

## 2.6.7 [テーマ番号 4 8] 「超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発 (FS 研究)」 (2017 年度)

### [テーマ番号 6 2] 「超高強度薄鋼板の水素脆化挙動評価技術の開発」 (2018 年度～2020 年度)

#### 2.6.7.1 テーマの概要

##### (1)背景と目的

鋼板の引張強度(TS)が 1180MPa を超えると自動車を使用される大気腐食環境でも、環境から鋼板中に侵入する水素により生じる遅れ破壊と呼ばれる水素割れが発生する可能性が生じる。自動車への TS1500MPa 級鋼適用には、水素割れ危険性を適切に評価、予測可能な技術が必要となる。水素割れ危険性評価に関する研究はボルト分野では種々あるが、塑性変形の影響を大きく受ける薄鋼板分野での検討は少なく、革新鋼板の水素割れ危険性の適切な評価、予測は現技術では困難である。そこで本研究では、革新鋼板の水素割れ危険性の適切な評価、予測を可能とする基本技術の開発を目的とする。

##### (2)目標値

###### 【中間目標 (2019 年度末)】

試験条件及び試験環境による応力、ひずみ及び水素分布の変化が高強度鋼板の水素脆化割れに及ぼす影響を明確化する。

###### 【最終目標 (2020 年度末)】

数百  $\mu$  m 以下のオーダーでマイクロな応力・歪・水素濃度分布を評価解析する技術を開発することで、革新鋼板の水素脆化割れ危険性を適切に評価する試験方法構築のための基本技術を確立する。

表 3-2.6.7-1 研究開発目標

研究開発項目	中間目標 (2019 年度末)	最終目標 (2020 年度末)	根拠
超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発	応力、ひずみ及び水素分布の変化が高強度鋼板の水素脆化割れに及ぼす影響を明確化	水素脆化による割れ発生の危険性を適切に評価・予測可能な基本技術の確立	革新鋼板の水素割れ評価に適用

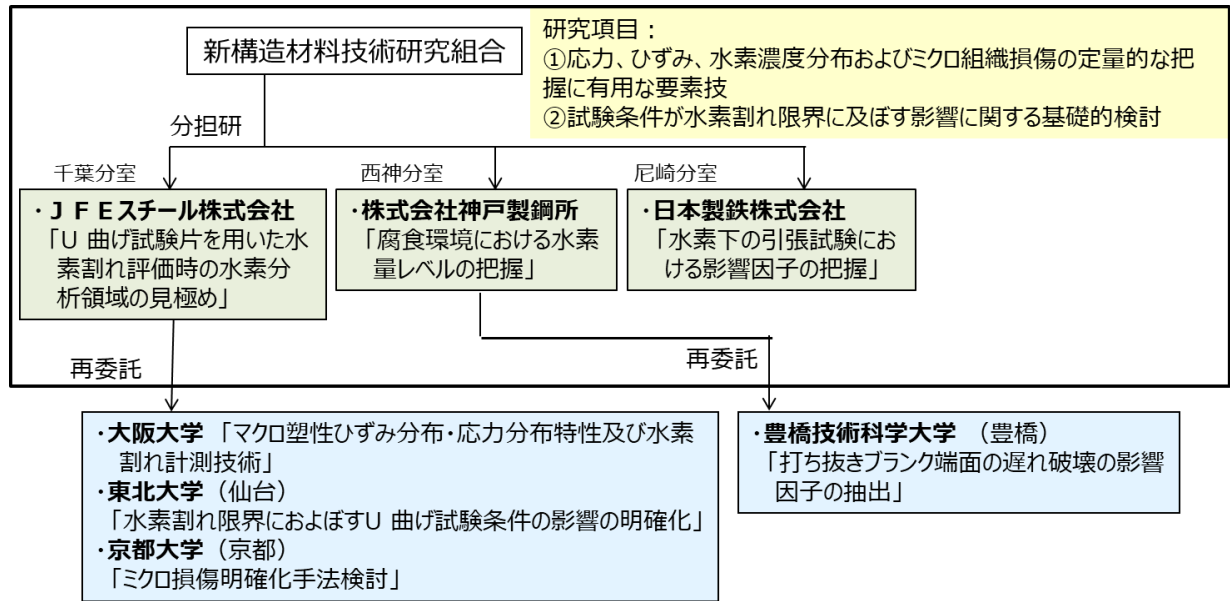
##### (3)全体計画

研究開発項目	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発		技術検討委員会	FS 研究(テーマ 48)			本研究(テーマ 62)		

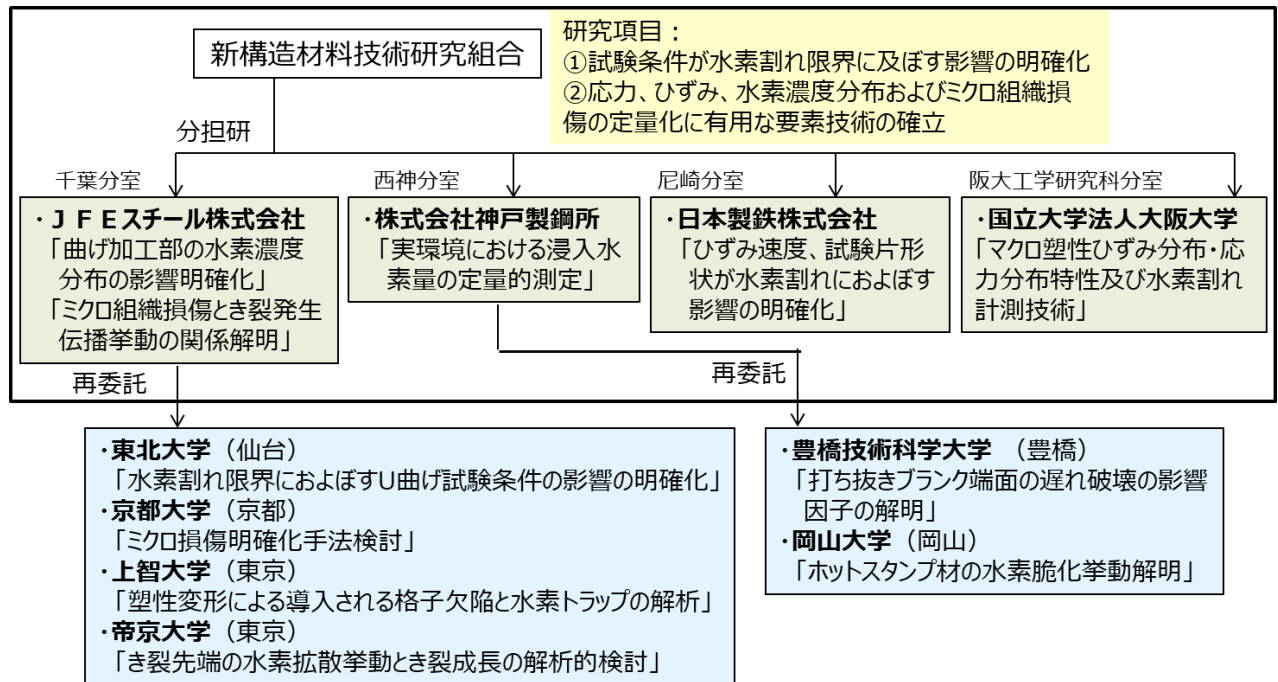
▲ : 基本原理確認、 ● : 基本技術確立

#### (4)実施体制

2017 年度



2018～2020 年度



#### (5)運営管理

実務者進捗会議を毎月開催し、再委託先との進捗会議を定期的を実施した。また、分担研及び再委託先の全体会議を2～3回／年開催した。

#### (6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度）

各社で進めている革新鋼板の水素割れ評価、予測に適用する。

## 2.6.7.2 研究開発成果

### (1)最終目標の達成度

表 3-2.6.7-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成度※	未達の場合 原因と解決方針
超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発	水素脆化による割れ発生の危険性を適切に評価・予測可能な要素技術の開発 (2020 年度)	数百 $\mu$ m 以下オーダーでの応力・歪・水素濃度分布評価技術開発	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

### (2)研究開発の成果と意義

TS1500MPa 級の「革新鋼板」実用化を目指し、超ハイテンで課題となる水素脆化感受性評価のために必要な要素技術開発を行い、以下の結果を得た。

**【課題①】試験条件及び試験環境による応力、ひずみ及び水素分布の変化が水素脆化割れに及ぼす影響の明確化**

**【千葉分室 JFE スチール】**

#### (1) 背景及び目的

水素割れ危険性の評価に関する研究はボルト分野では種々あるが、塑性変形の影響を大きく受ける薄鋼板分野での検討は少なく、革新鋼板の水素割れ危険性の適切な評価、予測は従来技術では困難であった。そこで、革新鋼板の水素脆化現象の適切な評価および理解に有効な実験法、解析法等の要素技術を検討するため、共通試料となる TS1500 MPa 級高強度薄鋼板を製造し各機関（分担研、再委託先）に配布した。共通試料を用い、試験条件が水素割れ限界に及ぼす影響に関する基礎的検討として、U 曲げ試験片を用いた水素割れ評価時の試験片内部の水素濃度分布を明らかにする技術を確立し、水素脆化割れにおよぼす U 曲げ試験片内部の水素濃度分布および応力、ひずみ分布の影響を明らかにすることを目的とした。

#### (2) 実験方法および結果

##### (2-1)共通試料の作製

本研究では、市販の SCM435 鋼を用いて TS1500MPa 級の共通試料を作製した。ミクロ組織の影響を評価するため、熱処理条件を変えてマルテンサイト鋼（M 鋼）とフェライトとマルテンサイトが混在する Dual phase 鋼（DP 鋼）の 2 鋼種をつくり分けた。市販の SCM435 の板厚と化学成分を表 2-3.6.7-3 に示す。板厚 6.0 mm の鋼板を先に使用していたが、材料が不足したため板厚 3.2 mm の鋼板を追加で準備して共通試料を作製した。

表 3-2.6.7-3 共通試料の板厚と化学成分

共通試料	板厚 (mm)	化学成分 (mass%)							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	O
SCM435 (6.0t)	6.0	0.37	0.30	0.71	0.008	0.0038	1.00	0.17	<0.001
SCM435 (3.2t)	3.2	0.37	0.20	0.65	0.020	0.0044	0.98	0.16	<0.001

(2-1-1) マルテンサイト鋼の作製

表 3-2.6.7-3 に示す鋼を 880℃で 30 min 保持した後、空冷する焼きならし処理を実施した。その後オーステナイト単相域である 900℃で 15 min 保持した後に油焼き入れをする焼入れ処理をし、次いで 400℃で 30 min 保持した後に水冷をする焼戻し処理をした。熱処理は全てソルトバスで行った。熱処理後の鋼板を板厚 1.6 mm に両面研削したものを共通試料 (M 鋼) とした。なお、M 鋼は主に板厚 6.0 mm の鋼板を用いて作製した。

(2-1-2) DP 鋼の作製

表 3-2.6.7-3 に示す鋼を 880℃で 30 min 保持した後、空冷する焼きならし処理を実施した。その後フェライトとオーステナイトの 2 相域である 770℃で 30 min 保持した後に油焼き入れをする焼入れ処理をし、次いで 200℃で 30 min 保持した後に水冷をする焼戻し処理をした。熱処理は全てソルトバスで行った。熱処理後の鋼板を板厚 1.6 mm に両面研削したものを共通試料 (DP 鋼) とした。なお、DP 鋼は主に板厚 3.2 mm の鋼板を用いて作製した。

(2-1-3) 共通試料のマイクロ組織と機械的性質

図 3-2.6.7-1 に M 鋼と DP 鋼のマイクロ組織を示す。マイクロ組織観察は、圧延方向断面 (TD 面)、板厚 1/4 部について行った。腐食液はナイトール液 (1%硝酸アルコール)

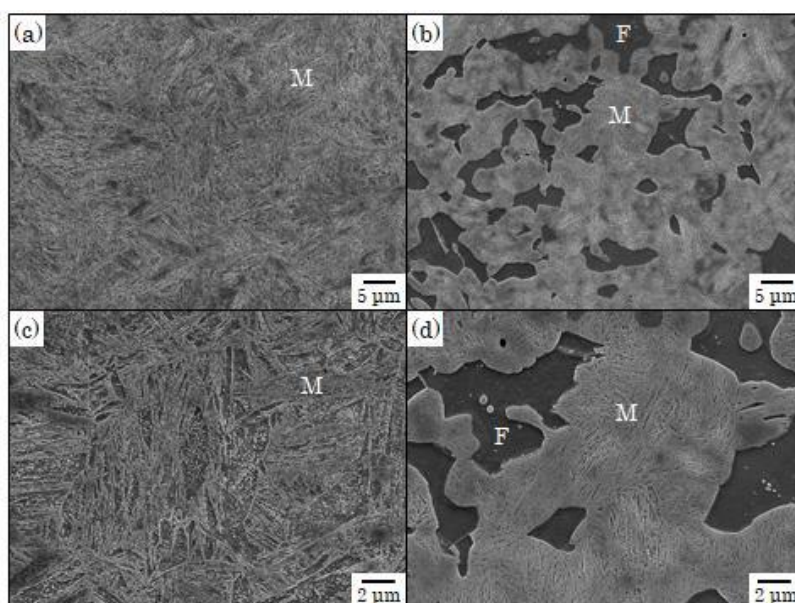


図 3-2.6.7-1 共通試料のマイクロ組織 (a, c) M 鋼, (b, d) DP 鋼.  
(F: フェライト, M: マルテンサイト)

ル溶液；HNO<sub>3</sub>, 1 cc + C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH, 99 cc の混合液) を用いてマイクロ組織を現出させ、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察した。M 鋼のマイクロ組織はラスマルテンサイトに炭化物が析出した焼戻しマルテンサイトであった。DP 鋼のマイクロ組織はフェライトとマルテンサイトの 2 種類の組織からなり、フェライトの面積率はおよそ 20% であった。表 3-2.6.7-4 に M 鋼と DP 鋼の機械的性質を示す。引張試験片は、圧延方向に JIS5 号試験片 (GL: 50 mm、W: 25 mm) を採取し、n = 2 で JIS Z 2241 に準拠し、ひずみ速度 10 mm/min で引張試験を実施した。いずれの鋼も引張強さ (TS) が 1500 MPa 級であり、DP 鋼は M 鋼と比較して降伏強さ (YS) が低く、全伸び (El) および均一伸び (U-El) が

高かった。図 3-2.6.7-2 に M 鋼と DP 鋼の代表的な応力歪線図を示す。限界 U 曲げ半径は、せん断により圧延方向を長手として 100 mm×35 mm の試験片を採取し、幅を 35 mm から 30 mm まで両面均等研削加工 (▽▽▽仕上げ) を施したサンプルを U 曲げ加工試験に供して測定した。U 曲げ加工試験は油圧式のプレス機を用い、パンチとダイのクリアランスは板厚と等しい 1.6 mm とした。

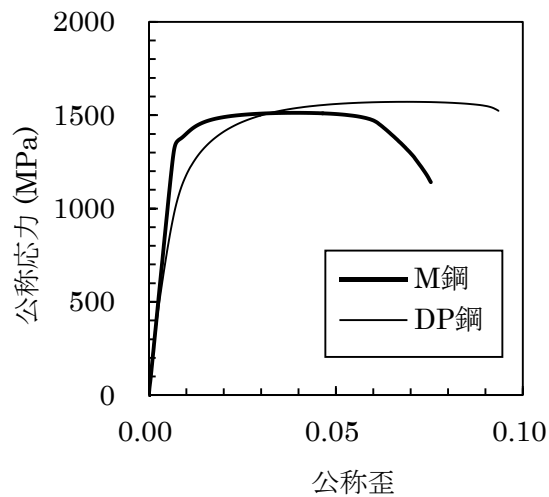


図 3-2.6.7-2 共通試料の代表的な応力歪線図

U 曲げ半径を 7.0 mm、8.0 mm、9.0 mm、10.0 mm と変化させて U 曲げ加工を行い、n = 3 で割れが生じなかった最小の曲げ半径を限界 U 曲げ半径とした。割れが発生しない限界 U 曲げ半径は M 鋼と DP 鋼でそれぞれ 8.0 mm、10.0 mm であった。

表 3-2.6.7-4 共通試料の機械的性質

共通試料	YS (MPa)	TS (MPa)	El (%)	U-El (%)	限界 U 曲げ半径 (mm)
M 鋼	1377	1508	7.4	4.0	8.0
DP 鋼	1007	1564	9.8	7.0	10.0

## (2-2) 水素割れ試験方法

本研究では、U 曲げ・ボルト締め法、定荷重試験法の 2 種の手法を用いて水素割れ試験を実施した。

### (2-2-1) U 曲げ・ボルト締め法

図 3-2.6.7-3 に U 曲げ試験片を用いた水素割れ試験片の作製手順を示す。M 鋼および DP 鋼から圧延方向を長手とする 110 mm×35 mm の短冊試験片を採取し、試験片長辺端面はせん断加工によるひずみの影響を除去するため、幅 30 mm まで片側 2.5 mm ずつ研削加工を施した。その後、M 鋼、DP 鋼ともに曲げ加工で割れが生じ

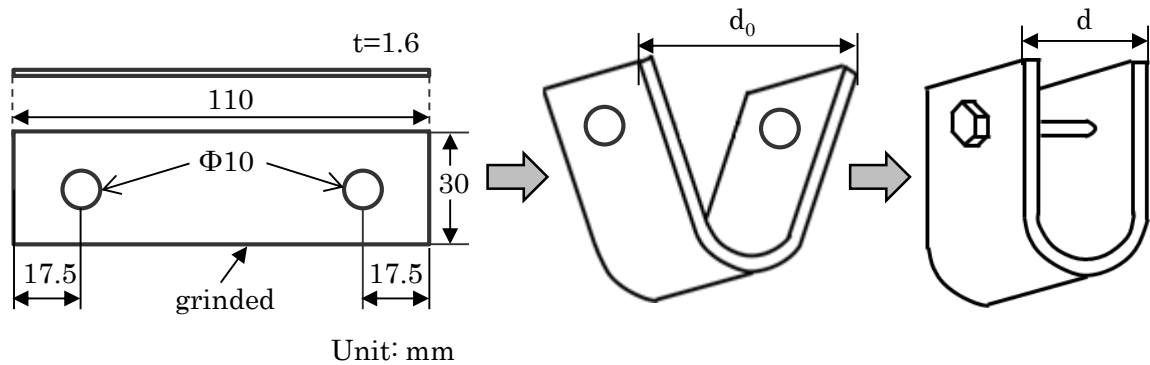


図 3-2.6.7-3 U 曲げ試験片を用いた水素割れ試験片の作製手順

ない U 曲げ半径 10 mm で U 曲げ加工をした。ひずみを与えてから水素割れ試験をするまでの時間の影響を無視できるようにするため、U 曲げ加工後に恒温炉を用いて 50℃で 96 h 保持した後に炉冷をする熱処理をした。その後、U 曲げ加工後の鋼板に対してボルトを締め付けることによって応力を負荷した。ボルト締込み量  $d_b$  を式(1-1-1)で定義をした。

$$d_b = d_0 - d \quad (1-1-1)$$

ここで、 $d_0$  は U 曲げ加工後のスプリングバックのままの足と足の距離であり、 $d$  はボルト締込み後の U 曲げ試験片の足と足の距離である。ボルト締込み量  $d_b$  を 0～27 mm と変化させることによって応力を変化させた。ひずみ、応力を負荷した試験片を、25℃の浸漬液に 96 h まで浸漬し、破壊発生時間を測定した。浸漬液としてチオシアン酸アンモニウム水溶液にマッキルベイン緩衝液  $\text{W}$  を 1:1 で混合したものを用いた。チオシアン酸アンモニウム ( $\text{NH}_4\text{SCN}$ ) 5 g、クエン酸 ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ) 98.4 g、リン酸水素二ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) 578.0 g を水 20 L に溶解させ、 $\text{NH}_4\text{SCN}$  の濃度を 0.05 mass%、溶液の pH が 6.0 になるように調製した。また、鋼中に侵入した水素量は、溶液浸漬後、割れが発生する U 曲げ頂点部から 5 mm の幅の分析用サンプルを切り出し、乾式研磨により表面が金属光沢となるまで研磨し、アセトンで超音波洗浄をしたのち、ガスクロマトグラフィーを利用した昇温分析装置（ジェイ・サイエンス・ラボ製 JTF-20AL）により、測定温度範囲：室温～300℃、昇温速度：200℃/h の条件で測定した。なお、水素チャージ終了後の試験片はただちに液体窒素中に保存し、液体窒素から取り出して分析開始までに要する時間は 20 min 以内とした。

#### (2-2-2) 定荷重試験法

水素割れ、水素侵入量におよぼすひずみの影響を調査するため、冷間圧延によってひずみを導入したサンプルを作製した。M 鋼、DP 鋼とする熱処理をした後の素材を板厚 2.8 mm に両面研削をした後に、冷間圧延によって圧下率 1～14%の圧延ひずみを与えた。その後、板厚 1.6 mm に両面研削をした後に、圧延方向を長手として図 3-2.6.7-4 に示す定荷重引張試験片を採取した。圧延ひずみを与えてから水素割れ試験

をするまでの時間の影響を無視できるようにするため、定荷重引張試験片に恒温炉を用いて 50℃で 96 h 保持した後に炉冷をする熱処理をした。その後、定荷重引張試験片の平行部を室温の浸漬液に浸漬させながら、定荷重試験機を用いて、定荷重引張試験片の平行部に 0~1400 MPa の応力を付与し、M 鋼は 96 h、DP 鋼は 24 h までの破壊発生時間を測定した。浸漬液は U 曲げ・ボルト締め法で使用したものと同様のものを使用した。また、鋼中に侵入した水素量は、定荷重試験後、平行部から 5 mm の幅の分析用サンプルを切り出し、乾式研磨により表面が金属光沢となるまで研磨し、アセトンで超音波洗浄をしたのち、ガスクロマトグラフィーを利用した昇温分析装置（ジェイ・サイエンス・ラボ製 JTF-20A）により、測定温度範囲：室温~400℃、昇温速度：200℃/h の条件で測定した。なお、水素チャージ終了後の試験片はただちに液体窒素中に保存し、液体窒素から取り出して分析開始までに要する時間は 20 min 以内とした。

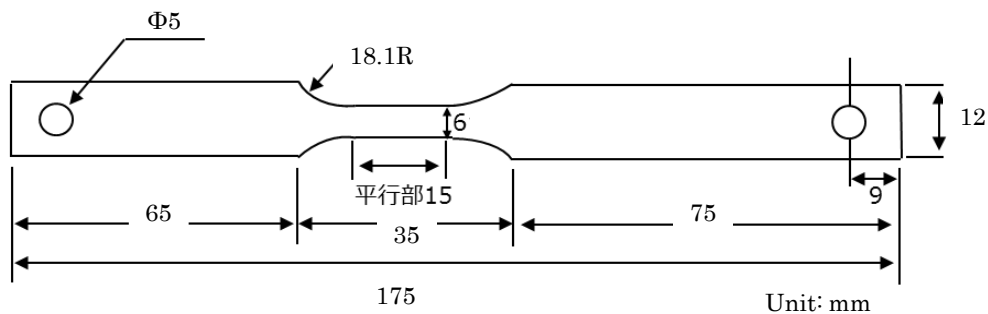


図 3-2.6.7-4 定荷重試験片寸法

(2-3) U 曲げ試験片内部の応力・ひずみ状態の FEM 解析

U 曲げ加工後、およびボルト締め後の U 曲げ試験片内部の応力・ひずみ状態を取得するため、有限要素法（FEM）を用いて解析した。

(2-3-1) FEM 解析条件 図 3-2.6.7-5 に示すような、U 曲げ試験片に対して U 曲げ加工、スプリングバック、締め込みを模擬したシミュレーションを実施した。U 曲げ後、スプリングバックした鋼板の残留応力と、ひずみを解析し、その後の締め付けにより付与される応力とひずみを解析した。解析には LS-DYNA を使用し、静的陰解法によ

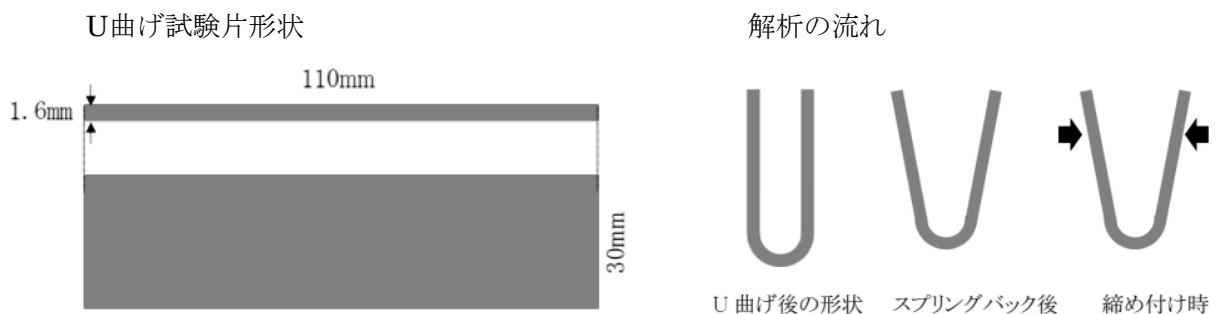


図 3-2.6.7-5 FEM 解析で用いた U 曲げ試験片形状と解析の流れ

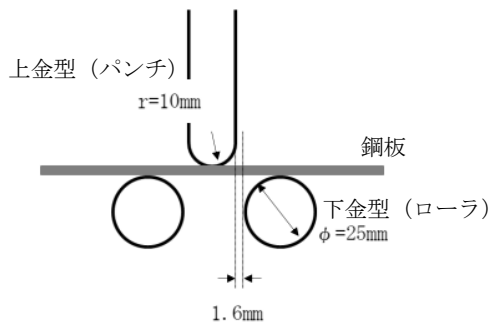


図 3-2.6.7-6 U 曲げ試験機寸法

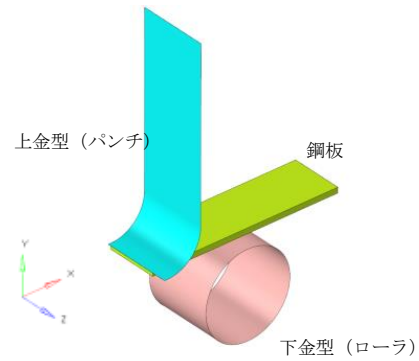


図 3-2.6.7-7 U 曲げ解析モデルの全体

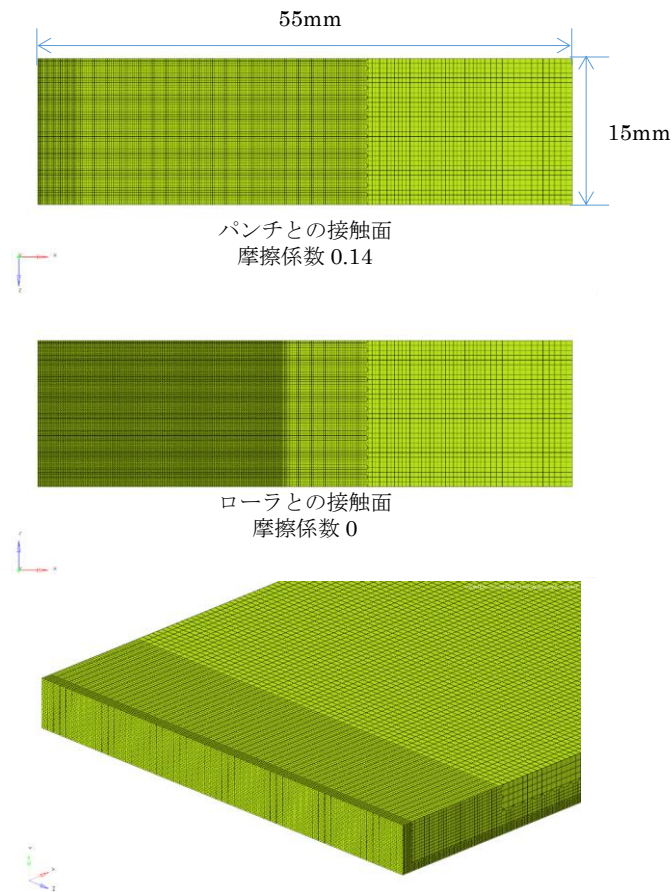


図 3-2.6.7-8 解析に使用した鋼板のメッシュ図および寸法

り解析を実施した。図 3-2.6.7-6 に示す寸法の上金型（パンチ）と下金型（ローラ）を有する U 曲げ試験機、および鋼板を解析対象とした。解析モデルは、対称性を考慮し、1/4 モデルとした。

図 3-2.6.7-7 に解析モデルの全体図を示す。図 3-2.6.7-8 に解析に使用した鋼板のメッシュ図、および寸法を示す。鋼板の要素数：324、480、節点数：355、327 のモデルである。また、板厚方向の最小メッシュは 0.05 mm、板幅方向の最小メッシュは 0.25 mm である。



### (2-3-2) 境界条件

鋼板に付与する境界条件を、  
図 3-2.6.7-9 に示す。鋼板の長  
手方向中心を x 方向の変位を拘  
束し、板幅方向中心を z 方向の  
変位を拘束した。

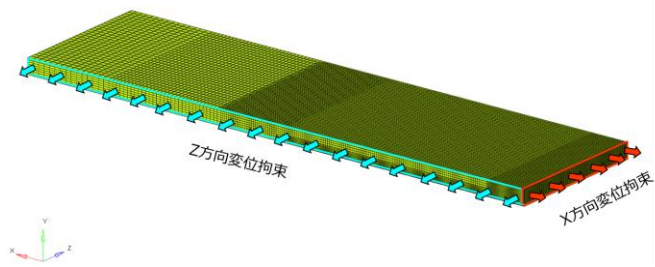


図 3-2.6.7-9 鋼板に付与した境界条件

### (2-3-3) 物性条件

解析に使用した鋼板の物性条  
件を表 3-2.6.7-3 および図 3-  
2.6.7-10 に示す。応力歪線図は、低いひずみ域は実験値を用い、それ以上は次の  
Swift の式を用いた。

$$\sigma = a(b + \varepsilon_p)^N \quad (1-1-2)$$

ここで  $\sigma$  は相当応力、 $a$ 、 $b$  および  $N$  は材料定数であり、 $\varepsilon_p$  は相当ひずみを示す。図  
3-2.6.7-10 の赤い曲線が実験値であり、青い曲線が式(1-1-2)により算出した区間であ  
る。M 鋼および DP 鋼の 2 種類の物性条件で解析を行った。なお、パンチとローラは  
剛体として解析をした。

表 3-2.6.7-3 鋼板の物性条件

鋼	ヤング率 (GPa)	ポアソン 比	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	式(1-1-2)の材料定数		
				a	b	N
M 鋼	205	0.3	7800	1797	0.00282	0.0392
DP 鋼	205	0.3	7800	2077	0.09027	0.1124

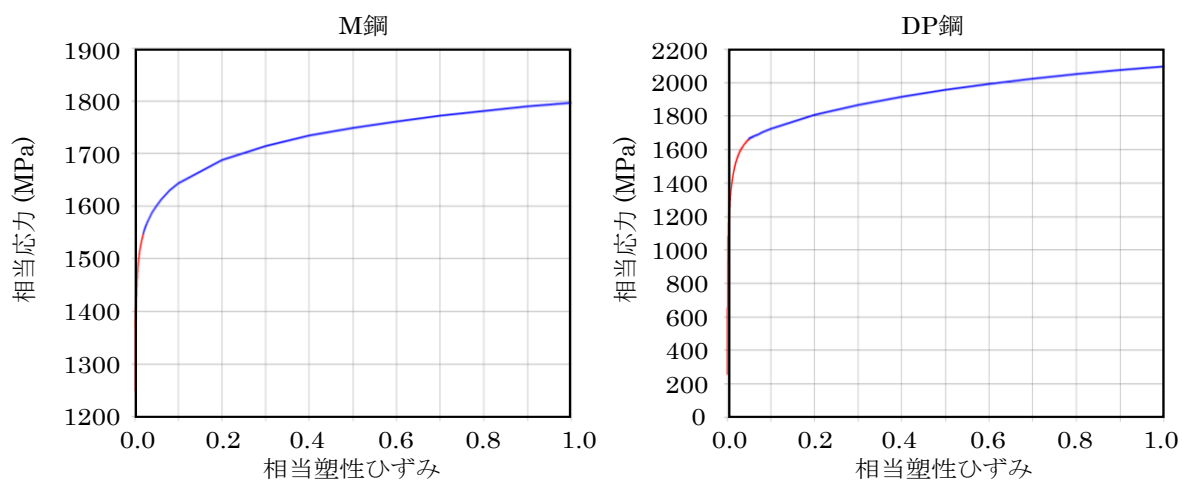


図 3-2.6.7-10 解析に使用した応力歪線図

#### (2-3-4) その他解析条件

前述のように、本解析では U 曲げ解析→スプリングバック解析→締め込み解析の順で実施した。U 曲げ解析では、パンチ降下速度：60 mm/min、鋼板／パンチの摩擦係数：0.14、鋼板／ローラの摩擦係数：0 として鋼板がローラから離れるまでを解析した。スプリングバック解析では、U 曲げ後の鋼板のスプリングバック解析を実施した。締め込み解析では、図 3-2.6.7-11 に示すように、ボルトが貫通する位置に強制変位を与え、鋼板の足と足が接触するまで解析を実施した。

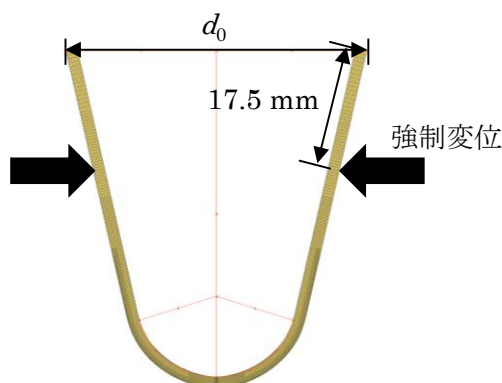


図 3-2.6.7-11 締め込み解析での締め込み位置

#### (2-3-5) U 曲げ試験片内部の応力・ひずみの状態

図 3-2.6.7-12、3-2.6.7-13 に M 鋼および DP 鋼のスプリングバック後の曲げ頂点からの板厚方向位置における曲げ方向応力と相当ひずみをそれぞれ示す。曲げ方向応力は曲げ頂点部で圧縮を示し、板厚中心にむかって応力が増加し、曲げ頂点部から約

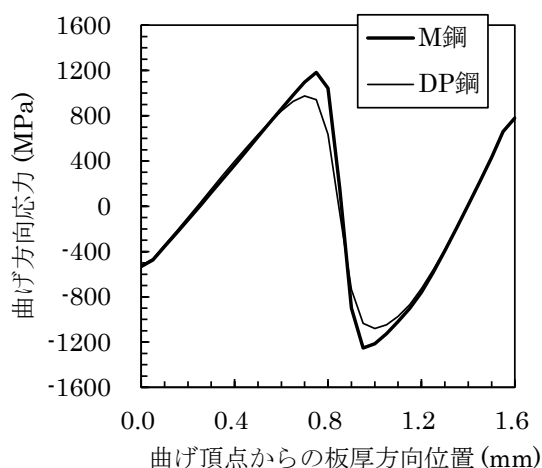


図 3-2.6.7-12 曲げ頂点部の板厚方向位置における曲げ方向応力分布

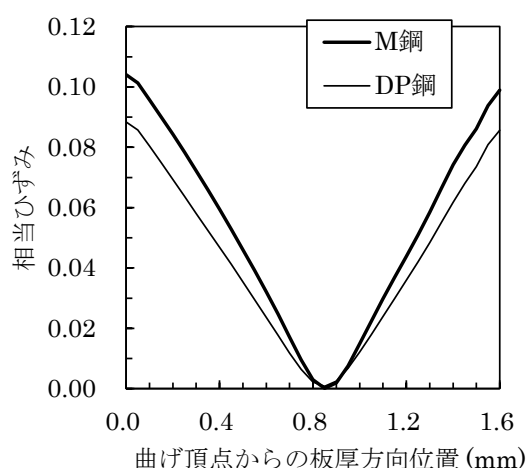


図 3-2.6.7-13 曲げ頂点部の板厚方向位置における相当ひずみ分布

0.8 mm 位置で極大値を取りその後減少し、約 0.9 mm 位置で極小値を取り、その後増加し鋼板の裏側では引張の応力を示した。スプリングバックの影響で複雑な応力状態となっていることが分かる。DP 鋼と比較して M 鋼の方が板厚中心部の応力が高い結果であった。これは M 鋼が DP 鋼と比較して降伏応力が高いためである。相当ひずみは曲げ頂点部および裏側が高く、板厚中心に向かうにしたがって線形的に低下し、板厚中心付近では 0 となる。DP 鋼と比較して、M 鋼の方が全体的に高いひずみとなる結果となり、曲げ頂点部の相当ひずみは、M 鋼と DP 鋼でそれぞれ 0.104 と 0.088 であった。曲げ加工によって導入される曲げ頂点部の相当ひずみは次式によって簡易的に計算することができる<sup>2)</sup>。

$$\varepsilon_p = \frac{t}{2R+t} \times \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (1-1-3)$$

ここで、 $t$  は供試鋼の板厚 (1.6 mm)、 $R$  は曲げ内側の曲率半径 (10 mm) である。この式によれば、今回の実験の曲げ頂点部の相当ひずみは 0.086 となり、FEM で計算した DP 鋼の相当ひずみと近い値となる。M 鋼は式 (1-1-3) で計算すると曲げ R8 mm 相当の曲げ加工を受けており、R10 mm のパンチよりも小さい  $R$  で曲げられている。M 鋼は降伏応力が高く、加工硬化率が低いため、U 曲げ加工の途中でパンチの形状通りに鋼板が変形せず、曲げ頂点部で鋼板が金型から離れる現象が起きたと考えられる。

図 3-2.6.7-14、3-2.6.7-15、3-2.6.7-16 に M 鋼と DP 鋼のスプリングバック後のボルト締め時の縮込み量を変化させたときの曲げ頂点からの板厚方向位置における曲げ方向応力と相当ひずみをそれぞれ示す。いずれの鋼も、縮込み量が増加するにしたがい、曲げ表面の応力が上昇し、裏面の応力が低下した。また、いずれの鋼も縮込み量が 20 mm 以下では最もひずみが高い曲げ表面よりも板厚中央部の方が常に応力が高い状態であることが分かった。縮込み量が 25 mm までは相当ひずみに変化は無く、曲げ部が弾性変形していることが分かるが、縮込み量が 27 mm となるといずれの鋼も表面の相当ひずみが増加し、塑性変形が生じていることが分かった。

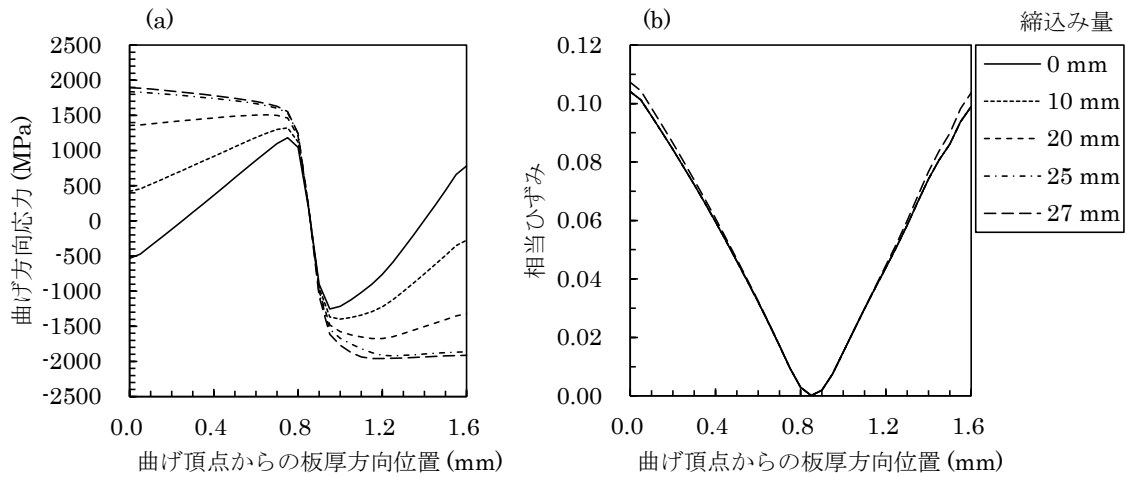


図 3-2.6.7-14 M 鋼の曲げ頂点部の板厚方向位置における(a)曲げ方向応力分布, (b)相当ひずみ分布と締込み量の関係

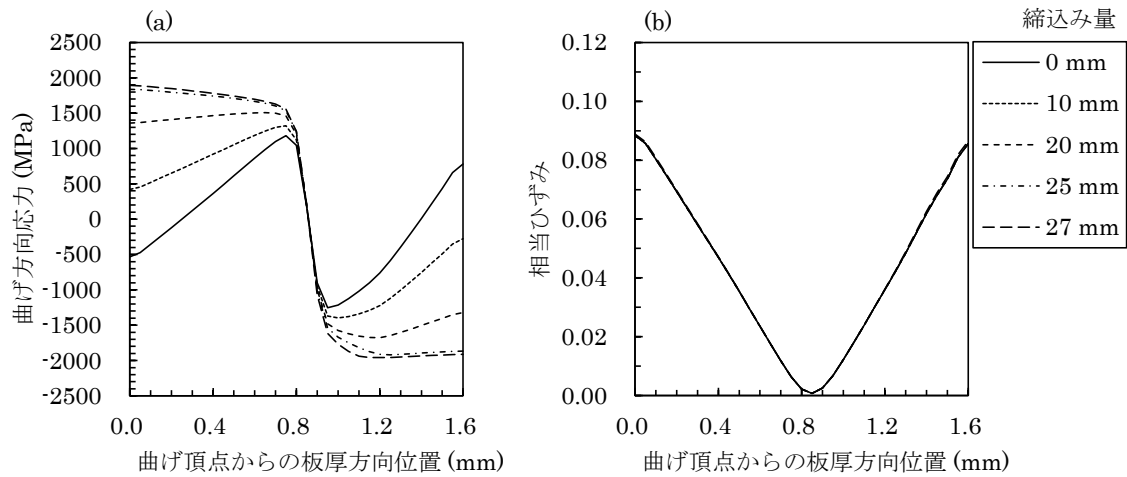


図 3-2.6.7-15 DP 鋼の曲げ頂点部の板厚方向位置における(a)曲げ方向応力分布, (b)相当ひずみ分布と締込み量の関係

図 3-2.6.7-17 に M 鋼と DP 鋼の締込み量と頂点の曲げ方向応力と相当ひずみの関係を示す。いずれの鋼もスプリングバック後は頂点に $-500$  MPa 程度の応力がかかっており、締込み量の増加に曲げ方向応力が線形に増加し、塑性変形が生じると応力の増加量が減少する傾向であった。応力の増加量は、いずれの鋼も締込み量  $1$  mm あたり約  $94$  MPa であった。

図 3-2.6.7-18 に締込み量と U 曲げ試験片全厚で最も曲げ方向応力が高い値と、その位置の相当ひずみを示す。M 鋼は DP 鋼

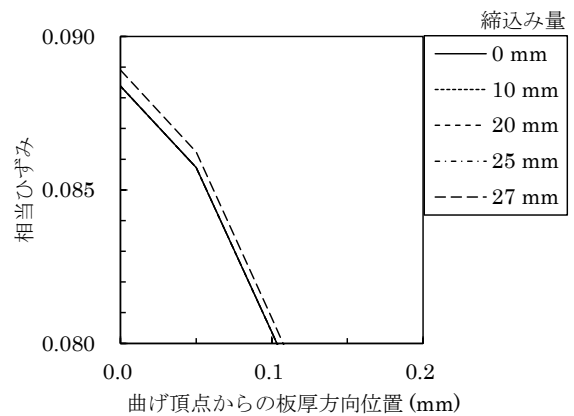


図 3-2.6.7-16 DP 鋼の曲げ頂点部の板厚方向位置における相当ひずみ分布と締込み量の関係 (拡大)

よりも降伏応力が高いため、スプリングバック後に板厚中央部に高い残留応力が生じており、最大応力が DP 鋼よりも締込み量 25 mm までは常に高いことが分かる。締込み量の増加にともない、応力最大箇所の相当ひずみが増加しており、これは応力最大箇所が曲げ頂点部に徐々に移動していることを示している。締込み量が 25 mm 以上となると応力最大箇所は曲げ頂点となる。

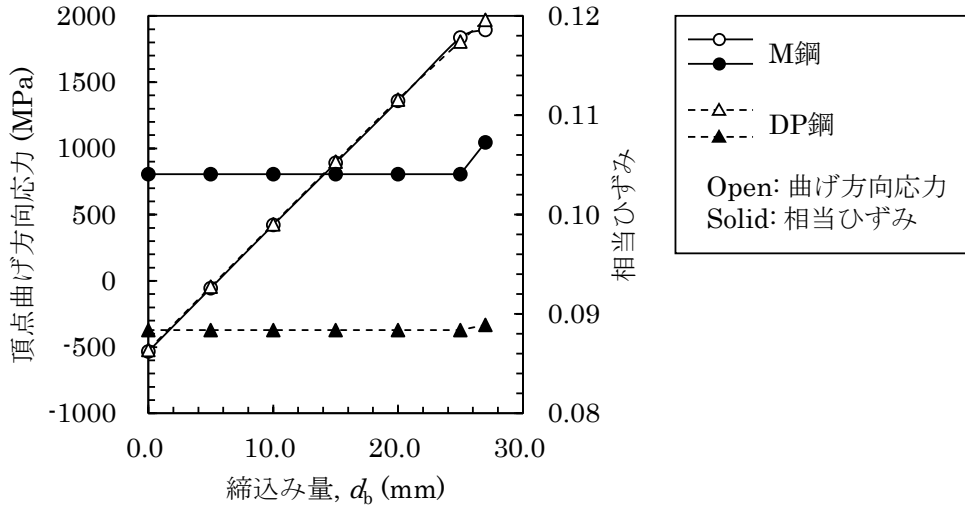


図 3-2.6.7-17 ボルト締込み量と表面曲げ方向応力，表面相当ひずみの関係

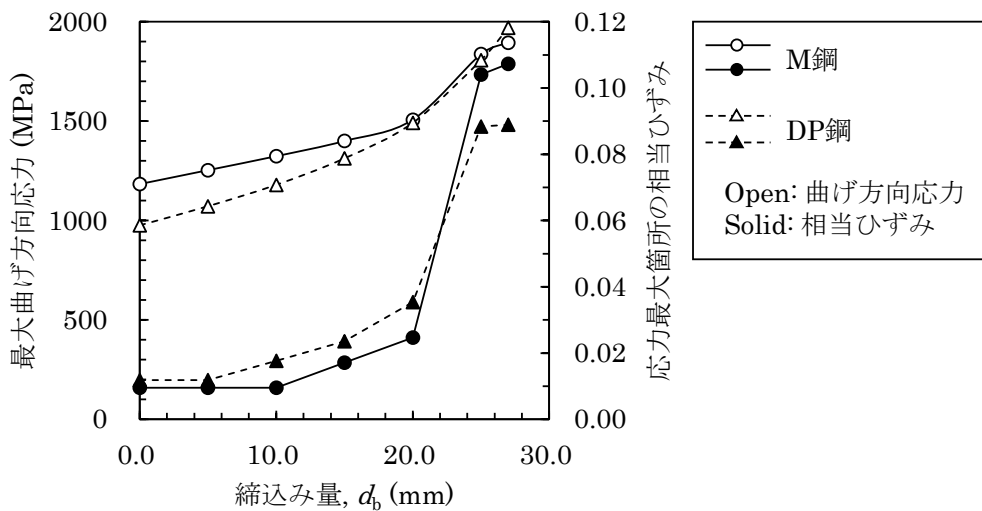


図 3-2.6.7-18 ボルト締込み量と最大曲げ方向応力およびその位置の相当ひずみの関係

#### (2-4) 水素割れ実験結果

##### (2-4-1) U 曲げ・ボルト締めによる水素割れにおよぼす応力の影響

図 3-2.6.7-19、3-2.6.7-20 にボルト締込み量を 5~27 mm とした M 鋼と DP 鋼の U 曲げ試験片を浸漬液に浸漬したときの破壊時間と表面の曲げ方向応力、試験片全厚での最大曲げ方向応力との関係をそれぞれ示す。水素割れが生じなかった U 曲げ表面の

限界曲げ方向応力は、M 鋼と DP 鋼でそれぞれ 890 MPa、666 MPa であった。また、水素割れが生じなかった試験片全厚での限界最大曲げ方向応力は、M 鋼と DP 鋼でそれぞれ 1400 MPa、1243 MPa であり、M 鋼の方が水素割れが生じにくい結果となった。いずれの鋼も応力が大きくなるにつれて破壊時間が短時間化するが、M 鋼では約 1800 MPa 以上の応力で破壊時間が長時間化する傾向が認められた。この理由については (2-4-3) 節で考察する。

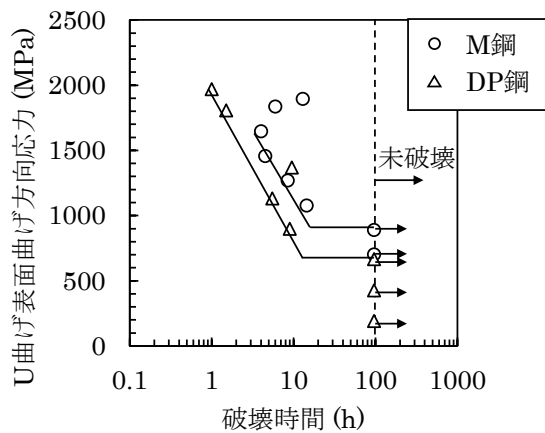


図 3-2.6.7-19 U 曲げ水素割れ試験片の浸漬液へ浸漬後の破壊時間と頂点曲げ方向応力の影響

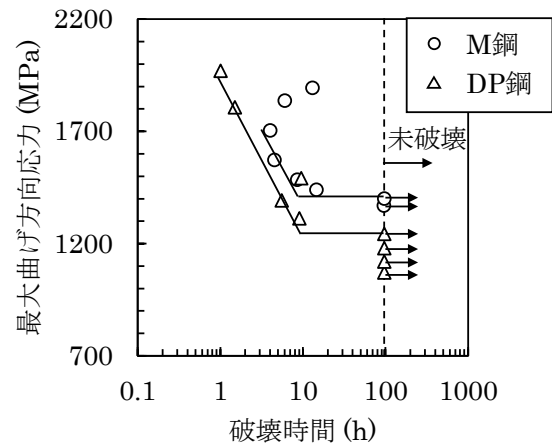


図 3-2.6.7-20 U 曲げ水素割れ試験片の浸漬液へ浸漬後の破壊時間と最大曲げ方向応力の影響

#### (2-4-2) U 曲げ試験片中の侵入水素量におよぼす浸漬時間と締め込みの影響

図 3-2.6.7-21 に U 曲げスプリングバック後の M 鋼の U 曲げ試験片を浸漬液に 24 h 浸漬した試験片と U 曲げスプリング後と 10 mm ボルト締め込み後の DP 鋼の U 曲げ試験片を浸漬液に 6 h および 24 h 浸漬した試験片の U 曲げ頂点部から採取したサンプルの水素放出曲線を示す。M 鋼には DP 鋼と比較してより多くの水素が侵入していた。また、DP 鋼では、U 曲げ試験片の締め込みの有無による侵入水素量の変化は認められなかった。一般に、200℃以下で放出される水素は水素脆化に影響をおよぼす拡散性水素と考えられていることから<sup>3-5)</sup>、本研究では、室温から 200℃までの積算値を拡散性水素量とした。

図 3-2.6.7-22 に U 曲げスプリングバック後の M 鋼の U 曲げ試験片と U 曲げスプリング後と 10 mm ボルト締め込み後の DP 鋼の U 曲げ試験片を浸漬液に浸漬したときの、U 曲げ頂点部に侵入した拡散性水素量と浸漬時間の関係を示す。いずれの鋼も浸漬時間 24 h で拡散性水素量が最も高く、それ以降は減少する傾向であった。図 3-2.6.7-23 に U 曲げスプリングバック後の M 鋼の U 曲げ試験片を浸漬液に 0~96 h 浸漬後の外観を示す。時間の経過とともに表面に腐食生成物が生じており、表面状態が変化することにより、水素侵入に影響をしたものと推定している。前節の U 曲げ・ボルト締めによる水素割れは全て浸漬開始から 14.5 h 以内に割れが発生しており、侵入水素量のピークは 10~15 h にあると考えられる。

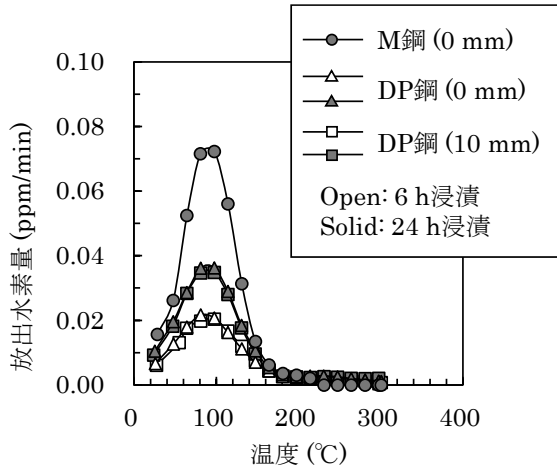


図 3-2.6.7-21 U 曲げ水素割れ試験片の浸漬液へ浸漬後の水素放出曲線

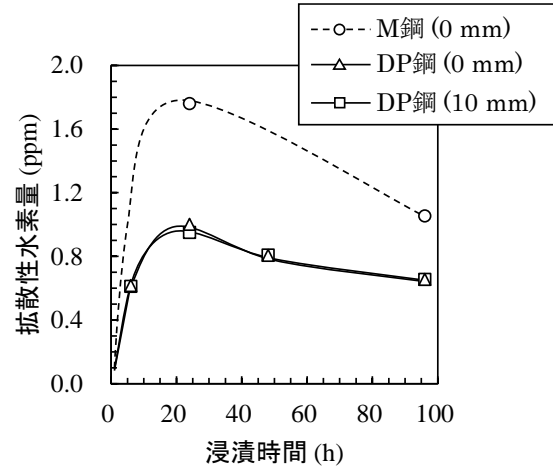


図 3-2.6.7-22 浸漬液への浸漬時間と U 曲げ水素割れ試験片の拡散性水素量との関係

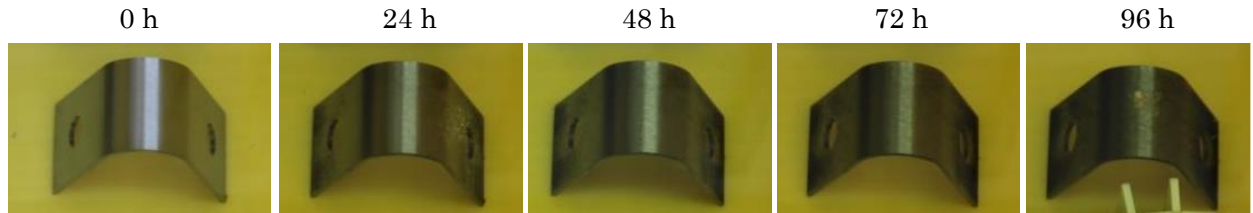


図 3-2.6.7-23 U 曲げスプリングバック後の M 鋼の U 曲げ試験片を浸漬液に 0~96 h 浸漬後の外観写真

侵入水素量がボルト締込みの影響を受けなかった理由は、本研究の水素分析値が板厚全厚の平均値であるためと考えられる。図 3-2.6.7-24 にボルト締込み量と FEM で計算した U 曲げ頂点部全厚の応力の積分値との関係を示す。締込み量の増加にともない応力の積分値は増加する傾向にあるが、その増加量は締込み量 1 mm あたり約 3 MPa であり、その増加量は表面の応力増加量と比較して約 1/30 と小さい。このため、スプリングバック後と 10 mm ボルト締込み後の U 曲げ試験片の浸漬液に浸漬後の侵入水素量に変化が無かったと考えられる。

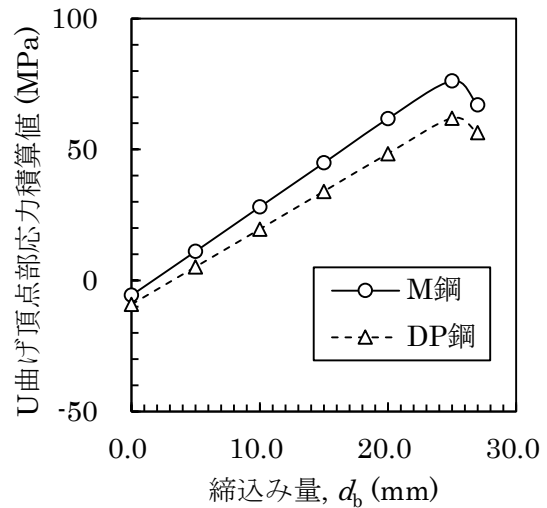


図 3-2.6.7-24 ボルト締込み量と U 曲げ頂点部の板厚全厚の応力積分値との関係

(2-4-3) 定荷重試験における水素割れにおよぼす応力、ひずみの影響

図 3-2.6.7-25 に冷間圧延によって相当ひずみ 0.017、0.090、0.18 付与した M 鋼および冷間圧延をしていない M 鋼（相当ひずみ 0.00）の定荷重試験片を浸漬液に浸漬したときの破壊時間と負荷応力との関係を示す。相当ひずみが高い試験片ほど、水素割れの発生が長時間化する傾向にあることが分かった。相当ひずみ 0.18 付与した試験片においては、1400 MPa の負荷応力でも水素割れの発生は生じなかった。

図 3-2.6.7-26 に冷間圧延によって相当ひずみ 0.010、0.087、0.144 付与した DP 鋼および冷間圧延をしていない DP 鋼（相当ひずみ 0.00）の定荷重試験片を浸漬液に浸漬したときの破壊時間と負荷応力との関係を示す。相当ひずみが高いほど、水素割れ発生時間が短時間化し、割れ発生負荷応力も低下する傾向であり、M 鋼とは逆の傾向を示した。

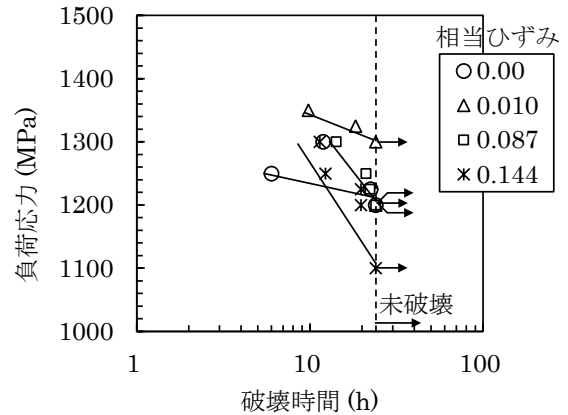
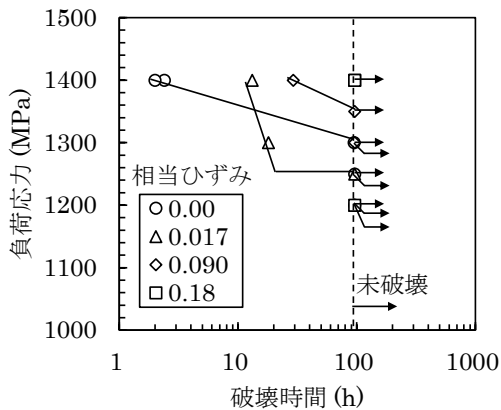


図 3-2.6.7-25 M 鋼の定荷重試験片の浸漬液への浸漬後の破壊時間への負荷応力と相当ひずみの影響

図 3-2.6.7-26 DP 鋼の定荷重試験片の浸漬液への浸漬後の破壊時間への負荷応力と相当ひずみの影響

図 3-2.6.7-27 に相当ひずみと水素割れが発生しない限界の負荷応力との関係を示す。M 鋼は相当ひずみ 0.017 で極小をとり、相当ひずみが高いほど割れ限界の負荷応力が高くなり、DP 鋼は逆に相当ひずみ 0.010 で極大をとり、相当ひずみが高いほど割れ限界の負荷応力が低くなる傾向であった。(2-4-1)節において、U 曲げボルト締込み後の M 鋼の U 曲げ試験片が 1800 MPa 以上の負荷応力のときに割れ発生時間が長時間化する傾向があった。これは、応力最大箇所が U 曲げ試験片の板厚中央のひずみが低い箇所から U 曲げ表面のひずみが高い箇所に移ったからであると考えられる。(2-3-5)の図 3-2.6.7-18 に示した U

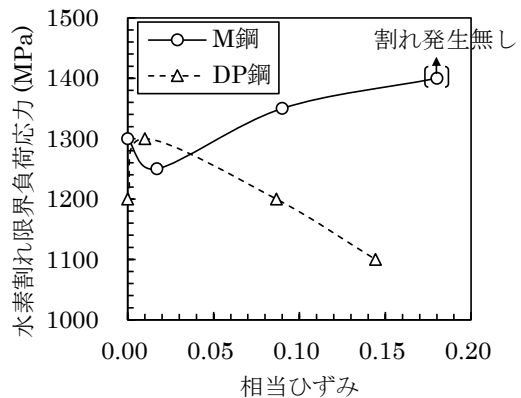


図 3-2.6.7-27 定荷重試験片の水素割れ発生限界負荷応力と相当ひずみの関係



曲げ試験片のボルト締込み量と最大曲げ方向応力とその位置における相当ひずみの関係では、曲げ方向応力が 1800 MPa 以上となるとその位置の相当ひずみは 0.10 を超える。定荷重試験において、M 鋼はひずみが高いほど水素割れ発生限界応力が高くなり、また水素割れ発生時間が長時間化した。U 曲げボルト締込み試験片においても、同様の現象が起きたと考えられる。

(2-4-4) 定荷重試験片中の侵入水素量におよぼす応力、ひずみの影響

図 3-2.6.7-28、3-2.6.7-29 に M 鋼と DP 鋼の定荷重試験片を 0~1200 MPa の負荷応力をかけながら浸漬液に 24 h 浸漬した後に定荷重試験片の平行部に侵入した拡散性と相当ひずみおよび負荷応力の関係を示す。いずれの鋼も負荷応力と拡散性水素量には線形な関係が認められた。図 3-2.6.7-30 に M 鋼、DP 鋼の負荷応力 0 MPa のときの相当ひずみと拡散性水素量の関係を示す。相当ひずみと拡散性水素量には対数関係が認められ、M 鋼と DP 鋼の拡散性水素量と相当ひずみの関係はそれぞれ次式で表すことができる。

$$H_M = 0.23 \ln(\varepsilon) + 2.43 \quad (1-1-4)$$

$$H_{DP} = 0.17 \ln(\varepsilon) + 1.98 \quad (1-1-5)$$

ここで  $H_M$ 、 $H_{DP}$  はそれぞれ M 鋼、DP 鋼の拡散性水素量 (ppm)、 $\varepsilon$  は相当ひずみである。上記式(1-1-4)、式(1-1-5)は相当ひずみのみを考慮した関係式だが、応力と拡散性水素量が線形関係であると仮定して、さらに応力の影響を考慮することで以下の式で表すことができる。

$$H_M = 0.213 \ln(\varepsilon) + 0.185\sigma + 2.28 \quad (1-1-6)$$

$$H_{DP} = 0.152 \ln(\varepsilon) + 0.220\sigma + 1.89 \quad (1-1-7)$$

ここで  $\sigma$  は負荷応力 (GPa) である。ただし、これらの関係式は本研究で用いた浸漬液に 24 h 浸漬して鋼に水素チャージをした場合にのみ適用できる。他の条件で水素を鋼にチャージする場合は、条件毎に本研究で実施した手法で実験をする必要がある。

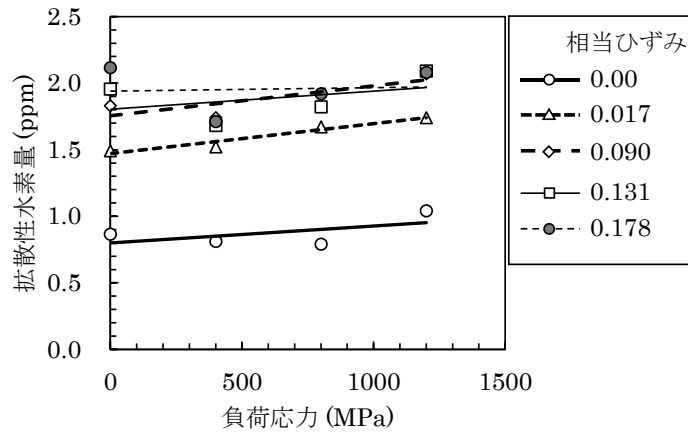


図 3-2.6.7-28 M 鋼の定荷重試験片を浸漬液に 24 h 浸漬後の負荷応力と相当ひずみの拡散性水素量への影響

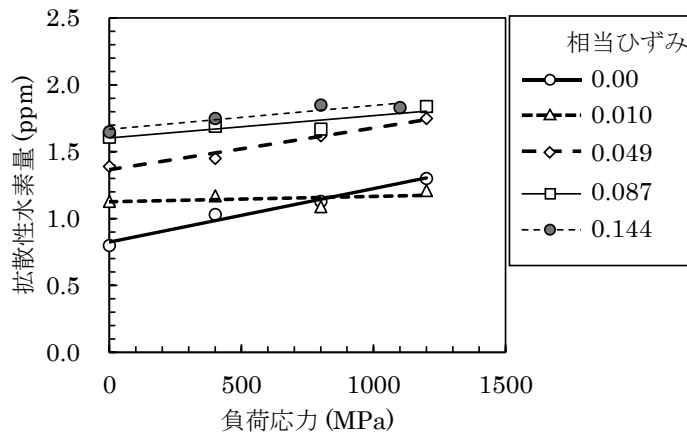


図 3-2.6.7-29 DP 鋼の定荷重試験片を浸漬液に 24 h 浸漬後の負荷応力と相当ひずみの拡散性水素量への影響

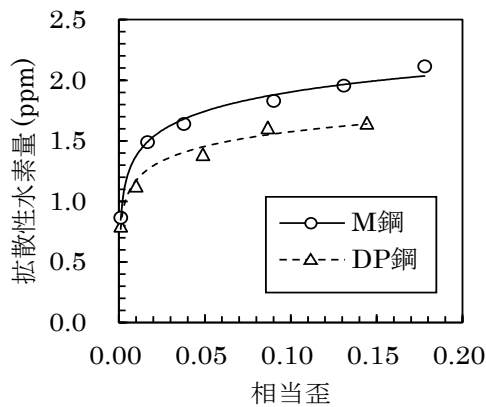


図 3-2.6.7-30 定荷重試験片を浸漬液に 24 h 浸漬後の相当ひずみと拡散性水素量との関係 (負荷応力 0 MPa)

## (2-5) U 曲げ試験片の曲げ加工部の水素濃度分布および割れ発生危険箇所

### (2-5-1) U 曲げ試験片の曲げ加工部の水素濃度分布

図 3-2.6.7-31 に式(1-1-6)を用いて計算した M 鋼の板厚全厚の拡散性水素濃度分布と U 曲げ締込み量の関係を示す。応力が高いほど、また相当ひずみが高いほど拡散性水素量は多くなるため、締込み量 0 mm では U 曲げ後のスプリングバックによって引張の残留応力が生じている鋼板の裏面が最も水素量が多い。また、応力、相当ひずみともに低い板厚の中央部が最も水素量が少ない。締込み量が増えると鋼板表面の水素量が増えていく一方で裏面の水素量は減少していく。締込み量 25 mm までは塑性変形が生じず相当ひずみは一定であることから、締込み量 25 mm までの水素量の変化は締込みによる応力の変化に対応している。

図 3-2.6.7-32 に式(1-1-7)を用いて計算した DP 鋼の板厚全厚の拡散性水素濃度分布と U 曲げ締込み量の関係を示す。水素濃度分布は M 鋼と同様の傾向を示しており、M 鋼と比較して水素量が全体的に低い結果であった。

計算した拡散性水素量の精度を検証するため、U 曲げ試験片を浸漬液に 24 h 浸漬後に U 曲げ頂点部からサンプルを採取して測定した拡散性水素量との比較をした。図 3-2.6.7-33 に計算した M 鋼、DP 鋼の板厚全厚の平均拡散性水素量と、実際に浸漬液に 24 h 浸漬後の U 曲げ頂点部からサンプルを採取して測定した拡散性水素量と締込み量の関係を示す。拡散性水素量の計算値と実測値には約 0.2 ~ 0.3 ppm の誤差があるものの、締込み量によって板厚全厚の平均拡散性水素量が増える傾向を計算により再現できた。今回、拡散性水素量におよぼす応力の影響を定荷重試験によって測定しているため引張の応力の影響しか測定できていない。計算の精度を高めるためには、圧縮の応力の影響も評価できるようにする必要があると考える。

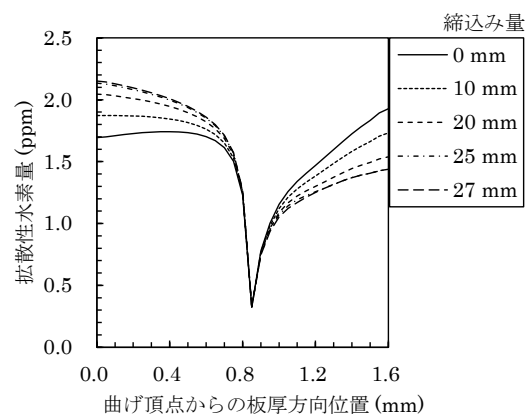


図 3-2.6.7-31 U 曲げ試験片のボルト締込み量と式(1-1-6)を用いて計算した M 鋼の板厚全厚の拡散性水素濃度分布の関係

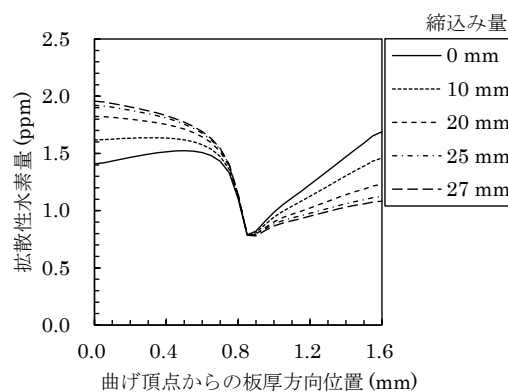


図 3-2.6.7-32 U 曲げ試験片のボルト締込み量と式(1-1-7)を用いて計算した DP 鋼の板厚全厚の拡散性水素濃度分布の関係

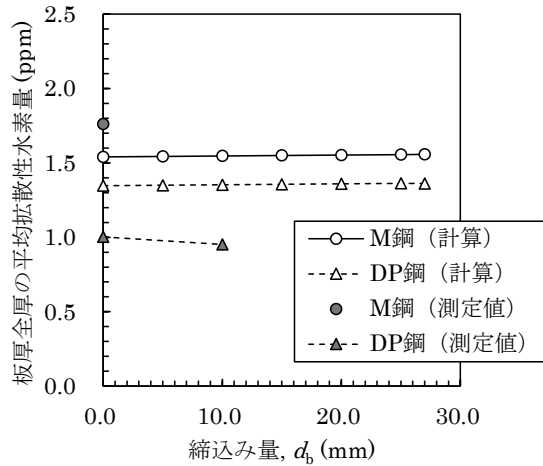


図 3-2.6.7-33 U 曲げ水素割れ試験片の浸漬液へ 24 h 浸漬後の板厚全厚の拡散性水素量と締込み量の関係

(2-5-2) U 曲げ試験片の水素割れ発生危険箇所

U 曲げ・ボルト締めによる水素割れの評価では、M 鋼はボルト締込み量 17 mm、DP 鋼はボルト締込み量 15 mm で割れが発生した。図 3-2.6.7-34 に M 鋼のボルト締込み量 17 mm のときの曲げ頂点部の板厚方向位置における曲げ方向応力、式(1-1-6)を用いて計算した拡散性水素量および定荷重試験で水素割れが発生した応力を示す。なお、ボルト締込み量 17 mm では締込みによる塑性変形は生じていないので、相当ひずみ分布は図 3-2.6.7-13 と同じである。定荷重試験は冷間圧延により種々の相当ひずみを付与して割れ発生応力を測定しており、割れ発生位置は相当ひずみと対応させている。ボルト締込み量 17 mm では、U 曲げ試験片の板厚中央部が最も応力が高く、その位置では定荷重試験で測定した水素割れ発生応力を超えていることが分かる。図 3-2.6.7-35 にボルト締込み量 17 mm で水素割れが発生した試験片の曲げ部からサンプルを採取した断面の SEM 像を示す。水素割れ破面から約 1.6 mm 離れた板厚中央部に内部割れが観察された。また、この内部割れは曲げ部に周期的に存在していた。

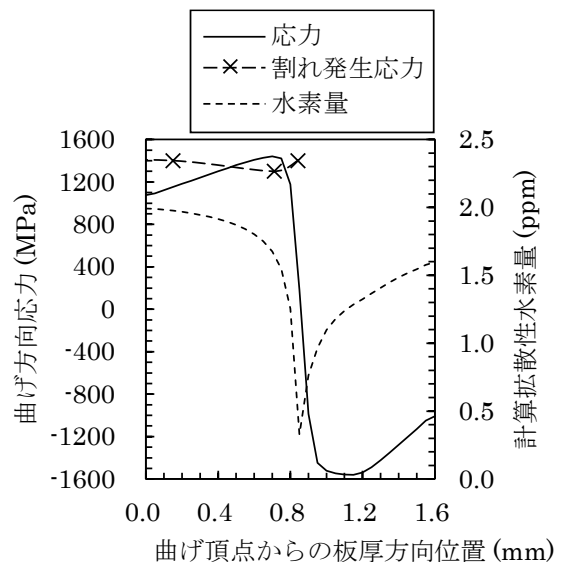


図 3-2.6.7-34 U 曲げ水素割れ試験で水素割れが発生した締込み量 17 mm のときの M 鋼の U 曲げ頂点部の板厚方向曲げ方向応力分布と計算拡散性水素濃度分布および定荷重水素割れ試験において水素割れが発生した応力

板厚内部で割れ発生応力を超えた位置でまず割れが発生し、そのき裂先端に応力集中が生じ、き裂が鋼板表面に進展して破断に至ったものと推察される。この結果から、U曲げ試験片の水素割れ発生危険箇所は、必ずしも相当ひずみと水素量が最も高い曲げ頂点部ではなく、応力の高い板厚中央部であることが分かった。なお、今回割れが発生したと考えられる位置における応力、相当ひずみ、拡散性水素量はそれぞれ、1440 MPa、0.017、1.68 ppm である。

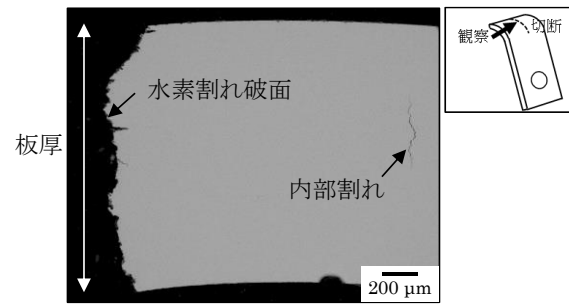


図 3-2.6.7-35 U 曲げ水素割れ試験で水素割れが発生した締込み量 17 mm の M 鋼の U 曲げ頂点部の水素割れ破面近傍の断面 SEM 像

図 3-2.6.7-36 に DP 鋼のボルト締込み量 15 mm のときの曲げ頂点部の板厚方向位置における曲げ方向応力、式(1-1-7)を用いて計算した拡散性水素量および定荷重試験で水素割れが発生した応力を示す。M 鋼同様に、ボルト締込み量 15 mm では、U 曲げ試験片の板厚中央部が最も応力が高く、その位置で定荷重試験で水素割れが生じた応力を超えていることが分かる。DP 鋼も M 鋼と同様に応力の最も高い板厚中央部から水素割れが生じたと考えられる。割れが発生したと考えられる位置における応力、相当ひずみ、拡散性水素量はそれぞれ、1313 MPa、0.024、1.61 ppm である。M 鋼でも DP 鋼でも水素割れ発生個所の応力、ひずみ、水素量で水素割れ発生を整理することができた。

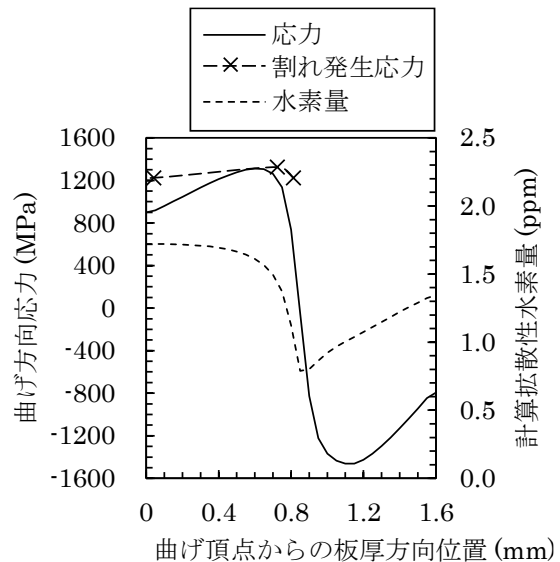


図 3-2.6.7-36 U 曲げ水素割れ試験で水素割れが発生した締込み量 15 mm のときの DP 鋼の U 曲げ頂点部の板厚方向曲げ方向応力分布と計算拡散性水素濃度分布および定荷重水素割れ試験において水素割れが発生した応力

### (3) 参考文献

- 1) T. C. McIlvaine: *J. Biol. Chem.*, **49**(1921) 183.
- 2) 塑性加工便覧, 日本塑性加工学会編, コロナ社, 東京, (2006) 566.
- 3) S.Yamasaki and T.Takahashi: *Tetsu-to-Hagané*, **83**(1997) 454.
- 4) N.Suzuki, N.Ishii, T.Miyagawa and H.Harada: *Tetsu-to-Hagané*, **79**(1993) 227.
- 5) K.Takai and R.Watanuki: *ISIJ Int.*, **43**(2003), 520.

## 【西神分室 神戸製鋼所】

### (1) 背景及び目的

腐食を伴う高強度鋼の水素脆化は、環境から侵入した水素が原因となって発生するため、想定する使用環境下における侵入水素量を把握することが重要である。環境からの侵入水素量を正確に得るためには、水素分析における阻害因子を把握し、極力除去することが望ましい。水素分析における代表的な阻害因子として錆の影響が挙げられ、錆の除去にはブラスト処理がしばしば使用されるが、水素侵入に及ぼすブラスト処理の影響を詳細に調査した報告例はない。そこで本研究では、腐食環境で鋼に侵入した水素を精緻に測定するための水素分析方法の確立を目的として、水素量測定に及ぼすブラスト処理の影響を調査した。そしてブラスト処理によって鋼に水素が侵入する現象を明らかにした。各種条件でブラスト処理を行った試験片の水素存在状態を解析し、水素侵入の機構および抑制方法を調査した。さらに同評価方法を用いて大気暴露環境下での U 曲げ試験片の水素量を定量化し、水素脆化との関係性について調査を行った。

### (2) 実験方法および結果

#### (2-1) 実験方法

##### (2-1-1) 供試材

供試材には SCM 435 薄鋼板を用いた。900℃、15 分の焼入れ、400℃、30 分の焼戻しを行い、引張強度 1500 MPa 級の焼戻しマルテンサイト組織に調質した。

##### (2-1-2) 大気暴露試験および陰極チャージ試験による水素添加

平板試験片および自動車用部材を想定した曲げ加工となる U 曲げ試験片を大気暴露試験に供した。U 曲げ試験片の作製には、幅 30mm、板厚 1.6 mm の試験片を採取し、シャー切断によるせん断加工ひずみの影響を排除するため試験片長辺端面をフライス加工した。この試験片を 3 点曲げによって U 字形状に曲げ、曲げ半径を変化させた。曲げの頭頂部に貼り付けたひずみゲージを用いて計測されるひずみ量にヤング率を乗じた値を負荷応力として、試験片に通したボルトをナットで締め付けることによって曲げ加工部に応力を付与した。大気暴露環境下での腐食による水素添加を目的として、銚子、宮古島、函館にて大気暴露試験を行った。鋼中に侵入した水素の逃散を抑制するため、大気暴露試験後はドライアイスおよび液体窒素で試験片を冷却した状態で保管した。大気暴露した試験片から水素分析用試料を切り出した。切断時は水素逃散を防止するためにできるだけ短時間で行い、切断前後には液体窒素で試験片を冷却した。

陰極チャージ試験による水素添加には 10×10×1.6 mm の試験片を用いた。ポテンシostat / ガルバノスタットを用いて、試験片に対し定電流制御により水素添加を行った。ここで、対極には白金を用い、チャージ溶液には 0.1 M NaOH 水溶液を用いた。陰極チャージ試験は約 20℃で実施し、カソード電流密度およびチャージ時間はそれぞれ 1  $\mu$  A/mm<sup>2</sup>、48 h とした。

##### (2-1-3) ブラスト処理

ブラスト処理を用いて大気暴露試験で形成した錆の除去を行った。ここでブラスト装置には、SNM アジア株式会社製ハンディブラスターを用い、エア源には圧縮空気あるいは圧縮乾燥空気を用いた。また、ブラスト処理の砥粒には珪砂 (有限会社竹折砥業所 9 号珪砂) あるいはアルミナ (サンゴバン株式会社製 WHITE ABRAX F220) を使用した。珪砂は全て同じ製品であるが、ロットによって水素分析結果が変化したため、珪砂 A、B、C とロット毎に区別した。温度上昇に伴う

水素逃散を防止するために、ブラスト処理の前後は液体窒素での冷却を行った。水素分析に及ぼすブラスト処理の影響を調査するため、暴露を行っていない試験片および陰極チャージ試験で水素添加を行った試験片に対しても、同様のブラスト処理を行った。砥粒に用いた珪砂およびアルミナの付着水分量は、105 °Cまでの加熱気化カールフィッシャー法を用いて求めた。

#### (2-1-4) 水素量測定および水素可視化

水素量の測定には大気圧イオン化質量分析計 (Atmospheric Pressure Ionization Mass Spectrometer, API-MS) を用いた<sup>1)</sup>。水素脆化に影響すると考えられる拡散性水素量は一般的に 300°Cまでに放出される。そのため、室温から 300°Cまで昇温したときに放出される水素の積算値を評価した。昇温速度は 12°C min<sup>-1</sup> とした。

水素の可視化には汎用セクター型 SIMS を用いた。ここで水素トラップサイトのトレーサーとして、軽水素の代わりに重水素を用いた。希少同位体である重水素をトレーサーとする同位体標識法により、鋼中に初期から存在する軽水素と環境から侵入した重水素を分離して存在箇所を評価することができる。さらに、測定上のバックグラウンド由来の水素と区別することが可能であるため、バックグラウンド由来の水素を低減するための排気時間を短縮化することができる<sup>2)</sup>。これにより、試験片に含まれる水素が逃散する前に、水素可視化評価を開始することが可能である。一次イオンビーム条件を Cs<sup>+</sup>, 15keV とし、走査イオン像モードにて負の重水素イオン (<sup>2</sup>D<sup>-</sup>) を取得した。

### (2-2) 実験結果

#### (2-2-1) 水素量測定に及ぼすブラスト処理の影響

鋼中の水素分析に及ぼす錆の影響を把握するために、大気暴露試験後の試験片の錆が一部残るように、意図的に 1 s 未満の短時間のブラスト処理を 3 回行い、水素分析を行った結果を図 3-2.6.7-37 に示す。ここでブラスト砥粒には珪砂 A を用いた。大気暴露試験で形成した錆はブラスト処理によって部分的に除去されているが、一部が残存していることが図 3-2.6.7-37 a に示す外観写真からわかる。錆が残存した試験片の水素量測定結果を図 3-2.6.7-37 b に示す。120°C近傍をピークとする低温側の水素放出に加え、250°C近傍をピークとする高温側の水素放出が確認された。120°C近傍をピークとする水素放出は拡散性水素であり、その一部は大気暴露試験によって鋼中に侵入した水素由来である可能性が考えられる。一方、250°C近傍をピークとする水素放出は錆由来と推察される。石黒らは錆の付いた鋼材を昇温脱離式ガスクロで分析を行った際の水素放出挙動を詳細に調査し、錆と鉄との反応によって 300-400°Cの高温域に水素が放出されることを報告している<sup>3)</sup>。本実験においても同様に、残存した錆と鋼が昇温脱離分析中に反応し、高温側に水素が放出されたことが考えられる。このような高温側の水素放出は低温側の水素放出にも裾を伸ばしており、水素脆化に影響すると考えられる低温側の鋼中の拡散性水素の定量化を阻害する。すなわち、錆は鋼中水素量の精密な測定に対する阻害因子として働き、水素量測定前に十分に除去する必要がある。そこで、次にブラスト処理による錆の除去を検討した。

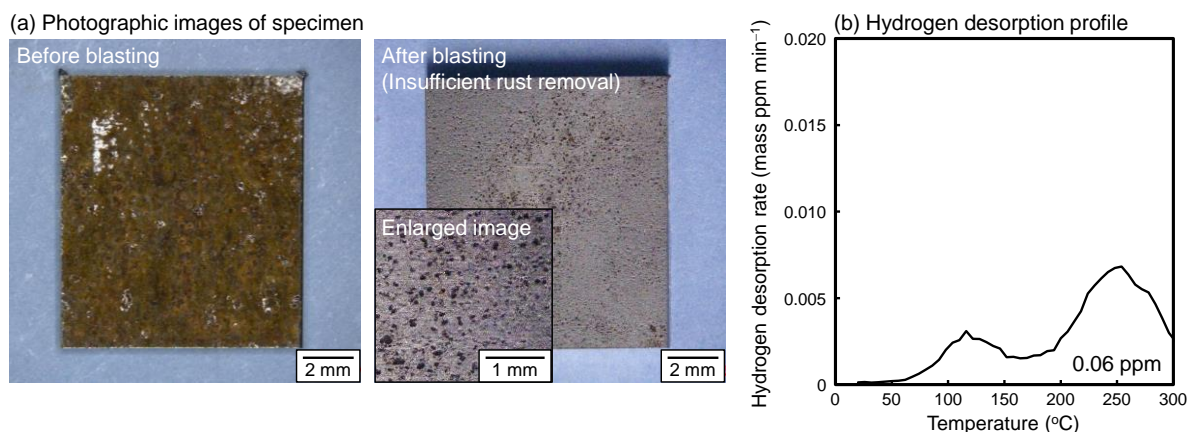


図 3-2.6.7-37. (a) Photographic images of specimen before and after insufficient blasting using silica A to remove the rust formed by atmospheric corrosion. (b) Hydrogen desorption profile of specimen with residual rust after insufficient blasting. (Online version in color.)

鋼の水素量測定に及ぼすブラスト処理の影響を調査するために、大気暴露後の試験片の錆が十分に除去されるよう、長時間のブラスト処理を行った。ここで砥粒には珪砂 A を使用し、ブラスト時間の影響を調査するために、1 回あたりのブラスト時間を 1 s、3 s、10 s、30 s とし、ブラスト回数を変化させ、ブラスト処理の合計時間は 30 s で固定とした。例えば 1 回あたりのブラスト時間を 1 s とする場合は、ブラスト処理を 1 s 行った後に液体窒素で冷却する作業を試験片の表面と裏面に対してそれぞれ 15 回ずつ行い、合計で 30 回のブラスト処理を実施して、ブラスト時間の合計は 30 s とした。得られた結果を図 3-2.6.7-38 に示す。大気暴露環境での腐食によって形成した錆はブラスト処理によってほぼ完全に除去されることがわかる(図 3-2.6.7-38 a)。従って、水素分析に及ぼす錆の影響はほとんどないとして以下の議論を進める。1 回あたりのブラスト時間が長くなるにつれて、水素量が増加することが図 3-2.6.7-38 b からわかる。また、図 3-2.6.7-38 c に示す水素放出曲線から、1 回あたりのブラスト時間が長くなるほど水素放出が増加するとともに、300 °C まで昇温しても脱離しきらない高温側の水素放出が顕著になることが確認された。1 回あたりのブラスト時間が長くなるほど、ブラスト処理に伴う発熱によって試験片温度が上昇し水素量が減少することが当初予想されたが、本結果は予想と反対の傾向であった。実際にブラスト処理直後の試験片温度を表面温度計で測定した結果、1 回あたりのブラスト時間が 1 s、3 s、10 s、30 s と長くなるにつれて、-22°C、-19°C、-4°C、25°C と表面温度が上昇することが確認された。大気暴露試験での腐食によって鋼中に侵入した水素は、試験片温度の上昇によって逃散しやすくなると考えられるため、今回確認された 1 回あたりのブラスト時間の長期化に伴う水素量の増加は、大気暴露試験で侵入した鋼中水素では説明できない。すなわち、ブラスト処理自体が水素量測定に影響を及ぼしていると考えられる。



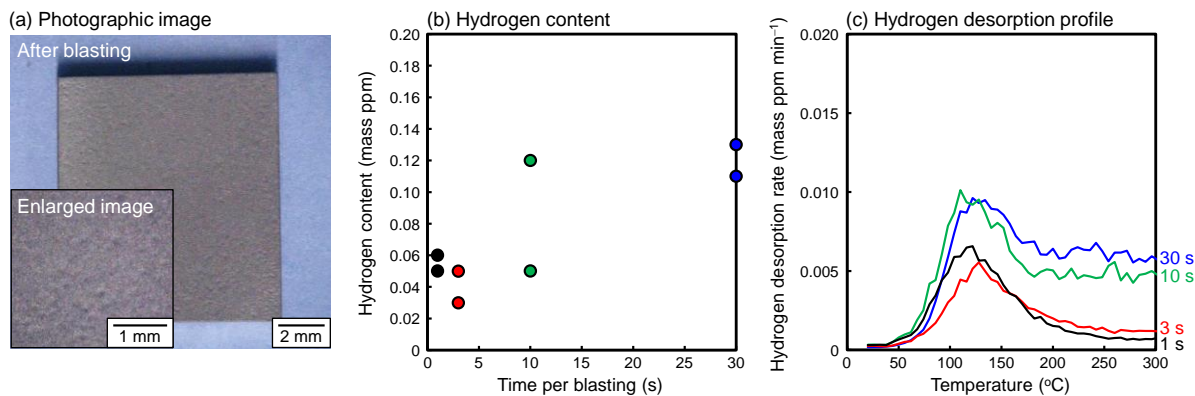


図 3-2.6.7-38. (a) Photographic image of specimen after sufficient blasting using silica A to remove the rust formed by atmospheric corrosion. (b) Hydrogen contents and (c) hydrogen desorption profiles of corroded specimens after blasting when changing the time per blasting with the total time of blasting as 30 seconds. (Online version in color.)

錆や腐食による水素の影響を排除し、ブラスト処理そのものが水素量測定に与える影響を調査するため、大気暴露試験を行わず腐食していない鋼に対してブラスト処理を行った結果を図 3-2.6.7-39 に示す。大気暴露後の試験片に対してブラスト処理を行ったときと同様に、1 回あたりのブラスト時間を 1 s、3 s、10 s、30 s としてブラスト回数を変化させ、ブラスト処理の合計時間は 30 s で固定とした。砥粒には珪砂 A、B、C を用いた。ブラスト処理を行わなかった試験片の水素量は 0.01 ppm 未満であり、ほとんど水素は含まれていなかった。一方、ブラスト処理を行うことで水素量が増加することが確認された。また、大気暴露した試験片を用いた場合と同様に、1 回あたりのブラスト時間が長いほど、水素量が増加する傾向が確認された(図 3-2.6.7-39 a)。珪砂 B を使用した場合の水素放出曲線を図 3-2.6.7-39 b に示す。1 回あたりのブラスト時間が長くなるにつれて、150°C 近傍をピークとする低温側の水素放出および 300°C でも低下しきらない高温側の水素放出が確認された。特に、珪砂 B を使用した場合、最大で 0.18 ppm もの水素量が検出されたが、これは従来報告されている暴露試験での侵入水素量と比較して無視できない高い値であることから、鋼中水素量を精密に測定する目的において、ブラスト処理は阻害因子となりうる事が判明した。

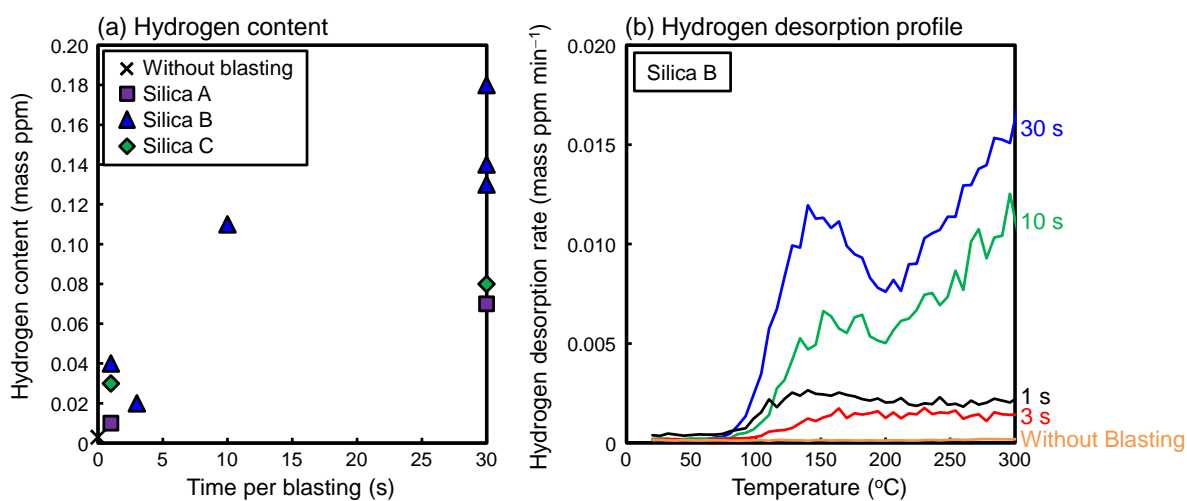


図 3-2.6.7-39. (a) Hydrogen contents and (b) hydrogen desorption profiles of non-corroded specimens after blasting using silica A, B, C when changing the time per blasting with the total time of blasting as 30 seconds. (Online version in color.)

水素分析に及ぼすブラスト処理の影響の試験片厚さ依存性を調査した結果を図 3-2.6.7-40 に示す。本実験でのみ、厚さが 6.0 mm の SCM 435 鋼板を供試材として用い、板厚 0.5 mm ~ 5.8 mm の試験片 (10×10 mm) を採取してブラスト処理を行った。ブラスト処理には砥粒 C を使用し、1 回あたりのブラスト時間を 30 s (試験片の表面と裏面に対してそれぞれ 15 s) としてブラスト回数は 1 回とした。試験片の板厚が減少するにつれて水素量が増加する傾向が確認された(図 3-2.6.7-40 a)。また、図 3-2.6.7-40 b に示す水素放出曲線から、板厚の減少とともに、120°C 近傍をピークとする低温側の水素放出および 300°C でも低下しきらない高温側の水素放出が増加することがわかる。板厚が大きい試験片では、ブラスト処理によって鋼表面から近い領域には水素が侵入するものの、鋼表面から離れた領域では水素が十分拡散しておらず、水素が少ない領域が占める割合が大きいため、平均の水素濃度としては少なく見積もられたと考えられる。一方、板厚が薄くなると比表面積が大きくなり、ブラスト処理によって鋼表面から侵入した水素が存在する領域の占める割合が大きくなるため、平均水素濃度が高くなったと推察される。特に薄鋼板や細径の線材などの比表面積が大きい試験片の錆を除去する場合において、ブラスト処理による水素量増加は注意すべき現象といえる。

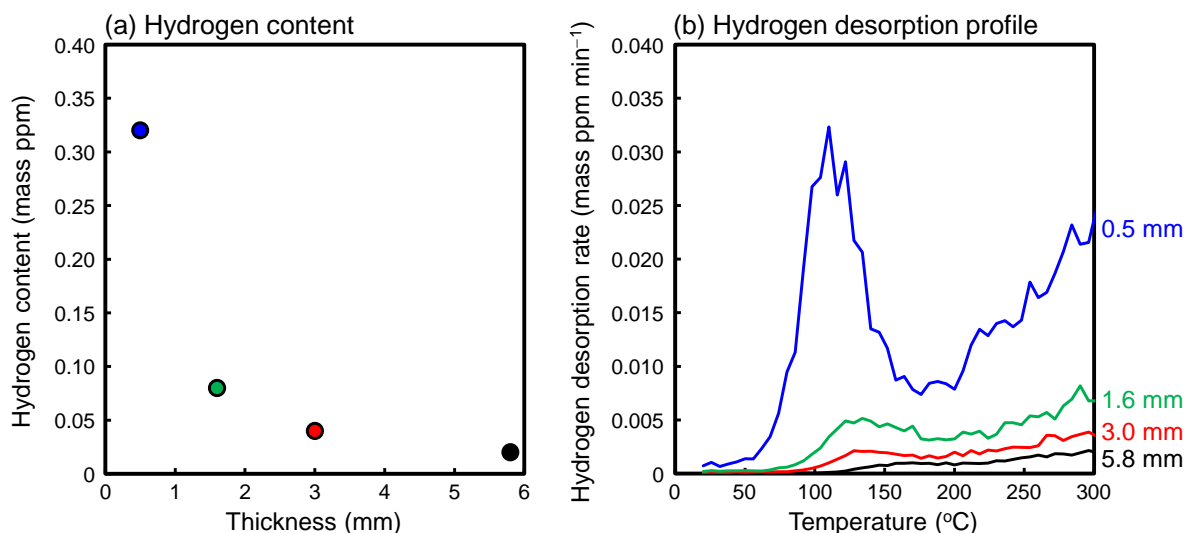


図 3-2.6.7-40. (a) Hydrogen contents and (b) hydrogen desorption profiles of non-corroded specimens after blasting using silica C when changing the thickness of specimens. (Online version in color.)

(2-2-2) ブラスト処理による水素量増加の水素源

腐食に伴い鋼中に侵入した水素を精緻に評価するためには、阻害因子である錆を除去するとともに、ブラスト処理による水素侵入の増加も抑制する必要がある。ブラスト処理による水素量増加の抑制を目的として、ここではその原因となる水素源の調査を行った。鋼への水素侵入機構の仮説を図 3-2.6.7-41 に示す。水素源となりうる水分が、ブラスト処理によって露出した鋼新生面によって還元されて、水素が発生すると共に、その一部が鋼中に水素侵入するモデルを仮定した。そして水素源としては、(i)液体窒素から試験片を取り出したときに試験片表面に付着する霜、(ii)ブラスト処理に使用するエア源に含まれる水分、(iii)砥粒に含まれる水分、(iv)雰囲気中の水分、が考えられる。これら因子の影響を以下に調査した。

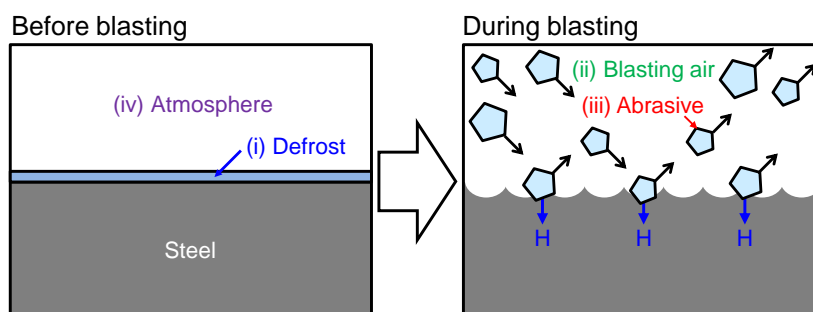


図 3-2.6.7-41. Schematic illustration of (i)frost, (ii)blasting air, (iii)water in abrasive, and (iv) atmosphere, which are assumed as hydrogen sources for increasing the hydrogen content due to blasting. (Online version in color.)

### (2-2-2-1) 霜の影響

ブラスト処理前に試験片を液体窒素から取り出した際に付着した霜がブラスト処理による水素量増加の水素源となるか把握するため、霜が付着した試験片と、液体窒素から取り出した後に室温に戻して霜を除去した試験片に対してブラスト処理を行った。ここで、ブラスト処理には珪砂 C を使用し、試験片の表面と裏面に対してそれぞれ 15 s、合計 30 s のブラスト処理を行った。霜が付着した試験片に対してブラスト処理した場合の水素量は 0.08 ppm であったのに対し、霜を除去した場合は 0.09 ppm と大きな差は確認されなかった。従って、霜はブラスト処理による水素量増加の水素源ではないとわかった。

### (2-2-2-2) エアースourceに含まれる水分の影響

ブラスト処理のエアースourceに含まれる水分の影響を調査するために、エアースourceに圧縮空気および圧縮乾燥空気を使用したときの比較を行った。ブラスト処理には珪砂 B を使用し、試験片の表面と裏面に対してそれぞれ 15 s、合計 30 s のブラスト処理を行った。圧縮空気を用いた場合の水素量は 0.13 ppm であり、圧縮乾燥空気を使用した場合の水素量は 0.14 ppm と同程度であったことから、エアースourceに含まれる水分はブラスト処理による水素量増加の水素源ではないと判断された。

### (2-2-2-3) 砥粒に含まれる水分の影響

ブラスト処理に使用した砥粒に含まれる水分の影響を調査するために、砥粒を乾燥させて水分を除去した場合の変化を調査した。具体的には、砥粒に使用した珪砂 B を定温乾燥器にて 200 °C×24 h 以上の乾燥処理を行った。乾燥処理後、室温までの冷却に伴って大気中の水分が珪砂に再付着することを抑制するために、事前にモレキュラーシーブで脱水したデシケータ内に乾燥後の珪砂とモレキュラーシーブを共に数時間保管して室温まで冷却した。珪砂に含まれる付着水分量は乾燥処理前に 0.12 mass% であったのに対し、乾燥処理によって 0.07 mass% まで低下することがカールフィッシャー法によって確認された。乾燥させた珪砂を用いて、表面と裏面に対してそれぞれ 15 s、合計 30 s のブラスト処理を行った試験片の昇温脱離分析結果を 図 3-2.6.7-42 a に示す。乾燥処理を行わずブラスト処理した場合は 0.14 ppm の水素が検出されたのに対し、乾燥処理を行った珪砂を用いた場合は 0.11 ppm と水素放出が減少することが確認された。乾燥処理による珪砂の付着水分量の低下に伴い、ブラスト処理した鋼中の水素量の低下が確認されたことから、砥粒に含まれる水分がブラスト処理による水素量増加の水素源となることが間接的ではあるが示唆された。砥粒に含まれる水分が水素源となることを直接的に証明するために、重水を付着させた珪砂を用いてブラスト処理を行い、ブラスト処理後の試験片から重水素が検出されるか検証を行った。軽水 (H<sub>2</sub>O) と比較して、重水 (D<sub>2</sub>O) は自然界での存在比率が極めて低いため、重水を付着させた砥粒を用いたブラスト処理を行った試験片から重水素が検出された場合には、砥粒に含まれる水分が水素源だと断定できる。実験方法としては、事前にモレキュラーシーブで脱水したデシケータ内に乾燥処理後の珪砂と重水を添加したビーカーを共に数時間保管して室温まで冷却した。これにより、乾燥処理で脱離させた軽水に代わって、ビーカーから蒸発した重水素が珪砂に吸着して置換すること (以後、重水置換処理と記載する) が可能である。重水を付着させた珪砂を用いて、試験片の表面と裏面に対してそれぞれ 15 s、合計 30 s のブラスト処理を行った。ブラスト処理した試験片から放出された重水素の昇温脱離分析結果を 図 3-2.6.7-42 b に示す。重水置換処理を行わなかった場合は、珪砂の乾燥処理の有無によらず、ブラスト処理後の試験片から重水素は

ほとんど検出されなかった。一方、乾燥処理後に重水置換処理を行った珪砂を用いてブラスト処理を行った試験片でのみ、重水素が顕著に検出されることが明らかになった。本結果から、砥粒に含まれる水分が、ブラスト処理による水素量増加の水素源となることが明確化された。図 3-2.6.7-42 a に示した軽水素の昇温脱離分析結果から、重水置換処理を行った場合に検出された軽水素は 0.09 ppm であり、乾燥処理を行わなかった場合 (0.14 ppm) や重水置換処理を行わず乾燥させた珪砂を使用した場合 (0.11 ppm) と比較して、低い値であることが確認された。これは、乾燥処理によって珪砂に含まれる軽水が脱離したことに加えて、乾燥処理後の室温までの冷却を重水雰囲気で行ったことで砥粒に付着した重水によって軽水の再付着が抑制され、珪砂に含まれる軽水の量が減少したためだと考えられる。

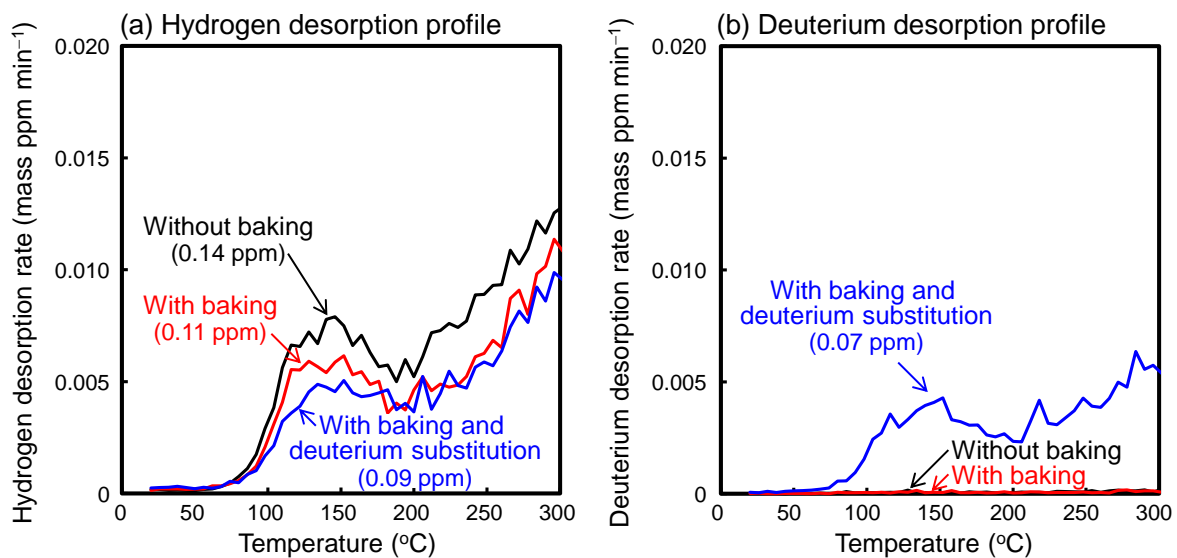


図 3-2.6.7-42. (a) Hydrogen and (b) deuterium desorption profiles of non-corroded specimens after blasting using abrasive without baking, with baking, and with baking and deuterium substitution. Silica B was used as abrasive. (Online version in color.)

#### (2-2-2-4) 雰囲気中の水分の影響

ブラスト処理における雰囲気中に含まれる水分の影響を調査するために、雰囲気を乾燥させて水分を除去した場合の変化について調査した。雰囲気中の水分量を制御するために、ここでは簡易グローブボックス内でのブラスト処理を実施した。砥粒には乾燥処理で砥粒に含まれる水分を減らした珪砂 C を使用し、モレキュラーシーブによって乾燥させたグローブボックス内 (湿度計で測定した相対湿度値: 21%RH) でブラスト処理を行った試験片と、乾燥させなかったグローブボックス内 (相対湿度値: 55%RH) でブラスト処理を行った。ここで、ブラスト時間は試験片の表面と裏面に対してそれぞれ 15 s、合計 30 s とした。グローブボックス内を乾燥させずブラスト処理した試験片の水素量は 0.06 ppm であったのに対し、乾燥させた場合は 0.05 ppm と水素量の低下が確認されたが、その差はわずかであった。したがって、雰囲気中の水分の影響は少ないことがわかった。

上記結果から、ブラスト処理による水素量増加の水素源は主に砥粒に含まれる水分であることが明らかになった。

### (2-2-3) ブラスト処理による水素量増加の抑制方法

ブラスト処理による水素量増加の水素源が砥粒に含まれる水分由来であることがわかったため、ブラスト処理による水素量増加の抑制を目的として、ここでは付着水分量の少ない砥粒を用いたブラスト処理を検討した。具体的には、砥粒として珪砂に加えアルミナを使用してブラスト処理を行った。珪砂 A、B、C の水分量は 0.07、0.12、0.09 mass% であり、全て同じ製品名であるが付着水分量はロットによって異なっていた。この原因は明らかではないが、珪砂の製造方法や製造時期あるいは保管方法によって、付着水分量が異なっていたと考えられる。アルミナの付着水分量は 0.02 mass% とであり、珪砂と比較して少ないことが確認された。これら砥粒を用いてブラスト処理を行った試験片の水素量測定結果を図 3-2.6.7-43 に示す。1 回あたりのブラスト時間を 1 s、3 s、10 s、30 s としてブラスト回数を変化させ、ブラスト処理の合計時間は 30 s で固定とした。いずれの砥粒でも、1 回あたりのブラスト時間が短くなるにつれて、水素量が低下する傾向が確認された。また、砥粒にアルミナを使用した場合、珪砂と比較して水素量が低下した。砥粒に含まれる水分量とブラスト処理した試験片の水素量との関係を図 3-2.6.7-43 b に示す。1 回あたりのブラスト時間が 1 s、30 s のいずれの場合も、砥粒に含まれる水分量が多いほど、ブラスト処理後の水素量が増加することがわかる。本結果もまた、砥粒の付着水分量の水素源でありブラスト処理での水素量増加の原因となることを示している。ブラスト処理による水素量増加を抑制するためには、1 回あたりのブラスト時間を短時間化すると共に、付着水分量の少ない砥粒を使用することが有効である。

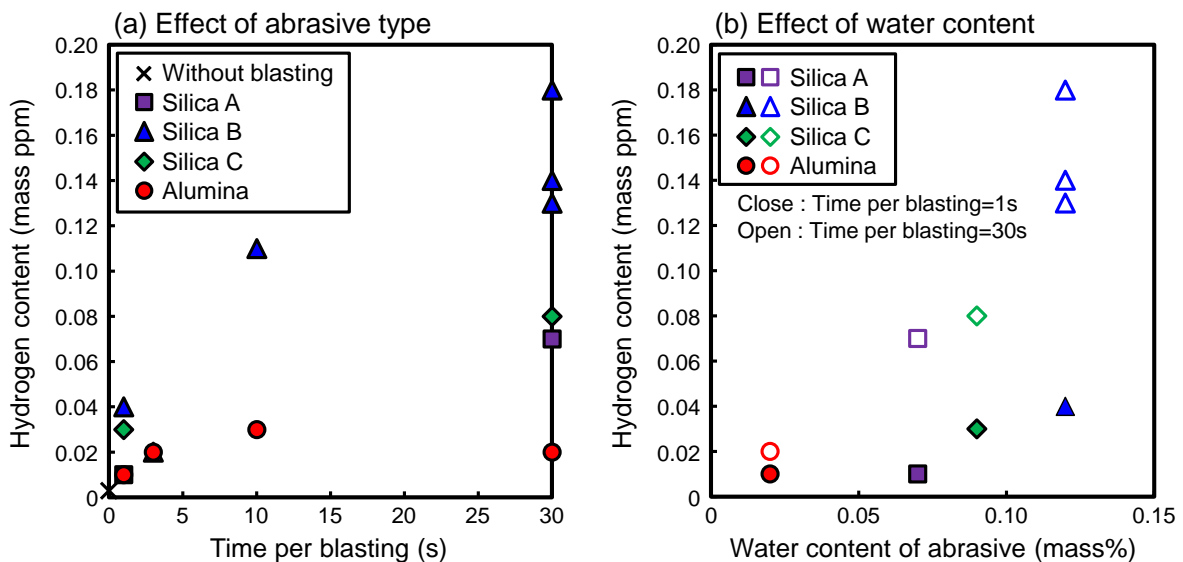


図 3-2.6.7-43. (a) Relationship between hydrogen contents of non-corroded specimens after blasting and time per blasting when changing the abrasives. (b) Relationship between hydrogen contents of non-corroded specimen after blasting and water contents of abrasives. (Online version in color.)

### (2-2-4) ブラスト処理による鋼への水素侵入の機構

ブラスト処理による鋼への水素侵入の仮説として、図 3-2.6.7-41 に示すように、水素源

となる水分（特に砥粒に含まれる水分）が、ブラスト処理によって露出した鋼新生面によって還元されて水素発生すると共に、その一部が鋼中に水素侵入するモデルを仮定した。ここでは水素放出プロファイルの解析や SIMS による水素可視化手法を用いて、ブラスト処理による鋼への水素侵入機構の詳細を考察する。ブラスト処理後の試験片の水素放出プロファイルは、100 ~ 200°C域にピークを有する低温側の水素放出と、300°Cでも低下しきらない高温側の水素放出の 2 種類の水素放出から構成される（図 3-2.6.7-39）。これら水素が鋼中に侵入した拡散性水素かあるいは非拡散性水素か、水素存在状態を明らかにするために、ブラスト処理後に一定期間の室温放置を行った後、水素量測定を行った結果を図 3-2.6.7-44 に示す。ブラスト処理後すぐに液体窒素に保管し、水素量測定を行った場合は、0.18 ppm の水素量が検出された。一方、ブラスト処理後に室温で放置して液体窒素保管を行った試験片の水素量は、1 日の放置で 0.11 ppm に低下し、1 日以降 10 日の放置までは水素量がほぼ一定となった。図 3-2.6.7-44 b に示す水素放出プロファイルから、100 ~ 200°C域にピークを有する低温側の水素放出が、室温での放置によって消失し、これは拡散性の水素であることを示唆している。一方、300°Cでも低下しきらない高温側の水素放出は、室温での放置時間に関わらず残存しており、非拡散性の水素であることがわかる。一般的に、腐食や陰極チャージなどで水素を添加した場合は、拡散性水素として鋼中に存在し、室温放置で逃散する。ブラスト処理した試験片の水素量測定で確認された 100 ~ 200°C域ピークの低温側の水素放出も室温放置で逃散することから、鋼中に侵入した拡散性水素であると考えられる。

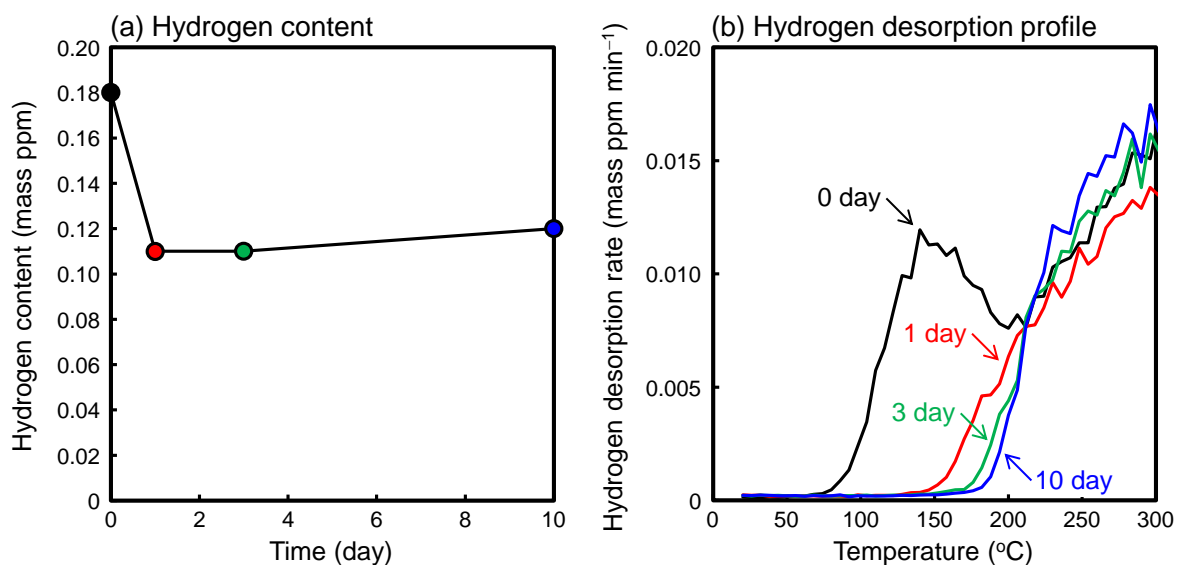


図 3-2.6.7-44. Time dependence of (a) hydrogen contents and (b) hydrogen desorption profiles of non-corroded specimens kept at room temperature after blasting. Silica B was used as abrasive. (Online version in color.)

ブラスト処理によって鋼中に水素が侵入することを直接的に証明するために、SIMS を用いて鋼断面の水素可視化を行った。具体的には、乾燥処理後に重水置換した砥粒を用いてブラスト処理を行った試験片の断面における重水素を可視化した結果を図 3-2.6.7-45 に示す。図 3-2.6.7-45 c で  $^{72}\text{FeO}^-$  が強く検出される領域が鋼の断面部分であるが、鋼内部に重水素 ( $^2\text{D}$ ) が存在するこ

とが図 3-2.6.7-45 a からわかる。本結果は、砥粒に含まれる水分由来の水素が鋼中に侵入することを明確に示すものである。鋼内部だけでなく、鋼表面にも重水素が存在することがわかる。鋼表面の重水素の存在位置と、砥粒由来のケイ素 ( $^{28}\text{Si}$ ) の存在位置は一致していた。検出されたケイ素は、ブラスト処理後に鋼表面に残存した珪砂の可能性が考えられたことから、ブラスト処理前後での試験片の断面 SEM 観察と EDX 分析を行った結果を図 3-2.6.7-46 に示す。ここで、1 回あたりのブラスト時間を 1 s、30 s としてブラスト回数を変化させ、ブラスト処理の合計時間は 30 s で固定とした。ブラスト処理前 (図 3-2.6.7-46 a) には確認されなかった Si、O がブラスト処理後の試験片表面には確認され、これは鋼表面に珪砂が残存することを示している。従って、SIMS で確認された鋼表面の重水素は、残存した珪砂に含まれる重水由来と推察される。1 回あたりのブラスト時間が 1 s のとき (図 3-2.6.7-46 b) と比較して 30 s と長いほど (図 3-2.6.7-46 c)、鋼表面に残存する珪砂の量が多くなることわかる。以上のように SIMS による水素可視化から、鋼中に存在する水素と鋼表面に残存する砥粒に含まれる水分由来の水素の 2 種類の水素存在状態が確認された。これと水素放出プロファイルで見られた 100 ~ 200°C 域の低温側の水素放出と 300°C でも低下しきらない高温側の水素放出の 2 種類の水素放出との対応と考えると、鋼中に侵入した拡散性水素が 100 ~ 200°C 域の低温側の水素放出であり、鋼表面の砥粒に含まれる水分が昇温脱離分析中に鋼と反応して生じた水素が高温側の水素放出の原因であることが推察される。鋼表面に残存した砥粒に含まれる水分は室温で安定であることから、ブラスト処理後に室温放置を行った試験片においても変わらず、高温側に水素放出が確認されたと説明できる。

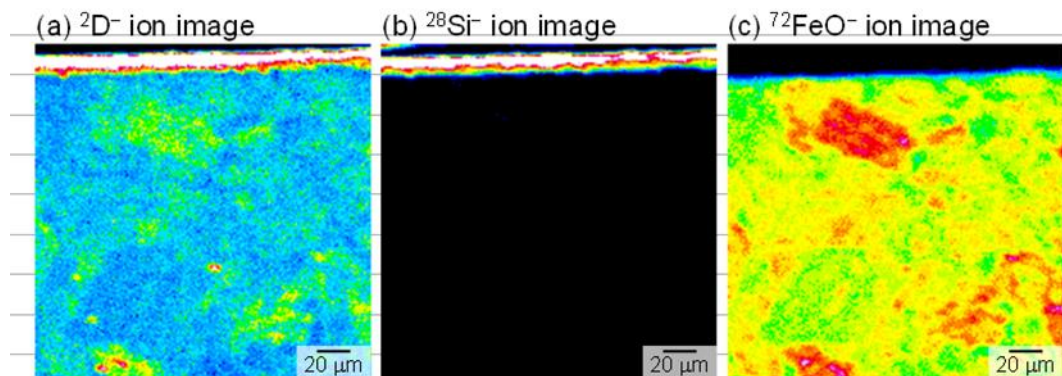
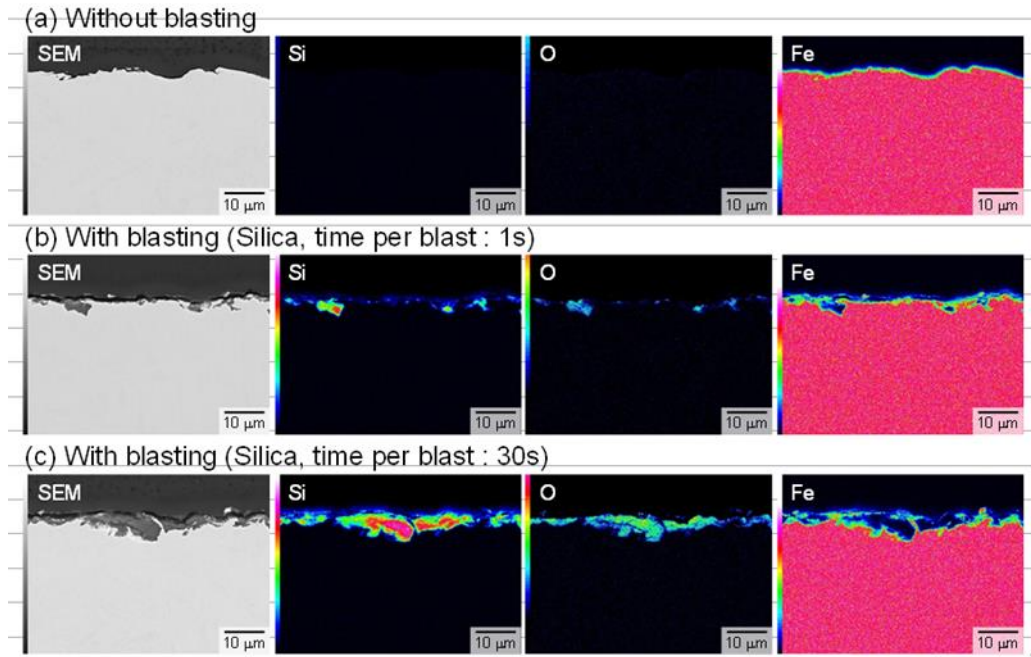


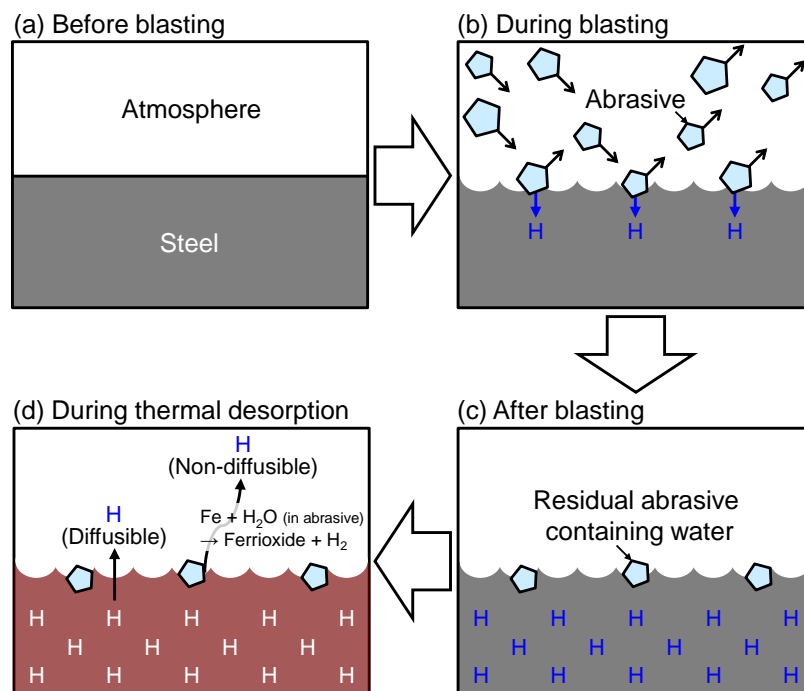
図 3-2.6.7-45. SIMS images of (a)  $^{2}\text{D}^-$ , (b)  $^{28}\text{Si}^-$ , and (c)  $^{72}\text{FeO}^-$  in specimen after blasting using abrasive with baking and deuterium substitution. Silica B was used as abrasive. (Online version in color.)

上記結果を踏まえ、ブラスト処理による鋼への水素侵入の機構の模式図を図 3-2.6.7-47 に示す。ブラスト処理によって露出した活性な鋼新生面によって、砥粒に含まれる水分が還元されて水素発生し、その一部が拡散性水素として鋼中に侵入する (図 3-2.6.7-47 b)。ブラスト処理後、鋼中には拡散性水素が存在し、鋼表面には水分を含む砥粒が残存する (図 3-2.6.7-47 c)。これに対し昇温脱離分析を行うと、鋼中の拡散性水素は 100 ~ 200°C 域の低温側にピークを持って放出される。さらに高い温度まで昇温を行うと、鋼表面の砥粒に含まれる水分と鋼とが反応し ( $\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ferrioxide} + \text{H}_2$ )、昇温脱離分析中に水素発生した結果、300°C でも低下しきらない高温側の水素放出として検出されたと考えられる (図 3-2.6.7-47 d)。





☒ 3-2.6.7-46. SEM and EDX mapping images of specimens (a) before blasting, (b) after blasting with 1 s time per blasting, and (c) after blasting with 30 s time per blasting. Silica B was used as abrasive. (Online version in color.)



☒ 3-2.6.7-47. Schematic illustration of hydrogen entry mechanism into steel by blasting. (Online version in color.)

(2-2-5) ブラスト処理による鋼への水素侵入の抑制機構

ブラスト処理による鋼の水素量増加の抑制には、1回あたりのブラスト時間を短くする

ことと、付着水分量が少ない砥粒を使用することが有効であることを図 3-2.6.7-43 に示した。ここでは、その抑制機構について考察を行う。1 回あたりのブラスト時間が短いほど水素侵入が抑制される機構は、ブラスト処理による発熱での鋼の温度上昇が抑えられることと、鋼表面に残存する砥粒が少なくなることが原因と考えられる。すなわち、一般的に鋼と水分との酸化還元反応（腐食反応）は温度が高いほど促進されるため、1 回あたりのブラスト時間が長い場合は、温度上昇によって鋼と砥粒の付着水分との腐食反応および水素発生反応が活発になり、水素が侵入しやすくなる。一方、1 回あたりのブラスト時間が短く、鋼の温度が低い場合には、腐食反応および水素発生・侵入反応が抑制されたと推察される。また、図 3-2.6.7-46 に示したように 1 回あたりのブラスト時間が短いほど、鋼表面に残存する砥粒が少なる。これは 1 回あたりのブラスト時間が長いほどエア圧力が安定し、砥粒が鋼に衝突する圧力が強くなったためだと推察される。水素放出プロファイルで 300 °C でも放出しきらない高温側の水素放出は、砥粒に含まれる水分と鋼との反応で生じたと仮定すると、1 回あたりのブラスト時間が短いほど、鋼表面に残存する砥粒が減少した結果、高温側の水素放出が低下したと考えられる。

砥粒の付着水分量が少ないほど水素量増加が抑制された機構は、水素放出プロファイルにおける低温側および高温側の水素放出の原因が砥粒に含まれる水分であるためと理解できる。すなわち、砥粒の付着水分量が少ないほど、鋼新生面との反応で発生して鋼中に侵入する水素が低減し、低温側の拡散性水素量が低下する。また、ブラスト処理後に鋼表面に残存した砥粒中の水分量が少なくなるため、昇温脱離分析中に鋼との反応で生じる高温側の水素放出も低減したと考えられる。

#### (2-2-6) 鋼中水素量を正しく評価するためのブラスト処理

ブラスト処理による水素量増加を抑制する方法を検討したが、ブラスト処理中の発熱等によって鋼中の水素が逃散してしまう可能性も考えられる。そこで、本ブラスト処理が鋼中水素量の逃散を促すことがないか調査を行った。具体的には、予め陰極チャージで水素添加を行った試験片に対しブラスト処理を行い、水素分析に供した。ブラスト処理が不適切な比較例として砥粒に水分量の多い珪砂 B を用い、1 回あたりのブラスト時間を 30 s とし試験片の表面と裏面に対してそれぞれ 15 s のブラスト処理を行った結果を図 3-2.6.7-48 a に示す。ブラスト処理を行わず陰極チャージを行った場合は、100 ~ 200°C 域の低温側にピークを持つ拡散性水素 (0.04 ppm) の放出が確認された。一方、陰極チャージ後に珪砂を用いてブラスト処理を行った場合は、100 ~ 200°C 域の低温側の水素放出および 300 °C まで放出しきらない高温側の水素放出が増加し、水素量は 0.20 ppm に増加した。水素チャージを行わずブラスト処理のみを行った場合の水素放出プロファイルを同時に示すが、ブラスト処理によって 0.14 ppm の水素量増加が確認される。陰極チャージで鋼中に侵入した水素にブラスト処理による水素侵入が重畳された結果、ブラスト処理前の 0.04 ppm から 0.20 ppm まで水素量が増加したと考えられる。また、珪砂を用いて 1 回あたりのブラスト時間を 1 s とし試験片の表面と裏面に対してそれぞれ 15 回の合計 30 s のブラスト処理を行った結果を図 3-2.6.7-48 b に示す。1 回あたりのブラスト時間を 30 s から 1 s に短時間化することにより、ブラスト処理による水素量増加が 0.14 ppm から 0.04 ppm に減少し、陰極チャージ後にブラスト処理した場合の水素量も 0.20 ppm から 0.10 ppm に低下する。しかしながら、珪砂のような付着水分量が高い砥粒を用いた場合は、1

回あたりのブラスト時間を短時間化した場合でもブラスト処理での水素侵入によって、鋼中水素量を正しく測定できないことがわかる。それに対し、砥粒に付着水分量の少ないアルミナを用いて、1 回あたりのブラスト時間を 1 s として試験片の表面と裏面に対してそれぞれ 15 回の合計 30 s のブラスト処理を行った結果を図 3-2.6.7-48 c に示す。陰極チャージでの水素添加を行わず、ブラスト処理のみを行った試験片の水素量は 0.01 ppm であり、ブラスト処理による水素増加はわずかであった。また、陰極チャージで水素添加した試験片の水素量および水素放出プロファイルはブラスト処理前後で大きな変化がないことが確認された。すなわち、本条件ではブラスト処理中の水素侵入および水素逃散のいずれも抑制できており、鋼中水素量の測定を阻害しないことがわかった。

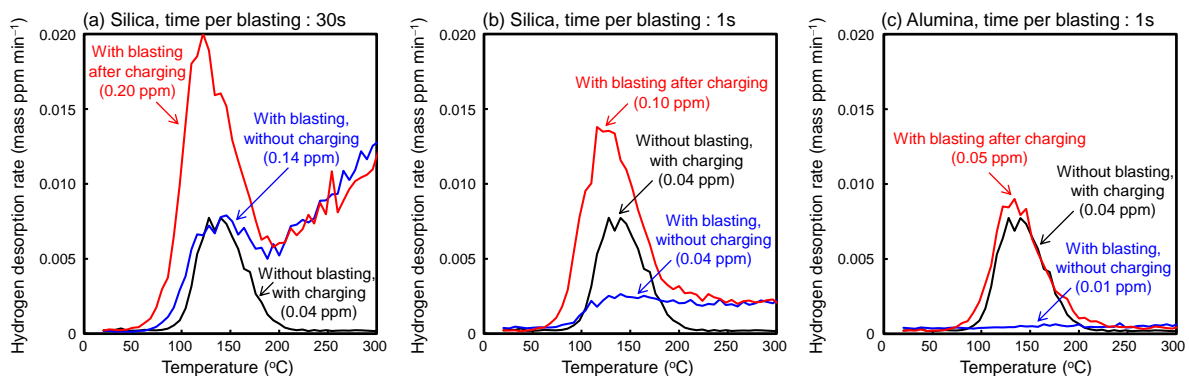


図 3-2.6.7-48. Hydrogen contents and hydrogen desorption profiles of non-corroded specimens with blasting, without blasting after charging, and with blasting after charging. (a) Silica B was used as abrasive with 30 s time per blasting. (b) Silica B was used as abrasive with 1 s time per blasting. (c) Alumina was used as abrasive with 1 s time per blasting. (Online version in color.)

腐食した鋼 (U 曲げ試験片) の錆を異なるブラスト方法で除去した場合の水素量測定結果を比較する。大気暴露試験後の U 曲げ試験片の頭頂部から 2 つの水素分析用試験片を切断して採取し、ブラスト方法を変化させて錆除去を行った。水素分析用の錆除去が不適切な比較例として、砥粒に珪砂 B を用いて 1 回あたりのブラスト時間を 30 s として脱錆した場合の水素分析結果を図 3-2.6.7-49 a に示す。適切な例として、アルミナを用いて 1 回あたりのブラスト時間を 1 s とした場合の水素分析結果を図 3-2.6.7-49 b に示す。大気暴露後の U 曲げ試験片と、U 曲げ試験片から切り出してブラスト処理を行った水素分析用試験片の外観写真を併せて示すが、ブラスト処理後は錆の残存は確認されなかった。砥粒に珪砂を用いた場合の水素量は 0.23 ppm であったが、これは併せて示す腐食していない試験片にブラスト処理を行った場合の水素量増加 (0.18 ppm) が暴露試験で侵入した水素量に畳重された結果である。これに対し、砥粒にアルミナを用いた場合の水素量は 0.05 ppm であり、繰り返しになるが本条件ではブラスト処理による水素量増加や水素逃散がほとんど起きないことが確認できているため、本値が腐食で侵入した本来の鋼中水素量であると考えられる。200 °C をピークとする水素放出は、曲げを行わなかった場合の 100 ~ 200°C 域の水素放出 (図 3-2.6.7-48) と比較して、高温側にピークシフトしている。これは U 曲げによって導入された転位、空孔などの格子欠陥によってより安定な高温側に水素トラップされ

たことと、水素の拡散速度が低下して昇温脱離試験中の水素放出が遅れたことが原因と考えられる。砥粒に珪砂とアルミナを用いた場合とでブラスト処理後の外観は同じような仕上がりであるが、水素量は大きく異なり、錆除去のためのブラスト方法がいかにその後の水素量測定結果に影響するかがわかる。このように、腐食した試験片の錆を除去する際にブラスト方法が不適切である場合は、ブラスト処理に伴う水素量増加によって、本来より過大に環境から入る水素量を評価してしまう。環境から入る水素量を過大に評価してしまうと、場合によっては使用環境を実態より過酷なものとして高強度鋼の適用可否を見誤ってしまう問題がある。

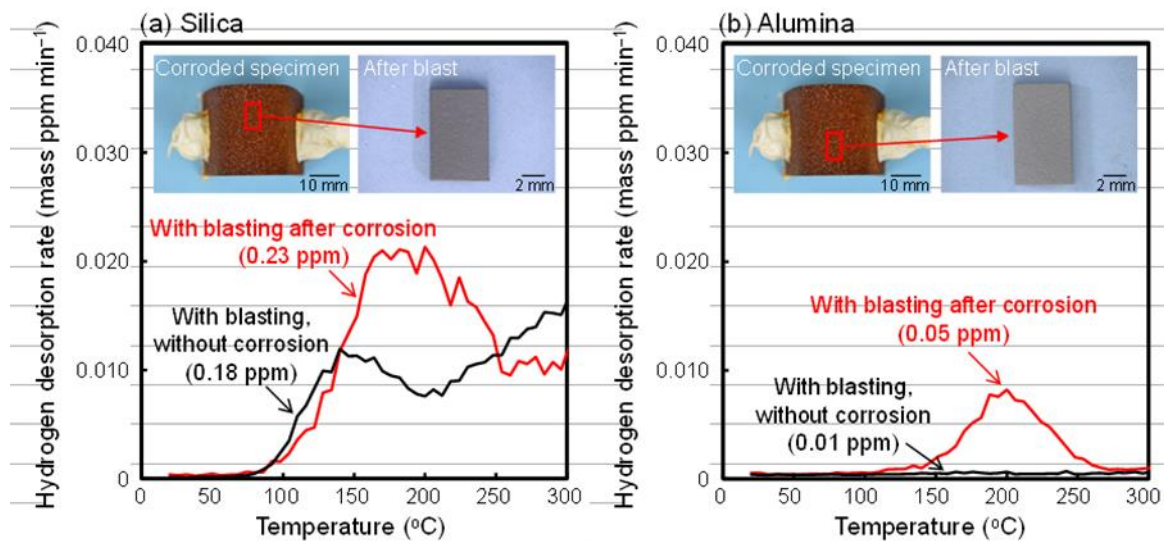


図 3-2.6.7-49. Hydrogen contents and hydrogen desorption profiles of the corroded U bend specimen after blasting and the non-corroded specimen after blasting. (a) Silica B and (b) alumina were used as abrasives. (Online version in color.)

本研究では、腐食環境における侵入水素量の定量評価技術確立を目的に、鋼の水素侵入に及ぼすスケール除去方法(ブラスト処理)の影響を調査し、鋼中水素量を正しく評価するためのブラスト処理を確立した。腐食した鋼の水素量を精緻に測定するための水素量測定方法を提供するものであり、今後さらなる発展が予想される高強度鋼の水素脆化研究に活用されることを期待している。

### (3) 参考文献

- 1) T. Iwata: *Koberunikusu*, **47** (2017), 17 (in Japanese).
- 2) M. Kawamori, W. Urushihara and S. Yabu: *ISIJ Int.*, **61** (2021), 1159.
- 3) Y. Ishiguro, K. Fujimura, S. Ootsuka and A. Kobayashi: *Trans. Jpn. Soc. Spring Eng.*, **63** (2018), 27 (in Japanese).

## 【尼崎分室 日本製鉄】

### (1) 背景及び目的

自動車用鋼板として適用が想定される TS1500MPa 級の高強度鋼において、水素脆化の破壊形態やその機構、破壊発生の支配因子やクライテリアは不明確であり、破壊発生の危険性を適正に評価する技術も確立されていない。水素脆化における破壊は一般的に引張応力、環境（水素濃度）、材料が支配的な因子であると考えられているため、単純な応力負荷方法である一軸引張試験を用いて水素脆化破壊の発生挙動を調査することで、破壊発生条件の絞り込みを行い、評価方法や条件の提案に繋げることを目的とした。

具体的には、種々の形状の異なる切欠付き板状引張試験片を用いて陰極水素チャージ下で低ひずみ速度引張試験を実施し、破断強度や破面形態に及ぼす試験片形状、ひずみ速度、水素濃度、材料組織の影響を評価することで、高強度自動車用鋼板の水素脆化特性評価に適した評価条件を検討した。引張公称応力と平均水素濃度、ならびに局所の最大主応力と水素濃度を主要な影響因子と考えて考察を行うと共に、その考察のために破断発生箇所の破断時における応力、ひずみ状態を FEM 解析で評価し、その解析結果を局所的な水素集積度の見積りにも用いた。

### (2) 実験方法および結果

#### (2-1) 引張試験と水素分析

JIS 規格の SCM435 焼入れ焼戻し鋼を供試鋼として用いた。規格における化学成分の中央値は 0.35C-0.25Si-0.75Mn-1.05Cr-0.22Mo (wt%) である。供試鋼の YS は 1416 MPa、TS は 1548 MPa であり、組織は焼戻しマルテンサイト組織を呈する。引張試験のため図 3-2.6.7-50 に示す両側に U 形切欠きを有する板状引張試験片を採取した。最小板幅  $2b = 1.3 \text{ mm}$ 、切欠き深さ  $d = 0.35 \text{ mm}$  は共通とし、切欠き底の曲率半径  $\rho = 2.50, 0.35, 0.10, 0.05 \text{ mm}$ 、さらに板厚  $t = 0.5, 1.0, 2.0 \text{ mm}$  となる、形状の異なる試験片を準備した。図 3-2.6.7-50 中の応力集中係数  $\alpha$  は、FEM 解析を行い、低公称応力条件における切欠き底の応力増加挙動から求めた数字である。

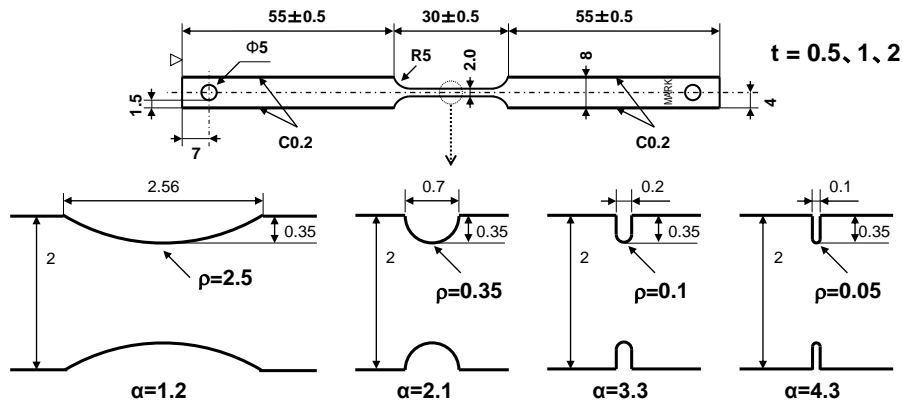


図 3-2.6.7-50 両側 U 形切欠きを有する板状引張試験片

同試験片を用いて大気中ならびに陰極水素チャージ条件下で低ひずみ速度引張試験

を実施した。陰極水素チャージ条件は、3% NaCl 水溶液、ならびに 3% NaCl 水溶液に対し水素侵入促進剤として 3g/L NH<sub>4</sub>SCN を添加した溶液を用い、電流密度は 0.1 mA/cm<sup>2</sup> とした。引張開始前に 1h のプレチャージを行い、その後試験機のクロスヘッド速度を 0.006 mm/min として、水素チャージを継続しながら試験片が破断するまで引張を行った。試験温度は室温である。陰極水素チャージは電流密度制御で行ったが、試験片厚みが異なると表面積が異なるため、切欠き部は無視して試験片形状から表面積を計算した。t = 0.5 mm の試験片に対しては接触面積 3.5 cm<sup>2</sup>、t = 1 mm の試験片に対しては接触面積 4.0 cm<sup>2</sup>、t = 2 mm の試験片に対しては接触面積 4.8 cm<sup>2</sup> と計算された。

同供試鋼から 3T x 10W x 40L mm の小型平板試験片を別途準備し、応力負荷をすることなく、引張試験と同じ陰極水素チャージ条件で 24h 保持した後、速やかに水素分析に供した。水素分析においては、ガスクロマトグラフィー (GC) を用いた昇温水素分析装置 (TDA) を用い、水素チャージ後試験片を常温から 100 °C/h で 400 °C まで昇温し、放出された水素のプロファイルから、常温拡散性と考えられる 200 °C 以下で放出された水素量を用いて水素濃度を計算した。

水素チャージ後の水素分析結果を図 3-2.6.7-51 に示す。各水素チャージ条件に対し n=2 で試験実施したが、ともに大きな差は確認されなかった。3% NaCl 水溶液では水素濃度は約 0.11 wppm であり、3% NaCl 水溶液に 3g/L NH<sub>4</sub>SCN を添加した溶液では水素濃度は約 2.0 wppm であった。NH<sub>4</sub>SCN の添加により室温時点から高い水素放出が確認されたが、これは吸蔵された水素量の増加によって、より不安定な水素トラップサイトまで水素が充填され、低温側から水素放出が始まったためと考えられる。

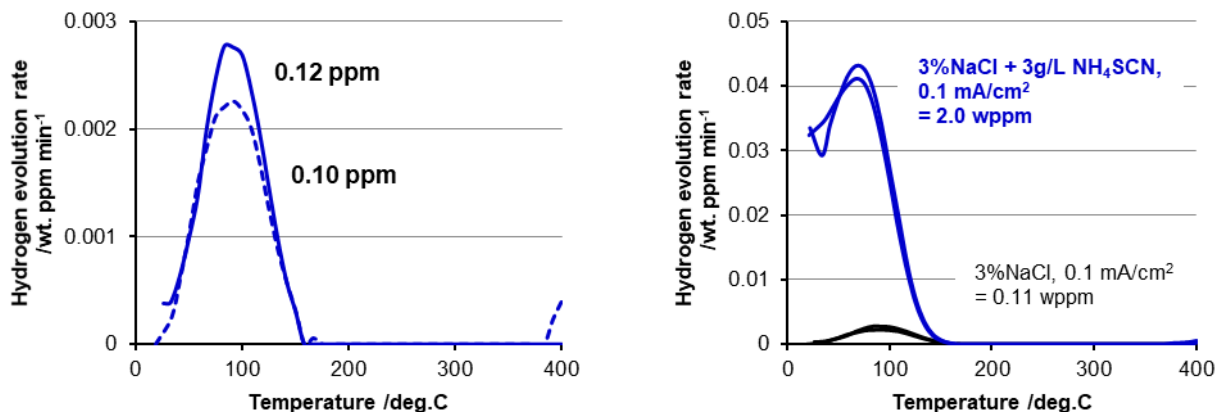


図 3-2.6.7-51 TDA で測定した水素プロファイルと水素濃度

(供試鋼 : SCM435、溶液 : 3%NaCl aq (左)、3% NaCl aq + 3g/L NH<sub>4</sub>SCN (右)、電流密度 : 0.1 mA/cm<sup>2</sup>)

引張試験結果として、各試験片形状、環境条件における、破断に至るまでの最大公称応力を図 3-2.6.7-52 に示す。最大公称応力を計算する際、引張に伴う試験片の絞りの影響は考慮せず、初期の断面積で計算した。水素濃度の増加に従い、破断を生じる公称応力が低下することは容易に予想された結果であり、応力集中係数  $\alpha$  が 3.3 を超

える条件ではその通りの結果であったが、 $\alpha$  が 2.1 以下となる条件では、必ずしも公称応力の低下が確認されなかった。 $\alpha = 1.2$  の条件では高水素濃度下であっても明確な公称応力の低下は確認されず、 $\alpha = 2.1$  の条件では試験毎に破断時の公称応力に大きなばらつきが確認された。

同一の試験片形状で得られた大気中ならびに水素チャージ中の最大公称応力を用いて、水素脆化度を【水素チャージ条件最大公称応力／大気中の最大公称応力】と定義し整理した結果を図 3-2.6.7-53 に示す。 $\alpha$  が 3.3 を超える条件においては、低水素濃度下と同様に、水素脆化度での評価を行うことで、試験片厚みの影響が小さくなることが確認され、厚みの異なる試験片を用いた結果の整理に活用できることがわかった。

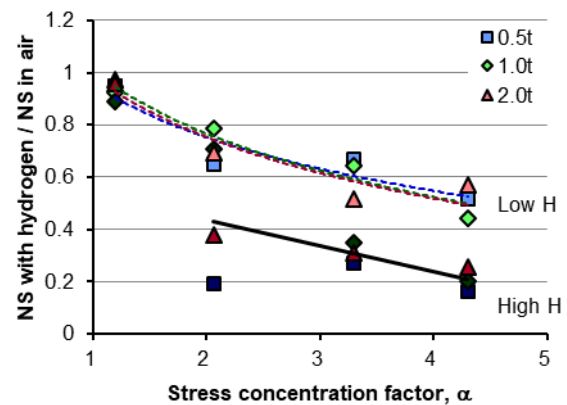
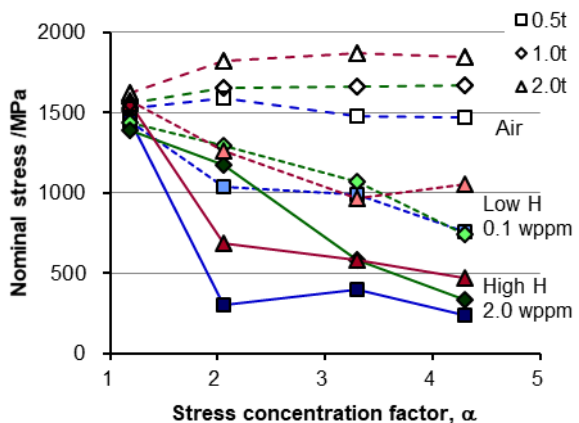


図 3-2.6.7-52 大気中と水素チャージ中の最大公称応力に及ぼす試験片厚みと応力集中係数の影響

図 3-2.6.7-53 水素脆化度に及ぼす試験片厚みと応力集中係数の影響

低ひずみ速度引張試験で得られたクロスヘッド変位—公称応力の関係を図3-2.6.7-54、図3-2.6.7-55に示す。図3-2.6.7-54は大気中の結果、図3-2.6.7-55は低水素濃度条件の結果である。高水素濃度条件では低水素濃度よりもさらに早期に破断するため変位—公称応力の関係図は割愛する。大気中において $\alpha = 1.2$ 、 $2.1$ の条件では最大公称応力に到達した後、低下する傾向が見られ、 $\alpha = 3.3$ 、 $4.3$ の条件では最大公称応力到達時に破断が生じた。水素チャージ条件において $\alpha = 1.2$ の条件では大気中と同様のクロスヘッド変位—公称応力関係を示しているように見えるが、伸びに加え最大公称応力も若干低下した。また $\alpha = 2.1$ 、 $3.3$ 、 $4.3$ の条件においても、マクロなクロスヘッド変位—公称応力の関係は変化せず、単純に早期に破断するという傾向が確認された。ちなみに板厚の増加に伴い、クロスヘッド変位増加による応力上昇が緩やかとなっており、試験片平行部以外の伸びが加算された結果と推定される。従って、クロスヘッド変位制御の場合は、板厚や平行部断面積によって切欠き底の厳密なひずみ速度は異なることになることにも留意が必要である。本検討で選択したクロスヘッド変位速度条件は、十分な水素脆化が生じる遅い速度条件を選択しているため、結果への影響は小さいと考えてよい。

大気中ならびに水素チャージ下で実施した引張試験後の試験片に対し、破面のSEM観察を行った結果を図3-2.6.7-56～3-2.6.7-58に示す。大気中の試験後試験片では、破

線で囲んだ領域において、大きな塑性変形が原因と考えられるディンプルを伴う破面形態が確認され、この領域で割れが発生し、初期の進展が生じたと考えられる（図3-2.6.7-56）。 $\alpha$ が2.1を超える試験片では、切欠き底あるいはその近傍から割れが発生したと考えられるが、切欠き底における塑性ひずみが最も大きいことから、破壊発生に対し塑性ひずみ量が支配的であると考えられる。 $\alpha = 1.2$ でのみ試験片の中央部から割れが発生したことになるが、 $\alpha$ の低い試験片では最終的に塑性ひずみが最も大きい領域が試験片の中央部となるため、同様の理解が可能である。

図3-2.6.7-57に示した、低水素濃度下においては、実線で囲んだ領域において粒界破面の形成が確認された。粒界破面は $\alpha$ が2.1を超える試験片で確認され、図3-2.6.7-52に示した水素下引張試験において最大公称応力の低下が確認された条件と一致する。一方で、 $\alpha = 1.2$ の試験片では粒界破面はほぼ見られなかった。高水素濃度下では、実線で囲んだ粒界破面の領域が、低水素濃度下に比べやや拡大した。 $\alpha = 1.2$ の条件であっても一部で粒界破面が確認されたが、水素下引張試験で得られた最大公称応力は大気中の結果とあまり変わらず、き裂が発生しても進展しなかった、あるいは高い応力とひずみが付与された後に粒界破壊を生じたと考えられる。

なお大気中、水素チャージ下ともに、破面観察結果から破壊の起点は板厚中央部であると考えられる。後に説明する、FEM解析からは最大主応力、応力三軸度、塑性変形後の相当塑性ひずみの全てが板厚中央部で高い結果となっており、これらの一部あるいは全てが破壊発生の支配因子であると予想される。

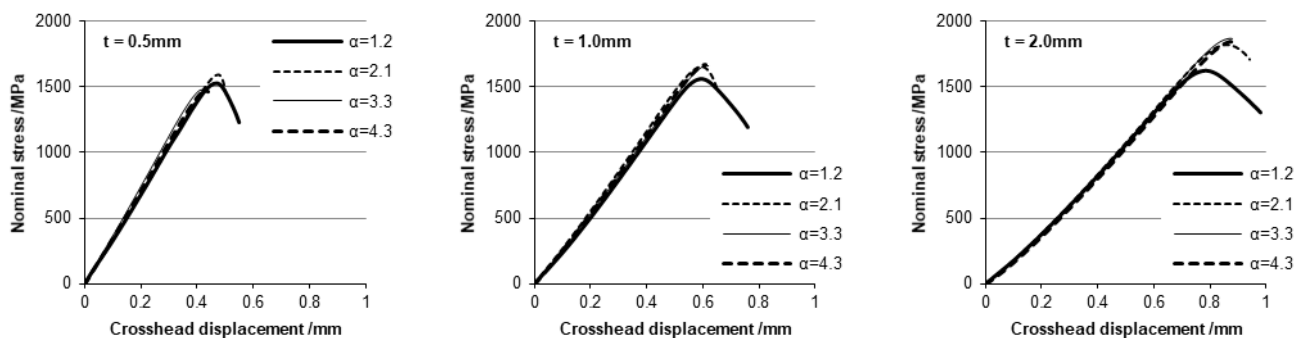


図3-2.6.7-54 大気中SSRTで得られたクロスヘッド変位—公称応力の関係



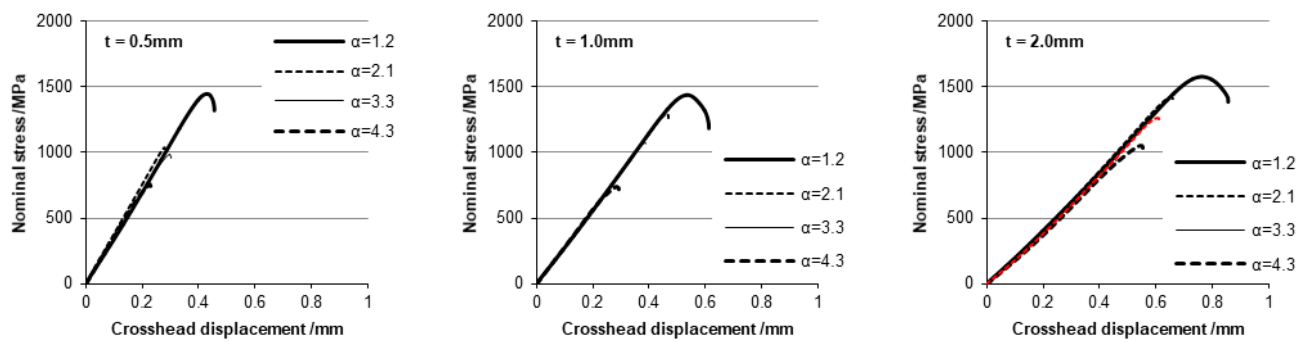


図3-2.6.7-55 水素チャージ条件SSRTで得られたクロスヘッド変位—公称応力の関係

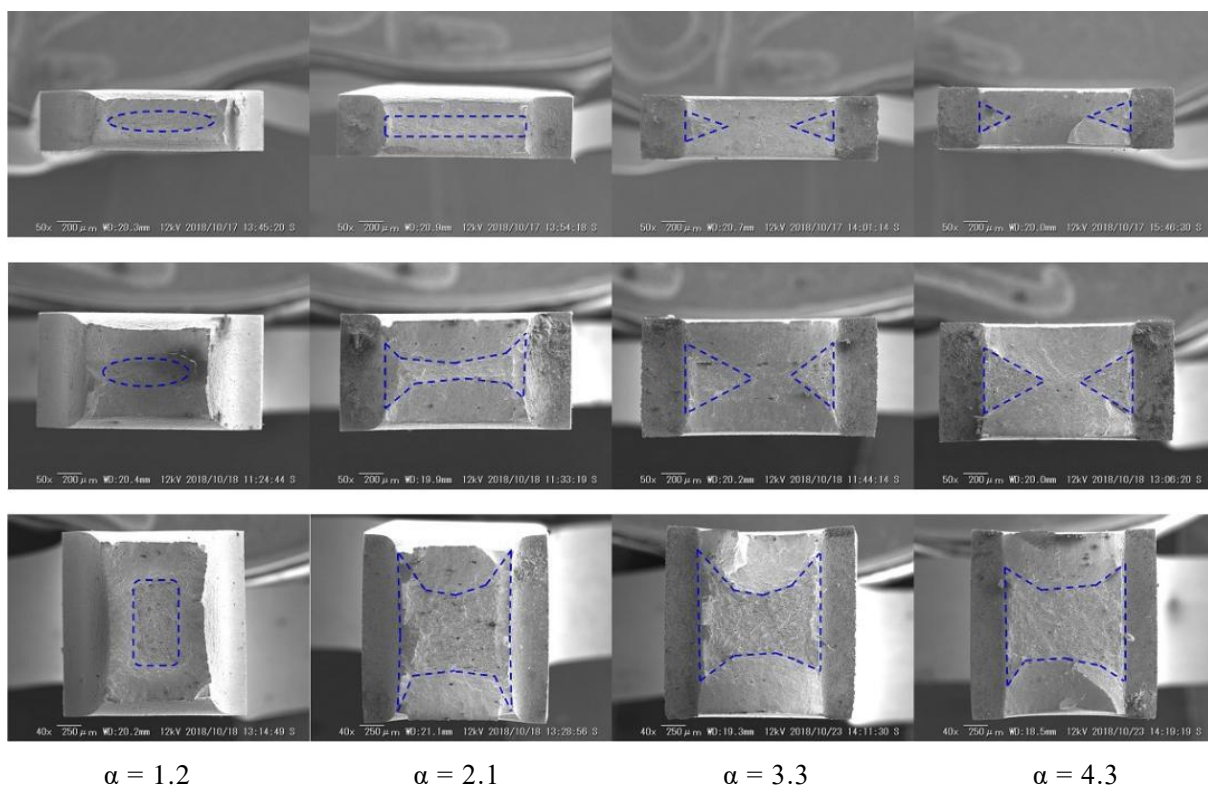


図3-2.6.7-56 大気中における破断後試験片の破面撮影結果(上 : 0.5mmt、中 : 1.0mmt、下 : 2.0mmt)

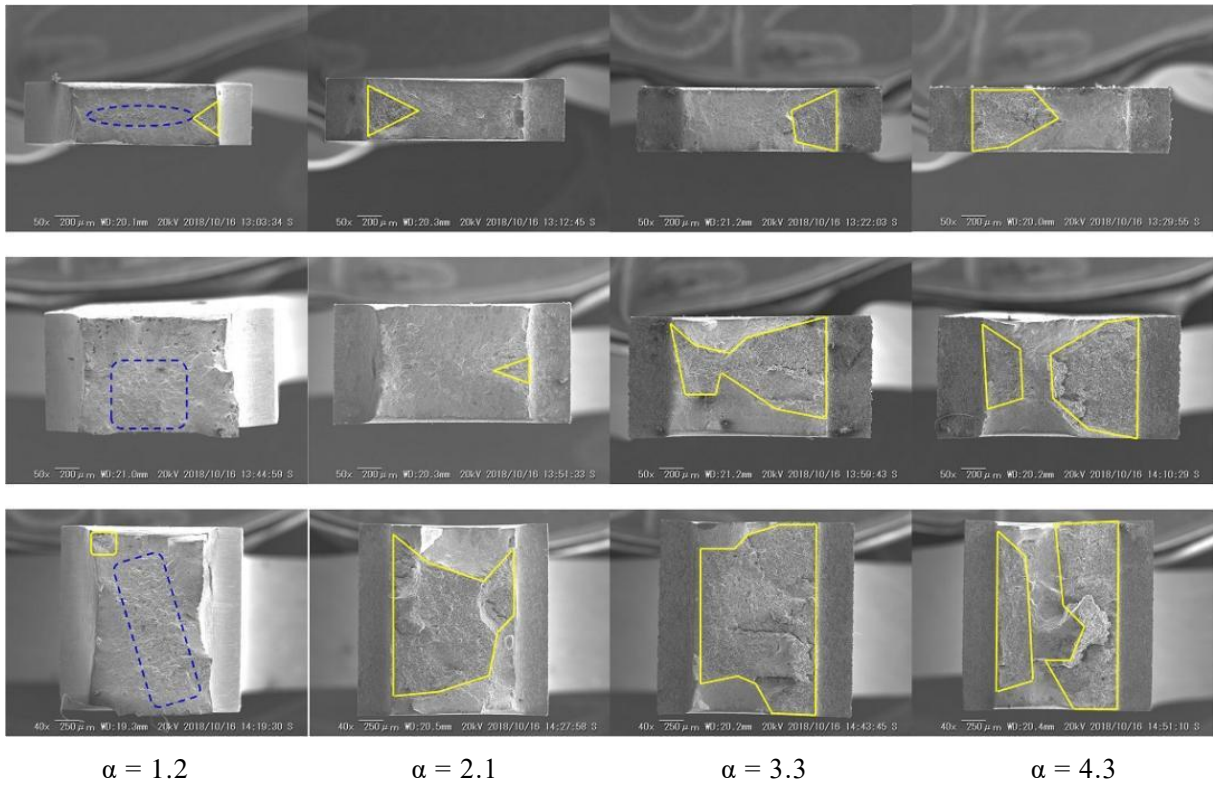


図3-2.6.7-57 低水素中における破断後試験片の破面撮影結果（上：0.5mm、中：1.0mm、下：2.0mm）

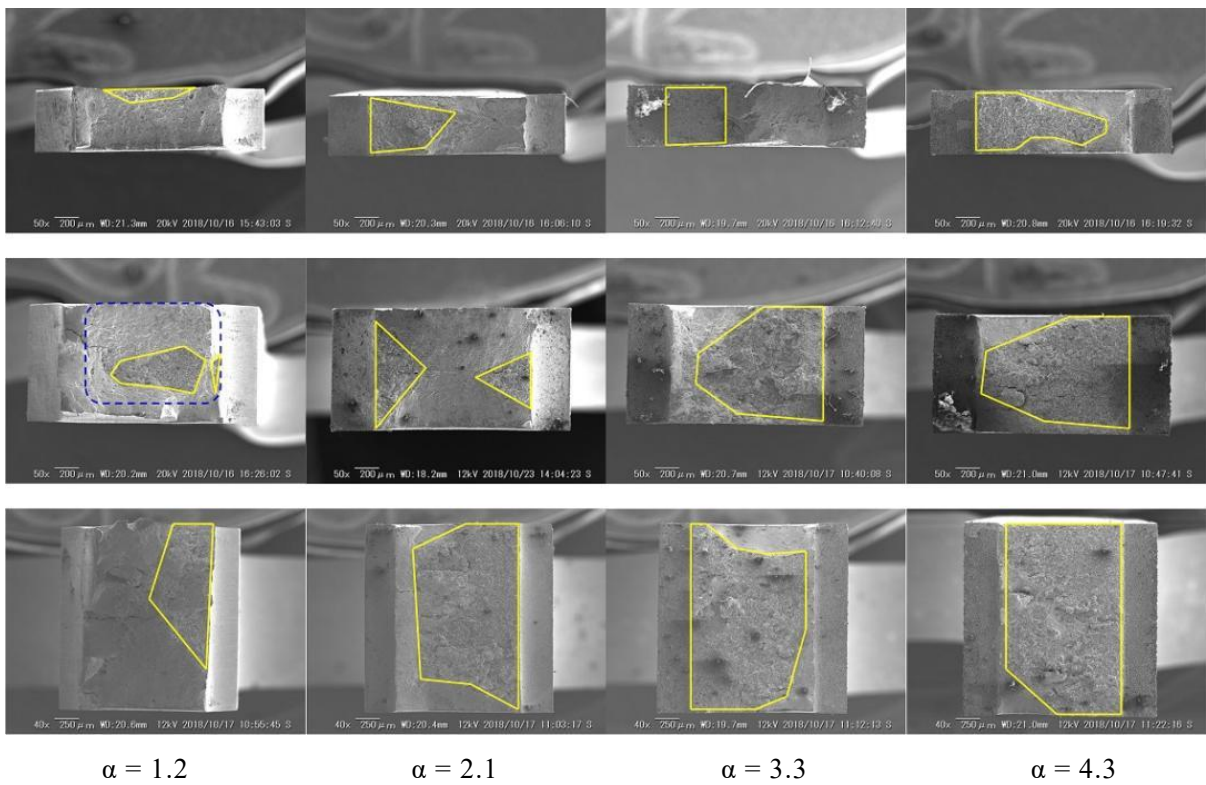


図3-2.6.7-58 高水素中における破断後試験片の破面撮影結果（上：0.5mm、中：1.0mm、下：2.0mm）

## (2-2) 引張試験片の FEM 解析

図3-2.6.7-50に示した切欠き形状（応力集中係数）ならびに試験片厚みを変えた、両側にU形切欠きを有する板状引張試験片に対し、引張試験中の応力・ひずみ挙動をFEMで解析した。解析においては、低ひずみ速度引張試験での評価同様、SCM435鋼を供試鋼とし、図3-2.6.7-59に示す応力-ひずみ曲線を元に解析材の応力-ひずみ関係を決定した。公称応力 $\sigma_n$ -公称ひずみ $\varepsilon_n$ 関係の弾性領域から、ヤング率 $E$ を求めたところ、 $E = 204 \text{ GPa}$ であり、計算にはその値を用いるとともに、ポアソン比は $\nu = 0.3$ を用いた。一方、真応力 $\sigma$ -塑性ひずみ $\varepsilon$ 関係は、Swiftの式によって表現されるものとした。

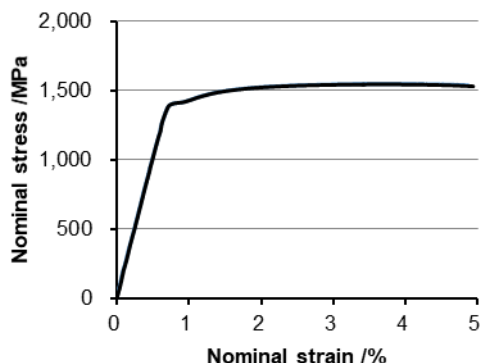


図3-2.6.7-59 供試鋼（SCM435鋼）のS-S曲線

FEM 解析より得られる最大相当塑性ひずみ $(\varepsilon_p)_{\max}$ が、引張破断延性  $D_p$  以上となるまで引張試験片モデルを引っ張ることとした。ここで単軸引張試験から得られた供試材の破断絞り  $\varphi = 0.55$  であったため、下記の関係から最大負荷は $(\varepsilon_p)_{\max} \geq 0.8$ とした。

$$D_p = -\ln(1 - \varphi) \approx 0.8$$

解析に用いたソフトウェアについて、解析ソルバは MSC Software 社の Marc 2016.0、解析モデル作成および結果処理は同社の Marc Mentat 2016.0 である。切欠き付板状引張試験片は対称性より 1/8 領域を 3次元ソリッドモデル化した。一例として図 3-2.6.7-60 に  $t = 1 \text{ mm}$ 、 $\rho = 2.5 \text{ mm}$  の条件における解析モデルの要素分割図を示す。試験片のつかみ部の長さは 2 mm とし、引張方向の 1/2 対称面からモデル端面までの長さを 17 mm とした。切欠き付試験片の中心点（3つの 1/2 対称面の交点）を原点 C (0, 0, 0) とする直交座標 (X, Y, Z) を定義した。点 A、B は切欠き底上に位置し、点 C、D は板幅中心上に位置する。

試験片モデルの境界条件については、以下の通りとした。 $\delta/2$  の付与に対して試験片に作用する公称応力  $\sigma_n$  は、試験片モデル端面における X 方向反力の総和  $P/4$ 、ならびに、試験片の最小断面積  $2b t$  から、 $\sigma_n = P / (2b t)$  と求めた。なお、1/1 モデルにおいて、試験片モデル両端面の変位差を  $\delta$  にするのに必要な荷重が  $P$  である。

- ・ X 軸対称面 (YZ 平面) 上において、試験片引張 (X) 方向の変位を拘束
- ・ Y 軸対称面 (ZX 平面) 上において、試験片幅 (Y) 方向の変位を拘束
- ・ Z 軸対称面 (XY 平面) 上において、試験片板厚 (Z) 方向の変位を拘束

・モデル端面の全面に、X方向の強制変位  $\delta/2$  を付与することで、モデルを引っ張った。

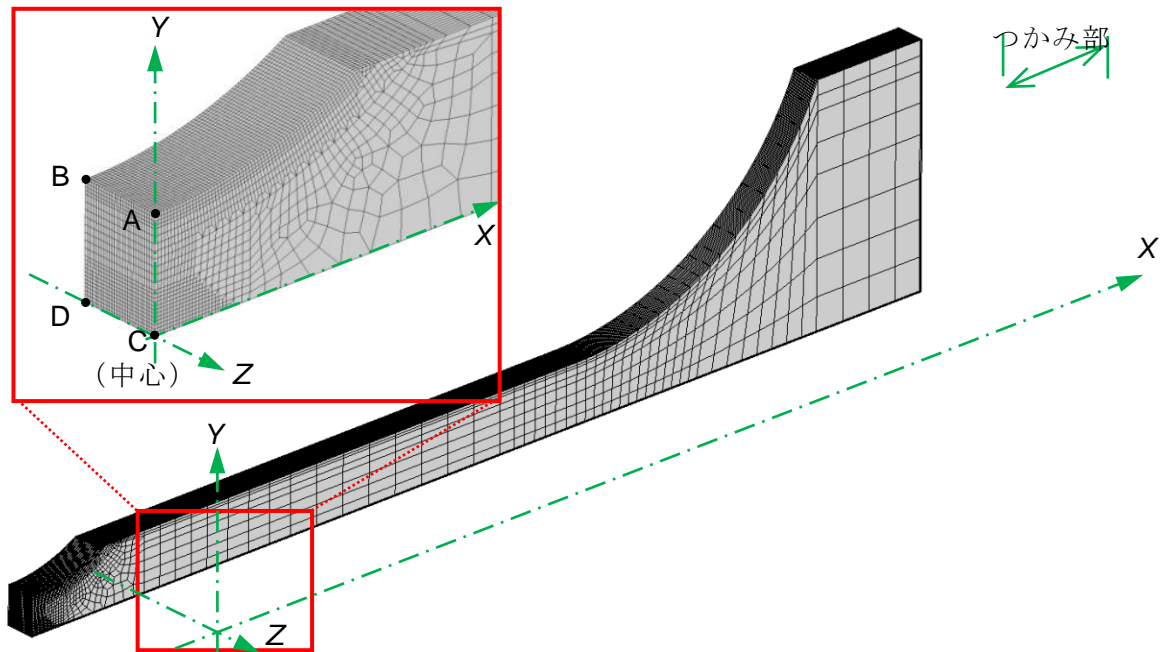


図 3-2.6.7-60 切欠き付板状引張試験片の要素分割 ( $t = 1 \text{ mm}$ 、 $\rho = 2.5 \text{ mm}$ )

FEM 解析の結果、弾性領域の低応力条件において切欠き底の点 A で最大引張応力  $(\sigma_1)_{\max}$  が発生した。弾性領域における  $(\sigma_1)_{\max}$  と公称応力  $\sigma_n$  より、応力集中係数  $\alpha_{\text{FEM}} = (\sigma_1)_{\max} / \sigma_n$  を求め表 1 に示すとともに、参考文献からも応力集中係数を求め、表 3-2.6.7-5 に記載した。

表 3-2.6.7-5 弾性領域の FEM 解析結果から求めた応力集中係数と文献による応力集中係数

	両側に U 形切欠きを有する板材の $\rho$ (mm)			
	2.50	0.35	0.10	0.05
本報 $\alpha_{\text{FEM}}$	1.19	2.06	3.30	4.30
H. Neuber <sup>[1]</sup>	1.16	1.84	2.97	3.99
西田 <sup>[2]</sup>	1.20	1.95	3.05	3.97

試験片モデルに付与した変位と公称応力との関係を図 3-2.6.7-61 に示す。板厚が同じ条件下では、応力集中係数の増加に伴い公称応力の最大値は大きくなり、破断時の伸びは低下した。この傾向は図 3-2.6.7-54 に示した大気中 SSRT と同様であるものの、薄肉試験片 ( $t = 0.5 \text{ mm}$ ) を用いた試験では応力集中係数の増加に伴う公称応力最大

値の増加は認められない。また応力集中係数が同じ条件下では、板厚の増加に伴わずに公称応力の最大値は大きくなり、破断時の伸びは低下した。

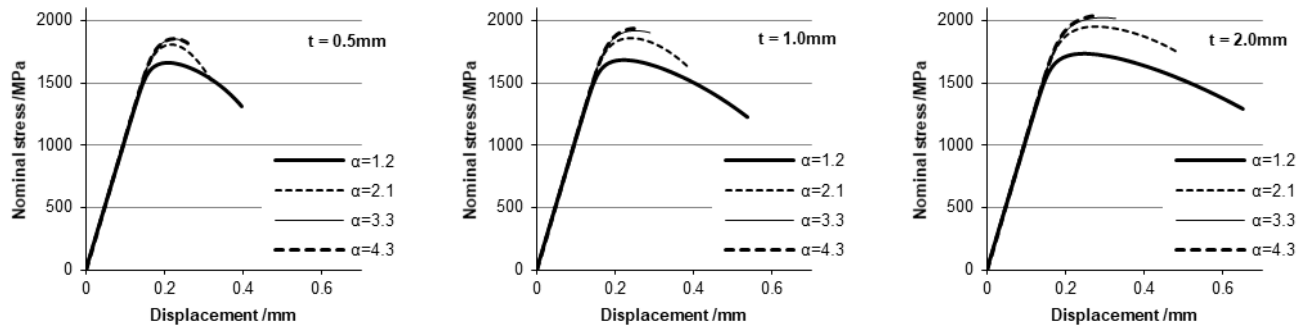


図3-2.6.7-61 FEM解析で得られた各試験片形状における変位－公称応力の関係

図 3-2.6.7-62 に各試験片の $(\epsilon_p)_{max} = 0.8$  の条件における相当塑性ひずみ分布を示す。この条件は大気中で試験片が破断する条件に近い条件であると考えられる。切欠き半径が小さく応力集中係数が大きい試験片ではひずみは切欠き底に集中しており、切欠き底が破壊の起点となると考えられるが、切欠き半径が大きく応力集中係数が小さい試験片では、ひずみが最も高いのは試験片の中央部であり、内部から破壊が発生し進展すると考えられる。

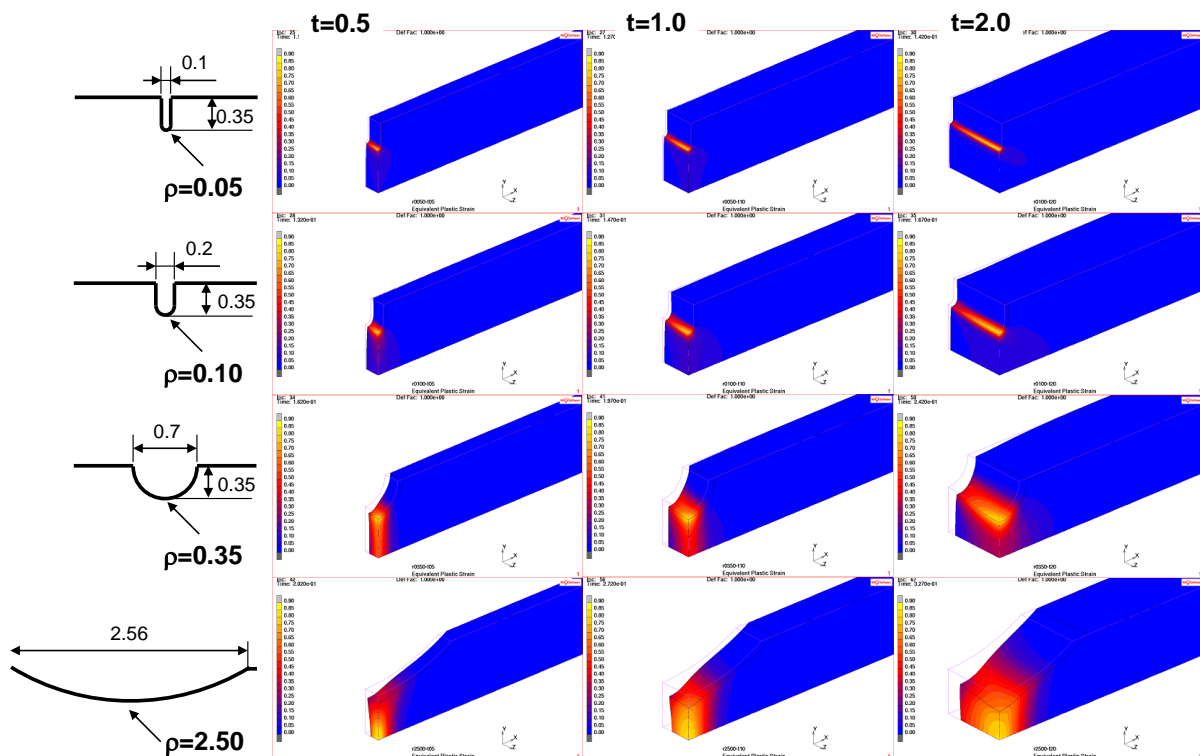


図 3-2.6.7-62 各種試験片の相当塑性ひずみ分布（最大相当塑性ひずみ = 0.8）

低ひずみ速度引張試験で得られた破壊時の公称応力から、応力集中係数が比較的高い条件においては、水素存在状態では塑性変形の開始から間もなく水素脆化破壊が発生していると考えられる。そこで、塑性変形開始時における最大主応力と相当塑性ひずみ分布をそれぞれ図 3-2.6.7-63、3-2.5.7-64 に示す。応力集中係数が高い条件では切欠き底での高い最大主応力が水素脆化の原因となっており、またそれに伴う塑性変形が助長している可能性がある。一方で応力集中係数が低い試験片では切欠き底での応力や塑性変形の集中が緩和されており、水素存在状態でも切欠き底では破壊につながらなかったと考えられる。

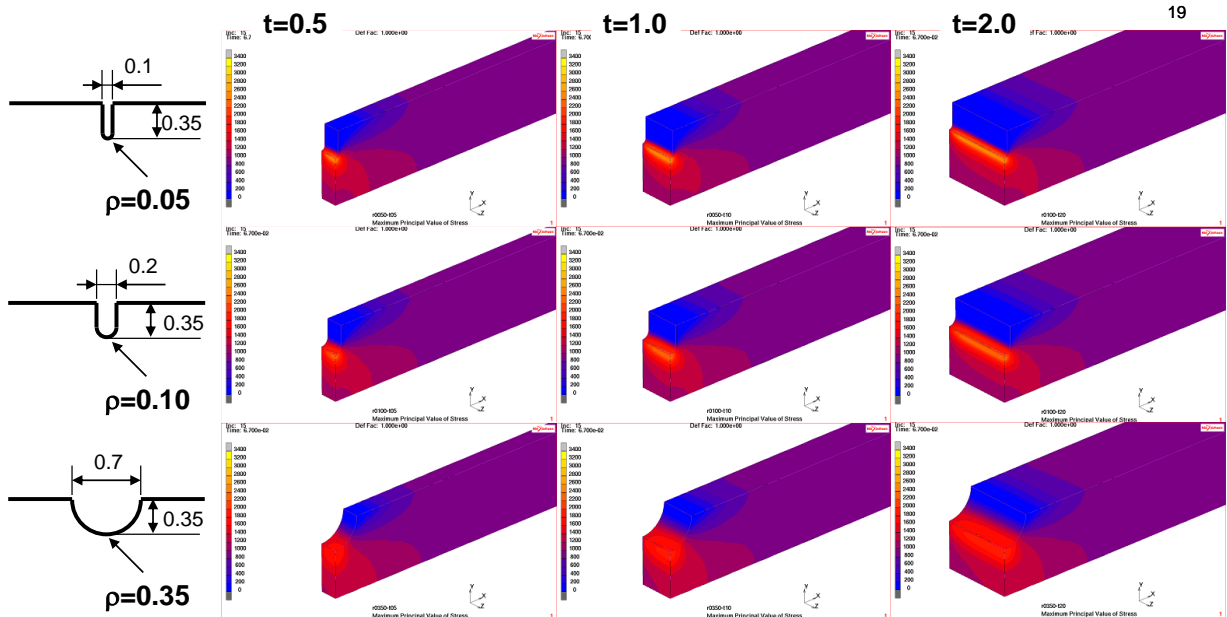


図 3-2.6.7-63 各種試験片の最大主応力分布（塑性変形開始時）

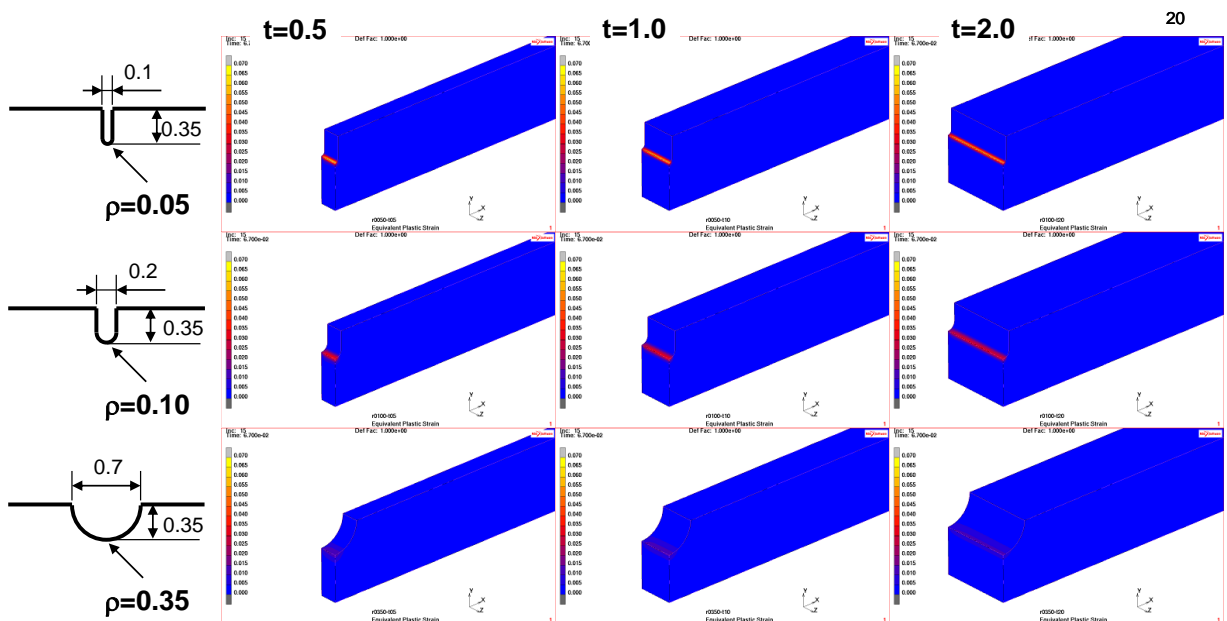


図 3-2.6.7-64 各種試験片の相当塑性ひずみ分布（塑性変形開始時）

### (2-3) 水素脆性破壊の発生条件に関する考察

水素脆性破壊は主に粒内（擬へき開）割れと粒界割れに分けられ、粒界割れに分類される割れの中でも、露出した粒界上において鋸状模様を呈し、塑性変形の寄与が疑われる場合と、滑らかな粒界面を呈し、塑性変形の寄与が見られない場合がある。これらの破壊形態の全てに対し、単一の機構で説明することは難しく、複数の破壊機構が個別にあるいは関連しながら存在していて、ある機構における破壊の条件を満たした場合に水素脆性破壊が生じると考えるのが自然である。なお、水素脆性破面の大部分は、き裂進展の結果であり、き裂進展時の応力ならびに水素の条件はき裂発生条件とは異なることがあるため、き裂発生条件の見極めこそが重要である。本検討で用いた供試鋼ならびに水素チャージ条件においては、破面観察の結果、粒界破壊が起点となっていると考えられたため、主に粒界破壊の発生条件について以下で考察を行う。

切欠き付き試験片を用いて引張応力負荷を行った場合には、切欠き底への応力集中が生じるため、応力やひずみ等の条件は当然試験片中で均一ではなく、加えて応力やひずみが最大となる領域も引張変位（公称応力）の増加に伴い変化（移動）していく。その変化の中で、試験片のどこかの領域で水素脆性破壊条件を満たした場合にき裂を生成し、さらにき裂進展の条件を満たした場合に試験片のマクロな破壊につながると考えられる。そのような観点で試験結果を見た場合に、 $\alpha = 1.2$ の試験片では大きな応力や塑性ひずみが付与されたとしても、試験片のどの部分においても水素脆性破壊の条件を満たしておらず、 $\alpha = 2.1$ の試験片に対し高水素濃度下で引張を加えた場合には、低い公称応力で破壊条件を満たす場合と、高い公称応力まで条件を満たさない場合があることになる。

図3-2.6.7-65～3-2.6.7-67に、 $\alpha$ が2.1を超える試験片において水素脆性破壊が発生した公称応力（に近い）条件のFEM解析結果を抽出し、その最大主応力と応力三軸度の分布を示した。安定して水素脆性破壊を生じた $\alpha = 4.3$ 、 $3.3$ の結果から考察を行う。高水素濃度下では、切欠き底表面における最大主応力が最も高く、表面での塑性変形が生じる前に破壊が生じていることがわかる。最大主応力は表面からの距離に応じて極端に減じていくことから、破壊の起点は表面が最も疑わしく、内部で発生する場合においても表面近傍（～0.02 mm程度）であると考えられる。この結果から、「高水素濃度下では、塑性変形が生じなくても、1200～1500MPa程度の最大主応力が負荷されることで水素脆性破壊が生じる」と一見結論付けられる。しかしながら、これが破壊条件であるならば、 $\alpha = 1.2$ の試験片でも条件を満たす公称応力条件が存在することになるが、実際には破壊は生じていない。公称応力が上昇すれば、単純に最大主応力、塑性ひずみは増加し、欠陥生成に伴う局所の水素濃度の増加も想定されるが、応力三軸度のみ影響が小さくほぼ一定の値を取り、また $\alpha = 1.2$ では切欠き底近傍における応力三軸度は1.0～1.1程度と今回採用した試験片で最も小さい。従って、水素脆性破壊においては応力三軸度が最低でも1.2～1.5程度は必要であると考え、今回の結果が説明できる。ちなみに応力三軸度の増加は静水圧応力の増加につながり、局所の水素濃度を増加させる効果があるため、単純に水素濃度への寄与とも考えられるが、 $\alpha = 1.2$ の試験片では塑性変形を生じて局所水素濃度が高まった後にも破壊が生じていないことから、重要なのは応力的な影響であると考えている。また、水素濃度を増加させる

効果であるならば、応力三軸度の高い厚肉試験片においては低い最大主応力条件で破壊が生じてもよいように思われるが、実際には逆の傾向があり、この点も問題である。破壊が生じる最大主応力が薄肉試験片ほど小さくなる原因については、き裂の発生自体は同じ応力条件で起こっているが、き裂進展の条件を満たす際に厚肉試験片では遅延が生じている可能性を考えている。試験片が厚くなるほど断面積は大きくなり、発生したき裂サイズが同じであると仮定すると、き裂発生に伴う周囲の応力あるいは応力拡大係数の増分は小さいことになり、き裂の進展は遅延することから、マクロな破壊が観測される公称応力は高くなるという考え方である。ただし今回の検討結果では、裏付ける結果は得られていないため、原因を明確化するためには更なる検討が必要である。

低水素濃度下においてもまず $\alpha = 4.3$ 、3.3の結果をみると、切欠き底表面は塑性変形を生じ、最大主応力箇所は肉中0.02~0.05 mmの位置に移行した後に破壊しており、それ以前には破壊の条件を満たすことが出来ていない。上述の応力三軸度については試験片内部では十分に高いことから、水素濃度が低く破壊条件を満たすために高い最大主応力が必要になったと予想される。加えて、主に切欠き底で塑性変形が開始した条件で水素脆性破壊が生じており、塑性変形に伴う局所の水素濃度を高める効果も重畳して影響すると考えられる。 $\alpha = 2.1$ の試験片では、表面領域の塑性変形に伴い、最大主応力箇所は肉中0.10 mmの位置まで移行しており、より内部でのき裂発生が予想される。

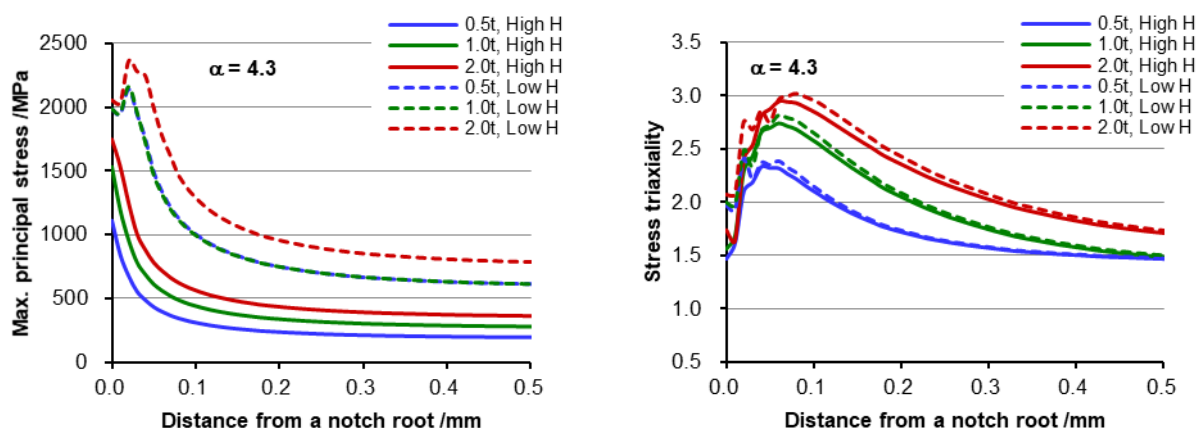


図3-2.6.7-65 水素脆性破壊時の引張試験片における最大主応力と応力三軸度の分布 ( $\alpha = 4.3$ )



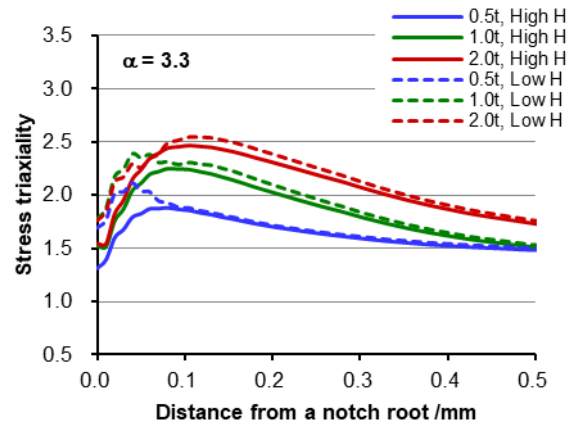
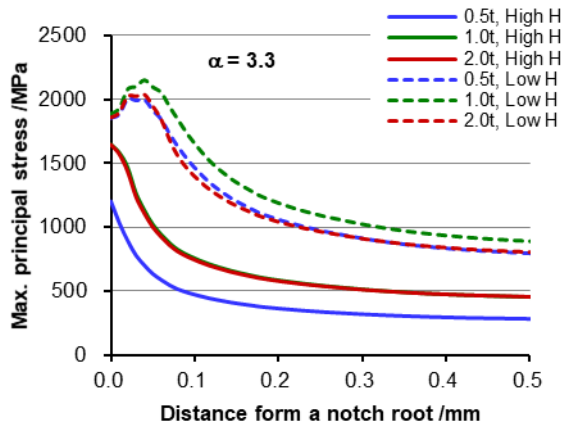


図3-2.6.7-66 水素脆性破壊時の引張試験片における最大主応力と応力三軸度の分布 ( $\alpha = 3.3$ )

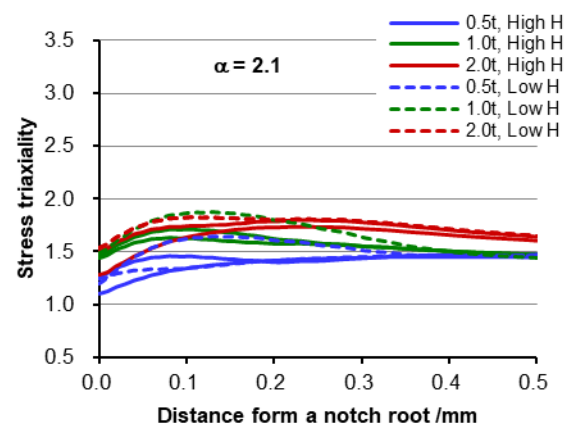
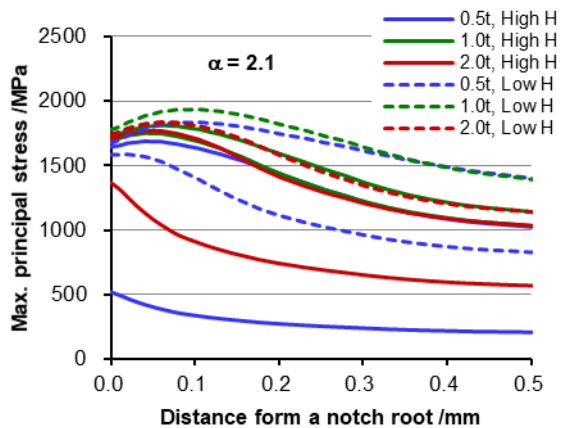


図3-2.6.7-67 水素脆性破壊時の引張試験片における最大主応力と応力三軸度の分布 ( $\alpha = 2.1$ )

破壊の条件として塑性変形による転位生成や転位移動が必須かどうかについては、ここまでの考察では明確ではなかった。高水素濃度下ではFEM解析上、塑性変形は生じていないものの、ミクロな領域における塑性変形は生じている可能性があり、塑性変形が関与しない割れであると断ずることは出来ない。また低水素濃度下で水素脆性破壊を生じる高い最大主応力を達成できるのは、拘束の強い試験片の内部であって、その領域で高い最大主応力を達成した際には、表層近傍は既に塑性変形を生じており、影響の分離が出来ない。

切欠き付き試験片を用いて引張応力負荷を行った場合には、切欠き底で塑性変形が開始するまでは表面の主応力が最も高く、塑性変形の発生により主応力最大箇所は内部に変化する。その変化の中で、試験片のどこかの領域で水素脆性破壊条件を満たした場合にき裂を生成し、さらにき裂が進展した結果、マクロな破壊につながると考えられる。ここでは引張試験で破壊が発生した時点での FEM 解析結果から、最大主応力箇所の主応力と水素濃度に着目して整理を行い、図 3-2.6.7-68 に示した。局所の水素濃度に関しては、平均水素濃度と静水圧応力から計算した。なお破壊時の最大主応

力箇所は、高水素濃度下では表面、低水素濃度下では表面から数十  $\mu\text{m}$  程度内側となった。この整理の結果、試験片厚みの増加に伴い、破壊発生条件は高応力側にシフトする傾向が得られた。その理由としては、き裂発生条件に差があるのではなく、き裂進展に伴う遅延が生じたためと考えられた。

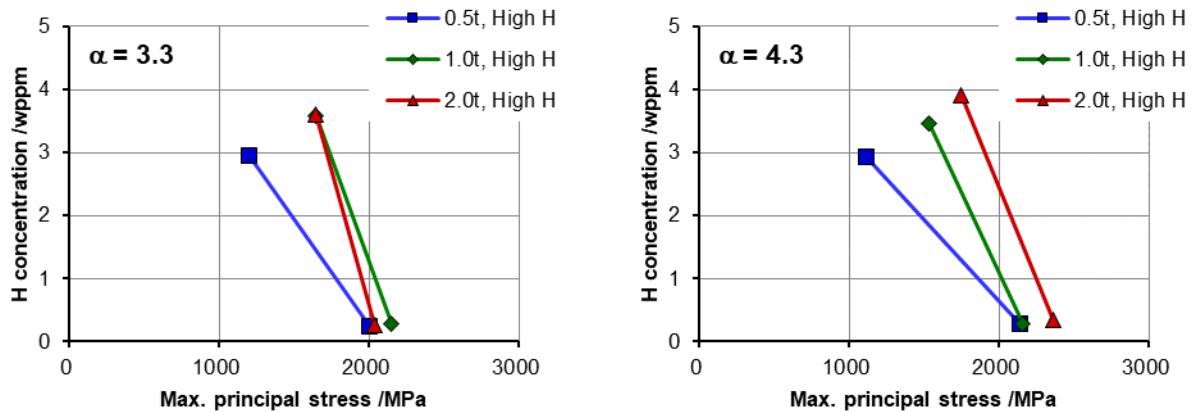


図 3-2.6.7-68 水素脆化破壊発生時の最大主応力×局所水素濃度

材料組織の影響については、本検討で確認された水素脆化破面が粒界破面的であることから、粒界炭化物の有無等が水素脆化に影響する可能性がある。また複相から構成される不均一な組織の場合には、FEM で評価するような均一な変形にならず、局所の応力状態が変動する可能性が高い。

#### (2-4) 水素脆化割れに及ぼす材料の引張特性と塑性予ひずみの影響

共試鋼である SCM435 に対し、再度焼入れ（焼戻し）を行い、応力ひずみ曲線の異なる材料を得た（図 3-2.6.7-69）。これら材料を用いて、両側に U 形切欠きを有する板状引張試験片を採取し、陰極水素チャージ条件下で SSRT を実施することで、破壊時の公称応力を導出した。陰極水素チャージ条件は、3% NaCl 水溶液に対し水素侵入促進剤として 3g/L  $\text{NH}_4\text{SCN}$  を添加した溶液を用い、電流密度は  $0.1 \text{ mA/cm}^2$  とした。加えて、各応力ひずみ曲線を用いて FEM 解析を行い、破壊時の応力ひずみ条件を評価した。その結果を図 3-2.6.7-70 に示す。

焼き戻しの有無、温度によって応力ひずみ曲線を変化させているため、組織や水素濃度の影響が表れている可能性は否定できないが、降伏応力が低い材料ほど、低い最大主応力、高い相当塑性ひずみの条件で破壊が生じた。相当塑性ひずみが大きいということは転位の生成が多くなっており、その転位が特定の粒界や第二相粒子界面に集積した結果、FEM 解析結果に比べ局所的に高い応力集中と共に高い水素濃度条件を形成し、見かけの最大主応力が低い条件で破壊が生じたとも考えられる。自動車用鋼板ではプレス等により塑性予ひずみが加えられるが、その結果圧縮残留応力や降伏応力の上昇が生じた場合には、降伏するまでに外部から高い引張応力を必要とするため、結果として水素脆化破壊が生じる最大主応力が上昇することがあり得る。ただし、大きな塑性予ひずみによって表層で潜在き裂が生じたり、内部で第二相粒子界面剥離が生じたりいわゆる材料損傷が生じた場合には、水素脆化感受性が增大する恐れもあり、

供強に応じて考える必要がある。

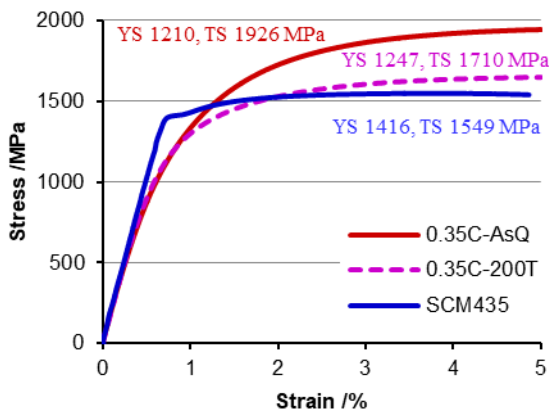


図 3-2.6.7-69 供試鋼（SCM435 鋼、再熱処理鋼を含む）の S-S 曲線

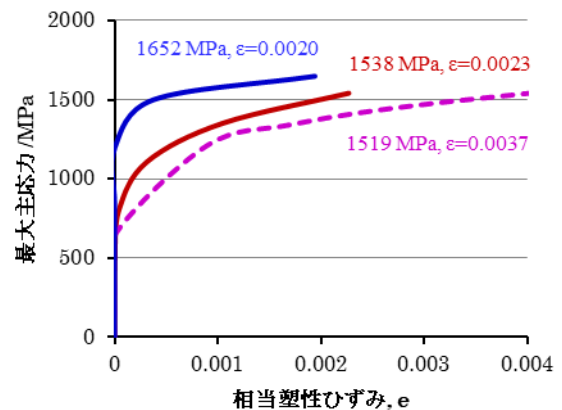


図 3-2.6.7-70 水素脆化破壊発生時の最大主応力×相当塑性ひずみに及ぼす材料の影響

#### (2-5) 各種因子の影響と水素脆化評価条件の提案

切欠付き引張試験片を用いて陰極水素チャージ下で低ひずみ速度引張試験を実施し、破断強度に及ぼす試験片形状、ひずみ速度、水素濃度、材料組織の影響を評価することで、自動車用鋼板の水素脆化特性評価に適した評価条件を検討した。その結果を以下に記載する。

自動車用鋼板に用いられる高強度鋼における水素脆化破壊は主に旧オーステナイト粒界破壊であって、特に大気腐食等で侵入する微量水素下での破壊は塑性変形を伴うことが多いと考えられる。この場合、水素脆化破壊の支配因子は応力集中部における局所の最大主応力と水素濃度であって、塑性変形がこれら応力や水素濃度を高める可能性がある。このような破壊を評価する方法として、応力負荷条件としては定荷重、定ひずみ、変動ひずみ等のような条件を用いても良いが、ひずみを試験中に変動させる場合には、破壊箇所への水素分配、集積に必要な時間を考慮し、十分に遅いひずみ速度での評価が望ましい。今回評価に用いた板状引張試験の場合には、表面近傍での割れを再現するため、比較的高い応力集中係数となる切欠きを付与した試験が望ましく、また厚みの異なる試験片で得られた結果は比較に適さない。比較をしたい場合には大気中引張試験を実施し、水素下の試験で得られた破断応力を大気中で得られた結果で除すことで、概ね同様の結果が得られるため、そのような形で比較するとよい。微小試験片を用いた評価では、き裂の発生の瞬間試験片の破断につながるため、より明確な破壊条件を導出できる可能性があるが、実験してみたところ破断応力のばらつきが大きい結果となり、試験片加工精度の問題があったと考えている。

#### (3) 参考文献

- 1) H. Neuber, “Kerbspannungslehre”, Springer (1957), ISBN: 978-3-540-67657-7, または、電子書籍版： DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56793-3>.
- 2) 西田正孝, “応力集中 増強版”, 森下出版 (1973), ISBN: 978-4-627-94020-8, ま

たは，“応力集中 増補版（POD版）”，森下出版（2000），ISBN: 978-4-627-94029-1.

## 【千葉分室 再委託 東北大学】

### (1) 背景及び目的

自動車の衝突安全性向上と車体軽量化による燃費向上が求められている。自動車用鋼板には 1180 MPa 級の高強度鋼板が用いられている。さらに、1470 MPa 級高強度鋼板はホットスタンピング技術を用いてフレーム部材に成形されて自動車用構造部材に用いられている。しかし、ホットスタンピングは専用設備で熱間プレス成形するため、新たな設備導入が必要となる。そのため、従来の冷間プレス成形によって自動車用構造部材を成形可能な 1470 MPa 級高強度鋼板が求められ、1470 MPa 級の超高強度と 20% の高延性を有する革新鋼板の開発を行っている。

高強度鋼は製造時や使用中の腐食反応により鋼中に侵入した水素によって機械的特性が低下する水素脆化が問題となっている。高強度鋼の水素脆化は、もともと橋梁に用いられる高強度ボルトで問題となったため、ノッチ付き丸棒を用いた定荷重試験、低ひずみ速度引張試験、および通常の引張試験によって評価され、評価方法が確立されている。現在、開発が進んでいる 1470 MPa 級自動車用高強度鋼板も水素脆化が問題となる。しかし、板材の水素脆化特性評価法は確立されていない。自動車用高強度鋼板は、冷間プレス成形を施して構造部材となるため、塑性ひずみが付与された状態で使用される。そのため、自動車用高強度鋼板の水素脆化特性は、微細組織、負荷応力、水素量に加えて、塑性ひずみの影響を考慮する必要がある。

本研究は、プレス成形様式のひとつである U 曲げ加工を施した高強度鋼板の水素脆化特性評価法を確立し、U 曲げ試験片の水素脆化特性に及ぼす応力、塑性ひずみ、水素量の影響を明らかにした。

### (2) 実験方法および結果

#### (2-1) U 曲げ試験片の水素脆化特性評価法の検討<sup>1, 2)</sup>

U 曲げ試験片中の水素量を段階的に増加させて水素脆化によるき裂が発生する限界の水素量を評価する手法の模式図を図 3-2.6.7-71 に示す。陰極水素チャージは電流密度や水素チャージ溶液を調節することで鋼中に侵入する水素量を比較的簡便に調節することができるため、陰極水素チャージを用いた。これは酸浸漬で起こる腐食や、それによるき裂の観察の阻害を避ける点でも有効と考えられる。

本手法ではある水素チャージ条件でき裂発生の有無を確認し、一定時間内にき裂が発生しなければ電流密度を増加させ（水素チャージ条件を高めて）、これを繰り返して水素脆化によるき裂が発生する限界の水素チャージ条件を求めるとともに、そのときの水素量を求める。

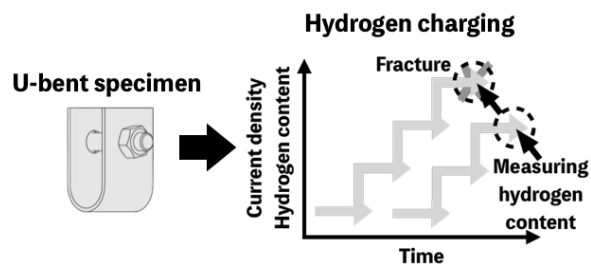


図 3-2.6.7-71 水素脆化試験時の電流密度変化の模式図

図 3-2.6.7-72 に U 曲げ - 水素脆化試験装置の概要図を示す。定電流装置 (galvanostat) により試験片をカソード分極して水素チャージを行った。対極には Pt 線を用いた。3 wt% NaCl 水溶液にチオシアン酸アンモニウム ( $\text{NH}_4\text{SCN}$ ) を添加した溶液を水素チャージ溶液として用いた。水素チャージの再現性を目的として水素チャージ用アクリルセルをウォータージャケットで覆い、水素チャージ液を  $30^\circ\text{C}$  に保った。陰極水素チャージ中の水素脆化き裂をその場観察するためデジタルカメラを設置しインターバル撮影を行った。

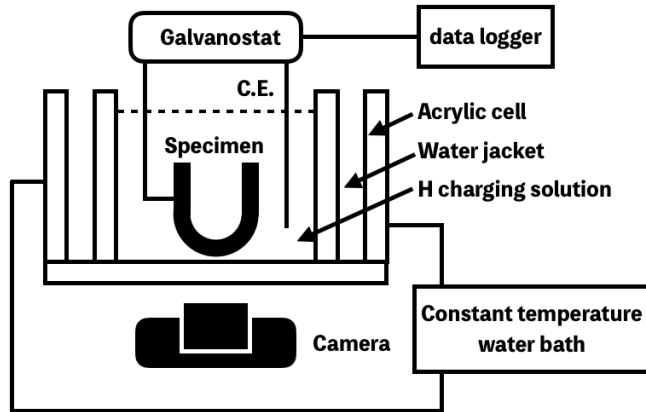


図 3-2.6.7-72 水素脆化試験装置の概

また、試験片と対極間の電圧をデータロガーによって記録し、き裂発生の際の検出を行った。一定時間水素チャージしてもき裂発生が見られない場合、電流密度を上昇させて鋼中にチャージされる水素量を増加させ、これを段階的に繰り返してき裂が発生する条件を求めた。2つの試験片を用いてき裂発生が見られた試験片、およびき裂の発生が見られた1段階手前の水素チャージ条件の試験片のそれぞれから水素分析試験片を切り出し、水素昇温脱離分析によって水素量の測定を行なった。水素脆化き裂が発生しない場合の拡散性水素量の最大値を限界水素量と定義した。

図 3-2.6.7-73 に SCM435M 鋼の曲げ半径 10 mm、負荷応力 1000 MPa の U 曲げ試験片で水素脆化特性を評価した場合の試験片と対極間の電圧をモニタリングした結果を示す。水素チャージに用いた溶液は 3 wt% NaCl +  $0.03 \text{ g L}^{-1} \text{ NH}_4\text{SCN}$  である。試験開始から約 8 h 後に電流密度を上昇させたため電圧が急激に低下した (絶対値は増加した)。また、約 12 h にて電圧の急激な上昇が観察された。この電圧変動のタイミングをインターバル撮影の結果と照合すると、き裂発生と一致したためき裂発生を原因とした電圧変動と考えられる。このことは試験片と対極間の電圧をモニタリングすることによってき裂発生を検出が可能であることを示している。

インターバル撮影によって観察した U 曲げ試験片の水素脆化によるき裂発生と進展挙動の例を図 3-2.6.7-74 に示す。曲げ半径 10 mm、負荷応力 1000 MPa の SCM435M の U 曲げ試験片に 3 wt% NaCl 水溶液中、電流密度 (a)  $300 \text{ A m}^{-2}$  および (b)  $30 \text{ A m}^{-2}$  で水素チャージを行った。いずれの条件でも試験片の幅方向の中央部で初期き裂が観察され、時間経過とともに幅方向外側に進展する様子が観察された。

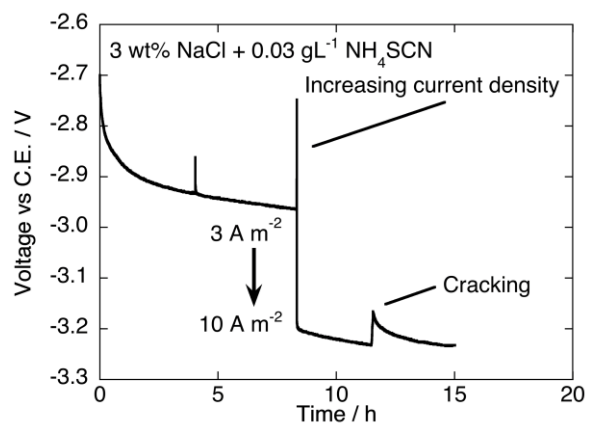


図 3-2.6.7-73 試験片と対極間の電圧をモニタリング

3-2.6.7-54

図 3-2.6.7-73、および図 3-2.6.7-74 より、電圧のモニタリング、およびインターバル撮影によって U 曲げ試験片の水素脆化き裂発生を検出が可能であることが明らかとなった。

図 3-2.6.7-75 に U 曲げ加工部の水素量と負荷応力の関係を示す。それぞれの曲げ半径で、ソリッドマークは破断直前の水素チャージ条件で水素チャージを行ったときの水素量、オープンマークは破断したときの水素量となっている。負荷応力が 1500 MPa の場合、限界水素量は  $R = 8.5 \text{ mm}$ 、

15 mm、10 mm の順となった。 $R = 15 \text{ mm}$  と 10 mm を比較すると  $R=10 \text{ mm}$  の加工ひずみ量が多いため、水素トラップサイトが増加しひずみ部の水素量が増加したと考えられる。負荷応力 1000 MPa、500 MPa の場合も同様に  $R=15 \text{ mm}$  は加工ひずみ量が少ないため限界水素量が低くなったと考えられる。

以上のことから U 曲げ加工部の限界水素量を基準として水素脆化特性評価を行うと曲げ半径  $R=15 \text{ mm}$  の水素脆化感受性が高く、加工ひずみ量を多くすると水素脆化感受性が低くなり、これまでの知見と異なる結果となった。

次に、U 曲げ試験片の無ひずみ部の水素量で限界水素量と負荷応力の関係をまとめた。曲げ半径 8.5 mm、1500 MPa を除き、どの曲げ半径においても負荷応力の増加とともにわずかに無ひずみ部の水素量が減少する傾向を得た。しかし、薄鋼板に侵入した水素は室温で外部に逃散するため測定した水素量は過小評価されて、ばらつきが大きくなる可能性がある。そこで、水素チャージ条件の検討を行った際に得られた水素チャージ条件と水素

量の関係から最小二乗法によって近似式を求め、この近似式を用いて割れた試験片の無ひずみ部の各水素チャージ条件での水素量を換算した。図 3-2.6.7-76 に無ひずみ部の限界水素量を曲げ半径・負荷応力で整理した結果を示す。曲げ半径  $R = 8.5 \text{ mm}$  を除き、負荷応力を増加させると推定される無ひずみ部の限界水素量が減少する傾向が得られた。負荷応力 500 MPa の場合、加工ひずみ量が多い  $R = 10 \text{ mm}$  の水素脆化感受性が  $R = 15 \text{ mm}$  よりも高くなった。(無ひずみ部の限界水素量が減少 → 水素脆化感受性が高ま

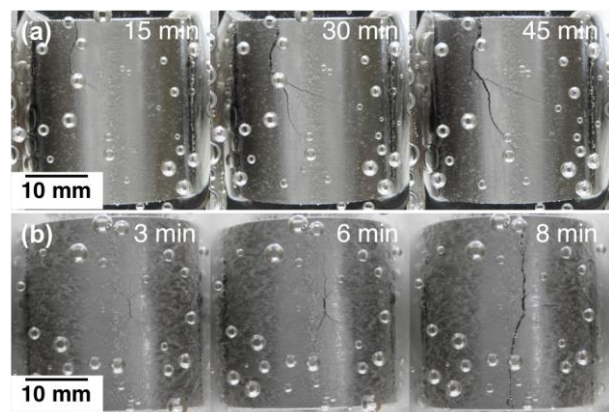


図 3-2.6.7-74 U 曲げ試験片の水素脆化によるき裂発生と進展挙動。(a)  $300 \text{ A m}^{-2}$ , (b)  $30 \text{ A m}^{-2}$

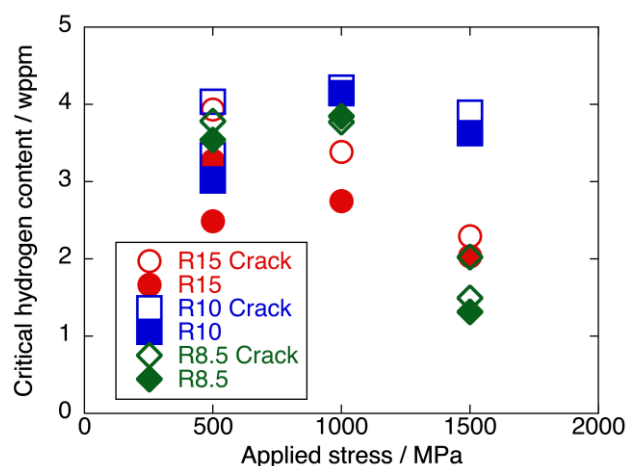


図 3-2.6.7-75 U 曲げ加工部を用いた限界水素量と負荷応力の関係

る)しかし、負荷応力 1500 MPa では  $R = 15 \text{ mm}$  の水素脆化感受性が  $R = 10 \text{ mm}$  よりも高くなり、負荷応力 500 MPa の場合と逆転した結果となり、加工ひずみ量に依存しない結果となった。図 3-2.6.7-75 の結果では加工ひずみを増加させると水素脆化感受性が低下する結果だったが、無ひずみ部の水素量（水素チャージ条件）で水素脆化特性を評価すると加工ひずみ（曲げ半径）に依存しない結果を得た。環境で入る水素量を考慮する場合、水素侵入強度（水素チャージ条件）で評価する方法が妥当であると考えられた。

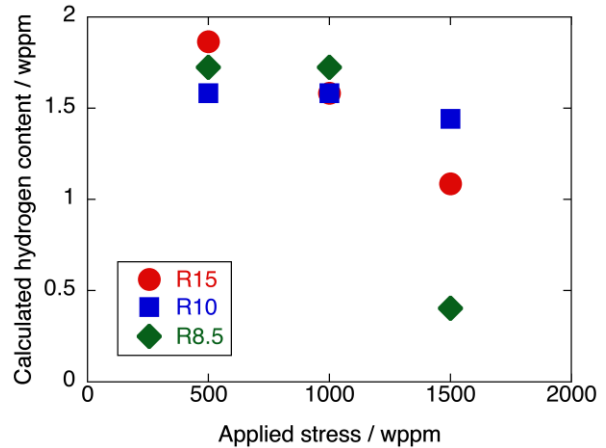


図 3-2.6.7-76 無ひずみ部を用いた推定限界水素量と負荷応力の関係

(2-2)U 曲げ試験片の水素脆化破壊機構の解明<sup>3)</sup>

1470 MPa 級焼戻しマルテンサイト鋼から作製した U 曲げ試験片の水素脆化挙動を詳細に検討するため、U 曲げ水素脆化試験後の破面観察、および縦断面のき裂観察を行った。図 3-2.6.7-77 に曲げ半径  $R = 10 \text{ mm}$ 、負荷応力 1000 MPa で水素脆化試験を行ったあとの破面写真を示す。U 曲げ試験片は板厚方向の中央部付近で粒界破壊を発生し（図 3-2.6.7-77(c)）、U 曲げ外側表面付近では Shear Lip が観察された（図 3-2.6.7-77(b)）。また、図 3-2.6.7-77(d)のように擬へき開破壊と粒界破壊の混合した破面を示した領域も確認された。図 3-2.6.7-78 に U 曲げ試験片の水素脆化試験後の縦断面のき裂観察結果を示す。U 曲げ試験条件は曲げ半径  $R = 10 \text{ mm}$ 、負荷応力 1000 MPa である。破断部以外でも板厚方向の中央部から少し外側でき裂が観察された。破面観察結果、および縦断面のき裂観察結果より、U 曲げ試験片の水素脆化き裂は試験片板厚方向の中央部付近で発生したことが示唆された。

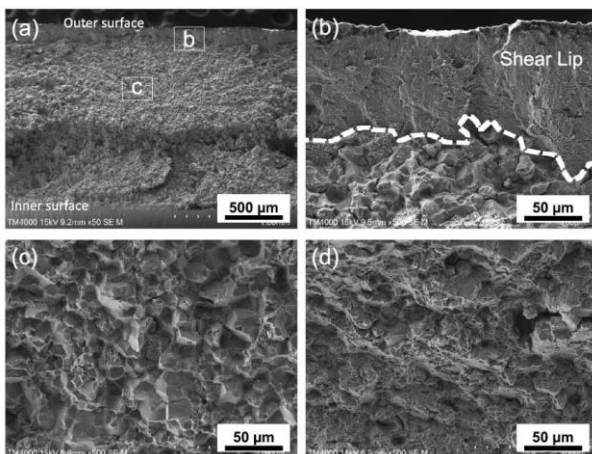


図 3-2.6.7-77 曲げ半径  $R = 10 \text{ mm}$ 、負荷応力 1000 MPa の U 曲げ試験片の水素脆化試験後の破面

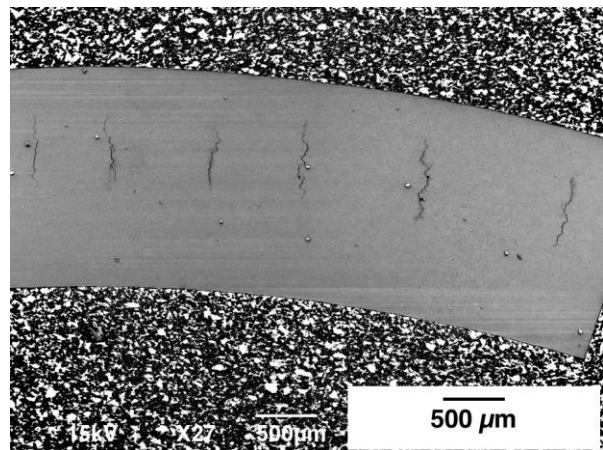


図 3-2.6.7-78 曲げ半径  $R = 10 \text{ mm}$ 、負荷応力 1000 MPa の U 曲げ試験片の水素チャージ後の縦断面観察写真



U 曲げ試験片の応力分布、塑性ひずみ分布を詳細に解析するために、放射光 X 線回折法による応力測定、および有限要素法 (FEM) による応力、ひずみ解析を行った。放射光 X 線回折測定は、SPring-8 のビームライン BL14B1 にて白色 X 線と Ge 検出器を用いて行った。入射側の X 線は高さ 50  $\mu\text{m}$ 、幅 300  $\mu\text{m}$  に、透過側は 500  $\mu\text{m}$  に整形され、透過 X 線は 50-200  $\mu\text{m}$  のコリメータにより制限された。また、回折角は  $10^\circ$  に設定し、U 曲げ試験片の長手方向の弾性ひずみを測定した。X 線測定は板厚方向に 0.1 mm 間隔で 20 点の測定を行った。測定した X 線回折プロファイルより、 $\alpha$ -Fe321 回折ピークを用いてガウスフィッティングを行い、回折ピーク中心を求めて格子面間隔を計算した。U 曲げ加工、およびボルト締めによって生じた弾性ひずみは無ひずみ状態の格子面間隔  $d_0$ 、および U 曲げ加工、ボルト締めした試験片の格子面間隔  $d$  より次式(1-1)を用いて計算した。

$$\varepsilon = (d - d_0) / d_0 \quad (1-1)$$

有限要素 (FE) 法による弾塑性解析は商用ソフトウェアである Abaqus/Standard (Dassault Systèmes Co.) の静的陰解法ソルバーを使用した。2次元平面ひずみ状態を仮定し、要素の形状とサイズは 50  $\mu\text{m}$   $\times$  50  $\mu\text{m}$  の 2次元四辺形要素とした。加工硬化挙動は供試鋼の引張試験より得られた真応力-真ひずみ線図を最小二乗法により近似し、スイフト則によって予測した。全要素数、および節点数は 64000、および 66033 として解析を行った。また、U 曲げ試験片と押込み棒の間の摩擦係数は 0.1 とした。

図 3-2.6.7-79 に放射光 X 線回折測定、および FEM 解析によって求めた曲げ半径  $R = 10 \text{ mm}$  で U 曲げ加工のまま、および 1000 MPa の応力付与後の U 曲げ試験片の弾性ひずみ分布を示す。X 線回折測定、FEM 解析とも、同様の弾性ひずみ分布が得られた。なお、板厚方向の中央部付近では、 $\alpha$ -Fe321 回折ピークは引張と圧縮の 2つの回折ピークが重なっていたため、その範囲では引張と圧縮の弾性ひずみ成分を分けてプロットしている。U 曲げ加工のままの試験片では、板厚方向の U 曲げ外側表面付近で圧縮、内側で引張の大きな弾性ひずみがみられ、U 曲げ外側の弾性ひずみは板厚中央部に向かって線形に上昇した。これは、U 曲げ加工時のスプリングバックによるものと考えられる。また、板厚中央部のわずかに外側では大きな引張、内側では大きな圧縮の弾性ひずみを有し、板厚中央部付近では弾性ひずみが大きく変化したことが確認された。板厚中央部のわずかに外側ではもっとも高い引張の弾性ひずみがみられた。U 曲げ試験片に 1000 MPa の応力を付与すると、U 曲げ外側表面の弾性ひずみは上昇し、内側表面付近は低下して、板厚中央部に向かって弾性ひずみ勾配が小さくなった。なお、板厚中央部付近の引張、および圧縮の弾性ひずみの大きさ、および位置は U 曲げままのものと比較してほとんど変化はみられなかった。

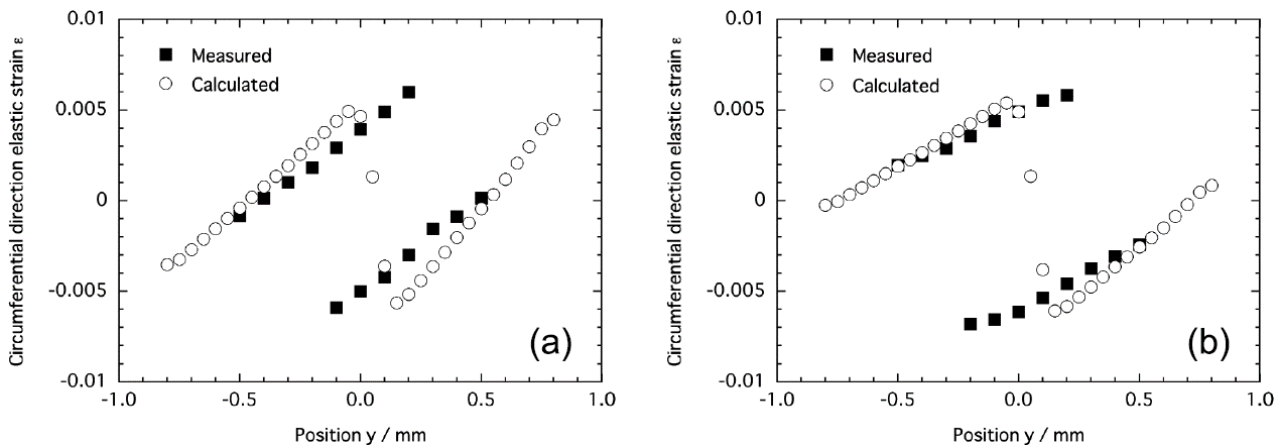


図 3-2.6.7-79 放射光 X 線回折測定，FEM 解析によって求めた (a) 曲げ半径  $R = 10 \text{ mm}$  の U 曲げ加工まま試験片，(b) 1000 MPa の応力付与した U 曲げ試験片の弾性ひずみ分布

図 3-2.6.7-80 に 1000 MPa のボルト締め後の U 曲げ試験片の長手方向応力、最大主応力、静水圧応力および相当塑性ひずみ分布の FEM 解析結果を示す。最大主応力、の長手方向の最大応力、および静水圧応力は板厚中央部からわずかに外側に存在した。一方、最大相当ひずみは U 曲げ外側、および内側の両表面付近で確認された。図 3-2.6.7-77、および図 3-2.6.7-78 で示した破面観察結果、および縦断面のき裂観察結果と最大主応力、および長手方向の最大応力を比較すると、水素脆化き裂の発生は最大主応力、および長手方向の応力が最大の位置と一致したため、水素脆化き裂の発生は最大主応力、および長手方向の最大応力が主な要因であると考えられた。さらに、き裂発生位置の静水圧応力は高いため、水素の応力誘起拡散により水素が集積したこともき裂発生に影響したと考えられた。

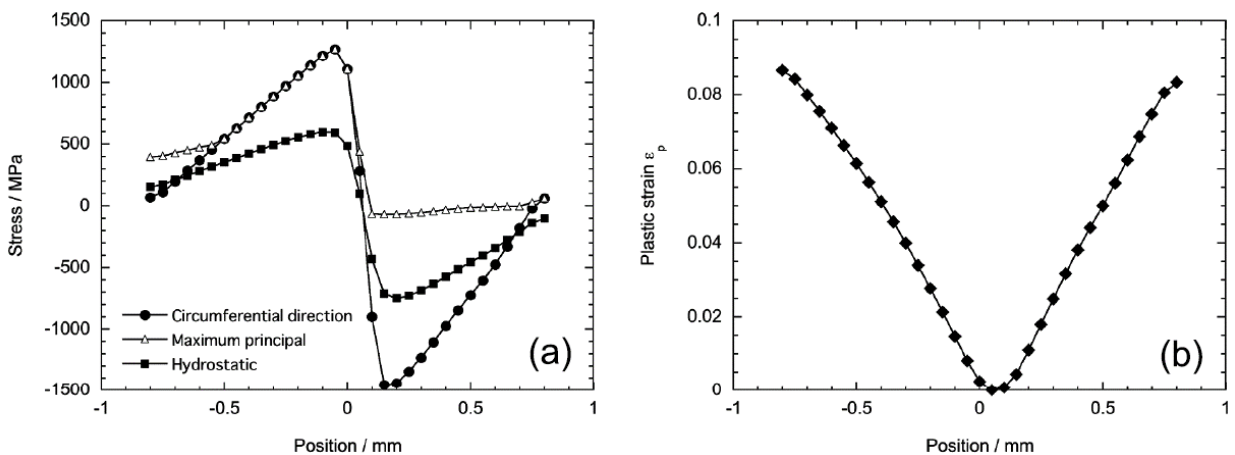


図 3-2.6.7-80 1000 MPa のボルト締め後の U 曲げ試験片の (a) 長手方向応力，最大主応力，静水圧応力，(b) 相当塑性ひずみ分布の FEM 解析結果

### (2-3)フェライト - マルテンサイト複合組織鋼 (Dual Phase: DP 鋼) の U 曲げ水素脆化試験

DP 鋼は軟質相としてフェライト相、硬質相としてマルテンサイト相からなる高強度鋼板であり、フェライト相が変形を担うため、先の焼戻しマルテンサイトとは変形、破壊挙動が異なると考えられる。本研究で提案した U 曲げ水素脆化試験によって DP 鋼の水素脆化特性も適切に評価可能であることを明らかにするため、DP 鋼を用いて先の実験と同様の方法で U 曲げ水素脆化試験を行った。

図 3-2.6.7-81 に DP 鋼の U 曲げ試験片の水素チャージ時の電流密度と負荷応力の関係を示す。電流密度の変化は U 曲げ試験片に導入される水素量の変化に相当する。電流密度  $1 \text{ A/m}^2$  では  $2000 \text{ MPa}$  の負荷応力で水素脆化割れが発生したが、電流密度を  $10 \text{ A/m}^2$  に上昇すると、 $1000 \text{ MPa}$  の負荷応力でも水素脆化割れが発生した。図 3-2.6.7-82 に DP 鋼の水素脆化破壊後の破面観察

結果を示す。DP 鋼も焼戻しマルテンサイト鋼と同様に水素脆化破壊起点は粒界破壊を生じた。水素脆化破壊起点は低負荷応力の条件では板厚方向の中央部に近い位置であったが、負荷応力が高くなるにしたがって水素脆化破壊起点が表面付近に移動し、 $2000 \text{ MPa}$  の高負荷応力では表面近傍で水素脆化き裂が生じた。DP 鋼も焼戻しマルテンサイト鋼と同様に、本手法を用いて水素脆化特性を適切に評価可能であることが明らかとなった。

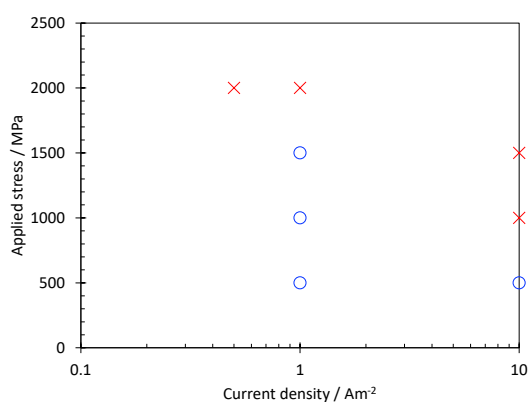


図 3-2.6.7-81 DP 鋼の水素脆化破壊発生に及ぼす電流密度と負荷応力の関係 (曲げ半径  $R = 10 \text{ mm}$ ,  $3 \text{ wt\% NaCl} + 0.3 \text{ g L}^{-1} \text{ NH}_4\text{SCN}$ )

### (2-4)水素脆化試験中の水素チャージ液の特性変化<sup>4)</sup>

水素脆化試験中に水素チャージ条件が変化することが懸念されている。ここでは、水素チャージ試験中の水素チャージ液の特性変化を明らかにするため、水素チャージ溶液変化に及ぼす  $\text{NH}_4\text{SCN}$  添加の影響、および長時間水素チャージの影響を調査した。純鉄に  $1173 \text{ K} \times 900 \text{ s}$  の焼鈍とその後の室温までの空冷を施し供試鋼とした。このサンプルを  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  に切断し、耐水研磨紙で研磨後、電解研磨を施した。電解研磨後の板厚は  $0.35 \text{ mm}$  とした。この試料に Watt 浴、電流密度  $-30 \text{ A/m}^2$ 、 $333 \text{ K} \times 180 \text{ s}$  で Ni めつ

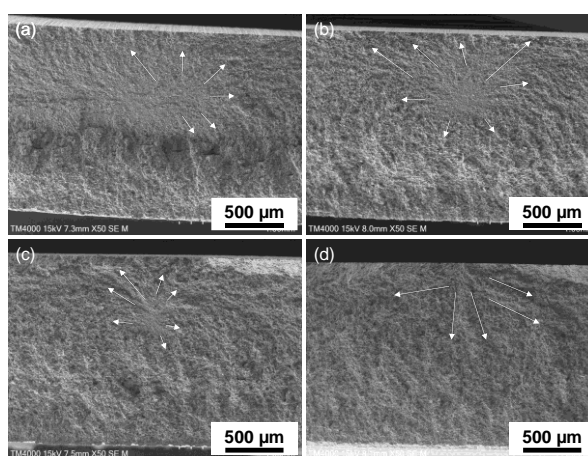


図 3-2.6.7-82 DP 鋼の水素脆化破壊後の破面

きを施した。Niめっきの厚さは180 nmと見積られた。

水素透過試験の水素透過電流はDS法により測定した。純鉄のサンプルはNiめっきした側を水素検出側としてDSセルに設置した。水素侵入側、透過側の有効面積は $3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ であった。白金線とHg/HgO電極は対極、および参照電極として水素検出側のDSセルにセットした。水素検出側のDSセルの水溶液は1.0 mol/L NaOHとした。Niめっきされた純鉄は+0.1 V vs. Hg/HgOの定電位で分極した。分極電流密度が $1.0 \text{ A/m}^2$ よりも低くなったとき、水素透過試験を開始した。

水素侵入側のDSセルでは、白金線を対極として用い、Ag/AgCl参照電極、またはHg/HgO参照電極を用いた。また、水素侵入側の水溶液には3 wt.% NaCl水溶液を用い、0-3 g/L  $\text{NH}_4\text{SCN}$ を添加した。純鉄表面の分極電位は-0.5~-1.6 V vs. SSEに変化させ、それぞれの分極電位で2、または150時間保持した。

図3-2.6.7-83 分極電位と水素侵入電流密度、および水素透過電流密度の関係と $\text{NH}_4\text{SCN}$ 添加量の影響を示す。酸素還元反応により-0.9 V以上の分極電位では拡散限界電流領域がみられたが、-0.9 Vよりも卑な電位では水素侵入電流密度が上昇する傾向がみられた。 $\text{NH}_4\text{SCN}$ の濃度によらず、電位が卑化すると、水素透過電流密度は増加するが、およそ-1.2 V vs. SSEより卑な電位では、水素透過電流密度は一定となった。また、 $\text{NH}_4\text{SCN}$ の濃度が高くなるほど、水素透過電流密度は大きくなり、 $\text{NH}_4\text{SCN}$ の添加によって、水素侵入反応が促進された。

図3-2.6.7-84は、種々の電位で定電位分極したときの(a)水素導入側のカソード電流と(b)水素透過電流の経時変化である。まず、水素導入側のカソード電流は、電位の卑化にともない増加した。また、-0.9 Vから-1.3 Vに分極した場合には、カソード電流は時間によらずほぼ一定であったが、-1.6 Vに分極した場合には時

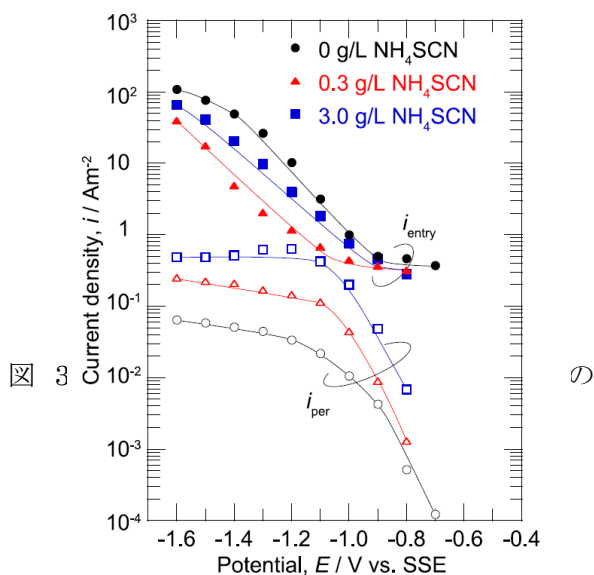


図 3-2.6.7-83 0, 0.3, 3 g/L  $\text{NH}_4\text{SCN}$  の NaCl 溶液を用いた分極電位と水素侵入電流密度、水素透過電流密度の関係

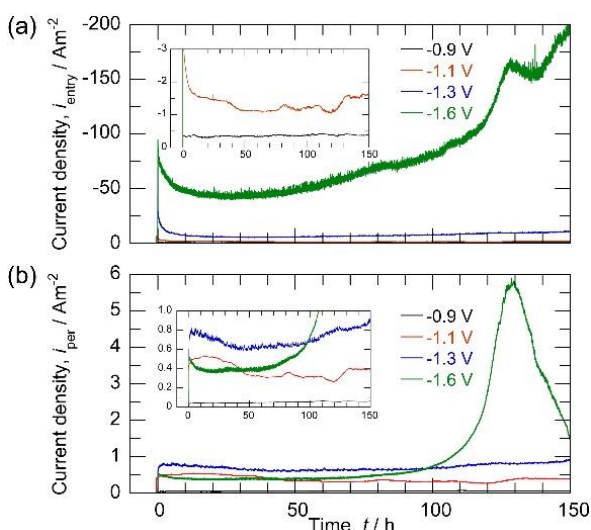


図 3-2.6.7-84 種々の電位で定電位分極したときの(a)水素導入側のカソード電流と(b)水素透過電流の経時変化

間とともに増加した。次に、水素透過電流は、-0.9 V から-1.3 V に分極した場合には、電位の卑化とともに増加し、時間によらずほぼ一定であった。しかし、-1.6 V に分極した場合の水素透過電流は、はじめは-1.1 V に分極した場合の電流値と同程度であり、分極開始 100 時間程度から大きく増加し、その後減少した。このように、分極条件が-1.3 V よりも貴な電位では長時間安定して水素を導入することができるが、-1.6 V で分極した場合には時間とともに水素導入量が大きく変化するので、水素導入には適さないことがわかった。

### (3) 参考文献

- 1) Y. Shibayama, T. Hojo and E. Akiyama: *Tetsu-to-Hagané*, **105** (2019), 927.
- 2) Y. Shibayama, T. Hojo and E. Akiyama: *ISIJ Int.*, **61** (2021), 1104.
- 3) Y. Shibayama, T. Hojo, M. Koyama, H. Saitoh, A. Shiro, R. Yasuda, T. Shobu, T. Matsuno and E. Akiyama: *ISIJ Int.*, **61** (2021), 1322.
- 4) S. Ajito, T. Hojo, M. Koyama and E. Akiyama: *ISIJ Int.*, **61** (2021), 1209.

## 【西神分室 再委託 豊橋技術科学大学】

### (1) 背景及び目的

自動車の燃費を改善させるために軽量化が必要になると同時に衝突安全性の向上も望まれており、高強度鋼板が自動車部材として採用されるようになってきた。重量を低減または維持して自動車部材の強度を増加させるためには鋼板の高強度化が必要になる。車体の骨格部材は衝突時の安全を確保するものであり高強度化が望まれており、自動車重量の 20% 程度を占めるため、骨格部材への高強度鋼板の使用が増加する傾向にある。

鋼板の引張強さが増加して 1000 MPa を超える超高張力鋼板も一般的に使われるようになり、比強度がアルミニウム合金板と同等以上になってきている。鋼板の価格はアルミニウム合金板の 1/5 程度と低く、比強度が増加すると高強度鋼板の使用率が高まる。日本車の骨格部材では鋼板が主流であり高強度鋼板の比率が増加しており、欧米車においてもオールアルミニウム製骨格部材がなくなり、高強度鋼板の使用が増えている。最近自動車のマルチマテリアル化が注目されているが、実際には高強度鋼板の適用が増加している。

高強度鋼板の強度が増加して、成形部材としては高特性を有する一方で、プレス成形がますます困難になってきている。980 MPa 級超高張力鋼板が一般的に使われるようになってきて、1180 MPa 級鋼板の適用も増加しており、1500 MPa 級鋼板も実用化されている。1500 MPa 級鋼板は現在ロール成形でバンパー等に成形されているが、プレス成形での試作も始まっている。高強度鋼板では強度が高く延性が低く、特に超高張力鋼板の冷間プレス成形は容易ではない。成形荷重は大きく、スプリングバックも大きくなるため形状凍結性が低く、成形性も低く、金型摩耗が顕著になり焼付きも生じやすい。プレス成形だけでなく、せん断加工も同様に困難になってきている。延性が低いため端面のせん断面が少なくなると破断面が増加し、表面性状、精度が低下する。せん断面はパンチと接触する平滑な面であるが、破断面はクラックが進展した

粗い表面である。また、接触面圧が高くなって、金型が損傷しやすくなっており、割れ、カケ、摩耗などの欠陥が生じやすい。

水素ぜい化遅れ破壊は水素の拡散によって時間を経過した後に塑性変形を生じることなしに脆性的に破壊する現象である。遅れ破壊は鋼材が高強度化すると生じやすくなり、高強度鋼ボルトで問題になっていたが、鋼板強度が増加して超高張力鋼板でも遅れ破壊の危険性が高まり、1500 MPa 級超高張力鋼板の冷間プレス成形では遅れ破壊が大きな問題になる。図 3-2.6.7-85 に示すように、超高強度薄鋼板は打ち抜かれてプレス成形され、トリミング、穴抜き加工を経て部材になり、部材は溶接されて自動車の骨格部材に組み立てられる。自動車を長期に使用していると水素が侵入し、打ち抜かれた鋼板の端面は大きな塑性変形、高い引張残留応力などをに受けているために、水素脆化割れを生じる危険性が高い。

本研究開発では、超高強度薄鋼板の打ち抜きブランク端面の水素脆化割れの影響因子を明確化した。

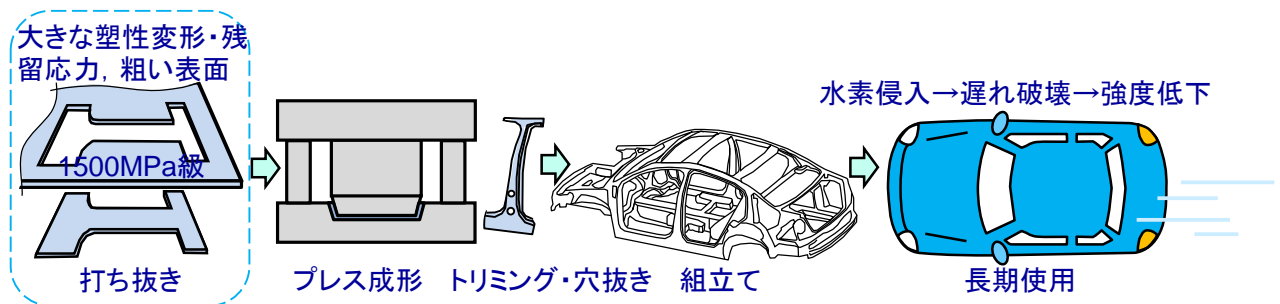


図 3-2.6.7-85 超高張力鋼板を用いた自動車骨格部材の製造

## (2) 実験方法および結果

表 3-2.6.7-6 に示す 1500 MPa 超高張力鋼板が引張試験片形状に打ち抜き加工およびレーザー切断され、打ち抜き加工に用いた金型を図 3-2.6.7-86 に示す。パンチの寸法を変更することにより、クリアランスを板厚で除したクリアランス比  $c$  は 6%であった。パンチおよびダイスは SKD11 を焼入れしたものであり、パンチの平均速度は 192 mm/s であった。

打ち抜き加工およびレーザー切断されたブランク端面の表面と断面を図 3-2.6.7-87 に示す。超高張力鋼板では、端面のせん断面は小さく破断面は大きく、かえりは生じていなくだれも小さい。レーザー切断では、熔融による縦しまが現れている。打ち抜き加工では、端面にクラックが発生していない。

表 3-2.6.7-6 1500 MPa 超高張力鋼板の機械的特性

鋼板	板厚	引張強さ	伸び	絞り
[MPa]	[mm]	[GPa]	[%]	[%]
1500	1.63	1.503	7.7	48

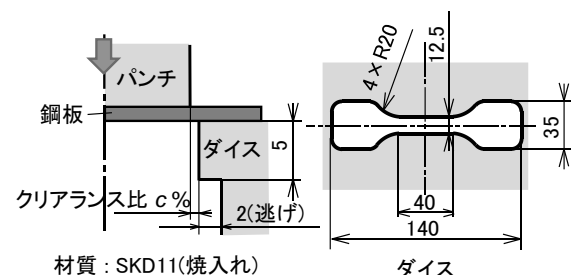


図 3-2.6.7-86 超高張力鋼板の打ち抜き加工に用いた金型

打ち抜き加工およびレーザー切断されたブランクの端面における X 線回折法によって測定された残留応力分布を図 3-2.6.7-88 に示す。打ち抜き加工されたブランク端面の板厚方向残留応力は、長手方向応力よりも大きく、引張強さよりも大きな値になっている。一方、レーザー切断されたブランク端面では、残留応力は小さく、板厚方向の残留応力は圧縮になっている。

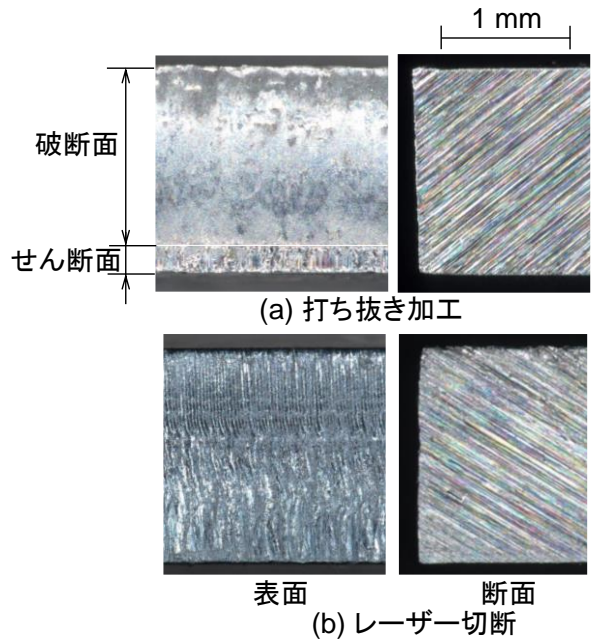


図 3-2.6.7-87 打ち抜き加工およびレーザー切断されたブランク端面の表面と断面

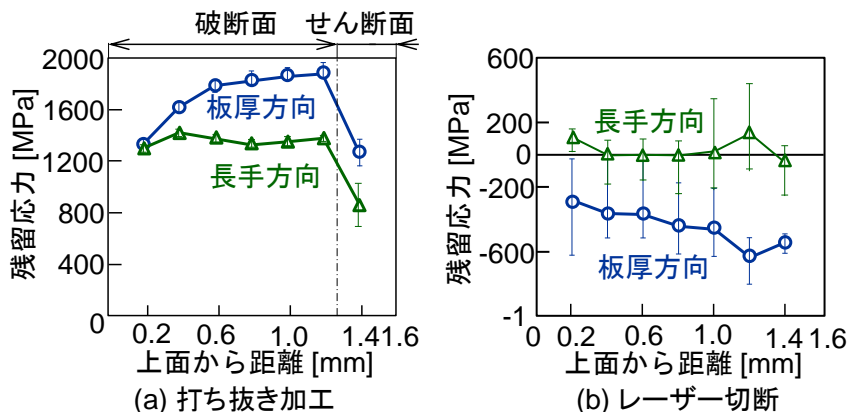


図 3-2.6.7-88 打ち抜き加工およびレーザー切断されたブランクの端面における残留応力分布

打ち抜き加工およびレーザー切断されたブランクの端面付近におけるビッカース硬さ分布を図 3-2.6.7-89 に示す。打ち抜き加工されたブランクの端面では大きなせん断変形によって、レーザー切断されたブランクの端面で急冷によってそれぞれ硬さが大きく上昇しており、レーザー切断されたブランクの端面の硬さは打ち抜きよりも大きい。

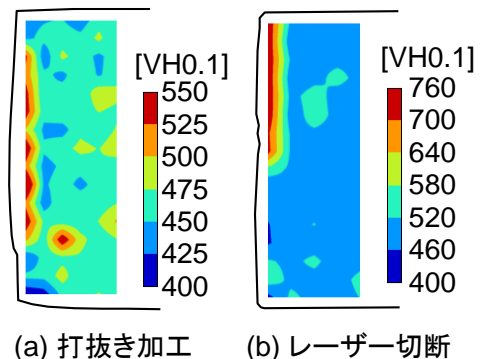


図 3-2.6.7-89 打ち抜き加工およびレーザー切断されたブランクの端面付近におけるビッカース硬さ分布

打ち抜き加工されたブランクの端面における表面粗さ分布を図 3-2.6.7-90 に示す。表面粗さはほぼ一定であり、レーザー切断された端面の粗さは  $10.2 \mu\text{m}$  と大きかった。

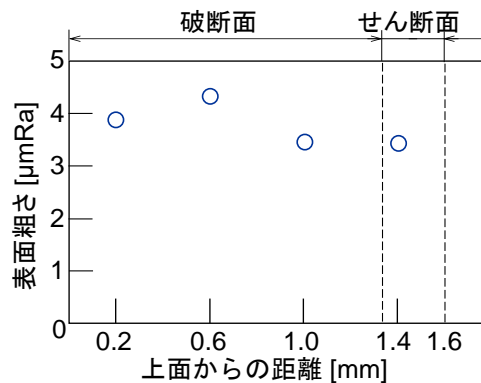


図 3-2.6.7-90 打ち抜き加工されたブランクの端面における表面粗さ分布

### (2-2) 打ち抜き加工されたブランクの遅れ破壊および強度結果

遅れ破壊を調査するために、陰極水素チャージ試験を行った。電極は直径  $0.3 \text{ mm}$  の白金線をリング状にしたものであり、作用電極に銀塩化銀参照電極を使用し、 $3\% \text{ NaCl} + 0.75 \text{ g/L NH}_4\text{SCN}$  溶液中で  $-1.0 \text{ V}$  の電位を試験片に印加した。溶液温度は  $30\text{--}35 \text{ }^\circ\text{C}$  に固定し、溶液から取り出した試験片を水洗いした後、切口面に発生した  $0.2 \text{ mm}$  以上のクラックを目視で観察して遅れ破壊を評価した。

打ち抜き加工およびレーザー切断されたブランクの水素チャージ前後の端面を図 3-2.6.7-91 に示す。ここで、 $T$  は水素チャージ時間であり、 $T = 0 \text{ h}$  は水素チャージ前の端面である。打ち抜き加工では、クラックが  $T = 3 \text{ h}$  において板厚中央部付近である破断面で発生し、長手方向に沿って進展している。これは図 3-2.6.7-88(a) に示すように、板厚方向の引張残留応力が高い部分である。また、レーザー切断では図 3-2.6.7-88(b) に示すように圧縮残留応力によって  $T = 24 \text{ h}$  でも遅れ破壊は発生しなかった。遅れ破壊の発生は引張残留応力に大きく影響される。一方、図 3-2.6.7-89、3-2.6.7-90 に示すように、硬さおよび表面粗さの小さい打ち抜き加工ではクラックが発生したため、打ち抜き加工のような大きなせん断変形を受ける加工においては遅れ破壊に及ぼす硬さ及び表面性状の影響は小さい。クラックは高い引張残留応力によって生じた。

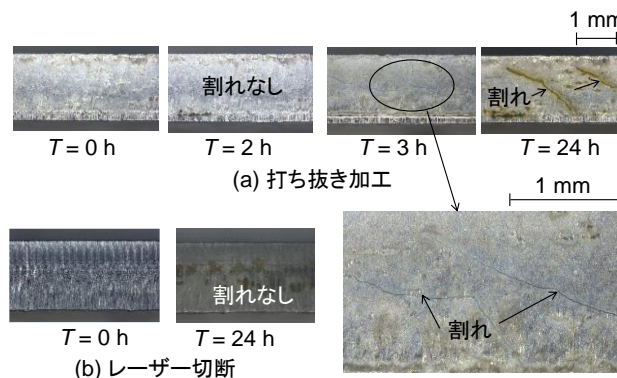


図 3-2.6.7-91 打ち抜き加工およびレーザー切断されたブランクの水素チャージ前後の端面



水素チャージされたブランクの静的引張試験から測定された引張強さと全伸びを図 3-2.6.7-92 に示す。水素チャージした後 2 h 以内に引張試験を行い、試験中は水素チャージを行っていない。打ち抜き加工では、24 h の試験片ではクラックが入っているが引張強さの低下は少ないが、伸びは大きく減少している。水素脆化は強度には影響しないが、延性を大きく低下させる。レーザー切断では、水素チャージの伸びの低下は小さい。

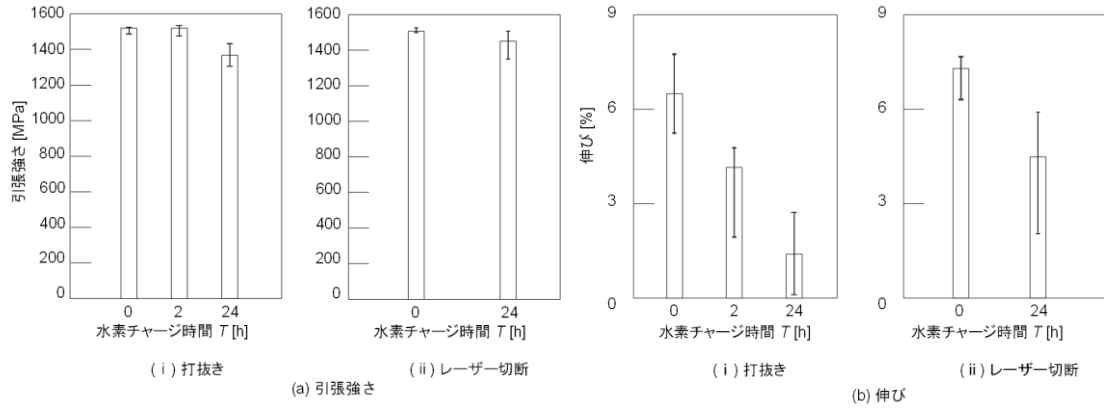


図 3-2.6.7-92 水素チャージされたブランクの静的引張試験から測定された引張強さと全伸び

水素チャージされたブランクの引張疲労試験結果を図 3-2.6.7-9 に示す。40 Hz の周波数で最大  $10^7$  回まで片振り引張疲労試験を行った。水素チャージした後 2 h 以内に疲労試験を行い、試験中は水素チャージを行っていない水素の放出を防ぐ対策は行わなかった。応力  $\sigma = 1000$  MPa において、打ち抜き加工では  $T = 24$  h の疲労強度は  $T = 0$  h と比べて破断までの繰返し数が最大で約 72%減少しており、鋼板切口に生じるクラックと水素脆化の影響である。また、打ち抜き加工では水素チャージをした場合としていない場合のどちらもレーザー切断よりも低い強度を示している。打ち抜き加工では、端口面に生じる引張残留応力によって疲労強度が低下した。

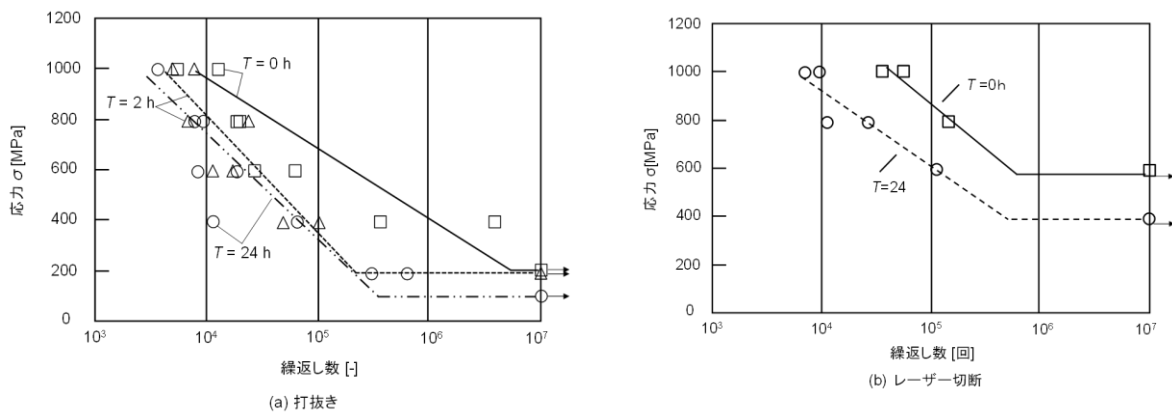


図 3-2.6.7-93 水素チャージされたブランクの引張疲労試験結果

### (2-3) 打ち抜きブランク端面の水素脆化遅れ破壊の評価方法

打ち抜きブランク端面の水素脆化遅れ破壊の評価方法を図 3-2.6.7-94 に示す。打ち抜かれたブランクを引張試験してひずみを与え、水素チャージ遅れ破壊試験を行って

クラック発生の有無を観察した。打ち抜かれたブランクの端面には引張残留応力が作用してクラックが生じるが、ブランクを引張試験すると引張残留応力が低下してクラックの発生が防止され、クラックが発生しない限界の引張残留応力が求まる。水素チャージ時間を変化させると拡散水素量が増加し、限界引張残留応力と拡散水素量の関係が求まる。この関係が求まると、ある拡散水素量に対して打ち抜きにおける限界の引張残留応力が得られることになる。また、打ち抜きブランクは引張り試験片の形状をしており、静的引張り試験および疲労試験を行うことができ、静的および疲労強度を測定できる。

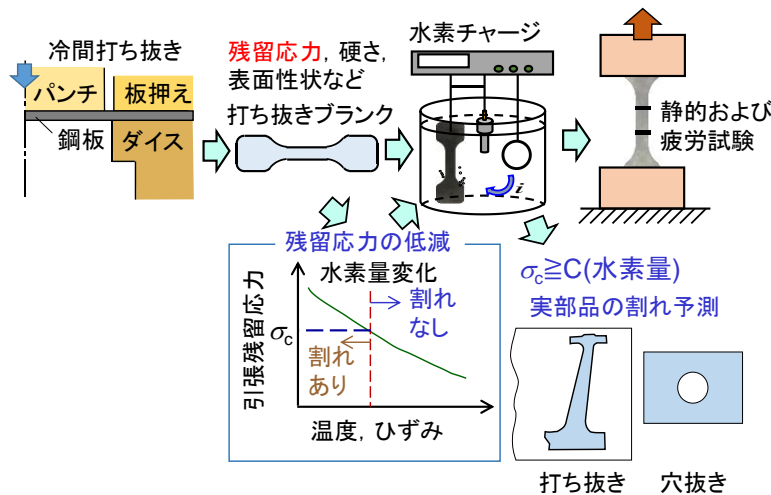


図 3-2.6.7-94 打ち抜きブランク端面の水素脆化遅れ破壊の評価方法

打ち抜かれたブランクに引張試験して水素チャージ遅れ破壊試験を行うと限界引張残留応力が求まり、それを水素チャージ時間を変えて行うと、図 3-2.6.7-95 に示す打ち抜きブランク端面の限界引張残留応力と拡散水素量の関係が求まる。拡散水素量の増加とともに限界引張残留応力が減少している。新しい鋼板が開発されると、図 3-2.6.7-94 の評価方法から図 3-2.6.7-95 を求めることができ、打ち抜き加工における限界の引張残留応力が求まることになる。

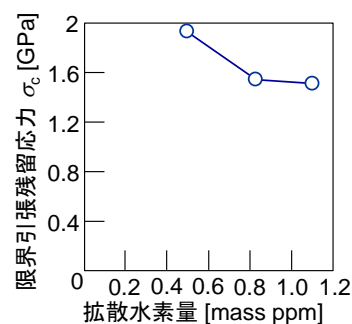


図 3-2.6.7-95 打ち抜きブランク端面の限界引張残留応力と拡散水素量の関係

#### (2-4) 超高強度薄鋼板の穴抜き加工

各種鋼板を直径 10 mm のパンチでクリアランス比 10% で穴抜き加工を行った。1180 MPa 鋼板の厚さは 1.2 mm であり、それ以外の鋼板の厚さは 1.6 mm であった。穴抜き

加工された各種鋼板の端面と断面を図 3-2.6.7-96 に示す。鋼板強度の上昇とともに、だれとせん断面の割合が減って、破断面の割合が増えている。穴抜き加工では、端面にクラックは発生していない。

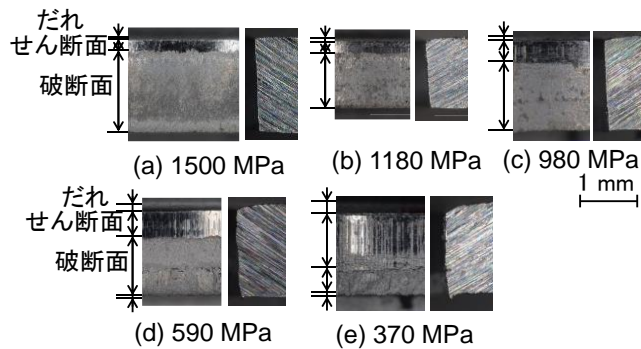


図 3-2.6.7-96 穴抜き加工された各種鋼板の端面と断面

穴抜き加工された各種鋼板の端面における板厚方向残留応力の分布を図 3-2.6.7-97 に示す。残留応力は X 線回折法によって測定され、板厚方向残留応力しか測定できなかった。370 MPa 鋼板では残留応力は小さいが、鋼板強度の増加とともに引張残留応力が高くなっている。1500 MPa 鋼板では打ち抜き加工と同程度の強度を示している。

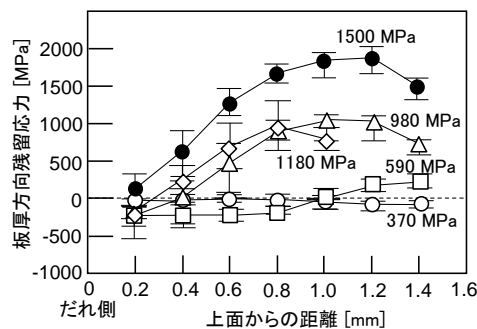


図 3-2.6.7-97 穴抜き加工された各種鋼板の端面における板厚方向残留応力の分布

穴抜き加工された鋼板の陰極水素チャージ試験結果を図 3-2.6.7-98 に示す。980 MPa 鋼板では  $T = 10$  h でもクラックは生じていないが、1180 MPa 鋼板では  $T = 6$  h で 1500 MPa 鋼板では  $T = 1$  h でクラックが発生した。穴抜き加工の遅れ破壊特性は、打ち抜き加工と同様である。

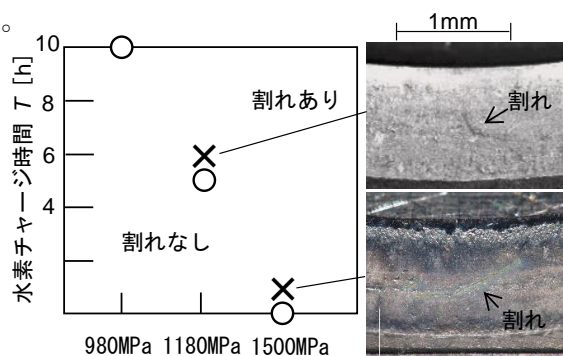


図 3-2.6.7-98 穴抜き加工された鋼板の陰極水素チャージ試験結果

鋼板はプレス成形された後トリミング加工され、塑性変形した鋼板がせん断加工される。トリミング加工された切口面の遅れ破壊特性を調べるために、打ち抜かれた1500 MPa 鋼板の引張試験片を引張試験して5%のひずみを与え、その後穴抜き加工し、穴端面の残留応力を測定して水素チャージ遅れ破壊試験を行った。穴抜き加工された穴の板厚方向残留応力分布を図 3-2.6.7-99 に示す。5%のひずみありとなしの残留応力分布はほとんど同じであり、どちらの試験片の水素チャージ試験においても  $T = 1$  h でクラックが発生した。トリミング加工における端面付近のせん断変形は非常に大きく、プレス成形で受けた塑性変形は残留応力および遅れ破壊の発生にあまり影響を及ぼさない。

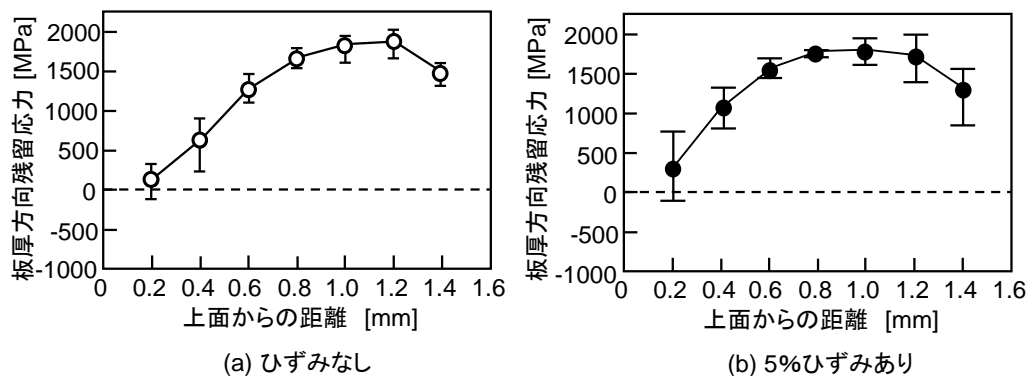


図 3-2.6.7-99 1500 MPa 鋼板に 5%のひずみを与えた後に穴抜き加工したスクラップの残留応力分布

(2-5) プレス成形品の遅れ破壊特性

図 3-2.6.7-100 に示すように、1500 MPa 鋼板をせん断加工し、せん断加工された長さ 180 mm、幅 50 mm の矩形ブランクをハット曲げ加工した。クリアランス比  $c$  は 10%であった。パンチおよびダイスは SKD11 を焼入れしたものであり、パンチの平均速度はせん断加工において 80 mm/s、ハット曲げ成形では 110 mm/s であった。

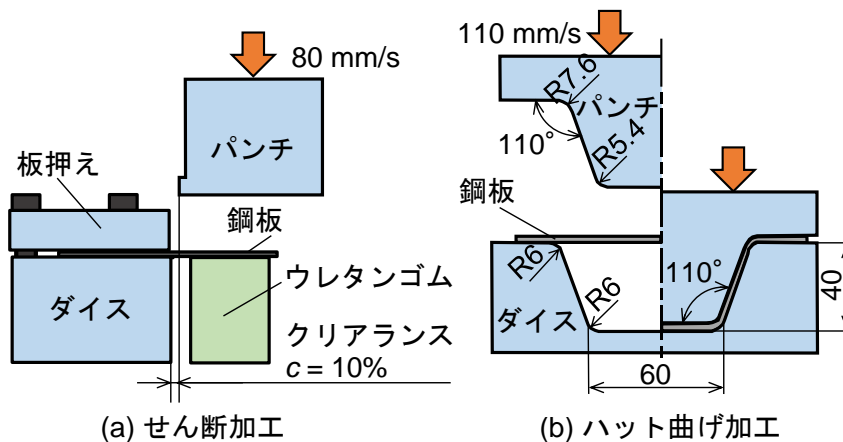


図 3-2.6.7-100 1500 MPa 鋼板のせん断加工とハット曲げ加工

せん断加工後とハット曲げ加工後の端面の板厚方向残留応力分布を図 3-2.6.7-101 に示す。曲げ加工後は高い引張残留応力が作用しているが、曲げられた角部  $c_1$ ,  $c_2$  の残留応力は大きく低下している。一方、曲げ加工においてほとんど塑性変形を受けない平坦部  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  はせん断加工の残留応力が残っており、高い引張残留応力を示している。

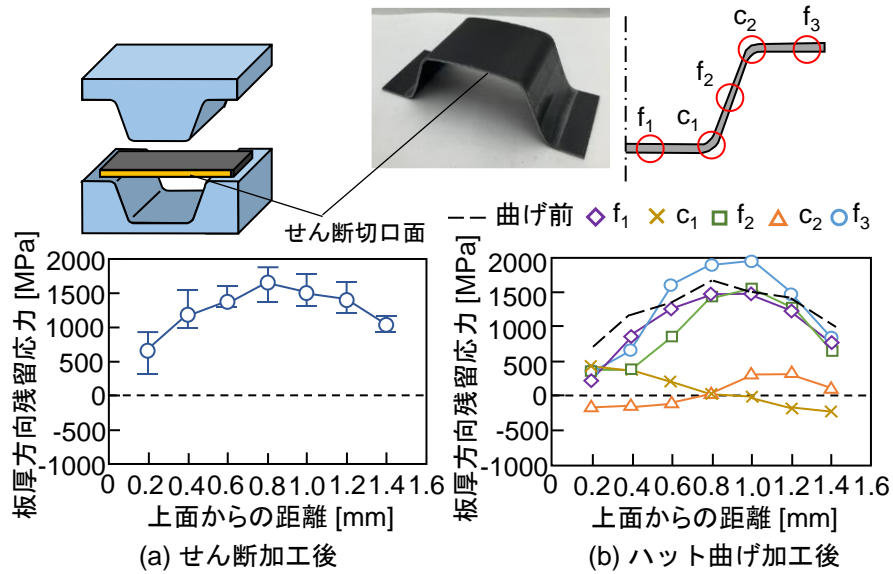


図 3-2.6.7-101 せん断加工後とハット曲げ加工後の端面の板厚方向残留応力分布

せん断加工後とハット曲げ加工後の端面の陰極水素チャージ試験結果を図 3-2.6.7-102 に示す。曲げられた角部  $c_1$ ,  $c_2$  の引張残留応力は大きく低下したためクラックが防止されたが、平坦部  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$  では高い引張残留応力が作用しているためクラックが生じている。遅れ破壊の発生はプレス成形の影響を受ける。

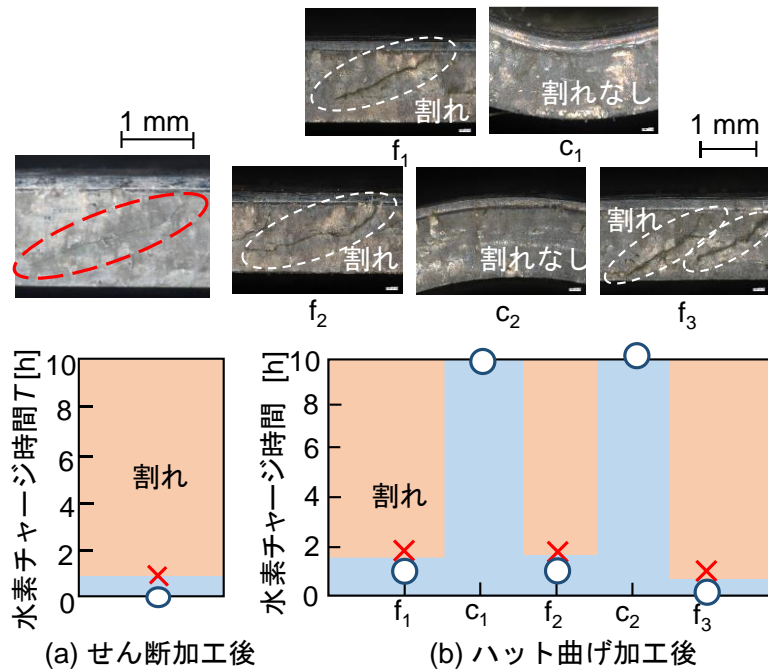


図 3-2.6.7-102 せん断加工後とハット曲げ加工後の端面の陰極水素チャージ試験結果

(2-6) 端面の特性向上

端面の特性を向上させるために、図 3-2.6.7-103 に示すように 1500 MPa 鋼板を穴抜き加工し、その後鋼板を反転させて穴をテーパパンチでしごき加工を行った。図 3-2.6.7-97、3-2.6.7-98 に示すように、穴抜き加工された穴端面には引張残留応力が作用して遅れ破壊が生じるが、しごき加工によって端面の残留応力を低下させた。

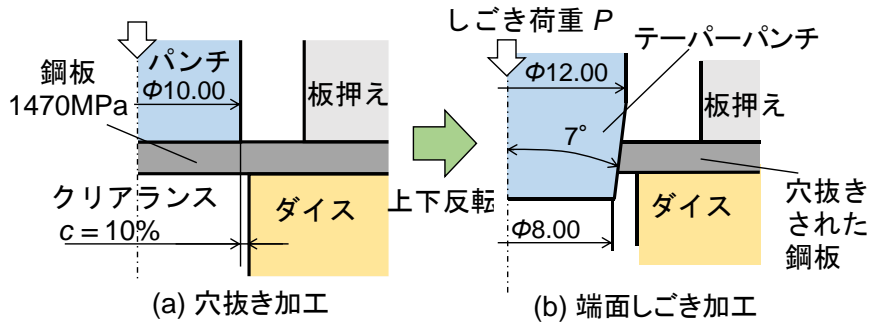


図 3-2.6.7-103 穴抜き加工された端面のしごき加工

穴抜き加工およびしごき加工後の端面と断面を図 3-2.6.7-104 に示す。しごき加工によって破断面がしごき面が変わっており、 $P = 20$  kN では破断面の 80%程度がしごき面になっている。

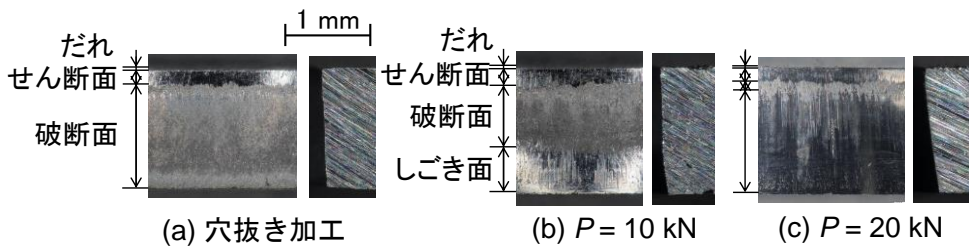


図 3-2.6.7-104 穴抜き加工およびしごき加工後の端面と断面

しごき加工後の端面の板厚方向残留応力分布を図 3-2.6.7-105 に示す。しごき加工によって、穴抜き加工によって生じた高い引張残留応力を低下させることができた。

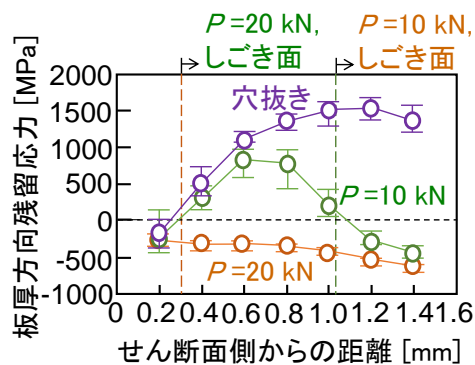


図 3-2.6.7-105 しごき加工後の端面の板厚方向残留応力分布

しごき加工された鋼板の陰極水素チャージ試験結果を図 3-2.6.7-106 に示す。しごき加工によって引張残留応力が低下し、水素チャージを 10 時間行っても遅れ破壊による割れは発生しなかった。

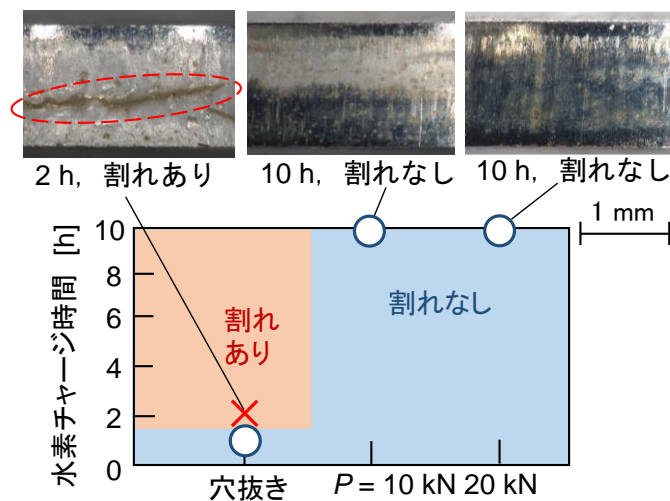


図 3-2.6.7-106 しごき加工された鋼板の陰極水素チャージ試験結果

(2-7) 打ち抜き加工の有限要素シミュレーションおよび高い引張残留応力発生メカニズム

1500 MPa 鋼板の打ち抜き加工では、図 3-2.6.7-88(a) に示すように端部の破断面の引張残留応力がかなり高いのに対し、370 MPa および 590 MPa 鋼板では、図 3-2.6.7-107 に示すように残留応力は低い。

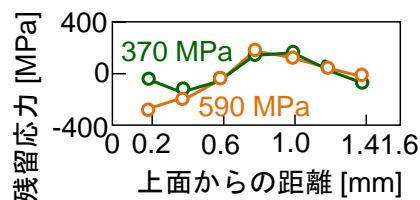


図 3-2.6.7-107 打ち抜かれた 370 MPa および 590 MPa 鋼板の残留応力分布

1500 MPa 鋼板の打ち抜き加工における高い引張残留応力の発生メカニズムを市販ソフトウェア LS-Dyna を用いた有限要素シミュレーションから検討した。打ち抜き加工における鋼板の分離挙動をシミュレーションするためには、クラック発生予測式、クラック伝搬の処理、予測式の材料定数の測定などが必要であるが、これらを満足させることは容易ではない。打ち抜き加工の分離挙動を簡単に扱うために、図 3-2.6.7-108 に示すようにクラックが発生すると瞬間的に進展して鋼板が分離すると近似した。延性の低い 1500 MPa 鋼板の打ち抜き加工では、クラックが急激に進展して鋼板が分離するが、シミュレートされたクラック進展は実際よりも遅れる傾向があるため、瞬間的な分離に近似した。打ち抜き加工において塑性変形を限界ストロークまでシミュレーションした後、瞬間的な分離のために全てのスクラップの要素を除去し、分離直前の応力分布を解放して鋼板内の残留応力分布を計算した。分離境界はパンチとダイスのコーナーを結ぶ直線を想定し、分離後は破断面とした。図 3-2.6.7-87 に示す実験から得られた端部のせん断面から分離の限界ストロークを決定した。打ち抜き加工のシミュレーションでは、平面ひずみ変形を仮定し、鋼板の断面を 4 角形ソリッド要素

に分割した。鋼板は弾塑性体であり、パンチ、ダイス、板押えは剛体とした。

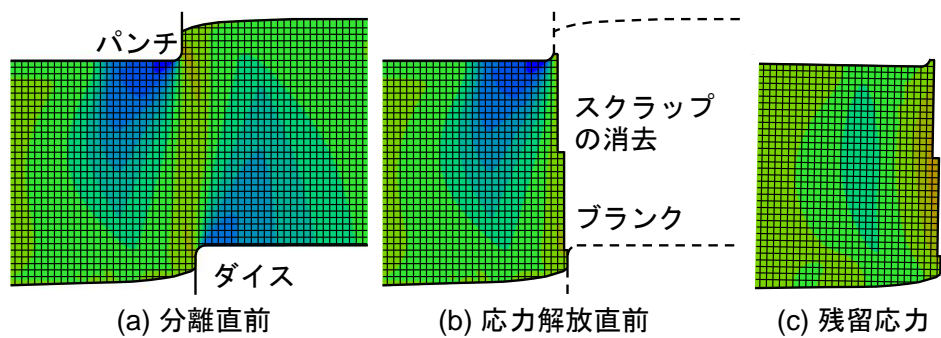


図 3-2.6.7-108 打ち抜き加工のシミュレーションにおける残留応力を計算するための分離の取り扱い

打ち抜き加工の有限要素シミュレーションによって計算された 1500 MPa 鋼板の厚さ方向の分離直前の応力と残留応力の分布を図 3-2.6.7-109 に示す。実験で得られた分離の限界パンチストロークは、1500 MPa 鋼板の延性が低いため、0.3 mm と小さかった。分離直前には分離境界付近に引張応力が発生し、パンチ角部直下の圧縮応力が非常に大きくなる。この応力分布を分離のために解放すると、角部直下の高い圧縮応力が戻って端部が引張られて破断面には高い引張残留応力が残る。

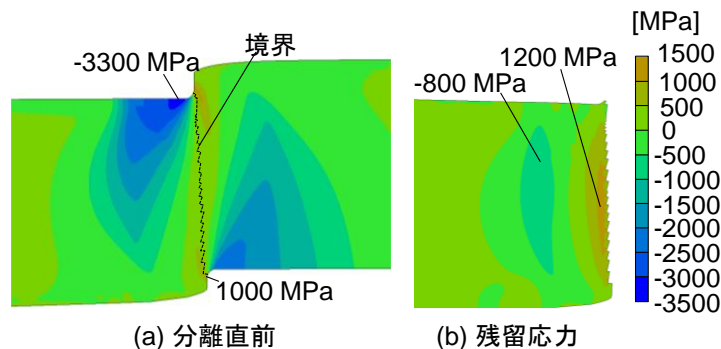


図 3-2.6.7-109 打ち抜き加工の有限要素シミュレーションによって計算された 1500 MPa 鋼板の厚さ方向の分離直前の応力と残留応力の分布

## (2-8) まとめ

1500 MPa 超高強度鋼板を打ち抜き加工したブランク端面の水素脆化遅れ破壊の影響因子を調べ、以下の知見を得た。

- 1) 打ち抜き加工されたブランク端面には、水素チャージ下において高い引張残留応力によって遅れ破壊が生じ、レーザー切断された端面では残留応力は圧縮になって遅れ破壊は生じないため、遅れ破壊は端面の高い引張残留応力によって発生し、硬さ及び表面性状の影響は小さかった。
- 2) 静的引張試験では、引張強さに及ぼす水素チャージの影響は小さかったが、全伸びには大きな影響を及ぼし、全伸びの低下は打ち抜き加工の方がレーザー切断よりも大きかった。



- 3) 疲労強度に及ぼす水素チャージの影響は大きく、その低下は打ち抜き加工の方が大きかった。
- 4) 打ち抜きブランク端面の水素脆化遅れ破壊の評価方法を開発し、打ち抜きブランク端面の限界引張残留応力と拡散水素量の関係を求めることができた。
- 5) 穴抜き加工の遅れ破壊特性は打ち抜き加工と同様であり、トリミング加工では成形における塑性変形の影響は小さかった。
- 6) せん断加工されたブランクをハット曲げ加工すると、端面において曲げられた角部付近の引張残留応力は大きく低下して、遅れ破壊が防止された。
- 7) 穴抜き加工された穴端面をテーパーパーンチでしごき加工すると、引張残留応力が大きく低下して遅れ破壊が防止された。
- 8) 打ち抜き加工では、クラック発生直前のパンチ角部直下の非常に高い圧縮応力が解放されて端部が引張られて、破断面に高い引張残留応力が現れることが有限要素シミュレーションから分った。

### (3) 参考文献

1) K. Mori, Review of shearing processes of high strength steel sheets, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 4-2 (2020), 54.

## 【西神分室 再委託 岡山大学】

### (1) 背景及び目的

現在、自動車産業において自然環境保護のために CO<sub>2</sub> 排出量の減少、燃費向上が求められ、部品の軽量化が不可欠となっている。軽量化のために高張力鋼板が使用されている。高張力鋼は高強度であるとともに溶接性、耐候性、低温脆性に優れる鉄鋼材料である。自動車部品の多くが 1000 MPa 以下の高張力鋼板でつくられている。一部 1200 MPa 級高張力鋼板が使用されるようになってきている。1200 MPa を上回る鋼板が開発されているが、高強度化や伸びの低下による成形性の課題が残る。この問題を解決すべく、ホットスタンピング技術を用いた 1500 MPa 級の自動車部品の開発が進められている。ホットスタンピング技術については、現在の自動車製品より軽量にするためにはさらに高強度な鋼板を用いて薄肉化しなければならない。そこで 2000 MPa 級高張力鋼板の実用化に向けた研究開発が行われている。このように研究開発が進められている 2000 MPa 級高張力鋼板には、水素脆化といわれる課題があり、解決が求められている。高強度であるほど水素脆化の影響を大きく受けるため、2000 MPa 級高張力鋼板の実用化にとって大きな問題点となっている。そこで、本研究では、下記 3 項目について取り組んだ。

1. 炭素鋼中の水素拡散性に関する基礎調査
2. ホットスタンピング鋼の水素脆化メカニズムに関する調査
3. U 字曲げホットスタンピング鋼材の水素脆化感受性に関する影響

## (2) 実験方法

### (2-1) 供試材

水素拡散性の調査は、機械構造用中炭素鋼 S45C の未熱処理材(Not-WQ 材)および焼入れ材(WQ 材)を用いた。中炭素鋼の化学組成を表 3-2.6.7-7 に示す。ホットスタンピング鋼の水素脆化メカニズムに関する研究では冷延加工された Fe-0.3C-2.5Mn 鋼を使用した。Fe-0.3C-2.5Mn 鋼の化学組成を表 3-2.6.7-8 に示す。この合金鋼には焼入れ性向上のために Mn, Cr, B が添加している。ここでは、水素脆化に及ぼす Nb の影響を確認するため、0.079%Nb を添加した合金鋼も供試材とした。U 字曲げ試験片による水素脆化特性に関する研究では、Fe-xNb-xMo 鋼を用いた。この合金の化学組成を表 1-6-3 に示す。全ての鋼材は、電気炉を用いて、 $\gamma$ -オーステナイト相となる 850°C まで加熱したのちに水冷し、焼入れ処理を施した。焼入れ処理後、170°C のオイルバスで 20 min 加熱後、水冷することで低温焼戻しをした。ここでは、焼入れ材を WQ 材、焼入れ後に低温焼戻ししたものを BH 材と呼ぶ。また冷延プレスしたままおよび焼きなまし材を CS と AA とそれぞれ称する。

表 3-2.6.7-7 Chemical compositions of mechanical structural carbon steel for diffusivity test, S45C (wt%).

C	Mn	Si	P	S
0.42–0.48	0.60–0.90	0.15–0.35	≤0.030	≤0.035

表 3-2.6.7-8 Chemical compositions of the steels used for investigation of hydrogen trap site (wt%).

C	Mn	Si	P	S	Ti	Nb	Al	B	N	Fe
0.32	2.5	0.1	0.001	0.0023	0.01	0.000	0.04	0.002	0.0008	Bal.
0.32	2.5	0.1	0.001	0.0024	0.01	0.079	0.04	0.002	0.0010	Bal.

表 3-2.6.7-9 Chemical compositions of the steels used in U-bent tests (wt%).

C	Mn	Si	Mo	Nb	P	S	Ti	Al	N	Fe
0.33	1.2	0.1	0.15	0	0.005	0.005	0.02	0.004	0.002	Bal.
0.33	1.2	0.1	0.3	0	0.005	0.005	0.02	0.004	0.002	Bal.
0.33	1.2	0.1	0.5	0	0.005	0.005	0.02	0.004	0.002	Bal.
0.33	1.2	0.1	0.5	0.05	0.001	0.001	0.01	0.004	0.002	Bal.

### (2-2) 組織観察

試料の組織観察をするため、EBSD (Electron back scatter diffraction patterns)法による結晶方位解析を実施した。EBSD 法は試料表面に電子線を照射し、そのとき回折した電子の回折パターンから結晶方位を解析する方法である。結晶方位を示す IPF (Inverse pole figure)マップのほか、回折パターンの鮮明度を表す IQ (Image quality)マップ、周囲の解析点との結晶方位差を示す KAM (Kernel average misorientation)マップを取得で

きる。

組織観察を行うため、JEOL 社製の走査型電子顕微鏡(Scanning electron microscope, SEM) JSM-7-IF を用いた。解析ソフトウェアは TSLOIM Anaysis5 を使用した。

観察面はエメリー研磨紙(#180, #320, #500, #800, #1200, #2000, #4000)で湿式研磨したのち、OP-U 懸濁液(粒径: 0.04  $\mu\text{m}$ )を用いてバフ研磨することで鏡面に仕上げた。

### (2-3) 鋼中水素量測定

鋼中に侵入する水素量を調査することを目的として鋼中の水素量を測定した。試験片の寸法は一辺 8 mm の正方形、厚さは 1 mm である。試料を 10% $\text{NH}_4\text{SCN}$  水溶液に浸漬することにより、鋼中に水素を拡散させた。浸漬時間は 48 h であり、25°C 一定に保たれた部屋に保管した。浸漬が終了したのちに試料をアセトンで洗浄し、鋼中水素量測定を実施した。サンプル数は  $n = 4$  とした。ジェイ・サイエンス・ラボ製の鋼中水素測定システムを用いて、昇温脱離ガス分析法(TDS)により、室温(約 20°C)から 400°C までに試験片から離脱した水素量を測定した。TDS は昇温する間に試験片内部から離脱するガスを分析することで、試験片中に含有していた水素量を測定する方法である。

### (2-4) ビッカース硬さ試験

明石製作所製のビッカース硬度計を用いてビッカース硬さ試験を行った。エメリー研磨紙(#180-#4000)による研磨後、荷重を 9.8 N、負荷時間を 15 s 間として 12 点の圧痕をつけ、ビッカース硬さを測定した。これらの圧痕の中心間距離は、圧痕の対角線長さの 3 倍以上空けた。12 点の測定値から最大値および最小値を除いた 10 点の測定値の平均をビッカース硬さとした。

### (2-5) 水素透過試験

図 3-2.6.7-110 に水素拡散性を調査する装置を示す。装置の中央に炭素鋼の薄板(隔壁版)を取り付け、水素の透過性を調査する。すなわち隔壁版によって 2 つの空間に仕切られ、一方の空間に水素ガスを 0.7 MPa で充填し、隔壁版を透過し、もう一方の空間に透過する水素量を測定する。隔壁版の直径は 36 mm とし、厚さを 1 mm としている。実験では、水素ガス充填前には、両容器内を真空引きした。実験では、ヒータを用いて温度を 50°C, 100°C, 150°C に加熱して、拡散性を調査した。

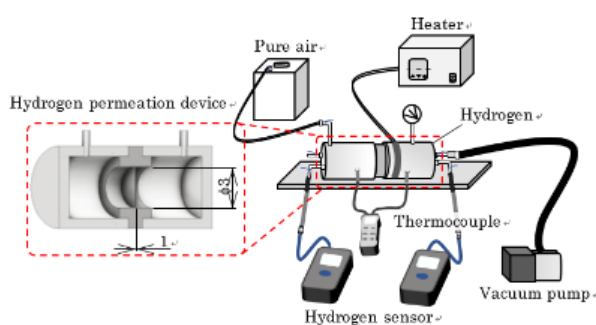


図 3-2.6.7-110 Illustration of a newly developed system to detect the amount of hydrogen gas, permeating through the carbon steel plate.

### (2-6) STEM-EDX 分析

熱処理による析出物の差異を分析することを目的として、走査型透過電子顕微鏡(Scanning Transmission Electron Microscope, STEM)を用いて EDX 分析を行った。STEM-

-EDX 分析は薄片化した試料に電子線を照射し、試料内を透過した電子を利用して、観察および分析する方法であり、ここでは、0.079%Nb を添加した WQ および BH 材について分析を行った。

### (2-8) 3次元アトムプローブ分析

0.079%Nb 添加鋼 WQ 材および BH 材の 3次元アトムプローブ分析(3DAPT)を実施した。試験片は 30 kV の Ga 集束イオンビームを用いて作製されたものである。粒界での水素トラップを調査できるように、試料に粒界が含まれるように加工した。分析は東芝ナノアナリシスにて行われた。装置は AMETEK 社製の LEAP3000XSi が用いられ、レーザ波長は 532 nm とした。30°C の雰囲気下でレーザパルス周波数 500 kHz、パルスエネルギー 0.3 nJ にて分析し、得られたデータをソフトウェア IVAS で解析した。図 3-2.6.7-111 に WQ 材試験片の SEM 画像を示す。3DAPT は、図に示すように針状の試験片を用いる。この試験片に正電圧を印加することで電解蒸発したイオンを深さ方向へ連続的に検出する。これより 3次元による原子分布を得られる。金属材料の構成元素の空間位置を格子間隔レベルの分解能で 3次元に可視化することで、元素ごとの存在位置および局所的な濃度を調べることが可能である。

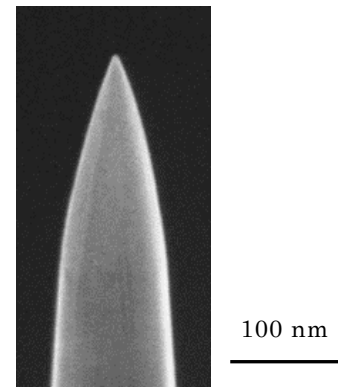


図 3-2.6.7-111 SEM image of Fe-0.3C-2.5Mn-0.079Nb alloy: WQ sample for 3DAPT.

### (2-9) 引張試験

水素脆化感受性に及ぼす応力の影響を調査するため、形状の異なる 3種の試験片を用いた。一つはダンベル型試験片である。水素脆化感受性に及ぼす Nb 添加の影響を調査した。図 3-2.6.7-112 に試験片の形状を示す。島津製作所製の島津オートグラフ AG-50kNXPlus を用いて、ストローク速度 1 mm/min で試験した。試験片に水素を侵入させるため、30 ml の 10%NH<sub>4</sub>SCN 水溶液に 48 h 浸漬した。

さらに応力の影響を確認するため、平行部にノッチを入れた試験片についても調査した。ノッチは、試験片中央部の両側に導入した。ノッチ先端の曲率半径は 0.1 mm または 0.5 mm である。これらの試験片を各々“Notch-0.1”、“Notch-0.5”と称する。“Notch-0.1”および“Notch-0.5”の試験片平行部の断面積は 4 mm × 1.5 mm となる。図 3-2.6.7-113 に試験片形状を示す。

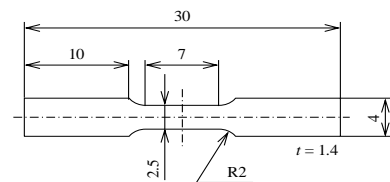


図 3-2.6.7-112 Schematic diagram of tensile test specimen.

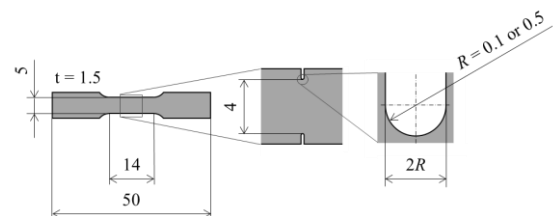


図 3-2.6.7-113 Illustration of double-notched specimen.

さらに WQ 材において、片側ノッチ試験片を作製し引張特性を調査した。試験片の形状を図 3-2.6.7-114 に示す。

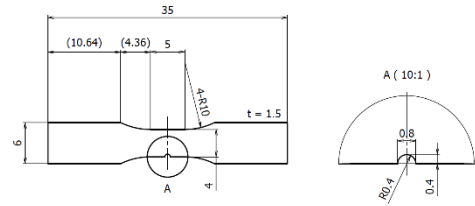


図 3-2.6.7-114 Illustration of single-notched specimen.

(2-10) き裂進展試験

水素脆化した鋼のき裂進展特性について調査した。ここで使用した材料は 0.079%Nb 添加鋼 WQ 材で、試験片形状を図 3-2.6.7-115 に示す。この試験片には、予き裂を 0.25 mm 導入した。水素チャージ方法を行った後、き裂進展試験を実施した。未浸漬の試験片においても同様に実験を行い、き裂進展速度に水素が及ぼす影響を明確にした。ここでは応力拡大係数  $\Delta K$  の式(1)を用いて算出した。なお、式(1)中の  $W$  は試験片の幅 ( $W = 10$  mm)、 $a$  は切欠き長さとき裂長さの和である。

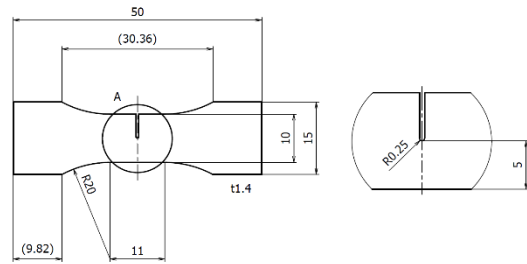


図 3-2.6.7-115 Illustration of specimen for fatigue crack growth test.

$$K = \sigma(\pi a)^{0.5}(1.12 - 0.231\alpha + 10.55\alpha^2 - 21.72\alpha^3 + 30.39\alpha^4) \quad (1)$$

$$\alpha = a/W \quad (1a)$$

(2-11) U 字曲げ試験

遅延破壊試験を U 字試験片にて静的および繰り返し負荷条件で実施した。図 3-2.6.7-116(a)に U 字曲げ試験片を示す。このサンプルはホットスタンピングで作製した。図 3-2.6.7-116(b)に、試験片の取り付け方法を示す。繰り返し試験では、負荷荷重と最終破壊までのサイクル数の関係で評価した。負荷は引張-引張負荷による繰り返しで、周波数 2 Hz、荷重比 0.2、負荷波形 sin 波とした。負荷試験中は、チオシアン酸アンモニウム溶液中で実施した。一方、静的負荷試験では、1,000MPa を加えながら、3g/L NH<sub>4</sub>SCN + 3%NaCl, 10 A・m<sup>-2</sup> で電解チャージした。

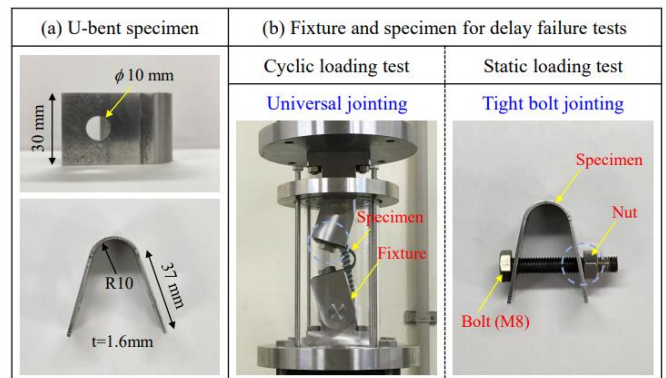


図 3-2.6.7-116 Photographs of (a) U-bent specimen and (b) jointing methods for the delayed failure tests under static and cyclic loading.

サンプル中の水素含有量は、200°C/h の線形加熱速度でガスクロマトグラフによる熱脱着分析によって測定した。アルゴンを使用して 5 分間隔で分析した。本サンプルでは、100°C付近で検出される水素は拡散性と考えている。

### (3) 実験結果および考察

#### 1. 炭素鋼中の水素拡散性に関する基礎調査

##### (3-1) 組織観察およびビッカース硬さ

図 3-2.6.7-117 に EBSD 解析によって得られた S45C の Not-WQ 材(CR 材)および WQ 材の IPF, IQ, KAM マップを示す。IPF および KAM マップより Not-WQ 材はひずみが小さいことが確認できる。IQ マップで明るい領域はフェライト相で、白と黒の縞模様に表示されている領域はパーライト相である。焼入れによりマルテンサイト相に変態しており、KAM マップから、内部ひずみの増加が確認できる。図 3-2.6.7-118 に各材料のビッカース硬さを示す。測定した 10 点の平均値は Not-WQ 材が HV205、WQ 材が HV669 であった。図 3-2.6.7-117 に示す WQ 材のマルテンサイト相が高いビッカース硬度に影響していると考えられる。

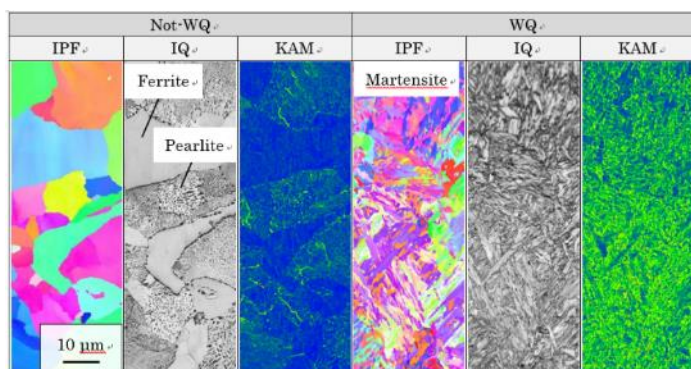


図 3-2.6.7-117 EBSD analysis for S45C: Not-WQ and WQ samples, showing the inverse pole figure, image quality and Kernel average misorientation.

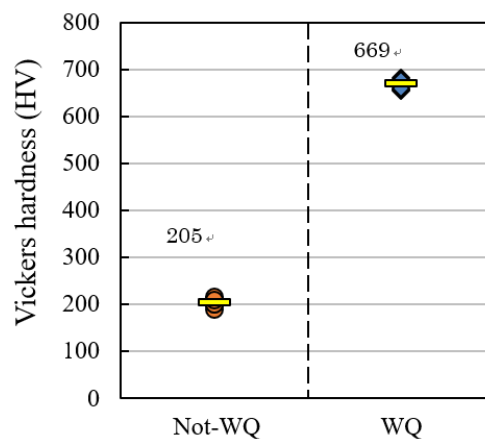


図 3-2.6.7-118 Vickers hardness of S45C: Not-WQ and WQ samples.

##### (3-2) 鋼中水素量

各材料への水素侵入量を確認するため、10%NH<sub>4</sub>SCN 水溶液に 48 h 浸漬した後、水素量を測定した。図 3-2.6.7-119 に得られた水素量(水素放出曲線)の結果を示す。Not-WQ 材(CR 材)において鋼からの水素放出量に 2 つのピークが確認できた。低温側の一次ピークは約 120°C のとき、高温側の二次ピークは 400°C のときである。一方で WQ 材では二次ピークは確認されなかった。二次ピークは転位や析出物によりトラップされた水素であると考えられる。マル

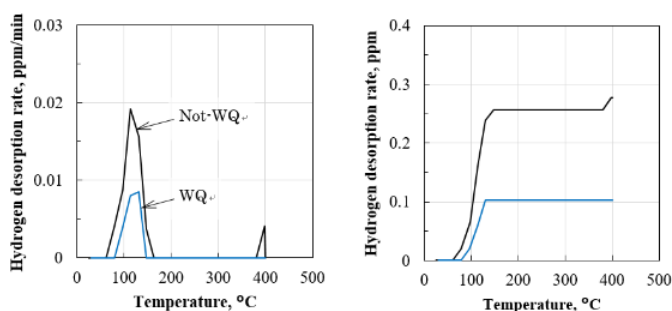


図 3-2.6.7-119 (a) Desorption rate of hydrogen released from the S45C samples vs. heat temperature curves. (b) Variation of the cumulative amount of hydrogen as a function of sample temperature.

テンサイト鋼中の水素は昇温脱離法において、試験片寸法や昇温速度によるものの、

一般的におよそ 100°C–200°C に単一のピークを持つことが知られている。また、WQ 材における一次ピークの水素放出量は Not-WQ 材のおよそ 1/2 であった。図 3-2.6.7-117 の IQ マップに示されるように、Not-WQ 材にはフェライトとセメンタイトのラメラ組織であるパーライト相が存在する。これより Not-WQ 材の一次ピークはセメンタイトとフェライト部境界での水素トラップが緩解していると考えられる。

### (3-3) 水素透過量

図 3-2.6.7-120 に S45C-Not-WQ 及び-WQ 材の累計水素透過量を示す。室温および 50°C では水素透過量は 0 ppm であったが、100°C および 150°C では水素透過した。50°C 以下では水素が鋼中を拡散し、もう一方の空間へ移るほどのエネルギーを有さなかったと考える。水素の透過にかかわる要因として表面から鋼中への水素の侵入、鋼中での拡散、表面からの放出の 3 つが挙げられるが、特に鋼表面から中への侵入に必要なエネルギーが不十分と考える。図 3-2.6.7-121 に金属表面近傍における水素の自由エネルギーの模式図を示す。この模式図に表したエネルギー曲線の関係は多くの遷移金属に適用でき、鉄もこれにあてはまる。金属表面に近づいた水素分子は運動エネルギーを失い、金属との van der Waals 力により表面近傍にとどまり、物理吸着の状態となる。水素原子と分子の自由エネルギー曲線の交点は、運動エネルギーを失っていないときの分子のエネルギーより小さい。そのため活性化エネルギーを必要とせず水素分子が原子に解離し、イオン結合または共有結合により金属表面に存在する化学吸着の状態となる。図 3-2.6.7-122 に、金属に固溶する水素原子の自由エネルギーの模式図を示す。図中の  $E_s$  は固溶エネルギーである。 $E_s$  は水素分子の自由エネルギーより 27 kJ/mol 高い。したがって、化学吸着状態で金属表面に存在する水素原子が金属に固溶するためには、活性化エネルギーを必要である。本実験において水素圧 0.7 MPa、加熱温度 100°C 以上の熱エネルギーが加えられたとき、水素原子が固溶するために必要な活性化エネルギーに達していないと推測できる。

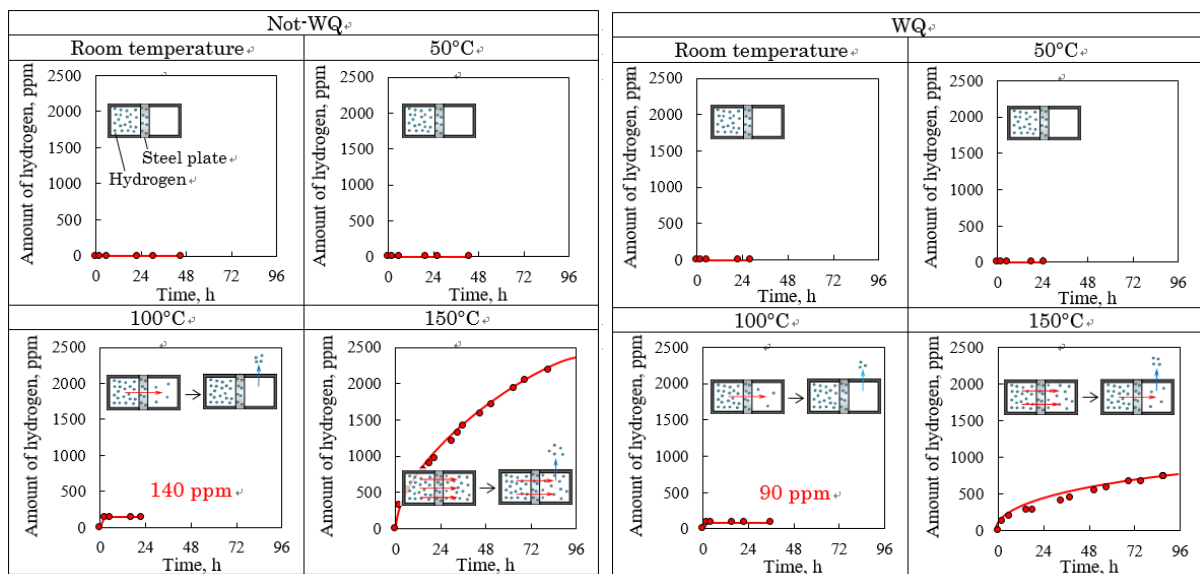


図 3-2.6.7-120 Variation of the hydrogen detected by the diffusivity hydrogen testing system for the Not-WQ and WQ thin plates at various temperatures.

加熱温度 100°C では実験を開始してから最初の測定時のみ、透過した水素が検出された。一方 150°C では非線形的に透過量が増加し、70 h 後も透過し続けた。

100°C の条件で実験したとき、空孔や粒界、転位などのトラップサイトに水素がトラップされる。そして、トラップされた水素(トラップ水素)が拡散する水素の経路を妨げたことで、透過が困難になったと考える。これに対し、150°C では、水素原子のもつエネルギーが大きいため、一度トラップされた水素がトラップサイトから離脱でき拡散するとともに、トラップ水素による透過の妨害も抑制されたと考える。ただし 150°C の場合も、実験時間の経過に伴い、トラップ水素の増加し、透過率が減少したと考える。なお、図から明らかのように Not-WQ 材の方が 100°C および 150°C とともに水素透過量が高い値を示した。

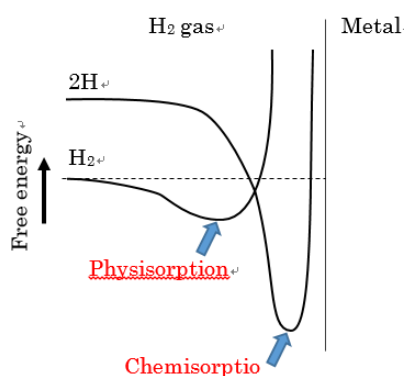


図 3-2.6.7-121 Schematic diagram of free energy curve of hydrogen near metal surface.

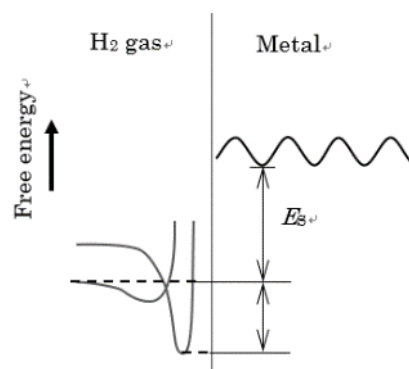


図 3-2.6.7-122 Schematic diagram of free energy curve of hydrogen solution in metal.

図 2-3.6.7-123 は、Not-WQ 材での水素拡散を示す模式図である。この場合、フェライト( $\alpha$  相)とセメンタイト( $\theta$  相)の界面(I/F $_{\alpha-\theta}$ )はトラップサイトとなると推測できる。図 2-3.6.7-124 に金属母相における水素の自由エネルギーおよび、界面での自由エネルギーの模式図を示す。図から明らかのように界面での自由エネルギーは、フェライト相と比べて低い値を推移しており、この結果からも、CR 材のフェライトとセメンタイト界面は、トラップサイトとなりやすいと考える。



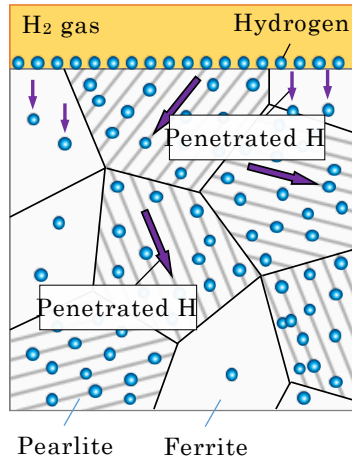


図 3-2.6.7-123 Hydrogen penetration models for Not-WQ, influenced by microstructure.

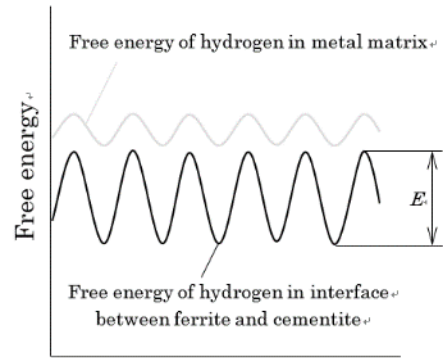


図 3-2.6.7-124 Schematic diagram of free energy curve of hydrogen in metal matrix or interface between ferrite and cementite.

2. ホットスタンピング鋼の水素脆化メカニズムに関する調査

(3-4) 組織観察およびビッカース硬さ

図 3-2.6.7-125 に、EBSD 法により得られた 0%Nb および 0.079%Nb 添加鋼、各熱処理材の IPF マップを示す。Nb には結晶粒微細化の効果があることが知られている。その効果が IPF マップに明瞭に確認できる。しかし、熱処理による組織の差異は判別できなかった。図 3-2.6.7-126 に、0%Nb および 0.079%Nb 添加鋼、各熱処理材のビッカース硬さ試験を実施した結果を示す。0%Nb, 0.079%Nb 添加鋼ともに、WQ 後に BH を実施することでビッカース硬さが低下している。組織写真では変化がなかったが、内部ひずみの減少や過飽和した炭素が微細な炭化物の析出が原因と考える。

各熱処理材ともに、0%Nb 添加鋼に比べて 0.079%Nb 添加鋼の方が硬化した。これは Nb 添加による結晶粒微細化、および Nb 化合物の析出が影響していると考えられる。

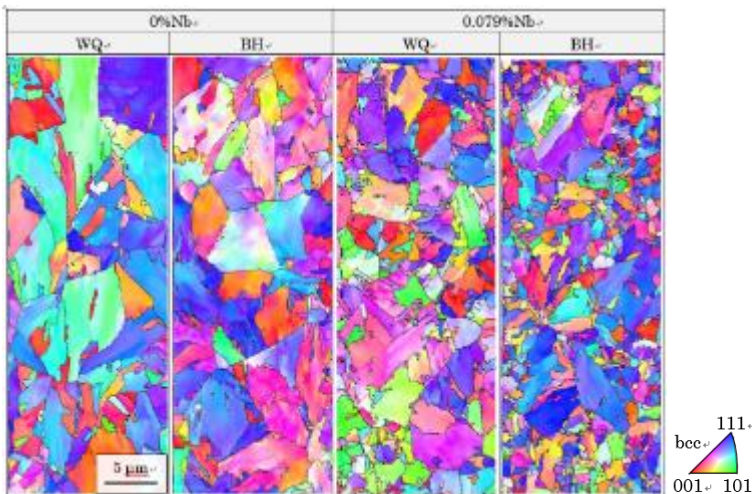


図 3-2.6.7-125 EBSD analysis for Fe-0.3C-2.5Mn-xNb alloy: WQ and BH samples, showing the inverse pole figure.

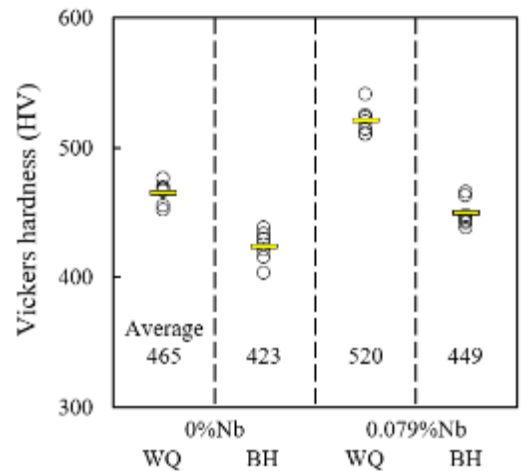


図 3-2.6.7-126 Vickers hardness of Fe-0.3C-2.5Mn-xNb alloy: WQ and BH samples.

### (3-5) NbC の析出

図 3-2.6.7-127 に、STEM 観察によって得られた組織写真および元素マッピング画像を示す。WQ, BH 材ともに Nb の析出が確認できる。これは後に述べる 3 次元アトムプローブ分析の結果から、この析出物は NbC であると考えられる。WQ 材に比べ BH 材にある NbC が多く、BH 処理によって NbC がさらに析出したと思われる。その他、WQ, BH 材ではともに MnS が検出された。

図 3-2.6.7-128 に、0%Nb および 0.079%Nb 添加鋼、各熱処理材の引張試験結果を示す。WQ, BH 材ともに、水素未チャージ材より水素チャージ材の延性が低下し、水素脆化が確認できる。WQ 材の水素チャージ材より BH 材の伸びが大きく、水素脆化感受性が低い。高強度である鋼であるほど水素脆化の影響を受けやすい。BH 処理によって生じた強度低下によって、水素脆化感受性が低下したと思われる。水素チャージした 0%Nb 鋼に比べて 0.079%Nb 添加鋼の引張強さ、破断ひずみが高くなっている。この結果から Nb 添加により水素脆化が緩和したと思われる。水素チャージ材において 0%Nb 鋼と 0.079%Nb 添加鋼の破断ひずみの差を比較したとき、WQ 材より BH 材における破断ひずみの差が大きい。この結果、BH 処理により Nb 添加材は、大きな脆化緩和効果があると考えられる。図 3-2.6.7-127 より、BH 処理による NbC 粒子数の増加が確認されたため、NbC が脆化緩和効果に寄与していると思われる。

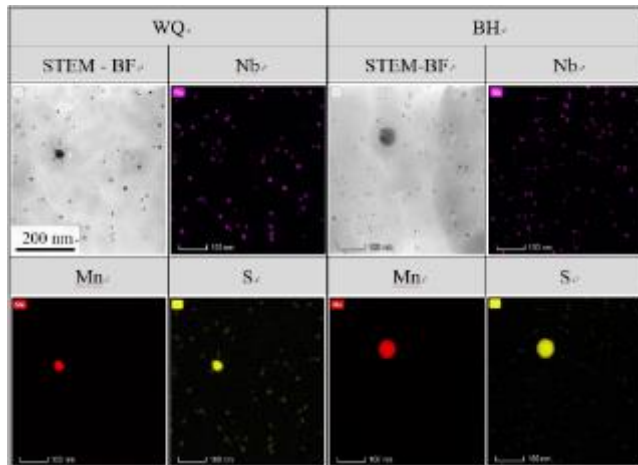


図 3-2.6.7-127 STEM images with EDS mapping for Fe-0.3C-2.5Mn-xNb alloy: WQ and BH samples.

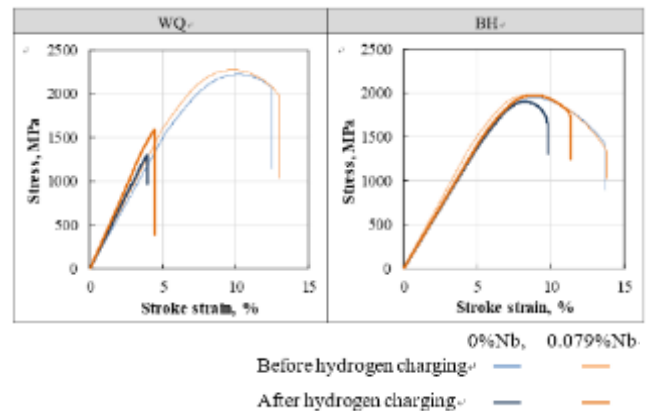


図 3-2.6.7-128 STEM images with EDS mapping for Fe-0.3C-2.5Mn-xNb alloy: WQ and BH samples.

### (3-6) Nb 添加による水素脆化緩和

図 3-2.6.7-129 に、各種熱処理を施した 0%Nb および 0.079%Nb 材の引張試験結果を示す。WQ, BH 材ともに、水素未チャージ材より水素チャージ材の方が延性は低下し、水素による脆化が確認できた。WQ 材の水素チャージ材より BH 材の延性は大きく、水素脆化感受性が低かった。高強度である鋼であるほど水素脆化の影響を受けやすいため、BH 処理による強度低下が、水素脆化感受性が低下したと思われる。

水素チャージした 0%Nb 鋼に比べて 0.079%Nb 添加鋼の引張強さ、破断ひずみは高くなっている。この結果から Nb 添加によって水素脆化は緩和したと思われる。

水素チャージ材において 0%Nb と 0.079%Nb 材の破断ひずみは、BH 材の方が WQ 材より大きく、Nb 添加により大きな脆化緩和効果があると考える。BH 処理により NbC 粒子数の増加が図 3-2.6.7-127 で確認されたことから、NbC の増加が脆化緩和効果に寄与したと思われる。そこで、3次元アトムプローブ分析を行い、NbC の水素に対する作用を調査した。

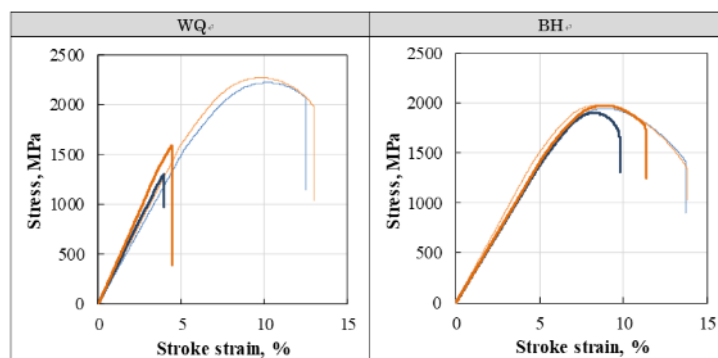


図 3-2.6.7-129 Tensile stress-strain curves for Fe-0.3C-2.5Mn-xNb alloy: WQ and BH samples before and after hydrogen charging.

### (3-7) NbC と $\epsilon$ 炭化物による水素トラップ

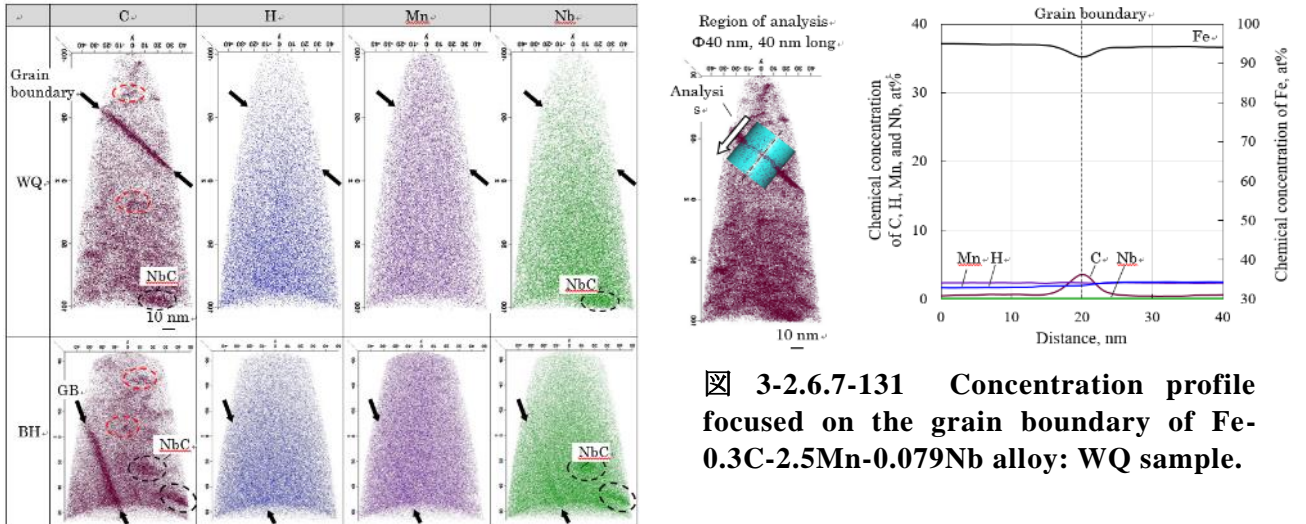
水素のトラップサイトを明確にするため、3次元アトムプローブ分析(3DAPT)を行った。図 3-2.6.7-130 に各熱処理材の C, H, Mn, Nb の原子分布図を示す。なおここでは粒界を炭素の偏析部とした(黒矢印)。C は明瞭な分布が確認できる。H, Mn, Nb は C ほど明確には確認できないが、WQ, BH 材とも C および Nb の析出が確認できた。各熱処理材ともに Nb の集積がなく、かつ C 濃度の高い箇所が確認できた(赤い破線)。これは BH 処理をすることで析出した  $\epsilon$  炭化物であると考えられるが、WQ 材でも確認されたことから断言はできない。

図 3-2.6.7-130 の原子分布図は 3次元データを 2次元で示している。粒界や炭化物などの局所的な濃度を確認できないため、解析範囲を定めて元素濃度曲線を得ている。図 3-2.6.7-131 に WQ 材、図 3-2.6.7-132 に BH 材の粒界近傍の元素濃度プロファイルを示す。WQ, BH 材ともに粒界での偏析は C のみ生じている。したがって、粒界における添加元素の影響はないと考える。

粒界は水素のトラップサイトであるが、本結果では水素の集積は確認できなかった。このことから、粒界は結合エネルギーの低い、弱いトラップサイトであるか、または、サンプル作成時に水素が大気中に放出された可能性も考えられる。WQ 材より BH 材の方が H の濃度が高い。図 3-2.6.7-130 から分かるように、針状試験片の先端付近で H 濃度が低く、根元に近づくにつれ濃度が高くなっている。WQ 材試験片の粒界は先端に近かったために、このような結果となったと考えられる。なお、試験片の先端からの距離による水素濃度の差異の原因は不明である。

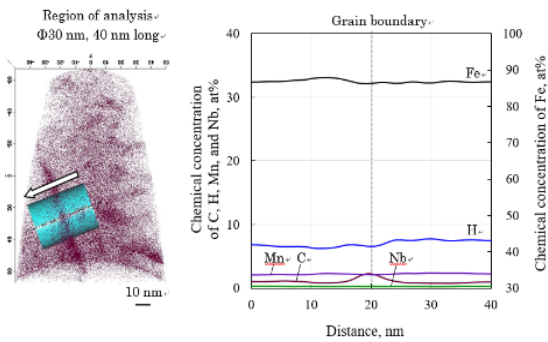
図 3-2.6.7-133 に、BH 材において Nb および C の濃度が高い箇所の元素濃度曲線を示す。この箇所は析出物 NbC だと思われる。NbC の部分では H 濃度がおおよそ 30 at% と高い値を示している。試料への水素チャージから 3DAPT まで時間を要しているにもかかわらず NbC に水素が集積していることから、NbC は強いトラップサイトであ

ることが明白であり、この析出物にトラップされた水素は非拡散性の状態にあると思われる。すなわち水素の NbC のトラップにより、拡散性水素の減少し、水素脆化が緩和したと思われる。

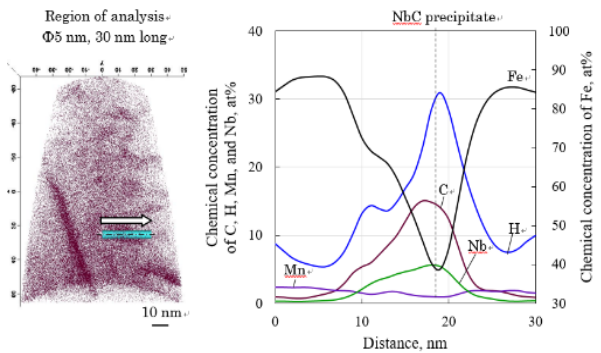


☒ 3-2.6.7-131 Concentration profile focused on the grain boundary of Fe-0.3C-2.5Mn-0.079Nb alloy: WQ sample.

☒ 3-2.6.7-130 Atom probe maps of Fe-0.3C-2.5Mn-0.079Nb alloy: WQ and BH samples, showing the C, H, Mn, and Nb elements.



☒ 3-2.6.7-132 Concentration profile focused on the grain boundary of Fe-0.3C-2.5Mn-0.079Nb alloy: BH sample.



☒ 3-2.6.7-133 Concentration profile focused on high NbC precipitate of Fe-0.3C-2.5Mn-0.079Nb alloy: BH sample.

### (3-8) き裂進展速度

図 3-2.6.7-134 は、WQ 材の水素チャージ前後のき裂進展速度結果を示す。水素未チャージ材では、応力拡大係数  $\Delta K$  がおよそ 20–120 MPa・m<sup>1/2</sup> と大きくなるにつれてき裂進展速度  $da/dN$  が増大した。一方水素チャージした試験片では水素での脆性により、 $\Delta K$  が 10-40 MPa・m<sup>1/2</sup> のわずかな増大に対してき裂進展速度  $da/dN$  が著しく増大した。この結果から、水素が鉄鋼内に拡散している場合には、わずかな応力負荷つまり小さな  $\Delta K$  であってもき裂が容易かつ急激に進展することがわかる。引張による静的負荷だけでなく、疲労による繰り返し負荷においても、き裂進展において水素が影響すると考えられる。本実験により生じた現象は、水素が転位トラップされ、き裂先端領域のせん断変形を局所化して延性破壊の進行を助長する水素助長局所塑性変形 (HELP)理論と関係していると思われる。

水素チャージ材の繰り返し荷重によるき裂、およびストローク速度 1 mm/min で引張試験を実施した際に生じたクラック周辺の結晶方位解析を実施した。図 3-2.6.7-135 に EBSD 法により得られた IPF, IQ, KAM マップを示す。試験荷重の条件によってき裂進展の特徴が異なっている。繰り返し荷重を負荷したとき、き裂は結晶粒内を進展していることが IPF および IQ マップから分かる。それに対して引張静荷重を負荷した際には、旧オーステナイト粒界と思われる箇所に沿ってき裂が進展している。以上から、水素脆化は粒界だけでなく粒内においても影響していると考えられる。また引張荷重を負荷した試験片の IPF, KAM マップより、結晶粒の変形はほとんど確認できない。つまり、塑性変形する前に、き裂は生成および進展していると考えられる。

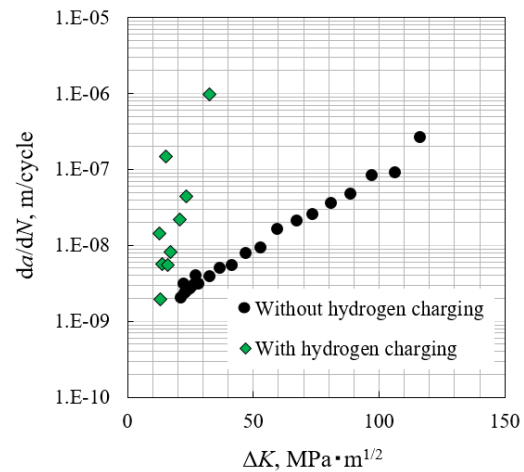


図 3-2.6.7-134 Relationship between crack growth rate ( $da/dN$ ) and stress intensity factor range ( $\Delta K$ ) for the WQ with and without hydrogen charging.

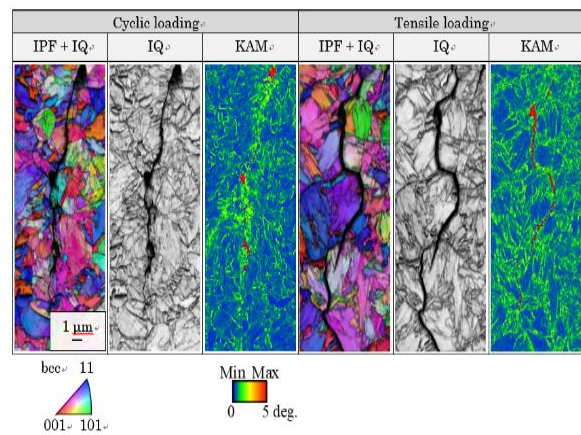


図 3-2.6.7-135 EBSD analysis for both WQ samples after the crack growth test and tensile test after hydrogen charging for 48 h, showing the crack growth characteristics.

## 3. U字曲げホットスタンピング鋼材の水素脆化感受性に関する影響

### (3-9) 水素脆化特性

図 3-2.6.7-136 に BH サンプルの遅延破壊試験の結果を示す。BH-0.05Nb-0.5Mo 材で

は、高い遅れ破壊抵抗が確認できる。これは引張強度特性と同様の結果を示している。図から明らかのように BH-0.05Nb-0.5Mo 材は、168 時間以上の荷重をかけても破壊しなかった。一方、BH-0Nb-0Mo 材は低い破壊抵抗を示すことから、0.05Nb や 0.5Mo などの添加により遅延破壊が改善されたと考える。図 3-2.6.7-136 (b)に U 字曲げ試験片のき裂写真を示す。このき裂の進展速度は約  $8 \times 10^6$  m/s であり、き裂生成後、短時間で最終破断に至ることがわかった。

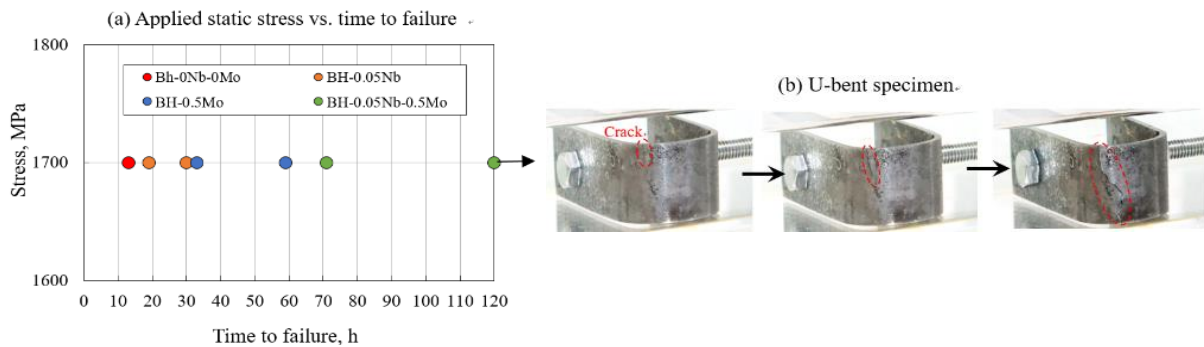


図 3-2.6.7-136 (a) The relationship between the applied static stress and time to failure for BH samples and (b) Photographs of U-bent specimen showing crack.

図 3-2.6.7-137 に引張試験後の WQ と BH 材の破面写真を示す。図 3-2.6.7-137(a)(b)より、水素チャージしていない両サンプルは、試験片が大きく変形し、ディンプルによる延性破壊で支配されている。水素チャージしたサンプルでは、図 3-2.6.7-137(c)に示すように、WQ 材は、破壊面が平坦で脆性的な破壊が確認でき、ここでは旧オーステナイト粒界に沿ってき裂が進展していた。一方、BH 材は、水素チャージ後も延性破壊が支配的であり、耐遅れ破壊に強いことが確認できる。この原因は、先に述べた Nb, Mo,  $\epsilon$ 炭化物などの析出物による水素トラップが関係していると考えられる。

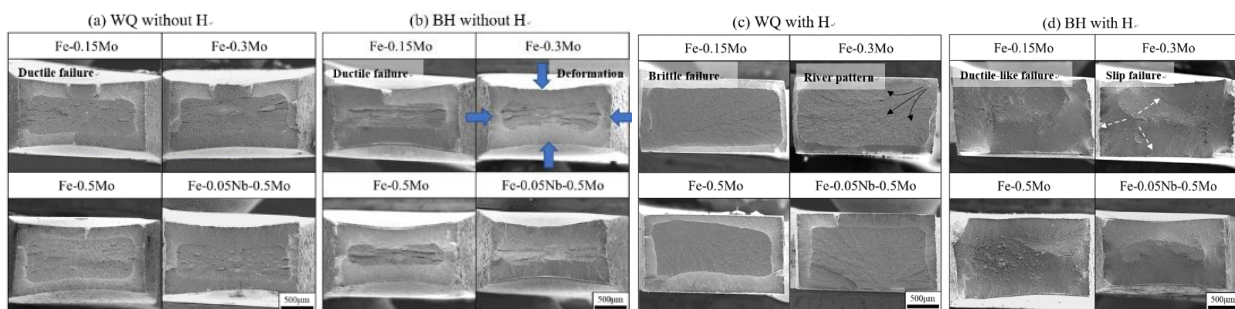


図 3-2.6.7-137 SEM images of fracture surfaces of the Fe-xNb-xMo steels: (a) WQ and BH samples without hydrogen charging; (b) WQ and BH sample with hydrogen charging.

トラップサイトを確認するため、STEM 分析を行った。図 3-2.6.7-138(a)に、WQ-0.5Mo、BH-0.5Mo、および BH-0.05Nb-0.5Mo 材の STEM 像を示す。全てのサンプルは、マルテンサイト相で構成されるが、析出物の特性が異なった。ここでは、 $\epsilon$ 炭化物、Mo、Nb ベースの析出物が考えられる。WQ 材では析出物が小さく、数も少ないことがわかる。これに対し、BH-0.05Nb-0.5Mo 材は粗大化した析出物が確認できる。よっ

て、粗大化した析出物が、水素の強いトラップサイトになったと考える。

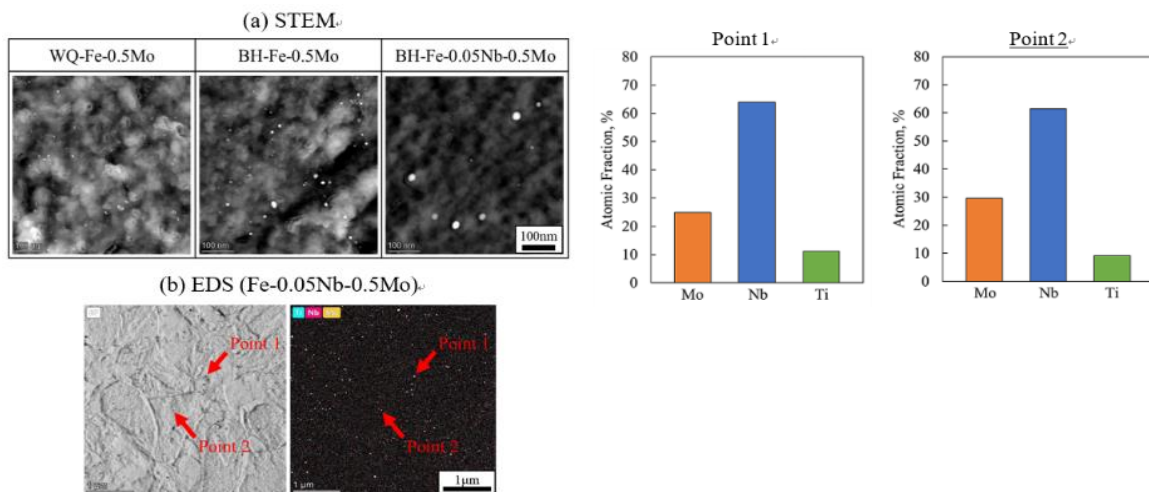


図 3-2.6.7-138 (a) STEM images for the WQ-0.5Mo, BH-0.5Mo and BH-0.05Nb-0.5Mo steels, showing  $\epsilon$ -carbide, Nb- and Mo-base precipitates; (b) STEM images with EDX mapping for the precipitates in the BH-0.05Nb-0.5Mo steel.

### (3-10) 遅延破壊試験

図 3-2.6.7-139(a)に、HS-920°C および HS-1000°C-U字曲げ試験片の破壊までのサイクル数を示す。繰返し負荷は、試験片を NH<sub>4</sub>SCN 溶液に 1 時間および 48 時間浸漬した後に加えた。まず両サンプルともに浸漬時間が短い 1 時間の方が遅れ破壊の抵抗は高い値を示した。これは水素の拡散量が少ないためと考えられる。また負荷荷重が少ないほど破壊までの時間が長くなっている。一方、HS-920°C と HS-1000°C 材との比較では、HS-920°C 材の方が遅れ破壊抵抗が高くなっている。これは HS-920°C 材で確認できた炭化物の析出がトラップサイトになったことと、HS-1000°C 材の粗大化した旧オーステナイト相が粒界に水素がトラップして脆化を促進させたと考える。

図 3-2.6.7-139(b)は、HS-920°C および HS-1000°C 材の静的荷重条件における遅延破壊試験結果を示す。まず、繰返し負荷条件と同様に HS-920°C 材の方が HS-1000°C 材より高い破壊抵抗を示した。この理由についても先に述べたように異なる組織構造が原因と考える。

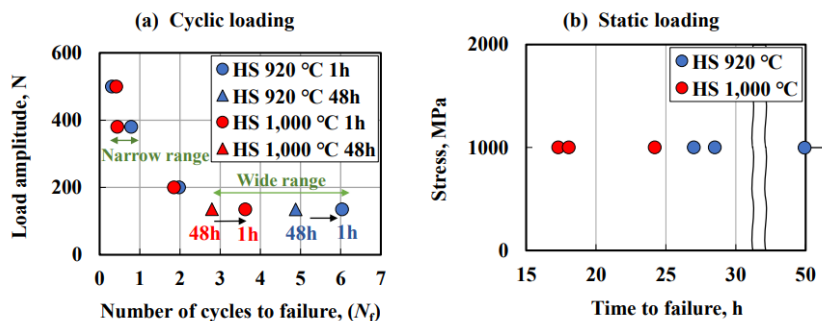


図 3-2.6.7-139 (a) The relationship between the load amplitude and the number of cycles to final fracture for HS-920°C and HS-1000°C. (b) The relationship between the applied static stress and time to failure for HS-920°C and HS-1000°C.

### (3-11) 遅延破壊試験の損傷解析

図 3-2.6.7-140 は、遅延破壊試験後の U 字曲げ試験片の外観写真を示す。図から明らかのように負荷条件により、破壊場所が異なっている。繰返し負荷試験の場合は、U 字曲げ試験片の先端部から破壊し、ボルト固定試験では、R 部とストレート部の境界部から破壊している。これは U 字曲げ試験片にかかる応力状態の変化が原因と考えられる。先に述べたが、繰返し負荷試験では試験片をユニバーサルジョイント治具で固定している。一方、静的負荷試験は、ボルトによる完全固定となる。この応力分布を確認するため、有限要素法解析を行った。図 3-2.6.7-141 は、2 つの試験片固定条件における U 字曲げ試験片のミーゼス応力の分布を示す。解析結果から応力分布の相違が明らかであり、高い応力部から、破壊が起こったと考えられる。

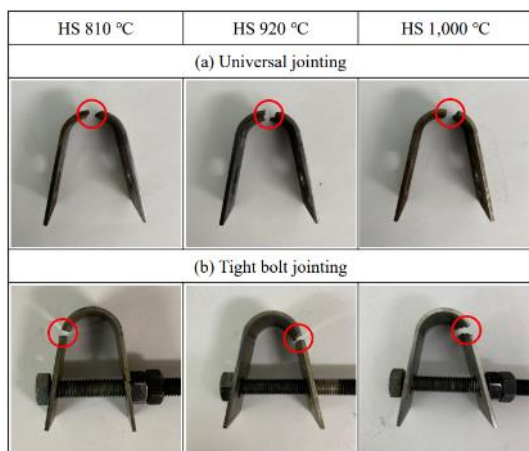


図 3-2.6.7-140 Photographs of the U-bent specimens of HS-810°C, HS-920°C, and HS-1000°C after the delayed failure tests, showing fracture area in the specimens with (a) universal jointing and (b) tight bolt jointing.

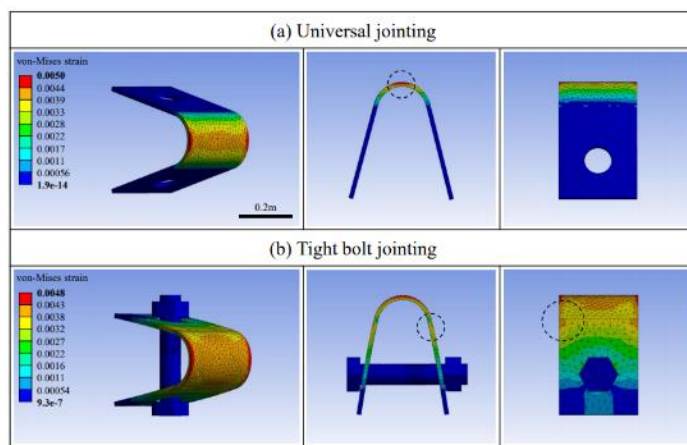


図 3-2.6.7-141 The von Mises strain distribution of U-bent specimen loaded by (a) universal jointing and (b) tight bolt jointing.

### (3-12) まとめ

#### 1. 炭素鋼中の水素拡散性に関する基礎調査

1) 鋼材の温度が常温および 50°C では、水素の浸透および拡散は確認できなかった。一方、100°C 以上の条件で、水素は鋼材に拡散することを確認できた。

2) 鋼材が 100°C では、加熱から 2 h 後には水素の透過および拡散がほとんど起こらなかった。鋼中にトラップされた水素がその後の水素拡散を妨げたと考えられる。しかし、鋼材を 150°C に加熱すると、水素の透過量は低下するが、70 h までの拡散は確認できた。

3) 鋼材を焼入れすることにより水素の透過量が増大した。これは鋼材のフェライトとセメンタイト界面が強い拡散経路になっているためと考える。



## 2. ホットスタンピング鋼の水素脆化メカニズムに関する調査

4) 鋼材に Nb を添加し、BH 処理を施すことにより、水素脆化は緩和した。STEM-EDX 分析の結果から、BH 処理によって NbC の粒子数が増加しており、これら析出物がトラップサイトになったと考える。

5) NbC の析出物には H 濃度がその周囲の約 3 倍に増加しており水素が強く集積していると考ええる。

6) WC 材に水素をチャージすることにより、低い応力拡大係数範囲  $\Delta K$  でき裂速度  $da/dN$  が急激に増加した。水素拡散が、き裂周辺のすべりや転位に強く起こっていると考える。

7) 水素をチャージした鋼材に繰返し負荷を加えると結晶粒内をき裂が進展し、引張負荷時の粒界破壊とは異なる結果となった。よって水素は粒界だけでなく粒内にもとどまる可能性があると考ええる。

## 3. U 字曲げホットスタンピング鋼材の水素脆化感受性に関する影響

8) 鋼材の破壊抵抗は 0.05Nb や 0.5Mo の添加で、トラップサイトが形成されることから改善された。トラップサイトが無い場合、水素は旧オーステナイト相粒界に蓄積され、脆性破壊が起こった。

9) HS-920°C 材では、HS-1000°C 材より遅れ破壊の抵抗が高かった。これは HS-920°C 材で確認できた炭化物がトラップサイトになったためと考える。一方、HS-1000°C 材では粗大化した旧オーステナイト相が粒界に水素が強くトラップして脆化を促進させたと考ええる。

10) U 字曲げ試験片の実験により、水素は高い応力場でトラップされることが分かった。これは転位密度や格子ひずみの増大により水素が強く集積されたためと考える。

### 【課題②】 応力、ひずみ、水素濃度分布およびマイクロ組織損傷の定量化のための要素技術の確立

#### 【阪大工学研究科分室 大阪大学】

##### (1) 背景及び目的

自動車用鋼板を対象とした水素脆化割れ特性評価試験手法の一つとして、短冊状の薄板の U 曲げボルト締め試験が提案されている。しかし、U 曲げボルト締め試験片の曲げ頭頂部での塑性ひずみや応力、さらにはこれらの分布に起因して変化する拡散性水素の局在化挙動を精度良く評価する手法が確立されておらず、実際の割れ発生位置と力学量との関係が必ずしも対応しないという課題が残る。

そこで本課題では、1500 MPa 級超高強度鋼部材を対象として、U 曲げボルト締め試験片表面の塑性ひずみ分布・応力分布をマクロスケールのみならず数百  $\mu\text{m}$  以下のオーダーで計測する技術を確認する。また、陰極水素チャージ実験中の割れの発生場所・時期を高精度に検出する技術を確認する。さらに、確認した計測技術と三次元 FEM による弾塑性及び水素拡散解析を援用して水素脆化割れ挙動と応力・ひずみ分布状態との関係を解析する。

(2) 実験方法および結果

(2-1) U 曲げボルト締め過程の塑性ひずみ分布・応力分布計測

供試鋼材に板厚 1.6mm で引張強さ 1500 MPa 級の自動車用超高強度薄鋼板を用い、U 曲げ加工後にボルト締めが可能な穴付き短冊状試験片を作製し実験に供した。U 曲げ過程における試験片表面のひずみ分布の履歴を実験により計測するための特殊な U 曲げ加工・除荷試験治具を製作し、2 台の CCD カメラを用いて試験片表面の三次元変位を撮影することでデジタル画像相関法によってひずみ分布を実測することに成功した。

曲げ半径 R が 10mm と 20mm のケースについて、U 曲げ過程で計測した曲げ頭頂部近傍の長手方向ひずみ分布の履歴を図 3-2.6.7-142 に示す。R が小さい場合に頭頂部の板幅中央部でややひずみが大きくなること、また、約 10mm~15mm 程度の押込み変位で頭頂部近傍のひずみ分布はほぼ一定になることなどがわかった。

さらに、U 曲げによって塑性ひずみが導入された試験片に対してボルト締めによって応力を付加し、ボルト締め過程における試験片表面の応力分布を X 線応力測定装置によって測定した。図 3-2.6.7-143 は、一例として、R=10mm の U 曲げ加工・除荷後の試験片を種々の締込み量でボルト締めした際の、X 線応力測定装置で計測した曲げ頭頂部の X 方向・Y 方向応力の板幅方向分布の履歴を示したものである。U 曲げ除荷時には約 600MPa 程度の X 方向圧縮応力が存在していること、また、ボルト締め完了時には約 1600MPa 程度の X 方向引張応力が生じていることがわかった。

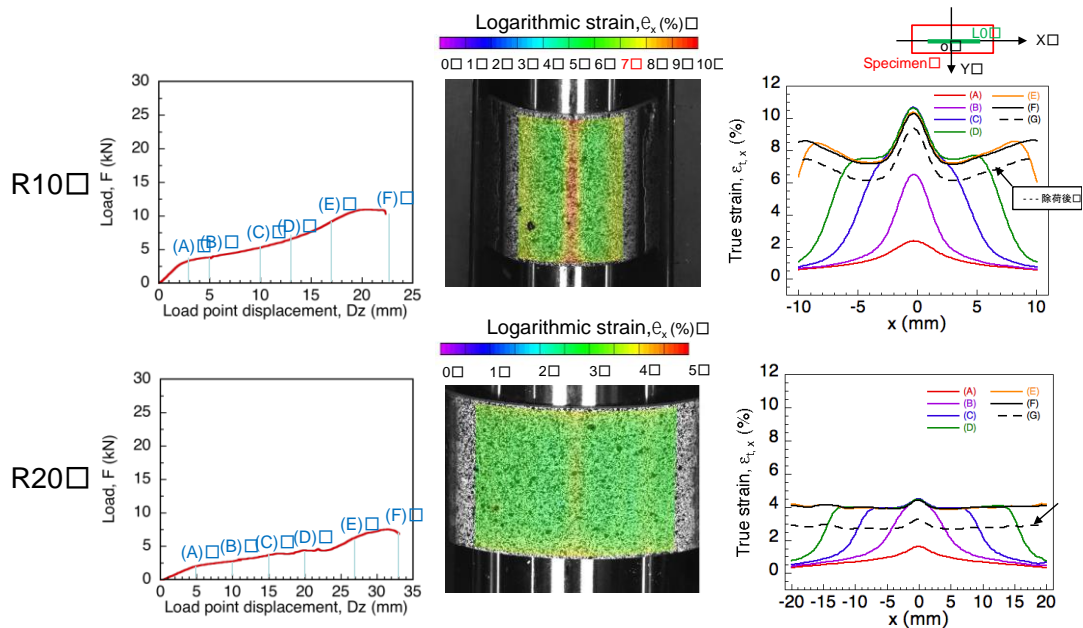


図 3-2.6.7-142 U 曲げ過程で計測した曲げ頭頂部近傍の長手方向ひずみ分布の履歴

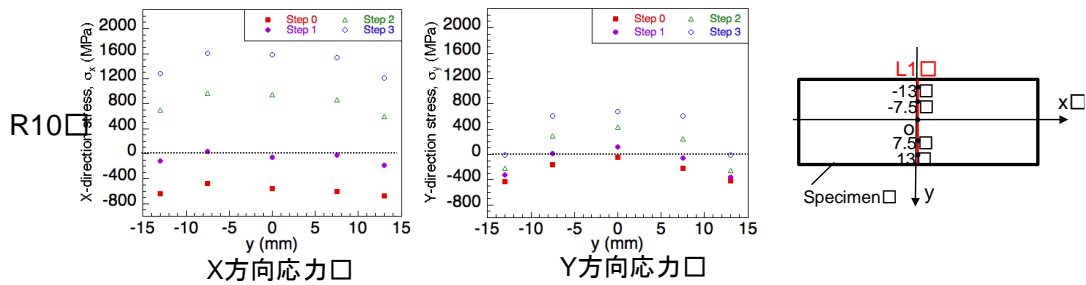


図 3-2.6.7-143 ボルト締め過程の曲げ頭頂部の X 方向および Y 方向応力の板幅方向分布の履歴

このような U 曲げ・ボルト締め過程における変形挙動および表面の応力・ひずみ分布を再現するための三次元弾塑性 FEM 解析手法について、治具と試験片の摩擦係数と治具同士の間隔に着目して検討した。その結果、本解析により、実験で得られた頭頂部における U 曲げ過程におけるひずみ分布、ならびにボルト締め過程における応力分布の履歴を精度よく再現できることがわかった。

以上の結果から、水素割れの影響因子である静水圧応力と相当塑性ひずみの情報を板表面だけでなく内部も含めて三次元弾塑性 FEM 解析により取得できることがわかった。そこで、U 曲げ試験片中で水素脆化割れ発生が危惧される位置についての考察を行った。図 3-2.6.7-144 は、R10 試験片のボルト締め過程における頭頂部の板厚中央部における板厚方向の静水圧応力分布と塑性ひずみ分布の履歴を示したものである。特に静水圧応力が最大となる位置に関しては、ボルト締めの初段階（頭頂部表面の応力が小さい段階）では頭頂部から少し離れた位置における板厚方向内部に存在し、ボルト締め最終段階になってはじめて最大値が板表面部に現れることがわかった。

このような応力・ひずみ場の FEM 解析手法は、水素割れ挙動の解明や、静水圧応力を駆動力とする水素拡散の数値解析へ展開が期待される。一方で、U 曲げ試験においては、条件によってはボルト締め込み量を変化させることでは、頭頂部表面からの割れ限界に及ぼす応力の影響を必ずしも適切に実験・評価できないことも示唆された。

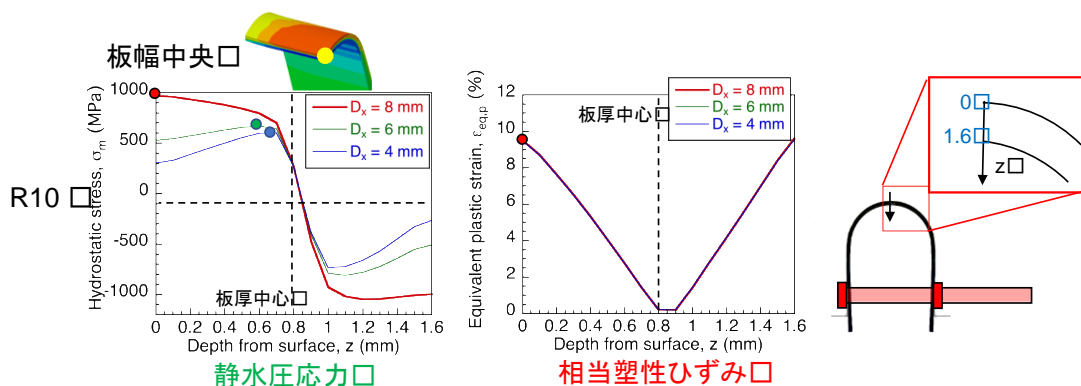


図 3-2.6.7-144 三次元弾塑性 FEM 解析で得られたボルト締め過程の板厚方向の静水圧応力分布と相当塑性ひずみ分布 (R10)

## (2-2) 陰極水素チャージ実験中の割れ発生場所・時期の検出

超高強度薄鋼板の U 曲げボルト締め試験片の陰極水素チャージ法によって、割れ位置と割れ発生までのチャージ時間を精度良く検出する手法について検討した。そこで、U 曲げボルト締め試験片の陰極水素チャージ中に、3 次元デジタル画像相関法（3D-DIC 法）によって加工部表面のひずみ変化を計測した。その結果、図 3-2.6.7-145 に示すように、割れの発生に伴うひずみ変化を検出することができ、割れ発生場所・時期を検出することに成功した。ただし、割れ発生までに長時間要する場合には曲げ加工部表面に塗布したマーカの剥離が生じるため、比較的短時間で割れ発生が生じる陰極水素チャージ条件（電流密度）の設定が必要であることがわかった。

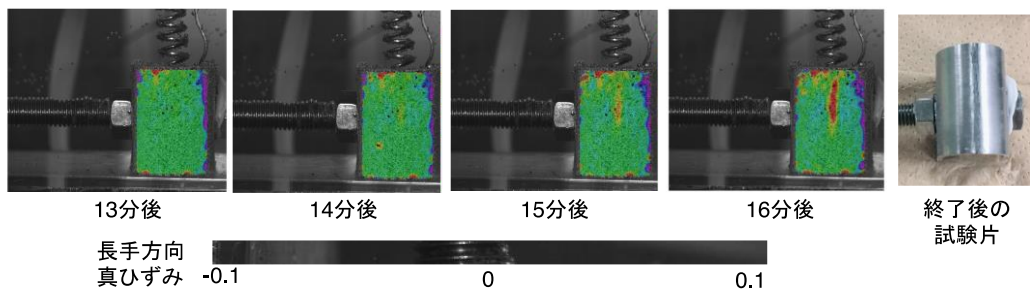
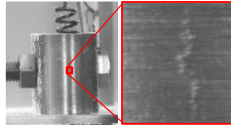
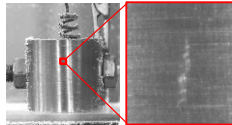
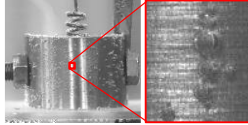
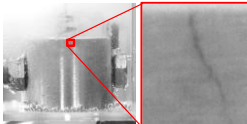
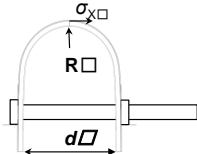


図 3-2.6.7-145 3D-DIC 法を用いた水素割れ発生に伴うひずみ変化の計測例

3D-DIC 法と画像観察の結果を併用して、U 曲げボルト締め試験片の水素割れ発生限界に及ぼす塑性ひずみの影響、ならびに負荷応力の影響について実験により検討した。ここでは、長さ 1 mm の割れが確認できた時点（後の観察により表面に長さ 1mm の割れが生じたときには板厚方向に約 0.2mm 進展していることが確認されている）を割れ発生と定義し、割れ発生時間を計測した。その結果を表 3-2.6.7-10 にまとめて示す。曲げ表面に付与される応力が最大となる締め込み量の大きい条件（ $d$  が小さい）において（それぞれ  $d=2R$ ）、曲げ半径が小さく付与した塑性ひずみ量が大きいほど割れ発生は短時間で生じた。また、割れは板幅中央近傍の曲げ表面にて発生し、その後は、徐々に複数の割れ発生を伴いながら板幅全域へ広がる様子が確認された。一方、曲げ半径が 15mm の試験片に対して締め込み量を変化させ曲げ表面に付与される応力を小さくすると（ $d=2.5R$ ）、割れ発生には高電流密度かつ長時間を要し、締め込み量  $d=2R$  の場合とは異なる割れ挙動を示した。本条件では、曲げ表面の板幅端部にて割れが確認された後、急速に（数秒で）板幅方向へ伝播し破断に至る挙動がみられた。破断後の破面と照らして、本条件では板厚方向内部で発生した割れ（粒界割れ）が延性的に粒内を伝播することにより表面に現出することが示唆された。これは、図 3-2.6.7-144 の結果から推察されるように、締め込み量が小さい場合（ $d=2.5R$ ）、曲げ表面部よりも板厚方向内部で応力が高くなることと定性的に対応している。本試験による締め込み量の変化では、割れ限界に及ぼす板表面の応力値の影響を広い応力範囲にわたって評価することは難しいことがわかった。

表 3-2.6.7-10 水素割れ発生限界(発生挙動と発生時間)に及ぼす塑性ひずみ及び負荷応力の影響

d	$\sigma_x$	電流密度 (A/m <sup>2</sup> )	曲げ半径 R (mm)		
			10	15	20
2R (最大締め込み)	$1.2\sigma_T$	3.5	3 min 	9 min 	30 min 
2.5R	$0.9\sigma_T$	150	—	21 h 	
2.8R	$0.6\sigma_T$	150	—	割れ発生なし	—

(2-3) 割れ限界に及ぼす塑性ひずみ・応力・拡散性水素量の評価試験

割れ限界に及ぼす塑性ひずみ・応力・拡散性水素量の影響を広い条件範囲において評価するための試験法を考え、実験および評価を行った。設計した試験片は厚さ 0.5mm、幅 1.0mm の板状の微小引張試験片で、平行部中央に板厚方向に R=2.0mm、深さ 0.05 mm の浅い切欠きを両面に導入した。これは、U 曲げ試験片の頂上部に近い応力状態を切欠き底断面中央で再現するものとして設計したものである。この微小試験片に対して引張負荷によって塑性ひずみを付与し、陰極水素チャージを行った後、大気中で引張試験を行うことで切欠き底断面中央からの割れ限界荷重を取得した。なお、引張負荷中は試験片表面のひずみ分布を双眼顕微鏡を用いた DIC 法により計測して、割れ発生位置を特定した。実験は、付与する塑性ひずみレベルと水素チャージ条件をそれぞれ変化させた条件で行った。

全ての条件で行った塑性ひずみ付与過程（予ひずみ付与過程）およびその後の水素チャージ後の引張試験時の荷重応答と破断（割れ発生）荷重を図 3-2.6.7-146 に示す。多くの条件で最終引張試験時に弾性域で割れ（破断）が生じ、環境水素量（採用した陰極チャージ条件下で素材にチャージされる飽和水素量）が 1.71ppm 以上の条件では全てにおいて粒界破面を呈した。また、最終引張試験時に計測したひずみ分布の変化挙動と破面観察結果とあわせて、いずれも割れは試験片内部を起点として発生したことを示唆する結果が得られた。

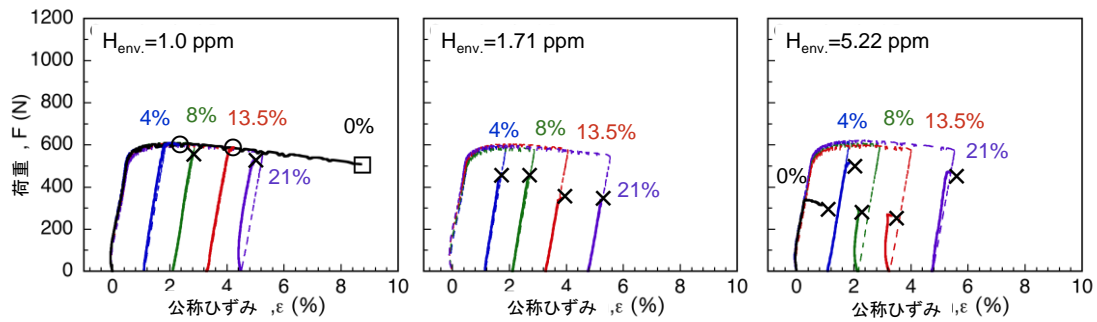


図 3-2.6.7-146 塑性ひずみ付与過程およびその後の水素チャージ後の引張試験時の荷重応答

実験を行った引張り予ひずみ付与（除荷） - 水素チャージ - 引張り破断試験の全過程を、FEM を用いてそれぞれ弾塑性解析、水素拡散解析、弾性解析を行った。その結果を用いて、実験で特定された割れ発生荷重時の割れ起点における塑性ひずみ、最大主応力および拡散性水素量の関係を求めた。得られた結果を図 3-2.6.7-147 に示すように、予ひずみ量によって傾向が異なることがわかった。材料の一樣伸び相当のひずみ範囲（8%程度以下）では、水素量が多い領域において予ひずみが大きいほど限界応力が低くなる傾向が見られたが、さらに大きな予ひずみを付与した際には、逆に限界応力は大きくなる傾向が見られた。これは、一樣伸び以上の大きな塑性ひずみが付与した際に生じ始めるマイクロボイドに水素がトラップされることで、粒界への水素集積量が少なくなったことが原因の一つとかが得られるが、今後の詳細検討が必要である。

このような試験および解析結果に基づき、水素割れの局所限界条件が定量化できることが示された。

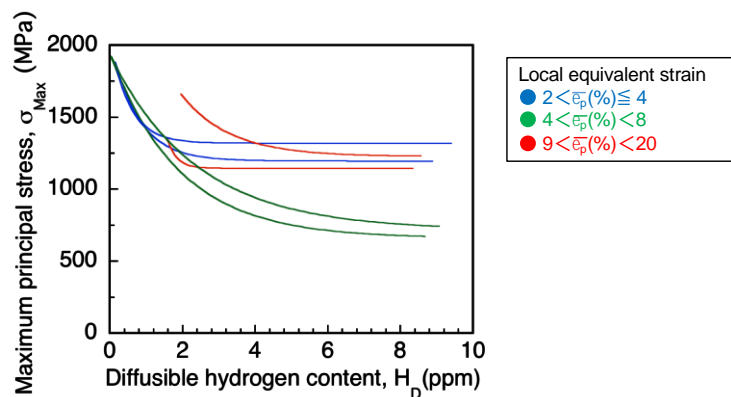


図 3-2.6.7-147 割れ発生荷重時の割れ起点における塑性ひずみ、最大主応力および拡散性水素量の関係

## 【千葉分室 再委託 京都大学】

### (1) 背景及び目的

革新鋼板の水素脆化評価技術の開発のためには、試験条件および試験環境による応力、ひずみおよび水素濃度分布の変化が水素脆化割れ限界に及ぼす影響を明確化するとともに、塑性加工による応力、ひずみおよび水素濃度分布とマイクロ組織損傷の定量化のための技術構築が必要になる。

ラスマルテンサイト組織はほとんどの革新鋼板を構成する組織であるが、ラス、ブロック、パケット、旧オーステナイト粒といった種々の大きさのマイクロ組織で構成された非常に複雑な組織となっている。ラスは幅  $0.2 \mu\text{m}$  程度の板状の組織であり、 $10^{14} \sim 10^{15} \text{ m}^{-2}$  ほどの高密度の転位を含む。一方、ブロックはほぼ同じ結晶方位を有するマルテンサイトラスの集合、パケットはほぼ同じ晶癖面を有するマルテンサイトラスの集合である。本研究では、複雑なラスマルテンサイト組織を有する焼き戻しマルテンサイト鋼およびマルテンサイト・フェライト 2 相鋼を研究対象として、塑性加工材における水素脆性クラック発生サイトの同定・予測のための技術構築を目指し、走査型電子顕微鏡 (scanning electron microscopy、SEM) 像を用いた画像相関 (digital Image Correlation、DIC) 法による局所ひずみ分布の測定を行うことによって、マイクロ組織レベルすなわち数百ミクロン以下のオーダーでの局所塑性ひずみ分布を正確に把握し、その塑性ひずみ分布と水素脆性クラック発生サイトの相関を明らかにすることを目的とした。

### (2) 実験方法および結果

材料として商用の SCM435 鋼を用いた。熱処理を変化させることにより、焼き戻しマルテンサイト組織およびマルテンサイト・フェライト 2 相組織の 2 種類の組織を有する試料を作製した。(以下では、それぞれの試料を焼き戻しマルテンサイト鋼および DP 鋼と呼ぶ)。引張試験の結果、焼き戻しマルテンサイト鋼と DP 鋼の引張強度はそれぞれ 1513MPa、1572MPa であり、ともに 1500MPa 以上であったため、これらの試料は革新鋼板のモデル材料として取り扱うことができる。熱処理後の試料のマイクロ組織は SEM を用いて観察し、結晶方位解析には SEM により得られる電子線後方散乱回折 (Electron backscattering diffraction pattern、EBSD) パターンを利用して行った。試験片に室温にて引張変形を付加し、引張変形前の SEM 像とそれぞれの変形量における SEM 像を用いた DIC 解析を行うことによって、マイクロ組織レベルでの組織損傷 (塑性ひずみ分布) を調べた。さらに、引張変形による塑性変形を施した試料に対して、除荷後に陰極電界法による水素チャージを行うことによって水素を導入し、再度引張変形を付加することによって、水素脆性クラックの発生サイトを同定し、DIC 解析によって同定した局所塑性ひずみ分布と水素脆性クラックの発生サイトの相関を調べた。

図 3-2.6.7-148 は DIC 解析によって調べた引張変形中（付加応力：(a) 533MPa、(b) 800MPa）の局所塑性ひずみ分布である。マイクロレベルにおいてもひずみは不均一であることがわかる。また、マルテンサイトマイクロ組織中のブロックやパッケージ毎にひずみ量が異なっている傾向が確認でき、さらに旧オーステナイト粒界近傍にひずみが

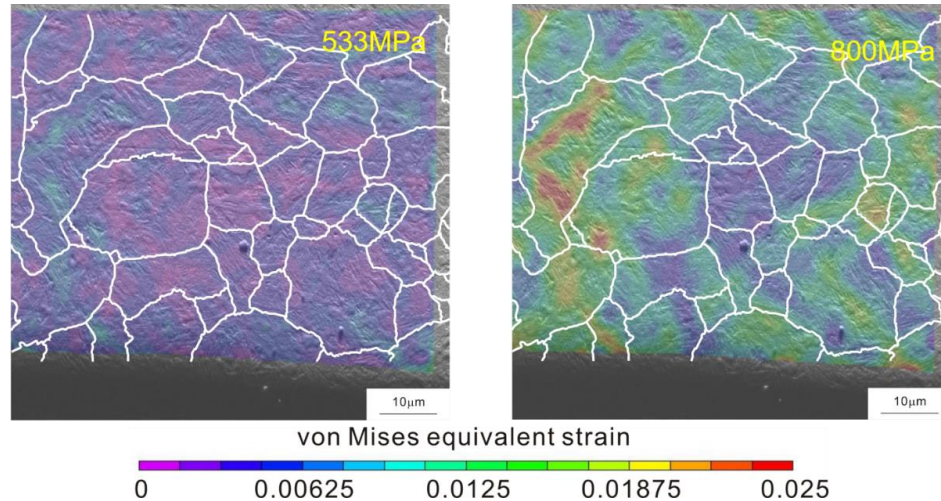


図 3-2.6.7-148 DIC 解析によって調べた引張変形中の局所塑性ひずみ分布（焼き戻しマルテンサイト鋼、付加応力：(a) 533MPa、(b) 800MPa）。

集中している領域も存在している。この結果より、焼き戻しマルテンサイト鋼の局所塑性変形挙動はマルテンサイトマイクロ組織に大きな影響を受けることが明らかとなった。

図 3-2.6.7-148(b)に示したように応力 800MPa まで引張予変形を付加した試料に対して、水素チャージを行うことによって水素を導入した後、再度引張変形を付加した試料の SEM 像を図 3-2.6.7-149(a)に示す。比較的塑性ひずみ量の多い旧オーステナイト粒界近傍にて水素脆性クラックが発生していることがわかる（図 3-2.6.7-149(b)）。つまり、局所塑性ひずみ多い領域が水素脆性クラックの発生サイトとなることが明らかとなった。図 3-2.6.7-150 は DP 鋼の(a) SEM 像、(b) EBSD 方位マップ、(c) EBSD-IQ マップである。図 3-2.6.7-150(c) のように EBSD-IQ マップを用いることによって、フェライト相とマルテンサイト相を明確に区別することが可能である。図 3-2.6.7-151(a)に応力 1133MPa の引張変形を付加した際の DP 鋼の局所塑性ひずみ分布を DIC により調べた結果を示す。マイクロ組織中のフェライト相とマルテンサイト相の間の界面近傍に塑性ひずみが集中していることがわかる。図 3-2.6.7-151(a)のように、付加応力 1133MPa まで引張予変形を付加した試料に対して水素チャージを行うことによって水素を導入した後、破断まで引張変形を付加した試料の SEM 像を図 3-2.6.7-151(b)に示す。観察領域は図 3-2.6.7-149(a)と同じであり、塑性ひずみが集中していた箇所に矢印で示すような微小な水素脆性クラックが発生していることがわかる。以上の結果より、図 3-2.6.7-149 に示した焼き戻しマルテンサイト鋼の場合と同様に、DP 鋼において予変形時に大きな塑性ひずみを受けた箇所が水素脆性クラックの発生サイトとなることが明らかとなった。以上より、SEM 像を用いた DIC 法によ



る塑性ひずみ分布測定は、マイクロ組織レベルでの組織損傷の測定および水素脆性クラックの発生を予測する方法として非常に有用であると言える。

図 3-2.6.7-150 は DP 鋼の(a) SEM 像、(b) EBSD 方位マップ、(c) EBSD-IQ マップである。図 3-2.6.7-150(c) のように EBSD-IQ マップを用いることによって、フェライト相とマルテンサイト相を明確に区別することが可能である。図 3-2.6.7-151(a)に応力 1133MPa の引張変形を付加した際の DP 鋼の局所塑性ひずみ分布を DIC により調べた結果を示す。マイクロ組織中のフェライト相とマルテンサイト相の間の界面近傍に塑性ひずみが集中していることがわかる。図 3-2.6.7-151(a)のように、付加応力 1133MPa まで引張予変形を付加した試料に対して水素チャージを行うことによって水素を導入した後、破断まで引張変形を付加した試料の SEM 像を図 3-2.6.7-151(b)に示す。観察領域は図 3-2.6.7-151(a)と同じであり、塑性ひずみが集中していた箇所に矢印で示すような微小な水素脆性クラックが発生していることがわかる。以上の結果より、図 3-2.6.7-149 に示した焼き戻しマルテンサイト鋼の場合と同様に、DP 鋼において予変形時に大きな塑性ひずみを受けた箇所が水素脆性クラックの発生サイトとなることが明らかとなった。以上より、SEM 像を用いた DIC 法による塑性ひずみ分布測定は、マイクロ組織レベルでの組織損傷の測定および水素脆性クラックの発生を予測する方法として非常に有用であると言える。

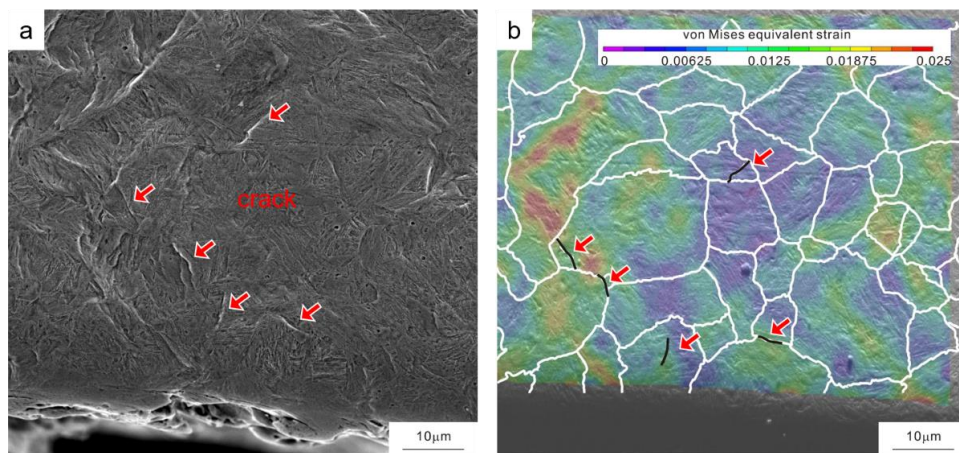


図 3-2.6.7-149 水素脆性クラックの発生サイトと局所塑性ひずみ分布の関係 (焼き戻しマルテンサイト鋼、(a) 水素チャージ後に引張変形を付加した材料の SEM 像、(b) 局所塑性ひずみ分布応力 (800MPa))。

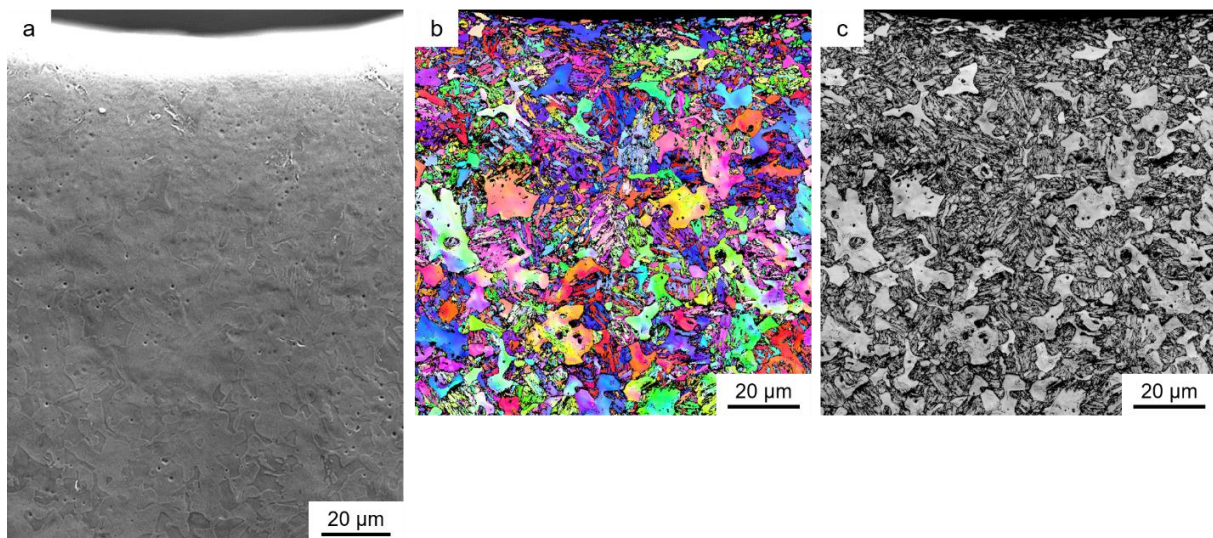


図 3-2.6.7-150 DP 鋼の(a) SEM 像、(b) EBSD 方位マップ、(c) EBSD-IQ マップ。

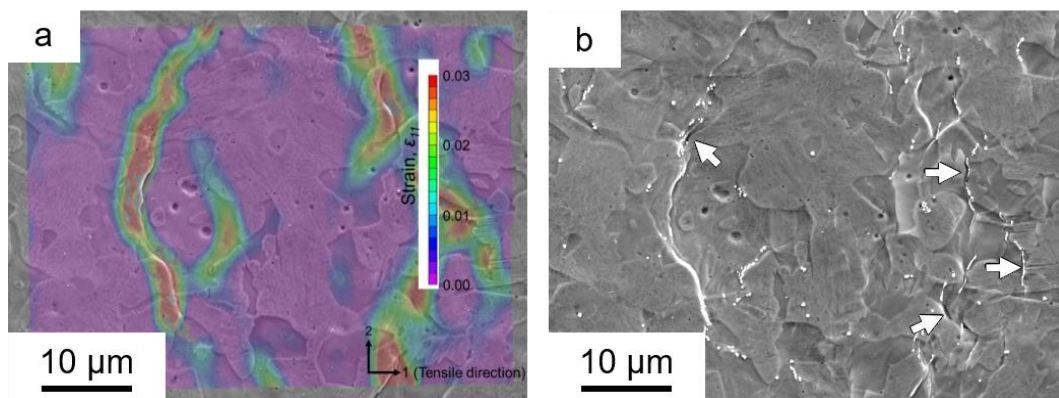


図 3-2.6.7-151 (a) 1133MPa の引張応力を付加したときの DP 鋼の局所塑性ひずみマップ、(b) 水素チャージ後の破断材の SEM 像。

### 【千葉分室 再委託 上智大学】

#### (1) 背景及び目的

塑性変形により導入される格子欠陥と水素トラップの関係解明を目的に、曲げ変形で導入される格子欠陥、特に引張側と圧縮側で形成される格子欠陥の形成挙動の比較について着目した。具体的には、トレーサー水素法により引張側と圧縮側のトレーサー水素量および放出温度から格子欠陥の形成挙動について検討した。

#### (2) 実験方法および結果

##### (2-1) 実験方法

本研究では、SCM435 鋼を使用した。長さ 70 mm、幅 8 mm、厚さ 1.6 mm の曲げ試験片加工し、3 点曲げの支点間距離 35 mm の水素量測定用の試験片に加工した。試験片保管時に形成された傷や被膜を取り除くために、試験前にエメリー紙を用いて

800、1000、2000 番で機械研磨し、加工層を除去した。曲げ試験では試験片が U 字に変形するにしたがって溶液と触れる面積も変わるため、試験片表面に生じる水素の濃度を一定にすることができるポテンショスタットを用いた定電位陰極電解法を水素添加に採用した。温度 30 °C の 0.10 N NaOH 水溶液中にて電位 -1.0~-1.5 V (vs. Ag/AgCl) で 48 h の定電位陰極電解チャージを行った。

3 点曲げ試験による水素脆化感受性を評価した。水素濃度を一定に保つことを目的として、水素予添加時と同一の条件で曲げ試験中も水素添加を行った。バンドヒーターを用いて溶液の温度を 30 °C 一定に保った。その後クロスヘッドスピードを 0.1 mm/min とし、曲げ半径 10 mm で 3 点曲げ試験を実施した。水素脆化感受性評価を破壊強さで評価した。

曲げ試験後の試験片を引張側と圧縮側に分け、低温昇温脱離分析装置 (L-TDS) を用いて水素分析を行った。温度 30 °C の 0.10 N NaOH 水溶液中にて電位 -0.94 V vs. Ag/AgCl で 48 h の定電位陰極電解チャージを行った。変位 6 mm まで 3 点曲げ試験を行った。水素未添加材は 30 °C 一定に保った 0.10 N NaOH 溶液中で変位 6 mm まで 3 点曲げ試験を行った。曲げ中央部から 8 mm×5 mm の試験片を採取し、機械研磨、化学研磨することで、図 3-2.6.7-152 に示す引張側と圧縮側の試験片を作製した。30 °C の 0.10 N NaOH 水溶液中で電圧 -1.2 V (vs. Ag/AgCl) でトレーサー水素添加し、低温 TDS を用いて昇温速度 1 °C/min、温度範囲 200~200 °C で水素分析することで、引張側・圧縮側のひずみ誘起格子欠陥の種類と量の比較を行った。

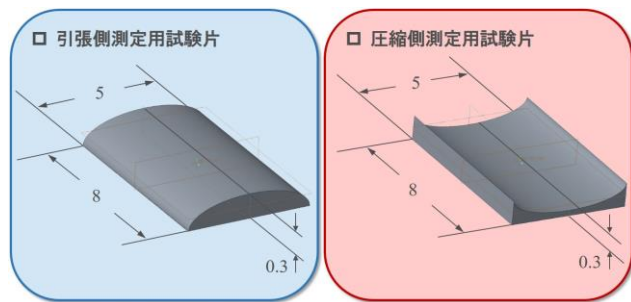


図 3-2.6.7-152 L-TDS 測定用試験片

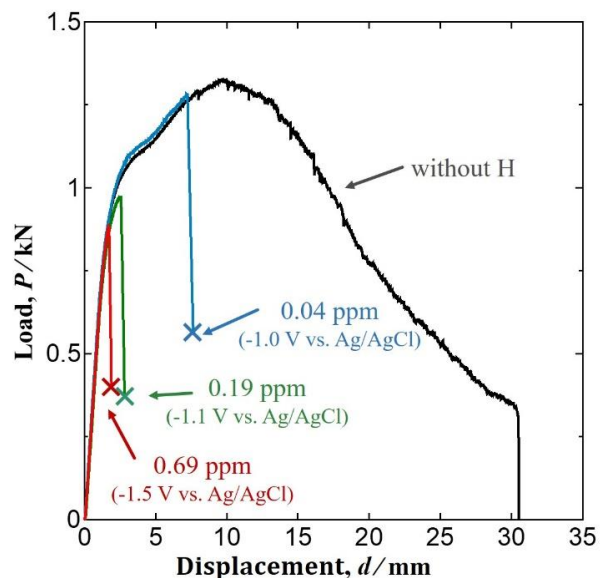


図 3-2.6.7-153 SCM435 の曲げ試験による荷重-変位曲線

### (2-2) 3 点曲げ試験による水素脆化感受性評価

得られた荷重-変位曲線を図 3-2.6.7-153 に示す。0.69 ppm(高水素量)チャージ材では弾性域で破断し、0.19ppm(中水素量)、0.04 ppm(低水素量)チャージ材では耐力付近で破断する。また、破壊強さは 0.04 ppm(低水素量)チャージ材で 1.29 kN、0.19 ppm(中水素量)チャージ材で 0.97 kN、0.69 ppm(高水素量)チャージ材で 0.88 kN で

ある。水素量増加とともに破壊強さが低下する。曲げ試験においても水素量増加に従い水素脆化感受性が高まる。

### (2-3)曲げの引張側・圧縮側のひずみ誘起格子欠陥の種類と量の比較

図 3-2.6.7-154 に水素未添加材の引張側材・圧縮側材と水素添加材の引張側材・圧縮側材の水素脱離スペクトルとトレーサー水素量を低温 TDS で測定した結果を示す。水素未添加材の引張側材の水素放出開始温度は 20 °C、水素放出終了温度は 140 °C、ピーク温度は 56.°C である。水素未添加材の圧縮側材の水素放出開始温度は 20 °C、水素放出終了温度は 120 °C、ピーク温度は 48 °C である。水素添加材の引張側材の水素放出開始温度は 10 °C、水素放出終了温度は 180 °C、ピーク温度は 58 °C である。水素添加材の圧縮側材の水素放出開始温度は 0 °C、水素放出終了温度は 150 °C、ピーク温度は 28 °C である。また、水素添加有りで曲げひずみ付与した引張側と圧縮側において、引張側のトレーサー水素量の方が圧縮側のそれに比べ多い。さらに、引張側のトレーサー水素放出終了温度も高い。すなわち、水素を含んで曲げひずみを付与した際、引張側での水素助長ひずみ誘起格子欠陥の形成量が圧縮側のそれより多い。

以上より、水素添加有りで曲げひずみ付与した引張側と圧縮側において、引張側のトレーサー水素量の方が圧縮側のそれに比べ多く、引張側のトレーサー水素放出終了温度も高い結果から、水素を含んで曲げひずみを付与した際、引張側での水素助長ひずみ誘起格子欠陥の形成が圧縮側より助長されることが判明した。

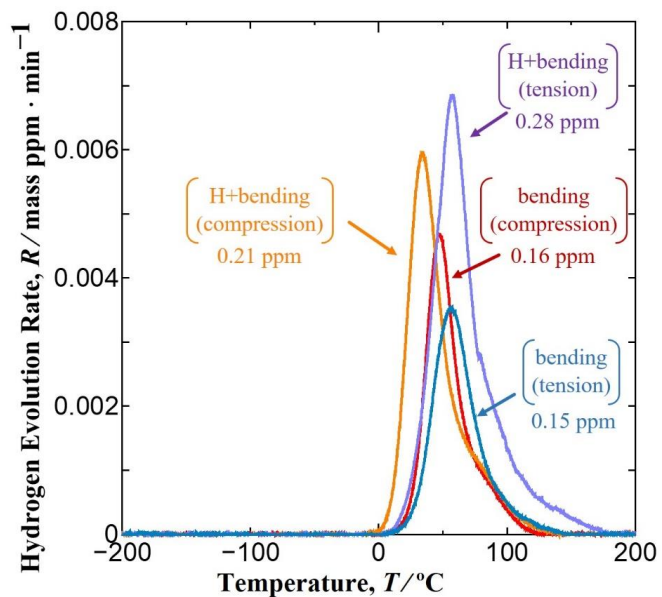


図 3-2.6.7-154 水素添加有り無しの曲げ試験後に得られたの引張・圧縮部の水素脱離スペクトルとトレーサー水素量

### 【千葉分室 再委託 帝京大学】

水素脆化に関わるき裂先端水素拡散挙動と疲労き裂成長速度を計算機シミュレーションにより予測する手法を構築し、遅れ破壊を含めた水素脆化敏感度に及ぼす負荷応力変動効果の解明とそれを可能にするプログラムソフトの開発を行った。研究テーマとして、解決すべき課題は以下のとおりである。

- ・き裂先端の水素拡散挙動とき裂成長の解析的検討
- ・水素凝集と水素脆化割れ挙動解明
- ・遅れ破壊を含めた水素脆化敏感度に及ぼす負荷応力変動効果の解明

以下に得られた結果を示す。

(1)  $\alpha$  法による疲労き裂成長シミュレーション解析の基礎式、解析モデルおよびき裂成長のクライテリオン

解析に用いた基礎式を式 (2-4-1) に示す[1-5]。  $\alpha_i$  ( $i=1\sim 3$ )は  $\alpha$  法の各係数であり、各項のオーダー評価により、右辺第 2 項の応力誘起項が第 1 項の拡散項と等価になるように定めている。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \alpha_1 D \nabla^2 C - \frac{\alpha_2 D}{RT} \Delta V \nabla C \cdot \nabla \sigma_p - \frac{\alpha_3 D}{RT} \Delta V C \nabla^2 \sigma_p \quad (2-4-1)$$

本解析では、経験的に求められている比率に従って、  $\alpha_1 = 0.1, \alpha_2 = 5.0, \alpha_3 = 2.0$  とした。有限差分は、クランク・ニコルソン法を用いて離散化し、非零成分のみを記憶させて、SOR 法にて不足緩和法により解析している[2,3]。また、濃度の一次微分項による振動解を回避するために、式 (2-4-2)

$$\frac{\Delta t}{\Delta r^2} < 0.3 \sim 0.4 \quad (2-4-2)$$

を満たすように時間と位置の分割を行った[2]。これらの工夫により、高精度かつ安定した数値解が得られている[1-5]。解析領域を図 3-2.6.7-155 に示す。FEM-FDM 法[3,5]では、応力解析を行った有限要素法による解析領域は、広範囲に解析しており、拡散解析は切欠き近傍の局所領域を計算領域としている。図 3-2.6.7-155(a),(b)に示す各計算領域を示す。シミュレーション解析のフローチャートを図 3-2.6.7-156 に示す。

塑性変形の歪履歴性を考慮して、応力負荷過程において、塑性変形が一度に進まないように、負荷応力を微小時間ステップで増加させる。各応力段階にて、静水圧応力を計算し、これを差分格子点に補間し、水素拡散解析を行う。静水圧応力は、隣接 4 要素の平均値をその重心位置の値とし、この点での応力を隣接する差分格子点に補間した[3,5]。この方法によれば、有限要素解析で得られる応力の数値誤差的な変動が抑えられ、滑らかな応力分布が得られる。  $\nabla \sigma_p$  なる応力勾配が水素駆動力となるので、応力の絶対値の近似度ではなく、勾配の近似度が要求されることからこの平滑化は重要である。本手法の概要を図 3-2.6.7-157 に示す。

また、有限要素法による応力解析では、き裂先端の隣接要素の歪エネルギーが、ある限界値に達した時に、き裂先端の節点を解放するという手法で疲労き裂を成長させた[1]。この限界条件を式 (2-4-3) に示す。限界条件は水素濃度の関数となっており、水素濃度が増加すると限界歪エネルギーが減少するようにしている。限界条件を満たす節点は、すべて解放している。節点解放は、解放する節点に作用している反力に逆反力を増分的に負荷し、節点に作用している反力を完全に除荷した後、解放した。逆反力の負荷増分数はほぼ 100 段階である[6]。本解析手法の概要図を図 3-2.6.7-158 に示す。クライテリオンに用いた水素濃度は、解析で得られる最大水素濃度、  $C_{max}$  を用いた。また、水素は腐食性環境により算出される水素の拡散を想定して、き裂先端に外部より負荷応力に対応して流入するとした。

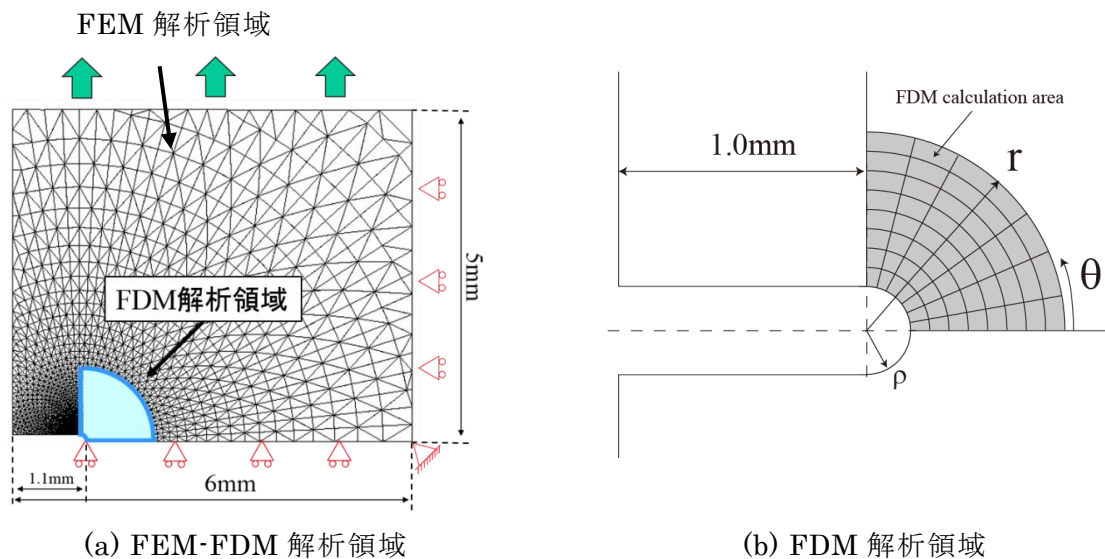
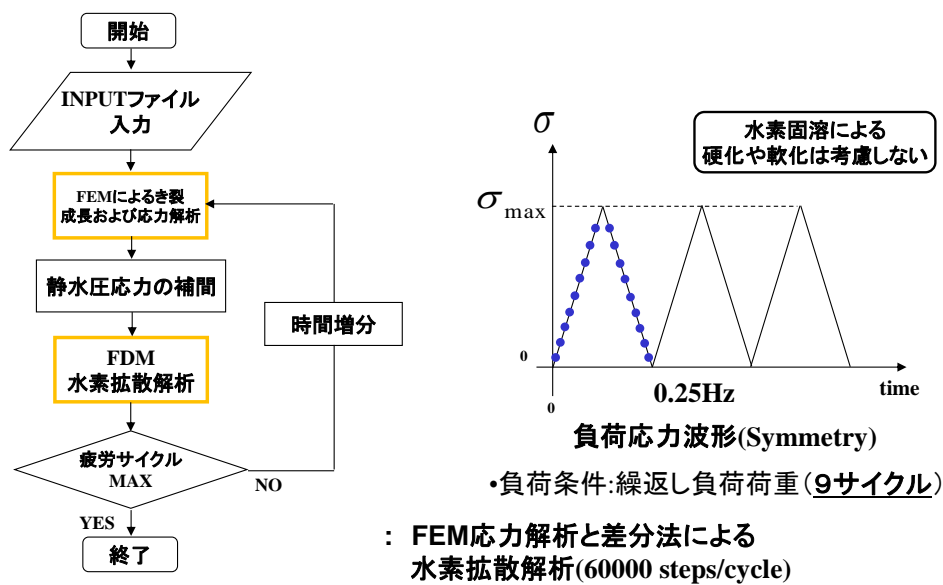


図 3-2.6.7-155 FEM-FEM および FEM-FDM 計算領域

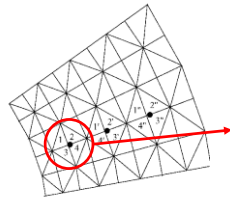


: FEM応力解析と差分法による  
水素拡散解析(60000 steps/cycle)

\* A. T. Yokobori, Jr., T. Uesugi, M. Sendoh and M. Shibata, Strength, Fracture and Complexity, 1 (2003) 187-204.

\*\* T. Ohmi, A. T. Yokobori, Jr., K. Takei, Proc. of ICF12, (2009) Ottawa in the content of CD rom of hydrogen embrittlement.

図 3-2.6.7-156 水素環境下での疲労き裂成長シミュレーション解析フローチャート  
この図では、例として 9cycle 負荷の場合の水素拡散ステップ数を示している。

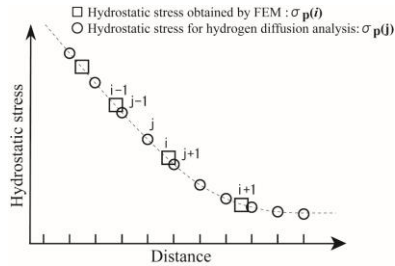


重心位置

$$r_g = \frac{\sum_i S_i r_i}{\sum_j S_j} \quad \theta_g = \frac{\sum_i S_i \theta_i}{\sum_j S_j}$$

静水圧応力

$$\sigma_{p_g} = \frac{\sum_i S_i \sigma_{p_i}}{\sum_j S_j}$$



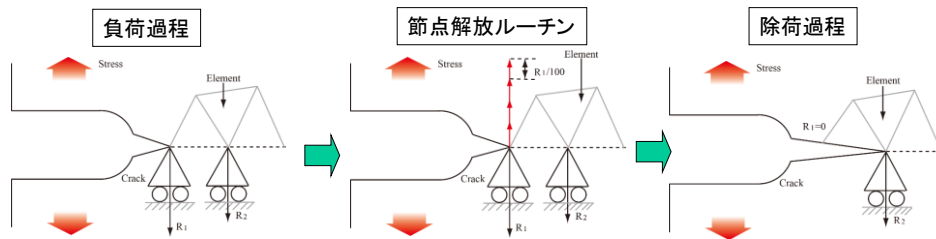
差分格子点への補間式  
(2次精度の中心差分)

$$\sigma_{p_j} = \frac{(r_j - r_{i-1})\sigma_{p_i} + (r_i - r_j)\sigma_{p_{i-1}}}{r_i - r_{i-1}}$$

$$\nabla \sigma_{p_i} = \frac{\sigma_{p_{i+1}} - \sigma_{p_{i-1}}}{2\Delta r^+}$$

$$\nabla^2 \sigma_{p_i} = \frac{\nabla \sigma_{p_{i+1}} - \nabla \sigma_{p_{i-1}}}{2\Delta r^+}$$

図 3-2.6.7-157 有限要素法で得られる静水圧応力の平滑化とその差分格子点への補間法の概要

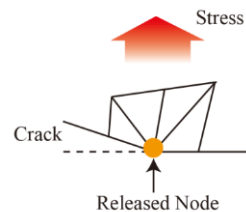


反力を持つき裂先端の拘束節点に、逆反力を段階的に加えることによって節点を解放

解放条件: ひずみエネルギー密度

$$W^P \geq W_H^P \quad W_H^P = \frac{W_c^P}{(C_{\max}/C_0)^{n_H}}$$

$W^P$ : 解放節点のひずみエネルギー密度  
 $W_H^P$ : 最大水素濃度を考慮したき裂成長クライテリア



$W^P$ は解放節点周辺隣接要素のひずみエネルギー密度を平均化したもの

図 3-2.6.7-158 水素脆化の影響を考慮に入れた疲労き裂節点解放手法の概要図

$$W_H^P = \frac{W_c^P}{(C_{\max}/C_0)^{n_H}} \quad (2-4-3a)$$

$$W^P \geq W_H^P \quad (2-4-3b)$$

(2) 疲労き裂先端近傍の水素凝集挙動

疲労き裂先端近傍における 2cycle 目のき裂延長方向の静水圧応力分布、水素濃度分布を図 3-2.6.7-159 および図 3-2.6.7-160 に示す。これらの結果から、水素濃度は静水圧応力場の極大値あるいは、その近傍の変曲点で極大値 ( $C_{\max}=12.8$ ) をとり、応力勾

配の変化で増減し、時間とともに変化する遷移解の状態では、静水圧応力場と同じ分布にはなっていないことがわかる。

また、本研究で提案している  $\alpha$  法を用いずに、拡散方程式の各項の重みをすべて同じ値にして解析した結果を図 3-2.6.7-161（荷重サイクル：1cycle）に示す。応力勾配項に重みが付加されていない場合は、水素濃度分布は水素が流入するき裂先端近傍で高い濃度( $C_{max}=2.9$ )となり、応力分布に影響されず、き裂先端から離れるに従い一様に減少し、 $\alpha$  法により得られた図 3-2.6.7-160 とは、異なる結果となり、応力の影響は発現しなかった。また、この時のき裂先端の水素濃度は、 $\alpha$  法により解析した 1cycle での切欠き先端での水素濃度( $C=2.4$ )とほぼ同じであるが、 $\alpha$  法により解析した場合は最大水素濃度は、静水圧応力が極大値近傍において生じ、 $C_{max}=11.3$  となっていた。以上のことから、 $\alpha$  法により、応力誘起水素拡散凝集挙動が再現され、静水圧応力分布の極大点及びその近傍の変曲点に高濃度の水素凝集が生じることが示された。

また、拡散方程式のオーダーリング評価を行うと、第 2 項を 50 倍程度増幅させることにより、第 1 項と同程度のオーダーとなった。本解析で取り扱った材料は 1500MPa 級の高強度鋼であることから、第 2 項の応力勾配項の寄与が考えられることから、 $\alpha$  法は水素の応力誘起拡散挙動を再現するために必須であることが示された。

図 3-2.6.7-159 および図 3-2.6.7-160 に示される  $\alpha$  法による解析において、水素拡散の流束  $J$ 、(flux)を求めた結果を図 3-2.6.7-162 に示す。本結果から、 $\alpha$  法による解析では、水素はき裂先端から流入して、き裂先端延長方向の水素高濃度領域に凝集していくことが検証された。

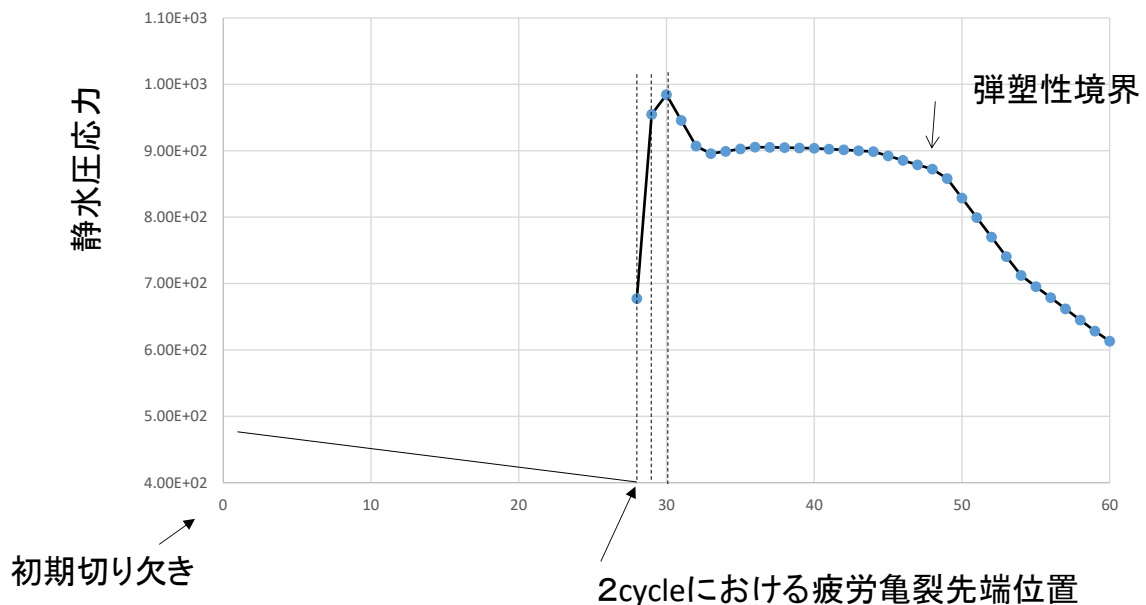


図 3-2.6.7-159 疲労き裂先端近傍におけるき裂延長方向の静水圧応力分布(MPa)

(0.025Hz、疲労き裂成長長さ：0.385mm、荷重サイクル：2cycle、節点解放数：27、横軸は距離に対応する差分格子点番号である。)



0.025Hz 疲労亀裂長さ: 0.385mm 2cycle 27  
 節点解放  $\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 0.1 : 5.0 : 2.0$

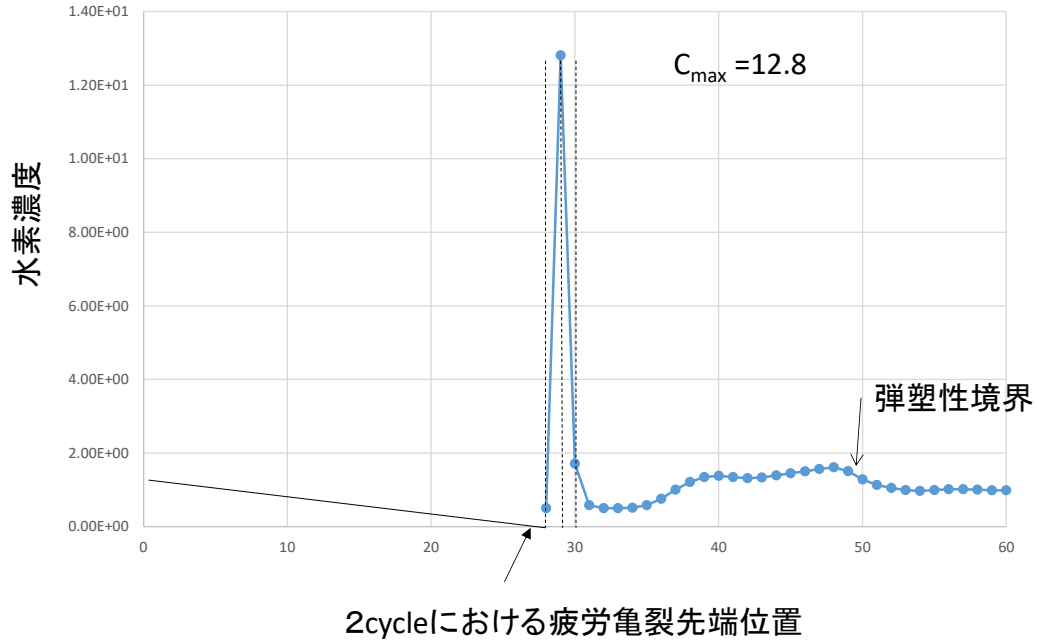


図 3-2.6.7-160 疲労き裂先端近傍におけるき裂延長方向の水素濃度分布（0.025Hz、疲労き裂成長長さ：0.385mm、荷重サイクル：2cycle、節点解放数 27、横軸は距離に対応する差分格子点番号である。）

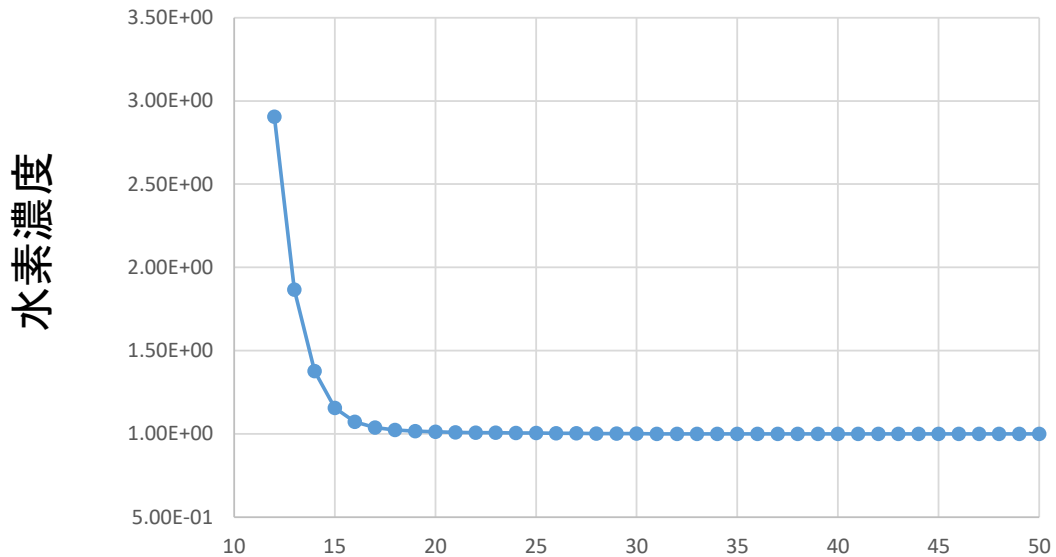


図 3-2.6.7-161  $\alpha$ 法を用いずに、拡散方程式の各項の重みをすべて同じ値にして解析した場合のき裂先端延長方向の水素濃度分布、横軸は距離に対応する差分格子点番号である。

$$\alpha_1 : \alpha_2 : \alpha_3 = 0.1 : 5.0 : 2.0$$

2cycle 0.025Hz Flux

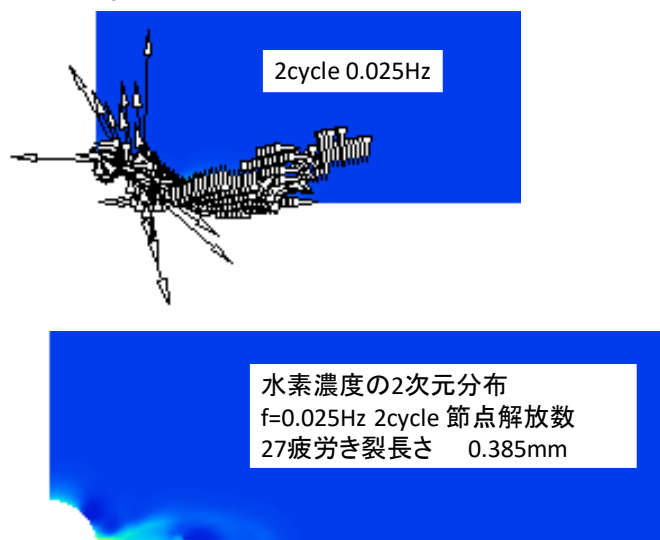


図 3-2.6.7-162  $\alpha$ 法を用いた場合の水素拡散流束  $J(\text{flux})$ の解析結果、白印が流束方向  
静水圧応力極大値近傍に水素が凝集して行くことがわかる。

(3)本シミュレーションにより得られた大気中と水素環境下での疲労き裂成長曲線と実験結果との比較

本解析で得られた水素環境下と大気中の疲労き裂成長曲線を図 3-2.6.7-163 に示す。き裂成長曲線は、大気中に比べて水素環境下では加速し、かつ、繰返し速度が遅くなるほどき裂成長の加速がみられており、実験特性とも定性的に一致する結果となっている。

さらに、それぞれの疲労き裂成長曲線を詳細に示した結果を図 3-2.6.7-164 に示す。本結果から、大気中では、若干、下に凸の曲線となり、0.25Hz では、初期に上に凸の曲線となる。さらに繰返し速度が低下して 0.025Hz では、遅れ破壊のき裂成長曲線に見られる直線的な成長特性（疲労き裂成長速度の等速度性）となり、0.0025Hz になるとまた、下に凸の曲線となった。

図 3-2.6.7-165 に低合金 Cr-Mo 鋼(SCM4 種)を用いた 3.5%NaCl 水溶液中での腐食疲労き裂成長曲線を示す[7,8]。本材料は、1000MPa 級の高強度鋼であることから、腐食環境誘起水素脆化の影響が発現していると考えられる。

図 3-2.6.7-164 に示す、0.25Hz ((b)図)と 0.025Hz ((c) 図)のシミュレーションによる疲労き裂成長曲線とその繰返し速度に近い条件の図 3-2.6.7-165 に 0.11Hz ((a) 図)および 0.05Hz ((b)図)の実験による疲労き裂成長曲線は、初期の加速状況や直線的な疲労き裂の成長挙動など定性的に一致した傾向を示している。

以上のことから、本解析で得られる水素環境下での疲労き裂成長曲線は、実験特性を初期を含めて良く再現していることがわかる。

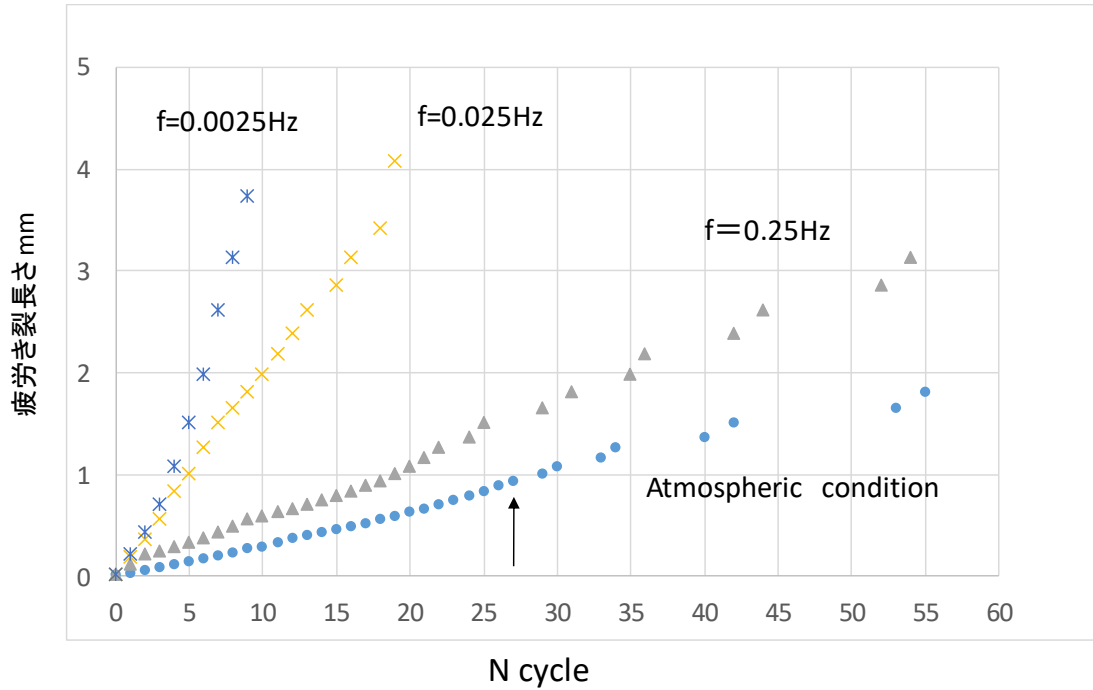


図 3-2.6.7-163 本解析で得られた水素環境下と大気中の疲労き裂成長曲線

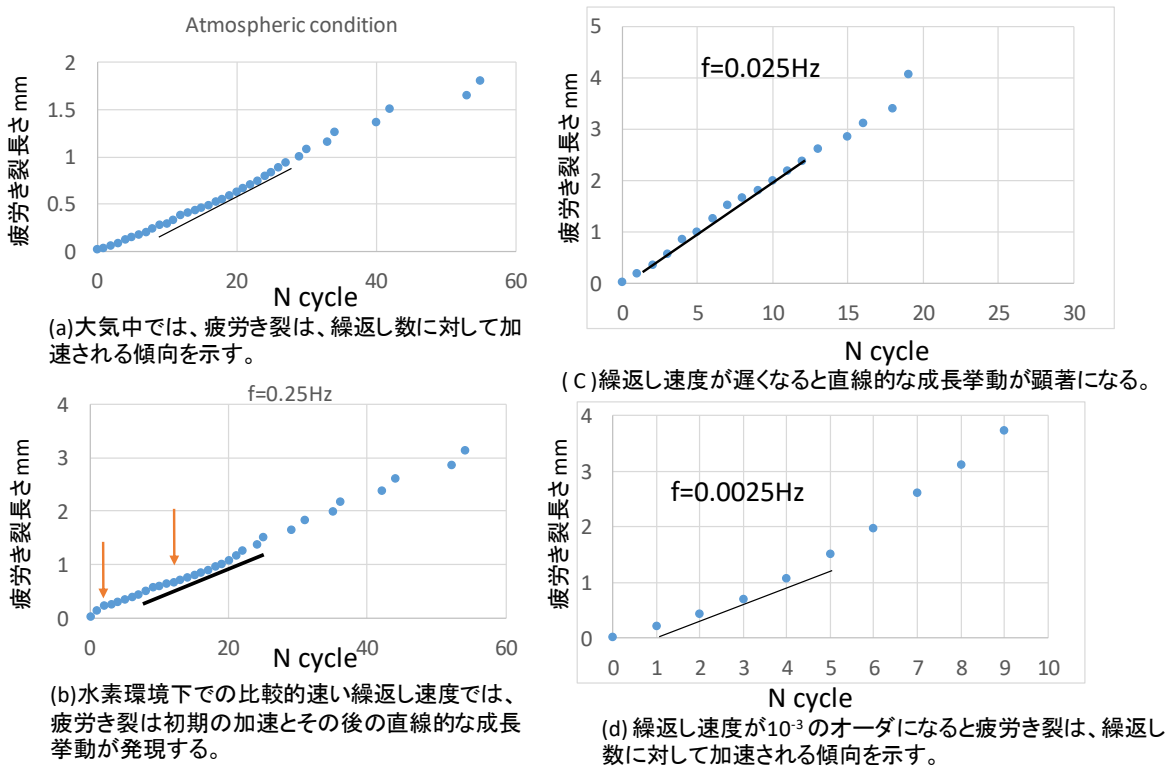
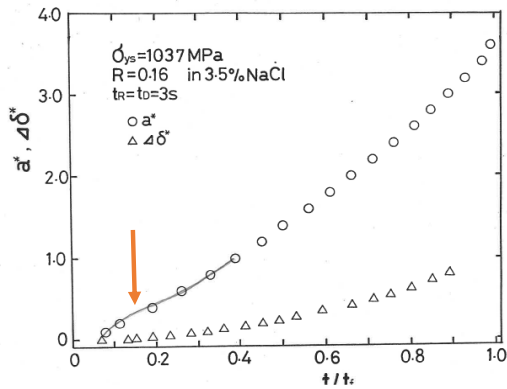
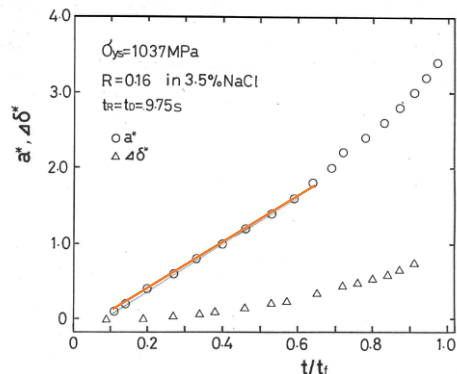


図 3-2.6.7-164 それぞれの負荷応力繰返し速度における疲労き裂成長曲線



(a) 繰り返し速度が速い時亀裂成長曲線の初期に加速領域を有し、その後も加速する傾向を示す。(0.11Hz)



(b) 繰り返し速度が遅くなるとき裂の直線的な成長挙動(等速度特性)が顕著になる。(0.05Hz)

図 3-2.6.7-165 低合金 Cr-Mo 鋼(SCM4 種)を用いた 3.5%NaCl 水溶液中での腐食疲労き裂成長曲線[7]。1000MPa 級の高強度鋼であることから、腐食環境誘起水素脆化の影響が発現している。図 3-2.6.7-165(a)および(b)の結果は、図 3-2.6.7-164 の(b)図および(c)のき裂成長曲線とそれぞれ、定性的に一致している。

(4)大気中および種々の応力繰り返し速度における水素環境下での疲労き裂成長速度のシミュレーション解析結果と実験特性との比較

大気中での 1500MPa 級高強度鋼 SCM435 鋼の実験より得られた疲労き裂成長速度とシミュレーション解析で得られた疲労き裂成長速度を比較した結果を図 3-2.6.7-166 に示す。シミュレーションでは 60 サイクルで 2mm 程度き裂が成長するような節点解放条件を疲労き裂成長のクライテリオンとしているので、き裂成長速度は実験結果より、約 2 オーダ速くなるが、応力拡大係数のべき乗の指数は、両者でほぼ一致している (2.52 と 2.39)。

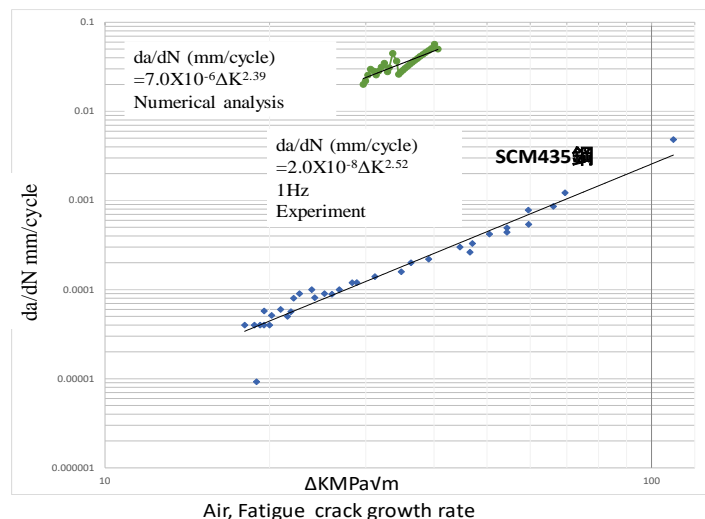


図 3-2.6.7-166 大気中での 1500MPa 級高強度鋼 SCM435 鋼の疲労き裂成長速度とシミュレーションで得られた疲労き裂成長速度との比較。シミュレーションでは 60 サイクルで 2mm 程度き裂が成長する節点解放条件としているので、き裂成長速度は実験結果より、約 2 オーダ速いが、応力拡大係数のべき乗の指数は、両者でほぼ一致する。

本シミュレーションにより得られた、種々の応力繰り返し速度での水素環境下での疲労き裂成長速度と応力拡大係数幅値  $\Delta K$  との関係を図 3-2.6.7-167 に示す。本結果から、繰り返し速度が速い時は、大気中の疲労き裂成長速度特性に平行に若干加速される傾向を示すが(図中、 $f=0.25\text{Hz}$ )、繰り返し速度が低下するにつれて、初期に疲労き裂が加速され、その後、減少する特性となる(図中、 $f=0.1,0.05\text{Hz}$ )。さらに繰り返し速度が低下すると、疲労き裂成長速度が  $\Delta K$  に依存しない、遅れ破壊に見られるプラトー特性が発現する。(図中  $f=0.025\text{Hz}$ )。さらに  $f$  が低下すると、大気中に平行かつ大きく加速される特性に遷移することがわかる (図中、 $f \leq 0.005\text{Hz}$ )。

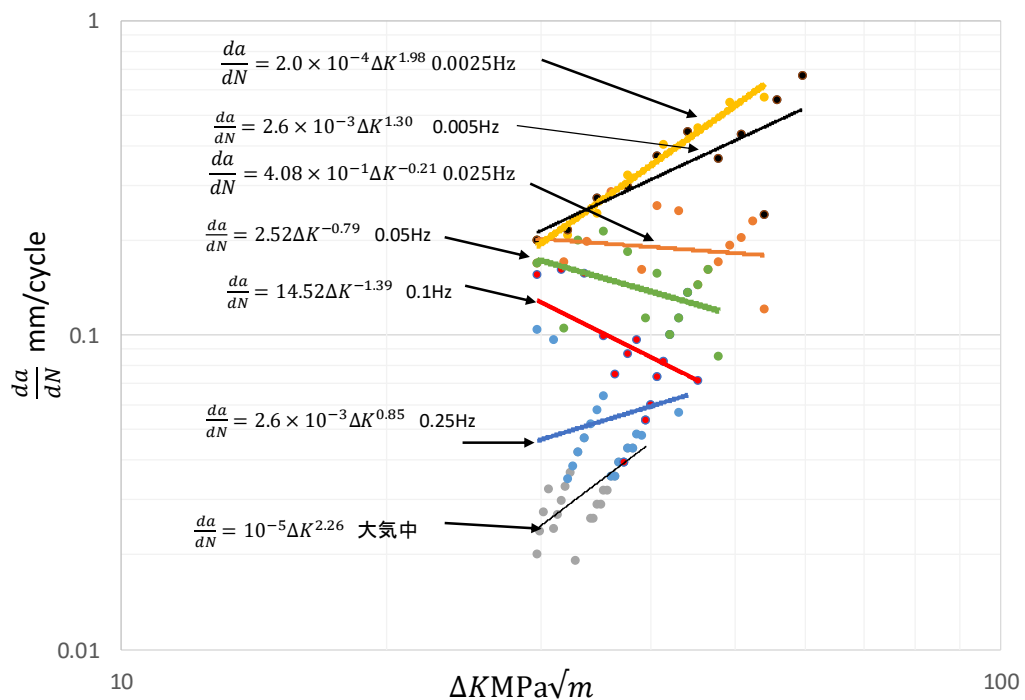


図 3-2.6.7-167 本シミュレーション解析により得られた種々の繰り返し速度における疲労き裂成長速度と応力拡大係数幅値との関係

#### (5) 実験結果と本シミュレーション解析との比較と考察

本材料(高強度鋼 SCN435 鋼)で、3.5%NaCl 水溶液中での腐食疲労条件と一定応力負荷の下で水素チャージした試験片を用いて、疲労試験を行った実験結果を図 3-2.6.7-168 に示す。

腐食疲労き裂成長速度は、大気中に比べて 5 倍程度、加速している。この時の応力拡大係数のべき乗の指数は 1.0 である。それに対して、水素チャージ条件は、疲労き裂成長速度は、大気中に比べて、30 倍程度、加速されており、かつ、大気中のき裂成長速度の応力拡大係数のべき乗の指数 (2.27) に比べて大きい指数 (3.87) になっている。以上のことから、疲労き裂成長速度の加速の状況と  $\Delta K$  のべき乗の指数との関係から、水素チャージ条件での疲労き裂成長速度は、水素ガス圧下でのき裂成長挙動に対応していると考えられる。本シミュレーション解析の水素環境は、腐食溶解反応

により、外部から水素が流入してくる条件での解析であることから、腐食環境での高強度鋼の疲労き裂成長の実験特性との比較が合理的である。

また、図 3-2.6.7-167 から、本実験の応力繰り返し速度と同じ条件である、 $f=0.25\text{Hz}$  でのシミュレーションにより得られる水素環境下での疲労き裂成長速度と、 $\Delta K$ との関係は、式 (2-4-4) で与えられ、べき乗の指数は 0.85 であった。この値は、式 (2-4-5) の実験結果(1.0)とほぼ同じ値をとることがわかる。

以上のことから、本シミュレーションにより得られる 0.25Hz における水素環境下での疲労き裂成長速度と  $\Delta K$  の関係は、大気中での結果と同じく、腐食環境誘起水素脆化の影響下での同じ繰り返し速度での実験による疲労き裂成長速度から 2 オーダの定数倍ほど速い速度として、予測できることが示された。

$$\frac{da}{dN} = 2.6 \times 10^{-3} \Delta K^{0.85} \quad (2-4-4)$$

$$\frac{da}{dN} = 2.0 \times 10^{-5} \Delta K^{1.0} \quad (2-4-5)$$

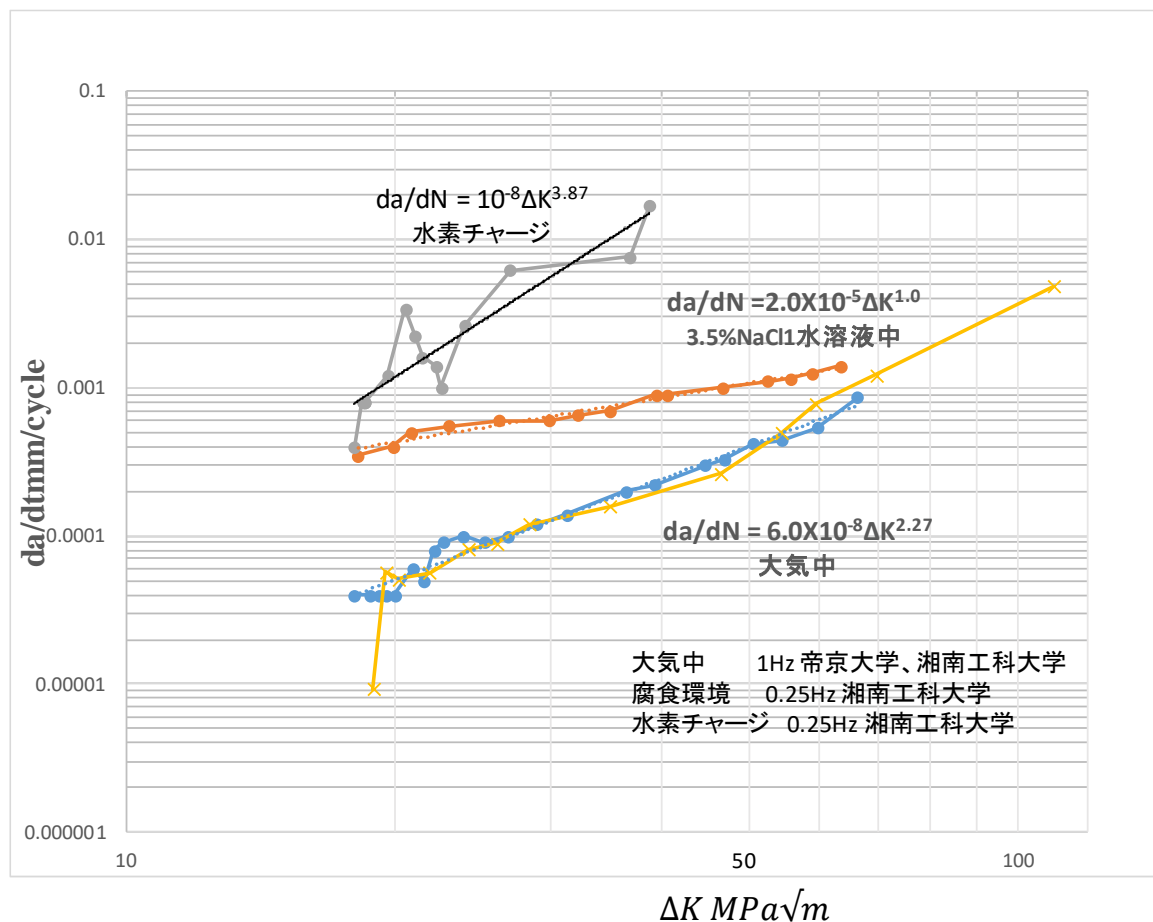


図 3-2.6.7-168 実験による 1500MPa 級高強度鋼の大気中、3.5%NaCl 水溶液中および一定応力負荷による水素チャージ条件での疲労き裂成長速度と  $\Delta K$  との関係

次に、本シミュレーション解析により得られる各応力繰返し速度における疲労き裂成長速度と繰返し速度との関係を求めたものを図 3-2.6.7-169 に示す。疲労き裂成長速度は、本シミュレーション解析で計算されている、 $30\text{MPa}\sqrt{\text{m}} \leq \Delta K \leq 59\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  の範囲での疲労き裂成長速度の平均値、 $\left(\frac{da}{dN}\right)_{mean}$  として式(2-4-6)により計算した結果である。本シミュレーションにより得られた疲労き裂成長速度と応力繰返し速度との関係は式(7)で表された。

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{mean} = \frac{\left(\frac{da}{dN}\right)_{\Delta K_1} + \left(\frac{da}{dN}\right)_{\Delta K_2}}{2} \quad (2-4-6)$$

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{mean} = 3.16 \times 10^{-2} f^{-0.481} \quad (2-4-7)$$

式 (2-4-7) は、実験で得られた、式 (2-4-8) に示す 1000MPa 級高強度鋼である低合金 Cr-Mo 鋼 (SCM 4 種) の 3.5%NaCl 水溶液で腐食疲労き裂成長速度の  $f$  のべき乗の指数(-0.508) [7]とほぼ一致し、大気中および 2.5Hz の結果と同じく、疲労き裂成長速度を 2 オーダの定数倍ほど速い速度として、予測できることが示された。

$$\frac{da}{dN} = 3.52 \times 10^{-4} f^{-0.508} \quad (2-4-8)$$

本シミュレーション解析で得られる疲労き裂成長長さが 3mm 時を破壊寿命、 $N_f$  として、その逆数と繰返し速度との関係を図 3-2.6.7-170 に示す。本結果から、き裂成長寿命の応力繰返し速度( $f$ )特性における  $f$  のべき乗の指数は、-0.531 であり、ほぼ、疲労き裂成長速度の応力繰返し速度( $f$ )特性と一致していることがわかる。したがって、図 3-2.6.7-169 に示す疲労き裂成長速度は、き裂成長寿命を反映する値であることがわかる。

また、図 3-2.6.7-169 に示す疲労き裂成長速度の応力繰返し速度 ( $f$ )特性、および図 3-2.6.7-170 の疲労き裂成長寿命の逆数の応力繰返し速度( $f$ ) 特性とも、 $f=0.01\text{Hz}$  以下で両者の値とも飽和する傾向を示し、応力繰返し速度  $f$  依存性が低下する傾向を示している。

そこで、本材料のヤング率、疲労負荷最大応力および応力繰返し速度( $f$ )から、繰返し速度をひずみ速度に換算し、図中に示す大村らの SSRT 試験のひずみ速度範囲を図 3-2.6.7-169 の横軸に示した。本結果から、応力繰返し速度  $f$  にあまり依存しない SSRT 条件としては、ひずみ速度  $\dot{\epsilon} \leq 10^{-5}/\text{s}$  であることが予測される。今後、SSRT 試験を実施する際に、この値の妥当性について検証することの工学的意義は大きいと考えられる。

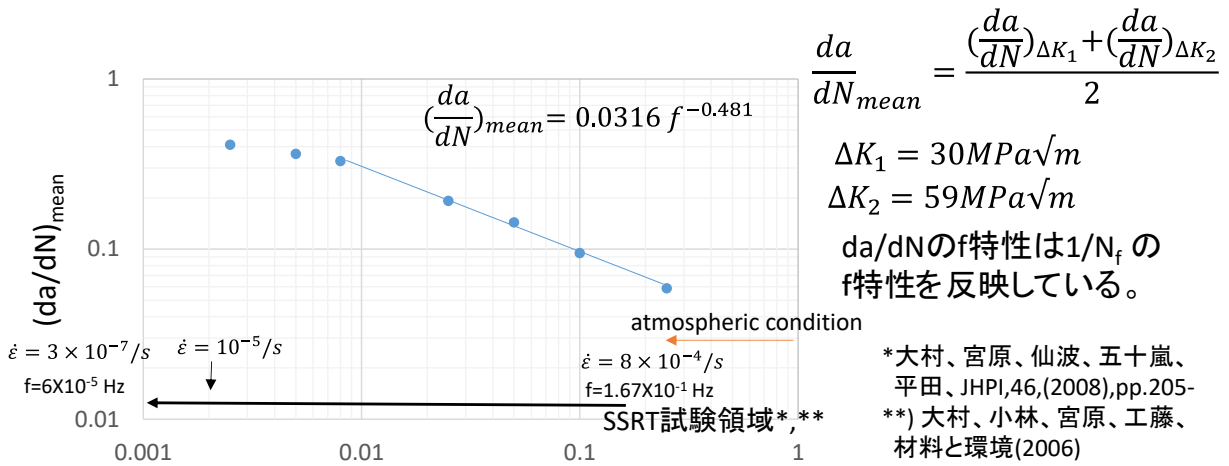


図 3-2.6.7-169 本シミュレーション解析による  $(da/dN)_{mean}$  と 繰返し速度  $f$  との関係

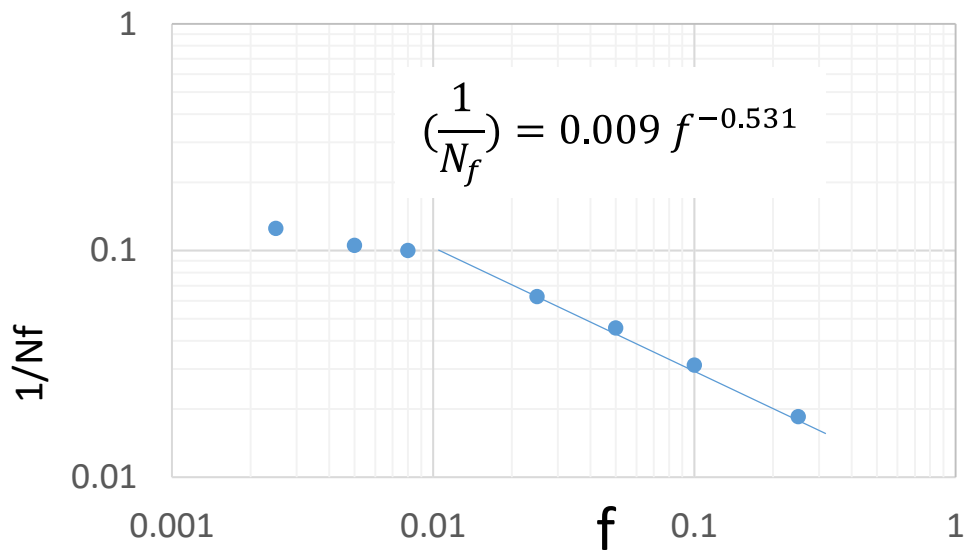


図 3-2.6.7-170 破壊寿命（疲労き裂成長長さが 3mm 時の  $N$ ）の逆数、 $1/N_f$  と繰返し速度、 $f$  との関係

(2) 結論

開発した水素環境での疲労き裂成長シミュレーション解析手法とプログラムにより、以下の結論が得られた。

- (1) 疲労条件下でのき裂先端近傍に凝集する水素濃度は、静水圧応力最大値に極大値を有し、繰返し速度が遅くなるほど水素凝集濃度は高くなる。SSRT 試験の条件まで解析を行っており、SSRT 試験を含めた遅れ破壊実験で得られる水素脆化試験は水素脆化敏感性の上限値を与えることが示唆された。



- (2) 本シミュレーションによる疲労き裂成長速度の繰返し速度特性 ( $f$ 特性) の解析結果は、実験特性をかなり、正確に予測し得ることが示された。したがって、任意の繰返し速度での疲労き裂成長速度の実験結果から、水素脆化感性の上限値となる低繰返し速度域での疲労き裂成長速度を理論的に予測出来、遅れ破壊領域での水素脆化感性を予測し得ることが示された。
- (3) 本解析により SSRT 試験での最適ひずみ速度範囲を予測可能であることが示された。
- (4) 本シミュレーションプログラムは、上述した実際の水素脆化に関わる問題を計算科学で実験をすることなく予測可能であることから、実装し得る技術として実用化へ向けての開発がすすめられる技術である。

#### 参考文献

- 1) 山路教弘、横堀壽光、川島佑介、大見敏仁、日本材料強度学会誌、50, 4 ,(2017), pp. 69-74.
- 2) A.T.Yokobori,Jr., T.Nemoto,, K.Satoh, and T.Yamada, Engineering Fracture Mechanics, 55,(1996), pp.47-60.
- 3) A.T.Yokobori,Jr., T.Ohmi, T.Murakawa, T.Nemoto and T.Uesugi and R.Sugiura, Strength,fracture and Complexity, An Int. J., 7,(2011), pp.215-233.
- 4) A.Toshimitsu Yokobori,Jr., Tomoharu Uesugi,et.al., Strength, Fracture and Complexity An Int. Journal, 1 (4), (2003), 187-204.
- 5) T. Ohmi, A. T. Yokobori, Jr. and K. Takei, Defect and Diffusion Forum, Vol. 326-328 (2012), pp.626-631.
- 6) 竹内博晃、横堀壽光、細野真司、小林大輔、佐藤康二、日本金属学会誌, 71 (5), (2007), 452-457.
- 7) 横堀 (壽)、横堀 (武)、高須、機論、52,(1986)、pp.1232~1239
- 8) 横堀 (壽)、横堀 (武) ,小澄、高須、機論、53,(1987)pp.1541-1549.

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.6.7-11 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2017FY	0	0	1	0	0	0	0	1	0
2018FY	1	0	7	1	0	0	0	1	1
2019FY	3	0	15	1	0	0	0	2	1
2020FY	6	0	8	0	0	0	0	0	1
2021FY	6	0	3	0	0	0	0	0	0
2022FY	1	0	1	1	0	0	0	0	0
合計	17	0	35	3	0	0	0	4	3

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

なし

成果の公開により、評価法の普及を狙い、開発手法をデファクトスタンダード化する。

## 2.6.8 [テーマ番号 6 6] 鉄鋼信頼性評価技術開発 (2021 年度～2022 年度)

### 2.6.8.1 テーマの概要

#### (1) 背景と目的

近年、環境負荷や省資源対策の観点から自動車などの輸送機器の軽量化による燃費向上が必要不可欠であり、引張強度 1.5GPa を超える超高強度鋼の開発が盛んに行われている。しかし、鉄鋼材料ではその強度が高くなるほど水素脆化感受性が高くなることが知られており、引張強度 1.5GPa 以上の超高強度鋼では通常の大気環境下において鋼板中に侵入する水素によって水素脆化が生じる危険性が提唱されている。つまり、超高強度鋼を広く社会実装していくためには、水素脆性問題を克服する材料設計が非常に重要である。超高強度鋼に必要な水素脆性に関連した材料信頼性評価技術は、き裂伝ば評価技術であると言える。そのため、(i)破壊力学に基づいたき裂伝ば過程に対応する特性値によって水素脆性感受性を評価する、(ii)き裂伝ば形態といったような材料の壊れ方をしっかりと把握し、破壊特性（き裂伝ば特性）発現の起源を明らかにする、(iii)き裂伝ばとマイクロ組織の相関を明らかにする、ことができれば、マイクロ組織制御によってき裂伝ば形態を制御するなど、理論的な背景から破壊特性を向上させていくことが可能になる。そこで本研究では、水素脆性評価法の標準化および水素脆性き裂伝ばの抑制技術の確立に向けて、超高強度薄鋼板の水素脆性における材料信頼性評価技術（き裂伝ば評価技術）を構築することを目的とした。

#### (2) 目標値

表 3-2.6.8-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第 1 中間目標 (2015 年度末)	第 2 中間目標 (2017 年度末)	第 3 中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)
薄鋼板の破壊靱性評価技術開発 (2020～2022 年度)				超高強度薄鋼板の水素脆性に適用できる ASTM / ISO を参照した破壊特性（き裂伝ば特性）評価技術を開発し、従来技術（U 曲げ試験など）との関係を明確化する。そして、き裂伝ば特性 / 水素濃度 / 応力レベルの 3D 相関マップを作成するとともに、従来の厚鋼板用の破壊力学試験法（ASTM など）から、薄鋼板の破壊特性を予測できるモデルを構築する

<p>コンピュータ断層撮影（CT）実験によるき裂の非破壊3次元解析技術開発 (2020～2022年度)</p>				<p>き裂3次元伝ぱ形態を解析するため、簡便に実施可能なラボレベル X 線 CT を用いた技術を開発する。そして、超高強度鋼の水素脆性における破壊特性の起源を解明するため、破壊特性・き裂伝ぱ3次元形態・マイクロ組織の相関を調べる。</p>
<p>マルテンサイトの新規マイクロ組織観察技術開発 (2020～2022年度)</p>				<p>超高強度鋼の基地組織であるマルテンサイトが有する複雑なマイクロ組織に対して、従来以上の空間分解能・方位分解能の解析技術や3次元解析技術などの新規組織解析技術を確立する。</p>

### (3)全体計画

#### ① 薄鋼板の破壊靱性評価技術開発

薄鋼板での水素環境下におけるき裂伝ぱ抵抗評価試験技術を開発する。そして、②のき裂伝ぱ形態との定量相関を明らかにする。具体的には以下に示す3つの項目の研究を行い、物質・材料研究機構および再委託先として九州大学と東北大学（秋山グループ）が参画した。

- ①-1 「薄鋼板での破壊靱性試験技術の確立」
- ①-2 「破壊靱性におよぼす板厚の影響」
- ①-3 「U 曲げ試験による破壊特性評価」

#### ② コンピュータ断層撮影（CT）実験によるき裂の非破壊3次元解析技術開発

き裂伝ぱ形態を非破壊かつ3次元で解析する技術を開発するとともにそのき裂3次元伝ぱ形態とマイクロ組織の相関を明らかにする。具体的には以下に示す2つの研究を行い、物質・材料研究機構および再委託先として東北大学（古原グループ）が参画した。

- ②-1 「X 線 CT によるき裂3次元形態解析」
- ②-2 「き裂伝ぱ形態とマイクロ組織の関係」

#### ③ マルテンサイトの新規マイクロ組織観察技術開発

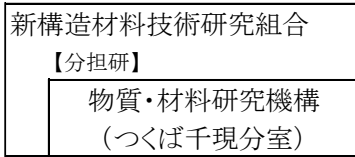
き裂伝ぱ抑制のための情報を得るために、超高強度鋼の基地組織であるマルテンサイトのマイクロ組織を正確に観察する新規技術を開発する。具体的には以下に示す2つの研究を行い、物質・材料研究機構および再委託先として島根大学が参画した。

③-1「単純モデル合金のマルテンサイト組織解析」

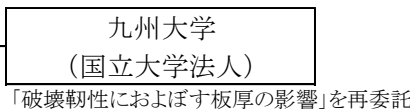
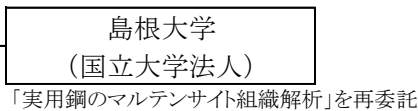
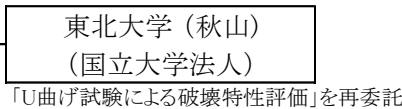
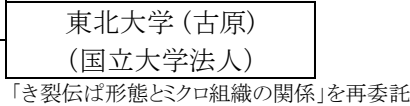
③-2「実用鋼のマルテンサイト組織解析」

#### (4)実施体制

【委託先】



【再委託先】



#### (5)運営管理

1回/3か月の頻度で再委託先も含めた進捗会議を開催し、研究の進捗状況の確認・情報共有を行いながら研究開発を進めた。

#### (6)実施の効果(費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度)

環境負荷や省資源対策の観点から自動車などの輸送機器の軽量化による燃費向上が必要な状況であり、引張強さ1.5GPa級の超高強度鋼板の開発が重要となっている。そこで、本テーマでは、水素脆性評価法の標準化および水素脆性き裂伝ばの抑制技術に向けて、超高強度薄鋼板(マルテンサイト鋼およびDP鋼)の水素脆性におけるき裂伝ば評価技術の研究開発を行った。当該研究開発による成果等は、研究発表や講演、論文投稿等により、積極的な発信を行う。

## 2.6.8.2 研究開発成果

### (1)最終目標の達成度

表 3-2.6.8-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
薄鋼板の破壊靱性 評価技術開発	<p>超高強度薄鋼板の水素脆性に適用できる ASTM / ISO を参照した破壊特性（き裂伝ば特性）評価技術を開発し、従来技術（U 曲げ試験など）との関係を明確化する。そして、き裂伝ば特性 / 水素濃度 / 応力レベルの 3D 相関マップを作成するとともに、従来の厚鋼板用の破壊力学試験法（ASTM など）から、薄鋼板の破壊特性を予測できるモデルを構築する。</p> <p>（2022 年度）</p>	<p>【薄鋼板での破壊靱性試験技術の確立】</p> <p>1.5GPa 級マルテンサイト鋼の 1.6mm 板材を対象として、ASTM E561 に準じて MT 試験片形状を検討決定した。シェブロンノッチを利用することによって、疲労予き裂の導入に成功し、大気中および水素チャージ下での破壊靱性試験技術を確立した。</p> <p>【破壊靱性におよぼす板厚の影響】</p> <p>高圧水素ガス環境中における薄板の破壊靱性試験を行うための試験治具を製作し、1.7GPa 級マルテンサイト鋼の 1.6mm 板材の試験を実施した。さらに厚さの異なる CT 試験片の破壊靱性試験を行い、大気圧中および高圧水素ガス環境中の両方で破壊靱性値に板厚依存性が存在することを明らかにした。</p> <p>【U 曲げ試験による破壊特性評価】</p> <p>DP 鋼の組織と引張特性を取得し、水素脆化特性を曲げ半径 10mm で評価した。曲げ半径 15mm で水素脆化試験を行い、焼戻しマルテンサイト鋼の結果と比較することで、DP 鋼では焼戻しマルテンサイト鋼よりもひずみや局所水素分布がき裂発生に大きな影響をおよぼしていることを明らかにした。</p>	○	

<p>コンピュータ断層撮影 (CT) 実験によるき裂の非破壊 3次元解析技術開発</p>	<p>き裂 3次元伝ば形態を解析するため、簡便に実施可能なラボレベル X線 CT を用いた技術を開発する。そして、超高強度鋼の水素脆性における破壊特性の起源を解明するため、破壊特性・き裂伝ば 3次元形態・マイクロ組織の相関を調べる。(2022 年度)</p>	<p>【X線 CT によるき裂 3次元形態解析】 マルテンサイト鋼に対して破壊靱性試験を行い、導入された粒界き裂の 3次元解析を X線 CT 実験により行った。得られたデータからき裂 3次元形態の定量化を行い、局所的なき裂開口変位量が水素濃度の増加に伴って減少することを定量的に明らかにした。</p> <p>【き裂伝ば形態とマイクロ組織の関係】 旧オーステナイト粒界において生成するマルテンサイトのバリエーションの特徴を抽出する一つの手法を構築するとともに、水素脆化したマルテンサイト鋼のき裂周囲の EBSD 測定を行い、水素脆性では旧オーステナイト粒界セグメントの方位差および母相オーステナイト時の粒界方位差がき裂伝ばに影響をおよぼすことを統計的な手法により明らかにした。</p>	○	
<p>マルテンサイトの新規マイクロ組織観察技術開発</p>	<p>超高強度鋼の基地組織であるマルテンサイトが有する複雑なマイクロ組織に対して、従来以上の空間分解能・方位分解能の解析技術や 3次元解析技術などの新規組織解析技術を確立する。(2022 年度)</p>	<p>【単純モデル合金のマルテンサイト組織解析】 IF 鋼および 0.2C 鋼のマルテンサイト組織に対して、SEM-ECCI 解析を行った。その組織解析結果を TEM 解析結果と比較することにより、SEM-ECCI によって最小組織単位であるマルテンサイトラスが同定できることを明らかにした。またナノディフラクション解析によって一つのラス内に 5 度程度の方位差が存在していることを明らかにした。</p> <p>【実用鋼のマルテンサイト組織解析】 マルテンサイト鋼に対して EBSD 測定を行った。得られたデータを元に組織の抽出を行い旧オーステナイト粒、パケット、ブロック、サブブロックを識別することに成功した。</p>	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

## (2)研究開発の成果と意義

### ① 薄鋼板の破壊靱性評価技術開発

#### (1) 超高強度薄鋼板の破壊靱性試験法の確立

金属材料の破壊靱性試験標準として ASTM E399 規格が知られている。この規格では、コンパクト試験片 (CT 試験片) や片側切欠き付き曲げ試験片 (SEB 試験片) を対象として平面ひずみ破壊靱性  $K_{Ic}$  を算出する方法が定められているが、これらの方法では実用の自動車用鋼板のような薄板の破壊靱性の決定は困難である。一方、ASTM E561 規格では、中央切欠き付き試験片 (MT 試験片) に代表される薄板を対象としてき裂進展抵抗曲線 (KR 曲線) を取得する方法が定められているが、き裂進展の下限界となる破壊靱性  $K_c$  の決定方法は定められていない。このように、現状では、薄板の破壊靱性を測定するための方法は確立されていない。そこで、本研究では、E561 規格に定められた MT 試験片に対する実験方法と、E399 規格に記載された  $K_{Ic}$  の決定方法を組み合わせることにより、大気中および高圧水素ガス環境中における超高強度薄鋼板の破壊靱性試験法を確立することを目的とした。新たな試験方法を実現するために、①疲労予き裂導入方法、②試験治具開発、③水素ガス中における高精度なき裂開口変位の測定、の 3 点の技術課題に取り組んだ。①については、有限要素法解析による試験片保持方法の最適化、および、切欠き先端部へのシェブロン切欠きの導入などの対策を講じることで切欠きの両側にほぼ均等に予き裂を導入する方法を確立した。②に関する具体的な課題として、高圧水素ガス環境中での試験治具の強度の確保、治具のコンパクト化、試験片のアライメント確保が挙げられる。これらの要求を満たす治具 (鉄基耐熱合金 SUH660 製) を設計、作製した。治具上部のピン穴にブッシュを設け、このブッシュを調整することで、試験片のアライメントを調整できる機構とした。また、治具下部にはユニバーサルジョイントを設け、引張荷重を与えることで試験片のアライメントが自動的に調整される機構とした。③については、CT 試験片に比べて高い剛性を有する MT 試験片において、き裂開口変位を従来品の約 2 倍の分解能で測定可能な変位計 (クリップゲージ) を開発した。

#### (2) 超高強度薄鋼板の破壊靱性評価

供試材には、低合金鋼 JIS-SCM440 を用いた。室温・大気中で取得した機械的性質は、降伏応力  $\sigma_Y$  が 1470 MPa、引張強さ  $\sigma_B$  が 1720 MPa であった。図 3-2.6.8-1(a) に、室温・大気中で実施した破壊靱性試験で取得した荷重  $P$  と

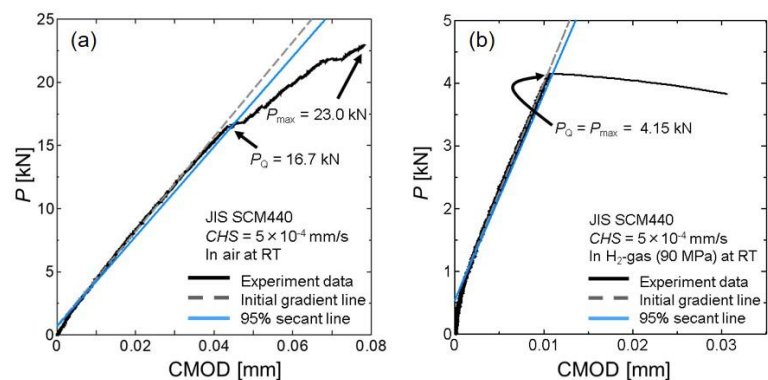


図 3-2.6.8-1 荷重変位曲線 ; (a) 大気中、(b) 90MPa 水素ガス中。



き裂開口変位  $CMOD$  の関係 ( $P$ - $CMOD$  線図) を示す。大気中の破壊靱性は平均で  $53.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  であった。なお、き裂発生荷重  $P_Q$  の決定には、ASTM E399 規格を参照して 95%セカント法を用いた。試験片の中央部では平坦破壊 (Flat fracture) が、外縁部では斜め破壊 (Slant fracture) が生じていたため、大気中の破壊靱性は、平坦破壊と斜め破壊に対する破壊抵抗の総和として決まったものと考えられる。平坦破壊部では、一部でディンプル破面が観察されたものの粒界破面が支配的であったのに対し、斜め破壊部では、ディンプル破面のみが確認された。図 3-2.6.8-1(b)に、室温・90 MPa 水素ガス中で取得した  $P$ - $CMOD$  線図を示す。90 MPa 水素ガス中における破壊靱性の平均は  $12.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  となり、大気中に比べ著しく低下した。大気中とは異なり、90 MPa 水素ガス中では破面全面にわたり平坦破壊が生じていた。このことから、90 MPa 水素ガス中で取得した破壊靱性は、平坦破壊に対する破壊抵抗のみで決定されたと考えられる。また、90 MPa 水素ガス中での微視的な破壊様相は粒界破壊と擬へき開破壊であり、板厚中央部と試験片外縁部で破壊様相に違いは認められなかった。破壊靱性に対する板厚効果について、板厚の減少に伴い破面全体に占める平坦破壊の割合が小さくなり、破壊靱性が上昇することが知られている。この現象を定量的に評価する方法として、次式が提案されている。

$$G_c = F \times G_{Ic} + (1 - F) \times G_{Sc}$$

ここで、 $G_c$  はエネルギー開放率で表した試験片全体の見かけの破壊靱性、 $F$  は平坦破壊部の破面率、 $G_{Ic}$  は平坦破壊に対する破壊靱性、 $G_{Sc}$  は斜め破壊に対する破壊靱性である。低～中強度の材料の破壊靱性に関する過去の研究では、試験片の板厚が十分に小さい場合、大気中において破面の全面が斜め破壊となることが知られている。一方、本供試材では、大気中でも平坦破壊が破面の大半を占め、水素ガス中では全面が平坦破壊であった。これらの結果から、超高強度材料では低～中強度の材料に比べて大気中での板厚効果は小さいと考えられる。また、高圧水素ガス中では、板厚 1.6 mm の薄板試験片においても全面が平坦破壊となっていたことから、破壊靱性に対する板厚効果は表れないと予想される。しかし板厚を変化させた試験片を用いた破壊靱性試験を行った結果、大気中および高圧水素ガス中の両方で板厚効果が存在することが明らかとなった。そのため、板厚効果は平坦破壊の割合のみで決定されるものではないと考えられる。

### (3) U 曲げ試験による破壊特性評価

SCM435 鋼に二相域での熱処理を施すことにより作製したフェライトとマルテンサイトからなる Dual-Phase (DP)鋼を用いて U 曲げ加工、ボルト締めによる再負荷、陰極水素チャージからなる一連の水素脆化試験を行い、同強度・同組成の SCM435 マルテンサイト鋼の結果と比較をすることで水素脆化特性における組織変化の影響を調査した。その結果、以下の知見が得られた。(1) 水素脆性割れ試験の結果から締込み量で整理すると DP 鋼とマルテンサイト鋼の破断条件に明瞭

な差は見られなかった。(2) 締込み量の増加に伴いき裂の発生位置が外周表面に近づいたところから、今回の U 曲げ条件では、き裂の発生位置においてマルテンサイト鋼と同様に応力が支配的な役割を持つことが確認された。また、縦断面の観察から DP 鋼では内部き裂が確認されなかった。このことから、DP 鋼ではマルテンサイト鋼よりもき裂進展が容易であることと考える。(3) 耐水素脆化特性の評価において応力による影響が確認できた。有限要素解析によりき裂発生位置と主応力最大位置の関係を調べたところ、U 曲げ試験における DP 鋼のき裂発生位置と主応力最大の位置はマルテンサイト鋼よりも大きくずれていることが明らかとなった。そのため、DP 鋼の水素脆性では、応力以外の因子 (水素分布や塑性ひずみ) が大きく寄与していると考えられる。

## ② コンピュータ断層撮影(CT)実験によるき裂の非破壊 3次元解析技術開発

### (1) マクロなき裂形態

2020 年度に導入した X 線顕微鏡を用いて、マルテンサイト鋼の粒界き裂伝播 3次元形態の解析を行った (図 3-2.6.8-2)。供試材は水素を含まない場合でも粒界破壊を起こすモデル合金である Fe-8Ni-0.1C 合金の焼入れままマルテンサイトを用いた。破壊靱性試験後のコンパクトテンション試験片の中心部分を放電加工機により切り出し、X 線顕微鏡測定を行った。マルテンサイト組織中にはラス境界、ブロック境界、パケット境界、旧オーステナイト粒界といったように種々の粒界・境界が存在するが、粒界き裂はほとんどの場合、旧オーステナイト粒界に沿って伝播する。しかし、き裂は一様に伝ばしているわけではなく、図 3-2.6.8-2(a)の矢印で示したような箇所は粒界き裂が連続しておらず、非破壊リガメントを多く残すような形で不連続・断続的に伝ばしていることがわかった。図 3-2.6.8-2(b)は各き裂セグメントの開口変位量を色の変化で示したものであり、先端に行くほど開口変位が減少していることがわかる。そのため、破壊はモード I タイプであると考えられる。遠方応力から算出した分解垂直応力が高い旧オーステナイト粒界にて優先的にき裂が伝播すると予想されるが、分解垂直応力とき裂開口変位の間には相関を確認することはできなかった。そのため、マクロな力学因子よりもマイクロ組織が大きな影響をおよぼしていると考えられる。

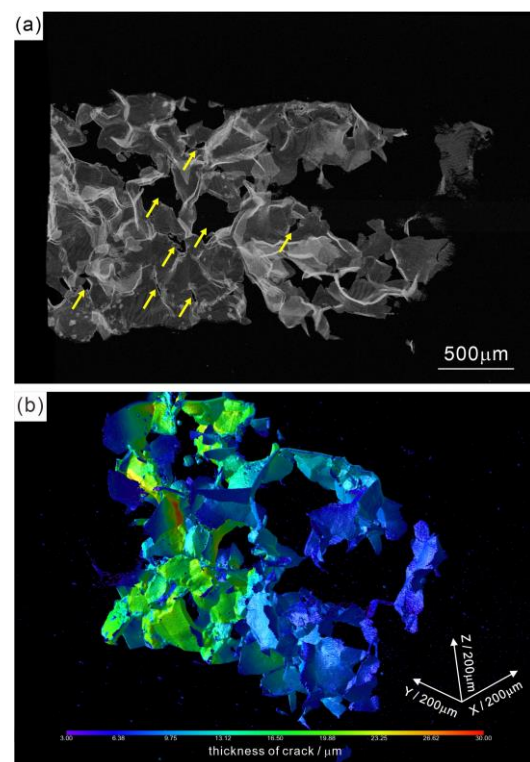


図 3-2.6.8-2 X 線 CT により同定したマルテンサイト鋼の粒界き裂 3次元形態。

## (2) き裂伝ば形態とマイクロ組織の関係

超高強度マルテンサイト鋼におけるき裂伝ばにおよぼす結晶学的組織の影響を明らかにするために、旧オーステナイト ( $\gamma$ ) 粒界を挟んだ両側のマルテンサイト組織および旧  $\gamma$  粒の結晶方位の特徴を表すパラメータの評価法を確立し、脆化材に適用してき裂の有無と粒界の結晶学的特徴の関係を明らかにすること、および、水素脆化との類似性が指摘されている液体金属脆化した材料においても、き裂と粒界の結晶学的特徴との関係調査を行った。これまでの取り組みで、粒界き裂のリガメントは、旧  $\gamma$  粒界における小角のマルテンサイト境界に対応する確率が高いことが示されている。そこで、旧  $\gamma$  粒界におけるマルテンサイトの結晶方位差に影響し得る二種類の方位差を検討した。一つ目は、母相  $\gamma$  状態での粒界方位差  $\Delta \theta^\gamma$  である。これは、マルテンサイト方位に基づいて母相  $\gamma$  方位を再構築すれば、通常の結晶粒間の方位差として評価することができる。二つ目の方位差は、粒界において生成したマルテンサイトの K-S 関係からのずれ角を表す  $\Delta \theta^{K-S}$  である。そして、特に進展が抑制されていると思われるき裂に対して  $\Delta \theta^\gamma$  と  $\Delta \theta^{K-S}$  を評価した結果、 $\Delta \theta^\gamma$  はランダム方位から予想される平均以上のもの、平均以下のものも両方見られるが、 $\Delta \theta^{K-S}$  は、いずれも平均値を下回っていた。このことは、これらの  $\gamma$  粒界でバリエーション選択が働きマルテンサイトが核生成することで小角方位差のマルテンサイト境界が形成されうることを意味しており、小角方位差のマルテンサイト境界でのリガメントが観察される確率が高いことと対応している。

## ③ マルテンサイトの新規マイクロ組織観察技術開発

### (1) 単純モデル合金のマルテンサイト組織解析 (IF 鋼および低炭素鋼)

まず IF 鋼マルテンサイトを対象とし、マルテンサイト組織中の最小組織単位であるラス組織に対して、走査型電子顕微鏡 (SEM) による同定を試みた。まず SEM / in-lens 検出器によりマルテンサイト組織をキャラクターゼーションした後、その観察領域から集束イオンビーム加工により透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察用薄膜を作製し、SEM / in-lens 検出器と TEM にて同一視野を観察した。これまでラス組織を解析するためには TEM を用いる必要があったが、SEM / in-lens 検出器によってラス組織を明瞭に観察できることが明らかとなった。TEM 観察は試験片を薄膜化しなければならない一方で、SEM はバルク材を用いることができる。そのため、この結果はバルク材を用いてラス組織を観察できることを意味している重要な結果である。また Nano-diffraction を用いた方位自動マッピング技術をマルテンサイト組織に適用した。Nano-diffraction を用いた方位自動マッピングによって、通常 SEM-EBSD では困難であった一つのラス内の方位変化を明瞭に解析できることを明らかにした。更にラス内の方位差はラスサイズに依存している傾向を確認することができた。

## (2) 実用鋼のマルテンサイト組織解析(SCM435 鋼)

SCM435 鋼に熱処理を施すことにより、焼き戻しマルテンサイト材とフェライト-マルテンサイト二相材を作製した。焼き戻し材の光学顕微鏡写真と結晶方位

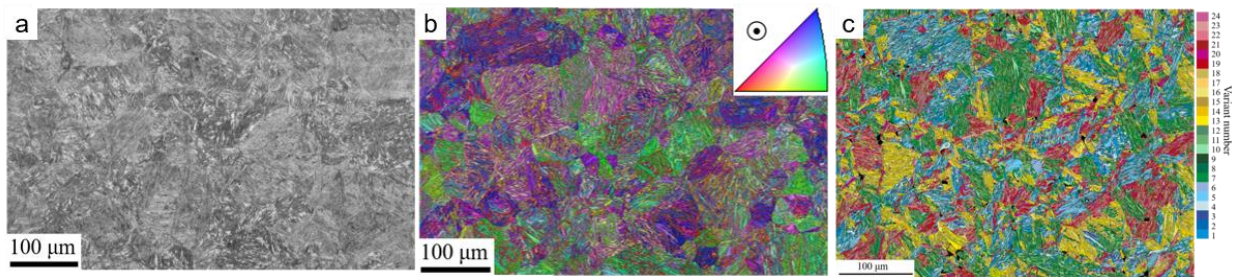


図 3-2.6.8-3 焼き戻しマルテンサイト材の(a) 光学顕微鏡写真, (b) 結晶方位図, (c) バリエントマップ (オーステナイト逆解析)。

図を図 3-2.6.8-3(a)と(b)に示す。いわゆる大角粒界で定義した結晶粒に相当するブロックは、光学顕微鏡像においてはコントラスト差により認識する事が出来る。ただし、識別できない場所も多く定量評価を行うことは難しい。また、旧オーステナイト粒も一部識別できるが境界が明瞭でない部分も多いため、粒径を求めることは難しい。結晶方位図では結晶方位差を直接利用して結晶粒を判定することが出来るため容易にブロックを識別することが出来る。しかし、ブロック厚の結晶方位依存性などラスマルテンサイトとしての形態およびサイズの定量評価は難しい。旧オーステナイト粒についても光学顕微鏡像よりも明確に識別することが出来るが、所々判別しにくい粒界が存在する。図 3-2.6.8-3(c)にオーステナイト逆解析法を用いて作成したバリエントマップを示す。この図の各色は各オーステナイト粒内でのマルテンサイトのバリエントを示している。黒はオーステナイト粒を同定できなかった領域となる。一部の小さなオーステナイト粒を同定できていない領域があるが、ある程度の面積を有したオーステナイト粒は同定が出来ており十分に定量評価が可能である。DP 材は二相域熱処理中に生じたオーステナイトから変態したマルテンサイトと、再結晶したフェライトで構成されている。IQ マップの明度が高い領域は組成ひずみの低い領域と考えられ、フェライト粒が対応すると考えられる。実際にはマルテンサイトでも IQ 値が高い領域もあるので IQ 値のみでは判別が難しい。本解析では IQ 値と局所方位差 (KAM) および結晶粒サイズを使ってマルテンサイト部を同定し解析を行っている。組織が微細な領域では解析がうまくいかないところがあるが、多くのマルテンサイト部についてはバリエントの同定までできることが明らかとなった。

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.6.8-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2021FY	0	0	5	0	0	0	0	0	1
2022FY	1	1	1	0	0	0	0	0	1
合計	1	1	6	0	0	0	0	0	2

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.6.8-4 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2021FY	0	0	0
2022FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.6.8.3 参考文献

なし

## 2.7 研究開発項目⑦「熱可塑性 CFRP の開発」

### 2.7.1 [テーマ番号 2 7]「熱可塑性 CFRP の開発および構造設計・応用加工技術の開発」(2014 年度～2022 年度)

#### 2.7.1.1 テーマの概要

##### (1)背景と目的

###### ① 背景

世界的な環境負荷低減の要求拡大を背景に、CO<sub>2</sub> 排出量削減の動きが加速している。欧州では 2021 年から新車の CO<sub>2</sub> 排出量は 95g/km となり、要求を満足できない場合、2019 年から CO<sub>2</sub> 1g あたり 95€のペナルティが課されている。加えて、EV 化による航続性能向上やバッテリーおよび CASE 装備に伴う重量増要因も加わり、自動車構造の軽量化技術として CFRP への期待は高い。

CFRP 市場としては年率 11%程度の拡大が予測され、それに伴い CFRP 廃材量も拡大し今後、大量の FRP 廃棄物が発生する。現状では CFRP 廃材のほとんどが地中廃棄されているが、欧州を中心に量的制限等の取組みが強化され、CN 目標達成にはライフサイクル全体における環境負荷を低減するための CFRP リサイクルシステムの構築が求められている。

このような中、本プロジェクトでは低コスト複合材の有力技術である LFT-D (Long Fiber Thermoplastics - Direct) 工法を根幹技術として、NEDO/ISMA の委託を受け自動車への適用を目指した実証研究に取り組んだ。本技術は、繊維長の比較的長い炭素繊維と熱可塑樹脂を混練して得られる押出素材を高速プレス成形することで軽量・低コストな部材を得る技術である。多様な素材をそのまま投入できるメリットを有する。1・2 期で基本技術を開発し、3・4 期では、長さが不揃いで取り扱いが難しい綿状のリサイクル CF の有力な成形法として研究開発に取り組んだ。

###### ② 目的

LFT-D 工法は、材料供給から最終製品までのダイレクトな一貫自動生産システムにより、中間加工材を不要とした短時間成形を可能とし、CFRP 製法としてはこれまでにない低コストな方法である。基本的にプレス金型が抜ければ形状制約はなく、ネット成形が可能である。また、熱可塑樹脂のもつ、再成形性、リサイクル性、融着接合性の特長を有する。(図 3-2.7.1.1-1)

一方、LFT-D 成形材は連続繊維に比べて強度・剛性が低く、繊維長・配向のバラツキが大きいことが挙げられ、素材の特性を見極めると共に、最適かつ安定的なプロセス確立および設計手法の開発が課題である。

現状では世界的にもガラス繊維使いの LFT-D は普及しているが、炭素繊維の LFT-D は要素研究の段階にあり、本プロジェクトでは、世界に先んじて CF/PA6 を用いた構造用の LFT-D 技術の実用化を目指した。

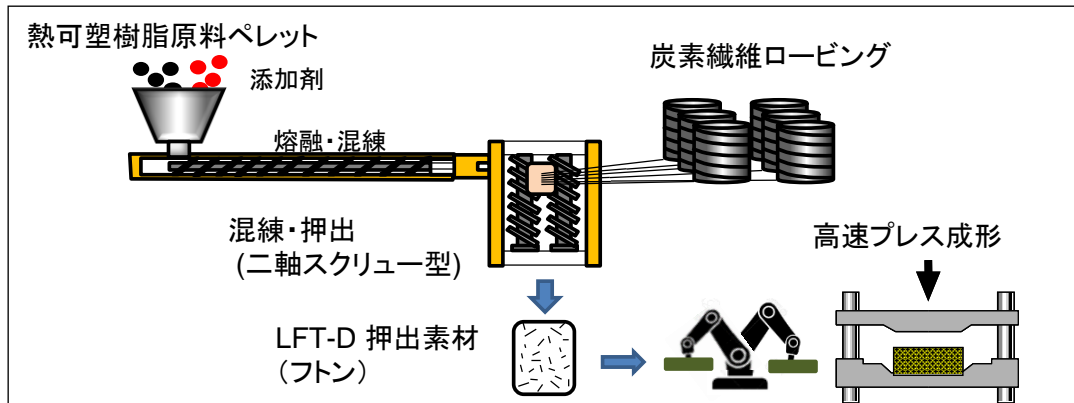


図 3-2.7.1.1-1 LFT-D 成形プロセス概要

(2)目標値

①LFT-D 技術の位置づけ

CFRP の成形法は数多く存在するが、航空機等に主用される連続繊維を用いたオートクレーブや RTM 成形法に対し、不連続繊維による LFT-D 成形は量産自動車用としてコストと強度性能を両立する技術として位置づけられる。(図 3-2.7.1.1-2)

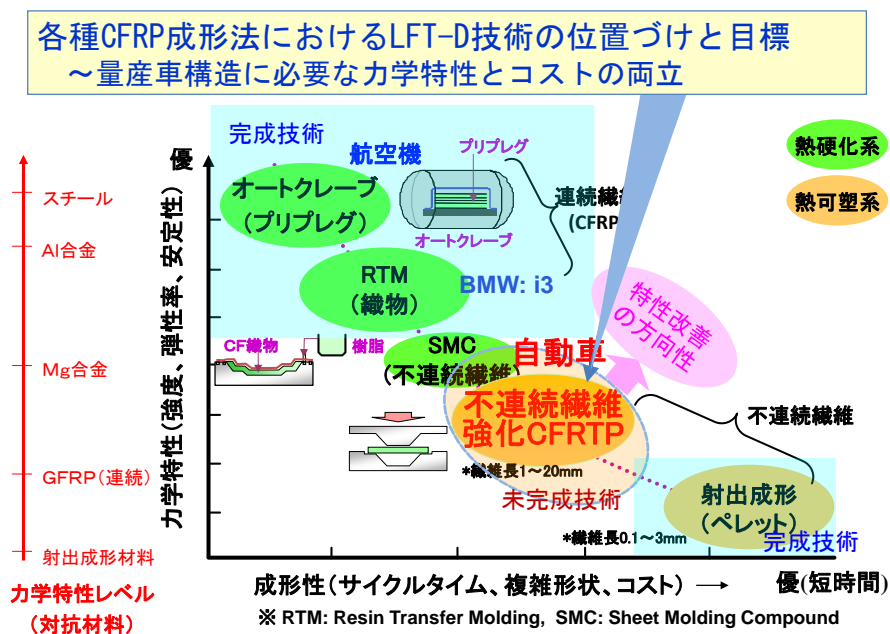


図 3-2.7.1.1-2 CFRP 成形法の位置づけ

②プロジェクト全体目標

下記をプロジェクトの全体目標とし、従来車両を凌駕する軽量・低コストな LFT-D 構造技術を開発する。

- ・ 軽量化：従来アルミ車より軽量の車体構造
- ・ 低コスト化：量産車（月産 8000 台レベル）に対応する生産性
- ・ 実車モデル LFT-D 構造の剛性試験による技術実証

<目標設定の考え方>

- ・ 基準とする従来車として、実績のあるアルミ構造車を基準とする。
- ・ アルミ構造車は従来スチール車に対し、 $\Delta 30\sim 40\%$ の軽減が得られており、CFRP 構造の BMW i3 も同等レベルにある。従って、アルミ車を凌ぐ軽量化と従来 CFRP 工法よりはるかに生産性の良い LFT-D 構造を実現できれば、新規の事業化に繋がる。
- ・ 上記の目標について、1・2 期では Lotus Elise 構造（アルミ）をモデルにした LFT-D 構造の実証試験にて実証した。（図 3-2.7.1.1-3）3・4 期では、EV 車をモデルにしたマルチ材料 LFT-D 構造にて実証した。（図 3-2.7.1.1-4）

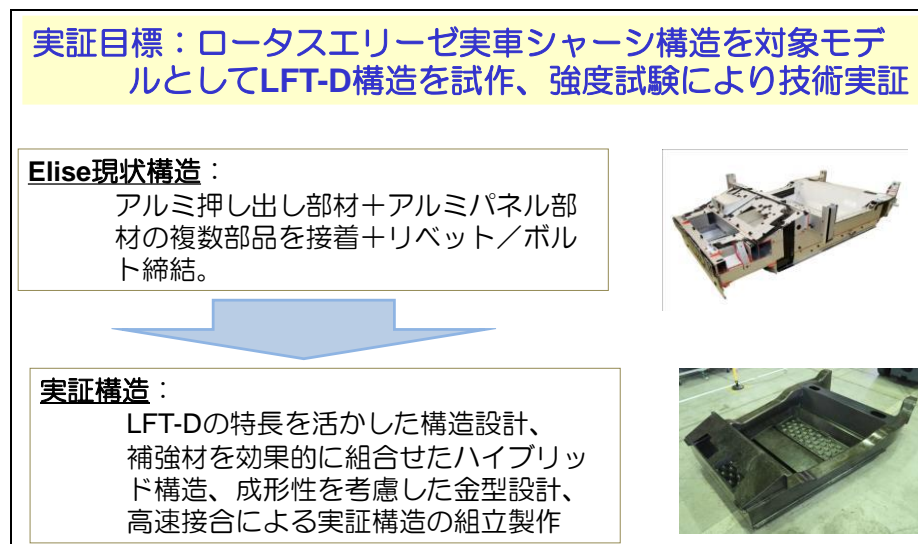


図 3-2.7.1.1-3 技術実証（1・2 期）

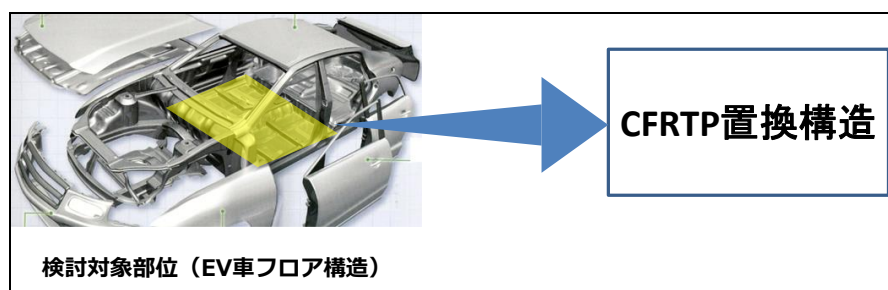


図 3-2.7.1.1-4 3・4 期技術実証計画



将来的には、炭素繊維の需要急拡大による量産化効果、および革新炭素繊維基盤技術開発で進められているような新たな低廉 CF 材の実用化により、材料コストの大幅低減による市場拡大が期待できる。

### ③ 研究開発目標

表 3-2.7.1.1-1 に各期における研究開発項目と目標を示す。

表 3-2.7.1.1-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第1中間目標 (2015年度末)	第2中間目標 (2017年度末)	第3中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)
(e) LFT-D 成形の要素技術の開発 (2014～2017年度)	<ul style="list-style-type: none"> <li>炭素繊維と熱可塑樹脂の混練体の流動特性と材料特性の関係を解析し、混練プロセスの最適条件を解明し、基礎的力学的モデルを提案する。</li> <li>これらの解析に使用する初歩的な CAE 解析技術を確立する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>H27 導入小型 LFT-D 設備による混練プロセス解明、および LFT-D 特性向上を図る。</li> <li>H26, 27 導入設備を用いて成形パラメータ・条件と成形板物性との相関を取得するとともに、それらのデータ分析・評価を行い最適成形プロセスの基礎技術を確立する。</li> <li>LFT-D 材料特性 DB の構築に着手する。</li> <li>CAE 成形解析法の高高度化、実証構造の成形シミュレーションにより基礎技術を確立する。</li> </ul>	(残存課題について研究開発項目(j)にて継続)	(残存課題について研究開発項目(j)にて継続)
(f) 大物高速成形技術の開発 (2014～2017年度)	<ul style="list-style-type: none"> <li>初歩的なボディ部材のプレス成形技術を確立。</li> <li>部材剛性確保のための LFT-D 使用構造の部分補強を試行。</li> <li>ハイブリッド成形構造を達成するためのマテハン技術構築の概念を決定。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>実証構造部材の成形条件および量産化に繋がる要素技術を確立する。</li> <li>技術実証用構造部の成形要素技術を確立する。</li> <li>H27 導入設備を用いた補強材ハイブリッド一体成形技術を確立する。</li> <li>LFT-D 一貫成形ラインのハイサイクル高速マテハン技術の要素技術を確立する。</li> <li>LFT-D 構造の最適設計 DB 構築に着手する。</li> <li>高速 NDI 要素技術を開発する。</li> </ul>	(残存課題について研究開発項目(j)にて継続)	(残存課題について研究開発項目(j)にて継続)

(g) 大物高速 接合技術の開 発（2014～ 2017年度）	・熱可塑性 CFRP 使用 部材同士を高速で接合 できる方法を見極め、 最適手法を選択する。	・LFT-D 部材同士の高 速接合基礎技術を確立 する。 ・アルミ部材とのマル チマテリアル接合の基 礎記述を確立する。	（残存課題について研 究開発項目(j)にて継 続）	（残存課題について 研究開発項目(j)にて 継続）
(h) 意匠性外 板製造技術の 開発（2014～ 2017年度）	・高意匠性を支配する 技術要因を分析し、基 礎技術を見極めるとと もに、候補となる素材 を選定し、適用するプ ロセスを絞り込む。	・選定した素材を用い て、高意匠性付与と強 度・剛性のある程度両 立する技術を確立す る。	（該当なし）	（該当なし）
(i) 実証評価 （2014～2017 年度）	・実車模擬 LFT-D 構造 の試作・試験により技 術実証を行う。	・ロータスエリーゼ実 車模擬 LFT-D 車体構造 の部品製作および接合 組立を行い、剛性試験 によりプロジェクト目 標の達成度を検証す る。	（該当なし）	（該当なし）
(j) LFT-D 高 速成形最適化 技術の開発 （2018～2022 年度）	（該当なし）	（該当なし）	(j1) LFT-D 成形材の物 性向上の研究を行う。 弾性率 25GPa を目標 とする。 (j2) LFT-D 中間素材の 繊維分散等の繊維性状 の定量的評価法を開発 する。 (j3) LFT-D 混練 CAE 技術の研究を行う。ま た、プレス成形 CAE 技術を確立するととも に、プレス成形に伴う 繊維配向異方性を考慮 した最適設計 CAE 技 術の研究を行い、剛性 最適化技術を開発す る。 (j4) プレス成形に伴う 反り変形の抑制技術を 開発するとともに、 LFT-D 成形材同士の溶	(j1) ・ 新 LFT-D 成形システムを構築 し、物性目標を達成 し得る最適な成形プ ロセス条件を確立す る。引張弾性率： 25GPa、引張強度： 200MPa、物性バラツ キ改善を目標とす る。 (j2) LFT-D 混練材の 繊維配向、分散等の 繊維性状の定量的評 価技術を確立する。 (j3) 成形材の場所毎 の繊維配向異方性を 考慮した成形・設計 連成 CAE 技術を確 立する。

			<p>着接合界面の NDI 法を開発し、安定品質を得る高速溶着接合技術を確立する。</p> <p><b>(j5)</b> 革新炭素繊維 LFT-D 成形に関する検討を行う。</p>	
<p><b>(k)</b> 熱可塑性 CFRP マルチマテリアル成形技術の開発 (2018～2022 年度)</p>	(該当なし)	(該当なし)	<p><b>(k1)</b> その場重合成形による連続繊維プリフォームと LFT-D 中間素材とのハイブリッド成形技術を開発する。また、新創案の非混練フレック法によるフレック繊維と LFT-D 中間素材とのハイブリッド成形法の基礎技術を開発する。</p> <p><b>(k2)</b> ハイブリッド成形の高速マテハン技術・設備を開発するとともに、ハイブリッド成形を適用したマルチマテリアル自動車部品の設計および試作評価を行う。</p> <p><b>(k3)</b> 熱可塑性 CFRP マルチマテリアル設計法に関する基礎データを取得する。</p>	<p><b>(k1)</b> その場重合成形による連続引抜成形技術を確立するとともに、連続引抜 UD テープによるフレックシート基材の成形技術を開発する。</p> <p><b>(k2)</b> フレックシート基材と LFT-D 混練材とのハイブリッド成形およびマテハン技術を開発するとともに、CFRTP マルチマテリアル設計フロアパネルによる成形実証を行う</p> <p><b>(k3)</b> ハイブリッド成形フロアパネルとサイドシルとの接合構造を試作し、設計および成形性の評価を行う。</p>
<p><b>(l)</b> 熱可塑性 CFRP 評価・解析技術の開発 (2018～2022 年度)</p>	(該当なし)	(該当なし)	<p><b>(l1)</b> 熱可塑性 CFRP の動的・経時特性を評価するとともに、破壊メカニズム解明の研究を行い、材料特性予測の基礎技術を開発する。</p> <p><b>(l2)</b> 材料データベースの一部を構築する。</p> <p><b>(l3)</b> 熱可塑性 CFRP 試</p>	<p><b>(l1)</b> X 線 CT および タルボ・ロー干渉計による LFT-D 材料特性評価技術を開発する。</p> <p><b>(l2)</b> LFT-D 材の歪速度影響および疲労強度特性評価を行うとともに、材料特性予</p>

			<p>験法標準化の調査・検討を行う。</p> <p><b>(14)</b> 構造設計 CAE に用いる実用的な材料モデルを提案する。</p>	<p>測技術を開発する。</p> <p><b>(13)</b> 熱可塑性 CFRP 試験法標準化の調査・検討を行う。</p> <p><b>(14)</b> 構造設計 CAE に用いる実用的な材料モデルを提案する。</p>
<p><b>(m)</b> 自動車向 リサイクル CF 適用化技 術の開発 (2018~2022 年度)</p>	(該当なし)	(該当なし)	<p><b>(m1)</b> 航空機 CFRP 廃材および自動車用水素タンク廃材等の多様な CFRP 廃材からリサイクル CF を効率的に回収できる過熱水蒸気処理プロセスの開発を行う。</p> <p><b>(m2)</b> リサイクル CF および LFT-D 工程内廃材を用いた LFT-D 成形技術を開発する。</p> <p><b>(m3)</b> LCA 評価法に関する基礎的な調査を行い、LFT-D 成形 CFRP に関する LCA の予備的な評価を行う。</p>	<p><b>(m1)</b> 過熱水蒸気処理による CFRP 水素タンク廃材からのリサイクル CF 回収技術を確立する。</p> <p><b>(m2)</b> リサイクル CF を用いた LFT-D 成形技術を確立する。</p> <p><b>(m3)</b> CFRP リサイクルに関する LCA 評価を行う。</p>

### (3)全体計画

1・2期でLFT-D成形の基本技術を開発、シャシ構造による技術実証を達成したが、実用化に向けて多くの解決すべき課題も明らかになった。これらのLFT-D残存課題のクリアおよび新たに設定された新規課題の開発を目標に、3・4期の課題設定と実施計画を策定した。(図3-2.7.1.1-4)

1・2期と3・4期の研究開発課題についてそれぞれ表3-2.7.1.1-2、-3に示す。

I期 (2013-2015年度)	II期 (2016-2017年度)	III期 (2018-2020年度)	IV期 (2021-2022年度)
(e) LFT-D成形の要素技術の開発		<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">残存課題</div> <div style="margin-right: 10px;">}</div> <div>物性向上、薄板化 など</div> </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-right: 10px;">新規課題</div> <div style="margin-right: 10px;">↓</div> <div>リサイクル、マルチマテリアル 繊維性状分析手法 など</div> </div>	
(f) 大物高速成形技術の開発			(j) LFT-D高速成形最適化技術の開発
(g) 大物高速接合技術の開発			(k) 熱可塑性CFRPマルチマテリアル成形技術の開発
(h) 意匠性外板製造技術の開発			(l) 熱可塑性CFRP評価・解析技術の開発
(i) 技術実証			(m) 自動車向リサイクルCF適用化技術の開発

図 3-2.7.1.1-4 研究開発の全体計画

表 3-2.7.1.1-2 研究開発課題（1・2期）

研究開発課題 (大項目)	研究開発課題(中項目)
(e)LFT-D成形の要素技術の開発	e1: LFT-D成形法に最適な成形プロセスの開発
	e2: LFT-D成形品の特性評価技術の検討
	e3: LFT-D成形品のデータベースの一部の構築
	e4:最適成形プロセスを効率的に実現するためのCAE解析技術の開発
(f)大物高速成形技術の開発	f1:大物LFT-D成形品をハイサイクルでプレス成形する技術の開発
	f2: LFT-D混練体をプレス機に搬送、チャージするマテリアルハンドリング（マテハン）技術の開発
	f3: LFT-D構造設計技術の開発
	f4: 補強材ハイブリッド成形技術の開発
	f5: 高速NDI技術の開発
(g)大物高速接合技術の開発	g1:大物成形品同士を高速で接合するための要素技術の開発
	g2:量産自動車の生産性に対応できる接合部位の高速非破壊検査技術の開発
(h)意匠性外板製造技術の開発	h1: 高意匠性を有する熱可塑性CFRP部材の材料・成形プロセス技術の開発
(i)実証評価	ii: 実車模擬LFT-D構造の試作・試験による技術実証

表 3-2.7.1.1-3 研究開発課題（3・4期）

研究開発課題 (大項目)	研究開発課題(中項目)
(j)LFT-D高速成形最適化技術の開発	(j1) LFT-D材料物性向上及び薄板化技術の開発
	(j2) LFT-D材繊維性状の定量的評価法の開発
	(j3) LFT-D成形および設計CAE技術の開発
	(j4) 高速溶着接合技術の開発
(k)熱可塑性CFRP高速ハイブリッド成形技術の開発	(k1) その場重合ハイブリッド成形技術の開発
	(k2)ハイブリッド高速成形マテハン技術の開発
	(k3)LFT-Dハイブリッド構造設計技術の研究
(l)熱可塑性CFRP評価・解析技術の開発	(l1) 熱可塑性CFRPの材料特性予測技術の研究
	(l2) 熱可塑性CFRP材料のデータベースの一部の構築
	(l3) 熱可塑性CFRPの試験法標準化の研究
	(l4) 非線形性を考慮した材料モデルの開発
(m)自動車向けリサイクルCF適用化技術の開発	(m1) リサイクル炭素繊維回収技術の開発
	(m2)リサイクル炭素繊維のLFT-D適用技術の研究
	(m3) 熱可塑性CFRPのLCA評価法の研究

#### (4)実施体制

集中研企業および分担研、再委託先機関が関係するプロジェクトを円滑に遂行するため、下記の会議体による推進体制で進めた。

- ・ ステアリング委員会（月次）：NCCと集中研企業で構成され、プロジェクト方針事項、重要事項の審議、決定。
- ・ ワーキンググループ（WG）：材料、成形、設計・接合、ハイブリッド、評価・解析、リサイクルの各WGを組織、実務作業を推進。
- ・ 合同WG：WG間の問題議論、情報共有。必要に応じ開催。
- ・ 成形トライチーム：NCCおよび実施機関における成形試験を実行指揮。
- ・ 分析・評価チーム：物性測定、結果の分析、評価実施。関連WGへ報告。
- ・ 事務局（アドミニストレーション業務管理事務局、知財事務局）

さらに、プロジェクト活動の学術的な支援を行うために、名古屋大学を中心とする学術支援WGを設置し、LFT-D特性解明等の理論あるいは数値計算による学術的な研究を実施し、プロジェクトへフィードバックした。分担研、再委託先については、実施項目に応じて、各WGに参画する体制とした。各期における参加機関・企業の体制について表 3-2.7.1.1-4 に示す。



表 3-2.7.1.1-4 参画機関・企業

区分	参画機関・企業*	担当作業	1期		2期		3期			4期	
			2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2020年度
集中研	トヨタ自動車	プロジェクト推進	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	本田技術研究所	↑	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	スズキ	↑	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	三菱自動車	↑	✓	✓	✓	✓					
	SUBARU	↑	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	東レ	↑	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	帝人	↑	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	三菱ケミカル	↑	✓	✓	✓	✓					
	アイシン精機	↑	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
	コマツ	↑	✓	✓	✓	✓					
	共和工業	↑	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	KADO	↑					✓	✓	✓	✓	✓
	福井ファイバーテック	↑					✓	✓	✓	✓	✓
分担研	産業総合研究所	材料物性評価・試験法	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	KADO	ロボットマテハンシステム	✓	✓	✓	✓					
	島津製作所	材料特性解明					✓	✓	✓	✓	✓
	JFCC	CF回収技術						✓	✓	✓	✓
	高砂工業	CF回収技術						✓	✓	✓	
	トヨタカスタマイジング&デベロップメント	構造設計・試作・試験 接合技術						✓	✓	✓	✓
	コニカミノルタ	材料評価技術						✓	✓	✓	✓
再委託先	トヨタカスタマイジング&デベロップメント	構造設計・試作・試験	✓	✓	✓	✓	✓				
	東レエンジニアリング Dソリューションズ	成形・設計 CAE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	大成プラス	接合技術	✓	✓	✓	✓					
	名機製作所	成形要素実験	✓	✓	✓	✓	✓	✓			
	JAXA	NDI 技術	✓	✓	✓	✓					
	石川県工業試験場	溶着接合技術	✓	✓	✓	✓					
	福井県工業技術センター	薄層 UD セミプリプレグシート	✓	✓	✓	✓					
	東京大学	強度予測技術					✓	✓	✓	✓	✓
	日本大学	T-RTM 成形技術					✓	✓	✓	✓	✓
	JFCC	CF回収技術					✓				
	高砂工業	CF回収技術					✓				
	日立化成	CF回収技術					✓				
	金沢工業大学	CNF 添加強化技術							✓	✓	✓
	豊田通商	CFRP リサイクル技術評価									✓

\*最新の社名を示す

## (5)運営管理

- ・ プロジェクト運営管理のツールとして、期初にプロジェクト全体の実施計画（マスタープラン）を策定し、ステアリング委員会で承認を得て各 WG に展開、毎月のステアリング委員会で進捗報告を行うことにより、PDCA を回す。
- ・ 分担研、再委託先については、実施内容および担当 WG をアサインし、各 WG で管理。
- ・ 各ワーキンググループは、月 1 回程度の頻度で開催。NCC、集中研企業、分担研および再委託先の研究員を中心に、個別テーマについて具体的な検討、議論、意思決定を行うなど、実務作業を推進。
- ・ 合同 WG：各 WG 間にまたがる課題等について、各 WG からの報告と議論を通じて、問題解決と情報共有を行う。
- ・ 成形トライ：NCC の成形設備（3500 トンプレス機大型 LFT-D 成形システム、300 トン小型 LFT-D 成形装置および T-RTM 成形用 800 トンプレス機システム）を用いた NCC での成形トライは月 1～2 回ペースで実施。外部実施機関での実験等は関連 WG の計画に基づき実施。
- ・ 分析・評価チーム：毎週開催。NCC を中心に、物性測定結果の分析および評価手法について検討し、材料 WG 活動へ反映。
- ・ 学術支援WG：年 2 回開催。担当の先生方から各テーマの研究計画と成果の報告を行い、企業との意見交換、議論を通じて、企業ニーズや要望等を研究に反映。

## (6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030 年度）

### ① 基本前提条件

- ・ 費用としては、現国プロ段階から LFT-D 実車開発段階における集中研カーメーカー5社（1・2期）における研究開発投資（推定）を対象とする。
- ・ 効果としては、集中研カーメーカー5社による国内販売、輸出および海外生産合計台数の売上（推定）を対象とする。（LFT-D 部品に関わる材料を含む総生産＝総付加価値と解釈）
- ・ LFT-D 適用車は 2026 年市場投入され、2026 以降 5 社が販売する新型車には全て LFT-D 適用車とし、各年の販売車の 12%が新型車とする。

### ② 費用（2030 年までの LFT-D 関連研究開発総費用）：総額 615 億円

- ・ NCC 当初導入設備費：15 億円
- ・ プロジェクト費用（2013～2022）：50 億円
- ・ 国プロ期間中の企業投資総額（5社）：50 億円（想定）
- ・ 国プロ終了後の LFT-D 研究開発費（5社）：約 500 億円（想定）

### ③ 効果

- ・ LFT-D 適用車台数推算：約 1540 万台(2026 年～2030 年)
- ・ LFT-D 適用部品重量 40kg（平均車体重量 1500kg、その中の構造重量 390Kg の約 10%と想定）（40kg 軽量化）
- ・ LFT-D 部品売上総額(2026 年～2030 年)：約 9240 億円  
（カーメーカー5 社分総付加価値：約 2300 億円）
- ・ 燃費削減：0.3km/L→ガソリン削減総量@2030 年：約 92,000kl
- ・ CO<sub>2</sub> 排出削減総量@2030 年：約 2 億 t

### 2.7.1.2 研究開発成果

#### (1)最終目標の達成度

表 3-2.7.1.2-1 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成度※	未達の場合 原因と 解決方針
(e) LFT-D 成形の要素技術の開発 (2014～2017 年度)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ H27 導入小型 LFT-D 設備による混練プロセス解明、および LFT-D 特性向上を図る。</li> <li>・ H26, 27 導入設備を用いて成形パラメータ・条件と成形板物性との相関を取得するとともに、それらのデータ分析・評価を行い最適成形プロセスの基礎技術を確立する。</li> <li>・ LFT-D 材料特性 DB の構築に着手する。</li> <li>・ CAE 成形解析法の高度化、実証構造の成形シミュレーションにより基礎技術を確立する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 物性の支配因子である繊維長と分散について、方向性を見出した。</li> <li>・ 独自の繊維長（分布）および配向測定法を確立した。</li> <li>・ LFT-D 材の圧縮特性の基礎データを取得した。</li> <li>・ 成形流動および反り変形の CAE 予測手法について、実測データとの突合せにより、精度向上を行った。</li> </ul>	○	
(f) 大物高速成形技術の開発 (2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実証構造部材の成形条件および量産化に繋がる要素技術を確立する。</li> <li>・ 技術実証用構造部の成形要素技術を確立する。</li> <li>・ H27 導入設備を用いた補強材ハイブリッド一体</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ LFT-D 成形基幹設備の改良が完了し、設備システムが完成した。安定的なフルパック成形条件を確立した。</li> <li>・ 精度向上のためのマテハンの改造を行った。</li> <li>・ LFT-D 最適設計法の概念を構築し、Hat 材での試行を行った。</li> </ul>	○	

～2017年度)	成形技術を確立する。 ・ LFT-D 一貫成形ラインのハイサイクル高速マテハン技術の要素技術を確立する。 ・ LFT-D 構造の最適設計 DB 構築に着手する。 ・ 高速 NDI 要素技術を開発する。	・ 構造要素試験を実施し、予測との良好な整合性を確認した。 ・ LFT-D/補強材ハイブリッド成形技術の基本技術を確立した。 ・ 3次元超音波探傷 NDI 検査を行い、接合界面の健全性を確認した。		
(g) 大物高速接合技術の開発 (2014～2017年度)	・ LFT-D 部材同士の高速度接合基礎技術を確立する。 ・ アルミ部材とのマルチマテリアル接合の基礎記述を確立する。	・ 部分構造試験により超音波融着の十分な接合強度を確認した。 ・ 実証構造の融着接合システムを完成し、融着接合トライを行った。	○	
(h) 意匠性外板製造技術の開発 (2014～2017年度)	・ 選定した素材を用いて、高意匠性付与と強度・剛性のある程度両立する技術を確立する。	・ 意匠性のパラメータである表面粗さの発生メカニズムを解明する熱収縮1次元モデルを作製し、検証した。	○	
(i) 実証評価 (2014～2017年度)	・ ロータスエリゼ実車模擬 LFT-D 車体構造の部品製作および接合組立を行い、剛性試験によりプロジェクト目標の達成度を検証する。	・ 上記要素技術を活用したシャシ構造対を試作し、経済性や効率性・重量の観点から融着による接合法の優位性等の知見および反り対策等の課題を得た。 ・ 今後の LFT-D 特性向上（物性・配向設計）＋高剛性接合（US 溶着・高弾性接着剤）により高比剛性シャシ構造の実現の目途が得られた	○	
(j) LFT-D 高速成形最適化技術の開発	(j1) 新 LFT-D 成形システムを構築し、物性目標を達成し得る最適な成形プロセス条件を確立する。 引張弾性率：25GPa、引張強度：200MPa、物性バラ	(j1) ・ LFT-D 物性向上の新アプローチによる LFT-D 成形により、目標値を得る成形条件を見出した。また大幅なばらつき改善の結果を得た。本成形法の大型高速化のため新 LFT-D 大型成形設備システムを構築した。	○	

	<p>ツキ改善を目標とする。</p> <p><b>(j2)</b> LFT-D 混練材の繊維配向、分散等の繊維性状の定量的評価技術を確立する。</p> <p><b>(j3)</b> 成形材の場所毎の繊維配向異方性を考慮した成形・設計連成 CAE 技術を確立する。</p>	<p>・ LFT-D 薄板化に取組みフロアパネルおよびリアパネルについてほぼ設定板厚を達成した。</p> <p><b>(j2)</b> タルボ・ロー干渉計による繊維性状（繊維配向、Vf、分散性）の高速測定、定量評価、可視化・表示技術を確立した。</p> <p><b>(j3)</b> 繊維配向異方性を考慮した成形・設計連成 CAE を開発し、構造要素による剛性最適設計による軽量化効果を検証した。</p>		
<p><b>(k)</b> 熱可塑性 CFRP マルチマテリアル成形技術の開発</p>	<p><b>(k1)</b> その場重合成形（T-RTM）による連続引抜成形技術を確立するとともに、連続引抜 UD テープによるフレックシート基材の成形技術を開発する。</p> <p><b>(k2)</b> フレックシート基材と LFT-D 混練材とのハイブリッド成形およびマテハン技術を開発するとともに、CFRTP マルチマテリアル設計フロアパネルによる成形実証を行う</p> <p><b>(k3)</b> ハイブリッド成形フロアパネルとサイドシルとの接合構造を試作し、設計および成形性の評価を行う。</p>	<p><b>(k1)</b> T-RTM 連続引抜成形による UD テープから製作した非混練フレック繊維の製造技術を確立した。</p> <p><b>(k2)</b> T-RTM プリフォーム成形用 800 トンプレス機および付帯設備の設置を完了した。プリフォーム補強材と LFT-D フトンとのハイブリッド成形用マテハンシステムを構築した。</p> <p><b>(k3)</b> 既存 EV 車のフロアパネルを題材とした CFRTP 置換設計による軽量化効果を検証した。設計に基づき、部分構造供試体ハイブリッド成形フロアパネル構造を試作し、成形性を確認した。また供試体の側面衝突模擬試験を行い、衝突安全性を確認した。</p>	○	
<p><b>(l)</b> 熱可塑性 CFRP 評価・解析技術の開発</p>	<p><b>(l1)</b> X 線 CT およびタルボ・ロー干渉計による LFT-D 材料特性評価技術を開発する。</p> <p><b>(l2)</b> LFT-D 材の歪速度影響および疲労強度特性評価を行うとともに、材料特性予測技術を開発する。</p> <p><b>(l3)</b> 熱可塑性 CFRP 試験</p>	<p><b>(l1)</b> タルボ・ロー干渉計による LFT-D 材料特性（Vf, ひずみ分布、配向）評価に関する研究を行った。</p> <p>引張・圧縮強度予測理論モデルの検証（海技研）、大規模シミュレーションによる強度予測の検証（東京大学）、およびマルチスケールモデルによる力学特性シミュレーション（名古屋大学）を行い、材料特性予測の基礎技術</p>	○	

	<p>法標準化の調査・検討を行う。</p> <p><b>(I4)</b> 構造設計 CAE に用いる実用的な材料モデルを提案する。</p>	<p>を開発した。</p> <p><b>(I2)</b> LFT-D 材の疲労試験法（両振曲げ）の有効性を確認するとともに、有意な SN データを作成した。</p> <p><b>(I3)</b> 疲労試験法について標準化の検討を行い、スペック案を作成した。</p> <p><b>(I4)</b> 粘弾塑性モデルと損傷則を用いた LFT-D の応力-ひずみ非線形特性の予測、評価を行い、材料モデルを作成した。</p>		
<p><b>(m)</b> 自動車向リサイクル CF 適用化技術の開発</p>	<p><b>(m1)</b> 過熱水蒸気処理による CFRP 水素タンク廃材からのリサイクル CF 回収技術を確立する。</p> <p><b>(m2)</b> リサイクル CF を用いた LFT-D 成形技術を確立する。</p> <p><b>(m3)</b> CFRP リサイクルに関する LCA 評価を行う。</p>	<p><b>(m1)</b> 水素タンク廃材および航空機 CFRP 廃材からリサイクル CF を高効率に回収可能な新過熱水蒸気処理炉を導入し、CF 回収処理プロセス・条件を確立した。</p> <p>回収 CF の単糸強度および界面強度を同時評価できる新フラグメンテーション試験法を開発するとともに、標準化の検討を行った</p> <p><b>(m2)</b> リサイクル CF の LFT-D 成形用の材料供給装置を導入し、NCC 大型 LFT-D 押出機に装着するとともに大板成形を行い、プロセスを検証した。また工程内廃材を用いた混練成形性を評価した。</p> <p><b>(m3)</b> CF 回収～LFT-D 成形工程における消費エネルギーのデータを取得した。</p>	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

## (2)研究開発の成果と意義

以降のページでは関連する 1・2 期の成果も含めて 3・4 期のテーマ毎に研究成果を記載する。

### (j) LFT-D 高速成形最適化技術の開発

#### (j1)LFT-D 材料物性の向上

LFT-D 力学特性の支配因子である LFT-D 押出素材（フトン）内の CF 繊維長（分布）と分散性の最適条件を探るべく、CF 材種、繊維体積含有率（Vf）、混練スクリュ条件を振った計 4 回の混練スクリュ実験を実施した。結果、目標

値を達成し得る条件を見出した。(図 3-2.7.1.2-1) さらに本条件を再現するための LFT-D 大型成形設備システムで成形トライを行い再現、検証した。

図 3-2.7.1.2-2 に LFT-D 強度向上の主要因、図 3-2.7.1.2-3 に構築した大型 LFT-D 成形設備システム、図 3-2.7.1.2-4 に LFT-D 成形技術開発の経過、を示す。

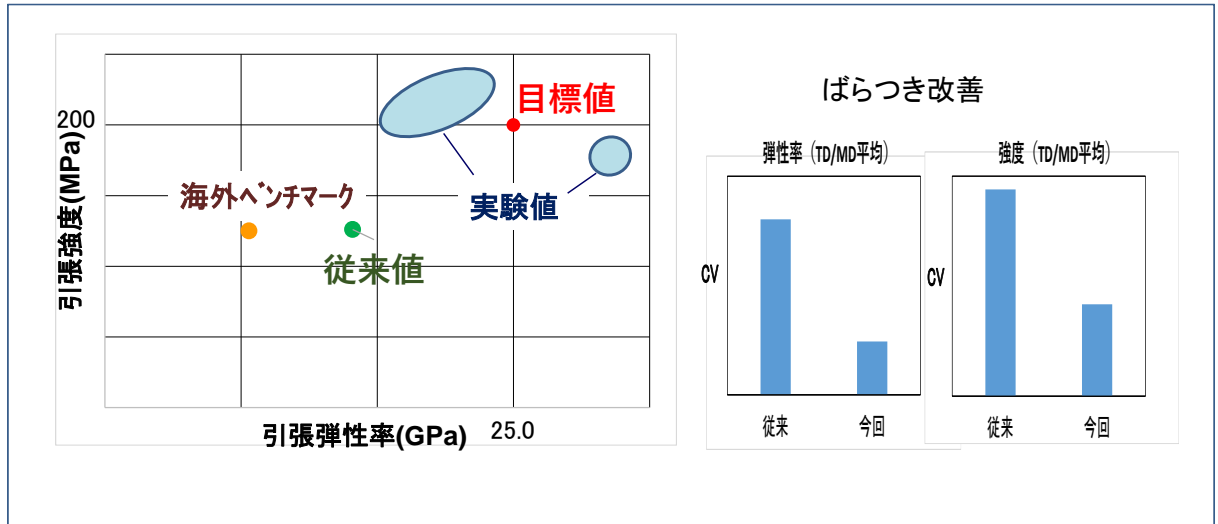


図 3-2.7.1.2-1 LFT-D 物性向上

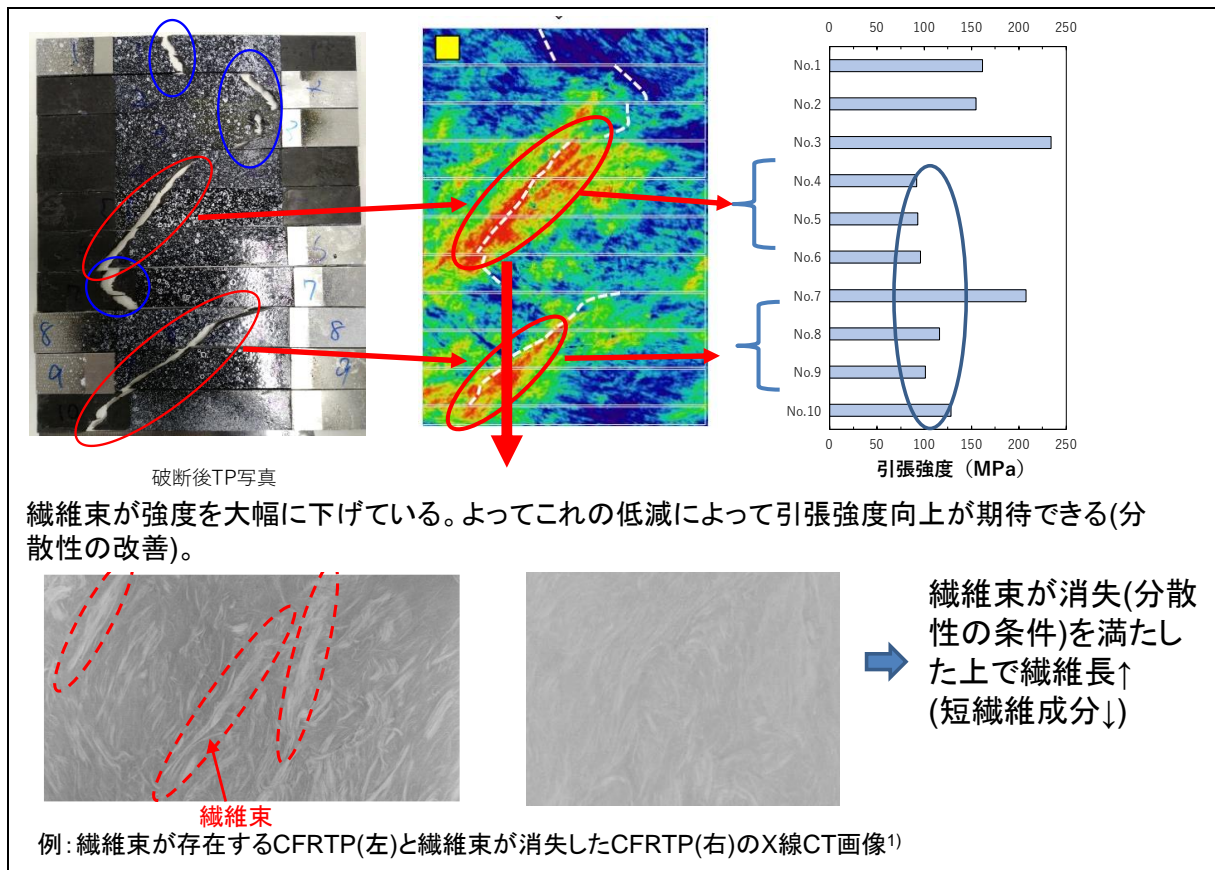


図 3-2.7.1.2-2 LFT-D 強度向上の主要因

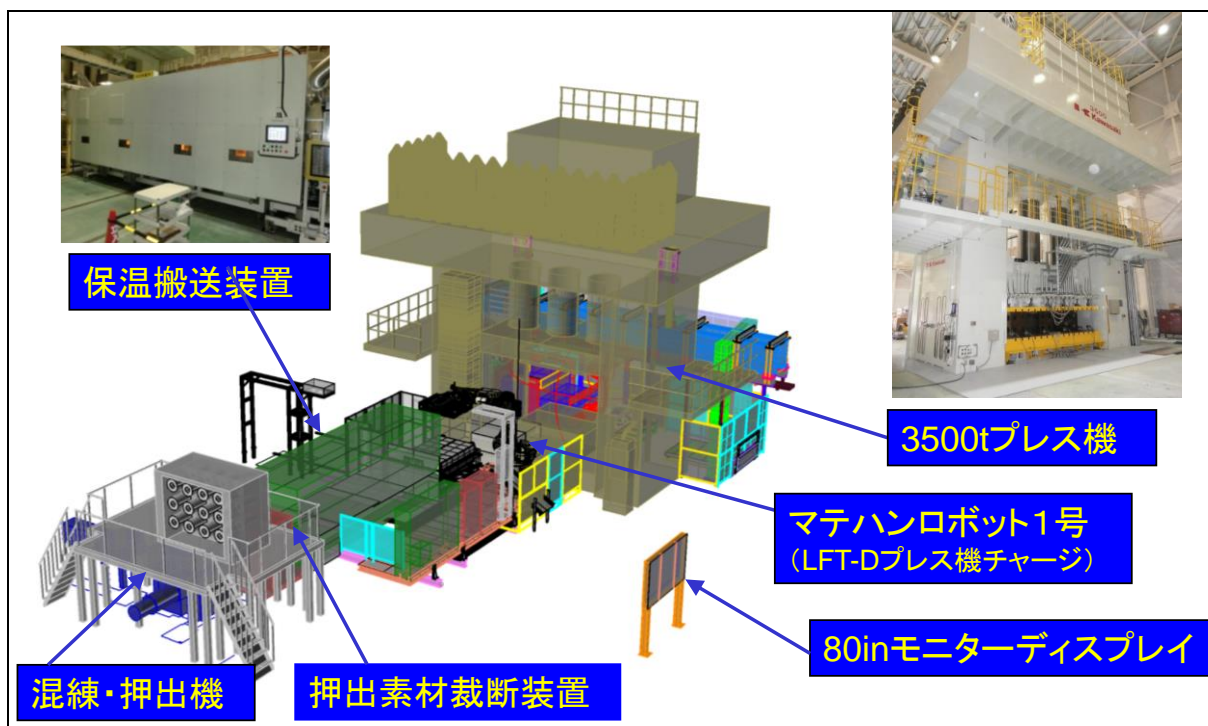


図 3-2.7.1.2-3 構築した大型 LFT-D 成形設備システム

2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度
<b>基礎データ取得</b> 平板形状 	<b>課題明確化 基本技術の目処</b> 分岐形状 	<b>LFT-D要素技術 確立</b> 実車模擬構造部品 	<b>実用化の 要素技術確立</b> 大型接合構造 	<b>実証評価</b> 実証評価 実用化に向けた データ整備 
<b>ハイブリッド構造 FS</b> LFT-D/織物補強 	<b>構造調査 (基礎検討)</b> LFT-D/フレークシート補強 サイドシル・クロスメンバ (フレークシート) リアパネル <b>LFT-D薄肉構造</b> 	<b>構造設計・解析 金型設計・製作</b> 物性向上のための新システム設備構築 	<b>成形トライ 部品成形・組立</b> reCF適用 	<b>実証評価 (成果展示)</b> 

図 3-2.7.1.2-4 LFT-D 成形技術開発の経過



(j2) LFT-D 繊維性状の定量的評価方法の開発

LFT-D 材料開発には、繊維性状の精確な測定評価法が必須である。1・2期では、多段階希釈による繊維長分布測定法（図 3-2.7.1.2-5）、熱拡散率を応用したロックインサーモグラフィ繊維配向測定法（図 3-2.7.1.2-6）、X線回折による繊維配向測定法（図 3-2.7.1.2-7）を開発し、3・4では新たにタルボ・ロー干渉計による測定技術の研究に取組み、広域の LFT-D 成形材の繊維量分布および繊維配向の測定を効率良く評価できる技術を確立した。さらに、小角散乱画像から求めた配向分布、繊維量分布、さらに別途測定した繊維長分布を組み合わせ有限要素解析(FEM)を行い、引張特性予測方法の検討を行い基本コンセプトを得た。タルボ・ロー干渉計の原理を図 3-2.7.1.2-8 に、LFT-D 成形板のタルボ・ロー干渉計撮影画像を図 3-2.7.1.2-9 に示す

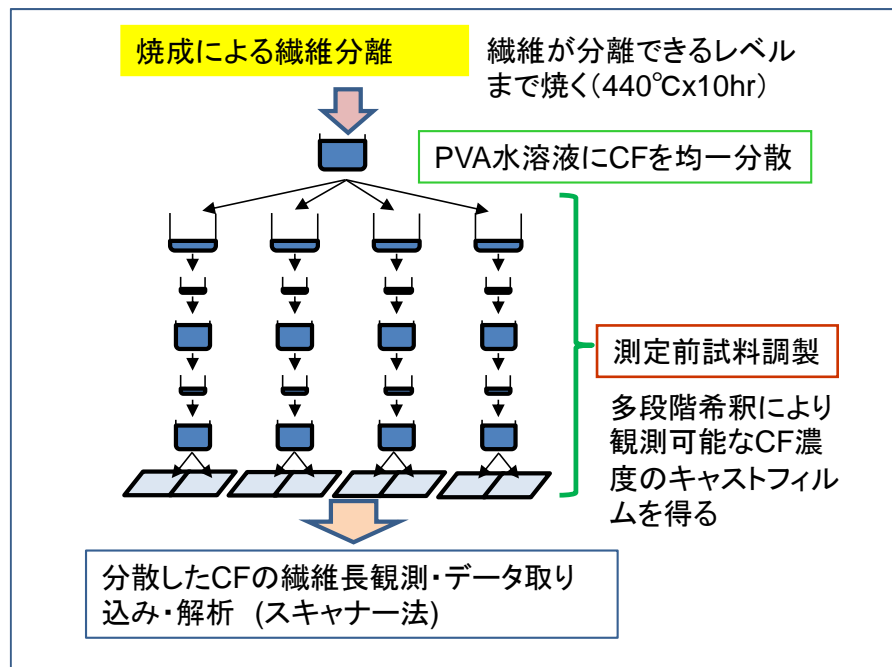


図 3-2.7.1.2-5 多段階希釈による繊維長分布測定法

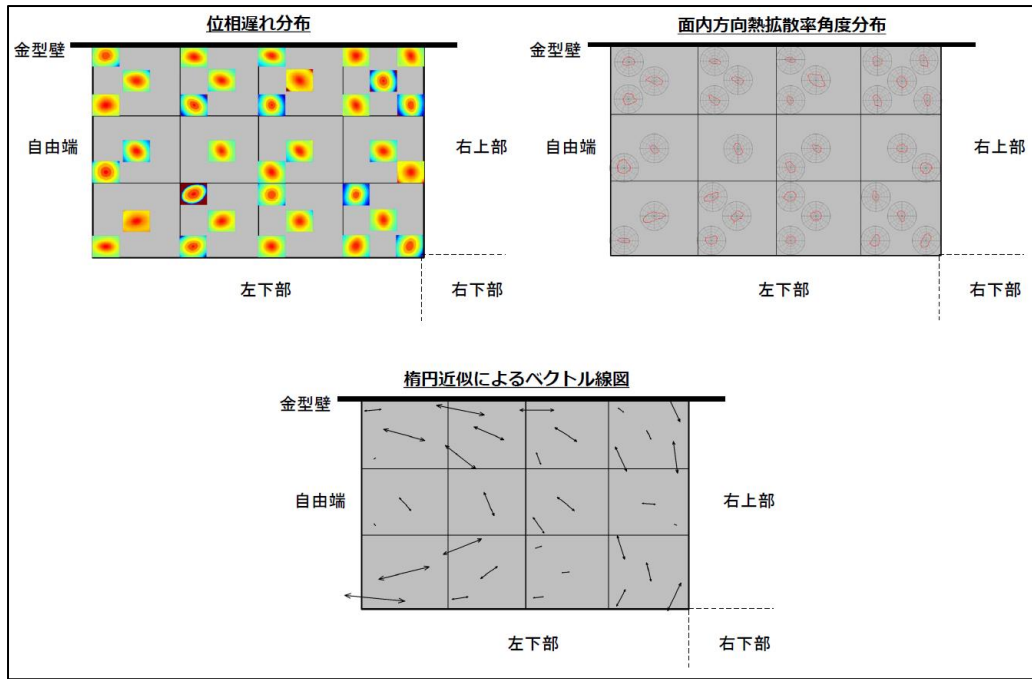


図 3-2.7.1.2-6 ロックインサーモグラフィによる繊維配向測定法

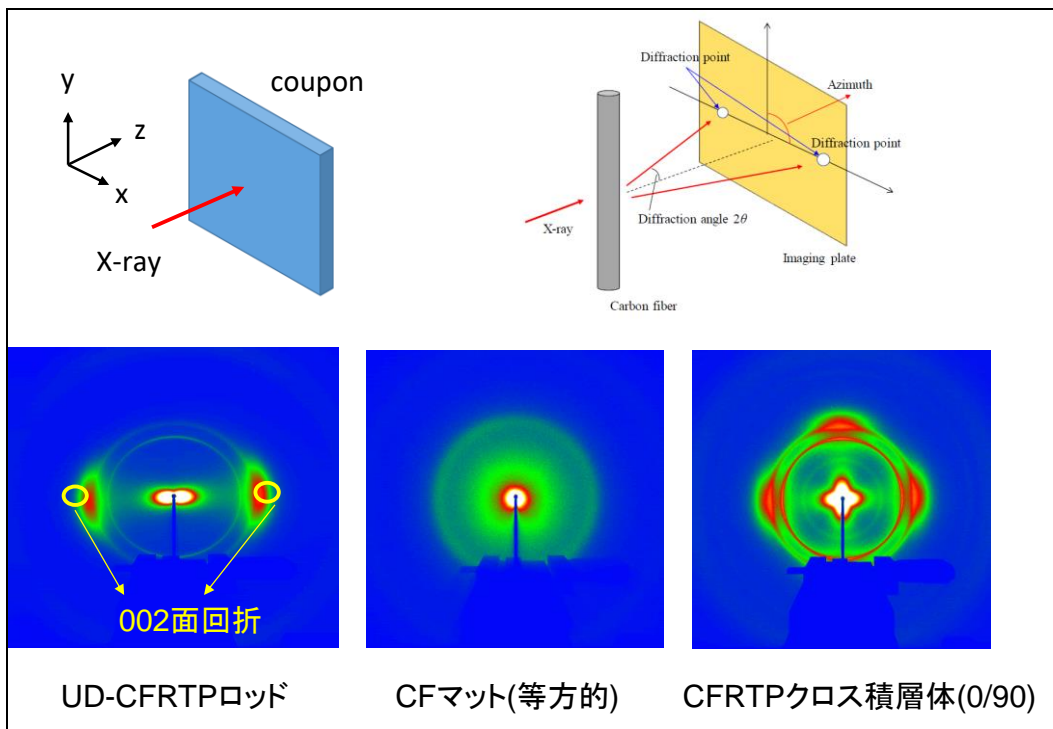


図 3-2.7.1.2-7 X線回折による繊維配向測定法

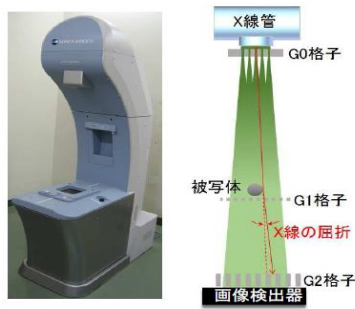


図 3-2.7.1.2-8 タルボ・ロー干渉計の原理

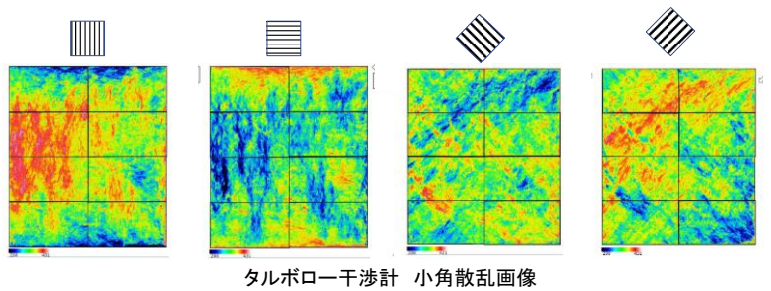


図 3-2.7.1.2-9 LFT-D 成形板のタルボ・ロー干渉計撮影画像

(j3) LFT-D 成形および設計 CAE 技術の開発

(j32) 成形 CAE 技術の開発

TIMON プログラムをベースにした LFT-D 成形シミュレーション技術について、粘度特性、No-Flow 温度、PVT 特性、熱物性特性に基づくパラメータ設定、フトン初期条件の精度向上等の改良を行い、成形トライデータにより検証した。

開発した CAE を用いて、各種大型部品のプレス成形流動解析、そり変形解析による金型設計検討、フトンチャージ位置検討、成形水準設定に応用した。フロアパネルの成形 CAE 解析の例を図 3-2.7.1.2-10 に示す。

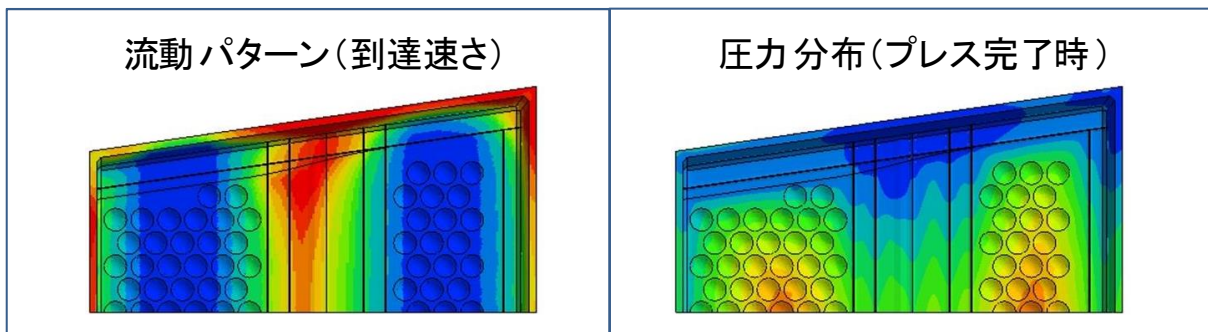


図 3-2.7.1.2-10 成形 CAE 解析の例

(j33) 設計 CAE

LFT-D は混練およびプレス成形に伴う繊維配向の異方性をもつ。従って、LFT-D 部品の最適設計を行うためには、異方性を考慮する必要がある。そのため、LFT-D 繊維配向異方性と構造解析をリンクした成形・設計連成剛性最適化 CAE のプログラムを試作し、小型平板モデルおよびハット形状モデルの要素構造にて検証解析を実施し、解析手法の妥当性を確認した。解析プロセスフローを図 3-2.7.1.2-11 に、せん断パネルでの検証解析例を図 3-2.7.1.2-12 に示す。

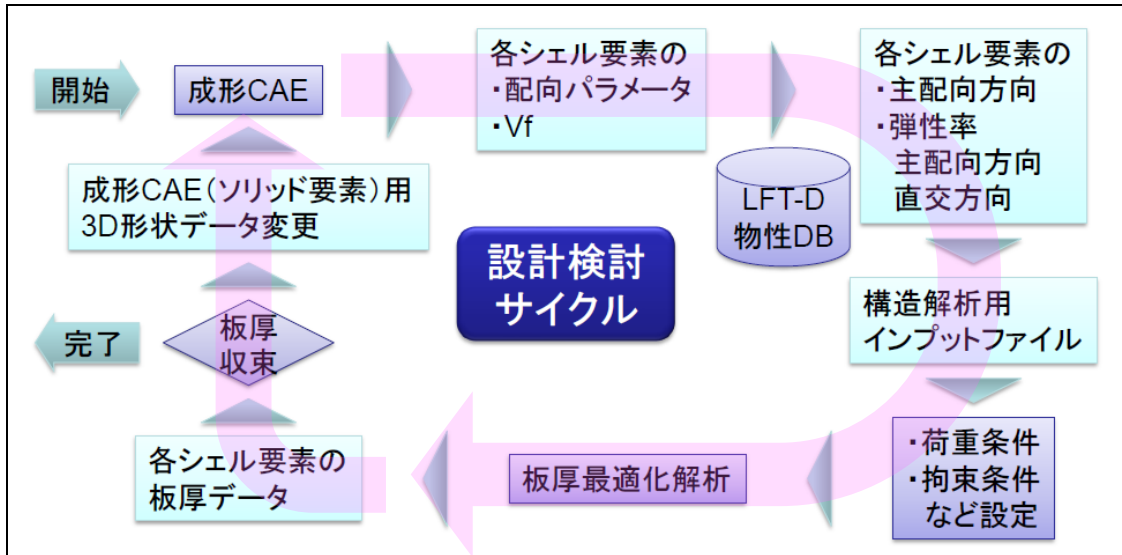


図 3-2.7.1.2-11 成形 CAE と設計 FEM との連成 CAE

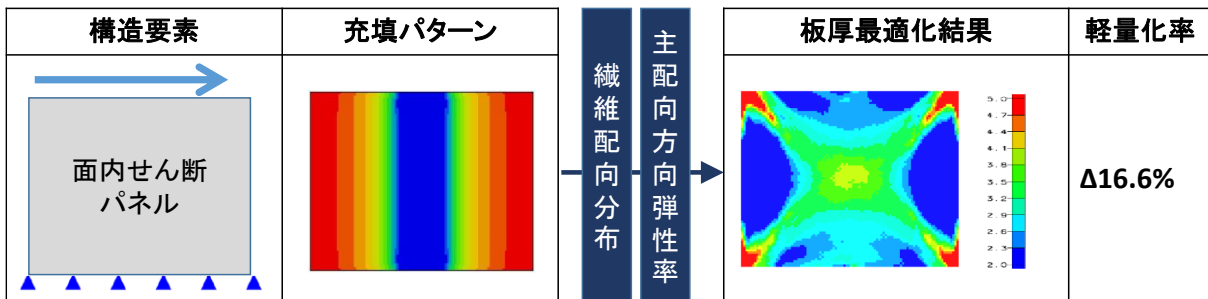


図 3-2.7.1.2-12 成形・設計連成 CAE の検証解析例

(k) 熱可塑性 CRFP マルチマテリアル成形技術の開発

(k1) その場合重合 (T-RTM) 成形ハイブリッド成形技術の開発

LFT-D だけでは強度剛性が不足する場合の対策として、力学特性の優れた補強材を必要な個所に配置して同時成形するハイブリッド成形に取り組んだ。1.2 期では補強材として熱可塑スタンプブルシートを使用し、LFT-D とのハイブリッド成形を実施したが、フタンの流動に伴う補強材のヨレの問題が生じた。マテハンの改良によりほぼ改善されたが、安定品質的には課題が残った。

これに対し、3・4 期では高速成形可能な ε-カプロラクタム PA6 その場合重合 (T-RTM) 成形により一旦補強材を金型内で成形し、それをハイブリッド成形

金型のキャビティにチャージすることで課題解決を図った。具体的には、下記の技術を確立した。

- ・ T-RTM 連続引抜成形による薄層 UD シートの成形技術および未反応モノマー除去技術
  - ・ T-RTM UD シートを素材にした薄層フレーク製作技術
  - ・ T-RTM フレークを素材にしたランダムフレーク基材製作技術
- ハイブリッド成形の概念を図 3-2.7.1.2-13 に、上記 3・4 期の開発技術について図 3-2.7.1.2-14 に示す。

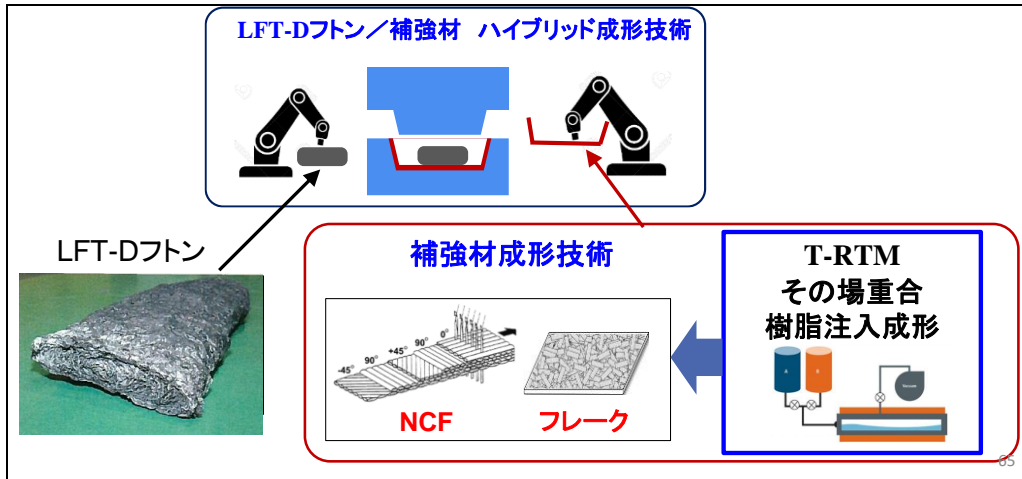


図 3-2.7.1.2-13 その場重合（T-RTM）成形補強材と LFT-D とのハイブリッド成形の概要

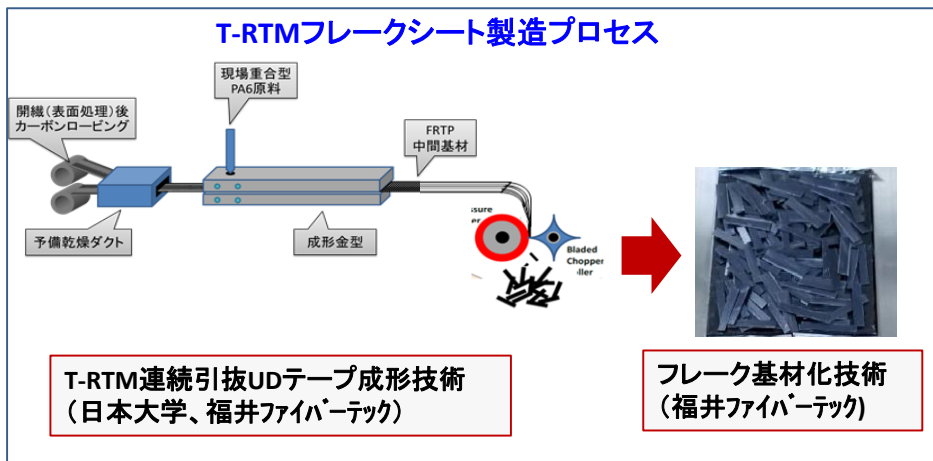
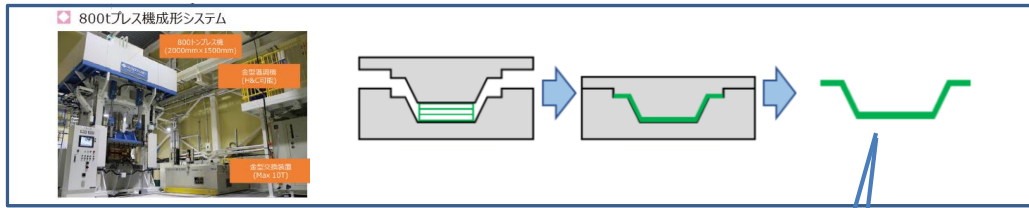


図 3-2.7.1.2-14 その場重合(T-RTM)連続成形フレーク基材化技術の概要

(k12) ハイブリッドフロアパネルの試作

クロスビーム成形およびクロスビーム/LFT-D ハイブリッド成形フロアパネル試作を行い、フルパックの良品を得た。工程の概要を図 3-2.7.1.2-15 に示す。

### クロスビーム成形



### ハイブリッド成形

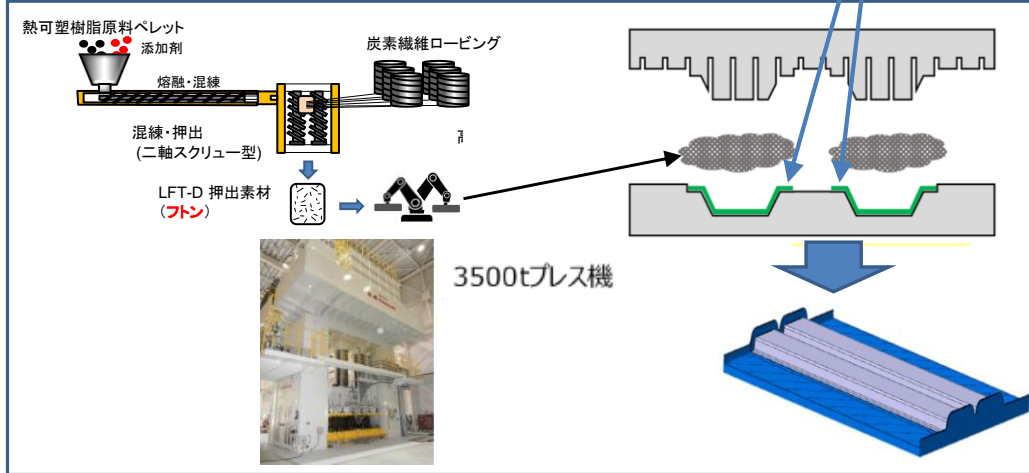


図 3-2.7.1.2-15 T-RTM クロスビーム/LFT-D ハイブリッド成形の概要

#### (k2) ハイブリッド高速成形マテハン技術の開発

T-RTM 用の 800 トンプレス機の設置、樹脂注入機 (RTM/T-RTM) その他付帯設備の設置を行った。(図 3-2.6.1.2-16)。また予熱機能アタッチメントをもつハイブリッド成形マテハンを構築した。本設備を用いてマルチマテリアル T-RTM 成形部品の試作を実施した。

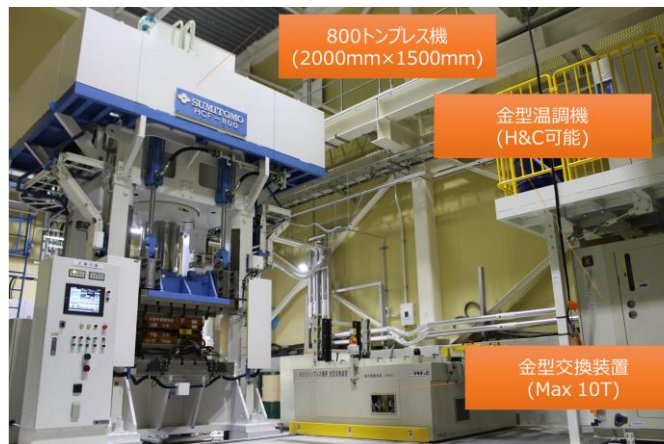


図 3-2.7.1.2-16 800 トンプレス機システムの構築

(k3) LFT-D ハイブリッド構造設計技術の研究

① 概要

既存スチール製フロア構造に対し 45%軽量化を目標として、プロジェクト開発技術を投入した熱可塑性 CFRP (CFRTP) 構造への置換設計を行い、軽量化効果を確認するとともに、上記設計を反映した部材試作による成形性と衝突安全性の評価を行った。投入した開発技術は、その場重合成形(T-RTM)技術、T-RTM/LFT-D ハイブリッド成形技術および超音波溶着接合技術である。図 3-2.7.1.2-17 に置換設計対象構造を示す。

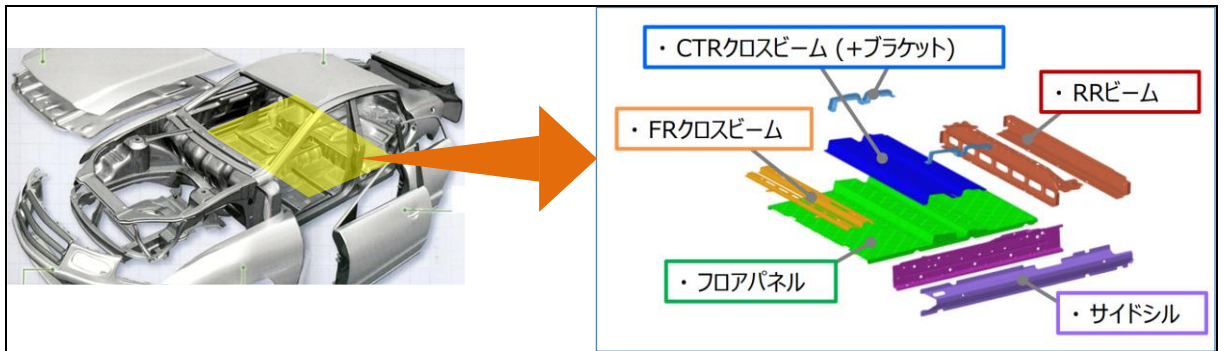


図 3-2.7.1.2-17 置換設計対象構造 (フロア部位)

② 構造様式の検討

下表に課題項目に対する方策と軽量・低コストの狙いを示す。

課題	方策/投入技術	狙い
軽量化	・強度部材(ビーム、サイドシル)に高強度・高流動性T-RTMフレークシート材を使用	・流動成形自由度を生かした板厚徐変最適化
剛性確保	・フロアパネルにLFT-D格子リブ様式の採用	・パネル剛性付与、成形反り抑制、 ・クロスビーム圧縮強度確保
低コスト化	・T-RTM/LFT-Dハイブリッド成形	・一体化による部品点数削減
	・超音波溶着ロボット接合	・スポット溶接並みの効率性

③ 置換材料・成形・接合法

下表に各部材について、置換材料、成形法および接合法を示す。

置換部品	置換材料	成形法		接合
パネル、ブラケット	LFT-D(一体化)		T-RTM/LFT-D ハイブリッド成形	超音波溶着 接合
ビーム	T-RTMフレーク シート	プレス成 形		
サイドシル	T-RTMフレーク シート	プレス成形		

#### ④ 結果

上記検討の結果、下記の成果を得た。

- ・モデル構造と捩じり剛性等価の条件でフロアパネルの構造最適設計を行い、軽量化目標を達成した。また部品点数約半減の成果を得た。
- ・構造設計を模擬したハイブリッド成形フロアパネル構造を試作し、良品を得た。(図 3-2.7.1.2-18)
- ・ロボットシステムによるフロアパネルとサイドシルとの超音波溶着接合構造を試作し、良品を得た。(図 3-2.7.1.2-19)
- ・同試作構造の衝突模擬試験を行い、衝突安全性を確認した。

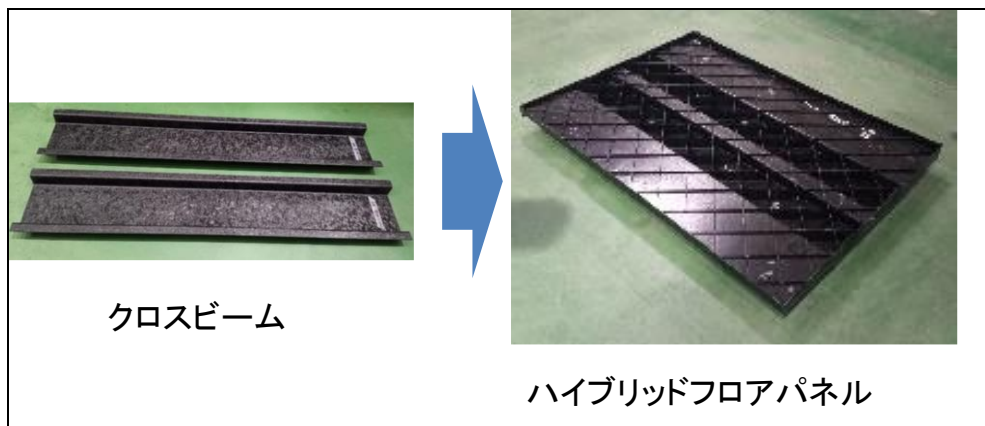


図 3-2.7.1.2-18 成形されたクロスビームとハイブリッド成形フロアパネル

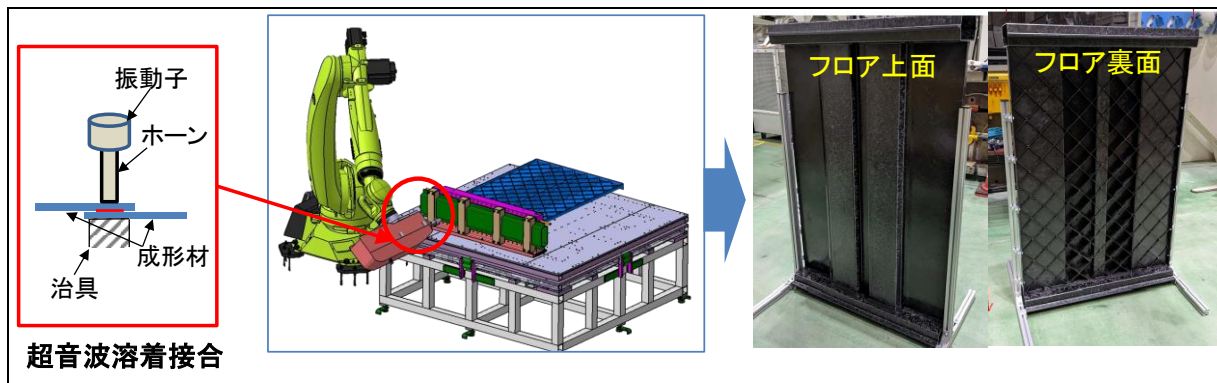


図 3-2.7.1.2-19 ハイブリッドフロアパネルとサイドシルとの超音波溶着接合構造

- (I) 熱可塑性 CFRP 評価・解析技術の開発
- (II) 熱可塑性 CFRP の材料特性評価技術の研究
- (III) タルボ・ロー干渉計による LFT-D 成形材の材料特性解明 (名古屋大学グループ)



CFRP 積層材に対しタルボ・ロー干渉計による LFT-D 成形材の繊維配向分布、繊維分散の定量化手法を検証した。また CFRP 中のボイドがタルボ・ロー干渉計画像に与える影響の定量化を行った。(図 3-2.7.1.2-20)

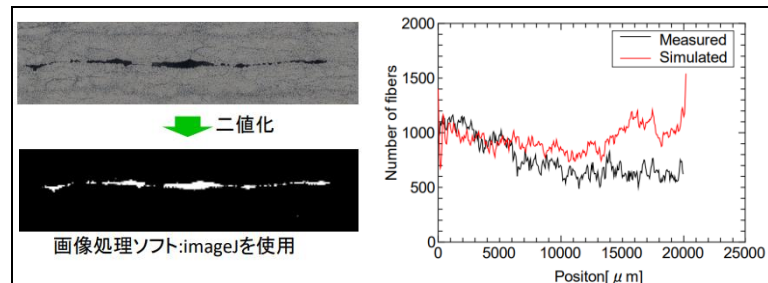


図 3-2.7.1.2-20 タルボ・ロー干渉計を用いた CFRP の繊維方向評価

(112) 熱可塑性 CFRP の材料特性予測技術の研究

(1121) 理論式による強度予測

引張特性発現メカニズムについて、三次元 X 線 CT 画像解析により  $V_f$  や配向テンソルの分布を定量化、力学特性理論モデルを検証し、実験値との比較・検証を行った。(図 3-2.7.1.2-21) また、繊維配向度によって圧縮強度を予測する理論モデルを構築し、実験値との比較・検証を行った。さらに、樹脂単体の高速引張試験によって、PA6 樹脂および LFT-D 試験片の引張特性の速度依存性を明らかにした。

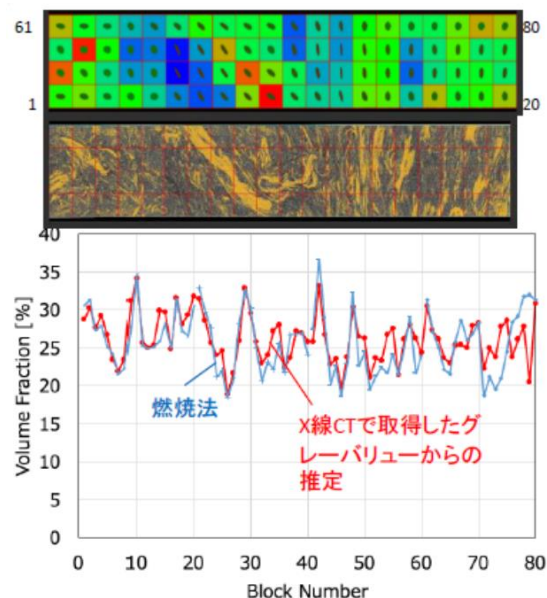


図 3-2.7.1.2-21 X 線 CT によるグリッド毎の配向テンソルと

(1122) 熱可塑性 CFRP の不確定強度モデル・成形モデルの確立

X 線 CT 画像より繊維と樹脂の配置を明確に捉えたミクروسケールモデルを

構築し有限要素法によるミクロスケール破壊シミュレーションを実施した。ミクロスケール破壊シミュレーションにより、繊維方向と荷重方向と最大強度の関係性のデータが得られ、全体領域モデル・単位領域モデルとも定性的な一致が見られた。(図 3-2.7.1.2-11)

設定した不確定性強度モデルは、全体領域のミクロスケール有限要素モデルの計算結果と照合することで、その有効性を検証した。また、LFT-D 材料の疲労強度評価法を検討した。

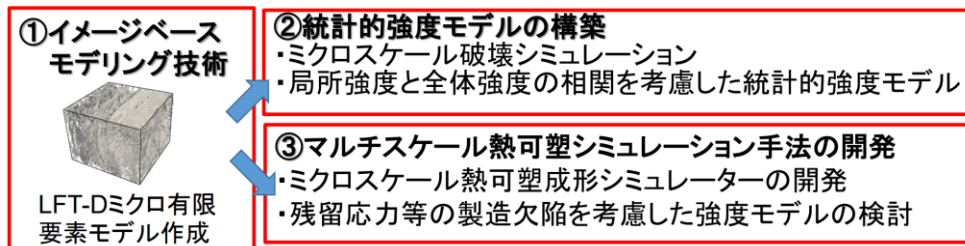


図 3-2.7.1.2-22 ミクロスケール破壊シミュレーションの概要

(1123) マルチスケールシミュレーションモデルによる強度予測

内部構造、繊維長、配向特性等が場所毎に異なる LFT-D の X 線 CT 画像をもとに、画像処理ソフトウェア Avizo (Thermo Fisher Scientific 製) を用いて画像解析を行い、輝度値フィッティングを適用した結果から、3 段階のマルチスケールモデルを検討した。LFT-D は各スケールにおいて特徴的な内部構造を有していると考え、部構造を再現した幾何モデルを構築した。図 3-2.7.1.2-23 に LFT-D のマルチスケールモデルを示す。各スケールの幾何モデルを使用し、均質化法などのマルチスケール解析により LFT-D の力学特性シミュレーションを実施、検証した。

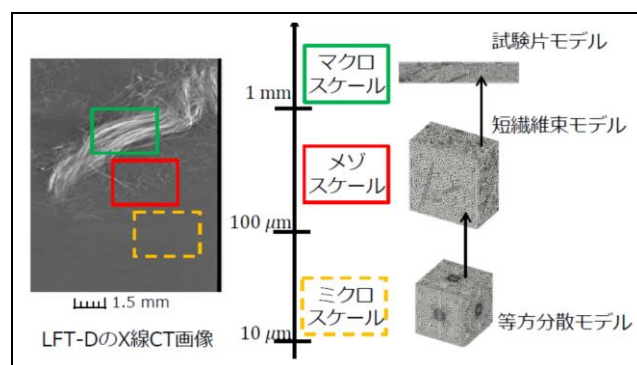


図 3-2.7.1.2-23 LFT-D マルチスケールモデル

(13) 熱可塑性 CFRP の試験法標準化の研究

疲労特性は、静的特性との相関性確認、静的強度に対する比率として評価することが可能であり、また応力比の影響については、疲労限度線図において評価することが可能であり、従来指標の修正 Goodman 線図が適用できることが

確認された。さらに、・AEを用いた四点曲げ疲労試験における破壊起点、疲労亀裂の進展経路を観察し、LFT-D材の疲労破壊メカニズムの解明を行った。また温度依存性を測定し、その影響を評価する指標を見出した。

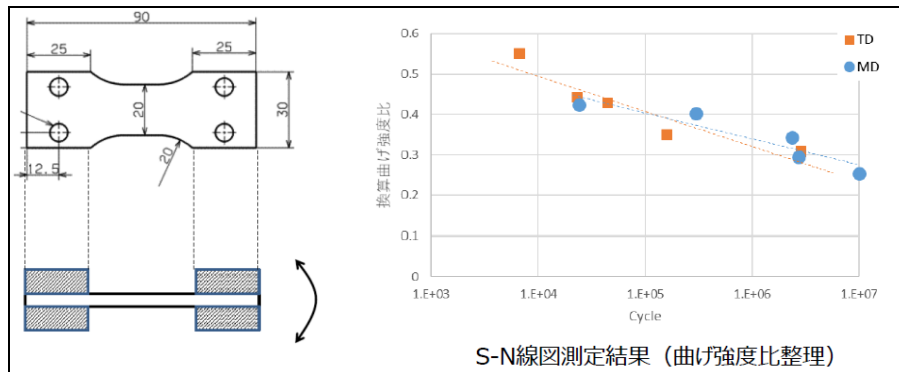


図 3-2.7.1.2-24 LFT-D 疲労評価

(m) 自動車向リサイクル CF 適用化技術の開発

本項目では下記を目標とし取り組んだ。

- ・ LFT-D 要件を満たす高品位な過熱水蒸気処理 CF 回収技術の開発
- ・ 回収 CF のフラグメンテーション試験法評価技術の開発
- ・ 回収 CF の LFT-D 成形技術の開発

対象とする CFRP 廃材としては、航空機 CFRP および LFT-D 工程内廃材に加え、燃料電池車用の水素タンクを追加対象とした。航空機は 20 数年の寿命を終えた機体が今後続々と退役する。水素タンクは、現状多量の工程内廃材の問題に加え、圧力容器の寿命を迎える 2030 年代には大量に用廃になる。それらの廃材の再利用は喫緊の課題である。

CFRP 廃材からの過熱水蒸気法による CF 回収、回収 CF の評価および回収 CF の LFT-D 成形に至る技術開発の全体概要を図 3-2.7.1.2-25 に示す。

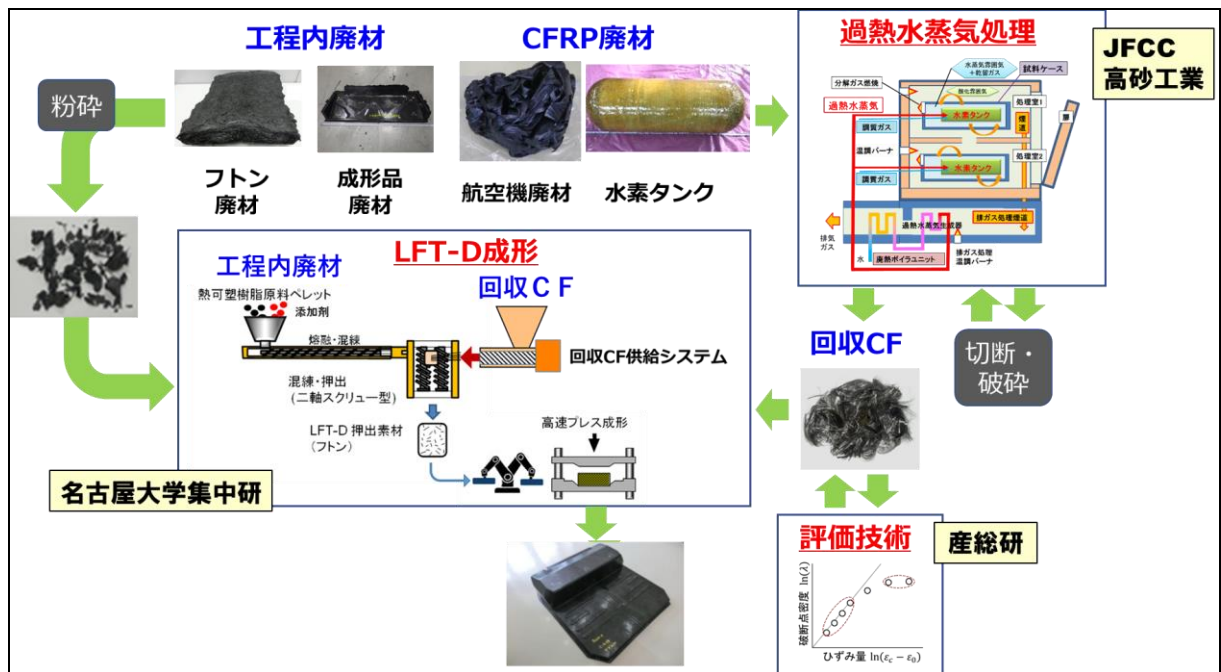


図 3-2.7.1.2-25 CFRP リサイクル技術開発の概要

(m1) リサイクル炭素繊維回収技術の開発

(m11) 過熱水蒸気による CF 回収プロセスの開発

CFRP 水素タンクは大型かつ肉厚のため、その状態で破碎や切断等を行うのは困難であることから、一旦、過熱水蒸気のみで処理（1次処理）して樹脂の大部分を除去し、脆性化した材料を破碎して、酸素を含む過熱水蒸気で処理（2次処理）して樹脂残渣を除去する方法を開発した。また新設処理炉の仕様検討～導入、CFRP 水素タンク廃材の処理プロセスの開発、航空機 CFRP 廃材の処理条件検討を実施した。

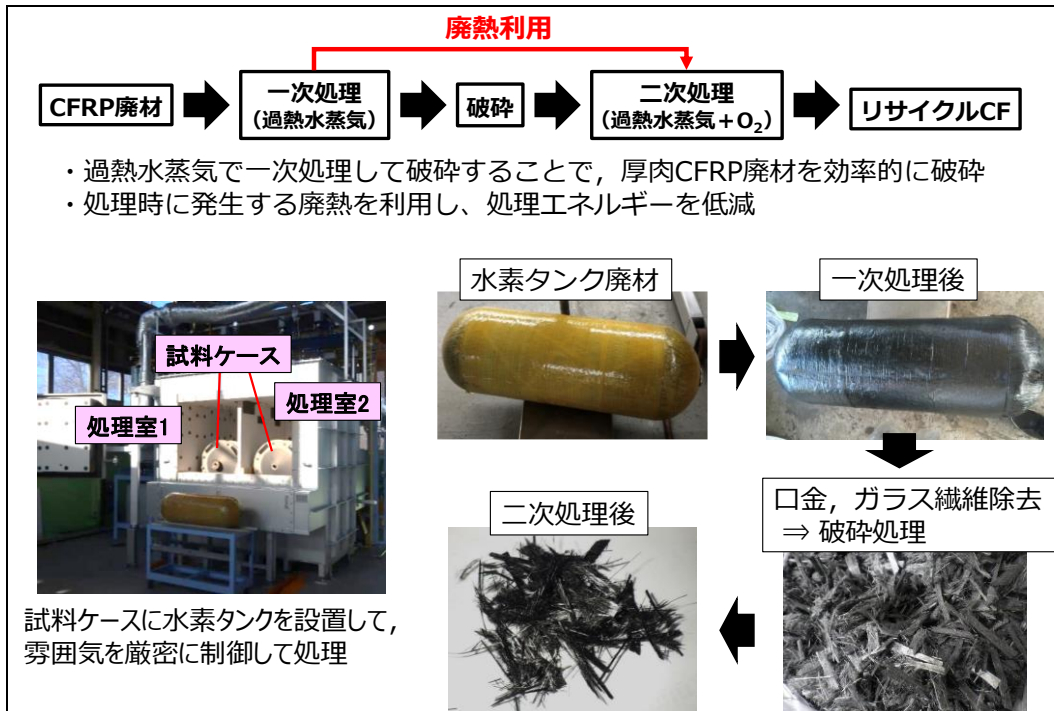


図 3-2.7.1.2-26 水素タンク廃材からの炭素繊維回収プロセス

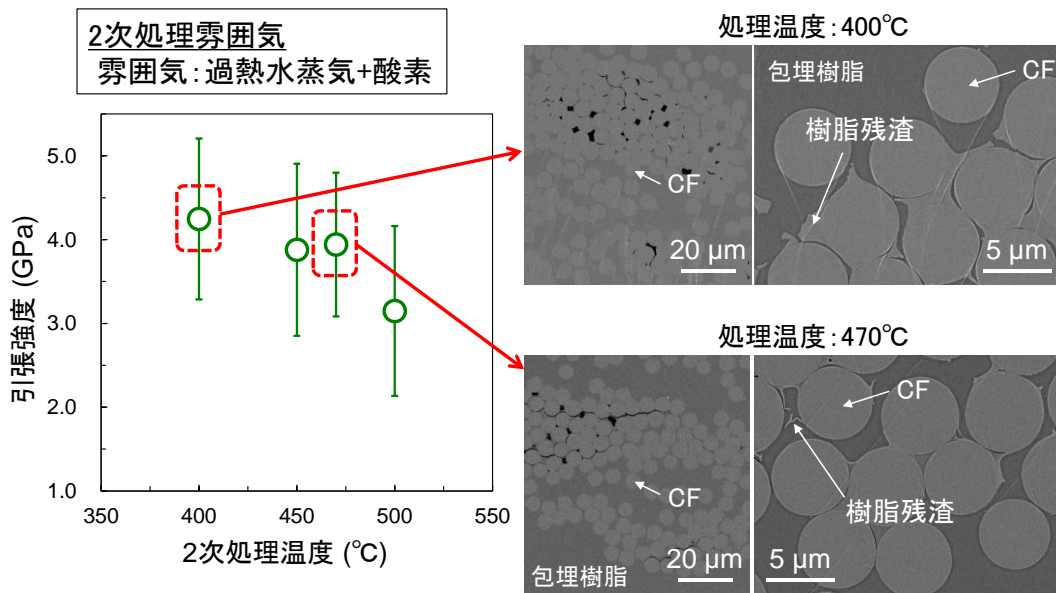


図 3-2.7.1.2-27 水素タンク廃材から回収した炭素繊維の特性

(m12) フラグメンテーション試験による回収 CF の物性評価

炭素繊維の引張特性と界面せん断強度を同時に評価可能な新フラグメンテーション試験・解析手法を開発した。本手法は、適切な試料作製により不連続繊維にも適用可能であることを実証し、回収 CF の新評価法として確立した。課

題として挙げられていた試料作成・評価の効率化のため、試験自動測定法を構築した。暗視野観察を導入することにより、破断点の認識が容易になり、破断点計測に要する労力を大幅削減できた。(図 3-2.7.1.2-28)

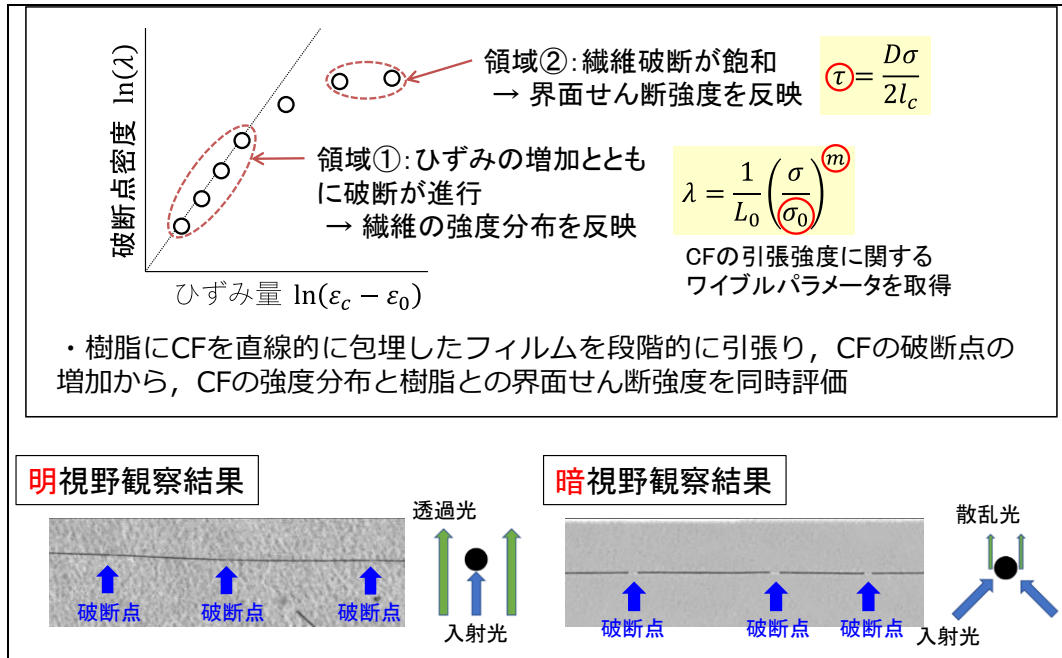


図 3-2.7.1.2-28 炭素繊維の引張特性と界面せん断強度を同時評価可能な新フラグメンテーション試験法

(m2) リサイクル炭素繊維の LFT-D 適用技術の研究

リサイクル CF は綿状でかさ密度が極小さい。そのため、2 軸押出機に材料を安定的供給にする装置システムが課題である。

これに対し、新たに、時間当たり一定量を供給する重量フィーダーと、材料を 2 じく押出機に強制的に送り出すサイドフィーダを構築した。これを用いてリサイクル CF による供給実験を行い、装置改良を経て、最適な制御プロセスを確立した。またフトンおよび成形材破砕材の再成形トライを実施し、物性を評価した。工程内廃材を含むリサイクル CF の LFT-D 成形の概要を図 3-2.7.1.2-29 に示す。

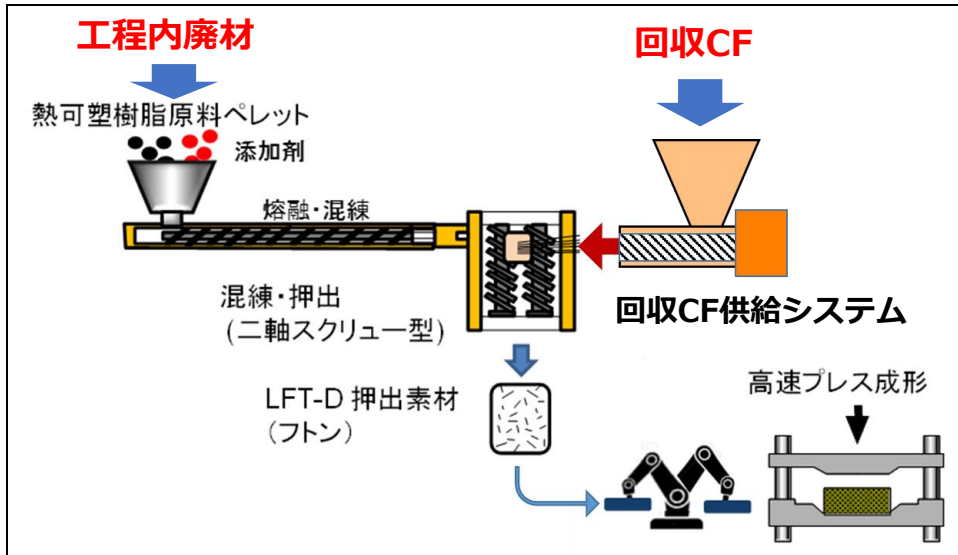


図 3-2.7.1.2-29 リサイクル CF の LFT-D 成形技術

さらに LFT-D 工程内廃材（フトン廃材および成形品廃材）を破碎した材料を用いて混練再成形し，バージン材の 60-80% の力学特性を発現することを確認した。（図 3-2.7.1.2-30）

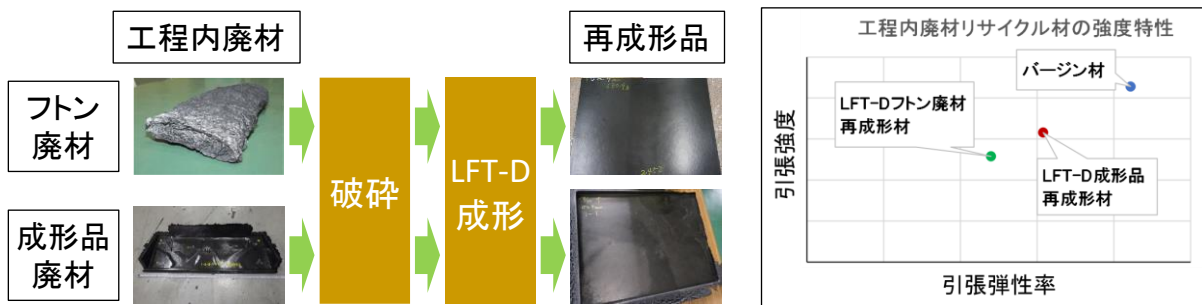


図 3-2.7.1.2-30 LFT-D 工程内廃材の成形技術

(m23) LCA データ取得

CF 回収工程および LFT-D 成形工程における LCA データを取得、評価した。また低 LCA のための連続工程のコンセプトおよび低減効果を確認した。

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.7.1.2-2 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2013FY	0	0	25	1	0	8	1	0	3
2014FY	2	0	16	12	0	3	2	0	4
2015FY	1	0	13	2	0	1	4	0	5
2016FY	3	0	20	4	1	3	4	1	2
2017FY	3	0	20	11	1	4	6	0	4
2018FY	1	0	24	7	0	3	9	0	4
2019FY	1	2	30	2	0	2	5	0	3
2020FY	3	0	19	0	0	1	5	0	4
2021FY	3	0	19	1	0	0	6	0	6
2022FY	2	0	2	1	0	1	6	0	3
合計	19	2	188	41	2	26	48	1	38

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取組み（戦略に沿った取組み、取得状況）

表 3-2.7.1.2-3 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
2015FY	2	0	0
2016FY	4	0	2
2017FY	5	0	4
2018FY	1	0	4
2019FY	0	0	0
2020FY	1	0	0
2021FY	3	0	0
2022FY	0	0	1
合計	16	0	11

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約



## 2.7.2 [テーマ番号 27B] 「リサイクル炭素繊維の評価技術開発」 (2019年度～2022年度)

### 2.7.2.1 テーマの概要

#### (1) 背景と目的

2015年に国連で採択された持続可能な開発目標（SDGs）の目標12『つくる責任つかう責任』では、12-4：製品ライフサイクルを通じたすべての廃棄物の環境に配慮した管理、12-5：発生防止、使用量削減、リサイクル、再利用による廃棄物排出量の削減、等の取組を通じて、持続可能な消費と生産のパターンを確保することを目標として掲げている。また、循環経済の実現に向けて、資源の効率的な利用により最大限の付加価値を生み出す経済政策としての資源循環に関する取り組みも始められている。

軽量で丈夫なCFRPは、輸送機器の軽量化に伴う燃費向上により、温暖化ガス排出量削減を実現させるための有望な素材である。一方、炭素繊維は製造時に多くのエネルギーを投入しているため、リサイクルプロセスを確立することにより、ライフサイクル全体のエネルギー原単位の低減を図ることが求められている。CFRPのリサイクルでは、マトリックスを除去し、回収される炭素繊維を再度強化繊維として循環利用するプロセスの確立が必要である。炭素繊維の取り出しにおいては、炭素繊維へのダメージを最小にしながらマトリックスを除去することが求められ、熱分解法、溶解法、電解酸化法、粉碎等の手法を用いた研究開発が国内外で行われている。特に熱分解法は有望で、実用に近い規模での開発が進められている。

リサイクルされた炭素繊維の再活用を促進させるためには、多様なリサイクル炭素繊維の品質を客観的に評価できる基盤を整備することが必要である。しかしながら、既存の炭素繊維関連の評価法は、新品の炭素繊維の性状を前提としており、リサイクル炭素繊維の品質評価を行うには不十分であった。

本テーマでは、CFRPから回収されたりサイクル炭素繊維の平均的機械特性や各種不純物の評価分析手法を開発し、リサイクル炭素繊維の品質評価法を確立することを目的とする。簡便・効率的に精度よく評価を行うことのできる手法として確立することを目指して、種々の評価手法の開発を行った。

#### (2) 目標値

表 3-2.7.2-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第1中間目標 (2015年度末)	第2中間目標 (2017年度末)	第3中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)
リサイクル炭素繊維の平均的機械特性の簡易評価手法の開発 (2019～2022年度)			リサイクル炭素繊維の平均的な機械特性を効率的に評価するための評価試料の作製手法を	多様なリサイクル炭素繊維に対応する機械特性評価解析手法を開発し、種々の実サンプル

			確立し、評価解析手法を開発する。	への適用可能性を検証する。
リサイクル炭素繊維中の不純物の分析技術の開発 (2019～2022年度)			リサイクル炭素繊維中に含まれる残渣類を同定・定量するための評価手法および不純物元素分析の原理手法を確立する。	リサイクル炭素繊維中に含まれる残渣類を定量し、後段のリサイクルプロセスで炭素繊維として活用できるかを評価する手法を開発する。回収された炭素繊維中に含まれる不純物元素の分析法を確立する。

### (3)全体計画

リサイクル炭素繊維の機械特性の評価に関しては、配向を揃えた繊維束を用いた引張試験法に基づく評価法を開発を行う。リサイクル炭素繊維からの適切な配向繊維束試験片の作製法、引張試験実施方法、評価解析手法を開発し、リサイクル炭素繊維の平均的機械特性を評価する手法を確立する。また、配向繊維束にマトリックスとなる樹脂を含浸させた複合材料を用いて、界面特性を評価する手法を開発する。

不純物分析法としては、炭素残渣の簡易・高精度分析法として、炭素繊維と炭素残渣の反応性の差異を利用した定量手法の開発を進める。また、環境規制への対応および素材評価の両面から求められる各種不純物元素の混入量の分析法として、ICP-MS法を検出手段とし、リサイクル炭素繊維に適した前処理法を開発することで、幅広い不純物元素を簡便かつ一斉定量する分析法を開発する。

### (4)実施体制

産業技術総合研究所 マルチマテリアル研究部門（テーマリーダー、機械特性評価）

産業技術総合研究所 環境創生研究部門（不純物分析）

再委託：京都大学工学研究科機械理工学専攻 北條正樹 教授（2020～2021年度、機械特性評価）

再委託：早稲田大学ナノ・ライフ研究機構 加茂徹 上級研究員（2021～2022年度、不純物分析）

### (5)運営管理

産業技術総合研究所マルチマテリアル研究部門（中部センター）および産業技術総合研究所環境創生研究部門（つくば西事業所）において、それぞれ機械特性評価手法開発と不純物分析技術開発を進めた。平均して2か月に1回程度の頻度で、双方を訪

問あるいはウェブ会議で、各担当課題の進捗状況および課題等の共有、意見交換、議論を行った。各再委託先とも、同程度の頻度で、訪問あるいはウェブ会議により、進捗状況および課題等の共有、意見交換、議論を行った。

#### (6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度）

CFRPは軽量構造材料として年率12%以上の成長を期待されており、2030年時点で、リサイクル材の活用市場としても1,000億円規模となることが予想されている。本開発によりリサイクル炭素繊維の評価技術を確立し、標準化等を通じて評価基盤を整備することにより、リサイクル炭素繊維市場の拡大に貢献する。

### 2.7.2.2 研究開発成果

#### (1)最終目標の達成度

表 3-2.7.2-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
リサイクル炭素繊維の平均的機械特性の簡易評価手法の開発	多様なリサイクル炭素繊維に対応する機械特性評価解析手法を開発し、種々の実サンプルへの適用可能性を検証する。(2022年度)	繊維束を用いた引張試験、繊維束に樹脂を含浸させた複合材料の90°引張試験による界面強度試験、短繊維を配向させた複合材料の引張試験からの繊維特性抽出法を開発し、様々な状態のリサイクル炭素繊維の機械特性評価解析手法として確立した。	○	
リサイクル炭素繊維中の不純物の分析技術の開発	リサイクル炭素繊維中に含まれる残渣類を定量し、後段のリサイクルプロセスで炭素繊維として活用できるかを評価する手法を開発する。回収された炭素繊維中に含まれる不純物元素の分析法を確	回収された炭素繊維を空気中で加熱すると、300～500℃までは炭素残渣が、それ以上の温度では炭素繊維が酸化する。450～500℃の範囲加熱した際の重量変化から、残留する炭素残渣の含有割合を算出する手法を確立した。不純物元素の揮発性に	○	

	立する。(2022年度)	応じた分析前処理法としてマイクロ波分解法および熱分解法を開発し、誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)による多種類の元素の一斉検出法と組み合わせ、回収された炭素繊維中に含まれる不純物元素の分析法を確立した。		
--	--------------	---	--	--

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

## (2)研究開発の成果と意義

### (2)-1 リサイクル炭素繊維の平均的機械特性の簡易評価手法の開発

#### (2)-1-1 配向炭素繊維束を用いた平均的機械特性評価技術の開発

##### (2)-1-1-1 緒言

新品に比べてばらつきが大きいことが懸念されるリサイクル炭素繊維の力学特性を効率的に評価するための手法として、繊維の束を用いた引張試験を用いることを検討した。リサイクル炭素繊維では、繊維の長さに制約があることも多いため、できるだけ短いゲージ長で精度良い試験を実施するための実験上の課題の解決に取り組んだ。また、繊維束引張試験のデータ解析法を改良し、繊維間の摩擦の影響を考慮することで、より妥当な繊維強度分布を得る手法を開発した。新品の繊維を用いて実験手法を構築し、実際のリサイクル炭素繊維にも適用して、適用可能性の検証を行った。

#### (2)-1-1-2 新品炭素繊維を用いた繊維束の引張試験方法の開発

##### (2)-1-1-2-1 実験

###### ① 材料

試験手法の確立に当たっては、12,000本の繊維からなる新品の炭素繊維束(T700S、東レ)を用いた。新品の炭素繊維束には糸束を収束させるためのサイジング剤が塗布されているが、本開発では繊維配向を乱さないようにするためそのまま用いた。測定系の伸びの補正に関して検討するため、繊維を半分に割いた約6,000本の炭素繊維束も用いた。

炭素繊維束の断面積は、線密度(基準長さあたり質量)を繊維密度で割ることで計算した。線密度は繊維束を30cm切り出し、その重量から計算した。繊維密度はメーカー公表値を用いた。

###### ② 繊維束引張試験片の作製

繊維束の引張試験を適切に実施するには、すべての繊維に同時に荷重を加えること

および繊維束が切断しないように把持することが必要である。これらを実現するため、繊維束引張試験片として、**図 3-2.7.2-1** に示すような両端がタブで固定された試験片を作製した。まず、厚さ 0.5 mm の厚紙を 20 mm × 60 mm と 5 mm × 60 mm にカットして台紙とスペーサーを準備した。続いて、台紙の上にスペーサーを固定して、エポキシ系接着剤(セメダインスーパー、セメダイン)を塗布した。その後、繊維がまっすぐになるよう台紙上に設置して、繊維束の上から接着剤をさらに塗布して台紙で上から蓋をした。タブとタブの間の距離をゲージ長とする。今回、ゲージ長 10 mm、50 mm、100 mm、150 mm のものを作製し、試験に用いた。

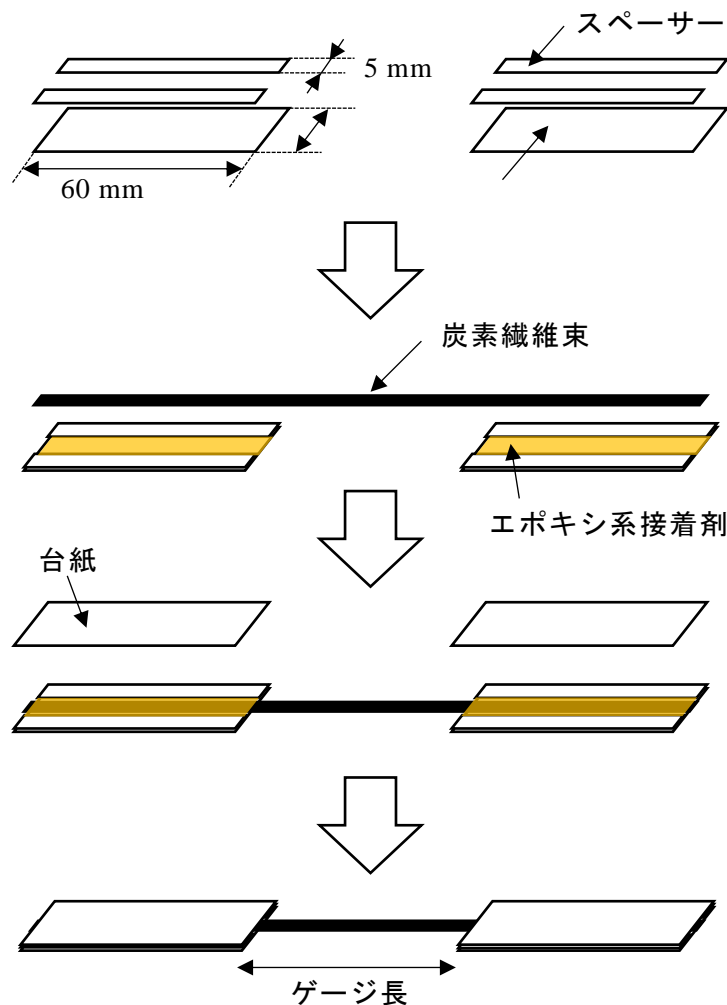


図 3-2.7.2-1 試験片の作製方法

### ③ 繊維束引張試験

繊維束の引張試験は万能試験機(AG-Xplus 10KN、島津製作所)を用いて行った。クロスヘッド速度はゲージ長さに対して 1%/min となるようにした。

引張試験は空気式グリップを取り付けた引張試験機(オートグラフ、島津製作所)を用いて実施した。引張試験機で試験片に加わる荷重を精度良く測定できるのに対して、試験機の表示変位は試験片の伸びに加えて測定系の伸びが加わるため、荷重と比較して精度良く測定できない。そのため、高精度な測定が要求される場面では別途伸

び計等を取り付けて測定することが一般的である。しかし、繊維束の試験片の場合は、繊維束が伸び計のナイフエッジで切断されてしまうため、伸び計の使用はできない。そのため、繊維のひずみを計算するために試験片以外の測定系の伸びを補正する必要がある。測定系の伸びは使用装置によって決まる装置剛性に支配されるだけでなく、つかみ具自体の変形やつかみ具に試験片を把持させた場合の引張軸に対する荷重軸周りの回転や荷重軸のずれも影響する。今回予備実験としてこれらの測定を行い、補正する変位ができるだけ小さくなるように治具の選定、セッティングをした。また、試験片のアラインメントについては、設置する際に下部のタブに重りを吊り下げて糸軸と引張軸とを一致させることで確保した。

#### ④ 単繊維引張試験

紙で作製した台紙に炭素繊維を張り付けることによって図 3-2.7.2-2 に示すようなゲージ長さ 10 mm 単繊維引張試験片を作製した。単繊維引張試験は 10N ロードセルを装着した引張試験機(EZ-SX、島津製作所)を用いて実施した。クロスヘッド速度はゲージ長さに対して 1%/min とした。単繊維の引張試験は 109 本行った。

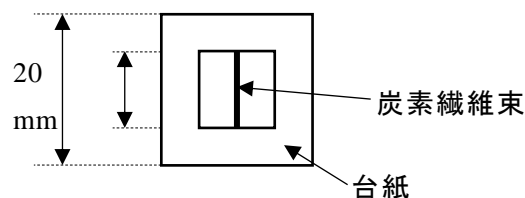


図 3-2.7.2-2 単繊維引張試験片

#### (2)-1-1-2-2 結果

##### ①ゲージ長の異なる引張試験結果

12,000 本の繊維束を用いたゲージ長の異なる引張試験の結果を図 3-2.7.2-3 に示す。各ゲージ長で複数回行った荷重-変位線図の初期の傾きはそれぞれ一致しており、繊維の引き抜け等を起こさずに試験できたことが分かる。また、ゲージ長 10 mm の試験以外については、繊維が徐々に破断する様子が観察され、それに対応して荷重-変位線図も徐々に荷重が減少した。繊維束を構成する繊維の強度は一定値ではなく分布を

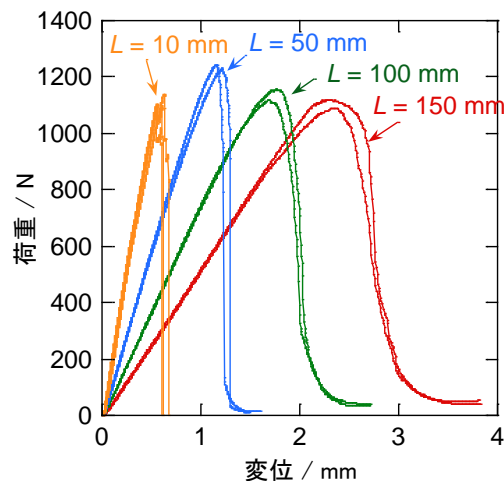


図 3-2.7.2-3 炭素繊維束の応力ひずみ線図

有しているためこのような挙動を示している。また、破断後については繊維間の摩擦によって荷重がゼロにならず残っており、かつ繊維間の摩擦はゲージ長が長いほど大きくなることが分かった。

## ②測定系の伸びの算出

図 3-2.7.2-3 で示した荷重-変位線図から応力-ひずみ線図を得るためには、繊維束のひずみを求める必要がある。試験機で表示される変位は繊維束の変位ではなく、繊維束の変位と測定系の変位の合計である。試験機で表示される変位を  $\Delta L_{total}$ 、繊維束の変位を  $\Delta L_{fiber}$ 、測定系の変位を  $\Delta L_{system}$  とすると以下の式が成り立つ。

$$\Delta L_{total} = \Delta L_{fiber} + \Delta L_{system} = L_{fiber} \frac{P}{SE} + \Delta L_{system} \quad (1)$$

ここで  $L_{fiber}$  はゲージ長、 $P$  は繊維束にかかる荷重、 $S$  は繊維束断面積、 $E$  は繊維束の引張弾性率である。したがって、横軸に  $L_{fiber}$ 、縦軸に  $\Delta L_{total}$  をプロットすると傾きが  $P/SE$ 、切片が  $\Delta L_{system}$  の直線となる。様々な荷重  $P$  に対して  $\Delta L_{system}$  を計算することで、 $\Delta L_{system}$  の荷重  $P$  依存性が得られる。今回、1,200 N まで 50 N 刻みでこのプロットを作成して荷重依存性を評価した。荷重 250 N と 500 N についてプロットした例を図 3-2.7.2-4 に示す。ゲージ長  $L_{fiber}$  に対してグラフは直線になっていることが確認できる。様々な荷重  $P$  に対してこれと同じグラフを作成して、そのグラフの切片から測定系の伸び  $\Delta L_{system}$  の荷重  $P$  依存性を計算した。

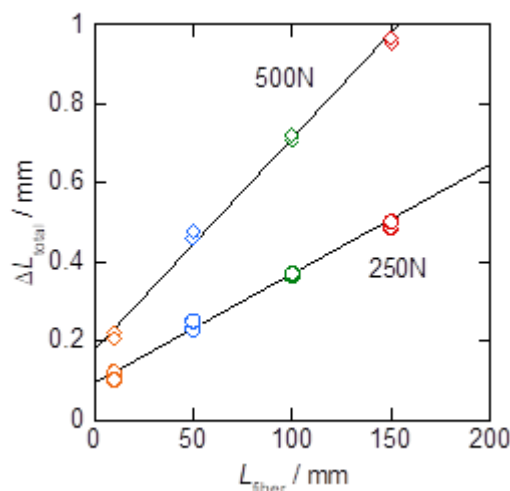


図 3-2.7.2-4 測定の伸びと試験片長さの関係

繊維束引張試験から得られた  $\Delta L_{system}$  の荷重  $P$  依存性を図 3-2.7.2-5 に示す。 $\Delta L_{system}$  は荷重に対して非線形な増加を示した。これは、 $\Delta L_{system}$  の主因がタブ接着に用いた接着剤樹脂の変形によるためであると考えられる。この  $\Delta L_{system}$  を全変位  $\Delta L_{total}$  から差し引くことで、繊維束のみの伸びを得ることができる。

糸の本数が半分の 6,000 本の場合についても同様の計算し、図 3-2.7.2-5 にはその結果も青いプロットで示した。糸の本数が半分になると、同じ荷重時の測定系の伸びが大きくなった。繊維の本数が異なると、繊維束の断面形状（束の厚さと幅）が変わ

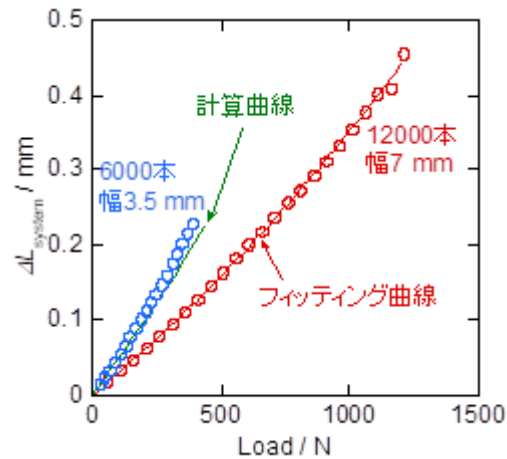


図 3-2.7.2-5 測定系の伸びの荷重依存性

り、タブ接着部の応力状態が変わることが、 $\Delta L_{\text{system}}$  が繊維本数依存性を示す原因と考えられる。繊維束の厚さと幅を考慮した単純な shear-lag 理論によって 12,000 本の繊維束を用いた測定系の変形量から 6,000 本の測定系の変形量の推定を試みた。図 3-2.7.2-5 の緑色の線は、12,000 本の結果をフィッティングした赤いカーブから、6,000 本の場合の測定系の変形量を推定した結果である。若干の差異はあるものの、12,000 本の繊維束の引張試験の結果から 6,000 本の場合の  $\Delta L_{\text{system}}$  をほぼ予測できることが分かった。本手法を用いれば、ある既知の本数の繊維束で測定系の伸びを得ておけば、本数の異なる繊維束の場合の測定系の伸びも推測できる。従って、リサイクル炭素繊維のように、ゲージ長の異なる試験や既定の本数の繊維束を得ることが困難な場合にも、適切なコンプライアンス補正を行うことができる。

### ③繊維引張試験の解析方法の検討

測定系の変位を補正して得られた繊維束のみの変位から算出した応力-ひずみ曲線を図 3-2.7.2-6 に示す。10 mm のゲージ長のものを除き、ひずみが小さい領域でのグラフの傾きはほぼ一致しており、測定系の伸びが適切に除去されていることが分かった。また、ゲージ長が短いほど高い最大応力を示した。これはゲージ長が短いほど繊維中の欠陥存在確率が小さくなるため強度が高くなるという寸法効果の影響があると

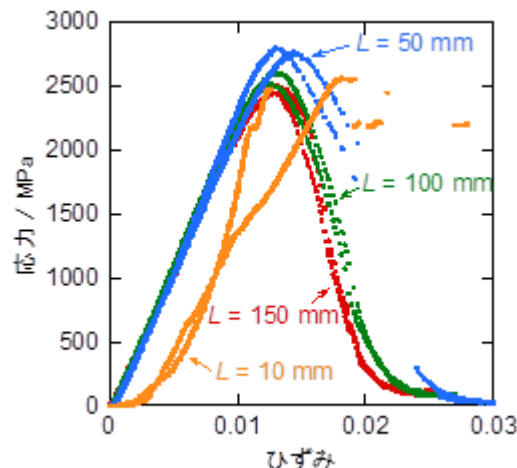


図 3-2.7.2-6 繊維束の応力ひずみ線図



考えられる。一方、ゲージ長が 10 mm のものについては小さなひずみ領域の挙動が乱れており、測定系の伸びが繊維伸びよりも大きく精度よくひずみが評価できなかったことが分かった。

ゲージ長 50mm 以上の応力-ひずみ曲線から繊維の引張強度分布の解析を試みた。炭素繊維はワイブル分布に従う脆性材料であり、一般にその累積強度分布  $F$  は以下のように表現されることが知られている。

$$F = 1 - \exp\left(-\frac{L_{\text{fiber}}}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right) \quad (2)$$

ここで、 $\sigma$  は応力、 $m$  と  $\sigma_0$  はそれぞれワイブルのシェイプパラメーターとスケールパラメーター、 $L_0$  は基準長さで 1m である。この強度分布を有する繊維束をたるみな

く、引っ張った場合の糸束の繊維束の見かけの応力  $\sigma_{\text{bundle}}$  (荷重を初期断面積で除したもの) は以下のように表現できる。

$$\sigma_{\text{bundle}} = E\varepsilon \cdot \exp\left(-\frac{L_{\text{fiber}}}{L_0} \left(\frac{E\varepsilon}{\sigma_0}\right)^m\right) \quad (3)$$

ここで応力  $\sigma$  とひずみ  $\varepsilon$  の関係式  $\sigma = E\varepsilon$  を用いた。図 3-2.7.2-3 で確認したように、現実の引張試験では繊維間に接触が存在するため、破断後の繊維間に摩擦力が生じる。繊維が破断した後に動摩擦力として荷重を伝達すると仮定すると上の式は

$$\sigma_{\text{bundle}} = E\varepsilon \cdot \exp\left(-\frac{L_{\text{fiber}}}{L_0} \left(\frac{E\varepsilon}{\sigma_0}\right)^m\right) + T \left(1 - \exp\left(-\frac{L_{\text{fiber}}}{L_0} \left(\frac{E\varepsilon}{\sigma_0}\right)^m\right)\right) \quad (4)$$

となる。ここで  $T$  は動摩擦力に起因する応力の成分である。

実測したゲージ長 50~150 mm の応力-ひずみ線図を式(4)でフィッティングし、4つのパラメーター  $E$ 、 $m$ 、 $\sigma_0$ 、 $T$  を求めた。一例としてゲージ長 100 mm のデータをフィッティングした結果を図 3-2.7.2-7 に示す。応力-ひずみ線図全体にわたって良好にフィッティング出来ていることがわかる。

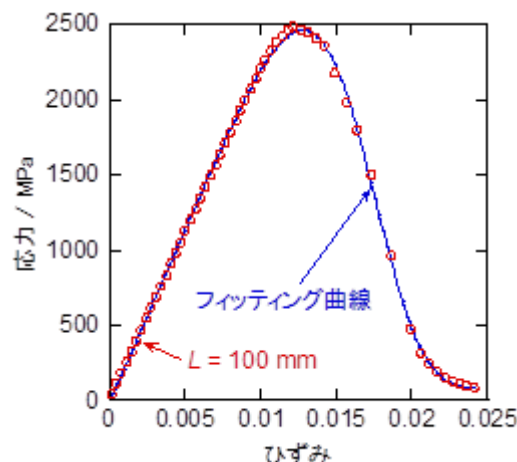


図 3-2.7.2-7 応力-ひずみ線図のフィッティング例

フィッティングによって得られた各パラメーターのゲージ長依存性を図 3-2.7.2-8 に示す。点線は、単繊維引張試験から得られた値である。繊維束引張試験から得られた

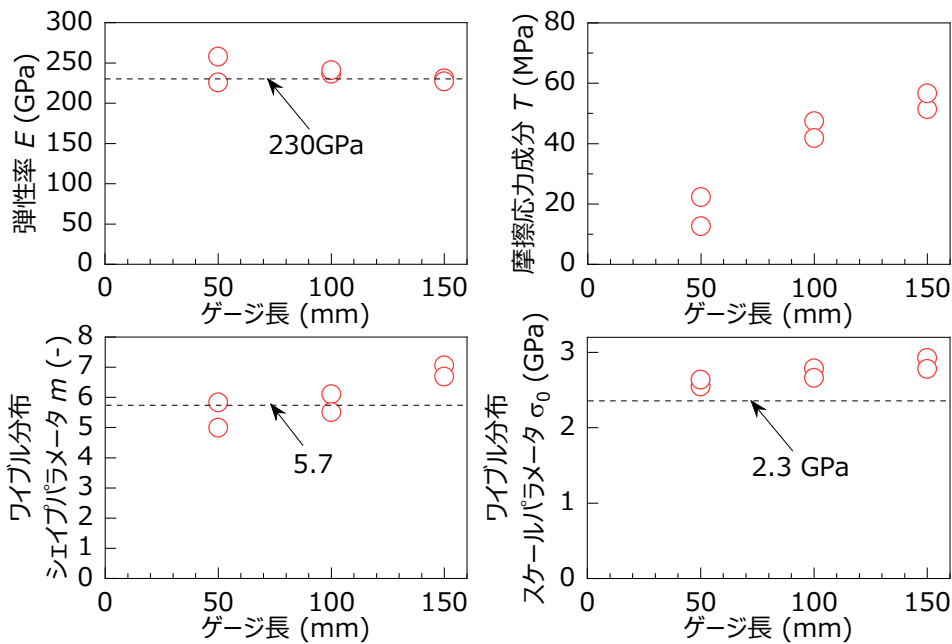


図 3-2.7.2-8 繊維束引張試験で得られた各パラメーターのゲージ長依存性

引張弾性率および繊維強度のワイブルパラメータは単繊維引張試験とほぼ同等の結果を得ることができており、本試験が妥当であることを示している。摩擦応力成分  $T$  はゲージ長が長いほど高い値を示した。接触面積が長いほど動摩擦力が大きくなることを反映していると考えられる。本来であれば、長さに対して正比例の関係を示すはずであるが、完全には直線になっていない。破断後の繊維の密集状態が若干異なっていることが予想される。また、今回は表面状態が同じものを扱っているため、この値自体に大きな意味はないが、リサイクル炭素繊維の評価の際には、表面状態の変化の影響が  $T$  に反映されると予想されるため、表面状態の変化を判定する重要な指標になりうると考えられる。

### (2)-1-1-3 リサイクル炭素繊維を用いた引張試験

#### (2)-1-1-3-1 実験

##### ①材料

長さ 30cm 以上の長いリサイクル炭素繊維(廃材種類不明)の炭素繊維を用いた。

##### ②リサイクル炭素繊維束の作製

糸切れを起こしている部分を櫛で梳かして除去することで、配向の揃った繊維束を作製した。

##### ③繊維束の断面積測定

新品の炭素繊維束の断面積は、線密度（基準長さあたり質量）を繊維密度で割ることで計算するが、リサイクル炭素繊維の場合は繊維の長さが短いため精度良く測定できないという課題がある。そこで、課題番号 42 で新たに開発した評価手法で測定した。材料の厚さを測定する方法として X 線が材料内部を通過する際の透過率を利用す

る方法あり、X線が透過しづらい金属膜の厚さを測定など利用されている。一般に炭素繊維は透過率が高く厚さの測定が難しい。しかし、課題番号 42 ではこの手法を炭素繊維束の透過像に適用し、X線輝度分布補正や透過厚さと透過率の校正曲線を導入することで、炭素繊維束の断面積を高精度な測定を可能にしている。

#### ④樹脂含浸ストランドの作製

②で作製した 30cm のリサイクル炭素繊維束を幅 10mm の金型に入れてエポキシ樹脂を流し込み余分な樹脂をプレスして絞り出すことで樹脂含浸ストランドを作製した。その後、(2)-1-1-2 と同様の方法で試験片にした。

#### ⑤繊維束引張試験

(2)-1-1-2 と同様の方法で繊維束および樹脂含浸ストランドの引張試験を実施した。樹脂含浸ストランドについては自動伸び計(SIE-560A, 島津製作所)を使用して伸びを測定した。

#### (2)-1-1-3-2 結果

##### ①リサイクル炭素繊維の応力ひずみ線図

リサイクル炭素繊維束の応力ひずみ線図を図 3-2.7.2-9 に示す。応力ひずみ線図は荷重が徐々に増加して最大値に達したのち減少する挙動が観察された。詳細にみると引張ひずみが小さいときの傾きが徐々に増加していることが分かる。これは楯で引きそろえた炭素繊維束内部の繊維配向の乱れが若干あることを示唆している。しかし、傾きの増加はそれほど顕著なものではないため、今回は得られた応力ひずみ線図から式(4)の繊維束の引張試験の理論式でフィッティングを行い、引張弾性率やワイブルパラメータを算出した。

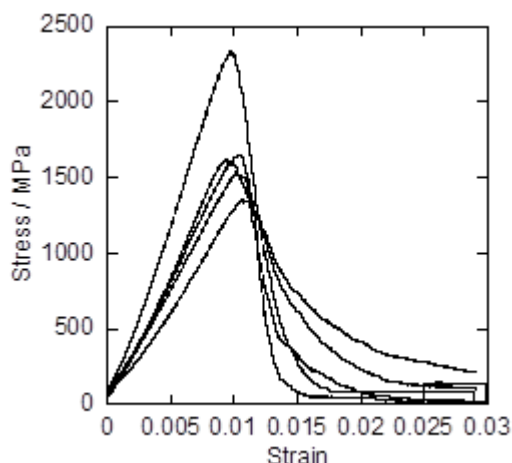


図 3-2.7.2-9 30cm のリサイクル炭素繊維の応力ひずみ線図

フィッティングから 30cm のリサイクル炭素繊維の引張弾性率は  $192 \pm 26 \text{ GPa}$  と市販されている炭素繊維と比較すると低い値であった。試験片作製時にも糸切れが確認されていたことから、この引張弾性率が異なる要因としては炭素繊維自体の劣化ではなく繊維束内部での糸切れが主要な要因として考えられる。したがって繊維束内部に

糸切れがある場合は昨年度開発した手法をそのまま適用すると引張弾性率を小さく評価してしまう課題があることを確認できた。

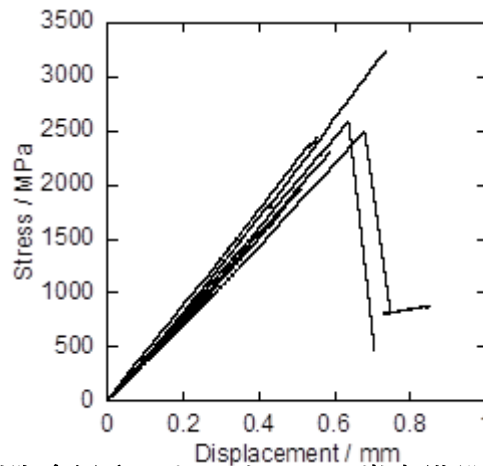


図 3-2.7.2-10 樹脂含浸させたりサイクル炭素繊維の応力ひずみ線図

### ② 樹脂含浸リサイクル炭素繊維の応力ひずみ線図

前述したように繊維束の引張試験において繊維束内部に糸切れがある場合はすべての繊維に荷重伝達できないため引張弾性率が低めに評価される。そのため、例えば、繊維束を樹脂含浸させて、すべての繊維に荷重伝達させることができれば糸切れの影響を見かけ上無くすることができるはずである。30cmのリサイクル炭素繊維を樹脂含浸させた場合の応力ひずみ線図を図 3-2.7.2-10 に示す。ここから求めた繊維の引張弾性率は  $231 \pm 15 \text{ GPa}$  となった。これより樹脂を含浸させたサンプルを用いることで引張弾性率が得られることが分かった。

### ③ 繊維束が切断している場合の解析方法について

繊維束の引張試験において繊維が徐々に破断していく挙動を適切に追跡できているとすると、応力が低い要因は糸切れの断面積に起因する。そのため、糸切れしていない断面積の割合を  $k$  とすると糸切れしている場合の繊維束の引張試験の結果は以下のように表現される

$$\sigma_{\text{bundle}} = E\varepsilon \cdot k \cdot \exp\left(-\frac{L_{\text{fiber}}}{L_0} \left(\frac{E\varepsilon}{\sigma_0}\right)^m\right) + T \left(1 - k \cdot \exp\left(-\frac{L_{\text{fiber}}}{L_0} \left(\frac{E\varepsilon}{\sigma_0}\right)^m\right)\right) \quad (5)$$

これは残存繊維量を表す指数関数項に糸切れしていない繊維の断面積割合  $k$  をかけることで得られる式である。したがって上記の修正式でフィッティングを行うことでパラメーターを算出できる。この修正式を用いて評価した結果を  $(\sigma_0, m) = (1.5 \pm 0.1 (\text{GPa}), 8.8 \pm 2.3)$  となった。

### (2)-1-1-4 まとめ

繊維束の引張試験から平均的機械特性を評価するための試験手法を検討した。繊維の両端にタブを取り付けた試験片を使用することで繊維束をたるみなく同時に引張ることを実現した。繊維ひずみに関しては測定系の変位を補正することで繊維ひずみを

算出した。測定系の伸びに関しては主要な変形部がタブ内の樹脂であることを見出し、繊維量に応じて測定系の変位を計算できる式を計算した。また、破断した繊維が摩擦力に寄与するという仮定のもと、摩擦力を考慮した解析式の提案をし、それに基づいて繊維の強度分布(ワイブルスケールパラメータ)の評価ができることを確認した。

リサイクル炭素繊維束に本手法を適用した結果、引張試験ができることを確認した。その一方で繊維束内での糸切れがある場合に引張弾性率が低めに評価されてしまうことが分かった。この課題を解決するため、樹脂含浸させた繊維束の引張試験から引張弾性率を評価をした。そして、その引張弾性率を用いることで糸切れのある場合の繊維束でも強度分布を評価できる解析式を提案した。本開発により糸切れのあるリサイクル炭素繊維束でも評価可能になった。

## (2)-1-2 配向炭素繊維束複合材料を用いた界面特性評価法の開発

### (2)-1-2-1 緒言

リサイクル炭素繊維の繊維樹脂界面特性は、その後利用する複合材料の物性に大きく影響を及ぼす。繊維樹脂界面特性を評価する方法として、繊維一本を対象とするフラグメンテーション試験やマイクロドロップレット試験といったものが挙げられる。これらの測定法では詳細な解析が可能であるが、評価にかなりの労力と時間を要し、リサイクル炭素繊維で実施するためにはコストがかかりすぎるという課題がある。

複合材料の試験から繊維樹脂界面の平均特性を推定する方法として、90°方向引張試験がある。90°方向に引張破壊を起こさせた場合、繊維樹脂界面強度が弱い場合は繊維樹脂界面から破壊の起点になり樹脂のほうが弱い場合は樹脂が破壊の起点になる。そのため、この試験は繊維樹脂界面強度の見積もる試験として有用である。しかし、リサイクル炭素繊維は不連続であることから大きな試験片の作製が困難な場合がある。そこで本開発では小型引張試験片で繊維樹脂界面引張強度を評価することを検討した。

### (2)-1-2-2 実験

#### ①試験片

試料として、炭素繊維(T700SC 12K、東レ)、エポキシ樹脂(jER827、三菱ケミカル)とエポキシ樹脂硬化剤(ST11、三菱ケミカル)を用いた。不連続のリサイクル炭素繊維を模擬するため、炭素繊維は5 cm程度の長さにカットした。カットした炭素繊維を5cm×5cmの金型の中に方向を揃えて配置し、金型の中央部分にエポキシ樹脂を流し込んだ。できるだけ均一に樹脂を含浸させるため、炭素繊維の配置とエポキシ樹脂の流し込みは数回に分けて行った。その後、金型の蓋をかぶせて、真空中に5分間置いて脱気処理した。最終的にプレス機で圧縮して余分な樹脂を絞り、硬化させることで、厚さ1mmの一軸配向複合材料を作製した。繊維体積分率 $V_f$ は40—70%の範囲で作製した。5 cm×5 cmの板材から、繊維配向に直交する方向に1 cm×5 cmの板材を切り出して試験片を得た。

## ②引張試験

引張試験は楔形の手締めグリップを取り付けた万能引張試験機(AG-Xplus SC10kN、島津製作所)を用い、クロスヘッド速度 0.1 mm/min で行った。試験片端部の破壊およびすべりを防ぐため、試験片は引張試験機のグリップに紙やすりを介して取り付けられた。試験をビデオカメラで撮影し、デジタル画像相関解析ソフト(VIC-2D、Correlated Solutions 社)により、引張試験時の試験部のひずみを解析した。

## ③平均場法による応力分布計算

繊維/樹脂界面の特性を予測するためにマクロな機械特性の理論計算を行った。ここでは、Eshelby の等価介在物理論を用いた。強化繊維の相互作用に関しては、マトリックス領域に生じる平均ひずみを用いて記述する森一田中の平均場理論を適用した。具体的には、これらの理論を組み込んだ複合材料物性値予測ソフトウェア (Digimat MF, MSC Software) を用いて、複合試料の引張特性の理論計算を行った。この手法は線形問題において高い精度を示すことが知られている。また、非線形部分に関しても、接線剛性を考えることにより対応が可能である。今回の計算では炭素繊維の物性は線形弾性体を仮定してカタログ値を用いた。エポキシ樹脂の物性は等方体を仮定して実測値を用いた。繊維長分布は一軸配向とした。Eshelby の等価介在物理論に基づくインクルージョンである繊維の応力は一定値であることが理論的に示さ

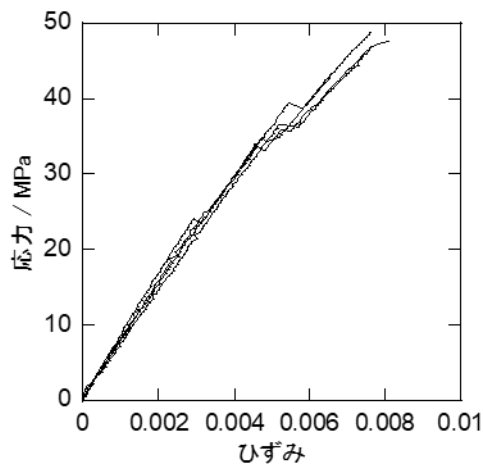


図 3-2.7.2-11 90° 引張試験の応力ひずみ線図(n=4)

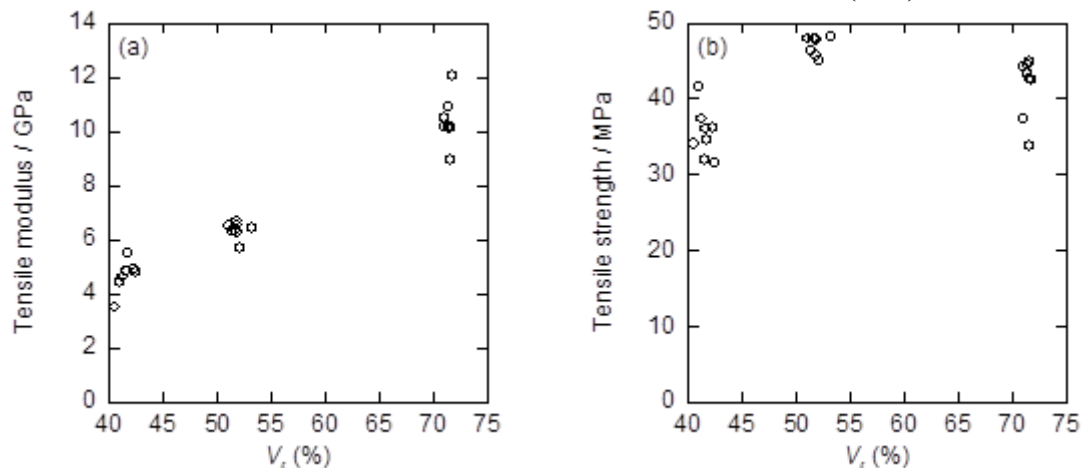


図 3-2.7.2-12 90° 引張試験の(a)引張弾性率および(b)引張強度の繊維体積分率

れている。これは、繊維の中央部も界面近傍も同じ応力であることを示している。そこで、今回界面の剥離を扱うにあたり、界面に破壊規準を設けるのではなく、繊維に破壊規準を設けることで界面の剥離による破壊を再現することにした。

### (2)-1-2-3 結果

#### ① 90° 引張試験の結果

90°引張試験の応力-ひずみ線図を図 3-2.7.2-11 に示す。適切に試料作製および試験を行うことができれば、ばらつきの小さい結果が得られることが確認できた。

続いて繊維体積分率  $V_f$  を変えた場合の引張弾性率と引張強度の結果を図 3-2.7.2-12 に示す。繊維体積分率  $V_f$  が上がると複合材料弾性率も上がった。複合材料引張強度は繊維体積分率  $V_f$  が上がると若干強度が上がる傾向を示した。

#### ③ 数値計算の結果

繊維体積分率  $V_f$ 40%の 90° 方向引張試験の応力ひずみ線図の計算結果を図 3-2.7.2-13 に示す。計算から得られた繊維応力もプロットした。前述したように繊維に応力が集中して高い値を示していることが分かる。このグラフから応力集中係数  $\alpha$  (複合材料応力に対する繊維応力の比) を計算した結果が図 3-2.7.2-14 である。この応力集中係数  $\alpha$  を任意の繊維体積分率  $V_f$  および複合材料応力  $\sigma$  について適用できるようにするため近似式として以下の式を考案した。

$$\alpha = (a \times V_f + b) + f \times \frac{\exp(c(\sigma + d \times V_f + e))}{1 + \exp(c(\sigma + d \times V_f + e))}$$

上式で図 3-2.7.2-14 の結果をフィッティングしたところ、 $a=-0.002925337$ ,  $b=1.167595203$ ,  $c=-0.312790274$ ,  $d=0.280028245$ ,  $e=-59.41695332$ ,  $f=0.113411079$  となった。今回の複合材料の系ではこの値を使用することで応力集中係数  $\alpha$  は 0.7%以下の誤差で近似できる。実験結果から、上式を用いて繊維樹脂界面引張強度を計算した。今回の複合材料の破壊が界面から起きているとすると繊維樹脂界面強度は  $44 \pm 5$  MPa になることが分かった (図 3-2.7.2-15)。

### (2)-1-2-4 まとめ

炭素繊維の繊維樹脂界面引張強度を出す手法として一方向材料を用いた方法を提案した。平均場理論による計算結果から応力集中係数を計算して、さらにその近似式を提案した。その近似式を用いて繊維樹脂界面引張強度を計算した結果  $44 \pm 5$  MPa になることが分かった。リサイクル炭素繊維の繊維樹脂界面引張強度を簡便に評価する一つとして有用な方法といえる。

## (2)-1-3 短繊維配向複合試料を用いた機械特性評価技術の開発

### (2)-1-3-1 緒言

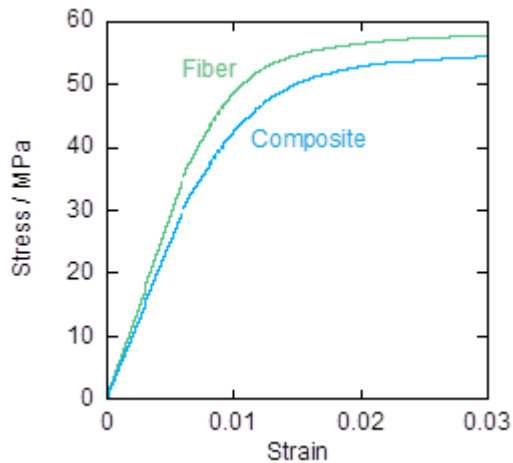


図 3-2.7.2-13 計算で得られた  
応力-ひずみ線図

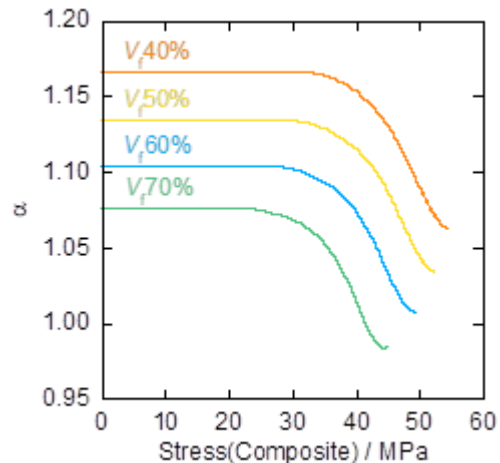


図 3-2.7.2-14 応力集中係数の応力および  
繊維体積分率依存性

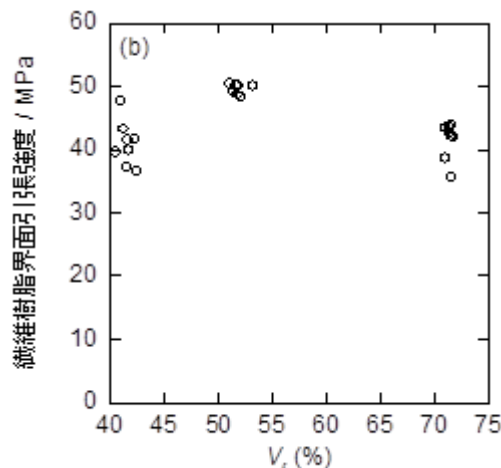


図 3-2.7.2-15 応力集中係数を用いて計算した繊維樹脂界面引張強度

リサイクル炭素繊維が数 mm にも満たない長さにまで短くなっている場合には、これまでに述べたような繊維束として取り扱う評価方法は適用できない。そこで、炭素繊維を熱可塑樹脂と混練し、押し出して繊維を配向させた複合材料を作製し、その複合材料の特性から炭素繊維の物性を抽出することを試みた。

## (2)-1-3-2 実験

### ① 短繊維配向複合試料の作製

粉末状のリサイクル炭素繊維および PA12 を二軸混練押出機(KZW20TW-30MG-NH、テクノベル)で混練後、口径 7mm×2mm の口金から押し出し、角棒状の押出試料を作製した。

### ② 繊維配向の測定

押出試料の表面を鏡面研磨して、内部の炭素繊維の観察画像を取得した。繊維分析装置(FiberShape、IST AG 社)を用いて、押出方向を 0°方向として、内部の繊維配向の分布を評価した。



### ③ 押出試料の引張試験

全長 250mm の押出試料の両端各 50 mm の範囲に紙製タブを取り付けて引張試験片を作製した。タブの間隔は 150mm とした。試料の外観を図 3-2.7.2-16 に示す。引張試験は自動伸び計(SIE-560A、島津製作所)を装着した引張試験機(AGX-plus 100kN、島津製作所製)で引張速度 1mm/min で行った。応力は引張荷重を初期断面積で割って求めた。

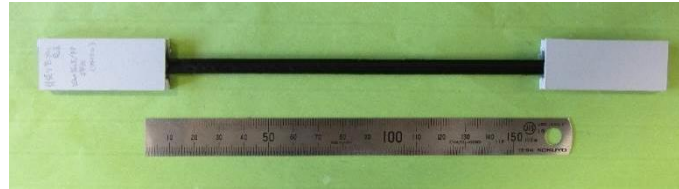


図 3-2.7.2-16 押出試料から作製した引張試験片

### ④ 短繊維配向複合試料の機械特性の理論計算

マクロな機械特性の理論計算を行った。ここでは、Eshelby の等価介在物理論を用いた。強化繊維の相互作用に関しては、マトリックス領域に生じる平均ひずみを用いて記述する森一田中の平均場理論を適用し、さらに配向分布がある場合に拡張した。具体的には、これらの理論を組み込んだ複合材料物性値予測ソフトウェア (Digimat MF, MSC Software) を用いて、複合試料の引張特性の理論計算を行った。この手法は線形問題において高い精度を示すことが知られている。また、非線形部分に関して、接線剛性を考えることにより対応が可能である。今回の計算では炭素繊維の物性は線形弾性体を仮定してカタログ値を用いた。PA12 の物性は実測した応力ひずみ線図を用いた。繊維の配向分布は実測した配向分布から配向テンソルを計算して入力した。配向ベクトルの  $(p_1, p_2, p_3)$  とき、配向テンソル  $\mathbf{a}$  は式(1)のように表現される。

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 p_1 & p_1 p_2 & p_1 p_3 \\ p_2 p_1 & p_2 p_2 & p_2 p_3 \\ p_3 p_1 & p_3 p_2 & p_3 p_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

今回の計算において繊維配向は面内配向を仮定し、 $i$  番目の炭素繊維の押出軸からの角度を  $\theta_i$  とした場合の配向ベクトルを  $(\cos \theta_i, \sin \theta_i, 0)$  と表現した。式(2)を用いてそれらの平均値から配向テンソルを計算した。

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos^2 \theta_i & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sin \theta_i & 0 \\ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos \theta_i \sin \theta_i & \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin^2 \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

今回、押出配向試験片の力学特性を支配する因子のうち特に影響が大きいと思われる引張弾性率、繊維分率、配向テンソル、アスペクト比について基準物性を設定して、その基準から変化させた場合に押出配向試験片の物性がどのように変化するか計算した。引張弾性率、繊維分率、配向テンソルに関しては実際の複合材料から得られた値を参考にして、引張弾性率 230GPa、繊維分率  $V_f=0.20$ 、配向テンソル  $a_{11}=0.80$  を基準物性として採用した。アスペクト比に関しては市販のミルドファイバーのアスペク

ト比を参考に基準を 20 とした。

### (2)-1-3-3 結果

#### ① 繊維配向分布

解析した短繊維配向複合試料の繊維配向分布のヒストグラムを図 3-2.7.2-17 に示す。押出プロセスによって繊維が押出方向に配向し、大半の繊維が $\pm 30^\circ$ の範囲内に配向していることが分かった。今回、この実測値から計算に用いる配向テンソルの基準値 0.8 を決定した。

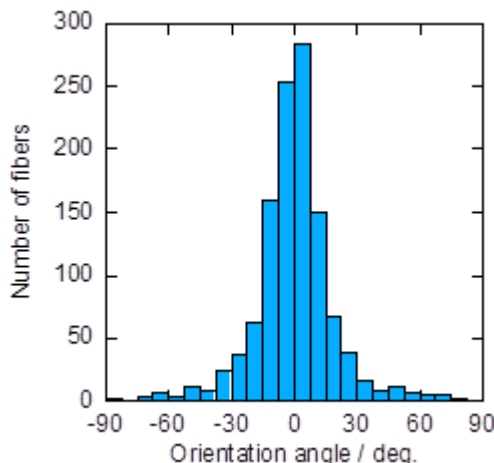


図 3-2.7.2-17 炭素繊維の配向分布

#### ② 等価介在物理論による計算

繊維弾性率、体積分率、アスペクト比、配向テンソルをそれぞれ変化させた場合の短繊維配向複合試料の応力ひずみ線図の計算結果を図 3-2.7.2-18 に示す。繊維弾性率、繊維配向、繊維分率、繊維アスペクト比が高くなると、短繊維配向複合試料の引張弾性率も高くなることが分かる。本計算によって、各因子の影響を定量的に把握することができた。

### (2)-1-3-4 考察

今回の計算結果を用いて短繊維配向複合試料の引張弾性率から繊維弾性率を計算する方法を説明する。図 3-2.7.2-18(b)のひずみの小さい領域の傾きから、短繊維配向複合試料の引張弾性率を計算する。繊維弾性率に対して得られた短繊維配向複合試料の引張弾性率をプロットすることで、短繊維配向複合試料の引張弾性率から繊維弾性率を計算するための校正曲線を作成できる。図 3-2.7.2-19 が実際に得られた校正曲線である。リサイクル炭素繊維を用いた短繊維配向複合試料の実験から得られた応力ひずみ線図を図 3-2.7.2-20 に示す。この結果から短繊維配向複合試料の引張弾性率の実測値として 12GPa が得られており、校正曲線から繊維の引張弾性率を推定すると 200GPa となる。実際の繊維の引張弾性率は 230GPa であり、推定値として妥当な値が得られたと考えられる。

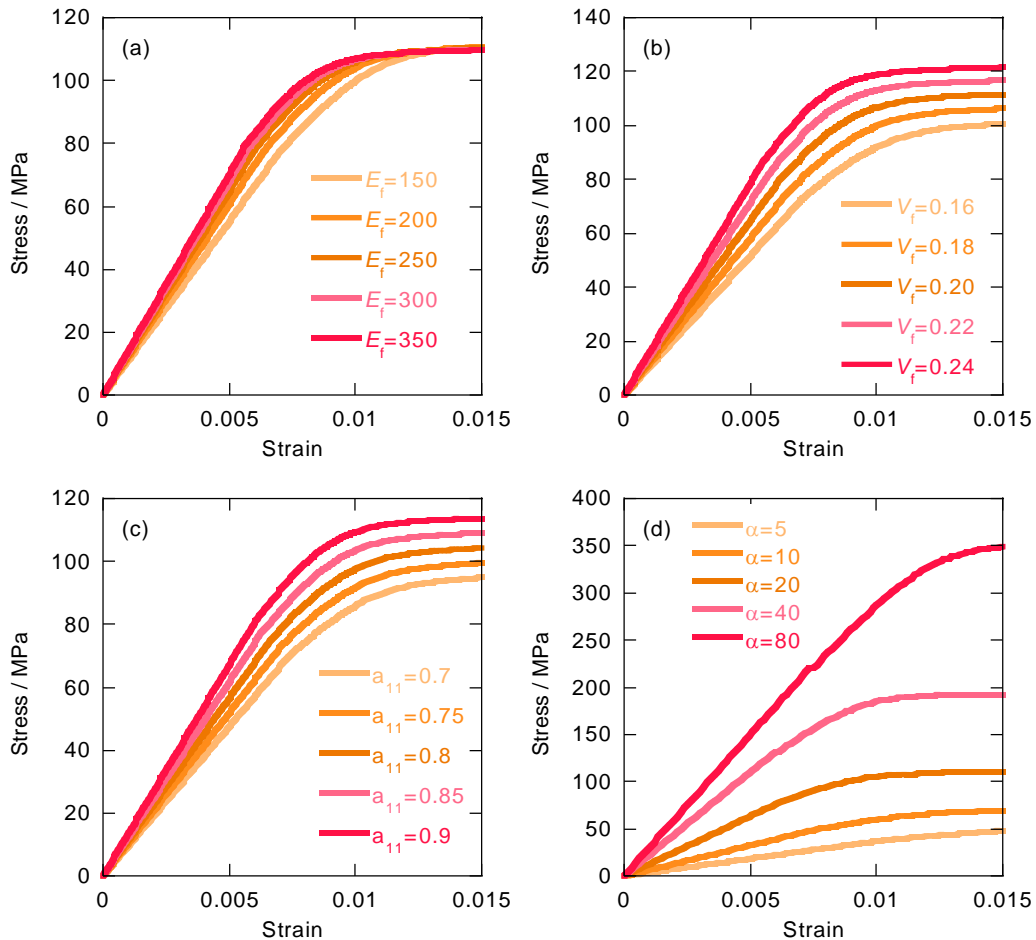


図 3-2.7.2-18 短繊維配向複合試料の応力ひずみ線図の(a)繊維弾性率、(b)繊維分率、(c)配向テンソル、(d)繊維アスペクト比依存性

#### (2)-1-3-5 結論

短繊維配向複合試料から炭素繊維の物性を評価するために短繊維配向複合試料の引張試験および理論計算を実施した。物性値を計算するための繊維配向データが面内配向という仮定をおいて計算して、短繊維配向複合試料の引張試験の結果から炭素繊維の力学特性を評価するための校正曲線を作成した。作成した校正曲線とリサイクル炭素繊維を用いた短繊維配向複合試料の引張弾性率の実測値から繊維の物性値を計算したところ 200GPa となり、実際の弾性率 230GPa にほぼ一致する値を得ることができた。

#### (2)-1-4 まとめ

リサイクル炭素繊維の平均的機械特性を簡便かつ効率的に評価する手法として、3つの手法の開発に取り組んだ。繊維束を用いた引張試験では、一度の試験で数千本程度のリサイクル炭素繊維から弾性率、強度分布、表面状態を効率的に評価する手法として確立した。繊維束に樹脂を含浸させた一方向複合材料の 90° 引張試験では、小型の試験片で精度よく試験を実施し、繊維樹脂界面強度を評価する手法を開発した。繊維束の作製が困難であるような短繊維に関しては、短繊維配向複合試料の引張試験か

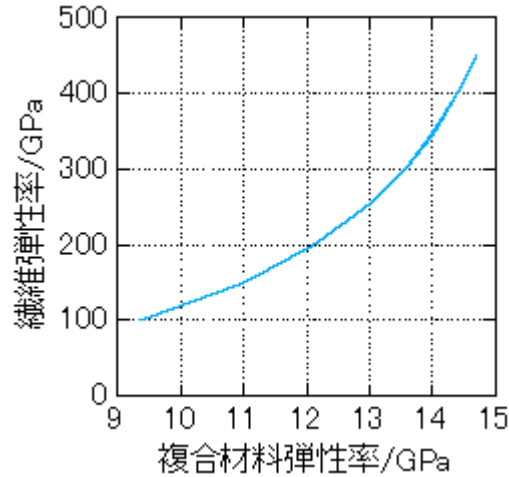


図 3-2.7.2-19 複合材料弾性率から繊維弾性率を求めるための校正曲線

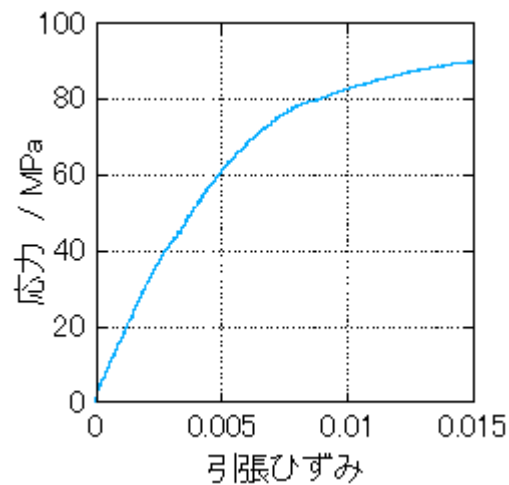


図 3-2.7.2-20 実測データ

ら、繊維弾性率を推定する手法を開発した。

開発した手法を、リサイクル炭素繊維の評価手法として普及させるため、国際規格化に向けた取組を進める。

## (2)-2 リサイクル炭素繊維中の不純物の分析技術の開発

### (2)-2-1 炭素繊維に付着した残留炭素の定量評価技術の開発

#### (2)-2-1-1 緒言

CFRP から炭素繊維を回収する場合、炭素繊維表面の残渣の量や反応性は、マトリックスの種類や熱分解条件によって大きく異なる<sup>1</sup>。炭素残渣、ガラス繊維、金属箔や埃などが混入すると、再生した CFRP の炭素繊維とマトリックスとの密着性が阻害され、物性に大きな影響を与える<sup>2</sup>。また表面を酸化処理すると、残渣の生成が抑制され、物性低下を回避できることが報告されている<sup>3</sup>。

エポキシ樹脂の熱分解に対し、これまでいくつかのモデルを用いて速度論的に解析されてきた<sup>4,5,6</sup>が、CFRP の熱分解に対する解析はほとんど報告されていない<sup>7,8,9</sup>。本研究では、初めにエポキシ樹脂の熱分解に対する試料の形状や雰囲気ガスの影響を検

討した。次に各企業で実際に CFRP から回収された炭素繊維を空气中で加熱し、重量変化からリサイクル炭素繊維に付着した炭素残渣を定量する簡便で高精度な評価技術を開発した。

## (2)-2-1-2 実験

### ①試料

#### ①-1 エポキシ樹脂

エポキシ樹脂の熱分解では、ビスフェノールA樹脂(DGEBA, 三菱化学社製) 33 g に無水メチルヘキサヒドロフタル酸 (MHHPA、日立化成社製) 30 g とN,N-ジメチルベンジルアミン (NDMA、和光純薬工業社製) 1g を混合し、80°Cで2時間、200°Cで2時間硬化させて試料作成した。エポキシ樹脂の元素分析値を表 3-2.7.2-3 に示す。

表 3-2.7.2-3 エポキシ樹脂の元素分析値

C	H	N	O <sub>a</sub>
68.7	7.2	0.2	23.9

#### ①-2 炭素繊維

炭素繊維としては、航空機等に広く使用されている炭素繊維 T800SC-24K-10E (東レ社製) および T800 に未重合のエポキシ樹脂を塗布して製造したプリプレグ (トレカプリプレグ (P2255S-15)) を 130°Cで2時間硬化させた CFRP を用いた。また CFRP



炭素繊維 T800SC-24K-10E



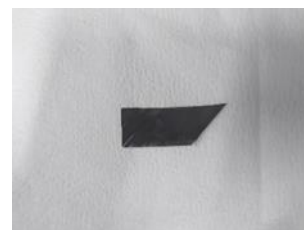
プリプレグ P2255S-15



試料1 1次加熱品



試料2 2次加熱品



試料3



試料4



試料5



試料6 ピッチ系繊維

図 3-2.7.2-21 実験に使用した試料

から回収された炭素繊維試料としては、各会社から提供された試料を使用した。試料 1、試料 2、試料 4、試料 5 は、A 社の 1 次加熱品、2 次加熱品、および B 社、C 社から提供された試料である。試料 3 は、実際の航空廃材を当研究室において窒素雰囲気中 500℃で 1 時間乾留して生成した。また試料 6 は、D 社から提供された炭素質繊維である（図 3-2.7.2-21）。

各試料を 1000 倍に拡大した SEM 写真を図 3-2.7.2-22 に示す。CFRP から回収された炭素繊維にはマトリック由来の炭素残渣が炭素繊維周辺に多く残留していることが明らかである。一方、2 次加熱品には炭素残渣はほとんど確認されず、2 度の熱分解で残渣がよく除去されていることが明らかである。各試料の元素分析値（表 3-2.7.2-4）から、炭素含有率は 94～96%であった。一方、ピッチから製造された炭素質繊維（試料 6）の炭素組成は 91%程度で、水素や酸素が多く含まれており、他の炭素繊維とは組成が大きく異なることが明らかである。

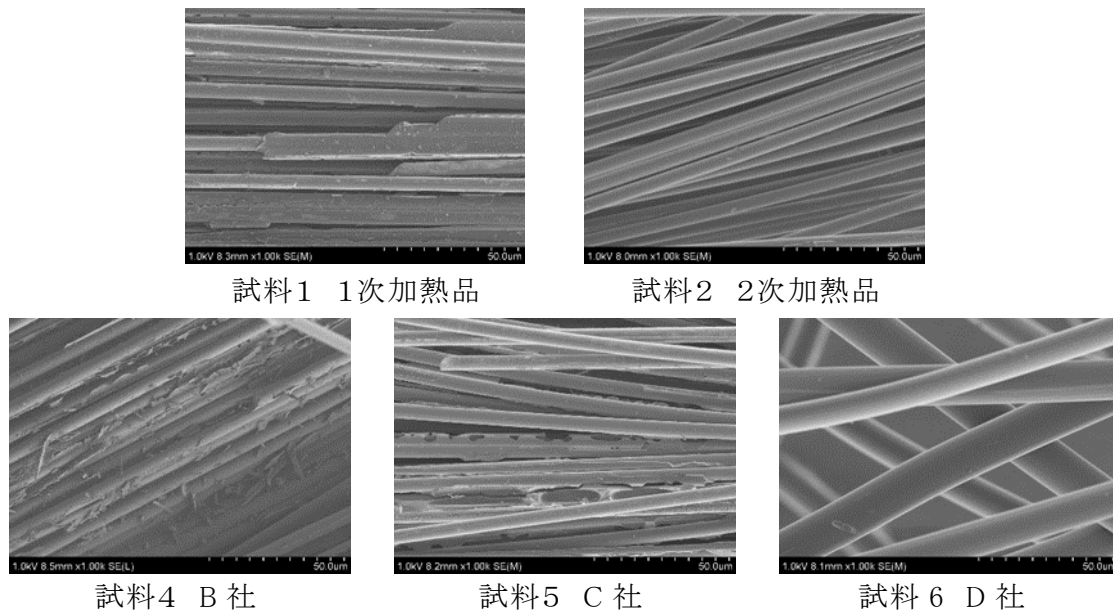


図 3-2.7.2-22 実験に使用したリサイクル炭素繊維の SEM 写真

表 3-2.7.2-4 炭素繊維の元素分析値

試料 No.	試料名	C	H	N	S	O	H/C	O/C
1	A 社 1 次加熱品	93.70	0.49	1.06	0.00	4.75	0.062	0.038
2	A 社 2 次加熱品	96.10	0.22	0.49	0.00	3.19	0.027	0.025
3	自作	95.70	0.41	0.00	0.00	3.89	0.051	0.030
4	B 社	94.40	0.57	0.93	0.07	4.03	0.072	0.032
5	C 社	95.10	0.31	0.98	0.07	3.54	0.039	0.028
6	D 社	90.90	1.19	1.16	0.30	6.45	0.156	0.053

## ② 実験装置および手順

産業技術総合研究所での実験では、空気あるいは酸素と窒素の混合ガス(酸素濃度 0, 5, 10 %) を  $200 \text{ cm}^3/\text{min}$  の流量で流し、試料  $5 \text{ mg}$  を熱天秤 (リガク社製 TG 8120) で  $2.5, 5, 10, 20^\circ\text{C}/\text{min}$  の昇温速度で  $800^\circ\text{C}$  まで加熱し、重量変化を測定した。また試料  $1 \text{ g}$  を石英製反応器 (長さ  $600 \text{ mm}$ , 内径  $30 \text{ mm}$ ) に入れ、空気あるいは窒素を  $100 \text{ cm}^3/\text{min}$  で流しながら室温から  $800^\circ\text{C}$  まで  $5\sim 10^\circ\text{C}/\text{min}$  で昇温し熱分解した。凝縮性生成物は氷/水冷却トラップに回収し、ガス状生成物はモレキュラーシーブ 5A とポラパック Q の 2 本のカラムを備えたガスクロマトグラフ (Varian 社製 CP-4900) で

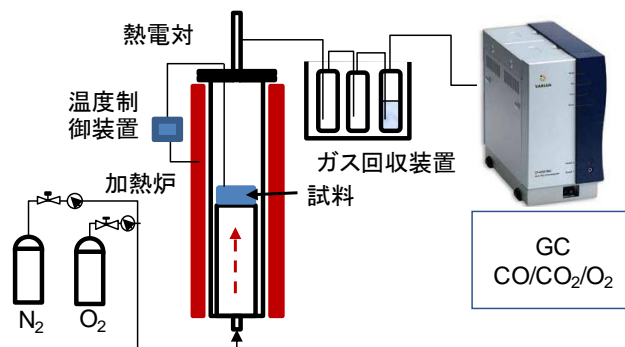


図 3-2.7.2-23 実験装置 (産業技術総合研究所)

2 分毎に採取し分析した (図 3-2.7.2-23)。

早稲田大学での実験では、昇温時における試料の重量変化を測定するため、熱天秤 (リガク、TG8121)、を用いて空気あるいは窒素を  $30 \text{ cm}^3/\text{min}$  で流しながら、試料  $5 \text{ mg}$  を昇温速度  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  で  $900^\circ\text{C}$  まで加熱した。また一定温度での試料の酸化速度を測定するため、試料  $5 \text{ mg}$  を  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  で所定温度まで昇温した後、6 時間保持した。

炭素残渣および炭素繊維の酸化反応では、二酸化炭素および一酸化炭素が主に生成する。各反応温度でのガス生成物の生成速度を測定するため、試料  $0.1\sim 0.2 \text{ g}$  を石英製反応器 (長さ  $600 \text{ mm}$ , 内径  $30 \text{ mm}$ ) に入れ、空気を  $30 \text{ cm}^3/\text{min}$  で流しながら室温から  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  で所定の温度まで昇温した後に  $4\sim 6$  時間保持した。反応器から流出するガスをいったん氷温で冷却したトラップを介した後、 $1 \text{ ml}$  のガス用マイクロシリンダで約 5 分毎に採取した。また全ガス生成物を定量するため、反応器出口に  $20 \text{ L}$  のテドラーバックをつなげ、反応後に収集ガスの組成と体積を測定した。ガス状生成物の分析には、SHINCARBON-ST (50/80,  $2.0\text{m}\times 3.0 \phi$ ) カラムを備えたガスクロマトグラフ (TCD、SHIMAZU-8A) を用いた (図 3-2.7.2-24)。

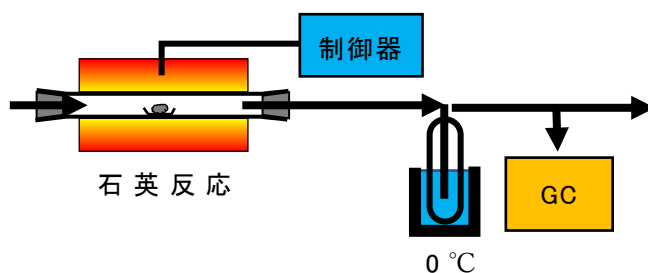


図 3-2.7.2-24 実験装置の概要

## (2)-2-1-3 結果と考察

### (2)-2-1-3-1 炭素繊維および CFRP の加熱

テトラヒドロフラン (THF) で表面のサイジング剤を除去した炭素繊維 (T800) およびプレプリグを加熱成形した製造した CFRP を窒素または空気雰囲気中 10°C/min で加熱した際の試料の重量変化を図 3-2.7.2-25 に示す。炭素繊維の重量は窒素中 1000°C まで昇温してもほとんど一定で、分解反応による重量減少は観測されなかった。一方、炭素繊維を空气中で加熱すると 600°C 付近から酸化反応による重量減少が観測され、900°C 付近で全て酸化分解した。550°C で昇温を止め回収した炭素繊維表面には、酸化分解によるとみられる多くの窪みが観察された (図 3-2.7.2-26)。CFRP を窒素中で加熱すると 300°C 以上でエポキシ樹脂の熱分解が始まり、450°C に達するまでに大部分の分解反応は完了し、エポキシ樹脂重量の 10%~20% に相当する残渣が炭素繊維表面に残留した。CFRP を空气中で加熱すると、300°C 付近でエポキシ樹脂の熱分解が始まり、400°C 以上で残渣が酸素を取り込む酸化反応が起こり、500°C 以上で残渣が酸化分解し、600°C 以上では炭素繊維の酸化分解に由来する急激な重量減少が観測された。

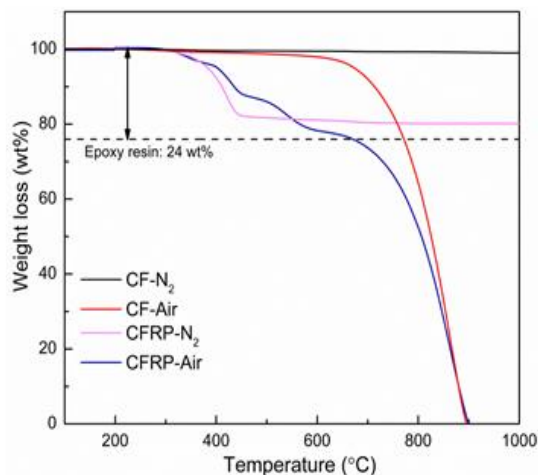


図 3-2.7.2-25 炭素繊維および CFRP の重量減少

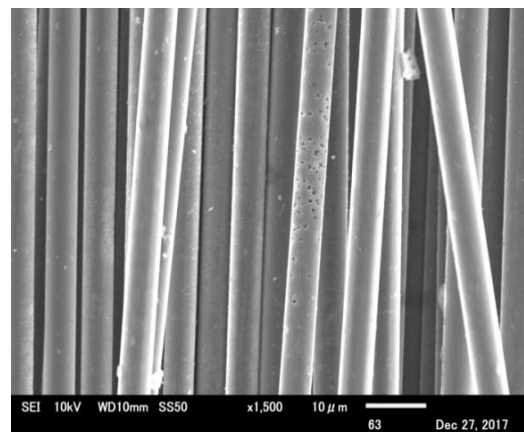


図 3-2.7.2-26 酸素中 550°C で処理した炭素繊維

### (2)-2-1-3-2 プレプリグから製造した CFRP の熱分解で生成する残渣の熱分解

プレプリグから製造した CFRP を窒素雰囲気中で加熱した場合に生成する残渣の酸化分解反応性を詳細に検討するため、CFRP を空気雰囲気下 5, 10, 15, 20, 25°C/min で昇温した場合の試料の重量変化を図 3-2.7.2-27 に示す。試料の重量変化から、CFRP の分解は(1)304-393°C, (2)393-479°C, (3)479-654°C, (4)654-952°C の 4 段階で進行していると考えられる。熱天秤において異なる昇温速度で加熱した場合、活性化エネルギー ( $E_{\alpha}$ ) は(1)式から表せることが知られており、本研究でも  $\ln(\beta)$  と  $1/T_{\alpha}$  との関係が直線関係になることを確認し、その傾きから各反応の活性化エネルギーを(1) 93.8 kJ/mol, (2) 132.7 kJ/mol, (3) 64.5 kJ/mol, 85.3 kJ/mol と算出した (図 3-2.7.2-28)。

$$\frac{\beta}{T_{\alpha}^2} = \ln \left[ \frac{AE_{\alpha}}{RC(\alpha)} \right] - \frac{E_{\alpha}}{RT_{\alpha}} \quad (1)$$



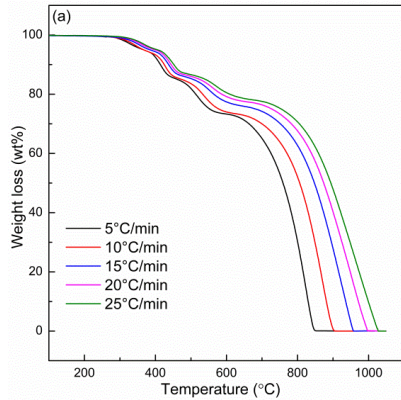


図 3-2.7.2-27 昇温速度を変化させた場合のエポキシ樹脂残渣の重量変化

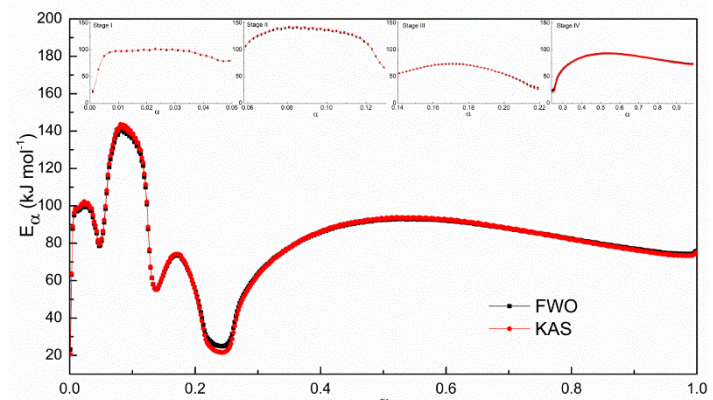


図 3-2.7.2-28 各反応の活性化エネルギー (α: 転化率)

サイジング剤を除去した炭素繊維を窒素中で所定の温度まで昇温し、温度を一定に保持した後に空気に切り替えた際に生成した二酸化炭素を GC で観測した際に得られたピーク面積の時間変化を図 3-2.7.2-29 に、そのアレニウスプロットを図 3-2.7.2-30 に示す。反応温度が高くなるに従って二酸化炭素の生成量は増加し、試料が消費されると急速に減少した。観測された二酸化炭素の面積は生成速度と比例しており、アレニウスプロットの傾きから活性化エネルギーは 86 kJ/mol と求められた。CFRP の 4 ステップ目の反応の活性化エネルギーは、700°C 以上で二酸化炭素の生成速度から求められた炭素繊維の酸化反応の活性化エネルギーと良く一致した。

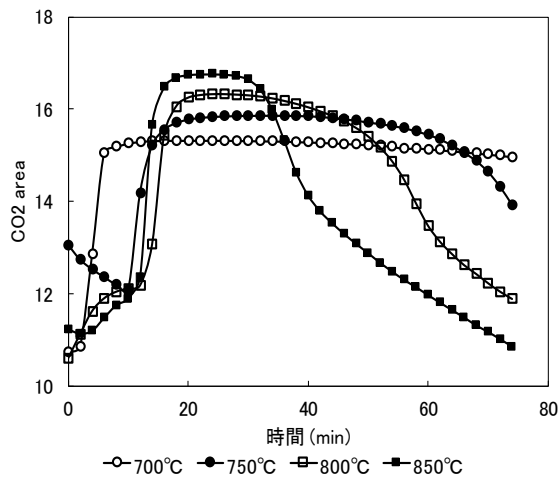


図 3-2.7.2-29 炭素繊維を空气中で熱分解した場合に生成した二酸化炭素

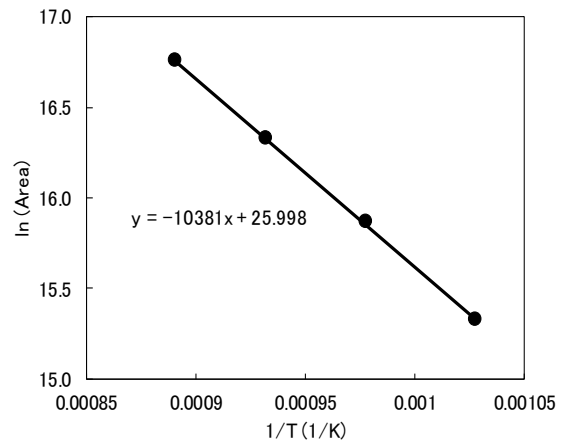


図 3-2.7.2-30 二酸化炭素の生成速度から観測された炭素繊維の酸化反応の活性化エネルギー

### (2)-2-1-3-3 エポキシ樹脂の熱分解における雰囲気ガスの影響

エポキシ樹脂の熱分解では、雰囲気中の酸素が樹脂の熱分解や中間体の酸化反応を加速するため、粒径が小さく、雰囲気中の酸素濃度が高くなるに従って初期分解反応や中間体および残渣の酸化分解反応を促進させた。エポキシ樹脂を窒素中および空气中で 10°C/min で昇温させた際に観測されたガス生成物を図 3-2.7.2-31 および図 3-

2.7.2-32 に示す。窒素中の熱分解では、400～600℃の温度域でエステル結合やメチル基の熱分解に由来する二酸化炭素や一酸化炭素およびメタンが、550℃以上で残渣の縮重合に由来する水素が主に生成した。空気雰囲気中では 300～500℃付近でメタンや一酸化炭素が生成し、酸素によってメチル基の脱離やエステル結合の酸化分解が促進されていることが明らかである。

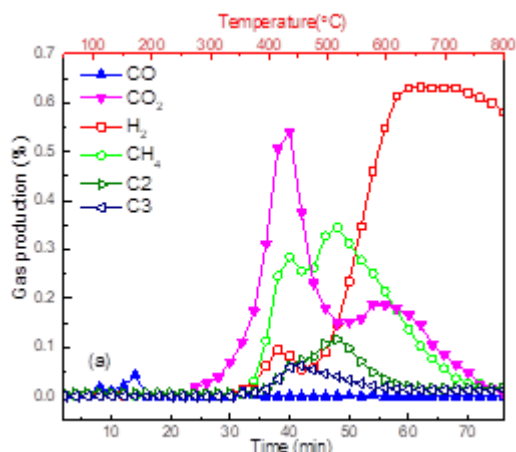


図 3-2.7.2-31 窒素中でエポキシ樹脂を熱分解した際に観測されたガス生成物

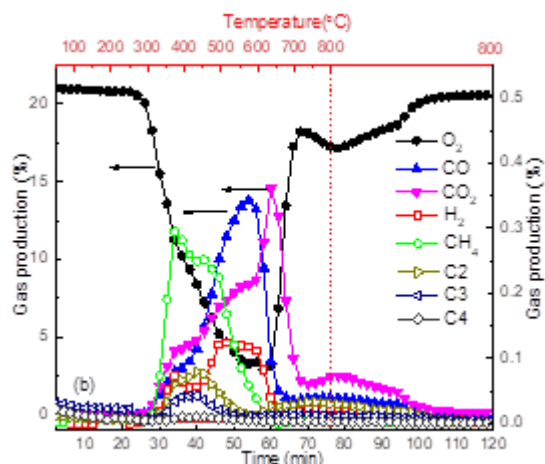


図 3-2.7.2-32 空気中でエポキシ樹脂を熱分解した際に観測されたガス生成物

#### (2)-2-1-3-4 CFRP から回収された炭素繊維の重量変化

試料 1（一次加熱品）を空気雰囲気中 5℃/min で昇温させた場合の試料重量の減少割合と減少速度を図 3-2.7.2-33 に示す。試料重量の減少速度は 500℃および 800℃で極大値を示し、前者は残渣の酸化反応、後者は炭素繊維の酸化反応と考えられ、残渣と炭素繊維の反応性は大きく異なり、それぞれを区別して定量できることが示唆された。

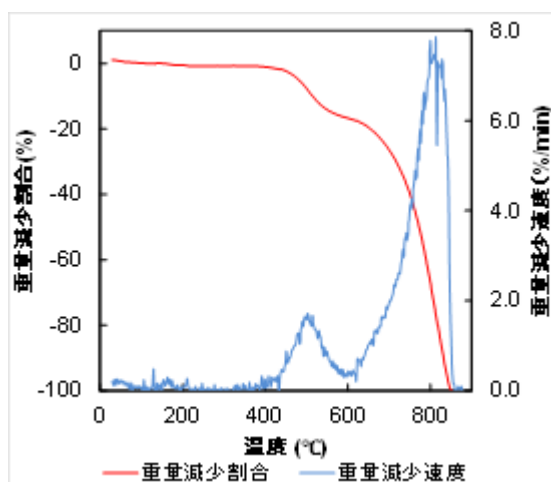


図 3-2.7.2-33 試料 1（一次処理品）の重量変化

### (2)-2-1-3-5 CFRP から回収された炭素繊維のバラツキ

各試料をそれぞれ 10 個取り出し、空気を 30 ml/min 流しながら 10°C/min で加熱した場合に観測された試料重量の微分値を図 3-2.7.2-34 に示す。試料 1～4 において 520°C 付近および 820°C 付近に観測される重量変化は、それぞれ炭素繊維表面に残った炭素残渣および炭素繊維の酸化によるものと考えられる。炭素残渣の酸化反応速度が最大となる温度は試料に依存せずほぼ一定であり、残渣の酸化反応性はマトリックの種類に依存しないと考えられる。一方、変化量のバラツキは非常に大きく、炭素繊維に付着している炭素残渣の付着量が不均一であることが示唆された。炭素繊維の酸化反応が最大となる温度は、試料の種類や個体によって大きく異なり、バラツキも非常に大きい。これらの結果から、回収された炭素繊維の品質には大きなバラツキがあることが推定される。試料 6（炭素質繊維）は他のリサイクル炭素繊維とは全く異なり、600°C 付近で炭素繊維の酸化反応による重量減少が観測された。

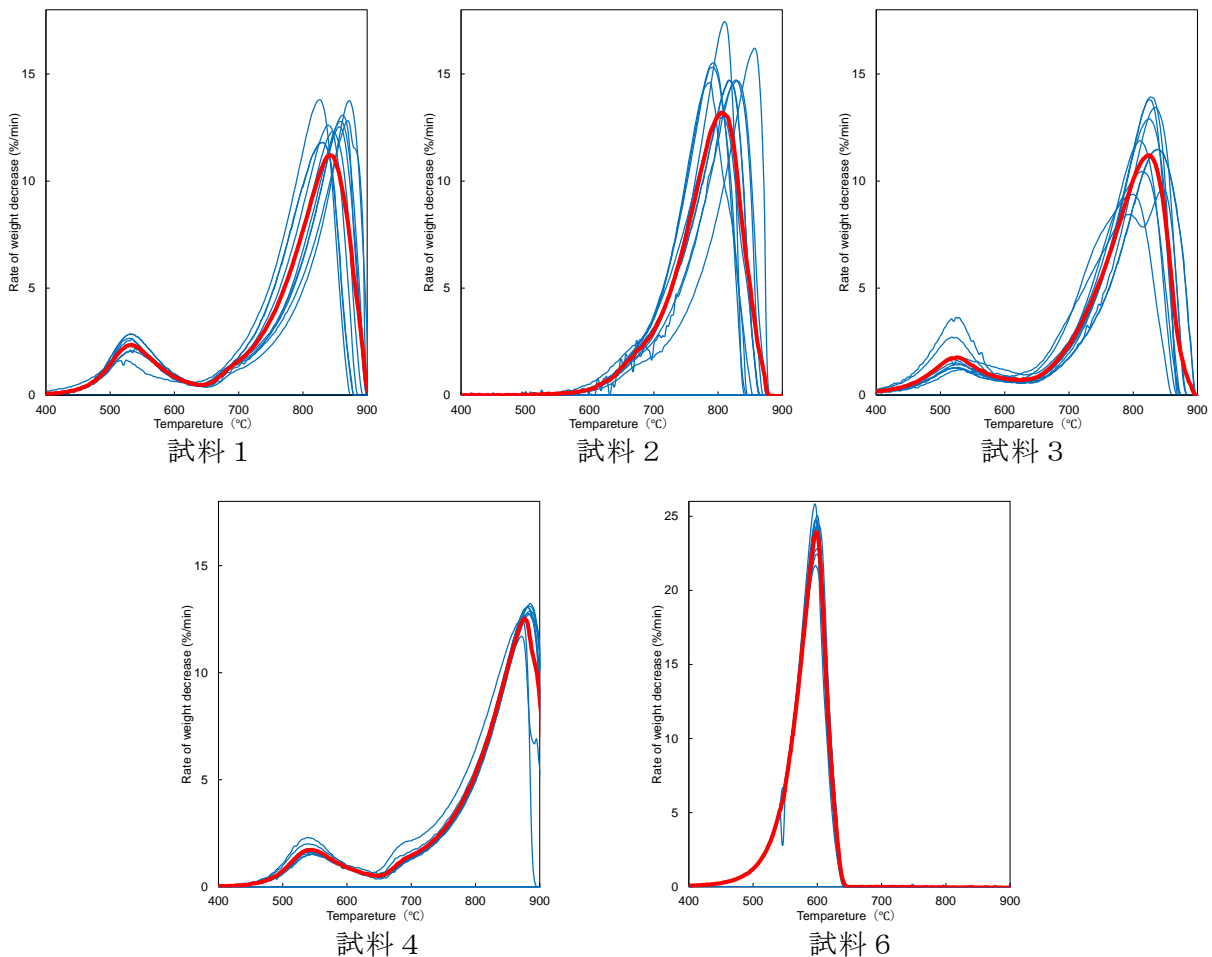


図 3-2.7.2-34 各試料を空气中 10°C/min で昇温した際の重量の微分値(赤線:平均)

(2)-2-1-3-6 CFRP から回収された炭素繊維の酸化における重量変化

試料 1（1次加熱品）を空気 30 ml/min で流しながら 360～600℃の所定の温度まで加熱し、その後一定に保持した場合（図 3-2.7.2-35）、反応初期試料重量が増加する現象が観測された。窒素中ではこのような試料重量の増加が認められないことから、炭素表面に残留している残渣が酸化されたために重量が増加したと考えられる。転化率 (X) の対数値 ( $\ln(1-X)$ ) は、390℃までは加熱時間に対してほぼ直線的に減少し、反応温度が高くなるに従って傾きは大きくなり、酸化反応速度は温度が高くなるに従って促進されていることが明らかである。400℃～460℃では、曲線の傾きは反応時間が経過すると緩くなり、残渣の酸化反応から炭素繊維の酸化反応へ移行していることが示唆される。460℃以上では直線の傾きは反応温度が高くなるに従って増加し、炭素繊維の酸化反応が高温において促進されていることが明らかである。また反応時間が長くなると酸化反応速度（曲線の傾き）が大きくなることから、炭素繊維内部は外表面よりも酸化し易い傾向にあると考えられる。

試料 2 を空気中 450～550℃で保持した場合（図 3-2.7.2-36）、460℃までは炭素残渣に起因する重量減少はほとんど観測されなかった。460℃以上では、炭素繊維の酸化による重量減少が観測された。転化率の対数値 ( $\ln(1-X)$ ) は反応時間と共に直線的に減少し、その傾きは反応温度が高くなるに従って増加した。

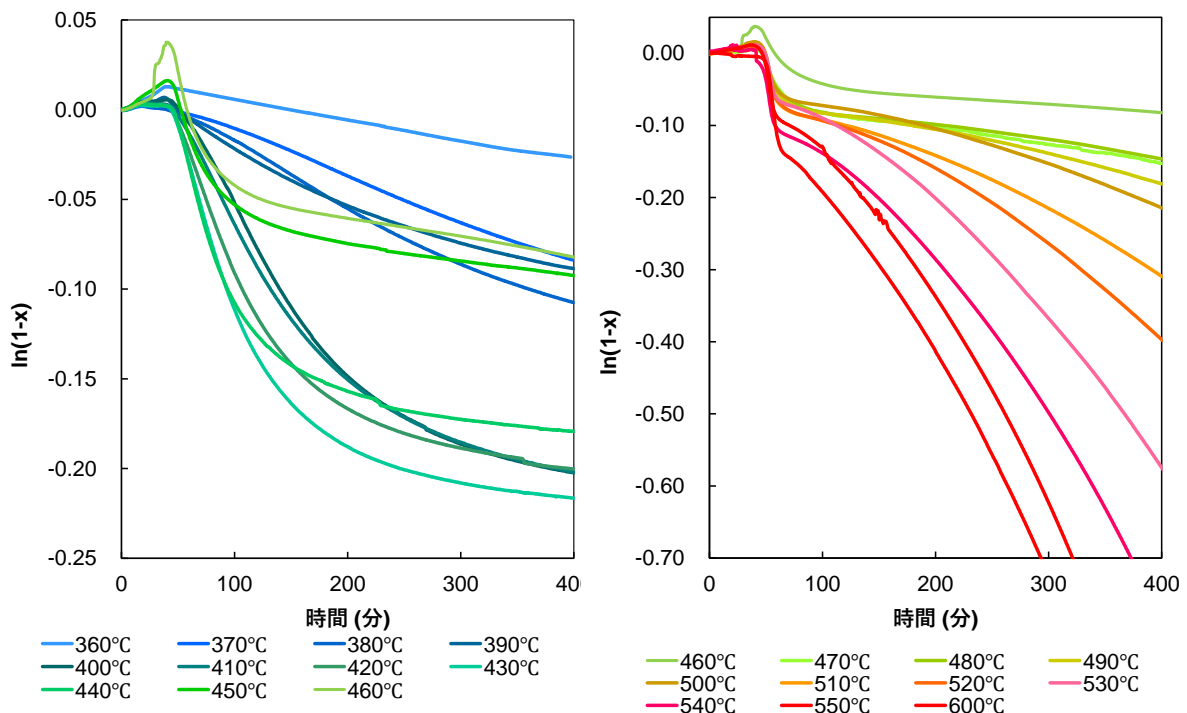


図 3-2.7.2-35 試料 1 を空気中で加熱した場合の重量変化

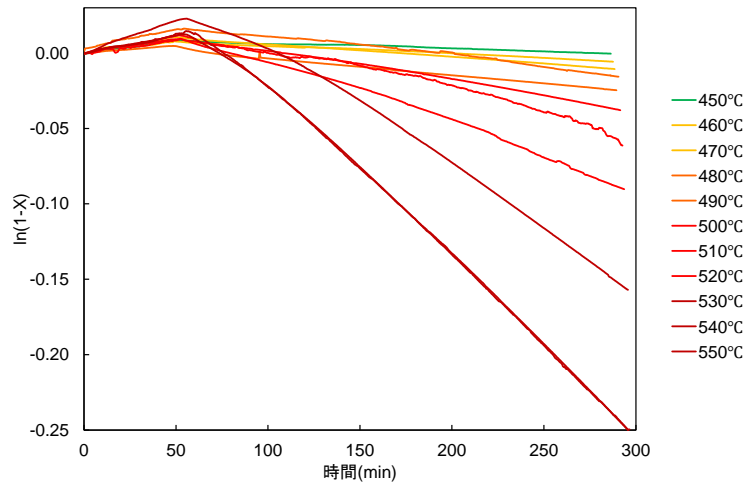


図 3-2.7.2-36 試料2を空气中で加熱した場合の重量変化

各試料を空气中 300～550℃で保持した場合（図 3-2.7.2-37～39）、460℃以下では固体炭素の酸化によって、それ以上の高温では炭素繊維の酸化によって重量減少が観測され、転化率の対数値は加熱時間に対して直線的に減少した。試料 6 は他の試料とは全く異なり、固体残渣による重量減少は観測されず、400℃以上で炭素繊維の酸化反応による重量減少が観測された（図 3-2.7.2-40）。

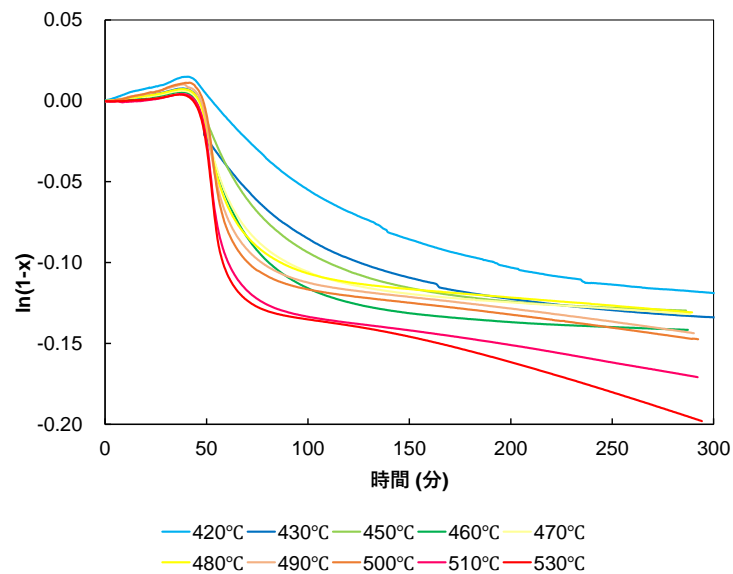


図 3-2.7.2-37 試料3を空气中で加熱した場合の重量変化

固体炭素および炭素繊維の酸化反応はそれぞれ擬一次反応と仮定することができるので、直線の傾きから各温度における反応速度（k）を算出した。各試料のアレニウスプロットを図 3-2.7.2-41 に示す。試料 1、試料 2、試料 3、試料 4、試料 5 を空气中で酸化させた場合、反応初期（50 分）では炭素残渣の酸化反応が、一方 250 分以降では炭素繊維の酸化反応が主に観測された。

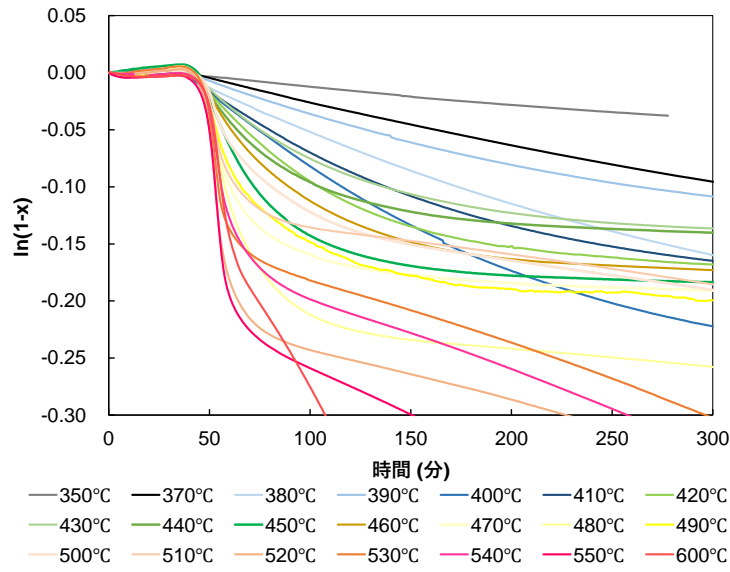


図 3-2.7.2-38 試料4を空气中で加熱した場合の重量変化

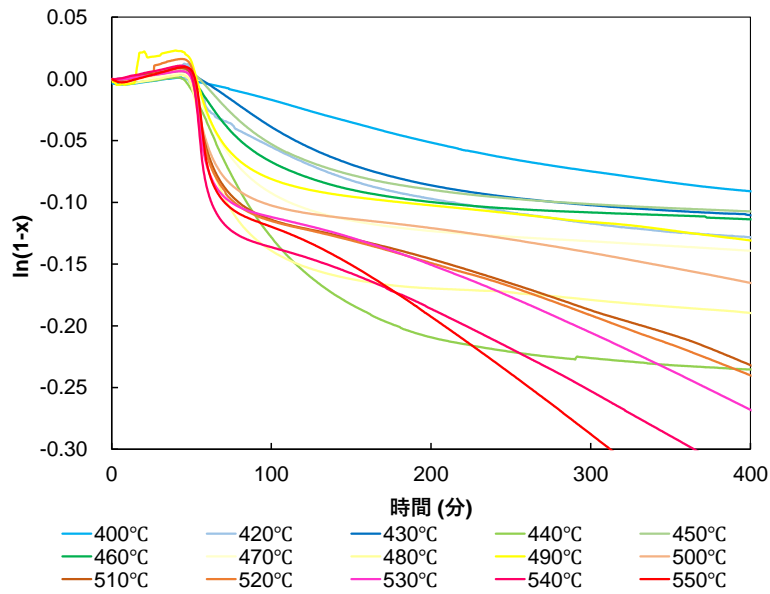


図 3-2.7.2-39 試料5を空气中で加熱した場合の重量変化

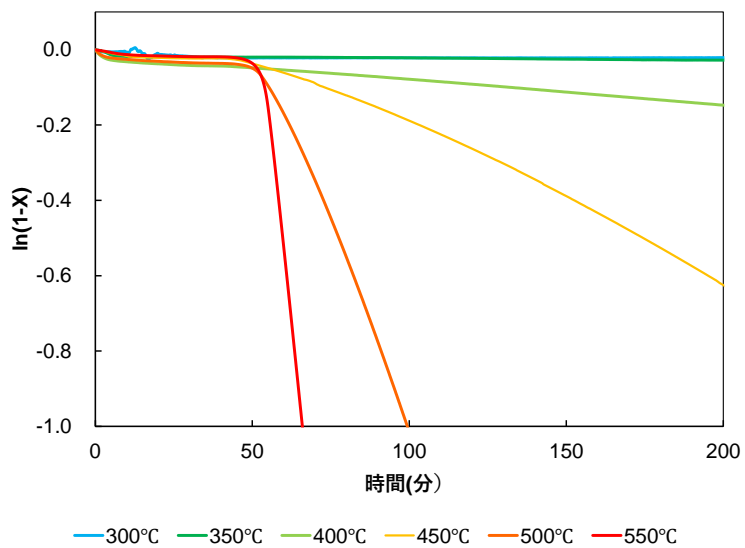


図 3-2.7.2-40 試料6を空气中で加熱した場合の重量変化

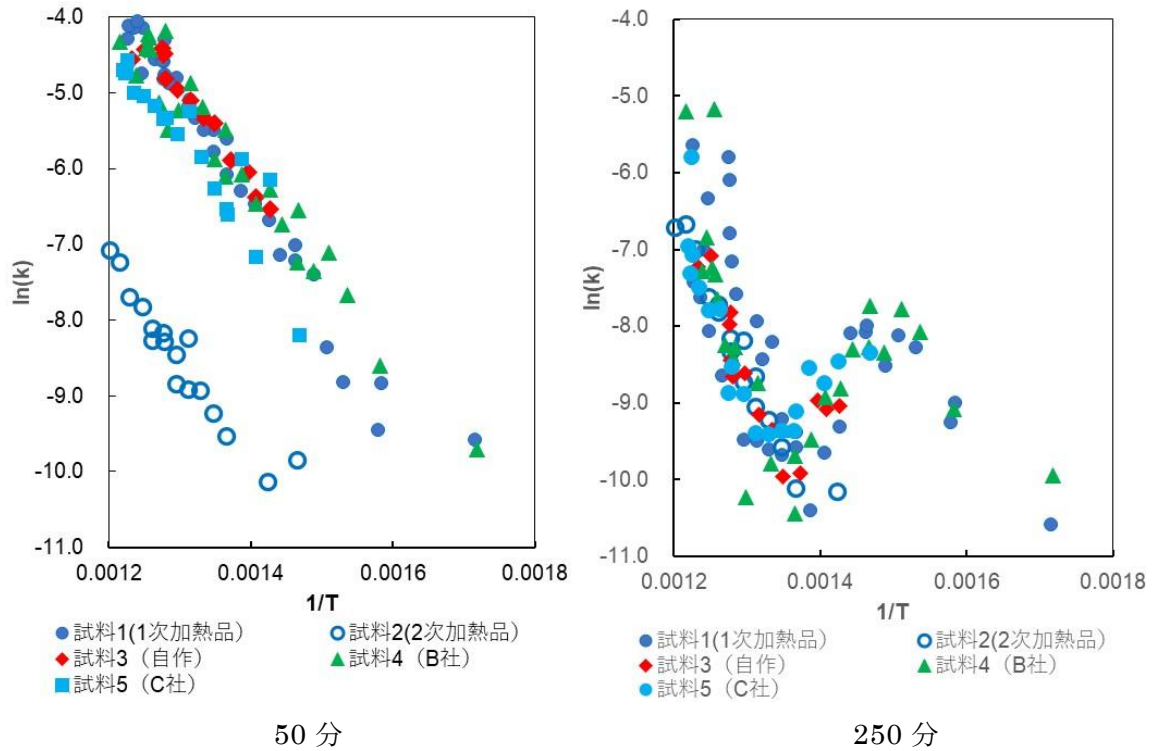


図 3-2.7.2-41 各試料の固体残渣および炭素繊維の酸化反応のアレニウスプロット

(2)-2-1-3-7 CFRP から回収された炭素繊維の酸化反応から得られた生成物

試料 0.5g を石英反応器に入れ、空気を 30cm<sup>3</sup>/min 流しながら 10°C/min で昇温させた場合に観測された一酸化炭素および二酸化炭素の生成量を図 3-2.7.2-42 に示す。試

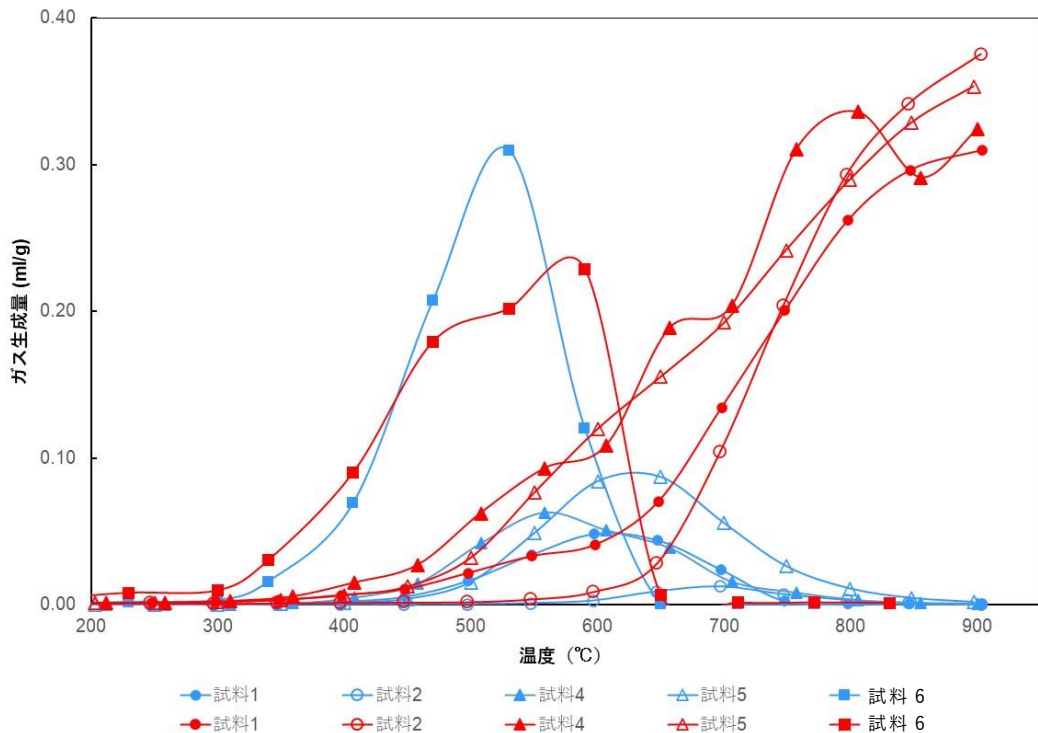


図 3-2.7.2-42 各試料の酸化反応で生成した一酸化炭素と二酸化炭素の生成量

料 1、試料 4、試料 5 では、一酸化炭素の生成量は 500℃付近で極大となった。一方、二酸化炭素の生成量は反応温度が高くなるに従って増加した。炭素残渣をほとんど含まない試料 2 の反応では、一酸化炭素の生成量は非常に小さく、650℃以上で炭素繊維の酸化反応による二酸化炭素の生成量が急激に増加した。試料 6 の反応は試料 1～5 とは全く異なり、500℃付近で一酸化炭素や二酸化炭素の生成量が極大値を示した。

閉鎖系に固体炭素、酸素および水がそれぞれ 1 mol, 0.4 mol および 0.1mol 存在した場合の平衡組成と温度との関係を図 3-2.7.2-43 に示す。室温付近では固体炭素、酸素および水はそれぞれ安定に存在するが、300℃以上では水が炭素によって水素と二酸化炭素に還元される。温度が 500℃以上では、二酸化炭素が炭素で還元されて一酸化炭素の成分が増加する。二酸化炭素と一酸化炭素ガスの組成だけと示すと、450℃付近では一酸化炭素と二酸化炭素の組成は 2.8%と 97.2%となり二酸化炭素が主成分となる。

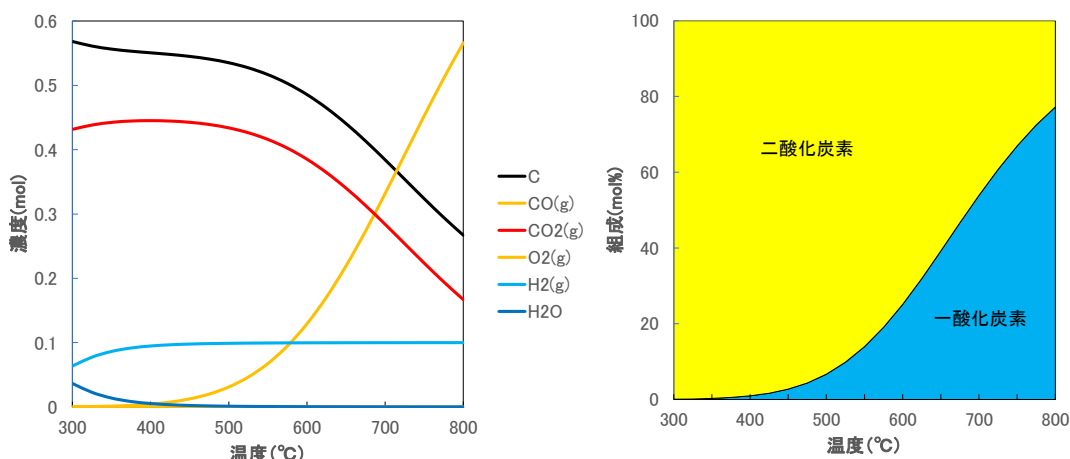


図 3-2.7.2-43 ガス生成物の平衡組成の温度依存性

本実験で試料を空气中 450℃で酸化させた場合、一酸化炭素と二酸化炭素の組成は大よそ 40%と 60%で、一酸化炭素の生成量が平衡組成に比べて非常に多い。また 800℃以上では二酸化炭素が主に生成し一酸化炭素は殆ど検出できなかった。これらの実験結果から、ガス生成物の組成は反応速度律速で得られたもので、炭素残渣の酸化反応では一酸化炭素が多く、炭素繊維の酸化反応では二酸化炭素が主に生成する反応が起きていることが明らかにされた。

#### (2)-2-1-3-8 炭素残渣の定量

回収した炭素繊維を空气中で加熱処理すると、炭素残渣と炭素繊維の酸化反応が並発し、重量減少から算出される転化率 (X) は式 (1) で表される。

$$1-X = \alpha \exp(-k_1 t) + (1-\alpha) \exp(-k_2 t) \quad (1)$$

X: 転化率

$\alpha$ : 炭素残渣の含有割合



$k_1$  : 炭素残渣の反応速度

$k_2$  : 炭素繊維の反応速度

炭素残渣の反応速度が炭素繊維の酸化速度に十分大きい場合 ( $k_1 \gg k_2$ )、式(1)は式(2)に単純化され、炭素残渣の反応がほぼ終了した後に観測される炭素繊維の酸化反応を表す直線の切片Bから、炭素残渣の含有割合を算出することができる。

$$\ln(1-X) = \ln(1-\alpha) - k_2 t \quad (2)$$

$$= B - k_2 t$$

$$\alpha = 1 - \exp(B) \quad (3)$$

試料1を石英反応に入れ、空気を流しながら450~480°Cの一定温度で加熱した場合(図3-2.7.2-44)、固体炭素がほぼ完全に消失したと認められる200°C以上での転化率( $\ln(1-X)$ )の時間変化を反応が始まったとみなされる加熱時間45分に外挿した場合の切片(B)の値から、固体残渣の重量割合は5.9%(4.5%~6.8%)と算出された。同様に試料4(図3-2.7.2-45)、試料5(図3-2.7.2-46)に含まれる残渣の割合は、それぞれ15.7%(13.7~17.4%)、8.3%(6.6%~10.3%)と求められた。

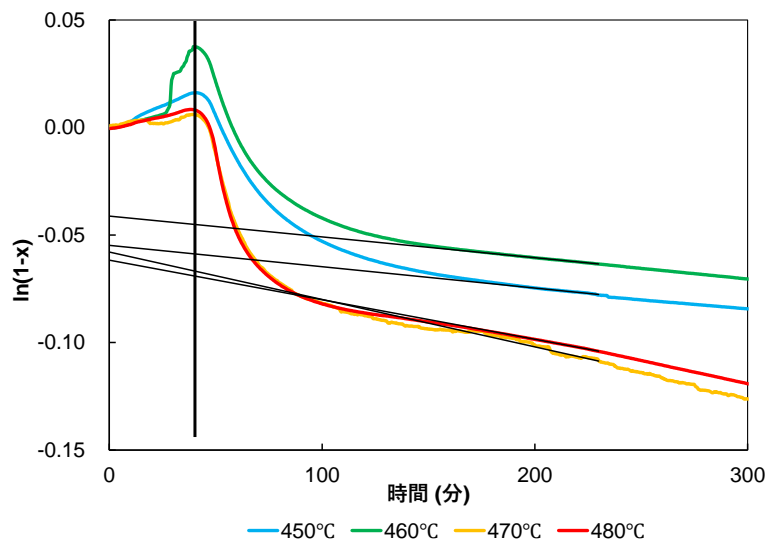


図3-2.7.2-44 試料1に含まれる炭素残渣の含有量の算出

#### (2)-2-1-4 まとめ

- ・回収された炭素繊維に含有している炭素残渣の割合はバラツキが大きく、多数回の測定を行う必要がある。
- ・リサイクル炭素繊維を空气中で加熱すると、350°C以上で炭素残渣の酸化が始まり、転化率の対数值( $\ln(1-X)$ )は加熱時間に対してほぼ直線的に減少した。
- ・400°C~500°Cでは炭素残渣と炭素繊維の酸化反応が並発し、500°C以上では炭素繊維の酸化反応が主に観測された。
- ・炭素残渣と炭素繊維の酸化反応では、前者からは一酸化炭素が比較的多く、後者からは二酸化炭素が主に生成した。

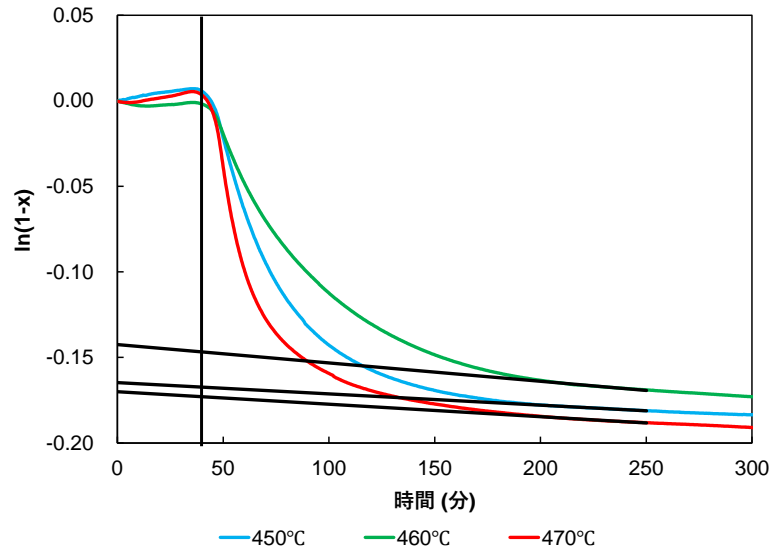


図 3-2.7.2-45 試料 4 に含まれる炭素残渣の含有量の算出

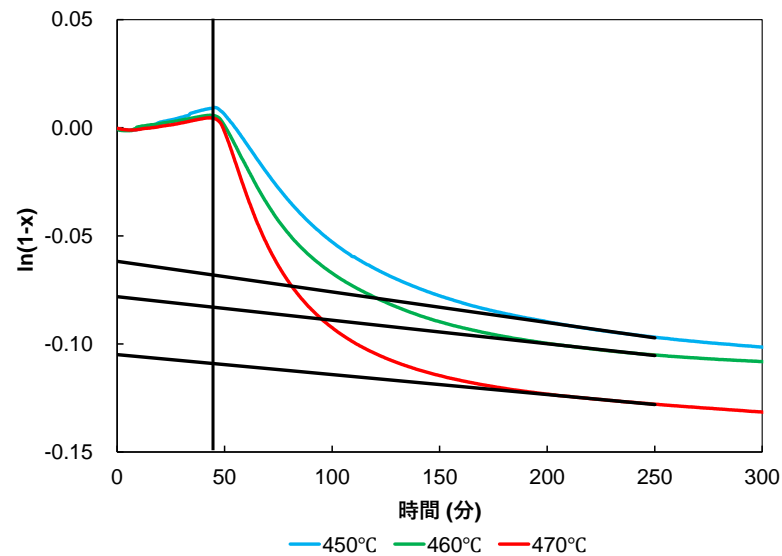


図 3-2.7.2-46 試料 5 に含まれる炭素残渣の含有量の算出

- ・ 熱天秤を用いて試料の重量減少から、試料 1、試料 4、および試料 5 の固体残渣の重量割合はそれぞれ 5.9%、15.7%、8.3%と求められた。

## (2)-2-2 不純物元素分析技術の開発

### (2)-2-2-1 緒言

リサイクル炭素繊維には、CFRP 等の廃棄回収後のリサイクル材に残留する不純物元素や廃棄回収操作時に混入する金属粉、ガラス繊維、ほこりなどに由来する不純物元素が含まれる可能性が考えられる。このためリサイクル炭素繊維の利活用のためには、環境規制対応および素材評価の面で不純物元素の管理が必要となる。環境規制の面では、例えば RoHS 規制対象の水銀、鉛、臭素といった有害元素の管理が必要であり、また、素材評価の面ではアルカリ金属や鉄など微量元素の管理が必要となると考えられる。本研究では、これらの不純物元素の管理に資するリサイクル炭素繊維中の不純物元素の分析法を開発する。開発する分析法は、不純物元素の揮発性に応じた適

切な分析前処理法を開発し、誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)による多種類の元素の一斉検出法と組み合わせて手法を確立するものである。

不揮発性元素の分析前処理法は、マイクロ波分解法によるリサイクル炭素繊維を分解する方法で、この前処理により分析対象元素を溶液中に移行した後に ICP-MS 装置に導入して分析する。また、揮発性元素の分析前処理法は、熱分解法によるリサイクル炭素繊維中の揮発性元素を気化し、ICP-MS 装置に導入して分析する。図 3-2.7.2-47 に各分析法の概要を示す。

本研究では最初に分析前処理法について検討した。不揮発性元素分析法については、マイクロ波分解法によるリサイクル炭素繊維の分解条件を検討し、また、揮発性元素分析法については、熱分解法によるリサイクル炭素繊維からの元素の気化条件を検討した。次にこれらの前処理法によって得られた rCF から分解した元素を ICP-MS で検出できる方法を検討し、不純物元素分析の原理手法を確立した。さらに、この原理手法を基に試料および元素の適用範囲の拡大、定量性の向上、および分析法の迅速化などを図り、rCF 実サンプルへの適用可能性の評価、および分析法の正確性の評価を行った。これらの検討結果から分析条件を最適化し、リサイクル炭素繊維の不純物元素分析法を確立した。

## (2)-2-2-2 不揮発性不純物元素分析法の開発

### (2)-2-2-2-1 マイクロ波分解/誘導結合プラズマ質量分析法による分析原理の検討

マイクロ波分解法を分析前処理法として利用して、rCF 中の不純物元素を溶液中に移行した後、ICP-MS 装置に導入して溶解した不純物元素を分析する手法について検討した。マイクロ波分解についてはフッ酸を用いずに分解する条件を検討した。フッ酸を用いたマイクロ波酸分解では、分解後に残留フッ酸が ICP-MS 装置のガラス製の試料導入部の劣化や ICP-MS 測定に影響を与えるため、分解後に蒸発除去やほう素化処理などの後処理が必要となり、この後処理は元素の損失や汚染の原因となり、操作も長時間・煩雑である。また、試料導入部に白金やテフロン製の耐フッ酸製器具を用いると直接導入が可能であるがこれらの器具は極めて高価である。一方、本研究のフッ酸フリーマイクロ波分解法は、マイクロ波分解した溶液を ICP-MS 装置に直接導入することが可能であるため、簡便かつ損失や汚染を低減した条件でリサイクル炭素繊維中の不純物元素を分析することが可能であると考えた。

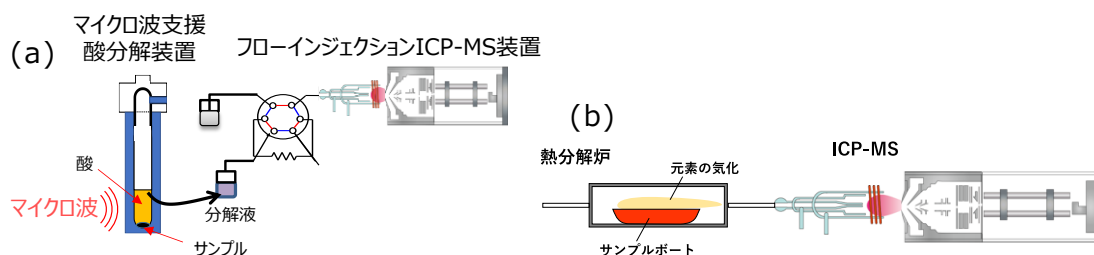


図 3-2.7.2-47 (a)マイクロ波支援酸分解/ICP-MS による不揮発性元素分析法 (b)熱分解/ICP-MS による揮発性元素分析法の概要

本研究では硝酸および過酸化水素を分解試薬として用いて、かつ高温でマイクロ波分解処理を行うことで、フッ酸を使用せずに CF および rCF 試料を分解できる条件を検討した。また、この分解の評価を行うためマイクロ波分解液を ICP-MS 装置に導入し元素分析を行った。最初に CF 試料を試験対象試料とした。CF は難分解性であるため、マイクロ波分解反応の温度を高温化することで、CF および不純物元素の回収率の向上を図った。結果を図 3-2.7.2-48 に示す。

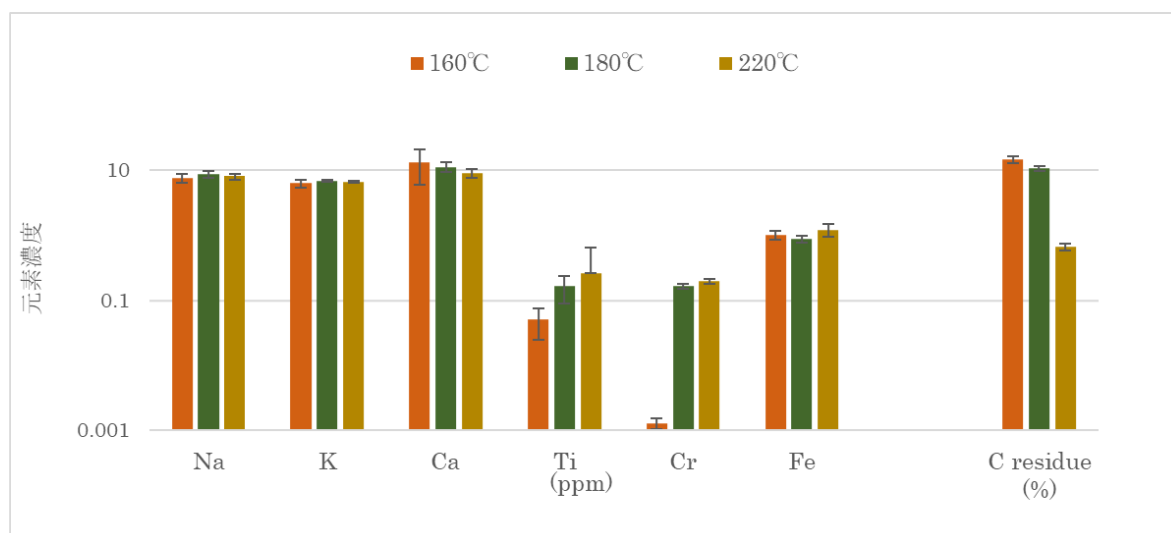


図 3-2.7.2-48 CF のフッ酸フリーマイクロ波酸分解の温度依存性

マイクロ波温度を 220°C まで上昇させると CF 由来の残留炭素濃度が減少し 1%未満となった。また、この他に試験に供された rCF 試料の一次処理および二次処理した 7 種類の試料が分解できる条件を検討したところ、ボールミルで粉砕した試料形態では、220°C の分解条件下で約 1.5 時間で可溶化することを確認した。以上の事から CF や rCF 中の難分解性の炭素繊維本体およびサイディング剤等の有機炭素はほとんど分解したと考えられた。

次に、CF 中の不純物元素分析について検討した。マイクロ波分解温度を上昇させると、ナトリウム、カリウム、カルシウム、鉄の分析濃度値はほとんど変わらなかったのに対して、クロムおよびチタン濃度値が増加する傾向が観測された。最高温度の 220°C 条件では、CF に含有するナトリウム、カリウム、カルシウム、鉄、クロムの濃度が昇温に対して増加し 220°C でほぼ一定となったことから、CF がほぼ分解後にこれらの不純物元素も可溶化したと考えている。一方、チタンの濃度値は温度上昇に対して増加傾向が継続しているため、220°C であっても未溶解のチタンが存在する可能性は否定できず、定量性の確保は保証できないと考えられる。また、ICP-MS 分析の観点からは、高温マイクロ波分解処理は ICP-MS 分析時の妨害原因となる残留炭素量を低減していることから、分析の正確性や安定性の確保に貢献していると考えられる。

#### (2)-2-2-2-2 元素汚染を抑制した rCF 試料の分析試料調製法の開発

次に、rCF 分析前の試料調製法の元素汚染の低減について検討した。rCF 試料を分

析する場合、試料の一部を分取する必要がある、また、試料形態によっては分解を促進するため試料を切断や微粒子化する必要がある。この操作はハサミやボールミルなど器具由来の元素汚染の危険性がある。そこで分取の最初の操作となる試料切断の汚染を抑制するため、非金属製ハサミによる切断法と、レーザー光による切断法の元素汚染評価を行った。ハサミはセラミックス製を、また、レーザー光は赤外(1060 nm)レーザー光を用いた。試料は rCF 不織布試料を 5mm 角に切断し、これを本研究法であるマイクロ波酸分解/ICP-MS で元素を分析した。切断した試料を図 3-2.7.2-49 に示す。また、元素分析の結果を図 3-2.7.2-50 に示す。非金属製ハサミによる切断法は、非接触型のレーザー切断法とほぼ同じ元素濃度であったことから、この非金属製ハサミ切断法は元素汚染が少なくかつ安価・簡便に切断できる方法と考えられた。

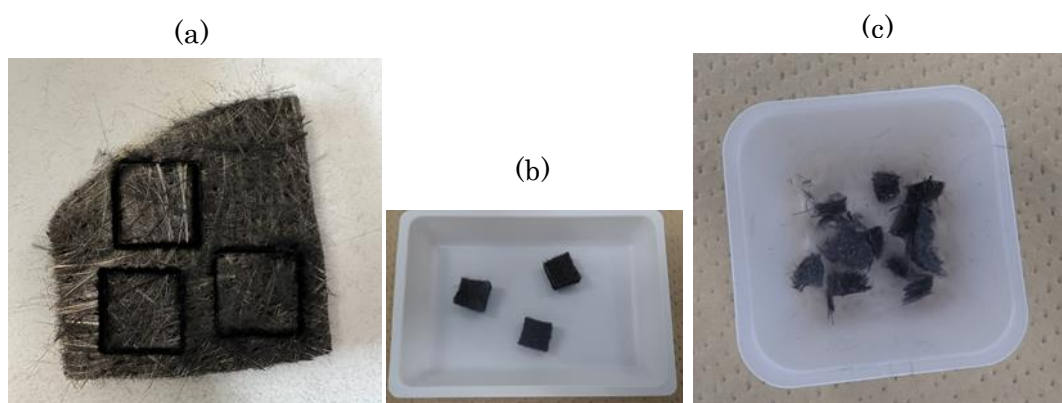


図 3-2.7.2-49 rCF 試料のレーザー切断(a, b)およびハサミ切断(c)

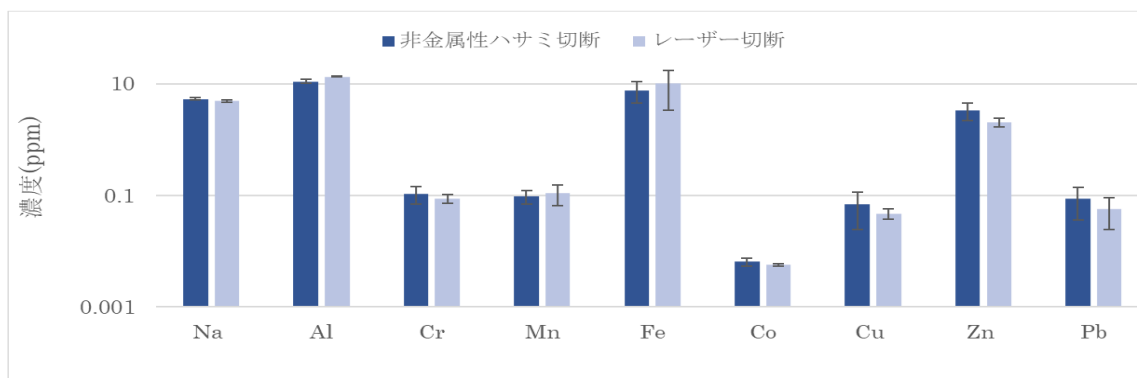


図 3-2.7.2-50 レーザー切断および非金属ハサミ切断条件での rCF の不純物元素分析

#### (2)-2-2-2-3 rCF 実サンプルへの適用性評価

開発した分析法について、5種類の rCF 実サンプルへの適用可能性について評価した。分析では、操作による汚染をできる限り抑制するため、可能な場合は rCF サンプルをそのまま分析に供した。ただし形状が大きすぎる場合には、非金属性ハサミで切断した試料を用いた。不揮発性元素の分析は、分析前処理はマイクロ波支援酸分解法を用いて rCF 試料を分解し、この分解液を ICP-MS 測定した。分解条件を最適化することで、rCF の粉碎等を行うことなく、最低限の操作での分解を可能となった。な

お、rCF の試料の一部を採取してそのまま分析しているため、今回報告する分析値はあくまで一例であり、各 rCF の代表値としては保証されない。

rCF 試料中の不純物元素含有濃度の結果を図 3-2.7.2-51 に示す。今回の試料で検出した元素はアルカリ金属、アルカリ土類金属、アルミニウム、および重金属の 16 元素であった。また、各元素濃度を現時点で検証した範囲での暫定的な定量法により測定したところ、0.011ppm~450ppm と広範囲の濃度域で、かつ試料毎に大きく異なっていた。ナトリウム、カリウム、マグネシウム、カルシウムといったアルカリ金属およびアルカリ土類金属の軽元素に加えて、アルミニウムおよび鉄の濃度が高く 1~100ppm レベルであった。一方、鉄を除く重金属元素は濃度が低くおおむね 0.01~1ppm レベルであった。また、各元素の濃度は試料によって大きく異なり、今回測定した元素の合計濃度(図 3-2.7.2-51 の sum)は、40ppm~1056ppm と約 26 倍の濃度差があった。

また、各試料についての繰り返し分析結果のから得られた相対標準偏差(RSD)を図 3-2.7.2-52 に示す。各元素分析の RSD 値は 5%~172%と広範囲であり、かつ試料毎に

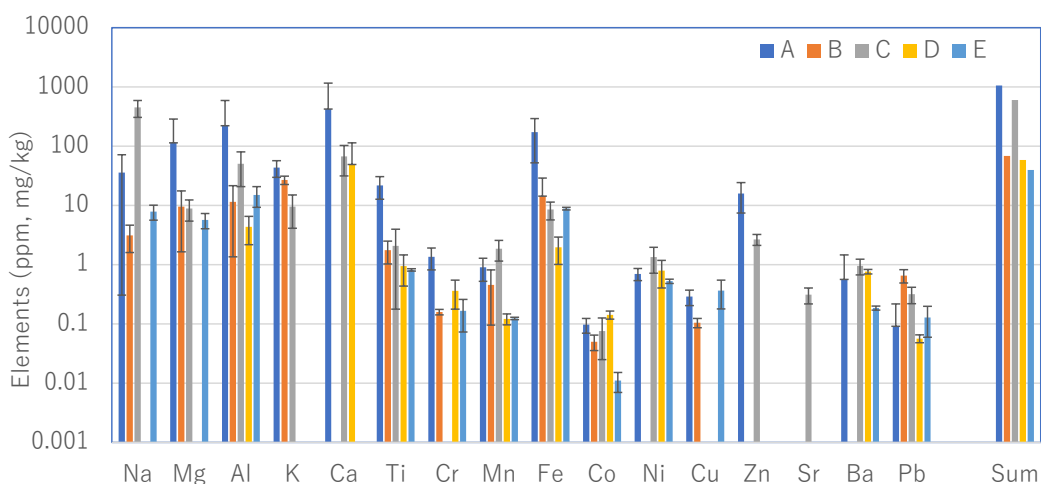


図 3-2.7.2-51 マイクロ波分解/ICP-MS によるリサイクル炭素繊維中の不純物元素の分析結果 (分析回数 3 回)

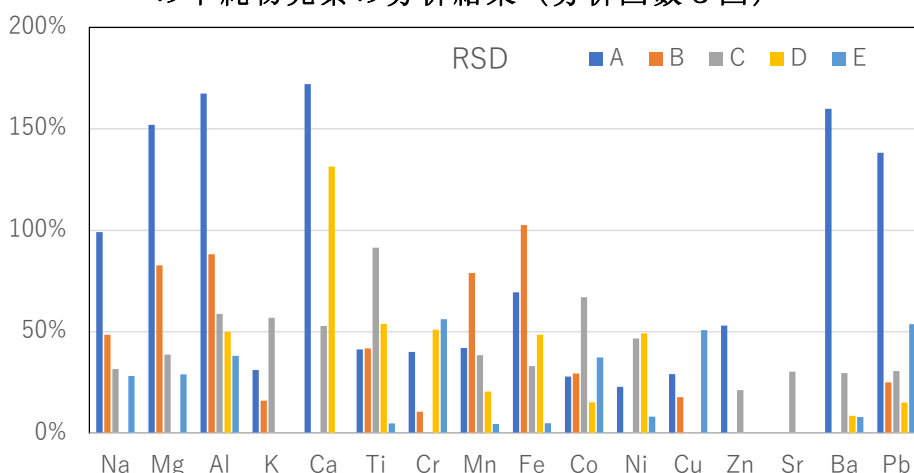


図 3-2.7.2-52 マイクロ波分解/ICP-MS による不純物元素分析の相対標準偏差 (分析回数 3 回) (分析回数 3 回)

大きく異なった。全体の傾向としては、ばらつきは試料および元素に大きく依存していた。例えば、試料 A は他の試料と比較してばらつきが大きい元素が多かった。また、元素の種類によってばらつきは大きな差があり、試料 A ではナトリウム、マグネシウム、アルミニウム、カルシウム、鉛などのばらつきが非常に大きい一方、コバルト、ニッケル、銅、亜鉛などの重金属類は他の試料と同程度に小さかった。一方、試料 E は全体的にばらつきが小さく、かつばらつきの元素間の差も小さかった。なお、分析法自身の精度については、元素濃度が均一な試料は 10%以下となっており(例:試料 E の鉄、ニッケルなど)、高精度な分析の可能性があると考えている。

#### (2)-2-2-2-4 マイクロ波酸分解後の ICP-MS による元素測定の正確性の評価

次に、本研究法であるフッ酸フリーマイクロ波支援酸分解法/ICP-MS によって得られる分析値(不純物元素濃度)の正確性を検証するため、最初に、rCF 試料のマイクロ波分解後に元素測定を担当している ICP-MS の正確性を検証した。ICP-MS と異なる元素測定の原理である ICP 発光分析法との比較検証を行った。rCF 試料の不純物分析結果を図 3-2.7.2-53 に示す。

本研究法のマイクロ波酸分解/ICP-MS 法は、マイクロ波酸分解により分解・溶液化した rCF 試料に含まれる各元素をイオン化して質量数別に分離して検出する。一方、測定原理が異なる検証用分析法であるマイクロ波酸分解/ICP 発光分析法は、分解・溶液化した rCF 試料に含まれる各元素を原子化・イオン化させることで得られる元素固有の発光線を波長別に分離検出する。上記の図(b)で示されるように、本研究法のマイクロ波酸分解/ICP-MS 法による分析値は、アルカリ金属、アルカリ土類金属、軽金属(アルミニウム)、重金属(銅、鉄、亜鉛、マンガンの 9 元素についてマイクロ波酸分解/ICP 発光分析法による分析値との比率は 90~110%とほぼ良い一致を示したことから、開発中のマイクロ波酸分解/ICP-MS 法の分析正確性は広範囲の元素種で比較的高いと考えられる。

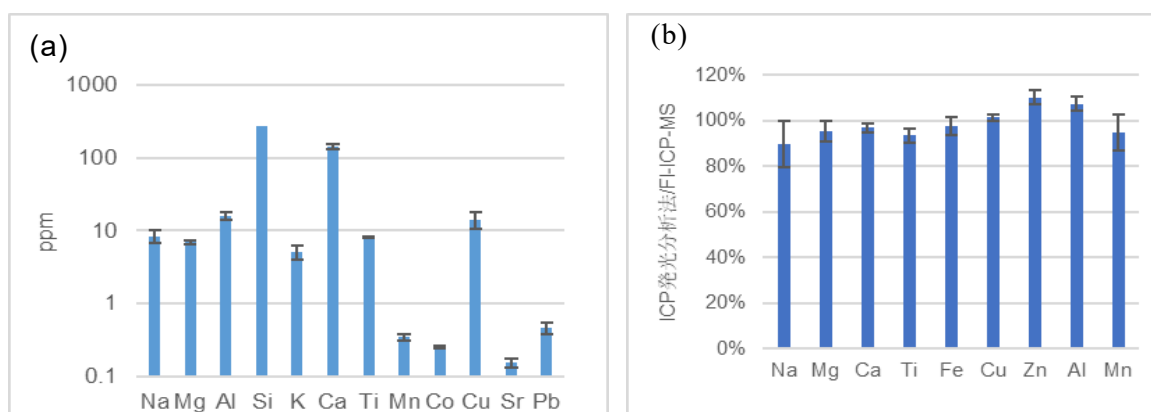


図 3-2.7.2-53 (a)マイクロ波酸分解/ICP-MS 法による不揮発性不純物元素の分析例 (b)マイクロ波酸分解/ICP 発光分析法との比較

## (2)-2-2-2-5 マイクロ波分解による分析前処理法の正確性の評価

次に、フッ酸フリーマイクロ波支援酸分解法/ICP-MS の分析前処理法の正確性を検証するため、フッ酸フリーマイクロ波支援酸分解法と他原理法となるフッ酸使用マイクロ波酸分解処理法との比較検証を行った。CF および rCF 試料にガラス成分が残留することも想定されるため、ケイ酸塩の分解およびこれに結合する元素の溶解も行う必要がある。そこでフッ酸フリー法の分解力および元素溶解力を確認するため、ケイ酸塩の分解力が高いフッ酸を使用したマイクロ波酸分解法と比較を行った。分析操作は、本研究法のフッ酸フリー分解法は硝酸および過酸化水素を分解試薬として rCF 試料を分解し、その分解溶液を ICP-MS 分析に供した。一方、フッ酸使用分解法は硝酸および過酸化水素にフッ酸を添加した分解試薬条件下でマイクロ波分解を行った後、ICP-MS 分析に供する前にホットプレート法による蒸発を行いフッ酸を除去した。その後、希硝酸で再溶解し ICP-MS 分析に供した。これは通常の ICP-MS 装置の試料導入部はガラス製であるため、フッ酸による損傷および元素汚染が生じるため除去操作が必要となるためである。分析試料は分解性能および元素汚染の比較評価を行うために難分解性で元素濃度が低い CF を用いた。不純物元素分析の結果を図 3-2.7.2-54 に示す。不純物元素の中で高濃度なナトリウム、カリウム、カルシウムから低濃度のストロンチウムやバリウムまでのアルカリ金属、アルカリ土類金属類の元素濃度は、フッ酸フリー分解法はフッ酸使用分解法とほぼ同等であった。一方、低濃度の重金属類(クロム、マンガン、鉄、コバルト、ニッケル、銅)、およびケイ素はフッ酸フリー法のみ定量が可能であった。また、CF 試料を含めない分解試薬の空試験の結果から、重金属の分析においてフッ酸フリー法はフッ酸使用法よりも元素汚染が低かった。以上の結果から、フッ酸が無くてもフッ酸フリー法は十分な CF 分解力と元素溶解力を有しており、かつ低濃度元素の重金属分析において汚染が抑制されているため定量が可能となったと考えられた。また、ケイ素についてはフッ酸フリー法のみが検

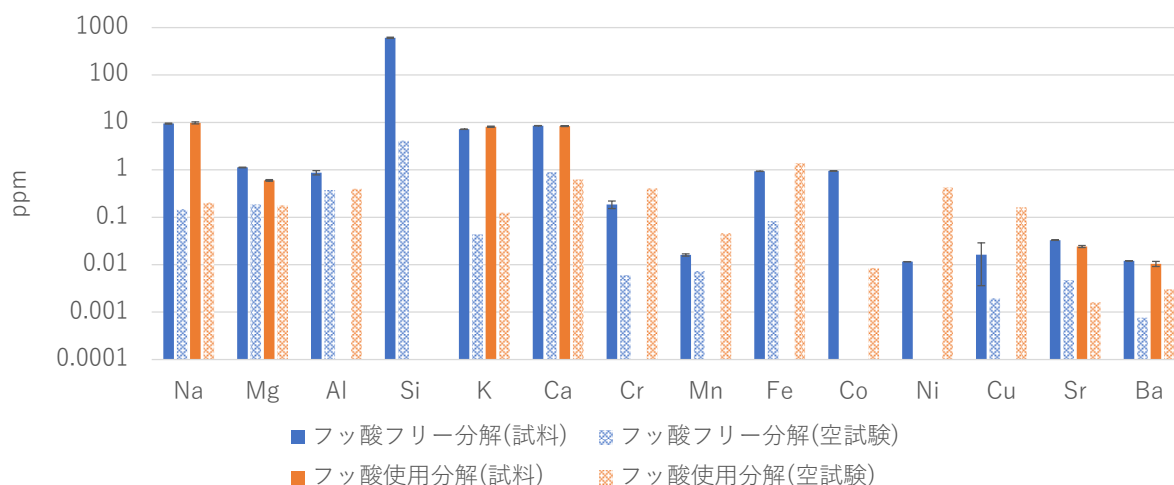


図 3-2.7.2-54 フッ酸フリー分解法およびフッ酸使用分解法による CF 不純物元素分析



出可能であった。このことはフッ酸が存在しなくても CF 中のケイ素が溶解する可能性があることが示唆される。一方、フッ酸使用法ではケイ素は溶解するが、後処理の蒸発操作時に除去され検出下限以下となったと考えられる。CF 中のケイ素分析についてはフッ酸フリー法が有利で定性分析は可能と考えられるが、定量分析についてはフッ酸使用法以外の他の原理の分析法との比較など今後更なる検証が必要である。また、分析操作の観点からは、フッ酸フリー法はフッ酸使用法と比較して蒸発操作などが不要であるため、より簡便かつ迅速に分解が可能と考えられる。

#### (2)-2-2-2-6 不揮発性不純物元素分析法における元素保存性の評価

本研究の不揮発性元素分析法の分析操作により rCF の元素の損失や汚染が無いか確認するため試料として CF を用いて添加回収試験を行った。添加回収試験は既知量の分析対象元素を添加してからマイクロ波酸分解を行い、分解溶液の ICP-MS 分析を行った。回収率は添加試料と無添加試料の分析値の差分により計算されるため、元素添加量は無添加試料の分析濃度値のばらつきが分析値に影響が無いような濃度レベル(添加後の CF 元素濃度は 10ppb~10ppm)に調整した。結果を図 3-2.7.2-55 に示す。軽元素から重元素まで 16 元素の回収率は 100%近く、本分析法の分析操作による元素の損失や汚染は生じずに定量分析が可能と考えられた。

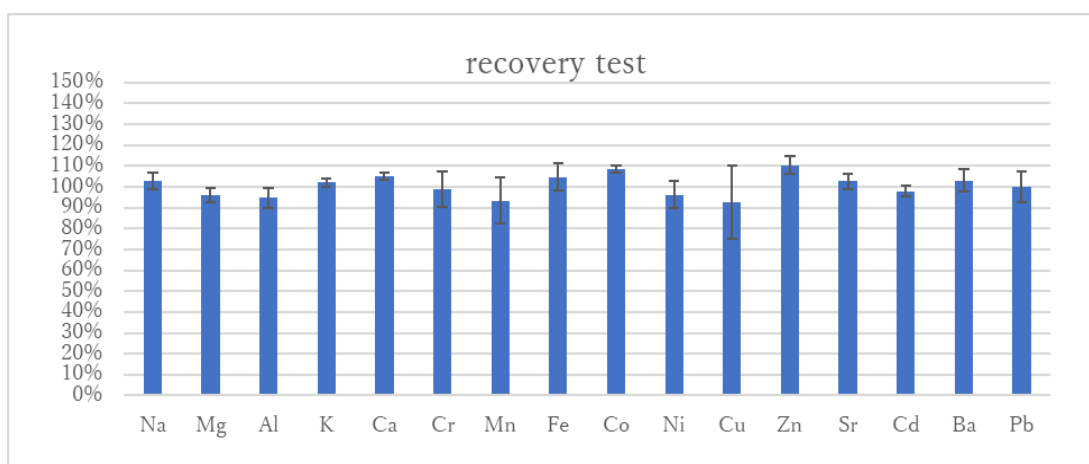


図 3-2.7.2-55 不純物元素分析法の添加回収試験結果 (分析回数 3 回)

#### (2)-2-2-2-7 不揮発性不純物元素分析の効率化

上述のように rCF の実サンプルは様々なものがあり、また、不純物元素の含有濃度に大きなばらつきがあるサンプルも存在することから、不純物分析法についてもできるだけ多量・多数の試料の分析を効率化できる方が望ましい。不揮発性元素分析のマイクロ波酸分解/ICP-MS 法において、ボトルネックとなるマイクロ波酸分解の効率化を図るため、加圧マイクロ波分解装置を導入し、マイクロ波反応の温度を上昇させ rCF 試料の分解の効率化を検討した。マイクロ波分解容器の外側から窒素ガスによる加圧を行いつつ、分解容器にマイクロ波を照射することで、温度を 250℃以上に昇温することが可能となった。マイクロ波分解において分解容器内の酸の温度が上昇し、

その蒸気により内圧が増加するが、非加圧型マイクロ波分解装置の場合は分解容器の耐圧が上限となるため温度上限が 220℃に限られていた。一方、加圧型マイクロ波分解装置の場合は、分解容器の外部からガスで加圧して分解容器内外の圧力差を低減することで、昇温による分解容器の内圧の許容範囲が拡大される。加圧型マイクロ波装置の条件を検討した結果、フッ酸フリーマイクロ波分解条件で 280℃に昇温することが可能となった。この高温条件下での難分解性の CF 試料の分解効率は、非加圧型マイクロ波分解条件と比較して 5.0 倍となった。この分解効率の向上は rCF 試料の分析の迅速化につながり、また、分析試料の多量化を可能にすることからばらつきが多い rCF サンプルの分析や低濃度の元素の分析にも有用と考えている。一方、CF 自身のマイクロ波吸収により分解容器が局所的に高温加熱されるため、複数の rCF 試料を分解した場合は、分解容器への熱伝導による加熱影響が大きくなり、条件によっては分解容器の劣化も観測された。したがって、加圧マイクロ波分解法については、迅速かつ安全に分解処理が行えるように条件を更に検討を進めていく必要があると考えられた。

### (2)-2-2-3 揮発性不純物元素分析法の開発

リサイクル炭素繊維に含まれる揮発性元素を分析するため、試料を加熱し ICP-MS へ導入することによる分析方法を検討した。加熱方法としてはレーザーを用いた直接加熱法と、誘導加熱や抵抗加熱を用いた外部加熱法の 2 方法について検討を行った。

#### (2)-2-2-3-1 直接加熱式熱分解/ICP-MS による揮発性元素分析原理の検討

リサイクル炭素繊維に含まれる揮発性元素のため、直接加熱式熱分解装置と ICP-MS 装置と接続する直接式熱分解/ICP-MS による分析について検討を行った。直接加熱式熱分解/ICP-MS では、レーザー照射により rCF の蒸発温度以上まで高速で加熱することで、揮発性元素と共に固体試料全量の気化を行うことができる。直接加熱式熱分解/ICP-MS の概略図を図 3-2.7.2-56 に示す。

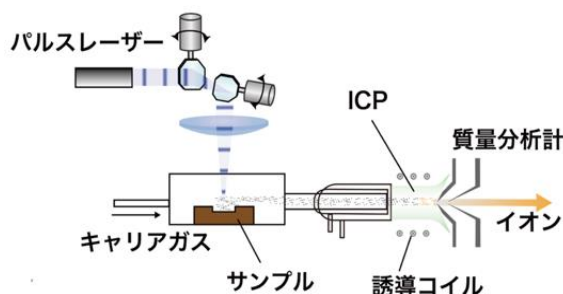


図 3-2.7.2-56 直接加熱式熱分解/ICP-MS 装置

直接加熱式熱分解/ICP-MS による 4 種類の元素の検出信号例を図 3-2.7.2-57 に示す。綿状の rCF 試料の定性分析では、レーザーを 70 秒間照射することで rCF 試料は分解気化し臭素および鉛を検出することができた。カドミウム、水銀は検出可能であるが、この試料に含まれる量が少なく検出されなかったと考えられる。

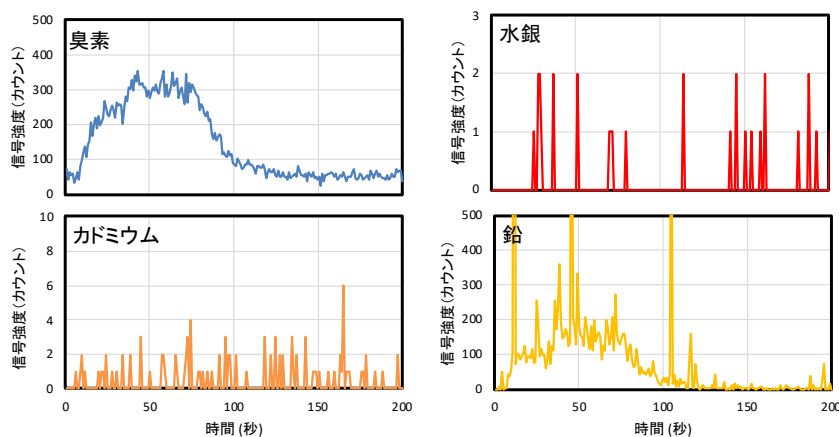


図 3-2.7.2-57 直接加熱式熱分解/ICP-MS による不純物元素の検出例

#### (2)-2-2-3-2 直接加熱式熱分解/ICP-MS のための試料調製方法

リサイクル炭素繊維は様々な形状（綿状、繊維束、粉末など）が存在するため、実試料への適応範囲を広げるためには、試料形状を光加熱式熱分解/ICP-MS に適した形に調製すると同時に、濃度校正用の標準試料についても調製する必要がある。そのため、試料調製及び濃度校正用標準物質の調製方法について検討を行った。

rCF 試料は粉砕によって粉末化したのち加圧成形することで、固体ペレットとすることで、試料形態を統一することを検討した。粉砕ではボールミルによる粉砕によって、1 mm 以下の微粉末にすることができた。炭素粉末の物理特性や粒径によっては加圧成形でのペレット化が困難である場合を考慮し、蛍光 X 線分析で用いられるセルロースをバインダーとして添加する方法を選択した。ペレット化には  $\phi 10$  mm 金型を用い、1 t の加圧を行うことでペレット化を行った。

ペレット状に成形した rCF の定量分析では、同様のペレット状の元素濃度標準物質が必要となる。そのため、rCF を模した高純度炭素粉末へ金属元素溶液を添加することによる調製を検討した。プラスチック製容器に秤量した炭素粉末とセルロースを重量比 1:1 で混合し、硝酸に溶解した元素溶液を添加した。溶液を添加した粉末はホットプレートで乾燥し添加元素を含む粉末を調製した。完全に乾燥した粉末を容器内で攪拌し均一化したのち、一軸加圧成形によりペレット化を行った。水銀などの揮発性元素はホットプレートでの加熱により蒸発損失する可能性がある。そこで損失の有無を確認するため、各試料に固体換算で  $10 \mu\text{g/g}$  となるように水銀溶液を添加した粉末を加熱しペレット化した試料を光加熱式熱分解/ICP-MS を用いて測定し蒸発損失の影響を調査した（図 3-2.7.2-58）。無添加試料では水銀は検出されなかった。水銀添加し

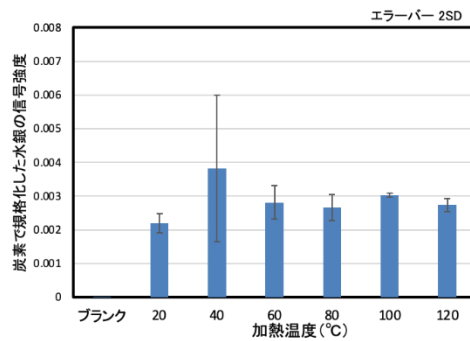


図 3-2.7.2-58 標準ペレット試料調製における乾燥温度の影響

た試料について、乾固温度を 20°C から 120°C までの範囲で有意な蒸発損失は確認されなかった。したがって、120°C 以下での乾固では水銀は損失しないと考えられる。

次に、添加濃度を系統的に変化させた標準ペレットを調製し光加熱式熱分解/ICP-MS により測定した。水銀及び鉛についてブランク試料（元素溶液を添加していないペレット）を切片とした最小二乗法により作成した検量線を図 3-2.7.2-59 に示す。水銀、鉛に関して、10 µg/g ~ 10 ng/g の範囲で  $R^2 = 0.9$  以上の直線性が得られており、仕込み量に応じた元素の添加に成功した。

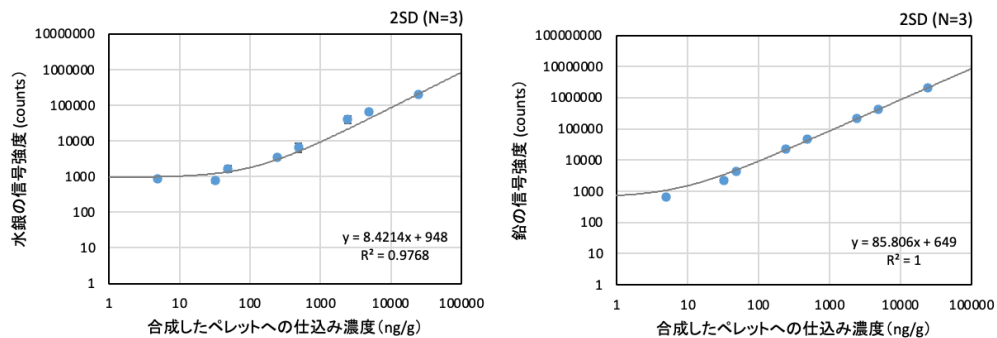


図 3-2.7.2-59 標準ペレット試料による水銀および鉛の検量線

最後に、同時に添加した 29 元素に関して測定を行った。結果を図 3-2.7.2-60 に示す。元素ごとに濃度レベルは異なるものの、カルシウムと鉄を除いた 27 元素に対して 10 µg/g 以下のバックグラウンド相当濃度が得られた。したがって、本合成方法では µg/g レベルでの標準試料の調製が可能であることが示された。本標準試料は直接加熱式熱分解/ICP-MS による多元素の定量分析に利用可能である。

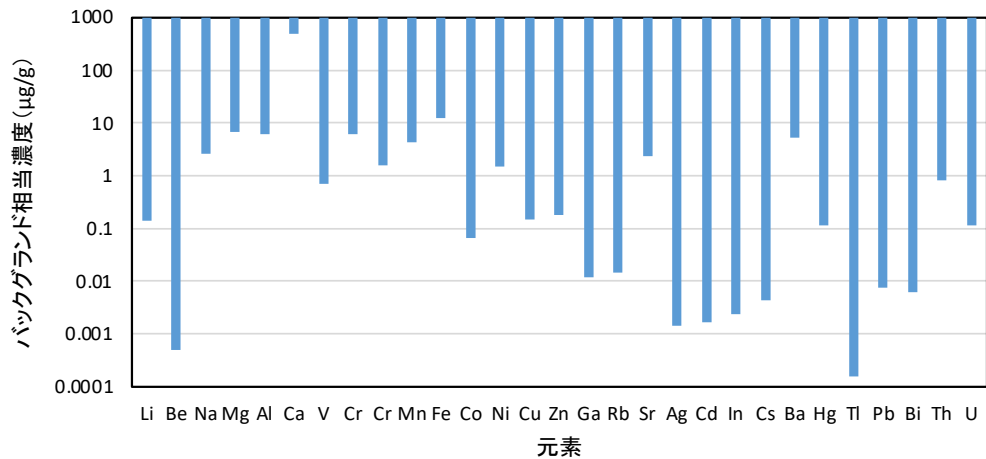


図 3-2.7.2-60 ペレット標準試料で調製可能な元素濃度範囲

(2)-2-2-3-4 直接加熱式熱分解/ICP-MS による定量分析法の検討

光加熱式熱分解/ICP-MS は、原理的に ICP-MS 装置へ導入量の変化および ICP-MS 装置感度の変化が生じ、測定の定量性に影響を与える可能性がある。そこで、これらの変動要因を補正するために、rCF とバインダーであるセルロースの主成分元素である炭素を用いた内部補正法について検討した。内部補正法では、濃度がサンプル間で一定あるいは既知の炭素の信号強度を用いて、目的元素の信号強度との比を計測することによって、導入量変動や装置感度の変化を補正する。この炭素の補正法の有効性を明らかにするため、炭素含有量が異なる 5 材質の認証標準物質（ポリエステル:PES、ポリエチレン:PE、ABS 樹脂:ABS、ポリ塩化ビニル:PVC、ポリプロピレン:PP）を用いて、補正方法の評価を行った。図 3-2.7.2-61 に炭素含有量が 45.62～84.812% の範囲の材質の異なる 5 種類の炭素材料標準物質から得られた鉛分析の検量線を示す。炭素による内部補正をしない場合は材質毎の感度差が見られ、鉛の検量線の直線性が低く定量分析が困難となるのに対し、内部補正を行うことで材質の違いに起因する感度差を低減し、検量線の直線性が高く定量分析が可能であることを示している。以上の結果から、炭素を用いた内部補正法が光加熱式熱分解法/ICP-MS における定量方法として有効であることがわかった。

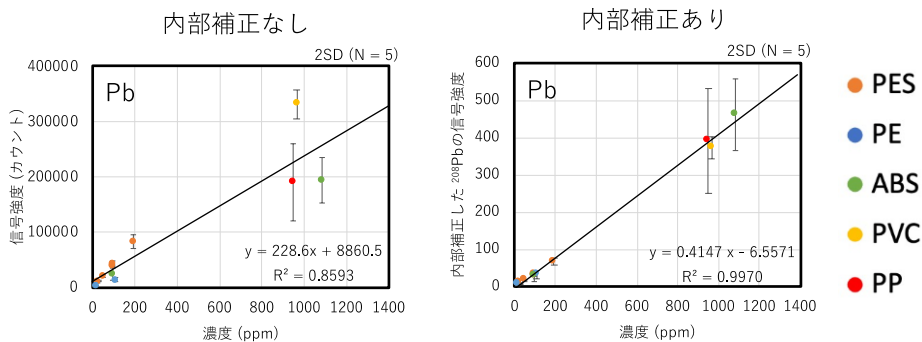


図 3-2.7.2-61 炭素素材中鉛分析における炭素を用いた内部補正効果

また、定量性の評価として、rCF に類似の物質として石炭の認証標準物質（NIST SRM 1632d）の測定を行った結果を図 3-2.7.2-62 に示す。測定した 19 元素に対して概ね認証値と近い値が得られた。また、測定値と認証値の偏差を図 3-2.7.2-63 に示す。

Ca, Mn, Fe, Cd, Hg などの均一性が高い元素に関しては認証値に近い値が得られているが、他の元素に関しては試料内部の不均一性の影響のため、認証値から最大 600% 程度高い値が得られた。したがって、定量分析のためには、より試料の均一化が必要であることがわかった。

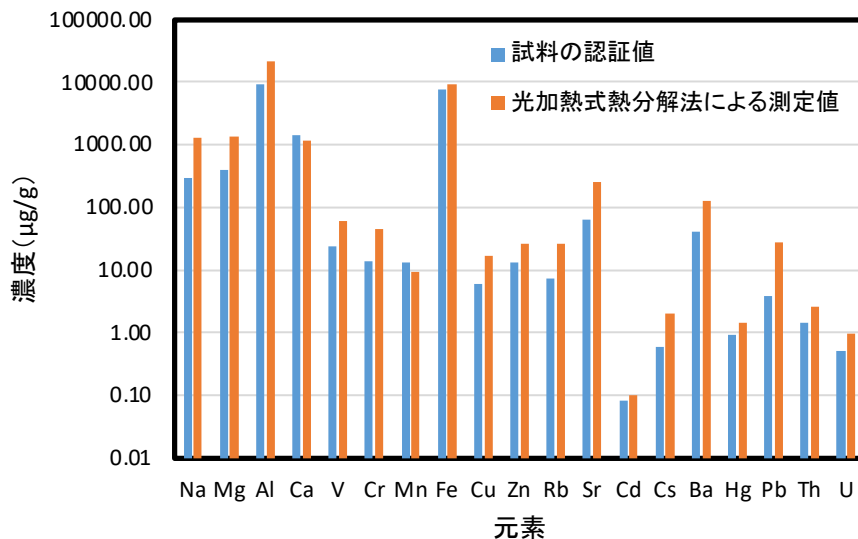


図 3-2.7.2-62 直接加熱式熱分解/ICP-MS による石炭標準物質分析

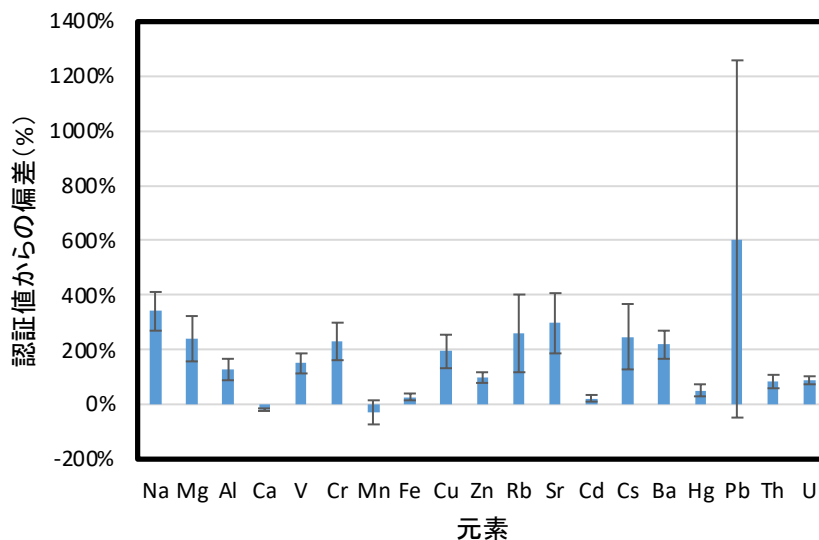


図 3-2.7.2-63 直接加熱式熱分解/ICP-MS による分析値と認証値との比較 (石炭標準物質)

### (2)-2-2-3-5 外部加熱式熱分解/ICP-MS による揮発性元素分析法の原理の検討

外部加熱式熱分解法は、誘導加熱式および抵抗加熱式による加熱方法の2方式について検討を行った。

誘導加熱式熱分解法では、誘導コイルにより rCF 試料を加熱し、試料から気化した元素をオンラインで ICP-MS へ導入して分析する (図 3-2.7.2-64)。

誘導加熱により5分で室温から1200℃以上に昇温させることに成功した。黒鉛製の試料ボートに綿状のリサイクル炭素繊維試料を入れ、Ar 雰囲気下で rCF 試料を測定した検出信号の例を図 3-2.7.2-65 に示す。熱分解温度は室温から5分で1200度まで昇温した。臭素や水銀は加熱直後の200℃程度から検出信号が観測され始め、カドミウムや鉛は600℃付近から信号が検出された。鉛を除いた3元素は、単体の沸点が今回の熱分解温度以下であるため気化して十分検出できると考えられる。一方、鉛単体の沸点は1749度であり今回の熱分解条件では蒸発しないため、鉛は低沸点化合物が気化して検出されたと考えられる。また、臭素は2つのピークが生じていることから少なくとも2種類の化学形態の臭素化合物が含まれていることが示唆された。

図 3-2.7.2-66 には3回の繰り返し測定における検出信号強度の相対標準偏差 (RSD) を示す。各元素分析の RSD 値は4%~136%と広範囲であり、かつ臭素、カドミウム、鉛は試料毎に大きく異なった。例えば、カドミウムについては、試料 B は100%を超える大きな RSD 値を示す一方で、試料 C は10%未満となった。

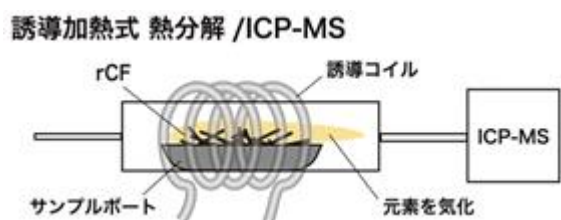


図 3-2.7.2-64 誘導加熱式熱分解/ICP-MS 装置

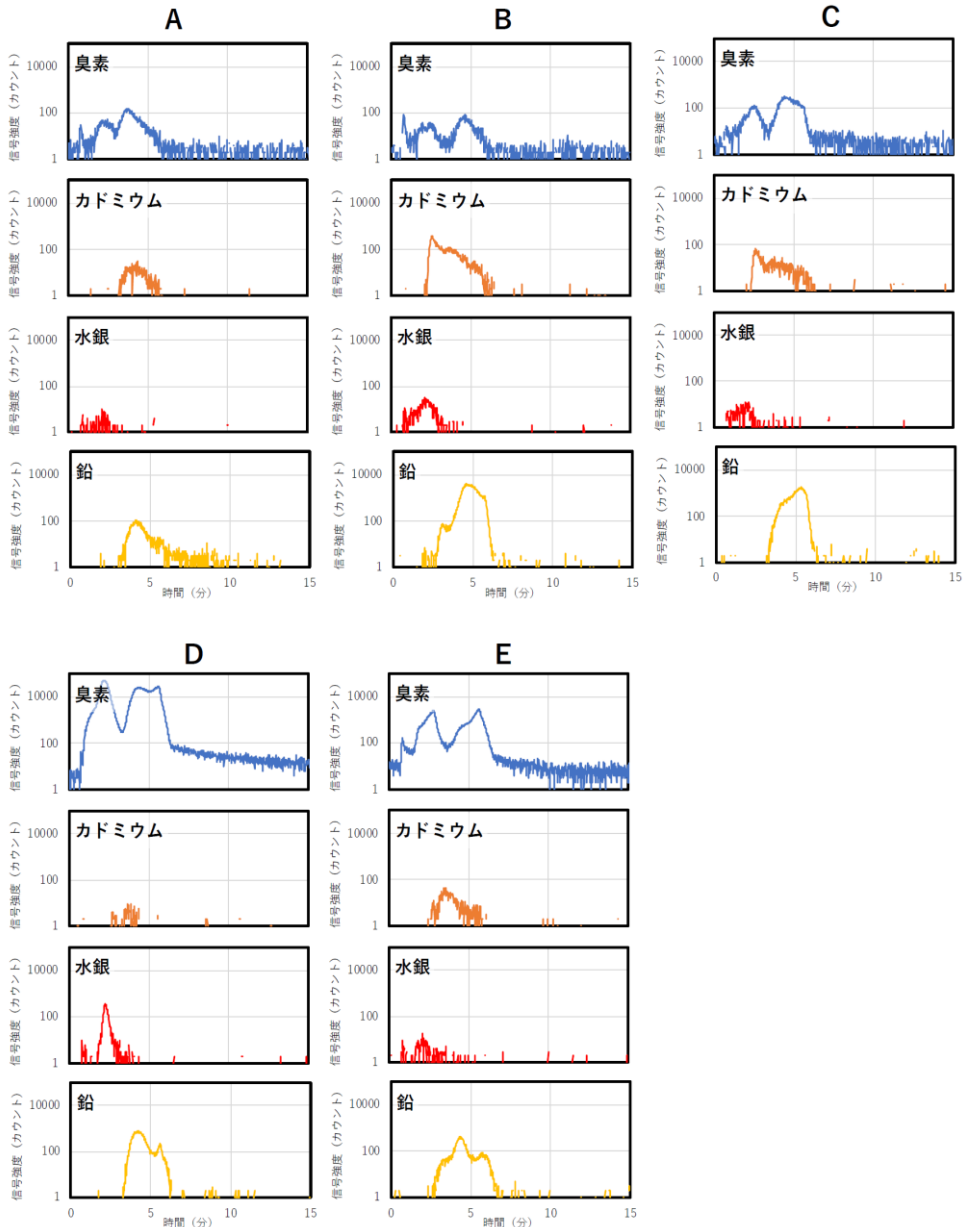


図 3-2.7.2-65 誘導加熱式熱分解/ICP-MS による rCF 中の不純物元素の検出例

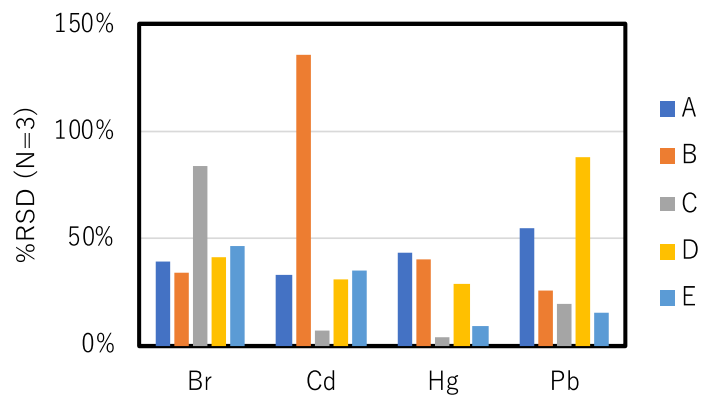


図 3-2.7.2-66 誘導加熱式熱分解/ICP-MS による不純物元素分析の相対標準偏差(分析回数 3 回)



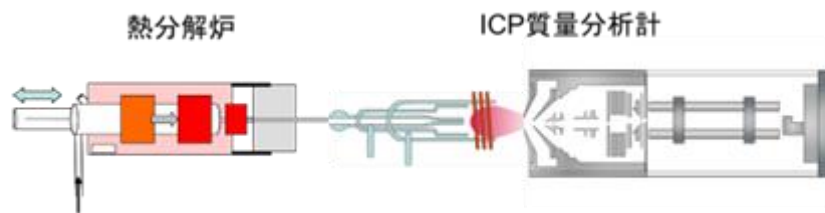


図 3-2.7.2-67 抵抗加熱式熱分解/ICP-MS 装置

誘導加熱分解法に加えて、より安価な装置構成が可能な抵抗加熱式熱分解法として検討した。本分析法は外部加熱型熱分解炉によって試料中の元素を加熱気化し、ICP質量分析装置に直接導入し揮発性元素を検出する。装置図を図 3-2.7.2-67 に示す。

次に、熱分解法によるリサイクル炭素繊維からの揮発性元素の気化法について、開発した熱分解/ICP-MS 装置を用い、Ar 雰囲気下で気化条件を検討した。その結果、ボールミルで粉砕した試料を 700°C まで約 20 分間で昇温させると、臭素、水銀、炭素が気化し、ICP-MS により検出可能となった。今回、試験に供されたリサイクル炭素繊維試料の一次処理および二次処理した試料の 7 種類、および新品の炭素繊維 1 種類、計 8 種類の試料で分析したところ、全ての試料でこれらの元素は検出した。図 3-2.7.2-68 にリサイクル炭素繊維の分析例を示す。ICP-MS 検出データから、これらのリサイクル炭素繊維試料には、上記の 3 元素の含有量に差があり、また、臭素および炭

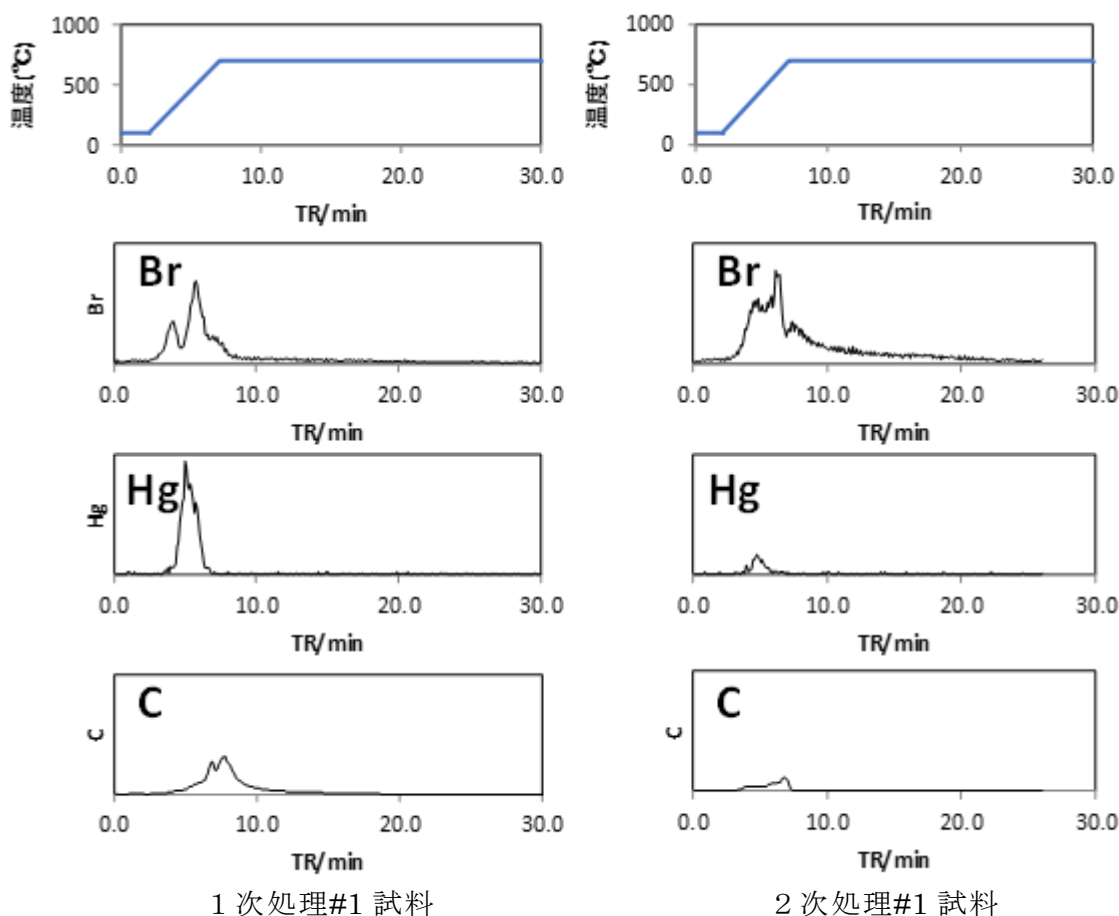


図 3-2.7.2-68 抵抗加熱式熱分解/ICP-MS による rCF 中の不純物元素の検出例

素の検出の温度依存性が異なることから、各元素の含有化合物の種類は試料間で異なる可能性があると考えられる。

分析精度等の分析性能を評価するため、rCFと同様な炭素系材料としてプラスチック認証標準物質を用いて臭素の定量法の検討を行った。臭素の濃度値が保証されているポリスチレンおよびポリエステルの2種類の臭素系難燃剤含有プラスチック認証標準物質を用いて、熱分解炉の温度条件を90℃から800℃まで60℃/minで昇温することで、500℃～600℃の温度域で臭素を検出した。この温度条件で異なる臭素含有濃度の認証標準物質を用いて検量線を作成したところ、ポリスチレン認証標準物質では、260～815 µg Br/gの範囲で相関係数0.99以上の直線の検量線を得ることができた。結果を図3-2.7.2-69に示す。また、組成が異なるプラスチックとしてポリエチレンの認証標準物質を比較したところ、プラスチック分解温度および炭素含有率等の違いにより、熱分解ICP-MSの臭素の検出感度が異なることが分かった。この結果とrCFもプラスチックとは分解温度や炭素含有率が異なることから、プラスチック標準認証物質を用いたrCFの定量においては臭素の感度補正法を検討する必要があることを明らかにした。

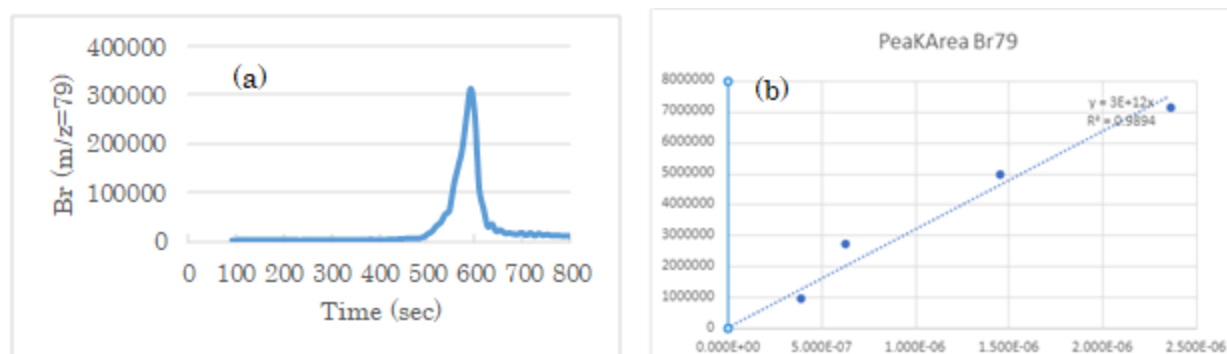


図 3-2.7.2-69 抵抗加熱式熱分解/ICP-MS によるポリスチレン標準物質の分析例(a)および臭素の検量線(b)

#### (2)-2-2-3-5 揮発性元素分析法の rCF 実サンプルへの適用可能性の評価

外部加熱式では臭素および水銀のシグナルは化学形態別に検出されているものの、分析感度が化学形態等に依存している可能性があり、元素総量の定量分析に課題があることを明らかにした。このため直接加熱式熱分解法のみを評価した。rCFを4試料測定した結果を図3-2.7.2-70に示す。臭素はppmレベル、水銀は試料C以外はppbレベルで検出されており、ppm～ppbレベルの微量な揮発性元素の評価に利用可能であると考えられた。なお、rCFの試料の一部を採取してそのまま分析しているため、今回報告する分析値はあくまで一例であり、各rCFの代表値としては保証されない。

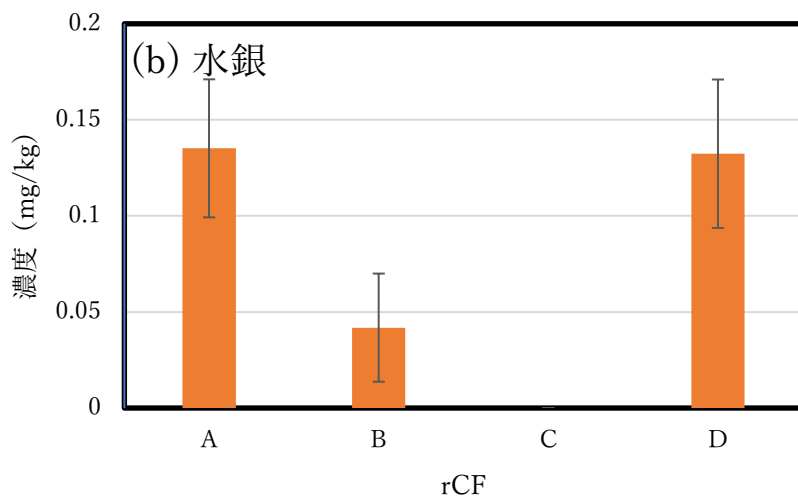
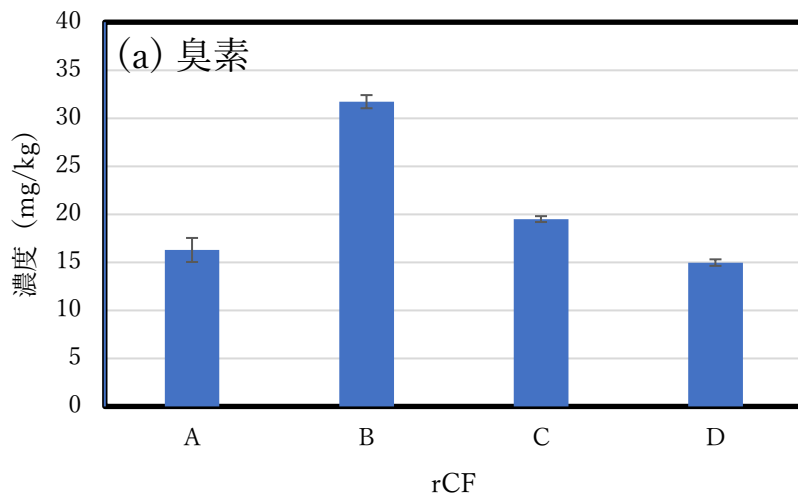


図 3-2.7.2-70 直接加熱分解/ICP-MS による rCF の分析例 (a)臭素 (b)水銀

#### (2)-2-2-4 不純物元素分析法開発のまとめ

以上、不純物元素の揮発性に応じた分析前処理法と誘導結合プラズマ質量分析法 (ICP-MS) を組み合わせた手法により、リサイクル炭素繊維中の不純物元素分析法を確立した。

不揮発性元素分析については、マイクロ波分解/ICP-MS による分析法を開発した。マイクロ波分解法によるリサイクル炭素繊維の分解条件については、ICP-MS 測定の妨害となり、また、分析操作面でも危険性が高いフッ酸を使用せずに、マイクロ波分解反応を高温化することで CF 分解率・不純物元素の溶解率を向上を高め、結果、難分解性の CF が 1.5 時間で可溶化できるフッ酸フリーマイクロ波分解条件を見出し

た。また、分析時の汚染原因となる可能性がある分析試料の調製方法については、低汚染・簡便・安価なハサミ切断法を確立した。次に、この開発した分析法の分析正確性について他原理の分析法と比較検証を行った。分析前処理後の不純物元素の ICP-MS による定量分析について検証したところ、9 種類の元素で ICP 発光分析法とほぼ良い一致し、本研究法は分解ができれば正確に元素を定量できることが示唆された。また、分析前処理法についても、本研究のフッ酸フリー法と他原理の分解法であるフッ酸使用マイクロ波分解法と比較したところ、CF 試料では比較的高濃度のアルカリ金属やアルカリ土類金属の 6 元素でほぼ良い一致を示し、アルミニウムや低濃度の重金属類 7 元素は本研究法のみが汚染の影響が少なく分析可能であった。また、添加回収試験結果から、定量値に影響を与える分析操作時の元素の損失も軽元素から重金属までの 16 元素ではほとんどなく良好であった。また、この試料調製法とマイクロ波分解/ICP-MS を組み合わせた方法は、試験で入手した 5 種類の実サンプルを分解可能で、ICP-MS による定量が可能であった。また、実サンプルの 16 元素の濃度範囲が広く(総濃度は数十倍異なる)、また、サンプル内の元素のばらつきも観測可能となり、ばらつきが試料の種類や元素種に依存することが評価できた。また、試料中の元素の不均一性に対応し分析精度の確保するため、分析試料量の増大や、多数試料の分析ができるように分析の効率化についても検討した。結果、加圧型マイクロ波分解法を用いて条件最適化により分解処理量を 5 倍増大し可能にした。一方で、CF の局所加熱のため分解時の安全性の確保が必要であることも明らかにした。

揮発性元素分析法については、試料を熱分解して ICP-MS 装置へ導入して分析する手法を検討し、レーザーを用いた直接加熱式熱分解/ICP-MS と、誘導加熱や抵抗加熱を用いた外部加熱式熱分解/ICP-MS を開発した。直接加熱式熱分解/ICP-MS については、レーザー照射による元素の気化および ICP-MS による検出の原理を構築し、2 分以内で揮発性元素の検出を可能にした。次に、様々な形状の rCF 試料分析に対応し、元素定量に必要な濃度校正用標準物質の調製も可能となる粉碎処理・ペレット化・元素添加法を確立した。条件を最適化することで、水銀や鉛などの揮発性元素について汚染が少なく、かつ濃度校正用標準物質の調製時に添加した元素をほとんど損失せず濃度を維持できる調製条件を見出した。次に、元素定量に影響を与えるレーザー照射による ICP-MS 装置へ試料導入量の試料依存性を低減するため、CF やペレット剤の主成分元素である炭素を用いた内部補正法を確立し、組成が異なる炭素材料間で鉛などの定量性を向上させた。実サンプルへの適用性についても検証を行い、CF に類似で炭素含有量が高く元素濃度認証値がある標準石炭試料を分析した結果、19 元素で濃度オーダーレベルで一致し、また、実際の rCF 試料の測定結果から ppm～ppb レベルの微量の臭素および水銀を評価できることを示した。また、外部加熱式熱分解/ICP-MS については、誘導加熱またはより安価な装置構成である抵抗加熱により元素を数分で気化し ICP-MS によって検出する原理を構築し、臭素、カドミウム、水銀、鉛など揮発性元素を検出可能にした。また、臭素については複数の検出ピークが得られており、複数の化学形態の存在を推定できる手法に展開できる可能性が示唆された。一方、分析感度が化学形態等に依存する可能性があり、元素総量の定量分析に課題があることを明らかにした。

今後、確立したリサイクル不純物元素分析法を基に、標準化に向けて、汎用性を高め、試料適用性を評価し、標準試料調製法を開発し、ラウンドロビンテストを通じて標準分析法として展開していきたい。

### (3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.7.2-5 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2019FY	0	0	0	0	0	0	1	0	1
2020FY	2	1	3	2	0	0	0	0	1
2021FY	2	0	6	0	0	0	0	0	1
2022FY	1	0	1	0	0	0	2	0	2
合計	5	1	10	2	0	0	3	0	5

### (4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.7.2-6 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2019FY	0	0	0
2020FY	0	0	0
2021FY	0	0	0
2022FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

#### 2.7.2.3 参考文献

1. Oliveux G, Dandy LO, Leeke GA. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. Prog Mater Sci 2015;72:61–99.
2. Yang J, Liu J, Liu W, Wang J, Tang T. Recycling of carbon fibre reinforced epoxy resin composites under various oxygen concentrations in nitrogen-oxygen atmosphere. J Anal Appl Pyrolysis 2015;112:253–61.
3. Meyer LO, Schulte K, Grove-Nielsen E. CFRP-recycling following a pyrolysis route: Process optimization and potentials. J Compos Mater 2009;43:1121–32.

4. Mustata F, Tudorachi N, Bicu I. The kinetic study and thermal characterization of epoxy resins crosslinked with amino carboxylic acids. *J Anal Appl Pyrolysis* 2015;112:180–91.
5. Mustata F, Tudorachi N. Curing kinetics and thermal characterization of epoxy resin cured with amidodicarboxylic acids. *Appl Therm Eng* 2017;125:285–96.
6. Yao Z, Xiong J, Yu S, Su W, Wu W, Tang J, et al. Kinetic study on the slow pyrolysis of nonmetal fraction of waste printed circuit boards (NMF-WPCBs). *Waste Manag Res* 2020;38:903–10.
7. Régnier N, Fontaine S. Determination of the thermal degradation kinetic parameters of carbon fibre reinforced epoxy using TG. *J Therm Anal Calorim* 2001;64:789–99.
8. Tranchard P, Duquesne S, Samyn F, Estèbe B, Bourbigot S. Kinetic analysis of the thermal decomposition of a carbon fibre-reinforced epoxy resin laminate. *J Anal Appl Pyroly* 2017;126:14–21.
9. Zhang Z, Wang C, Huang G, Liu H, Yang S, Zhang A. Thermal degradation behaviors and reaction mechanism of carbon fibre-epoxy composite from hydrogen tank by TG-FTIR. *J Hazard Mater* 2018;357:73–80.

## 2.7.3 [テーマ番号 5 4] 低圧・超高速 CFRP 成形技術の開発 (FS 研究)

(2018 年度～2019 年度)

### [テーマ番号 2 7 C] 超軽量 CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の開発

(2020 年度～2022 年度)

#### 2.7.3.1 テーマの概要

##### (1) 背景と目的

温室効果ガス排出削減に向けた自動車軽量化の流れを受け、材料を適材適所に配置し、無駄を省いて軽量化するマルチマテリアル化技術が、環境規制の厳しい欧州を軸に進んでいる。中でも炭素繊維材料は、軽量性に特に優れることから BMW や Audi などのマルチマテリアル車体に適用されているが、熱硬化性 CFRP (CFRP) が主流である。その CFRP の車体適用のポイントは、材料技術ではなく HP-RTM などの成形技術の進歩による生産性の向上にあった。そのため、本事業では低圧・超高速成形プレス成形技術の構築を通し、高度省エネルギー社会実現への貢献と、CFRP 加工技術の国際競争力強化をテーマ 5 4 の目的とする。一方、熱可塑性 CFRP (CFRTP) と CFRP では特徴が異なり、現状の車体設計では CFRTP を使い熟しているとはいえない。そこで、テーマ 2 7 C では、これまで開発してきた CFRTP の材料および成形技術を元に、必要箇所に必要な形で CFRP を組み合わせた超軽量の CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の開発を通し、自動車構造体における CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の軽量化効果を実証することを目的とする。

##### (2) 目標値

表 3-2.7.3-1 研究開発目標 (テーマ番号 5 4)

研究開発項目 (実施年度)	最終目標 (2019 年度末)
①樹脂供給体の開発 (2018～2019 年度)	成形圧力 1MPa 以下、プレス型締め 3 分で平板成形品を与える、樹脂供給体の標準仕様の決定。
②低圧・高速成形プロセスの開発 (2018～2019 年度)	「樹脂供給体の開発」で開発した樹脂供給体を用いた、CFRP 平板 (30cm 角、面圧 1MPa 以下、型締め時間 3 分以内) の成形プロセスの構築。マルチマテリアル化に向けたプロセス課題の抽出。
③含浸シミュレーション技術の開発 (2018～2019 年度)	本プロセスでの樹脂含浸挙動を表現するシミュレーションのアプローチ手法の決定。樹脂含浸挙動の傾向の定性的な一致。

表 3-2.7.3-2 研究開発目標 (テーマ番号 27C)

研究開発項目 (実施年度)	第3中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)
①CFRTP/CFRP 複合パネルの開発 (2020～2022年度)	複合パネルの曲げ剛性で、スチール比 50%軽量化の実現	複合パネルの実用化に向けた特性 (耐環境特性、NVH 関連) を評価し、自動車部材への適合性を明確にする。
②CFRTP/CFRP 複合パネルの形状賦形 (2020～2022年度)	CFRTP フォーム材の形状賦形限界の見極めと複合パネルの技術課題抽出	形状を持った複合パネルについて、部材の性能評価結果との理論づけを行う。
③CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の形状設計 (2020～2021年度)	50%軽量化を実現できる部材の見極め	成形技術や材料特性の最適化と連動させ、構造を修正して更なる軽量化を図り、設計上で部材形状としての 50%軽量化を実現する。
④CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の成形 (2021～2022年度)	なし (2021年度開始)	CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の性能評価を行い、「CFRTP/CFRP 複合パネルの開発および形状賦形」で得られている材料および要素形状での性能と比較し、軽量化効果を実測および理論で実証する。また、実用化に向けた塗装性について検討する。

### (3)全体計画

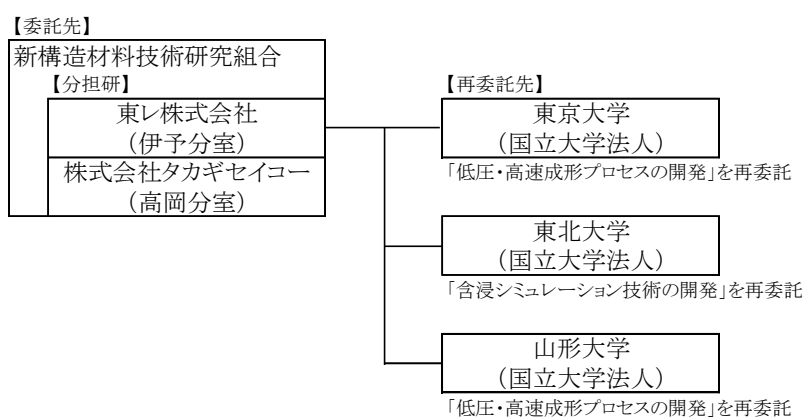
過去の研究開発テーマ ([テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発) で、炭素繊維を均質に分散・配置させた低比重・高剛性の CFRTP フォーム材が、プレス成形により形状賦形できることを示した。このフォーム材は、構造が炭素繊維で保持されている多孔質体であり、低比重・高弾性の性質を示し、強いスプリングバック性能から、プレスによる形状賦形も可能である。一方で、一般に CFRP は静的機械特性で CFRTP より優れており、これらの適切な組み合わせは、単独の材料よりも優れた軽量性を確保できる。2018～2019年度に実施した「[テーマ番号 54] 低圧・超高速 CFRP 成形技術の開発 (FS 研究)」では、熱可塑のサイ



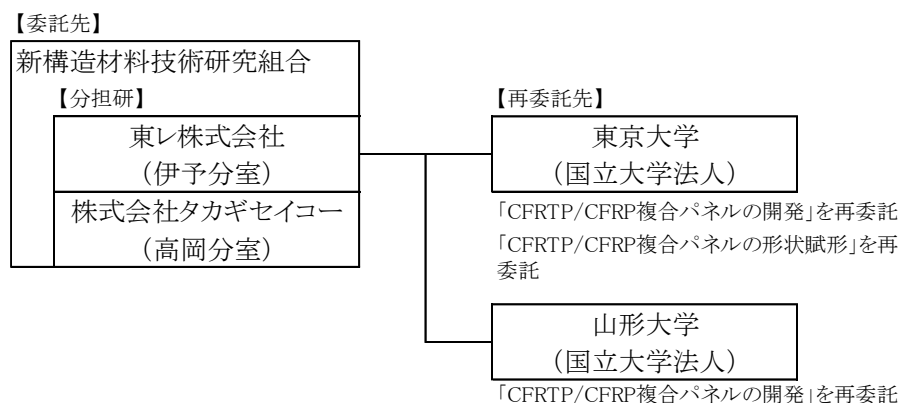
クルタイムに同期できる CFRP の材料ならびに低圧・高速成形技術を構築している。  
[テーマ番号 27C] では、これらの技術を適切に組み込んだ、超軽量の CFRTP/CFRP  
ハイブリッド部材の研究開発を行う。

#### (4) 実施体制

図 3-2.7.3-1 に示す体制で推進する。テーマ番号 54 については、材料成形の基盤技術は分室で構築し、高度な専門性を要する研究は、大学（東京大学、東北大学、山形大学）に再委託する。また、テーマ番号 27C については、材料技術は東レが、成形技術はタカギセイコーが、それぞれの専門性を活かして構築する。特殊な装置を要する評価技術や高い専門性を要する研究は、大学（東京大学、山形大学）に再委託する。



(a) テーマ番号 54



(b) テーマ番号 27C

図 3-2.7.3-1 実施体制

#### (5) 運営管理

主に材料開発を担当する東レ（伊予分室）と、成形技術開発を担当するタカギセイコー（高岡分室）は、1 回／月の頻度で共同試作・開発を行い、技術開発を共有する。再委託先とは、定期的な連絡・情報共有と半期ごとの直接面談で、成果と課題を共有する。

## (6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度）

本プロジェクトは、車体の大幅軽量化に向け、複数のテーマが個別技術を開発する構造を取る。従い実施効果は個別テーマ単独に帰属できないが、プロジェクトが目指す自動車軽量化による社会的、経済的影響は大きい。自動車向け CFRP の市場規模は 1,000 億円規模で推移しており、FCV などの環境対応車の普及期待を含めて拡大が見込まれている。

自動車への CFRP 適用による CO<sub>2</sub> の削減効果は、炭素繊維協会モデルでは炭素繊維 1t あたり 50t とされる。自動車 1 台あたりに使用される炭素繊維を 100kg とすると、ライフサイクル（10 年）で 5t/台の CO<sub>2</sub> が削減される。CASE の拡大や環境対応車の普及、安全基準の厳格化から車体重量増は不可避であり、今後も量産と親和性のある軽量化技術は流行と関わりなく需要が続く。四輪の世界生産台数は 9,571 万台（2018 年）であり、このうち上位 10% に適用された場合でも、ライフサイクルで 48 百万 t の、年間で 4.8 百万 t の CO<sub>2</sub> が削減される。

### 2.7.3.2 研究開発成果

#### (1)最終目標の達成度

表 3-2.7.3.2-1 最終目標と達成度（テーマ番号 5 4）

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
①樹脂供給体の開発 (2018～2019年度)	成形圧力 1MPa 以下、プレス型締め 3 分で平板成形品を与える、樹脂供給体の標準仕様の決定 (2019 年度)	低圧・高速成形に適用する樹脂供給体に関する基材およびマトリックス樹脂の設計を完了した。	○	
②低圧・高速成形プロセスの開発 (2018～2019年度)	「樹脂供給体の開発」で開発した樹脂供給体を用いた、CFRP 平板 (30cm 角、面圧 1MPa 以下、型締め時間 3 分以内) の成形プロセスの構築 マルチマテリアル化に向けたプロセス課題の抽	30cm 角の CFRP 平板を、成形圧力 0.6MPa、型締め 3 分で成形するプロセスを構築した。 アルミ平板との一体成形では、技術の成り立性は示されたが、部材形状、生産設備・条件の各論となった。	○	

	出 (2019 年度)			
③含浸シミュレーション技術の開発 (2018～2019 年度)	本プロセスでの樹脂含浸挙動を表現するシミュレーションの、アプローチ手法の決定。樹脂含浸挙動の傾向の定性的な一致 (2019 年度)	樹脂供給体からの面内および面外の含浸挙動を解析し、実際のプレス成形品でも同様の挙動が見られることを確認した。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

表 3-2.7.3.2-2 最終目標と達成度 (テーマ番号 27C)

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成度※	未達の場合 原因と解決方針
①CFRTP/CFRP 複合パネルの開発 (2020 年度～2022 年度)	複合パネルの実用化に向けた特性 (耐環境特性、NVH 関連) を評価し、自動車部材への適合性を明確にする。	実用特性として衝撃特性を評価し、環境温度による特性変化が少ない事を確認した。遮音特性を評価し、既存スチールパネル対比、透過損失が高いことを確認した。	○	
②CFRTP/CFRP 複合パネルの形状賦形 (2020 年度～2022 年度)	形状を持った複合パネルについて、部材の性能評価結果との理論づけを行う。	サーモビューアでの 3 点曲げの破壊起点の可視化によるスキン/コアの接合の健全性を評価・観察する手法を確立した。確立した手法を用いて、複合パネルの 3 点曲げ衝撃試験をおこない、延性的な破壊挙動を確認し、スキン/コアの健全性の効果を示した。	○	
③CFRTP/CFRP ハイブリット	成形技術や材料特性の最適化と	全体板厚 1.9mm にて等価剛性を実現で	◎	

部材の形状設計 (2020年度～2021年度)	連動させ、構造を修正して更なる軽量化を図り、設計上で部材形状としての50%軽量化を実現する。 (2021年度末)	き、74%の軽量化を得られる結果を得た。		
④CFRTP/CFRPハイブリッド部材の成形 (2021年度～2022年度)	CFRTP/CFRPハイブリッド部材の性能評価を行い、「CFRTP/CFRP複合パネルの開発および形状賦形」で得られている材料および要素形状での性能と比較し、軽量化効果を実測および理論で実証する。また、実用化に向けた塗装性について検討する。	50%軽量化したルーフの成形を実証した。ルーフ中心部の基材分割線を最小限に抑え、塗装により隠蔽可能であることを確認した。 -40～80℃までの温度環境下の剛性試験において、いずれの温度条件に既存スチール品対比、高剛性であることを示した。	○	

## (2)研究開発の成果と意義

以下、テーマ番号54について説明する。

### ①樹脂供給体の開発

樹脂供給体は、担持基材およびマトリックス樹脂から構成される。担持基材は短繊維からなる均質な多孔質体で、優れた樹脂担持能力を持つ。これに担持させるマトリックス樹脂は、ハイサイクルに適合する高速硬化性と、保管・プロセス中で変質しない安定性を両立させる設計としている。

樹脂供給体は自重の20倍以上のマトリックス樹脂を担持でき、かつ図3-2.7.3.2-1に示すように、持ち運んでも樹脂が垂れ落ちることがない。硬さは担持基材設計の結束力などで調節でき、複雑形状にも追随させることができる。

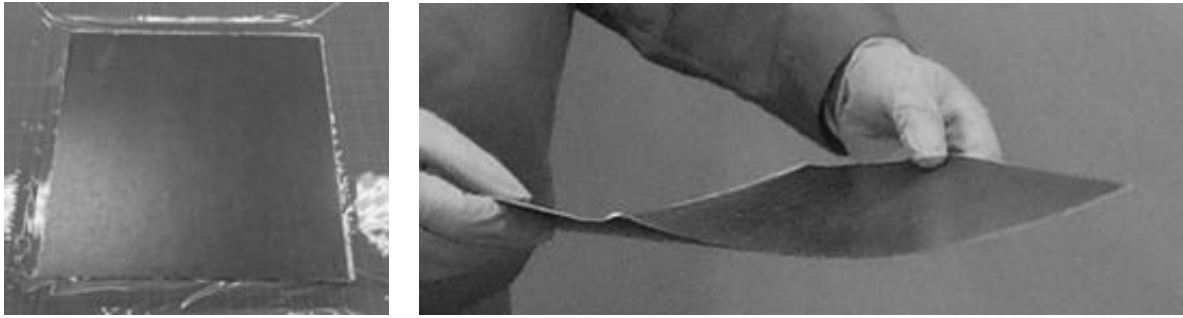


図 3-2.7.3.2-1 樹脂供給体の外観

樹脂供給体は、樹脂を型内で供給する点に特徴がある。外部から樹脂を供給する RTM では、成形設備や金型に樹脂の注入機構が必要となる。特に高速成形を指向する場合、含浸に高圧を要するため設備投資が大型化する。樹脂供給体は、基材の間に挟んでプレス機に置くだけでよく、専用設備を必要としない。かつ含浸は基材内部から厚さ方向に進むため、低圧で素早く進む。これら型内供給・面含浸の特徴は、小規模の試作から量産まで、幅広いプロセスに親和性が高い。

樹脂供給体の製造には、均質な担持基材の設計・製造技術と、本目的に特化したマトリックス樹脂の設計技術を要する。これらの技術は製品や製造設備から追跡することはできず、他国の企業の模倣が難しい。

## ②低圧・高速成形プロセスの開発

「樹脂供給体の開発」で開発した樹脂供給体を用い、CFRP 平板を低圧、高速で成形するプロセスを構築した。基本プロセスは、図 3-2.7.3.2-2 に示すシンプルなものである。ドライの CF クロスと樹脂供給体を積層して加熱されたプレス型内に配置して加圧すると、樹脂が樹脂供給体から染み出し、CF クロスに含浸の後硬化して、CFRP 平板を与える。

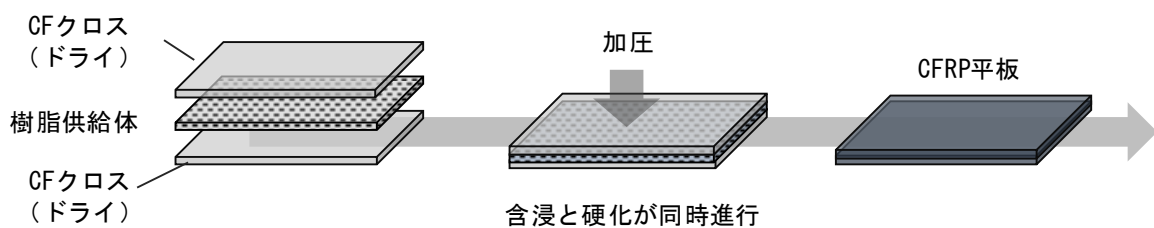


図 3-2.7.3.2-2 樹脂供給体を用いた低圧・高速プレス成形の基本プロセス

CF クロス (T300-3K クロス) を用い、プレス圧力 0.6MPa、型温 150°C、型締め 3 分で成形した CFRP 平板の外観と断面の顕微鏡写真を図 3-2.7.3.2-3 に示す。均一に樹脂が含浸し、成形品中にボイド、欠陥は見られていない。この結果は、本 FS 研究の狙いである樹脂供給体による高速面含浸のコンセプトが、有効に機能したことを示している。

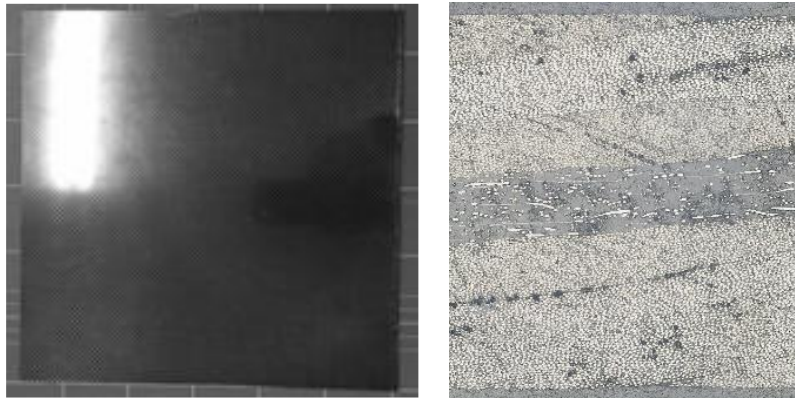


図 3-2.7.3.2-3 CFRP 平板の外観と厚さ方向断面の顕微鏡写真

得られた平板の力学特性は、図 3-2.7.3.2-4 に示す通り、従来成形法（RFI）と同等であった。なお、樹脂供給体向けに設計した樹脂は RTM 向けと比べて粘度が高いため、比較対象の平板は、同等以上の品位が得られる RFI（Resin Film Infusion）法で作製している。

この結果から、本 FS 研究で構築した低圧・高速成形プロセスは、従来プロセスよりも簡便な設備を使用しつつ、高速で品位に優れる CFRP 成形品を得られることが示された。

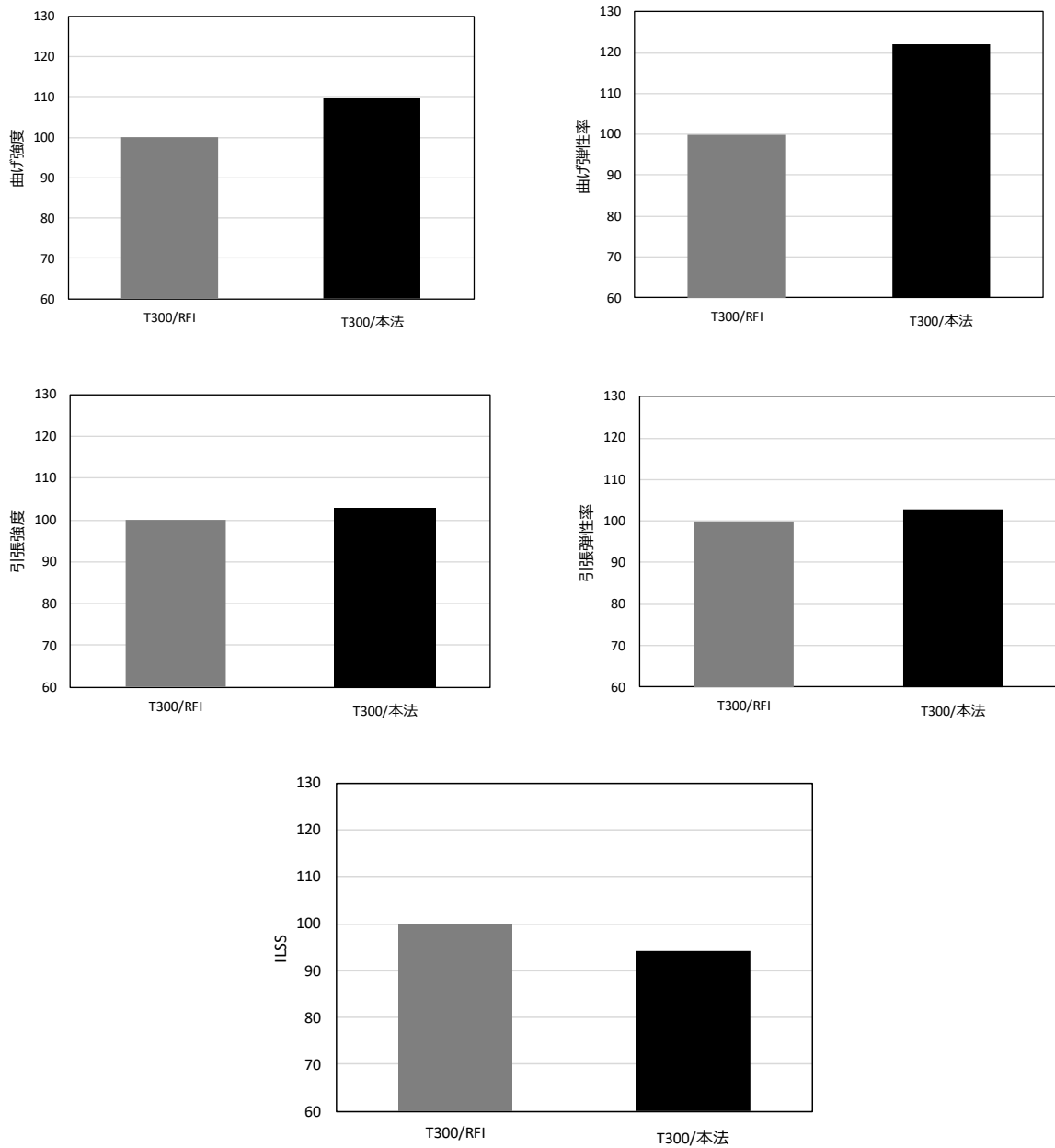


図 3-2.7.3.2-4 CFRP 平板の力学特性（上段：曲げ 中段：引張 下段：ILSS）  
（比較対象を 100 とした場合の相対値）

CFRP 平板内部の均質性は、C-scan の活用が有効であった。樹脂供給体は平板内部に残存するが、広視野 X 線 CT での検出は、難度が高いうえ検査に時間がかかった。これに対し C-scan では、図 3-2.7.3.2-5 に示す通り、樹脂供給体の健全性を簡便に追跡できた。プレス圧力 2.4MPa まで高めて意図的に内部を破損させた平板では、粗密差が明確に可視化された。

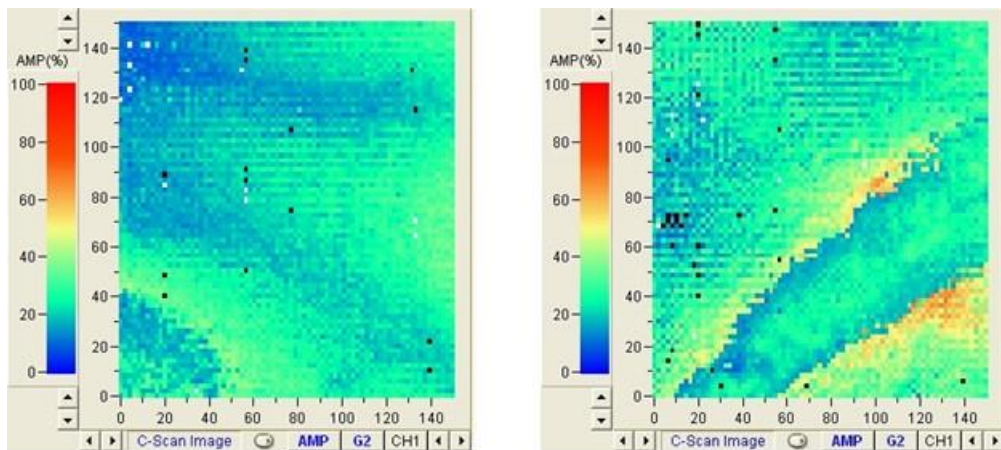


図 3-2.7.3.2-5 C-scan による CFRP のスライス画像  
 (左 : プレス圧 0.5MPa 右 : プレス圧 2.4MPa)

今後の部材成形を視野に、曲面、凹凸形状を持つ成形品を本プロセスで試作した結果を、図 3-2.7.3.2-6 に示す。予算計画の変更を受け、要素型は作製せず、保有していた不連続 FRP 向けのクラッシュカン形状の金型を用いた。流動成形を前提とする形状のため成形難度は高く、表面ピットや樹脂だまりが散見されたものの、立壁、曲面形状部分でも含浸良好な成形品を得ることができた。



図 3-2.7.3.2-6 CFRP 平板の力学特性

また、マルチマテリアル一体成形の布石として、アルミとの一体成形を試み、課題を抽出した。これは、樹脂が内部から外側に向けて流れることを利用し、最外層にアルミを設置することで、含浸と接着を同時に実現する狙いに基づく。図 3-2.7.3.2-7 に示す構成でプレス成形して得られた平板は、一部にフクレや接着不良が見られた。アルミの表面処理で接着は改善したが、フクレは完全には除けなかった。フクレは基材内部の空気が、脱気パス不足で残存したものである。アルミの表面処理時に脱気パスを作る、GF ヴェール層を挟んで電食防止と脱気パスの機能を持たせるなどの対



策は考えられるが、形状、サイズ、成形条件に応じた各論となる。アルミ一体成形は、形状や製造設備に応じた各論技術となるため、個別成形して接合させるプロセスとの、費用対効果での選択となる。

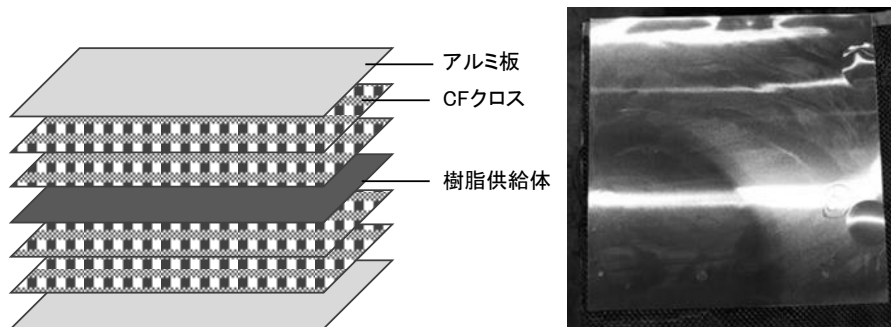


図 3-2.7.3.2-7 アルミ一体成形品の積層構成と外観

### ③含浸シミュレーション技術の開発

部材を始めとする製品設計では様々な形状を扱うため、樹脂供給体による含浸挙動をシミュレーションできる技術が必要となる。本 FS 研究では、平板での含浸挙動を定性的に理解する解析手法を構築した。本 FS 研究の特徴的な樹脂流動挙動の経時変化を、(A) 繊維束の圧縮の効果を取り入れた樹脂フローフロントの追跡、(B) ボイドの空間分布の導出、モデル化し組み合わせることで表現した。また、連続の方程式（質量保存則）に、圧縮による樹脂湧き出し項を加えて、圧縮により修正された流動場分布を表現した。

図 3-2.7.3.2-8 は、厚さ方向中央にある樹脂供給体から、一定の距離でスライスしたときのボイド分布を表している。ボイドは、面外（厚さ）方向では樹脂供給体からの距離が近いほど、面内方向では端部に近い領域で大きくなる傾向が見られた。これは、含浸が不完全な CFRP 平板を断面観察した結果（図 3-2.7.3.2-9）とよく一致した。

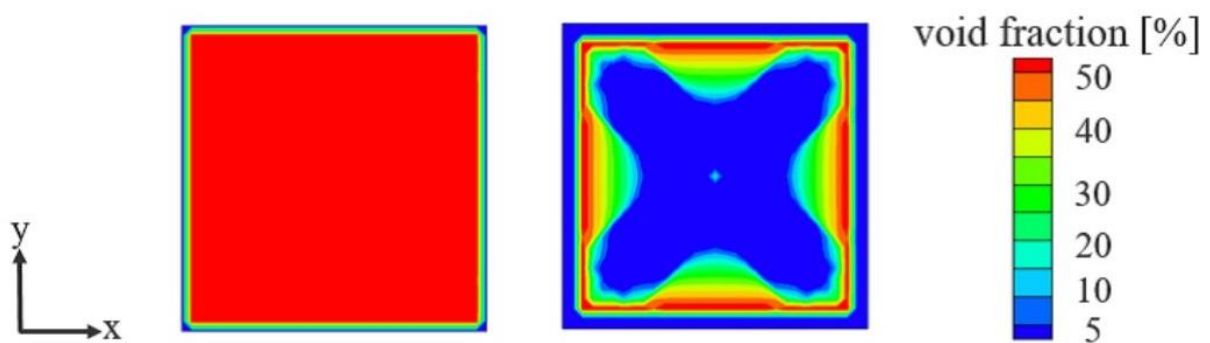


図 3-2.7.3.2-8 樹脂供給体からの距離とボイド分布の関係  
(左: 0.2mm 右: 0.4mm)



図 3-2.7.3.2-9 含浸が不完全な CFRP 平板断面の顕微鏡写真

#### 〈熱可塑性 CFRP との一体化〉

本 FS 研究は、熱可塑性 CFRP との一体化による、マルチマテリアルボディーへの適用を前提としている。本 FS 研究で得られた技術は、テーマ 28 「熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発」で構築された熱可塑性 CFRP (CFRTP) フォーム材の形状賦形技術 (図 3-2.7.3.2-10) との一体化を想定している。いずれも高速プレス成形に適合する技術であり、比重が極めて低い (水に浮く) CFRTP フォームを、本 FS 研究で構築した剛性に優れる CFRP で補強した CFRTP / CFRP ハイブリッド構造体は、優れた軽量化効果が期待できる。



図 3-2.7.3.2-10 熱可塑性 CFRP フォームのプレス成形品の例

CFRP と CFRTP の接合は、東レの保有する互いに混ざり合わない樹脂を貼り合わせるハイブリッド接合技術が適用できる。これは、異樹脂間でアンカー構造を形成させ、さらに補強繊維をアンカー部に貫通させることで、強い接合面を形成する技術である。本 FS 研究により、CFRTP、CFRP を適材適所に適用した熱可塑／熱硬化マルチマテリアルによる軽量構造体の要素技術が揃ったので、今後のテーマの中で、マルチマテリアル成形品を通してその効果を実証する。

以上により、本 FS 研究の中核である低圧・高速成形の目標は達成した。得られた知見を CFRTP とのマルチマテリアル化ならびに部材形状での性能実証に早期に適用するため、以降、CFRTP/CFRP ハイブリッド構造での自動車構造体について検討を行うこととした。

以下、テーマ番号 27C について説明する。

### ①CFRTP/CFRP 複合パネルの開発

複合パネルの概要を下記する。CFRTP/CFRP 複合パネルは、図 3-2.7.3.2-11 に示すように、CF 強化 PP (ポリプロピレン) 多孔質体からなる、低比重な CFRTP フォーム材をコアとして、高剛性な CFRP をスキンとしたサンドイッチ構造である。CFRTP フォーム材は、X 線 CT 画像 (東大撮影) に示すように、短繊維がランダムに配向した 3 次元構造を有し、軽量、高剛性、等方、均質性に加え、高膨張性、高膨張力を備えることが特徴である。また、従来材であるポリプロピレンフォーム対比、比曲げ弾性率に優れる材料である。

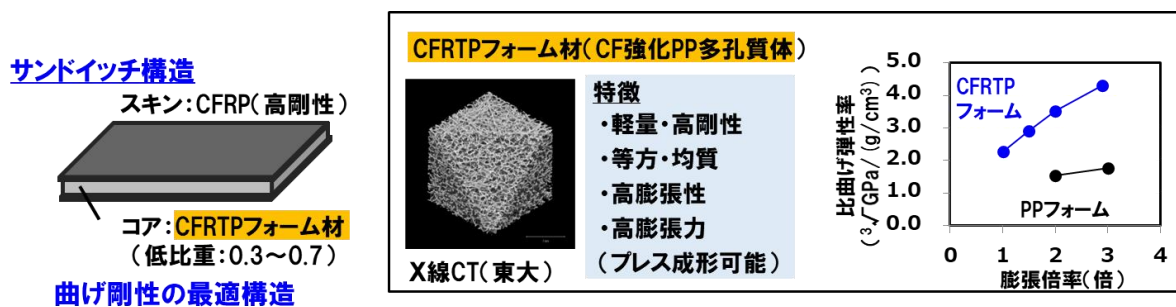


図 3-2.7.3.2-11 CFRTP/CFRP 複合パネル

CFRTP フォーム材のプレス成形性は、図 3-2.7.3.2-12 に示すように、プレス金型内に CFRTP フォーム材を配置して加熱プレスした後、型を開くと、CF の復元力で CFRTP フォーム材が自力膨張し、フォーム材でありながらプレスのみで形状賦形が可能である。

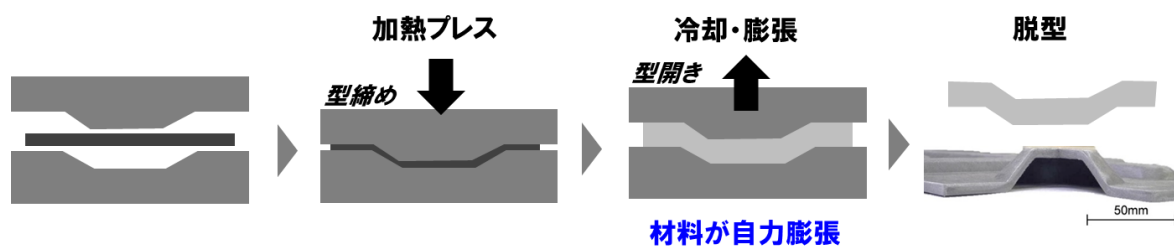


図 3-2.7.3.2-12 CFRTP フォームのプレス成形性

CFRTP/CFRP 複合パネル (平板) の製法と得られる成形品について説明する。製法は、図 3-2.7.3.2-13 に示すように、CFRTP フォーム材と CFRP の間に接着シートを挿入し、加熱加圧によりスキンとコアを接着させた後、型を開き、CFRTP フォーム材を膨張させて複合パネルを成形する。このように、プレスのみで複合パネルを接着部含めて成形することがポイントである。金型内に配置するスキンの CFRP として、熱硬化プリプレグを使用すると加熱・加圧と同時に硬化させることができ、成形効率を高めることができる。

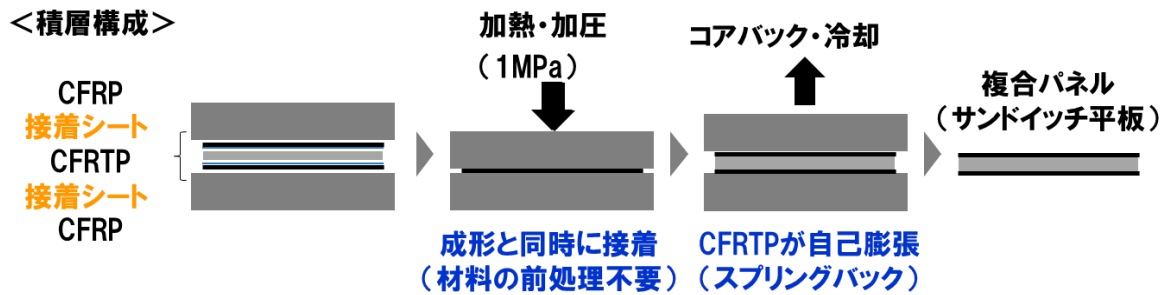


図 3-2.7.3.2-13 CFRTP/CFRP 複合パネルの製法

図 3-2.7.3.2-14 に複合パネルの成形品の外観を示すが、成形条件（温度、圧力、時間）の最適化と特定の離型フィルムを金型面と CFRP の間に配置することにより、表面品位を改善し、均質な表面を得ることに成功した。また、複合パネルの成形品の断面は、図 3-2.7.3.2-15 に示すように、健全な接合面を形成していることを確認した。

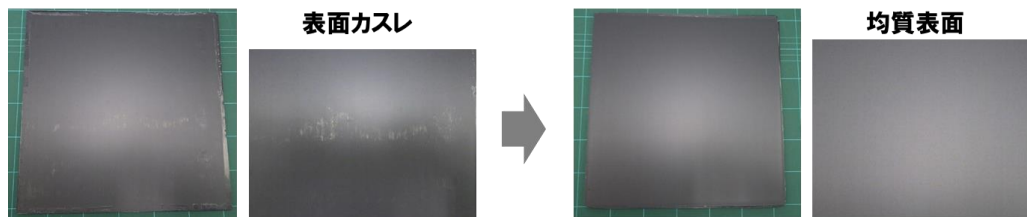


図 3-2.7.3.2-14 複合パネルの成形品（平板）

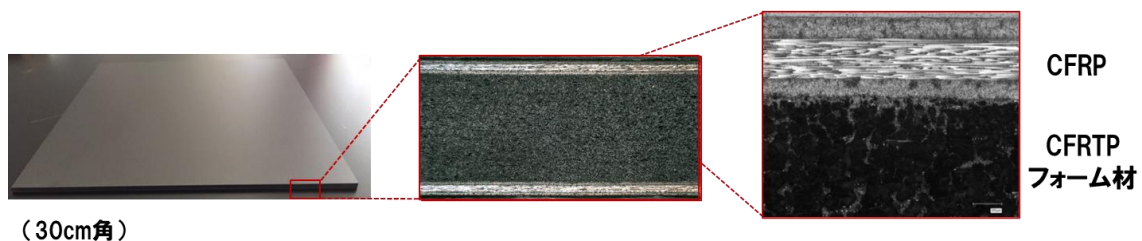


図 3-2.7.3.2-15 複合パネルの成形品（平板）の断面

#### ①-1 複合パネルのスキン／コア接合面の健全性評価

以下、複合パネルの4点曲げ試験による接合面の健全性評価について説明する。

サンプルAは、熱硬化プリプレグを片面 [0°/90°/90°/0°] となるシンメトリー構成で4ply積層してCFRPスキンとし、CFRTPフォーム材が5mm厚となる設計でプレス成形機を用いて一体成形した。得られたサンドイッチ板のスキンとコアは容易に引き剥がせない程度に接合していたが、 $L/d=16$ として4点曲げ試験を実施したところ、スキンとコアの接合部で剥離して破壊した（図 3-2.7.3.2-16）。



図 3-2.7.3.2-16 4点曲げ試験による接合面の剥離の様子（サンプルA）

サンプルBは、CFRTP フォーム材と CFRP スキンの間に接着シート（熱可塑性樹脂シート）を挿入した点がサンプルAと異なる。一体成形し、得られたサンドイッチ板は、サンプルAと同様の試験により、スキンとコアの接合部で剥離して破壊した。

サンプルCは、成形温度を高めて一体成形した点がサンプルBと異なる。得られたサンドイッチ板はサンプルBとは異なりスキンとコアの接合部で剥離せず、コア材が剪断破壊した（図 3-2.7.3.2-17）。



図 3-2.7.3.2-17 4点曲げ試験による接合面の「剥離なし」の様子（サンプルC）

複合パネルの4点曲げによる接合面の健全性評価結果を表 3-2.7.3.2-3 にまとめた。スキンとコアの間に接着シートを挿入し、比較的高温での成形で健全な接合面の形成を確認した。

表 3-2.7.3.2-3 4点曲げ試験による接合面の健全性評価

	接着シート	成形温度	曲げ強度 (-)	曲げ弾性率 (-)	接合面
サンプルA	なし	中	100	100	×剥離あり
サンプルB	あり	中	64	181	×剥離あり
サンプルC	あり	高	130	116	○剥離なし

※サンプルAに対する相対値

### ①-2 複合パネルの面外圧縮特性

CFRTP/CFRP 複合パネルの面外圧縮特性について説明する。図 3-2.7.3.2-18 に示すように、複合パネルの上下面にアルミブロックを接着して圧縮荷重を与えて、コア材は CFRTP フォーム（3倍膨張）と競合材であるポリメタクリイミド（PMI）フォームにて実施した結果、競合材である PMI フォームは特定の歪み量で降伏が確認されたが、CFRTP フォーム材では明確な降伏挙動は確認されなかった。これは、PMI フォームは独立気泡構造であり、空隙が潰れて降伏するのに対し、CFRTP フォーム材は短繊維が

ランダムに配向した 3 次元構造を有しており、面外荷重を支えることができるためと考えられる。

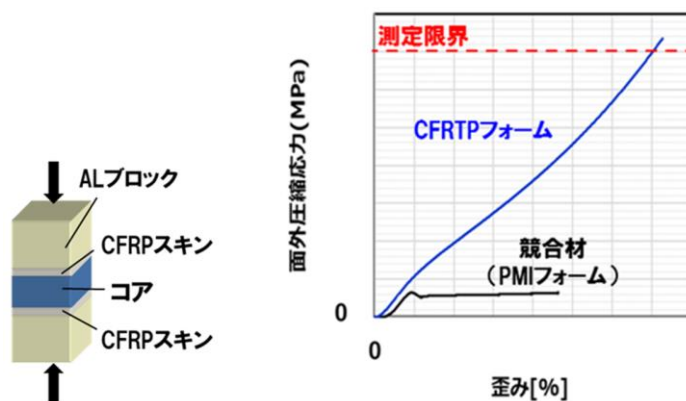


図 3-2.7.3.2-18 面外圧縮特性

### ①-3 複合パネルの衝撃特性

CFRTP フォームの発泡発泡倍率を上げると、材料としての剛性は低下する。この剛性低下は CFRTP フォームの両面を CFRP で覆う（サンドイッチ）ことによって複合パネル化によって補償できる。膨張による耐衝撃性の変化ならびに複合パネル化の影響について調べることを目的とした。なお、本材料はルーフなどの自動車部品への応用を目指しているので、衝撃性の評価には自動車用プラスチック分野で最も一般的である Izod 衝撃試験を採用した。また、近年当該分野で重視され始めている高速面衝撃試験（落錘試験）も実施した。炭素繊維複合材料分野ではこのような耐衝撃性評価は皆無に等しい。さらに両試験結果に相関性があるか否かを明らかにすることの意義は大きい。本記載の衝撃特性評価は再委託先である山形大学にて実施したものである。

#### (a) 試料

フォーム材として、表 3-2.7.3.2-4 に示すように、CFRTP フォーム 4 点、PMI フォーム 2 点を使用した。

- ・厚みが一定で（3 mm）、発泡倍率が異なる一連の試料（No. 2, 3, 5）
- ・同じ発泡倍率で（×3）厚みが異なる試料（No. 3, 4）
- ・比較試料としての PMI フォーム（No. 7, 11; 厚みが異なる）

また、複合パネルとして、表 3-2.7.3.2-5 に示すように、CFRP/CFRTP フォーム／CFRP 2 点と CFRP/ロハセル／CFRP 1 点を使用した。

表 3-2.7.3.2-4 フォーム材

RUN No.		2	3	4	5	11	7
サンプルコード		solid	F3_3	F3_5	F5	PMI_3	PMI_5
材料		CFRTP(CF/PP)			PMI		
密度	g/cm <sup>3</sup>	1.09	0.41	0.36	0.22	0.11	0.11
発泡倍率	倍	1.0	3.0	3.0	5.0	-	-
厚み	mm	3.0	3.0	5.0	3.0	3.0	3.0

表 3-2.7.3.2-5 複合パネル

RUN No.		12	13	14
サンプルコード		S6	S3	PMI_s
コア材料		CFRTP	CFRTP	PMI
スキン材料		CFRP		
密度	g/cm <sup>3</sup>	0.36	0.36	0.11
発泡倍率	倍	1.0	3.0	-
スキン厚み	mm	1.2*	0.6**	0.6**
コア厚み	mm	1.8	2.4	2.4

\*[0°/90°/90°/0°]      \*\*[0°/90°]

### (b) SEM 観察

走査電子顕微鏡 (SEM) 観察には、試料を液体窒素で冷却して破断して、破面をプラチナコーティングしたのちに SEM 観察した。

### (c) 衝撃試験

JIS に従い、デジタル衝撃試験機を用いて Izod 衝撃試験を行った。試料をラボカッターで 10mm×60mm の短冊状に切り出して、30mm から下部を固定し、上部の中央を打撃した。面衝撃試験も図 3-2.7.3.2-19 の高速パンクチャー衝撃試験機を用いて実施した。試料を正方形 (600mm×600mm) に切り出し下図のように内径 40 mm の金属リングで固定し、中心部を直径 10 mm のストライカーを高速 (36 km/h) で降下させた。ストライカーにかかる荷重 (F) を変位量 (δ) の関数として計測した。同時に下部から試料裏面の形状変化を動画として収録した。

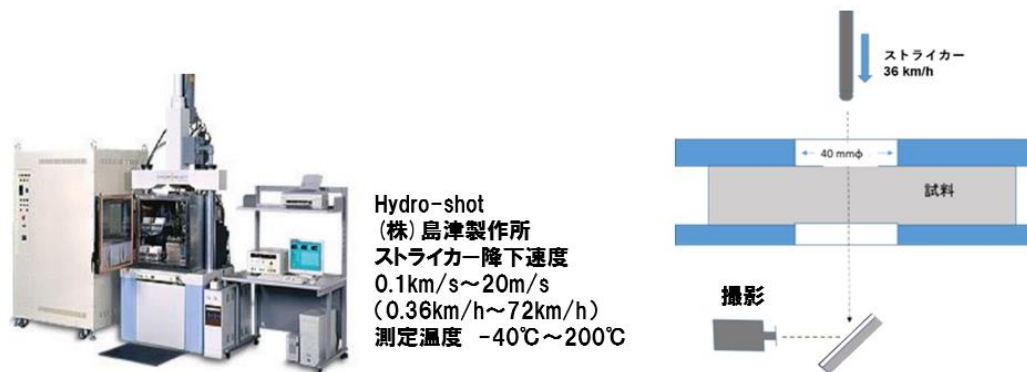


図 3-2.7.3.2-19 高速パンクチャー衝撃試験機 (山形大学)

### (d) 結果と考察

図 3-2.7.3.2-20 に代表的なパンクチャー試験結果：荷重(F)ー変位(δ)曲線を示す。PMI フォーム (青線) に比べて CFRTP フォーム (赤線) は著しく高強度であることが分かる。ストローク進行方向の一部で赤線が負側にふれているのは、ストライカーが試料を突き抜けた後に自動的に逆方向に戻る設定になっており、ストライカーと試

料の間の摩擦力を負値として計測するためである。

図 3-2.7.3.2-21 にパンクチャー試験後の、ストライカー打ち込み側（表）と突き抜け側（裏）の写真を示す。PMI では大きく成長した亀裂がみられるのに対して、CFRTP フォームでは、そのような“危険な亀裂”の成長は見られない。

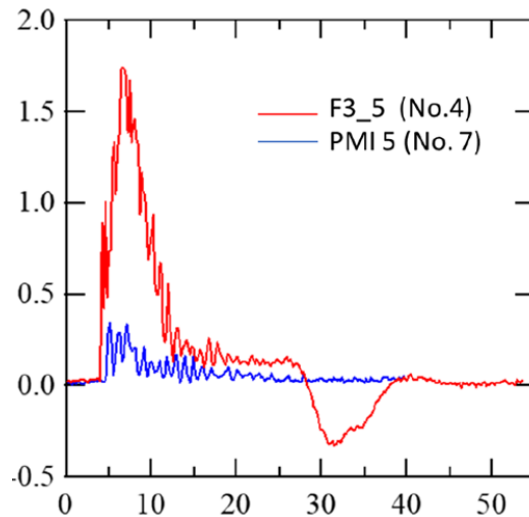


図 3-2.7.3.2-20 CFRTP フォームと PMI フォームの荷重-変位曲線

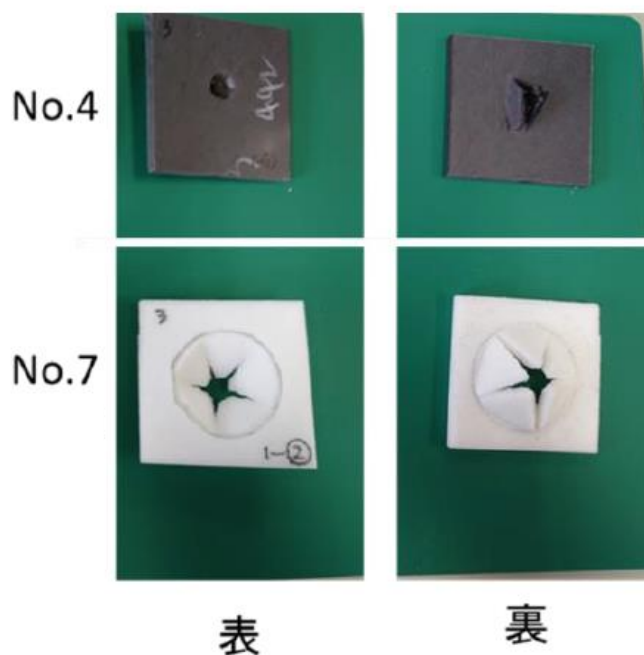


図 3-2.7.3.2-21 パンクチャー試験（図 3-2.7.3.2-20）後の試料の写真

図 3-2.7.3.2-22 に CFRTP フォームの SEM 写真を示す。100 $\mu\text{m}$  前後の空孔が見られる。これらとは別に幅 10 $\mu\text{m}$ /長さ 50 $\mu\text{m}$  の細長い空孔もみられる。おそらく CF-CF 間の剥離によってできたもの（図 3-2.7.3.2-23 参照）と考えられる。



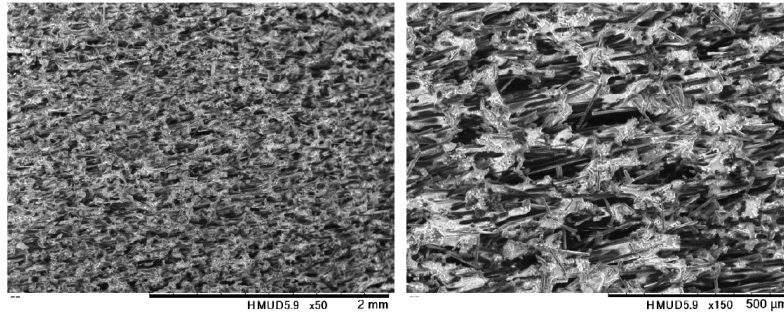


図 3-2.7.3.2-22 CFRTP フォーム (S5) の SEM 写真

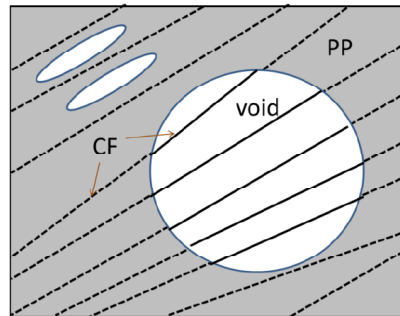


図 3-2.7.3.2-23 CFRTP フォームの構造模式図

図 3-2.7.3.2-23 の模式図は、図 3-2.7.3.2-22 の SEM 写真より CFRTP フォームの構造を描画したものである。直径 100 $\mu$ m の空孔を CF が貫通している。CF 繊維長は含侵工時に著しい切断がおこらないとすれば 7 mm、つまり空孔の 1000 倍弱の長さを有することになる。このような発泡体は他に例がなく、導電性・EMI 特性・誘電性・熱伝導性・軽量性などの視点で特徴ある材料として位置づけされる可能性が考えられる。

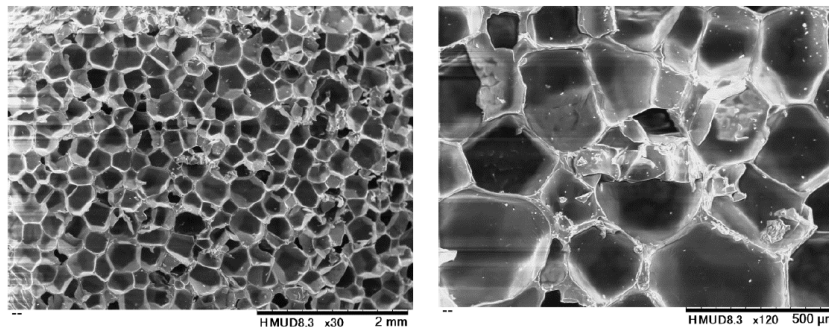


図 3-2.7.3.2-24 PMI フォームの SEM 写真

図 3-2.7.3.2-24 に PMI フォームの SEM 写真を示す。200~300 $\mu$ m の空孔がみられ、空孔間の壁の薄さからすれば、かなりの高倍率（おそらく 20 倍以上）のフォームであると推察される。上記の PMI フォームの低強度は主としてこの高発泡によると考えられる。

CFRTP の Izod 衝撃強度は図 3-2.7.3.2-25 のように発泡倍率が高いほど低くなった。パンクチャー試験の最大荷重も同様に低下した。

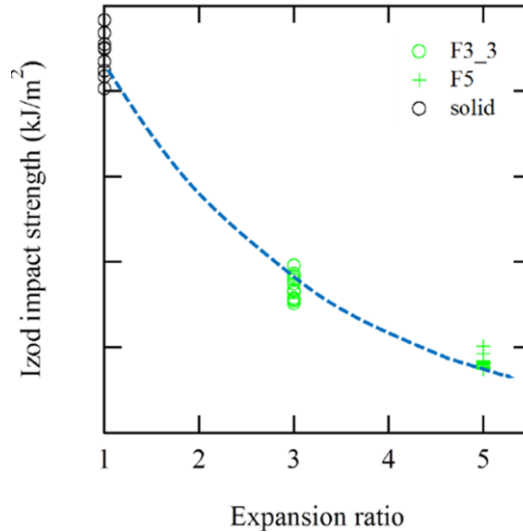


図 3-2.7.3.2-25 CFRTP フォームの膨張率と Izod 衝撃強度の関係

図 3-2.7.3.2-26 に最大荷重  $F$  を Izod 衝撃強度に対してプロットした。実線のように両者に良好な相関が見られる。これら実線上の試料は厚みが一定 (3 mm) で発泡倍率が異なっている。

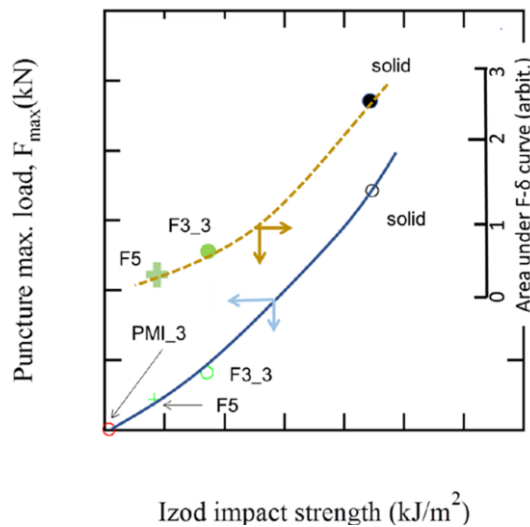


図 3-2.7.3.2-26 パンクチャー衝撃強度と Izod 衝撃強度の相関

まとめとして、図 3-2.7.3.2-27 の  $F_{max}$ -Izod 衝撃強度マップ上に以下の①～③の傾向を矢印で示した。

- ①CFRTP の発泡倍率による耐衝撃性の低下
- ②CFRTP フォームの CFRP スキンによるサンドウィッチ化による耐衝撃性の向上
- ③CFRTP スキンの厚み増加 (2ply 化) による更なる耐衝撃性の向上

スキンの厚肉化の矢印が垂直に向いていることに注目すべきである。剛直な CFRP の相対的な厚みが増すことによって  $F_{max}$  が増大するのは当然であるが、Izod 値増大には無効である。

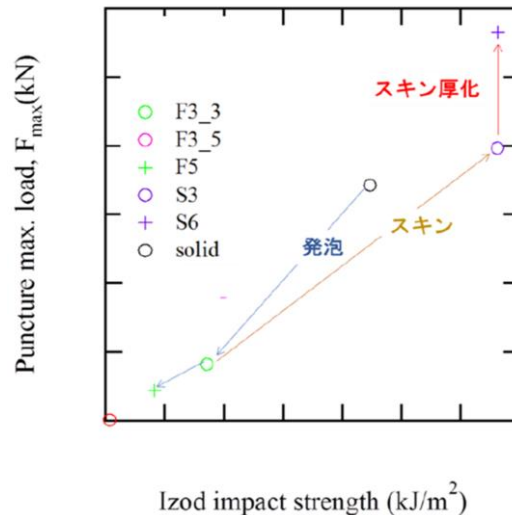


図 3-2.7.3.2-27 発泡、サンドイッチ化による衝撃特性の変化

図 3-2.7.3.2-28 に発泡前、発泡後ならびに CFRTP フォーム／CFRP サンドウィッチ（複合パネル）のパンクチャー荷重－変位曲線を示す。それぞれの曲線の下面積は衝撃エネルギーの尺度の一つであると考えられる。これら面積（相対値）を図 3-2.7.3.2-26 に破線で示した。Fx と同様に Izod 値と良好な相関を示している。つまり、これまでの限られた試料で見ると、CFRTP フォームの耐衝撃性は Fmax、F- $\delta$  曲線下の面積、Izod 衝撃強度のいずれで評価しても問題はなさそうである。

図 3-2.7.3.2-28 でさらに議論すべきは、F- $\delta$  曲線の形状そのものである。すべてのフォームは発泡前(solid)に比べて小さな変位で座屈（F の急激な低下）している。延性の低下、一種の脆化が起こっている。脆化の原因として次記の推論が考えられる。

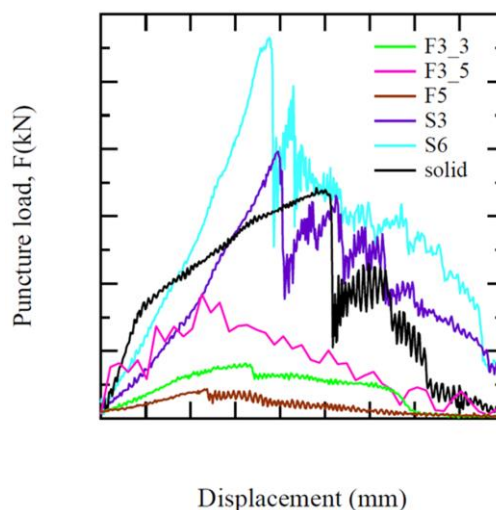


図 3-2.7.3.2-28 CFRTP およびそのフォームのパンクチャー荷重－変位曲線

スプリングバックによる発泡は面方向（xy 面）で拘束され、主として厚み方向（z 方向）のみで選択的に起こる。これによって CF 配向に異方性が生じる。つまり、z 方向に向いた CF が増えて xy 方向に向いた CF 数が少なくなる。この CF 配向の異方性

のため、小さな $\delta$ で内部破損が生じる。つまり座屈により延性が低下すると推察される。図 3-2.7.3.2-29 にパンクチャー試験後の写真を示す。

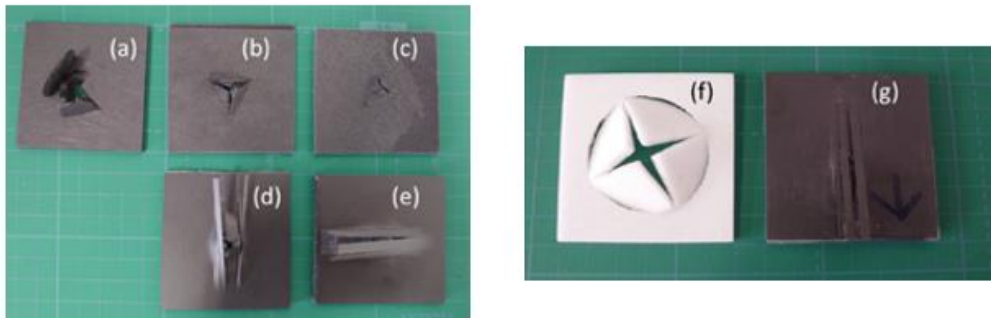


図 3-2.7.3.2-29 パンクチャー衝撃試験後の写真：ストライカー貫通面（裏）  
(a)solid, (b)f3\_3, (c)F3\_5, (d)S3, (e)S6, (f)PMI\_3, (g)PMI\_s

さらに、複合パネルの耐衝撃性に及ぼす衝撃速度や環境温度の影響について評価した。CFRTP コアは粘弾性体である PP を母材としているので、材料特性が温度や変形速度に大きく依存すると考えられ、この依存性が顕著であれば、耐寒性や衝突安全性の観点から自動車部材として採用が困難となる。温度・速度依存性の評価は必要不可欠な研究課題であると考えられる。

面衝撃試験を図 3-2.7.3.2-19 の高速パンクチャー衝撃試験機を用いて実施した。試料を正方形（600mm×600mm）に切り出し、右図のように内径 40mm の金属リングで固定して、中心部に向けて直径 10 mm のストライカーを一定速度で降下させた。ストライカーにかかる荷重を変位量の関数として計測した。試料室温度を -30℃ ~ 50℃、ストライカー降下速度を 0.5~72km/h と変量した。

図 3-2.7.3.2-30 に示すように、複合パネルの衝撃試験の速度依存性（0.5~72km/h）と温度依存性（-30~50℃）を評価した結果、衝撃強度にいずれも大きな変化は見られず、自動車部材として好ましい結果と考えられた。

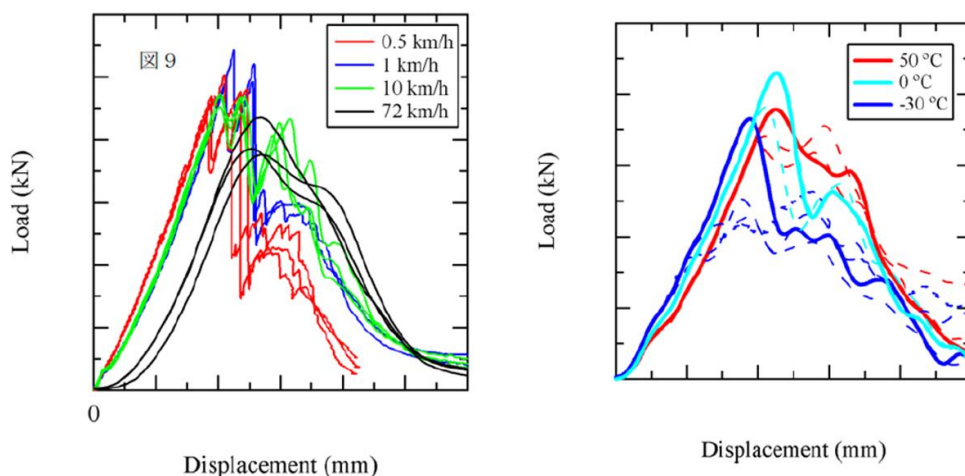


図 3-2.7.3.2-30 複合パネルの衝撃試験  
(左：速度依存性、右：温度依存性、山形大学データ)

### ①-4 遮音性

EV車の普及につれて、自動車の静粛性は著しく向上するが、一方で今までエンジン音でかき消されていたロードノイズ（700～1200Hz）やルーフの雨音等（1000～2000Hz）の騒音が課題となり始めており、複合パネルの位置づけを明確にする必要がある。そこで、**図 3-2.7.3.2-31** 左に示す透過損失を指標として、遮音性の評価を実施した。複合パネルは、CFRP スキンを片側 0.6mm、CFRTP コアを 3.8mm とし、トータル厚み 5.0mm とした。比較材として、スチール 0.8mm を用いた。

**図 3-2.7.3.2-31** 右に示すように、複合パネルは従来スチールよりも透過損失が高く、遮音性のポテンシャルを確認した。

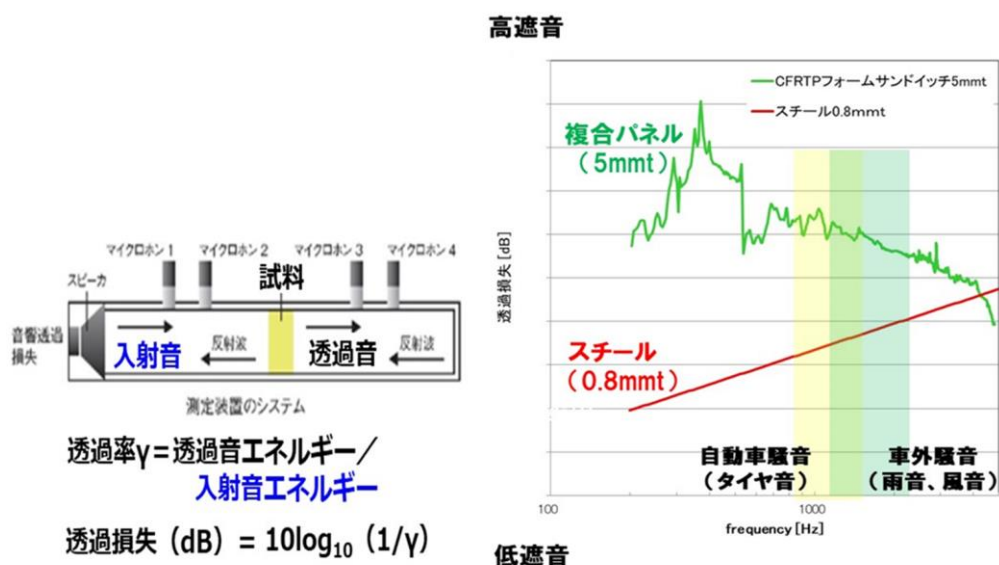


図 3-2.7.3.2-31 複合パネルの遮音性評価

### ①-5 吸音性

前項に続き、2022年度に CFRTP コア材の特徴である微少かつ均質な空隙構造が、多孔質吸音材に類似していることに着目し、吸音率の測定を実施した。**図 3-2.7.3.2-32** に車内空間における吸音材の適応部位を示す。一般論として車体が影響を受ける音域は 10～10000Hz と広域であるものの、重要視されるのは 50～2000Hz 付近のロードノイズ（タイヤと路面の摩擦音）とされている。他には走行中の風切り音やエンジンの放射音とされている。

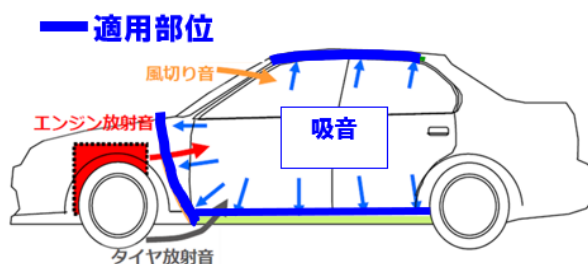


図 3-2.7.3.2-32 自動車における吸音材の配置位置

CFRTP コア材の吸音性を測定し、自動車への適応を考察するべく、日本音響エンジニアリング株式会社にて、吸音率の測定を行った。また、多孔質構造体の吸音特性発現の指標である、迷路度、流れ抵抗の測定を実施した。

### (a) 迷路度

迷路度は、多孔質体の構造中における空隙の緻密性（複雑さ）を表す指標であり、多孔質体に超音波パルスを入力し、多孔質体の有無における透過までの速度差により、以下の式にて求める。迷路度が高いほど、内部構造が緻密（複雑）であることを表す。

$$\alpha_{\infty} = \left(\frac{C_0}{C}\right)^2 \cdot (l - 2\varphi)$$

ここで、 $\alpha_{\infty}$ は迷路度、 $C_0$ は空気中の音速（m/s）、 $C$ は材料中の見かけの音速（m/s）、 $\varphi$ は loss angle of complex wave number である。なお、 $\varphi$ は 1 より十分に小さく、測定上は無視される。

### (b) 流れ抵抗

流れ抵抗は多孔質体中の空気の流れにくさを表す指標であり、言い換えると通気度に相当する。多孔質体に微風速を与えてその前後の圧力差を測定する手法であり、ISO9053 に定められる。測定により得たパラメータを以下の式に代入して求める。流れ抵抗が高いほど、内部構造に通気性が低く、音波が通りにくいことを表す。

$$Rf = p/(d \cdot v)$$

ここで、 $Rf$ は流れ抵抗（ $N \cdot s/m^4$ ）、 $p$ は材料前後の圧力差（ $N/m^2$ ）、 $d$ は材料厚み（mm）、 $v$ は風速（m/s）。

迷路度および流れ抵抗の測定水準及び結果を表 3-2.7.3.2-6 に記す。CFRTP コア材の空隙率を変化させたものを中心に測定し、対比材として自動車天井材の内部に使用される硬質フェルト（2種）を測定項目に加えた。

表 3-2.7.3.2-6 迷路度および流れ抵抗の測定水準および結果

		1	2	3	4	5
サンプルコード		CFRTP50	CFRTP65	CFRTP80	H-Felt	S-Felt
材料		CFRTP(CF/PP)			硬質フェルト	
密度	$g/cm^3$	0.54	0.36	0.22	0.22	0.08
発泡倍率	倍	2.0	3.0	5.0	-	-
厚み	mm	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
迷路度	-	85	100	170	60	51
流れ抵抗	$N \cdot s/m^4$	417	100	2.2	1.5	0.1

※迷路度、流れ抵抗はサンプル 2 を 100 としたときの相対値

測定結果をまとめたものを図 3-2.7.3.2-33 に示す。CFRTP コアは空隙率を変化させることで多孔質体として、迷路度（緻密性）、流れ抵抗（通気度）を変化させることができ、空隙率が高いほど、空気（音波）を複雑な材料内に通気（侵入）させることができることが分かり、吸音率の向上に期待が持てることが分かった。既存硬質フェルトが流れ抵抗のみに優れた値であった。

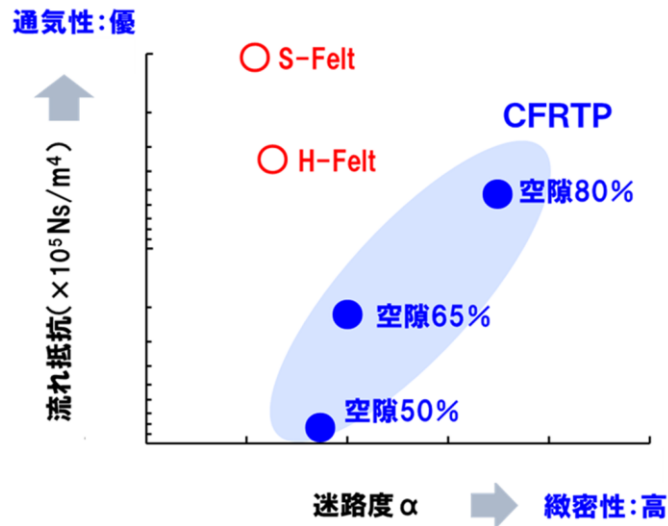


図 3-2.7.3.2-33 CFRTP の迷路度と流れ抵抗の関係

### (c) 吸音率

迷路度、流れ抵抗の測定に用いた水準の内、CFRTP コア材について、ISO10534-2 「音響管による音響インピーダンス測定」に基づき、垂直入射級率を測定した。図 3-2.7.3.2-34 に測定装置の概略を示す。測定は剛壁に測定サンプルを直接設置（背面層を設けない）することで、材料そのものの吸音性能の測定をおこなった。

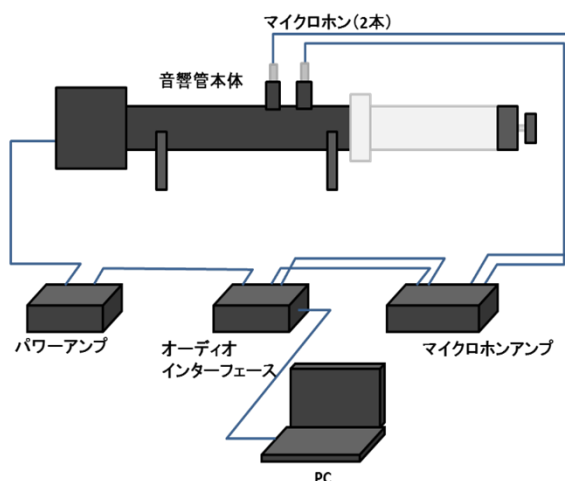


図 3-2.7.3.2-34 吸音率測定装置の概略

測定結果を図 3-2.7.3.2-35 に示す。CFRTP コア材と硬質フェルトとの比較において、素材や迷路度、流れ抵抗などとの相関はなく、同様の吸音性能となった。吸音性のグラフから空隙率 50%の空気（音波）を通しにくい水準においても、吸音性が測定され

ていることから、現実を即していると考えにくい結果となった。そのため、測定方法を変更して、再度測定を実施した。なお、硬質フェルトは迷路度、流れ抵抗にて測定した柔軟層（S-Felt）と剛直層（H-Felt）を実際の使用時と同様に積層して測定した。

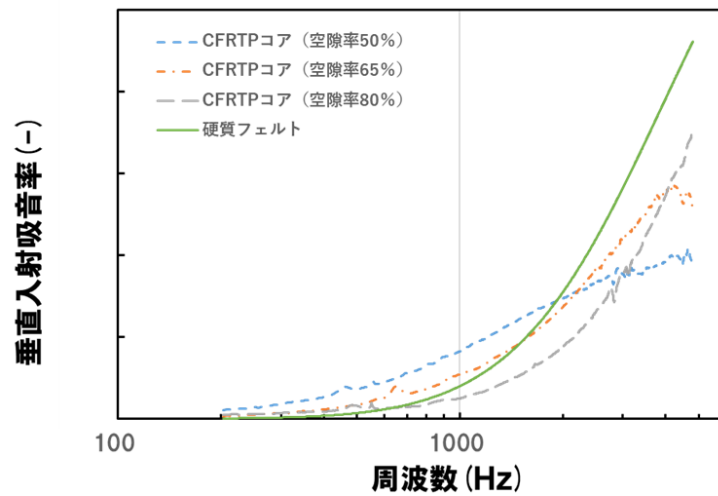


図 3-2.7.3.2-35 吸音率測定結果（背面層なし）

空気の侵入と内部構造の緻密性を活用した測定方法として、図 3-2.7.3.2-36 に示すように、吸音管内において、評価サンプルの背面層に空間を設けて測定を実施した。これは吸音構造体として音波の波長を考慮した測定方法であり、ターゲットとする周波数（ロードノイズの中心である 1000Hz 付近）の吸音を考慮した。

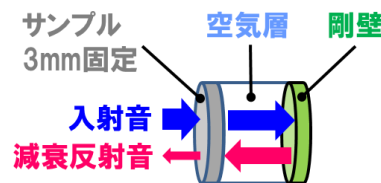


図 3-2.7.3.2-36 吸音率測定方法（背面層 50mm）

本測定方法において、CFRTP コア材について、迷路度、流れ抵抗測定の結果を反映し、空隙率が高いほど、吸音率に優れる結果となった（図 3-2.7.3.2-37）。これは、流れ抵抗が低いことにより、CFRTP コア材内に空気（音波）の侵入が容易となり、さらに迷路度が高いことで音波が CFRTP コア材内を複雑に進み材料内で音響エネルギーが熱エネルギーとして吸収されたためと考えられた。これは、空気伝搬音の抑制メカニズムと同様である。



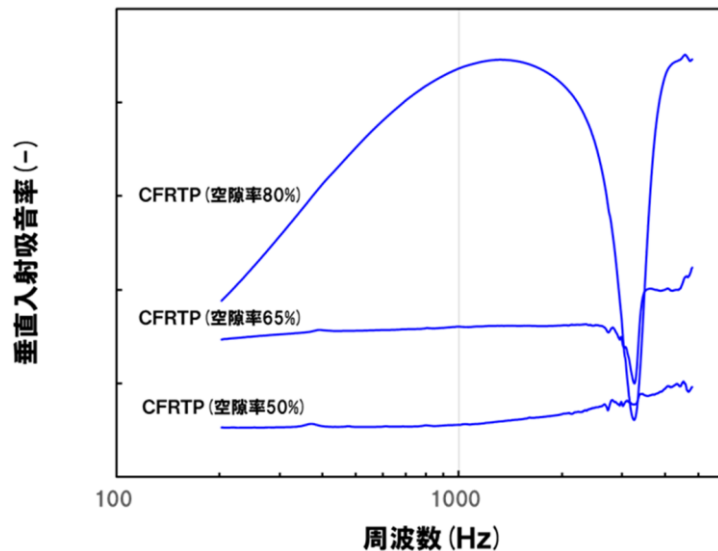


図 3-2.7.3.2-37 CFRTP コア材の周波数と吸音率の関係

## ②CFRTP/CFRP 複合パネルの形状賦形

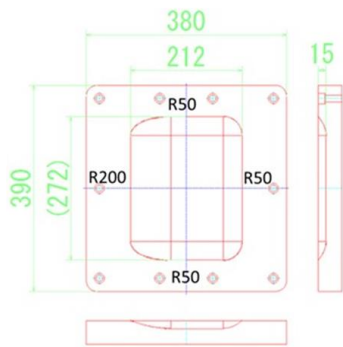
本プロジェクトにて開発した CFRP/CFRTP サンドイッチ構造を基準として、自動車ルーフ形状の形成を行うためにこれらの形状賦形に関する検討を東レ（株）及び（株）タカギセイコーの共同で実施した。CFRP/CFRTP サンドイッチ構造の成形を実現させるためには、以下の手法が考えられる。

- (a) CFRP と CFRTP を個別に形状賦形し、その後に接着剤などを用いて接着接合する手法
- (b) 形状賦形した CFRTP の表面にプリプレグ（CFRP 原料）を配置し、オートクレーブにより硬化と接着を行う手法
- (c) プリプレグと CFRTP を一度にプレス機に投入し、賦形と接着接合を同時に行う手法

上記のいずれにおいても形状の実現が可能と考えられるものの、設備が簡単であることや熱可塑性樹脂を用いた CFRTP の成形加工の実績から、上記（c）のプリプレグと CFRTP を一度にプレス機に投入し、賦形と接着接合を同時に行う手法を選択し、自動車ルーフ形状を作製への事前検討として、賦形性の確認検討を試みた。

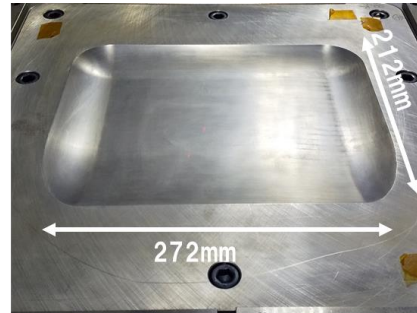
本検討では、成形方法を選択し、実現させる形状を勘案した上で求められる立体形状の要素検討として、図 3-2.7.3.2-38 に示すように、R 部を有する要素金型を用いて成形検討を実施した。ここで、使用したプレス成形機は、機構上盤面の稼働精度が高いことから、株式会社アミノが所有している「トグル式サーボプレス装置」を使用した。

**R部を有する要素金型で検証**

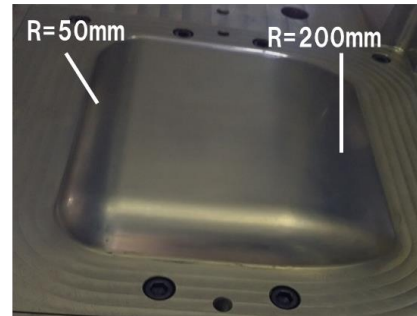


**立体形状検討用金型**  
(タカギセイコー社)

**金型(上)**

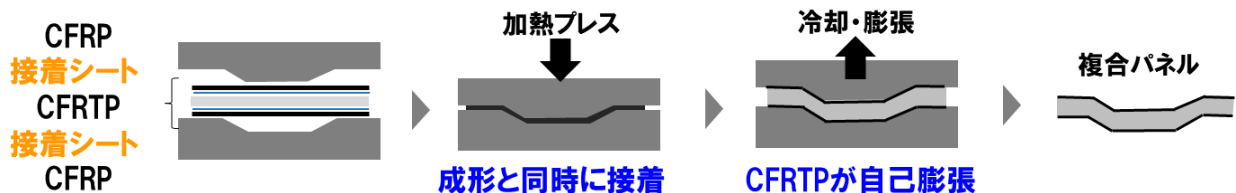


**金型(下)**



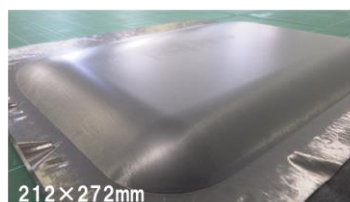
**図 3-2.7.3.2-38 R部有する要素金型**

立体形状の製法は、図 3-2.7.3.2-39 に示すように、複合パネルの平板成形と同様に、接着シートをスキンとコアの間に挿入して、加熱プレスにて成形と同時に接着させ、型開きをおこない、CFRTP を膨張させることで作製した。CFRTP は、金型に賦形しやすいように予め熔融させて使用した。

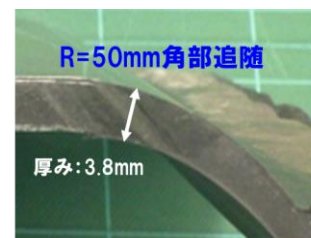


**図 3-2.7.3.2-39 複合パネル（立体形状）の製法**

成形検討を推進した結果、成形条件（温度、圧力、時間）の最適化により、図 3-2.7.3.2-40 の写真に示すように、表面平滑な成形品を得ることに成功し、また、R=50mm の角部でも追従して、ルーフ形状の曲面追従が可能であることが分かった。また、成形品の厚みは 3.8mm±0.1mm を再現性よく成形できた。



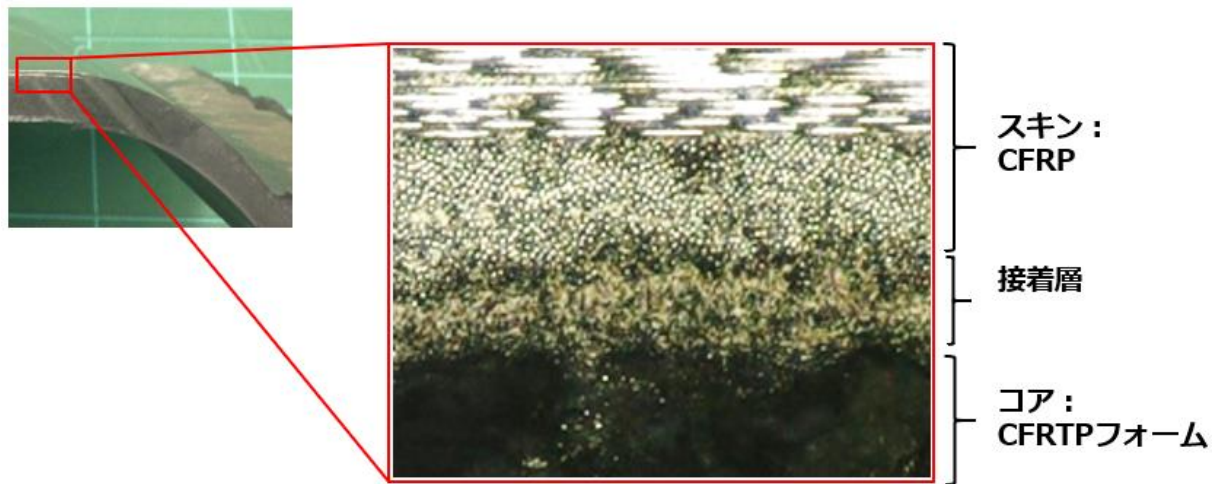
**表面平滑**



**ルーフ形状の曲面追従が可能**

**図 3-2.7.3.2-40 立体形状成形品**

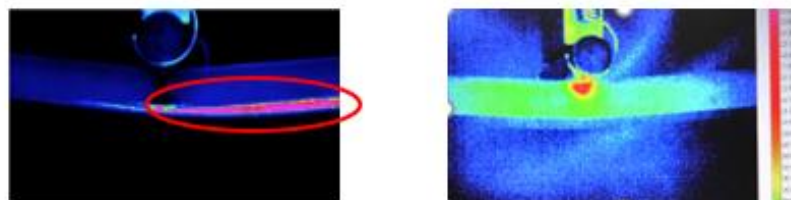
成形品の断面写真を図 3-2.7.3.2-41 に示す。スキンとコアが接着層を介して接合しており、接合面の健全性を確認した。



接着層を介してスキンとコアが接合

図 3-2.7.3.2-41 立体形状成形品の断面写真

次に、図 3-2.7.3.2-42 に示すように、サーモビューアでの 3 点曲げの破壊起点の可視化によるスキン／コアの接合の健全性を評価・観察する手法の確立をおこなった。また、図 3-2.7.3.2-43 左に示すように、3 点曲げ衝撃試験により、複合パネルは延性的な破壊挙動を確認し、スキン／コアの健全性の効果を示した。



他材: スキン/コアの剥離

複合パネル: 剥離なし

図 3-2.7.3.2-42 サーモビューアでの 3 点曲げの破壊起点の可視化  
(東京大学データ)

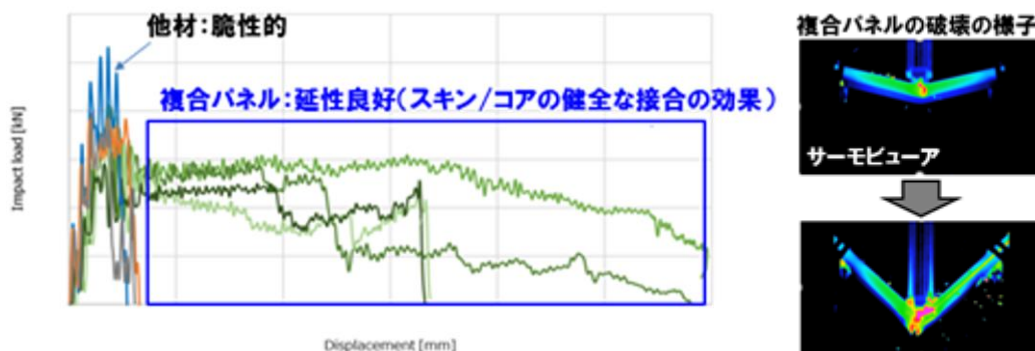


図 3-2.7.3.2-43 複合パネルの 3 点曲げ衝撃試験  
(左; 変位-荷重、右; 破壊の様子、東京大学データ)

### ③CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の形状設計

CFRTP/CFRP 複合パネル材料およびその賦形手法の開発と並行して、ターゲット部材としてルーフパネルを選定し、材料の性能を最大限発揮できる構造設計により、50%軽量化のシミュレーションと図面化を実施した。軽量化に関する解析は株式会社富士テクノリサーチに外注した。以下、詳細を説明する。

ベンチマーク部材として、**図 3-2.7.3.2-44** に示すように、普通自動車のスチール製ルーフを購入し、3D 形状計測ならびに CAD 化を行った。フローを**図 3-2.7.3.2-45** に示す。

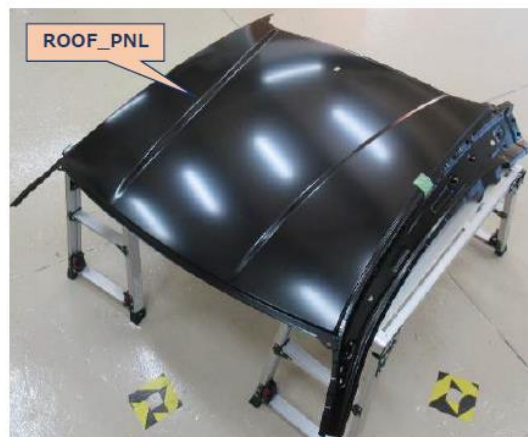


図 3-2.7.3.2-44 ベンチマーク部材

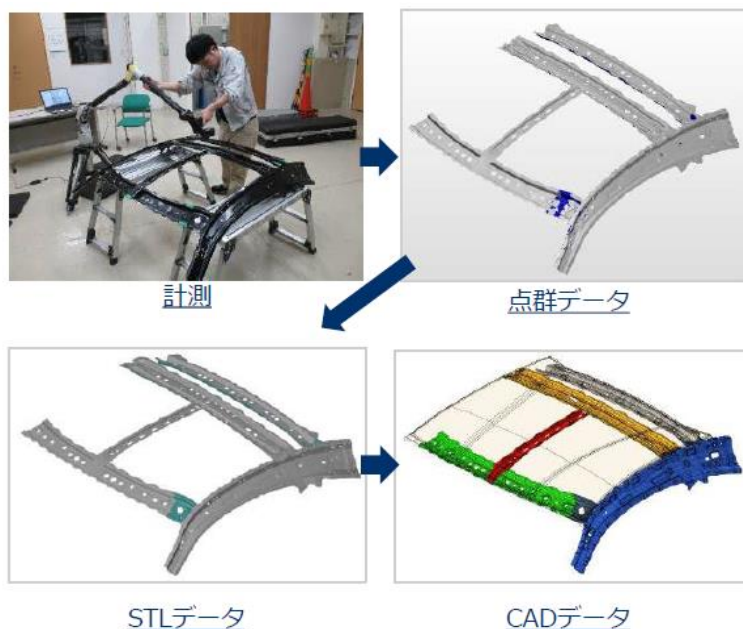


図 3-2.7.3.2-45 3D 形状計測とデータ処理の流れ

上記作成した CAD データを用いて、**図 3-2.7.3.2-46** に示すように解析モデルの作成を行った。部品の板厚中心にシェル要素でモデル化し、断面特性は計測した厚さを設定し、材料特性は材料に即した値をそれぞれ設定した。本検討における積層構成は

[90°/0°/CFRTP/0°/90°] とした。

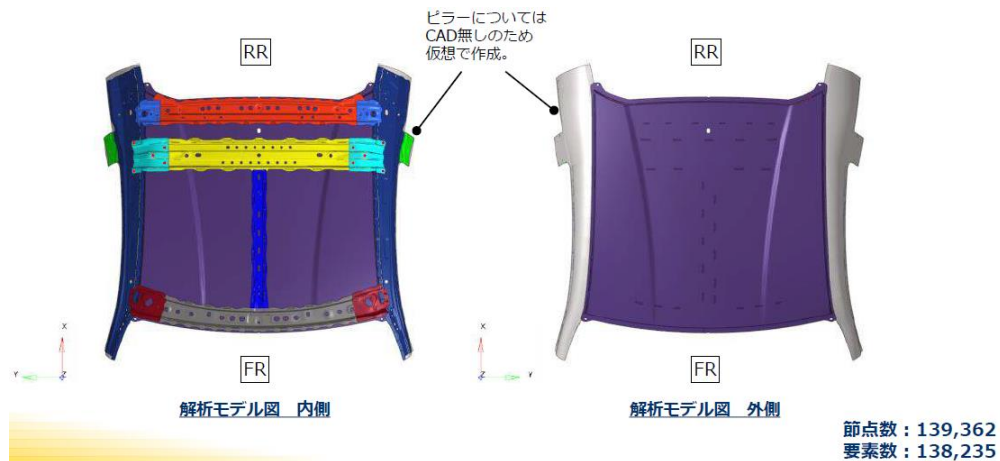


図 3-2.7.3.2-46 解析モデル

CAE 解析は、スチールから複合パネルへの材料の置き換えを行っても、面剛性、点剛性、衝突性が損なわれないように、50%軽量化実現可能な最適構造設計を成形技術と連動させて実施した（表 3-2.7.3.2-8）。

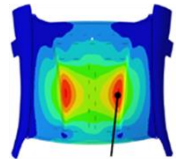
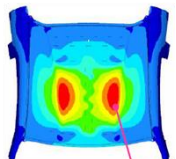
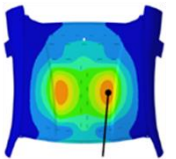
表 3-2.7.3.2-8 CAE 解析評価概要

評価項目	剛性性能評価1	剛性性能評価2	衝突性能評価
解析種類	静解析	静解析	衝突解析
荷重条件	面荷重条件 (積雪荷重を表現)	圧子荷重条件 (手押し荷重を表現)	バリア強制移動 (車両転倒を表現)
荷重値	重量140kg	変位量1.0~2.5mm (スチールが降伏する条件で決定)	ピーク荷重が確認できるまで ストローク
材料特性	弾性材	弾性材	弾塑性材
解析イメージ	<p>FRONT view</p>	<p>BOTTOM view</p>	<p>FRONT view</p> <p>SIDE view</p>
評価指針	<ul style="list-style-type: none"> <li>●変位量</li> <li>●塑性・損傷起点到達率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●損傷起点到達率</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●ピーク荷重</li> <li>●エネルギー吸収量</li> </ul>

CAE 解析によると、衝突性能よりも剛性性能の方がクリティカルであったため、剛性性能を基準にして解析を進めた。表 3-2.7.3.2-9 に示すように、スチール製のベンチマークから複合パネルへの単純置き換えでは、曲げ剛性が 55%に減少するが、コア層を厚くする設計により、剛性がアップし、全体板厚 1.9mm にて等価剛性を実現でき、74%の軽量化を得られる解析結果を得た。

表 3-2.7.3.2-9 CAE 解析結果

外注先: 富士テクニカルリサーチ

狙い	ベンチマーク	ハイブリッド材への単純置換	コア層を厚くして剛性アップ
構成	スチール製	CFRP/CFRTP/CFRP (0.26mm/0.13mm/0.26mm)	CFRP/CFRTP/CFRP (0.30mm/1.3mm/0.30mm)
板厚	0.65mm	0.65mm	1.9mm
剛性評価 (面荷重)	 最大変位: 1(相対値)	 最大変位: 2.3	 最大変位: 0.9
曲げ剛性	100(相対値)	55	100
重量	5.7kg	0.9kg(-84%)	1.5kg(-74%)

50%軽量化に目処

さらに、オプションの要素として、高温環境下（80℃）で CFRP/CFRTP サンドイッチ構造体の材料特性が 20%低下することを前提に再解析を実施し、板厚 2.7mm（スキン層 0.6mm、コア層 2.1mm）、67%軽量化のシミュレーションを得た。図 3-2.7.3.2-47 にルーフ形状の最終設計図面を示す。本図面を元にルーフを試作して、部材としての軽量性を実証していくこととした。

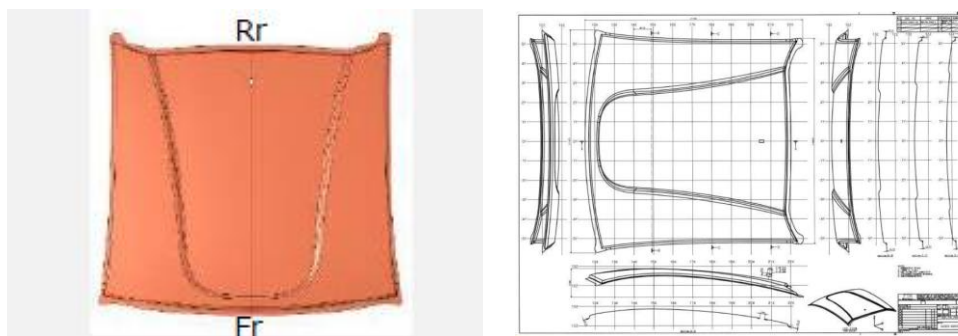



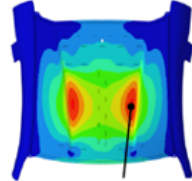
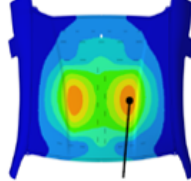


図 3-2.7.3.2-47 ルーフ形状の最終設計図面

さらに、表 3-2.7.3.2-10 に示すように、ユーザー目線の設計により、面内剛性も考慮した設計に変更して、50%軽量化が実現できる最終仕様を決定した。

表 3-2.7.3.2-10 ルーフの形状設計

	現行スチール	初期設計 (材料メーカー目線)	最終設計 (ユーザー目線)
構成	 ヤング率206GPa 比重7.48	 CFRPスキン(0.3mm) CFRTPコア(1.3mm)	 CFRPスキン(0.6mm) CFRTPコア(1.1mm)
剛性評価 (面荷重)	 最大変位:1(相対値)	 最大変位:0.9	仕様変更のポイント 面内剛性を確保のため、 スキン層に高弾性率C Fの使用、厚み増加
厚み (mm)	0.65	1.90	2.30
重量(kg)	5.7kg	1.5kg (-74%)	2.8kg (-50%)

④CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の成形

④-1 実大ルーフの仕様

前項にて設計した自動車ルーフ形状を用いて実寸サイズの CFRTP/CRFP サンドイッチ構造の自動車ルーフの成形検討を実施した。

〈使用材料〉

- ・ CFRP：一方向性炭素繊維プリプレグ①（東レ“トレカプリプレグ”）
- ・ CFRP：一方向性炭素繊維プリプレグ②（東レ“トレカプリプレグ”）
- ・ CFRTP：東レ研究開発品、ポリプロピレン樹脂仕様

〈使用装置〉

- ・ プレス装置：1200 トン油圧プレス装置（川崎油工（株）製）（図 3-2.7.3.2-48 左）
- ・ 成形金型：ルーフ形状金型（図 3-2.7.3.2-48 右）

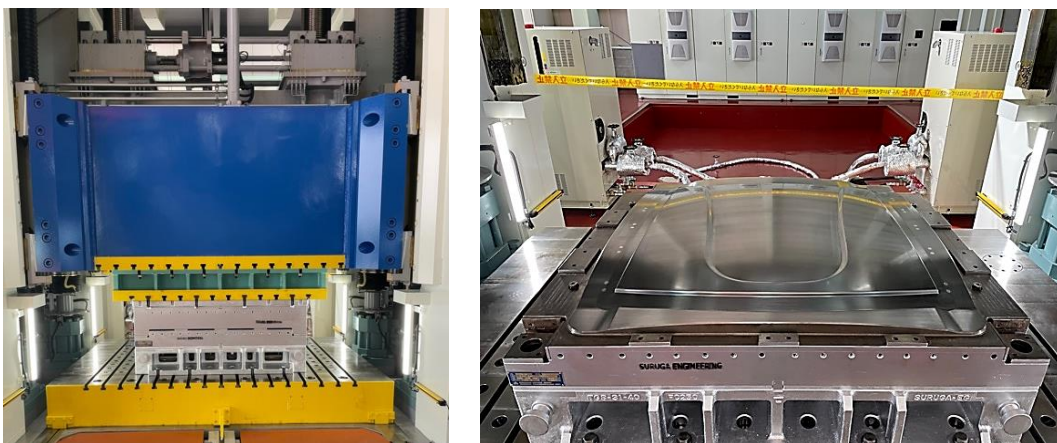


図 3-2.7.3.2-48 成形インフラ（左：プレス装置、右：成形金型）

### 〈ルーフ構成〉

以下の2種類を設定した。タイプ1が面外剛性を考慮した上でスチール材対比、軽量化率50%を達成する構成であり、タイプ2は面内剛性を考慮した上で、軽量化率50%を達成する構成となる。

- ・タイプ1：[0/0/90/90/CFRTP/90/90/0/0]
- ・タイプ2：[0/±45/90/CFRTP/90/±45/0]

数字はCFRPの繊維の配列方向であり、0°は車体進行方向に相当する。タイプ1については、タイプ2とCFRPの厚みを合わせるために0°を2層、90°を2層ずつ積層した。

### 〈成形条件〉

上記構成におけるプレス成形条件の導出を行った。成形条件は大別すると以下のA、B、Cのパラメータに分けられる。

#### A.成形圧力

成形材料を金型形状に賦形するために必要な圧力であり、成形品の投影面積に対する荷重である。一般的に面圧(MPa)で表す。

#### B.成形温度

本項では金型温度を指す。本検討では熱硬化性CFRP(プリプレグ)の硬化可能温度と溶融したCFRTPコア材固化温度により決定される。

#### C.成形時間

金型内に保持される時間の合計である。成形温度における熱硬化性CFRP(プリプレグ)の脱型可能時間と溶融したCFRTPコア材固化時間に関連づけられる。

上記パラメータから、熱硬化性CFRPの推奨硬化時間の異なる2種について検討を実施し、成形条件を導出した。水準と結果を表3-2.7.3.2-11に記す。

上記検討から、成形の基本条件を得ることができたため、成形品の採取を開始した。



表 3-2.7.3.2-11 成形条件検討水準

		#1	#2	#3	#4
スキン材	CFRP	①	①	①	①
コア材	CFRTP	CF/PP	CF/PP	CF/PP	CF/PP
積層構成	タイプ	1	1	1	1
成形温度	-	低	中	高	高
成形圧力	-	中	中	低	中
成形時間	-	長	長	長	短
賦形状態	○×	○	○	○	○
表面状態	○×	×	×	×	×
その他	-	未硬化	-	-	厚みムラ

		#5	#6	#7	#8
スキン材	CFRP	①	①	①	②
コア材	CFRTP	CF/PP	CF/PP	CF/PP	CF/PP
積層構成	タイプ	1	1	2	1
成形温度	℃	高	高	高	中
成形圧力	MPa	中	高	中	中
成形時間	分	長	長	長	短
賦形状態	○×	○	○	○	○
表面状態	○×	○	○	○	○
その他	-	-	角良好	-	-

〈成形実証〉

図 3-2.7.3.2-49 に成形品を示す。成形品の品質としては、CFRTP コアに分割部があるため継ぎ目部分がはっきり分かり、CFRTP コアの表面状態が CFRP スキンの表面形状に影響を与えていることがわかる (図 3-2.7.3.2-49 左)。成形条件を調整した水準に関しては、成形材料にしっかりとプレス装置からの圧力が加わることで金型キャビティ内にて材料表面と金型表面の間に空間が発生していないため、中心部の基材分割線を最小限に抑えることができている (図 3-2.7.3.2-49 右)。ただし、この現象については、CFRTP を 1 枚構造とすることで改善される見込みがある。



図 3-2.7.3.2-49 ルーフ成形品（左：条件調整前、右：条件調整後）

ISMA との議論を進めることで、外板部材の要求形状として、自動車ルーフにおいてその端部は同一素材により構成されている必要があることが分かった。理由は外的要因であり雨水、雰囲気中の湿気などからルーフ内部に水分が侵入し、特に冬期ではこれら水分が凍結し、コア材の破損やスキン層の剥がれの要因となるためである。

そのため、これまでは CFRTP/CFRP 構成の自動車ルーフにおいて、端部においても [CFRP/CFRTP/CFRP] の三層構造となっていたものを、端部は CFRP のみ、天井部分を [CFRP/CFRTP/CFRP] の構成とすることとした。しかし、既存金型ではキャビティ厚みが等厚みで設計してあるため、成形品として薄くなってしまい、スキン層の端部のみ成形することが困難である。そのため、金型にシムプレートを設置して、端部である外周部をコア材の厚み分のみ薄くすることとした。

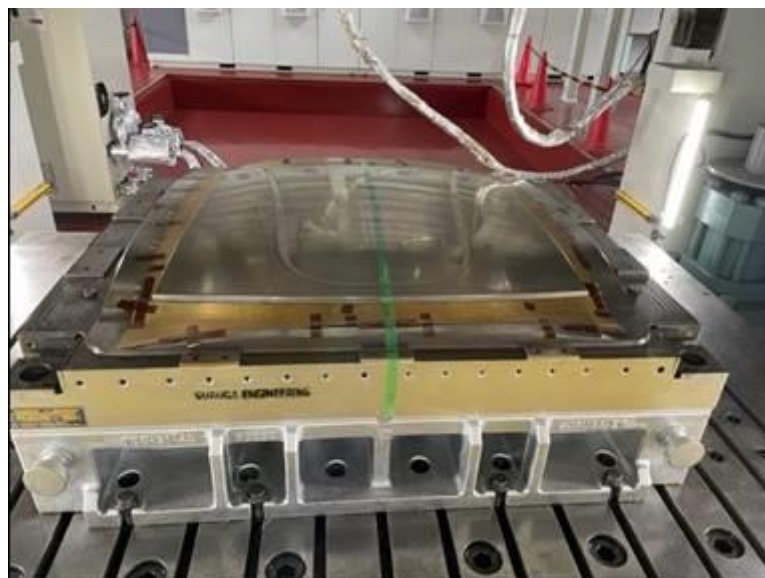


図 3-2.7.3.2-50 金型にシムプレートを設置した様子

図 3-2.7.3.2-50 の金型構成である周囲シム設置とし、材料構成、成形条件はこれまでの検討で得られた条件である、金型温度、加圧力、金型保持時間を設定の範囲内で

調整しながら成形を実施し、自動車ルーフ形状サンプルを採取した（図 3-2.7.3.2-51）。



図 3-2.7.3.2-51 端部を CFRP にて拘束した成形品

ただし、端部においては金型シムにより厚み補正されているものの、軽微な厚みムラがあると考えられた、これにより端部において局所的にカスレの表面性の不良が見られた（図 3-2.7.3.2-52）。本現象については、「[テーマ番号 5 4] 低圧・超高速 CFRP 成形技術の開発（FS 研究）」にて得た樹脂供給体の使用により熱硬化性樹脂のマテバラを調整できるため解消できる目途があるが、ルーフ形状サイズと樹脂供給体の現時点での製造可能サイズに乖離があることから検討を断念した。樹脂供給体の製造サイズの拡大検討については、大型設備の導入が必要であることから、本事業期間の範囲を大幅に超過することが考えられるため、今後の課題となるが、塗装時のサーフェイサー処理により隠蔽する手法が応急処置として適用可能と考えられる。

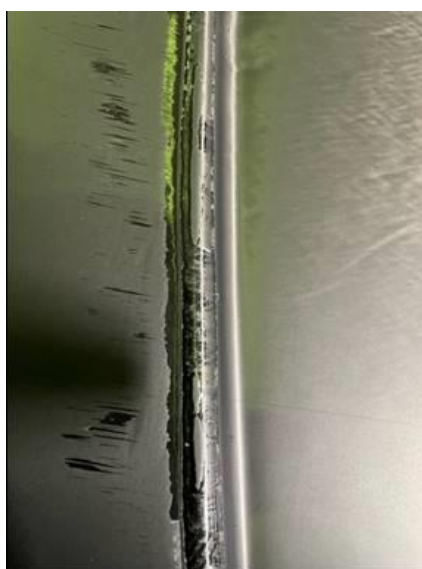


図 3-2.7.3.2-52 CFRP 端部に見られたカスレ

これら材料技術と成形技術の組み合わせにより、5分成形の目処を得た。

#### ④-2 簡易塗装検討

成形検討結果による良品を用いて、実装化に念頭をおいた塗装性のテストを実施した。塗装においては、CFRPの平滑性、ピンホールなどの表面調整対策をしたウレタン系塗料を用いた。

図 3-2.7.3.2-53 に示すように、初期検討において塗料由来の表面光沢を得ることができた。さらには、CFRP 特有の微細な表面凹凸を隠蔽可能であることを確認した。軽量性を損なわない程度の塗膜厚みの調整や塗料組成の種類による塗装性のさらなる向上が検討課題として考えられた。

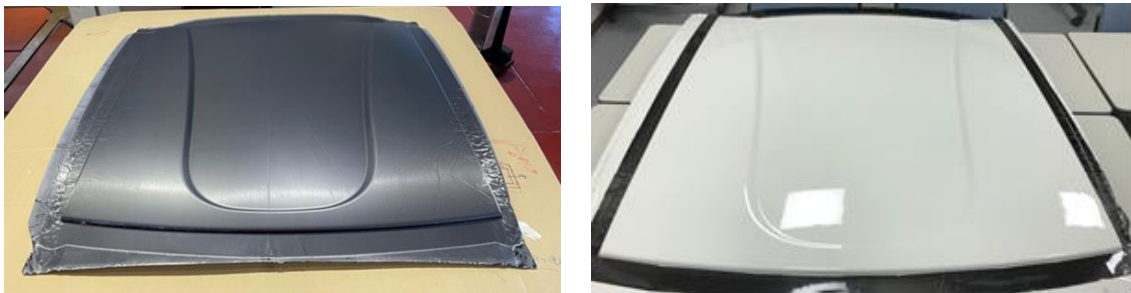


図 3-2.7.3.2-53 塗装検討前後の成形品（左：塗装前、右：塗装後）

#### ④-3 実大ルーフの遮熱性試験

バッテリーを電源とする EV 自動車はエアコンを使用することで、著しく航続距離が低下するという課題がある。このため、車内温度を一定の範囲でコントロールするヒートマネジメント技術が注目されている。そこで、スチールルーフとカーボンルーフの遮熱性について、日本自動車研究所（JARI）の日射装置を用いて評価した。

スチールルーフとカーボンルーフを 2 台並列に設置し、図 3-2.7.3.2-54 に示す様に日射装置（高さ 3600mm）から 2100mm の距離になる様に設置した。熱電対は、各ルーフに日射面側 9 箇所、裏側 9 箇所、ルーフ中央部裏面から 15cm の距離の空間に 9 箇所と合計 54 箇所に設置した。次に、スチールルーフ中央の日射面側が 80℃となる日射量の検討を実施した。初めに国内での平均的な日射量である 600W/m<sup>2</sup> に設定して 20 分放置したが、スチールルーフの温度は 45℃程度であった。そこで、日射距離を 1000mm に縮め、800W/m<sup>2</sup> とすることでスチールルーフ表面温度が 81℃に到達することができた。ここで、800W/m<sup>2</sup> とは真夏の沖縄の日射量に相当する。

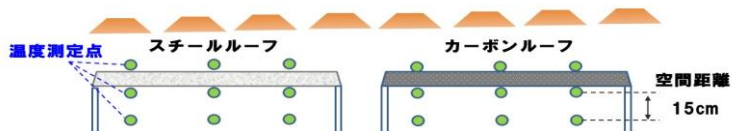


図 3-2.7.3.2-54 スチールルーフとカーボンルーフの遮熱試験セッティング

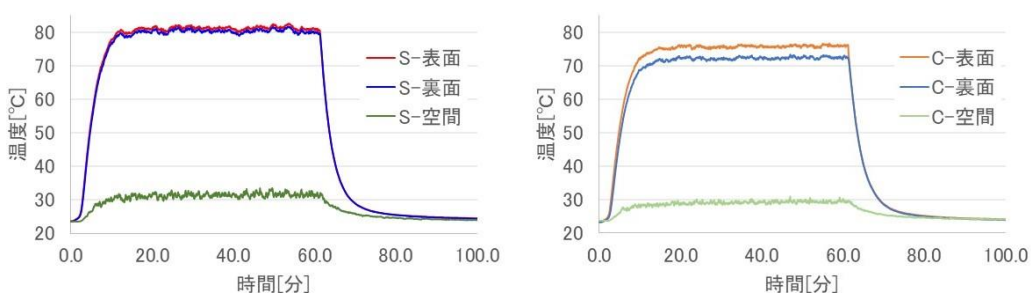


図 3-2.7.3.2-55 スチールルーフとカーボンルーフの遮熱試験結果  
(左：スチールルーフ、右：カーボンルーフ)

図 3-2.7.3.2-55 に示すように、スチールルーフの中央表面が 11 分で 80°C に到達した際に、スチール中央裏面は 79.1°C と表面とほぼ同等で、ルーフの陰になる中央空間は 30.8°C であった。これに対して、カーボンルーフは同じ条件でもルーフ中央表面は 73.1°C、中央裏面 70.1°C、空間温度 27.8°C とスチール対比で遮熱性に優れることが分かった。

カーボンルーフは、車内空間温度に影響の大きい、ルーフ裏面の温度がスチール対比で 9°C 低く、車内空間を模擬した中央空間温度が 3°C 低いいため、夏場の空調温度を抑えられ、EV 車の延長航続距離延長に寄与する可能性を示した。

#### ④-4 剛性試験

成形した実寸サイズの自動車ルーフ成形品の特性評価として外装品において重要視される面外押込による剛性試験を実施した。

##### 〈評価条件〉

評価条件を表 3-2.7.3.2-12 に記す。

表 3-2.7.3.2-12 面外押込試験条件

		荷重 (N)			
		68	98	147	167
環境 温度 (°C)	-40	○	○	○	○
	25	○	○	○	○
	80	○	○	○	○

評価サンプルは、既存スチール製ルーフと⑦-1項にて作製した CFRTP/CFRP ルーフの2種を用いた。なおスチール製ルーフの厚みは代表値として 0.6mm であった。

#### 〈評価設備〉

面外押込試験は一般財団法人日本自動車研究所にて実施した。評価に用いた設備を下記する。

- ・恒温槽：温度複合環境試験室（図 3-2.7.3.2-56 左）
- ・押込治具：日本自動車研究所作製、圧子径 30mm（自製、図 3-2.7.3.2-56 右）



図 3-2.7.3.2-56 評価設備（左：環境試験室、右：押込治具）

#### 〈評価方法〉

評価は、図 3-2.7.3.2-56 左に示す環境試験室を所定温度に保温した状態で、ルーフサンプルを投入後、45 分間放置してサンプル温度を環境温度になじませた後、図 3-2.7.3.2-56 右に示す押込治具に所定の荷重となるように錘を設置し、荷重負荷時の押込治具の変位を測定することで、剛性の評価値とした。なお、評価において荷重負荷を解放後も形状が復元しない振り返った状態をバックリングと表現した。

ルーフサンプルにおいて押込を実施した箇所を図 3-2.7.3.2-57 に示す。荷重負荷の位置はルーフサンプルの縦横の重心（中央）位置 1 点と、その右方向に 120mm 離れた位置とした。120mm 離れた位置は剛性解析により荷重が最も負荷されるとされた位置に相当する。

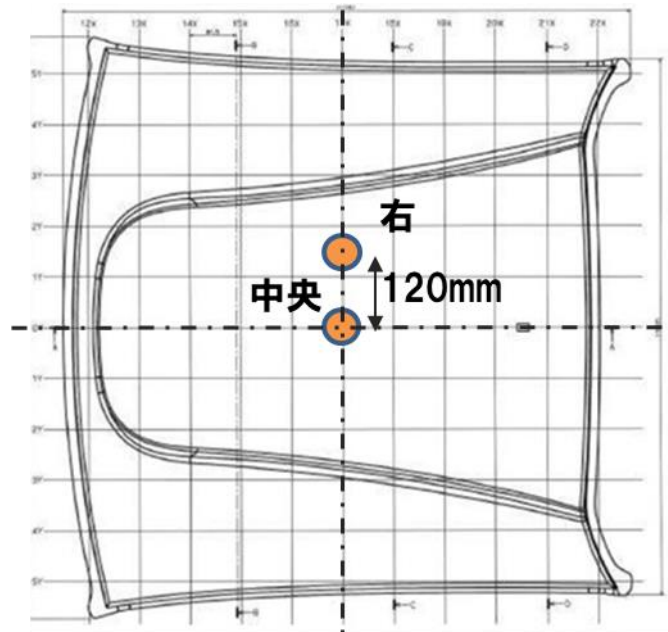


図 3-2.7.3.2-57 荷重負荷の位置

〈評価結果〉

評価結果をまとめて図 3-2.7.3.2-58 に示す。評価結果は書く温度条件にてスチール製ルーフと CFRTP/CFRP ルーフに分けて示した。いずれも荷重上昇に伴いリニアに押込量が増加した。

図 3-2.7.3.2-59 にまとめを示す。図からも分かるように既存スチールルーフと比較し、全ての温度条件においてスチール製ルーフを上回る剛性を示した。特筆すべきは高荷重領域（147N、167N）において、スチール製ルーフで見られたバックリングが CFRTP/CFRP ルーフでは発生しなかったことであった（図 3-2.7.3.2-60）。これにより、現状軽量化率を 50%として設計しているが、さらなる軽量化（薄肉化）が可能であることを示唆している。

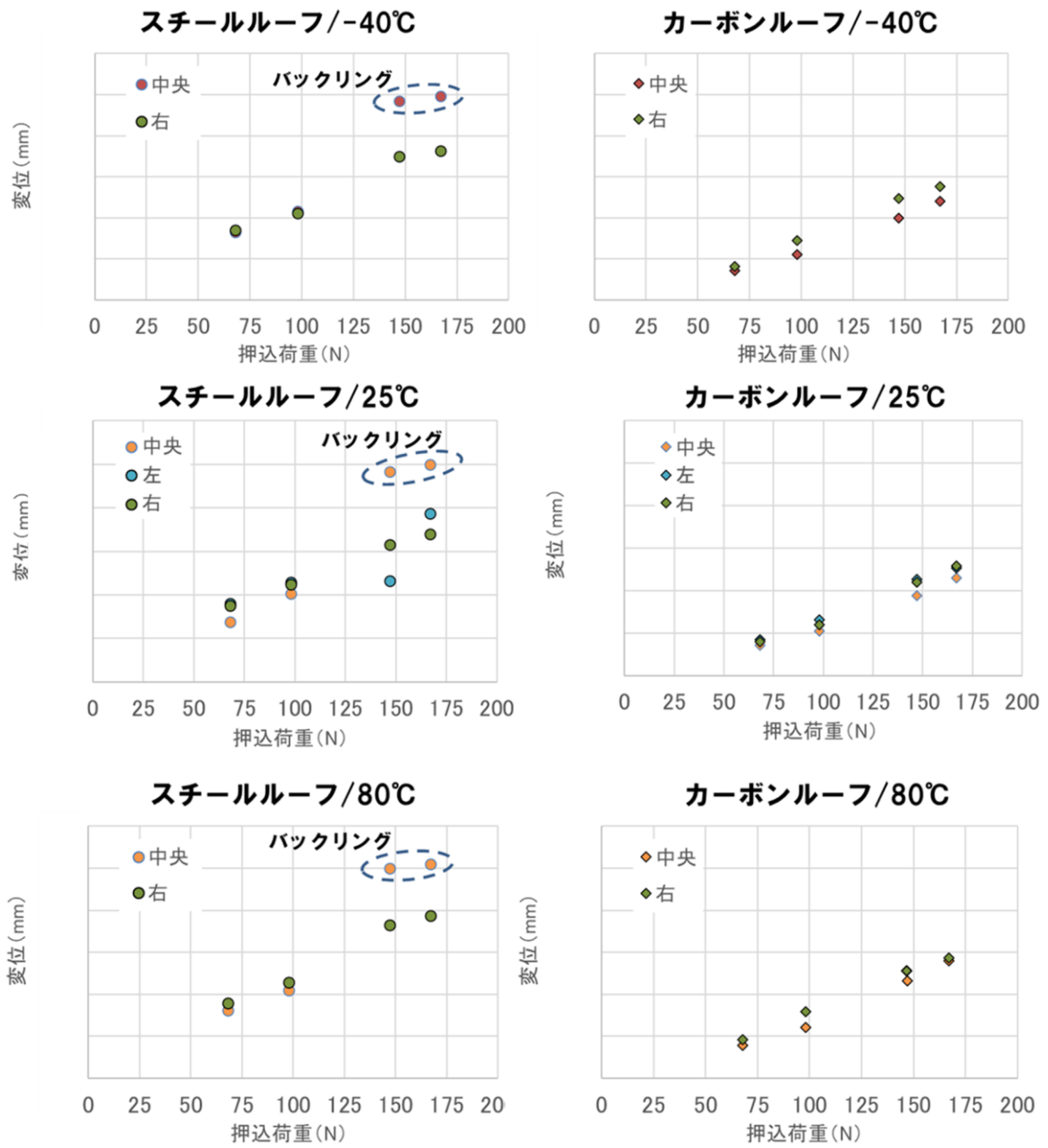


図 3-2.7.3.2-58 スチールルーフ、CFRTP/CFRP ルーフの評価結果



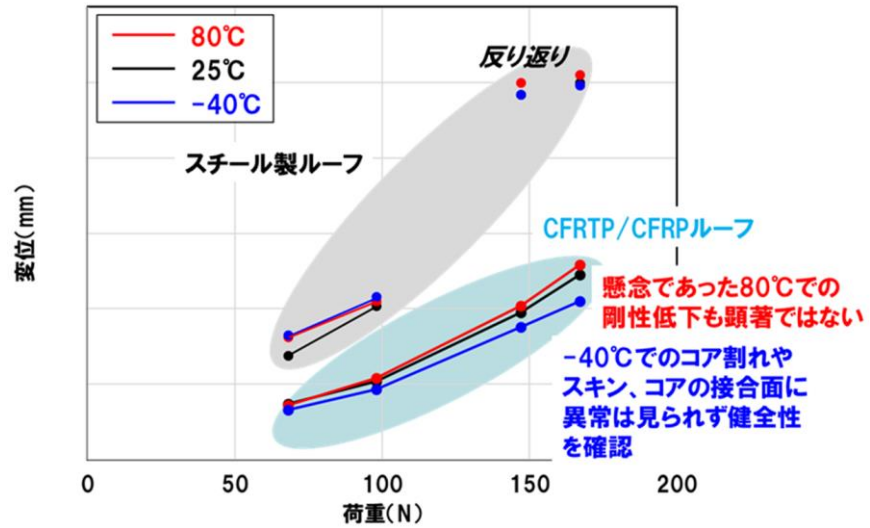


図 3-2.7.3.2-59 評価結果まとめ

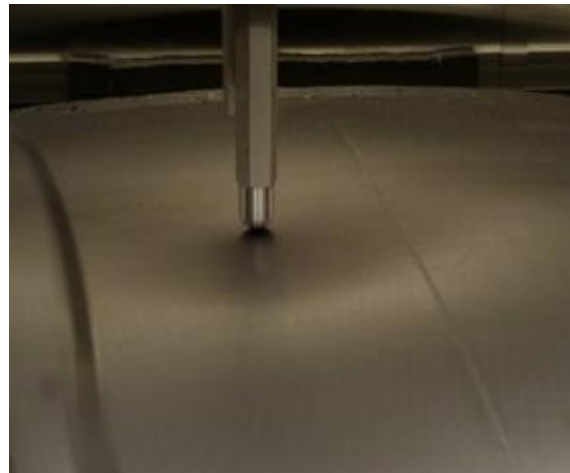


図 3-2.7.3.2-60 バックリングの様子 (左：スチール、右：CFRTP/CFRP\*)  
(\*CFRTP/CFRP ルーフはバックリングせず)

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.7.3-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2018FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2019FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2021FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2022FY	0	0	1	0	1	0	2	1	1
合計	0	0	1	0	1	0	2	1	3

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.7.3-4 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
2020FY	0	0	0
2021FY	0	0	0
2022FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.3.3 参考文献

特になし

## 2.7.4 [テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発 (2014 年度～2017 年度)

### 2.7.4.1 テーマの概要

#### (1)背景と目的

エネルギー消費量削減、CO<sub>2</sub> 排出量削減は国際的な重要課題であり、産業・運輸・民生の各部門でさまざまな対応が図られており、運輸部門では、世界的に自動車に対する厳しい燃費規制が設定されている。このような世界情勢の中、我が国においても、運輸部門のエネルギー消費量の 9 割を占める自動車をはじめ、鉄道車両等の大量生産される輸送機器の軽量化による省エネに取り組むことが必要である。

炭素繊維と樹脂の複合材料である炭素繊維強化樹脂（Carbon Fiber Reinforced Plastics、以下「CFRP」という。）は、航空機の構造材等に使用され、機体の軽量化によって省エネに貢献している素材であるが、現在、航空機の構造材等として使用されている CFRP は、主に熱硬化性 CFRP であり、樹脂の特性上加工に時間がかかり、生産コストも高いため、大量生産型製品への適用は困難な状況である。さらに、将来的に様々な素材を適材適所に使用していくためには CFRP と金属材料の接合が必要であるが、熱膨張率の差に起因する変形や電食等の課題がある。

これらの課題を解決するため、本事業では「熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発」及び「熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工技術の開発」により、大量生産される自動車の構造材等に熱可塑性 CFRP を使用することで軽量化による燃費向上を実現するとともに、我が国が競争力を有する素材である炭素繊維及び CFRP の新規需要の創出を目指す。また、材料、加工、装置、ユーザーの各メーカー、大学等が垂直連携体制を構築し、実用化までを視野に入れた一気通貫の開発を行う研究体制とすることにより、素材のみならず、最終製品、部品、加工装置等の関連産業を含めた国内産業の競争力の維持・強化を図る。

#### (2)目標値

表 3-2.7.4-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第 1 中間目標 (2015 年度末)	第 2 中間目標 (2017 年度末)	第 3 中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)
①熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発 (2014～2017年度)	熱可塑性 CFRP と異種材料（鉄鋼、アルミ合金）との接合に必要な要素技術の見極め  各種接合方式、接合形状における強度設計に必要なデータベースの構築	現行のスチール製量産車と同等の接合部強度の実現  接合部強度予測結果と、その実験結果の平均値との誤差を供試体レベルで±10%以下とする接合技術の確立		

	構造の接合部強度予測結果と、その実験結果の平均値との誤差を±10%以下とする接合技術の指針の策定と供試体による検証	現行のスチール製量産車と同等のライン速度 1 台/分を実現する指針の策定と供試体による検証		
②(a)熱可塑性 CFRP の中間基材の開発 (2014～2017 年度)	当該年度の②(b)(c)(d)の目標を実現するための、中間基材の製造に係る要素技術の確立  曲げ剛性でスチール対比 60%軽量化	当該年度の②(b)(c)(d)の目標を実現するための、中間基材の製造に係る要素技術の確立  重要特性の変動係数 5%以内		
②(b)熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発 (2014～2017 年度)	静的挙動に関わる開発材料固有の材料特性（面内せん断強度、面外せん断強度）の測定誤差（変動係数）が 10%以下となる試験法の確立  特性評価値の CAE 設計パラメータへの適用性の検証	開発材料の特性発現メカニズムの解明と適正な試験条件の探究  動的挙動に関わる開発材料固有の材料特性（ひずみ速度依存係数、温度依存係数）の測定誤差（変動係数）が10%以下となる試験法の確立		
②(c)熱可塑性 CFRP を用いた構造設計技術の開発 (2014～2017 年度)	開発部材における予測精度を剛性で±5%、強度で±10%とする CAE 解析技術の確立	スチール車と同等のボディ剛性と衝撃吸収能力を保持したまま、ボディを60%軽量化する構造の提案  開発材料の供給量や長期耐久性等のリスクも考慮したマルチマテリアルボディで30%以上の軽量化を実現する構造の提案		
②(d)熱可塑性 CFRP の成形加工技術の開発 (2014～2017年度)	開発した中間基材の加熱・加圧・二次加工方法などを検討し、現行数 10MPa のハイサイクル成形圧力を 10MPa 以下とするための周辺要素技術基盤の構築	②(c)で提案される構造を実現するための部材を対象とし、成形シミュレーション技術を基にした、精度±10%以内の繊維配向や形状安定性の予測手法の確立、並びに型占有時間1分以内での成形加工技術の開発		

### (3)全体計画

本事業では事業化を見据えて「熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術開発」及び「熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発」について以下の各研究開発内容を実施した。

#### ① 熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発

熱可塑性 CFRP は図 3-2.7.4-1 に示されるように構造材料の中で最も軽量化効果が高く、特にその異方性を活用することでさらなる軽量化が期待できる。また、図 3-2.7.4-2 に示されるようにライフサイクルアセスメント的に見ても環境負荷を小さくできる可能性を持つ優れた材料であるが、耐熱性や長期耐久性の観点から、実際の車体構造を設計・製造する際には、車体構造材料として現在の主流である鉄鋼や軽量構造材料として一部実績のあるアルミ合金などの金属材料との接合が必要となる。しかし、熱可塑性 CFRP と金属材料との接合においては、電食や熱膨張率の差に起因する問題などにより、実構造に適用できる可能性までは見極められていない。本研究開発項目では、異材接合技術として有力視されている機械的接合と接着接合を、熱可塑性 CFRP の特性や自動車組立プロセスへの適合性を考慮して開発した。また、接合部の耐久性等の評価解析技術を確立した。

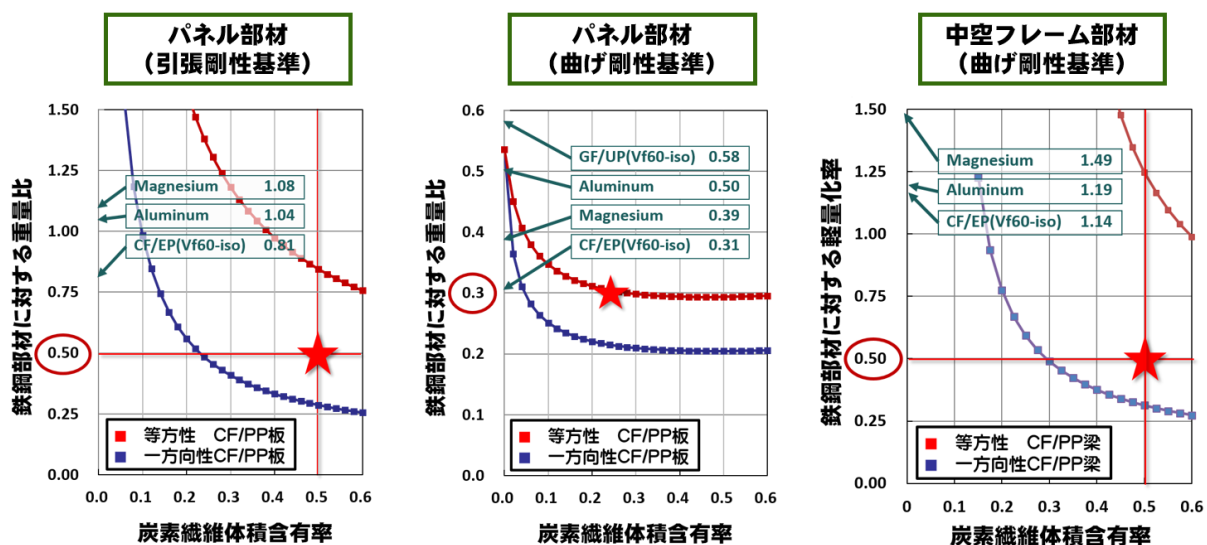


図 3-2.7.4-1 熱可塑性 CFRP の軽量性

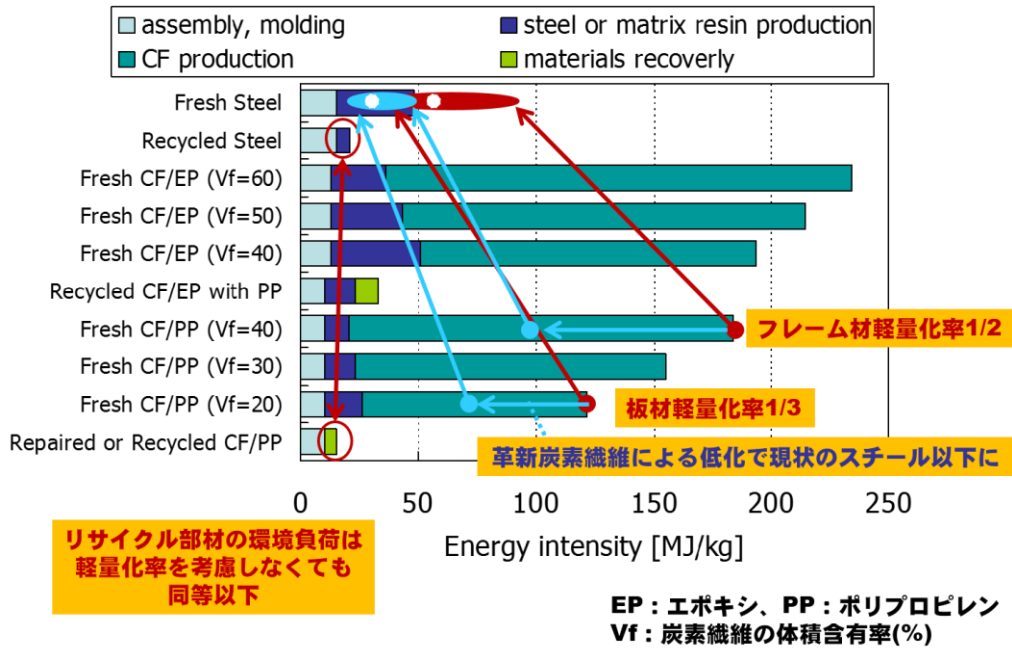


図 3-2.7.4-2 鉄鋼部材、熱硬化性 CFRP 部材、熱可塑性 CFRP 部材の製造エネルギー比較

(a) 機械的接合技術

熱可塑性 CFRP の適用箇所拡大や適材適所への材料配置のため、金属材料と併用する部分において高い接合強度と長期耐久性を持つ接合方法の開発を行う。具体的には、熱可塑性 CFRP の延性的な性質を利用し、図 3-2.7.4-3 に示されるようなボルト・ネジ、リベット、セルフピアスリベットなどの機械的接合技術、機械的接合技術を補助するインサート・アウトサート成形技術及び熱による二次加工が容易である熱可塑性 CFRP の特性を生かしたヘミングやクリンチング等のかんごう技術を開発した。さらに、接合部の強度信頼性を確保するため、電食対策技術及び衝撃や疲労に対する耐久性等の評価解析技術を開発した。

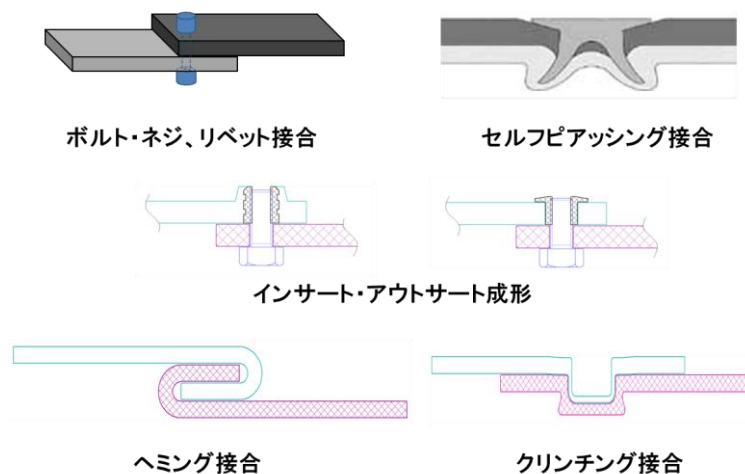


図 3-2.7.4-3 検討する機械的接合技術

## (b)接着技術

一般的に難接着性であり、接着剤の硬化に必要な高温での加熱硬化処理が難しい熱可塑性樹脂において、短時間で接合するため、熱膨張差を吸収し、高強度・高耐久性を実現する低温速硬化性の接着剤の開発及び熱可塑性 CFRP と金属材料の表面処理を含む接着技術を開発した。また、接合部に生じる接着剤の熱歪み・熱応力（図 3-2.7.4-4）や耐久性の評価法、並びに寿命予測法や非破壊検査法を含む評価解析技術を開発した。

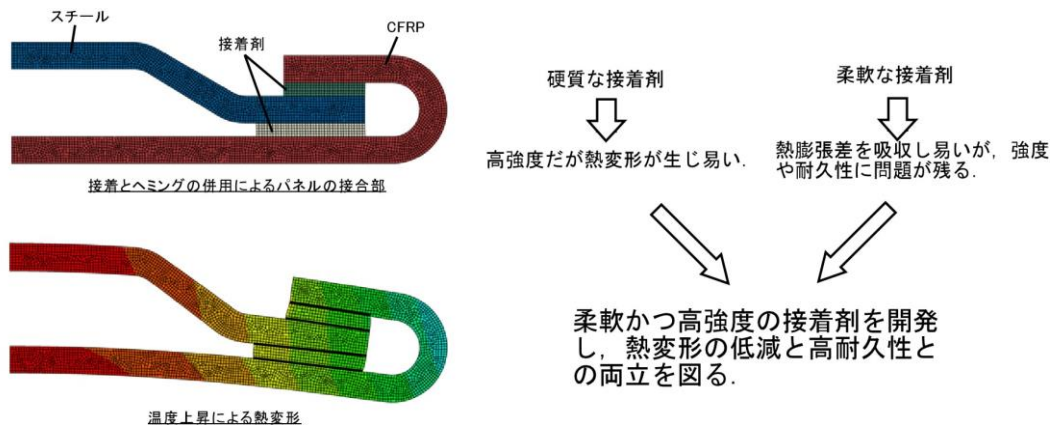
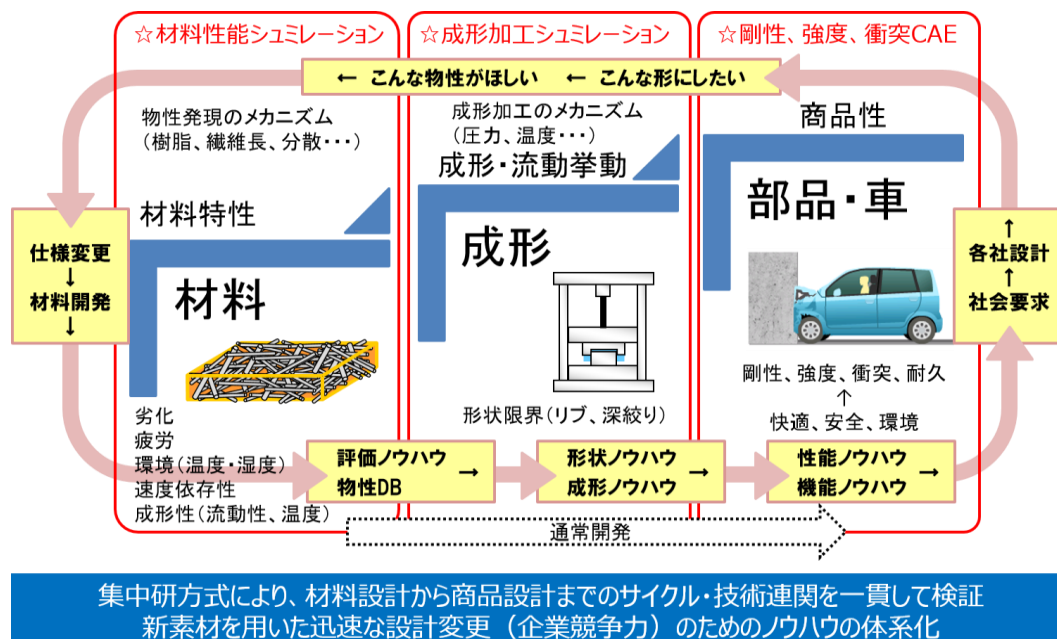


図 3-2.7.4-4 接着接合部に生じる熱歪み・熱応力と接着剤の特性による緩和

## ② 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工技術の開発

鉄鋼製車体での構造・材料配置から熱可塑性 CFRP に適した構造・材料配置とし、かつ、高速・低コスト成形加工が可能となる作り易さも追求しながら、熱可塑性 CFRP の異方性も十分に活用するための関連技術を包括的に開発した。さらに実施に当たっては、専門設備と専門人材を集結した集中研方式により、図 3-2.7.4-5 に示すとおりテーマ間のフィードフォワード・フィードバック連携を図る。



集中研方式により、材料設計から商品設計までのサイクル・技術連関を一貫して検証  
新素材を用いた迅速な設計変更（企業競争力）のためのノウハウの体系化

図 3-2.7.4-5 集中研方式による技術連関の体系化

### (a)熱可塑性 CFRP の中間基材の開発

車体構造は様々な性能を持つ部品の集合体であり、材料への要求特性は部品により異なるため、ニーズに合わせて多種多様な材料を設計する技術が求められる。しかし、車体の軽量化は、材料設計と構造設計の綿密な連携によってはじめて最適化されるため、本研究開発項目では、構造設計と成形加工の両者からのニーズを迅速かつ最適に実現するための材料基盤技術を構築した。具体的には、図 3-2.7.4-6 に示すとおり既存の最新中間基材に加え、半連続繊維や異方性の活用、それらのハイブリッド化等を進め、加工性・強度・剛性・耐衝撃性・耐熱性・意匠性・振動吸収性などの設計上の要求を満たす新規の中間基材を構造設計からのフィードバックを反映させながら開発した。

また、集中研方式を活かし、材料特性・成形データベースを基に、素材物性・基材形態・成形加工条件・部材性能について理論的解釈を深め、材料・加工・構造設計の相互のフィードバックが迅速かつ適切に行える材料の共通基盤技術として体系化した。

さらに、中間基材のハイブリッド化やリサイクル繊維の活用、一般産業用途のニーズに幅広く応えられる中間基材設計法を構築した。

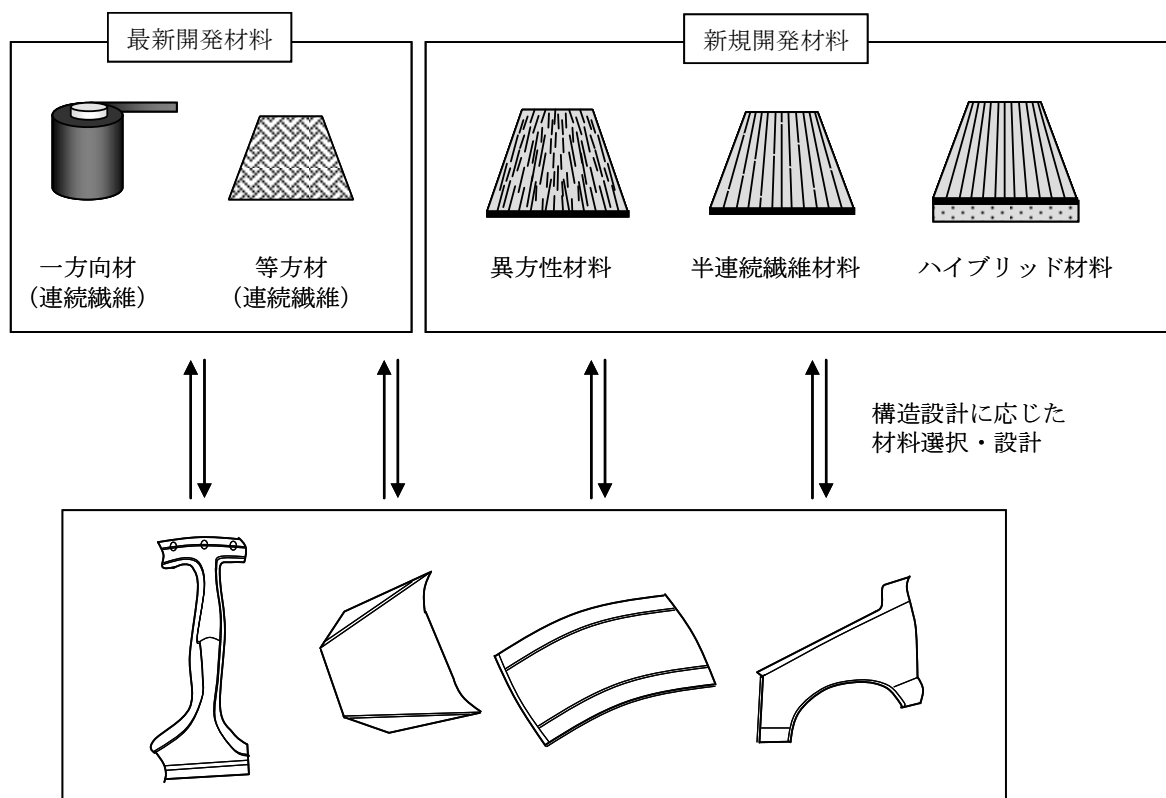


図 3-2.7.4-6 熱可塑性 CFRP 中間基材の開発概要

### (b)熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発

熱可塑性不連続 CFRP の材料性能評価技術は、圧縮特性、衝撃特性、長期耐久性などのメカニズムの解明にまでは至っていないため、本研究開発項目において、まず、図 3-2.7.4-7 に示すように、熱可塑性 CFRP (連続繊維、不連続繊維、等方性、異方性) を対象として、変形・破壊・劣化挙動の可視化と材料特性発現メカニズムの解明



のための高性能な治具の開発や最適試験条件の探究を行う。

次に、開発する材料・構造設計手法・成形加工方法を実際に量産車開発に使用する際に不可欠となるコンピューター支援エンジニアリング（Computer Aided Engineering、以下「CAE」という。）への入力パラメータを効率的に整備する手段として、金属材料や樹脂材料並みの手間で材料特性を評価する簡易評価手法を開発した。具体的には、異方性を有する中間基材やそのハイブリッド材料群を活用していくため、CAEに入力すべきパラメータが増えることから、より効率的な評価手法のみならずデータの内挿・外挿理論などを開発する必要がある。そこで、確率論・統計学の手法を駆使して、基材形態と評価パラメータごとに合理的な試験条件・試験片寸法・試験本数を決定するロジックを構築し、実証試験によりその有効性を検証する（図 3-2.7.4-8 参照）。

さらに、車体設計に必要となる材料特性（弾性率、強度、靱性、衝撃、クリープ、疲労、接合性、シールド、遮音、耐雷等）の評価手法開発とラウンドロビンテストを通じた材料特性データベース構築を行う。その上で、海外の動向も見極めながら、必要に応じて標準材料や国際標準試験法策定のためのドラフト作成も行う。

また、当該分野は世界的に開発競争の激しい分野であるため、程度の悪い便乗基材が出回ることが想定されることから、そのような基材を用いることでユーザーが不利益を被ることの無いよう、基材段階でのスクリーニング技術も同時に開発した。

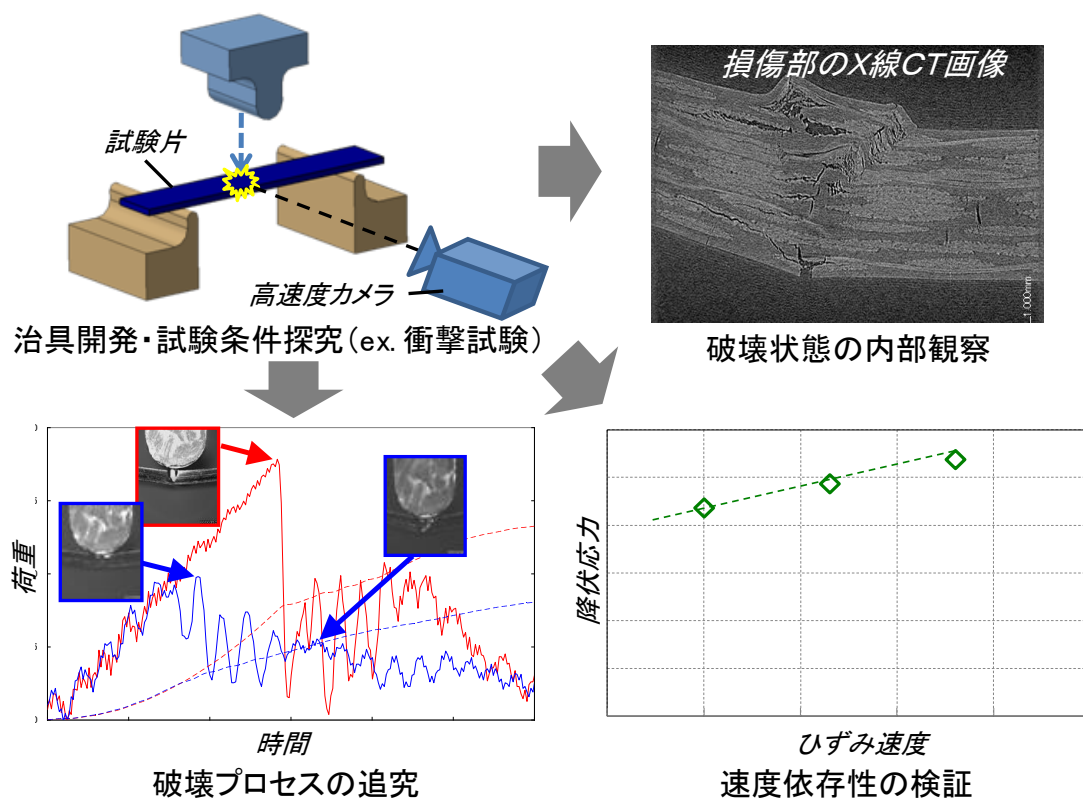


図 3-2.7.4-7 材料特性発現メカニズムの解明

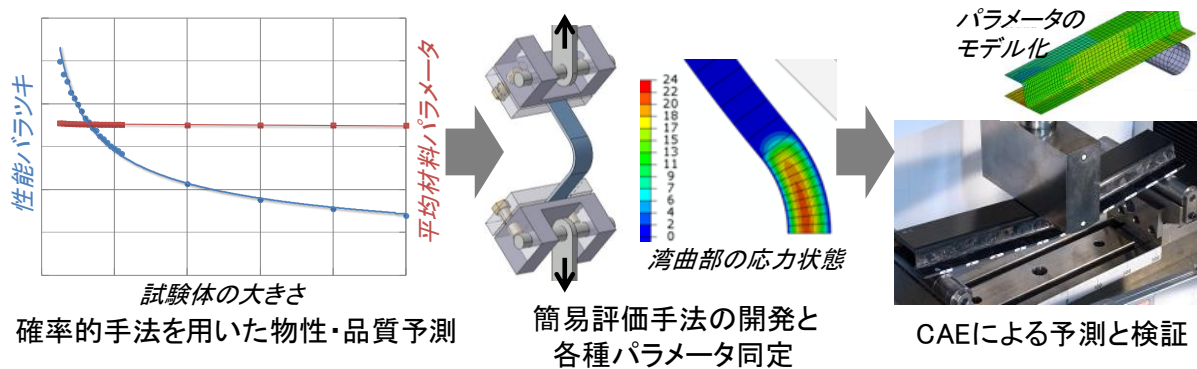


図 3-2.7.4-8 CAE パラメータの整備と予測及び設計技術への適用性検討

### (c)熱可塑性 CFRP を用いた構造設計技術の開発

現在の熱可塑性 CFRP の CAE 解析においては、様々な材料特性パラメータ（圧縮特性や速度・温度・時間依存性など）を適用するには至らず、構造解析による予測技術は限定的であり、多種多様な材料群に応じた解析用材料モデルは構築されていないため、本研究開発項目では、まず、速度依存及び環境依存を考慮した材料モデルを構築し、CAE 解析による予測技術の適用範囲を拡大する（図 3-2.7.4-9 参照）。

また、さらなる軽量化や部品点数削減、軽量化率向上とのトレードオフとなる成形加工速度の低下も解決する設計指針の構築を目的として、熱可塑性 CFRP を用いた車体構造全体の最適化を達成できるシミュレーション技術の確立と設計理論の構築を行う。具体的には、車両性能・コスト・乗り心地・乗員安全性・歩行者保護などの要求度に応じて最適な構造デザイン（材料配置、板厚、寸法、形状）を提供するため、最適トポロジー（形状付与）技術等を取り入れた理論的な共通基盤を構築した。

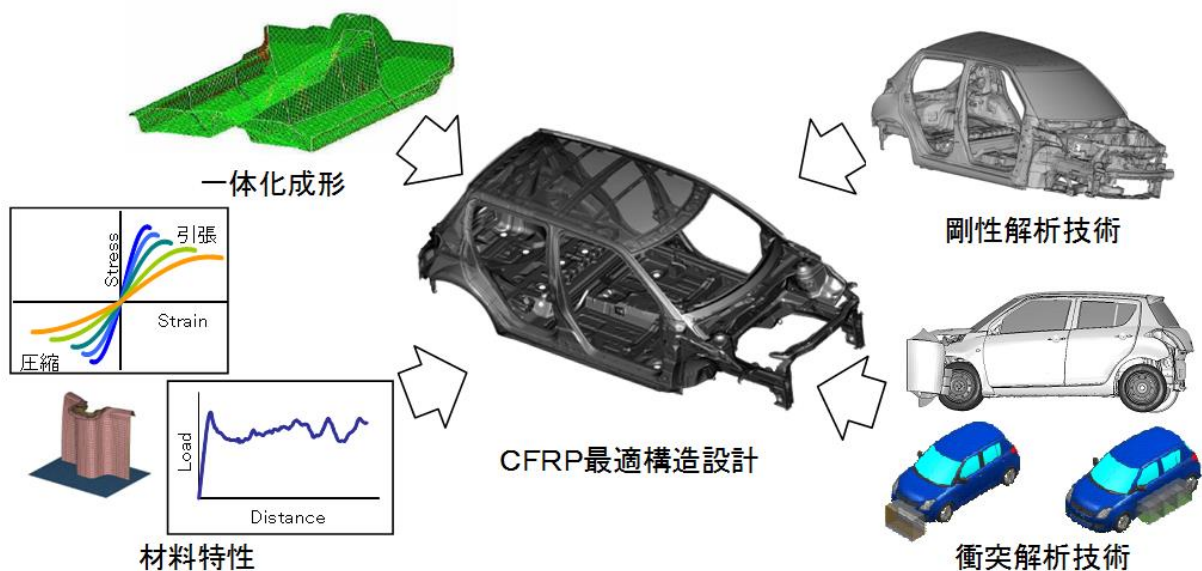


図 3-2.7.4-9 構造設計技術開発

#### (d)熱可塑性 CFRP の成形加工技術の開発

最適設計された車体が予定通りの性能を発現するためには再現性の良い成形加工技術の確立が必要であり、部材性能、部材形状、複合成形に適した多種多様な新規中間基材、さらに、これらを組み合わせてハイブリッド化した基材に対応した成形加工プロセスの開発・最適化が不可欠となる。しかしながら、本事業で開発する多種多様な中間基材は、それぞれが従来に無い強化メカニズムや熱可塑性樹脂特有の性質を持つため、成形加工方法を体系的に見直す必要がある。そこでシミュレーション技術の援用が不可欠となるが、従来のシミュレーション技術では、これらの成形加工後の繊維配向等を精度良く予測することができない。本研究開発項目では、**図 3-2.7.4-10** に示すように、開発された基材を用いて、構造設計が要求する軽量形状を実現するための成形加工技術を開発するとともに、成形加工・物性予測シミュレーション技術を開発した。具体的には、開発された基材の加熱・加圧・二次加工方法などの成形基盤技術を整えるとともに、複数の材料のハイブリッド成形に関する基盤技術を確立した。

また、複雑な部材の高精度かつ再現性の良い成形のための流動解析シミュレーション手法を開発して、成形条件の見極めだけでなく金型設計に適用できる技術を確立した。

さらに、研究開発項目(a)(b)(c)での検討を踏まえて、素材から構造体までのトータルの成形加工サイクルを最短とするプロセスパターンを体系化すると同時に、今後の設計変更にも迅速に対応できる技術基盤を構築した。

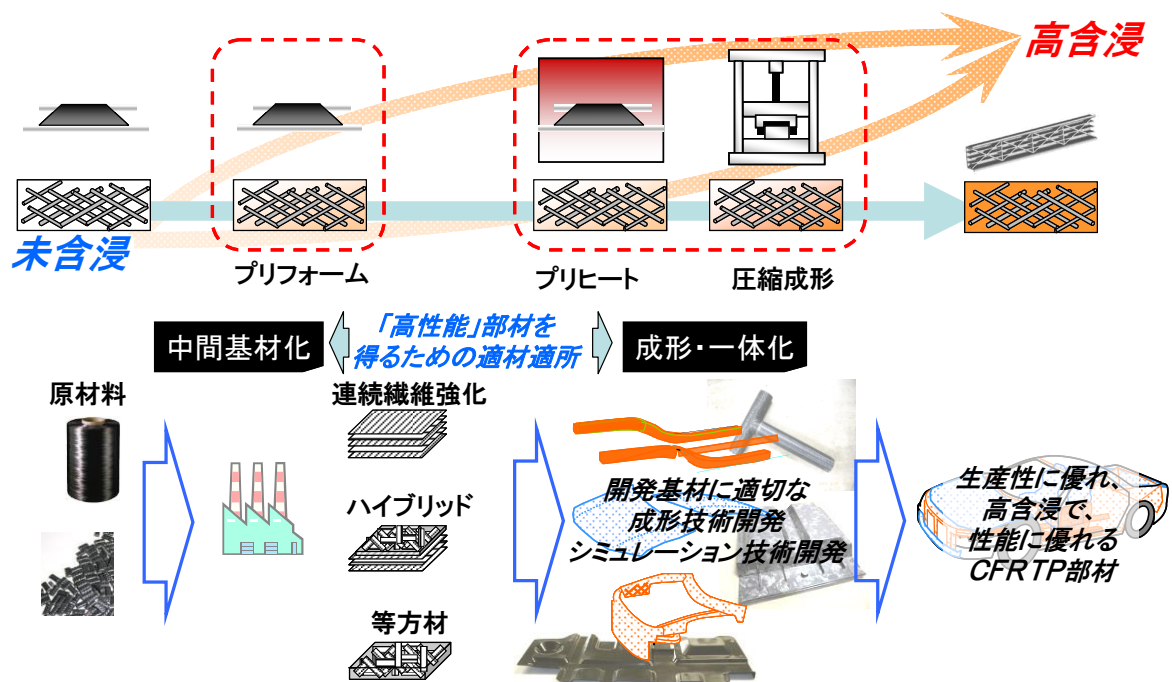


図 3-2.7.4-10 高生産性・高性能部材を得るための熱可塑性 CFRP の成形加工技術開発

#### (4) 実施体制

東京大学（PL：高橋淳教授）を集中研究拠点として、22 機関が以下のように WG を組織して実施した。

【分担研：13社】		接合	5 基材	評価	設計	成形
東レ株式会社	(伊予分室)	○	幹事	○	○	
三菱ケミカル株式会社	(豊橋分室)	○	幹事	○		○
東洋紡株式会社	(大津分室)		幹事	○	○	
株式会社タカギセイコー	(高岡分室)		○			○
スズキ株式会社	(浜松分室)	○		○	○	○
株式会社本田技術研究所	(芳賀分室)			○		
三菱自動車工業株式会社	(岡崎分室)				○	
日産自動車株式会社	(追浜分室)	○			○	○
株式会社島津製作所	(京都分室)			○		
福井ファイバートック株式会社	(豊橋中原分室)		○			○
株式会社カドコーポレーション	(たつの分室)	○				○
住友重機械工業株式会社	(横須賀分室)					○
株式会社 I H I	(瑞穂分室)					○

【再委託先：9機関】		接合	5 基材	評価	設計	成形
東京大学	(国立大学法人)	○	幹事	幹事	幹事	幹事
金沢工業大学	(学校法人)	○				
東京工業大学	(国立大学法人)	幹事				○
東北大学	(国立大学法人)		○			
山形大学	(国立大学法人)		○			
岐阜大学	(国立大学法人)		○			
福井県			幹事			
国立研究開発法人物質・材料研究機構		○				
一般財団法人ファインセラミックスセンター			○			

#### (5) 運営管理

東京大学の共同研究契約における各種規定に基づき、22 機関（82 名）が共同研究を行った。

研究開発は接合・評価・設計・成形と 5 つの基材（マット材、連続材、テープ材、薄層テープ材、リサイクル材）の計 9 個の WG で機動的に行い、以下の通り全体会合を年 4 回、WG 別会合を年 7 回（+臨時会合）行った。

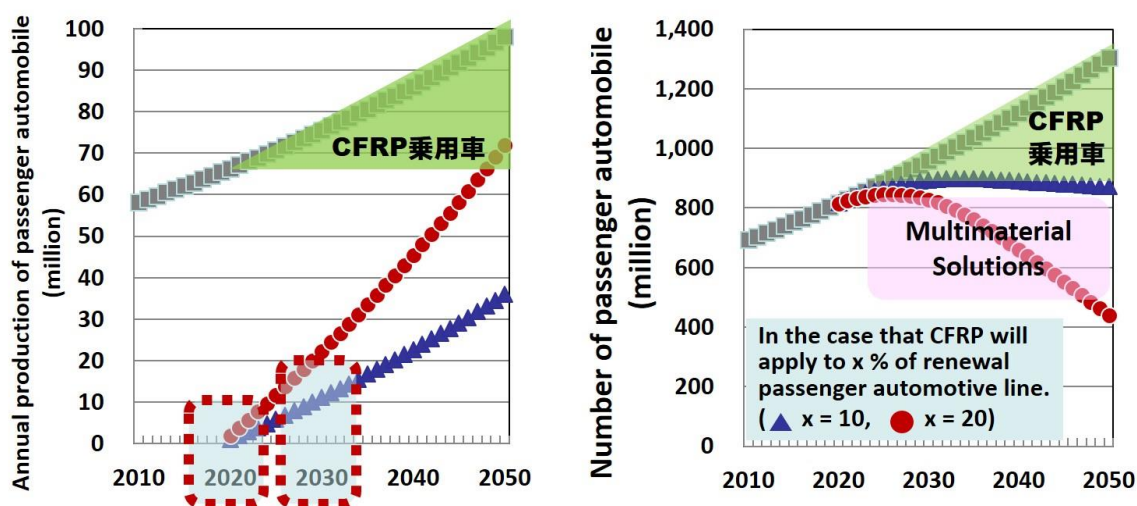
- 4 月 : WG 別会合
- 5 月 : 全体会合（東大集中研のみ）
- 6 月 : WG 別会合
- 7 月 : WG 別会合
- 8 月 : WG 別会合
- 9 月 : WG 別会合
- 10 月 : 全体会合（名大集中研との合同会合）
- 11 月 : WG 別会合
- 12 月 : 全体会合（東大集中研のみ）
- 1 月 : WG 別会合
- 2 月 : 全体会合（名大集中研との合同会合）

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度）

本プロジェクトの目標は車体の50%軽量化であり、これにより現行車両の走行時の石油消費量（1000L/年）とCO<sub>2</sub>排出量（2.32t-CO<sub>2</sub>/年）がそれぞれ37.5%（一台あたり石油375L/年、0.87t-CO<sub>2</sub>/年）削減される。なお、図3-2.7.4-2に示されるように、部材製造までの環境負荷は現行車両と同じになるので、LCAで考えても結果は同じである。

そして、図3-2.7.4-11に示されるように、本プロジェクトの開発技術は2030年にCFRP量産乗用車1,000万台に適用されることを目標としているので、2030年に生産される技術適用車による石油削減量は375万kL/年、CO<sub>2</sub>削減量は870万t-CO<sub>2</sub>/年（2020年から生産されるすべての技術適用車による効果は石油削減量1,875万kL/年、CO<sub>2</sub>削減量は4,350万t-CO<sub>2</sub>/年）となる。

また、本プロジェクトで開発される技術による車両一台あたりの熱可塑性CFRP部材は240kg（24万円）であることから、これが1,000万台に適用される2030年の市場創出効果は2.4兆円（2020年からの累積では12兆円）となる。



2020年から本格適用  
2030年に  
CFRP車1000万台生産  
CF需要量100万トン



開発目標とスケジュール  
CF : コスト、生産量  
CFRP : 製造コスト、製造速度、3R  
周辺 : CAE、試験法標準化・・・

図 3-2.7.4-11 革新炭素繊維プロジェクトと共有している開発目標

## 2.7.4.2 研究開発成果

### (1)最終目標の達成度

表 3-2.7.4-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (2017年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
①熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発	<p>現行のスチール製量産車と同等の接合部強度の実現</p> <p>接合部強度予測結果と、その実験結果の平均値との誤差を供試体レベルで±10%以下とする接合技術の確立</p> <p>現行のスチール製量産車と同等のライン速度1台/分を実現する指針の策定と供試体による検証</p>	<p>各種機械締結法・接着での接合方式、接合形状における表面処理・耐久性を含めた強度データベースの構築を行った</p> <p>上記の実験結果と有限要素法 (FEM) 解析から、供試体レベルで予測結果と実験結果の誤差が±10%以内の精度となる接合部強度予測接合技術の確立を見出した</p> <p>実装／高信頼性な高速プロセスに焦点を絞り、検討した</p>	△	<p>実験データを充実させて、成果の汎用化を図っていくこと</p> <p>湿度環境下での試験、動的粘弾性特性等の温度・周波数（時間）の関係を検討すること</p> <p>供試体レベルで接合部の幾何学形状をより正確に加味すること</p> <p>最適条件の検討を行うこと</p>
②(a)熱可塑性 CFRP の中間基材の開発	<p>当該年度の②(b)(c)(d)の目標を実現するための、中間基材の製造に係る要素技術の確立</p> <p>重要特性の変動係数5%以内</p>	<p>①および②(b)(c)(d)からの要請に基づく中間基材を提供し、各々目標達成した</p> <p>重要特性の変動係数5%以内を達成した</p> <p>特に CMT では長期耐久性（疲労）シミュレーション技術構築するとともに、クラッシュカンを成形し、GMT 比エネルギー吸収量60%向上を達成した</p>	○	
②(b)熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発	<p>開発材料の特性発現メカニズムの解明と適正な試験条件の探究</p> <p>動的挙動に関わる開発材料固有の材料特性（ひずみ速度依存係数、温度依存係数）の測定誤差（変動係数）が10%以下となる試験法の確立</p>	<p>開発材料の曲げ損傷メカニズムや温度・速度・時間依存といった動的特性を実験的に解明した</p> <p>また、それを CAE 用の材料モデルとして定式化し、数値シミュレーションでの再現性を確認した</p> <p>開発した試験法によって動的特性（強度・弾性率の温度速度依存関係）の理論値に遜色ない実験結果を得た</p>	○	
②(c)熱可塑性 CFRP を用いた構造設計技術の開発	<p>スチール車と同等のボディ剛性と衝撃吸収能力を保持したまま、ボディを60%軽量化する構造の提案</p> <p>開発材料の供給量や長期耐久性等のリスクも考慮したマルチ</p>	<p>②(a)、並びに、②(b)の検討を元に、汎用 CAE ソフトウェアを用いながら、これまで実現されなかった構造 CAE 解析技術を開発し、60%軽量化を実現するための設計技術を確認した</p> <p>中空部材およびパネル部材の使用割合を最適にするこ</p>	○	

	マテリアルボディで30%以上の軽量化を実現する構造の提案	とで、剛性と衝撃吸収能力を保持したまま、60%軽量化可能な構造を提案した  また、現時点で想定される長期耐久性リスクを考慮した、30%軽量化達成可能な構造を提案した		
②(d)熱可塑性CFRPの成形加工技術の開発	②(c)で提案される構造を実現するための部材を対象とし、成形シミュレーション技術を基にした、精度±10%以内の繊維配向や形状安定性の予測手法の確立、並びに型占有時間1分以内での成形加工技術の開発	開発した中間基材で800トンプレス機及びロボット周辺機器を使用し、10MPa以下成形技術開発に取り組んでいる	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

## (2)研究開発の成果と意義

### ①熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術開発

熱可塑性CFRP同士の融着技術の検討は前プロジェクトで完了しているため、本テーマでは、熱可塑性CFRP同士、さらには熱可塑性CFRPと金属の接着剤での接合を検討している。図3-2.7.4-12に示されるように、これまでに、様々な表面処理方法の比較検討を完了し、接着剤の絞り込みと、モデル部材での有効性の検証ができている。

一方で、特に、接着に広い面積が使えないような所や、高い強度・耐久性が求められる箇所での強固な接合を想定した機械的接合の検討も行った。図3-2.7.4-13に示されるように、こちらも様々な機械接合法の比較検討が完了し、有望とみられるグリップメタルや熱可塑性フィルム接着剤との併用についての検討を行った。

#### 【現在までの主要な結果】

- ◆ PP複合材に対して、各種表面処理および接着剤のスクリーニングを実施した
  - ◆ ラップシヤで12MPa程度の強度が得られている
  - ◆ ハットビーム試験でも接合部は破断しなかった
- 接着でも実用上十分な強度が得られる**

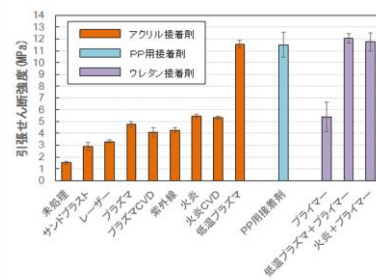
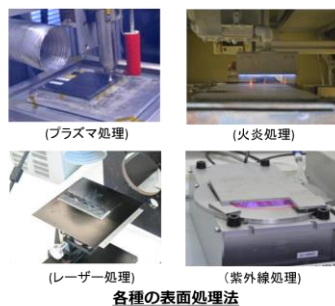


図 3-2.7.4-12 接合技術 (接着接合)

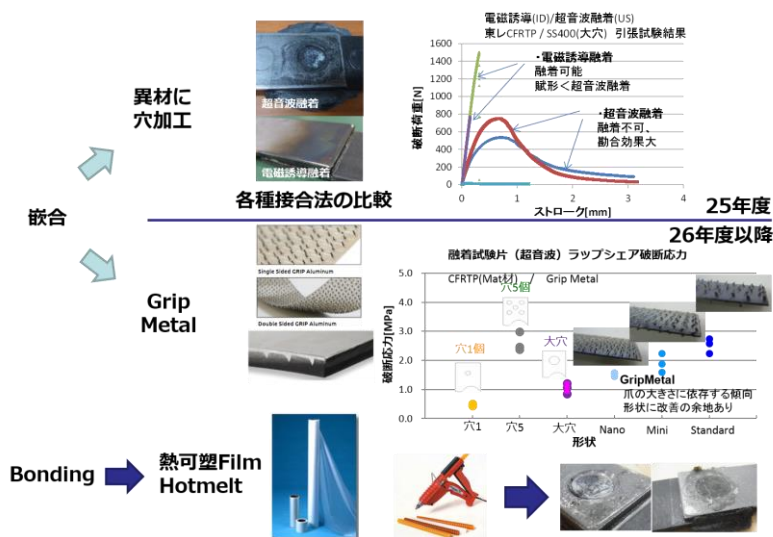


図 3-2.7.4-13 接合技術（機械的接合）

### ②(a)熱可塑性 CFRP の中間基材の開発

このテーマでは、各素材の最高性能や特性発現メカニズムの検討はほぼ完了し、他のテーマからの要望、例えば評価しやすい材料、成形しやすい材料、等への対応、さらには異材とのハイブリッド化による問題解決などを進めた。

#### マット材（CMT: Carbon fiber Mat reinforced Thermoplastics）

CMT は、繊維長が制御された炭素繊維を、単繊維レベルで等方・均質に分散させたマットに、熱可塑性樹脂を含浸させた中間基材である。連続繊維強化に匹敵する強度利用率を特徴とし、この性質は強度理論でも証明されている。本研究期間では、① CMT のエネルギー吸収能力の実証、②長期耐久性シミュレーション、③マルチマテリアルへの展開に向けた予備検討を進めた。

熱可塑性樹脂をマトリックスとしている CMT は、優れたエネルギー吸収能力が期待できる。自動車の軽衝突時の乗員保護を目的としたクラッシュボックスを想定し、デモンストレーターを成形して衝撃圧縮（軸圧縮）時のエネルギー吸収を評価した。まず、CMT をスタンピング成形してハット形状のパーツを成形し、これを 2 枚貼り合わせて中空形状のクラッシュボックスを成形した。接合部はフランジ破壊が支配的となることを回避するため、熱板溶着とファスニングを併用した。得られた成形品の衝撃圧縮試験では、狙いどおりの逐次圧壊が見られ、重量あたりのエネルギー吸収量は、同じ形状で同様に逐次圧壊した GMT と比較し、60%向上した。





図 3-2.7.4-14 CMT 製クラッシュボックス

重量あたりの  
エネルギー吸収量

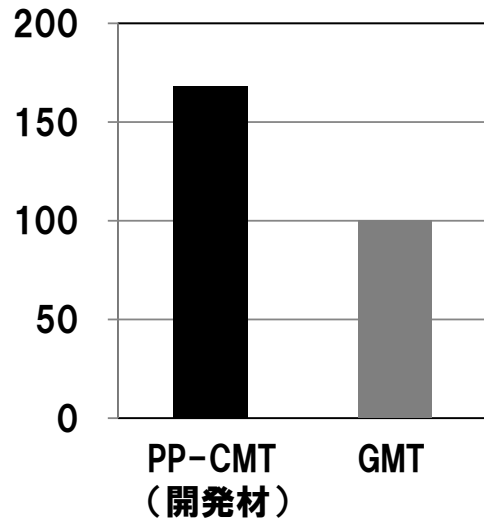


図 3-2.7.4-15 重量あたりのエネルギー吸収  
(GMT を 100 とした場合の相対値)

CMT の強度発現機構および破壊メカニズムは再委託先（東北大学）で研究を進めており、静的機械強度理論は構築済みである。本研究期間では、長期耐久性（疲労）予測を進めた。破壊メカニズムを追跡できる FEM に加え、計算コストに優れるマイクロメカニクスのアプローチでも、実験結果をよく再現できる手法を構築した。一般に不連続繊維強化材料は、繊維、樹脂および界面破壊が混合して破壊様相が複雑になり、解析が難しいとされる。材料研究（等方・均質性確保）と強度理論研究を両輪とする手法で、高い精度と信頼性をもった解析手法の確立に成功した。

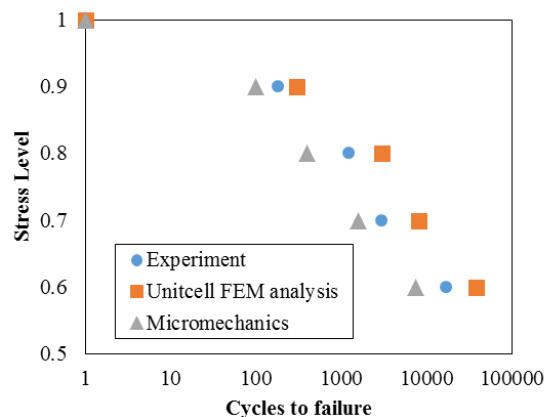


図 3-2.7.4-16 CMT の引張疲労試験

また、マルチ材料への展開を考慮し、アルミと CMT の一体成形を検討した。アルミと CFRP は成形法が全く異なり、これらの複合化は、個別成形後の接着が主流

である。これに対し、熱可塑性樹脂の伸張とアルミの変形を同期させ、凹凸形状を持つアルミ／CFRTP を一体成形する試みを、再委託先（山形大学）で検討した。

基礎検討段階ではあるが、材料および加工条件を適切に選択することで、凹凸形状を有するアルミ／CFRTP サンドイッチや、厚肉の成形品を得ることに成功した。材料間は成形の過程で強固に接合しており、成形と接合を同時に行える手法として注目している。



図 3-2.7.4-17 アルミ／CFRTP 一体成形品

材料の応用展開として、CMT をスキン層とし、新規な CFRTP フォーム材をコアに用いた、曲げ剛性に優れたサンドイッチ構造体の成形技術を構築した。コアとスキンをプレスで一体成形し、凹凸面を持ったサンドイッチ構造体を得ることに成功した。

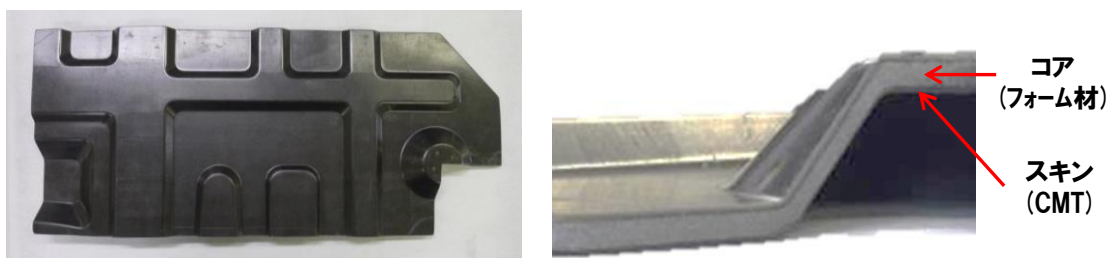


図 3-2.7.4-18 CMT を用いたサンドイッチ成形体

#### 連続・半連続中間基材

図 3-2.7.4-19 は航空機や F1 カーで使われている連続状態での炭素繊維シートに切り込みを入れてランダム化し、乗用車の複雑形状に対応させようという基材である。この基材でも基本検討は完了し、CAE 成立性や流動シミュレーションによるさらなる成形性の向上を目指した検討を進めた。

テーマ	H26-28の進捗
中間基材	<ul style="list-style-type: none"> <li>連続基材: 評価WG、成形WGと連携して物性発現メカニズムの理解と深化。</li> <li>半連続基材: スリット材の基本設計終了。力学物性と成形加工性に優れた材料を開発。</li> <li>半連続基材の高性能化: コストパフォーマンスで既存の半連続基材を凌駕。</li> </ul>
構造設計 CAE	<ul style="list-style-type: none"> <li>ハイブリッドモデル: 自由度の異なる要素を組み合わせ、CFとマトリックスを表現。計算速度と精度を両立。</li> <li>軸圧縮など衝撃破壊試験を精度よく再現。</li> <li>衝撃解析精度向上、疲労予測に着手。</li> </ul>
成形加工 CFD	<ul style="list-style-type: none"> <li>繊維方向と繊維と垂直方向の流動異方性を考慮したCFD(粒子法)技術を開発。配向とリブ流入の違いを予測。</li> <li>粘度比の異なる層の積層体の計算に向けて、積層界面の安定性や計算時間の短縮を実施中。</li> </ul>

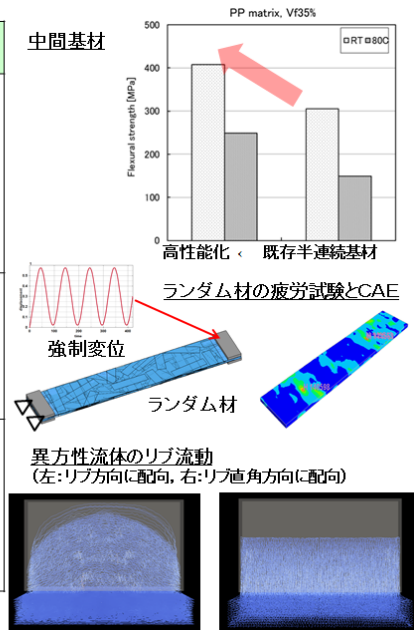


図 3-2.7.4-19 中間基材 (連続・半連続系)

### テープ材 (CTT: Carbon fiber Tape reinforced Thermoplastics)

「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」で開発した CTT 材を用いて、②(b)、②(c)の課題解決に向けた検討を行うとともに、大型モデル部材や実物大モデル部材を成形・評価して、材料開発にフィードバックを行い、中間目標である「60%軽量化を実現するための、中間基材の製造に係る要素技術の確立」の見込みを得た。さらに、岐阜大学と協業で、シームレス中空部材の成形技術開発の検討を行った。

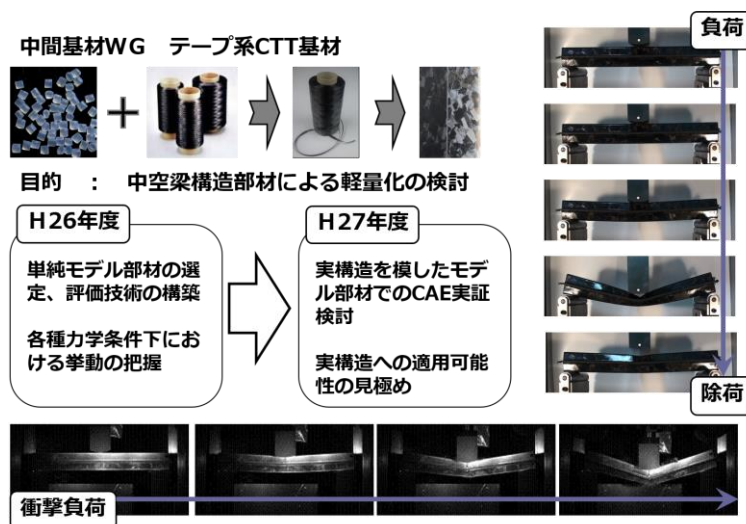


図 3-2.7.4-20 中間基材 (テープ系)

テープ系基材のもう一つの検討として、その低コスト化も進めた。図 3-2.7.4-21 は炭素繊維シートを薄くすることで樹脂含浸の必要圧力を下げて生産性を 10 倍にしたものである。層が薄くなることにより、部材の性能がさらに上がり、ばらつきも小さ

くなるなどのメリットが確認されている。また、さらに CAE の精度をあげたり、成形時のプレス圧を下げて設備投資コスト削減を実現するための検討も進められている。学術的にも、この不連続繊維の力学特性モデリング関連で複数の学会賞を受けている。

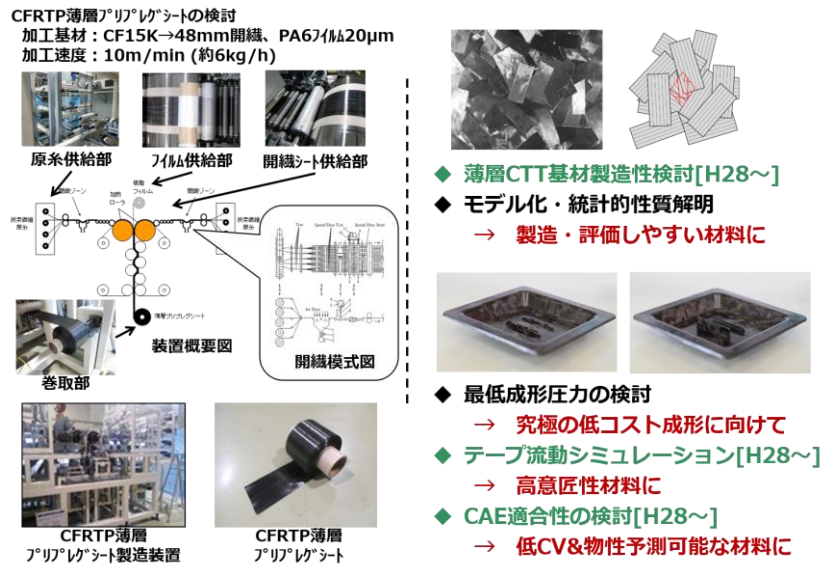


図 3-2.7.4-21 中間基材（薄層テープ系）

### リサイクル材

以上、マット、連続、テープとそのハイブリッド基材を紹介したが、リサイクル基材の検討も行った。自動車の量産を考えた場合、鉄の場合もそうだが、ロール状の素材をカットしてプレス・接合する際に必ず端材が出る。炭素繊維は高価な材料なので、その端材を使ってバージン材と同等の自動車部材が製造できれば、コスト面での大きなメリットになるし、もちろんこの技術は市場ゴミのリサイクルにも活用できる。そこで、図 3-2.7.4-22 に示されるように、樹脂を除去しながら同時に炭素繊維表面の官能基を回復する手法の検討を進める一方で、リサイクル繊維を用いてバージン材同等の自動車部材を作るための手法を絞り込んだ。既にマット系ではバージン材同等の性能の部品がリサイクル材から製造できることが明らかになっており、引き続きテープ系での実現を目指した検討を進めた。

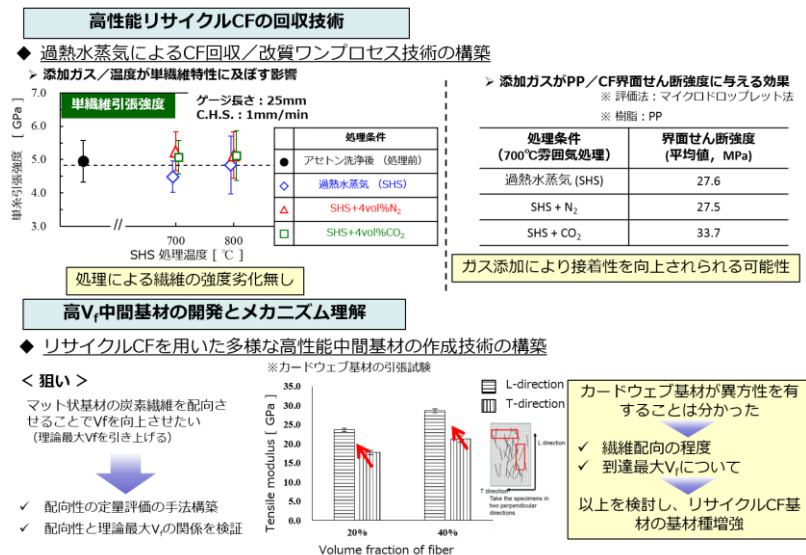


図 3-2.7.4-22 中間基材 (リサイクル材系)

## ②(b)熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発

性能評価技術開発のテーマでは、新たに開発した試験法と既存の試験法を適宜組み合わせ、強化形態の異なる数種類の開発材料の材料特性値を高精度に取得するとともに、その特性発現メカニズムを解明し、それによって理論モデルの構築・定式化を達成してきた。また、そのモデルを数値解析シミュレーションに適用して、部材性能や材料特性の予測技術の開発に取り組み、シミュレーション上での再現性を検証中である。

図 3-2.7.4-23 は、曲げ負荷中に試験片の内部を X 線 CT により可視化できる新しい分析システムであり、曲げ非線形挙動と損傷深さの関係性を明らかにすることができた。また、温度・速度の違いによって曲げ損傷の様子が異なることが明確化され、材料モデルの定式化に貢献している。

図 3-2.7.4-24 は、面外せん断の応力ひずみ特性を検出する新たな試験法であり、従来の試験法では計測が難しかった非線形特性を取得するのに成功した。特に、開発材の面外方向の破断ひずみは CAE モデル構築に重要な材料パラメータであり、CAE 予測精度の向上に役立った。引き続き計測精度を様々な観点から検証していく。

図 3-2.7.4-25 は、新たに取得した面外せん断非線形特性も活用し、中空クラッシュボックスの落錘軸圧潰挙動の数値解析モデルによる再現性を実験結果と比較したものである。プログレッシブ破壊進展の様子を再現できただけでなく、衝撃エネルギー吸収性能も実験とほぼ一致させることができた。ここで培った解析モデルの構築ノウハウは、具体的な衝撃部材の設計・実用化に貢献することが期待できる。

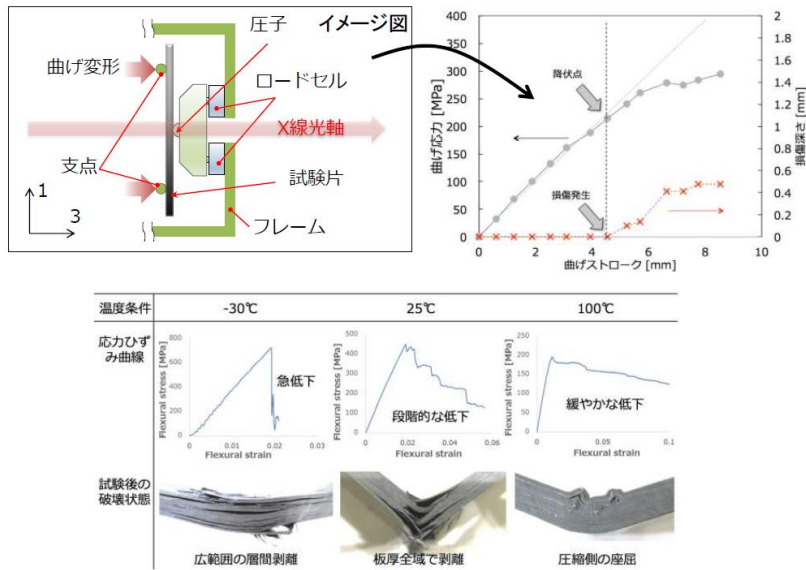


図 3-2.7.4-23 性能評価技術 (曲げ試験法と損傷メカニズム)

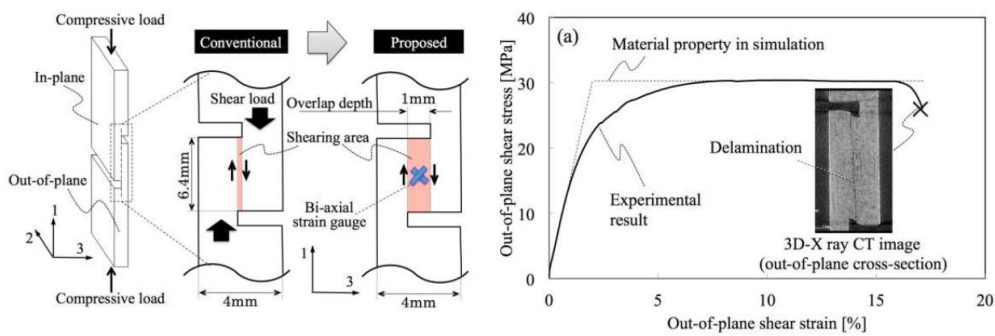


図 3-2.7.4-24 性能評価技術 (面外せん断試験法)

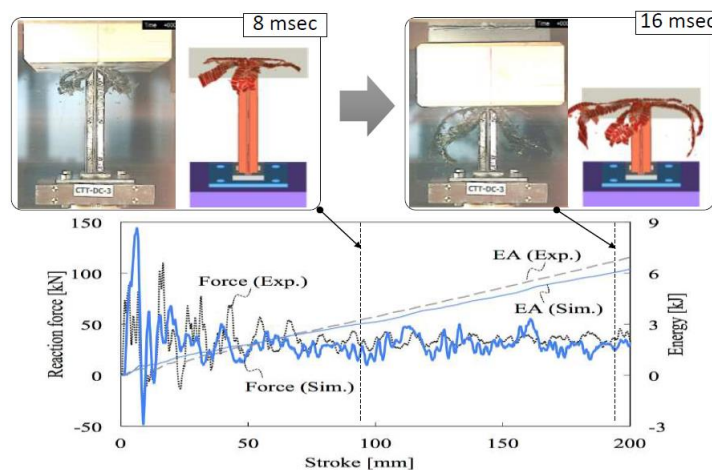


図 3-2.7.4-25 性能評価技術 (軸圧潰挙動の数値解析と実験の比較)

## ②(c)熱可塑性 CFRP を用いた構造設計技術の開発

構造設計のテーマでは、熱可塑性 CFRP に適した構造形状のあり方を検討している。複合材料は面内方向と面外方向の特性差が 1 桁から 2 桁あることで、航空機や圧力容

器など主に面内方向の特性だけを使う用途では圧倒的な軽量性を発揮した。しかし自動車のようにコーナー部や突起がたくさんあり、曲げやねじり荷重もふんだんに受ける複雑構造では、この極端な異方性を正しく考慮した設計を行う必要がある。

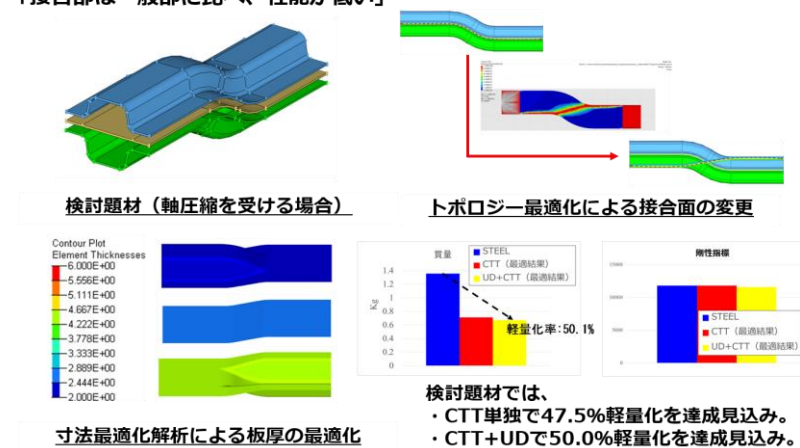
そこで、**図 3-2.7.4-26** に示されるように、金属材料用に開発されている構造最適化ソフトを異方性が使えるように改造したが、上述のように複合材料には性能の大きく異なる基材があり、また実際にハイサイクル成形できる形で無ければならないので、それらも含めた最適化を考える必要がある。現在の所、最も軽量化が困難とされている中空ビーム部材において、構造最適化により 50%以上の軽量化デザインができるようになっている。

また、強度設計においても、極端な強度の異方性を考慮する必要があり、板厚方向の破壊を想定していないシェル要素が使えないという問題がある。そこで、**図 3-2.7.4-27** に示されるように、ソリッド要素とシェル要素のハイブリッド要素を開発し、層間剥離を伴う破壊プロセスも精度良く、かつ高速にシミュレーションできようになった。また、そもそもこのような層間剥離現象が起こらなければ、素材の持つ高い性能を使い切ることができ、かつ CAE の難易度も大幅に下げることが出来ることから、層間剥離が起こらない部材形状の提案も行った。

以上を踏まえ、**②(a)**で示したように、各種大型モデル部材や実物大モデル部材を試作し、構造 CAE 解析との比較を行った結果、汎用の解析ソフトを用いているが、**②(b)**で開発した技術を用いることによって、部材剛性が設計できることが示された。

複合材への構想最適化手法の活用方法を検討する。

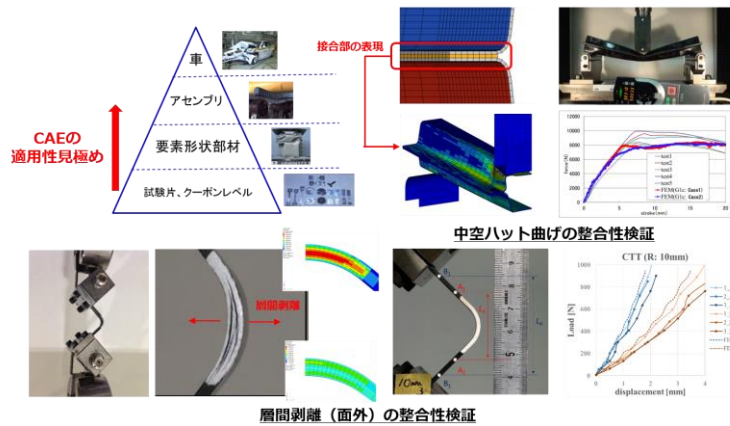
※複合材の特徴：「繊維の向きをコントロールすることで特性が変わる」、  
「接合部は一般部に比べ、性能が低い」



◆ 剛性設計する場合、複合材に適する構造最適化手法が見出せた。

図 3-2.7.4-26 構造設計技術 (1)

実車のCAEを実施するには、材料特性を正しく表現することに加えて、実部品を表現するためのCAE解析手法が必要である。



- ◆ 中空ハット部材の接着部の材料特性を表現することで、曲げを精度良く再現できた。
- ◆ 層間剥離現象を精度良く再現できた。

図 3-2.7.4-27 構造設計技術(2)

## ②(d)熱可塑性 CFRP の成形加工技術の開発

最後に、成形加工のテーマでは、図 3-2.7.4-28 に示されるように、これまでに世界中で提案されている各種成形手法を比較検討することからはじめて、量産車の低コスト成形に適した成形方法を絞り込んだ。特に、複雑な形状を 1 分以内のサイクルで成形する方法としては、本プロジェクトで開発しているような不連続繊維を用いた基材が不可欠である。現在は、さらに低い圧力での成形が可能となる方法を検討しており、これにより生産ラインでのプレス機の容量が 1000t 以下と小さくなって、設備投資コスト削減から、部材単価がさらに下がることにつながると期待できる。

また、基礎検討を行うテーマでは、個々の基材用の非常に管理された良い条件のもとで、素材の持つ性能を十分に発揮する検討を行った。が、実際の成形では様々な材料が同じ装置で成形加工されることから、マルチマテリアル化に向けてはそのような現実的な状況下での科学的な解決方法も研究対象となる。そこで、図 3-2.7.4-29 に示されるように、種々の基材、あるいはそれらのハイブリッド材を同じヒーターで加熱する場合や、さらに金属材料との同時成形や後加工としての接合を行う場合の温度制御、成形・接合時の圧力制御についての検討を行った。この検討は平成 26 年度末に装置の一部を導入し、最適形状や接合検討のための装置も平成 27 年度に導入した。



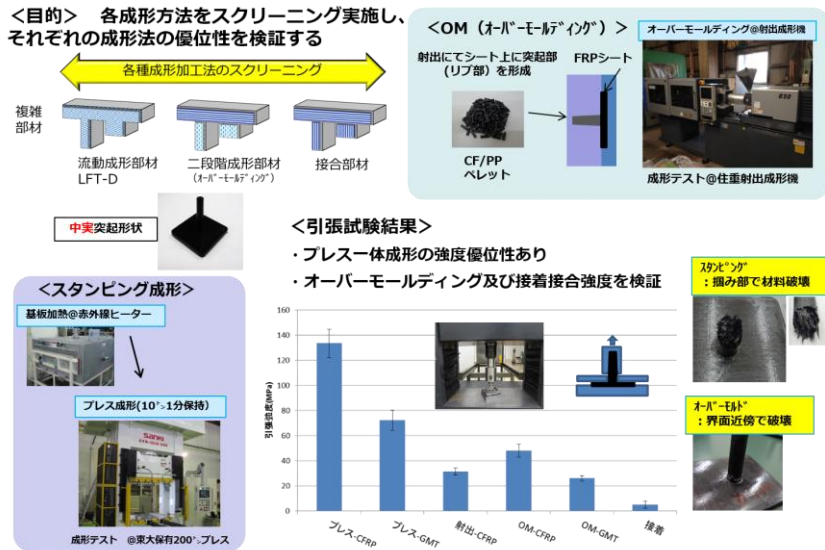


図 3-2.7.4-28 成形加工技術 (1)

- ◆ 成形プロセス検討に必要な装置の一部を導入完了後に検討実施
- ◆ 構造設計 WG の提案形状、接合 WG の提案接合を導入

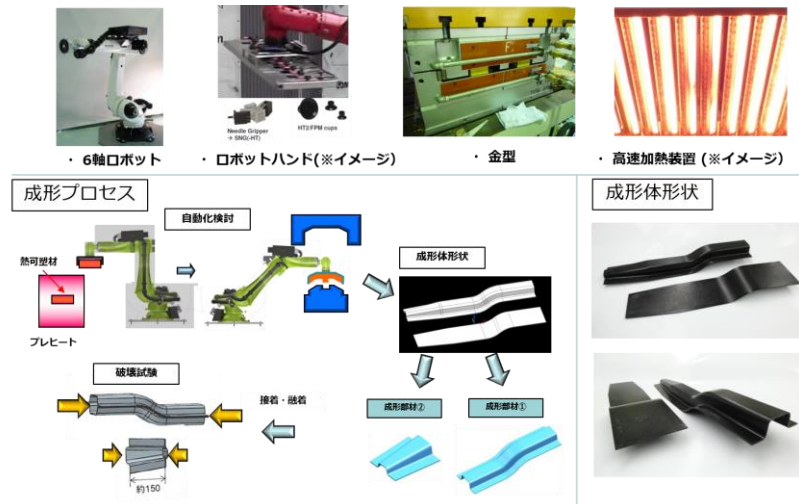


図 3-2.7.4-29 成形加工技術 (2)

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.7.4-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2013FY	8	0	47	5	0	0	0	1	0
2014FY	8	0	27	8	0	0	3	1	1
2015FY	2	2	37	4	1	0	2	0	0
2016FY	16	2	32	1	1	0	1	0	1
2017FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2018FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2019FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	34	4	143	18	2	0	6	2	2

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.7.4-4 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
2015FY	3	0	0
2016FY	3	0	0
2017FY	2	0	0
2018FY	3	0	0
2019FY	0	0	0
2020FY	0	0	0
2021FY	0	0	0
2022FY	1	0	0
合計	12	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

#### 2.7.4.3 参考文献

特になし

**「革新的新構造材料等研究開発」**

**事業原簿【公開】**

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 材料・ナノテクノロジー部
-----	---

## 平成 26 年度～平成 27 年度成果報告書

### 革新的新構造材料等研究開発/研究開発項目⑦ 革新炭素繊維基盤技術開発

#### 成果報告書

平成 28 年 3 月

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

(委託先)国立大学法人 東京大学

## 目 次

I. 要約.....	4
II. 研究計画.....	6
1. 実施計画.....	6
1.1 目的.....	6
1.2 概要.....	7
1.3 内容.....	8
1.4 実施スケジュール.....	18
2. 開発研究体制.....	20
2.1 研究体制スキーム図.....	20
III. 研究開発成果について.....	21
1. テーマの概要.....	21
1.1 背景と目的.....	21
1.2 位置付け、目標値.....	21
1.3 全体計画.....	22
1.4 実施体制.....	23
1.5 運営管理.....	24
1.6 実施の効果(費用対効果、費用・売上・CO <sub>2</sub> 削減・省エネルギー等@2030年度)....	24
2. 研究開発成果.....	26
2.1 目標の達成度.....	26
2.2 最終目標の達成可能性.....	27
2.3 個別テーマの成果と意義.....	30
2.3.1 新規炭素繊維前駆体化合物の開発.....	30
2.3.1.1 新規前駆体化合物 A.....	30
2.3.1.2 新規前駆体化合物 B.....	31
2.3.1.3 再委託先研究成果概要(東レ株式会社).....	32
2.3.2 炭素化構造形成メカニズムの解明.....	33
2.3.2.1 マイクロ波炭素化技術の開発.....	33
2.3.2.2 プラズマ表面処理技術の開発.....	34
2.3.2.3 再委託先研究成果概要(東邦テナックス株式会社).....	35
2.3.3 炭素繊維の評価手法開発、標準化.....	36
2.3.3.1 炭素繊維の直径分布の評価.....	36
2.3.3.2 単繊維ねじり試験.....	38
2.3.3.3 単繊維圧壊試験.....	38
2.3.3.4 単繊維三点曲げ試験.....	39
2.3.3.5 熱膨張率測定装置の開発.....	40
2.3.3.6 界面接着性評価法の開発と比較.....	43

2.3.3.7 再委託先研究成果概要(三菱レイヨン株式会社) .....	46
2.3.3.8 再委託先研究成果概要(日本プラスチック工業連盟) .....	47
2.3.3.9 再委託先研究成果概要(金沢工業大学) .....	48
2.3.4 成果の普及(論文、外部発表等).....	49
2.3.5 知的財産権等の確保に向けた取り組み(戦略に沿った取り組み、取得状況) .....	49
2.3.6 論文賞受賞について.....	49
IV. 成果資料(論文、外部発表、発明等) .....	50
1. 概要 .....	50
2. 特許 .....	50
3. 論文 .....	50
4. その他外部発表 .....	51
4.1 学会発表・講演 .....	51
4.2 新聞・雑誌等への掲載 .....	55
4.3 プレス発表 .....	55
5. 展示会への出展 .....	55
6. 受賞 .....	55
7. フォーラム等 .....	56
V. プロジェクト用語集 .....	57

## I. 要約

(和文)

本基盤技術開発において、次の3テーマについて研究開発を実施した。

### (1) 新規炭素繊維前駆体化合物の開発

耐炭化プロセスを不要とする高性能炭素繊維が得られる新しいポリマー前駆体候補物質の絞り込みの結果、引張試験において、引張弾性率が 240GPa、破断伸度 1.5%の炭素繊維が得られるなど、目標値をクリアする結果を得た。新たな炭素繊維前駆体の効率的な合成技術を確立し、また太径単糸など、耐炭化不要であることによって製造が容易になる異形状の高多機能炭素繊維の作製にも着手した。

### (2) 炭化構造形成メカニズムの解明

炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関解明を進めるとともに、マイクロ波による焼成工程の安定化に必要な技術の検証と炭素化条件の最適化を図った。PAN系耐炭化糸を用いたマイクロ波加熱による炭素化実験において、引張弾性率 247GPa、破断伸度 1.7%を示す炭素繊維の製造に成功した。装置構造改良や運転条件の適正化により、性能や品質の向上が示された。前駆体物質のマイクロ波炭素化技術を確立し、マイクロ波による加熱メカニズムやそれによる炭素化の解析に適合した新たな評価法が開発された。プラズマ表面処理技術については、計画を前倒しして、実用化に必要なスケールアップ技術の開発ステージに移行している。

### (3) 炭素繊維の評価手法開発、標準化

横方向圧壊試験、曲げ試験およびねじり試験方法については、計画通り、テスト報告を作成した。熱膨張率計測装置は、試験装置開発を完了し評価手法を確立した。熱可塑性樹脂との界面接着性については、4種類の手法について比較検討し、新規手法(引抜き法)を開発した。



(英文)

In this fundamental technology development, following three themes of the research and development have been carried out.

(1) Development of new carbon fiber precursor

We succeeded in producing carbon fibers with the tensile modulus of 240 GPa and the 1.5 % elongation, which have reached the targets, as a result of developing new precursor polymers which give high performance carbon fibers without flame proofing process. Further progress of the efficient process technology of new carbon fiber precursors has been achieved. Additionally, we have started investigating the production of high performance and multifunctional carbon fibers with a different shape or a thick monofilament diameter which could be easily prepared from the novel precursors not requiring flame proofing process.

(2) Analysis of carbonization mechanism; Development of carbonization process by microwave heating

In addition to the study on relationship between structure formation process of carbon fibers and the mechanical properties, techniques for stabilization of microwave heating process and optimization of carbonization conditions were investigated. In carbonization experiments with microwave heating using PAN-based flame-resistant yarns, we succeeded in the production of carbon fibers showing tensile modulus of 247 GPa and 1.7 % elongation. The performance and quality of carbon fibers were improved by optimization of the device and improvements of operating conditions. Additionally, heating mechanism by microwave was investigated and new evaluation methods which are suitable for analysis of the carbonization process were developed. We also developed the plasma surface treatment technology. The development stage has been shifted to the scale-up technology which is necessary for practical use by accelerating the implementation of the plan.

(3) Development of evaluation methods of carbon fibers and standardization

We completed a test report of procedures for transversal compression test, bending test and torsion test. Thermal expansion coefficient measuring apparatus and the evaluation techniques have been developed. The interfacial adhesion performance between carbon fibers and thermoplastic resins measured by four kinds of methods has been compared and a new technique (pull-out method) has been developed.

## II. 研究計画

### 1. 実施計画

#### 1.1 目的

我が国の繊維産業は世界に誇る高い技術力を有しており、特に省エネルギーや環境保全等の分野での貢献が期待されている。世界に誇る我が国の高い繊維技術の国際競争力の維持・強化や省エネルギー・CO<sub>2</sub>排出量削減等エネルギー・環境問題への対応を積極的に図るため、繊維分野における環境関連技術や環境問題に貢献できる素材技術等の研究開発を進めるとともに、繊維製造工程における省資源・省エネルギーを推進することが重要である。

特に、炭素繊維は我が国が世界市場の約7割を占める国際競争力の非常に強い高付加価値素材であり、軽くて強いという特性から省エネルギーや環境保全等の社会的ニーズに大いに応えることができる繊維素材として位置づけられている。この炭素繊維を用いた複合材料は、航空機等で燃費向上のためにすでに用いられており、今後自動車を始めとする新たな分野への使用拡大が期待されている。

しかしながら、現在の炭素繊維製造方法(進藤方式)は、アクリル繊維を空气中高温で熱処理(耐炭化)するもので、製造時における消費エネルギー及びCO<sub>2</sub>排出量はいずれも鉄の約10倍と高い。また、製造装置の除熱効率の限界から生産性もなかなか高められないのが現実であり、これらは大きな課題となっている。今後の自動車の軽量化に向けた普及拡大を考えると、近い将来見込まれる炭素繊維の大量需要に的確に対応していくことが必要である。

これらの課題を解決し、我が国の炭素繊維の国際競争力を維持・強化するとともに自動車等新たな分野への活用を広げるためには、炭素繊維の製造時のエネルギー・CO<sub>2</sub>排出量の半減及び生産性の大幅向上(約10倍の生産量)を両立させた革新的な炭素繊維製造プロセスに係る基盤技術の開発を行い、産業技術へと繋げていくことが必要である。

従って、本事業では、産学官が一体となり科学的知見を結集し、以下の事業内容のとおり、従来と全く異なる革新的な炭素繊維製造プロセスに関する研究開発を実施した。

## 1.2 概要

炭素繊維の製造時のエネルギー・CO<sub>2</sub>排出量の半減及び生産性の大幅向上(約 10 倍の生産量)を実現するための基盤技術として、従来の炭素繊維製造プロセスにおける耐炭化工程を不要とする技術の確立を図るため、以下の項目について研究開発を推進した。

### \* 研究開発項目

#### ① 新規炭素繊維前駆体化合物の開発

新規炭素繊維前駆体化合物の開発においては、得られる炭素繊維のさらなる性能向上のため、新規前駆体の改良検討を推進する。また、新規前駆体の合成方法の最適化ならびに品質安定化のための条件検討を実施するとともに、炭素繊維の製造効率向上のための製糸条件の検討を進める。

#### ② 炭素化構造形成メカニズムの解明

炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関解明を進めるとともに、マイクロ波による炭素化工程の安定化に必要な技術の検証と炭素化条件の最適化を図る。プラズマ表面処理については、均質かつ適正な官能基量の炭素繊維表面を得るため、処理条件の最適化を進める。

#### ③ 炭素繊維の評価手法開発、標準化

炭素繊維の評価手法開発、標準化では平成 25 年度までに作成した素案に基づき、試験評価法の規格原案作成のための検討を推進する。界面接着性についての評価手法の検討を進めるとともに、革新炭素繊維/樹脂複合材料の基礎物性評価を開始する。

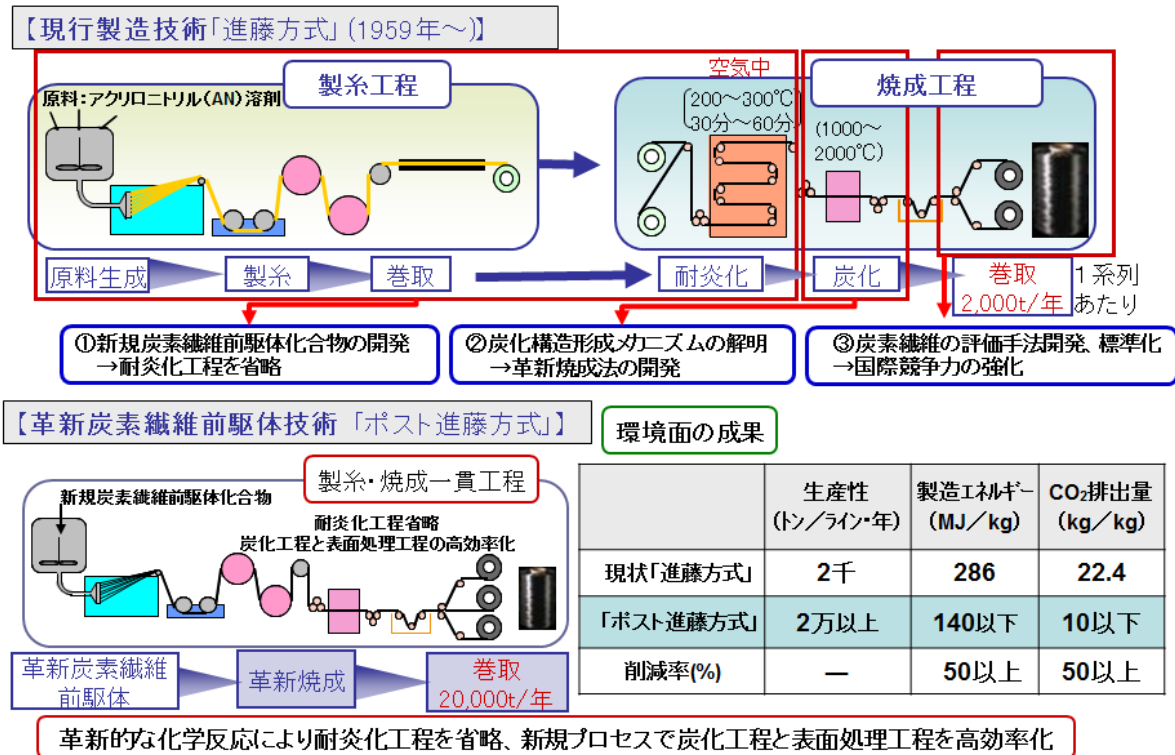


図 1.2-1 革新炭素基盤技術開発の全体構想

### 1.3 内容

(以下は、開発開始時点の計画を示す)

#### 研究開発項目① 新規炭素繊維前駆体化合物の開発

(担当：東京大学、産業技術総合研究所、東レ株式会社)

##### 【第1期目標(平成27年度末)】

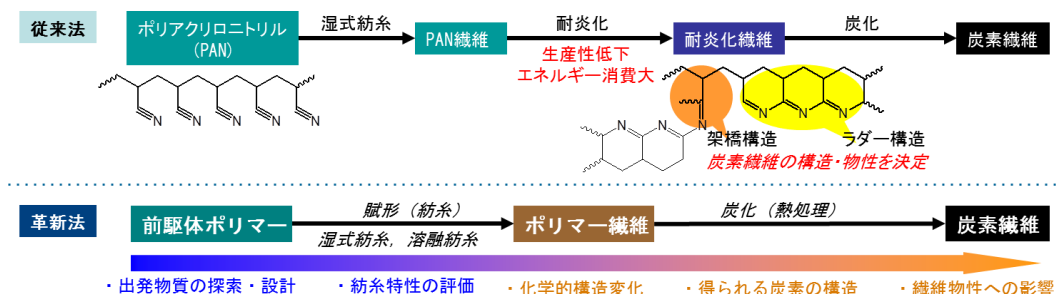
研究開発項目②「炭素化構造形成メカニズムの解明」の成果とあわせて、新たな炭素繊維前駆体の効率的な合成プロセス技術を確立し、新たな炭素繊維前駆体を開発する。なお、目標とする炭素繊維の特性は、市販の汎用炭素繊維と同等の特性(引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%)とする。

上記目標を達成するため、平成26年度、及び、平成27年度は以下の項目を実施する。

#### ①-1 「新規前駆体化合物Aの開発」 (担当：産業技術総合研究所)

(新規炭素繊維前駆体化合物である縮合多環芳香族系ポリマーの開発)

炭素繊維を生産するための基本である、有機化合物の熱処理による炭素の製造(炭素化)過程において、炭素骨格が生成していく経路、及び、最終的に得られる炭素の構造は、出発物質に非常に強く依存することが知られている。本事業の目標である耐炭化工程の不要化を達成するためには、従来の原料有機化合物と異なる炭素化過程を経る新規前駆体の創製が必須である。本開発項目においては、PANに代わる新たな炭素繊維前駆体となりうる縮合多環芳香族系ポリマーの探索・設計を行う。



溶媒可溶性ラダーポリマー：湿式紡糸法	
<b>【特徴】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>分子設計の自由度</li> <li>繊維軸方向への選択配向</li> <li>高強度繊維製造向き</li> </ul>	<b>【技術ポイント】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>溶媒可溶性の確保</li> <li>耐炭化処理が不要</li> <li>架橋構造と積層構造の制御</li> </ul>
<b>【モデル構造】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>・4官能性モノマーを重合</li> <li>・溶媒に可溶</li> </ul>	<b>【具体的構造例】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>縮合多環芳香族ユニット (積層構造体形成・可溶性確保)</li> <li>反応性部位 (架橋構造形成)</li> </ul> <p><b>高耐熱性 耐炭化不要 炭化収率高</b></p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>高い溶解性と高い炭化収率 (75%以上) ⇒ 生産性向上</li> <li>高耐熱性 ⇔ 不炭化処理不要 ⇒ 省エネ&amp;コスト削減</li> <li>炭素の結晶性を広範囲に制御可能 ⇒ 炭素繊維の機械特性制御</li> </ul>	

図 1.3-1 革新炭素繊維前駆体化合物 A の技術概要

**【平成 26 年度計画】**

縮合多環芳香族系ポリマーの改良により、炭素繊維として引張弾性率、破断伸度を向上させる新規炭素繊維前駆体を開発する。

**【平成 27 年度計画】**

研究開発項目②の成果とあわせて、新たな炭素繊維前駆体の効率的な合成プロセス技術を確立し、新たな炭素繊維前駆体を開発する。なお、目標とする炭素繊維の特性は、市販の汎用炭素繊維と同等の特性(引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%)とする。

①-2 「新規前駆体化合物Bの開発」 (担当：東京大学)

繊維(固体)を空气中で耐炎化处理する現行プロセスに比べて、エネルギー効率が非常に有利なプロセスで耐炎化处理を行うため、液相(溶液)反応で耐炎ポリマーを合成し、耐炎化不要の前駆体繊維を得る方法を開発する。有機化学反応論を駆使し、高分子溶液中で特殊酸化剤及び特殊溶解剤を反応させ、溶媒に溶解可能な炭素繊維前駆体化合物(溶解剤が酸化ポリマー鎖に振り袖状に結合した柔軟構造、溶媒可溶性耐炎ポリマー)を得ることを目指す。

**【平成 26 年度計画】**

溶媒可溶性耐炎ポリマーの合成条件を検討し、炭素繊維として引張弾性率、破断伸度を向上させる新規炭素繊維前駆体を開発する。

**【平成 27 年度計画】**

研究開発項目②の成果とあわせて、新たな炭素繊維前駆体の効率的な合成プロセス技術を確立し、新たな炭素繊維前駆体を開発する。なお、目標とする炭素繊維の特性は、市販の汎用炭素繊維と同等の特性(引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%)とする。

①-3 「炭素繊維の新たな前駆体化合物の合成・製糸技術の確立」(担当：東レ株式会社)

革新炭素繊維基盤技術開発で得られた炭素繊維前駆体高分子化合物を連続的に繊維化するための技術工業化には、炭素繊維前駆体高分子化合物の均一性や経時安定性が重要である。そこで、工業化に必要な評価項目を明確化する基礎技術検討を行う。また、必要に応じて、炭素繊維前駆体高分子化合物の基本組成の見直しを行う。

**【平成 26 年度計画】**

炭素繊維前駆体高分子化合物について、繊維断面均一性や、分子組成を進藤方式の繊維と比較し、工業スケールで目標の炭素繊維の機械特性を達成するため前駆体繊維構造を明らかにする。工業化を想定したプロセスウィンドウを明確化するため、工業スケールでの安定操業に関連するポリマーの経時安定性について、評価法を確立する。また、パイロットスケール合成(350L 規模)を実施する。

**【平成 27 年度計画】**

東京大学で改善処方を用いた炭素繊維前駆体高分子化合物について、工業スケールで連続的な操業性を達成する指標として、1ヶ月程度の長期保管試験後、平成26年度に確立する評価項目に変化がないことを確認する。スケールアップ合成により得た炭素繊維前駆体繊維と炭素繊維について、平成26年度に得た知見に照らし合わせて炭素繊維物性が改善する構造を形成しているか東京大学と連携して確認する。

新規前駆体の候補である炭素繊維前駆体高分子化合物について、経時安定性評価を行い、更に実用化のための課題の検討を行う。

研究開発項目② 炭素化構造形成メカニズムの解明

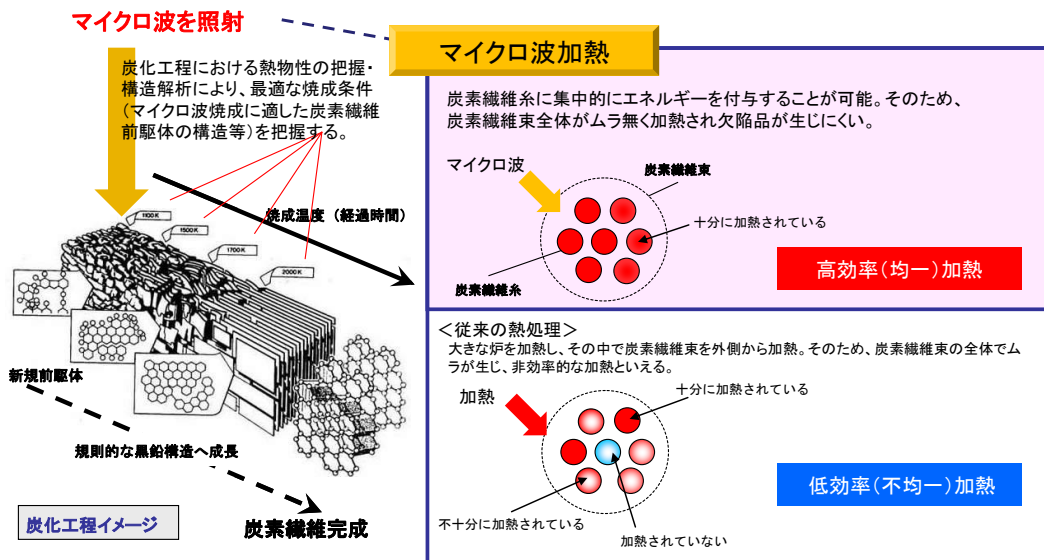
(担当：東京大学、産業技術総合研究所、東邦テナックス株式会社)

【第1期目標(平成27年度末)】

研究開発項目①「新規炭素繊維前駆体化合物の開発」の成果とあわせて、新たな炭素繊維の製造技術を開発する。なお、汎用炭素繊維と同等の特性とは、引張弾性率235GPa、破断伸度1.5%とする。

上記目標を達成するため、平成26年度、及び、平成27年度は以下の項目を実施する。

炭素化構造形成メカニズムの解明では、炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関解明を進めるとともに、マイクロ波による炭素化工程の安定化に必要な技術の検証と炭素化条件の最適化を図る。プラズマ表面処理については、均質かつ適正な官能基量の炭素繊維表面を得るため、処理条件の最適化を進める。また、新規炭素繊維前駆体化合物の開発進展による耐炭化工程の必要のない新たな炭素化工程において、高多機能化炭素繊維を試験的に製造し、その物性を検証する。



炭化工程でのマイクロ波加熱による炭化構造形成のメカニズムの解明を行い、最適な焼成条件を探索する。

図1.3-2 炭素化メカニズムの解明

## ②-1 「炭素化過程における構造・物性変化の解明」

(担当：東京大学、産業技術総合研究所)

本事業においては、従来にない全く新しい前駆体の確立を目指しており、本炭素化構造形成メカニズムの解明は、それらの炭素化過程を詳細に検討するものである。研究開発項目①で検討する新規前駆体繊維(比較として既存の耐炎化繊維)の効率的炭素化処理に関する基礎知見を得るため、マイクロ波の照射条件がどのように炭素繊維の構造変化や物理的性質変化に影響を与えるか検討する。また、炭素化過程における構造変化、機械特性との相関等についての知見を得るため、炭素化に伴うボイドや、炭素化物構造の形成過程を連続的に測定する手法を開発する。

### 【平成 26 年度計画】

新規前駆体繊維や耐炎化繊維のマイクロ波に対する特性を把握し、照射過程における炭素繊維の化学構造変化や電磁気学的な性質変化、力学的な性質変化との相関関係を検討する。

### 【平成 27 年度計画】

マイクロ波炭素化過程を経た新規前駆体繊維や耐炎化繊維の性能評価を基にして、マイクロ波炭素化技術の確立に資する基礎データを蓄積する。

## ②-2 「マイクロ波等による炭素化技術の確立」(担当：東京大学、産業技術総合研究所)

これまで、繊維のみならずフィルムやポリマー単体へのマイクロ波照射による炭素化挙動はほとんど報告例がない。マイクロ波照射時の発熱機構をシミュレーション、および実機において検証し、効果的なマイクロ波炭素化を実現できる条件を明らかにする。また、マイクロ波照射による炭素化反応と、既存の熱処理の炭素化反応とを比較し、工程上の優劣、及び両方法から得られた繊維構造の差異を明らかにして、マイクロ波炭素化を用いた革新的な製造方法を開発する。

### 【平成 26 年度計画】

マイクロ波による炭素化工程の安定化に必要な技術の検証を繊維原料の物理的特性から考察し、炭素化条件の最適化を図る。

### 【平成 27 年度計画】

研究開発項目①の成果とあわせて、新たな炭素繊維の製造技術を開発する。なお、目標とする炭素繊維の特性は、市販の汎用炭素繊維と同等の特性(引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%)とする。

## ②-3 「プラズマ等による表面処理技術の確立」(担当：東京大学)

炭素繊維にプラズマ等を照射し、照射前後の炭素繊維表面の構造、官能基種・量・分布状態を分光分析的手法、熱機械的手法等を用いて解析し、表面状態の変化を観察する。

また、これを従来技術である薬液表面酸化処理で得られるものと比較し、差異を明らかにする。炭素繊維内部及び表面の構造・状態等の物理・化学特性とコンポジット物性等の機械特性との基礎的な相関関係を見出し、目標とするコンポジットの機械特性を達成する上で適した炭素繊維の表面構造を見出すことを目指す。

**【平成 26 年度計画】**

プラズマ表面処理の均質かつ適正な官能基量の炭素繊維表面を得るための処理についての制御条件を調査する。

**【平成 27 年度計画】**

プラズマ表面処理の均質かつ適正な官能基量の炭素繊維表面を得るための処理条件の最適化を行う。

②-4 炭素化プロセス技術の開発(担当：東邦テナックス株式会社)

東京大学で検討する炭素化理論や技術に裏打ちされた連続炭素化技術の設計を行う。設計の過程で電磁界シミュレーションを活用し、シミュレーション結果と既設装置内で起こる現象の比較解析を行うとともに、安定炭素化に必要な要件を明確にする。これらの知見を基に装置を設計、製作し、前駆体繊維の連続炭素化を実証する。

また、東京大学での検討成果を踏まえ、表面処理に適した処理条件を選定し、連続表面処理が可能であることを実証する。この結果を基に、より大規模な炭素化処理および表面処理に適した設備とするための設計を行い、有効性の検証を行う。

**【平成 26 年度計画】**

炭素化に適したマイクロ波照射による加熱方式を、これまでに得られた知見から比較し、評価する。スケールアップに向けた装置の設計のため、電磁場シミュレーションを行う。炭素化装置を設計し、製作する。

製作した炭素化装置を用いて電磁場シミュレーション結果の検証を行うとともに、得られた繊維の分析、解析結果を電磁場シミュレーションにフィードバックし、設計パラメータの精度を向上させる。

**【平成 27 年度計画】**

スケールアップに向けた加熱モジュールを製作し、炭素化の検討を行う。この結果を基にプロセスパラメータ、エンジニアリングデータを取得し、エネルギー効率を算出する。

これらの結果からマイクロ波炭素化技術の生産機への採用実現可能性を検証し、スケールアップ装置の提案を行う。



## ②-4-2 プラズマ等による連続表面処理技術の確立

(担当：東邦テナックス株式会社)

東京大学での条件検討から得られた、スケールアップ(高速処理、複数本処理)に適したプラズマ等による表面処理技術、条件を基準に、大型化の検討を行う。実生産工程への適用可否を判断するため、スケールアップ技術の開発を行い、大型装置の一部のモジュールを設計、製作し、将来の大規模設備に向けた、エンジニアリングデータの取得、エネルギー効率の算出、スケールアッププロセス構想の立案とスケールアップに向けた課題の洗い出しとその評価を行う。

表面処理後の繊維の複合材料物性を評価し、ベンチマークとなる既存の炭素繊維との比較を行い、実用化可能なレベルであるかを検証する。

### 【平成 26 年度計画】

オンラインでの炭素繊維の連続表面処理技術を確立する。

従来のエポキシ樹脂系複合材料の物性を評価し、ベンチマークとなる既存の炭素繊維との比較を行う。

ラボスケールの装置での検討結果を基にしたスケールアップ試験装置の設計、製作を開始する。

### 【平成 27 年度計画】

スケールアップ試験装置を用いた表面処理プロセスの最適化検討を実施する。得られた炭素繊維を用いた複合材料の物性を評価し、ベンチマークとなる既存の炭素繊維との比較を行い、実用化可能なレベルであるかを検証する。

研究開発項目③ 炭素繊維の評価手法開発、標準化(担当：東京大学、産業技術総合研究所、三菱レイヨン株式会社、日本プラスチック工業連盟、金沢工業大学)

### 【第 1 期目標(平成 27 年度末)】

圧縮試験、曲げ試験、ねじり試験方法の規格原案を作成し、JIS/ISO 化に必要なデータを収集する。また、単繊維の熱膨張率計測試験について、試験装置を開発し、評価手法を確立するとともに、熱可塑性樹脂との界面接着特性試験について、複数の評価手法にて比較検討を行い、その結果をテスト報告(TR)としてとりまとめる。

上記目標を達成するため、平成 26 年度、及び、平成 27 年度は以下の項目を実施する。

## ③-1 「単繊維材料の力学的特性評価手法並びに熱膨張率計測法の開発」

(担当：産業技術総合研究所)

単繊維炭素繊維の横方向圧壊試験法、曲げ試験法、ねじり試験法、熱膨張率計測法の開発を行う。その手法の標準化への規格原案を作成するとともに、標準化に必要な試験を実施し、データ収集を行う。また、新規な炭素繊維の材料力学特性を複合材料設計(シミュレーション)に応用するための技術データ(引張特性、弾性率、熱膨張率等)

の収集も行う。有限要素法による数値解析等を通じて炭素繊維の特有の材料力学的知見を得ることも検討する。

図 1.3-3 に、評価手法の例と研究目的を簡潔に表現した概念を示す。

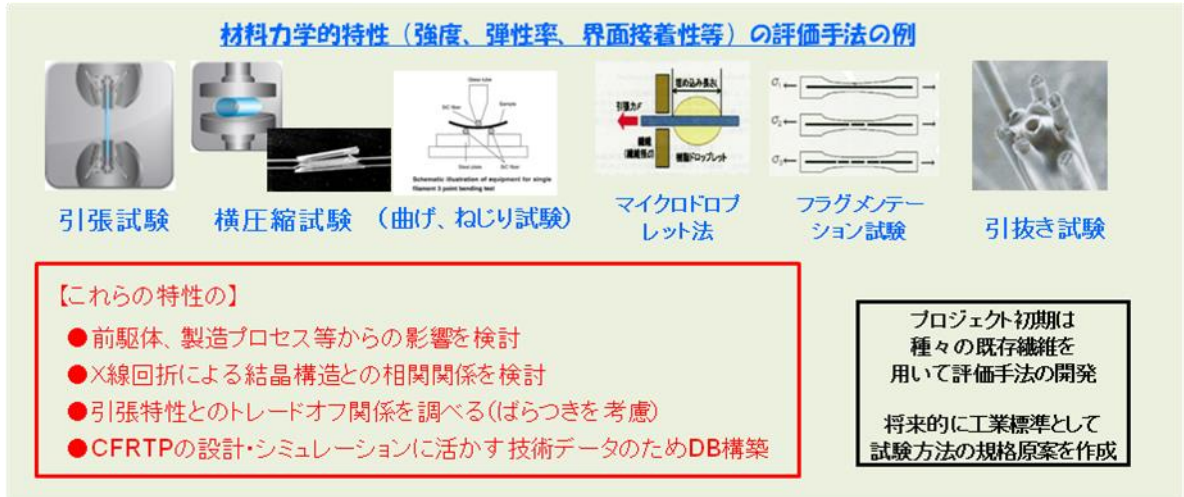


図 1.3-3 材料力学特性および界面特性の評価手法

**【平成 26 年度計画】**

評価手法開発、標準化について試験評価法の規格原案作成のための検討を推進する。また、単繊維の熱膨張率計測試験について、試験装置を開発する。

**【平成 27 年度計画】**

圧縮試験、曲げ試験、ねじり試験方法の規格原案を作成し、JIS/ISO 化に必要なデータを収集する。また、単繊維の熱膨張率計測試験について、試験装置を開発し、評価手法を確立する。

③-2 「界面接着性評価」（担当：東京大学）

炭素繊維とマトリクス樹脂の界面接着性はコンポジットの物性に大きく影響する。しかしながら、炭素繊維と樹脂との界面接着性評価法は標準化されていない。そこで、単繊維やトウを使った炭素繊維/樹脂複合界面の接着性評価手法を確立することを目的に、現在その評価法として一般的に行われているマイクロドロプレット法やフラグメンテーション試験の課題抽出と評価手法の開発・提案を実施し、その標準化を目指す。

**【平成 26 年度計画】**

マイクロドロプレット法やフラグメンテーション試験等、炭素繊維/樹脂複合界面の接着性を評価する複数の手法について比較検討を行う。

**【平成 27 年度計画】**

熱可塑性樹脂との界面接着特性試験について、複数の評価手法について比較検討を行い、その結果をテスト報告(TR)としてとりまとめる。

### ③-3 評価手法の開発、標準化検討(担当：三菱レイヨン株式会社)

複合材料の物性発現において、炭素繊維と樹脂の接着性や、炭素繊維の配向が重要な因子である。まず、炭素繊維と樹脂との接着性評価に関し、炭素繊維の表面処理の影響、樹脂の改質の影響を系統的に検証する。また、コンポジット中の繊維配向の非破壊解析手法として X 線 CT 装置や X 線回折装置を用いた手法を検討し、繊維配向の定量化にも取り組む。これら 2 つの検討により、炭素繊維と樹脂の接着性と炭素繊維配向がコンポジット物性に及ぼす影響を解明する。さらには、得られた相関性からコンポジット物性の発現メカニズムを解明し、複合材料の評価における最適な試験片形状や試験条件の確立に繋げる。

#### 【平成 26 年度計画】

炭素繊維と樹脂の接着性に対する、炭素繊維表面処理の影響や樹脂の改質の影響を検証する。また、X 線 CT 法、X 線回折法を用いた複合材料中の炭素繊維の配向解析手法を検討し、非破壊解析の可能性を見極める。さらに、各種炭素繊維や樹脂を用いたコンポジットの基本的な物性(引張、曲げ、圧縮)を取得する。

#### 【平成 27 年度計画】

平成 26 年度に実施する炭素繊維と樹脂の接着性評価、炭素繊維配向解析及びコンポジット物性を統合し、それらの相関性を検証する。さらに、その相関性を基にして物性発現メカニズムを解明し、複合材料の評価の標準化に繋げる。

### ③-4 繊維強化・複合材料に関する標準化調査 (担当：日本プラスチック工業連盟)

本事業によって開発する炭素繊維及びそれによる複合材料の実用化には評価手法及びその標準化が重要である。同分野の標準化に関しては、日本は、ISO/TC61(プラスチック)/SC13(複合材料・強化材)で議長及び幹事国として中心的役割を担っているものの、航空宇宙分野では先進性から米国が強みを持ち、日本はこれらの標準化について強みを発揮できなかった反省から、今後は研究開発、素材産業界、ユーザ産業界及び国が連携して強化繊維・複合材料に関する標準化戦略に基づき、オールジャパン体制で国際標準化に取り組めるような体制が必要である。この体制を構築・整備・運営し、並びに国際標準化に係る業務を実施する。

- ・強化繊維・複合材料標準化本委員会(以降、本委員会とする)、下部委員会及び分科会の運営、必要に応じて分科会の設立及び運営
- ・関連する研究開発及び標準化の情報を共有する
- ・標準化開発のロードマップを作成する
- ・現行規格の適用可能性範囲を調査する
- ・海外他の動向に調査する

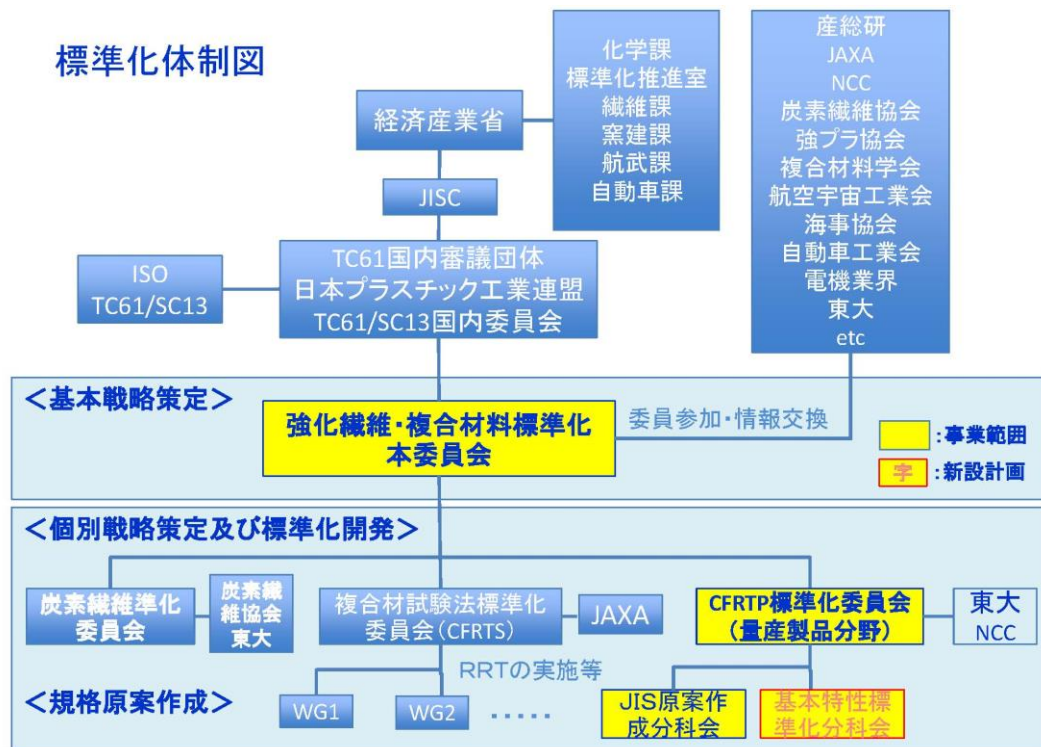


図 1.3-4 標準化体制図

【平成 26 年度計画】

- ・委員会の開催： 本委員会：1 回、下部委員会：2 回、分科会：3 回
- ・委員会の開催、運営を通じて、標準化項目、戦略立案に関する情報調査
- ・CFRTP 基本特性標準化分科会の設立

【平成 27 年度計画】

- ・委員会の開催： 本委員会：1 回、下部委員会：2 回、分科会：3 回
- ・委員会の開催、運営を通じて、標準化項目、戦略立案に関する情報調査及び絞り込み

③-5 炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合材料(CFRTP)の長期耐久性評価法の検討

(CFRTP：Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics) (担当：金沢工業大学)

炭素繊維強化熱硬化性樹脂複合材料(CFRP)を対象にして開発してきた時間-温度換算則を基盤とした長期耐久性評価法をもとに、炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合材料(CFRTP)の長期耐久性評価を行い、熱可塑性 CFRP への適用に向けた長期耐久性評価法の開発を行う。

【平成 26 年度計画】

時間-温度移動因子の評価：熱可塑性 CFRP およびそのマトリックス樹脂単体を取り上げ、種々の温度および負荷応力のもとでクリープ変形試験を行い、クリープコンプライアンスのマスター曲線を構成し、時間-温度移動因子を評価する。

**【平成 27 年度計画】**

長期耐久性評価：数種類のマトリックス樹脂を用いた一方向 CF RTP 積層板を用意し、この CF RTP 積層板に用いられているマトリックス樹脂の動的粘弾性試験を行い、時間－温度換算則の適用性について確認する。そして、一方向 CF RTP 積層板の繊維方向および繊維直角方向の曲げ強度試験を種々の負荷速度および温度のもとで実施し、上記の時間－温度換算則をもとに、それぞれの静的強度のマスター曲線を構成し、長期耐久性を評価する。

## 1.4 実施スケジュール

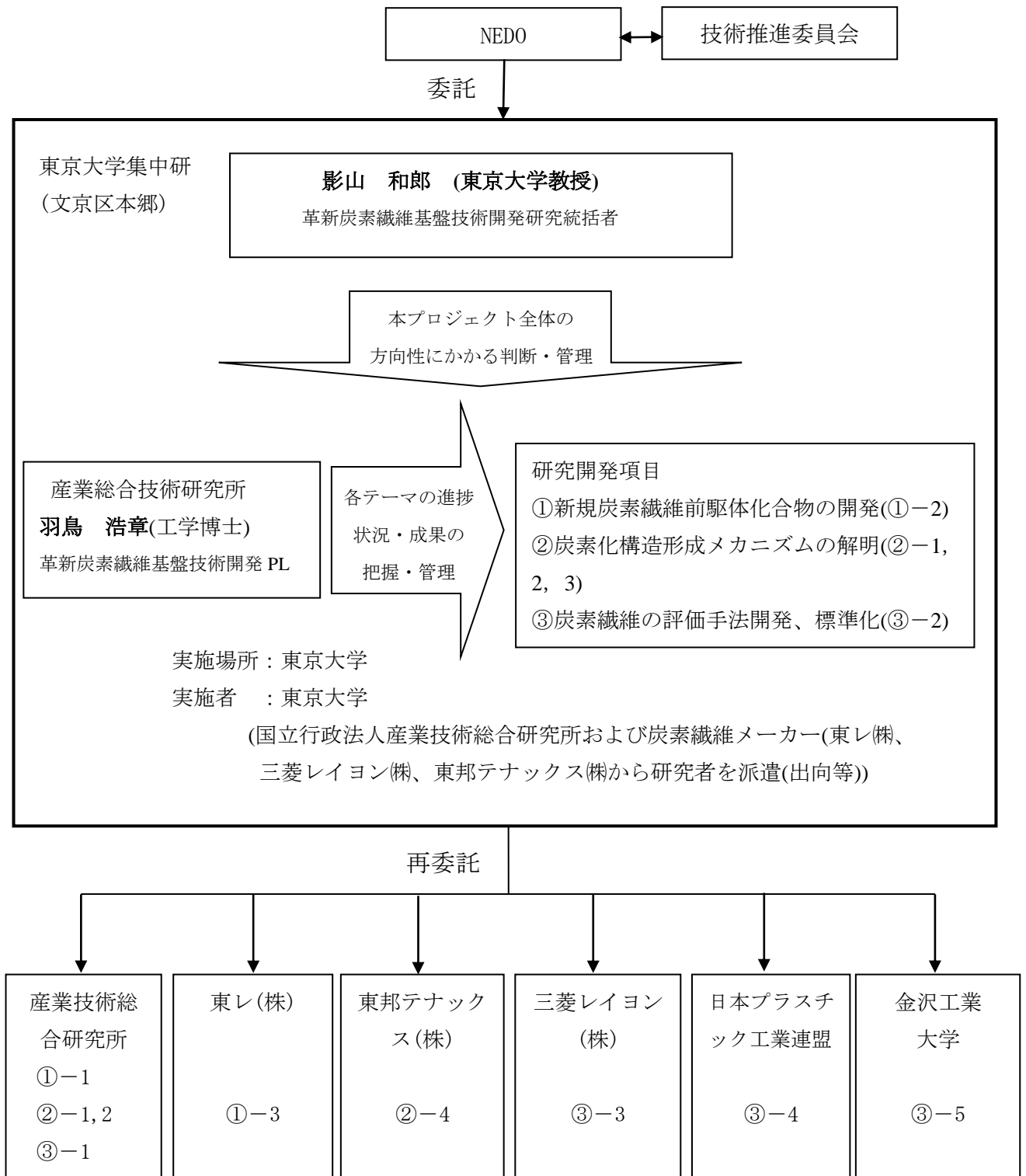
事業項目	平成 26 年度				平成 27 年度			
	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期
<b>①新規炭素繊維前駆体化合物の開発</b> (担当： 東京大学、産業技術総合研究所、東レ株式会社)								
①-1 「新規前駆体化合物 A の開発」 (担当： 産業技術総合研究所)	前駆体改良 合成方法最適化				最終強度、弾性率の達成			
①-2 「新規前駆体化合物 B の開発」 (担当： 東京大学)	合成条件 検討				最終強度、弾性率の達成			
①-3 「炭素繊維の新たな前駆体化合物の合成・製糸技術の確立」 (担当： 東レ株式会社)	安定性評価法検討		評価法確立		経時安定性の課題抽出			
			▽ スケールアップ 合成①		▽ スケールアップ 合成②			
<b>②炭素化構造形成メカニズムの解明</b> (担当： 東京大学、産業技術総合研究所、東邦テナックス株式会社)								
②-1 「炭素化過程における構造・物性変化の解明」 (担当： 東京大学、産業技術総合研究所)	炭素化メカニズムの解明・繊維構造と機械特性との相関解明				繊維構造と機械特性との相関解明			
②-2 「マイクロ波等による炭素化技術の確立」 (担当： 東京大学、産業技術総合研究所)	マイクロ波炭素化挙動解明				繊維構造と機械特性との相関解明			
②-3 「プラズマ等による表面処理技術の確立」 (担当： 東京大学)	表面処理技術・界面特性の検討							
②-4 炭素化プロセス技術の開発 (担当： 東邦テナックス株式会社)	加熱方式の縛りこみ		▽ 装置設計・制作				検証	
②-4-1 マイクロ波による連続炭素化技術の確立 (担当： 東邦テナックス株式会社)	処理方式の		▽ 装置設計		▽		検証	
②-4-2 プラズマ等による連続表面処理技術の確立 (担当： 東邦テナックス株式会社)	縛りこみ		制作				▽	
<b>③炭素繊維の評価手法開発、標準化</b> (担当： 東京大学)								
③-1 「単繊維材料の力学的特性評価手法並びに熱膨張率計測法の開発」 (担当： 産業技術総合研究所)	単繊維評価手法確立・改良				基準化の促進			
③-2 「界面接着性評価」 (担当： 東京大学)	界面接着性評価手法の基礎検討・改良							

③-3 評価手法の開発、標準化検討 (担当：三菱レイヨン株式会社)	接着性、界面特性		物性相関評価検証		▽		
	コンポジット物性、繊維配向解析				物性発現メカニズム		
③-4 繊維強化・複合材料に関する標準化調査 (担当：日本プラスチック工業連盟)	強化繊維・複合材料		標準化本委員会他	委員会運営・調査			
	基本特性標準化分科会設立準備						
③-5 炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合材料(CFRTP)の 長期耐久性評価法の検討 (担当：金沢工業大学)	時間-温度移動因子の評価		▽		強度評価		

## 2. 開発研究体制

### 2.1 研究体制スキーム図

「革新炭素繊維基盤技術開発」実施体制





### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 1. テーマの概要

##### 1.1 背景と目的

軽量・高強度の特徴を持つ炭素繊維は、自動車等の輸送機器の材料として利用することにより大幅な燃費向上が可能となる等、低炭素社会の実現に貢献できる画期的な素材であり、今後の大幅な需要拡大が期待されている。しかしながら、現在の炭素繊維の製造プロセスでは、消費エネルギー及びCO<sub>2</sub>排出量が大きく、生産性の向上も困難であることが課題となっている。

本テーマは、我が国の炭素繊維の国際優位性を維持し、かつ、国内における炭素繊維の利用産業の競争力強化を図っていくため、環境負荷が少なく、かつ、生産性が大きく向上する新たな炭素繊維製造プロセスの基盤技術の研究開発を実施した。

##### 1.2 位置付け、目標値

現在の炭素繊維製造方法(進藤方式)は、アクリル繊維を空气中高温で耐炎化(焼成)するので、製造時における消費エネルギー及びCO<sub>2</sub>排出量はいずれも鉄の約10倍と高い。また、製造装置の除熱効率の限界から生産性もなかなか高められないのが現実であり、これらは大きな課題となっている。今後の自動車の軽量化に向けた普及拡大を考えると、近い将来見込まれる炭素繊維の大量需要に的確に対応していくことが必要である。

本研究開発では、高温長時間の加熱をマイクロ波に代替することなどにより、消費電力及びCO<sub>2</sub>排出量を半減するとともに、製造速度を向上し生産効率を引き上げる炭素繊維製造プロセスの革新を行う。また、炭素繊維の多機能化を目指した異形状炭素繊維の開発と、製造プロセス等に係わる技術開発を実施した。

表 1.1-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一期中間目標 (平成 27 年度末)	根拠
(1)新規炭素繊維前駆体化合物の開発	下記(2)の成果とあわせて、新たな炭素繊維前駆体の効率的な合成プロセス技術を確立し、新たな炭素繊維前駆体を開発する。なお、汎用炭素繊維と同等の特性とは、引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%とする。	耐炎化工程を必要としない新規前駆体を用いて、現行の汎用 PAN 系炭素繊維と同等以上の特性(引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%)を中間目標として設定した。
(2)炭素化構造形成メカニズムの解明	(1)の成果とあわせて、新たな炭素繊維の製造技術を開発する。なお、汎用炭素繊維と同等の特性とは、引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%とする。	(1)上記前駆体開発と同様に、現行の汎用 PAN 系炭素繊維と同等以上の特性(引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%)を中間目標として設定した。
(3)炭素繊維の評	圧縮試験、曲げ試験、ねじり試験方	現在、炭素繊維の材料力学的特性

価手法開発、標準化	法の規格原案を作成し、JIS/ISO化に必要なデータを収集する。また、単繊維の熱膨張率計測試験について、試験装置を開発し、評価手法を確立するとともに、熱可塑性樹脂との界面接着特性試験について、複数の評価手法について比較検討を行い、その結果をテスト報告(TR)としてとりまとめる。さらに、新規炭素繊維前駆体から製造される炭素繊維を適用した複合材料の設計やライフサイクルアセスメント(LCA)に活用するためのデータを収集する。	等の評価手法は、引張試験、密度測定試験、直径計測試験がISOおよびJISに標準化されている。一方、炭素繊維が熱可塑性樹脂をマトリックスとする不連続繊維強化複合材料などの補強材として幅広い用途に使用されていくためには、圧縮、ねじり、曲げといった力学特性、熱膨張率、樹脂界面接着性を一定基準の下、評価することが求められ、また評価技術やデータベース等を確立する必要がある。
-----------	---	---

### 1.3 全体計画

以上の(1)~(3)の研究開発項目に対する全体スケジュール計画を、図 1.3-1 に示す。

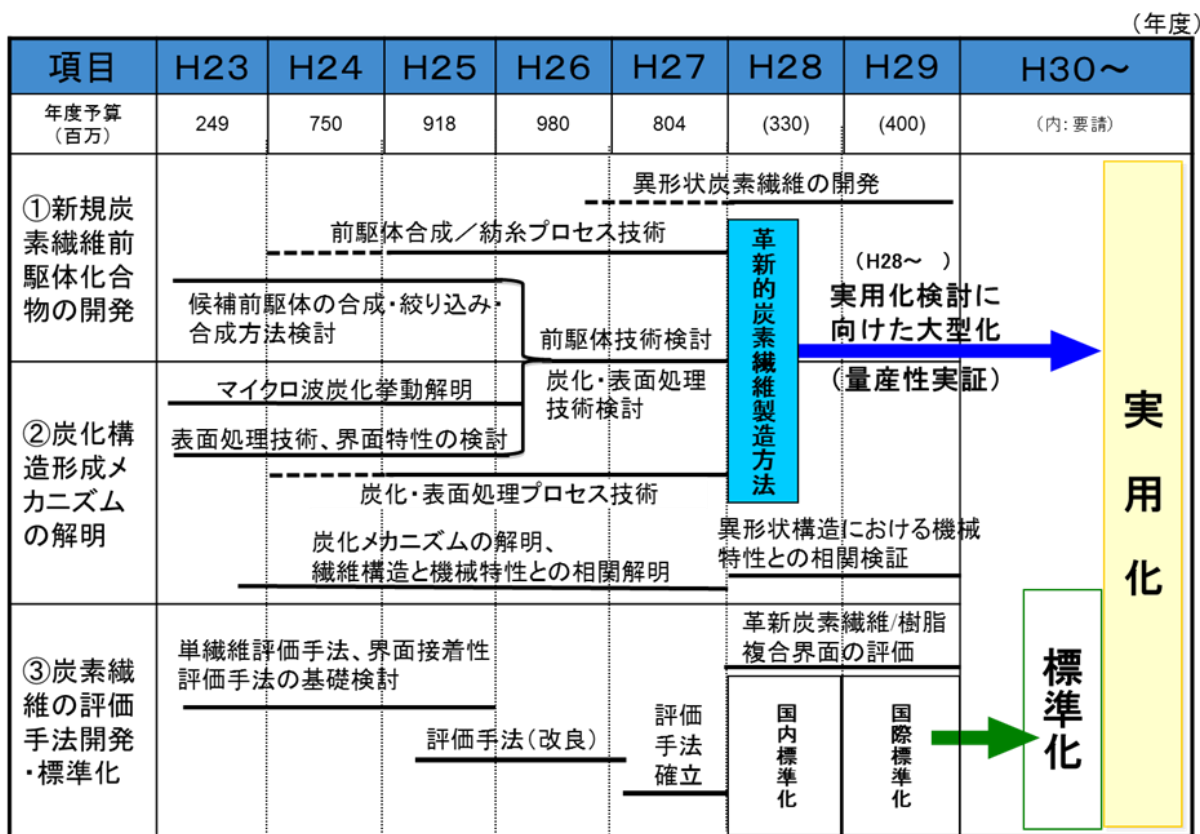


図 1.3-1 革新炭素基盤技術開発 全体計画

## 1.4 実施体制

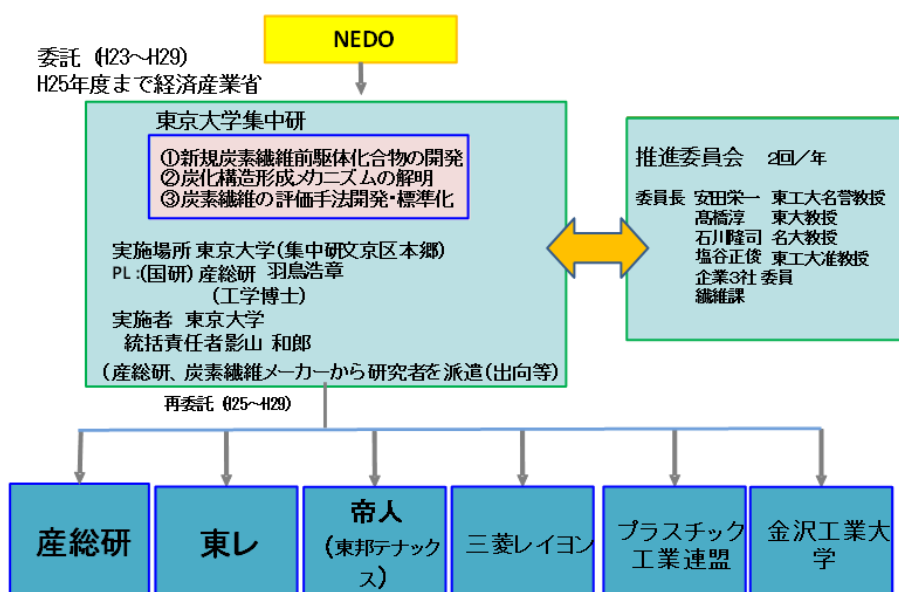
本プロジェクトの具体的な実施体制を図 1.4-1 に示す。NEDO は国立大学法人東京大学と委託契約を締結し、東京大学は産業技術総合研究所、東レ株式会社、東邦テナックス株式会社(帝人株式会社)、三菱レイヨン株式会社、日本プラスチック工業連盟、金沢工業大学へ再委託契約を締結した。東京大学影山研究統括および産総研羽鳥 PL の指示・協議のもとプロジェクトを推進する体制を取っている。委託事業では、東京大学内に集中研を設置し、基盤技術である研究開発項目(1)~(3)を実施した。この中で、産総研および東レ株式会社は(1)新規前駆体化合物の開発を、東邦テナックスは(2)炭素化構造メカニズムの解明を、産総研、三菱レイヨン、日本プラスチック工業連盟と金沢工業大学は(3)炭素繊維の評価手法開発・標準化をそれぞれ担当した。各研究テーマにおいては、参画企業がそれぞれ得意とする要素技術およびノウハウ、さらには研究開発インフラ等を勘案し、研究開発項目毎に個別の要素技術について特に優れた技術力を有する企業を選定し機動的かつ効率的に研究開発を推進した。

また、外部の有識者をアドバイザーとした推進委員会を設けており、専門家の意見を吸収して研究開発を推進する体制をとった。

また、スムーズな連携実施のため、各テーマ毎の個別研究会において研究進捗状況、問題点等を検討し、そこで取り上げられた問題点、およびその対策を研究統括および PL と協議のうえ、的確かつ迅速にプロジェクト全体の研究開発を効率的に推進した。

発明の創出があった場合は、速やかに企業の知財部を交えて発明の出願方針を確認し、迅速な特許出願を行っている。また、プロジェクト全体にかかわる知財の検討課題については、参加機関の知財担当者による知財 WG において定期的に検討した。

### ◆ 研究開発の実施体制



### 事業の進捗管理

会議の名称	頻度
推進委員会	6ヶ月に1回
全体会議	月1回
個別チーム研究会	月1回
発明審査委員会	都度実施
知財WG	2か月に一回
参加企業連絡会	3か月に1回

図 1.4-1 実施体制

## 1.5 運営管理

### ① 研究開発目標の達成

製造エネルギーと CO<sub>2</sub> 排出を現行技術から半減させ、生産性を 10 倍以上に引き上げた、「ポスト進藤方式」による炭素繊維製造プロセスの開発のための基盤技術の開発を推進した。

### ② 産官学の ALL JAPAN チームによる効率的な研究開発の実施

東京大学による集中研方式に産業技術総合研究所が参加した。研究者が東京大学に集まり、同じ屋根の下で一丸となって研究を実施。

コンソーシアムを形成し、機密保持・成果取扱規約について基本合意済み。

東京大学・産総研の研究開発ポテンシャルの活用(若手研究者の育成)。

低炭素工学イノベーション拠点(平成 21 年度産業技術研究開発施設整備費補助金)による研究環境整備。

平成 26 年度—27 年度 研究会・検討会実施状況

推進委員会 4 回実施

研究全体会議 24 回実施

個別研究会(3 件のテーマ毎) それぞれ 24 回実施

### ③ 国立大学法人東京大学に知的財産管理を一元化

特許のパッケージ化、海外企業に買収される心配のない国立大学法人を中心とした。

発明委員会 4 回実施

知財 WG 6 回実施

### ④ 出口を明確にした研究開発：NEDO「熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工技術の開発」の成果との相乗効果を狙う。

CFRP 連携委員会 3 回実施

## 1.6 実施の効果(費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030 年度)

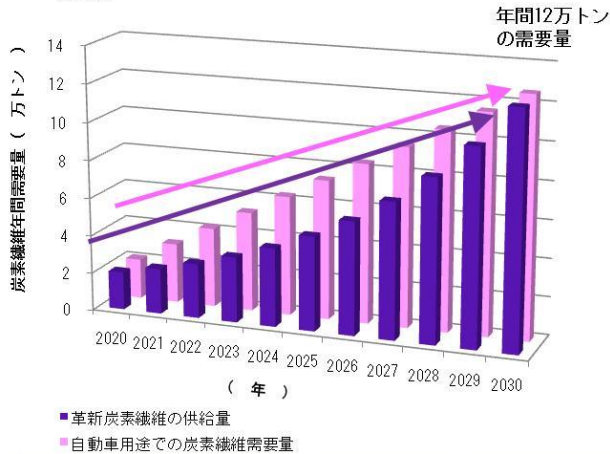
本技術開発のアウトプットからアウトカムへの展開としては、現行の炭素繊維製造における原料(炭素繊維前駆体)、製糸、焼成の技術について、抜本的な見直しを行うことにより、製造エネルギー及び CO<sub>2</sub> 排出量を半減させるとともに生産性も飛躍的に向上させる技術を確立し、自動車等への炭素繊維の普及拡大はもとより新市場の創出・獲得の実現を目指す。アウトカムとしては、我が国の炭素繊維及び関連産業の国際競争力の強化、低炭素社会への実現及び安全性等を確保した自動車などの普及による生活の豊かさへの貢献が挙げられる。

なお、本技術開発のさらなる展開に当たっては、欧米に遅れをとっている製品評価技術等の応用技術や標準化も同時に進めるとともに、本技術開発による研究開発成果の取り扱いへの配慮も必要である。

2030年における自動車分野での炭素繊維需要量と供給量

自動車分野での需要に追いつくためには、炭素繊維供給量を年率20%で生産増加させる必要がある。

※自動車分野での需要量  
国内年間生産台数700万台（普通車+小型車 参考：JAMA統計）に対して、年率0.5~1.5%でCFRP適用率が普及（参考：次世代自動車戦略2010）した場合、及び1台あたり0.1トンの炭素繊維の使用（参考：炭素繊維協会モデル）を想定。



	生産性 (ト/30・年)	製造エネルギー (MJ/kg)	CO2排出量 (kg/kg)
現状「通産方式」	2千	286	22
新規「ポスト通産方式」	2万以上	140以下	11以下
削減率(%)	—	50	50



【2030年】  
年間需要量12万トンの炭素繊維を「進藤方式」で生産した場合との比較  
削減効果

CO2削減量 132万トン/年  
原油換算量 46万KL/年

国内生産

革新的製造技術の確立により、CO2排出量・製造エネルギーは半減する

図 1.6-1 実施の効果

## 2. 研究開発成果

### 2.1 目標の達成度

平成 27 年度末目標(以下、中間目標)に対する達成度について表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 目標と達成度

研究開発項目	目標 (平成 27 年度末)	研究開発成果	達成度 ※	原因・課題と解決方針 ※未達の場合のみ
(1)新規炭素繊維前駆体化合物の開発	下記(2)の成果とあわせて、新たな炭素繊維前駆体の効率的な合成プロセス技術を確立し、新たな炭素繊維前駆体を開発する。なお、汎用炭素繊維と同等の特性とは、引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%とする。	前駆体候補物質の絞り込みの結果、引張試験において、引張弾性率が 240GPa、破断伸度 1.5%の炭素繊維が得られるなど、目標値をクリアする結果を得た。新たな炭素繊維前駆体の効率的な合成プロセス技術を確立しつつあり、また太径単糸など、耐炎化不要であることによって製造が容易になる異形状の高多機能炭素繊維の作製にも着手している。	◎	
(2)炭素化構造形成メカニズムの解明	(1)の成果とあわせて、新たな炭素繊維の製造技術を開発する。なお、汎用炭素繊維と同等の特性とは、引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%とする。	PAN 系耐炎化糸を用いたマイクロ波加熱による炭素化実験において、引張弾性率 247GPa、破断伸度 1.7%を示す炭素繊維の製造に成功した。装置構造改良や運転条件の適正化により、性能や品質の向上が示されており、目標を超える炭素繊維を連続的に製造できる見込みを得た。前駆体物質のマイクロ波炭素化技	◎	

		術を確立しつつあり、マイクロ波による加熱メカニズムやそれによる炭素化の解析に適合した新たな評価法が開発された。プラズマ表面処理技術については、計画を前倒しして、実用化に必要なスケールアップ技術の開発ステージに移行し、技術ファイリングを行った。		
(3) 炭素繊維の評価手法開発、標準化	圧縮試験、曲げ試験、ねじり試験方法の規格原案を作成し、JIS/ISO化に必要なデータを収集する。また、単繊維の熱膨張率計測試験について、試験装置を開発し、評価手法を確立するとともに、熱可塑性樹脂との界面接着特性試験について、複数の評価手法について比較検討を行い、その結果をテスト報告(TR)としてとりまとめる。さらに、新規炭素繊維前駆体から製造される炭素繊維を適用した複合材料の設計やライフサイクルアセスメント(LCA)に活用するためのデータを収集する。	横方向圧壊試験、曲げ試験およびねじり試験方法については、計画通り、テスト報告を作成した。熱膨張率計測装置は、年度内に試験装置開発を完了し、評価手法を確立した。熱可塑性樹脂との界面接着性については、4種類の手法について比較検討し、新規手法(引抜き法)を開発した。	◎	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

## 2.2 最終目標の達成可能性

下記の表 2.2-1 に示すように、各研究開発項目における今後の課題が明確になっていることから、今後は逐次解決に向けて計画的に研究開発を遂行していく。今まで同様に関係機関と協議しながら進行していくという前提をもとに、最終目標達成の見通しがあると判断して

いる。今後はより実用化の促進に目を向け、各企業との連携を強化した体制も築いていく予定であり、将来のユーザーへのサンプル提供なども通して、実用化・事業化を目指して、基盤技術の骨太化と裾野拡大を図っていく。

表 2.2-1 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 29 年度末)	達成見通し
(1)新規炭素繊維前駆体化合物の開発	前駆体候補物質の絞り込みの結果、引張試験において、引張弾性率が 240GPa、破断伸度 1.5%の炭素繊維が得られるなど、目標値をクリアする結果を得ている。 新たな炭素繊維前駆体の効率的な合成プロセス技術を確立しつつあり、太径単糸など、耐炭化不要であることにより初めて製造が可能になる異形状の高多機能炭素繊維ができつつある。	下記(2)の成果とあわせて、異形状炭素繊維の製造技術を確立する。	達成可能と考える。
(2)炭素化構造形成メカニズムの解明	PAN 系耐炭化系を用いたマイクロ波加熱による炭素化実験において、引張弾性率 247GPa、破断伸度 1.7%を示す炭素繊維の製造に成功した。装置構造改良や運転条件の適正化により、性能や品質の向上が示されており、目標を超える炭素繊維を連続的に製造できる見込みを得た。前駆体物質のマイクロ波炭素化技術を確立しつつあり、マイクロ波による加熱メカニズムやそれによる炭素化の解析に適合した新たな評価法が開発された。	前駆体物質のマイクロ波による加熱メカニズムを解明することにより、(1)の成果とあわせて、異形状炭素繊維の製造技術を確立する。	達成可能と考える。



	<p>プラズマ表面処理技術については、計画を前倒しして、実用化に必要なスケールアップ技術の開発ステージに移行し、技術ファイリングを行った。</p>		
<p>(3)炭素繊維の評価手法開発、標準化</p>	<p>横方向圧壊試験、曲げ試験およびねじり試験方法については、標準仕様書(TS)の作成を完了した。熱膨張率計測装置は、試験装置開発を完了し、評価手法を確立した。熱可塑性樹脂との界面接着性については、4種類の手法について比較検討し、新規手法(引抜き法)を開発した。</p> <p>新規炭素繊維の物性に関する評価手法を確立しつつある。熱可塑性樹脂との界面接着性について新規手法を確立しつつある。</p>	<p>熱可塑性樹脂と異形状炭素繊維の界面特性を検証し、その特性発現メカニズムを解明することにより、標準的な力学的試験法を確立する。</p>	<p>達成可能と考える。</p>

## 2.3 個別テーマの成果と意義

### 2.3.1 新規炭素繊維前駆体化合物の開発

耐炎化工程を不要とする新たな炭素繊維前駆体高分子化合物の探索、設計、合成を行った結果、塩基性の含窒素官能基により溶媒に可溶性芳香族系高分子である新規前駆体化合物 A、ならびに溶解剤が酸化ポリマー鎖に振り袖状に結合した柔軟構造を持つ新規前駆体化合物 B について、中間目標に匹敵、あるいはそれを超える特性を示す新規炭素繊維が得られた。新規前駆体 A、B とともに、今後の工業化に向けたプロセス技術の改良により、更なる高性能化のポテンシャルを有するとともに、異形状繊維など、従来の進藤法プロセスでは実現できない特徴的な構造・力学特性を持つ繊維の創出が可能であることが示された。

#### 2.3.1.1 新規前駆体化合物 A

前駆体化合物 A から得られた炭素繊維について、ストランド引張試験の結果を図 2.3.1.1-1 に示す。引張弾性率については、中間目標値である 235GPa を超え、焼成条件等によって 270GPa を超えるものも得られた。この前駆体は PAN とは全く違う構造を有し、耐炎化不要の高耐熱性を持ちながら良好な紡糸性を示し、得られる炭素繊維は、結晶構造、配向性、密度等、すべての構造解析パラメータにおいて、PAN 系炭素繊維と同等の物性値を与えることから、炭素化条件によって、市販の PAN 系炭素繊維と全く同等の引張弾性率制御が可能であることが示された。また、本プロジェクトにおいて開発された手法である、到達可能強度を指標とする検討により、新規前駆体化合物 A から得られる炭素繊維は、市販の汎用 PAN 系炭素繊維と同等の強度が実現可能であることが示された。これにより、破断伸度 (=強度/弾性率で表される)についても、汎用 PAN 系炭素繊維と同等以上の炭素繊維の製造が実現可能であると言える。

この炭素繊維前駆体からは、単糸直径が 17 $\mu\text{m}$  と、市販の汎用炭素繊維(6~7 $\mu\text{m}$ )の 2 倍以上の直径を有する炭素繊維(図 2.3.1.1-2)が得られており、その機械特性も細径のものと大きく変わらないことが示されている。このような単糸直径が太い炭素繊維の製造は、耐炎化工程を必要とする PAN 系炭素繊維では困難であり、耐炎化工程を必要としない新規前駆体の優位性の一つであるとともに、異形状の高多機能炭素繊維の製造という最終目標の達成が期待される結果と言える。

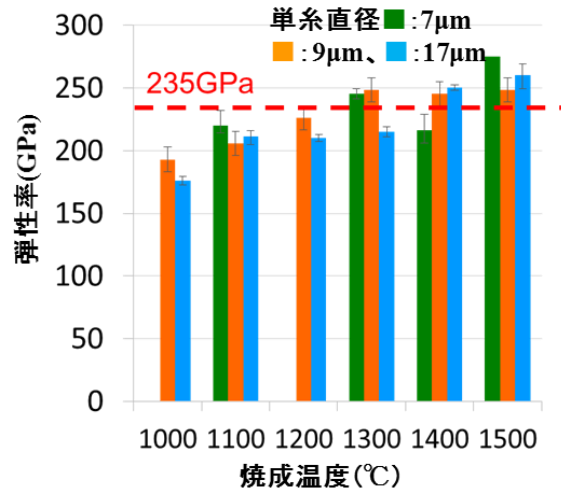


図 2.3.1.1-1 前駆体化合物 A から調製された炭素繊維(単糸直径 7、9、17μm)の弾性率

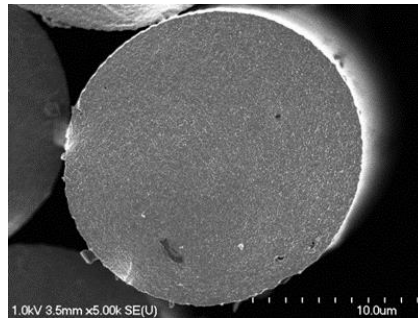


図2.3.1.1-2 前駆体化合物Aから調製された炭素繊維(φ17μm)の走査電子顕微鏡写真

### 2.3.1.2 新規前駆体化合物 B

高度な液相反応により、良好な紡糸性と耐炎性能を兼ね備える前駆体化合物 B を安価な原料から製造する条件を確立し、得られた炭素繊維の物性は下表の通り、中間目標値を達成した。レギュラートウとしては最大の 24,000 本の前駆体繊維束の製造が可能であることも実証 (図 2.3.1.2-2)し、量産化に向けた課題の検証など、実用化に向けた検討をすでに開始している。

表 2.3.1.2-1 前駆体 B からの炭素繊維の物性値

	引張弾性率(GPa)	引張強度(GPa)	破断伸度(%)
前駆体 B	240	3.5	1.5
中間目標	235	(3.5)	1.5

( ) : 引張強度 目標値は引張弾性率と破断伸度から計算している。

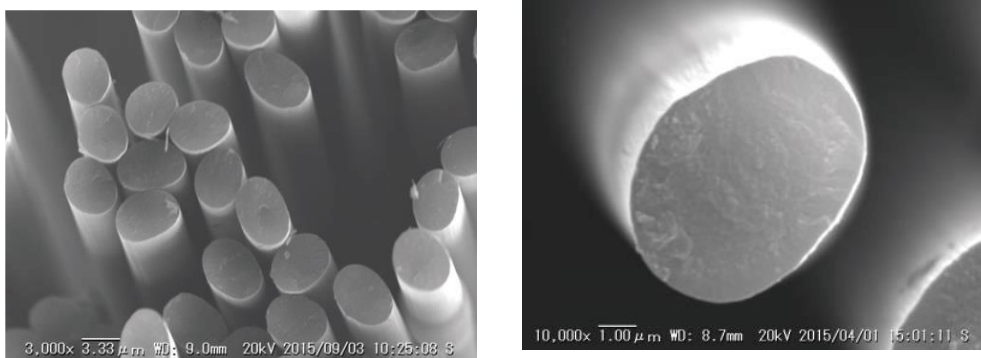


図 2.3.1.2-1 新規前駆体からの炭素繊維(断面の電子顕微鏡写真)

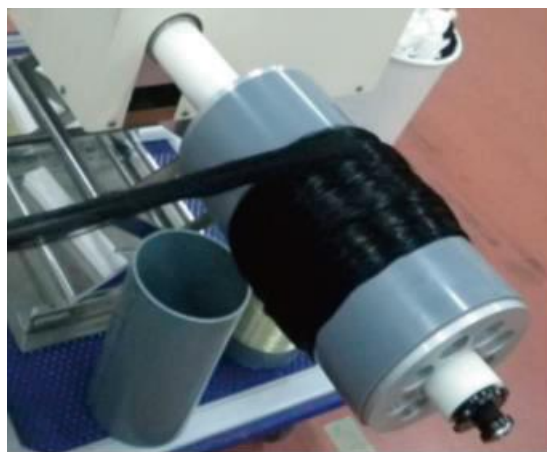


図 2.3.1.2-2 溶媒可溶性耐炎ポリマーの新規前駆体繊維束(24,000 本)

### 2.3.1.3 再委託先研究成果概要(東レ株式会社)

工業プロセスに適用可能な炭素繊維前駆体としてのあるべき姿を明確化するため、実用化にあたり課題となりえる事象について、現象および得られる物質の構造解析を行った。また、その結果を東京大学で実施している基盤技術開発にフィードバックし、スケールアップに向けた検討に展開した。

#### 研究開発項目「炭素繊維前駆体化合物の工業化基礎技術」

前駆体 B は、PAN をベースにして化学的にモディファイした分子構造であり、いわゆる「進藤方式」で得られる前駆体とは大きく異なっている。東京大学では、プラスチックスケールで実施していた液相耐炎化反応を中規模にスケールアップし、紡糸・焼成プロセスの基礎的な検討および炭素繊維の機械的特性向上に向けた検討を進めている。前駆体 B を連続的に繊維化するための技術を工業化するためには、炭素繊維前駆体高分子化合物の均一性や経時安定性が重要である。そこで工業化に必要な評価項目を明確化する基礎技術検討を行うことを目

的とした。

- ・「革新炭素繊維基盤技術開発」研究の炭素繊維機械特性目標（弾性率 230GPa、破断伸度 1.5%）の実現にむけ、液相耐炭化反応をベンチスケールの反応槽で実施し、東京大学中規模スケールと同等の反応性であることを確認した。
- ・ポリマーの経時安定性評価と分子構造の追跡から、保管状態において化学的な構造変化が進むことがわかり、元素分析により添加剤残存の課題があることを明らかにした。
- ・スケールアップ反応の場から回収した溶媒不溶異物が液相耐炭化反応由来であることを確認し、連続反応を実施する際の課題を明らかにした。
- ・工業スケールに対応したフィラメント数での焼成において、熱処理工程における糸束温度の炭素繊維物性に対する影響を明らかにし、フィラメント数に応じた適切な条件設定が必要であること、適正条件の設計指針を明らかにした。
- ・目標を達成した CF の表面処理条件を確定するため、表面処理条件を変えた CF の表面分析を実施し、市販の標準弾性率 CF と同等になる条件を明らかにした。

### 2.3.2 炭素化構造形成メカニズムの解明

新規焼成技術の開発は、マイクロ波を用いる新規炭素化技術の開発とプラズマを用いる新規表面処理技術の開発から成る。

マイクロ波を用いる新規炭素化技術の開発においては、炭素化工程の最適化を効率的に進めるため、PAN 系前駆体を用いた耐炭繊維の炭素化過程における誘電率変化等から、マイクロ波に好適な炭化構造形成のメカニズムを解析した。その結果、一定条件下で耐炭繊維が誘電体から導電体に連続的に変化する中で、ある領域において閾値が存在し、耐炭繊維をマイクロ波に対する高吸収性繊維に転換することができることを明らかにした。本結果を基に、マイクロ波炭素化工程を最適な形へと改良し、この高吸収性繊維をマイクロ波で炭素化した結果、中間目標を超える特性を示す炭素繊維が得られた。

本技術は、(1)が開発の新規炭素繊維前駆体に対しても、その誘電特性等から有効であることは容易に連想でき、新規炭素繊維前駆体を用いた場合でも PAN 系炭素繊維と同等の性能を実現できるポテンシャルを有すると期待される。

本成果を得るにあたり、前駆体物質のマイクロ波による加熱メカニズムやそれによる炭素化の解析に適合した新しい分析評価法も同時に開発したので、今後の検討に活かす。

プラズマを用いる新規表面処理技術の開発においては、プラズマ処理の形態の探索、処理条件等の検討を行った結果、極めて短時間で、目標とする表面特性を達成できるプラズマ処理技術の開発に成功した。表面処理効果の検証のため、複合材料の物性や界面接着性の評価、表面の精密な解析を行った結果、有意な効果が認められ、同効果発現のメカニズムを解明した。

#### 2.3.2.1 マイクロ波炭素化技術の開発

マイクロ波炭素化によって得られた炭素繊維について、ストランド引張試験の結果を

表 2.3.2.1-1 に示す。平均の引張強度が 3.7GPa、引張弾性率が 247GPa、破断伸度が 1.7% であり、中間目標性能を超えるストランド引張特性を示す炭素繊維の製造に成功した。マイクロ波炭素化によって得られた炭素繊維の単糸写真を図 2.3.2.1-1 に示す。真円に近い断面形状を保持していることや繊維表面に大きな傷などが見られないことから、マイクロ波による炭素化反応は安定的に進行したことがわかる。

中間目標性能、とくに弾性率の向上に注力し検討を進めた結果、繊維物性の安定化と条件適正化が重要であることが分かり、マイクロ波炭素化の技術的問題点を抽出し解消していくことで、耐炎繊維を安定した物性の高吸収性繊維へと転換することに成功した。マイクロ波炭素化のメカニズムを解析することで、目標性能の達成に必要な高吸収性繊維の性状を明確にするとともに、装置の改良や条件調整を行った。

表 2.3.2.1-1 マイクロ波炭素化で得られた炭素繊維のストランド引張特性

	平均強度(GPa)	平均弾性率(GPa)	破断伸度(%)
マイクロ波炭素化	3.7	247	1.7
中間目標性能	(3.5)	235	1.5

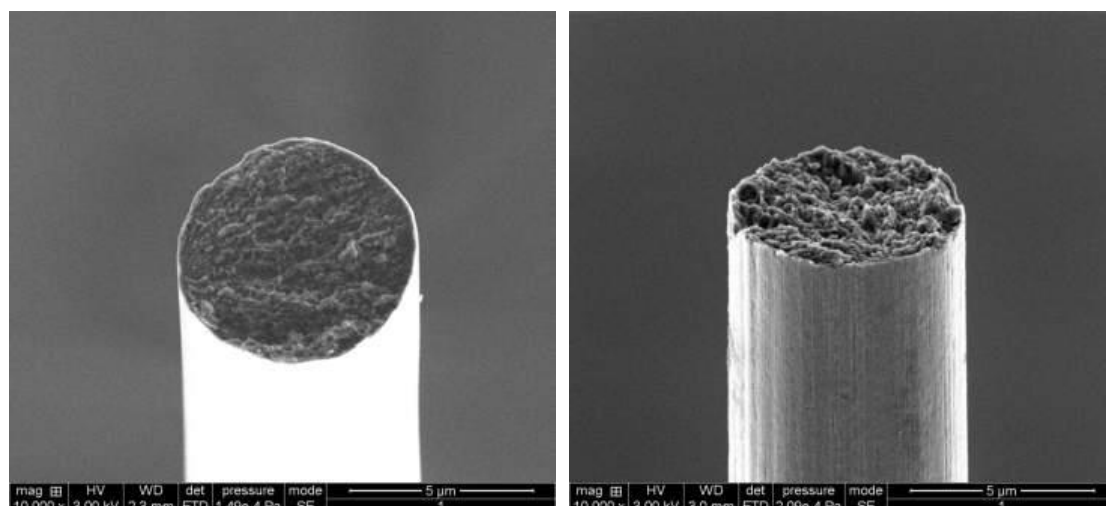


図 2.3.2.1-1 マイクロ波炭素化で得られた炭素繊維の走査型電子顕微鏡写真

### 2.3.2.2 プラズマ表面処理技術の開発

プラズマを用いて表面処理した炭素繊維の、X線光電子分光法により測定された表面酸素濃度値(O/C)の結果を表 2.3.2.2-1 に示す。プラズマ表面処理によって、極めて短時間で、中間目標である表面酸素濃度範囲内の表面特性を有する炭素繊維が得られた。また、表面酸素濃度値は、処理時間の制御によって、低い値(0.07)から高い値(0.23)までコントロールができ、複合材料のマトリックス樹脂に応じた表面性状の適性化も容易に行えることを見出した。

表面処理を連続的にかつ均一に施すプロセス技術の確立に成功し、技術的な基礎検討は

完了した。実用化を見据えた応用検討として、熱可塑性コンポジットの射出成形品において力学的特性が向上する同処理の効果を追究した。繊維表面の精密な解析や X 線 CT 観察を行った結果、表面の濡れ性が向上し、残存繊維長が長い状態でも高い繊維分散性を有することが可能となるといった、効果発現のメカニズムを解明した。

複合材料の物性評価では、従来品と同等の性能を示した。表面処理工程のエネルギー消費削減効果の試算では、これを半減できるポテンシャルを有する技術であることを確認した。

表 2.3.2.2-1 プラズマ表面処理された炭素繊維の表面特性

	表面酸素濃度値(O/C)
プラズマ表面処理	0.07 - 0.23
中間目標値	0.05 - 0.40

### 2.3.2.3 再委託先研究成果概要(東邦テナックス株式会社)

炭素繊維の製造時のエネルギー・CO<sub>2</sub> 排出量の半減及び生産性の大幅向上を実現するためのマイクロ波による連続炭素化技術を開発した。

#### 研究開発項目①マイクロ波による連続炭素化技術の確立

##### ・マイクロ波炭素化技術のスケールアップ検討

東京大学でのマイクロ波による炭素化検討を踏まえ、連続炭素化に向けた装置設計を行った。東京大学と連携して電磁界シミュレーションを実施し、繊維を炭素化する加熱装置の設計に活用した。将来のスケールアップ検討に備え、装置構成をモジュール化した装置を設計、製作し、導入を完了した。

導入した装置は繊維を段階的に加熱できるように低温部用と高温部用に分かれ、それぞれ独立して稼働できるものとした。低温部用の装置では耐炎繊維の加熱により目標とする物性の繊維を連続的に得ることが出来た。一方、高温部用の装置では既存の外熱処理による炭素化途中の繊維、並びに、低温部用の装置で熱処理した炭素化途中の繊維を連続的に熱処理することが可能となった。

この結果を基にプロセスパラメータ、エンジニアリングデータを取得し、エネルギー効率を算出した。

#### 研究開発項目②プラズマ等による炭素繊維の連続表面処理技術の確立

##### ・常圧プラズマ表面処理技術の確立

東京大学及び東邦テナックスでの常圧プラズマによる表面処理検討成果を踏まえ、炭素繊維の連続表面処理の基礎評価を実施した。表面処理を施した炭素繊維のエポキシ樹脂に対する界面せん断強度を東京大学と連携して評価した。スケールアップ検討に適した表面処理設備とするため、表面処理装置の増設を完了した。

連続表面処理の基礎評価により処理条件を設定し、表面処理を施した炭素繊維を用いてエポキシ樹脂のプリプレグを作製し、複合材料物性を評価した。

プラズマで表面処理を施した炭素繊維強化複合材料の曲げ強度、界面せん断強度は市販の炭素繊維を用いた複合材料の物性と同等であった。

表面処理に費やすエネルギーを炉材メーカーの公表値と比較し、高効率な装置の開発、照射条件の最適化が実用化に向けた課題であることを確認した。

### 2.3.3 炭素繊維の評価手法開発、標準化

自動車部品用途の複合材料としては成型性とコスト面から不連続繊維によって強化された熱可塑性プラスチックが用いられることが期待されている。NEDO プロジェクト「サステナブルハイパーコンポジット技術の開発」では、それら複合材料の調製、接合、修理、そしてリサイクル技術が検討されてきた。このような複合材料は、いったん中間基材を調製してからプレス成形等にて複雑な形状の部材を製作している。そのため、炭素繊維の引張特性だけでなく、様々な方向の材料力学的特性が重要となる。例えば、複合材料中の不連続繊維の破断のモデリングにおいては、繊維 1 本(モノフィラメント)による強度分布の解析結果が用いられ、特性のばらつきを統計的に評価する必要がある。

平成 25 年度までにモノフィラメントの横方向圧壊試験やねじり試験によって解析される圧壊強さ  $\sigma_c$ 、横方向の圧縮弾性率  $E_T$  およびねじり弾性率  $G$  の試験条件の影響について詳細に調査し、試験手法の標準化に向けて試験素案を作成するとともに計測データを蓄積した。【研究成果発表論文 1、2】

平成 26 年度以降は、このプロジェクトで得られた新規炭素繊維も含めて各種の炭素繊維のモノフィラメント特性試験の計測データを蓄積するとともに、試験方法の改善や新たな特性試験の開発を試みた。【研究成果発表論文 3、4】

#### 2.3.3.1 炭素繊維の直径分布の評価

本研究開発では、標準弾性率タイプの市販の PAN 系炭素繊維 (CF-A)を用いた。引張特性試験は、JIS R7606「炭素繊維-単繊維の引張特性の試験方法」に準拠した。試験繊維の直径は、JIS R7607「炭素繊維-単繊維の直径及び断面積の試験方法」の D 法：レーザー回折によって測定した。試験数  $n$  は、50 本とした。この PAN 系繊維のモノフィラメント特性試験の結果を表 2.3.3.1-1 に示す。直径の平均値は、7.6 $\mu\text{m}$  であり、変動係数が 5.3% であった。繊維断面は真円ではなく、少し扁平した楕円形状であった。



表 2.3.3.1-1 PAN 系炭素繊維 CF-A のモノフィラメント特性試験結果

引張試験	引張強度 GPa	Weibull 係数	引張弾性率 GPa	変動係数 %
	<b>4.10</b>	<b>5.6</b>	<b>208</b>	<b>9.67</b>
圧壊試験	圧壊強さ $\sigma_c$ GPa	Weibull 係数	圧縮弾性率 $E_T$ GPa	変動係数 %
	<b>1.74</b>	<b>7.6</b>	<b>16.6</b>	<b>15.6</b>
ねじり試験			ねじり弾性率 $G$ GPa	変動係数 %
			<b>15.7</b>	<b>3.8</b>

平成 26 年度までに予備実験として、炭素繊維 CF-A の直径の軸方向分布を前述の JIS R7607 の D 法で回転無しに測定し、また同ゲージ内から 4 か所のみ $\pm 60^\circ$ の測定を行い、考察したところ、楕円形状が軸方向にらせん的にねじれている可能性が示唆された。そこで、平成 26 年度-27 年度は、炭素繊維の回転や軸方向への移動が調節できる外径測定装置を試作した。試作した装置の外観写真を図 2.3.3.1-1 に示す。試作した装置から得られた試験結果を図 2.3.3.1-2 に示す。軸方向へ移動したときの外径の最長径と最短径および外径の平均値と繊維を回転させたときのそれらの値はそれぞれほぼ一致することから、この炭素繊維は楕円形状がらせん的に回転していることが支持された。

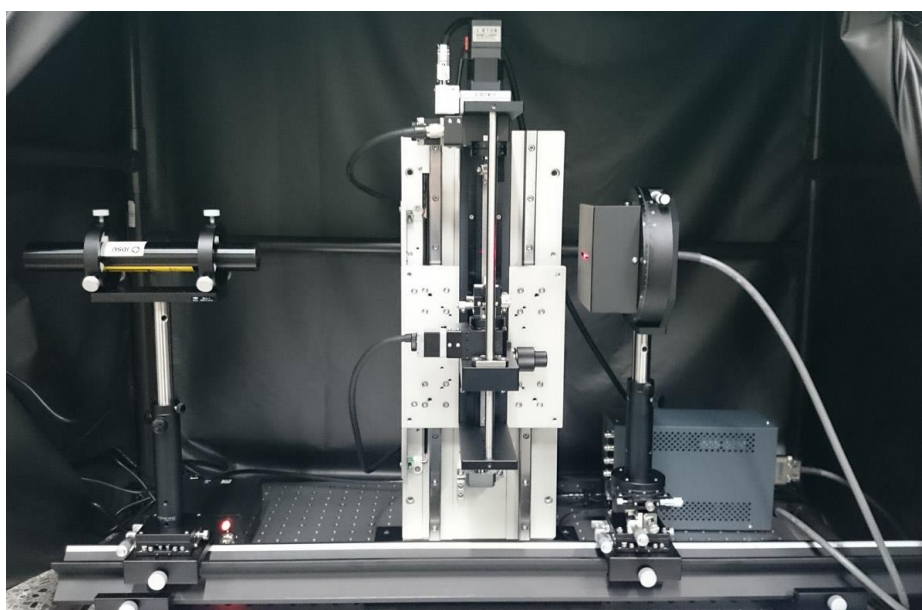


図 2.3.3.1-1 試作した外径測定装置の外観

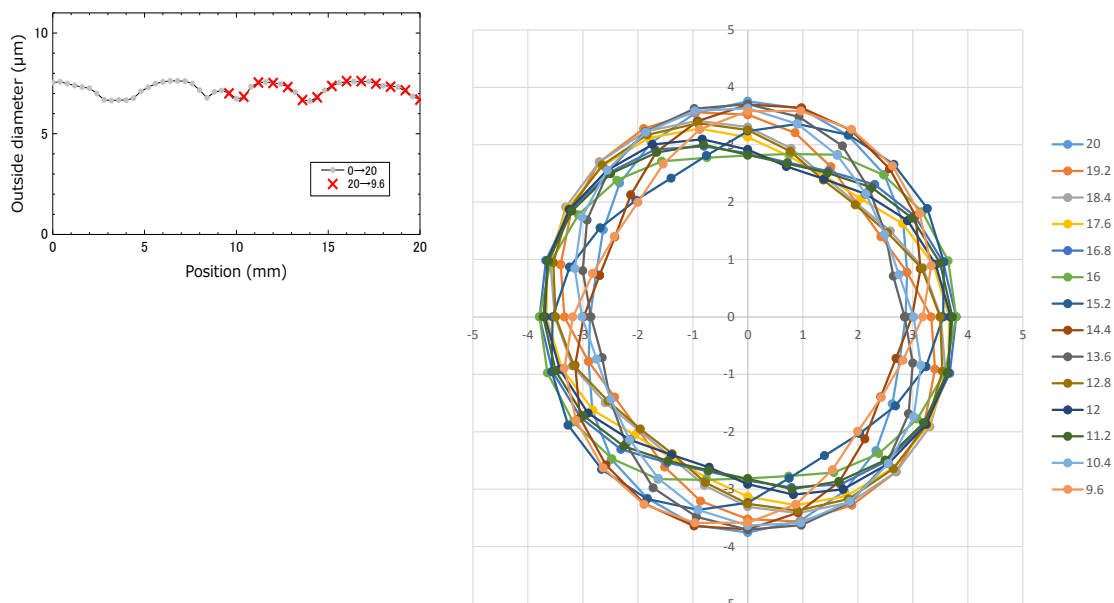


図 2.3.3.1-2 PAN 系繊維 CF-A の外径の繊維軸方向の分布例

### 2.3.3.2 単繊維ねじり試験

ねじり試験は、他のモノフィラメント特性試験と比べて長い試験片を用いる。さらに、ねじり弾性率の算出において繊維の直径は 4 乗で影響するので、炭素繊維の直径の評価が非常に重要である。前述した直径分布を評価する実際に、長径と短径を計測し、楕円形状としてねじり弾性率を算出すると試験結果の変動率が小さくなることが認められた。

### 2.3.3.3 単繊維圧壊試験

炭素繊維の横方向の圧縮において、繊維が圧壊する前に荷重を除荷させると、荷重-変位曲線にはヒステリシスが観察される。このヒステリシスの大きさは、炭素繊維のグラファイト結晶性と相関性があることが分かった。グラファイト結晶内の炭素六角網面層のせん断変形が応力の負荷と除荷で生じ方が異なることがヒステリシスの要因と考えられた。

横方向圧縮において圧壊する試験力よりも小さい荷重で炭素繊維への負荷・除荷の繰り返し試験を行ったところ、ヒステリシスが比較的大きな試料ほど、少ない繰り返し回数で繊維が圧壊されることがわかった。その他、横方向圧壊試験の圧子サイズの影響について調べた。

平成 27 年度は、圧壊試験時の試験力と変形曲線から横方向の圧縮弾性率  $E_T$  を求めるに適切な変形領域を調査するために、各種の PAN 系市販繊維を用いて圧壊試験を行った。その結果、変形距離を繊維の直径で規格化した値が 0.03~0.08 程度が適当であることが見出された。

圧盤に横たわる炭素繊維を横方向に圧縮するだけでなく、炭素繊維を垂直に固定し、上部をイオンビームで平滑した試験片を調製することにより、軸方向の圧縮試験を試みた。

その結果、前述の PAN 系繊維 CF-A の場合、繊維長が 20 $\mu\text{m}$  未満であれば座屈を起こすことなく圧縮強度を評価できた。圧縮強度の平均は、2.2GPa であり、引張強度のおよそ半分であった。軸方向の圧縮弾性率は、引張弾性率を決定するときのコンプライアンス補正と同様に試験片長さを変えた負荷-除荷試験を行い、一定荷重を負荷したときの圧縮変位の試験片長さ依存性から決定した。軸方向の圧縮弾性率は 102GPa と試算され、引張弾性率のおよそ半分であった。

ノッチを導入した炭素繊維を引張試験して到達可能強度を求める解析をする際、き裂近傍の応力集中状態を計算するときには横方向の圧縮弾性率  $E_T$  とねじり弾性率  $G$  および引張弾性率  $E$  の値を利用した。このプロジェクトで得られた新規炭素繊維も含めて種々の炭素繊維のこれら弾性率を計測し、到達可能強度を算出した。【研究成果発表論文 5】

#### 2.3.3.4 単繊維三点曲げ試験

単繊維の三点曲げ試験において、得られた曲げ強さと曲げ弾性率はスパン長さに影響する結果が得られた。PAN 系繊維 CF-A の三点曲げ試験のスパン長さ依存性を図 2.3.3.4-1 に示す。この PAN 系繊維は、スパン長さが 200 $\mu\text{m}$  以下のとき曲げ応力で破断したが、200 $\mu\text{m}$  より長くなると破断しなかった。炭素繊維 1 本が曲げ応力によって破断するか、否かを分けるスパン長さ(具体的には、繊維直径とスパン長さの比  $d/L$ )の閾値は、使用した炭素繊維の種類・特性によって異なった。曲げ弾性率は、スパン長さが 200 $\mu\text{m}$  より短くなるとわずかに低下する傾向が見られた。異方性が極端な材料の曲げ挙動は、せん断変形の影響が反映されやすいことが知られている。そこで、式 2.3.3.4-1 によって見かけの曲げ弾性率を求めて、図 2.3.3.4-1(b)に赤色でプロットし比較した。

$$E_{app} = \frac{1}{\left( \frac{1}{E} + \frac{1}{G} \left( \frac{d}{L} \right)^2 \right)} \quad \text{式 2.3.3.4-1}$$

ここに、 $E$  : 引張弾性率

$G$  : せん断弾性率(ねじり弾性率を代入した)

$d$  : 繊維の直径

$L$  : スパン長さ

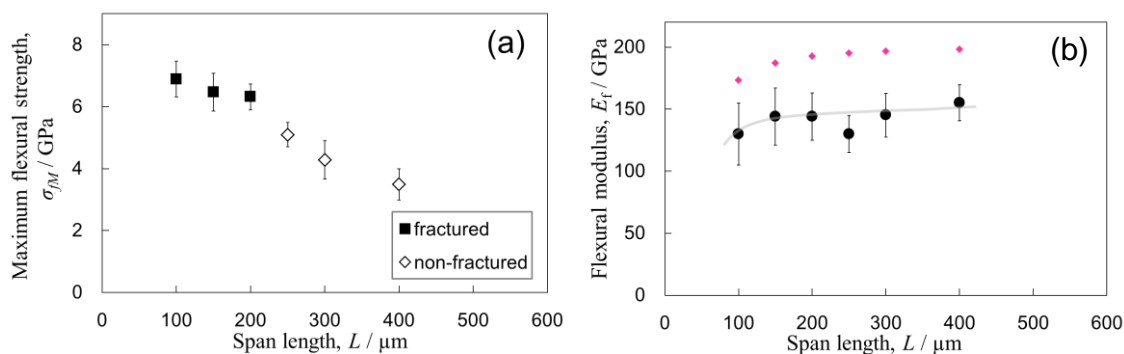


図 2.3.3.4-1 PAN 系繊維 CF-A の三点曲げ試験結果のスパン依存性

(a)曲げ強さ, (b)曲げ弾性率

実測値は試算した値より約 70%低い、短いスパン長さで曲げ弾性率が低下する傾向は一致している。先に述べたように、この繊維は引張弾性率と圧縮弾性率の値が異なるために、曲げ変形における応力の中立面が繊維断面の中心からずれているために、実測値が試算値より低くなったと考えている。

試験手法の素案では、繊維直径とスパン長さの比を  $d/L=30$  としたが、繊維の引張弾性率とねじり弾性率の比  $E/G$  から試験条件である  $d/L$  の値を決めるなどの方策を考慮する必要がある。

### 2.3.3.5 熱膨張率測定装置の開発

熱可塑性樹脂をマトリックスとするCFRPの調製には温度差が生じるために炭素繊維の熱膨張率の値はコンポジットの設計において重要な因子である。炭素繊維は、常温からおよそ400°Cの温度領域において熱膨張が負から正に変化するなど、熱膨張率の温度依存性は複雑である。そこで、本研究開発では炭素繊維の熱膨張率の測定において、比較的短い炭素繊維試験片を対象にして、炭素繊維の軸方向だけでなく、径方向の熱膨張特性も精密に計測できる装置の開発を行った。

これまでに、炭素繊維の束に通電加熱できる平行バネ式試料ホルダーの試作などを行ったが、機構の簡便さとしてリニアガイドを備えた台車セル方式が妥当と考えた。平成25年度までに、レーザー干渉法による大気中で繊維束の軸方向の熱膨張率の測定が可能となった。平成26年度-27年度は、単繊維による径方向の熱膨張測定と試料ホルダーを真空チャンバーに入れることによる加熱効率の向上と焼損防止により、500°C以上の高温化を目指した。さらに非接触における温度計測の信頼性向上や加熱によるノイズを除去する方法などを駆使し、計測の高精度化に取り組んだ。

図2.3.3.5-1に試作した炭素繊維熱膨張率測定装置の外観写真を、図2.3.3.5-2には装置の構成図を示す。台車セルに取り付けた炭素繊維の軸方向と平行にレーザー干渉法のための干渉計ユニットをセットし、繊維軸と垂直の方向には外径をJIS R7607のレーザー回折法によって計測するシステムを設置した。両光学系による非接触計測により真空チャン

バー内に置かれたサンプルに対して高温での計測に成功した。

温度の計測には、非常に細い熱電対をセラミックス接着剤で固定する方法を採用していたが、繊維 1 本の場合では、熱電対の接触によって温度が低下することが明らかとなったため、集光レンズを備えて二色放射温度計による非接触温度測定する方式を導入した。二色放射温度計で測定できない温度域は、繊維に印加した電力によるジュール加熱と放射の熱収支関係から演繹的に見積もることとした。

500°Cを超えると炭素繊維の 1 本でも肉眼で確認できる程度に赤熱することが確認された。繊維の径方向の外径を前述のJIS R7607のD法(レーザー回折法)で測定するときに、繊維の赤熱によりバックグラウンドの乱れが観察された。そこで、この赤熱によるバックグラウンドを回折プロファイルからピーク分離するとともにプロファイルフィッティングを導入して、解析の精度を向上させた。

図2.3.3.5-3および図2.3.3.5-4には、前述のPAN系繊維CF-Aだけでなく、本事業でのターゲット特性に近い市販炭素繊維(T300およびIMS60)、そしてピッチ系高弾性率タイプ繊維CF-Aの繊維軸方向および径方向熱膨張率計測試験をそれぞれ示す。

炭素繊維の繊維軸方向の熱膨張係数CTEの温度依存性には、①500°CまでのCTEの絶対値は $1.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 以下と通常の方法と比較して非常に小さいこと、②PAN系、pitch系いずれも室温でのCTEは負であること、温度上昇によりCTEは負から正に変化する(PAN系は140-240°C、pitch系は500°C付近)という特徴が見てとれる。他方、径方向の熱膨張挙動には、①PAN系、pitch系いずれも室温から正のCTEである、②径方向のCTE値は繊維方向と比較して非常に大きい、③繊維方向のCTEが最も小さかったpitch系試料が直径方向では最も大きな結果となる、特徴が観察された。

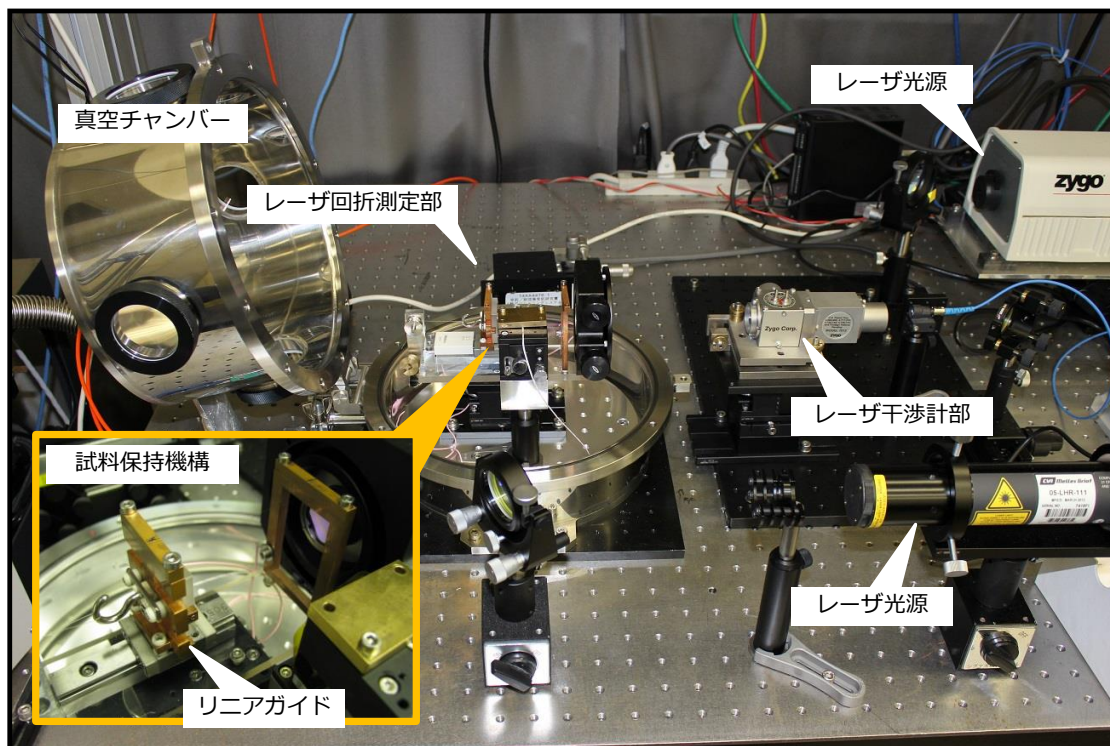


図 2.3.3.5-1 炭素繊維熱膨張率計測装置の外観写真

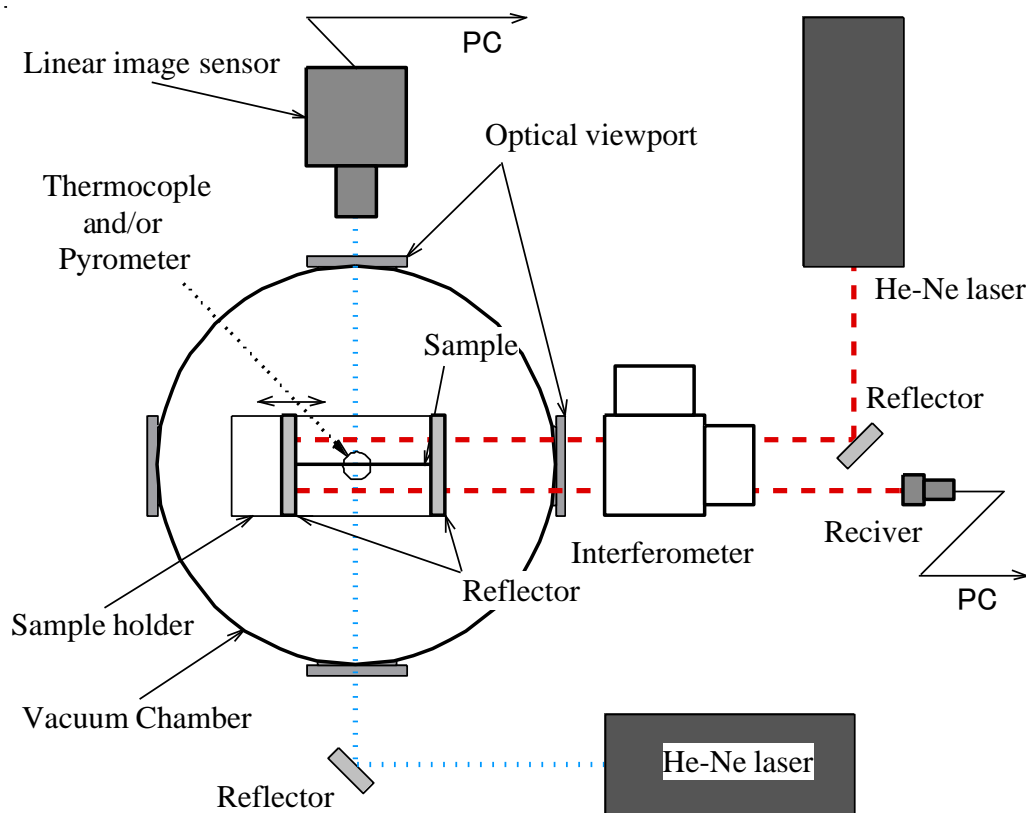


図 2.3.3.5-2 炭素繊維熱膨張率計測装置の構成

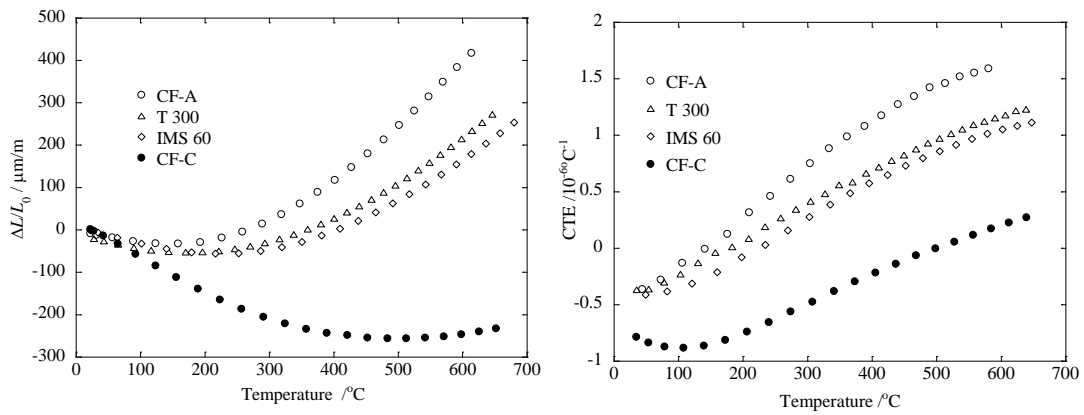


図 2.3.3.5-3 炭素繊維束の軸方向の熱膨張率計測試験の結果

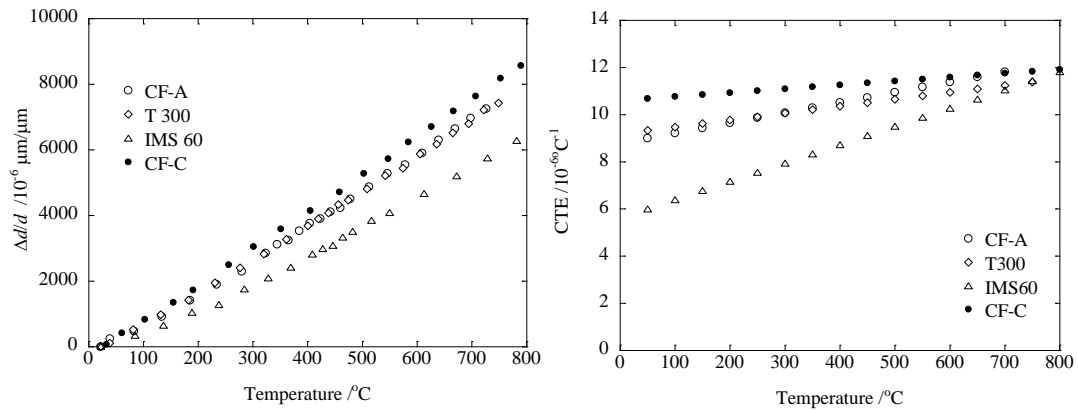


図 2.3.3.5-4 炭素繊維束の径方向の熱膨張率計測試験の結果

【研究成果発表論文】

- 1:岩下哲雄、諸星圭祐、藤田和宏、*材料試験技術*、**57**[4]、(2012) 134
- 2:藤田和宏、小島実希子、岩下哲雄、*材料試験技術*、**58**[3]、(2013) 143
- 3:諸星圭祐、藤田和宏、岩下哲雄、*材料試験技術*、**59**[3]、(2014) 142
- 4:杉本慶喜、影山和郎、岩下哲雄、*材料試験技術*、**60**[1]、(2015) 52
- 5: Yoshiki Sugimoto, Masatoshi Shioya, Kazuro Kageyama, *Carbon*, **100** (2016) 208

2.3.3.6 界面接着性評価法の開発と比較

新規炭素繊維前駆体化合物や新規焼成技術により成果が得られた炭素繊維の実用化可能性を見極めるために、複合材料として活用する際の基本特性を把握しておく必要がある。中でも、マトリックス樹脂と複合化した際の繊維-樹脂間の界面接着性は、複合材料としての品質・性能に大きく影響を与えるため、重要な材料設計指標の一つである。

そこで、本テーマにおいては、炭素繊維と樹脂、特に、生産性に優れるとされる熱可塑性樹脂との接着性に関する、様々な評価手法を検討し、測定精度や操作性の観点から比較検討を行い、一覧表として表 2.3.3.6-1 にまとめた。

表 2.3.3.6-1 界面接着性評価手法に関する比較表

	評価方法	特徴	実績	利点	その他
フラグメント法	モノフィラメントを樹脂フィルムに包埋、引張	臨界繊維長から算出	装置が市販されている	熱硬化系樹脂で適用実績多い	炭素繊維のワイブル分布が必要
マイクロドロップレット法	モノフィラメントに樹脂玉を付け、引抜く	樹脂玉径は 50~100 $\mu$ m 程度	装置が市販されている	操作が比較的容易	メニスカスの影響が大きい
マイクロコンポジット法	複数本の炭素繊維を束ねた後、樹脂玉を付け 1 本だけ引抜く	樹脂玉径は 300~400 $\mu$ m 程度	産総研で既開発、C/C コンポジットで適用事例あり	近傍に他の炭素繊維がある状況での測定	操作に熟練を要する
ピンホール引抜き法	樹脂中にモノフィラメントの片端を埋込み引抜	埋込長が可変	引抜き法の応用、装置・操作法は独自開発	装置が比較的簡素、応用展開が容易	金属板厚さによって埋め込み長さが可変

表 2.3.3.6-1 のピンホール引抜き法は独自開発したものであり、操作法が簡易的、かつ、測定精度が高い試験法として設計した。概要を図 2.3.3.6-1 に示す。右図が荷重変位線図であり、引抜き荷重が精度高く取得できることが分かる。

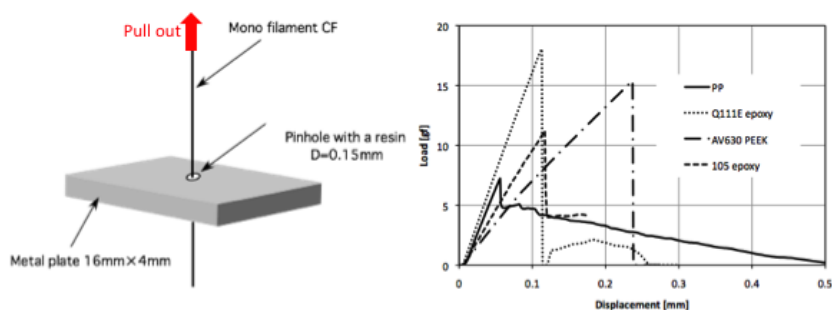


図 2.3.3.6-1 ピンホール引抜き法概要図と測定結果例

なお、開発中のピンホール引抜き法による試験結果と他の既存の方法による試験結果を比較検討した。図 2.3.3.6-2 には一例としてピンホール引抜き法とマイクロドロップレット法との



比較を示す。同一サンプルを両手法で試験した結果であり、良好な相関性が得られている。

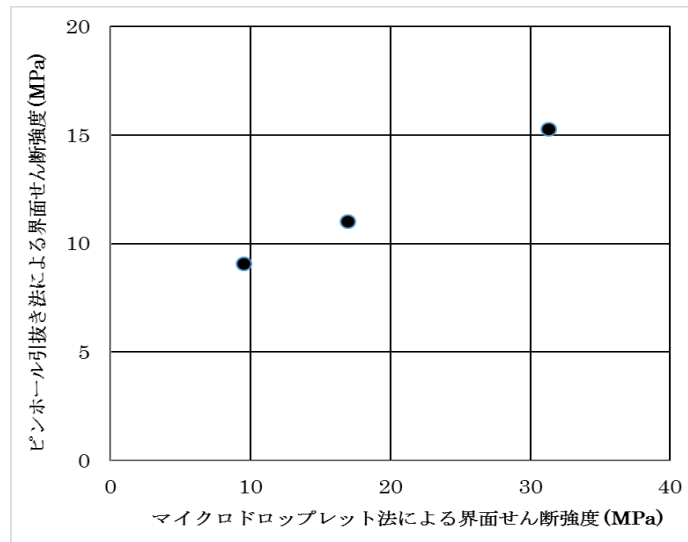


図 2.3.3.6-2 ピンホール引抜き法とマイクロドロップレット法との比較

界面せん断強度の標準化試験法として、ピンホール引抜き法が適していると思われる。その理由として、界面応力がシアラグ理論で説明可能、他の試験法とも相関性がある等が挙げられる。また、ピンホール引抜き法の標準試験条件として、埋め込み長  $50\sim 150\mu\text{m}$ 、試験速度は  $0.06\sim 0.12\text{mm}/\text{min}$  が適していると考えられる。図 2.3.3.6-3 に示すように埋め込み長をこの範囲にすることで低接着性樹脂から高接着性樹脂の界面せん断強度を測定することができる。また、図 2.3.3.6-4 に示すように試験速度をこの範囲にすることで短時間にかつ精度よく測定することができる。

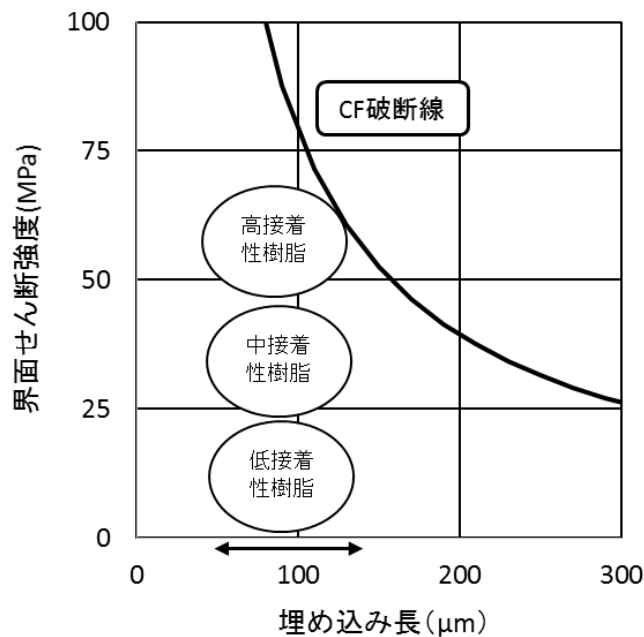


図 2.3.3.6-3 ピンホール引抜き法における埋め込み長

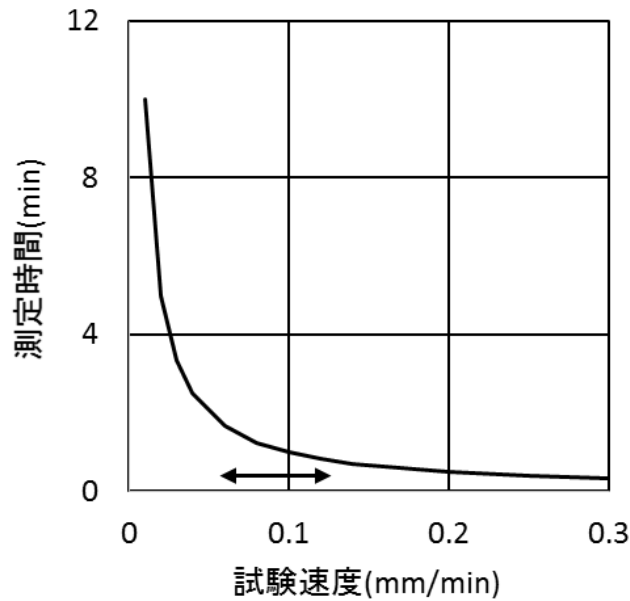


図 2.3.3.6-4 ピンホール引抜き法における試験速度

#### 2.3.3.7 再委託先研究成果概要(三菱レイヨン株式会社)

熱可塑性炭素繊維複合材料は熱硬化系に比べて圧縮強度が低い問題があり、マトリックス樹脂の弾性率が低いことや炭素繊維と樹脂の接着性が低いことが影響していると考えられている。本プロジェクトで三菱レイヨンは炭素繊維と熱可塑性樹脂の接着性評価技術の確立や接着性の本質解明に取り組んでおり、以下に掲げる評価を実施した。

##### ◇接着性評価手法の探索 (Pull-Out 法)

炭素繊維の一部を樹脂に埋め込んで、炭素繊維を引き抜く際の荷重から接着性を評価する手法を探索した。測定バラツキはフラグメント法に比べて大きい結果となった。また作製したサンプル数に対して測定ができたサンプル数が少なく測定効率は低かったため、手法としては改善が必要と判断した。

##### ◇フラグメント法の標準化準備

東京大学でフラグメント法による接着性評価の技術が確立された。標準化のためには実施機関によらず再現性のある評価となる必要がある。そこで、東京大学で使用中の金型を三菱レイヨンにも導入して再現性を確認した。その結果、界面せん断強度は東京大学と三菱レイヨンで同じ値となった。産学で評価手法を共有して実施機関によらず同じ値が得られるようになったことは、フラグメント法の標準化に向けて大きな成果となった。

##### ◇接着性の本質解明(吸湿による界面せん断強度の低下)

ナイロン系樹脂は吸湿によって物性が大きく低下する。そこで、確立したフラグメント法を使って、様々な吸湿状態のサンプルを準備して界面せん断強度を調べた。その結果、界面せん断強度は湿度によって低下する傾向を確認した。吸湿による界面せん

断強度の低下によって、たとえば90°曲げ物性の低下につながる可能性が推定された。

#### ◇コンポジットの機械特性の評価

熱可塑性炭素繊維複合材料の基本的な機械特性(樹脂物性試験・曲げ試験・層間せん断強度試験・高速面衝撃試験)を取得した。また室温および80°Cで0°圧縮試験を行い、圧縮物性の温度依存性を確認した。

#### 2.3.3.8 再委託先研究成果概要(日本プラスチック工業連盟)

東京大学が実施する研究開発には、炭素繊維の大幅な生産性向上が可能な生産プロセスの開発がある。また、このプロセスによる合理化された炭素繊維を、量産分野の用途への展開が可能な炭素繊維強化熱可塑性プラスチック(CFRTP)への導入を検討している。

本委託事業では、炭素繊維等の強化繊維及びCFRTP等の複合材に関する標準化を目的として検討を行った。

目標は次のとおり。

##### ①JIS K7016-9の公示

- ・ JIS本文及び解説の微修正及びJISC審議会への的確な対応により、公示に至らしめる。

##### ②CFRTPの引張特性の検討

- ・ 数種類のCFRTPサンプルについて引張特性のラウンドロビンテストを実施する。
- ・ テスト結果について基本特性標準化分科会及びCFRTP標準化委員会にて審議する。

##### ③委員会での審議、フィードバック及び情報共有

- ・ 「基本特性標準化分科会」及び「CFRTP標準化委員会」の他に「強化繊維・複合材料標準化本委員会」を開催して、審議、傘下委員会へのフィードバック及び情報の共有を行う。

成果は以下のとおりである。

##### ①JIS K7016-9 (繊維強化プラスチック—試験片の作り方—第9部:STC圧縮成形)の公示

CFRTP作製方法であるISO 1268-9をJIS化すべく平成26年度にJIS原案をJISCに提出した。平成27年度では、「JIS原案作成分科会」は開催しなかったが、問合せ及びJISC審議会対応を行った結果、JIS K7016-9は公示となった。

##### ②CFRTPの引張特性の検討

ランダムCF系 (CF/PPS)及び織物CF系 (CF/PA6)の引張特性のラウンドロビンテストを実施し、結果のまとめ及びデータの解析を行った。

##### ③委員会での審議、フィードバック及び情報共有

本委員会、CFRTP標準化委員会及び基本特性標準化分科会を開催し、種々議論することにより、情報の共有化ができた。

##### ④委員会開催実績

平成27年度の委員会開催実績は以下のとおりである。

<平成27年度 強化繊維・複合材料標準化 関連委員会開催実績>

本委員会 2016年 2月19日(第1回)

CFRTP 標準化委員会 2015年 7月17日(第1回)、2015年12月 4日(第2回)

基本特性標準化分科会 2015年 5月15日(第1回)、2015年11月 2日(第2回)

基本特性標準化分科会 2016年 1月 8日(第3回)、2016年 2月 1日(第4回)

### 2.3.3.9 再委託先研究成果概要(金沢工業大学)

母材の粘弾性挙動に成立する時間-温度換算則(Time-temperature Superposition Principle: 以下、TTSP と略称)を基盤とした CFRP の長期耐久性を予測する加速試験法(Accelerated Testing Methodology: 以下、ATM と略称)を提案してきた。この方法は、環境温度、負荷の時間、周波数、振幅といった環境および負荷条件の広い範囲を包含するマスター曲線によって長期寿命の予測を可能にするものであり、炭素繊維と熱硬化性樹脂の様々な組み合わせの CFRP 積層板に適用してその有用性を確認してきた。

本研究では、CFRP を対象にして開発してきた TTSP を基盤とした長期耐久性評価法をもとに、CFRTP の長期耐久性評価を行い、CFRTP への適用に向けた長期耐久性評価法の開発を行うことを目的とした。具体的には、炭素繊維強化ポリアミド複合材料(CF/PA6 と略称)を取り上げ、その一方向材の繊維方向曲げ強度および繊維直角方向引張強度の温度依存性を評価した。さらに、繊維直角方向の動的粘弾性特性試験を実施し、長期耐久性評価の基盤となる TTSP の適用性について確認した。得られた成果の概要を以下に示す。

- ①CF/PA6 繊維方向曲げ強度は著しい温度依存性を示した。
- ②CF/PA6 繊維直角方向引張強度は著しい温度依存性を示した。
- ③CF/PA6 繊維直角方向動的粘弾性特性の時間依存性と温度依存性の間には TTSP が成立した。
- ④CF/PA6 繊維方向曲げ強度および繊維直角方向引張強度に対して、③で求めた TTSP を適用して、それぞれの強度のマスター曲線を求めることができた。
- ⑤CF/PA6 繊維方向曲げ強度および繊維直角方向引張強度のいずれも吸水によって大きく低下することがわかった。

今後は、CF/PA6 繊維方向曲げ強度および繊維直角方向引張強度の時間依存性を評価する。また、強度に及ぼす吸水の影響を詳細に調査し、長期耐久性との関連について考察する予定である。

### 2.3.4 成果の普及(論文、外部発表等)

表 2.3.4-1 論文、外部発表等の件数 (内訳) 【平成 28 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等※ 2
	国内	外国	PCT 出願※ 1	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
H25FY	6	0	1	0	0	12	0	0	0	0	0	0
H26FY	4	0	4	4	0	15	1	0	0	0	1	2
H27FY	2	7	3	3	0	14	2	23	0	1	0	1
合計	12	7	8	7	0	41	3	23	0	1	1	3

※1：Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2：実施者が主体的に開催するイベント(フォーラム、シンポジウム等)

### 2.3.5 知的財産権等の確保に向けた取り組み(戦略に沿った取り組み、取得状況)

最先端技術の開発に関わる本プロジェクトでは、知的財産管理が重要である。他国の追随を許さないよう外国出願も今後検討しなければならないので、国内出願を基本にして海外出願を進めてきた。また、出願による技術開示は海外への技術流出につながる虞もあり、参加企業の国際競争力を保つためにも、ノウハウ保全と併用して出願作業を行った。平成 28 年 3 月末までに出了した特許件数を表 2.3.5-1 に示す。

表 2.3.5-1 特許の件数 (内訳) 【平成 28 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	6	0	1
H26FY	4	0	4
H27FY	2	7	3
合計	12	7	8

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

### 2.3.6 論文受賞について

本プロジェクトで開発した技術に関する論文が下記のとおり示すように受賞対象となった。学識的にも研究成果に対して高い評価を得ていることを示すとともに、対外的にも技術レベルの高さをアピールすることに寄与する。

東京大学 影山和郎、松尾剛	熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮破壊メカニズムに関する一考察	日本複合材料学会誌 論文賞	2015/6/9
------------------	---------------------------------	------------------	----------

#### IV. 成果資料(論文、外部発表、発明等)

##### 1. 概要

特許、論文、外部発表等の件数(内訳) 【平成 28 年 3 月末】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等※ 2
	国内	外国	PCT 出願※ 1	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
H25FY	6	0	1	0	0	12	0	0	0	0	0	0
H26FY	4	0	4	4	0	15	1	0	0	0	1	2
H27FY	2	7	3	3	0	14	2	23	0	1	0	1
合計	12	7	8	7	0	41	3	23	0	1	1	3

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント(フォーラム、シンポジウム等)

##### 2. 特許

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	6	0	1
H26FY	4	0	4
H27FY	2	7	3
合計	12	7	8

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

##### 3. 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	松尾剛、 影山和郎	東京大学	熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮破壊メカニズムに関する一考察	日本複合材料学会誌 Vol.40 No.3	有	2014/5
2	諸星圭祐、藤 田和宏、岩下 哲雄	産総研	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(その 3)－横方向圧縮試験に及ぼす圧子サイズの影響－	材料試験技術 59 巻 3 号 142 頁	有	2014/7
3	松尾剛、 影山和郎	東京大学	熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮強度の温度依存性に関する一考察	日本複合材料学会誌 Vol.40 No.5	有	2014/9
4	杉本慶喜、岩 下哲雄、影山 和郎	産総研	炭素繊維の単繊維による評価試験(その 4)－軸方向圧縮試験－	材料試験技術 60 巻 1 号 52 頁	有	2015/1

5	Daichi Wada, Jun-ichi Sugiyama, Hiroaki Zushi, Hideaki Murayama	東京大学	An optical fiber sensing technique for temperature distribution measurements in microwave heating	Measurement Science and Technology	有	2015/5 Accepted
6	Yoshiki Sugimoto, Masatoshi Shioya, Kazuro Kageyama	東京大学、東京工業大学	Determination of intrinsic strength of carbon fibers	Carbon, Vol 100(2016),pp208-213	有	2016/1 Accepted
7	Daichi Wada; Jun-ichi Sugiyama; Hiroaki Zushi; Hideaki Murayama	JAXA、 東京大学、産 総研	Temperature distribution monitoring of a coiled flow channel in microwave heating using an optical fiber sensing technique	Sensors & Actuators: B. Chemical	有	2016/3 Accepted

#### 4. その他外部発表

##### 4.1 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	藤田和宏、 小島実希子、 岩下哲雄	産総研	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(その2)-ねじり試験-	第 256 回材料試験技術シンポジウム	2013/7/31
2	岩下哲雄、 諸星圭祐、 永井英幹、 藤田和宏	産総研	炭素繊維強化熱可塑性プラスチック用炭素繊維の評価試験	産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門第 10 回シンポジウム	2013/9/6
3	K. Higuchi, H. Watanabe, N. Yamada, N. Iwashita	産総研	Temperature dependence of emissivity and electrical resistivity of carbon fiber	日本鉄鋼協会第 166 回秋季講演大会	2013/9/18
4	K. Higuchi, H. Watanabe, N. Yamada, N. Iwashita	産総研	Emissivity and Electrical Resistivity Measurements of Carbon Fiber	The 10th Asian Thermophysical Properties Conference	2013/10/2

5	諸星圭祐、 岩下哲雄	産総研	炭素繊維の横方向圧縮特性	日本学術振興会 第 117 委員会	2013/11/15
6	諸星圭祐、 岩下哲雄	産総研	炭素繊維の横方向圧縮特性の評価手法の 開発	第 40 回 炭素材料 学会年会	2013/12/5
7	羽鳥浩章	産総研	溶媒可溶性芳香族高分子を出発物質とする 炭素繊維の製造	平成 25 年度繊維 学会年次大会	2013/6
8	入澤寿平、曾根 田靖、児玉昌也、 羽鳥浩章	産総研	CARBONIZATION BEHAVIOR OF FIBERS FROM SOLVENT-SOLUBLE AROMATIC POLYMERS	The Annual World Conference on Carbon,Carbon2013	2013/7/15
9	羽鳥浩章	産総研	新規前駆体高分子を原料とする炭素繊維 の製造	第 44 回繊維学会 夏季セミナー	2013/8/9
10	羽鳥浩章、入澤 寿平、曾根田靖、 吉澤徳子、児玉 昌也	産総研	芳香族高分子を前駆体とする炭素繊維の 製造	日本学術振興会 第 117 委員会	2013/11
11	入澤寿平、杉本 慶喜、曾根田靖、 児玉昌也、羽鳥 浩章	産総研	溶媒可溶性芳香族高分子繊維前駆体炭素 繊維の構造と引張特性	第 40 回炭素材料 学会年会	2013/12/3
12	羽鳥浩章、曾根 田靖、吉澤徳子、 児玉昌也	産総研	人とエネルギーの未来を支える軽量構造 材料－革新炭素繊維－	エネルギー技術シ ンポジウム 2013	2013/12/6
13	羽鳥浩章	産総研	Carbon Fibers from Aromatic Polymer Precursors	招待講演 Carbon2014	2014/6/30
14	諸星圭祐、 藤田和宏、 岩下哲雄	産総研	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(そ の 3)－横方向圧壊試験に及ぼす圧子サイ ズの影響－	第 260 回材料試験 技術シンポジウム	2014/7/25
15	樋口健介、 渡辺博道、 山田修史、 岩下哲雄	産総研	Development of Thermal Expansion Measurement System for Carbon Fib	The 20th European Conference on Thermo- physical Properties	2014/8/30
16	永井英幹、諸星 圭祐、藤田和宏、 岩下哲雄	産総研	炭素繊維単繊維横方向圧縮試験の FEM 解 析	計測フロンティア 研究部門第 11 回 シンポジウム	2014/9/5
17	金井誠、和田大 地、大沢勇、影山 和郎、圖子博昭、 鈴木貴也	東京大学	ピンホール治具を用いた単繊維の引き抜 き試験法の開発	第 39 回複合材料 シンポジウム	2014/9/18



18	杉本慶喜、入澤寿平、岩下哲雄、影山和郎	東京大学 産総研	Assessment of axial compression property of single carbon fiber	ISF2014	2014/9/29
19	富田奈緒子、杉本慶喜、曾根田靖、吉澤徳子、児玉昌也、羽鳥浩章	産総研	芳香族高分子繊維を前駆体とする炭素繊維の力学特性と構造	第 41 回炭素材料学会年会	2014/12/9
20	佐藤(帝人株式会社) (連名者) 齋藤、鈴木、園子、村山	東京大学 (帝人)	ポリアクリロニトリル繊維の熱処理過程における SAXS/WAXD その場解析(2)	第 4 回 FSBL 成果報告会	2015/1/9
21	諸星圭祐、岩下哲雄、藤田和宏	産総研	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(その10) － 三点曲げ試験 －	第 6 回日本複合材料会議(JCCM-6)	2015/3/5
22	杉本慶喜、藤田和宏、岩下哲雄、塩谷正俊、影山和郎	東京大学 産総研	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(その 11)－炭素繊維の到達可能強度の評価－	第 6 回日本複合材料会議(JCCM-6)	2015/3/5
23	藤田和宏、岩下哲雄	産総研	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(その12) －ねじり弾性率に及ぼす直径計測の影響－	第 6 回日本複合材料会議(JCCM-6)	2015/3/5
24	永井英幹、藤田和宏、岩下哲雄	産総研	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(その13) －横方向圧縮による断面の弾塑性変形－	第 6 回日本複合材料会議(JCCM-6)	2015/3/5
25	渡辺博道、樋口健介、岩下哲雄、山田修史	産総研	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(その14) －炭素繊維の熱膨張係数の温度依存性－	第 6 回日本複合材料会議(JCCM-6)	2015/3/5
26	松尾剛、影山和郎	東京大学	熱可塑性 CFRP のための繊維方向曲げ試験法の提案と曲げ強度に関する一考察	第 6 回 日本複合材料会議(JCCM-6)	2015/3/6
27	蜂谷有希子、藤田和宏、岩下哲雄、影山和郎	東京大学 産総研	マイクロコンポジット法によるポリプロピレン-CF界面接着性の評価	第 6 回 日本複合材料会議(JCCM-6)	2015/3/6
28	岩下哲雄、藤田和宏	産総研	炭素繊維の単繊維による異方性の評価試験	日本学術振興会 第 117 委員会	2015/4/10

29	岩下哲雄、 杉本慶喜、 藤田和宏	産総研 東京大学	Monofilament mechanical test for anisotropic properties of carbon fiber	Carbon2015(German Carbon Group (AKK))	2015/7/15
30	富田奈緒子、杉本慶喜、曾根田靖、吉澤徳子、児玉昌也、羽鳥浩章	産総研 東京大学	Structure and mechanical characteristics of carbon fibers from aromatic polymer precursors	Carbon2015(German Carbon Group (AKK))	2015/7/15
31	松尾剛、 影山和郎	東京大学	Investigation about temperature dependence of unidirectional compressive strength of carbon fiber reinforced thermoplastic composites	20th International Conference on Composite Materials	2015/7/22
32	藤田和宏、 岩下哲雄	産総研	炭素繊維ねじり弾性率に及ぼす外径計測の影響	産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門 第1回 シンポジウム	2015/9/4
33	山田修史、渡辺博道、岩下哲雄	産総研	炭素繊維の熱膨張係数測定法の開発(2)	第36回日本熱物性シンポジウム	2015/10/20
34	岩下哲雄、杉本慶喜、永井英幹、卜部啓、藤田和宏	産総研 東京大学	炭素繊維1本の材料試験による異方性評価	第42回炭素材料学会 年会	2015/12/2
35	富田奈緒子、杉本慶喜、曾根田靖、吉澤徳子、児玉昌也、羽鳥浩章	産総研 東京大学	芳香族高分子繊維を前駆体とする炭素繊維の構造制御と力学特性	第42回炭素材料学会 年会	2015/12/3
36	羽鳥浩章	産総研	革新炭素繊維基盤技術開発—炭素繊維製造技術の革新を目指して	東海・北陸コンポジットハイウェイコンベンション2015	2015/12/10
37	藤田和宏	産総研	炭素繊維の単繊維での機械的特性評価試験	2015年度第7回CPC研究会	2015/12/11
38	松尾剛、 中田政之、 影山和郎	東京大学、 金沢工業大学	熱可塑性 CFRP の繊維方向曲げ強度に及ぼす樹脂粘弾性の影響	第7回 日本複合材料会議(JCCM-7)	2016/3/16
39	山田修史、 渡辺博道、	産総研	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(その15)	第7回 日本複合材料会議(JCCM-7)	2016/3/18

	岩下哲雄		—炭素繊維の熱膨張係数の温度依存性(2) —		
40	藤田和宏、 岩下哲雄、 北條正樹	産総研 京都大学	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(そ の 16) —繊維断面形状とその分布の測定 —	第 7 回 日本複合 材料会議(JCCM-7)	2016/3/18
41	永井英幹、 藤田和宏、 岩下哲雄	産総研	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(そ の 17)— 横方向圧縮弾性率評価範囲の検 討 —	第 7 回 日本複合 材料会議(JCCM-7)	2016/3/18

## 4.2 新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	東京大学	特集 鉄並に安くなる炭素繊維 「量産車への搭載がついに始まる低コスト化 で日本が世界をリード」	日経ものづくり	2014/10
2	東京大学	特集「炭素繊維市場 テイクオフ」 第二回	日刊工業新聞	2015/5/14、
3	東京大学	特集「炭素繊維市場 テイクオフ」 第三回	日刊工業新聞	2015/5/21
4	NEDO/東京大学	「革新炭素繊維基盤技術開発」成果発表	朝日、日経、日刊工 業、日経 BP、その他 を含め全 23 件	2016/1/14、15

## 4.3 プレス発表

- ・2016.1.14 NEDO 記者会見 「革新炭素繊維基盤技術開発」の成果発表

## 5. 展示会への出展

- ・NEDO Nanotech 2016.1.27~29 東京ビックサイト

## 6. 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	東京大学 影山和郎、松尾剛	熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮破壊 メカニズムに関する一考察	日本複合材料学会誌 論文賞	2015/6/9

## 7. フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	岩下、諸星、永井、藤田 (産総研)	産業技術総合研究所オープンラボ 2013	炭素繊維モノフィラメント による評価試験(パネル展示)	2013/10/31-11/1
2	影山和郎	革新的新構造材料等技術開発 プロジェクト成果報告会	革新炭素繊維基盤技術開発 の研究内容報告	2014/6/17
3	岩下、永井、藤田(産総 研)	JASIS2015(産業技術総合研究所 計 量標準総合センター 研究成果ブー ス)	炭素繊維 1 本による評価試 験技術(パネル展示)	2015/9/2-4

## V. プロジェクト用語集

番号	用語(日本語)・略号	English	用語。略号の説明
1	炭素繊維	Carbon Fiber	有機繊維の前駆体を加熱炭素化処理して得られる、質量比で90%以上が炭素で構成される繊維。
2	マイクロ波(炭素化)	Microwave carbonization	ヒーターなどによる放射や伝導による加熱ではなく、繊維をマイクロ波によって直接加熱して炭素化する方法。
3	異形状炭素繊維	Modified cross-section carbon fiber	中空など、通常の炭素繊維とは異なる断面形状を有する炭素繊維。
4	前駆体化合物	Precursor compound	炭素材料になる前の高分子物質。温度を上げても溶融しない特徴を持つ。
5	耐炎化	Thermal stabilization	PAN 繊維が炭素化時に溶融しないように200-350°Cの空气中で数時間加熱する処理のこと。
6	PAN	Polyacrylonitrile	有機高分子の一種で、アクリロニトリルを重合させて得られる。PAN と略称される。PAN(ポリアクリロニトリル)は、アクリル、モダクリル繊維、衣類および家の調度品のウールの一般的な材料として生産されている。
7	引張弾性率	Tensile modulus	材料を引張ったときの伸びにくさを表す物性値。
8	破断伸度	Fracture elongation	材料が破断したときのひずみ(変形量/試験片長)。
9	樹脂界面接着性	Interfacial adhesion	樹脂と繊維表面の接着性。
10	表面官能基	Surface functional group	材料の表面についている官能基。接着特性などに大きく影響する。

11	熱可塑性樹脂	Thermoplastic Resin	ガラス転移温度または融点まで加熱することによって軟らかくなり、目的の形に成形できる樹脂。一般的に、熱可塑性樹脂は切削・研削等の機械加工がしにくい事が多く、加温し軟化したところで金型に押し込み、冷し固化させて最終製品とする射出成形加工等が広く用いられている。ポリエチレン、ポリプロピレン、ポリスチレン、ABS樹脂、塩化ビニル樹脂、メタクリル酸メチル樹脂、ナイロン、フッ素樹脂、ポリカーボネート、ポリエステル樹脂など。
12	ライフサイクルアセスメント(LCA)	Life Cycle Assessment	製品やサービスに対する、環境影響評価の手法。主に個別の商品の製造、輸送、販売、使用、廃棄、再利用までの各段階における環境負荷を明らかにすることを目的としている。
13	不連続繊維強化複合材料	Discontinuous Fiber Reinforced Composite	カットされた短い繊維を強化繊維に用いた複合材料。短繊維強化複合材料。 ⇔連続繊維強化複合材料
14	CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics	炭素繊維強化プラスチック。炭素繊維で強化したプラスチック成形品(樹脂成形品)の総称。
15	プラズマ表面処理	Plasma surface treatment	プラズマを利用して、繊維表面に官能基を導入する表面処理方法。
16	横方向圧壊試験	Compressive crush test	繊維試料に横方向から圧縮荷重を負荷したとき誘起され半径方向引張応力によって、試料が脆性的に破壊させる試験。試験の最大荷重を試料のサイズで規格化した値を圧壊強さという。
17	ストランド物性	Strand mechanical property	(樹脂含浸)繊維束の引張弾性率や引張強度などの特性。
18	異方性	Anisotropy	物質の物理的性質、例えば弾性率や屈折率などが方向によって異なること。結晶、圧延した金属、プラスチックなどに現れる。 ⇔ 等方性
19	エッチング	Etching	繊維表面などを酸化処理などによって、削ること。一般に軽微なエッチングは繊維表面の欠陥を除去する効果があり、繊維強度

			を増加させるが、過度のエッチングは繊維強度を減少させる。
20	エポキシ(樹脂)	Epoxy (Resin)	高分子内に残存させたエポキシ基で架橋ネットワーク化させることで硬化させることが可能な熱硬化性樹脂の一種。硬くて熱や溶剤に強い。
21	界面層	Interfacial Layer	ある均一な液体や固体の相が他の均一な相と接している境界のことを界面と呼ぶ。炭素繊維のような強化繊維の場合、樹脂と接している境界の表面層を界面層という。
22	界面せん断強度	Interfacial shear strength	樹脂と繊維界面の接着が剥がれる際の繊維方向のせん断強度。
23	官能基	Functional Group	有機化合物に特別の化学性質を与える原子・原子団。例えばアルコールの $-OH$ 、アルデヒドの $-CHO$ 、カルボン酸の $-COOH$ 、などがある。
24	サイズ剤	Sizing Agent	炭素繊維束を収束させて、複合材料にする際に樹脂との濡れ性をよくするために、炭素繊維表面に塗布されるもの。使用する樹脂に応じて最適なサイズ剤がある。
25	酸化処理	Oxidative Treatment	炭素繊維などの表面層を改質する処理手法の一つ。エッチング処理。含酸素基を繊維表面に導入することにより樹脂との水素結合を促進し、接着性を高めることができる。
26	射出成形	Injection Molding	加熱溶融させた材料を金型内に射出注入し、冷却・固化させる事によって、成形品を得る方法。複雑な形状の製品を大量に生産するのに適している。工程は大きく分けて、型締め、射出、保圧、冷却、型開き、取り出し、と進み、このサイクルの繰り返しによって、製品を連続的に生産できる。
27	親和性	Affinity	繊維強化プラスチックにおいては、繊維と樹脂とのなじみやすさを言う。例えば、繊維表面にカルボキシル基( $-COOH$ )を持っていれば、エポキシ樹脂と親和性(濡れ性)に優れた繊維となる。
28	ねじり弾性率	Torsional modulus	材料をねじるときのねじりにくさを表す物

			性値。
29	熱硬化性樹脂	Thermosetting Resin	加熱すると重合を起こして高分子の網目構造を形成し、硬化して元に戻らなくなる樹脂のこと。熱硬化性樹脂は硬くて熱や溶剤に強い。フェノール樹脂、エポキシ樹脂、不飽和ポリエステル樹脂、ポリウレタンなどがある。
30	破断強度	Breaking Strength	外力の作用により、材料が破壊(破断)する時の応力。
31	表面改質	Surface Treatment	表面層の特性を変化させること。例えば、炭素繊維は、マトリックス樹脂との接着性を改善するため、その表面を酸化処理する。
32	ピンホール引抜き法	Pin-hole pull-out method	界面せん断強度を評価する手法の一つ。金属板に微小な穴を空けて、樹脂を埋め込み、繊維をそこに差し込んで、試験片を製作。繊維を引き抜く際の荷重と埋め込み長さからせん断強度を求める手法。
33	フラグメンテーション法	Fragmentation method	界面せん断強度を評価する手法の一つ。樹脂に繊維を一本埋め込んで引っ張った際の繊維の平均破断長さからせん断強度を求める手法。
34	ベンチプラント	Bench Plant	少量のサンプルを試験的に作成し、工業化にむけての運転データを取得するためのプラント(工業設備)。
35	ポリプロピレン(PP)	Polypropylene	エチレンの水素原子一つがメチル基に変わった構造のプロピレンの重合体。メチル基の立体的な位置の違いによって特性が大きく異なるが、その中でも結晶化度が高く剛性の優れたアイソタクチック PP が一般的に用いられている。
36	マイクロドロップレット法	Micro drop-let method	界面せん断強度を評価する手法の一つ。繊維一本に樹脂玉を付けて、繊維の埋め込み長さと繊維を引き抜く時の荷重から界面せん断強度を求める手法。
37	マイクロコンポジット法	Micro composite method	界面せん断強度を評価する手法の一つ。複数繊維束に樹脂玉を付けて、樹脂玉から繊維を一本引き抜いて、荷重と繊維の埋め込み長さ



			からせん断強度を求める手法。
38	ワイブル分布	Weibull Distribution	脆性材料の強度を統計的に記述するための確率分布。時間に対する劣化現象や寿命を統計的に記述するためにも利用される。ワイブル係数を導入した式で表わされる。
39	CFRTP	Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics	炭素繊維強化熱可塑性プラスチック。ポリアミドやポリプロピレンといった熱可塑性樹脂を母材とする炭素繊維強化複合材料。
40	Vf	Fiber Volume Fraction	繊維体積含有率。

## 2.8.2 [テーマ番号 5 1] 「革新炭素繊維基盤技術開発」(2016 年度～2020 年度)

### 2.8.2.1 テーマの概要

#### (1)背景と目的

軽量・高強度の特徴を持つ炭素繊維は、自動車等の輸送機器の材料として利用することにより大幅な燃費向上が可能となる等、低炭素社会の実現に貢献できる画期的な素材であり、今後の大幅な需要拡大が期待されている。しかしながら、現在の炭素繊維の製造プロセスでは、消費エネルギー及び CO<sub>2</sub> 排出量が大きく、生産性の向上も困難であることが課題となっている。

本テーマは、我が国の炭素繊維の国際優位性を維持し、かつ、国内における炭素繊維の利用産業の競争力強化を図っていくため、環境負荷が少なく、かつ、生産性が大きく向上する新たな炭素繊維製造プロセスの基盤技術の研究開発を実施した。

#### (2)目標値

現在の炭素繊維製造方法(進藤方式)は、アクリル繊維を空气中高温で耐炭化(焼成)するもので、製造時における消費エネルギー及び CO<sub>2</sub> 排出量はいずれも鉄の約 10 倍と高い。また、製造装置の除熱効率の限界から生産性もなかなか高められないのが現実であり、これらは大きな課題となっている。今後の自動車の軽量化に向けた普及拡大を考えると、近い将来見込まれる炭素繊維の大量需要に的確に対応していくことが必要である。

本研究開発では、耐炭化後の炭素化に要する窒素ガス中での高温長時間の加熱をマイクロ波加熱に代替することなどにより、消費電力及び CO<sub>2</sub> 排出量を半減するとともに、製造速度を向上し生産効率を引き上げる炭素繊維製造プロセスの革新を目指した。また、炭素繊維の多機能化を目指した異形状炭素繊維の開発と、製造プロセス等に係わる技術開発を実施した。

表 3-2.8.2-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第 1 中間目標 (2015 年度末)	第 2 中間目標 (2017 年度末)	第 3 中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)
(1)新規炭素繊維前駆体化合物の開発 (2016～2020 年度)		新規炭素繊維前駆体化合物から異形状炭素繊維を製造するための基盤技術を確立する。	完全耐炭化した新規前駆体からの革新炭素繊維製造プロセス技術の基盤確立 (2020 年度末)	
(2) マイクロ波等による炭素化プロセス		マイクロ波により大繊維度前駆体繊維	マイクロ波炭素化によるラージトウ	

技術の開発 (2016～2020年度)		の炭素化を可能とするため、炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関解明を進め、炭素化条件の最適化を図る。	製造プロセス技術の基盤確立 (2020年度末)	
(3)炭素繊維の評価手法開発、標準化 (2016～2017年度)		熱可塑性樹脂と異形状炭素繊維の界面特性を検証し、その特性発現メカニズムを解明することにより、標準的な力学的試験法を確立する。 (2017年度末)		

### (3)全体計画

研究開発の全体計画について示す(図 3-2.8.2-1)。

事業項目	2016年度				2017年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
①新規炭素繊維前駆体化合物の開発 【産業技術総合研究所、東京大学】 ①-1 「新規前駆体化合物 A の開発」 【産業技術総合研究所】 ①-2 「新規前駆体化合物 B の開発」 【産業技術総合研究所、東京大学】								
	異形状炭素繊維の製造				熱可塑性樹脂との界面特性評価			
②炭素化構造形成メカニズムの解明 【産業技術総合研究所、東京大学】 ②-1 「炭素化過程における構造・物性変化の解明」【産業技術総合研究所】 ②-2 「マイクロ波等による炭素化技術の確立」【産業技術総合研究所、東京大学】								
	炭素化メカニズムの解明・繊維構造と機械特性との相関解明				マイクロ波炭素化条件最適化			

③炭素繊維の評価手法開発、標準化 【東京大学】					界面特性発現メカニズムの解明				界面特性の力学試験法の確立			

事業項目	2018年度				2019年度				2020年度			
	第1	第2	第3	第4	第1	第2	第3	第4	第1	第2	第3	第4
	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期	四半期
①新規炭素繊維前駆体化合物（溶剤可溶性耐炎ポリマー）の開発【産業技術総合研究所、東レ】	溶剤可溶性耐炎ポリマーの高性能化				新規前駆体繊維製造のプロセス性検討				新規炭素繊維の品質目標達成 (単糸7μm、弾性率240GPa、強度4GPa)			
									コンポジット評価			
②マイクロ波等による炭素化プロセス技術の開発【産業技術総合研究所、帝人】 ②-1 「炭素化過程における構造・物性変化の解明」【産業技術総合研究所】 ②-2 「マイクロ波等による炭素化プロセス技術の開発」【産業技術総合研究所、帝人】	炭素化プロセスメカニズム解析・構造物性評価				メカニズムの装置設計への反映							
	大繊維度炭素繊維製造プロセス技術開発				多段プロセス技術開発				大規模量産プロセスへの適用性評価 (単糸7μm、弾性率240GPa、強度4GPa)			
	炭素繊維の高性能化・性能評価								コンポジット評価			

図 3-2.8.2-1 革新炭素基盤技術開発 全体計画

#### (4)実施体制

第1期(2015年度末)までの実施体制において、NEDOは国立大学法人東京大学と委託契約を締結し、東京大学は産業技術総合研究所、東レ株式会社、東邦テナックス株式会社(帝人株式会社)、三菱レイヨン株式会社、プラスチック工業連盟、金沢工業大学へ再委託契約を締結した。委託事業では、国立大学法人東京大学内に集中研を設置し、基盤技術である研究開発項目(1)~(3)を実施した。この中で、産総研及び東レ株式会社は(1)新規前駆体化合物の開発を、産総研および東邦テナックスは(2)炭素構造メカニズムの解明を、産総研、三菱レイヨン、プラスチック工業連盟と金沢工業大学は(3)炭素繊維の評価手法開発・標準化をそれぞれ担当した。各研究テーマにおいては、参画企業がそれぞれ得意とする要素技術及びノウハウ、さらには研究開発インフラ等を勘案し、研究開発項目毎に個別の要素技術について特に優れた技術力を有する企業を選定し機動的かつ効率的に研究開発を推進してきた。また、外部の有識者をアドバイザーとした推進委員会を設けており、専門家の意見を吸収して研究開発を推進する体制をとった。

第2期の実施体制については、NEDOはISMAと委託契約を締結し、ISMAは組合員である産総研内につくば小野川分室を設置するとともに、国立大学法人東京大学と再委託契約を締結した。2015年度までと同様に、東京大学(2017年度から一部産総研)

を集中研として炭素繊維メーカーから研究者を派遣(出向等)し、東京大学影山研究統括及び産総研羽鳥 PL の指示・協議のもと機動的にプロジェクトを推進する体制をとった。

第3期の実施体制は図 3-2.8.2-2 の通りである。NEDO は ISMA と委託契約を締結し、ISMA は組合員である産総研、東レ、帝人に、それぞれつくば小野川分室、伊予分室、三島分室を設置する体制をとり、①新規炭素繊維前駆体化合物（溶剤可溶性耐炎ポリマー）の開発については産総研-東レが、②マイクロ波炭素化プロセス技術の開発については、産総研-帝人が共同で実施する体制となった。

<b>新構造材料技術研究組合 (ISMA)</b>	
<b>【分担研】</b>	
	産業技術総合研究所 : テーマ51-①, ② (つくば小野川分室)
	東レ: テーマ51-① (伊予分室)
	帝人: テーマ51-② (三島分室)

図 3-2.8.2-2 実施体制 (2018~2020 年度)

## (5) 運営管理

### 1) 第2期まで

#### ①産官学の ALL JAPAN チームによる効率的な研究開発の実施

研究者が東京大学に集まり、同じ屋根の下で一丸となって研究を実施。

コンソーシアムを形成し、機密保持・成果取扱規約について基本合意済み。

東京大学・産総研の研究開発ポテンシャルの活用(若手研究者の育成)。

低炭素工学イノベーション拠点(2009年度産業技術研究開発施設整備費補助金)による研究環境整備。

2011年度-2017年度 研究会・検討会実施状況

推進委員会 8回実施、研究全体会議 66回実施

個別研究会(3件のテーマ毎) それぞれ 66回実施

#### ②国立大学法人東京大学に知的財産管理を一元化

特許のパッケージ化、海外企業に買収される心配のない国立大学法人を中心とする。

発明委員会 6回実施、知財WG 25回実施

### 2) 第3期 (2018-2020 年度)

NEDO/ISMA による進捗管理 (NEDO 推進委員会、ISMA 成果報告会、テーマリーダー会議等) に加え、ISMA プロジェクトマネージャーによる進捗報告会 (4

半期ごと)、ならびにテーマリーダーによる月1回の月例報告会を、①新規炭素繊維前駆体化合物の開発、②マイクロ波等による炭素化プロセス技術の開発、それぞれについて個別に実施して研究開発の進捗管理を行った。

### (6)実施の効果(費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度)

本技術開発のアウトプットからアウトカムへの展開としては、現行の炭素繊維製造における原料(炭素繊維前駆体)、製糸、焼成の技術について、抜本的な見直しを行うことにより、製造エネルギー及びCO<sub>2</sub>排出量を半減させるとともに生産性も飛躍的に向上させる技術を確立し、自動車等への炭素繊維の普及拡大はもとより新市場の創出・獲得の実現を目指す。アウトカムとしては、我が国の炭素繊維及び関連産業の国際競争力の強化、低炭素社会への実現及び安全性等を確保した自動車などの普及による生活の豊かさへの貢献が挙げられる。なお、本技術開発のさらなる展開に当たっては、欧米に遅れをとっている製品評価技術等の応用技術や標準化も同時に進めるとともに、本技術開発による研究開発成果の取り扱いへの配慮も必要である。

2030年における自動車分野での炭素繊維需要量と供給量

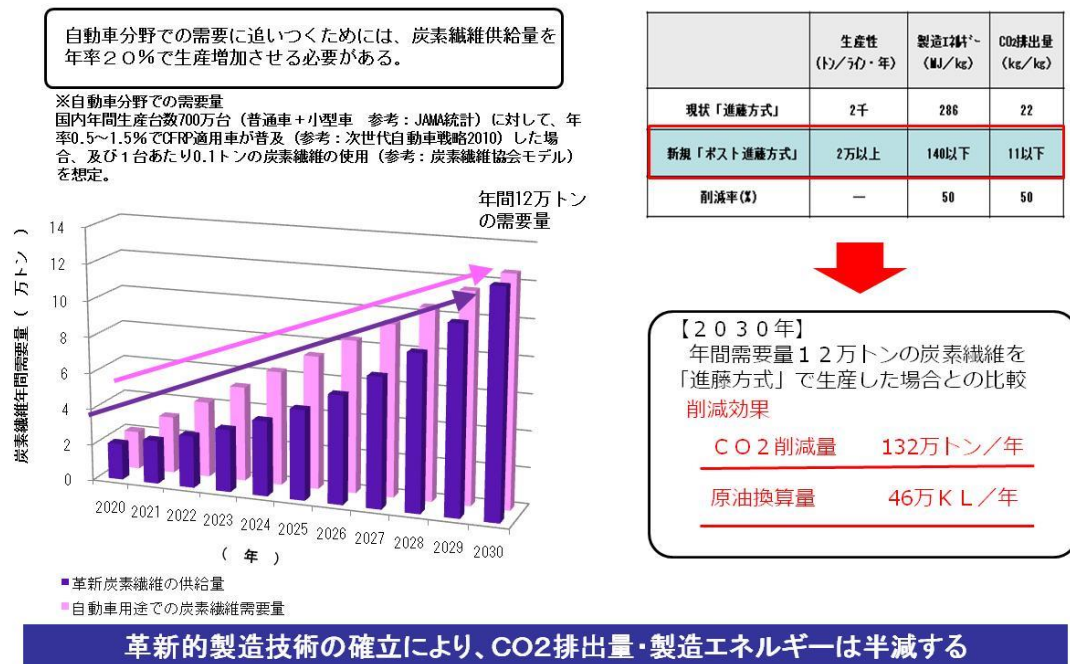


図 3-2.8.2-3 実施の効果

## 2.8.2.2 研究開発成果

### (1)最終目標の達成度

ここでは最終目標に対する達成度について示す。

表 3-2.8.2-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (2020年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
(1)新規炭素繊維前駆体化合物の開発	完全耐炭化した新規前駆体からの革新炭素繊維製造プロセス技術の基盤確立 (2020年度)	完全耐炭化した前駆体ポリマーからなる繊維を焼成した炭素繊維物性は、直径 6.7 $\mu$ m で強度 2.1GPa、弾性率 237GPa まで達した。評価用の長尺品の試作を行い、標準的なコンポジット性能評価により目標とする市販品と比較した結果、ストランド引張強度を除き市販品と同等の性能を発現した。さらに、ラージトウ (48K) 製造基盤技術を検討し、安定凝固した後低速で巻取可能であることがわかった。	○	
(2)マイクロ波等による炭素化プロセス技術の開発	マイクロ波炭素化によるラージトウ製造プロセス技術の基盤確立 (2020年度)	PAN 系前駆体繊維由来の耐炭繊維を用いたマイクロ波加熱によるレギュラートウ (24K) の炭素化によって引張強度 3.4GPa, 引張弾性率 230GPa を有する炭素繊維の製造に成功し、これから得られる炭素繊維強化複合材料の物性を評価し、市販の汎用品レベルの物性発現率であることを確認した。また、ラージトウ (48K) の炭素化実験においても、引張弾性率 250GPa を示す炭素繊維の製造に成功したことから、本プロセス技術がラージトウにも適用可能であることを確認した。上記の通りマイクロ波炭素化プロセスの基盤技術を確立することができた。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

## (2)研究開発の成果と意義

### ①新規炭素繊維前駆体化合物の開発

耐炭化工程を不要とする新たな炭素繊維前駆体高分子化合物の探索、設計、合成を行った結果、溶解剤が酸化ポリマー鎖に振り袖状に結合した柔軟構造を持つ新規前駆体化合物を開発した。

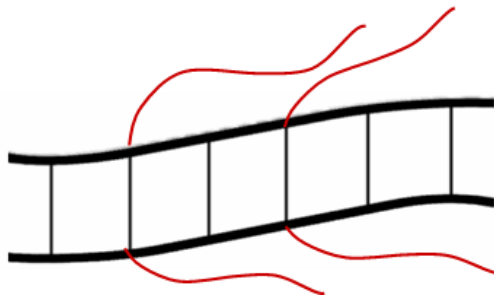


図 3-2.8.2-4 溶媒可溶性耐炎ポリマーの構造モデル

PAN を原料とし液相反応で得られる新規前駆体化合物（以下、溶媒可溶性耐炎ポリマー）の反応条件をさらに見直し、完全耐炎化と製糸性向上を両立させることができた。

製糸後に得られた前駆体繊維の品位は向上し、焼成後の C F 物性は直径  $6.7\mu\text{m}$  で強度  $2.1\text{GPa}$ 、弾性率  $237\text{GPa}$  まで達することができた。市販 C F と比較して物性値の位置付けを明確化したのが図 3-2.8.2-5 である。

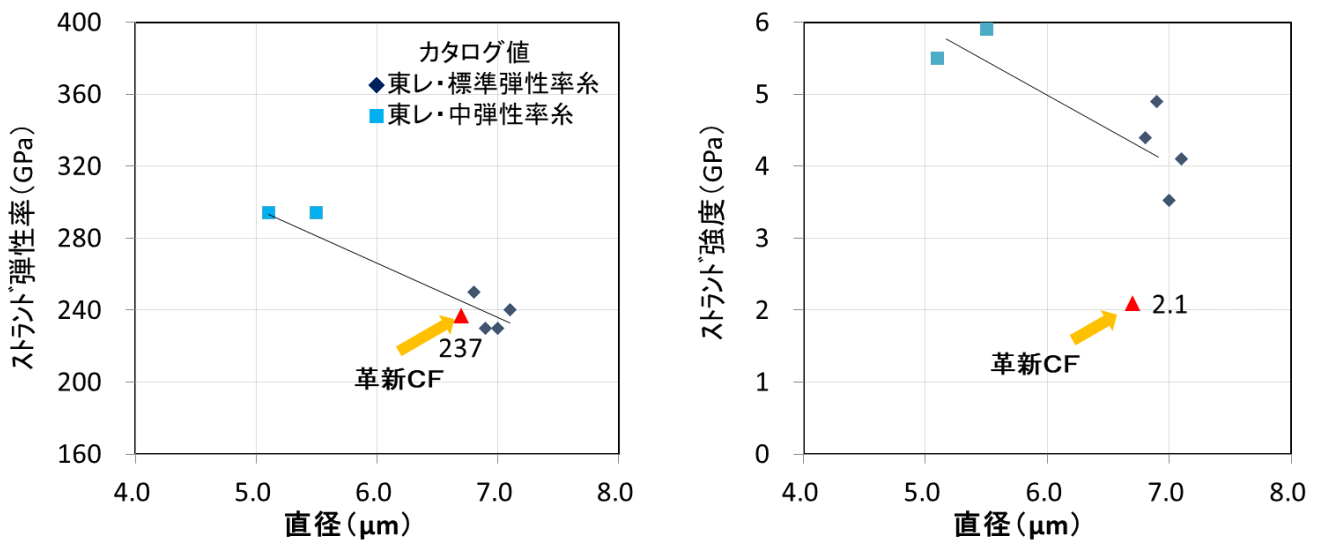


図 3-2.8.2-5 革新 C F の到達 C F 物性の位置付け（市販 C F と比較）

C F 直径および弾性率はほぼ目標領域に達したが、強度についてはさらなる改善が必要であることがわかる。低強度の原因は単糸間接着等が考えられ、今後の課題として製糸・焼成プロセスの改善が必要である。

また、該 C F の微細構造を透過電顕で解析し、炭素微結晶について内外構造差が小さいことを確認した。また中間層を含む内外の配向を市販 C F と比較したところ、内



外差が小さく目的の方向であることを確認した。このように革新CFの方が内外構造差が小さいのは、完全耐炎化した溶媒可溶性ポリマーを用いた効果と考えている。

次に、上記の溶媒可溶性耐炎ポリマーから革新CFを量的に試作し、コンポジット評価を行った。

表 3-2.8.2-3 は文献記載のエポキシ樹脂をマトリックスとした熱硬化コンポジットの物性一覧である。ここで比較（ブランク）CFとして Zoltek 社製、PX35 を用いた。熱硬化コンポジットの 0° 弾性率はブランク対比ほぼ同等であるが、0° 引張・圧縮・曲げ強度はブランクに対し 60~80%程度の発現値であった。これら強度系の値はストランド強度の向上で改善可能と考える。

表 3-2.8.2-3 熱硬化コンポジット物性

Vf60%換算、190g/m<sup>2</sup>、エポキシ/ポリエーテルスルホン: 1997 Kishi JMS, 32, 761

	ストランド 強度 (GPa)	0° 引張強度 (MPa)	0° 弾性率 (GPa)	0° 圧縮強度 (MPa)	0° 曲げ強度 (MPa)	0° ILSS (MPa)
PX35	4.1	2210	134	1513	2249	101
革新CF	2.1	1380	132	1104	1758	93
比率(%)	51	62	≒100	73	78	92

さらに表 3-2.8.2-4 に熱可塑コンポジット（短繊維ペレット、PA6、Wf30%）の評価結果一覧を示した。

ブランク対比、引張および曲げ強度は同等、曲げ弾性率とシャルピー衝撃強度が劣るという結果になった。コンポジットとして使えるレベルにあるが、耐衝撃はもう少し向上させる必要がある。

表 3-2.8.2-4 熱可塑コンポジット物性

	引張 強度 (MPa)	引張 破断歪 (%)	曲げ 強度 (MPa)	曲げ 弾性率 (GPa)	曲げ 破断歪 (%)	シャルピー ノッチ付 (kJ/m <sup>2</sup> )
PX35	241	1.8	367	25	2.2	9.6
革新炭素	242	2.4	367	21	2.7	8.0
3101- 30V (カタログ)	240	1.6	335	19	-	9.8

最後にラージトウ（48K）製造基盤技術を検討した結果について記す。凝固性と高速引取について別々に検討した。48K については安定凝固を確認し、低速であれば引取可能であることがわかった。一方、高速化については 3K であるが1次目標の中速ベースまで引取可能なことを確認した。



図 3-2.8.2-6 ラージトウの低速引取検討状況

## ②炭素化構造形成メカニズムの解明

### ②-1「炭素化過程における構造・物性変化の解明」

マイクロ波等による大繊維束の炭素化を可能とするため、炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関関係を解明する。これにより、大繊維束において、市販の PAN 系炭素繊維と同等の引張弾性率の新規炭素繊維を製造することを目標としている。本テーマでは、炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関関係を解明するため、PAN 系前駆体を耐炭化した耐炭繊維（以下、前駆体繊維と呼ぶ）のマイクロ波に対する特性を把握し、照射過程における炭素繊維の化学構造変化や電磁気学的な性質変化、力学的な性質変化との相関関係を検討している。

2017 年度までに、炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関解明を進め、炭素化条件の最適化を図った。固体発振器を用いたマイクロ波照射が前駆体繊維に対し、どのような構造変化をもたらすかを、周波数に対する加熱装置の散乱パラメータおよび小型共振器による集中照射によって検討した。固体発振器による周波数帯域の狭いマイクロ波を用い、炭素繊維単糸に対する照射と温度上昇の相関を調べたところ、到達温度は照射出力によって調整でき、印加電力による制御が可能であることが示された。また前駆体繊維束の加熱では、照射電力の精密な制御によって温度分布を調整できることが示された。前駆体繊維を搬送させながら照射した場合は、数十秒という短時間内で連続的に発光を伴う加熱を行うことができた。

高温化および大繊維化を検討するため、レギュラートウの前駆体繊維に対して図 3-2.8.2-7 に示す装置で照射検討を行ったところ、発光を伴う加熱が行われたとともに、石英ガイド管が熔融する高温に至った。大繊維束に対して搬送させながら連続的に照射する検討として高搬送用焼成装置の設計を行い、その基本特性である散乱パラメータを測定した。

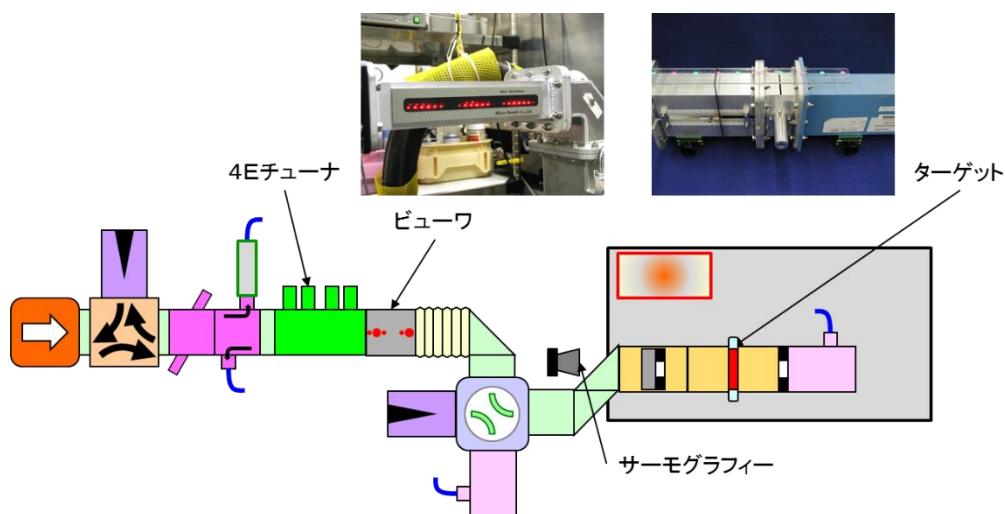


図 3-2.8.2-7 装置構成

2018 年度は、レギュラートウの前駆体繊維のマイクロ波に対する特性を把握し、炭素化過程における電磁気学的及び力学的な性質変化を検討し、大繊維束の炭

素化に向けた基礎データを取得・蓄積した。2017年度にて製作した集中照射型小型炉を用いた検討では、誘電体である前駆体繊維を連続的に導電性繊維に変換することが可能であった。この時の物性変化は、焼成時の繊維の位置及び電磁界との調和によって大きく影響される。検討の結果、加熱時の張力調整の影響が大きいことが判明し、搬送条件を見直すことで長さ方向に平均的な良導電性を示す繊維が得られた。さらに加熱時に、より高い張力下で印加することにより、強度向上の傾向も見られた。

2019年度は、大織度の前駆体繊維のマイクロ波に対する特性を把握し、炭素化の長時間運転に向けた装置改良を検討した。誘電体繊維の導電化過程において、長時間連続運転を検討するとともに、保温断熱管の種類及び設置方法の差異が連続運転時にもたらす影響を検討した。その結果、初期の不安定状態からの安定化への復帰が速く、3時間の連続運転においても停止することなく加熱が可能となった。運転において加熱の進行状況を把握することはプロセス検討の上でも重要となる。共振器による摂動法を用いることにより、運転中に、加熱直後の生成糸の評価を行うデバイスを作製した（図 3-2.8.2-8）。非接触で加熱度合いが目視でき、運転状態が良好か否かをその場で把握することができた。

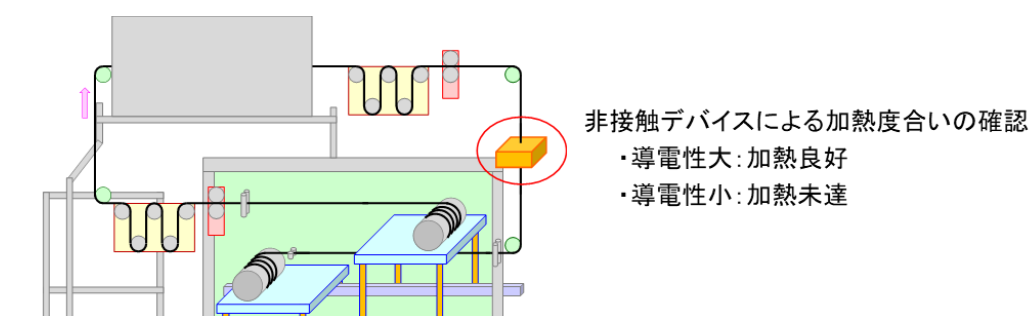


図 3-2.8.2-8 ラボ装置構成と開発した非接触デバイスの導入

2020年度はプロセス技術の導入を見据え、1段加熱では炭素化が不十分な場合に、繰り返し加熱を行うことで製品の品質向上を行うことを想定し、多段加熱装置の検討を行った。マイクロ波加熱は生成糸が導電性を持つため、導電糸を通じて装置間で好ましくないエネルギーの交差漏洩（クロストーク）が行われる可能性がある。例えば2段加熱を行う場合、前段装置のマイクロ波エネルギーが導電糸あるいは自由空間を通じるにより後段に漏洩した場合、想定されないエネルギー流入によって運転の不安定化あるいは装置の誤動作等が考えられる。この回避として装置間に十分な距離を持つ、あるいは装置間で導電糸に接触して接地をとり電氣的に分離する、等の対策が考えられる。これに対し当該年度研究では、これまでに本プロジェクト内で得てきた知見である、生成糸の有する導電損失によって導電糸を通じた漏洩を減衰的に遮断する方法、およびマイクロ波加熱炉の出口スリーブにおける急激インピーダンス差により漏洩を抑制する方法の採用に加え、2段加熱炉間の使用周波数に差をつけることで交差漏洩を抑制する方

法を検討した。図 3-2.8.2-9 に示す多段加熱装置を用い、前段の電界加熱炉と後段の磁界加熱炉に 2.45GHz 帯の異なる周波数のマイクロ波を照射して運転を確認したところ、両装置間の交差漏洩に基づく運転上の異常性は見られなかった。

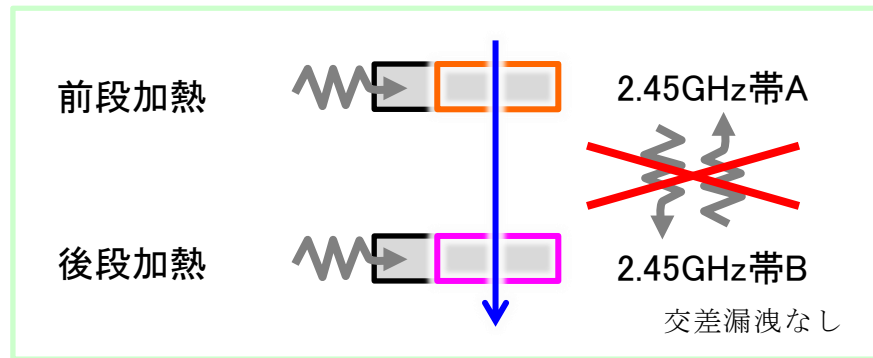


図 3-2.8.2-9 多段加熱装置

ここで加熱炉は、マイクロ波の進行方向と糸搬送方向を考慮した特殊な加熱炉を用いた（図 3-2.8.2-10）。本開発炉は、被加熱連続繊維を極大電界、あるいは極大磁界強度付近で加熱するとともに、被加熱連続繊維が半導体や導電体に変化したことによって生じる電界反射を抑制して工程安定性を高めることができる。本開発炉に対し、適切な条件を見出すことにより、狭い機幅にて連続的に加熱運転が可能であることを確認した。

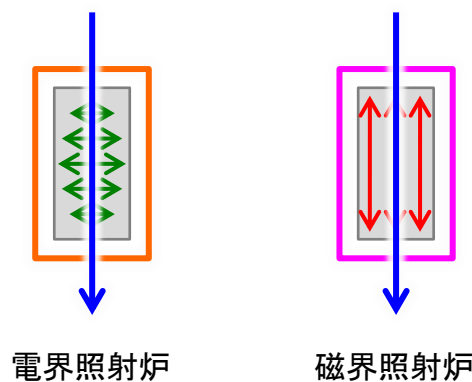


図 3-2.8.2-10 開発炉

## ②-2 「マイクロ波等による炭素化技術の確立」

マイクロ波エネルギーによる大繊維度（ラージトウ）前駆体繊維の炭素化を実現するため、炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関解明を進めながら炭素化条件を探索し、本プロセス技術の確立を目指している。

2017 年度までに、炭素繊維構造の形成過程と機械特性との相関解明を進めるとともに、マイクロ波加熱による炭素化工程の安定化に必要な技術の検証と炭素化条件の最適化を図った。PAN 系前駆体を耐炎化した耐炎繊維（以下、前駆体繊維と呼ぶ）を用いたマイクロ波加熱によるレギュラートウの炭素化実験において、

既に、引張弾性率 247GPa、破断伸度 1.7%を示す炭素繊維の製造に成功していたが、今回、炉体構造の改良や運転条件の適正化等により、炭素繊維の機械特性や品質の向上が得られた。この技術を確認する過程で、マイクロ波の照射方式や照射過程に関わる前駆体繊維の加熱メカニズムやそれによる構造の形成過程を精緻に解析する新たな分析評価法が開発された（図 3-2.8.2-11）。

前駆体繊維の大繊維化に向けて、マイクロ波の照射過程による物質構造変化や電磁界-熱-物質連成解析シミュレーションを通じて、目的に適合した炉体構造を実現した。ラージトウの炭素化実験によって炭素化条件を検討中であり、目標とする機械特性や品質を達成できる目処が得られた。さらに、2段階のマイクロ波炭素化システムを連動させたプロセスでの炭素繊維製造と目標物性の達成を目指した。特に、工程 2 に最適な性状を有する高吸収性繊維の安定的な供給を目的に、前駆体繊維の大繊維化に対応した工程 1 の炉体構造の開発を行った。

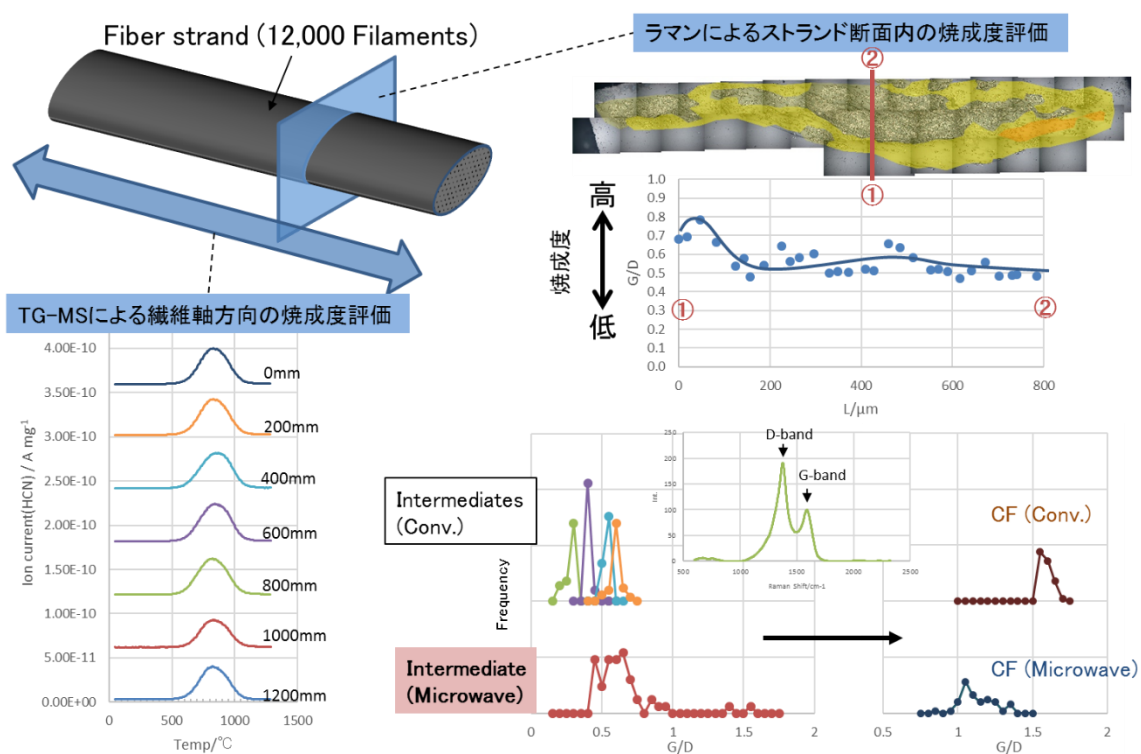


図 3-2.8.2-11 マイクロ波による炭素化メカニズム解明に向けた分析評価法の一例

前駆体繊維を用いたマイクロ波加熱によるレギュラートウの炭素化実験において、プロセス技術の深化によって引張強度 3.4GPa、引張弾性率 230GPa を有する炭素繊維（図 3-2.8.2-12）の製造に成功した。また、引張弾性率の調整を可能とする技術を開発し、引張弾性率 260GPa を有する炭素繊維を製造することに成功した。ラージトウの炭素化実験においても、引張弾性率 250GPa を有する炭素繊維の製造に成功しており、本プロセス技術がラージトウにも適用可能である見通しを得た。このプロセス技術を深化させる過程で、炭素化をコントロールするキーデバイスの開発や、新設計のマイクロ波炭素化炉の追加など、それに伴う加熱メ

カニズムや構造形成過程の仮説を検証し解明した。

2018年度は、レギュラートウの炭素化において、これまでよりも高度な炭素化制御により、得られる炭素繊維の引張強度は12Kの炭素化に対し低下がみられていた期初の2.3GPaから3.2GPaと向上させることに成功した。マイクロ波加熱により得られた炭素繊維の分析・解析を進め、強度低下の要因に関するいくつかの知見を得た。さらなる炭素化制御によりこれらの要因を排除していくことが今後重要であることを確認した。

2019年度は、多段プロセスのための新たなマイクロ波炭素化炉を導入し、既存のマイクロ波炭素化炉との連動プロセスを実現することで、炭素化技術を深化させて、炭素繊維の性能向上について検討した。2018年度までにマイクロ波炭素化により得られる炭素繊維は、構造欠陥を内包した粗密構造をとり平均密度が全体的に低いことにより、炭素繊維の機械物性が十分に発現しないという問題を明らかにしており、プロセスの多段化により物性を向上させる仮説を立てた。そこで、プロセスの多段化によって炭素繊維の構造の調整を行いこの構造欠陥を除去することの検証を目的として、新たなマイクロ波炭素化炉を追加導入した。既存のマイクロ波炭素化炉と組み合わせ、繊維の物性の変化に合わせて炭素化制御する多段プロセスによって、2018年度までのプロセスで炭素化時に起こっていた密度の低下を抑制しながら前駆体繊維を炭素化することが可能になった。表3-2.8.1-5に得られた炭素繊維の代表的な樹脂含浸ストランドの引張特性を示す。この中で、CF1およびCF2がこれまでの単プロセス、CF3が多段プロセスによる引張弾性率制御の結果である。引張強度は未だ目標に到達していないが、繊維内部の構造欠陥が2018年度に得られていた繊維よりもかなり減少していたことから、表面欠陥などの影響を減少させることがさらなる高強度化のための課題となった。

ラージトウについては、既存の炉および新設の炉のそれぞれでの炭素化試験を行っており焼成技術に目処を得た。レギュラートウを用いた多段化した炉の連動プロセスにおけるCF性能向上技術をさらに深化させ、ラージトウの炭素化技術に横展開した。

以上のように、性能および品質が改善された炭素繊維が安定的に製造できるようになってきたため、2020年度は補強繊維としての性能すなわち炭素繊維複合材料を作製し材料データを取得する。またレギュラートウの試作実績をもとに、ラージトウのプロセス技術の深化に着手し、実用化に向けた課題抽出を行った。

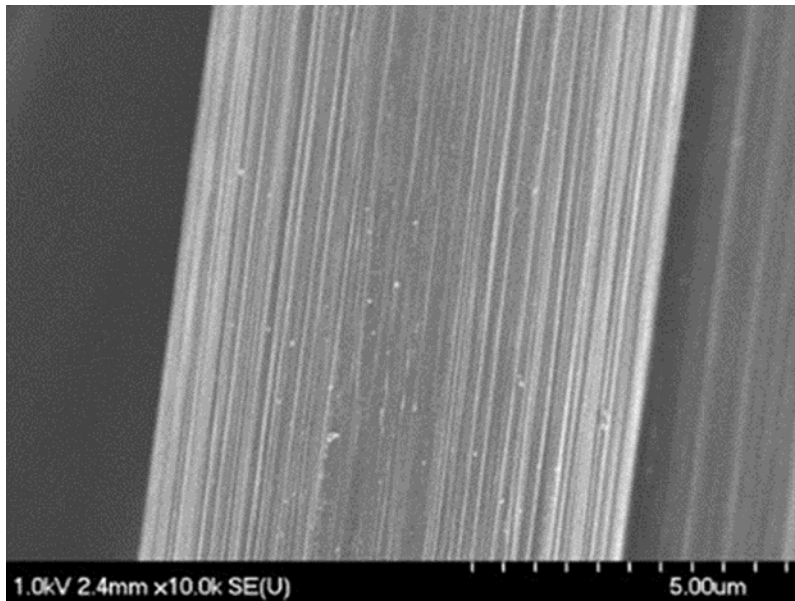


図 3-2.8.2-12 マイクロ波加熱により炭素化した炭素繊維の電子顕微鏡像

表 3-2.8.2-5 代表的な樹脂含浸ストランドの引張特性（平均値）

	目標値	CF1	CF2	CF3	CF4	CF5	CF6
フィラメント数/千本	24	12	24	24	24	24	48
引張強度/GPa	4.0	3.7	3.4	2.8	3.4	3.8	3.1
引張弾性率/GPa	240	240	230	260	230	223	220

焼成進行度を精密に評価を行い、焼成条件を最適化することにより引張強度の向上を目指した(表 3-2.8.2-5)。プロセスの多段化により構造欠陥を除去する試みを行った結果、ボイドの縮小が確認され、強度の向上も確認された (CF4)。しかし、工程数が増えることによる品位の低下が問題となり、不連続繊維強化への適用に限定された。連続繊維補強用の原糸に関しては、処理糸の品位を良好に保つため、プロセスの多段化は行わない工程での検討を実施した。その結果、焼成速度を抑え、反応を完了させる条件において、さらなる引張強度向上が見られた(CF5)。

ラージトウでの焼成において CF5 の成果を適用することにより力学性能の底上げを目指した。しかし、レギュラートウ対比放熱が抑えられることから、構造の乱れを生じ、到達レベルは低めとなった (CF6)。

2020 年度は、単繊維のワイブル分布の大幅な改善などからも明らかなように、性能および品質が向上した 24K ストランドを用いた熱可塑性コンポジットの評価を実施した。

図 3-2.8.2-13 にコンポジット評価結果を示す。今回試作した熱可塑性コンポジットにはマトリックス樹脂にポリアミド 6 (ナイロン) を選定した。プリプレグを作製してプレス成形法にて得られた連続繊維強化の炭素繊維/ポリアミド 6 (以下、CF/PA6) の一方向積層板と、混練機でコンパウンドしペレタイズしたものを射出成形した不連



続繊維（短繊維）強化の CF/PA6 射出成形品を試作し、それぞれ市販 CF から同様の方法で製作したコンポジットとの比較を行った。炭素繊維複合材料の物性は複合材料中の炭素繊維の割合により変化する。それぞれ使用した炭素繊維の物性が異なることから、比較に当たっては物性の発現率を指標とするため、特定の繊維体積含有率当たりの数字（Vf 補正值）を用いた。マイクロ波炭素化 CF を用いたコンポジットは、連続繊維強化の場合、市販 CF を用いた場合とほぼ同等の性能発現率であった。不連続繊維強化の場合、市販 CF を用いた場合よりも全体的に約 1.2 倍の性能発現率を示した。マイクロ波炭素化 CF の性能は市販 CF の性能に比べ低かったが、圧縮特性の向上が認められた。このふたつの事実の原因解明には構造形成メカニズムに基づいた発現機構のさらなる考察が必要であると考えられた。

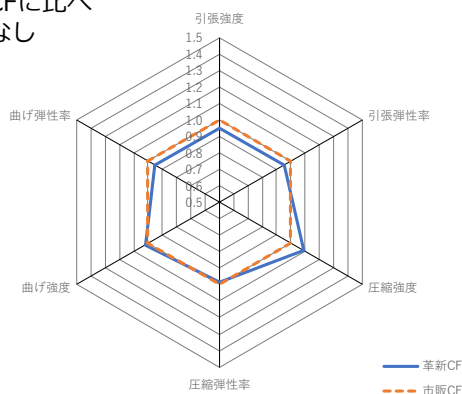
マイクロ波炭素化 CF のプロジェクト期間終了(2021年3月末)時点における到達性能は、表 3-2.8.2-6 に示す通りである。24K では、樹脂含浸ストランドの引張特性が目標値に迫った。24K の開発に多くの時間を費やし、ノウハウを蓄積した結果、48K の開発では強度向上に要する時間を大幅に短縮でき、同引張弾性率については目標値に迫ったが、引張強度については目標未達であった。さらなる物性向上は、図 3-2.8.2-14 に示すマイクロ波炭素化 CF の 48K のワイブル分布は検討当初より大きな改善を示しているため、可能であると考えられた。

## コンポジット物性

	革新CF(MC2) 連続繊維24K	市販CF 連続繊維24K	革新/市販
引張強度 / GPa	3.6	4.3	0.837
引張弾性率 / GPa	214	240	0.892

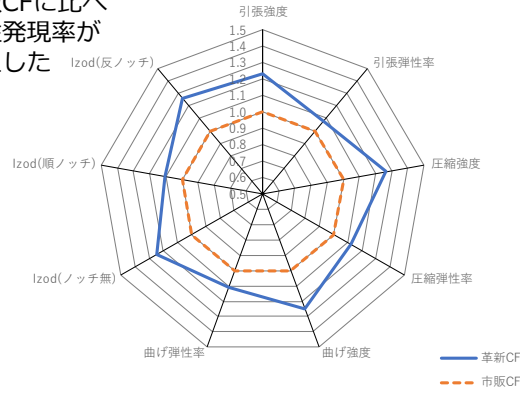
	革新CF(MC3) 6mmカット品	市販CF 6mmカット品	革新/市販
引張強度 / GPa	3.3	4.4	0.750
引張弾性率 / GPa	224	240	0.933

市販CFに比べ  
遜色なし



コンポジット物性発現率の比 (市販CF=1)

市販CFに比べ  
物性発現率が  
向上した



コンポジット物性発現率の比 (市販CF=1)

連続繊維強化CF/ナイロン

不連続繊維強化CF/ナイロン

図 3-2.8.2-13 コンポジット性能評価のまとめ

表 3-2.8.2-6 プロジェクト終了時の到達性能

項目	プロジェクト 目標値	革新炭素繊維 24K	革新炭素繊維 48K	市販炭素繊維 24K(参考)
引張弾性率 (GPa)	240	223	220	240
引張強度 (GPa)	4	3.8	3.1	4.3

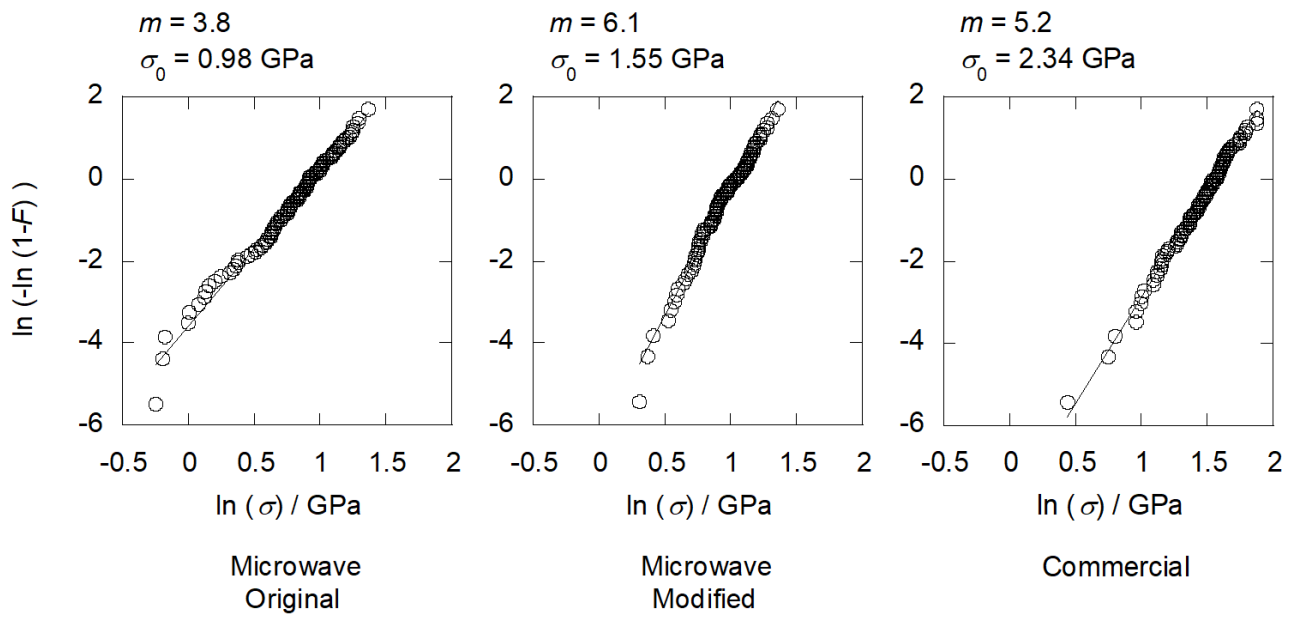


図 3-2.8.2-14 48K の単繊維引張特性 (ワイブル分布, GL=25mm, n=120)

(3)成果の普及(論文、外部発表等)

表 3-2.8.2-7 論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2013FY	0	0	12	0	0	0	0	0	1
2014FY	4	0	15	1	0	0	0	1	2
2015FY	1	0	14	4	23	0	1	0	2
2016FY	3	1	13	3	0	0	0	0	1
2017FY	2	0	4	1	0	0	0	0	2
2018FY	2	0	5	1	0	0	0	0	1
2019FY	0	0	2	2	0	0	0	0	1
2020FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021FY	0	1	2	0	0	0	0	1	1
2022FY	0	0	1	0	0	0	0	0	0
合計	12	2	68	12	23	0	1	2	11

※実施者が主体的に開催するイベント(フォーラム、シンポジウム等)

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み(戦略に沿った取り組み、取得状況)

表 3-2.8.2-8 特許の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	6	5	1
2014FY	5	12	3
2015FY	1	11	3
2016FY	1	0	0
2017FY	0	0	0
2018FY	1	0	0
2019FY	0	0	0
2020FY	1	0	0
2021FY	1	0	1
2022FY	0	0	0
合計	16	28	8

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

## 2.9 研究開発項目⑨戦略・基盤研究

### 2.9.1a [テーマ番号 29] 「新構造材料の技術・研究戦略」(2014年度)

#### 2.9.1a.1 テーマの概要

##### (1)背景と目的

自動車や航空機などに今後中長期的に求められる構造材料等の在り方を展望した上で、内外の技術動向や政策支援の調査、新しい技術の可能性調査（FS）、基盤研究など、本研究開発の方向性検討に必要な調査を全般的に行い、構造材料に関する研究開発のビジョンの明確化、接合技術および個別材料の技術戦略指針、実用化に向けた課題抽出を進め、本プロジェクトで開発する新構造材料の技術・研究戦略を策定する。

##### (2)目標値

各分野分科会（鉄鋼、非鉄、複合材料、接合、戦略・基盤）活動を通じた分野内（間）での関連情報の共有や協調課題の抽出、技術講演会等による最新情報の収集・共有、ISMA 独自の調査や再委託（テーマ 30,31,32）による技術動向調査や調査研究による新技術の創出や情報収集活動等により、プロジェクト内での関連情報の収集・共有を図ると共に、FS 研究の立案・ステアリング等研究戦略や研究の方向性への提案を策定する。

表 3-2.9.1a-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第1中間目標 (2015年度末)	第2中間目標 (2017年度末)	第3中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)
新構造材料の技術・ 研究戦略	構造材料に関する 研究開発のビジョ ンの明確化、接合 技術および個別材 料の技術戦略指 針、実用化に向け た課題抽出を進 め、本プロジェク トで開発する新構 造材料の技術・研 究戦略を策定す る。			

##### (3)全体計画

###### ① 技術分野分科会活動

接合、非鉄、鉄鋼、CFRP 各分科会を開催し、定期的な各研究分野内での共通課題の抽出、講演会や勉強会を通じた関連情報（技術動向、新技術）の共有および方向性の議論を行う会議等を ISMA 本部が主催し実施する。戦略・基盤分科会では、専門委

員各位の研究アクティビティの紹介や技術ヒアリング等でのアドバイスやサジェッションを通して各委員の専門知識・保有技術を分担研での研究開発に繋げていく。

## ② 技術動向調査

接合技術、個別課題（材料）としての鉄鋼、非鉄（アルミ、チタン、マグネシウム）、複合材料について、自動車等輸送機器に適用されるための技術動向を調査する。調査は、ISMA 組合本部および外部専門機関等へ再委託して行う。特に、金属同士の接合およびその周辺技術に関しては、金属系材料研究開発センターに、欧米での高分子系複合材料、複合材料と金属の異材接合に関わる接着技術以外の要素技術、新規高分子材料等の技術動向については高分子学会に再委託（テーマ 30,31）して調査を行う。

## ③ FS 課題抽出・ステアリング委員会の開催

構造材料用接着技術および中性子線適用化技術について、各研究課題関係者や外部有識者からなる技術調査委員会を開催し、FS 研究の円滑な立上げに繋げる。

表 3-2.9.1a-2 開発スケジュール

事業内容	2013 年度	2014 年度
① 技術分野分科会 1) 接合分科会 2) 鉄鋼分科会 3) 非鉄分科会 4) CFRP 分科会 5) 戦略・基盤分科会	協調課題の抽出、講演会開催等による関連情報共有	→
	協調課題の抽出、講演会開催等による関連情報共有	→
	協調課題の抽出、講演会開催等による関連情報共有	→
	協調課題の抽出、講演会開催等による関連情報共有	→
		技術ヒアリング、講演会等開催
② 技術動向調査 構造材料・接合技術 (研究拠点・大学)		国内外技術動向調査
		→
③ FS 課題抽出・ステアリング委員会開催	課題抽出	中性子等量子ビームを使った 構造材料解析技術に関する調査委員会
	課題抽出	構造材料用接着技術調査委員会
		→

## (4)実施体制

分野分科会は、接合・個別材料分野毎にコーディネーター（CD）を配置し、コーディネーター先導のもと活動を実施した（図 3-2.9.1a-1）。

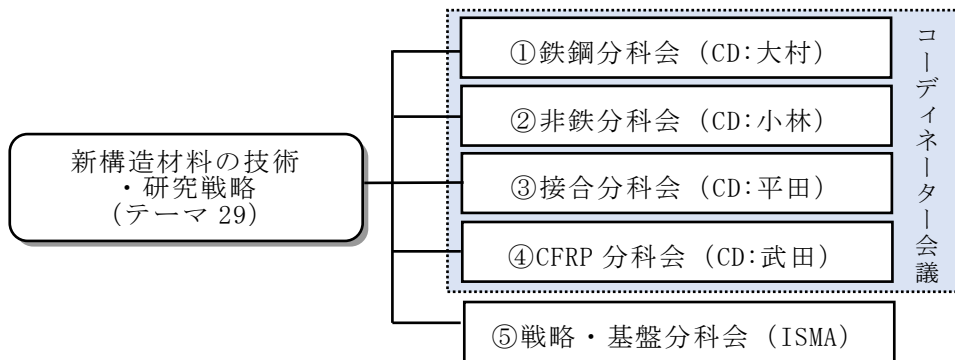


図 3-2.9.1a-1 分野分科会の実施体制

戦略・基盤分科会では、専門委員会を設置し、各構造材料分野の専門家の提言により個別材料の技術戦略指針の策定、実用化に向けた課題の抽出等を行った。

表 3-2.9.1a-3 戦略・基盤専門委員会委員

名前		所属機関	部署	研究課題
榎 学	材料WG	東京大学	大学院工学系研究科 マテリアル工学専攻 教授	「検査・診断技術－プロセスモニタリング／ヘルスマニタリング」
津崎 兼彰	材料WG	九州大学	大学院工学研究科 機械工学部門 教授	「革新的新構造材料－鉄鋼材料」
廣瀬 明夫	材料WG	大阪大学	大学院工学研究科 教授	「革新的新構造材料－接合プロセス」
伊藤吾朗	材料WG	茨城大学	工学部機械工学 教授	「革新的新構造材料－軽量金属材料」
新家光雄	材料WG	東北大学	金属材料研究所 教授	「革新的新構造材料－チタン材料」
北條正樹	材料WG	京都大学	大学院工学研究科 教授	「マルチマテリアル設計－複合構造」
渋谷陽二	構造WG	大阪大学	大学院工学研究科 機械工学専攻 教授	「マルチマテリアル設計－継手構造」
宇都宮 裕	構造WG	大阪大学	大学院工学研究科 教授	「マルチマテリアル設計－塑性加工」
香川 豊	構造WG	東京大学	大学院工学系研究科 教授	「材料と破壊の基礎科学－金属材料」
武田 展雄	構造WG	東京大学	大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 教授	「材料と破壊の基礎科学－複合材料」
横堀 壽光	構造WG	東北大学	大学院工学研究科ナノメカニクス専攻 教授	「材料と破壊の基礎科学－金属材料」
志波 光晴	構造WG	物質・材料研究機構	材料信頼性評価ユニット 非破壊評価グループ グループリーダー	「検査・診断技術－接合部の非破壊評価」
小関 敏彦	材料WG	東京大学	副学長 大学院工学科 マテリアル工学専攻 教授	H26.9より参画
鳥塚 史郎	材料WG	兵庫県立大学	大学院工学研究科物質系工学専攻 教授	H26.9より参画

技術動向調査については、再委託（テーマ 30,31）と併行して主に欧州自動車業界、欧米の関連材料研究開発拠点等について、ISMA 本部において調査を実施した。

FS 課題については、各分野分科会で抽出された協調課題や ISMA 本部での提案による戦略的課題をテーマアップし、適宜 FS 研究の立上げや遂行のためのステアリング委員会を設置し、実施内容の十分な精査を行い、円滑な本研究スタートに繋げていく。鉄鋼分野より構造解析向中性子線利用技術を、接合分野より構造材料用接着技術を FS 課題としてテーマアップし、2015 年度より両テーマを FS 研究としてスタートした。両テーマに関しては、2013、2014 年度において課題の抽出、FS 研究としての立上げを行い、ステアリング委員会を設置した。

表 3-2.9.1a-4、表 3-2.9.1a-5 に 2015 年度各ステアリング委員会委員リストを示す。

表 3-2.9.1a-4 中性子等量子ビームを使った構造材料解析技術に関する調査委員会委員

氏名	所属
大久保 雅隆	(国研)産業技術総合研究所 上席イノベーションコーディネーター
友田 陽	(国研)物質・材料研究機構
池田 進	高エネルギー加速器研究機構 大学・産業連携室
大竹 淑恵	(国研)理化学研究所 光量子工学研究領域 光量子技術基盤開発グループ 中性子ビーム技術開発チーム
大沼 正人	北海道大学 大学院工学研究院
大村 孝仁	(国研)物質・材料研究機構 元素戦略センター 構造材料ユニット
黒田 隆之助	(国研)産業技術総合研究所 軽量標準総合センター 分析計測標準研究部門
櫻井 健次	(国研)物質・材料研究機構 材料研究所 高輝度光解析グループ
篠原 武尚	(国研)日本原子力研究開発機構 J-PARC センター 物質・生命科学ディビジョン中性子セクション
鈴木 淳市	(一財)総合科学研究機構 東海事業センター 利用促進部
関戸 宣彰	(国研)物質・材料研究機構 元素戦略材料センター 構造材料ユニット 強度設計グループ
谷山 明	新日鐵住金(株) 技術開発本部 先端技術研究所
内藤 富士雄	高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 加速器第2研究系
仲道 治郎	JFE スチール(株) スチール研究所
野中 秀彦	(国研)産業技術総合研究所 計量標準総合センター 分析計測標準研究部門
林崎 規託	東京工業大学 原子炉工学研究所
村上 俊夫	(株)神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所 材質制御研究室
渡津 章	(国研)産業技術総合研究所 構造材料研究部門



表 3-2.9.1a-5 構造材料用接着技術検討委員会委員

氏名	所属・役職
佐藤 千明	東京工業大学 精密工学研究所先端材料部門・准教授
西野 孝	神戸大学 大学院工学研究科・教授
岸 肇	兵庫県立大学 大学院工学研究科化学工学専攻・教授
原賀 康介	(株)原賀接着技術コンサルタント・専務取締役
岩田 奈緒子	トヨタ自動車(株) 材料技術開発部・部付
木村 隆嗣	三菱重工業(株) 技術統括本部総合研究所・主席プロジェクト総括
平野 啓之	東レ(株) 複合材料研究所・主任研究員
内藤 昌信	(国研)物質・材料研究機構 元素戦略材料センター構造材料ユニット強度設計グループ・主幹研究員
堀内 伸	(国研)産業技術総合研究所 ナノ材料研究部門電子顕微鏡グループ・上級主任研究員
秋山 陽久	(国研)産業技術総合研究所 機能化学研究部門スマート材料グループ・主任研究員
野中 秀彦	(国研)産業技術総合研究所 計量標準総合センター分析計測標準研究部門・部門長
山本 研一	マツダ(株) 先進車両構造研究部門車体アーキテクチャー・研究アシスタントマネージャー
長谷川 清	(株)本田技術研究所 四輪 R&D センター第9 技術開発室4 ブロック
山岡 弘人	(株)IHI 技術開発本部生産技術センター溶接技術部・部長

### (5)運営管理

技術分野分科会は、鉄鋼分野：物質・材料研究機構大村氏、非鉄分野：産業技術総合研究所小林氏（2015年度からは吉澤氏）、接合分野：大阪大学平田教授、CFRP 分野：東京大学武田教授に各分野コーディネーターを委嘱し、戦略基盤分科会は、ISMA にて取りまとめを行っている。定期的にコーディネーター会議を開催し、プロジェクト全体及び各分野内（間）の課題や研究の方向性についての整理や情報共有を行っている。

戦略・基盤分科会では、専門委員にプロジェクト内での技術ヒアリングや進捗報告等各種報告会において技術的な提言や助言を頂くと共に、各専門委員の研究アクティ

ビティおよび最新の関連技術情報等を分担研での研究開発へ反映すべく、毎月 ISMA 講演会（戦略・基盤技術）を開催して情報提供を行った。

FS 課題については、鉄鋼分野より構造解析向中性子線利用技術を、接合分野より構造材料用接着技術を提案し、2015 年度より両テーマを FS 研究としてスタートした。両テーマに関しては、2016 年度以降実施予定の本研究の実施内容の見極め等円滑な課題設定を図るべく、課題の抽出・立上げから FS 研究の実施に至るまで外部の専門家や実施者からなるステアリング委員会を設置して遂行している。

## 2.9.1a.2 研究開発成果

### (1)最終目標の達成度

表 3-2.9.1a-6 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
①技術分野分科会	構造材料に関する研究開発のビジョンの明確化、接合技術および個別材料の技術戦略指針、実用化に向けた課題抽出を進め、本プロジェクトで開発する新構造材料の技術・研究戦略を策定する。 (2014 年度)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・共通課題として鉄鋼分野における中性子線利用等の先端計測技術、非鉄分野における分析技術・シミュレーション技術、接合分野における異材接合向接着技術等を提案した。</li> <li>・戦略基盤分科会専門委員各位の研究アクティビティの紹介を ISMA 講演会として毎月開催し、情報提供を行った。</li> </ul>	○	
②技術動向調査		モーターショー (@ジュネーブ&パリ)、ダイムラー、BMW、ミュンヘン工科大学、シュツットガルト大学や米国 DOE プロジェクト受託機関等欧米における自動車軽量化技術、特に新規材料開発に係わる研究機関やメーカーを訪問し、最新の情報を収集した。	○	
③FS 課題抽出・ステアリング委員会開催		構造解析向中性子線利用技術および構造材料用接着技術を新規 FS 課題としてテーマアップし、2015 年度より FS 研究としてスタートした。	○	

①技術分野分科会	構造材料に関する研究開発のビジョンの明確化、接合技術および個別材料の技術戦略指針、実用化に向けた課題抽出を進め、本プロジェクトで開発する新構造材料の技術・研究戦略を策定する。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・共通課題として鉄鋼分野における中性子利用等の先端計測技術、非鉄分野における分析技術・シミュレーション技術、接合分野における異材接合向接着技術等を提案した。</li> <li>・戦略基盤分科会専門委員各位の研究アクティビティの紹介を ISMA 講演会として毎月開催し、情報提供を行った。</li> </ul>	○	
----------	---	---	---	--

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

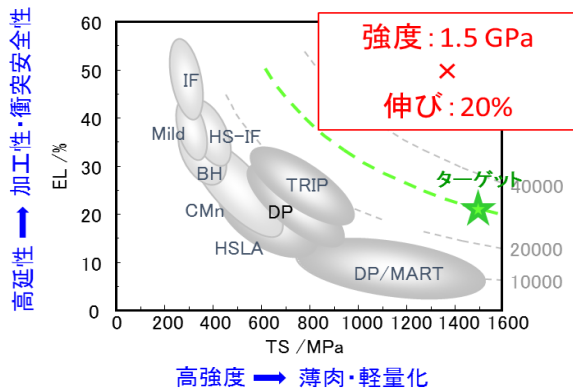
## (2)研究開発の成果と意義

### ①技術分野分科会活動

各分科会において、まずは各分野内で協調して検討が可能な研究課題につき審議を行った。その結果、鉄鋼分科会、接合分科会、非鉄分科会において下記に示す候補課題を抽出した（CFRP 分科会は、2015 年度に協調課題の抽出を行った）。

まず、鉄鋼分科会では、競争領域と協調領域の洗い出しを行い、さらに協調課題の深堀を行い FS として実施すべき技術課題の抽出を行った。中高温域での新たな材料組織挙動に関する定量データの取得がキーポイントであるとの結論を得、そのためのキーテクノロジーとして中性子線を利用した構造解析技術が FS として適切であるとの結論が得られた。

## 自動車用薄鋼板等の強度・靱性バランス向上



鉄鋼材料におけるレアメタル年間消費量の割合  
(2008年 日本金属学会)

### (1) 組織制御技術開発

- ・軽元素の有効利用による粒界強化
- ・ $\gamma$ - $\alpha'$ 複相形態制御による複相化
- ・残留 $\gamma$ 中炭素量の高度制御による強靱化

#### 競争課題

### (2) 機構解明技術開発

- ・高温プロセス中その場組織観察
- ・変形中その場組織観察
- ・軽元素の濃度分析精度向上

#### 協調課題

図 3-2.9.1a-2 協調課題の抽出 (鉄鋼分科会)

接合分科会では、マルチマテリアル化においてキーとなる異材接合への対応として、特に被接合材が CFRP の場合に有効と考えられる接着技術を協調課題としてテーマアップした。

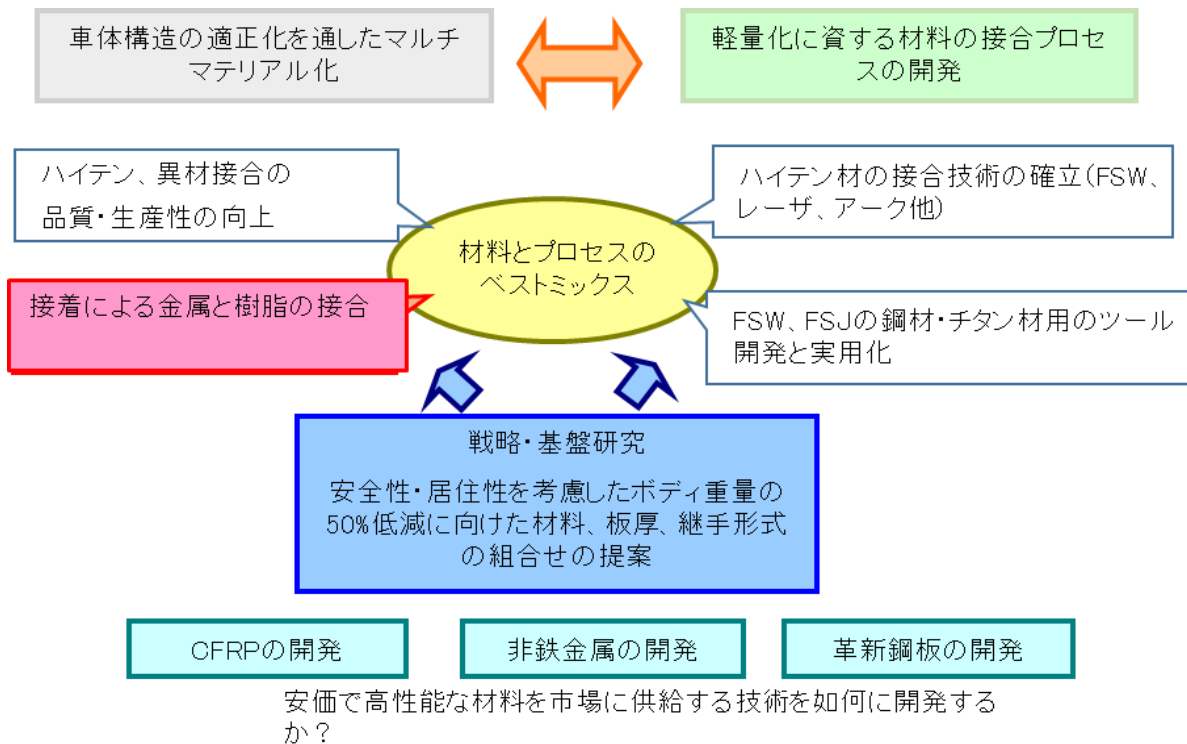


図 3-2.9.1a-3 協調課題の抽出 (接合分科会)

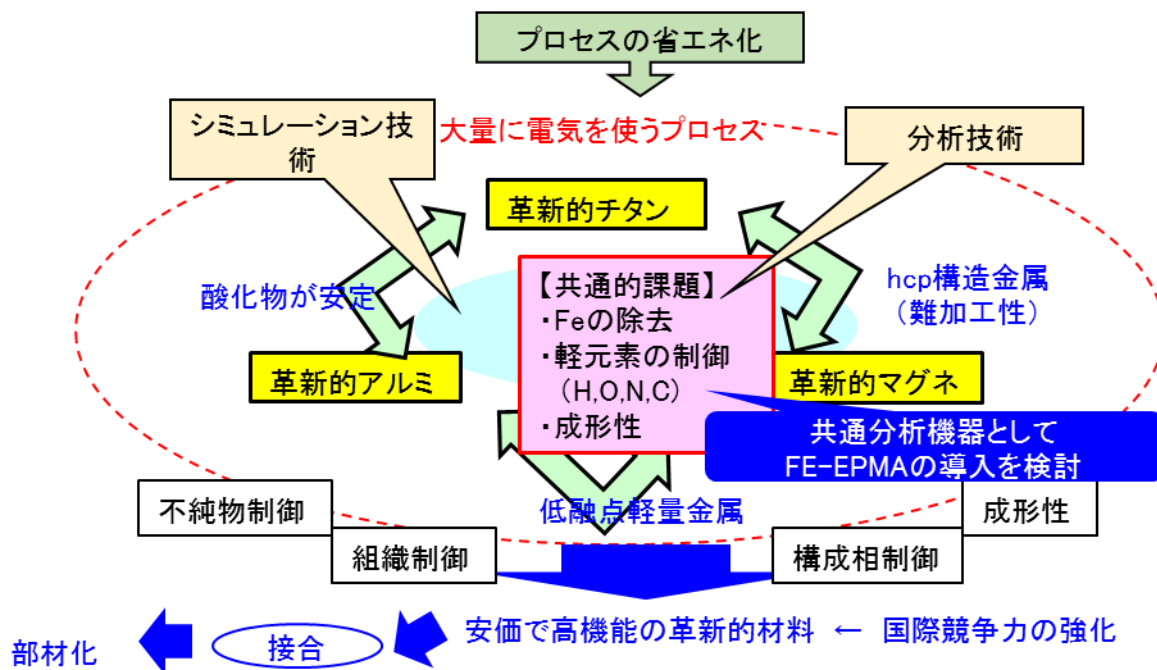


図 3-2.9.1a-4 協調課題の抽出（非鉄分科会）

非鉄分科会では、チタン、マグネシウム、アルミニウム各材料において低コスト成形プロセスを確立する上での共通的な課題として、1) 不純物（Fe）の除去、2) 軽元素（H,O,N,C）の制御、3) 成形性の改善が抽出された。これらの課題に協調して取り組む手段としてまずは、FE-EPMA 等による分析技術を確立していくことが必要であるとの結論を得た。

以上各分科会での審議により、技術分野毎に協調課題の抽出が行われた。この検討結果を基に後述するように新たに FS 研究としての課題を抽出することとした。

戦略・基盤分科会では、各専門委員の研究アクティビティや最新の関連技術情報を紹介する ISMA 講演会（戦略・基盤研究）を開催している（平成 26 年度から毎月開催）。講演会では、技術情報の深堀と分担研での研究開発の課題解決の足がかりとすべく、講演者である専門委員と参加者（組合関係者）との議論の時間を十分に取ながら進めた。

表 3-2.9.1a-7 ISMA 講演会（戦略・基盤研究）

	講演者	所属	演題
1	武田 展雄	東京大学大学院新領域創成科学研究科	革新複合材構造の知的生産科学の構築に向けて
2	志波 光晴	物質・材料研究機構非破壊評価グループ	非破壊材料信頼性評価
3	津崎 兼彰	九州大学大学院工学研究院機械工学部門	高 Mn オーステナイト鋼の機械的特性：引張強さ・疲労・水素脆化
4	廣瀬 明夫	大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻生産科学コース	鋼と軽合金の異材接合
5	鳥塚 史郎	兵庫県立大学大学院工学研究科	1500MPa-20%の可能性を予感させる 5Mn 微細ヘテロ組織鋼
6	榎 学	東京大学大学院工学系研究科マテリアル工学専攻	先進 AE 手法によるマテリアルプロセスモニタリング

②技術動向調査

外部機関への委託調査以外に ISMA 本部にて独自に技術動向調査を行っている。国内外の自動車メーカー、欧米の公的研究機関およびナショナルプロジェクト実施機関を主な調査対象（キーワード：自動車、軽量化、材料開発）とし、ベンチマーキングをする上で今後定常的な情報収集が必要となる地域、機関を特定していく予定である。図 3-2.9.1a-5、図 3-2.9.1a-6、図 3-2.9.1a-7 にトピックスを示す。

**「自動車用車体のマルチマテリアル化技術動向調査～欧州自動車業界調査～」**

1. 調査の内容

(1) 欧州自動車メーカーの製品開発の方向性

(2) 将来の材料・製造技術に対するシーズ技術に関する調査

対象となる技術・材料分野は、

i 「自動車メーカーによるマルチマテリアル化車体技術の現状」  
 (鋼材/鋼材、鋼材/Al材、鋼材/Mg材、鋼材/CFRP等、AL材/CFRP等)

ii マルチマテリアル車体構造の開発方向

iii マルチマテリアル/モジュール化車体の製造技術

2. 今回の欧州訪問で対象とする団体や学会  
 自動車会社(Daimler AG, BMW Group)および関連技術博物館

① 材料技術(シュツガルト大学、ミュンヘン工科大学)

② バイエルン州のプロジェクト(MA.I Carbon)の調査

3. 調査のアウトプット

欧州での自動車マルチマテリアル化の技術開発の方向性を確認し、2020年燃費規制に実装されるべく、自動車車体の軽量化に最も有効と考えられる軽量構造材料の部品適用技術(素材技術、異種材料適用技術、構造設計技術、成形加工技術)のレベルを把握して行く。

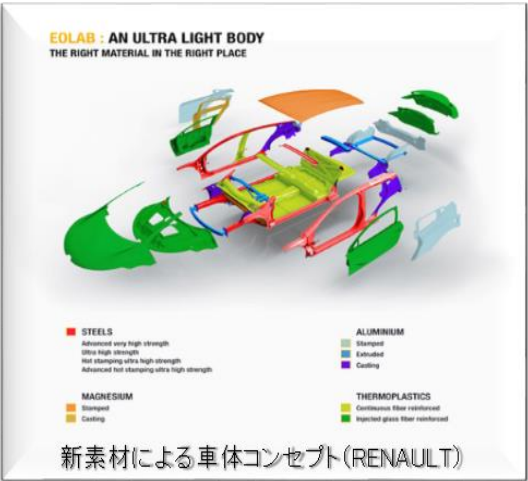
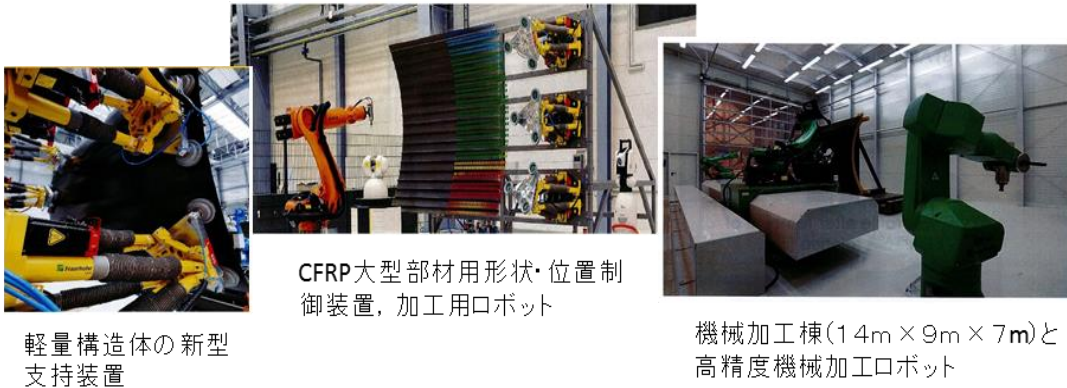


図 3-2.9.1a-5 技術動向調査（欧州自動車業界）

### ドイツフラウンホーファー研究機構IFMA訪問

#### 『StadeフラウンホーファーIFAMの概要』

- Stade市のR&Dセンターの中には有名なDLR(ドイツ航空宇宙研究所)があり、近くには欧州最大の航空機メーカーのエアバスの工場と研究施設、化学大手のDAWケミカルの工場などがあり、また直ぐ隣には私立の工業大学もあり、これらの企業や大学とうまく協力しながら研究開発を進めているとのことであった。
- Dr.Niermannが現在行っている航空機用の構造材料の自動化と製造技術に関する研究は、正式には2014年からスタートしている。CFRP製機体の加工・組立て工程を完全に自動化することを目的にしており、そのため飛行場の格納庫に近い巨大な建物とその中に実物大の機体がすっぽり入る規模の組み立てユニットが設置されていた(写真参照)。
- この完全自動化が実現すれば、飛躍的なコストダウン(工期短縮)が可能になるとのことであり、Dr.Niermannはかなりの自信を持って研究開発を進めていた。



軽量構造体の新型支持装置

CFRP大型部材用形状・位置制御装置, 加工用ロボット

機械加工棟(14m×9m×7m)と高精度機械加工ロボット

図 3-2.9.1a-6 技術動向調査 (欧州研究機関)

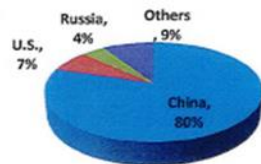
### 米国DOE自動車軽量化プロジェクト(各材料の目標達成時の軽量化率と残存課題)

#### Magnesium Alloys

When it "works" → 40-70% weight reduction

Otherwise → Cost (~\$3-10/lb-saved)

- Lack of domestic supply, unstable pricing
- Challenging corrosion behavior
- Inadequate strength, stiffness, and ductility
- Difficult to model deformation behavior



#### Aluminum Alloys

When it "works" → 25-55% weight reduction

Otherwise → Cost (~\$2-8/lb-saved)

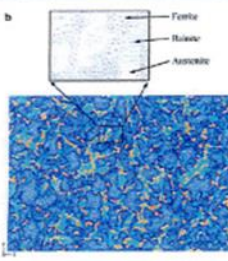
- Insufficient strength in conventional automotive alloys
- Limited room temperature formability in conventional automotive alloys
- Difficult to join/integrate to incumbent steel structures



#### Advanced High Strength Steel

15-25% weight reduction →

- Inadequate structure/properties understanding to propose steels with 3GAHSS properties
- Insufficient post-processing technology/understanding
- What other relevant properties should be considered? Hydrogen embrittlement, local fracture, etc.



Choi et. al., Acta Mat. 57 (2009) 2562-2504

#### Carbon Fiber Composites

When it "works" → 30-65% weight reduction

Otherwise → Cost (~\$5-15/lb-saved)

- High cost of carbon fiber (processing, input material)
- Joining techniques not easily implemented for vehicles
- Difficult to efficiently model across many relevant length scales



図 3-2.9.1a-7 技術動向調査 (米国 DOE プロジェクト)

③FS 課題抽出・ステアリング委員会開催

上記(3)．①技術分野分科会活動において協調課題の抽出を行い、その中から課題の喫緊性、分野間への展開可能性等を鑑みて、2015年度より中性子線利用技術（鉄鋼）と接着技術（接合）をFS研究としてスタートすることとした。課題の概要を図3-2.9.1a-8、図3-2.9.1a-9に示す。

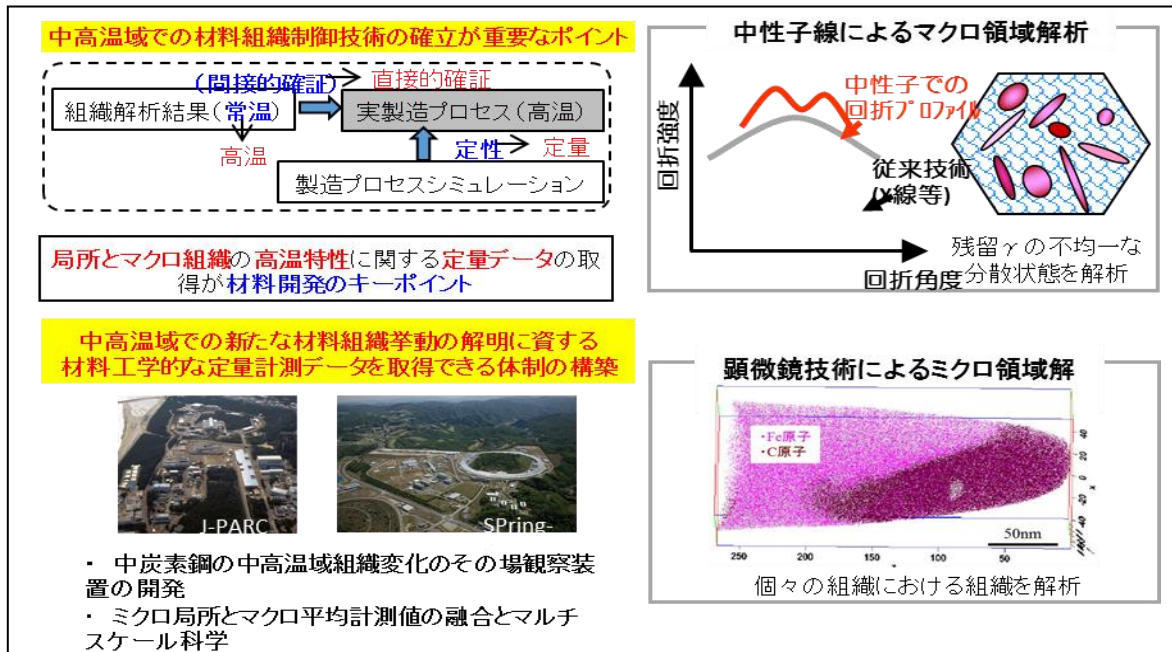


図 3-2.9.1a-8 電子線・中性子線等の活用によるマクロ・ミクロ組織定量化



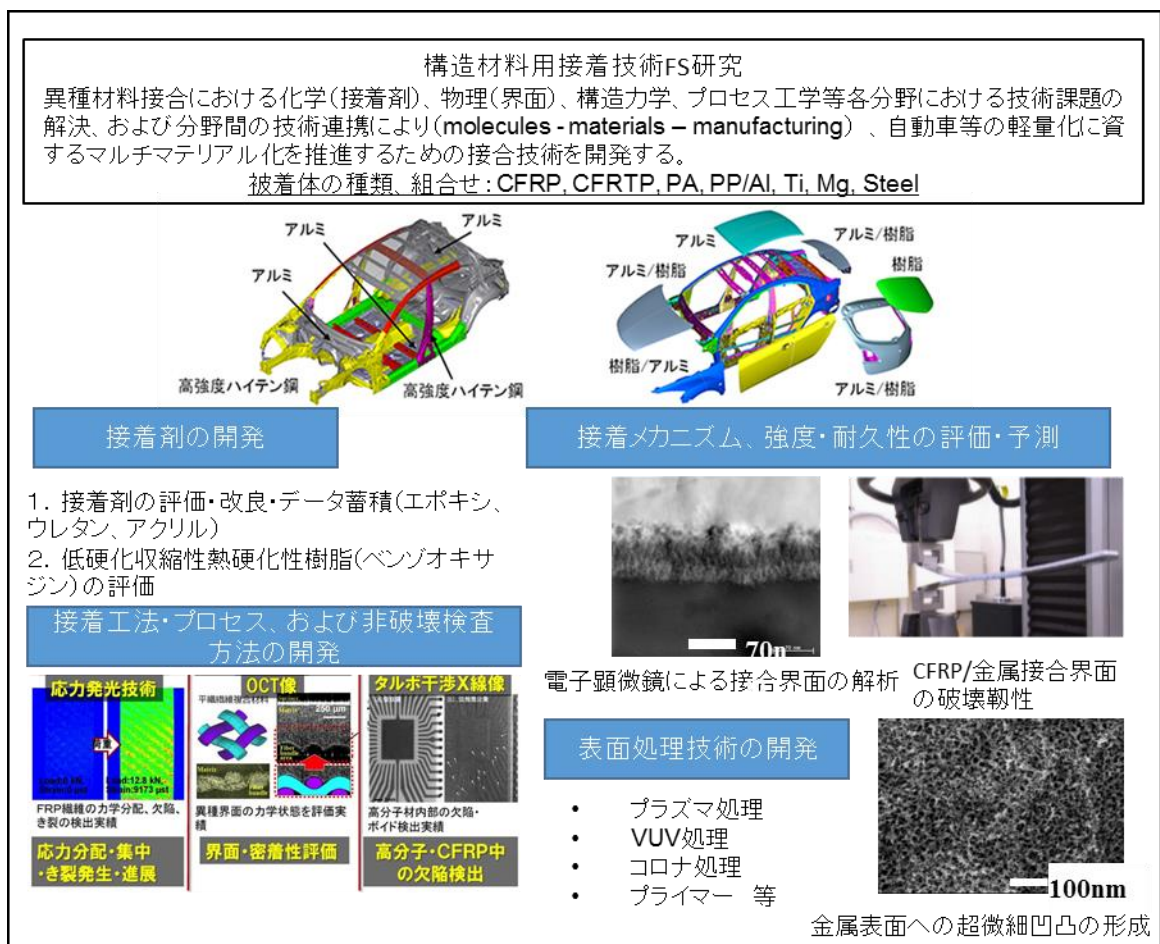


図 3-2.9.1a-9 構造材料用接着技術

これら FS 研究は、2015 年度に研究課題を絞り込み、2016 年度以降予定している本研究に向けた実施内容の提案を行う。また、前記ステアリング委員会を設置し、研究進捗の確認、市場ニーズとの整合性、海外技術動向調査によるベンチマーキング等を通して本研究に向けた課題の絞り込みの精査を行う。

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.1a-8 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会への出展	受賞	フォーラム等*
	査読付き	その他	学会発表・講演	新聞・雑誌等への掲載	プレス発表	その他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	1

\*実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.1a-9 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9.1a.3 参考文献

なし。

## 2.9.1b [テーマ番号 3 0] 「技術動向調査分析」(2014 年度)

### 2.9.1b.1 テーマの概要

#### (1)背景と目的

##### 【2013、2014 年度】

革新的新構造材料等研究開発に係る接合技術や構造材料の技術開発の現状および今後の動向について調査・分析を行い、関連技術開発の最新の状況を把握すると共に、今後の方向性を分析し、本プロジェクトの研究開発成果の適用先探索や今後取るべき方針や戦略の構築に有益な情報を提供することを目的とした。

##### 【2015 年度】

革新的新構造材料等研究開発に関する技術分野の中で「金属材料の接合技術および周辺領域」を中心に重要技術課題に関する詳細な調査を実施し、関連技術の最新状況を把握すると共に、今後の方向性を分析し、本プロジェクトの研究開発成果の適用先探索や今後取るべき方針や戦略の構築に有益な提言を行うことを目的とした。

#### (2)目標値

表 3-2.9.1b-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第 1 中間目標 (2015 年度末)	第 2 中間目標 (2017 年度末)	第 3 中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)
技術動向調査	金属同士の接合技術の第二中間目標達成に関する提言			

#### (3)全体計画

2013 年度は、調査分野を下記 4 分野として実施した。

A：接合技術(金属材料同士)

B：接合技術(金属材料／CFRP)

C：CFRP(特に自動車用、熱可塑性)

D：金属材料(鉄鋼、チタン、アルミ、マグネシウム)

2014 年度は、上記 A、B、C の 3 分野について、2013 年度に実施した上記の広範囲な調査結果に基づいて抽出された重要技術に関して、その内容の詳細を調査すると共に、実用化の進行状況と課題について明らかにする。また、2013 年度において調査した内容について、調査対象期間に関して直近 1 年間を追加して最新情報の調査を実施した。また、一部特定課題についても調査を実施した。

2015 年度は革新的新構造材料等研究開発事業における「金属材料の接合技術および周辺領域」に関する技術課題の調査を実施する。金属材料同士の接合技術とその構成材料等の周辺技術を対象を絞り、2014 年度に実施した重要課題に関する詳細な調査結果をベースに、本プロジェクト内外の研究機関やメーカーの専門家から技術開発と実

用化の状況に関する意見聴取を行い、当該分野の今後の技術開発の方向性に関するまとめと提言を行う。

#### (4)実施体制

本テーマは新構造材料技術研究組合（本部）が 1 機関に必要な研究開発を再委託して実施した。

#### (5)運営管理

3ヶ月程度毎に ISMA、NEDO、METI への進捗報告を行い、討議を実施した。

#### (6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度）

入手した技術情報を整理すると共に、進捗報告と提言により ISMA 技術企画部他への結果のフィードバックを行い、研究開発の方向性の確認や見直しに活用された。

### 2.9.1b.2 研究開発成果

#### (1)最終目標の達成度

表 3-2.9.1b-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成度※	未達の場合 原因と解決方針
技術動向調査分析	金属材料同士の接合技術および周辺技術の調査と技術開発の方向性・戦略に関する提言 (第二中間目標達成に関する提言) (2014年度)	金属材料同士の接合技術、金属材料/CFRP、CFRP材料(熱可塑性)について重要課題を抽出すると共に技術開発のベンチマークを実施。 (2013,2014年度)	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、X未達

#### (2)研究開発の成果と意義

##### ①技術調査対象分野と調査方法

技術動向調査は 2013 年度と 2014 年度は、表 3-2.9.1b-3 に示す分野およびテーマについて実施した。また、調査方法としては、表 3-2.9.1b-4 に示すように特許・文献による調査に加え、学協会・講演会等への参加や国内関係先へのヒアリング等により調査を実施した。

表 3-2.9.1b-3 技術調査分野とテーマ

分野・テーマ	H25年度	H26年度
1. 接合技術(金属材料同士)	◎	◎
2. 接合技術(金属材料/CFRP材料)	◎	◎
3. CFRP材料(特に自動車用、熱可塑性)	◎	◎
4. 構造用金属材料(鋼板、チタン、アルミニウム、マグネシウム)	◎	
「軽量化を目的とした自動車のマルチマテリアル化の現状」		◎

表 3-2.9.1b-4 技術調査方法

1. 特許調査:用途、対象期間を特定して他の調査と重複を回避
2. 文献調査:重要課題抽出→技術レベルのベンチマークを実施
3. 学協会関係の調査(関連学協会のロードマップ調査含む)
4. 専門家へのヒアリング

以下、金属材料同士の接合技術、金属材料／CFRP 材料の接合技術および CFRP 材料(熱可塑性、自動車用途)、構造金属材料分野について、成果の概要を記述する。

## ②金属材料同士の接合技術

金属-金属接合としては、従来から多くの種類の接合方法が存在するが、本プロジェクトがターゲットとしている自動車の軽量化の目的においては、特に高強度・高性能材料の接合および異材接合時の接合継手強度の確保が極めて重要となる。この2つの目的に合致する接合方法としては、接合時に溶融部が生成しない固相接合法が適している。固相接合法として近年特に注目されているのが摩擦攪拌接合（FSW：Friction Stir Welding）である。また、最近では FSW の点接合技術に応用させた FSSW や表面改質プロセスに応用させた FSP についても注目されている。

FSW は英国の TWI において発明された技術であり、Al 合金や Mg 合金等に関して、既に電車車両や自動車用途において実用化が達成され、工業的にも確立された技術となっている。また、FSW は日本国内で権利化されていた TWI の基本特許 2 件が 2015 年 1 月に有効期間満了となり、その点からも今後発展が加速する可能性がある。

一方の鉄鋼材料やチタン合金のような高融点金属やそれとの異材接合に関しては、未だ工業的には技術が確立されていない。図 3-2.9.1b-1 に調査結果から得られたハイテン材同士およびハイテン/Al 合金の FSW 継手の引張強さを示す。ハイテン同士の接合技術に関しては、研究開発段階のデータではあるが、980MPa 級までは母材と同等の継手強度が得られているが、それ以上の強度になると母材強度を下回っている。また、ハイテンと Al 合金の接合においても Al 合金が高強度である 6000 系等の Al 合金の場合には母材と同等の強度は得られていない。

また、高融点金属の FSW 技術の確立においては、低コストで耐久性に優れたツール用材料の開発が重要な鍵を握っている。FSW に関する今後の重要な課題として、次の 3 点が挙げられ、これらの課題は同時に本プロジェクトの中でも積極的に取り上げて開発すべき課題である。

- 高強度材接合や異材接合における強度不足、
- ツール材料の耐久性向上と低コスト化
- ツール寿命評価手法確立と寿命支配因子解明

2015 年度における技術調査は「金属材料同士の接合技術およびその周辺技術」を中心に実施しており、FSW については上記の課題に関係する研究および技術開発の現状と課題克服の可能性について検討する予定である。一方、FSW 以外にも MAG 溶接やレーザー溶接等の従来からある各種接合技術についても、本プロジェクトの用途に係わる分野への適用に関する開発状況についても併せて調査を進めている。

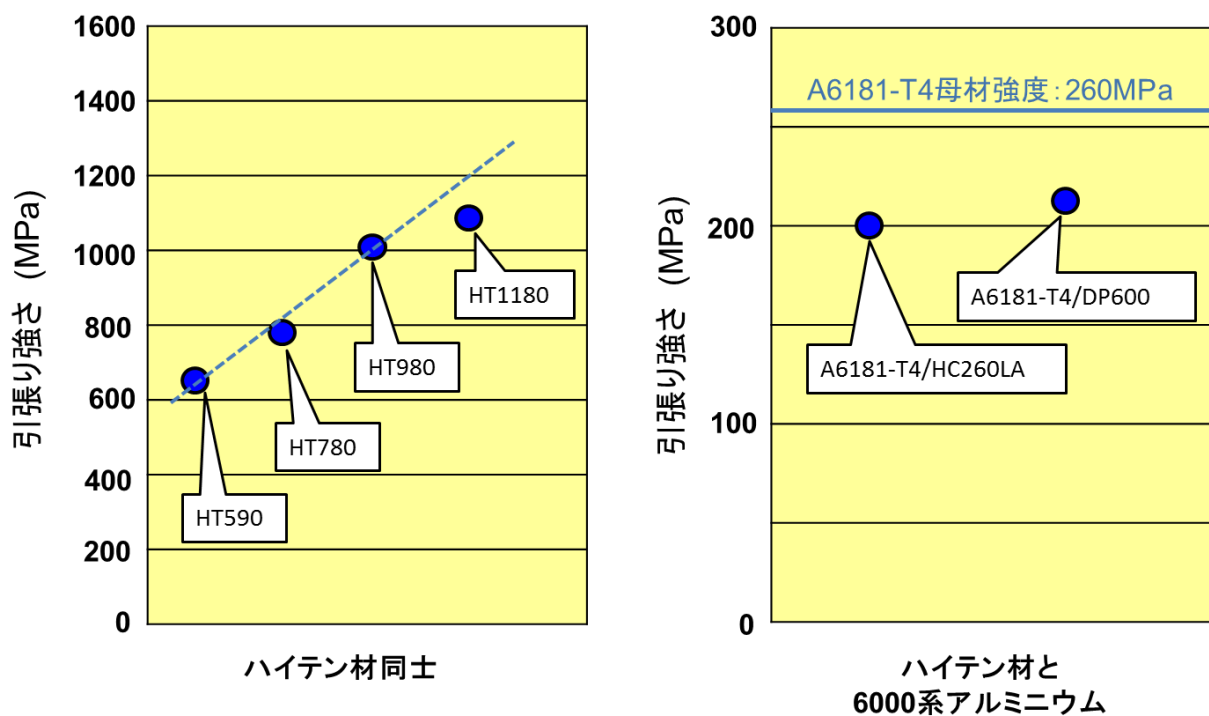


図 3-2.9.1b-1 ハイテン材同士およびハイテン/Al 合金の FSW 継手の引張強さ

### ③金属／CFRP 材料の接合技術

金属／CFRP 材料の接合に関する将来技術としては、「高信頼性接着」および「熱影響の小さい溶着技術」が挙げられる。接着・溶着いずれも金属と樹脂（接着剤、インサート材含む）の界面の結合形態が重要となる。一般に通常の接着・溶着は分子間力結合であるが、結合力は小さい。これに対し、界面に凹凸を付与しアンカー効果によって結合力を向上させる方法と、極性基を付与して化学的に結合力を向上させる方法が挙げられる。それぞれの結合形態と得られる接合強度（せん断破断力）との関係を図 3-2.9.1b-2 に示す。

アンカー効果を利用した接合が最も高い接合強度が得られている。これに対し、化

学的結合では極性基を付与することにより接着剤もしくはインサート材そのものの強度がネックとなり、接合強度は低くなっていると考えられる。

アンカー効果のための凹凸面付与方法として、高生産性・低コストであるレーザーによるエッチング法（ダイセル）が最新技術として注目される。レーザー等を用いた「熱影響の小さい溶着」とアンカー効果との組み合わせが一つの有力な手段になると考えられる。

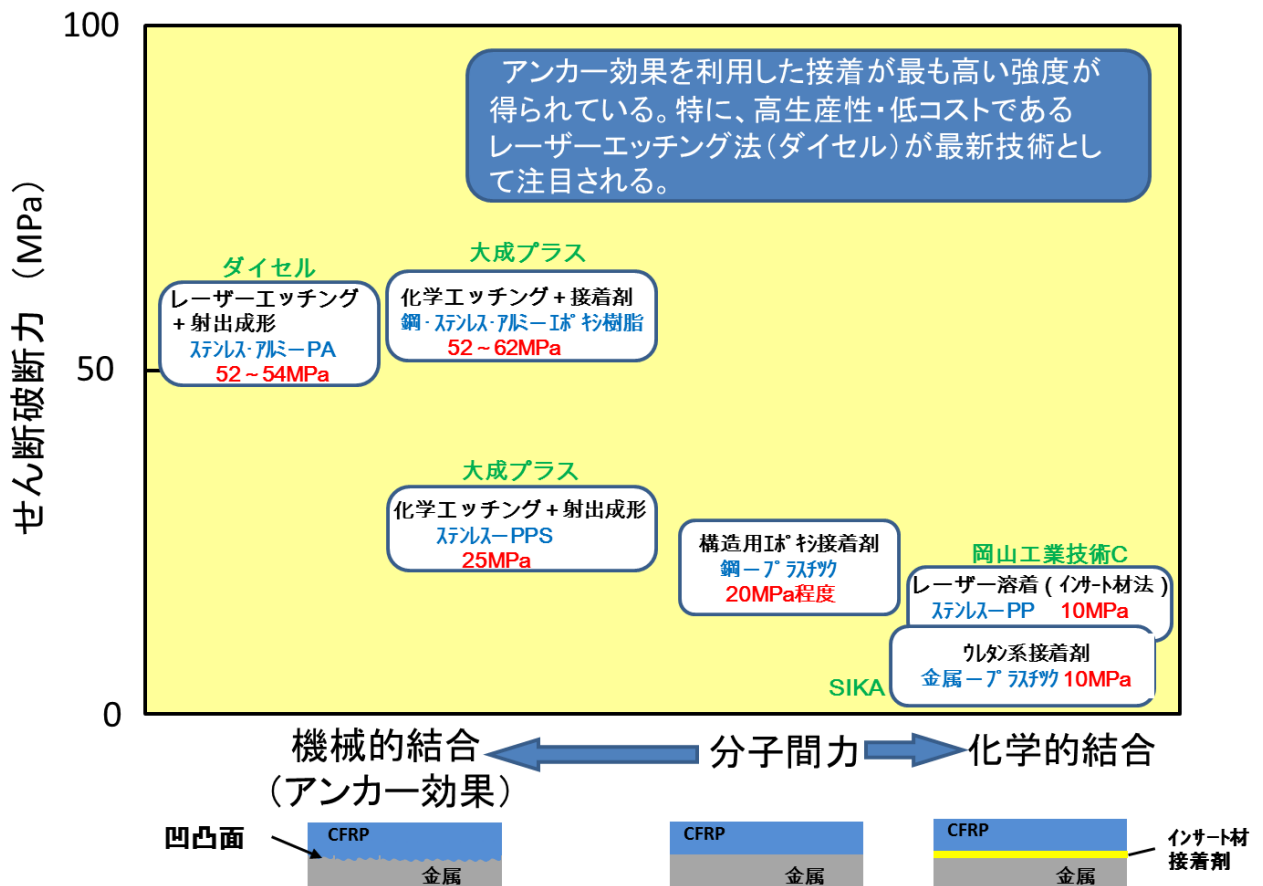


図 3-2.9.1b-2 金属/樹脂(接着剤・インサート材含む)界面の結合形態とせん断破断力

#### ④CFRP 材料(熱可塑性、自動車用途)

熱可塑性 CFRP (CFRTP) に関する調査の主な内容は、「成形時間と CFRTP の強度 (引張強度主体)」であり、両者の関係を図 3-2.9.1b-3 に示す。

一般に LFT-D 成形法や DRP 成形法は不連続繊維 (短繊維・長繊維) を使用し Vf が 30%程度であるため、CFRTP の引張強度は高くはない。一方、isP-RTM 成形法は、連続繊維を使用するため、引張強度は高い。成形時間では、LFT-D 成形法は短時間成形が可能である。また、isP-RTM 成形法は低粘度のモノマー (熱可塑性樹脂粘度の 1/1000 程度) を重合させて使用するため、1 分程度の成形が可能である。

短時間成形かつ高強度品を得るためには、連続繊維を使用し Vf を高め、かつ熱可塑性樹脂の低粘度化が必要である。特に樹脂の低粘度化が重要であるが、国内では新

規樹脂の研究開発を実施しているところはなく、この観点からすれば低粘度のモノマーを使用する isP-RTM 成形法は有望な技術の一つであると考えられる。

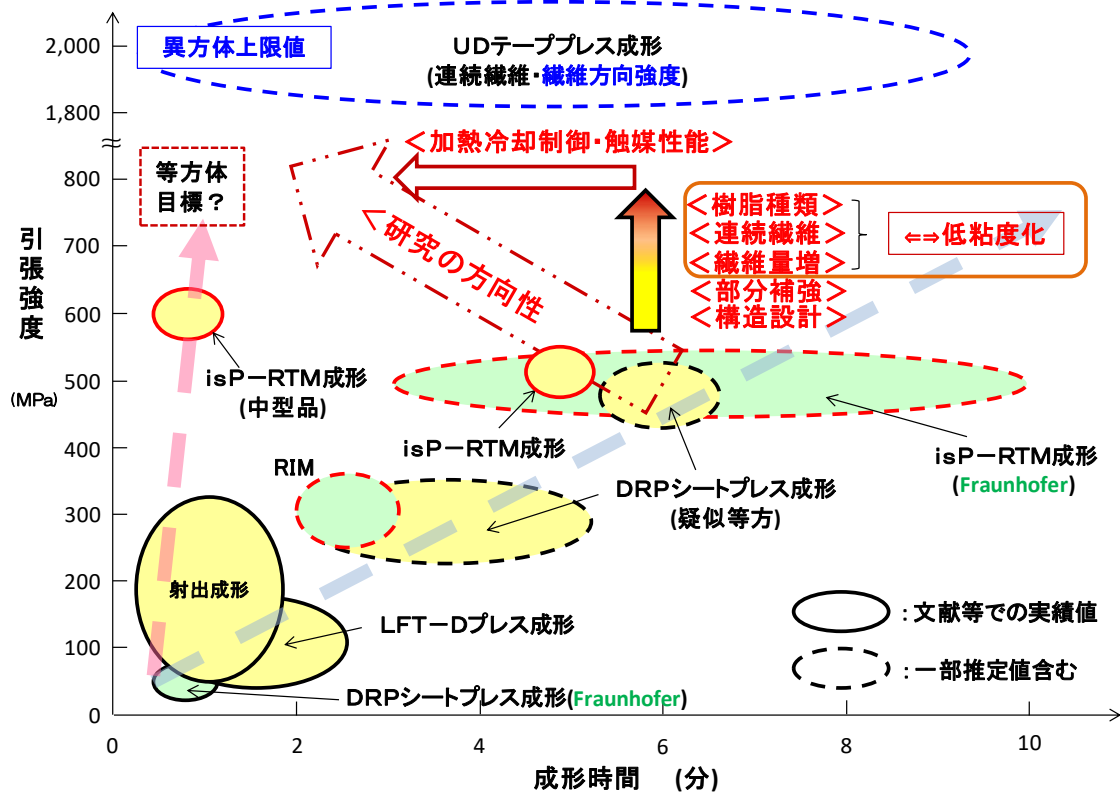


図 3-2.9.1b-3 熱可塑性 CFRP の各種成形方法の成形時間と引張強度との関係

### ⑤構造用金属材料

本事業の対象構造用金属材料である鉄鋼、チタン合金、アルミニウム合金およびマグネシウム合金について調査を実施した。高張力鋼開発においては、日本はドイツや韓国とは異なり、中 Mn 鋼ベースの開発に移行している。チタン合金は、コスト低減のためのプロセス開発が最優先課題である。アルミニウム合金はコスト低減と接合技術開発が自動車分野では重要課題になっている。また、マグネシウム合金は、自動車分野においては車体よりもエンジン向けの開発が主流となっており、成形性の改善が大きな課題である。



(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.1b-5 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2013FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	2	0	0	1
合計	0	0	0	0	0	3	0	0	1

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.1b-6 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9.1b.3 参考文献

なし。

## 2.9.1c [テーマ番号 3 1] 「高分子複合材料技術開発動向調査」(2014 年度)

### 2.9.1c.1 テーマの概要

#### (1)背景と目的

軽量・高強度を実現する革新構造材料として、炭素繊維強化の高分子複合材料には大きな期待が寄せられ、精力的な研究開発が行われている。しかしながら、極めて高い性能が要求される自動車用途では、未だ金属材料等の代替は一部に限られている。そして、次世代を担う高分子複合材料の本格的活用には、高性能マトリックス樹脂、フィラー素材・分散化プロセス、異種材料接合制御、複合材料の評価技術などの研究開発が不可欠である。高分子学会では、実用化に向けた高分子複合材料技術開発を動向調査に関して、熱可塑性樹脂、異種材料接合技術、新規技術（樹脂ガラスやセルロースナノファイバーなど）、および、海外技術動向を主体に調査を実施し、現在の課題を明確にし、本格的な研究開発に向けた戦略方針を得ることを目的とする。

#### (2)目標値

表 3-2.9.1c-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第 1 中間目標 (2015 年度末)	第 2 中間目標 (2017 年度末)	第 3 中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)
熱可塑性樹脂複合材料に関する調査	マトリックス材料としての最近の動向および課題抽出			
炭素繊維および新規フィラーに関する調査	CF 表面処理剤の動向および課題抽出およびセルロースナノファイバーの動向調査			
異種材料接合に関する調査	CFRP と金属などの接合技術に関する調査を実施し、マルチマテリアル化の技術動向を調査			

#### (3)全体計画

2013 年度 CFRP の構造評価技術およびバイオフィラーの調査

2014 年度 CFRTP に着目した技術動向および特許調査、海外動向調査

#### (4)実施体制

本テーマは新構造材料技術研究組合（本部）が1機関に必要な研究開発を再委託して実施した。

#### (5)運営管理

高分子複合材料技術開発動向調査委員会（委員長 西野孝）では、本調査領域の専門家（大学および企業）を委嘱し、調査内容の信頼性を主として検討する。また、本調査領域に関係するテーマを研究会において設定し、有識者の講演や個別面談において情報収集することで調査内容に反映させる体制で実施する。調査全般に関しては、業務管理者が調査活動を把握・指導し、また、技術情報を集約し報告書としてまとめる。

#### (6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度）

本技術動向調査により自動車用途へのCFRPの展開の可能性について現状認識と共に課題抽出を行い、国内の関連プロジェクトへの情報提供は価値が高い。

### 2.9.1c.2 研究開発成果

#### (1)最終目標の達成度

表 3-2.9.1c-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
熱可塑性樹脂複合材料に関する調査	マトリックス材料としての最近の動向および課題抽出 (2014年度)	CFRTPの自動車用途展開について可能性と課題を集約した。	○	
炭素繊維および新規フィラーに関する調査	CF表面処理剤の動向および課題抽出およびセルロースナノファイバーの動向調査 (2014年度)	熱可塑性樹脂をマトリックスにした際のCF表面処理の必要性、および、セルロースナノファイバーの開発状況を集約	○	
異種材料接合に関する調査	CFRPと金属などの接合技術に関する調査を実施し、マルチマテリアル化の技術動向を調査 (2014年度)	接着剤を使用しない接合技術の初期調査を実施した	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

## (2)研究開発の成果と意義

CFRPの自動車用途展開の現状を認識することは、CFRPの開発のみならず競合する鋼板などの技術開発においても必須である。本調査では、研究段階から実用化の技術まで幅広く情報を収集すると共に、競争が激しいこの領域での公開された特許を解析することによりメーカーの技術開発状況を把握するものである。また、複合材料や自動車の展示会を通じて、国内外の情報を集約し合わせるにより、自動車の軽量化に関連する研究開発戦略および事業戦略に資することが可能となる。具体的には、2014年度までの調査の成果概要を下記に示す。

熱可塑性樹脂を用いたCFRTPでは、機械的性質、成形性等に加え、コストの観点から、ポリプロピレンおよびナイロン6が一般的に用いられている。ポリプロピレンの場合、分子内に極性基を有しないため、炭素繊維表面との共有結合や水素結合を作ることができず接着界面が課題となる。そこで、炭素繊維に付与するサイジング剤の開発や変性ポリオレフィン樹脂の開発が行われている。一方、自動車用CFRTPの成形プロセスでは、熱可塑性樹脂の特徴を活かしてプレス成型が適用でき、熱硬化性樹脂のようにオートクレーブなどが不要。プレス成型する炭素繊維の基材の形態は、積層板、プリプレグなどである。積層板は、炭素繊維と樹脂を重ね合わせ、高温でプレスして平板状にした材料である。プリプレグとしては、炭素繊維を一方向

(UniDirection)に揃えた繊維を揃えて樹脂を含浸させたUDテープや平織や綾織の織物に樹脂を完全に含浸したシートが用いられている。また、短繊維と樹脂を含浸させ、短繊維の方向をランダムにしたシートもある。他方、熱硬化型でも加工技術の開発も行われ、三菱レイヨンでは、チャレンジ社が開発した量産成形技術であるPCM法を導入している。

一方、熱可塑性複合材料では、従来のボルトやカシメを用いたリベット締めなどの機械的接合の代替技術として、レーザー直接接合、超音波溶着、摩擦攪拌接合などの技術が着目されている。さらに、自動車の窓ガラスを代替する樹脂グレージングは、ガラスに比べて重量を軽減できるメリットがあると共に、耐衝撃特性が高く、自由度の高いデザインを射出成形によって実現できる特徴を有している。現在、ポリカーボネートが主として使用され、SABICや帝人が市場展開を行っている。

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.1c-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	1

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.1c-4 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9.1c.3 参考文献

なし。

## 2.9.1d [テーマ番号 3 2] 「共通基盤技術の研究調査」(2014 年度)

### 2.9.1d.1 テーマの概要

#### (1)背景と目的

自動車や航空機などに今後中長期的に求められる構造材料等の在り方を展望した上で、接合技術及び個別材料技術の研究開発の方向性や目標、新たな研究開発分野などを設定する。接合、非鉄、鉄鋼、CFRP 各分野の専門家により共通基盤技術となる課題の先導研究を実施し、プロジェクト現行テーマへの適用および新規テーマの創出を図る。また、元素戦略・SIP 等関連プロジェクトとの連携を図り、研究開発の活性化・効率化を図る。

#### (2)目標値

接合、非鉄、鉄鋼、CFRP 各分野の専門家により共通基盤技術となる課題の先導研究を実施し、プロジェクト現行テーマへの適用および新規テーマの創出を図る。また、元素戦略・SIP 等関連プロジェクトとの連携を図り、研究開発の活性化・効率化を図る。

表 3-2.9.1d-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第 1 中間目標 (2015 年度末)	第 2 中間目標 (2017 年度末)	第 3 中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)
共通基盤技術の研究 調査	構造材料に関する研究開発のビジョンの明確化、接合技術および個別材料の技術戦略指針の提言、実用化に向けた課題の抽出等を進め、本プロジェクトで開発する新構造材料の技術・研究戦略を策定する。			

#### (3)全体計画

接合、非鉄、鉄鋼、CFRP 各分野の専門家により共通基盤技術となる課題の先導研究を実施し、プロジェクト現行テーマへの適用および新規テーマの創出を図る。具体的には、研究開発項目を、1) 革新的新構造材料、2) マルチマテリアル設計、3) 材料と破壊の基礎科学、4) 検査・診断技術 に細分化し、プロジェクト推進テーマ(分担研)との連携を明確にすると共に、分野横断的なテーマの創出を図る。

#### (4)実施体制

表 3-2.9.1d-2 および図 3-2.9.1d-1 に研究テーマ概要およびプロジェクト推進テーマとの関連性を示す。図 3-2.9.1d-1 において関連付けを示す太い矢印は、単一分野に関連したもの、細い矢印は、幾つかの分野に跨って関連付けられることを示す。

表 3-2.9.1d-2 研究テーマ概要

研究開発項目		テーマ概要	担当
材料WG	①検査・診断技術 -プロセスモニタリング/ヘルスマニタリング	信頼性確保のための新規プロセスモニタリング技術の開発	榎学 (東京大学)
	②革新的新構造材料 -鉄鋼材料	疲労強度と延性・韌性に優れた高強度TWIP鋼の開発	津崎兼彰 (九州大学)
	③革新的新構造材料 -アルミ合金材料	7000系、2000系Al合金の疲労特性に関する基礎的研究	伊藤吾朗 (茨城大学)
	④革新的新構造材料 -チタン材料	金属粉末射出成形法を用いたTi-Mn系高強度チタン合金の開発	新家光雄 (東北大学)
	⑤革新的新構造材料 -接合プロセス	異材接合継手の強度発現機構の基礎的研究	廣瀬明夫 (大阪大学)
	⑥マルチマテリアル設計 -複合構造	CFRP系複合材料の積層微視構造が構造要素の強度に及ぼす影響の研究	北條正樹 (京都大学)
研究開発項目		テーマ概要	担当
構造WG	①マルチマテリアル設計 -継手構造	マルチマテリアル化における軽量材料の最適配置及びその最適境界形状を求める設計手法の開発	渋谷陽二 (大阪大学)
	②材料と破壊の基礎科学 -複合材料	CFRP表皮サンドイッチ構造の衝撃損傷モデリングと損傷低減手法の開発	武田展雄 (東京大学)
	③材料と破壊の基礎科学 -材料界面	界面破壊機構における剥離先端部の局所塑性変形の影響検討	香川豊 (東京大学)
	④マルチマテリアル設計 -塑性加工	塑性加工プロセスによるポーラス金属表面への緻密層形成による特性改善の研究	宇都宮裕 (大阪大学)
	⑤材料と破壊の基礎科学 -金属材料	水素環境下での自動車部品材の構造強度保証技術の開発および自動車溶接部の非破壊損傷計測と余寿命評価法の確立	横堀壽光 (東北大学)
	⑥検査・診断技術 -接合部の非破壊評価	CFRP/金属接合部を対象とした非破壊評価法の開発	志波光晴 (物材機構)

\*2014.9より材料WGに小関敏彦(東京大学)、鳥塚史郎(兵庫県立大学)が参画

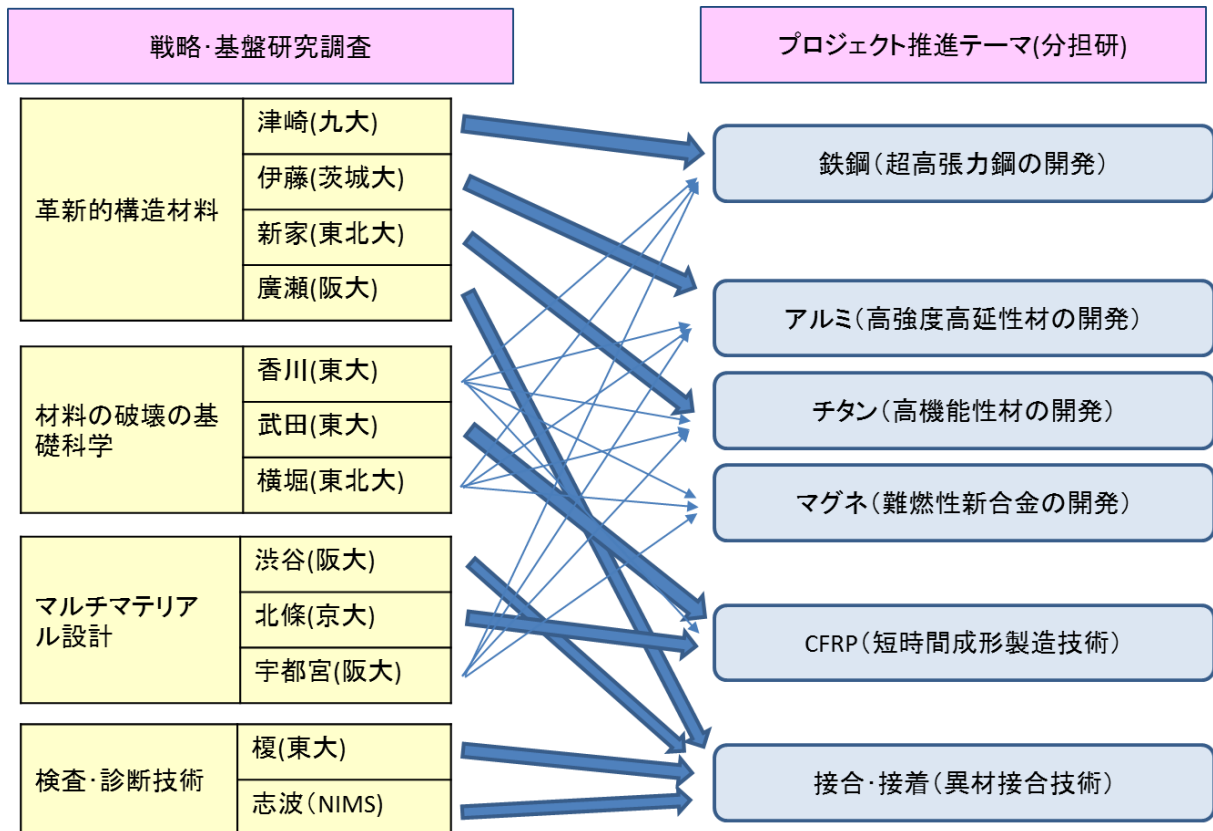


図 3-2.9.1d-1 研究調査と推進テーマとの関連

### (5) 運営管理

研究調査委託先研究者は、テーマ 29「新構造材料の技術・研究戦略」における戦略・基盤専門委員会委員としても委嘱を行っている。これは、プロジェクト研究戦略の策定を行う上で、各分担研での技術ニーズと研究者シーズの擦り合わせや推進テーマとの関連付けがより円滑に行われることを意図している。



## 2.9.1d.2 研究開発成果

### (1)最終目標の達成度

表 3-2.9.1d-3 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
共通基盤技術の研究調査	構造材料に関する研究開発のビジョンの明確化、接合技術および個別材料の技術戦略指針の提言、実用化に向けた課題の抽出等を進め、本プロジェクトで開発する新構造材料の技術・研究戦略を策定する。 (2014 年度)	戦略・基盤分科会との連携により、研究調査内容のプロジェクト内への展開や新技術の提言を行った。また、関連他省プロジェクト（元素戦略、SIP）との連携を進めた。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

### (2)研究開発の成果と意義

以下に、研究調査成果の概要をまとめる。

#### ① 榎学（東京大学）

##### i 研究者名/研究テーマ名

榎学/信頼性確保のための新規プロセスモニタリング技術の開発

##### ii 研究の目的

接合や表面処理後の材料の信頼性を確保するためには、従来には無いマテリアルプロセスモニタリングが重要である。本研究においては、プロセスモニタリング装置を開発することにより、難接合性の Mg 合金/Al 合金異種材料 FSW および鉄鋼材料 FSW のモニタリングへ適用を目指した。

##### iii 成果の概要

AE 波形のノイズフィルタ処理を多チャンネルでもリアルタイムに行えるようにするため、GPU (Graphics Processing Unit) を利用した多並列演算を導入し、さらに GPU の特性の理解に基づいた処理の最適化を行った。より高速な PCI Express バス規格に対応した GPU を利用することで、大規模な AE 計測でも十分リアルタイム処

理が行えるようになった。また、AE 事象のリアルタイム位置標定では、波形の立ち上がりの検出を高精度かつ自動的に行う必要がある。本研究では 2 つのピークがあった場合には後の A0 波を選択的に検出するよう波形処理を改良し、ノイズレベルによらず全チャンネルで A0 波による立ち上がりを検出し、精度良く自動位置標定が行えるようになった。

S45C 板材の FSW を接合開始から 10 分程度 AE モニタリングした。試料は長さ 200 mm × 幅 50 mm × 厚さ 2.0 mm の平板 2 枚を長辺で付き合わせたものである。

図 3-2.9.1d-2 に結果の一例を示す。図の横軸は時刻、縦軸は接合線上の位置を示しており、接合位置は右上がりの線、各 AE 事象はバブルとして表示される。時刻 0 s は接合開始を示している。良好な接合が行えた場合は殆ど AE 事象が検出されな

かったが、本例では多数の AE 事象が検出された。この AE 計測と断面観察の結果から、数秒遅れの AE 事象は接合後に裏板への放熱で急冷された材料がマルテンサイト変態した際の高速な体積変化にともなう弾性波を検出したものであることが推定された。AE 法を用

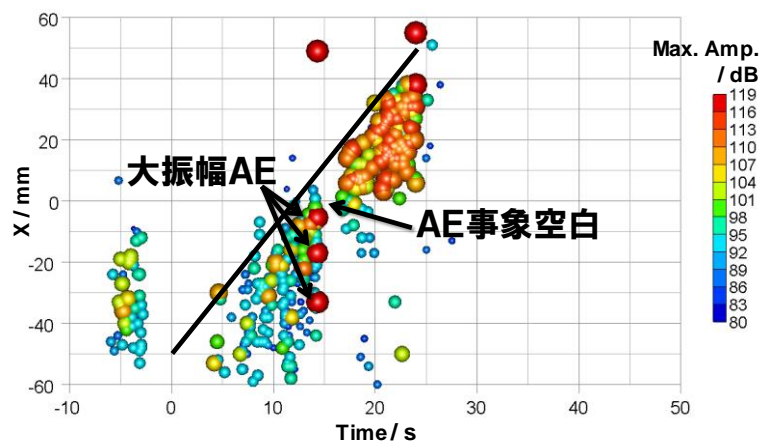


図 3-2.9.1d-2 鋼材の FSW における AE 事象

い

たことで時刻と位置の情報がリアルタイムに得られた。

#### iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

FSW を含む異種材料接合技術は、構造物のマルチマテリアル化を進める上で非常に重要な技術である。しかし、接合の際にどうしても欠陥が生じ易いため、接合部の材料および構造物の信頼性を確保することが重要である。これらの接合技術を工業的に実用化し、イノベーションにつなげるためには、本研究の成果を含むプロセスモニタリング技術のさらなる高度化が不可欠であると考えられる。

### ② 津崎 兼彰（九州大学）

#### i 研究者名/研究テーマ概要

津崎兼彰/疲労強度と延性・靱性に優れた高強度 TWIP 鋼の開発

#### ii 研究の目的

文部科学省元素戦略プロジェクト「構造材料元素戦略研究拠点」(ESISM) との連携を取りながら、自動車および輸送機器の軽量化に貢献する新規の高強度鉄鋼材料に関する研究開発および調査を行う。

### iii 成果の概要

開発研究においては、疲労強度と破壊靱性に優れた材料のものづくり技術を対象とし、自動車用の新しい高強度鉄鋼材料として注目されている変形双晶誘起塑性高強度鋼（**T**winning -**I**nduced **P**lasticity ; TWIP 鋼）の疲労特性に注目した。Fe-30Mn-3Si-3Al 鋼に加えて、炭素を含む Fe-16Mn-0.6C 鋼を対象として、回転曲げの疲労試験を実施し疲労寿命を取得するとともにレプリカ法を用いてき裂の発生進展挙動を観察した。その結果、Fe-30Mn-3Si-3Al 鋼では疲労限が存在せず、停留き裂も認められなかった。これに対して、Fe-16Mn-0.6C 鋼では明瞭な疲労限が存在し停留き裂が観察された（図 3-2.9.1d-3）。FCC オーステナイト鋼での疲労限の存在は注目される発見であり、き裂先端での拡張転位のすべり運動と炭素の相互作用が重要な働きをしていることが示唆された。また TWIP 鋼の変形双晶挙動について基礎的知見を得るために、変形双晶に及ぼす炭素の影響を検討した。

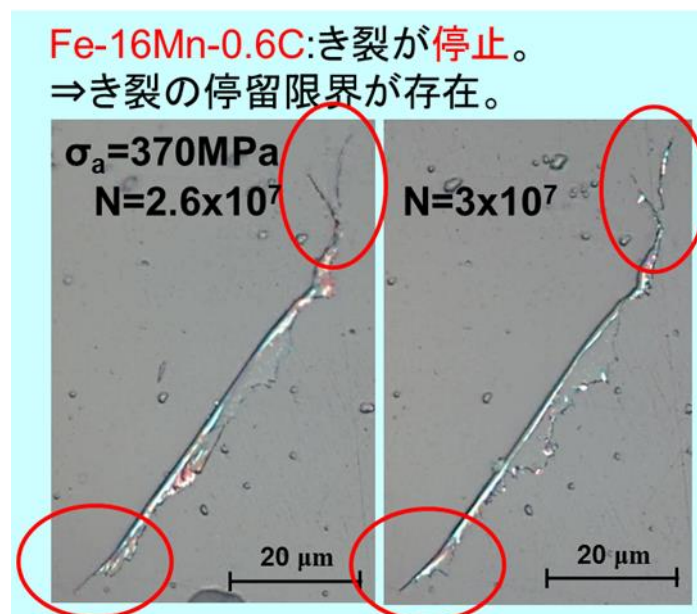


図 3-2.9.1d-3 Fe-16Mn-0.6C で認められた停留き裂（レプリカ法）

### iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

ESISM の元素戦略的研究の知見を活用しつつ、平均的な材料強度の向上を一步進めて金属材料の部材強度の向上につながる材料強化法の調査を行った。具体的には、「疲労き裂の進展を支配するき裂先端での交互すべり変形の様式（プラストン）の制御」について、すべり素過程が変形双晶やマルテンサイト変態の場合の先行研究について調査した。さらに自動車材料にとって疲労と並んで重要課題である水素脆化についての文献調査を行い、き裂の発生と伝播における整合  $\Sigma 3$  双晶界面の重要性が新たな研究課題として注目され始めていることを示した。これより ISMA プロジェクトでのミクロ組織と特性関係の解明においても、時間依存型損傷を解明するためには「変形素子と界面」が今後の研究開発のキーワードとなることを提言した。

### ③ 伊藤 吾朗 (茨城大学)

#### i 研究者名/研究テーマ名

伊藤吾朗/2000系、7000系 Al 合金の疲労特性に関する基礎的研究

#### ii 研究の目的

比強度・加工性に優れ、複合材料に比べて低コストなことから、アルミニウム合金は今後も輸送機器分野において主要な構造材料として用いられると考えられる。しかし、一般にアルミニウム合金は、鉄鋼材料に比べて疲労特性に劣る。特に7000系合金は、アルミニウム合金中で静的強度が最も高いにもかかわらず、疲労特性に劣るので、航空機において、圧縮疲労荷重を受ける主翼上面外板や胴体の桁材などの一部にしか用いることができない。そこで引張疲労負荷のかかる部材には、7000系合金よりも低強度であるが疲労特性に優れた2000系合金<sup>1)</sup>が使用されている<sup>2)</sup>。一般的には、静的強度と疲労特性は比例関係にあるといわれている<sup>3)</sup>ので、この両合金の疲労特性の差の原因は、解明すべき課題であるが、関係研究がほとんどなされていない。本研究では、7000系合金が水素脆化にきわめて敏感である一方で、2000系合金は鈍感である<sup>4)</sup>こと、および疲労も水素脆化も時間を要する現象であることから、7075および2024と同等の強化元素を含む両系合金（調質はそれぞれT6およびT4）の疲労き裂進展挙動に及ぼす試験環境および合金組成の影響を調査した。

#### iii 成果の概要

疲労き裂進展試験の結果、比較的高い $\Delta K$  ( $=14.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) で比較すると、7X（強化元素のみからなる7000系合金）の湿潤大気（MA）中でのき裂進展が最も速く、7Xの乾燥窒素環境（DNG）中、2X（強化元素のみからなる2000系合金）のMA中、7075合金のMA中、2X-0.6Mn（2Xに0.6%Mnを添加した合金）のMA中、2024合金のMA中、2X-0.03Mn（2Xに0.03%Mnを添加した合金）のMA中の順にき裂進展が遅くなった。すなわち2000系より7000系のほうが進展速度が速いことが確認され、また7Xでは、湿潤大気中よりも乾燥窒素環境のほうが進展が遅くなるのが分かる。

き裂経路観察結果から、き裂経路を粒界と粒内に分類できることが分かり、全体のき裂長さに対する割合で定量的に評価した結果を図3-2.9.1d-4に示す。粒界の割合は、水素脆化に敏感な7Xにおいて、2000系合金より高く、またDNGよりもMAのほうが高くなっている。このような結果は破面観察でも確認された。以上の結果から、7000系合金の疲労き裂進展が2000系よりも速いことが確認

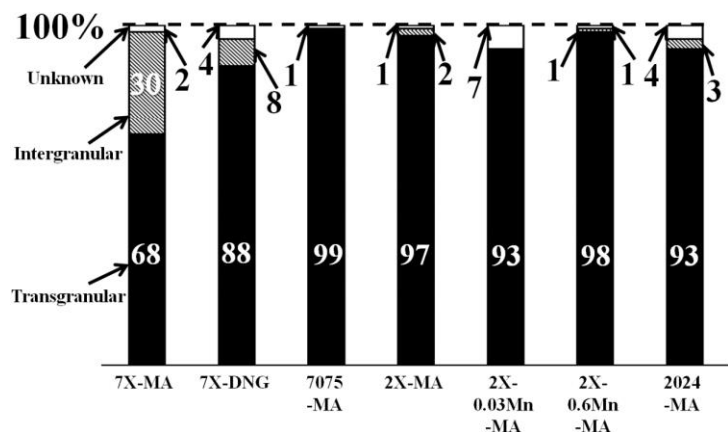


図3-2.9.1d-4 各試料、各環境でのき裂進展

され、それに水素脆化が関係していると推察された。

#### iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

今後、もっとも構造材料使用量の多い自動車分野においても、疲労特性が重要になると考えられ、本研究成果を自動車分野に応用する必要があると考えられる。接合（特に異材接合）においては、軽量金属（Al、Mg）では、電食が避けられず、これに伴う陽極溶解型、水素脆化型の応力腐食対策が必要になる。後者の場合、実際の部材では容易に判明しがたく、したがってこれに起因する疲労特性の低下も見過ごされやすいと考えられる。今後、接合部での水素脆化・疲労の研究が重要となる。

#### ④ 新家 光雄（東北大学）

##### i 研究者名/研究テーマ概要

新家光雄/金属粉末射出成形法を用いた Ti-Mn 系高強度チタン合金の開発

##### ii 研究の目的

低コスト添加元素であるマンガン等の利用、金属粉末射出成型法等の溶解法に依らない製造プロセスの利用および加工熱処理等による微細組織制御の利用により、低コストかつ超高強度なチタン合金を実現する。

##### iii 成果の概要

金属粉末射出成型法を用いて  $\beta$  型 Ti-Mn 合金（マンガン含有量:8-17 mass%）を作製し、溶体化処理状態の微細組織および力学特性を評価した。

溶体化処理状態の各 Ti-Mn 合金の結晶粒直径および気孔率は、それぞれ約 100  $\mu\text{m}$  および約 6%であり、構成相は、 $\beta$  相、非熱的  $\omega$  相および炭化チタンであった。非熱的  $\omega$  相の体積率は、マンガン含有量の増加に伴う  $\beta$  安定度の増加に伴って減少することがわかった。

溶体化処理状態の各 Ti-Mn 合金の力学的特性として、引張特性および圧縮特性を評価した。引張特性では、Ti-9Mn 合金が最も良い強度－延性バランス（最大引張強さ：1050 MPa、0.2%耐力：980 MPa、伸び：5%）を示すことが明らかとなった。一方、Ti-13Mn 合金では、強度および伸びが低下した。引張試験後の破面解析から、マンガン含有量の増加にともない、破壊形態が延性破壊から脆性破壊へと変化することが明らかとなった。この脆化には、マンガン原子による固溶強化、気孔周囲における応力集中および炭化チタンの存在が影響を及ぼしていると考えられる。

各 Ti-Mn 合金の圧縮特性を評価した結果、各合金の圧縮ひずみは、Ti-6Al-4V 合金のそれより大きく、マンガン含有量の増加に伴い増加した。特に、Ti-12Mn、Ti-13Mn、Ti-15Mn および Ti-17Mn 合金は、40%以上の圧縮ひずみを示したことから、これらは極めて高い冷間加工性を有すると言える。マンガン含有量の増加に伴う圧縮ひずみの増加は、マンガン含有量の増加に伴う  $\omega$  相の減少に由来すると考えられる。

各 Ti-Mn 合金は、極めて高い冷間加工性を有することから、冷間圧延加工による微細組織制御により、引張強度の向上が期待できる。そこで、Ti-13Mn 合金に対して、圧下率 90%の冷間圧延を行った。

圧下率 90%の冷間圧延加工後の Ti-13Mn 合金の微細組織を調査した結果、冷間圧延加工後、気孔が消失することが明らかとなった。冷間圧延加工前後の転位密度を見積もった結果、 $0.12 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$  (加工前) から圧下率 90%の冷間圧延加工により  $2.8 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$  へと増加することがわかった。さらに、冷間圧延加工前後で顕著な  $\omega$  相の増加が認められたことから、冷間圧延加工により、変形誘起  $\omega$  相が形成されることがわかった。

圧下率 90%の冷間圧延加工後の Ti-13Mn 合金の引張特性を評価した結果、最大引張強さは 1.85GPa で、0.2%引張耐力は 1.82GPa であった。一方、冷間圧延加工前後で伸びは大きく変化することなく、約 2%以下であった。冷間圧延加工による引張強度の大幅な増加は、転位密度の増加による加工硬化、気孔率の減少による応力集中の低減および炭化チタンと変形誘起  $\omega$  相による分散強化によると考えられる。

冷間圧延加工後の Ti-13Mn 合金の引張強度は、既存チタン合金の中でもトップデータレベルの極めて高いものであり、本研究の目的である、低コストかつ超高強度なチタン合金の実現に大きく近づいた。

#### iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性 (提言)

本研究で開発した Ti-Mn 合金は冷間加工性に優れており、かつ既存チタン合金の中でもトップデータレベルの極めて高い引張強度を有することから、次世代の構造用チタン合金として高い可能性を秘めている。本合金は、優れた冷間加工性つまり高い塑性加工性を有することから、塑性流動を利用した接合技術である摩擦攪拌接合との相性が良いと期待される。今後、摩擦攪拌接合による本合金同士あるいは本合金と他金属材料との接合技術の確立が重要だと考える。

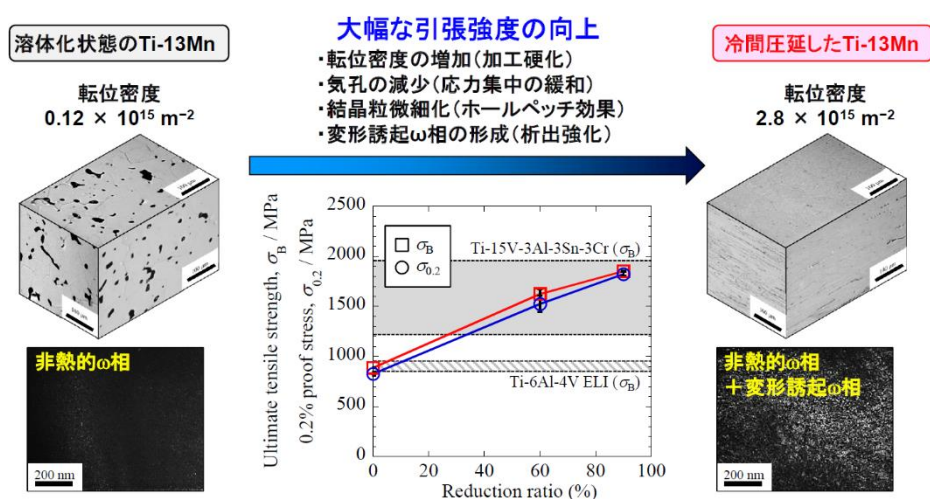


図 3-2.9.1d-5 金属粉末射出成型法を用いて作製した Ti-13Mn 合金の冷間圧延前後の微細組織および引張特性

## ⑤ 廣瀬 明夫 (大阪大学)

### i 研究者名/研究テーマ概要

廣瀬明夫/異材接合継手の強度発現機構の基礎的検討

### ii 研究の目的

本研究は、自動車をはじめとする輸送用機器に適用される鉄鋼材料および非鉄材料の異材接合を対象に、車体構造や材料の組み合わせに応じた効果的な接合プロセスの提案を行う。具体的には、異材接合部の機械的特性、破壊形態を系統的に評価し、界面構造との対応から強度発現機構を明確化すると共に、シミュレーションにより異材接合部の変形・破壊特性を予測するための手法の構築を行うことを目的とした。

### iii 成果の概要

異材接合部の界面構造と強度発現機構の検討に関しては、摩擦プロセスを用いた接合とレーザブレイジングを対象に検討を行った。摩擦プロセスを用いた接合では、まず、A6061/SUS304 および HT780 の重ね FSW 継手において、Al 合金側からのツールの押込み位置を適性に制御することで、良好な接合が達成された。接合界面では、脆弱な Al-Fe 系金属間化合物層をほとんど形成しておらず、このような接合部では Al 合金の母材強度以上の接合強度が得られた。反応層成長の影響を評価した結果、図 3-2.9.1d-6 に示すように、A6061/SUS304 継手では、反応層厚さが 0.2 $\mu\text{m}$  から 0.6 $\mu\text{m}$  までは継手強度は上昇し、母材破断となった後、さらに反応層が成長すると継手強度は大きく低下したが、A6061/HT780 継手では、反応層厚さが厚くなるほど継手強度は低下しており、被接合材料による影響があることが分かった。次に、FSSW によって A6061/GI および SPCC 継手の接合が達成できたが、すべての接合条件で A6061/GI 継手の方が高強度であり、亜鉛めっきにより接合性が向上することが分かった。摩擦圧接を用いて、Ti 合金と Ni 合金の異材接合を行った結果、アッ プセット圧力を制御することで接合が達成でき、400MPa 以上の継手強度を得た。接合界面に形成した Ti-Ni 系金属間化合物からなる反応層を介して接合が達成され

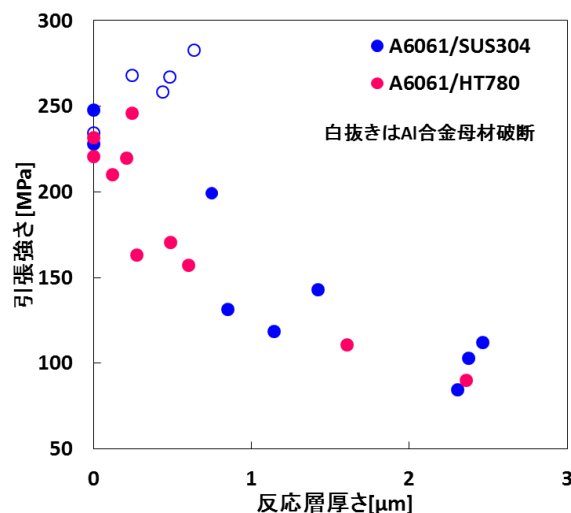


図 3-2.9.1d-6 FSW 重ね異材継手における接合強度に及ぼす反応層厚さの影響

ていることが分かった。次に Mg 合金ろう材を用いた Al 合金と Mg 合金の異材レーザーブレイジングを行い、レーザー出力を適正に制御することで、濡れ性を確保しつつ界面反応を抑制して高強度の接合が達成できることが分かった。継手強度に及ぼす IMC 層厚さの影響を評価すると、IMC 層厚さ 200 $\mu$ m 程度で強度は最大値を示した。

次に、異材継手を構造物に実用的に用いるためには、シミュレーションを適用して異材継手の変形、破壊挙動を統合的に理解し整理することが必要である。そこで、異材接合部の破壊メカニズムに基づいた数理モデルを提案し、継手の破壊支配領域とマクロ破壊強度を予測する手法の提案を行った。本手法は、I. 合金内での延性破壊モデルと、II. IMC 層内での脆性破壊モデル、からなり、それぞれの破壊条件を競合させることで、継手の破壊支配領域とマクロ破壊強度を数値シミュレーションにより予測しようとするものである。I. の延性破壊モデルは、接合界面近傍における合金側での破壊発生を予測するもので、異種金属間の強度差に起因した塑性拘束によって促進される損傷進展をシミュレートし、それによる延性き裂の発生・進展を予測するモデルとして提案したものである。II. の脆性破壊モデルは、脆性材料である IMC 層のへき開破壊限界を予測するもので、破壊の起点となる微視的き裂の寸法分布と最弱リンク概念を取り入れることで、数値シミュレーションによって破壊限界をばらつき特性も含めて予測するモデルとして提案した。提案したモデルに含まれる新たな破壊駆動力を用いることで、IMC 層からの破壊発生限界に及ぼす IMC 層厚さの影響を予測することが可能である。

#### iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

異材接合部の強度発現機構の解明により、最適な界面構造とその制御指針を示すことができる。これと接合部の変形・破壊挙動のシミュレーションを組み合わせることによって、試験片レベルの評価から車体構造に適用した継手レベルの評価への展開が可能となり、構造体軽量化に対して効果的な継手構造ならびに接合プロセスの提示を行うことができる。

### ⑥ 北條 正樹（京都大学）

#### i 研究者名/研究テーマ概要

北條正樹/CFRP 系複合材料の積層微視構造が構造要素の強度に与える影響の研究

#### ii 研究の目的

複合材料構造では、繊維で強化していない板厚方向に引張応力が生じはく離が発生することが、最弱破壊モードの一つである。今後開発の進む低コスト材（RTM, OoA 等）では、はく離の発生箇所は積層構造の層間および層内の双方が考えられるが、これまでの研究は前者が中心であった。本研究では、層間と層内を区別して評価する手法を開発し、積層微視構造が構造要素の強度に及ぼす影響を検討する。航空機構造材料として重要な位置付けにある層間高じん化材につき、実際の設計基準に直結する値である、層内はく離と層間はく離の破壊靱性の違いおよびその最低値を評価した。今後疲労特性も検討する予定であ



る。

### iii 成果の概要

用いた材料は、ポリアミド粒子を用いたモデル層間高じん化 CF/エポキシ材である。層内はく離の評価のため、新たに開発した層内フィルム挿入法を用いた。ここではプリプレグ製造プロセスを改良し、含浸初期の中央部に樹脂が含浸していない状態で PTFE フィルムを挿入後、樹脂を追加含浸することにより、層内に初期欠陥を配置した。破壊靱性試験には、双片持ち梁試験片を用いた。初期欠陥の挿入状況を断面および破面の高精度観察により検討し、ボイドや樹脂過剰な領域が認められないこと、すなわち、新たに開発した「層内フィルム挿入法」により、正常に初期欠陥が配置され、安定に試験ができることを確認した。

図 3-2.9.1d-7 に、層間高靱化材の破壊靱性値とき裂進展量  $\Delta a$  の関係（R 曲線）を示す。同図では、実線および破線で非高靱化材の結果を併せて示した。各実験点は  $\Delta a=2\text{mm}$  毎に靱性値を平均化したものである。まず、 $\Delta a=0$  での初期値について、層間高靱化材の層内破壊、非高靱化材の層内および層間の靱性値がほぼ一致した。一方、層間高靱化材の層間の破壊靱性の初期値は、層内と比べ倍以上の高い値を示した。

伝ば時の靱性値について、層間高靱化材については、ほぼ一定値を示した。この場合、き裂が常に層間領域内（粒子層）を進展しており、繊維架橋の影響を受けなかったため、破壊靱性値が一定になったものと考えられる。一方、それ以外については、き裂進展量  $\Delta a$  が増加するにつれて繊維架橋が発生し、破壊靱性値も上昇した。R 曲線に関しては、層内破壊については、層間高靱化材と非高靱化材の挙動が一致した。また、R 曲線の勾配は層内のほうが層間に比べて高く、飽和時の破壊靱性値も層内のほうが層間に比べて高くなった。微視観察から、R 曲線の挙動は繊維架橋の総本数等に支配されることが明らかになった。

き裂進展量  $\Delta a$  が 10 mm 以下の場合、層間高靱化材の層内の破壊靱性値は、同材料の層間の破壊靱性値よりも低い。が、 $\Delta a$  が 10 mm 以上になると層内の破壊靱性値が層間に比べ高くなった。このことから、初期のき裂進展抵抗には層間樹脂層が大きく影響を及ぼすが、き裂進展後の挙動を考慮すると、層間に粒子を配置したことによる高靱化効果よりも繊維架橋による高靱化効果のほうが大きくなることがわかった。設計の観点からは、層間高じん化材の靱性値の最低値は、層内靱性の初期値であり、かつ非高靱化材のそれと一致することを明らかにした。

以上のとおり、きわめて重要な結果が得られるなど、研究は予定通り進行した。

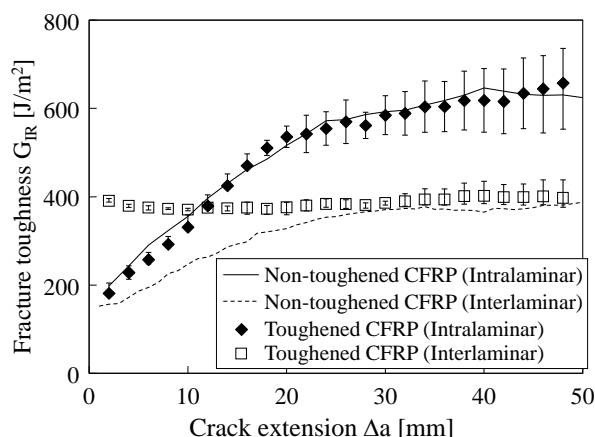


図 3-2.9.1d-7 層間高靱化材の層内および層間破壊靱性の非高靱化材との比較

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

本課題で開発した評価法は、熱硬化性樹脂を基として高性能を発揮する層間高靱化材料の設計のための最低値の指針を与える評価法である。この手法は、同種の材料の接合にあたっての評価に発展させることが可能と考える。また、CFRP そのものに対しては、積層構造のわずかな樹脂配置が力学特性に大きな影響を与えることを示し、物性値の評価における検討の重要性を示している。

⑦ 小関 敏彦（東京大学）

i 研究者名/研究テーマ概要

小関敏彦/高強度鋼の溶接・接合

ii 研究の目的

1GPa を超える高強度鋼の溶接性の問題点を過去の検討から系統的に明らかにするとともに、それらに及ぼす鋼組成および組織の影響、溶接法・溶接条件の影響を調査して、問題解決に向けた材料組成、組織、溶接・接合法の指針を導出し、新たな鉄鋼材料の開発にフィードバックすることを目的とした。

iii 成果の概要

本検討は 2014 年度からスタートしたものであるが、初年度は高強度鋼の溶接の冶金的な課題を過去の研究のレビューから抽出するとともに、現状、年々変化する自動車用材料および接合法のトレンドから、ISMA プロジェクトにおける高強度鋼の溶接・接合研究および技術開発の方向性について検討を行った。

1) 高炭素高強度鋼の溶融溶接ならびに摩擦攪拌接合 (FSW) に関する従来知見の調査  
高炭素高強度鋼の溶融溶接ならびに FSW に関する従来知見を、内外の学術誌、企業の技報や公表資料などから調査した。その結果、溶接部の課題は大別すると：

(a) 溶接熱サイクルによる溶接金属および熱影響部 (HAZ) の硬化、ならびに HAZ の軟化

(b) 硬化部における脆性破断・軟化部に起因する継手強度低下

(c) 疲労強度の低下

(d) 低温割れ（水素割れ）感受性の増加

このうち、(a)の硬化は焼入れのままのホットスタンプ材の1.5GPa級鋼では顕著でないが、今後TRIP鋼で同等の強度と延性の両立を目指す場合は更に高炭素化が必要であり、溶接による硬化は避けることができない。他方、軟化は鋼材が高強度になるほどA3以下に加熱されるHAZで顕在化し、1GPa以上の高強度鋼では問題となる。これらは(b)～(d)の支配要因であり、熔融溶接では根本的な解決策は無い。熔融しないFSWにおいても攪拌部はA3温度以上になり、攪拌部の硬化と周辺のHAZ軟化は起こる。

次に(b)の脆性破断は硬化に起因するもので、特にスポット溶接部の十字引張強度は母材強度が上昇しても脆性破断ゆえ向上せず逆に低下する。(c)の疲労強度の低下は溶接部の形状に大きく依存し、形状的な応力集中に加え、溶接による引張残留応力とHAZ軟化が疲労の発生・進展を加速しており、形状を改善しても母材レベルまでの回復は難しい。更に(d)の低温割れ感受性は、開発を目指す高強度鋼では検討が必須であるが、適用が薄板であり従来知見をそのまま適用することは難しく、評価法も含め検討が必要である。

2) 上記課題の改善に向けた接合研究の方向性の検討

以上のような調査結果から改善策ならびに今後の研究の方向について検討した。熔融溶接を高強度鋼に単独で用いることは多くの課題があり、他の接合法やあるいは熔融溶接とその他の接合法の併用も検討する必要がある。加熱温度の低いあるいは常温の接合法としては、①FSW、②ろう付け、③機械接合（リベット、クリンチ、ねじ）、④接着などがすでに自動車に適用されている。①FSWは高強度鋼に用いる場合は最高到達温度の制御やツールの寿命などの検討が不可欠である。②ろう付けはレーザーを用い高速で母材非熔融、最高加熱温度も低いなどのメリットがあるが、継手強度自身は低く、適用箇所が限定される。③④は常温であり、③は高強度鋼および他の材料との異材接合で適用できる。特にSPR(Self-piercing Rivet)は1.7GPaの強度まで適用可能と言われている。また④はすでに自動車に補助的に用いられており、接合強度上昇に加え、剛性向上や異材接触のインシュレーターとしても効果がある。

超高強度鋼の接合検討では、これらの接合の適用あるいは併用も含めた検討を並行して行うことを提言する。

#### 【自動車に適用される接合法の最近の変化と高強度鋼溶接への展開】

一方、近年の自動車製造ではBピラーなどホットスタンプ用超高強度鋼の適用とともにマルチマテリアル化も進む中で、適用される溶接・接合法も従来のアークやスポット溶接から、レーザー溶接やFSWなどに拡大してきた。これらは単独あるいは併用によって高強度鋼溶接や異材溶接への適用が可能で、車体の剛性向上や溶接熱ひずみの減少などのメリットもある。さらに機械接合や接着ではスポット溶接と同レベルの接合効率を達成できるものもあり、ISMAプロジェクトにおける高強度鋼の溶接・接合研究および技術開発では、従来の接合法に拘らず、冶金的な課題解決と並行して、様々な接合法の可能性の検討が重要と思われる。

#### iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

超高強度鋼の溶接にかかわる課題は、これまでの接合法を前提とすると解決が難しいものが多く、冶金的課題を解決する溶接部の組成・組織・プロセス条件の解明と並行して、新たな接合法を前提とした検討も必要である。適用が拡大しつつある接合法としてはレーザー溶接やFSW、リベットやクリンチの機械接合、ロウ付け、さらに接着などがあり、これらは単独あるいは併用によって高強度鋼溶接だけでなく異材溶接、マルチマテリアル化への適用が可能で、車体の剛性向上や溶接熱ひずみの減少などのメリットもある。さらに機械接合や接着ではスポット溶接と同レベルの接合効率を達成できるものもあり、ISMA プロジェクトにおける高強度鋼の溶接・接合研究および技術開発では、従来の接合法に拘らず、冶金的な課題解決と並行して、様々な接合法の可能性の検討が重要と思われる。

#### ⑧ 鳥塚 史郎（兵庫県立大学）

##### i 研究者名/研究テーマ概要

鳥塚史郎/材料と破壊の基礎科学－高強度材料 真ひずみで 1 を超える大ひずみ域までの真応力－真ひずみを取得しデータベースとしての確立

##### ii 研究の目的

自動車等の輸送機器の燃費改善には、エンジンを始めとした動力機関の効率向上とともに、車両の軽量化が重要な取組課題の一つである。高強度金属材料を用いれば、材料自体の使用量を減らすことができ、燃費向上によるエネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量の削減につながる。高強度金属材料を有効に活用するためには、真応力－真ひずみ挙動を知らねばならない。近年、最大荷重点を越える領域まで加工を行うようなことも必要とされ、破断までの真応力－真ひずみ挙動の把握のための正確な計測技術の確立が急務となっている。最大荷重点を越え破断までの真応力－真ひずみ曲線が取得できれば、高強度材料の成形限界や破断限界が推定できるようになる。高強度金属材料の真の延性・破壊ひずみ、破壊応力を明らかにでき、大きな塑性変形をとまなうプレス成形のような技術に対応できるようになる。

本研究では、金属材料の最も重要な性質である真応力－真ひずみ曲線に関して、画像計測引張試験技術により、真ひずみで 1 を超える大ひずみ域までの真応力－真ひずみを取得し、データベースとしての確立を行うことを目的とする。

##### iii 成果の概要

引張試験機に CCD カメラシステムを設置し、画像計測引張試験を行うための専用システムを構築した。CCD カメラによって試験平行部の観測点約 50 点の長さ（直径）を 0.2s 間隔で計測した。これらのデータから試験平行部の最小半径  $a$  と曲率半径  $R$  を連続的に算出した。荷重  $P$  はロードセルのデータから求めた。これらのデータから、

$$\text{平均応力 } \sigma_{av} = (P/a^2\pi) \quad (1)$$

$$\text{真ひずみ } \bar{\varepsilon} = 2\ln(a_0/a) \quad (2)$$

を求めた。また、最大荷重点までは、平均応力は真応力となる。最大荷重点を越え、局所くびれ発生以降は Bridgman の式より、

$$\text{真応力 } \bar{\sigma} = \sigma_{av} / \{(1 + 2R/a) \ln(1 + a/2R)\} \quad (3)$$

を用いて真応力を算出し、真応力 - 真ひずみ曲線を求めた。 $a_0$ は初期半径である。本画像計測引張試験システムによって、一様変形、くびれ発生、破断に至る試験片形状変化を連続的に正確に直接計測することができた。その結果、くびれ発生開始点やくびれの形状変化など断続引張試験では取得不可能な高精度データが得られ、最小半径  $a$  から、破断までの真ひずみ変化をとらえることができた。

成果の例として、化学組成 0.01C-0.30Mn-0.25Si mass%の低炭素鋼で、平均粒径  $15 \mu\text{m}$  の粗粒鋼と平均粒径  $0.7 \mu\text{m}$  の超微細粒鋼に対し、画像計測引張を行った結果を示す。引張試験片は、直径 3.5mm、平行部長さ 24.5mm、標点間距離 17.5mm の丸棒引張試験片を用いた。クロスヘッド速度は 0.5mm/min とした。

Bridgeman の真応力式から破断までの真応力-真ひずみ曲線を導出し、図 3-2.9.1d-8 のような結果を得た。公称応力-公称ひずみ曲線も同時に示すが、著しく異なることがわかる。微細粒鋼は、公称ひずみにおいて、破断ひずみ（全伸び）が 0.15 と非常に小さかったが、真ひずみの観点からは、きわめて大きな破断ひずみ 1.75 を有する。一方、粗粒鋼は、公称ひずみにおいては、破断ひずみ（全のび）は 0.35 と大きい。一方、真ひずみにおける破断ひずみは、1.95 と微細粒鋼と大きな差はなくなる。一方、応力に関しては、超微細粒鋼は粗粒鋼に比べ、真破断応力は 2 倍以上と、優れた真破断応力-真破断ひずみバランスをもつ材料であることが示されている。また、粗粒鋼は大ひずみ域では加工硬化が飽和するものの、超微細粒鋼は降伏から破断まで一貫して加工硬化し続けるという従来のセンスとは逆の結果も得た。

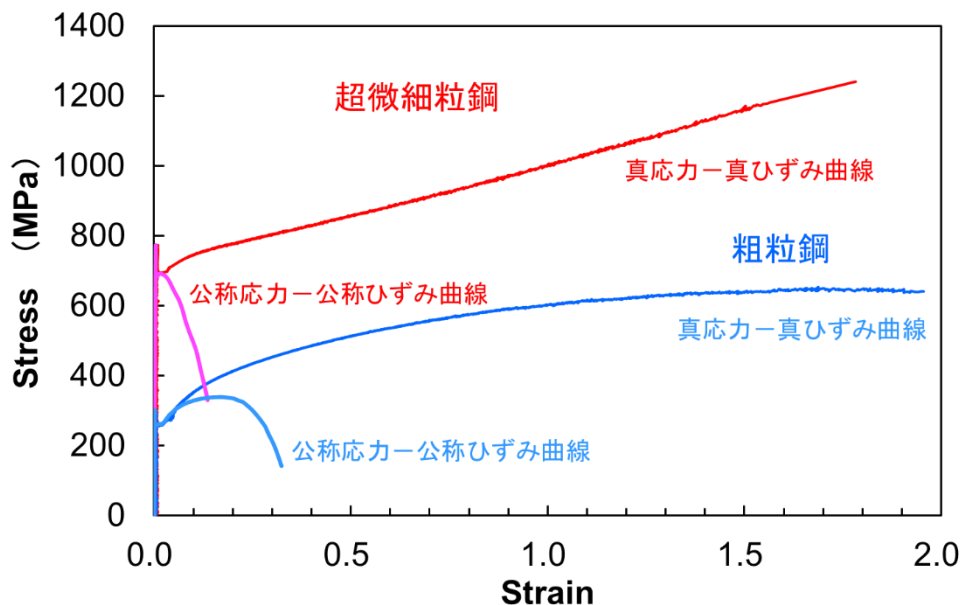


図 3-2.9.1d-8 画像計測引張試験法で得られた 0.01C 組成の平均粒径  $20 \mu\text{m}$  粗粒鋼と  $0.7 \mu\text{m}$  超微細粒鋼の破断までの真応力-真ひずみ曲線（公称応力-公称ひずみ曲線も併記）

超微細粒鋼は粗粒鋼に遜色のない破断ひずみとはるかに大きな破断応力を有することを明らかにしたものであり、金属材料の本質を明らかにした結果となった。

#### iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

輸送機や構造物の軽量化のため、最大荷重点伸び（一様延性）を大きく越える新しい成形加工技術等が積極的に採用され始めており、そのためには、くびれ発生以降の加工硬化挙動や真破断ひずみや真破断応力を知る必要がある。特に、ISMA で目指している超高強度・高延性材料は、必ずしも一様延性が大きくないと思われ、これを使いこなすには、最大荷重点以降（局部延性）の変形の活用も必要とされると思われる。したがって、破断までの真応力-真ひずみ曲線データベースの確立によって、ISMA で開発される輸送機用高強度金属材料を使いこなすための基本データを与えるものができること期待される。

### ⑨ 渋谷 陽二(大阪大学)

#### i 研究者名/研究テーマ概要

渋谷陽二/マルチマテリアル化における軽量材料の最適配置及びその最適境界形状を求める設計手法の開発

#### ii 研究の目的

Body-In-White (BIW)のマルチマテリアル化される部材に対して、接着を含めた接合構造の最適化を探索するため、被接合材料の最適界面境界形状を求める設計手法の開発を行う。まずは、ハイテン鋼、アルミニウム合金やマグネシウム合金などの異種材料からなるソリッド体の界面強度問題を対象に、界面に沿って垂直方向のはく離応力と界面に沿ったせん断応力の複合応力状態を対象にした界面強度最適化手法を確立する。そして、その手法を応用して、応力が多軸に作用した状態での接合強度評価手法を提案し、解析と実験による検討を行う。

#### iii 成果の概要

本研究では、マルチマテリアル構造体の接合界面強度問題に着目し、最大はく離強度関数の最小化を目的に最適界面形状を求めるための数値解析手法を提案した。そして、界面強度に応じた最適構造例を求め検証した(図 3-2.9.1d-9 参照)。その結果、界面強度(界面に沿った面に垂直なはく離応力と界面に沿ったせん断応力)を意図的に変化させるとそれに応じた界面形状の得られることがわかった。この手法を用いて、両者の応力が複合的に作用した界面での強度評価が可能になった。

## 界面最適化の構造解析例

$E_A:E_B=1:10$   
 $Z^1=Z^2=400\text{MPa}, Z=200\text{MPa}, Z=800\text{MPa}$

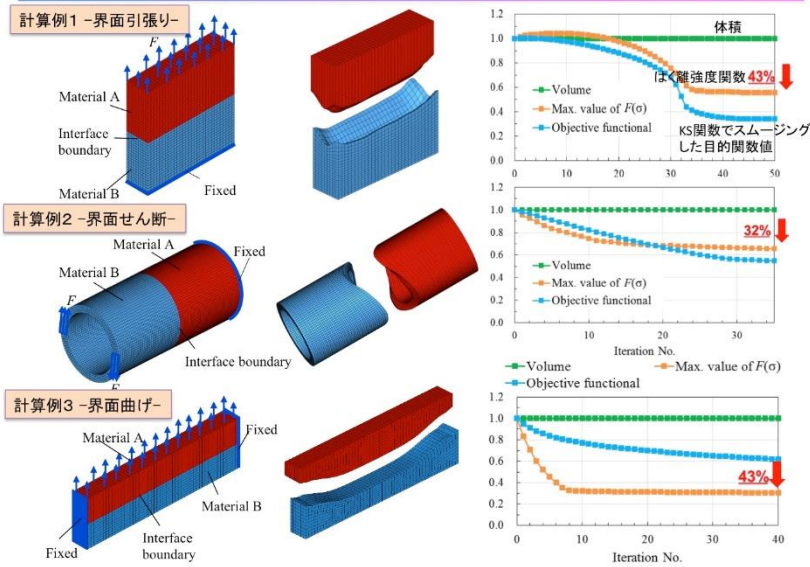


図 3-2.9.1d-9 負荷形態に応じた界面形状の最適化シミュレーション

### iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

ISMA の接合分科会(平田コーディネータ)の中で、界面評価接合メカニズム及び異材継手性能の評価技術に関わる分野で連携を取る予定である。提案する手法での界面強度評価の妥当性を議論し、接合分科会で得られた新たな接合へ適用を試みる。

## ⑩ 武田 展雄（東京大学）

### i 研究者名/研究テーマ概要

武田展雄/CFRP 表皮サンドイッチ構造の衝撃損傷モデリングと損傷低減手法の開発

### ii 研究の目的

本研究では、金属材料とは大幅に異なる材料組織から生じる複合材料製造技術に関連する力学課題についての検討を行う。とくに、航空機用新規複合材料構造としての「CFRP 表皮フォームコアサンドイッチ構造の衝撃損傷モデリングと損傷検出」に関して検討した。

### iii 成果の概要

温湿度を変化させたフォームコアの押し込み実験と CFRP 表皮フォームコアサンドイッチ構造の衝撃実験を行うとともに、FEM による衝撃損傷モデリング法を構築し、実験結果を説明した。とくに圧縮負荷後の引張負荷発生時の合理的なモデル化に成功した。

まず、PMI (polymethacrylimide) フォーム材の単軸圧縮負荷・引張負荷時の応答特性（応力-ひずみ線図）を様々な温度・湿度環境下で実験的に求め、応力-ひずみ線図の実験式を構築するとともに、マイクロ損傷の詳細観察による損傷挙動の物理的意味を明らかにした。

次に、CFRP 表皮フォームコアサンドイッチ梁の押し込み負荷・除荷応答（負荷-変位線図）を様々な温度・湿度環境下で実験的に求めた（図 3-2.9.1d-10 (a)）。また、負荷中・除荷後の表皮の押し込み深さを計測した。

さらに、上記の実験的に求めた PMI フォームの負荷応答特性を組み込んだサンドイッチ梁押し込み挙動の弾塑性有限要素 (FEM) 解析を行い、負荷-変位線図、表皮の押し込み深さを求め、計測した実験結果との比較を行った。とくに、押し込み負荷後の除荷挙動を正確に解析できる新しい弾塑性モデルを提案し、それを組み込んだ FEM 解析を行い、除荷過程中的負荷-変位線図や除荷後の押し込み深さの実験値により一致する FEM 解析が可能であることを示した（図 3-2.9.1d-10 (a)）。

また、負荷中・除荷後の CFRP 表皮フォームコア境界接着層の梁長手方向のひずみ分布（図 3-2.9.1d-10 (b)）を計算し、コア自体やコア・表皮間剥離損傷の大きさと範囲を検出できる可能性を示唆した。

#### iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

ISMA プロジェクトで実施している CFRP は主に自動車用途であるが、本研究のフォームコアサンドイッチ構造も将来的には自動車構造への展開の可能もある。

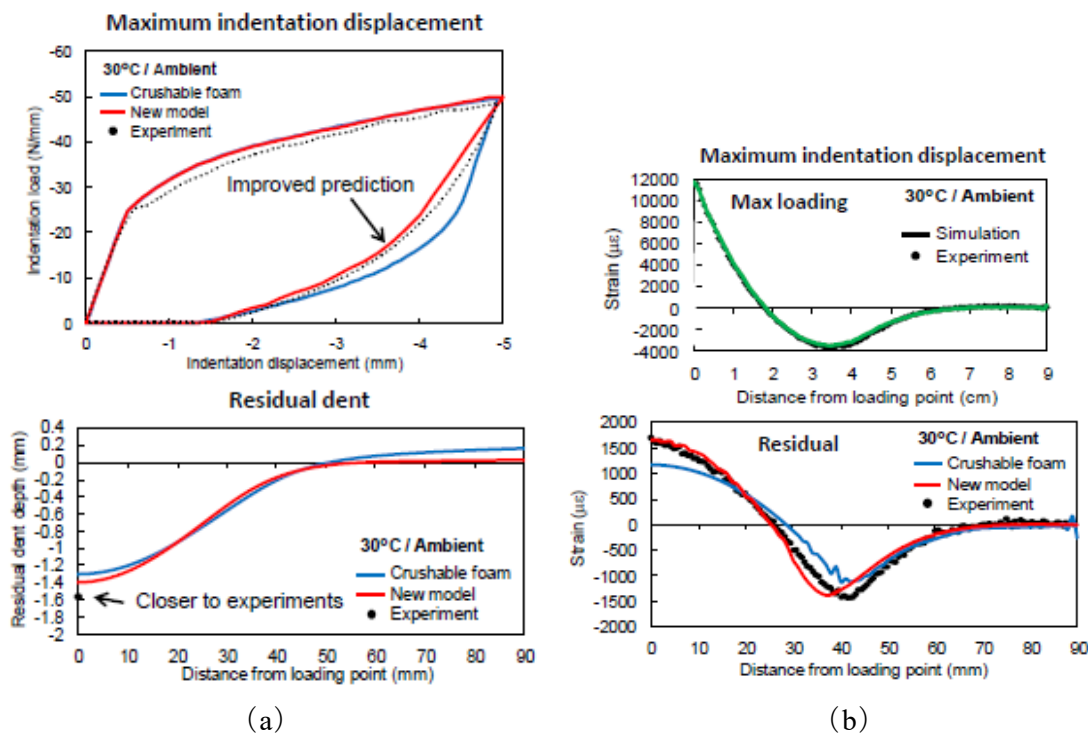


図 3-2.9.1d-10 CFRP 表皮コアサンドイッチ梁の応答

(a) 押し込み負荷・除荷応答（実験値と解析値）

(b) 境界接着層の梁長手方向のひずみ分布（実験値と解析値）



## ⑩ 香川 豊（東京大学）

### i 研究者名/研究テーマ概要

香川豊/界面破壊機構における剥離先端部の局所塑性変形の影響検討

### ii 研究の目的

移動用構造体の軽量化を実現するために、Ti や Al をはじめとする軽量金属に加えて、繊維強化プラスチック(FRP)が主要な役割を果たすことが期待されている。同時に、これらの軽量材料を組み合わせる使用することの重要性が増しており、異種材料の接合・接着が重要な技術課題となるとともに、接着部には高い信頼性が要求されるようになってきている。従って、高分子系接着材料と変形しにくい金属・セラミックスの接合体を対象とし、剥離先端部での局所的な変形が剥離エネルギーに及ぼす影響を、部材が実際に使用されるときに想定される条件下で明らかにし、接着界面の信頼性確保に貢献すること定量的に調べることは大切であると考えられる。本研究では、金属と FRP の接着界面の耐剥離特性を定量的に評価する方法を検討した。なお、耐剥離特性の評価に際しては、得られるデータが実接着構造体の界面剥離の問題に容易に展開できるように、有限要素法等で解析を行う際に用いることができることを重視して検討した。

### iii 成果の概要

#### 1) 界面剥離エネルギーとフェーズアングルの重要性

界面の剥離に要するエネルギーは、界面亀裂先端のフェーズアングルに応じて変化する。フェーズアングルは亀裂先端のモード I 応力拡大係数とモード II 応力拡大係数の比によって決まるが、しかし、高強度・高剛性の材料の間に柔らかい接着剤が存在する場合や、降伏応力およびヤング率の差が大きな異種材料が接合され、設計応力を超えたときに材料の一方が大きな塑性変形を生じる場合に生じるフェーズアングルの変化とそれが剥離エネルギーに及ぼす影響は実験・理論の両面から十分に調べられていない。本研究では、モード II の負荷を受ける場合に着目し、特に接着剤の厚さが界面剥離エネルギーに及ぼす影響を知ることが重要である。特に、接着部分の面積に大きく依存する「応力」ではシミュレーションに特性を利用することは難しいために、エネルギー開放率を求めることは重要である。

#### 2) 金属/FRP 接合材料及び試験方法

実験には、Al 合金(7075)と平織連続ガラス繊維強化プラスチック(GFRPs)をエポキシ系接着剤で接着した Al/E<sub>p</sub>/GFRP 接合体を用いた。接合体のヤング率比( $\Omega=EG/EA$ )は $\Omega=0.53$ である。Al 合金の寸法は $150 \times 6 \times 30$  mm(L<sub>Al</sub> $\times$ w<sub>Al</sub> $\times$ t<sub>Al</sub>)とし、GFRP の寸法は $25 \times 6 \times 1$  mm(L<sub>G</sub>F<sub>p</sub> $\times$ w<sub>G</sub>F<sub>p</sub> $\times$ t<sub>G</sub>F<sub>p</sub>)とした。また、GFRP と Al 合金の厚さ比 ( $\eta=tG/tAl$ )は 0.15 となるよう試験片を作製した。エポキシ接着剤の引張降伏強度( $\sigma_y$ )及びせん断降伏応力( $\tau_y$ )は $\sim 20$  MPa 及び $\sim 25$  MPa と変形しやすいものを用い、接着剤の厚さは 100 から 300  $\mu$ m の間で変化させた。接合体の Al 合金と接着剤界面に人工き裂を導入し、界面き裂先端のフェーズアングルが 60° 以上の条件下となるよう負荷を加えた。こ

ここで、フェーズアングルは剥離部先端でのモード II 成分とモード I 成分の比を表す指標である。試験にはバーブ法(例えば、Y.F. Liu, Y. Kagawa Y., A.G. Evans, “Analysis of a "barb test" for measuring the mixed-mode delamination toughness of coatings,” *Acta Materialia*, Vol. 56, No. 1 (2008) pp. 43-49. 53, N.-Y.Cao, Y.-F. Lin, Y. Kagawa, “Finite element analysis of a bard for thermal barrier coating delamination toughness measurement,” *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202. 13 (2008) pp. 3109-3114, N.-Y. Cao, Y. Kagawa, Y.-F. Lin, “Stress analysis of a barb test for thermal barrier coatings,” *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202, 14 (2008) pp. 3413-3418 など)を用いた。この手法は、熱遮蔽コーティングを対象として開発されたものであるが、金属/GFRP 接合体や金属/CFRP 接合体に容易に適用できるものである。

### 3) 界面剥離抵抗の定量評価

荷重を加えると、負荷とともに界面き裂が徐々に進展したのち、荷重はほとんど変化せずにき裂が長くなり、 $a_0 + \Delta a \sim 10 \text{ mm}$  程度で定常状態に達した。き裂は金属と接着剤の界面に沿って進展していた。これらの傾向は接着剤の厚さによらず同様であったが、接着剤の厚さが厚くなると、き裂の進展に要する荷重はさらに大きくなる傾向が見られた。

き裂長さが長くなるほどエネルギー開放率 $\Gamma$ は大きくなる R 曲線挙動が見られた(図 3-2.9.1d-11 (A))。界面の初期導入き裂からき裂が進展し始めるときのエネルギー開放率 $\Gamma_0$ は、 $h_{ad}=100 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m}$  及び  $200 \mu\text{m}$  のとき、それぞれ  $24 \text{ J/m}^2$ 、 $30 \text{ J/m}^2$  及び  $36 \text{ J/m}^2$  であった(図 3-2.9.1d-11 (B))。定常状態のひずみエネルギー開放率  $\Gamma_{ss}$  は、 $h_{ad}=100 \mu\text{m}$ 、 $150 \mu\text{m}$  及び  $200 \mu\text{m}$  のとき、それぞれ  $\Gamma_{ss} \sim 96 \text{ J/m}^2$ 、 $100 \text{ J/m}^2$  及び  $120 \text{ J/m}^2$  であった。これらの結果から、接着剤の厚さが厚くなると  $\Gamma_0$ 、 $\Gamma_{ss}$  はともに大きくなることが明らかになった(図 3-2.9.1d-11 (B))。この結果は、接着剤の層の変形による寄与が大きいことを示していると考えられる。

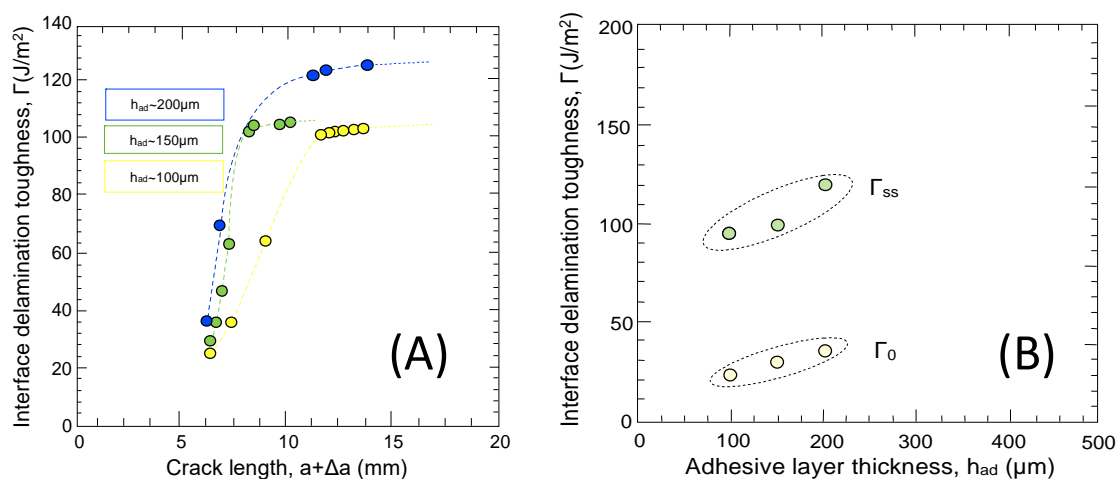


図 3-2.9.1d-11 界面剥離抵抗 $\Gamma$ に及ぼす接着剤層の厚さの影響(A), 剥離開始抵抗  $\Gamma_0$  及び定常状態剥離抵抗  $\Gamma_{ss}$  に及ぼす接着剤層厚さの影響(B)

#### iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性（提言）

本研究で行った界面剥離抵抗を定量的に評価する手法は、小さな試験片を用いて行うことが可能である。しかも、モード II 成分を多く含む条件での接着剥離抵抗を評価することができる。定常状態の剥離抵抗を求めることが可能であることから、実験的に求めた値を構造体の大規模解析に直接利用することができる。すなわち、構造体の界面剥離部先端でのひずみエネルギー開放率とフェーズアングルの関係を求めておけば、金属材料と FRP などの異種材料接合技術開発に大きく役立つといえる。

### ⑫ 宇都宮 裕（大阪大学）

#### i 研究者名/研究テーマ名

宇都宮裕/塑性加工プロセスによるポーラス金属表面への緻密層形成による特性改善の研究

#### ii 研究の目的

本研究は「マルチマテリアル設計」に供するため、塑性加工を利用して輸送機器用の革新的な軽量構造部材を開発することを目的としている。特にポーラス金属は内部に多数の気孔を含むため非常に軽量であり、かつ振動・音波・エネルギーの吸収性にも優れるため輸送機器部材への応用に好適であると考えられる。しかしながら、(a)現状では比強度が不十分であること、(b)構成式が不明で変形の予測が難しいことなどのため、その工業的応用は十分に検討されていない。そこで、本研究では、ポーラス金属を素材として革新的軽量構造部材を実現するため、(1)気孔率の分布の意図的な導入、(2)マクロな形状の成形、(3)材料学的強化、の適用による特性の飛躍的向上を検討する。

#### iii 成果の概要

発泡金属の表面にノンポーラス層を構成すること、すなわち表面緻密化は、プラトー領域の拡大、せん断帯など局所変形の抑制、切欠き効果の低減、他構造物との接合・接着の容易化の点で利点がある。2013 年度は「摩擦攪拌インクリメンタル加工」により、2014 年度は「金属レーザー積層造形法 (SLM)」によりサンドイッチ構造ポーラス金属の創製に成功した。図 3-2.9.1d-12 はレーザー照射された発泡アルミニウムの断面を示したものである。アルミニウム粉末は融解し、発泡アルミニウムと一体化していることが確認された。これにより発泡アルミニウムの表面の 4 面を緻密化して圧縮試験を行ったところ、プラトー応力（低ひずみの領域で、応力が低値一定となる領域の応力）が、2.4MPa となり、無処理材に比べておよそ 20%の向上が見られた。

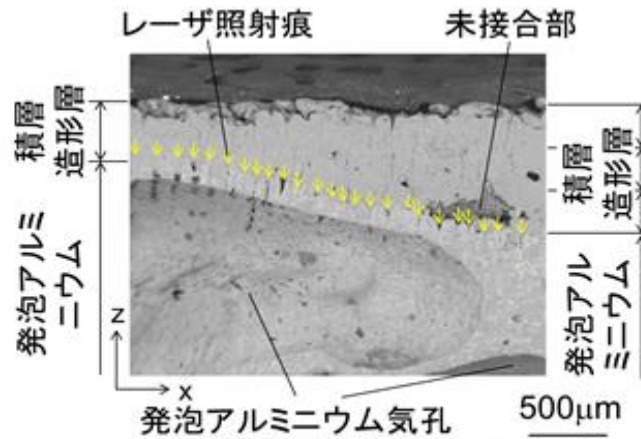


図 3-2.9.1d-12 アルミニウム粉末 - 発泡アルミニウム界面近傍の断面写真

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性 (提言)

ポーラス材料の使用は、構造材料の使用という点でパラダイムシフトを起こす可能性を秘めている。例えば、自動車材料としては、燃費改善を目的に鉄鋼材料からアルミニウムやマグネシウムなどへの転換が検討されている。しかし、鉄鋼材料を高い比強度を有したままでポーラス化し部材に成形できるならば、軽金属材料に対する有利性は保たれる。表面緻密化は、力学特性を改善し、接合等を容易にする点で、簡便ながら有望な手法である。また、ポーラス金属のエネルギー吸収性や低熱伝導性を利用すれば、衝撃吸収材料や振動吸収部材、シールド材などこれまでにない部材が出現する可能性を秘めている。したがって、将来を見据えて応用可能分野を調査しておくことが望まれる。

⑬ 横堀 壽光 (東北大学)

i 研究者名/研究テーマ概要

横堀 壽光/水素環境下での自動車部品材の構造強度保証技術の開発および自動車溶接部の非破壊損傷計測と余寿命評価法の確立

ii 研究の目的

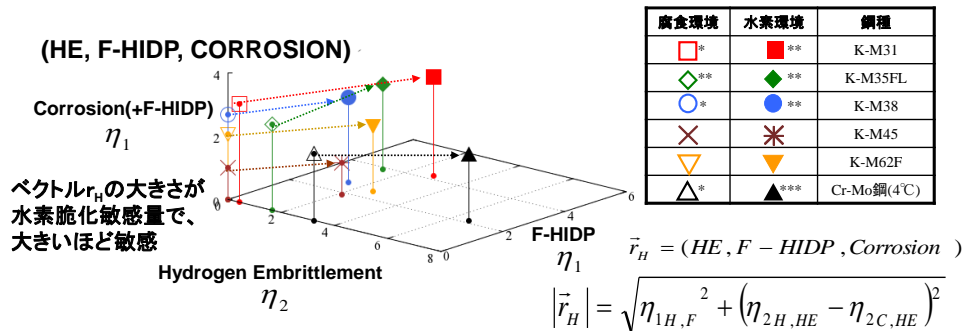
- 1)自動車用部品として使用される種々の電磁ステンレス鋼の水素脆化敏感性を定量的に評価するパラメータを実験により導出し、横堀の提案する水素拡散解析と組み合わせることにより、耐水素脆化材料開発指針の基礎基盤を構築する。
- 2)自動車溶接部の非破壊損傷計測による余寿命評価法の確立を想定したモデル研究として、マイクロスラリーエロージョン法(MSE)を用いた高温クリープ損傷評価と余寿命予測法の構築を行う。

iii 成果の概要

1)水素脆化

横堀が提案した小型試験片を用いた疲労条件下での水素脆化敏感性試験法が燃料電

池で走る自動車の電磁弁に使用される種々の電磁ステンレス鋼に対して適用可能であることを示した。本実験法を用いて系統的実験を行い、水素脆化敏感性を [de-cohesion model] と [HELP] 機構に定量的に分離評価および総合的に評価する方法を提案した。本方法により、Crの含有量を18-20%程度に含ませることが耐水素脆化性の一つの有効な方法であることを見出した。その評価例を下図に示す。



ベクトル $r_H$  値により、実験による水素脆化敏感度の定量オーダリング化に成功し、K-M45の電磁ステンレス鋼が最も $r_H$  が小さく、耐水素脆化性があることを示した。

Steel Type	$\eta_{1C,C}$	$\eta_{2C,HE}$	$\eta_{1H,F}$	$\eta_{2H,HE}$	$ \vec{r}_H $	$N_{Corrosion}/N_{Air}$	$N_{Hydrogen}/N_{Air}$
K-M45	◎ 1.01	○ 0	◎ 1.88	2.11	◎ 2.83	◎ $91 \times 10^{-2}$	◎ $46 \times 10^{-2}$
K-M62F	○ 2.06	○ 0	2.58	3.07	4.01	○ $43 \times 10^{-2}$	○ $19 \times 10^{-2}$
K-M38	2.68	○ 0	2.66	○ 1.45	◎ 3.03	◎ $37 \times 10^{-2}$	◎ $5.1 \times 10^{-2}$
K-M35FL	2.70	1.66	3.86	◎ 1.34	3.87	◎ $13 \times 10^{-2}$	◎ $0.68 \times 10^{-2}$
2.25Cr-1Mo	2.09	3.23	○ 2.15	6.57	3.97	◎ $29 \times 10^{-2}$	◎ $15 \times 10^{-2}$
K-M31	3.11	0.44	4.22	2.84	4.85	◎ $4.0 \times 10^{-2}$	◎ $0.91 \times 10^{-2}$

今後の計画：他の材料への適用と水素拡散解析との比較による材料開発への展開

図 3-2.9.1d-13 各種電磁ステンレス鋼の実験による水素脆化敏感性の定量評価結果 (r 値が小さいほど耐水素脆化性に富む。18-20%の K-M45, K-M38 の r 値が小さい)

2) マイクロエロージョン法を用いた高温クリープ損傷評価と余寿命予測法  
主として、ガスタービンに用いられる Ni 基超合金 (IN100) について研究を行い、横堀の提案するクリープダクティリティと余寿命を評価する QL\*パラメータと MSE を組み合わせて、MSE による微視研削抵抗値からクリープ余寿命を予測する基礎基盤的方法を構築して特許出願している。

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性 (提言)

「水素脆化敏感性評価法」は、アルミニウム合金、Ti 合金や他の鋼材に適用可能であることから、今後は、他の材料への適用を試み、材料開発への貢献を試みる。

「MSE 法による余寿命予測法」は高温時間依存型破壊機構に従う材料の余寿命予測に適用できる。また、本方法を自動車溶接部の非破壊損傷計測に適用するため、現在、SIP 溶接グループの広瀬先生との連携研究の準備を行っている。

#### ⑭ 志波 光晴（物質・材料研究機構）

##### i 研究者名/研究テーマ名

志波光晴/CFRP・金属接合部を対象とした非破壊評価法の開発

##### ii 研究の目的

構造物の軽量化を目的に高比強度材料である CFRP を対象に、CFRP 間や CFRP と金属等の接合、接着の信頼性を保障する非破壊評価手法の基礎検討を行った。高分子系接着剤を用いた接合部の非破壊評価においては、接合欠陥として接着不良や界面剥離があり、接合劣化として水浸漬による材質劣化が課題となる。そこで、代表的な力学測定手法である超音波及び新しい電磁気測定手法としてテラヘルツ波を用いて、各々接合欠陥及び接合劣化の検出についての基礎検討を行った。

##### iii 成果の概要

超音波においては、材料中に存在する閉じた界面への超音波入射による非線形超音波発生メカニズムを検討するため、3次元固体中の閉じた界面の改良型差分法における計算モデルを構築し、それを用いて2次元での現象を検討した。界面を閉じる力としての圧縮応力分布が存在する場合は、1次元でのシミュレーションで得られたのと同様に、界面の開閉口により、超音波透過波形の鋸歯状化が生じることが分かった。また2次元の有限長の閉じた界面においては、界面を閉じるための圧縮応力が存在しない場合でも、入射超音波ビームの音場分布や、界面端部からの超音波の回り込みにより、微小な開閉口現象が生じ、透過超音波波形に影響することが分かった。以上のことから、2次元における界面開閉口現象と観測される波形との関係は、界面の大きさや超音波の音場など、様々な要因が影響することが推測され、今後、様々な条件での計算機シミュレーションによる検討を元にした測定方法の開発が重要と考えられる。

テラヘルツ波においては、THz-TDS で測定した薬液浸漬試験片の複素屈折率は、侵入した薬液の量と線形関係にあった。特に酸が侵入した場合、吸収係数は周波数が高いほど増加が大きい。薬液浸漬試験片の吸収係数は、水（溶媒）と酸（溶質）の質量分率の線形モデルであらわすことができ、これを利用することで吸収係数の変化量から、水と酸の侵入量をそれぞれ求めることが可能である。今回は溶媒と溶質の2成分のみだったが、周波数ごとにモデル式が成り立つため、3成分以上の侵入量を求めることも可能性がある。つまり、多数の溶質が混在するプロセス流体や下水環境で使用される高分子材料の薬液侵入劣化を、THz-TDS によって非破壊で評価することができるようになる。また、塩基性水溶液に浸漬した樹脂試験片は樹脂が腐食し、通常の数倍の水を吸収する。この場合においても、THz-TDS による吸収係数を測定することで、水の侵入量や腐食厚さを評価することが可能であり、高分子系設置薬剤による界面劣化をテラヘルツ波により評価できる可能性が示された。

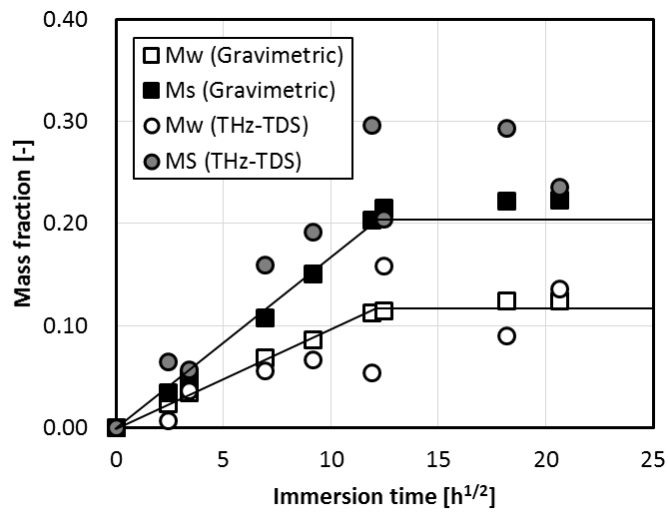


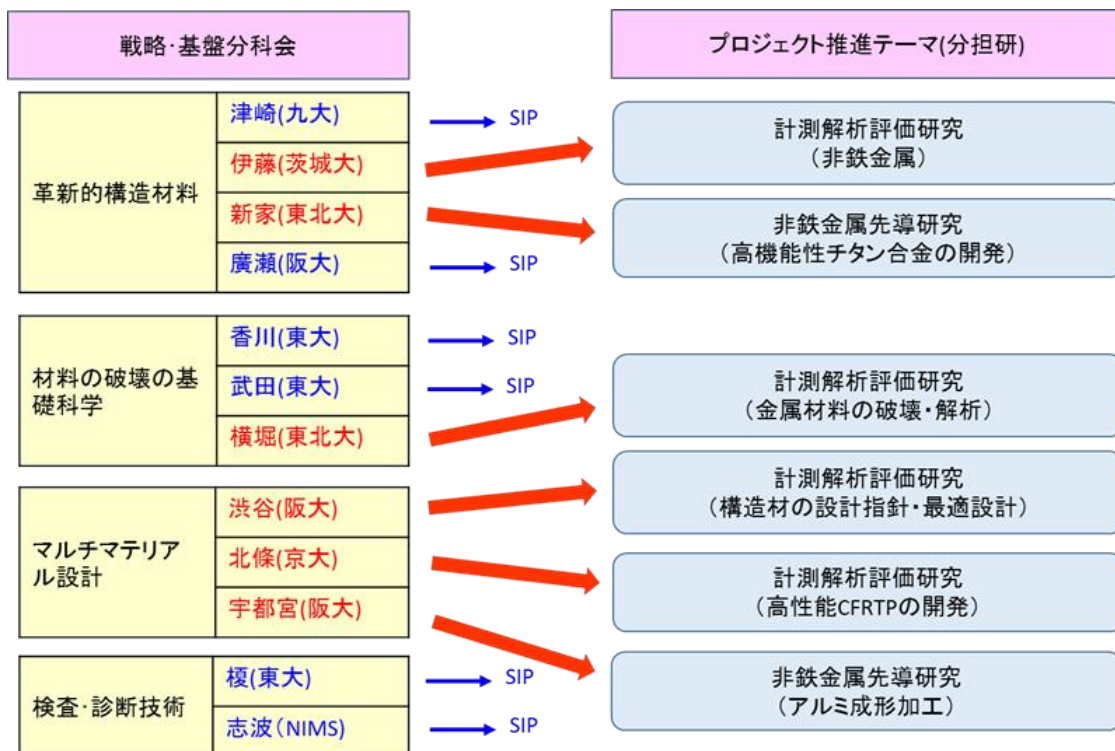
図 3-2.9.1d-14 水と硫酸の質量分率 M<sub>Water</sub>、M<sub>Sulfate</sub> の質量測定 (“Gravimetric”) 及びテラヘルツ (“THz-TDS”) で求めた値の比較

iv ISMA プロジェクトへの成果の展開可能性 (提言)

接合部の検査においては、従来の超音波探傷では検出できない接触した未接合部の検出が重要である。非線形超音波を対象とした計算機シミュレーションにより、非線形超音波を用いることで、この未接着部を検出できる可能性が示され、製造時の非破壊検査の可能性が示された。

高分子系接着剤の信頼性評価に当たり、劣化の評価が重要である。テラヘルツでは、FTIR よりも浸透深さが深い内部の材料特性が評価できる。THz-TDS 法を用いて、複素屈折率吸収係数を測定することで、水の侵入量や腐食厚さを評価することが可能であり、高分子系接着剤による界面劣化をテラヘルツ波により評価できる可能性が示された。

2015年度からは、研究調査委託先研究者の一部がSIPプロジェクト（内閣府）の課題担当研究者に移行すること、また、プロジェクト推進テーマとの関連性をより強くさせて、研究成果の展開をより加速させることを目的として、図3-2.9.1d-15に示すように体制を変更した（戦略・基盤分科会専門委員会委員は、従来どおりの体制で実施している）。



\*小関（東大）、鳥塚（兵庫県立大）は、SIPへ移行

図3-2.9.1d-15 研究調査と推進テーマとの関連性（2015年度より体制変更）



(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.1d-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2013FY	6	10	15	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	28	0	0	0	0	0	1
合計	6	10	43	0	0	0	0	0	1

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.1d-5 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2013FY	0	0	0
2014FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9.1d.3 参考文献

- 1) 岸 輝雄、大平 貴規: 軽金属, 31(1981), 628-634.
- 2) 今村 次男: 軽金属, 49(1999), 302-309.
- 3) 宮川 大海: 金属材料工学(改訂・SI版), 森北出版, (1984), 80-102.
- 4) 一谷 幸司・小山 克己 : Furukawa-Sky Review, 5(2009), 20-28.

## 2.9.1e [テーマ番号 4 1] 「非鉄金属先導研究」(2015 年度)

### 2.9.1e.1 テーマの概要

#### (1)背景と目的

戦略・基盤の再編に伴い、2015 年度では自動車の軽量化を実現する非鉄金属分野の中で革新的低コスト化技術に注目し、2016 年度以降の新しい研究課題につながる加工成型技術について先導的研究を実施した。

#### (2)目標値

粉末冶金法によるチタン合金の製造では塑性変形機構の制御による Ti-Mn 合金の強度－延性バランスの改善を検討する。Mo 等を第三元素として添加することで、引張荷重時に双晶変形が生じ、双晶粒界の形成に伴う加工硬化および双晶誘起塑性による伸びの改善が期待できる、Ti-Mn-Mo 合金の創製を目指す。

発泡アルミニウムの加工技術の研究開発では得られた結果を総括し、「任意の形状・特性を有する軽量高強度の構造部材」の少量多品種製造法として、ポーラス金属の表面およびバルク加工の優位性を考察する。

表 3-2.9.1e-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第 1 中間目標 (2015 年度末)	第 2 中間目標 (2017 年度末)	第 3 中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)
チタン合金の製造技術開発	Ti-Mn-Mo 合金の創製			
発泡アルミニウムの加工技術の研究開発	バルク加工の優位性を考察			

#### (3)全体計画

本事業では、製造プロセスの視点から低コスト化が期待できる粉末冶金法によるチタン合金の製造技術と軽量化と強度の両立を目指した発泡アルミニウムの加工技術の研究開発を行う。

#### (4)実施体制

本テーマは新構造材料技術研究組合（本部）が 2 大学に必要な研究開発を再委託して実施した。

#### (5)運営管理

特記事項無し。

#### (6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030 年度）

特記事項無し。

## 2.9.1e.2 研究開発成果

### (1)最終目標の達成度

表 3-2.9.1e-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
チタン合金の製造 技術開発	Ti-Mn-Mo 合金の創 製 (2015 年度)	加工熱処理等による微細 組織制御方法を確立でき た。	○	
発泡アルミニウム の加工技術の研究 開発	バルク加工の優位 性を考察 (2015 年度)	気孔率の分布の意図的な 導入と微構造制御方法を 確立した。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

### (2)研究開発の成果と意義

本研究で開発した Ti-5Mn-3Mo 合金および 90%冷間圧延を施した Ti-13Mn 合金は、既存の輸送機器用構造材料に比べ、低コストかつより優れた強度－延性バランスあるいは高強度をそれぞれ有する。そのため、これらの合金は、Ti-6Al-4V 合金をはじめとする既存チタン合金にとって代わる可能性を秘めていると言える。また、本研究で実証した第三元素添加による塑性変形機構制御は、今後のチタン合金開発において、重要かつ有益な合金設計の指針となる。

発泡アルミニウムに対して「摩擦攪拌インクリメンタル加工」と、「インクリメンタルハンマリング」を組み合わせた表面塑性加工を適用して表面緻密層を形成することで、プラトー応力が約 1.5 倍にまで向上し、比エネルギー吸収量は、最大 2.5 倍と大幅に向上することを見出した。発泡アルミニウムをアルミニウム管に充填した後に冷間押し出し加工を行い、変形特性と密度変化を基礎的に調査した結果、発泡アルミニウムは押し出し比 10 以上の冷間押し出し加工に耐える変形能を有すること、発泡アルミニウムの押し出しではダイス通過前に大きな体積減少を示した後に押し出しが行われるという特異な押し出し特性を示すことが明らかとなった。

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.1e-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2015FY	2	0	14	2	0	0	0	0	0
合計	2	0	14	2	0	0	0	0	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.1e-4 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2015FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9.1e.3 参考文献

なし。

## 2.9.1f [テーマ番号 4 2 - I] 「材料・接合等技術動向調査研究」(2015 年度～2022 年度)のうち、I. 材料・接合等技術動向調査

### 2.9.1f.1 テーマの概要

#### (1)背景と目的

自動車や航空機などに今後中長期的に求められる構造材料等の在り方を展望した上で、内外の技術動向や政策支援の調査、新しい技術の可能性調査（FS）、基盤研究など、本研究開発の方向性検討に必要な調査を全般的に行い、構造材料に関する研究開発のビジョンの明確化、接合技術および個別材料の技術戦略指針、実用化・事業化に向けた課題抽出を進め、「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトで開発する新構造材料の技術・研究戦略を策定する。

#### (2)目標値

自動車や航空機などに今後中長期的に求められる構造材料等の在り方を展望した上で、接合技術および個別材料技術の研究開発の方向性や目標、新たな研究開発分野などを設定する。特に、FS 研究および新規 FS 研究に係わる技術動向調査や自動車等輸送機器用構造材料の適用技術の動向調査を行う。

表 3-2.9.1f-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第 1 中間目標 (2015 年度末)	第 2 中間目標 (2017 年度末)	第 3 中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)
新たな研究分野の設定	FS 課題の設定	FS 課題の設定	FS 課題のテーマ化	新規 FS 課題のテーマ化と既存テーマの再編・融合
FS 課題の技術動向および適用技術の動向調査	FS 課題進捗に関して組合員への情報発信	FS 課題進捗に関して組合員への情報発信	FS 課題進捗に関して組合員への情報発信の常態化	FS 課題進捗に関して組合員への情報発信の常態化

#### (3)全体計画

マルチマテリアル化に必須の接合技術、個別課題（材料）としての鉄鋼、非鉄（アルミ、チタン、マグネシウム）、CFRP について、自動車等輸送機器に適用されるための技術動向を調査し、今後の方向性を議論し組合員に対して提言する。さらに、新規 FS 課題の抽出を来ない、将来を見据えた推進課題を提言する。

##### ① 融合課題の推進検討

第 1 期および第 2 期での接合、非鉄、鉄鋼、CFRP の研究開発状況・成果・問題点などの現状と対策をベースにして、4 分野の横串を通すことにより分野融合を推進し、将来への推進課題をも検討する。

## ② 各分野分科会の開催

接合、非鉄、鉄鋼、CFRP、戦略・基盤各分科会を設置し、各分科会コーディネーターの先導のもと、各研究分野内での共通課題の抽出、講演会や勉強会を通じた関連情報（技術動向、新技術）の共有等を実施し、参画するメンバー間の議論を深め、今後の方向性を提言する。

## ③ 技術動向調査

接合技術、個別課題（材料）としての鉄鋼、非鉄（アルミ、チタン、マグネシウム）、CFRPについて、自動車等輸送機器に適用されるための技術動向を調査する。また、併せて欧米にて先行する類似の国支援プロジェクト等の進捗状況等についても調査を行う。特に、欧米での高分子系複合材料、複合材料と金属の異材接合、新規高分子材料等の技術動向、金属材料同士の接合およびその周辺技術については、外部の専門機関に再委託して調査を行う。

構造材料用接合技術に関しては、技術課題・動向調査や海外の研究拠点の現地調査を行い、先行する欧州等の技術の現状を把握し、今後の研究の方向性の検討に反映する。

## ④ FS 課題等検討委員会等の開催

各研究課題関係者や外部有識者等からなる複合的な技術検討委員会を開催し、研究開発の円滑な推進に繋げる。

## ⑤ 研究成果等の発信

「国民との科学・技術対話」の趣旨を踏まえ、本プロジェクトの概要や成果、マルチマテリアル化に向けた取り組み等を一般に広く共有することを目的とし、成果報告会や同様の効果を得られる活動等を行う。

## (4)実施体制

本テーマは新構造材料技術研究組合（本部）が、外部機関への再委託も含めて実施した。

## (5)運営管理

特記事項なし

## (6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度）

特記事項なし

## 2.9.1f.2 研究開発成果

### (1)最終目標の達成度

表 3-2.9.1f-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
新たな研究分野の 設定	FS 課題のテーマ化	総計 10 課題（中性子、 接着、腐食、遅れ破壊、 マグネ MI、マルチマテ リアル設計、異材接合、 LCA、耐食性向上、研究 拠点整備）テーマ化	○	
	各分野テーマの再 編および融合	後半検討課題案の策定	○	
FS 課題の技術動 向および適用技術 の動向調査	FS 課題進捗に関し て組合員への情報 発信の常態化	成果報告会、TL 会議等 にて組合員と情報共有	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

### (2)研究開発の成果と意義

総計 10 課題について調査委員会を設置し、当該課題について何を研究開発するべきか検討し、テーマ化した。図 3-2.9.1f-1 に実績を示す。

融合推進検討員会では、各テーマで開発された技術のテーマ間連携について検討し、テーマ再編やテーマ間での技術連携を図った。

2014 年度（2015 年 1 月）より毎年度後半に成果報告会を開催し、広く一般に「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトの成果を発信した。2017 年度より、オーラルセッションに加えて、ポスターセッションも開催し、研究者との意見交換が出来る機会を設けた。また、オーラルセッションの発表資料、ポスターの来場者、登録者への配布を行った。

技術動向調査については、主として海外の技術動向について外部の調査機関を利用して調査し、組合内で報告会を開くなど研究開発に生かした。

課題	年度	テーマ29	テーマ42-I								
		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
中性子等による 構造材料等 解析技術	調査委員会										
	FSテーマ										
	本テーマ										
構造材料用 接着技術	調査委員会										
	FSテーマ										
	本テーマ										
鉄鋼材料の 腐食検討	調査委員会										
	FSテーマ										
	本テーマ										
鉄鋼材料の 遅れ破壊 (水素脆化)	調査委員会										
	FSテーマ										
	本テーマ										
マルチマテリアル 設計技術	調査委員会										
	FSテーマ										
	本テーマ										
マグネ材の MI活用	調査委員会										
	FSテーマ										
	本テーマ										
継手仕様 検討	調査委員会										
	FSテーマ										
	本テーマ										
L C A	調査委員会										
	FSテーマ										
	本テーマ										
マルチマテリアル 信頼性設計- データ等活用拠点	調査委員会										
	FSテーマ										
	本テーマ										
マルチマテリアル 腐食性評価 耐食性向上	調査委員会										
	FSテーマ										
	本テーマ										
融合推進検討委員会											

図 3-2.9.1f-1 調査委員会からのテーマ化実績



(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.1f-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2017FY	0	0	0	0	0	0	0	0	2
2018FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2019FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2020FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2021FY	0	0	0	0	0	0	0	0	3
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	12

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.1f-4 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2015FY	0	0	0
2016FY	0	0	0
2017FY	0	0	0
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
2020FY	0	0	0
2021FY	0	0	0
2022FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9.1f.3 参考文献

なし。

## 2.9.1g [テーマ番号 4 3] 「計測解析評価研究」(2015 年度～2017 年度)

### 2.9.1g.1 テーマの概要

#### (1)背景と目的

戦略・基盤の再編に伴い、2015 年度では計測解析評価研究として、自動車の軽量化を目指す材料開発の実現に資する基礎基盤的な研究を行う。本課題では共通的な自動車車体の設計技術、破壊機構の改善技術（破壊抑制理論構築、応力腐食割れの改善、繊維の方向による強度のばらつきの要因解析）および、より精度の高い分析技術に注目し、2016 年度以降の研究を推進および新しい研究課題発掘となる計測解析評価研究を行うことを目的とする。

#### (2)目標値

金属材料や複合材料における材料と破壊の問題に対する基礎科学的アプローチの検討や中性子線による材料評価による評価解析データ構築を進め、製品の実現において重要となる材料の高信頼性化あるいは効率的なスクリーニングのための非破壊評価方法やプロセスモニタリングに関する手法等の提言を行う。

表 3-2.9.1g-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第 1 中間目標 (2015 年度末)	第 2 中間目標 (2017 年度末)	第 3 中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)
金属材料の研究	材料強度特性に及ぼす強化組織の影響を明らかにする	事前に破壊を防止する破壊制御理論を構築		
軽量金属材料の研究	疲労特性・応力腐食割れ改善の可能性を検討	疲労および水素脆化の解明		
マルチマテリアル設計－複合材料の研究	積層構造の各部位での強度特性を評価する手法を開発	積層層内の破壊力学特性を層内と区別して評価する手法の開発		
構造体の強度・位相最適化設計の研究	構造健全性の評価	接合界面強度を低減させた構造を探索する最適化手法の構築		
1.5 世代中性子源の開発	電子入射システムとモジュレータの新造	構造材料評価についての測定時間を 1/3 程度にまで短縮する		

熱可塑性 CFRP 製造プロセス最適化の研究	(本テーマは 2016 年度から実施した)	熱可塑性成形プロセスシミュレーション技術の構築		
超高強度自動車ホットスタンピング部材の耐遅れ破壊性に及ぼす合金添加元素と組織の影響	(本テーマは 2017 年度から実施した)	耐遅れ破壊性に及ぼす添加元素の影響を明確にする		

### (3)全体計画

2014 年度の研究から絞られた 4 つの課題と新規の分析技術、プロセス最適化技術に特化し事業を行う。

中高炭素鋼や非鉄金属材料において非破壊的に余寿命を予測する方法の構築を完成させるとともに耐水素脆化に寄与する材料工学的要因を特定する。

非鉄金属では 7000 系および 2000 系アルミニウム合金の疲労特性について、両者の差の原因を実験的に解明し、7000 系合金の疲労特性改善の可能性を検討する。

CFRP 等の複合材料においては板厚方向に引張り応力が作用する場合を想定して、積層層内の破壊力学特性を層内と区別して評価する手法の開発に取り組む。

自動車車体のマルチマテリアル化による構造健全性の評価方法を開発し、マルチマテリアル化の最適構造を得るために、接合界面強度を低減させた構造を探索する最適化手法を構築する。

中性子線評価装置については加速器部のうち、劣化の激しい電子入射システムとモジュレータを新造し 1.5 世代器に更新する。

炭素繊維/樹脂マイクロモデルにより評価される応力規準に基づく熱可塑性 CFRP の製造プロセスの最適化技術を構築する。

ホットスタンピングサンプルの作製や遅れ破壊試験を実施するための試験装置を開発し、最適な評価方法を提案する。

### (4)実施体制

本テーマは、新構造材料技術研究組合（本部）から 7 大学に再委託して実施した。

### (5)運営管理

各研究開発項目共に年 2 回の成果報告会での報告および ISMA での進捗報告会を実施した。

### (6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030 年度）

特記事項なし。

## 2.9.1g.2 研究開発成果

### (1)最終目標の達成度

表 3-2.9.1g-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
金属材料の研究	事前に破壊を防止する破壊制御理論を構築 (2017年度)	電磁ステンレス鋼の水素脆化（HE）に関して、耐水素脆化性に有効な化学成分が特定された。 金属の高温強度に関しては、経年劣化材の余寿命を予測する方法を確立した。	○	
軽量金属材料の研究	疲労および水素脆化の解明 (2017年度)	7000系および2000系合金の疲労き裂進展挙動に及ぼす試験環境の影響を明らかにした。	○	
マルチマテリアル設計－複合材料の研究	積層層内の破壊力学特性を層内と区別して評価する手法の開発 (2017年度)	薄層化CFRTP積層板の損傷抑制性能と力学特性に与える影響を解明した。	○	
構造体の強度・位相最適化設計の研究	接合界面強度を低減させた構造を探索する最適化手法の構築 (2017年度)	接着接合における接合強度評価手法と解析手法を確立した。	○	
1.5世代中性子源開発	構造材料評価についての測定時間を1/3程度にまで短縮する (2017年度)	第1世代中性子源の運転を終了し、その後解体および1.5世代器の設置工事を進め、加速器の設置と加速器部全ての物理的接続が終了し、完工した。	○	
熱可塑性CFRP製造プロセス最適化の研究	熱可塑成形プロセスシミュレーション技術の構築 (2017年度)	強度モデルと熱可塑シミュレーション手法の開発を実施するにあたっての基礎となるイメージベースモデリング技術について実用上問題ない精度でモデル化可能な技術を開発できた。	○	

超強度自動車 ホットスタンピング部材の耐遅れ破壊性に及ぼす合金添加元素と組織の影響	耐遅れ破壊性に及ぼす添加元素の影響を明確にする (2017年度)	組織構造と遅れ破壊の関係について基礎的な知見得ることができた。更に組織構造の異なる素材の遅れ破壊特性について明確にすることができた。	○	
--	-------------------------------------	--	---	--

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

## (2)研究開発の成果と意義

### ① 金属材料

電磁ステンレス鋼の水素脆化（HE）に関して、横堀等が提案する試験法と水素拡散解析法に基づいて、耐水素脆化性に有効な化学成分が特定された。さらに、1500MPaの強度を有する高強度材について、腐食環境下で誘起される疲労き裂成長速度に及ぼす水素脆化敏感性試験を行った。

金属の高温強度に関しては、単結晶および多結晶 Ni 基超合金に注目して、横堀の提案するクリープ延性なる指標、QL に基づいて、経年劣化材の余寿命を予測する方法を確立した。

### ② 軽量金属材料

7000系および2000系両合金における疲労き裂進展挙動の違いに水素脆化が関係するかどうかを探る目的で、両合金の疲労き裂進展挙動に及ぼす試験環境の影響を調査した。その結果、湿潤環境で試験した7075系合金が最もき裂が進展しやすい結果となった。7075合金と類似の組成を有するAl-Zn-Mg系の試料においてき裂進展しやすい傾向を確認した。

### ③ マルチマテリアル設計－複合材料

薄層化CFRTPプリプレグを用いて、層厚の薄い積層板と、層厚を3倍として厚くした積層板の二種類の直交積層板を製作し、これらの結果を比較することで、薄層化に伴う損傷発生メカニズムの違いについて検討を試みた。CF/PA6材におけるトランスバースクラック発生のエネルギー解放率の臨界値は310 J/m<sup>2</sup>以上であり、熱可塑性樹脂利用に伴う高じん化が、薄層CFRTP積層板における損傷抑制に対して顕著な効果をもたらしていることが明らかとなった。

### ④ 構造体の強度・位相最適化設計の研究

自動車に代表される輸送機器の軽量化に不可欠なマルチマテリアル化に対して、接着を含めた接合構造の強度を最大にする被接合材料の最適界面形状設計手法の提案を行った。そのために、異種材料の界面強度問題を対象に、実機での応力状態を想定した界面の多軸応力状態の破損則を同定するために、薄肉円管を用いた簡便な評価試験方法とその解析手法の提案を行った。

⑤ 小型中性子源を利用した鉄鋼材料測定をシームレスに進めるための 1.5 世代中性子源開発

低エネルギー加速器部、高周波導波管部などを全て含む線形加速器統合製作および設置 1 式、ライナック用冷却装置 1 式、冷中性子用クライオスタットを製作した。これら装置構成ブロック全てが揃い、第 1 世代中性子源の運転を終了し、その後解体および 1.5 世代器の設置工事を進め、加速器の設置と加速器部全ての物理的接続が終了し、完工した。

⑥ 熱可塑性 CFRP 製造プロセス最適化の研究

強度モデルと熱可塑シミュレーション手法の開発を実施するにあたっての基礎となるイメージベースモデリング技術については、実用上問題ない精度でモデル化可能な技術を開発できた。

炭素繊維の体積含有率で強度予測が可能となれば、材料開発に明確な目標を設定できることになり、さらには製造管理技術としても有望な技術となると考えられる。

⑦ 超高強度自動車ホットスタンピング部材の耐遅れ破壊性に及ぼす合金添加元素と組織の影響

ホットスタンピング工程における加熱温度や冷却速度を変化させて組織を制御し、材料特性の関係について検討した。塑性加工を加えるホットスタンピング (HS) に加え、水焼入れ (WQ) や金型に挟んで冷却するホットプレス工程 (HP) でサンプルを作製し、機械的特性について調査した。鋼材に C と P の添加量を変化させて、機械的特性を評価した。C の増加に伴い、引張り強度及び延性は増加傾向を示した。しかし、P の添加量を増やしても機械的特性の変化は確認できなかった。両サンプルに水素チャージして、機械的特性を評価した結果、全てのサンプルにおいて同様な低下傾向を示した。水素脆化により、強度と破断ひずみは低下したが、弾性率はわずかに上昇した。

(3)成果の普及 (論文、外部発表等)

表 3-2.9.1g-3 論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2015FY	2	4	5	0	0	0	0	0	1
2016FY	3	4	17	3	0	0	0	3	1
2017FY	2	5	12	0	0	0	0	0	1
合計	7	13	34	3	0	0	0	3	3

※実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.1g-4 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2015FY	0	0	0
2016FY	0	0	0
2017FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9.1g.3 参考文献

なし。

## 2.9.2 [テーマ番号 5 6] 「新材料の材料代替効果定量技術の開発 (FS 研究)」 (2018 年度)

### [テーマ番号 4 2 - II] 「材料・接合等技術動向調査研究 (新材料の材料代替効果定量技術の開発)」 (2019 年度～2022 年度)

#### 2.9.2.1 テーマの概要

##### (1) 背景と目的

「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクト全体で実施している新規構造材料開発において、新たな技術により開発した材料の代替効果を求めることや、KPI (Key Performance Indicator) を見だしそこに研究開発の資源を投入することは重要である。しかし、材料のライフサイクルは製品のライフサイクルとは異なるため、既存の製品を対象とした LCA 手法では総合的な材料代替効果を求めるための評価ができない。本事業では、材料代替効果を定量的に求めるために、材料の物質フローやリサイクル性なども加味した、材料のライフサイクル全体を評価できる評価手法の構築を行い、その手法を研究開発現場で活用可能な評価ツール開発を行う。評価において考慮すべき項目の洗い出しを製品ライフサイクル毎に実施し、評価軸の設定の妥当性や実現性、時間的空間的システム拡張、リサイクル性、物質フローを勘案した、プロトタイプの定性的な評価手法を提案する。また、新材料の材料代替効果の評価ツールの基本コンセプトを検討する。

プロジェクトで開発している材料等を念頭に、そのマテリアルライフサイクルをシステム境界とする手法を構築する。従来の評価では製品のライフサイクルをシステム境界とし、製品ライフサイクルの最初におけるスクラップの利用と最後におけるスクラップの回収を一意に評価する手法が確立されてこなかったため、本研究では、リサイクルが考慮された手法を開発する。ただ、リサイクルは常に同じ材料にリサイクルされる訳ではなく、さらには材料が製品に搭載されてからその製品の使用期間後である。そのため、当該材料の物質フロー分析等から得られる情報を LCA 評価へインプットする必要もある。さらには、代替する材料間で、その材料がライフサイクルで発現する機能が同じとは限らない。例えば、高強度化により軽量化したものの、メンテナンス性が減少するなど、代替する材料ならびに代替される材料それぞれのライフサイクルにおけるなるべく多くの機能性の側面を考慮した手法を検討する。金属系材料、樹脂系材料、複合材料等、さまざまな材料に応じて材料生産・加工に関わるプロセスは異なるため、それらも整理する。最後に、材料間を定量的に比較するために、ここで構築した手法に必要なインベントリデータ等の各情報を収集するが、その入手可能性にも応じて手法も再度検討する。提案する手法は、LCA の専門家との議論を経て、従来の製品 LCA 手法との違いについても確認する。



## (2)目標値

表 3-2.9.2-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第1中間目標 (2015年度 末)	第2中間目標 (2017年度 末)	第3中間目標 (2020年度 末)	最終目標 (2022年度 末)
①新材料の材料 代替効果の評価 手法の構築 (18～22年度)			<ul style="list-style-type: none"><li>・新材料の材料代替効果の評価枠組みの提案</li><li>・素材ごとのリサイクル性を評価する指標の提案</li><li>・評価に必要な物質フローデータの枠組みの提案</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・時間的空間的に拡張したLCA手法を完成</li><li>・リサイクルによる回避効果を配分する手法を完成</li><li>・環境・社会・経済影響評価をユーザのニーズを反映して選定</li></ul>
②新材料の材料 代替効果評価用 インベントリ データベースの 開発 (20～22年度)			<ul style="list-style-type: none"><li>・インベントリデータの整備</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・ツールに必要なデータの整備</li><li>・将来シナリオの作成とインベントリデータベースへの反映</li><li>・リサイクルプロセスのインベントリ作成</li><li>・各統計用途別項目の選定と用途別需要量の配分</li></ul>
③新材料の材料 代替効果の評価 ツールの開発 (18～22年度)			<ul style="list-style-type: none"><li>・新材料の材料代替効果の評価ツールのプロトタイプ構築</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・新材料の材料代替効果の評価ツールの完成</li><li>・ツールを用いた ISMA プ</li></ul>

			プロジェクト内の材料評価
--	--	--	--------------

### (3)全体計画

事業項目	2018年度				2019年度				2020年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
① 新材料の材料代替効果の評価手法の構築												
①-1.材料代替効果評価手法の構築			材料代替効果評価手法の構築									
①-2.材料の物質フロー解析			材料の物質フロー解析									
①-3.リサイクル性の評価手法開発			リサイクル性の評価手法開発									
①-4.環境負荷のデータ整備および算定			環境負荷のデータ整備および算定									
①-5.時間的空間的システム拡張による consequential LCA手法の開発										手法開発		
①-6.リサイクル効果を考慮したライフサイクルインベントリ手法論の開発										リサイクル効果		
①-7.環境・社会・経済影響評価の開発										環境・社会・経済影響評価の開発		
② 新材料の材料代替効果評価用インベントリデータベースの開発												
②-1.IDEAにおける材料データの整備										材料データ整備		
②-2.将来シナリオに基づくインベントリデータの整備										将来シナリオに基づくインベントリデータ整備		
②-3.材料リサイクルに関わるインベントリデータの整備										材料リサイクルに関わるインベントリデータ整備		
②-4.物質フローデータのIDEA物量速関表への統合										物質フローデータのIDEA物量速関表への統合		
③ 新材料の材料代替効果の評価ツールの開発												
③-1.材料代替効果の評価ツールの開発										材料代替効果の評価ツール開発		
③-2.材料代替効果の評価ツールによる評価										材料代替効果の評価ツールによる評価		

図 3-2.9.2-1 全体計画 (2018-2020 年度)

事業項目	2021年度				2022年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
① 新材料の材料代替効果の評価手法の構築								
①-1.材料代替効果評価手法の構築								
①-2.材料の物質フロー解析								
①-3.リサイクル性の評価手法開発								
①-4.環境負荷のデータ整備および算定								
①-5.時間的空間的システム拡張によるconsequential LCA手法の開発			手法開発					
①-6.リサイクル効果を考慮したライフサイクルインベントリ手法論の開発			リサイクル効果					
①-7.環境・社会・経済影響評価の開発			環境・社会・経済影響評価の開発					
② 新材料の材料代替効果評価用インベントリデータベースの開発								
②-1.IDEAにおける材料データの整備			材料データ整備					
②-2.将来シナリオに基づくインベントリデータの整備			将来シナリオに基づくインベントリデータ整備					
②-3.材料リサイクルに関わるインベントリデータの整備			材料リサイクルに関わるインベントリデータ整備					
②-4.物質フローデータのIDEA物量連関表への統合			物質フローデータのIDEA物量連関表への統合					
③ 新材料の材料代替効果の評価ツールの開発								
③-1.材料代替効果の評価ツールの開発			材料代替効果の評価ツール開発					
③-2.材料代替効果の評価ツールによる評価			材料代替効果の評価ツールによる評価					

図 3-2.9.2-2 全体計画 (2021-2022 年度)

#### (4)実施体制

##### (1) 共同実施体制スキーム

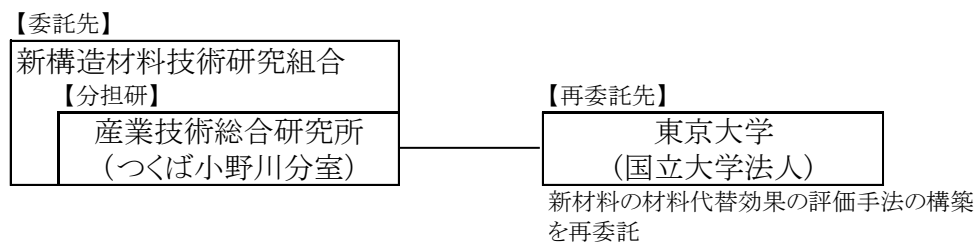


図 3-2.9.2-3 実施体制(2018 年度)

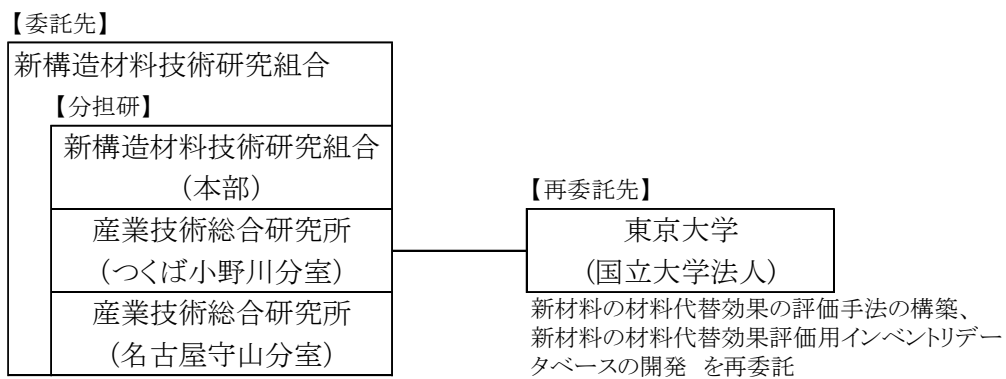


図 3-2.9.2-4 実施体制(2019～2021 年度)

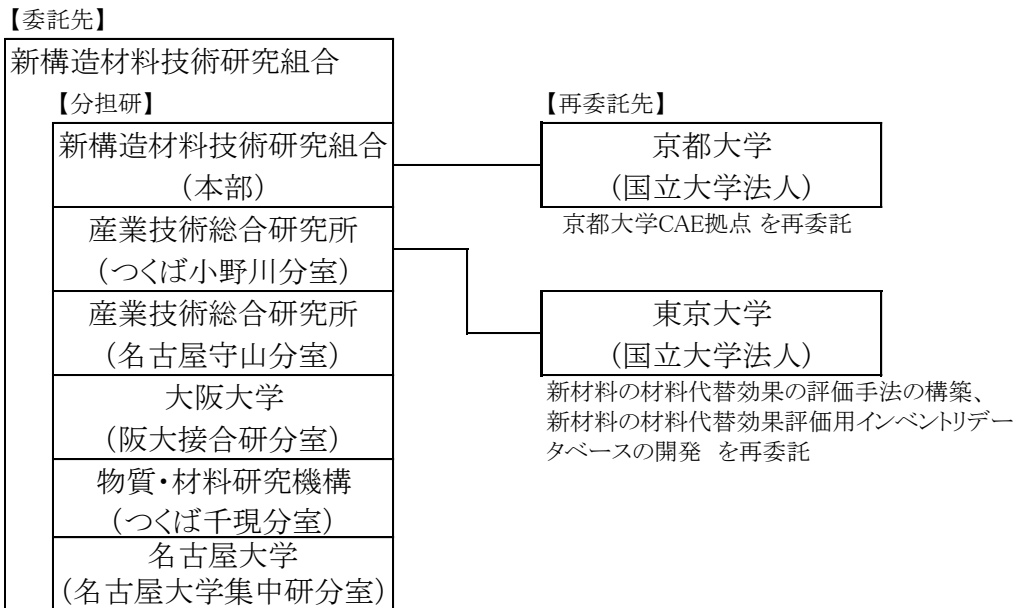


図 3-2.9.2-5 実施体制(2022 年度)

## (5) 運営管理

プロジェクトの運営にあたっては、プロジェクト構成機関で構成する会議を月1回程度実施し、プロジェクトの進捗を管理した。また、テーマ毎の会議は適宜実施され、全体会議で情報共有を図った。

## (6) 実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度）

- ・マルチマテリアル化した車両の代替効果を定量的に評価することで、環境性、経済性、社会性が担保された技術であることを裏付けすることができる。
- ・評価結果を開発現場にフィードバックすることにより、より効果的なマルチマテリアル化を実現することが可能である。

### 2.9.2.2 研究開発成果

#### (1) 最終目標の達成度

表 3-2.9.2-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度※	未達の場合 原因と解決 方針
	(最終年度)			
① 新材料の材料代替効果の評価手法の構築	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 時間的空間的に拡張したLCAの手法を完成させる</li> <li>・ リサイクルによる回避効果を配分する手法を完成させる</li> <li>・ 環境・社会・経済影響評価をユーザのニーズを反映して選定する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 将来シナリオが分析できるように時間的拡張</li> <li>・ 海外における需給予測は反映できるように空間拡張</li> <li>・ アルミニウムのリサイクル効果の配分方法が切り替わる時期でシナリオが変化する手法の構築</li> <li>・ 正確に材料選択が出来るSCLA手法の構築</li> </ul>	○	
② 新材料の材料代替効果評価用インベントリデータベースの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ツールに必要なデータの整備</li> <li>・ 将来シナリオの作成とイベントリデータベースへの反映</li> <li>・ リサイクルプロセスのイベントリ作成</li> <li>・ 各統計用途別項目の選定と用途別需要量の配分</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ BAU、STEPS、SDSシナリオを元にした将来シナリオの構築</li> <li>・ エネルギーモデルのインベントリへ反映</li> <li>・ 新材料の技術的課題と経済的課題の整理</li> <li>・ 引き取り輸送、解体、部品取り、プレスのプロセスインベントリデータの収集</li> </ul>	○	
③ 新材料の材料代替効果の評価ツールの開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 新材料の材料代替効果の評価ツールの完成</li> <li>・ ツールを用いたISMAプロジェクト内の材料評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Webベースツールを開発しβ版利用者への展開とフィードバックを受けたツールの改良</li> </ul>	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

## (2)研究開発の成果と意義

### ①新材料の材料代替効果の評価手法の構築

#### ①-5. 時間的空間的システム拡張による consequential LCA 手法の開発

将来世代においても後悔しない材料代替を実施するためには、時間的・空間的の拡張をした定量評価手法により材料代替効果を算出する必要がある。そのためには、既存の LCA 手法では将来を考慮した代替効果の算出はできず、新たな手法を開発する必要がある。

新しい手法では、時間的な拡張を行うために時間解像度を1年として、②-2の将来シナリオに基づき毎年のインベントリデータベースを作成して製品のライフサイクルを通じた環境負荷を計算できるようにする。具体的には、2020年に製造する乗用車は、2020年のインベントリデータベースを用いて製造段階の環境負荷を算出し、2021年～2033年までの13年間を使用する場合、各年のガソリン燃焼や電力のインベントリデータを使用し環境負荷を算出する。最後に2033年に廃棄を行う場合、2033年の廃棄プロセスデータを用いて算出することになる。また、空間的拡張は、輸出入を考慮して、日本とそれ以外の国を分けたデータベースにより環境負荷を算出できるようにする。これにより我が国のスクラップの過不足などの影響や素材の海外依存度などが定量的に算出できる。

これまでの LCA で使用されてきたプロセスベースの LCI データベースである、IDEA や ecoinvent を時間的な観点で見ると、ここ 20～30 年程度の間調査された多くの LCA の調査から得られた単位プロセスデータを基本的な骨格として持った上で、その骨格に対して、比較的統計情報の更新が頻繁にされている電力や貿易、生産量、エネルギーといった統計データで補完、肉付けをしながら、開発がなされている。一方、エネルギーシステムやインフラ、自動車、これらを支える金属材料といった評価対象に関しては、これらの評価対象自体のライフサイクルは数年～数十年にも及び、現在のバックグラウンドデータだけを用いて算定を行うことは、将来の技術革新や社会の将来像を無視しながら算定することになり、妥当でない可能性がある。LCA が意思決定を補助するツールであることを考えると、将来の各種シナリオに対応した LCI データベースの開発が必要とされてきている。LCI データベースの時間的拡張が重要になる意味について次図で示す。

### 自動車のライフサイクル

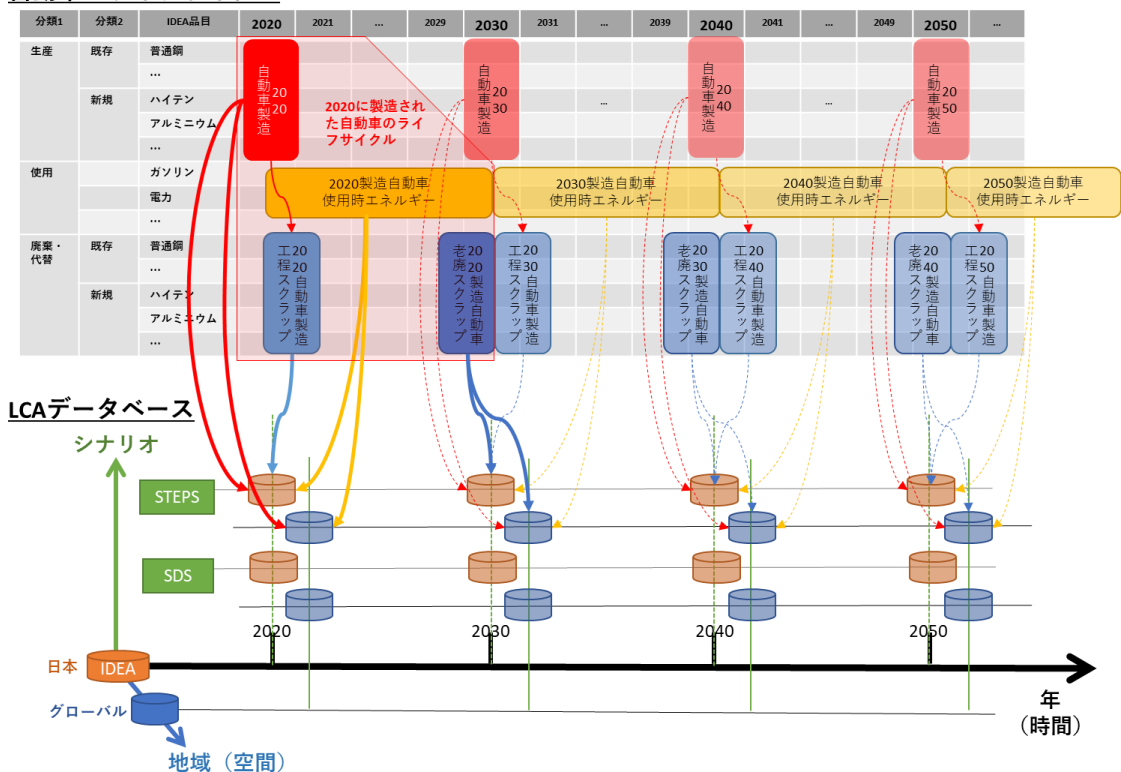


図 3-2.9.2-6 自動車のライフサイクルと時間的に拡張された LCA データベースの関係性

ISMA プロジェクトでは、2020 年～2050 年をその評価対象の時間範囲として指定しているが、例えば、2020 年に作られ、10 年走行し、2030 年に廃棄・リサイクルされる自動車を考える。アルミニウムを 1 単位生産するための GHG 排出量といった環境負荷は、精錬を行う地域の電力の発電方法の影響を強く受ける材料であり、将来の電力ミックスの影響を色濃く受けることになる。このような金属材料は、その製造過程だけでなく、一定期間製品として用いられた後にリサイクルされ、新規材料の製造を回避するといった効果も評価されなければならないが、自動車や建物のように一定のまとまった時間使用されることが前提となる製品で使用される材料は、この材料が製造した時点の負荷と、リサイクルした時点における製造負荷が異なることがあり得、その結果、回避効果も時間の推移とともに大きく異なることが有り得る。また、同じ鉄スクラップでも、鉄の加工工程で発生したスクラップは 2020 年のバージン鉄の生産を回避し、自動車に含まれ一定期間使用された後の老廃スクラップは 2030 年のバージン鉄の生産の回避をするといった状況となる。このような場合 2020 年と 2030 年におけるバージン鉄の製造エネルギーが異なれば、その回避効果は異なり、結論も変化することになる。

これまでの LCA のケーススタディでは、評価対象のライフサイクルが、LCA データベースが指定する時間時点で、材料の製造①・製品の生産・製品の使用・材料のリサイクル・材料の回避効果（材料の製造②の回避）が全て同じ時間軸で発生するとし



て扱われることが通常であったが、時間的な拡張の要素を加えることで、「2020 年における材料の製造」と「2030 年における材料の製造」を異なる製造プロセスとして扱うことができる。また、その際あり得る未来も一つだけではなく、シナリオ A の 2030 年、シナリオ B の 2030 年といったように複数の社会シナリオに対応したデータベースを準備することで、利用者が見たいと思う将来シナリオにおける環境影響評価をより精緻に実施できるようになる。

図 3-2.9.2-7 に示した枠組みのように新しい手法では、時間的な拡張を行うために時間解像度を 1 年として、②-2 の将来シナリオに基づき毎年のインベントリデータベースを作成して製品のライフサイクルを通じた環境負荷を計算できるようにした。また、リサイクル性評価の結果の反映、MFA の分析結果を加味したライフサイクルインベントリデータベース IDEA を構築した。また、空間的拡張は、日本とそれ以外の国を分けたデータベースにより環境負荷を算出できるようにした。これにより我が国のスクラップの過不足などの影響や素材の海外依存度などが定量的に算出できるようになる。

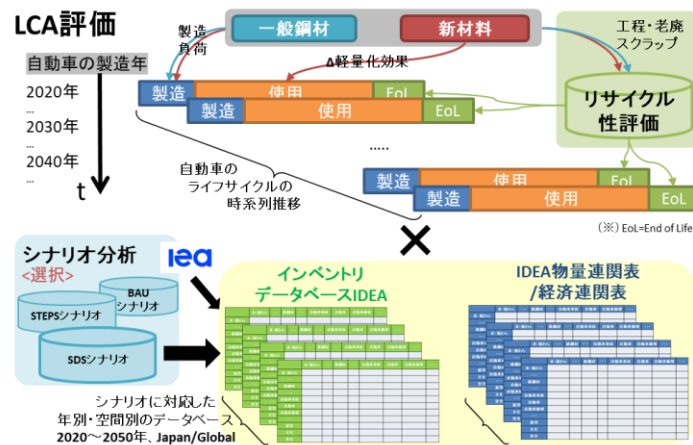


図 3-2.9.2-7 開発している手法の枠組み

①-6. リサイクル効果を考慮したライフサイクルインベントリ手法論の開発

材料代替効果の評価手法について、2021年度は、材料メーカーの革新材料の開発現場において評価手法を用いることができるよう、開発した革新材料の材料特性値と、自動車用構造材として用いた際の従来材料に対する材料代替率の関係式を開発した。また、昨年度まで開発してきたリサイクル効果の手法論について、欧州の製品環境フットプリントパイロットプロジェクトの成果がまとまったことから、当該プロジェクトにおいて考慮されているリサイクル効果の手法論について整理し、本研究で提唱する手法論との違いについて検討した。また、リサイクル性評価においては、鉄鋼材、アルミニウム素材、マグネシウム素材、CFRPについて、それらのリサイクル性に関する元データの収集や、リサイクルプロセスのインベントリデータの整備、あるいは、二次資源を用いたリサイクルプロセスやリサイクル材の技術的制約について研究を進め、リサイクル効果の評価における参照情報として整理した。

①-7. 環境・社会・経済影響評価の開発

社会的影響評価において、従来の社会ホットスポットデータベースや UNEP/SETAC の社会 LCA ガイドラインをもとにし、” more good ” と ” less bad ” という新しいコンセプトを導入することで、事業者の SDGs に寄与する取組みが LCA の枠組みのもとで評価できる手法を開発した。LCA の影響領域選定に向けた金属産業と SDGs の関係性分析では、金属メーカーの SDGs 報告の網羅的な調査に基づいて、金属産業が認識している 17 目標との関係の強さや、生産する金属による関係性の違いに着いて分析を実施した。LCA を環境影響評価から経済、社会影響へと拡張する際には影響領域の選定が必要であるが、このような分析で金属産業と経済、社会側面の接点を明らかにすることが選定基準の 1 つとなる。

## ②新材料の材料代替効果評価用インベントリデータベースの開発

### ②-1.IDEAにおける材料データの整備

マグネシウム素材、CFRPなどの新材料は従来から十分にリサイクルされておらず、マルチマテリアル化された新材料は適切なリサイクルシステムのあり方に関する情報が不足している。ここでは、当該新素材の使用済み製品から分離・回収され、自動車用途等にリサイクルされているプロセスについて、その将来技術も含めて調査しインベントリデータを作成した。

また、本テーマでは日本における乗用車の製造にかかる環境影響を調査する必要があるが、日本ではサイズや種類について多種多様な乗用車が製造されている。その全てについて製造時の環境影響を調査することは現実的ではないため、日本国内で一般的に普及している自動車のモデルを作成した。作成には、現在の国内販売実績などを加味し選定された自動車について、実機の解体調査を行うことにより、部位別に使用される材料の種類、重量等のデータを収集した。これらのデータや既往の文献などを用いて、4つのパワートレイン別に環境影響評価を行う代表車種、ガソリン自動車

(ICEV)、ハイブリッド自動車(HEV)、プラグインハイブリッド自動車(PHEV)、電気自動車(BEV)の4つのパワートレイン別に代表車種を選択し、乗用車製造時のインベントリデータについて自動車実機の解体調査や既往の文献などを用いて推計した。データの使用には限界があるものの、一貫性のある方法で比較的透明性の高いと思われる文献を用いたため、ある程度の品質を保つインベントリデータを整備することができた。

### ②-2. 将来シナリオに基づくインベントリデータの整備

LCAデータベースへ時間的拡張を行うには、LCAデータベースへ将来のエネルギーシナリオを統合していく作業が必要となる。この方法はトップダウン的なアプローチといえ、具体的にはLCAデータベースの内容を将来のエネルギー需要予測に合う形で変化させていく方法である。将来のエネルギーシナリオの予測については、IEA(International Energy Agency)、EIA(Energy Information Administration)、EC

(European Commission)、WEC(World Energy Council)、Shell等、様々な組織が、世界レベルや、国別、地域別の予測値を提供しているが、本テーマでは、IEA

(International Energy Agency)のWorld Energy Outlook(WEO)の最新版である、WEO 2020のシナリオの適用を試みた。WEO 2020は、2つの主要なエネルギーシナリオ(STEPS: Stated Policies Scenario、SDS: Sustainable Development Scenario)からなっており、地域別、セクター別(電力、産業、ビル、輸送)の燃料種別の需要や発電量の予測値が5~10年毎に示されている。昨年度に引き続き、これらのエネルギーデータの予測値をIDEA v3.1のLCAの単位プロセスへ適用していく作業を実装した。次に今回採用した方法論の日本のコアDB(IDEA v3.1)に対しての適用状況を模式化した図3-2.9.2-8に示す。

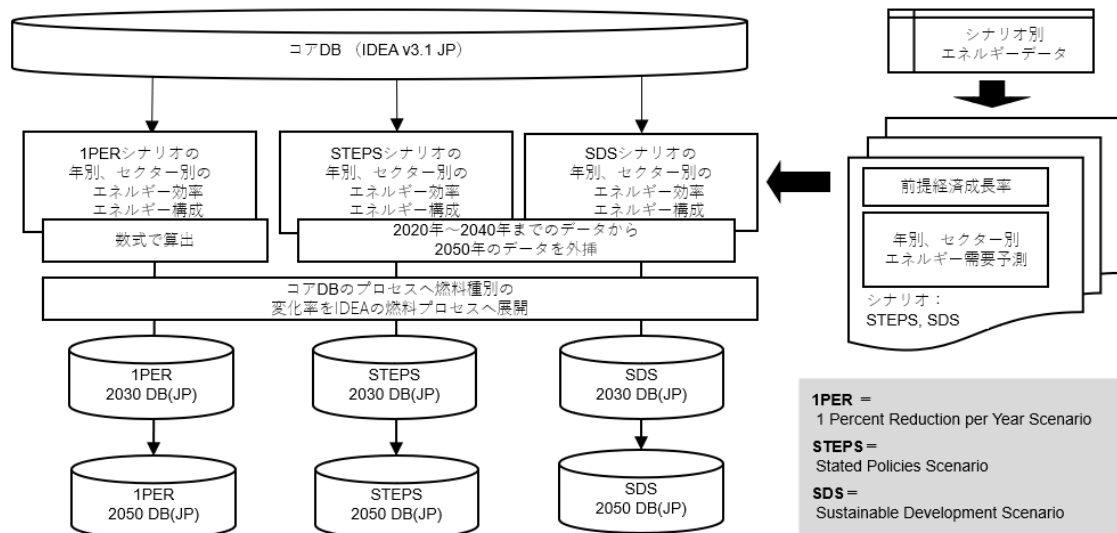


図 3-2.9.2-8 時間的拡張の適用イメージデータ

### ②-3. 材料リサイクルに関わるインベントリデータの整備

将来自動車に革新材料が活用された際の自動車のライフサイクルでの材料代替効果を評価することを目的として、革新材料の普及に伴う ELV のリサイクルに係る課題の整理を実施した。革新材料が活用された自動車のリサイクルに想定される課題を整理した結果、一部留意すべき点はあるが、革新材料が活用された ELV においても従来のリサイクルプロセスが適用可能であることがヒアリングの結果分かった。今回対象とした4つの革新材料について、高張力鋼板、アルミニウム、マグネシウムについては現行のリサイクルプロセスで十分に対応できる体制が整っていることがヒアリングの結果分かった。これら4つの革新材料については、リサイクル事業の経済指標で重要視される「単価」及び「回収量」の観点から、個別に選別・分離・回収をしていない事業者が多数となっているのが現状ではあるが、技術的観点においては現行の技術や設備で回収することが可能であり、今後、社会情勢の変化等により当該材料の経済性指標が改善した場合、事業者によるリサイクル体制の構築が見込まれる。一方、CFRP やマルチマテリアル材料のリサイクルについては、まだ実証段階であり、今後、市場における同材料の循環を促進していくためには、リサイクル技術の開発とリサイクル資源の出口市場の開拓が必要である。

次に使用済み自動車の廃棄・リサイクルプロセスが産業に与える影響を定量的に求めるため、当該プロセスおよび代替される可能性がある金属や炭素を含有する製品全般について、廃棄・リサイクルプロセスに関する文献調査を行い、IDEA に追加すべきインベントリデータを作成する。その際、対象となる製品の入出力の確認（廃棄・リサイクルプロセスにおけるマスバランスの確認）により、バランスが取れるように不足しているデータが分かる場合はインベントリデータを修正した。IDEA で対象としている製品の鉄使用量の整理を行う。IDEA で対象としている最終製品のうち、鉄使用量の多い品目について、入出力を確認し、マスバランスの整合がとれているかに

について確認する。なお、マスバランスの不整合の原因と修正方法が確認できた製品についてはインベントリデータを修正した。

#### ②-4. 物質フローデータの IDEA 物量連関表への統合

自動車構造材料のリサイクル効果を加味した LCA では、使用済み製品から回収されるスクラップの需要と供給のバランスに基づいた配分を行う。そのためには、対象素材の需要量ならびにスクラップ発生量を物質フロー分析で把握する必要がある。また、将来にわたる物質フローの時系列変化を分析することで、材料のインベントリデータの変化を考慮することが可能である。アルミニウムの場合、国内で消費する素材が輸入されている場合も多いことから、日本だけでなく海外主要国における需給動向を視野に入れた検討が必要である。現在のアルミニウムリサイクルは展伸材から鋳造品（含ダイキャスト）へのカスケードリサイクルで成立しており、展伸材から展伸材への水平リサイクルは飲料缶等の一部の用途に限られている。これはスクラップ中の合金元素が再生材中に残留するためであり、スクラップの需給バランスの検討は量だけでなく素材品位も考慮する必要がある。そこで本年度は、2050 年までの世界のスクラップ需給を物質フロー分析により検討することで、LCA におけるアルミニウムのリサイクル効果の算定を可能とした。

#### ③新材料の材料代替効果の評価ツールの開発

##### ③-1. 代替材料効果の評価ツールの開発

作成したツールは、ユーザが Google chrome などの web ブラウザを利用し

「<https://isma-lcatool.com/>」のサーバーにアクセスして計算を行う。サーバーには、大きく 3 つの目的のファイルが格納されており、表示内容を規定する Frontend、計算内容を規定する Backend、ユーザ入力と関係のない計算元データである Database により構成されている。本ツールでは通信を行いデータの受渡を行うが、SSL/TLS プロトコルを利用した暗号化通信とした。また、Database と Backend の通信では、ユーザの入力内容が Database に保持されないようにした。Frontend の設計には、WordPress を利用することとした。世界の多くの Web ページで利用されていること、GUI から編集が可能なこと、今回利用する予定の機能が担保されていることが理由である。Backend は、Python でコーディングすることとした。利用するライブラリは基本的なものだけにとどめ、環境を移行しても簡単に利用できるようにした。生データは CSV 形式で保持することとした。本プロジェクトを実施するうえで、生データは何度も更新される可能性が高く、誰もが簡単に理解、実装できるフォーマットであることが理由である。計算結果は、入力画面と同ページで表示させる。これにより、ユーザはどの入力内容により本結果が表示されたのかをページ遷移することなく確認することができる。本機能を実現させるために、Frontend と Backend の間は ajax 通信が利用される。

③-2. 材料代替効果の評価ツールによる評価

開発したツールにはリサイクル性の解析結果、物質フローデータ、環境負荷データベース、材料機能データ等を反映させ、代表的な代替材料効果の評価をツール内の計算により実施した。

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.2-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 *
	査読付 き	その他	学会発 表・講 演	新聞・ 雑誌等 への掲 載	プレス 発表	その他			
2018FY	0	0	12	0	0	0	0	0	0
2019FY	0	0	12	1	0	0	0	0	0
2020FY	2	0	20	0	0	0	2	0	1
2021FY	4	0	7	0	0	0	0	1	1
2022FY	0	0	1	0	0	0	0	0	1
合計	6	0	52	1	0	0	2	1	3

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

該当なし

## 2.9.3 [テーマ番号 5 8] マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究 (FS 研究) (2018 年度)

[テーマ番号 4 2 -IV] 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術研究  
(2019 年度、2021～2022 年度)

[テーマ番号 3 5 -④] 異種軽金属接合部材信頼性評価の基盤技術研究  
(2020 年度)

### 2.9.3.1 テーマの概要

#### (1)背景と目的

##### [テーマ番号 5 8] マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究 (FS 研究)

構造部材材料の軽量化・長寿命化・強靱化は、自動車、鉄道車両などの輸送機器はもとよりのこと、工作機械、建設機械、物流産業などの、多くの産業分野、民生分野においても、エネルギー消費低減、二酸化炭素排出低減など大きな波及効果が期待できる。構造部材材料のさらなる軽量化・長寿命化・強靱化には、軽量素材材料を中心とした各素材材料の信頼性の確立とともに、それらを適材適所的に組み合わせた部材のマルチマテリアル化の積極的な推進が不可欠である。本プロジェクトにおいては、輸送機器の抜本的な軽量化に向け、革新的接合技術の開発や、鋼材、アルミニウム材、チタン材、マグネシウム材、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)等、輸送機器の主要な構造材料の高度化等に係る技術開発が一体的に推進されているが、これらの技術開発により創出される貴重なデータや知見などをプロジェクト終了後も有効に活用するためには、材料の信頼性や接着・接合技術等の関連する知識を体系的に集積して材料設計に活用する新たな仕組みが必要となる。このため、本プロジェクトでも一部すでに行われている、材料信頼性評価技術、マルチマテリアル接着・接合技術、材料構造の最先端解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの技術の融合により、本プロジェクト終了後においても、データの集積・管理・解析、信頼性設計ツール構築、評価・解析手法の開発、国際規格化・標準化を継続的に行う研究拠点の構築を目指す。さらに、本研究拠点は、国内の企業や他の構造材料研究拠点等とのハブ機能の役割や、海外機関との協調、国際人材融合等によるグローバル拠点の役割も担うことを企図する。

本テーマでは、2018 年度は、これに必要な研究技術開発のアプローチ手法の精査を行い、研究拠点の構築に向けて有効な指針を得る事を目的とした。また、2020 年度末の目標として挙げられた「車体軽量化技術の集約化に関する課題の抽出」を実施した。

#### [テーマ番号 4 2 -IV、テーマ番号 3 5 -④] 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術研究

新幹線車両構体には、軽量化のために押出性と強度とのバランスに優れた A6N01 合金を主としたアルミニウム合金が用いられている。一方、次世代の高速車両には、より一層の軽量化が求められており、本プロジェクトでの先行研究開発では、アルミニウム合金よりも低密度であるマグネシウム合金に着目し、高速車両に適した難燃性マグネシウム合金の開発を進めている。さらに、自動車の車体においてもアルミニウ

ム合金を中心とした軽量化が進められているが、更なる軽量化のためにマグネシウム合金の適用が検討されている。

マグネシウム合金はアルミニウム合金と比較して成形性や耐食性が低く、複雑断面形状の押出型材が作製しにくいことや、高い耐食性が求められる部位には、利用しにくいことが問題となっている。上記の欠点を克服し、マグネシウム合金適用の効果を最大限に発揮するためには、マグネシウム合金とアルミニウム合金を組み合わせた接合部材として、適材適所で取り入れることが有効である。このためには、長期間の使用に耐えうる信頼性（疲労性能、耐食性等）を保証するためのデータを系統的に取得し、上記データに立脚した設計指針を構築する必要がある。特に、き裂の発生が集中する接合部分を対象として、様々な条件で疲労特性データを収集し、得られた結果疲労強度より基準応力を設定することが求められる。また、異種金属接合の際に問題となるガルバニック腐食特性を、各種環境（湿潤環境・塩水環境）下において系統的に把握する必要がある。これらの研究開発は本プロジェクトではこれまで行われていないが、上記の研究拠点を将来にわたり有効なものにするためには、これらの信頼性データの収集・補完は必要不可欠である。

そこで、本研究開発では、本プロジェクトのマルチマテリアル接合技術などの関連技術と連携して、マグネシウム合金ーアルミニウム合金等の異種軽量金属接合部材の信頼性に関し、これらの合金技術に実績のある名古屋守山分室において、研究開発を実施する。

なお、テーマ番号35「革新的マグネシウム材の鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発」においては、新幹線車両構体や自動車の車体において、マグネシウム合金を成形性、耐食性に優れるアルミニウム合金と組み合わせた接合部材として、適材適所で取り入れることが検討されており、本技術開発で得られる知見を効果的にテーマ番号35の技術開発に活用することが急務となっていた。このため、本技術開発は、2020年度はテーマ番号35において継続実施した。2021年度以降は、本テーマで得られた知見をテーマ35に反映させることができたため、再び、テーマ番号42-IVにおいて研究開発を推進した。

## (2)目標値

【テーマ番号58】マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究（FS研究）

表 3-2.9.3-1 テーマ 58 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第1中間目標 (2015年度末)	第2中間目標 (2017年度末)	第3中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)
マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究（FS研究）			マルチマテリアルの信頼性設計、及びその研究拠点の構築に必要となる	



(2018年度)			技術開発のアプローチ手法の精査を行い、研究拠点の構築に向けて有効な指針を得る。 (2018年度末)	
----------	--	--	--	--

【テーマ番号42-IV、テーマ番号35-④】異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術研究

表 3-2.9.3-2 テーマ 42-IV、テーマ 35-④研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第1中間目標 (2015年度末)	第2中間目標 (2017年度末)	第3中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)
① 接合部材作製 (2019～2022年度)			各種表面処理と接着処理等を行ったマグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材を作製し、疲労特性、耐食性の評価に供する。また、評価結果を受けて、接合部材作製にフィードバックを行い、疲労特性、耐食性を改善するための条件を抽出する。	ボルト締結体とは異なる各種接合体を対象として、マグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材を作製し、疲労特性、耐食性の評価に供する。また、評価結果を受けて、接合部材作製にフィードバックを行い、疲労特性、耐食性を改善するための条件を抽出する。 (2022年度末)
② 疲労特性評価 (2019～2022年度)			ボルト締結体を主な対象として疲労特性の評価を実施し、締結面の表面状態（摩擦係数、表面処理条件等）や材料変形（塑性変形、クリープ変形等）が軸力変化等に及ぼす影響を	ボルト締結体とは異なる各種接合体を対象として、2020年度までに確立した手法を基に疲労特性を系統的に評価し、得られたデータを元にデータベースの構築を実施する。

			明らかにするとともに得られたデータを集積して、データベースの構築を図る。また接着体の疲労特性評価技術を検討する。	(2022 年度末)
③ 耐食性評価 (2019～2022 年度)			異種部材が接合されたマグネシウム部品に化成処理や電着塗装等を施工した場合に生ずるガルバニック腐食現象を調査し、皮膜の均一性等に及ぼす影響を探る。また、これらを低減する施工方法を検討する。以上の評価によって得られたデータを集積して、データベースの構築を図る。さらに、第一原理計算等の計算科学で得られるガルバニック腐食挙動と実験結果の照合を行う。	ボルト締結体とは異なる各種接合体を対象として、2020 年度までに確立した手法を基に耐食性を系統的に評価し、得られたデータを元にデータベースの構築を実施する（計算科学により得られるデータベースも含む）。 (2022 年度末)
④ 接合部構造解析・欠陥評価 (2019～2022 年度)			2019 年度までに確立した評価・測定手法により接合部材の内部欠陥・含有水素量を測定し、これらの信頼性に及ぼす影響を明らかにする。また、マグネシウム	マグネシウム-アルミニウム接合材の内部欠陥・含有水素量を測定し、これらの信頼性に及ぼす影響を明らかにする。さらに、マグネシウム合金-アルミニウム

			合金-アルミニウム合金接合部材界面の残留応力等の情報を中性子ビーム法により入手する。	ム合金接合部材界面の残留応力等の情報を中性子ビーム法により入手する。 (2022 年度末)
--	--	--	--	--

### (3)全体計画

#### [テーマ番号 5 8] マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究 (FS 研究)

##### ① 調査研究

上述した「研究拠点」では、国立研究開発法人産業技術総合研究所の国立研究機関の機能を活かし、実環境での精密なデータの集積・管理・解析、信頼性設計ツール構築（材料プロセスから製品性能に至る因果関係の解明）、評価・解析手法の開発、及び国際規格化・標準化を行う計画である。同時に、国内の企業や他の構造材料研究拠点等と連携して、材料の実使用環境での信頼性データの提供・相互活用、信頼性設計ツールの共同構築等を行うハブ機能の役割を担うとともに、海外研究機関との信頼性設計ツールに関する情報交換や国際的な人材融合等を行うグローバル拠点の役割も併せ持つようにする。

マルチマテリアルの信頼性設計には、材料工学の分野において言及される、材料の製造プロセス（Synthesis/Processing）－構造（Structure/Composition）－特性（Properties）－性能（Performance）の4つの要素の因果関係（PSPP 関係・材料の4要素関係）を、マルチマテリアルを構成する個々の材料について体系的に解明し、それらの知見を基にして、マルチマテリアル化した際の部材、製品の性能（軽量性、寿命等）を正確に評価することが不可欠である。このため、本プロジェクトでも一部すでに行われている、材料信頼性評価技術、マルチマテリアル接着・接合技術、材料構造の最先端解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの技術の融合により、マルチマテリアル化をキーとして、各材料の4要素関係材料プロセス（リサイクルを含む）から製品性能に至る PSPP 関係を体系的に解明するとともにし、それらの材料によりマルチマテリアル化した部材、製品について軽量性、寿命等の性能の向上を把握し、信頼性設計につなげることを目指す。

本調査研究では、このために関連する研究開発を調査、抽出し、その有効性を吟味するとともに、マルチマテリアルの信頼性設計、及びその研究拠点の構築に必要な技術開発アプローチ手法を精査し、研究拠点の構築に向けて有効な指針を得るために下記項目の調査を実施した。

1) 当該研究拠点の成果が広く持続的に活用されていく上で想定される組織上の課題とその施策調査：

- 産業界/大学・高専等/他公的研究機関との連携のあり方（特に中小企業や地方の企業・大学・公設試・高専での利活用促進に向けて）

- 2) マルチマテリアル関連技術の動向調査（特に、輸送機器の軽量化に資するもの）：
  - マルチマテリアルの現状と将来性（開発・応用状況、課題等）
  - マルチマテリアル接着・接合技術、実環境・実部材の材料信頼性評価、材料構造の最先端解析・評価技術、計算材料科学、製品・材料 LCA 技術などの関連技術の研究開発動向調査。実環境・実部材の材料信頼性評価については、国際標準化動向も調査する。
  - これらの技術開発を融合しマルチマテリアル信頼性設計につなげるための効果的な技術開発アプローチ手法に関する調査
- 3) マテリアルズ・インフォマティクス関連技術の動向調査（特に、構造材料に関するもの）：
  - 計算科学活用材料技術、材料技術の人工知能（AI）等の、計算機の巨大情報処理能力を材料科学に応用するマテリアルズ・インフォマティクスに関連する技術の研究開発動向を調査。
- 4) 材料 4 要素関係体系化関連技術：
  - 材料の製造プロセス（リサイクルを含む）から材料が発現する性能に至る、材料の 4 要素関係の体系化（理論、実験、計算科学、経験則など）に関連する研究開発動向調査
- 5) マルチマテリアル化関連技術の動向調査：
  - 異種の材料によりマルチマテリアル化した際の性能（軽量性、寿命等）の向上とリサイクル性に関連する研究開発動向調査
- 6) 材料データベース関連技術の動向調査：
  - データ形式・データ交換プロトコル等の標準化などのデータ処理システム技術に関する今後の進展と、それによる材料データベースの高度化・互換化に関する可能性調査。例えば、「System of systems」などの活用による他機関の材料データベースとの統合的・互換的な運用方法
  - 材料データ集積・管理・解析・活用システム関連技術の動向調査
- 7) 信頼性材料設計ツール関連技術の調査：
  - 上記調査結果などを基に、将来あるべき材料データ集積・管理・解析・活用システムと、それに基づく信頼性材料設計ツール技術の調査
  - これらに向けた効果的な技術開発アプローチ手法の調査
- 8) その他関連項目の調査：
  - 「Society 5.0」における材料技術開発のあり方と当該研究拠点活動との整合性
  - 「材料データ集積・管理・解析・活用システム」等を十二分に活用できる人材育成のあり方
  - 「材料データ集積・管理・解析・活用システム」等における知的財産の管理と運用のあり方
  - 今後重要となる評価・解析手法
  - 国際規格化・標準化戦略のあり方。特に、実環境・実部材の材料信頼性評価に関する国際標準化に関連して

## ② 補足的実験等

材料信頼性評価技術、マルチマテリアル接着・接合技術、材料構造の最先端解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術については、本プロジェクトですでに一部行われているが、材料の4要素関係 PSPP 関係の体系化のために必要であり、かつ本プロジェクトで行われていない研究課題について補足的な実験を行った。

## [テーマ番号 42-IV、テーマ番号 35-④] 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術研究

### 1) 接合部材作製

本プロジェクトの先行研究開発において、マグネシウム合金-アルミニウム合金等の異種軽量金属接合への溶接技術の適用は、接合界面に金属間化合物等が生成するため、技術的に極めて困難であることが明らかになっている。そこで、これらの接合部材を上記の車両構体等に適用するに当たっては、機械的締結（ボルト締結・リベット締結等）を優先的に適用することが想定されている。このため、本研究開発では、機械的締結体を主たる接合部材として想定し、本プロジェクト参画機関と連携して、接合部材を作製する。ここでは、マグネシウム合金-アルミニウム合金等の異種軽量金属の表面処理技術、接着技術等の適用を検討する。接着技術については、産総研 接着・界面現象研究ラボ（つくば中央東分室）と連携し、適正な接着剤、接着方法を吟味、検討する。

### 2) 疲労特性評価

疲労特性評価に当たっては、主にボルト締結体を主な対象とし、締結体の疲労特性（緩み）の適正な評価技術を構築する。ボルト軸力等に及ぼす疲労試験条件（周波数、応力振幅、繰り返し数）の関係を調査するとともに、材料の表面状態（摩擦係数、表面処理条件等）や材料変形（塑性変形、クリープ変形等）が軸力変化に及ぼす影響を明らかにする。接着体についても同様の評価を実施する。これらの評価によって得られたデータを集積して、データベースの構築を図る。

### 3) 耐食性評価

耐食性評価に当たっては、接合部の界面のガルバニック腐食特性の適正な評価技術を構築する。走査型振動電極（SVET）や走査型電気化学顕微鏡（SECM）等により、接合部の腐食挙動のモニタリング評価を実施し、各種接合条件（接着、締結等）におけるガルバニック腐食挙動を評価する。また、ガルバニック腐食を低減するための手段を抽出する。これらの評価によって得られたデータを集積して、データベースの構築を図る。また、第一原理計算等の計算科学を用いてガルバニック腐食挙動を計算し、実験結果との比較を行う。

### 4) 構造解析・欠陥評価

X線 CT 法による非破壊の構造・欠陥観察、不活性ガス溶融-熱伝導度法、中性子ビーム法による含有水素量、残留応力等の測定技術を構築する。上記信頼性評価前後の接合部の構造・欠陥・水素量、残留応力を評価し、初期の接合部の状態が各種信頼性に及ぼす影響を明らかにするとともに、信頼性評価試験（≒実使用環境）が接合部の状態にどのような影響を及ぼすかを調査する。これらの評価によって得られたデー

タを集積して、データベースの構築を図る。（中性子ビーム法による解析・評価は、産総研 分析計測標準研究部門（つくば中央梅園分室）と連携して、2020 年度以降（装置準備等のため）に行う。）

#### (4)実施体制

##### [テーマ番号 5 8] マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究 (FS 研究)

本テーマは、国立研究開発法人産業技術総合研究所（名古屋守山分室）にて実施した。実施体制を表 3-2.9.3-3 に示す。調査の実施にあたっては外部調査機関（日鉄住金総研株式会社（現日鉄総研株式会社））による委託調査を中心とし、月 1 回以上の進捗状況確認・協議を行うとともに、関連企業、関連団体等への共同ヒアリングを行った。

表 3-2.9.3-3 テーマ 58 実施体制

【委託先】
新構造材料技術研究組合
【分担研】
産業技術総合研究所(名古屋守山分室)：2018 マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究

##### [テーマ番号 4 2 -IV、テーマ番号 3 5 -④] 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術研究

本テーマは、国立研究開発法人産業技術総合研究所（名古屋守山分室）にて実施した。以下、開発体制を表 3-2.9.3-4 に示す。

表 3-2.9.3-4 テーマ 42-IV、テーマ 35-④の実施体制

【委託先】
新構造材料技術研究組合
【分担研】
産業技術総合研究所(名古屋守山分室)：2019-2022
① 接合部材作製
② 疲労特性評価
③ 耐食性評価
④ 構造解析・欠陥評価

## (5)運営管理

### [テーマ番号 5 8] マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究 (FS 研究)

本テーマを実施・運営するにあたっては、新構造材料技術研究組合本部と密接な協議を行った。また、実施計画等を策定する際において、外部有識者を交えた「マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究検討委員会」(委員長：吉田豊信日本学術会議会員・東大名誉教授)を設け、関連する重要な調査項目を抽出し、調査の効果的な実施方法等について検討して、実施計画等に反映させた。さらに、調査研究期間中においても同委員会を開催し、進捗状況等を報告し、調査の結果等について確認・検討した。

### [テーマ番号 4 2 -IV、テーマ番号 3 5 -④] 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術研究

本テーマを実施・運営するにあたっては、新構造材料技術研究組合本部と密接な協議を行った。

研究開発を推進するにあたっては、テーマ 3 5 のサブテーマ①及びサブテーマ③(鉄道車両用部材開発)の参画企業((株)総合車両製作所、川崎車両(株))と連携して研究開発を推進した。例えば、高速車両構体にマグネシウム-アルミニウム接合体を適用する際に想定される使用環境をベースとして、疲労試験片の形状や疲労試験の条件を設定した。また、耐食性試験も同様に試験条件を設定した。

成果の発信に関しては、テーマ 3 5 と共同で、軽金属学会春期・秋期講演大会においてテーマセッション「難燃性マグネシウム合金展伸部材創製のための最新技術開発」を定期的(年 1~2 回)に開催し、プロジェクトの成果を発信した。また、各種論文誌にプロジェクトの成果を積極的に公表した。

## (6)実施の効果(費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030 年度)

### [テーマ番号 5 8] マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究 (FS 研究)

本テーマにより、マルチマテリアルの信頼性設計、及びその研究拠点の構築に関連する技術開発動向等が明らかになるとともに、本プロジェクトにおいて未実施で必要性の高い技術課題についての知見も得られ、本プロジェクトで得られたデータ等がプロジェクト終了後も有効に活用できる研究拠点の構築が可能となる。

### [テーマ番号 4 2 -IV、テーマ番号 3 5 -④] 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術研究

本プロジェクトで行われている軽量材料技術(軽量金属材料、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)等)、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発との連携により、本プロジェクト終了後においてもデータ等の有効な活用が可能となる研究拠点の構築が可能となる。さらに、鉄道車両および自動車構造部材への適用が検討されているマグネシウム合金-アルミニウム合金等の異種軽量金属接合部材の信頼性に関するデータの収集・補完は、この研究拠点の効果的な活動に必要不可欠である。

### 2.9.3.2 研究開発成果

#### (1)最終目標の達成度

[テーマ番号 5 8] マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究 (FS 研究)

表 3-2.9.3-5 テーマ 58 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
マルチマテリアル 信頼性設計技術に 関する調査研究 (2018 年度)	マルチマテリアル の信頼性設計、及 びその研究拠点の 構築に必要な 技術開発のアプ ローチ手法の精査 を行い、研究拠点 の構築に向けて有 効な指針を得る。 (2018 年度末)	マルチマテリアルの信頼 性設計、及びその研究拠 点の構築に関連する技術 開発動向等が明らかにな るとともに、本プロジェ クトにおいて未実施で必 要性の高い技術課題につ いての知見も得られた。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

[テーマ番号 4 2 -IV、テーマ番号 3 5 -④] 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基  
盤技術研究

表 3-2.9.3-6 テーマ 42-IV、テーマ 35-④の最終目標

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
① 接合部材作製 (2019~2022 年度)	ボルト締結体とは 異なる各種接合体 を対象として、マ グネシウム合金- アルミニウム合金 接合部材を作製 し、疲労特性、耐 食性の評価に供す る。また、評価結 果を受けて、接合 部材作製にフィー ドバックを行い、 疲労特性、耐食性	ボルト締結体とは異なる マグネシウム合金-アル ミニウム合金接合体とし て、爆着接合体を作製 し、その疲労特性、耐食 性を評価した。また、そ の熱処理特性を評価し、 金属間化合物の厚みと、 機械的特性の関係を明ら かにし、金属間化合物の 形成を極力抑えること が、接合体の機械的特性 の改善に必要であること	○	



	を改善するための条件を抽出する。 (2022年度末)	を明らかにした。		
② 疲労特性評価 (2019～2022年度)	ボルト締結体とは異なる各種接合体を対象として、 2020年度までに確立した手法を基に疲労特性を系統的に評価し、得られたデータを元にデータベースの構築を実施する。 (2022年度末)	ボルト締結体とは異なるマグネシウム合金-アルミニウム合金接合体として、爆着接合体を作製し、その疲労特性を評価した。そこでは、波長及び波高の異なる試料の疲労特性を評価するとともに、組成の異なる試料の疲労特性を評価し、データベースとした。	○	
③ 耐食性評価 (2019～2022年度)	ボルト締結体とは異なる各種接合体を対象として、 2020年度までに確立した手法を基に耐食性を系統的に評価し、得られたデータを元にデータベースの構築を実施する。 (2022年度末)	ボルト締結体とは異なるマグネシウム合金-アルミニウム合金接合体として、爆着接合体を作製し、その耐食性を評価し、耐食性が接合方向に依存することを明らかにした。また、組成の異なるマグネシウム合金-アルミニウム合金接合体の耐食性を評価し、組成の影響を明らかにし、データベースとした。	○	
④ 接合部構造解析・欠陥評価 (2019～2022年度)	マグネシウム-アルミニウム接合体の内部欠陥・含有水素量を測定し、これらの信頼性及ばす影響を明らかにする。さらに、マグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材界面の残留応力等の情報を中性子ビーム	マグネシウム-アルミニウム接合体の内部欠陥・含有水素量を測定し、耐食性との関係を明らかにした。また、マグネシウム合金-アルミニウム合金接合部材界面の残留応力等の情報を中性子ビーム法（ブラックエッジ法）により入手した。	○	

	法により入手する。 (2022 年度末)			
--	-------------------------	--	--	--

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

## (2)研究開発の成果と意義

### [テーマ番号 5 8] マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究 (FS 研究)

#### ① 調査研究

マルチマテリアル及びマルチマテリアル信頼性設計技術に関連する研究開発動向を調査、抽出、吟味するとともに、今後、必要となる技術開発アプローチを精査することを目的として、以下の項目に分けて調査を行った。

- 1) マルチマテリアル信頼性設計研究拠点（以下、拠点）の成果が広く持続的に活用されていく上で想定される組織上の課題とその施策調査
- 2) マルチマテリアル関連技術の動向調査（特に、輸送機器の軽量化に資するもの）
- 3) マテリアルズ・インフォマティクス関連技術の動向調査（特に、構造材料に関するもの）
- 4) 材料 4 要素関係体系化関連技術
- 5) マルチマテリアル化関連技術の動向調査
- 6) 材料データベース関連技術の動向調査
- 7) 信頼性材料設計ツール関連技術の調査
- 8) その他関連項目の調査

調査は、文献調査、Web 調査とともに、ヒアリング調査を行った。以下に結果の概略を示す。

- 1) マルチマテリアル信頼性設計研究拠点（以下、当該研究拠点もしくは拠点）の成果が広く持続的に活用されていく上で想定される組織上の課題とその施策調査

当該拠点活動による成果が広く持続的に利活用されるために拠点が具備すべき機能として以下のものが挙げられる。

- 拠点の成果および拠点リソース の利活用促進
- 拠点リソースの長期的な整備・維持・管理
- 連携・異分野融合
- 人材確保・育成
- 財務的健全性の確立（収益/コストバランス）

これらの各機能を有効に働かせるうえで想定される課題について調査した。

#### 1-1) 拠点の成果および拠点リソースの利活用促進

- 拠点の利活用を促進するには、利用者のみならず拠点の運営側関係者（研究者、技術指導者など）にもそのメリットが理解され、利活用に向けてのインセンティブになっている必要がある。

- 拠点利用者が企業の場合、大企業と中小企業、中小企業でも従来型とベンチャー志向では、事業環境や問題意識、利用インセンティブが様々に異なり、大多数を占める従来型の中小企業での利活用が進まない。これは従来型の中小企業が個別的、直接的なソリューションを求める場合が多く、そのような個別案件に答えるのは難しい場合が多い。中小企業の持っている問題意識を、拠点側でなんとか計測、加工、合成といった実行可能なレベルまで落とし付き合っていくなど利活用促進のための利用者とのかかわり方を工夫する必要がある。
- 提供する成果物のユーザビリティの向上は、利活用促進において極めて重要な活動である。ユーザビリティの向上活動には、例えば研究者の“気付き”を支援する可視化技術のようなものと、ソフトや DB の GUI といった操作性向上やポータルサイトといったシームレスな利用環境整備などがある。

#### 1-2) 拠点リソースの長期的な整備・維持・管理

- 拠点リソースの中でも材料データベースの重要性に関しては、すでに多くのところで指摘されている。これら連携による所謂データプラットフォーム化は、本拠点の技術分野であるマルチ・マテリアル技術（異素材間データベースや接着物質データベース必要）やマテリアルズ・インフォマティクス/インテグレーション技術（製造条件等含むプロセスデータベース必要）における主要な知的基盤としてますます重要となってきた。
- データベース以外に拠点が保有する施設、計測装置等の共通インフラ、ソフト等のサービスといったリソースにおいても上記材料データベースと同様な課題がある。

#### 1-3) 連携・異分野融合

- 基盤・基礎的研究と産業界への橋渡しの研究開発といった役割分担の明確化と知財成果の取り扱いが重要になる。
- 産学連携も、個々の研究者レベルの共同研究だけでなく、拠点としてもう少し大きな枠組みでの産業界との連携を進めるべき。人事交流をするための制度も必要。

#### 1-4) 人材確保・育成

- 今後、インフォマティクスのような帰納的方法を正當に理解できる人材を中長期的視点で養成する基本教育システムの構築が必須である。
- データ駆動型の研究をサポートするサービスを企画、開発、運用する人材の確保。
- 研究データの共有・公開を進め、その利活用を推進していくためには、データの利活用に精通した人材が不可欠である一方、これらの人材育成は体系的に行われていない状況。
- 広範囲にわたる膨大な物質系（有機 / 無機 / 金属）を俯瞰し、これまで集積された知見を従来の有機、無機、金属といった枠組みにとらわれずに、「機能＝構造

×元素」という視点の材料設計研究者の養成が重要。

- 大学・研究機関等においては、技術職員、URA（University Research Administrator）、大学図書館職員等を中心としたデータ管理体制を整備できるように、データサイエンティストやデータキュレーターなどを研究支援人材として位置づけられるよう、包括的な育成システムを検討し、推進することが必要である。

#### 1-5) 財務的持続性の確立（収益/コストバランス）

- 拠点におけるデータプラットフォームの維持や開発については、基礎・基盤に関する部分と、特定用途向けあるいは利用者向けに分けて考え、それぞれに適した予算措置をすることが必要である。システム全体を利用者からの負担金で運用するという事は不可能であり、国が持つべきところ（基礎・基盤部分）と利用者負担してもらうところ（特定用途向け、利便性向上のサービス）を分けた議論が必要である。
- 研究の助成を行う機関として JST、JSPS、NEDO などあるが、これらが研究のどのフェーズを支援すべきか。また、どの規模で支援すべきかという規模感の問題もある。支援する側からすると、面白そうだが実績の少ないテーマにいきなり大きな支援をするのは難しいところがある。例えば、トライアルファンドのようなものや、ステージゲートのものがある。

#### 2) マルチマテリアル関連技術の動向調査（特に、輸送機器の軽量化に資するもの）

国内外のマルチマテリアル関連の研究開発プロジェクトを整理し、開発目標と達成状況、課題等を調査した。さらに、マルチマテリアルの標準化の動向について、輸送機器材料の信頼性に関する項目に重点をおいて、材料の疲労、腐食、接合・接着について調べた。ここでは、海外の代表的な例として、米国エネルギー省 **Lightweight Materials** プロジェクトと欧州委員会 **EUCAR** プロジェクトについて述べる。

##### 2-1) 米国エネルギー省 **Lightweight Materials** プロジェクト

米国エネルギー省、**Vehicle Technology Office (VTO)** による **Lightweight Materials** プロジェクトにおいては、自動車の軽量化に係る研究開発が推進されており、その内容は多岐に亘っている。プロジェクトは主に、①Automotive Metals (Mg、Al、Ti、HSS)、② Carbon Fiber and Polymer Composites、③ Multi-Material Joining、④ Crosscutting の 4 分野に大別され、研究開発が推進されている。2025 年までに 2012 年車と比べ軽量車重量を 25%軽量化（コスト増：\$10/kg 以下）を目標とし、米国自動車材料協会（**USAMP**）、国立研、大学、企業が参画している。Al、HSS は短期視野開発（10-60%の軽量化）、Mg、CFRP は長期視野開発（50-75%の軽量化）とし、以下の重点方針を掲げている。

- 計算材料科学・モデリングによる解析
- 材料特性の向上（強度、剛性、延性等）
- 製造プロセスの向上（コスト、生産速度等）

- 先進材料および合金の開発

## 2-2) 欧州委員会 EUCAR プロジェクト

欧州においては欧州委員会の EUCAR プロジェクトをはじめとする種々のプロジェクトで自動車に係る研究開発が推進されている。EUCAR プロジェクトは、①SAFE & INTEGRATED MOBILITY、②Sustainable Propulsion、③Affordability & Competitiveness、④Commercial Vehicles の 4 つの分野からなる。自動車の軽量化技術開発は③ Affordability & Competitiveness において展開され、SEAM クラスタの一部でもある ENLIGHT、ALIVE のプロジェクトの元で推進されてきたが、現在は ALLIANCE と LoCoMaTech (Low Cost Material Technology ; Horizon2020 のプロジェクト) に引き継がれている。

電気自動車の BiW、シャーシ等で 20~45%の軽量化 (コスト増: 8€/kg 以下を目指し、企業、大学、国立研が参画している。BiW は HSS と Al のマルチマテリアルを基本 (フロントボディ: HSS、Al、Mg 等。ドア: Al 等。ルーフ: FRP 等) とし、以下の技術課題を掲げている

- 約 100 種類の材料 (HSS・Al・Mg、FRP 等) の特性データベースの構築
- 計算材料科学・モデリングによる材料特性、部品性能 (耐衝突性等) 予測
- 接合技術: 接着、リベット、遠隔レーザ溶接、スポット溶接、ヘミング加工等
- 材料技術: 新規複合材料・ハイブリッド材料技術、高性能・低コスト Mg 合金製造技術、等
- 評価技術: 接合部材信頼性評価、衝突時安全性評価、LCA、等

## 3) マテリアルズ・インフォマティクス関連技術の動向調査 (特に、構造材料に関するもの)

計算科学活用材料技術、材料技術の人工知能 (AI) 等の、計算機の巨大情報処理能力を材料科学に応用するマテリアルズ・インフォマティクスに関連する技術の研究開発動向を調査した。

### 3-1) 国内におけるマテリアルズ・インフォマティクス関連技術

国内のプロジェクトは SIP 革新的構造材料 (SIP-SM4I、内閣府)、超先端材料超高速開発基盤技術 (超々PJ、経産省)、情報統合型物質・材料開発イニシアティブ (MI2I、文科省)、先進的マテリアルズインフォマティクス (文科省) がある。それぞれのプロジェクトは大まかには機能・構造、無機・有機、物質・材料という三軸で特徴づけられる。MI2I はハブ (研究拠点) としての側面がある。そのため、SIP-SM4I のマテリアルズ・インテグレーションシステムの開発に従事する研究者が二つのプロジェクトに横断的に取り組むという濃密な連携が可能となっている。これは、先端的マテリアルズ・インフォマティクスについても同様である。

SIP-SM4I の開発ターゲットは航空機、発電分野の構造材料であり、無機材料、有機材料の両方が対象となっている。セラミックス基複合材料、樹脂・CFRP、耐熱合金金属間化合物に関しての技術開発とともに、マテリアルズインテグレーションは上記

のテーマを横断した体制をとっている。また、マテリアルズインテグレーションについては SIP 内だけではなく、本プロジェクト等との連携も進められている。

NIMS は JST 事業「情報統合型物質・材料開発イニシアティブ (MI2I)」を受託し、これを駆動力として、物質・材料科学から情報・数理科学にわたる産学官の共同体制を構築し、さらにより広範な企業の参画も促し、オープンイノベーションにつながるこの分野のハブ拠点化を目指している。MI2I の設立は文科省の施策である、イノベーションハブ構築支援事業の一環である。この施策は、大学、産業界等の人材が糾合する場として、国立研究開発法人を位置づけている。技術の統合化、システム化を目指したイノベーション創出機能を強化し、人材育成にも寄与することを目的としている。

### 3-2) 米国におけるマテリアルズ・インフォマティクス関連技術

米国においては、材料の開発、製造、普及を従来の 2 倍以上迅速に、かつ、数分の一のコストで実現するための活動に対して、政策、財源、米国機関を支援するインフラの新時代を築くことを目的に、Materials Genome Initiative プロジェクトが 2011 年にスタートし、その後 5 年間の 2016 年 8 月までに既に累積 \$ 500M 以上の資金を、DOE、DoD、NSF、NIST、NASA の連邦機関が投資している。現在においても様々な研究機関で、マテリアルズ・インフォマティクス関連の研究開発が行われている。その代表的な例である Center for Hierarchical Materials Design (CHiMaD) は NIST が主催する先進的な材料研究の卓越したセンター (コンソーシアム) である。次世代計算ツール、データベース、実験技術の開発を焦点に置いた先進材料研究の COE であり、新規材料の設計、産業への実装を加速する MGI の戦略目標達成を目指している。センターの目的として、以下の事を掲げている。

- 次世代の計算ツール、データベース、実験技術を開発し、階層的材料発見・開発を促進する。
- ワークショップ、セミナー、訓練機会と会合を通じて、マルチセクター、マルチディシプリン間の先進的交流により、現代の先達と次世代の科学者を結び付ける。
- 先進材料における新規なブレイクスルーを産業に実装する機会を与える。
- 予測、計測、解釈間の継ぎ目のない統合を採択する。
- 材料システム、方法論についての包括的知識を維持発展させる。
- NIST と一緒に、実証されたコード、集められたデータベースの国家的資源として機能し、米国企業パートナーを通じて、設計による材料開発の戦略、材料の発見を振興する。
- 金属合金システムで確立された成功の上に立ち、有機、無機の構造用ならびに多機能性材料双方への応用を通じて一般性を証明し、普遍的な、設計に基づく材料 (materials-by-design) 開発のアーキテクチャー、アプローチの方法を求める。
- ハード材料設計についての 3D、4D の方法を拡張し、ソフト材料設計の前面に活用する。

### 3-3) ドイツにおけるマテリアルズ・インフォマティクス関連技術

ドイツにおいては、これまでに様々なマテリアルズ・インフォマティクス関連の研究開発プロジェクトが行われ、またインターネットなどの情報技術（IT）を駆使して製造業の革新を促す巨大プロジェクト「インダストリー4.0」の推進もあり、関連技術開発は加速している。その代表的な例として、**Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH, Düsseldorf** がある。ここでは、化学、物理、冶金、材料科学を元に、新しい高機能性を持った高度な構造用材料、機能性材料を開発すべく、以下の4課題について学際的研究を展開している。

- 計算材料設計 **Computational Materials Design** : 熱力学および速度論データの第一原理計算、マイクロ組織の性質とダイナミックスの理論計算、コンピュータ支援合金設計、マルチスケールモデリングを扱っている。
- 界面化学と表面工学 **Interface Chemistry and Surface Engineering** : 電気化学的なエネルギー変換と同様に腐食や接着科学にも重点を置いて、電気化学の基礎研究を実施している。
- 微細構造の物理学と合金設計 **Microstructure Physics and Alloy Design** : 材料の機械的挙動、マイクロ組織と集合組織、合金設計と加工熱処理プロセス、原子レベル解析をカバーしている。
- 材料構造とナノ/マイクロメカニクス **Structure and Nano-/Micromechanics of Materials** : 材料の定量的ナノ/マイクロメカニカル試験を行うための実験的方法の開発、マイクロレベルから原子レベルの微細構造の特性評価技術による、基礎となる変形メカニズムの解明、優れた機械的特性を有するナノ構造材料の開発等を行っている。

#### 3-4) 中国におけるマテリアルズ・インフォマティクス関連技術

中国においては、近年特にマテリアルズ・インフォマティクス関連の技術開発に力を入れ、例えば中国科学技術省は以下のような「材料遺伝子工学基幹技術プラットフォーム： **China MGI** 」を推進している。

- 期間：2016～2020年、予算：2017年約3.3億CYN（53億円）+州政府補助
- 外国、特に日本に依存している先端産業での基幹材料の自給率（2016年14%）を2020年で40%、2025年で70%に上げることを目指す。また、「新材料の開発時間1/2、開発コスト1/2」を目指す。
- 「経験による開発」から「理論・計算・実験検証に基づく開発」に転換。米国**MGI**と類似。
- 対象材料：軽量高強度合金、複合材料、高温材料、エネルギー材料、生体材料等

#### 4) 材料4要素関係体系化関連技術

材料の製造プロセス（リサイクルを含む）から材料が発現する性能に至る、材料の4要素関係の体系化（理論、実験、計算科学、経験則など）に関連する研究開発動向を調査した。

材料4要素の概念は1989年に発行された米国の**the Committee on Materials Science and Engineering, National Research Council**のレポートに初めて紹介された。その趣旨

は現在の **Materials Integration** の概念につながるもので製造方法と性能の間の複雑な関係を理解するために材料システムをプロセス、組織、特性、性能の 4 つに分け、それぞれの関係をモデル化することが重要であることを述べている（材料の 4 要素関係・正四面体でよく図示される）。本調査研究ではまず、主な工業材料である金属、セラミックス、ポリマーについて、化学結合の状態から機械的特性を推測することを試みた。次に、材料 4 要素関係体系化関連技術として、組織材質予測技術、材料 4 要素体系化と AI などについて調査した。

#### 4-1) 組織材質予測技術

狭義の組織材質予測技術とは、材料の成分組成と製造プロセス条件を入力し、素材の組織ならびに特性を予測する技術をいうが、広義の材質予測技術は、成形シミュレーション、衝突シミュレーションを含む製品の性能を予測する技術である。ここでは、鉄鋼材料の組織材質予測技術、フェーズ・フィールド法による組織形態の予測、マルチスケールモデリングについて調査した。

#### 4-2) 材料 4 要素体系化と AI

AI によるモデリングには「データ主導型のアプローチ」と「数理モデルアプローチ」がある。データ主導アプローチは、統計処理によってまで人間が意識しなかった特徴量を抽出して機械学習して予測をするものや、データをそのままディープラーニングに入れ込んで予測をするものがある。一方、数理モデルのアプローチでは、実験データが少ない場合に計算科学でデータを補完して、各対象に附合する拡張数理モデルを AI は創造する。すなわち、現場よりビックデータが提供されるときはデータ主導型のアプローチを行い、限られた数の実験室のデータを用いる場合は数理モデルアプローチが必要になる。

組織材質予測制御技術における AI の活用については、2 つの活用法が考えられる。一つは成分や製造条件の入力データと出力データである機械的性質のデータとの関係を AI 技術を駆使して高精度の機械学習をすることで統計学に則った近似式を作成することであり、もう一つは、物理現象を考慮した半理論式で使われている合わせ込み係数を AI 技術によって高精度化して予測精度を高めることである。ここでは AI 技術に関連し、機械学習モデルとニューラルネットワーク、組織材質予測モデルと AI、物理モデルの学習について調査した。

### 5) マルチマテリアル化関連技術の動向調査

異種の材料によりマルチマテリアル化した際の性能（軽量性、寿命等）の向上とリサイクル性に関連する研究開発動向を調査した。ここでは、マルチマテリアルの接合技術、マルチマテリアルの腐食特性評価、マルチマテリアルのリサイクル技術について述べる。

#### 5-1) マルチマテリアル接合技術

日本、米国、欧州におけるマルチマテリアル接合技術開発状況を調べた。日本にお



いては、異材間の接合では、Fe-Al、Al-CFRP、Fe-CFRP が検討されている。溶接では摩擦攪拌接合（FSW）が金属間だけでなく金属と CFRP の接合にも検討されている。また、スポット溶接も検討されている。米国においては、日本と同様に FSW による Al-Fe 接合が検討されている。FSW によるアルミニウムのテーラードブランク（TWB）も検討されている。マグネシウム合金の鋳造、腐食や異種金属との接合の検討がなされている。金属箔による異種金属のろう付けが検討されている。欧州においては、金属と CFRP、金属同士の接合で積極的に検討されている。また、接合するだけでなく、アルミニウムシートと CFRP を接合しながら成形して複合体を作る検討もされている。

各種異種材料接合の組合せに対する接合方法の適用の可能性について調べたところ、接着方法は、同種金属、異種金属、金属/樹脂・CFRP、金属/セラミックスのすべての組合の接合に適用可能であるが、実用化されている事例は少ない。接着プロセスにおける接着剤固化時間の確保や接着剤の経年劣化対策等が必要であり、これらが実用化での課題となっている。しかし、欧州の自動車メーカーを中心に、異種材料間の接合に、従来の点接合から接着材での面接合の併用が 1990 年頃から増えている。主な狙いは次のとおりである。

- 面接着による接合部位の剛性、強度向上
- アルミ合金/鋼材における電食の抑制（メルセデスベンツ C クラス、AudiA4、BMW5 シリーズ）
- 異種材料間の接合面での熱膨張差の吸収

今後、接着技術はマルチマテリアル接合技術として重要となってくるが、異種材料を接着接合し、マルチマテリアル構造を実現する場合、主に問題となるのは熱応力・変形と電食であると考えられる。

#### 5-2) マルチマテリアルの腐食特性評価

日本、米国における腐食特性評価状況を調べたと。日本では、Fe-Al、Al-CFRP、Fe-CFRP 継手の電食、防食の検討は、これからの課題である。マグネシウム合金については、機械学習で特性予測を行うためのデータの構築中である。米国では、マグネシウム合金では、腐食メカニズム解明、コーティングによる防食の検討がなされている。

#### 5-3) マルチマテリアルのリサイクル技術

鉄鋼材料については、高炉鋼と電炉鋼に分かれるが、いずれも電炉または転炉で溶解してリサイクルする技術、流通経路が確立しており、例えば自動車に使用された鉄鋼材料の見掛リサイクル率は、90%前後と高い。

アルミニウムは他の金属と比べると腐食しにくく、融点が低いため、再生率の高い金属である。二次合金地金は品質的にも新塊合金と殆ど変わらず、しかも、製造時に必要なエネルギーが新塊合金を造る時と比べわずか 3%で済むため、積極的にリサイクルが進められている。しかし、アルミニウム缶の回収率は 92.4%と高いが、全体のリサイクル率は 36%に留まっている。

CFRP については、炭素繊維は鉄に比べて製造時に膨大なエネルギーが消費され（鉄：48 MJ/kg、炭素繊維：234 MJ/kg）、また CFRP の工程廃材や使用済み製品は通常の焼却炉では処理できないので、現在、大部分は埋め立て処理されている。このような CFRP 処理の現状を踏まえると、CFRP をリサイクルする意義は、主に次の 2 点にまとめられる。①炭素繊維を回収し CFRP として再使用することにより、バージンの炭素繊維を製造する際の膨大なエネルギー消費が節減され、CFRP 部材を用いる自動車のライフサイクルエネルギーを削減することができる。②現在、埋め立て処理されている CFRP 廃材を大幅に減らすことができる。直近では、特に②の意義が大きい。例えば、欧州連合（EU）では、2015 年以降、廃車部材の 85%をリサイクルすることが義務付けられており、喫緊の課題となっている。

CFRP リサイクル技術には、廃 CFRP を燃焼熱として回収するサーマルリサイクル技術、廃 CFRP から炭素繊維を回収する技術、回収した炭素繊維を再度 CFRP 又は炭素繊維として再利用する技術に分けられる。サーマルリサイクル技術は、廃 CFRP を燃焼熱として回収する技術であり、マテリアルリサイクルとは異なるが、埋め立て処理する CFRP 廃材の削減につながり、現実的な対応策の一つである。炭素繊維回収技術には、物理的粉砕法、熱分解法、流動床酸化法、溶媒溶解法（液化法）などがあり、それぞれの長短について調査した。回収炭素繊維の形態は、バージン品が連続繊維（トウ、フィラメント）であるのに対して、切断繊維（カットファイバー、ステープル）であり、粉末状のミルド、短繊維のチョップド、長繊維がある。回収炭素繊維を用いて CFRP を再生する成形方法には、射出成形、BMC（bulk moulding compound）、不織布の圧縮成形、織布への樹脂含浸などがあり、それぞれの長短について調査した。

## 6) 材料データベース関連技術の動向調査

ここでは、データ形式・データ交換プロトコル等の標準化などのデータ処理システム技術に関する今後の進展と、それによる材料データベースの高度化・互換化に関する可能性を調査した。

### 6-1) NIMS（国立研究開発法人物質・材料研究機構）物質・材料データベース MatNavi

2001 年 NIMS 発足時に、科学技術振興機構 JST が開発した高機能物質データベースが移管され、それと共に、NIMS の前身である旧金属材料研究所のデータベースを一元管理することになり、2003 年 4 月からこれらのデータベースを MatNavi としてインターネット公開を開始。基礎物性、エンジニアリング、アプリケーションシステム、NIMS 構造材料データシートオンラインのデータベースから成っている。

### 6-2) CODATA

CODATA は国際学術会議（ISC）のデータ委員会である。CODATA は、Open Science を推進するためのグローバルな協力関係を促進するとともに、あらゆる研究分野のデータの可用性と有用性を向上させるために存在する。CODATA では、研究に

よって得られ、研究に使用される可能性のあるデータは、FAIR (Findable、Accessible、Interoperable and Reusable) であるべきであるとの原則がある。

CODATA の戦略として以下の3つの優先分野を特定している。

- オープンデータとオープンサイエンスの原則、政策、実践を推進する。
- データ科学のフロンティアと科学研究への適応を推進する。
- オープンデータをサポートするために必要なデータスキルと国家科学システムの機能を改善することにより、オープンサイエンスの能力を構築する。

#### 6-3) CEN (European Committee for Standardization)

CEN の使命は、世界的な取引、欧州市民の福祉、環境の中で、欧州経済を育成することであり、そのサービスを通じ、欧州標準やその他の技術仕様の開発のためのプラットフォームを提供している。CEN の標準化活動は、CEN の作業プログラムの実施に全責任を負う CEN テクニカルボード (BT) によって管理されており、標準は技術委員会 (TC) によって作成されている。

#### 6-4) VAMAS

VAMAS (Versailles Projects on Advanced Materials and Standards) は、1982年のG7ベルサイユ・サミットにおいて合意された「先進材料の事前標準化に関する国際協力プロジェクト」。VAMASの主な目的は、標準化につながる最適な汎用性のある測定方法のための技術的基盤を提供する国際的な協力を行い、先進的な材料の革新と採用によって世界貿易を促進することである。NIMSでは、VAMAS活動を通して、研究成果の公知と標準化、データの信頼性向上、国内外機関との連携などを行っている。標準化活動は個々の Technical Working Areas (TWA) で行われている。

#### 6-5) Research Data Alliance

Research Data Alliance (RDA) は、欧州委員会 EC、米国国立科学財団 NSF および国立標準技術研究所 NIST、およびオーストラリア政府イノベーション部が共同体を構築し、2013年にデータのオープン共有を可能にする技術インフラストラクチャである。RDAは、137カ国から7200人以上(2018年9月)のメンバーが集中したグローバルワーキング・アンド・インタレスト・グループを通じて、データ共有とデータ駆動研究を促進するインフラを開発し、ドメイン、リサーチ、国家、地理的および世代間の境界を越えて、密接なデータコミュニティの成長に貢献している。

#### 7) 信頼性材料設計ツール関連技術の調査

構造材料(金属・複合材料)研究開発に関する国内外の注目動向のひとつとして、理論計算や数値計算モデルを活用したマテリアルズ・インフォマティクスと呼ばれる特性予測・材料設計のツール開発が挙げられている。マテリアルズ・インフォマティクスには、第一原理的手法と実験的評価データの効率的併用、物理モデルとディープラーニング(機械学習)による経験式との組み合わせにより、多様な元素・組織の組み合わせから信頼性の高い最適材料の設計を可能とする手法として期待が高

い。また、マテリアルズ・インフォマティクスへの期待が増すにつれて、その基礎データを提供する評価・解析技術の精緻化・高度化の必要性も増している。ここでは、将来あるべき材料データ集積・管理・解析・活用システムや、それに基づく信頼性材料設計ツールを知るために、これらの研究開発動向を調査した。

#### 7-1) ニューラルネットワークやディープラーニングを利用した材料性能予測

内閣府プロジェクト SIP において、「物理モデルとデータ駆動による疲労予測手法の開発」を実施している東京大学大学院工学系研究科榎教授グループの研究と、文科省プロジェクト学際大規模情報基盤利用・共同研究拠点・萌芽型研究において、「全電子混合基底第一原理計算法を活用したネットワーク型エネルギー絶対値算定マテリアルズ・インフォマティクス」を実施している東北大学川添良幸名誉教授グループの研究について調査した。

#### 7-2) 複合材料強度信頼性評価シミュレーター

NEDO や文科省ポスト「京」プロジェクトにおいて、複合材料強度信頼性評価シミュレーター (FrontCOMP) とその機能拡大を進めている東京大学生産技術研究所吉川暢宏教授グループの研究と、EU で実施された自動車用複合材料の破壊挙動シミュレーション開発プロジェクト MATISSE 等について調査した。

### 8) その他関連項目の調査

ここでは、「Society 5.0」における材料技術開発のあり方、「材料データ集積・管理・解析・活用システム」等を十二分に活用できる人材育成のあり方と知的財産の管理と運用のあり方、今後重要となる評価・解析手法、国際規格化・標準化戦略のあり方について調査した。

#### 8-1) 「Society 5.0」における材料技術開発のあり方

わが国の 2016 年度からの 5 年間における第 5 期科学技術基本計画においては、新しい価値やサービスを持続的に創出するコンセプトとして、「超スマート社会 (Society 5.0)」が新たに提唱された。このため、従来の経験と勘に頼る開発プロセスを刷新し、計算科学や AI を活用することにより、スマートマテリアル等の迅速な開発が必要となる。これには、保有するデータに加え、実サンプルを試作・評価した結果をフィードバックして高度化した計算ソフトを活用し、データを量産化する。これに AI を活用し、マテリアルズ・インフォマティクス手法 (逆問題 (機能→組成・構造)) により、開発期間の劇的な短縮を目指すことが重要となる。ここではまた、日本の強み・弱みとスマートマテリアル等の開発の現状を分析した。

8-2) 「材料データ集積・管理・解析・活用システム」等を十二分に活用できる人材育成のあり方

Society5.0の本格実装を材料開発から支えるために「材料データ集積・管理・解析・活用システム」等を十二分に活用できる人材の確保・育成が必須である。基本的課題として

- 情報工学・数理工学に精通した人材の確保・育成
- 多様な融合領域に精通した人材の確保・育成
- 材料工学に精通した人材の確保・育成

が挙げられるが、ここでは金属素材競争力強化検討会の報告等も踏まえて調査を行った。また、米国などの海外での材料分野の人材育成の状況についても調査した。さらに、支援技術者育成についても検討した。

8-3) 「材料データ集積・管理・解析・活用システム」等における知的財産の管理と運用のあり方

ここではデータの共有とそのメリット)、データを共有する方法、データ管理と計画、データ管理の費用、データの文書化等について調査した。

8-4) 今後重要となる評価・解析手法

ここでは、マルチマテリアルに関連し今後重要となる評価・解析手法として、腐食性の評価・解析手法、接着の評価・解析手法を中心に調査した。

8-5) 国際規格化・標準化戦略のあり方

マルチマテリアルの信頼性評価に関する国際標準化に関連して、国際規格化・標準化戦略のあり方について、欧州、米国の動向、日本の強い所、弱い所も視野に入れて調査した。

## ② 補足的実験等

拠点の構築に関し必要性の高い以下の技術課題について実験等を含む補足的な研究開発を行った。

- 1) マグネシウム－アルミニウム接合体（締結材）の疲労（緩み）特性評価
- 2) マグネシウム－アルミニウム接合体の耐食性評価
- 3) マグネシウム－アルミニウム接合体接合部構造解析・欠陥評価
- 4) CFRP/アルミニウム接合体の力学的特性評価

以下にその成果を述べる。

- 1) マグネシウム－アルミニウム接合体（締結体）の疲労（緩み）特性評価

マグネシウム（Mg）合金とアルミニウム（Al）合金のハイブリッド部材を用いて鉄道車両構体等の構造部材の軽量化を達成するためには、その締結部の信頼性（疲労特性、耐食性）を評価するための手法を確立することが必要である。本テーマでは、Mg合金部材とAl合金部材をボルト締結した部材（Mg/Alボルト締結材）を対象とし

て、その疲労特性（ボルト緩み特性）を評価する手法を検討した。具体的には、各種パラメータ（振幅及びボルト締め付けトルク）を変化させた疲労試験をボルト締結体に対して実施し、疲労試験時の試験力（荷重：ボルトの緩みと相関）の変化を調査した。

予備試験として、Mg/Mg 締結体（対象合金：AZX611 合金）を対象として、振幅を変化させて疲労試験を実施した。振幅が $\pm 0.05$  mm では試験力は緩やかに低下した後にはほぼ一定値を示した。それに対して、振幅を $\pm 0.1$  mm 以上に設定すると、ある繰り返し数以上で試験力の急激な低下が見られ、ボルトの緩みを試験力の低下により検出できることを確認した。次に、ボルト締め付けトルクを変化させて疲労試験を実施した。その結果、ボルト締め付けトルクが 6.0 N-m 以下では、ある繰り返し数以上で試験力の急激な低下を確認した。この結果より、ボルト軸力低下を検証する試験条件としてボルト締め付けトルク 6.0 N-m（AZX611 合金の降伏応力の約 70%に相当）を抽出した。

さらに、Mg/Al 締結材（対象 Al 合金：A6061 合金）の疲労試験を行った。ここでは、板材の表面粗さ（算術平均粗さ）が試験力に及ぼす影響を調査した。その結果、AZX611 合金の表面粗さを低く設定すると、試験片同士の接触面積の増加が見かけの摩擦係数の増加に寄与し、ぼるとの緩みが低減することを確認した。一連の試験結果より、疲労試験時の試験力（荷重）の低下挙動により、ボルトの緩みに及ぼす各種パラメータの影響を評価可能であることを明らかにした。

## 2) マグネシウム-アルミニウム接合体の耐食性評価

マグネシウム（Mg）合金は腐食電位が低いため、他の金属部材と接触すると Mg 合金がアノード、金属部材がカソードとなって Mg 合金が選択的に腐食するガルバニック腐食が問題となる。アルミニウム（Al）合金は Mg 合金に次ぐ軽量材料であり、腐食電位も他の金属部材と比べて Mg 合金に近いことから、ガルバニック腐食が起こりにくい締結材として期待されるが、その詳細はあまり知られていない。本テーマでは、Mg 合金部材と Al 合金部材にスペーサを挟んだ接合体（Mg/Al 接合体）を用いて腐食環境下でのガルバニック電流および電位、走査型振動電極(SVET)に基づく接合部近傍の電位分布を測定した。試験後の接合体表面の 3D 表面形状計測も実施した。

0.1 wt% NaCl 溶液中の Mg/Al 接合体の試験開始 15 分後および 60 分後の電位差分布を SVET により測定した結果、試験初期において Mg 合金部には部分的に電位が低い領域が存在し、腐食が局部的に進行すること、Al 合金部の電位はほぼ同様であることを確認した。また、時間の経過に伴い局部腐食域は減少し、150 分後にはほぼ認められなくなることを確認した。

次に、NaCl 濃度の異なる溶液中に Mg/Al 接合体を浸漬した際のガルバニック電流の時間変化を測定した。その結果、殆どの場合、ガルバニック電流は、1 時間以内に最大値を示し、その後急激に低下した。SVET による測定で確認した、局部腐食域の発生と消滅状況と良い対応を示すことを確認した。また、ガルバニック電位を測定したところ、NaCl 濃度の増加とともに低下した。一連の結果より、ガルバニック電流・電位の計測は Mg/Al 接合体の腐食挙動の評価に有効であることを明らかにした。

Mg-Al 接合部の腐食状態を 3D 表面形状計測した結果、セパレータ近傍に白色の腐食生成物が堆積していることが観察され、Al 合金側でも若干の浸食が確認された。以上の結果から、Mg/Al 締結部が腐食環境下に晒されると Mg 合金のみならず Al 合金も腐食することが予想された。

### 3) マグネシウム-アルミニウム接合体接合部構造解析・欠陥評価

材料の特性にはその組織や欠陥・含有ガス量などが大きく影響するように、接合体の特性には接合部の組織や欠陥・ガス量などが大きく影響を及ぼす。そこで、マグネシウム合金-アルミニウム合金異種金属接合試料の接合部の欠陥や含有水素量の測定手法の確立を目的として、モデル材を用いた X 線 CT 観察、水素量測定を行い問題点の確認を行った。

まず初めに、X 線 CT による内部欠陥観察を行った。モデル材として AZ91 マグネシウム丸棒 ( $\phi 10$  mm) に空隙欠陥を模擬して  $\phi 0.5$ mm の穴をあけたものを用いた。観察範囲を絞り解像度を上げて観察した結果と、観察範囲を広くし解像度を下げて観察した結果を比べると、どちらの条件でも試料中心に空隙欠陥（黒色部）が観察され、空隙を検出可能であったが、低解像度での観察においては、欠陥が大きく表示されていることが分かり、寸法精度が劣ることが分かった。

次に、水素量測定装置を用いて含有水素量の測定を行った。マグネシウム合金は蒸気圧が高く、溶解とともに蒸発・燃焼しやすい性質のため、測定や装置そのものに影響を及ぼすことが懸念される。そこで、マグネシウム合金単体の含有水素量測定を行い懸念点の確認を行った。含有水素量測定後のるつぼ及び下部電極を観察したところ、るつぼ内や下部電極周辺に、アルミニウム合金の場合は観察されないマグネシウムが飛散したと思われる形跡が確認されたが、測定中の装置の挙動や測定値などに異常な点は認められなかった。マグネシウム合金はその高い蒸気圧により測定時に蒸発するものの、測定や装置に悪影響を及ぼすことは無く正常に水素量測定が行えると考えられる。

### 4) CFRP/アルミニウム接合体の力学的特性評価

CFRP/アルミニウム合金接合体の変形挙動を解析するために CFRP およびアルミニウム合金の素材特性評価およびその接合体の力学特性を曲げ試験を用いて解析した。ここでは CFRP として PA6 をマトリックス樹脂として用いた織物材の積層板（Tepex、ランクセス社）を、アルミニウム合金として PMS（Prominent Micro Structure）処理をしたアルミニウム合金（A5052）を使用した。接合体は PMS 処理を行ったアルミニウム合金面と CFRP を、ホットプレスもしくは接着剤を用いて作製した。接着についてはアクリル系接着剤を用いて、アルミニウム合金と CFRP が直接接触する条件（薄い接着層部材）と PMS 処理側にスペーサを導入して直接接触させない条件（厚い接着層部材）の 2 条件で接着させた。接合状態の力学的挙動を評価するため力学万能試験機（AG-Xplus SC, 島津製作所）を用いて曲げ試験をした。また、曲げ試験途中の変形挙動を観察するためにデジタル画像相関法（DIC）を用いた解析を行った。

ホットプレスによって熱接合を行ったところ、PMS 処理を行ったサンプルについて

は熱接合で接合体を作製できた。しかし、PMS 処理をしていないサンプルは接合させることができず、PMS 処理によって生成される比較的大きな起伏が今回の熱接合では必要であることが分かった。また、熱接合は比較的容易な接合手法である一方で、CFRP とアルミニウム合金の熱膨張率が異なるため、接合体の反りが生じた。曲げ試験の結果から CFRP とアルミニウム合金はほぼ等しい曲げ弾性率を有すること、アルミニウム合金と比較すると CFRP のほうが破断ひずみは小さいが強度は 2 倍近くあり、アルミニウム合金を CFRP と接合することによって CFRP による補強効果を期待できることが分かった。CFRP/アルミニウム合金接合体の曲げ応力-ひずみ曲線から熱接合体と薄い接着層部材はほぼ同じ曲げ弾性率なのに対して、厚い接着層部材は高い曲げ弾性率を示した。両方とも変形初期に圧子直下の PMS 処理部分から破壊した可能性がある。強度の観点から CFRP がアルミニウム合金を補強する効果を十分発現できなかった。接合形態についても更なる検討が必要である。

アルミニウム合金と CFRP の DIC 解析の結果から、引張圧縮ひずみについて注目するとアルミニウム合金は圧子直下から支持部に向かってひずみが減少する傾向であるのに対して、CFRP の場合は周期的なひずみ分布が生じた。これは CFRP の織物構造に起因する弾性率分布を反映したためと考えられる。せん断ひずみに注目すると CFRP は圧子直下にひずみが集中しているのに対して、アルミニウム合金は広い範囲にひずみが分布した。降伏変形によって、広い範囲にせん断ひずみが生じたと考えられる。CFRP については、内部構造に応じて局所的なひずみが増加することから接合体の接着寸法と CFRP 内部構造寸法が近い場合、内部構造によって接合強度が変化する可能性がある。CFRP/アルミニウム合金接合体の DIC 解析の結果の引張圧縮ひずみのコンター図から、厚い接着層部材は接着剤部分が均一に変形して、熱接合体と薄い接着層部材は、局所的な引張ひずみが存在することが示された。これらの周期はちょうど PMS 処理の周期に一致しており、接着部分と非接着部分で変形が異なっていることが分かった。また、PMS 処理の周期に応じて現れたパターンは非対称になった。今回、PMS 処理部分は圧子の直下に置いたが、圧縮過程で PMS 処理の剥離、圧子のわずかな位置のずれ等によって剥離が不均一に起きたと考えられる。これらの不均一変形は初期の剥離の影響が大きいと考えられるので、接着面積の増大等による剥離の防止が一つの解決策として考えられる。さらに、接合体の状態評価手法として DIC の有効性も確認できた。



[テーマ番号 4 2 -IV、テーマ番号 3 5 -④] 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術研究

(i) 2019 年度(テーマ番号 4 2 -IV にて実施)

1) 接合部材作製

陽極酸化処理を実施したマグネシウム合金-アルミニウム合金のボルト締結部材を作製し、その疲労特性を評価した。その結果、陽極酸化処理を施工することによりボルトの軸力変動が抑制されることを明らかにした(詳細は 2)に記載)。2020 年度は、各種表面処理や接着処理の影響を調査するための締結材を作成し、その軸力変化挙動を調査する予定である。

また、マグネシウム合金-アルミニウム合金の新規接合方法として爆着圧接法に注目し、その接合トライを実施した。ここではマグネシウム合金として AZX611 合金押出材(幅 130mm、長さ 1000mm、厚み 4mm)、アルミニウム合金として A6N01 合金(幅 130mm、長さ 1000mm、厚み 3mm)を選定した。爆着接合に当たっては、マグネシウム合金を下板として固定し、爆発によりアルミニウム合金をマグネシウム合金に衝突させることにより爆着接合を実施した。爆着トライを行った試料の外観を図 3-2.9.3-1 に、その代表的な Mg/Al 界面の断面写真を図 3-2.9.3-2 に記す。爆着トライの結果プロセス条件を最適化することにより、試料の大部分において健全な接合体が得られることを確認した。今後は、爆着接合体の機械的特性、疲労特性、耐食性等を系統的に評価していく予定である。



図 3-2.9.3-1 Mg(AZX611 合金)、Al(A6N01 合金)爆着接合体の外観(赤い部分の内側が接合された部分)

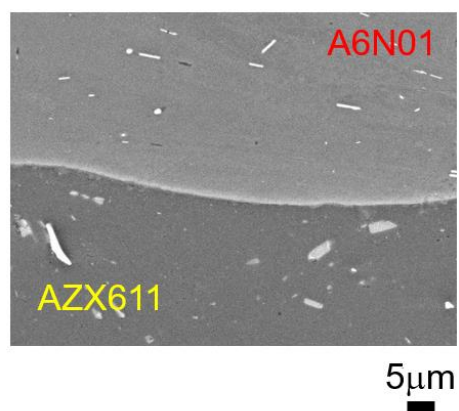


図 3-2.9.3-2 Mg(AZX611 合金)、Al(A6N01 合金)爆着接合体の接合界面の二次電子像

2) 疲労特性評価

マグネシウム(Mg)合金板材とアルミニウム(Al)合金板材をボルト締結した部材(Mg/Al ボルト締結材)を対象として疲労試験を実施し、疲労試験時のボルト軸力(軸力:ボルトの緩みと相関)の変化を調査した。

最初に Mg (AZX611 合金) / Al(A6061 合金)ボルト締結体を対象として、締め付けトルク 6.0N-m および 8.0N-m で締め付けた試験片を周波数 5Hz、振幅±0.1mm の条件で疲労試験を行い、軸力変化を測定した。試験前に締結面の TD 方向の算術平均粗さ

(Ra) を計測したところ、AZX611 では  $1.12\mu\text{m}$ 、A6061 では  $0.25\mu\text{m}$  であった。図 3-2.9.3-3 に軸力変化を示す。締め付けトルク  $6.0\text{N}\cdot\text{m}$  の場合と  $8.0\text{N}\cdot\text{m}$  の場合を比較すると、 $8.0\text{N}\cdot\text{m}$  の方が軸力低下の度合いが明らかに小さいことが確認された。

ボルトで 2 枚の板材を締結した際に被締結物に作用する圧縮力を見積もると、初期軸力  $7.8\text{kN}$  (締め付けトルク  $6.0\text{N}\cdot\text{m}$ ) の場合は  $149\text{MPa}$ 、 $11.2\text{kN}$  の場合は  $214\text{MPa}$  となった。なお、AZX611 および A6061 の圧縮降伏応力はそれぞれ  $157\text{MPa}$  および  $300\text{MPa}$  であった。したがって図 3-2.9.3-3 の結果は、板材の圧縮応力が AZX611 の降伏応力よりも大きくなる条件で締め付けると、軸力減少を抑制できることを示唆している。このようにボルト緩み特性には初期軸力の大きさが影響することを明らかにした。

次に、疲労特性に対する試料表面状態の影響を調べるために、マグネシウム合金 (AZX611) とアルミニウム合金 (A6N01) に陽極酸化処理を施し、初期軸力が  $9.0\text{kN}$  になるようにボルトで締結した。そして周波数  $5\text{Hz}$ 、振幅  $\pm 0.1\text{mm}$  の条件で締結材の疲労試験を行った。試験前に締結面の TD 方向の算術平均粗さ (Ra) を計測したところ、AZX611 では  $1.23\mu\text{m}$ 、A6061 では  $0.21\mu\text{m}$  であった。図 3-2.9.3-4 に陽極酸化処理を行った場合 (表面処理材) と、比較として陽極酸化処理を行わなかった場合 (受け入れまま材) の軸力変化を示す。表面処理材の軸力低下は  $25\%$  ( $8.9\text{kN} \Rightarrow 6.7\text{kN}$ )、受け入れまま材の軸力低回は  $38\%$  ( $9.2\text{kN} \Rightarrow 5.7\text{kN}$ ) であった。この結果は、軸力低下を抑制するための手段として、陽極酸化処理の施工が有効である可能性を示唆している。来年度は、各種表面処理材を対象として、ボルト緩み挙動に対する試験条件や試料の表面状態の影響をさらに検討する予定である。

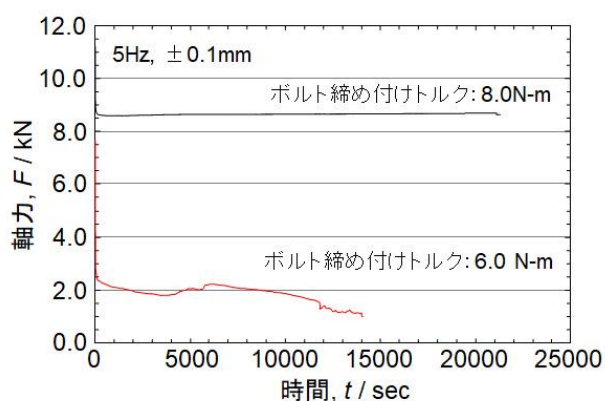


図 3-2.9.3-3 Mg (AZX611 合金) / Al (A6061 合金) 締結体の軸力変化 (受け入れまま材)

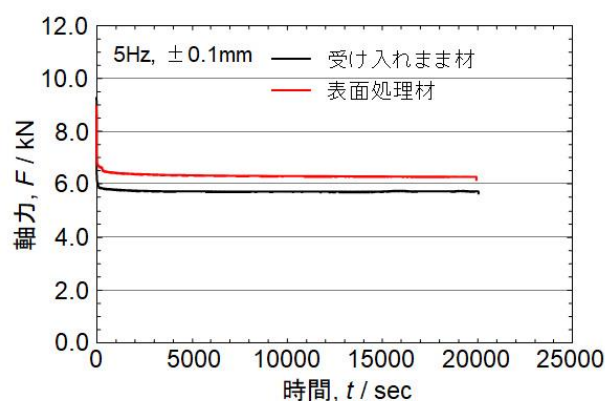


図 3-2.9.3-4 Mg (AZX611 合金) / Al (A6N01 合金) 締結体の軸力変化 (受け入れまま材および表面処理)

### 3) 耐食性評価

各種接合条件 (接着、締結等) における腐食環境下でのガルバニック腐食挙動を走査型振動電極 (SVET) 等により調査し、材料とその面積比、環境が及ぼす影響を定量的に評価した。ガルバニック腐食を低減するための部材への表面処理および施工条件を提案し、効果を検証する。また、第一原理計算を用いてマグネシウム合金-アル

ミニウム合金のガルバニック腐食挙動を推測するための基礎モデルを構築した。以下、成果の詳細を記す。

### 3-1) マグネシウム-アルミニウム異材（締結材）の耐食性評価

本テーマでは、マグネシウム合金/アルミニウム合金接合体（接合体）の電流分布を、マイクロ電極法的一种である走査型振動電極(SVET)を用いて測定し、ガルバニック腐食に及ぼす NaCl 濃度の影響を評価した。マグネシウム合金には AZX611 圧延板、アルミニウム合金には A6N01 圧延板を用いた。試験面積をともに  $2.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$  とした。両者の側面を  $100 \mu\text{m}$  のスペーサを挟んで接合し、樹脂に埋め込んだ。SVET を用いて、電氣的に短絡状態にある  $2.0 \times 2.0 \text{ cm}^2$  の領域を  $0.05 \times 0.05 \text{ cm}^2$  ステップで走査した。腐食環境には  $0.1 \sim 1 \text{ wt\% NaCl}$  溶液を用い、試験時間を 24 時間とした。試験終了後に腐食生成物除去後を除去し、接合体表面のプロファイルを光学式 3D 表面形状計測装置で評価した。上記試験とは別に、各合金の所定濃度の NaCl 溶液中での重量減少腐食速度も測定した。

$0.5 \text{ wt\% NaCl}$  溶液中の接合体を評価した結果、A6N01 はカソード、AZX611 はアノードとしてふるまうことが確認できた。但し前者はほぼ全体がカソードとなるが、後者は局部アノードの複数個の集まりである等、挙動が異なった。時間の経過に伴い局部アノードの数が減少し白色の不働態域が広がっており、腐食速度が減少していた。

図 3-2.9.3-5 に異なる濃度の NaCl 溶液中に浸漬した接合体の 24 時間後の SVET 電流マップを示す。青色は正（カソード）の、赤色は負（アノード）の電流値を示す。NaCl 濃度の増大につれ、カソード、アノード電流値が増大している。また局部アノードが接合体境界部に集中して発生するようになる。図 3-2.9.3-6 試験終了後の接合体表面のプロファイルを示す。 $1.0 \text{ wt\% NaCl}$  溶液での AZX611 の境界部での最大腐食深さは約  $1 \text{ mm}$  に達していた。図 3-2.9.3-5 と図 3-2.9.3-6 には良い相関が認められ、SVET によるガルバニック腐食評価の有効性を確認できた。

重量減少腐食速度測定の結果、AZX611 は NaCl 濃度  $0.5 \text{ wt\%}$  以上では脱不動態化して活性に腐食していた。この濃度は SVET において局部アノードが接合体境界部に集中する状況と良く対応している。よって本接合体でのガルバニック腐食はアノードの皮膜安定性に密接に関係し、NaCl 濃度によって挙動が変化することが判明した。

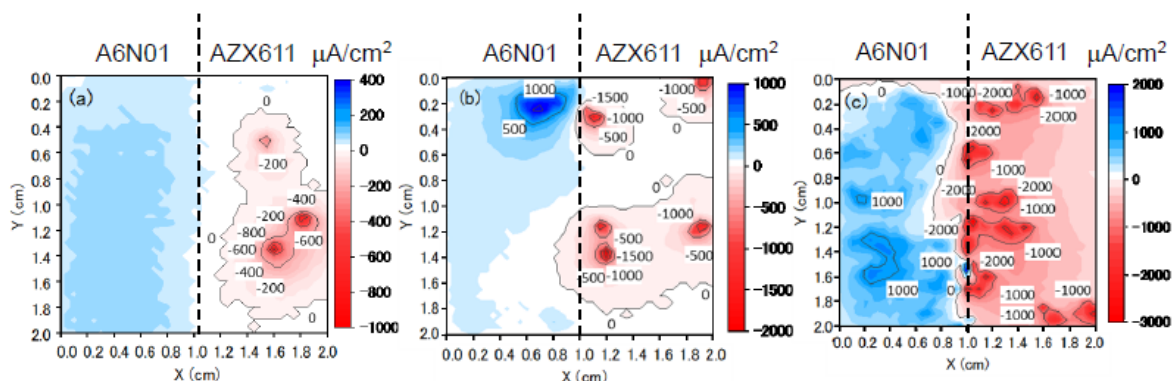


図 3-2.9.3-5 異なる濃度の NaCl 溶液中における A6N01/AZX611 接合体の 24 時間後の SVET 電流マップ：(a) $0.2 \text{ wt\%}$ 、(b) $0.5 \text{ wt\%}$ 、(c)  $1.0 \text{ wt\%}$ 。

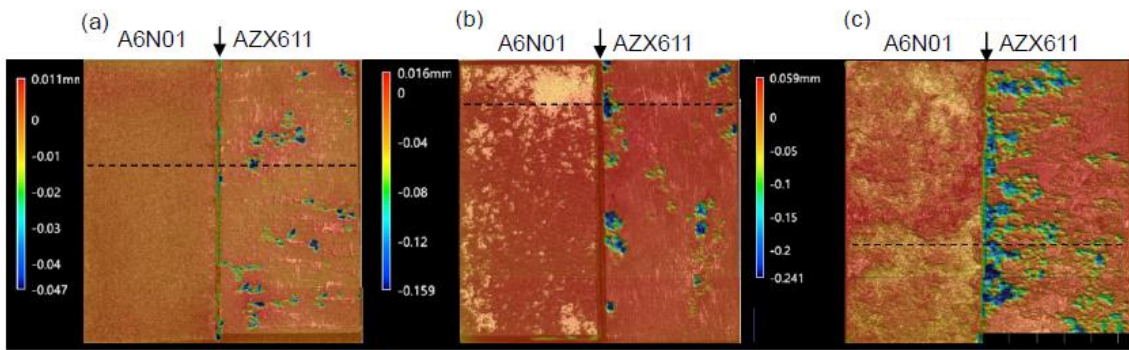


図 3-2.9.3-6 異なる濃度の NaCl 溶液中における A6N01/AZX611 接合体の 24 時間後の表面プロファイル：(a)0.2wt%、(b)0.5wt%、(c) 1.0wt%。  
矢印はスペーサの挿入位置を示す。

### 3-2) 第一原理計算によるマグネシウム-アルミニウム界面の腐食特性予測

本サブテーマでは、第一原理計算を用いてマグネシウム合金-アルミニウム合金のガルバニック腐食挙動を推測するための基礎モデルを構築した。まず、マグネシウム合金とアルミニウム合金の接合界面に生成することがわかっている、2 種類の金属間化合物  $\beta$  相 ( $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ ) 及び  $\gamma$  相 ( $\text{Mg}_2\text{Al}_3$ ) の腐食挙動を、第一原理計算により検討した。 $\beta$  相及び  $\gamma$  相それぞれの結晶構造からクラスターを切り出し、 $\text{H}_2\text{O}$  との反応を解析した (図 3-2.9.3-7)。いずれの場合も、 $\text{H}_2\text{O}$  分子は分子中の O 原子を介して金属表面へ吸着することがわかった。 $\beta$  相では Mg への吸着の後に、O-H 結合が解離するというプロセスが起りやすく、 $\gamma$  相では Mg と Al でどちらが有利とは一概に言えず、 $\beta$  相より反応は起り難いことが判明した。また、どちらの相も Mg や Al の純粋な金属に比べると活性化エネルギーが高く、金属間化合物の方が腐食されにくいと考えられる。

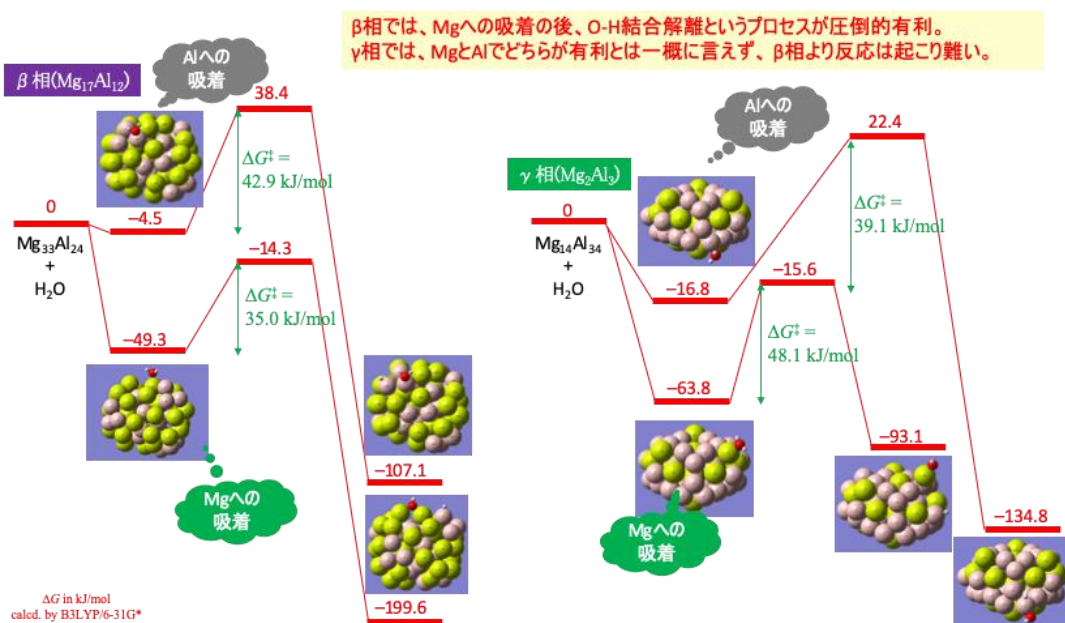


図 3-2.9.3-7 第一原理計算による Mg-Al クラスタ上での  $\text{H}_2\text{O}$  の分解反応結果

次に、異種金属が接触することによるガルバニック腐食を検討した。異種金属が接触すると酸化還元電位の違いから、一方から他方へ電子移動が起こると考えられ、それを考慮するために図 3-2.9.3-7 で検討した系に、+2 から-2 までの電荷を負荷した状態での活性化自由エネルギー ( $\Delta G^\ddagger$ ) を計算した (図 3-2.9.3-8)。図 3-2.9.3-8 で電荷 0 の状態が、図 3-2.9.3-7 で示したものに相当する。図 3-2.9.3-8 には、 $Mg_{33}Al_{24}$ ( $\beta$  相) や  $Mg_{14}Al_{34}$ ( $\gamma$  相)の他に、純粋な金属に相当するものとして  $Mg_{34}$  と  $Al_{40}$  の結果も載せてある。いずれのクラスター上でも、負の電荷をかけるほど活性化自由エネルギーが低下するということがわかった。この反応は、水の還元 (金属は酸化される) 反応なので、電子が豊富なほど反応が促進されるという結果は、妥当なものと言える。今回は、人為的に電荷を与えたが、実際の複合体では、自発的な電荷分布により、より負の電荷が溜まりやすいところが反応サイトになると考えられる。今後は、難燃性マグネシウム合金と Al が接合した際に形成される他の金属間化合物についてもモデルを作成し、その上での反応を検討することにより、ガルバニック腐食の挙動解明を行う。

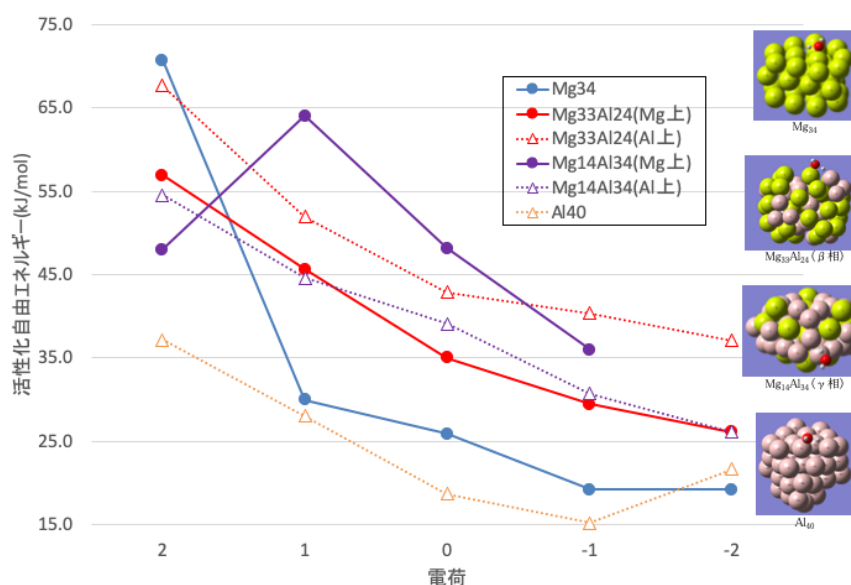


図 3-2.9.3-8 系全体の電荷を変化させた時の活性化自由エネルギー

#### 4) 接合部構造解析・欠陥評価

2018 年度は、テーマ 58 において、モデル材を用いた X 線 CT 観察、水素量測定を行った。この中で、特に水素量測定において、測定条件によって測定値が変化する傾向が見られたため、令和元年度は、市販のマグネシウム合金を対象として、測定条件と測定値の関係を詳細に調査した。その後、マグネシウム合金-アルミニウム合金異種金属接合試料を模擬した模擬材に対する水素量測定を行った。

初めに、市販材の含有水素量を測定する測定条件の大まかな範囲を決定するために、当該研究グループが過去に casting にて作製した難燃性マグネシウム合金を対象として予備測定を行った。結果を図 3-2.9.3-9 に示す。加熱出力を 700~1100W、分析時間を 20~40 秒の範囲で変化させた。加熱出力や分析時間の増加とともに測定値は増加する傾向を示した。また、700W・20 秒の測定条件においては、加熱が十分ではなく試料が

完全に溶解しなかった。本結果を受けて、マグネシウム合金の市販押出材 4 種 (AZ31、AZX912、AMX602、ZK60) を対象として、加熱出力 700~900W、分析時間 10~30 秒の測定条件にて水素量測定を行った。分析時間 20 秒および 30 秒の結果を図 3-2.9.3-10 (a)および(b)にそれぞれ示す。図中で白抜きのマーカーは、試料の一部もしくは全てが溶解していない。分析時間 20 秒の条件では、加熱出力 900W でもすべての試料が完全には溶解しておらず、試料中の水素を完全に抽出できていないと考えられる。一方、分析時間 30 秒では加熱出力 850W 以上で全ての材料が完全に溶解した。図 3-2.9.3-10 (b)に示すように、マグネシウム合金の水素量は、その合金種によって大きく異なり、ZK60 は一般的なアルミニウム合金並みの 1ppm 以下であるのに対し、AZ31、AZX912、AMX602 は 1ppm を超える値を示し、更に加熱出力が高いほど測定値が増加する傾向を示した。測定条件による測定値の大きな変動については、他の測定原理を用いた分析手法による測定結果と突き合わせた検討を行っていく必要がある。

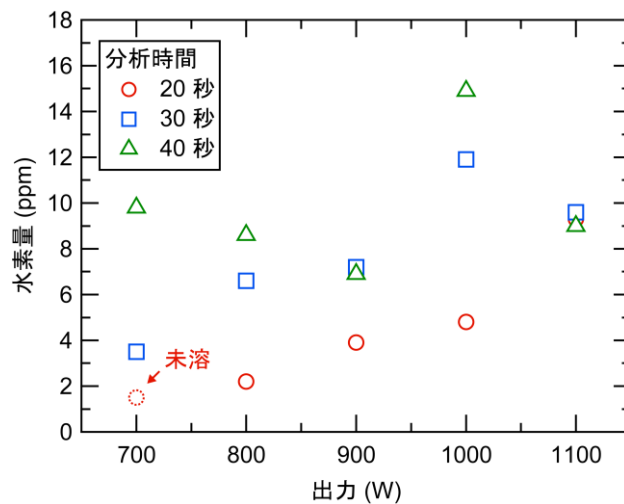


図 3-2.9.3-9 難燃性マグネシウム合金における測定条件と測定値の関係

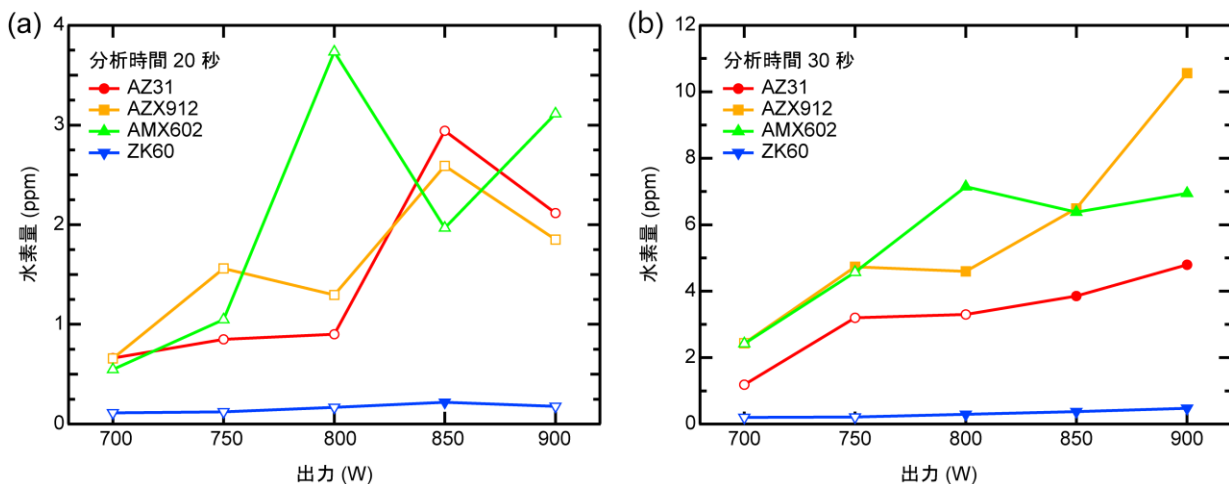


図 3-2.9.3-10 市販のマグネシウム合金における測定条件と測定値の関係

(a)分析時間 20 秒、(b)分析時間 30 秒

最後に、市販のマグネシウム合金押出材 4 種とアルミニウム押出材にネジ加工を施し、マグネシウム合金－アルミニウム合金接合体を準備した。屋外環境において雨水に曝される状況を想定し、上記接合体を水道水に 1 週間程度浸漬を行い、その後、水素量の測定を行った。水素分析は、接合体を分解してマグネシウム合金部分のみを用いて行った。また、測定条件は 800W・30 秒とした。水道水浸漬後、試料表面の切削を行わない場合、全ての試料が上記加熱条件では溶解しなかった。これは、水道水への浸漬により試料表面に何かしらの化合物層が形成したためと考えられる。水道水浸漬後に溶解しにくくなるという現象はアルミニウム合金では観察されておらず、活性なマグネシウム合金特有の現象の可能性が高い。2020 年度においては、試料の表面状態が測定に及ぼす影響について検討を行うとともに、他の測定原理に基づく分析手法の結果と突き合わせを行い、測定条件を決定していく必要がある。

## (ii) 2020 年度(テーマ番号 3 5 -④にて実施)

### 1) 接合部材作製

2019 年度は、陽極酸化処理を施した AZX611 合金と A6N01 合金ボルト締結材の疲労試験を行い、陽極酸化処理によりボルト軸力低下が抑制されることを示した。そこで 2020 年度は、陽極酸化処理材に接着剤を塗布したボルト締結材の疲労試験を行った。ここでは、表 3-2.9.3-7 に示す三種類の接着剤（二液混合反応型エポキシ系接着剤）を選定し、陽極酸化処理を実施した試験片表面に当該接着剤を塗布して試験を実施した。試験結果の詳細は次節に示す。

表 3-2.9.3-7 接着剤の特性

	接着剤A	接着剤B	接着剤C
引張せん断 接着強度	29.2MPa	14.2MPa	21.1MPa
弾性率	1615MPa	451MPa	778MPa
破断強度	33.7MPa	10.5MPa	16.1MPa
破断伸び	3.2%	40%	25%

### 2) 疲労特性評価

AZX611 と A6N01 に陽極酸化処理を実施した試料の表面に表 3-2.9.3-7 に記載の接着剤（二液混合反応型エポキシ系接着剤）を塗布した後に、ボルト締結接合部材を作製した。そして初期軸力が 8kN になるように締め付けた試験片を、周波数 5Hz、振幅 ±0.1mm の条件で疲労試験を行い、軸力変化を測定した。

図 3-2.9.3-11 に軸力変化を示す。接着剤を塗布しない試料では、軸力は試験開始直後から急激に減少し、試験終了後には 5.0kN（軸力の減少割合は 36%）であった。それに対して接着剤を塗布した試料では、いずれも軸力低下が接着剤を塗布しない試料に比べて低くなった。具体的には接着剤 A では軸力低下は 9%（8.1kN ⇒ 7.4kN）、接着剤 B では 21%（8.1kN ⇒ 6.4kN）、接着剤 C では 7%（8.1kN ⇒ 7.5kN）であった。すなわち、ボルト締結面を接着剤で接着することは、ボルト締結材が繰り返し振動を受けた場合のボルト軸力低下（緩み）の抑制に有効であることが示された。また接着

剤によるボルト軸力低下の効果は、接着剤 A と C で接着剤 B よりも大きかった。表 3-2.9.3-7 に示すように接着剤 A と C は接着剤 B よりも引張せん断強度、弾性率や破断強度が高い。このような接着剤の特性が、ボルト軸力低下の効果の違いの原因であると推測される。

図 3-2.9.3-12 に受け入れまま材に接着剤を塗布したボルト締結材と陽極酸化処理材に接着剤を塗布しボルト締結材の軸力変化を示す。試験終了時での軸力は、接着剤 A では受け入れまま材が 7.2kN、陽極酸化処理材が 7.4kN、接着剤 B では受け入れまま材が 6.1kN、陽極酸化処理材が 6.4kN、接着剤 C では受け入れまま材が 7.3kN、陽極酸化処理材が 7.5kN であった。すなわち陽極酸化処理材の方が受け入れまま材よりもボルト軸力低下が抑制される傾向があった。この原因は現時点では明らかではないが、陽極酸化処理を行うことで接着剤の接着性が受け入れまま材に比べて向上した可能性がある。今後は接着剤の接着性の評価を検討するとともに、ボルト緩み挙動に対する試料の表面状態の影響や接着剤塗布の影響も引き続き検討する。

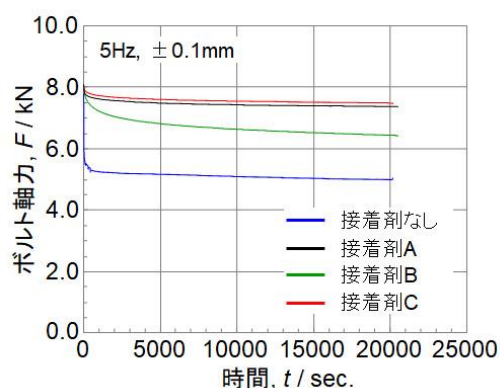


図 3-2.9.3-11 接着剤を塗布した Mg (AZX611)合金 / Al(A6N01)合金ボルト締結体の軸力変化（陽極酸化処理材）

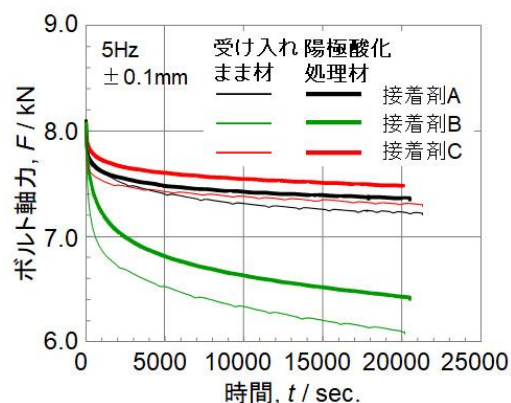


図 3-2.9.3-12 接着剤を塗布した Mg (AZX611)合金 / Al(A6N01)合金ボルト締結体の軸力変化（陽極酸化処理材及び受け入れまま材）

### 3)耐食性評価

実験的検討に関しては、マグネシウム(Mg)合金とアルミニウム(Al)合金のガルバニック腐食挙動を調査した。Mg 合金は、Al 合金同様に表面に形成される酸化皮膜の保護性・安定性が耐食性を左右する。汎用 Mg-Al 合金は表面に Al を含む酸化物/水酸化物皮膜が形成され、一般的に合金中の Al 濃度が高いほど耐食性に優れると言われる。しかしガルバニック腐食状態では、異種金属との接触に伴い外部電流が流れ込み、皮膜が破壊された状態で腐食が進行するため、自然浸漬状態とは異なる挙動を示すことが予想される。そこで、2 種類の Mg 合金を用い、Al 合金とのガルバニック腐食について、電気化学挙動および表面特性の差異を調査した。



図 3-2.9.3-13 に Mg-6%Al-1%Ca-1%Zn 合金 (AZX611) 及び Mg-8%Al-0.3%Zn(AZ80)合金を、A6N01 アルミニウム合金と 1wt%NaCl 溶液中で電氣的に接触させた場合の、合金間に流れるガルバニック電流の時間変化を示す。両サンプル対に流れる電流は浸漬初期に急激に上昇するが、AZX611-A6N01 対は約 30 分後に減衰し始め、6 時間後には約 200  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  を示した。他方 AZX611-A6N01 対は、約 500  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  に達した後はわずかに減少するのみで、高い値を保っていた。

両サンプル対をこの時点に取り出し、水洗・乾燥後、グロー放電発光分析装置(GD-OES)を用いて、表面皮膜を解析した。

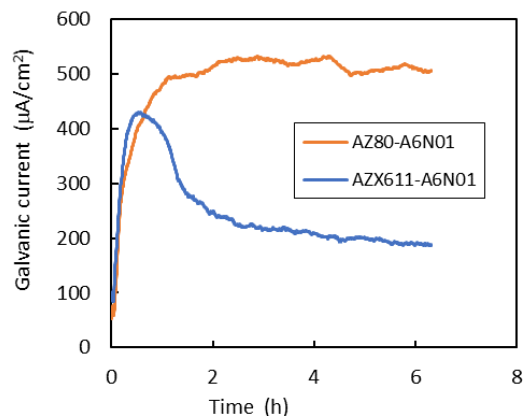


図 3-2.9.3-13 1%NaCl 溶液中の AZX611-A6N01 および AZ80-A6N01 対のガルバニック電流

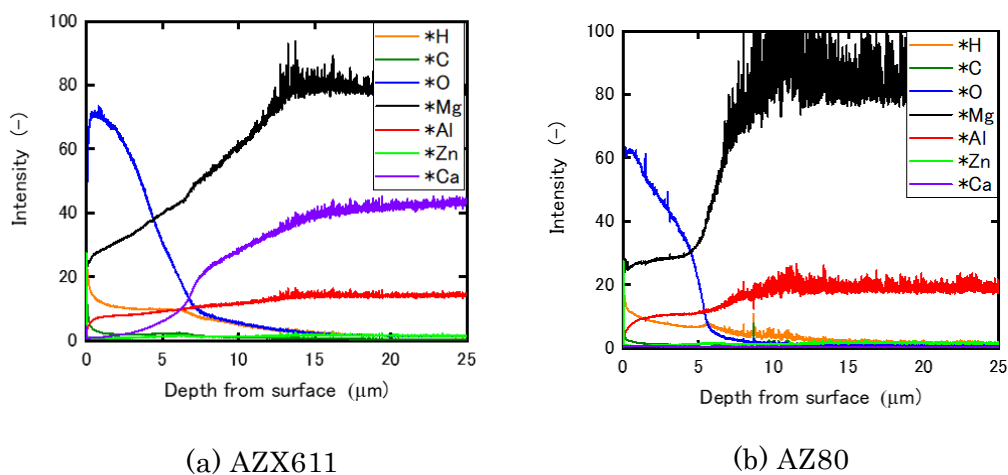


図 3-2.9.3-14 GD-OES によるマグネシウム合金表面の深さ方向の元素分布

AZX611 および AZ80 試験片表面の深さ方向の元素分布を図 3-2.9.3-14 に示す。縦軸は発光強度である。ともに表面付近に C,H,O 元素が検出されており、皮膜の存在を示唆する。C は極表面のみに検出されており、大気暴露試験で観察されるような厚膜の炭酸塩皮膜は形成していないと予想される。O および H 元素は酸化物/水酸化物皮膜に由来する。AZX611 がより高い O 元素ピークを示している。O 元素ピーク値の 1/10 の距離を皮膜深さとすると AZX611 は 8.5  $\mu\text{m}$ 、AZ80 は 5.7  $\mu\text{m}$  となり、AZX611 表面上により厚い皮膜が形成されていることがわかる。また AZ80 においては深さ 6 $\mu\text{m}$  以上において O 元素プロファイルよりも高い位置に H 元素プロファイルが検出されており、水素化マグネシウム  $\text{MgH}_2$  の存在を示唆する。A6N01 を GD-OES に適用したところ、酸化皮膜厚さは 70-80 nm であった。Mg 合金とのガルバニック腐食において、Al 合金はカソードとなる。この結果生ずるカソード反応 ( $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^- + \text{H}_2$ )

により表面がアルカリ化し、皮膜が溶解されることが知られており、解析結果はこれを裏付けている。また、表面に Mg 元素が、AZX611 と対となる A6N01 においてはさらに Ca 元素が検出されており、Mg 合金から溶解したこれら元素が A6N01 上に析出することを示唆する等、興味深い知見が得られた。

計算科学的検討に関しては、マグネシウム–アルミニウム接合体の、水との反応性を、量子化学計算により検討した。計算に使用したモデル  $\text{Mg}_{53}\text{Al}_{60}$  と、その電荷分布を図 3-2.9.3-15 に示す。中心付近の Mg がプラスに荷電している様子が見られ、Al サイドから Mg サイドに大きな双極子モーメントが現れ、Mg サイドから Al サイドに電子移動が起こっていることがわかる。このモデルを使用して計算を行った結果 (図 3-2.9.3-16)、 $\text{H}_2\text{O}$  分子の吸着は、Mg 原子上への吸着 ( $-45 \text{ kJ/mol}$ ) の方が、Al 原子上への吸着 ( $-5 \text{ kJ/mol}$ ) よりも有利であることがわかった。Mg 上に吸着した  $\text{H}_2\text{O}$  の反応性は、界面から遠い位置 (活性化自由エネルギー  $\Delta G^\ddagger = 40 \text{ kJ/mol}$ ) よりも、界面近く ( $\Delta G^\ddagger = 29 \text{ kJ/mol}$ ) の方が高いことがわかった。2019 年度、系全体にプラスの電荷を与えると反応性が落ちるという結果を示したが、今回、界面から遠い Mg 上での反応性の低下は、Mg-Al 接合体内部での Mg サイドから Al サイドへの電子移動により、Mg サイドがプラスに荷電していることと良い一致を示している。また界面近くでの反応性が高いのは、 $\text{H}_2\text{O}$  の吸着しやすい Mg 原子のすぐ隣に、H 原子を引き抜きやすい Al 原子が存在することによるものと考えられる。2019 年度示したように、 $\beta$  相や  $\gamma$  相の金属間化合物上では、純粋な Mg や Al 金属上よりも反応性が低下することが見られたため、Mg-Al 接合体界面にも、これら金属間化合物が形成することは、 $\text{H}_2\text{O}$  との反応性を抑制する効果が期待されると考えられる。

現在のモデルでは、Al サイドの界面からの長さが少ないので、今後は、もう少し Al の方を長くしたモデルでの計算を行う予定である。

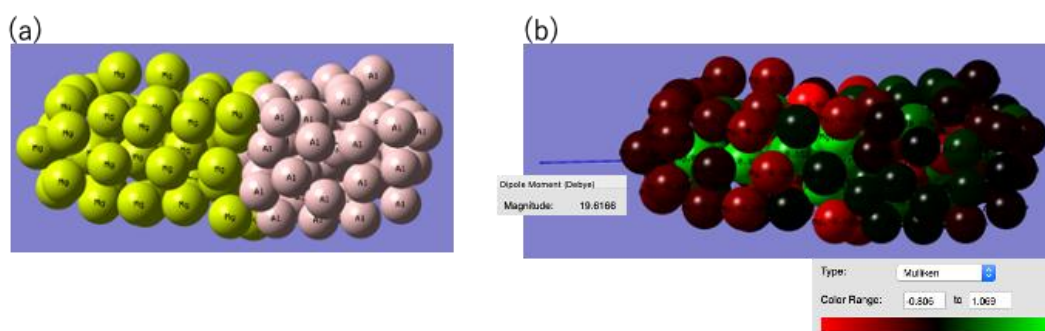


図 3-2.9.3-15 (a)マグネシウム–アルミニウム接合体のモデル図、(b)電荷分布と双極子モーメント

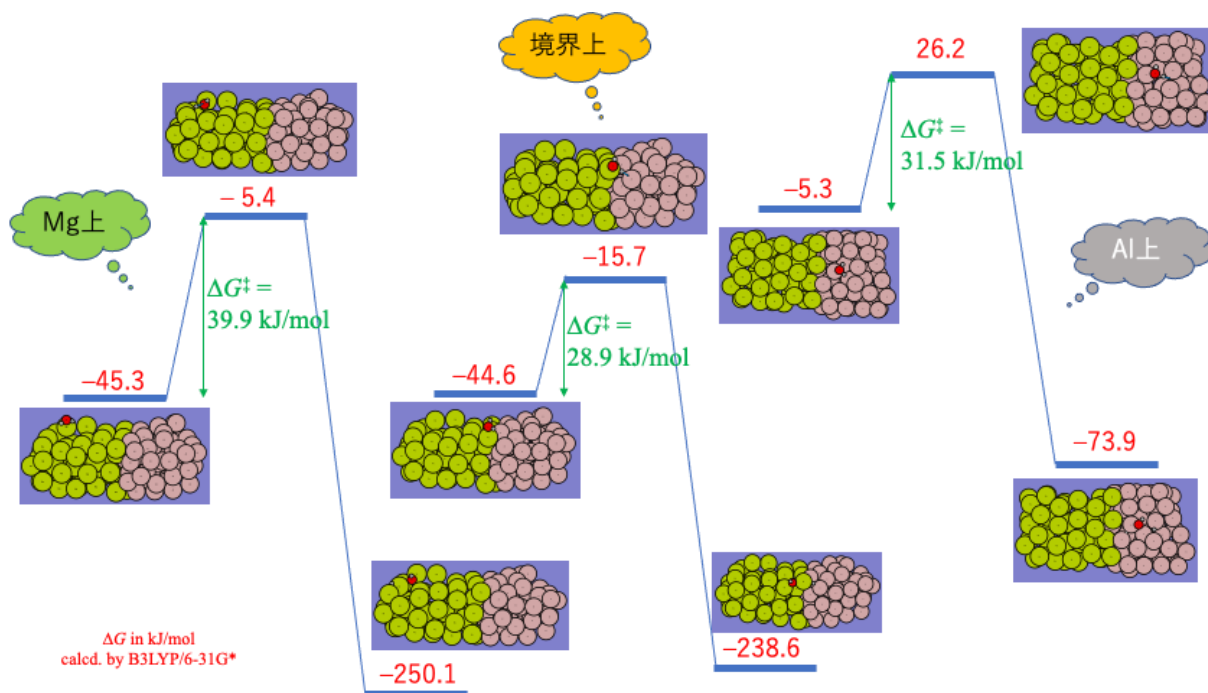


図 3-2.9.3-16 第一原理計算による、Mg-Al 接合体モデル上での H<sub>2</sub>O の分解反応結果

#### 4)構造解析・欠陥評価【産業技術総合研究所】

水素濃度評価に関しては、マグネシウム(Mg)合金-アルミニウム(Al)合金接合体の使用中の劣化挙動を明らかにするため、接合部材が雨水等に曝された状況を想定し、Mg合金-Al合金接合体を水及び温水(70°C)に1週間浸漬したのち、各材料の水素量測定を行った。Mg合金としては市販の押出材丸棒4種(AZ31、ZK60、AMX602、AZX912)を使用し、相手材となるAl合金は市販の純Al押出材丸棒(1070)を用いた。これら丸棒にネジ加工を施し接合を行い接合体とした。比較のため、接合しないMg合金・Al合金単体についても、同様に水および温水へ1週間浸漬したものについて水素量測定を行った。

図3-2.9.3-17にMg合金単体浸漬後の水素量測定結果を示す。浸漬前のMg合金(まま材)に含まれる水素量は合金種によって異なり、ZK60は0.5ppm以下であるのに対し他の3種は3~7ppm程度と1桁多い水素量であった。Mg合金はいずれの合金も単体状態で水・温水に浸漬することで水素量が増加した。特に温水に浸漬した場合にその増加が顕著であった。しかし、浸漬後の試料の表面を1mm程度切削してから測定を行うと、いずれの合金も浸漬を行う前のまま材と同程度の水素量であった。つまり浸漬後試料の水素量増加は、試料表面の反応生成物に由来するものであり、試料内部にまで水素が入り込むことはないことが分かる。一方、Al合金は単体の状態では水や温水に浸漬しても一切水素量増加を示さなかった(図3-2.9.3-18)。

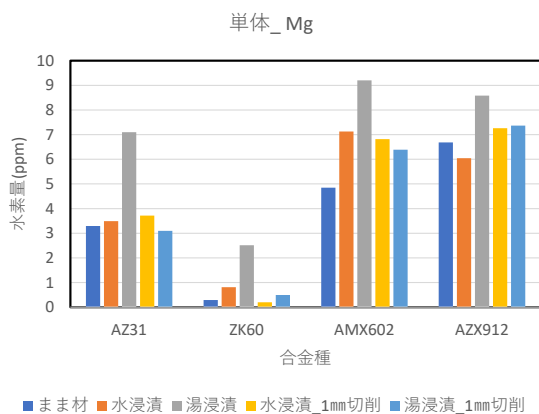


図 3-2.9.3-17 Mg合金単体浸漬時の水素量

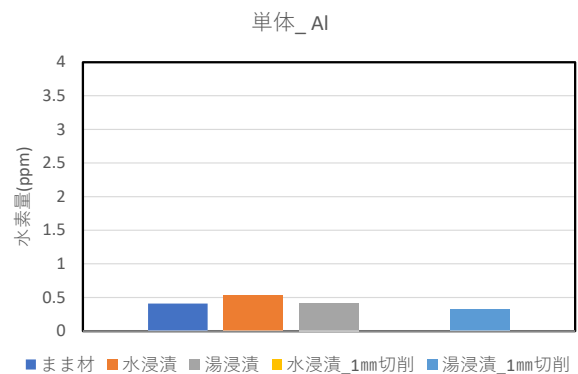


図 3-2.9.3-18 Al合金単体浸漬時の水素量

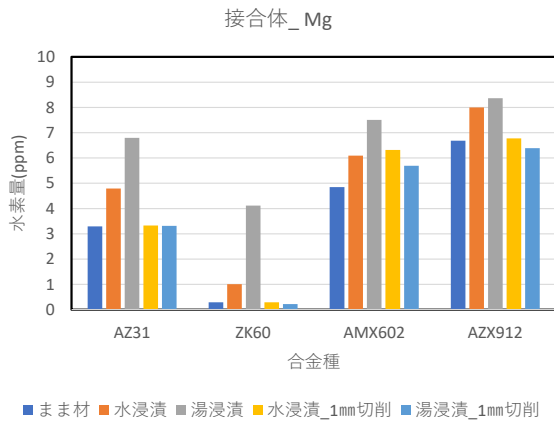


図 3-2.9.3-19 Mg-Al 接合体浸漬時の水素量

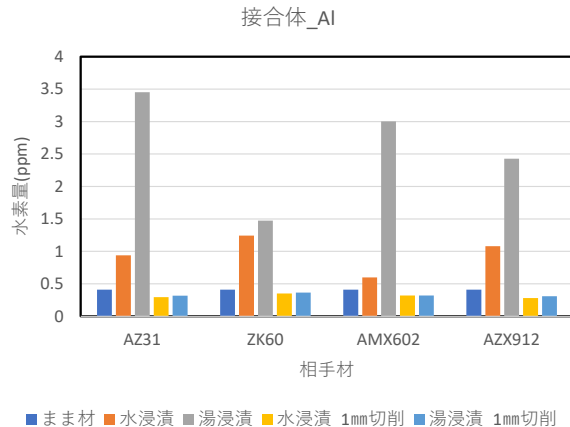


図 3-2.9.3-20 Mg-Al 接合体浸漬時の水素量

図 3-2.9.3-19 に接合体として浸漬後の Mg 合金部分の水素量測定結果を示す。いずれの合金も、単体浸漬時と同様に水・温水に浸漬することで水素量の増加を示した。その増加量は単体浸漬時とほぼ同程度であり、Al 合金と接合したことによる影響は見られない。また、表面を 1mm 切削することでまま材と同程度の水素量となった。このことから、Mg 合金は水・温水に浸漬することで表面に反応生成物を形成するものの、その程度は Al 合金（異種材料）と接合することによる影響は受けないことが分かった。一方、接合体の Al 合金部分は、単体浸漬の場合とは異なり水・温水に浸漬することで水素量が増加した（図 3-2.9.3-20）。特に温水浸漬した場合にその増加が顕著である。また、相手材の Mg 合金の種類によってその増加量が大きく異なる結果を示し、AZ31 と接合した Al 合金は ZK60 と接合した Al 合金の 2 倍以上の水素量であった。しかし、試料表面を 1mm 程度切削することで全ての材料において水素量はまま材同等になったことから、Mg 合金と同じく水素量増加は表面の反応生成物に由来しているものと考えられる。2021 年度は電気的な接触を防いだ状態の接合（=接着）により、反応生成物形成・水素量増加の程度にどのような影響が生じるか、検討を行う予定である。

本研究で用いている水素分析装置は、測定時間とともに水素量が増加するなど、その測定値（絶対値）には不確かなところがあることを 2020 年度に明らかとしている。そこで、当該装置とは異なる測定原理の装置での水素量測定を外注にて行った。ZK60 が他の 3 種よりも少ない水素量を示すという傾向は一致したが、その水素量は本研究の結果に対し 10 倍程度多い値であった。外注先装置において Mg 合金中の水素量測定は初めての試みであり、本検証は 2021 年度も引き続き行っていく予定である。

エックス線及び中性子線による構造・欠陥解析では、各種アルミニウム(Al)合金、マグネシウム(Mg)合金のバルク及び接合体の X 線による透過像分析を行った（図 3-2.9.3-21）。測定した Al 合金と Mg 合金は接合材では同時に測定することになるが、材料別に濃淡にて区別できる状態のデータを取ることができた。また、接合処理の加工範囲も確認できるデータであった。接合部分の欠陥導入部について

ては透過率が高く濃淡が淡くなり、欠陥の導入部の位置の確認ができる状態であった。

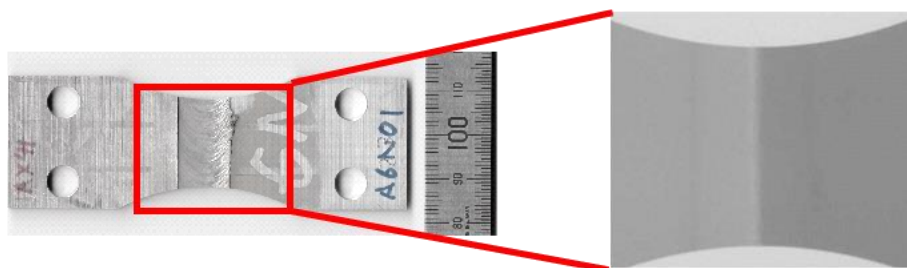


図 3-2.9.3-21 X線による接合試料の透過像測定例

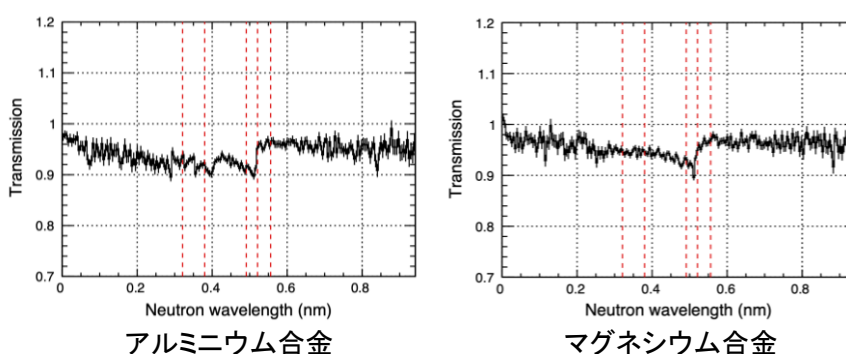


図 3-2.9.3-22 中性子計測によるブラッグエッジスペクトル

また、各種 Mg 合金、Al 合金のバルク及び接合体の中性子ビームを用いた計測は中性子ビームを発生し始めたばかりの中性子発生施設 AISTANS を用いて行った (図 3-2.9.3-22)。中性子計測においては、ブラッグエッジのデータを検出器の素子ごとに得ることができ、対象マルチマテリアル試料の透過中性子量分布の物質別ブラッグエッジスペクトルデータ等を得ることができた。

### (iii) 2021~2022 年度(テーマ番号 4 2 -IV にて実施)

#### 1) 接合部材作製

2021 年度は、アルミニウム合金の異材接合を実施する手段として、衝撃圧接法の一つである「爆着圧接法」に注目した。本法は、母材の上に合わせ材を配置し、その上にセットした爆薬を起爆させ、毎秒数千メートルで合わせ材が母材に衝突することで接合がなされる手法である。接合速度が高速であるが故に、接合界面に金属間化合物が生成されにくく、信頼性の高い接合界面が形成されることが大きな特徴である。爆着圧接法は鉄鋼やアルミニウム合金の分野では実用化がなされている技術であり、船舶用の構造部材等に利用されている。一方、マグネシウム合金とアルミニウム合金に関しては、汎用合金(Mg-Al 合金)を対象として、その接合界面の組織や機械的特性が報告されている程度であり、実用化に際して必要となる信頼性(疲労特性、耐食性等)に関する系統的な情報は皆無である。

そこで、2021 年度は代表的な難燃性マグネシウム合金である AZX611 (Mg-6wt%Al-1wt%Zn-1wt%Ca) 合金押出材 (厚み 3mm もしくは 4mm) と鉄道車両構体用アルミニウム合金である A6005C(Al-0.6wt%Mg-0.6wt%Si)合金押出材 (厚み 3mm) を対象として爆着クラッド材を作製した。そして、その疲労特性を評価するとともに、熱処理に供した際の界面挙動を調査した。結果の詳細は「2) 疲労特性評価」及び「4) 構造解析・欠陥評価」を参照されたい。

## 2) 疲労特性評価

2021 年度は、爆発圧着法により作製した Mg 合金-Al 合金接合体の疲労特性を調査した。爆発圧着材の素材には板厚 3mm の Al 合金 (6005C : Al-Mg-Si 合金) 押出材と板厚 3mm および 4mm の Mg 合金 (AZX611 : Mg-Al-Zn-Ca 合金) 押出材を使用した。図 3-2.9.3-23 に爆発圧着材の接合界面の観察結果を示す。接合界面は爆発圧着材に特有の波状を呈している。また、板厚 3mm の Mg 合金と 3mm の Al 合金の爆発圧着材 (以下、爆着材 A と記載) の接合界面の波長は 974mm、波高は 262mm、板厚 4mm の Mg 合金と 3mm の Al 合金の爆発圧着材 (以下、爆着材 B と記載) の接合界面の波長は 709mm、波高は 150mm であった。爆着材 A は爆着材 B よりも爆薬エネルギーを増加させた条件で作製され、このような接合条件の違いが接合界面の性状の違いの原因であると考えられる。

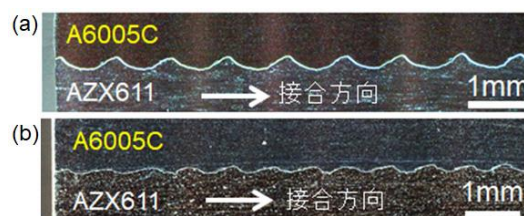


図 3-2.9.3-23 爆発圧着材の接合界面、(a) 板厚 3mm の Mg 合金と 3mm の Al 合金の爆発圧着材、(b) 板厚 4mm の Mg 合金と 3mm の Al 合金の爆発圧着材

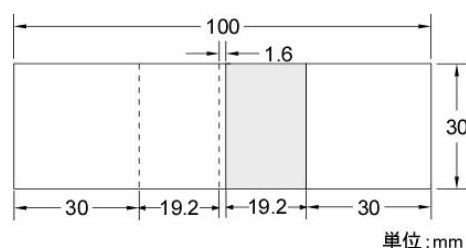


図 3-2.9.3-24 疲労試験片の寸法および形状

図 3-2.9.3-24 に疲労試験片の形状と寸法を示す。爆着材 A では Al 合金と Mg 合金の表面を 0.5mm 面削して厚みを 2.5mm とし、爆着材 B では Mg 合金の表面を 1.0mm 面削して厚みを Al 合金と同じ 3.0mm とした。疲労試験条件は周波数 20Hz、応力比  $R = 0$  で、繰り返し数  $10^7$  回まで破断しなかった場合はその時点で試験を終了した。図 3-2.9.3-25 は爆着材 A の疲労試験結果である。試験片長手方向と接合方向が平行な試験片の疲労強度は 12MPa、試験片長手方向が垂直な試験片の疲労強度は 12MPa であり、疲労強度の異方性は見られなかった。図 3-2.9.3-26 は疲労試験後の試験片の外観である。試験片長手方向と接合方向が平行な試験片 (a)、垂直な試験片 (b) とともに接合部で破断しており、本試験により爆着材の接合部の疲労特性が評価できたと考えられる。図 3-2.9.3-27 は爆着材 B の疲労試験結果である。試験片長手方向と接合方向が平行な試験片の疲労強度は 25MPa、試験片長手方向が垂直な試験片の疲労強度は 24MPa であり、疲労強度の異方性は見られなかった。爆着材 B でも試験片は接合部で破断した。爆着材 A の疲労強度は爆着材 B の疲労強度の約 1/2 であった。この結果は

接合界面の性状の違いに起因すると考えられるが、現時点では詳細は不明である。今後、接合界面に形成される中間層など接合界面のマイクロ組織観察を行い、接合条件と疲労強度の関係を検討する。

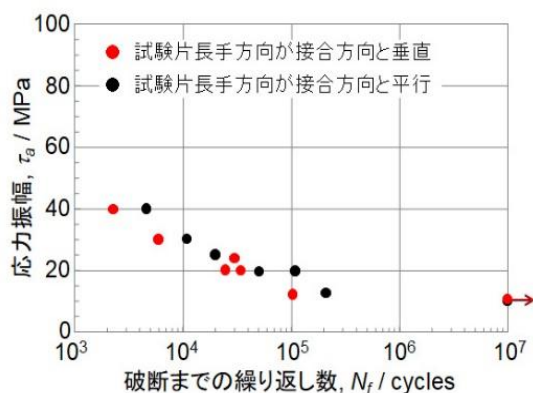


図 3-2.9.3-25 板厚 3mm の Mg 合金と 3mm の Al 合金の爆発圧着材の疲労試験結果

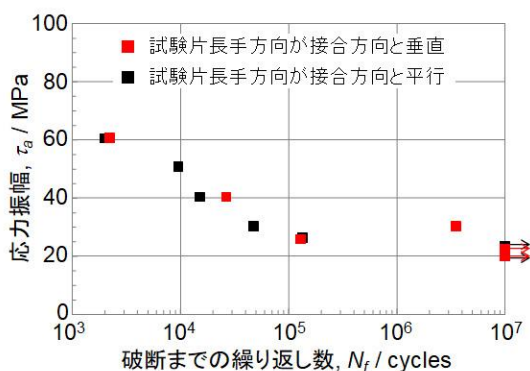


図 3-2.9.3-27 板厚 4mm の Mg 合金と 3mm の Al 合金の爆発圧着材の疲労試験結果

### 3) 耐食性評価

実験的な耐食性評価に関しては、2021 年度は Mg 合金-Al 合金接合体の耐食性に及ぼす締結方法の影響および Mg 合金種類の影響を調査した。Al 濃度の異なる 3 種類の Mg 合金(AZ31, AZ61, AZ80、順に Al 濃度 3, 6, 8wt%)の 3mm 厚押出材と A6005C (Al 合金) 3mm 厚押出材を爆発圧接およびボルト締結によって接合体を作製した。締結面が露出した状態で樹脂に埋め込み、研磨・脱脂した。接合体の耐食性を JASO M609 に基づく 10 日間 の複合サイクル試験 (CCT)および 1wt%NaCl 溶液中の電気化学試験により評価した。

図 3-2.9.3-28 に爆発圧接体の CCT 後の Mg 合金部の重量減少量を示す。図中「平行」は合金押出方向に平行な面、「垂直」は押出方向に垂直な面の値を示す。Mg 合金中の Al 濃度が高いほど大きな減少量を示した。試験面の違いは認められない。ボルト締結体についても試験を行い、同様な結果が得られた。腐食面の表面プロファイル

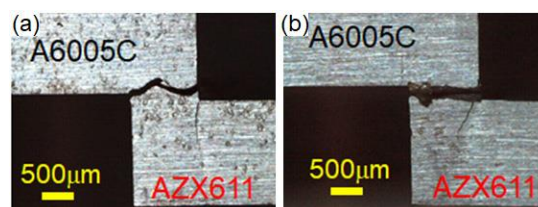


図 3-2.9.3-26 疲労試験後の試験片の外観、(a)試験片長手方向と接合方向が平行、(b)試験片長手方向と接合方向が垂直

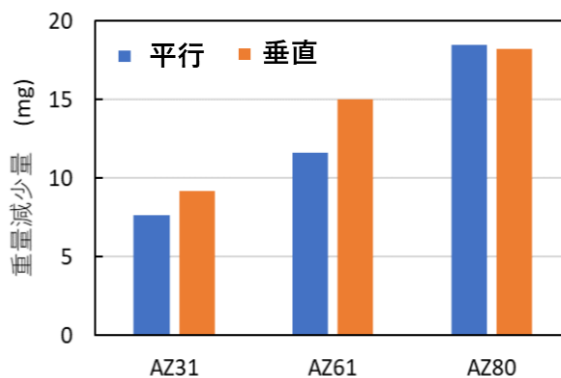


図 3-2.9.3-28 各種 Mg 合金-A6005C 爆発圧接体の CCT 後の Mg 合金部の重量減少量



を測定した結果、AZ31-A6005C の場合には AZ31 の腐食部が全体に分布していたが、AZ80-A6005C では AZ80 腐食部は 1 か所に集まり、かつ深い腐食孔を形成する等の違いが見られた。

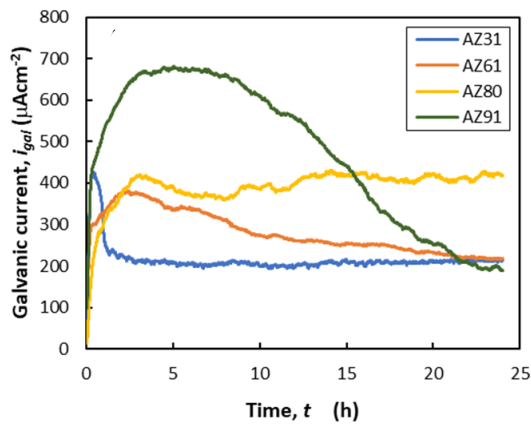


図 3-2.9.3-29 各種 Mg 合金—A6005C 接合体の 1wt%NaCl 中のガルバニック電流

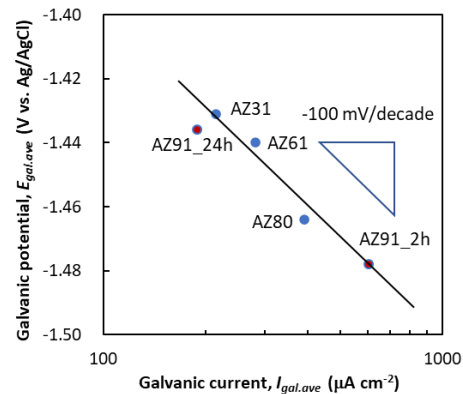


図 3-2.9.3-30 各種 Mg 合金—A6005C 接合体のガルバニック電位と電流との関係

Mg 合金の影響を理解するために電気化学試験を行った。各種 Mg 合金の単独浸漬時の腐食電位を測定したところ、Mg 合金中の Al 濃度が高いほど高い（貴な）値を示した。図 3-2.9.3-29 に各種 Mg 合金-A500C 接合体間に流れるガルバニック電流 ( $i_{gal}$ ) を示す。図には AZ91 (Mg-9% Al 合金)の結果も示した。 $i_{gal}$  は Mg 合金中の Al 濃度に応じて高い値を示し、図 3-2.9.3-28 とよく対応している。AZ91 は初期に大きな値を取るが、時間とともに減少した。接合体の腐食電位 ( $E_{gal}$ ) を測定したところ、AZ91<AZ80<AZ61<AZ31 の順で高い値を示した。図 3-2.9.3-30 に 24h 後の  $E_{gal}$  および  $i_{gal}$  の時間平均値  $E_{gal,ave}$ 、 $i_{gal,ave}$  の関係を示す。 $i_{gal,ave}$  は対数軸でプロットしている。A6005C-AZ91 は時間変動が大きかったため、2h 後と 24h 後の  $E_{gal}$  と  $i_{gal}$  の値をプロットした。両者の間には傾き -100mV の直線関係が得られた。この値は A6005C のカソード分極曲線のターフェル勾配に相当することから、Mg 合金—Al 合金接合体のガルバニック腐食はカソード反応支配であること、またガルバニック電流は Mg 合金と Al 合金の腐食電位差によって決定されることがわかった。AZ31 は他の Mg 合金に比べて高い腐食電位を示すため、A6005C との接触による  $E_{gal}$  も高い値を取り、結果として  $i_{gal}$  が小さな値を取る。ただし Mg 合金中の Al 濃度が高くなると、初期は腐食するが、時間とともに Al を含む安定な皮膜が形成されるため、AZ91-A6005C のようにガルバニック挙動は低下する。

接合材の界面近傍の微構造や特性の評価に関しては、マグネシウム—アルミニウム接合体の、水との反応性を、量子化学計算により検討した。昨年度計算したモデル  $Mg_{53}Al_{60}$  では、Al サイドの界面からの長さが短かったため、今年度は、もう少し Al サイドを長くしたモデル  $Mg_{53}Al_{72}$  での計算を行った。その結果を図 3-2.9.3-31 に示す。このサイズのモデルでは、モデル辺縁部の影響を受けない吸着が期待され、Mg 上、Al 上、Mg-Al 境界上、いずれの表面でも 30 kJ/mol 程度の吸着エネルギーで、 $H_2O$  分

子が吸着することが分かった。H<sub>2</sub>O 分子の分解反応については、昨年度検討したモデルと同様、境界上での反応性が高いという結果となった。これは、H<sub>2</sub>O の吸着しやすい Mg 原子のすぐ隣に、H 原子を引き抜きやすい Al 原子が存在することによるものと考えられる。昨年度示したように、β相やγ相の金属間化合物上では、純粋な Mg や Al 金属上よりも反応性が低下することが見られたため、Mg-Al 接合体界面にも、これら金属間化合物が形成することは、H<sub>2</sub>O との反応性を抑制する効果が期待されると考えられる。

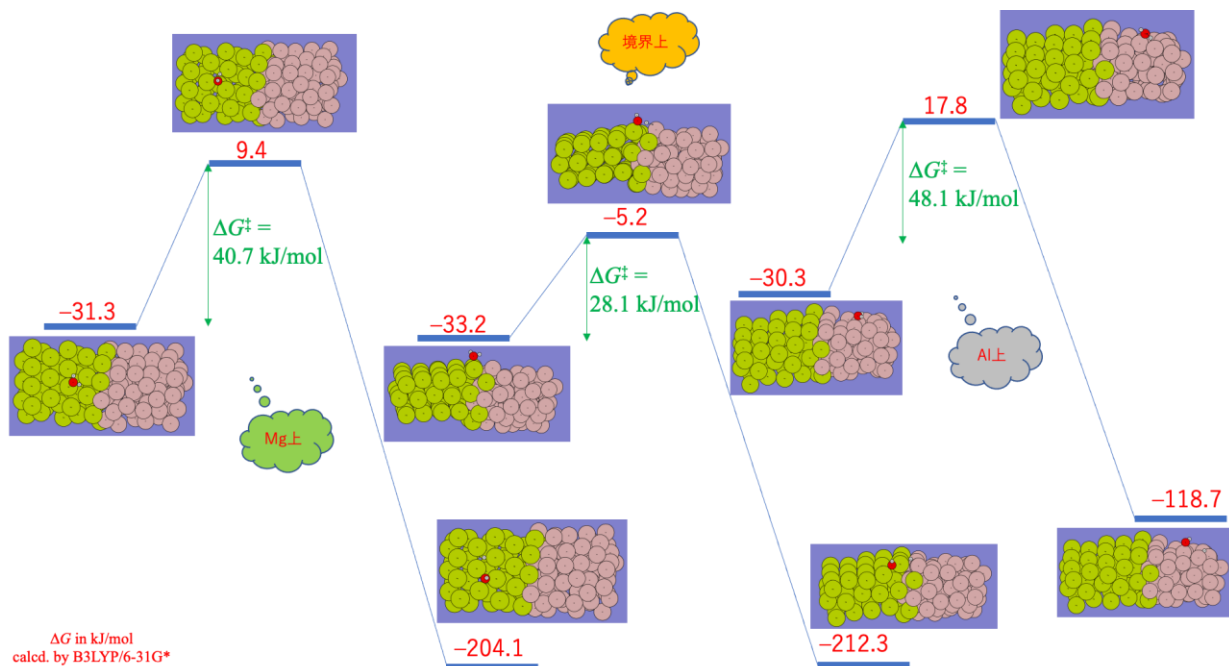


図 3-2.9.3-31 第一原理計算による、Mg-Al 接合体モデル上での H<sub>2</sub>O の分解反応

#### 4) 構造解析・欠陥評価

これまでに確立した手法を用いて、ボルト締結体に加え、ボルト締結体とは異なるマグネシウム合金-アルミニウム合金接合体の X 線 CT 観察（もしくは中性子ビーム測定）及び含有水素量測定を行った。また、修理した微視的組織評価装置を用いて、上記接合体の界面近傍の組成分布を明らかにした。

X 線 CT 観察については、難燃性マグネシウム合金 (AX92 合金 : Mg-9wt%Al-1wt%Zn-2wt%Ca 合金) 押出材 (t=3mm) を TIG 溶接により接合した試料を対象として評価を行った。一般に、形状異方性の高い試料の X 線 CT 測定は難しいことが知られているが、形状異方性の高い板接合についても接合部の内部観察が可能であった。接合体の溶融部に存在し、且つ、外から視認できないクローズポアの欠陥などについても、非破壊観察像内で分離し観

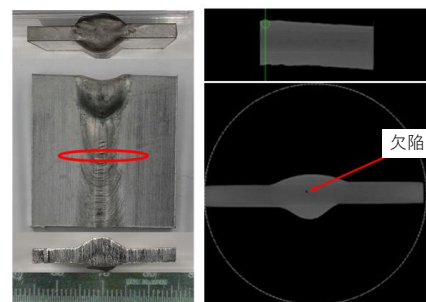


図 3-2.9.3-32 AX92 接合体の X 線 CT の結果

察することが可能であった（図 3-2.9.3-32）。この観察データは他の健全性評価にかかるデータと突き合わせて解析することが可能である。

含有水素測定については、2020 年度は、マグネシウム(Mg)合金-アルミニウム(Al)合金接合体の使用中の劣化挙動を明らかにするため、接合部材が雨水等に曝された状況を想定し、Mg 合金-Al 合金接合体を水及び温水（70℃）に 1 週間浸漬したのち、各材料の水素量測定を行った。その結果、Al 合金は単体で浸漬した場合は全く水素量が増加しないのに対し Mg 合金と接合した状態で浸漬することにより水素量が大幅に増加した。一方、Mg 合金は単体浸漬で水素量が増加する反面、Al 合金との接合による水素量増加の傾向は見られなかった。2021 年度は Mg 合金と Al 合金が直接接触しないよう接着剤(2 種類)を用いて接合し、温水浸漬後の水素量測定を行い直接接触の有無が水素量増加に及ぼす影響について調査した。なお、Mg 合金としては市販の押出材丸棒 4 種(AZ31、ZK60、AMX602、AZX912)を使用し、Al 合金は市販の純 Al 押出材丸棒(A1070)を用いた。

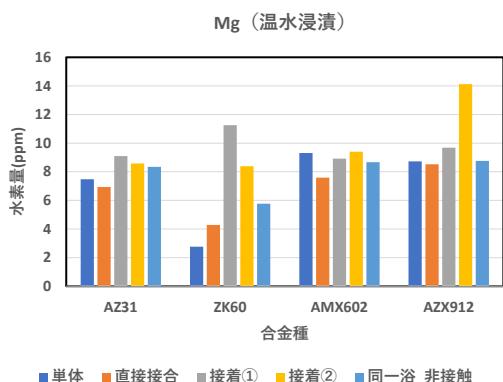


図 3-2.9.3-33 温水浸漬後の Mg 合金中水素量

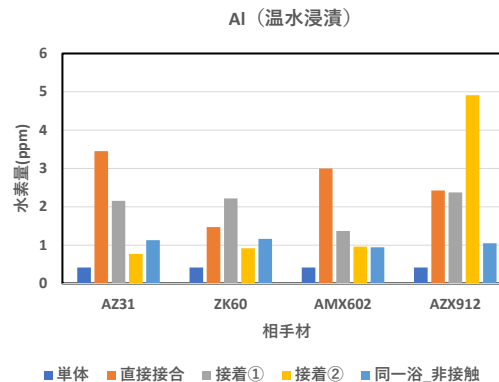


図 3-2.9.3-34 温水浸漬後の Al 合金中水素量

図 3-2.9.3-33、図 3-2.9.3-34 に Mg 合金および Al 合金それぞれの温水浸漬後の水素量測定結果を示す。ZK60 を除き Mg 合金は単体の場合と接合・接着の場合で水素量に大きな違いは無く、接触の影響は見られなかった。一方、Al 合金は接合と接着と比較した場合、直接接触の無い接着において水素量増加が抑制される傾向が見られたが、それでも単体の場合に比べると明確に水素量が増加した。そこで同一浴内に Mg 合金と Al 合金が接触しない状態でバラバラに浸漬させた後、水素量を測定したところ、Al 合金の水素量は単体（単独）浸漬の場合に比べ明らかに増加した（接着②と同程度）。以上のことから、Al 合金は Mg 合金と接触していない場合でも、Mg 合金の溶解などによる水質変化の影響を受け水素量が増加するものと推察される。2022 年度は部材の表面処理が水素量に及ぼす影響について、検討を行う予定である。

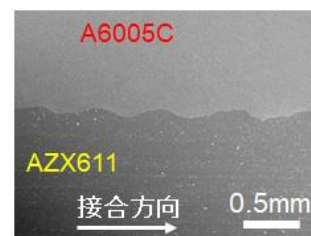


図 3-2.9.3-35 受け取りまま材（未焼鈍材）の接合界面の SEM 観察結果

接合体の界面組織評価については、2021年度は、爆発圧着法により作製した Mg 合金-Al 合金接合体の接合界面組織に対する熱処理の影響を調べた。爆発圧着材の素材には板厚 3mm の Al 合金 (6005C : Al-Mg-Si 合金) 押出材と板厚 3mm の Mg 合金 (AZX611 : Mg-Al-Zn-Ca 合金) 押出材を使用した。焼鈍温度は 200°C、250°C および 300°C で焼鈍時間は 1hr である。図 3-2.9.3-35 に受け取りまま材 (未焼鈍材) の接合界面の SEM 観察結果を示す。接合界面は爆発圧着材に特有の波状を呈し、接合界面には金属間化合物の形成は認められなかった。図 3-2.9.3-36 (a), (b), (c) に 473K 523K 573K 焼鈍材の接合界面の SEM 観察結果をそれぞれ示す。473K 焼鈍材の接合界面には厚さ約 2.6 $\mu\text{m}$  の平滑な層状組織が認められた。523K 焼鈍材では 473K 焼鈍材の接合界面で認められた層状組織が Al 合金側に成長するとともに、層状組織は厚さ約 2.9 $\mu\text{m}$  (Layer 1) と約 2.8 $\mu\text{m}$  (Layer 2) の 2 層になった。573K 焼鈍材では接合界面の層状組織の厚さは 523K 焼鈍材に比べて増加し、約 23.6 $\mu\text{m}$  となった。Layer 1 の厚さは約 4.8 $\mu\text{m}$ , Layer 2 の厚さは約 18.8 $\mu\text{m}$  であり特に Layer 2 で厚さの増加が顕著であった。接合界面の組成を EDS で分析した結果から、Layer 1 は  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ , Layer 2 は  $\text{Mg}_2\text{Al}_3$  であると考えられる。

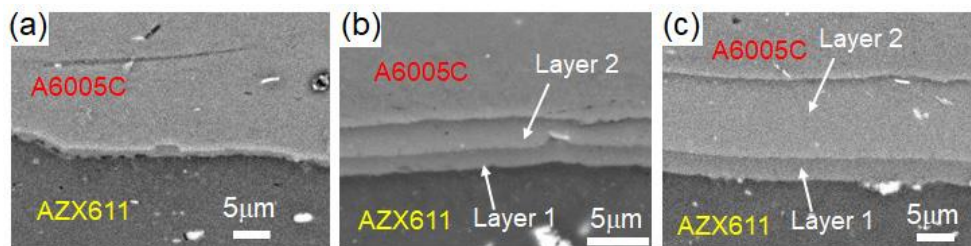


図 3-2.9.3-36 焼鈍材の接合界面の SEM 観察結果、焼鈍温度  
(a)200°C、(b)250°C、(c)300°C

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.3-8 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2018FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2019FY	1	0	1	0	0	0	0	0	0
2020FY	1	0	2	0	0	0	0	0	0
2021FY	0	0	2	0	0	0	0	0	0
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	2	0	5	0	0	0	0	0	0

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.3-9 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
2020FY	0	0	0
2021FY	0	0	0
2022FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9.3.3 参考文献

無し

## 2.9.4① [テーマ番号 4 2 -Ⅲ] 「材料・接合等技術動向調査研究 Ⅲ. データ等活用拠点（仮名称）計画」（2019 年度～2020 年度）

### [テーマ番号 4 2 -Ⅲ①] 「材料・接合等技術動向調査研究 Ⅲ. データ等活用拠点計画 ①AIST マルチマテリアル信頼性拠点」（2021 年度～2022 年度）

#### 2.9.4①.1 テーマの概要

##### (1)背景と目的

##### ① データ等活用拠点（仮名称）計画

構造材料のさらなる軽量化・長寿命化・強靱化には、軽量材料を中心とした各材料の信頼性の確立とともに、それらを適材適所的に組み合わせた部材のマルチマテリアル化の積極的な推進が不可欠である。本プロジェクトにおいては、これらに資する技術開発が一体的に推進されているが、これらの技術開発により創出される貴重なデータ等を、本プロジェクト終了後も有効に活用するためには、これらのデータ等を集積し活用する新たな仕組みが必要となる。このため、本プロジェクトで行われている軽量材料技術（軽量金属材料、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)等）、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発との連携により、本プロジェクト終了後においてもデータ等の集積・管理・活用が可能となる「データ等活用拠点：マルチマテリアル信頼性設計研究拠点。以下、研究拠点」の構築に向け準備を行った。

##### ② データ等活用拠点計画 ①AIST マルチマテリアル信頼性拠点

研究拠点は、本プロジェクト終了後においてもデータの集積・管理・解析等を行い、実用化・事業化に結びつける事を目指している。しかしながら、本プロジェクト終了後の段階において、本プロジェクトで得られたデータ等のみで、その時点の関連産業の要求に対応するのは困難と考えられる。このため、本プロジェクト終了後の拠点の活動においては、民間企業との共同研究や連携を促進し、それらによりデータ等を随時取得・付加し、これらの課題を解決することが期待される。このため、産業技術総合研究所では、非鉄信頼性評価拠点、接合技術拠点、量子ビーム計測拠点、LCA 評価技術拠点の 4 拠点の整備を行っており、データ等の取得装置の整備、測定ノウハウの蓄積、人材教育、民間企業を多数まとめたコンソーシアムの立ち上げ等を行った。また、単一の拠点のみでは対応が困難なマルチマテリアル構造等に関しては、「マルチマテリアル連携研究ハブ」を設置し、各拠点間の仲介、広報活動等を行った。

(2)目標値

表 3-2.9.4①-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第1中間目標 (2015年度末)	第2中間目標 (2017年度末)	第3中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)
データ等活用拠点 (仮名称)計画 (2019～2020年度)			本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品LCA技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効な集積・管理・活用方法について基本的計画を策定する。	
データ等活用拠点計画 ①AISTマルチマテリアル信頼性拠点 (2021～2022年度)				本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品LCA技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効な集積・管理・活用を可能とする①AISTマルチマテリアル信頼性拠点を構築する。

### (3)全体計画

#### ① データ等活用拠点（仮名称）計画

本プロジェクトで行われている軽量材料技術（軽量金属材料、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)等）、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発との連携により、本プロジェクト終了後においてもデータ等の集積・管理・活用が可能となる「データ等活用拠点（仮名称）」の構築に向け準備を行った。

#### ②データ等活用拠点計画 ①AIST マルチマテリアル信頼性拠点

本プロジェクトで行われている軽量材料技術（軽量金属材料、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)等）、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発との連携により、本プロジェクト終了後においてもデータ等の集積・管理・活用が可能となる「①AIST マルチマテリアル信頼性拠点」の構築を行った。

### (4)実施体制

① データ等活用拠点（仮名称）計画は、国立研究開発法人産業技術総合研究所（名古屋守山分室）にて実施した。また、②データ等活用拠点計画 ①AIST マルチマテリアル信頼性拠点は、国立研究開発法人産業技術総合研究所（名古屋守山分室）、および、（つくば小野川分室にて実施した。）

### (5)運営管理

本テーマを実施・運営するにあたっては、新構造材料技術研究組合本部と密接な協議を行った。

また、「① データ等活用拠点（仮名称）計画」については、関連技術開発の連携促進のため、キックオフ全体連携検討会を 2019 年 7 月 1 日、名古屋において、また、中間全体連携検討会を 11 月 5 日、つくばにおいて開催し、連携事項の確認・調整を行ったとともに、進捗状況、今後の展開等について討議した（最終全体連携検討会を 2020 年 4 月 7 日、名古屋において開催することを予定していたが、新型コロナウイルス感染対策のため延期）。さらに、個別の連携検討会を必要に応じて随時行った。

さらに、「②データ等活用拠点計画 ①AIST マルチマテリアル信頼性拠点」については、NEDO、ISMA も参加の上、2021 年 4 月 27 日、5 月 20 日、6 月 14 日、6 月 28 日、7 月 19 日、8 月 25 日、2022 年 4 月 20 日に Web 会議を開催した。2021 年度には、METI との連絡会も 4 回開催した。2021 年 11 月から 12 月には、産総研外の拠点（CFRP 信頼性評価拠点（名大 NCC）、接合技術拠点（阪大）、構造設計技術基盤拠点（京大）、鉄鋼信頼性評価拠点（NIMS））を訪問し、横連携の検討も行った。

### (6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030 年度）

本プロジェクトで行われている軽量材料技術（軽量金属材料、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)等）、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・



製品 LCA 技術などの関連技術開発との連携により、本プロジェクト終了後においてもデータ等の有効な活用が可能となる研究拠点の構築が可能となる。さらに、鉄道車両および自動車構造部材への適用が検討されているマグネシウム合金ーアルミニウム合金等の異種軽量金属接合部材の信頼性に関するデータの収集・補完は、この研究拠点の効果的な活動に必要不可欠である。

## 2.9.4①.2 研究開発成果

### (1)最終目標の達成度

表 3-2.9.4①-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
データ等活用拠点 (仮名称) 計画	本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効な集積・管理・活用方法について基本的計画を策定する。 (2020 年度)	本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効な集積・管理・活用方法について吟味・検討した。	○	
データ等活用拠点 計画 ①AIST マルチ 材料信頼性拠点	本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、	本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効	◎	

	<p>データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効な集積・管理・活用を可能とするデータ等活用拠点を構築する。</p> <p>(2022年度)</p>	<p>な集積・管理・活用を可能とする「①AIST マルチマテリアル信頼性拠点」を構築した。さらに、産総研外との拠点とも連携を深めるために、産総研内に「マルチマテリアル連携研究ハブ」を設置し、ワンストップ窓口、広報拠点等の整備を完了した。</p>		
--	---	--	--	--

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

## (2)研究開発の成果と意義

### ① データ等活用拠点（仮名称）計画

本プロジェクトで行われている軽量材料技術（軽量金属材料、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)等）、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発との連携により、本プロジェクト終了後においてもデータ等の集積・管理・活用が可能となる「データ等活用拠点（仮名称）」の構築に向け準備を行った。信頼性評価技術、接着・接合技術、構造評価技術、材料代替効果に関して、国立研究開発法人産業技術総合研究所で行われている関連技術開発と連携して検討を行った。また、全体及び個別の連携検討会を同所において適宜開催し、連携の状況と今後の方策について討議した。

### ②データ等活用拠点計画 ①AIST マルチマテリアル信頼性拠点

本プロジェクトで行われている軽量材料技術（軽量金属材料、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂(CFRP)等）、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発との連携により、本プロジェクト終了後においてもデータ等の集積・管理・活用が可能となる「①AIST マルチマテリアル信頼性拠点」の構築を行った。「①AIST マルチマテリアル信頼性拠点」は、非鉄信頼性評価拠点、接合技術拠点、量子ビーム計測拠点、LCA 評価技術拠点の4拠点から構成される。さらに、産業技術総合研究所外に設置の CFRP 信頼性評価拠点（名古屋大学 NCC）、接合技術拠点（大阪大学）、構造設計技術基盤拠点（京都大学）、鉄鋼信頼性評価拠点（物質・材料研究機構）の4拠点との拠点とも連携を深めるために、産業技術総合研究所内に「マルチマテリアル連携研究ハブ」を設置し、ワンストップ窓口、広報拠点等の整備を完了した。

- ・非鉄信頼性評価拠点（中部センター）

#### 概要

非鉄信頼性評価拠点では、マグネシウム合金、アルミニウム合金、CFRP を主とし

て、機械的特性、疲労特性、接合、耐食性、ガルバニック腐食特性等の情報を収集、集約している。

マグネシウムに関しては、プロジェクトにおいて鉄道車両構体用に開発した難燃性マグネシウム合金展伸材を対象として、その母材・接合継手（MIG、TIG、FSW）の機械的特性、疲労特性、耐食性に関するデータを収集・集約した。また、母材・接合継手の微視的組織や界面構造を収集・集約した。これらのデータの大半は、テーマ 60 の MI システムに格納し、データベース化している。また、自動車部材用に開発した易成形性マグネシウム合金展伸材を対象として、その機械的特性、室温成形性、腐食特性、微視的組織に関する情報を収集・集約した。加えて、難燃性マグネシウム合金とアルミニウム合金の異種材料接合材を対象として、その疲労特性、耐食性、界面組織に関する情報を収集・集約した。

アルミニウムに関しては、接着剤を用いてマグネシウム合金と接着した異種材料接着接合体を主な対象として、水や塩水に浸漬した際の接着接合部の変化や含有水素量の変化について測定を行った。これらのデータは、相手材であるマグネシウム合金の種類、接着剤の種類やアルミニウム合金の表面処理の有無および種類などを因子として整理・集約している。また、マグネシウム合金中の含有水素量を測定する際に問題となる課題やその対策に関する情報について収集している。

CFRP に関しては、CFRP からマトリックスポリマーを除去して回収されるリサイクル炭素繊維およびそれを強化繊維として再活用したリサイクル CFRP を対象として、それらの機械的特性評価に必要な構造データの評価法を開発し、データを収集した。また、配向性の異なるリサイクル CFRP とアルミニウム合金の接着接合部材の疲労特性に関するデータを収集した。

#### 保有する技術、データ

##### ○ マグネシウム合金（Mg-Al 接合材）

- ・ 機械的特性評価（室温引張試験等）
- ・ 成形性評価（エリクセン試験、成形限界曲線）
- ・ 疲労特性評価（平面曲げ疲労試験、軸疲労試験等）
- ・ 腐食特性評価（大気暴露試験、サイクル試験、電気化学特性等）
- ・ 微細組織評価（OM, SEM, TEM 写真、SEM-EBSD による結晶配向データ等）
- ・ 表面組成評価（GD-OES による腐食界面組成データ等）

##### ○ アルミニウム合金（Al-Mg 接合材）

- ・ 機械的特性評価（室温引張試験等）
- ・ 微細組織評価（OM、SEM、XRD 等）
- ・ 内部構造、欠陥評価（エックス線 CT、含有水素量測定等）

##### ○ CFRP

- ・ 機械的特性評価（単繊維を用いた試験、複合材料を用いた試験、等）
- ・ 複合材料構造評価（XRD を用いた繊維配向評価等）
- ・ 微細構造・内部構造評価（X 線 CT、OM、SEM 等）
- ・ ひずみ分布評価（デジタル画像相関法）

### 保有する装置

#### ○マグネシウム合金 (Mg-Al 接合材)

- ・機械的特性評価装置
- ・各種疲労試験機
- ・ガルバニック腐食評価装置 (SVET)
- ・材料表面分析装置(GD-OES)



図 3-2.9.4①-1 GD-OES 装置

#### ○アルミニウム合金 (Al-Mg 接合材)

- ・機械的特性評価装置
- ・ビッカース硬度計
- ・エックス線 CT
- ・水素分析装置



図 3-2.9.4①-2 水素分析装置

#### ○CFRP

- ・機械的特性評価装置
- ・ひずみ分布可視化装置
- ・X線回折装置
- ・油圧式疲労試験機



図 3-2.9.4①-3 X線回折装置

### コンソーシアムなど

産総研マルチマテリアル研究部門内に拠点を設置。

- ・非鉄信頼性評価拠点

(産総研マルチマテリアル研究部門内)

[https://unit.aist.go.jp/mmri/res\\_type/index.html](https://unit.aist.go.jp/mmri/res_type/index.html)

以下の既存の外部コンソーシアムと連携予定。

- ・マグネシウム合金高速車両構体実用化技術委員会 (日本 Mg 協会内：大学・研究所 17 機関、民間 25 社)
- ・自動車マグネシウム展伸材適用検討委員会 (日本 Mg 協会内：大学・研究所 2 機関、民間 10 社)
- ・汎用型高性能・高信頼性マグネシウム合金研究部会 (軽金属学会内：大学・研究所 8 機関、民間 8 社) <https://www.jilm.or.jp/page-society25>
- ・コンポジットハイウェイコンソーシアム <https://www.cfrphwy.jp/>

## ・接着技術拠点

### 概要

接着接合コンソーシアムおよびコンソーシアム型共同研究体を運営している。コンソーシアムでは、接着技術全般に関する、研究開発のトレンド、次に必要となる技術課題や技術に対するニーズを調査している。この調査を受けて、実際の共同研究体において多機関での共同研究を実施している（これまで3テーマを実施し、本年度は新規2テーマを開始）。とくに、疲労試験、塩水による劣化、水熱劣化などは時間がかかる試験となっており、産総研でデータを収集を進めている。また、接着接合部評価用の衝撃試験は試験機自体持っていない企業も多くあり、これについてもベースを構築できる体制を整えている。

### 保有する技術、データ

- ・機械的特性評価（疲労限界、強度、破戒靱性値、衝撃強度）
- ・微細組織評価（接着接合部界面ナノ構造像）
- ・接着剤化学構造情報（劣化前後）
- ・破断面像
- ・劣化特性評価（暴露試験データ、恒温恒湿槽保持データ、熱水浸漬データ）

### 保有する装置

- ・温度制御高速（衝撃）試験機
- ・界面強度測定装置（サイカス）
- ・高速度カメラ
- ・劣化環境制御装置（冷熱衝撃試験機、複合サイクル試験機、恒温恒湿槽）
- ・温度制御疲労試験機
- ・動的粘弾性測定装置
- ・熱機械分析装置
- ・ナノ表面構造分析装置（nanoIR+nanoTA、SFG）
- ・ナノ構造測定装置（STEM+EDX+EELS、SEM+EDX）
- ・化学構造分析装置（顕微赤外分光装置、ラマン顕微鏡）



図 3-2.9.4①-4 温度制御高速試験機

### コンソーシアムなど

- ・接着・接合コンソーシアム（民間 60-70 社）
- ・ <https://unit.aist.go.jp/nmri/airl/T-CAB/>
- ・接着接合基盤技術共同研究体（本年度 2 テーマ実施、企業のべ 15 社）非公開、接着・接合コンソーシアム A 会員に参加資格有り

## ・量子ビーム計測拠点（つくばセンター）

### 概要

量子ビーム計測拠点では、テーマ 52 研究活動の成果として得られた、3つの小型中性子計測装置（後述）を軸とした各種量子ビーム計測装置による、鉄鋼材料、アル

ミニウム合金、マグネシウム合金等の各種構造材料およびそれらの接合・接着部材の計測データに関して、情報収集と集約を行った。

中性子は、構造材料内部の様々な組織を直接観察できる極めて強力なプローブであるため、構造材料の性能高度化のみならず、マルチマテリアル構造の接合部や接着界面の状態把握までも可能とする計測技術である。中性子を用いた構造材料の分析結果を実際の材料開発に迅速にフィードバックするためには、解析技術、小型中性子解析装置、ユーザーが使いやすい利用体制など克服すべき課題がある。これらを解決し、中性子等量子ビームによる構造材料解析技術を産業利用において実用化することを目指して実施されたテーマ 52 における計測データをまとめた。

計測装置（利用施設）の情報収集・集約においては、産業界に簡便な中性子計測環境を実現すべく、簡易な小型中性子計測施設（装置）のカタログを作成した。掲載した施設は、産業技術総合研究所の AISTANS、北海道大学の HUNS、理化学研究所 RANS の 3 施設であり、各施設の特徴が分かりやすいよう施設概要や測定データ例を掲載した。また、ユーザーが気軽に利用相談できるよう各施設の連絡先を記載した。

計測データの情報収集・集約においては、上記の小型中性子計測装置（3 施設）の計測データに加え、J-PARC（中性子計測）や KEK（放射光 X 線計測）等の大型施設の計測データや、ラボ X 線や電子顕微鏡等の市販計測装置の計測データも掲載した。また、計測データの一部は、他テーマとの連携で得られたものを含んでいる。記載項目課題例を、以下に記す。

- ・中性子および X 線小角散乱の複合利用による鉄鋼中のナノサイズ炭化物の組成検討
- ・中性子小角散乱法を用いた鋼中ナノサイズ NbC 析出物分布形態の評価法検討
- ・中性子小角散乱による鉄鋼中のナノサイズ炭化物による水素トラップの検出
- ・中性子回折法による鉄鋼中の炭素濃度（分布）測定
- ・中性子回折による集合組織を有する鋼の残留オーステナイト量測定
- ・加熱中の低合金鋼ミクロ組織変化の中性子回折法によるその場定量計測
- ・低合金鋼における冷却中のフェライト・パーライト変態の中性子回折によるその場定量計測

## AISTANS

(Analytical facility for Industrial Science and Technology using Accelerator-based Neutron Source)

ISMAにおける主要解析法

**1：ブラッグエッジイメージング法**  
(分析情報) 材料を識別（色分け）した透過像を得ることができます（図1）。また、接合部材等において結晶組織やひずみ等の情報を得られます。  
(分析サイズ) 1cm~10 cm  
(計測原理) 結晶・元素の情報を反映する中性子透過率の波長依存性を、2次元検出器を用いて計測します。

**2：ラジオグラフィー法**  
(分析情報) 試料内の透過像を、X線ラジオグラフィーとは異なるコントラストで撮像できます（図2）。X線では困難な金属板間の接着剤等の観測が可能です。  
(分析サイズ) 1 cm ~3 0 cm。  
(計測原理) 中性子透過率を2次元検出器で計測します。

装置・施設の特徴

- ・電子加速器を用いたパルス中性子源（図3）
- ・固体メタン減速材を用いた高効率な熱（冷）中性子発生法
- ・引張試験機、加熱炉を整備

設置場所・連絡先

設置場所：産総研つくば中央2（2-4棟）  
ISMAつくば中央梅園分室  
〒305-0568 茨城県つくば市梅園1-1-1

問合せ：  
中性子解析ネットワーク代表（大島永康）  
isma-neutron-annai-ml@aist.go.jp  
装置責任者（木野幸一）  
koichi.kino@aist.go.jp



特定の材料を識別して画像化（BCC鋼の特徴を画像化した例）

図1：ブラッグエッジイメージングの例。結晶構造の異なる2種の鋼とCFRPを透視・識別できます。



写真 中性子透過像

図2：ラジオグラフィー（車ダンパーの透過例；X線では確認が困難なオイル等も観測できます。）



図3：中性子源および測定室外観

図 3-2.9.4①-4 施設紹介カタログ例

- ・加工熱処理シミュレーターを用いたその場中性子回折による計測：低合金鋼のマルテンサイト変態とそれに及ぼすオースフォームの影響
- ・加工熱処理シミュレーターを用いたその場中性子回折による低合金鋼のベイナイト変態のモニタリング
- ・中性子透過ブラッグエッジ法による残留応力（ひずみ）測定 - 北大 HUNS と J-PARC/BL22\_RADEN による測定の比較 -
- ・Al 合金-FSSW 接合部品の中性子ブラッグエッジ測定による評価
- ・Mg 合金-FSSW 接合部材の中性子ブラッグエッジ測定による評価
- ・小型中性子源 RANS の中性子回折法による鋼の集合組織と残留オーステナイトの定量測定
- ・中性子透過ブラッグエッジイメージングと SEM/EBSD による SUS304 鋼溶接ビードのキャラクタリゼーション（溶接条件の影響）
- ・中性子ラジオグラフィ法による車ドアの構造解析
- ・AISTANS での FSSW 部材の中性子ブラッグエッジ測定
- ・X 線と中性子による金属板に蔽われた接着剤のボイド解析

なお、上記の計測課題の作成資料については、データ解析と議論内容をまとめた「利用事例」のパートと、計測前にユーザ側が利用施設側に相談する際に用いる「問診票（カルテ）」パートを分けて準備した。「問診票（カルテ）」を参照することで、ユーザ側は、課題解決に適した計測装置の利用相談を、円滑に進めることが可能になる。

AISTANS 等を軸とした中性子等量子ビーム計測の産業利用を展開するため、量子ビーム計測クラブ等で研究会開催やそこでの意見交換を通して、技術紹介やニーズ調査を行い、さらなるユーザの拡大を図る。産総研の計量標準総合センター（NMIJ）にて、研究開発において蓄積された技術を、わが国の産業や学術研究、国民の日常生活に役立てていただくことを目的に、技術を共有する場として“計測クラブ”を運営している。計測分野によって 20 を超えるクラブが活動しており、“量子ビーム計測クラブ”もその一つである。量子ビーム計測クラブでは、中性子を含む各種量子ビーム（電子、陽電子、X 線、ガンマ線等）の国内産業における利用・技術革新を加速するために、各種量子ビーム源およびそれらを用いた材料分析・非破壊分析法等の開発や高度化に関して、以下の活動を実施している。

- ・研究会（講演会，勉強会）の開催（1 回-2 回/年）
- ・技術相談，共同研究等のマッチング相談
- ・分析法の開発・装置利用・環境整備等に関する意見交換

量子ビーム計測クラブは、会員登録制（無料）で、活動内容は WEB PAGE にて発信している。<https://unit.aist.go.jp/rima/rad-imag/Q-beam/index.html>

#### ・ LCA 評価技術拠点

##### 概要

材料代替効果を定量的に求めることを目的として、材料の物質フローやリサイクル性なども加味した材料のライフサイクル全体を評価できる手法の構築とその手法を研

究開発現場で活用可能な評価ツールを開発した。LCA 評価技術拠点では、開発した定量手法の実用化を目指し、事業参加機関以外の企業も視野に入れ、共同研究・共同開発の実現を図る。さらに、新たな国家プロジェクトの立案に向けた活動を実施する。

### 保有する技術、データ

- ・インベントリデータベース IDEA
- ・材料の代替効果定量評価手法

### コンソーシアムなど

- ・LCA 活用推進コンソーシアム（大学 31 機関、民間 197 社、官公庁 6 団体）

### コンソーシアムの活動内容

- ・データベースの維持管理  
毎年 4 月中旬に新バージョンのリリース  
次年度 4 月リリースに向けた準備

- ・コンソーシアム会員獲得のための活動

LCA 活用推進コンソーシアム説明会の実施

- ・LCA、IDEA の普及啓発  
IDEA の利用方法に関する講習会の開催（2 回/年程度）

LCA の基礎講習会の開催（2 回/年程度）

何でも相談会の開催（3 回/年程度）

- ・イベントの開催、会員のための情報提供

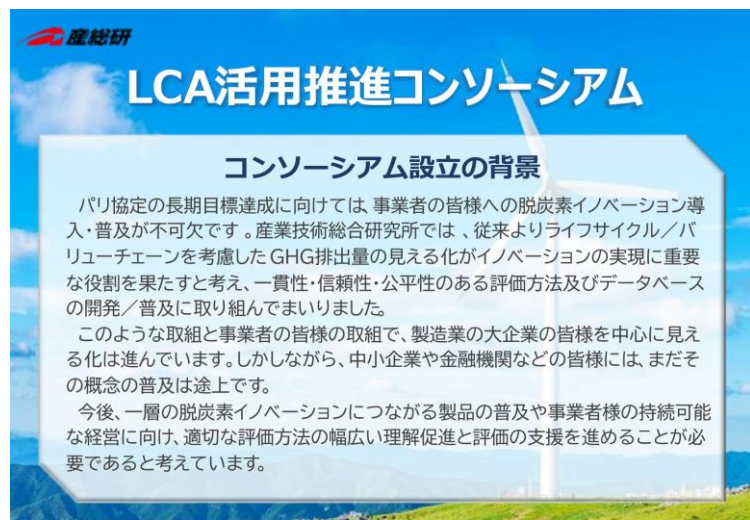
公開講演会の実施（5～6 月：オンライン開催）

公開講演会・成果報告会（2～3 月：会場・オンライン併用開催）

会員限定講演会の実施

- ・海外との協力、会員への情報提供のための調査の実施

<https://riss.aist.go.jp/lca-consortium/>



### コンソーシアムの目的・目指す理念

脱炭素イノベーションの普及に向け、製造業だけでなく、製造業を支える金融業及び中小企業などを含む多様なステークホルダーの皆様「見える化」をご理解していただくこと、社会全体で「見える化」を促進することにつながる対話を行うこと、そして「見える化」を支える最新のデータベースを整備・維持していくこと、を目的として本コンソーシアムを設立しました。

### コンソーシアムが目指す方向性・理念

- LCAの活用は、製品、企業全体に環境負荷の低減と優れた経済性をもたらすとともに、イノベーション促進のきっかけとなることで企業競争力向上の原動力となります。
- 本コンソーシアムでは、ライフサイクル思考に基づき、一貫性・信頼性・公平性のある評価手法について、多様なステークホルダーの皆様が双方向で議論を行う場を提供し、社会全体の理解を進めることを目指します。
- 定量評価を実現可能とするデータベース IDEA: Inventory Database for Environmental Analysis を中心とした評価インフラ(ツールやデータベースなど)の維持・管理を行い、皆様の持続可能な企業経営の支援を目指します。



図 3-2.9.4①-5 コンソーシアムの案内



・マルチマテリアル連携研究ハブ

概要

産業技術総合研究所内の非鉄信頼性評価拠点、接着技術拠点、量子ビーム計測拠点、LCA 評価技術拠点の4つの拠点、及び、産業技術総合研究所外に設置の CFRP 信頼性評価拠点（名古屋大学 NCC）、接着技術拠点（大阪大学）、構造設計技術基盤拠点（京都大学）、鉄鋼信頼性評価拠点（物質・材料研究機構）の4拠点との連携を深めるために、産総研内に「マルチマテリアル連携研究ハブ」を設置し、ワンストップ窓口、広報拠点等の整備を完了した。

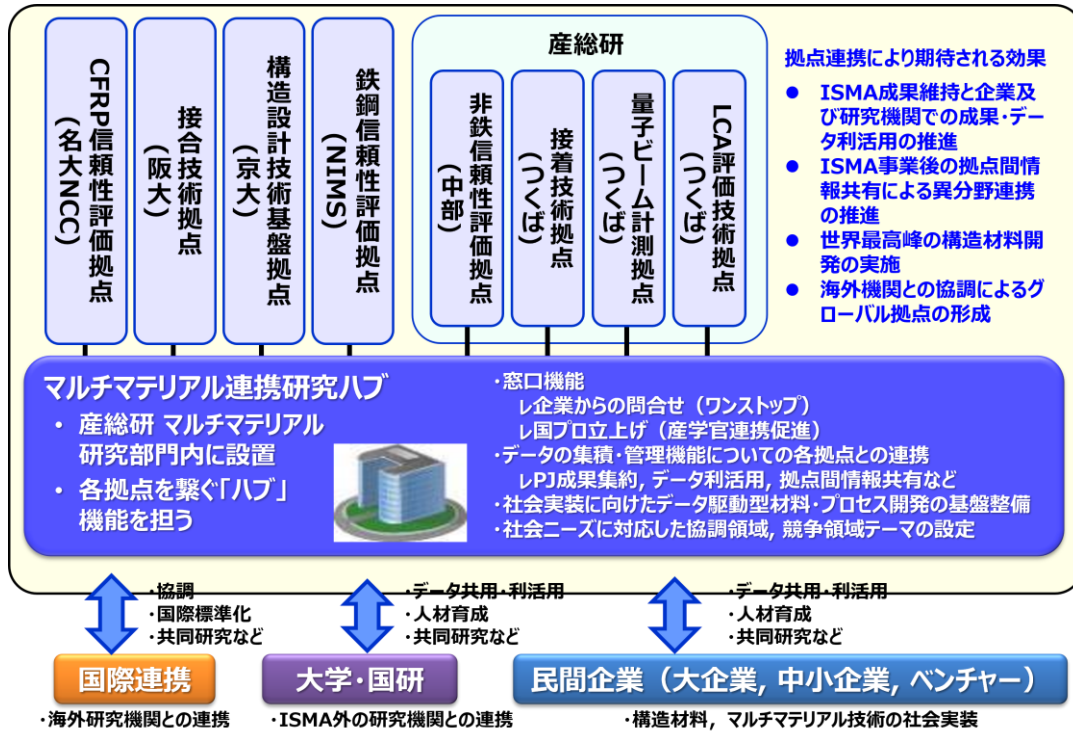


図 3-2.9.4①-6 マルチマテリアル連携研究ハブのイメージ図

・拠点間連携

① 非鉄信頼性評価拠点－接着技術拠点の連携

テーマ番号 35「革新的マグネシウム材の鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発」、テーマ番号 42「材料・接合等技術動向調査研究 IV. 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術開発」、テーマ番号 53「構造材料用接着技術の開発」と連携して、マグネシウム合金押出材とアルミニウム合金押出材の接着特性に及ぼす化成処理接着層厚みの影響を評価した。

アルミニウム合金としては、A6061(Mg-Si-Mg-Fe)合金(幅 25mm、長さ 100mm、厚み 3.0mm)を利用した。マグネシウム合金としては、AX41(Mg-4wt%Al-1wt%Ca)合金(幅 25mm、長さ 100mm、厚み 2.5mm)を利用した。アルミニウム合金、マグネシウム合金ともに、サンディングにより表面研磨を行った試料と、化成処理（アルミニウム：ジルコニウム系化成処理、マグネシウム：リン酸塩系化成処理）を行った試料に接着剤を塗布した。利用した接着剤は、エポキシ樹脂系 2 液型接着剤を対象とし、ビーズにより接着層厚みを 0.1～0.3mm と変化させた試料を作製した。接着した試料

を対象として、JIS K6850（引張せん断接着強さ試験）に準拠した試験により、せん断強度を導出した。接着層の幅（試験片のマージ幅）は 12.5mm とした。

図 3-2.9.4①-7 にアルミニウム合金とマグネシウム合金のせん断引張り試験の結果を示す。アルミニウム合金の結果に注目すると、接着層の厚みに依存せず、せん断強度はほぼ同じであることが確認された。また、接着前の前処理（サンディングと化成処理）の影響もほぼ確認できなかった。マグネシウム合金に関しても、

アルミニウム合金と同様に接着層の厚み、接着前の前処理に依存せず、せん断強度はほぼ一緒であることが確認された。せん断試験後の破面を観察したところ、アルミニウム合金、マグネシウム合金ともに接着層から破壊が起こっていた。アルミニウム合金の方がマグネシウム合金よりも 10%程度高いせん断強度を示した理由としては、アルミニウム合金の板厚がマグネシウム合金よりも 0.5mm 厚かったことが一因として考えられる。以上の結果よりアルミニウム合金およびマグネシウム合金の接着特性に接着層の厚み、接着前の前処理は影響を与えないことが分かった。

本知見は、テーマ番号 35 における新幹線車両試験車の床材試験の際の接着仕様に活かされている（図 3-2.9.4①-8）。

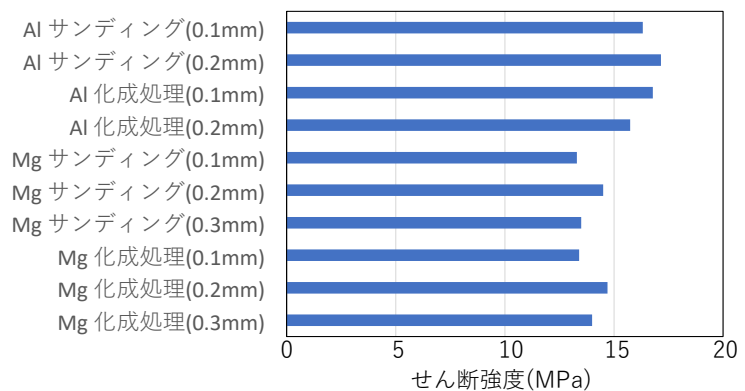


図 3-2.9.4①-7 Al合金及びMg合金の接着せん断強度に及ぼす試料前処理及び接着層厚みの影響



図 3-2.9.4①-8 実車両に適用された難燃性マグネシウム合金製客室床（幅 3m、長さ 9m）

## ②非鉄信頼性評価拠点－量子ビーム計測拠点の連携

テーマ番号27B「リサイクル炭素繊維の評価技術開発」、テーマ番号52「中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発」、テーマ番号53「構造材料用接着技術の開発」と連携して、リサイクル炭素繊維から作製するCFRP中間基材内の繊維配向状態を定量的に評価する手法を開発し、繊維特性の抽出に適した中間基材形態やCFRPの特性向上に関するデータを蓄積し、リサイクルCFRP試料作製プロセスの向上に活用した。

具体的には、現在、テーマ番号27B「リサイクル炭素繊維の評価技術開発」ではリサイクル炭素繊維の力学特性を評価するために、短繊維状のリサイクル炭素繊維と熱可塑ポリマーを熔融混練・押出して配向試験片を作製している。繊維特性評価用試験片は炭素繊維が高度に配向していることが求められ、最適な作製プロセス探索のためには迅速な炭素繊維配向の評価が必要である。従来は光学顕微鏡を用いた評価を実施していたが、評価試料の作製・画像解析による配向評価に時間がかかるという課題があった。そこで本研究ではテーマ番号52「中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発」と連携し、広角X線回折を用いて炭素繊維の配向状態を定量的に評価する手法を開発した。炭素繊維がCFRP板内で面内配向している場合、広角X線回折における炭素網面積層体の002面反射の方位角方向強度分布形状 $A(\varphi)$ は「1本の炭素繊維の002面反射の方位角方向強度分布 $B(\varphi)$ 」と「炭素繊維の面内配向分布 $C(\varphi)$ 」の2つで決まり、数学的には $B(\varphi)$ と $C(\varphi)$ の畳み込みとして表現される。従って、 $A(\varphi)$ の $B(\varphi)$ に関する逆畳み込み処理により繊維配向分布 $C(\varphi)$ を得ることができる。しかし、 $A(\varphi)$ と $B(\varphi)$ の実測データには測定ノイズが含まれるため、逆畳み込み処理が難しいという課題があった。そこで、 $A(\varphi)$ を複数のガウス関数でフィッティングし、そのフィッティング関数に対して、 $B(\varphi)$ のガウス関数によるフィッティング結果を用いて逆畳み込み処理を行ったことで、CFRP中の炭素繊維配向分布 $C(\varphi)$ を評価した。図3-2.9.4①-9に押出配向試験片の方位角方向強度分布 $A(\varphi)$ の測定データ例を示す。このデータと、別途測定した $B(\varphi)$ から、本研究開発の手法で抽出した炭素繊維配向分布 $C(\varphi)$ を図3-2.9.4①-10に示す。本試料の炭素繊維は $90 \pm 17^\circ$ の範囲内に配向しているという結果が得られた。光学顕微鏡観察から求めた配向は $90 \pm 20^\circ$ であり、妥当な測定結果が得られたといえる。本手法が様々な面内配向分布の解析に使用できることを確認するために、テーマ番号53「構造材料用接着技術の開発」との連携で使用する、押出配向試験片から作製したペレットを用いたランダム配向CFRP板材の局所的な繊維配向分布評価を実施した。そのデータ例を図3-2.9.4①-11に示す。マクロ的にはランダムな材料であるが、配向測定範囲が0.5mm $\phi$ 程度と狭いため、ミクロ的にはわずかに配向している様子を確認できた。

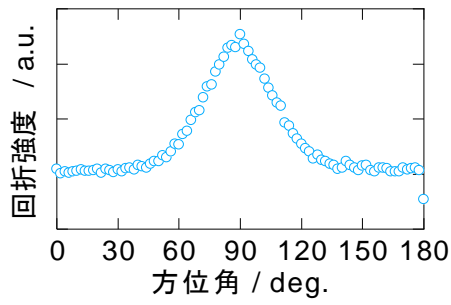


図 3-2.9.4①-9 押出配向試験片の(002)面反射の方位角方向強度分布

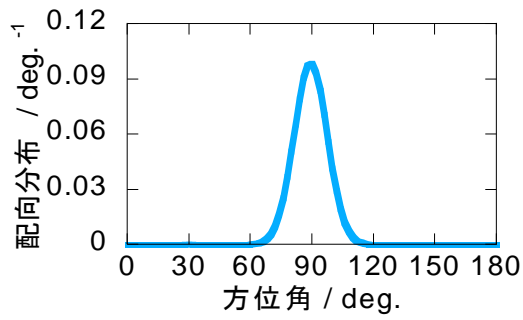


図 3-2.9.4①-10 開発手法で求めた押出配向試験片の炭素繊維配向分布

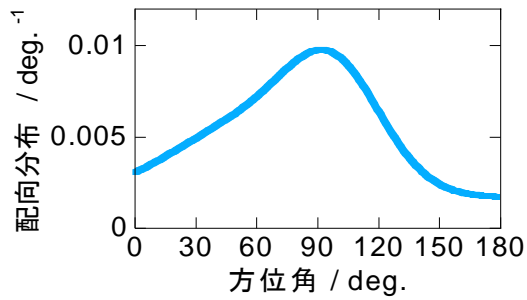


図 3-2.9.4①-11 開発手法で求めたランダム配向板の局所的な炭素繊維配向分布

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.4①-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2019FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021FY	0	0	0	0	0	0	1	0	2
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	0	0	0	1	0	4

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.4①-4 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
—			

2.9.4①.3 参考文献

なし

## 2.9.4② [テーマ番号 42-Ⅲ②] 材料・接合等技術動向調査研究 Ⅲ. データ等活用拠点計画 ②大阪大学接合技術拠点 (2021～2022 年度)

### 2.9.4②.1 テーマの概要

#### (1)背景と目的

構造材料のさらなる軽量化・長寿命化・強靱化には、軽量材料を中心とした各材料の信頼性の確立とともに、それらを適材適所的に組み合わせた部材のマルチマテリアル化の積極的な推進が不可欠である。本プロジェクトにおいては、これらに資する技術開発が一体的に推進されているが、これらの技術開発により創出される貴重なデータ等を、本プロジェクト終了後も有効に活用するためには、これらのデータ等を集積し活用する新たな仕組みが必要となる。

本プロジェクトで行われている関連技術開発との連携により、本プロジェクト終了後においても継続的に接合技術の発展に寄与できる体制の構築を行う。

#### (2)目標値

ISMA が共有する装置を用いた技術共同開発のための、協働研究所・共同研究講座の設置および企業との共同研究・スタートアップフォロー窓口の設置を行う。以下の表 3-2.9.4②-1 に、最終目標を示す。

表 3-2.9.4②-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第2 中間目標 (2017 年度末)	第3 中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)
データ等活用拠点計画 ②大阪大学接合技術拠点 (2021～2022 年度)			<ul style="list-style-type: none"> <li>・継続的に接合技術の発展に寄与できる体制の構築</li> <li>・協働研究所・共同研究講座の設置およびフォロー窓口の設置</li> </ul>

#### (3)全体計画

##### 【2021 年度】

本プロジェクトで進めてきたプロセス技術（日本発の新規接合法（シーズ）の開発、接合メカニズムの解明）、評価解析技術（継手特性評価、その場観察による現象解析）のまとめと、協調研究でのデータの集積と活用手段の整備を行う。

##### 【2022 年度】

協働研究所・共同研究講座の設置および企業との共同研究・スタートアップフォロー窓口の設置を行い、企業との実用化に向けた共同研究を立案する。加えて、事業参加機関以外の企業とも、協働研究所・共同研究講座の設置を模索し、シーズ技術の実用化を図る。また、協調研究でのデータの集積を継続して行う。

#### (4)実施体制

大阪大学(接合科学研究所および工学研究科)は、本プロジェクトにおいて「摩擦接合共通基盤研究(46)」、「マルチマテリアル接合技術の基盤研究(64)」および「マルチマテリアル接合技術における継手性能データベースの構築(64-B)」を推進してきた。2021年度、本プロジェクトで開発された新規接合技術やそれにより創出され、本プロジェクトで導入した装置、蓄積したデータを有効に活用するために「接合技術拠点」を形成した。図 3-2.9.4②-1-1 に接合技術拠点における実施体制を示す。

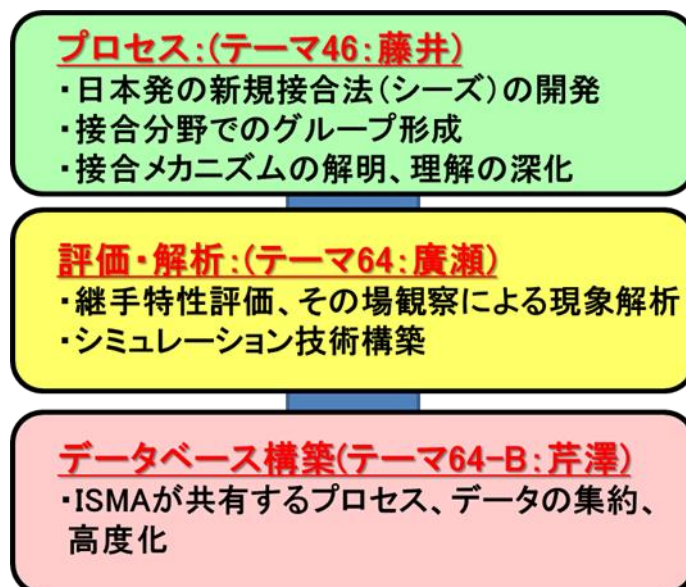


図 3-2.9.4②-1-1 接合技術拠点における実施体制

#### (5)運営管理

分室責任者と各担当者との情報交換による進捗を共有しながら適切に運営管理を行い、定期的に ISMA における会議などで進捗状況を報告した。

#### (6)実施の効果(費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度)

CO<sub>2</sub> 排出量の削減と衝突安全性能向上の観点から、自動車部品の軽量化が求められ、高張力鋼の車体部品への適用は増加傾向にある。特に、980MPa を超える超ハイテンは、部品への使用が年々増加し、2030年頃には部品への使用比率について約20%となる予想もみられる。本プロジェクトで開発を目指す革新的な接合技術は、自動車ユーザが、1.5GPa 以上の中高炭素鋼を信頼し、安心して使うことのできる革新的な接合技術であり、国内外での中高炭素鋼の拡販やその実用化に大いに貢献するものである。

この拠点を形成をすることで、これまでに自動車メーカーを含む多くの企業から問い合わせも増加し、協働研究所・共同研究講座の設置を達成するなど、上記技術の実用化、事業化への展開について、一層貢献する体制が整ってきた。

## 2.9.4②.2 研究開発成果

### (1)最終目標の達成度

表 3-2.9.4②-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
データ等活用拠点 計画 ②大阪大学 接合技術拠点	協働研究所・共同 研究講座の設置お よびフォロー窓口 の設置  (2022年度)	協働研究所、共同研究部 門・講座をそれぞれ設置 するとともに、大学発ベ ンチャーを立ち上げた。 フォロー窓口として拠点 HP を立ち上げ運用し、 複数の共同研究を実現し た。	◎	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

### (2)研究開発の成果と意義

2021 度上記活動を受け、コンテンツライブラリー（ホームページ <http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/~jthub/index.html>）を構築し、運用を開始した。図 3-2.9.4②-2-1 にトップページを示す。このホームページは、ホーム(概要、NEWS&TOPICS)、活動内容、動画ライブラリー、研究設備、知的財産・特許、論文・発表、メンバー、問い合わせ先、サイトポリシーで構成され、逐次更新している。2022 年度には、英語翻訳を行い国際展開も可能な体制を整えた。

コンテンツの一つである動画ライブラリーにおいて、新規接合法(シーズ)の原理を説明するとともに、本拠点が所有する接合装置、分析装置群を実際の接合映像も含め

[【Select Language】](#)    [【Japanese】](#)    [【English】](#)

図 3-2.9.4②-2-1 接合技術拠点ホームページ(トップページ)



紹介し、共同研究を参画して頂く企業への周知を促している。また、知的財産・特許において、大阪大学接合技術拠点を通じて、メンバーが保有する特許を本ホームページ上で公開している。2022年7月現在、255件の特許を公開し、企業の共同研究内容策定の参考にして頂いている。参画企業が、速やかに共同研究を進めることのできるように、共同研究相談シートを作成し、本ホームページに掲載するとともに、共同研究を始めるためのフローを明確にした。これまでに自動車メーカーを含む多くの企業から問い合わせがあり、共同研究の協議中である。

これらの共同研究を発展させ、協働研究所・共同研究講座の設置をすることで、より深く接合技術を向上させるとともに、早期実用化・事業化を図る。これまでの実績として、本プロジェクトの組合員である日本製鉄と「日本製鉄ものづくり未来協働研究所」を立ち上げ、また、本プロジェクトに参画していない企業とも「高度ジョイント生産システム構築共同研究部門」を立ち上げた。

加えて、実用化・事業化において、部品試作などを希望する企業に対しても的確に対応するため、2022年6月に大学発ベンチャーとして株式会社 solid phase を設立し、新規接合技術実用化の橋渡しを担う仕組みを形成した。

最後に、他の拠点とも接合技術を共通課題として連携を深めていく予定である。

上記内容をまとめた接合技術拠点における社会実装のプランを図 3-2.9.4②-2-2 に示す。このような体制を生かし、実用化・事業化を進めていく。



図 3-2.9.4②-2-2 接合技術拠点における社会実装のプラン

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.4②-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2021FY	0	0	0	1	0	2	1	0	0
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	1	0	2	1	0	2

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.4②-4 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2021FY	0	0	0
2022FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9.4②.3 参考文献

特に無し。

2.9.4③ [テーマ番号 42-Ⅲ③] 「材料・接合等技術動向調査研究 Ⅲ. データ等活用  
 拠点計画 ③NIMS 鉄鋼信頼性拠点」(2021 年度～2022 年度)

2.9.4③.1 テーマの概要

(1)背景と目的

構造材料のさらなる軽量化・長寿命化・強靱化には、軽量材料を中心とした各材料の信頼性の確立とともに、それらを適材適所的に組み合わせた部材のマルチマテリアル化の積極的な推進が不可欠である。本プロジェクトにおいては、これらに資する技術開発が一体的に推進されているが、これらの技術開発により創出される貴重なデータ等を、本プロジェクト終了後も有効に活用するためには、これらのデータ等を集積し活用する新たな仕組みが必要となる。このため、本プロジェクトで行われている関連技術開発との連携により、本プロジェクト終了後においてもデータ等の集積・管理・活用が可能となる「データ等活用拠点」の構築に向け準備を行う。

(2)目標値

本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効な集積・管理・活用を可能とするデータ等活用拠点を構築する。

表 3-2.9.4③-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第 1 中間目標 (2015 年度末)	第 2 中間目標 (2017 年度末)	第 3 中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)
データ等活用拠点計画 ③NIMS 鉄鋼信頼性拠点 (2021～2022 年度)			NA	データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効な集積・管理・活用を可能とするデータ等活用拠点を構築する。

(3)全体計画

③ NIMS 鉄鋼信頼性拠点 【物質・材料研究機構】

【2021 年度】

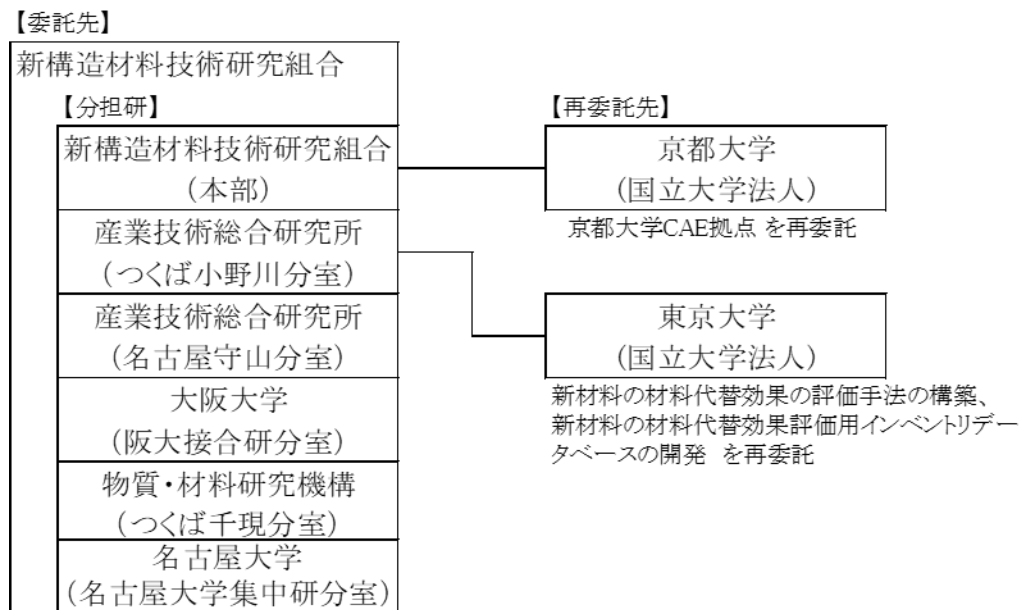
データ創出・活用可能な共通施設・設備の整備・高度化として、力学特性測定評価のための共通設備の整備では水素脆化評価試験に必要な機器を一室に整えデータ取得を高効率に行う環境を作る。また、腐食-水素基礎データ取得のための共通設備の整備では種々の環境下での系統的な水素拡散侵入データ取得のための環境を作る。

【2022 年度】

マテリアルデータの中核拠点形成とネットワーク形成として、専門人材・技術者の育成・確保ののち、高強度鋼における水素脆化と腐食関連の最新マテリアルデータの収集と高強度鋼との水素脆化と腐食関連の国内主要研究機関との連携体制を構築する。

(4)実施体制

研究体制スキーム



(5)運営管理

特になし。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度）

例えばデータの利活用において、テーマ 66「鉄鋼信頼性評価技術開発」（2021年度～2022年度）で行った超高強度薄鋼板の水素脆性における材料信頼性評価技術（き裂伝ぱ評価技術）の構築によって得られた成果データは、ISMA で開発された 1.5GPa 級冷間ハイテンの自動車骨格部材への実装促進にとどまらず、新規材料の開発や他の破壊現象への展開、水素脆化評価法の標準化、き裂伝ぱ抑制技術の提案といった波及効果が望まれる。

## 2.9.4③.2 研究開発成果

### (1)最終目標の達成度

表 3-2.9.4③-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
データ等活用拠点 計画 ③NIMS 鉄 鋼信頼性拠点	データ、知的財産 等について、本プ ロジェクト終了後 においても有効な 集積・管理・活用 を可能とするデー タ等活用拠点を構 築する。 (2022 年度)	データ、知的財産等につ いて、本プロジェクト終 了後においても有効な集 積・管理・活用を可能と するデータ等活用拠点を 構築した。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

### (2)研究開発の成果と意義（注：研究開発成果の詳細はここに記載）

テーマ 42-Ⅲ③NIMS 鉄鋼信頼性拠点においては、高強度鋼の水素脆化と腐食を主たる対象として、「関連研究に関するベンチマークとデータ収集；先導的技術研究実施；国プロ立案」を行うために必要なソフトとハードを整備した。その活動はテーマ 65B（ガルバニック腐食）およびテーマ 66（水素脆化）と協働して行った。以下、データの利活用に関して；共通施設・設備の整備と高度化；最新マテリアルデータの収集；ISMA プロジェクト終了後の拠点運用；ISMA プロジェクト終了後の拠点運用、これらの項目について具体的に示す。

#### (2-1) データの利活用に関して

NIMS 統合型材料開発・情報基盤部門（MaDIS）との連携を検討した。MaDIS では SIP で導入した材料データプラットフォーム（DICE）のシステムを使えるという優位性があり、NIMS ではこれを活用するコンソーシアムが 2020 年 12 月にスタートしている（<https://www.nims.go.jp/news/press/2020/12/202012220.html>）。鉄鋼信頼性拠点として検討の結果、図 3-2.9.4③-1 で一番右に示している DICE-MDR（材料データリポジトリ）に、ISMA 終了テーマ（鉄鋼関係）の 61, 62, 65 の公開情報を格納できることを確認した。また 2022 年度進行中のテーマ 65B と 66 の公開情報も同様に DICE と連携し利活用できることを確認した。

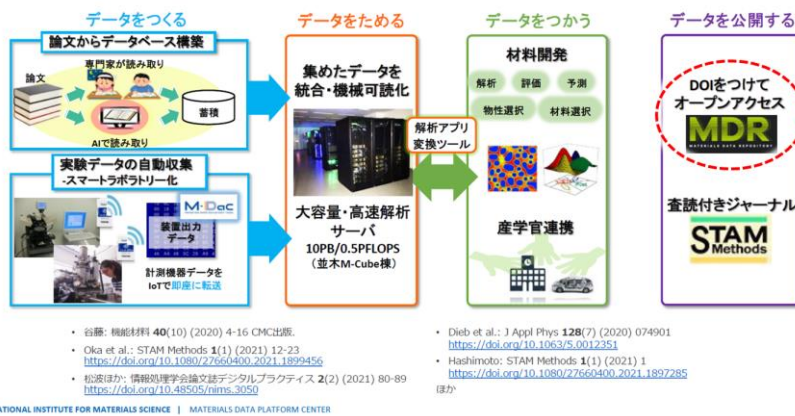


図 3-2.9.4③-1. 材料データプラットフォーム (DICE) の構成と材料データリポジトリ (MDR)

## (2-2) 共通施設・設備の整備と高度化

ISMA 事業で導入した機械設備 (NEDO 資産) を導入時期とともに以下に示す。

- (1) 精密万能試験機 (2021 年 8 月 導入)
- (2) ビデオ式伸び幅計 (2021 年 9 月 導入)
- (3) ポテンショ／ガルバノスタット (2021 年 12 月 導入)
- (4) き裂進展追跡装置 A, B (2022 年 6 月 導入)

精密万能試験機とビデオ式伸び計は、汎用引張試験のために用いるもので、本導入により「水素チャージ」「力学試験」「試料切断」「水素昇温分析」の一環工程が一つの部屋で遂行でき、高効率なデータ取得ができる環境を実現した。従来は引張試験機が別の建屋にあり、作業効率に問題があった。本実験環境を活用することによって、マイクロ組織と紐づけた「破断応力-水素量」曲線を効率的に取得できる。

ポテンショ／ガルバノスタットは水素透過試験を行うための実験設備の一部である。別途、消耗品として導入した電解水溶液用の浴槽と参照電極と組み合わせて用いることによって、ハイテン材の水素拡散係数や水素量を求めることができる。

き裂進展追跡装置は、図 3-2.9.4③-2 に示す様に、観察レンズ・カメラ・モニター部と電動ステージ部並びに全体を制御するコントローラ部 (PLC) の 3 部から構成されている。き裂の発生伝ば挙動を全自動パノラマ撮影することができる。

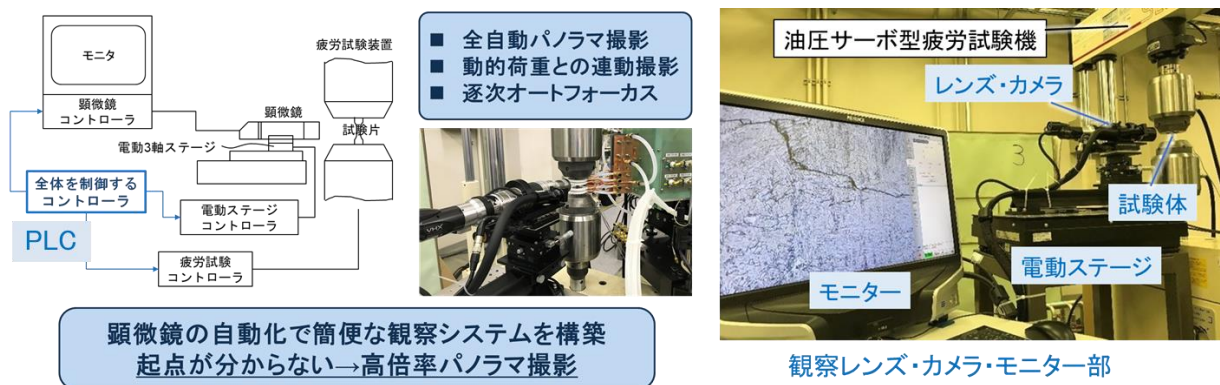


図 3-2.9.4③-2 き裂進展追跡装置の構成

高強度鋼の疲労破壊においては、き裂発生および発生直後の微小き裂の進展挙動が材料特性の鍵を握る。特にき裂発生および進展挙動をマイクロ組織と紐づけして把握することが重要であるが、従来手法であるレプリカ法では後追い観察であること、多大の労力を必要とするなどの欠点があった。自動き裂進展追跡装置は、この問題を解決して、微小き裂の進展挙動を効率的にしかもその場観察・計測するものである。

本き裂進展追跡装置の導入によって、種々の鉄鋼材料のき裂進展挙動をマイクロ組織に紐づけしてデータ取得でき、これによって破壊抵抗に優れた鉄鋼マイクロ組織の創製指針および高強度鋼の品質保証技術を提案できる世界一の卓越した「鉄鋼信頼性評価拠点」となれる。また、本装置は従来手法と比較して省労力・短時間であることから、企業からの依頼研究の場合にも、企業の求めるスピードに応えることができる。

き裂進展追跡装置は 2022 年 6 月 30 日に納品資産登録したのちに、微細多階層という複雑なマイクロ組織を持つ超ハイテン・マルテンサイト材に適用するため、疲労試験機の振動の影響を抑える工夫を行った。その上で、2022 年 9 月に本課題としてプロジェクト開始した文科省 データ創出・活用型プロジェクト「東北大学・極限環境対応構造材研究拠点」(2-4 にも記載)における材料課題の一つである超高強度鋼の疲労課題に応えるために、超ハイテンのモデル材：Fe-3Mn-0.2C マルテンサイト材での疲労き裂発生進展挙動の解明に向けた準備を行った。具体的には、試験片形状の最適化を行い、図 3-2.9.4③-3 に示す試験片を作成するとともに、試験条件の詳細を検討決定した。

また、2023 年 4 月から新たに開始する日本鉄鋼協会・組織と特性部会の「局所塑性に由来する損傷発達および破壊」研究会において、NIMS 西川嗣彬主任研究員（テーマ 42-III③登録研究者）が参画し、本き裂進展追跡装置を用いて研究活動を行う予定である。この日本鉄鋼協会の研究会は、鉄鋼関連業界が重要とする基礎基盤課題を研究の対象とするもので、学協会の場においても「NIMS 鉄鋼信頼性拠点」として貢献する予定である。

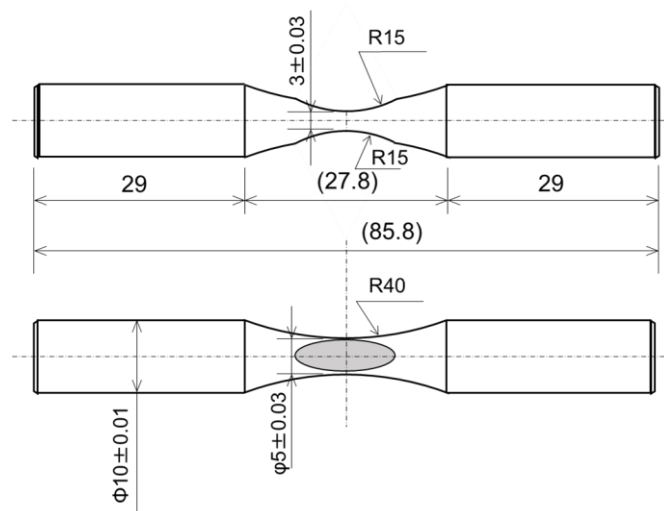


図 3-2.9.4③-3 き裂進展追跡装置用の試験片形状 (mm)

#### (2-3) 最新マテリアルデータの収集

国内外会議への出席、先駆的研究者との情報意見交換、独自の技術動向調査の3点を実施した。このうち、技術動向調査では、冷間プレスとホットスタンプの LCA 比較を含み、自動車用 1.5GPa 超級ハイテンの技術課題の調査を行った。その結果、1.5GPa 級の部材 1kg あたりの CO<sub>2</sub> 排出量は、冷間プレスと比べて、ホットスタンプの方が +0.96kg 排出量が多いことが判明した。すなわち、ISMA で目標とした冷間プレス用 1.5GPa ハイテンは LCA 的に 20% 優れていることが定量的に示された。

また、国外会議については、2022 年 10 月 4 日～7 日に韓国済州にて開催された International Welding and Joining Conference (IWJC 2022) に参加し、ハイテンの水素脆化研究の最新成果の情報収集を行った。その中で、韓国にてホットスタンプ鋼のプロセスと材料特性に関する大型プロジェクトがスタートしたとの情報を得ており、今後の動向を注目したい。

#### (2-4) ISMA プロジェクト終了後の拠点運用

拠点運用の財源を確保するため、新たな競争的資金大型プロジェクトとして 2021 年度 FS、2022 年度本課題となる文科省の「データ創出・活用型プロジェクトへの「東北大学・極限環境対応構造材研究拠点」(以下、RISME 拠点)としての課題提案協力と連携を行った。ここには 3 つマテリアル創製課題の一つとして、ISMA での研究成果である高強度鋼の水素脆化(耐水素高圧設計)が含まれており(図 3-2.9.4③-4)、ISMA 成果の継続が確実に行われるプロジェクト構成となっている。



「鉄鋼信頼性拠点:プロジェクト終了後の拠点運用」

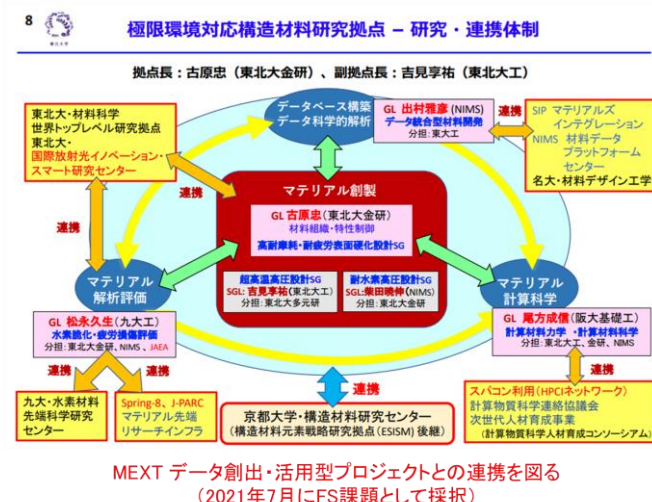


図 3-2.9.4③-4. 極限環境対応構造材研究拠点 (FS 課題) の構成

RISME 拠点は 2021 年 9 月から 1 年間を FS 課題として活動し、2022 年 7 月 25 日に本課題として採択され、2031 年 3 月までを活動期間として 2022 年 9 月から研究に着手している。拠点長は、FS 課題時の副拠点長であった東北大学・吉見享佑教授が務める。この RISME 拠点ではプロジェクト推進のための材料 3 課題を設定している (図 3-2.9.4③-5)。このうち、高強度耐水素材料 P では、ISMA テーマ 66 「鉄鋼信頼性評価技術開発」で開発した破壊靱性評価技術とともに、テーマ 42-III ③で整備した万能引張試験機など汎用試験機群 (2-2 に記載) を活用する。また、耐疲労表面硬化材料 P では、テーマ 42-III ③で導入した疲労き裂進展追跡装置を活用するなど、ISMA 成果を積極的に活用する形となっている。

RISME 拠点では 2023 年 3 月 3 日に第一回の公開シンポジウムを開催予定である。ここでは、NIMS 鉄鋼材料グループの柴田暁伸リーダー (ISMA テーマ 66 責任者; テーマ 42-III ③登録研究者) が「高強度マルテンサイト鋼の水素脆性粒界破壊」と題して、ISMA 成果も含めた最新の研究成果を紹介する予定となっている。(シンポジウムプログラム: <https://www.material.tohoku.ac.jp/~uhtm/RISME/symp2023/>)

# プロジェクト推進のための材料3課題

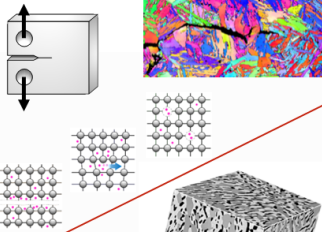
## 高強度耐水素材料P

PL 九州大学  
松永 久生



安全・安心かつ低コストな水素社会の実現を後押しする

- 材料選択と材料開発に役立つ水素ガス中疲労き裂進展特性予測システムの構築
- 高強度・高耐水素性の両立のための指導原理の確立
- 社会実装を見据えた化学成分やプロセス条件の高効率達成



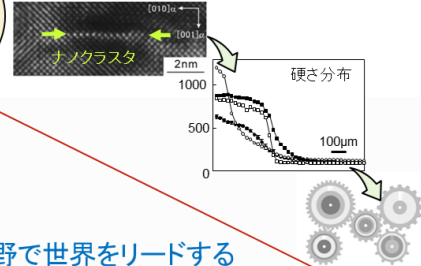
## 耐疲労表面硬化材料P

PL 東北大学  
宮本 吾郎



次世代自動車を支える表面硬化材のメタラジーを確立する

- 組織形成機構、強化機構に基づく表面硬さ分布設計システムの構築
- 硬さ分布と摩耗、疲労特性の関係解明
- 窒化利用による浸炭焼入れ材に匹敵する耐摩耗・耐疲労材料の提案



損傷・破壊メカニズムの解明  
材料マイクロ構造の特徴量を抽出  
スモール・データ活用

## 超耐熱材料P

PL 東北大学 吉見 享祐



宇宙・航空・発電等の耐熱材料分野で世界をリードする

- データ駆動型先進モシブテック合金の材料特性予測モデルの構築
- 耐熱クリープ温度1400°C以上、破壊靱性値20MPa·m<sup>1/2</sup>以上の達成とその機構解明
- ペスト現象の抑制(耐酸化性の改善)とその機構解明
- 材料特性予測モデルを反映する材料プロセス開発

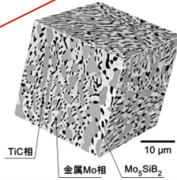


図 3-2.9.4③-5 極限環境対応構造材研究拠点 (RISME 拠点) における材料3課題

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.4③-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2021FY	0	0	3	0	0	0	0	1	0
2022FY	0	0	4	0	0	1	0	0	2
合計	0	0	7	0	0	1	0	1	2

※実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.4③-4 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2021FY	0	0	0
2022FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9.4③.3 参考文献

なし

2.9.4④ [テーマ番号 4 2 -Ⅲ④] 「材料・接合等技術動向調査研究 Ⅲ. データ等活用拠点計画 ④名古屋大学 (NCC) 拠点」  
(2021 年度～2022 年度)

2.9.4④.1 テーマの概要

(1)背景と目的

ISMA 事業終了後について関係機関で議論された結果、ISMA 事業で蓄積された成果（データ、特許）を維持管理し、今後の事業化・研究活動に活用できる仕組みづくりが重要との共通認識の下、研究分野毎の各拠点でデータ活用と実用化を促進するための取り組みを進めることになり、ISMA 本部実施共通基盤テーマ 42-3 「材料・接合等技術動向調査研究 Ⅲ. データ等活用拠点計画」として 2021 年度より残りのプロジェクト期間内に成果の拠点化を進め、プロジェクト終了後も成果活用できる体制構築を目指すこととなった。

(2)目標値

表 3-2.9.4④.1-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	最終目標 (2022 年度末)
データ等活用拠点 計画 ④名古屋大 学 (NCC) 拠点 (2021～2022 年度)	本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても有効な集積・管理・活用を可能とするデータ等活用拠点（仮名称）を構築する。

(3)全体計画

表 3-2.9.4④.1-2 研究開発課題

目標：研究開発成果を活用可能な研究拠点体制を整備するとともに、拠点資産およびDB活用の仕組みを構築し、研究開発成果の実用化促進と社会実装を支援する体制を整える。

【課題①】データベース活用拠点の検討

研究開発項目	概要, 目標
拠点体制の検討	企業におけるプロジェクト成果実用化の継続的支援を担うための、DBおよび獲得資産の運用管理、他機関連携、人材育成等の機能を有する拠点体制を整える。
ポストプロジェクト研究開発計画の検討	CFRPリサイクル技術の実用化基盤構築を目指したポストプロジェクト研究開発計画を検討する。

【課題②】データベース活用システムの構築

研究開発項目	概要, 目標
DB活用システムの整備	研究開発成果のDB活用システムを整備する。
DB構築	他機関とも連携しながらLFT-D材料特性を中心とするDB構築を進める。

(4)実施体制

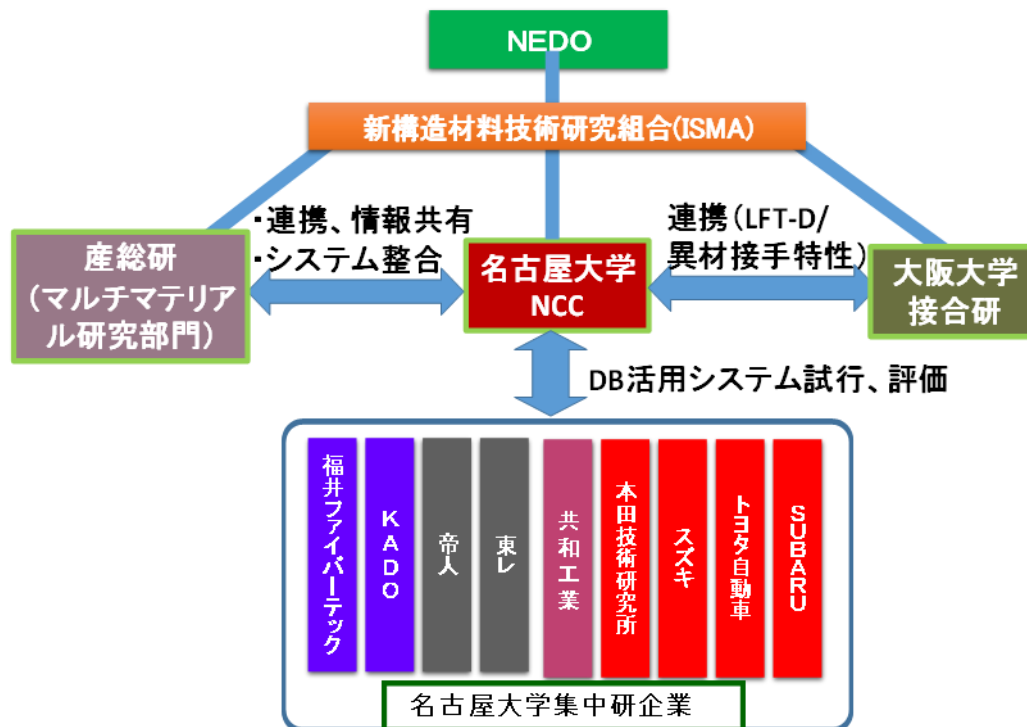


図 3-2.9.4④.1-1 研究開発体制

## (5) 運営管理

- プロジェクト運営管理のツールとして、期初にプロジェクト全体の実施計画を策定し、毎月のステアリング委員会で進捗報告を行うことにより、PDCAを回した。2022年度からはDB活用WGを設置し、各WG活動計画が策定され、具体的な実行に落とし込んだ。
- 各ワーキンググループは、月1回程度の頻度で開催。NCC、集中研企業、分担研及び再委託先の研究員を中心に、個別テーマについて具体的な検討、議論、意思決定を行うなど、実務作業を推進。

## (6) 実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度）

DB活用拠点およびDB活用システムの構築により、プロジェクト研究成果（テーマ27開発技術）の実用化促進が期待される。具体的には下記の効果が見込まれる。

- 世界の自動車販売台数は新興国を中心に年率2.8%の伸びと予想。（約8000万台@2012年→約1億1500万台@2030年）
- LFT-D適用車の市場投入は2026年と想定、2026年以降集中研5社が販売する新型車には全てLFT-D適用車とし、かつ各年の販売車の12%が新型車とすると、集中研カーメーカー（5社を想定）でのLFT-D適用車の総販売台数は約1540万台（2026年～2030年）
- LFT-D部品重量は車体構造重量の10%とし、売上構成比率は重量比とした場合、2026-2030年のLFT-D部品の売上総額は9240億円（材料、部品も含めた付加価値総額に相当すると推定）、CO<sub>2</sub>排出量削減は総量@2030年で約2億tの効果が見込まれる。

### 2.9.4④.2 研究開発成果

#### (1) 最終目標の達成度

表 3-2.9.4④-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成度※	未達の場合 原因と解決 方針
データ等活用拠点計画④ 名古屋大学 (NCC) 拠点	本プロジェクトで行われている軽量材料技術、異種材料接着・接合技術、材料構造解析・評価技術、材料・製品LCA技術などの関連技術開発に関し、関連機関と連携して、データ、知的財産等について、本プロジェクト終了後においても	<ul style="list-style-type: none"> <li>NCC拠点活動の柱となるポストPJ研究計画計画について、社会的、企業ニーズを反映した計画をとりまとめた。</li> <li>プロジェクト研究開発の成果データを企業や学内で有効活用できるDB活用システムについて、</li> </ul>	○	

	有効な集積・管理・活用を可能とするデータ等活用拠点を構築する。 (2022 年度)	Web ベースで外部からアクセスして検索可能なシステムを構築し、運用基盤を整えた。		
--	--	---	--	--

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

## (2)研究開発の成果と意義

### 1. データベース活用拠点の検討

テーマ 27 で蓄積した開発技術の実用化と社会実装を目指した NCC 拠点体制およびポストプロジェクト構想について検討した。拠点の運用方針、開発・蓄積したコア技術、主要設備、上記リソースの活用により可能となる研究開発テーマの例、および研究計画構想について下記に示す。

#### 1.1 拠点運用方針

今後の拠点活動に当たっての基本的な考え方について検討し、下記を設定した。

- ・ 研究開発を通じて開発、蓄積した LFT-D を軸とするコア技術、設備、ノウハウの活用。
- ・ できるだけオープンな成果共有、運営による LFT-D 技術の普及、企業における実用化支援
- ・ IT 活用による効率的な情報共有と意思決定。
- ・ 外部機関との有機的連携推進

#### 1.2 コア技術

- ・ LFT-D 技術（構造設計、金型技術、設備技術、成形技術、CAE 技術）
- ・ 超音波溶着接合技術
- ・ T-RTM その場重合成形技術
- ・ ハイブリッド成形技術（補強材/LFT-D、ロボットマテハン技術）
- ・ CFRP リサイクル技術（CF 回収技術（過熱水蒸気法）、回収 CF の成形技術）
- ・ 測定・分析・評価技術（物性発現メカニズム、内部性状分析、樹脂挙動分析、測定評価技術、材料評価技術、物性予測モデリングとシミュレーション技術（強度、弾性率、疲労特性など））

#### 1.3 主要設備

- ・ LFT-D 成形システム（Tex54 二軸押出機、材料供給装置、局排装置、3500 トンプレス機、マテハンロボット、ハイブリッド成形用加熱炉他）
- ・ 小型 LFT-D 成形システム（Tex44 二軸押出機、プランジャー装置、300 トンプレス機）
- ・ 800 トンプレス機システム（800 トンプレス機、金型交換装置、マテハンロボット）
- ・ 超音波溶着接合装置
- ・ 卓上型混練装置

- ・ 強度試験装置、材料特性計測・分析装置
- ・ 耐雷試験設備

#### 1.4 上記リソースにより可能となる拠点活動

##### (i) LFT-D 技術の深化、多様化、発展研究

- ・ 多様な材料の LFT-D 成形技術（革新 CF、高弾性・高強度 CF、PA6 以外の熱可塑性樹脂、各種の物性向上添加剤、自然由来材料等）
- ・ 多様な補強材（メタル、先進 CF 基材等）と LFT-D とのハイブリッド成形技術
- ・ 多様なリサイクル材を用いた LFT-D 成形技術
- ・ LFT-D 材規格標準化（量産材料 DB 整備）
- ・ LFT-D 成形材の強度予測モデル、シミュレーションモデルの検証
- ・ CF 製モビリティの耐雷評価

##### (ii) 企業支援

- ・ DB 活用支援
- ・ 企業における熱可塑性 CFRP 技術開発支援（設計、成形、解析他）
- ・ 企業による NCC 設備、装置の利用支援（開発部品の試作、データ測定・分析等）
- ・ 上記活動を通じた人材育成、ネットワーク形成

#### 1.5 研究開発計画構想

環境負荷低減の取り組みが加速する中、自動車にも資源循環型への転換が強く求められ、特にプラスチック材料の循環型リサイクル（水平リサイクル）技術の開発は喫緊の課題である。このような社会的、産業ニーズを背景に、NCC 拠点活動の柱となるポスト P J 研究計画の構想について、企業との意見交換の内容も参考に検討しながら計画をまとめた。



## 2. データベース活用システムの構築

プロジェクト研究開発の成果データを企業や学内で有効活用できる DB 活用システムについて構築を図る。DB は学内サーバーに格納し、Web ベースで外部からアクセスして検索可能なシステムの基本仕様を策定し、製作した。さらにシステムを試行し、必要な改修を行いつつ、検索メニューとリンクしているデータコンテンツ（既存マスターテーブルデータ）の整理を図り、運用基盤を整えた。

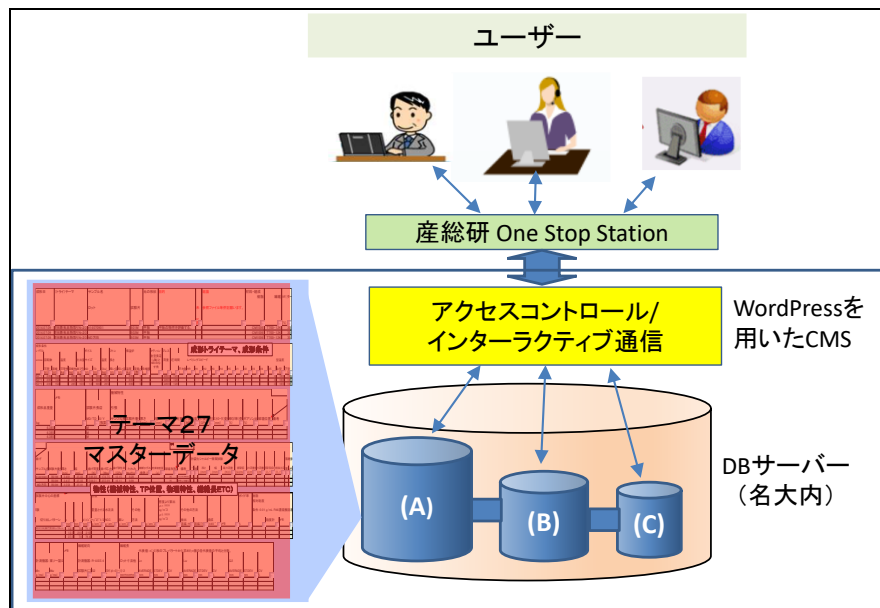


図 3-2.9.4④.2-1 データベース活用システム

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.4④-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2021FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	2

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.4④-4 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2021FY	0	0	0
2022FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9.4④.3 参考文献

特になし

2.9.4⑤ [テーマ番号 4 2 -Ⅲ⑤] 「材料・接合等技術動向調査研究 Ⅲ. データ等活用拠点計画 ⑤京都大学 CAE 拠点」  
(2021 年度～2022 年度)

2.9.4⑤.1 テーマの概要

(1)背景と目的

テーマ 59 では、マルチマテリアルボディトポロジー最適化の基づき軽量構造設計ツールの開発し、それによりマルチマテリアル車体の提案を行うよう進めている。本プロジェクト終了後においても、マルチマテリアルトポロジー最適化に関する技術開発の成果を有効に活用するために、これまで得られたソフトウェア・データ等を集積し活用する、新たな仕組みを構築する必要がある。そこで、マルチマテリアルトポロジー最適設計法に基づくマルチマテリアルボディ構造設計技術環境の提供および整備を行う。

(2)目標値

表 3-2.9.4⑤-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第 1 中間目標 (2015 年度末)	第 2 中間目標 (2017 年度末)	第 3 中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)
マルチマテリアル最適設計に関するデータ等活用拠点の整備 (2021～2022 年度)				<ul style="list-style-type: none"> <li>マルチマテリアル最適設計環境の整備を行う。</li> <li>CAE データ整備を行う。</li> </ul>

(3)全体計画

マルチマテリアルトポロジー最適化のオープンスペースラボ開設準備、コンソーシアム開設準備、および CAE データ収集のためのテーマ間の連携研究体の構築を行う。すなわち、マルチマテリアルトポロジー最適設計法のユーザ利用環境の提供、およびベンチマークと利用データ収集のための、マルチマテリアルトポロジー最適設計法のシステム利用のためのサーバー準備とプロジェクト開発材料の材料データ、CAE データのためのサーバー準備を進める。

(4)実施体制

京都大学（再委託先）

(5)運営管理

テーマ 59 において、各分担研、再委託先である京都大学、ISMA が参加して毎月開催する月例会議、および、自動車技術会の会員や本分野の学識経験者らを推進委員として毎月開催する、技術推進委員会にて、議論を行いながら進めた。

## (6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度）

開発する設計ツールを、本プロジェクト終了後においても有効に活用し、多様な分野の産業へ展開する。我が国の機械産業の多様な分野に展開し、大幅な軽量化と設計の効率化を支援し、さらには、CO<sub>2</sub>削減・省エネルギーを可能とする。

### 2.9.4⑤.2 研究開発成果

#### (1)最終目標の達成度

表 3-2.9.4⑤-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
マルチマテリアル最適設計に関するデータ等活用拠点の整備 (2021～2022年度)	データ等活用拠点の整備（2022年度）	・最適化プログラムの整備 ・教育環境の整備 ・CAEデータの整理	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

#### (2)研究開発の成果と意義

##### ① トポロジー最適化計算・設計環境の整備

図 3-2.9.4⑤-1 に示すようなようにテーマ 5 9 にて開発したマルチマテリアル最適設計法のソフトウェアを整備し、最適設計プロセスのためのユーザーインターフェースの開発、最適化パラメータの調査を行い、幅広いユーザーが設計ツールとして利用可能となるようなシステム化を行った。

システムは、図 3-2.9.4⑤-2 のような簡易に最適設計が利用可能な Windows 版と、大規模で複雑な問題を取り扱い可能な UNIX 版の 2 種類を用意した。これにより設計したい対象に応じて使いやすいシステムを選択が可能とした。また、さらに、このシステムのマニュアルの整備を行い、解析モデル、入力データ、出力データのフォーマットの説明、最適化ソフトウェアの使用方法のマニュアルを作成した。また、チュートリアルとしてのデータの整備も同時に進めた。最適設計に不慣れな新規利用者でも、システムの利用方法とそのコツを容易に習熟が可能となると期待される。

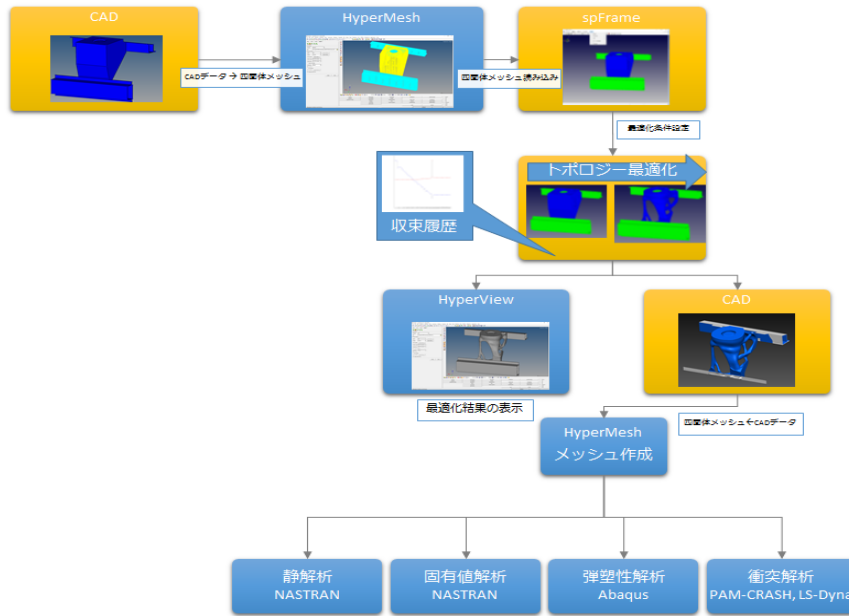


図 3-2.9.4⑤-1 トポロジー最適設計システム

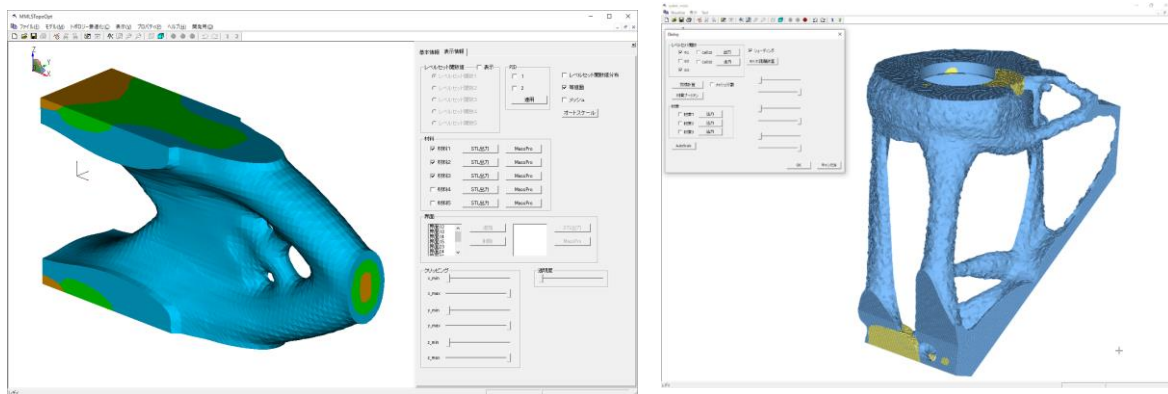
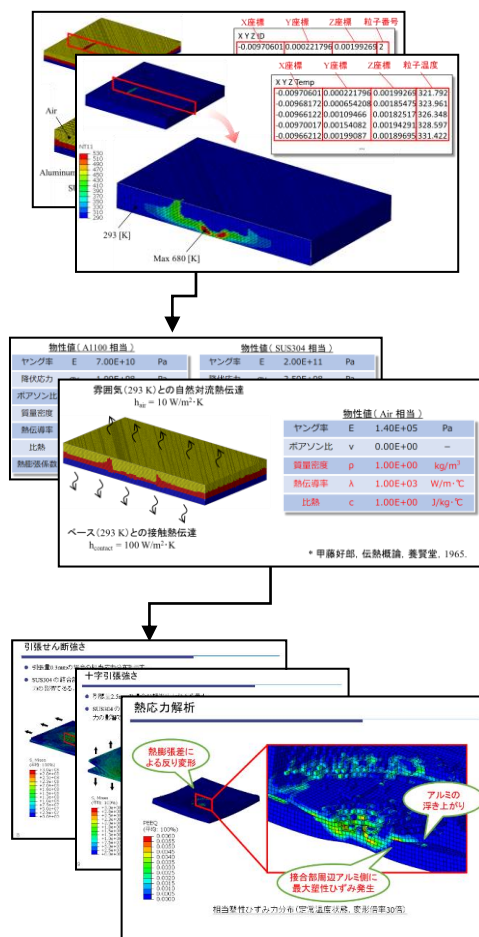


図 3-2.9.4⑤-2 Windows 版のトポロジー最適化の試行例

また、マルチマテリアル接合解析，衝突解析，ガルバニック腐食解析について，CAE のデータの整備を進め，マルチマテリアルボデー設計のための数値解析のデータベースを構築を進めた。

## ② ドキュメント作成等のオープンスペースラボ運営に関する準備

マルチマテリアルトポロジー最適化に関するオープンスペースラボを運営する上で、必要となるノウハウを明示的な文書として残し、スムーズな運営が可能となるよう準備を行った。まず、想定される多様な最適化問題に対応するために、最適設計の例題をいくつか設定し、実際に最適解を得るトポロジー最適化のプロセスを複数実施し、どのような思想のもとで境界条件の設定等の問題設定をすべきか、また最適化のパラメータの調整をどのように行うべきか等、ノウハウの蓄積を進めた。また、最適化手法をトポロジー最適化に限定せず、形状最適化を含めた構造最適化のシステムとして準備を進めた。また、オープンスペースラボにてセミナーの開催も予想されるため、その講師となりうる人材の育成を進めた。



### 汎用 FEM データベース

- ・ 解析コントロール
- ・ 要素タイプ
- ・ 初期温度境界条件（粒子法解析結果より反映）
- ・ 機械的境界条件
- ・ 部品構成

### 材料データベース

- ・ 金属塑性特性
- ・ 熱伝導率
- ・ 熱伝達率

### 解析結果データベース

- ・ 温度分布
- ・ 残留応力分布
- ・ 塑性ひずみ分布
- ・ 引張強度

図 3-2.9.4⑤-3 マルチマテリアル接合解析データベースの概要

## ③ 各種数値解析のデータの蓄積

マルチマテリアルトポロジー最適化に関する CAE 技術のデータの整備を実施するため、データベースの構成を進めた。このデータベースは3つの各分野のデータベースから構成され、それぞれ、マルチマテリアル接合解析データベース、ガルバニック腐食解析データベース、衝突解析データベースである。

例として、マルチマテリアル接合解析データベースでは、図 3-2.9.4⑤-3 のように、汎用 FEM データベース、材料データベース、解析結果データベースを用意する予定であり、固相接合 (FSW, FSSW) に対して、汎用 FEM を用いて開発した界面評価モデルを用意し、一般の利用に向けて展開することを想定する。

図 3-2.9.4⑤-4 に示すガルバニック腐食解析データベースでは、異材接合に起因するガルバニック腐食の影響を評価するための数値解析モデルを蓄積し、一般の利用に向けての展開を想定している。また、図 3-2.9.4⑤-5 の衝突解析データベースでは、数値計算ソフトウェアデータベースと材料データベース、解析結果のデータベースを用意し、マルチマテリアル軽量化車体の提示に向けて開発された衝突安全性解析モデルを、一般の利用に向けて展開するため準備を進めた。

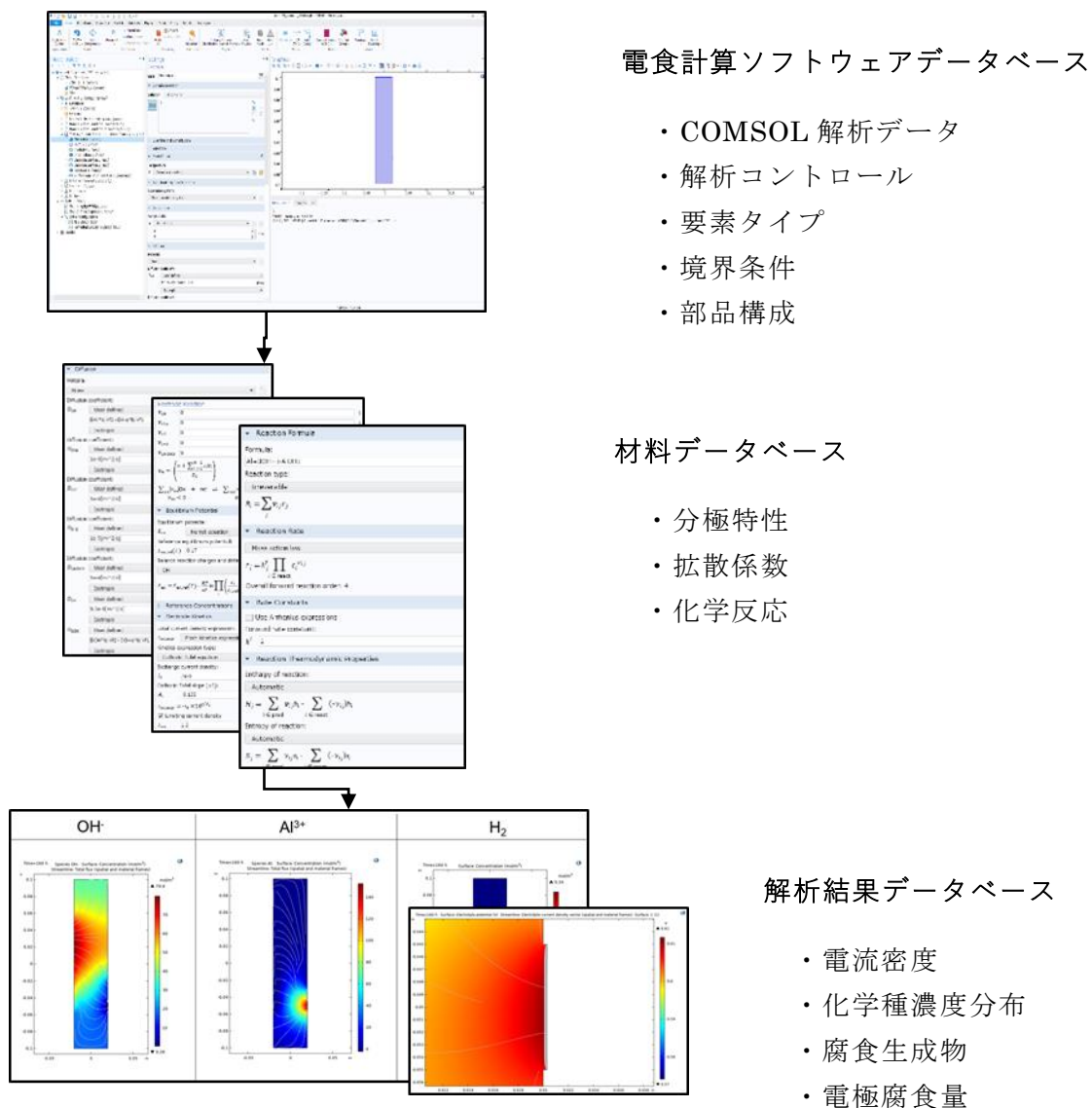


図 3-2.9.4⑤-4 ガルバニック腐食解析データベースの概要

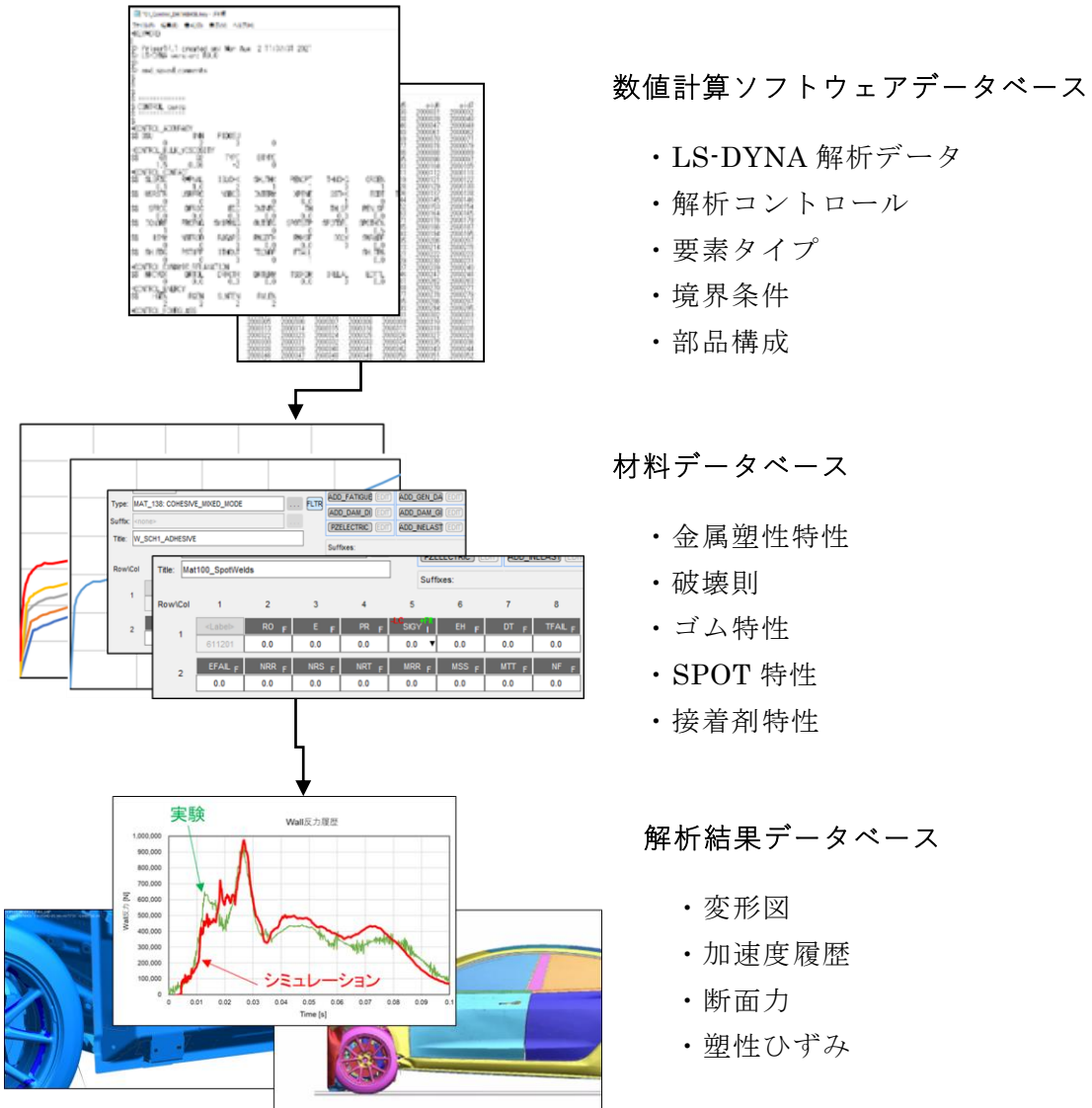


図 3-2.9.4⑤-5 衝突解析データベースの概要

本研究プロジェクト終了後には、京都大学にコンソーシアムを形成し、上述のマルチ材料最適設計システムおよび数値解析データベースを、このコンソーシアム内で公開予定である。このためのコンソーシアムを含めたオープンスペースラボ設立の準備もプロジェクト内で進めた。



(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.4⑤-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2021FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	2

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.4⑤-4 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2021FY	0	0	0
2022FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9.4⑤.3 参考文献

なし

## 2.9.5 [テーマ番号 4 4] 「中性子線による構造材料解析技術の Feasibility Study」 (2015 年度～2016 年度)

## [テーマ番号 5 2] 「中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発」 (2017 年度～2022 年度)

### 2.9.5.1 テーマの概要

#### (1)背景と目的

中性子は、構造材料内部の様々な組織を直接観察できる極めて強力なプローブであるため、革新鋼板、非鉄金属材料や CFRP 等の複合材料の性能高度化のみならず、マルチマテリアル構造の接合部や接着界面の状態把握までも可能とする構造材料開発における横断的な基盤技術になることが期待されている。しかしながら、中性子を用いた構造材料の分析結果を実際の材料開発に迅速にフィードバックするためには、解析技術、小型中性子解析装置、ユーザーが使いやすい利用体制など克服すべき課題が存在する。本事業ではこれらの課題を解決することで、中性子等量子ビームによる構造材料解析技術を産業利用において実用化し、これによる構造材料、接着・接合技術の高度化やこれらの結果を基にした車両重量の抜本的な軽量化による省エネ化・CO<sub>2</sub> 排出量削減を図るとともに、我が国の自動車・航空機等の輸送機器産業や材料産業等の競争力強化を目指すことを目的とする。

#### (2)目標値

自動車や航空機等の輸送機器の軽量化のため、これまで X 線や電子線等による量子ビーム計測解析技術が適用され、新しい構造材料開発に活用されてきた。その中で中性子は量子ビームの中でも構造材料に対する透過力が極めて高いという大きな特長を有しており、材料内部の解析への活用が期待されている。そこで、2014 年度に調査研究を行った結果、中性子による構造材料等の解析の有効性、企業の利用ニーズの高さ等が判明するとともに、現状の中性子解析装置や解析手法への要求や問題点も顕在化した。2015 年度から 2 年間の FS 研究では、本事業に先立つ試行実験や小型装置設計の検討等を実施した。その結果を踏まえて本事業では、表 3-2.9.5-1 に記載した 3 つの研究開発内容を遂行することとした。それぞれの目標を達成することで、問題点を解決し、計測・解析技術を発展させ、我が国の産業競争力強化に資する「中性子による解析技術」を世界に先駆けて実用化することで、構造材料等の性能高度化を加速させることを目標とした。

表 3-2.9.5-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第1中間目標 (2015年度末)	第2中間目標 (2017年度末)	第3中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)
テーマ 44 : FS 研究 中性子線による構造 材料解析技術の feasibility study (2015～2016 年度)	透過力の高い中性子線は構造材料内部の種々な組織等を直接に計測できるプローブであり、ISMA で進行中の革新的構造材料開発の推進を加速することが期待される。中性子装置の活用や次世代解析技術のあり方について課題を明確化する。	小型および大型中性子源の構造材料解析への適応性や計測精度の現状を予備実験等を行って明確にし、中性子施設の利活用や現状不足している要件を明らかにし、次年度以降に実行可能な戦略を立案する。 (2016 年度末)		
テーマ 52 研究開発項目 I 中性子等量子ビームを用いた構造材料、 接合・接着部の解析 手法の確立と材料開 発への適用 (2017～2019 年度)		共通の鉄鋼試料等による小角散乱、ブラッグエッジ、回折等の測定ならびに測定方法の立案を行い、材料組織や接着・接合部の情報に翻訳するためのデータ解析技術の指針を得る。具体的検討課題は①核生成段階における第二相ナノ析出物のキャラクタリゼーションと材料組織制御への適用、②析出物と水素の相互作用の計測と遅れ破壊抑制への適用、③ブラッグエッジスペクトルおよび回折プロファイル形状を用いた炭素濃度分布解析技術の開発、④その場中性子散乱回折による熱処理および加工熱処理による組織形成機構の解明、⑤：マルチマテリアル構造材の	①作製したモデル合金を用いて中性子小角散乱と X 線小角散乱の測定を行い、散乱強度比から化学組成を算出する手法を確立する。散乱プロファイル解析によりナノ析出物のサイズ分布、体積率と形状因子を同定する。 ②水素チャージおよび脱水素後の小角散乱プロファイルの比較を可能とする技術を確立し、析出物の種類と形態の違いによる水素トラップ挙動を解明する。 ③炭素濃度の異なるオーステナイト鋼を作製し、中性子回折とブラッグエッジ測定を活用して、プロファイル解析により格子定数の平均値と分布を同定する。 ④加工熱処理シ	

		<p>接着界面及び接合部の状態モニタリング手法の検討である。</p>	<p>ミュレーターにおける温度・変形条件の制御範囲を見極め、マイクロ組織形成過程をモニターし、高温加工時の転位密度同定可能な測定時間（時間分解能）10秒を実現する。 ⑤接合部のマイクロ組織および残留応力のブラッグエッジイメージング法による測定を行い、その空間分解能を確認し、2次元分布を示す手法を提案する。 (2019年度末)</p>	
<p>テーマ 52 研究開発項目 II 構造材料解析・産業利用に特化した小型中性子解析装置の新規開発および利便性を追究した小型装置による構造材料評価技術の開発 (2017～2022 年度)</p>		<p>II-① 小型中性子解析装置のために、その設置場所を整備し、主要な構成機器（電子加速器、中性子源、中性子ビームライン、放射線安全システム、検出器などの一部）を導入する。また 2018 年度に導入する中性子強度モニター等の小型中性子装置構成機器の詳細仕様を決定する。 II-② 北海道大学の小型中性子装置を用いて、小角散乱によるナノ析出物の微細構造を評価する。 II-③ 構造用金属材料の接合試料に対して、中性子と X 線、SEM などのデータを用いるハイブリッド計測法を提案する。</p>	<p>電子ビームパワー約 10 kW クラスの電子加速器、非結合型減速材をもつ中性子源、約 8 m の飛行路長をもつビームライン、中性子波長 0.4 nm で検出効率 20% 以上の中性子検出器を有する小型装置を 2018 年度末までに開発し、稼働を開始する。新規および既存の小型装置について試料の形状・寸法、測定視野サイズと分解能、解析可能な情報や統計精度の限界を明らかにする。 構造用金属材料の接合試料に対して、中性子とその他量子ビームとのハイブリッド計測を行い、各測定手法の相互関係を明らかにする。</p>	<p>新規小型中性子装置の J-PARC に迫る 0.6% 程度の波長分解能をもつ中性子ビームを用いて、ブラッグエッジイメージングの計測を実施し、歪みや金属組織のイメージング情報に変換する技術を確立する。 小型装置による鉄鋼材料中の炭素濃度の同定や接合材料中のマイクロ組織および残留歪み等の二次元マッピングを実現する。 接着部材における水の存在状況検出方法を提示する。 ケースバイケースに即した構造材料開発のための小型中性子等量子ビームによるハイブリッド計測のガイドラインを作成する。</p>

<p>テーマ 52 研究開発項目 III 中性子構造材料解析 ネットワークの構築 (2019～2022 年度)</p>			<p>新規小型装置、既存小型装置（北海道大学、理化学研究所）ならびに大型装置において標準試料を測定し、計測量の精度や計測に必要な時間を明らかにする。 ネットワーク内でのデータ形式ならびに試料ホルダーの共通化を行う。またデータ解析法ならびに解析ツールの共通化に関する指針を示す。各装置の性能や得意とする分析手法、実際に必要な分析時間や試料の調製法等の構造材料の分析に必要な情報が得られる解析事例集の雛形を作成する。</p>	<p>ネットワーク内でデータ解析法ならびに解析ツールの共有化を行う。得られた情報を基にして、各装置の性能や得意とする分析手法、実際に必要な分析時間や試料の調製法等の構造材料の分析に必要な情報が得られる解析事例集を発行する。可能な内容に関しては、ホームページ等により外部に公開する。さらに、測定カルテ・ガイドラインの運用体制、情報管理体制をネットワーク内に構築する。</p>
---	--	--	--	--

### (3)全体計画

FS 研究（テーマ 44）の「中性子線による構造材料解析技術の feasibility study」では、2014 年度に行った調査を踏まえて、具体的な測定対象の抽出と実現可能性の探究、解決すべき課題群の設定と研究計画立案を行って、本事業開始を準備した。

本事業（テーマ 52）では以下の 3 つの研究開発項目（I、II、III）を遂行した。研究開発項目 I の「中性子等量子ビームを用いた構造材料、接合・接着部の解析手法の確立と材料開発への適用」では、主に既存の大型・小型中性子装置等による分析結果を実際の材料組織や接着・接合部の情報に翻訳するためのデータ解析技術を確立することで、非専門家でも容易に実際に必要な材料組織等の情報が獲得できることを目指した。各分担機関が得意とする金属材料の高度化に有用な回折、小角散乱、ブラッグエッジイメージングなどの解析技術を開発した。まずは鉄鋼材料を中心に解析技術の開発を進め、非鉄金属、CFRP、マルチマテリアル接合部へ展開した。

研究開発項目 II の「構造材料解析・産業利用に特化した小型中性子解析装置の新規開発および利便性を追究した小型装置による構造材料評価技術の開発」では、産業用・構造材料分析用の小型中性子装置をつくば梅園分室に新設した。本装置は、調査研究で最もニーズ・期待が高かったブラッグエッジイメージング法に重点化させ、さらに高感度検出器など先端的な要素技術の活用や、研究開発内容 I で確立する解析法

の導入により、効果的かつ効率的に新規装置開発を完了させるとともに、産業的な利用価値を最大限に高めた測定装置として実用化した。また新規装置ならびに既存小型装置における構造材料計測法やデータ解析手法を確立した。併せて、同一試料の多面的な分析のため、中性子のみでなく、X線、電子等を用いたハイブリッド分析計測技術も目指した。

研究開発項目Ⅲの「中性子構造材料解析ネットワークの構築」では、産総研、北大、理研の装置側と企業等のユーザー側が連携し、構造材料評価のための小型中性子装置の解析ネットワークを構築した。このネットワークでは、各装置の性能や得意とする分析手法等をユーザーに示すための仕組みの構築、ならびに各装置間での計測ノウハウ等の情報共有やデータ形式等の共通化という装置側の連携体制づくりを行った。これにより材料・産業側ユーザーの中性子分析に対する利用の閾値を下げ、多くのユーザーに本事業で開発する分析手法・装置を活用しやすくなるよう図った。

本事業ではこの3つの研究開発内容を有機的に連携させて、中性子解析手法を多種多様な産業ニーズに迅速に対応できるものとするこゝで、革新的構造材料の開発を促進することを目指した。

#### (4)実施体制

FS研究（テーマ44）では以下の実施機関（分室）ならびに再委託先が協力して調査研究に取り組んだ。

- ・新構造材料技術研究組合（ISMA）： つくば中央梅園分室（国立研究開発法人産業技術総合研究所）、富津分室（日本製鉄株式会社（新日鐵住金株式会社））、千葉分室（JFEスチール株式会社）、西神分室（株式会社神戸製鋼所）
- ・再委託先： 国立大学法人 北海道大学、国立大学法人 東京工業大学、国立研究開発法人物質・材料研究機構）

テーマ52では以下の実施機関（分室）ならびに再委託先において取り組んだ。

- ・新構造材料技術研究組合（ISMA）： つくば中央梅園分室（国立研究開発法人産業技術総合研究所、担当研究開発項目Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ）、富津分室（日本製鉄株式会社（新日鐵住金株式会社）、Ⅰ・Ⅲ）、千葉分室（JFEスチール株式会社、Ⅰ・Ⅲ）、西神分室（株式会社神戸製鋼所、Ⅰ・Ⅲ）、夏島分室（株式会社日産アーク、Ⅰ・Ⅱ・ⅡⅠ）、つくば千現分室（国立研究開発法人 物質・材料研究機構、Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ、2018年度より）
- ・再委託先： 国立大学法人 北海道大学（Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ）、国立大学法人 東京工業大学（Ⅱ）、国立研究開発法人 理化学研究所（Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ）、大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構（Ⅱ）、（国立研究開発法人 物質・材料研究機構、Ⅰ・Ⅱ・Ⅲ、2017年度まで）

#### (5)運営管理

各目標を達成するように、テーマリーダーである友田陽、大島永康（ともに産業技術総合研究所）を中心に、年2回の全体会議等において各分室ならびに再委託先と綿

密に情報交換・議論を進めた。加えて研究開発項目Ⅱに関しては、主たる実施機関であるつくば中央梅園分室（産業技術総合研究所）において、新規装置開発・整備・利用・安全等に関する会議を週1回以上開催し、進捗管理を行った。

**(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度）**

本事業目標を達成し、産業利用に特化した中性子分析手法とその利用体制を確立すれば、本分析結果を基にした軽量化材料・技術の自動車等輸送機器への普及によるCO<sub>2</sub>排出量の削減や省エネルギー化が期待できる。また新規開発した装置を基にした高度分析サービス事業への展開も期待でき、本事業後においても様々な材料開発の高度化に貢献できる。

**2.9.5.2 研究開発成果**

**(1)最終目標の達成度**

**表 3-2.9.5-2 最終目標と達成度**

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成度※	未達の場合 原因と解決方針
テーマ 44 FS 研究 中性子線による構造材料解析技術の feasibility study	小型と大型中性子線の構造材料解析への適応性や計測精度の現状を定量的に明確化し、中性子施設の利活用法や現在不足している要件を明らかにする。日本における鉄鋼をはじめとする構造材料の中性子解析について、次年度以降に実行可能な戦略を立案する。(2016年度)	調査および試行実験を実施して、小型と大型中性子源を用いた各々の計測精度の明確化、中性子計測以外の方法との比較、小型装置開発のための設計検討、中性子ナノ解析（試行実験）、小型中性子源を利用した材料評価（試行実験）および小型装置開発のための設計検討に関して得られた成果を踏まえて、本プロの提案を行った結果、採択された。	◎	
テーマ 52 研究開発項目 I 中性子等量子ビームを用いた構造材料、接合・接着部の解析手法の確立と材料開発への適用	第二相ナノ析出物の化学組成同定、水素トラップに効果的な析出物の探求、オーステナイト相中の炭素濃度、高温加工中の転位密度同定、接合部のマイクロ組織および残留歪みの二次元マッピング等の中性子解析手法を確立する。(2019年度)	*小型装置（北海道大学・HUNS-II)で、中性子小角散乱測定により、鋼中の第二相ナノ析出物のサイズ分布等を同定し大型装置(J-PARC)による測定とよく一致する結果を得た。中性子とX線小角散乱を併用し両者の散乱強度の差異を利用してナノ析出物の化学組成を同定する手法を確立した。水素チャージ前後の中性子小角散乱測定により水素とナノ析出物の相互作用を解析可能にした。 *J-PARCにおいて、中性子	◎	

		<p>回折のプロファイル解析から鋼中の炭素濃度の同定を可能にした。高温加工中のその場測定により相変態挙動、集合組織形成や転位密度の同定を実現した。中性子透過ブラッグエッジ測定による第二相体積率や炭素濃度の同定、異材接合部のマイクロ組織の二次元マッピング等の基礎的知見を得た。</p> <p>* 小型装置（理研・RANS）を用いて接着部の水の挙動を中性子イメージングで観測するための基礎実験を行った。</p>		
<p>テーマ 52 研究開発項目 II 構造材料解析・産業利用に特化した小型中性子解析装置の新規開発および利便性を追究した小型装置による構造材料評価技術の開発</p>	<p>* 電子ビームパワー 10 kW クラスの電子加速器、非結合型減速材を有する中性子源、中性子飛行路長約 8 m のビームライン、中性子波長 0.4 nm で検出効率 20% 以上の中性子検出器を有する小型装置を 2018 年度末までに開発して、稼働を開始する。(2020 年度)</p> <p>* 0.6% 程度の波長分解能をもつ新小型装置の中性子ビームを用いて、ブラッグエッジイメージングの計測を実施し、歪みや金属組織のイメージング情報に変換する技術を確立する。新小型装置で鉄鋼材料中の炭素濃度や接合材料中のマイクロ組織および残留歪み等の二次元マッピングを実現する。新小型装置における測定視野を A4 サイズ以上に拡大する。</p> <p>* 接着部における水の存在状況の検出方法を提示する。</p>	<p>* つくば中央梅園分室にブラッグエッジ等中性子イメージング測定に適した中性子ビームを出射するための電子加速器や中性子源等の整備・調整を進め、新小型装置を完成させ、中性子ビームを発生させることに成功した。新しい Li-Glass 検出器システムを導入し期待される検出効率 20% 以上を達成した (0.4 nm 周辺の中性子波長域)。鉄鋼のブラッグエッジが明瞭に測定され、その位置から鋼中の炭素濃度が同定された。また、接合試料において接合部と素材部の集合組織の相違も検出された。残留歪みの二次元マッピングも小型装置で実現できることを示した。ラジオグラフィーによる接着構造部材の内部欠陥の観察に成功した。また、計測ポートを増築し、接合・接着試料の外力（応力・温度）印加状態におけるイメージングを実現し、新小型装置のデータ取得能力を拡大させた。また、安定運転監視のための中性子モニターを開発した。</p> <p>* 接合試料等に対して、中性子ラジオグラフィー観察および透過ブラッグエッジ測定だけでなく、反射光学顕微鏡観</p>	○	



	<p>*ケースバイケースの構造材料開発課題解決のための中性子等量子ビームによるハイブリッド計測のガイドラインを作成する。</p>	<p>察、走査型電子顕微鏡観察、走査透過 X 線顕微鏡(STXM)測定、X線ラジオグラフィー観察、EBSD測定、電子プローブマイクロアナライザー(EPMA)分析などのハイブリッド計測を行い総合的な考察を行った。</p>		
<p>テーマ 52 研究開発項目 III 中性子構造材料解析ネットワークの構築</p>	<p>ネットワーク内でのデータ解析法ならびに解析ツールの共有化を行う。得られた情報を基にして、各装置の性能や得意とする分析手法、実際に必要な分析時間や試料の調製法等の構造材料の分析に必要な情報が得られる解析事例集を発行する。可能な内容に関しては、ホームページ等により外部に公開する。さらに、測定カルテ・ガイドラインの運用体制、情報管理体制をネットワーク内に構築する。</p>	<p>中性子構造材料解析ネットワークにて、新小型装置（産総研）、既存小型装置（北海道大学、理化学研究所）ならびに大型装置の有効な利用方法を検討した。研究開発項目 II で開発した中性子モニターを小型 3 施設に設置し共有化した。標準試料ほか共通試料の測定で得られたデータを整理し、各装置における計測精度や計測時間等とともにデータ解析事例集や 3 つの小型装置の紹介資料の作成・整備を進めた。また、測定カルテ・ガイドラインを検討し、試料ホルダやデータ解析ソフトの共通化、情報管理体制をまとめた資料を作成した。作成した資料は ISMA 内に展開した。</p>	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

## (2)研究開発の成果と意義

### テーマ 44 (FS 研究)

本FS研究では、専門家を招いて4回の技術検討会（接合界面評価、ナノ組織と時間依存型破壊評価、組織制御・強度延性評価、および2次元マッピング（ブラッグエッジ）評価）、予備的実験の実施と国内外の文献調査等により以下の点を明確にした。

- ・電子線やX線には真似出来ない透過力をもつことから、中性子分析の構造部材への有用性・利便性が改めて明らかとなった。
- ・調査（紙面調査・インタビュー・施設訪問）をとおして、鉄鋼中だけでなく、非鉄や接合分野を含む構造材料課題の共通基盤として、応用展開が期待されていることが明らかとなった。
- ・中性子分析のなかでも、特に「ブラッグエッジ法」は、製品部材のままで、誰にでも解りやすいイメージとして、ナノ構造情報（ひずみ分布・結晶サイズ・相形態）が得られるので、期待が大きい。
- ・従来の小型装置ではブラッグエッジイメージングを高精度に測定することは困難であったが、新装置開発により、J-PARC並みの高パフォーマンス測定が可能であるとの試算を得た。
- ・新小型装置（産総研）を中心として、他の小型装置（北大・理研）や大型J-PARC/茨城県）とも連携して、中性子ネットワークで幅広い構造材料の課題に対応することが、有用だとの結論を得た。

これらの結果を踏まえて研究計画を練り、本プロ提案を行い採択された。

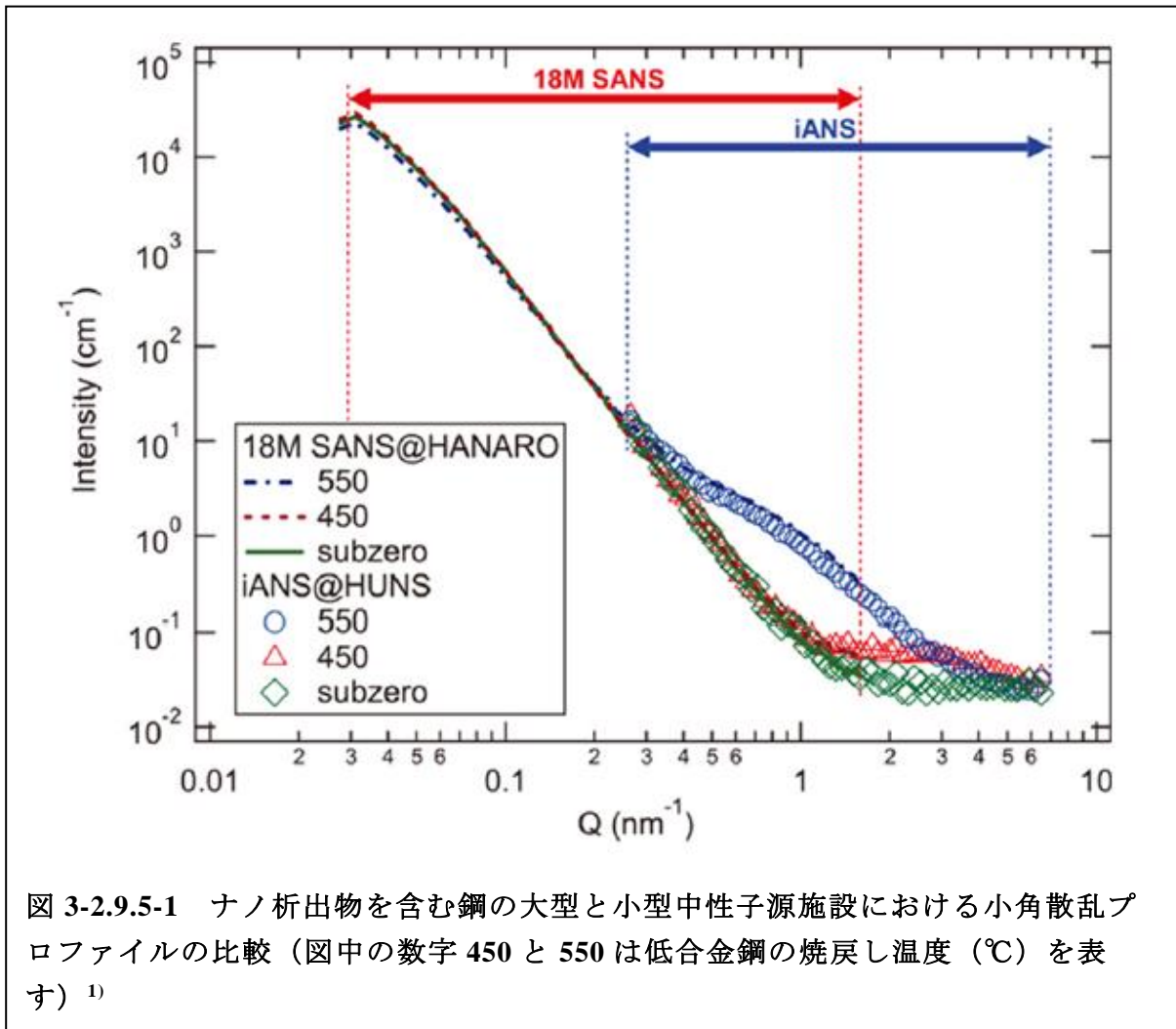
### テーマ 52 研究開発項目 I：中性子等量子ビームを用いた構造材料、接合・接着部の解析手法の確立と材料開発への適用

本研究開発項目では、小角散乱、回折、ブラッグエッジイメージング等の中性子を用いた解析手法の高度化や材料解析への最適化を進めるべく5つの研究開発テーマに取り組んだ。各テーマの主な成果を以下に記す。なお、本研究開発項目は2019年度をもって最終目標を前倒しで達成し終了した。

#### I-①：核生成段階における第二相ナノ析出物のキャラクタリゼーションと材料組織制御への適用

まずミクロ組織状態を変えたモデル合金（共通試料）の作製と従来法である透過電子顕微鏡観察や硬さ試験によるキャラクタリゼーションを行った。北海道大学の高度化した小型中性子計測装置（HUNS-II）と大型装置のJ-PARC（BL20 iMATERIA、BL15 大観）と韓国原子力研究所 HANARO (18m SANS)において、中性子小角散乱実験を行った。これらの測定結果からサイズ1 nm以下の定量測定が可能なが実証され、最終目標が達成された。特筆すべきことは、図 3-2.9.5-1 に示すように「ナノ析出物のサイズ領域において小型中性子源装置によって大型中性子源装置による測定とほぼ同程度の測定が可能であること」の確認である。次に、中性子とX線による小角散乱実験を行い、散乱プロファイルの強度比と組成毎の散乱長密度の比較によるナノ析出の化学組成の推定を行った。最終目標である「中性子とX線の小角散乱プロファ

イルの散乱強度比と組成毎の散乱長密度を比較してナノ析出物の組成を推定する手法」を確立した。さらに、この手法の非鉄合金への適用も進めた。本成果の一部は学術誌 *ISIJ International* 等<sup>1,6)</sup>に掲載された。なお、これらの測定法は研究項目Ⅲにおいて、2種類の析出物各々のサイズと化学組成の同定やアルミニウム合金の時効析出挙動の研究に展開し注目すべき結果を得ている。



### I-② 析出物と水素の相互作用の計測と遅れ破壊抑制への適用

まず高度化した北海道大学の小型中性子計測装置(HUNS-II)を用いて、水素チャージした直後および脱水素処理した後に中性子小角散乱測定がすみやかに行える実験手順、ならびに熱膨張測定による水素チャージの簡便検出法を確立した。共通試料である Nb 系析出物を含む鋼の引張試験を実施した。引張強度と硬さおよび微細析出量の傾向が良く一致し、析出強化挙動を確認した。本装置において図 3-2.9.5-2 に示すように水素チャージ有無の共通試料の中性子小角散乱プロファイルを測定した。その比較から散乱強度の水素チャージ有無での差異を解析できたことで、析出物による水素トラップ効果を確認した。さらに磁気散乱を活用することで、実用上問題になると想定される平均水素量に近い 5 ppm レベルの水素の局所的濃縮をとらえる方法の開発が可能であることを示した。実用性を重視した本共通試料では、析出物量および水素含有量が少ないため、測定を繰り返して統計精度を高めた結果、最終目標である「鋼中のナノ析出物と水素の相互作用を中性子小角散乱法によって実用レベルの評価ができること」を明らかにした。また、塑性加工により転位密度が増加すると水素含有量が増えることが小角散乱プロファイルから観測された。

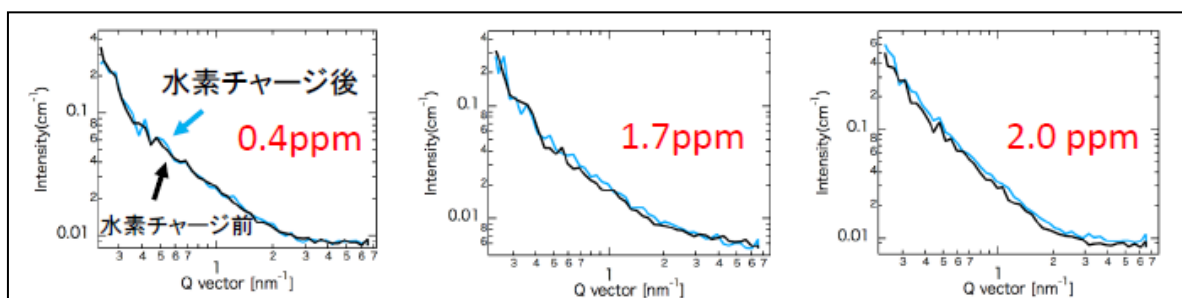


図 3-2.9.5-2 高強度鋼中の水素挙動の中性子小角散乱による観測例（大沼ほか：未発表）

### I-③ ブラッグエッジスペクトルおよび回折プロファイル形状を用いた炭素濃度分布解技術の開発

炭素量の異なる 8 種類のオーステナイト鋼単体および 5 種類の鋼を重ね合わせた模擬試料体を作製した。本試料について、J-PARC において中性子回折および中性子透過ブラッグエッジ測定を行い、得られたデータを解析し炭素濃度の同定法を提案した。走査電子顕微鏡 (SEM) 観察や電子線後方散乱回折 (EBSD) 測定等を加えて総合的に検討した結果、最終目標である「0.2mass%以下の精度で鋼中の炭素濃度を非破壊測定」できることが示された。図 3-2.9.5-3 は炭素含有量の異なる 9 種類の鋼の中性子回折(a)と中性子透過ブラッグエッジ測定(c)の結果である。これらのプロファイルをリートベルト型解析ソフト (Z-Rietveld および RITS code) で解析し、精緻化された格子定数と炭素量の間をそれぞれ(b)と(d)に示す。2つの測定法による結果は良く一致している。測定試料内の炭素濃度分布を求めるには回折では走査測定するが、ブラッグエッジ測定では中性子ビーム透過経路の平均値が 2 次元マップとして得られる。本成果は学術誌 *Materials Characterization* <sup>14)</sup> に掲載された。加えてラボ X 線回折のライン

プロファイル解析による簡易測定法を実施しその有用性を明らかにした。なお、後に研究項目Ⅱにおいて、同じ試料を用いて新小型中性子装置で中性子透過ブラッグエッジ測定を行いプロファイル解析した結果、格子定数（炭素濃度）と結晶子サイズが J-PARC RADEN による結果に近いことを確認した。

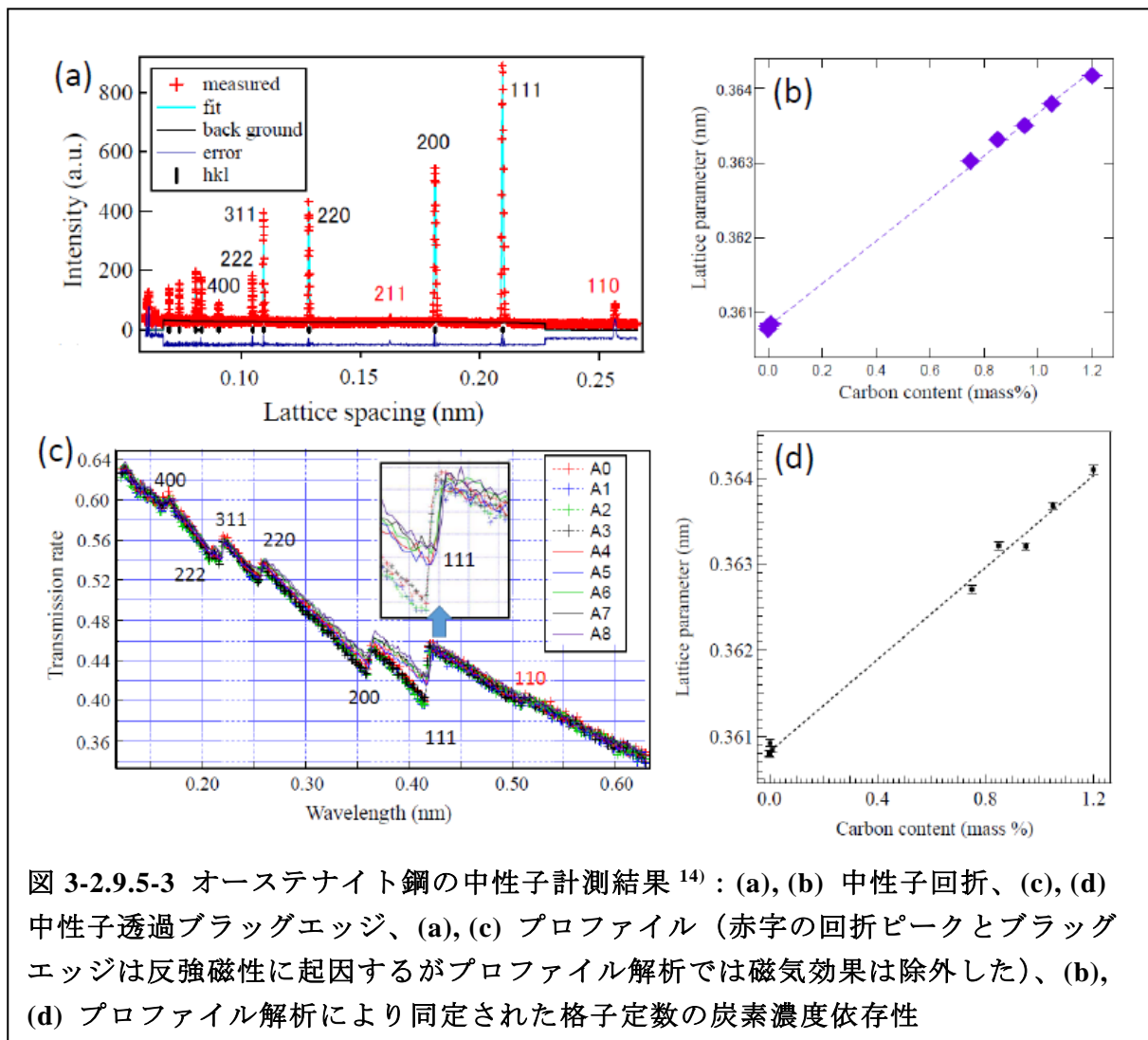


図 3-2.9.5-3 オーステナイト鋼の中性子計測結果<sup>14)</sup>: (a), (b) 中性子回折、(c), (d) 中性子透過ブラッグエッジ、(a), (c) プロファイル（赤字の回折ピークとブラッグエッジは反強磁性に起因するがプロファイル解析では磁気効果は除外した）、(b), (d) プロファイル解析により同定された格子定数の炭素濃度依存性

#### I-④ その場合中性子散乱回折による熱処理および加工熱処理による組織形成機構の解明

共通試料として、富津分室、千葉分室、西神分室の合同提案で溶解作製した低合金鋼を用いた。J-PARC BL19 匠を用いて 3 種類の実験を実施した。まず、熱処理状態の試料に含まれる残留オーステナイト量を中性子回折で同定し、通常の補正を行っても測定方向（散乱ベクトル）によって値が異なり、集合組織の影響を取り除けないことを明らかにした。そこで、オイラークレードルを用いて 256 方向から測定し結晶方位関数(ODF)を求めた。そして、ODF と残留オーステナイト量を Multi-Rietveld 解析によって同時測定すると、最も正確な値が求められることを示した<sup>2)</sup>。次に、熱膨張系（加熱炉）を使って

焼鈍に伴うマイクロ組織変化をその場中性子回折で計測し、オーステナイト単相に至る過程を図 3-2.9.5-4 に示すように定量的に追跡した<sup>3)</sup>。同様なその場計測はX線回折や電子線背面散乱回折 (SEM/EBSD) でも行うことができるが、図に見られるように表面層を対象とするこれらの方法では、加熱中に脱炭や脱 Mn が生じ正確な知見が得られない。中性子回折は熱膨張測定の結果にほぼ一致し、構成相体積率のみでなく集合組織やひずみ (内部応力) 等が求められるので、変態挙動を深く理解することができる。続いて、オーステナイト化状態からの連続冷却に伴うフェライト、パーライト変態挙動をその場中性子回折で追い、変態速度のみでなく未変態オーステナイト相の炭素濃

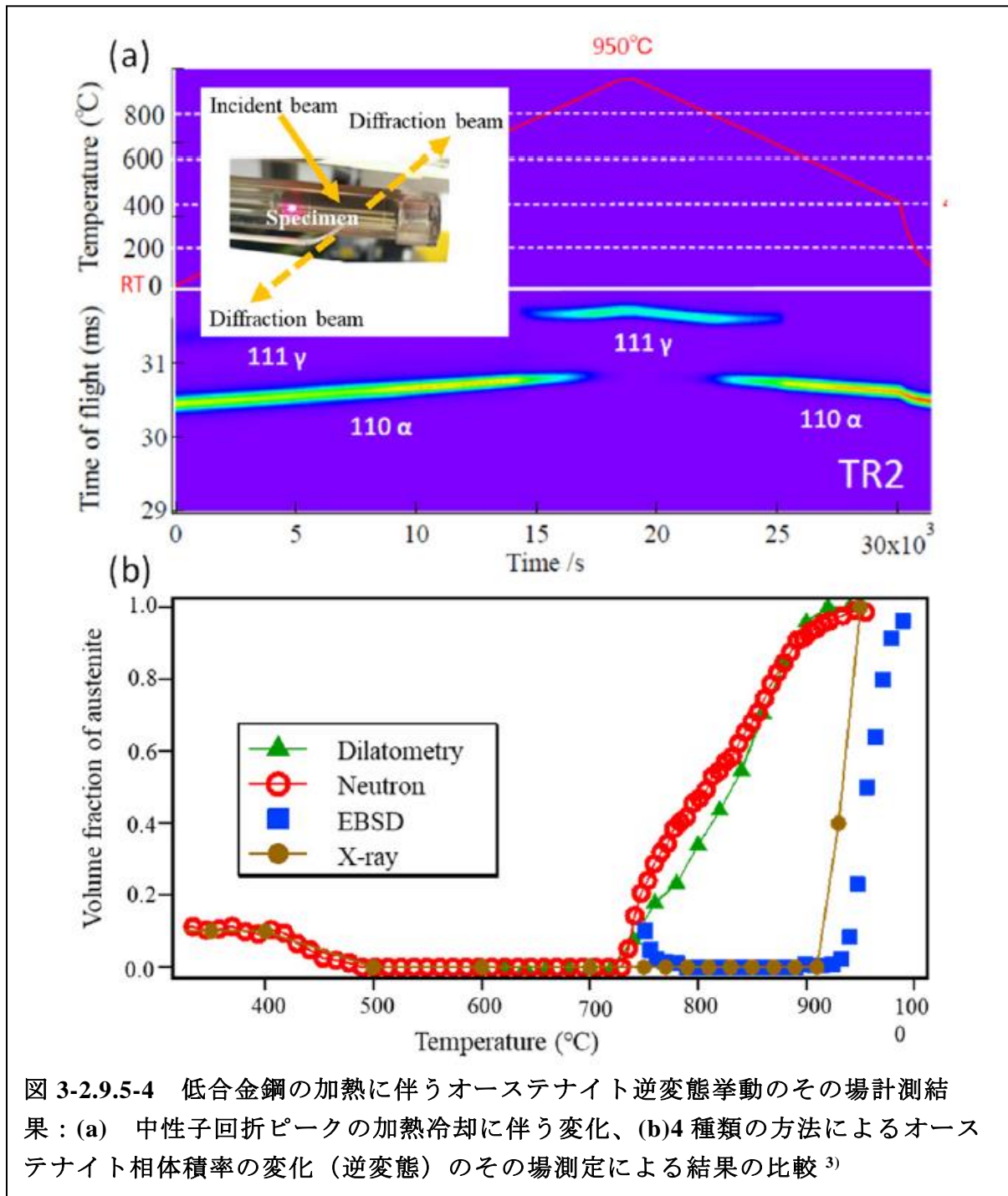


図 3-2.9.5-4 低合金鋼の加熱に伴うオーステナイト逆変態挙動のその場計測結果 : (a) 中性子回折ピークの加熱冷却に伴う変化、(b)4 種類の方法によるオーステナイト相体積率の変化 (逆変態) のその場測定による結果の比較<sup>3)</sup>

度を変態相応力と熱相応力を考慮して同定することができた<sup>5)</sup>。高温加工が含まれる製造プロセスのその場測定では中性子回折はさらに威力を示す。加工熱処理シミュレーターを J-PARC BL19 匠にセットし、本共通試料に高温での圧縮塑性加工を施した後、種々な速度で冷却しながら、その場中性子回折測定を行った。高温加工後 10 秒毎に得られた中性子回折プロファイル全体を一括フィットする解析法(Convolucional multiple whole profile: CMWP 法)を用いることで転位密度を同定することができ、最終目標を達成した。また、従来から課題であった低合金鋼の焼入れに伴うマルテンサイト変態挙動のその場計測に挑戦し、冷却中の自己焼き戻し挙動や高温加工（オーステンサイト化処理）の影響を明らかにした<sup>11)</sup>。さらに、オーステナイト化処理後に種々な温度で恒温保持してフェライト-パーライト変態やベイナイト変態のその場中性子回折実験を行い、拡散型変態と無拡散型変態で変態進行中のオーステナイト格子定数の変化が異なる（前者で増加、後者は減少）ことを見出し、変態機構と炭素濃縮、格子欠陥密度、および相応力と各種相変態の関係を明らかにした。これらの結果に関する学術論文が学術誌 Acta Materialia<sup>11)</sup>や ISIJ International（澤村論文賞受賞）ほか<sup>2,5,3)</sup>に、解説論文が学術誌 Science and Technology of Advanced Materials<sup>10)</sup>に掲載された。

#### I-⑤ マルチマテリアル構造材の接着界面及び接合部の状態モニタリング手法の確立

接合部のマイクロ組織および残留歪み分布の二次元マッピングと接着部の水の検出を目的に 2 種類の研究を行った。

接合部に関しては、J-PARC および北海道大学の小型中性子計測装置(HUNS-II)において、摩擦攪拌接合 (FSW) ほか各種接合部材 (アルミニウム合金、マグネシウム合金、鉄鋼) の中性子透過ブラッグエッジイメージング測定を行った。RITS 解析ソフト等を用いてデータ解析法の検討や空間分解能・波長分解能などを含めた両者の結果の比較を行った。また、研究開発項目II-①で産業技術総合研究所に新設した中性子計測装置にて、鉄鋼材料等の中性子イメージング測定を行った。

J-PARC と HUNS-II で、中性子ビームコリメータのイメージング空間分解能や測定時間への影響について確認を行った。HUNS-II では加速器の最大パワー運転下で発生する中性子フラックス (単位面積当たりのビーム強度) を用いた測定でも、中性子検出器での数え落としではなく、フラックスを低減するためのコリメータは不要であることが判明した。一方、J-PARC では、フラックスが高いため、検出器が数え落としをしない程度にまでコリメータでフラックスを低減させる必要があった。コリメータは、フラックス低減による測定時間の増大とともに、イメージング空間分解能の向上にも影響するため、小型中性子源を上手に活用する上でその有効な活用法に関する知見を得ることができた。

FSW 接合試料では、アルミニウム合金の母材と比較して、攪拌部では複数のブラッグエッジの相対透過率が大きく変化している事が判明し、解析の結果、結晶の配向の変化を反映していることが分かった。またラボ X 線回折を用いて残留応力を測定するとともに、放射光 X 線回折測定を行うことで、結晶配向性を含む接合部分の結晶構造変化の特徴を解析した。J-PARC における接合試料の測定例として Mg 合金摩擦攪拌

点接合 (FSSW) 部材を 4 点曲げ負荷状態で 2 方向 (板面 ND と側面 TD) から測定した中性子透過ブラッグエッジ測定結果を図 3-2.9.5-5 に示す。(a)では、素材 (非接合) 領域と接合部のスペクトルが若干異なり接合によって集合組織が強くなったことがわかる。TD 方向のスペクトルは割愛するが 10-10 エッジ位置を RITS コードで解析すると格子面間隔 (すなわち弾性ひずみ) が(b)に示すように曲げモーメントによって変化する様子が推定される。なお、これらの FSSW 接合部材は研究開発項目II-①で開

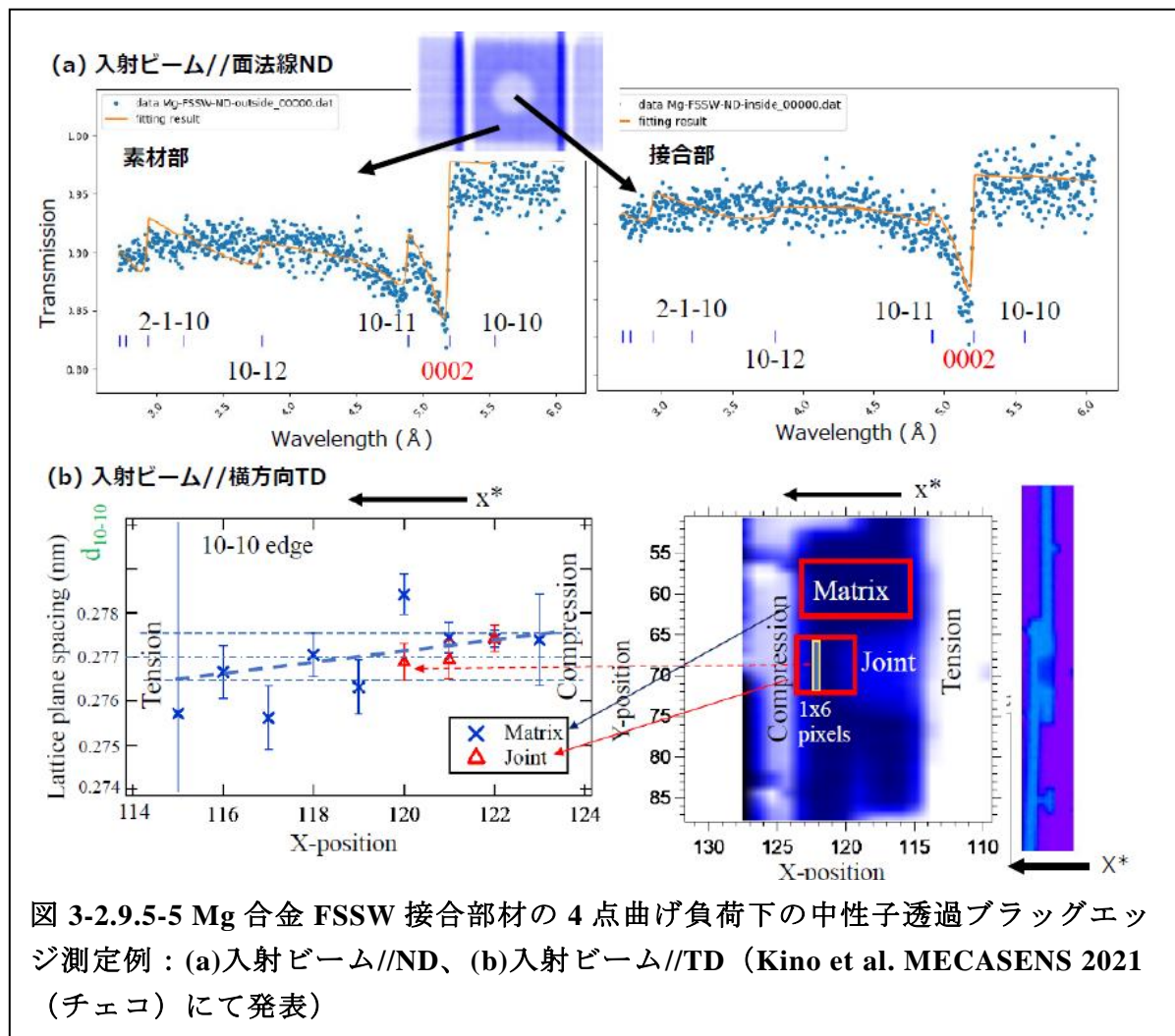


図 3-2.9.5-5 Mg 合金 FSSW 接合部材の 4 点曲げ負荷下の中性子透過ブラッグエッジ測定例 : (a)入射ビーム//ND、(b)入射ビーム//TD (Kino et al. MECASENS 2021 (チェコ) にて発表)

発した新小型装置でも再測定し類似した傾向が得られた。

鋳鉄の結晶歪み測定では、J-PARC と HUNS-II 両施設のデータで歪みの情報を引き出すことに成功し、双方とも材料力学計算による結果に近い値が得られた。両施設での測定時間はほぼ同じであったため、中性子フラックスの大きく飛行距離の長い J-PARC の方が、歪みの不確かさを低減できた。

これらの結果からマイクロ組織と歪みの二次元マッピングが可能となり、鋳鉄においては結晶歪みの定量測定にも成功した。

金属と接着剤界面の水検出に関して、理化学研究所の小型中性子解析装置(RANS)を用いて異なる水の浸漬条件の金属と接着剤サンプルの中性子イメージング測定による接着剤への水の侵入状態の変化観察を実施した。その分析から、接着界面近傍の水



の影響に関しては、詳細情報が得られる見通しを得た。また、実用部材を想定し作製された、鋼板とアルミ板の接着接合試料の中性子透過イメージング像を得た。両板を接着剤や他の機械締結を組み合わせた部材を使用し測定条件を検討した結果、両金属に影響されることなく接着剤の2次元イメージングが可能であり、内部に存在する気泡や厚さの違いも観察することができた。

## テーマ 52 研究開発項目Ⅱ：構造材料解析・産業利用に特化した小型中性子解析装置の新規開発および利便性を追究した小型装置による構造材料評価技術の開発

中性子ブラッグエッジイメージング法に重点化した構造材料分析用の小型中性子解析装置を新規に開発し、併せて新小型装置ならびに既存小型装置における構造材料計測法やデータ解析手法を発展させた。また、同一試料の多面的な分析のため、中性子のみでなく、X線、電子線等を用いたハイブリッド分析計測技術も検討した。本課題で取り組んだ下記の3つの研究開発テーマの成果を以下に記す。

### Ⅱ-①：構造材料解析に最適化した小型装置の開発

つくば中央梅園分室において小型中性子解析装置（以下、新小型装置）開発のための設置場所を2017年度より整備を開始し、小型中性子解析装置構成機器（電子銃、クライストロンシステム、電子ターゲット、放射線安全システム、中性子源、中性子減速材システム、高周波ガイドシステム、加速器温調システム、電子加速器総合制御システム、中性子ビームライン遮蔽システム、中性子強度モニター等）を設計・構築・導入した<sup>7,8,9,17)</sup>。中性子強度モニターに関しては、高エネルギー加速器研究機構が主導的に開発し、理化学研究所 RANS、北海道大学 HUNS-II、新小型装置にて性能試験を実施した。

これら構成機器の接続・整備・調整・試験運転等を行うことで、電子加速器や非結合型減速材をもつ中性子源等を用いた新小型装置を設置した。本装置の整備・調整を進めることで、電子加速器を駆動して中性子ビームの発生、中性子計測用ビームラインへの輸送と検出をすることができた。パルス中性子ビーム強度の時間変化から固体メタン減速材で期待される中性子波長スペクトルを有するビームを発生できる事を確認した。さらに、鉄鋼材料のブラッグエッジスペクトルの測定も成功した。この中性子計測用ビームライン（以下、従来ビームラインとも呼称）は当初より計画されていたものであり、主にブラッグエッジスペクトル・ブラッグエッジイメージング測定に適したものとして設計・開発した。

2022年度には、新小型装置を改造して中性子計測用ビームラインを増設（以下、新ビームライン）し、3次元イメージング（CT）や接合・接着試料の外力（応力・温度）印加状態におけるイメージング等が高効率で可能なシステムを導入し、新小型装置のデータ取得能力を拡大させた。

電子加速器に関しては、電子銃と加速器ビームライン、電子加速のための高強度マイクロ波を発生させるクライストロンシステムとその電源であるクライストロン電源システム、加速管に高周波電力を輸送する高周波ガイドシステム、加速器温調システム、電子加速器総合制御システムの設計・製作・設置と必要に応じて調整・整備を

行った。さらに加速器ビーム出力増強と安定化のため、電子ビーム軌道補正システムを導入し、電子ビームの出力増強と安定化のための制御パラメータ調整を、再委託先の東京工業大学や北海道大学と協力して進めた。これらにより、電子ビームの発生と加速に成功した。電子銃は動作周波数が 2856 MHz であり、三極管方式で電子ビーム電流 250 mA 以上、電子ビームパルス幅 1~10  $\mu$ s、電子ビーム繰り返し周波数 100 Hz で 3 MeV のエネルギーの電子ビームを発生できる仕様である。電子銃のカソードは定期的にエージングする必要があるため、その電流設定や持続時間等の制御パラメータを調整した。加速器ビームラインは、2.8 m の加速管 3 本から構成され全長は約 15 m である。加速管において、2856 MHz のマイクロ波を  $2\pi/3$  モードで、電子を加速する。なおこれらの加速管は過去に電子技術総合研究所によって製作されたものが、現在も産総研に承継保管されていたことから、コスト削減のためにこれらを活用した。電子ビームの安定化に重要な真空度をより良くするため、加速管のエージングを行った。この加速管や収束用二連四極電磁石等から構成される加速器ビームラインによって、電子ビームを 30-40 MeV にまで加速できる。電子ビームの電流安定化と軌道補正のために、電子ビームのプロファイルを確認して調整するシステムと手順を構築した。クライストロンシステムは、各加速管と電子銃に提供するマイクロ波を出力するものである。電子を目標とするエネルギーにまで加速するため、各クライストロン本体の仕様は、最大ピーク出力 7 MW 以上、最大平均出力 7 kW 以上、最大出力パルス幅 10  $\mu$ s 以上とした。新設した小型装置の概要を図 3-2.9.5-6 に示す<sup>20, 21, 22</sup>)。本装置が最終目標に掲げた 0.6% 程度の波長分解能にて、ブラッグエッジイメージング測定に適用できることを確認した。新小型装置を AISTANS (Analytical facility for Industrial Science and Technology using Accelerator-based Neutron) と呼ぶことにした。

## II-②：小型中性子装置を用いた構造材料解析および計測・解析手法の高度化

新小型装置ならびに既存の小型装置の性能を比較するために、共通試料群（鉄鋼、アルミニウム合金およびマグネシウム合金の FSW 接合部材等）を準備し、J-PARC ならびに北海道大学の小型中性子計測装置(HUNS-II)でブラッグエッジ測定を、両者の比較が容易になるように試料のセット条件と測定時間をほぼ同じにして行った。例えばアルミニウム合金の FSW 部では Al の 111 ピークが明瞭に観察されたが、母材部では観測されなかった。これは FSW による結晶方位がランダム化したためと考えられる。また新規小型中性子解析装置によるブラッグエッジ等測定を実施し、新装置の装置性能の評価を行った。更に得られた結果を基にして、標準試料の選定や高性能検出器導入の効果の検討を行い、より産業利用に適した新装置高度化の指針を策定した。

新小型装置により、100 mm  $\times$  100 mm 視野、0.8 mm  $\times$  0.8 mm ピクセルの GEM 検出器で、結晶構造が異なる 10 mm 厚の鉄鋼材料のブラッグエッジ測定を行った。鉄鋼試料として結晶構造が体心立方格子の鋼板と面心立方格子の鋼板とを組み合わせた試料

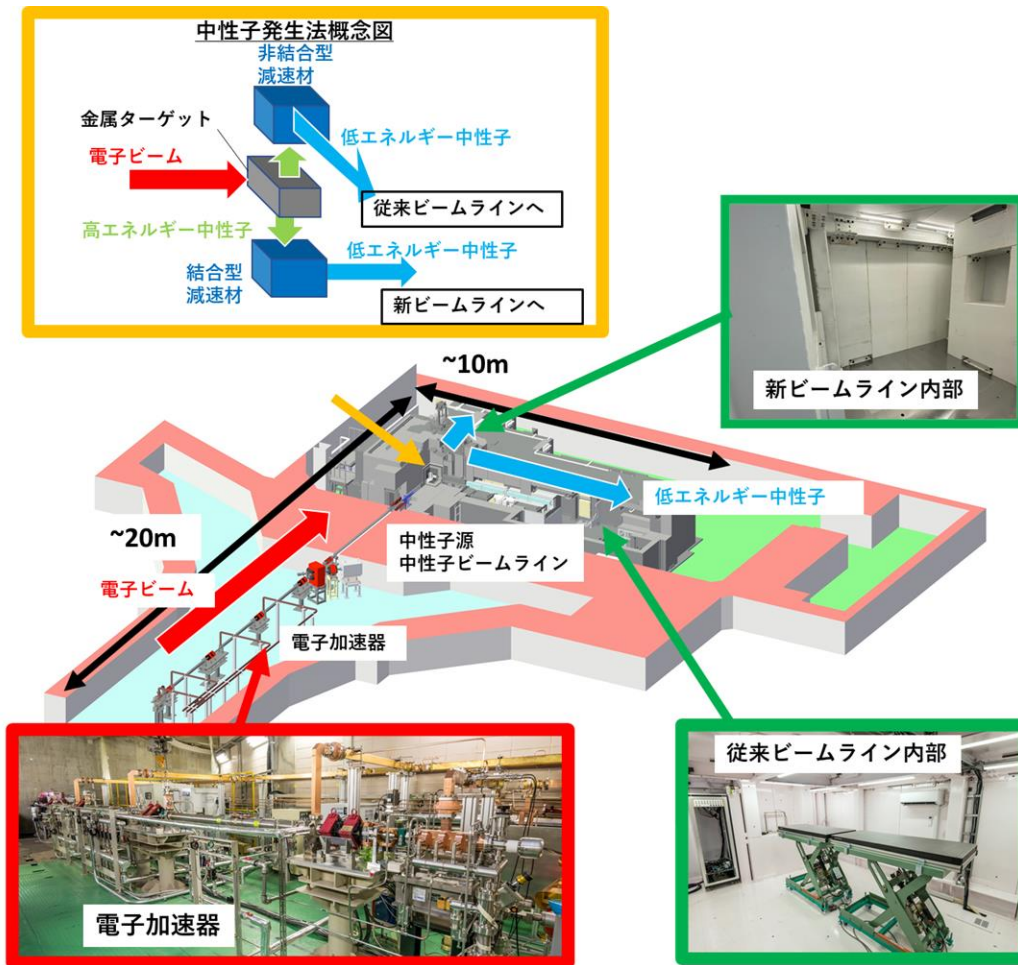


図 3-2.9.5-6 開発した小型中性子解析装置 AISTANS の概要<sup>20, 22)</sup>

を用いることで、これら結晶構造の違いに起因する明瞭なブラッグエッジスペクトルの違いを確認することができた。さらにこの違いを利用して、体心立方格子と面心立方格子とを区別した二次元イメージ観測に成功した。

新小型装置で中性子透過ブラッグエッジ測定を効率的に実施するために、検出効率の高い Li-Glass 中性子検出器を開発・導入した。これを用いた測定例として、先に J-PARC で測定したオーステナイト鋼の再測定を行った。2つの装置で得られた中性子透過ブラッグエッジスペクトルを図 3-2.9.5-7 に示す。両者を比較すると、波長分解能が3倍程度優れる J-PARC の結果(b)の方がブラッグエッジは鮮明に現れているが、新小型装置 AISTANS でもかなり良好な結果(a)が得られていると言えよう。RITS による暫定的な解析結果では格子定数も結晶子サイズにも両者で大きな差は見られない。

中性子は軽元素の解析に適しているため、接着部に浸透する水の挙動を観察できないかという要望が強い。接着剤には水素が多量に含まれているため、接着部に浸透する水を検出することはむづかしい。そこで接着剤の水素を重水素化しておけば浸透する軽水の挙動をモニタリングしやすくなる。物質・材料研究機構の内藤らは理化学研究所の RANS を用いて図 3-2.9.5-8 のような実験を行った。その結果、軽水がアルミニウム合金板と接着剤の界面を優先的に浸透してゆく様子を観察することに成功した。

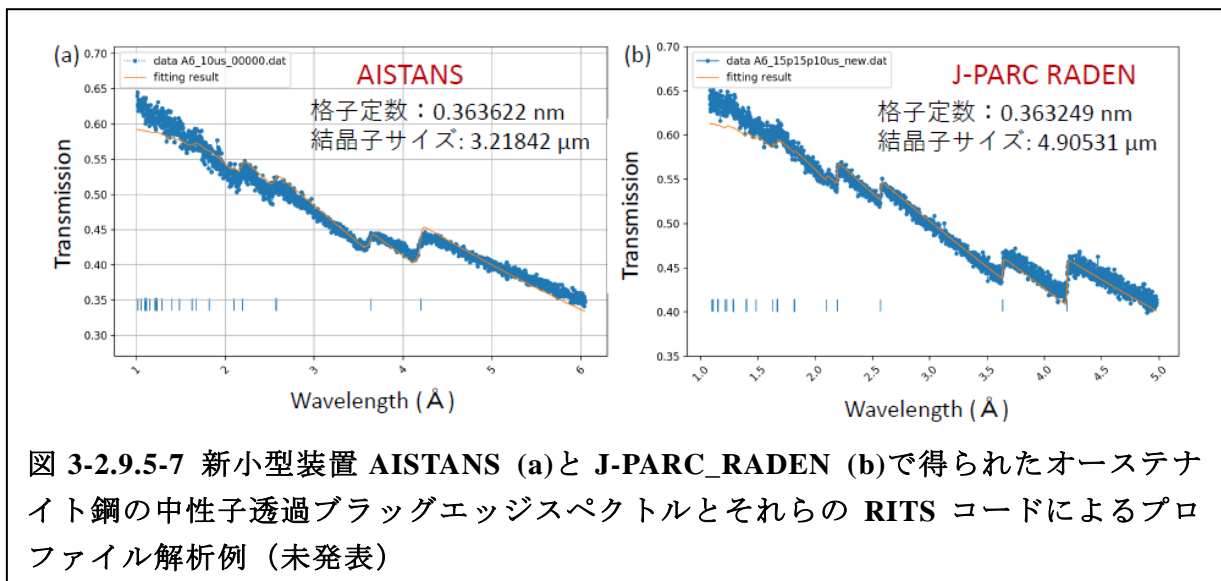


図 3-2.9.5-7 新小型装置 AISTANS (a)と J-PARC\_RADEN (b)で得られたオーステナイト鋼の中性子透過ブラッグエッジスペクトルとそれらの RITS コードによるプロフィール解析例 (未発表)

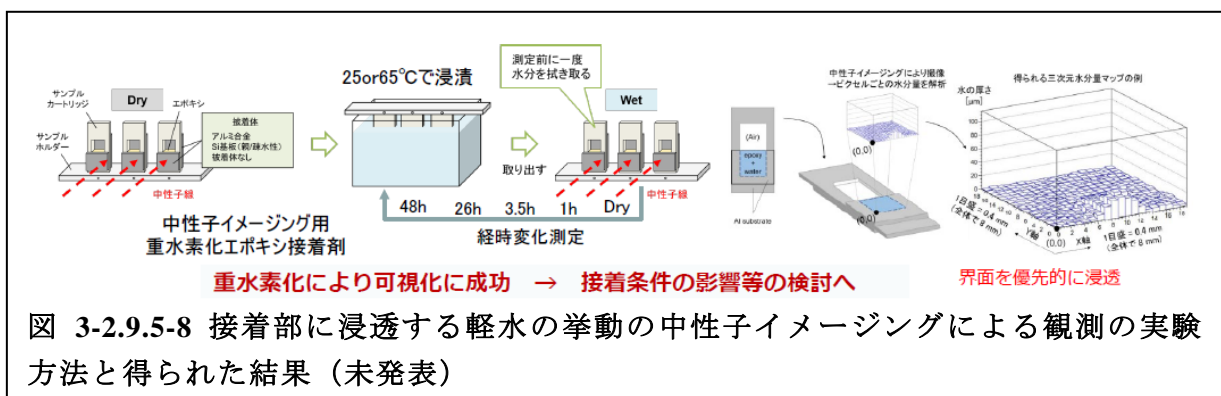
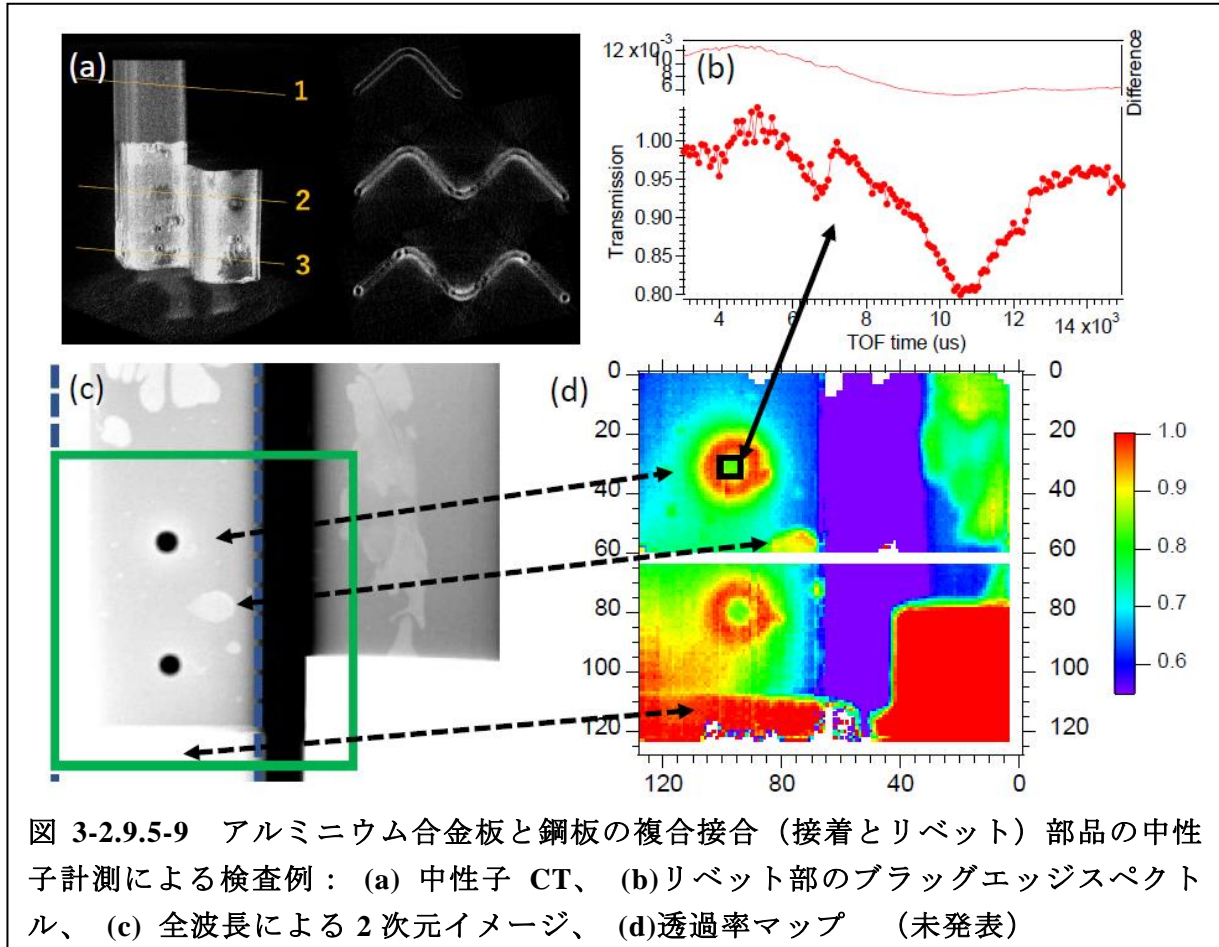


図 3-2.9.5-8 接着部に浸透する軽水の挙動の中性子イメージングによる観測の実験方法と得られた結果 (未発表)

接着部品における接着剤厚さや接着ムラ等は X 線ラジオグラフィによっても検出できる場合が多いが中性子の方が明瞭に観察される<sup>19)</sup>。新小型装置によるアルミニウム合金板と鋼板の異材複合接合(接着とリベット)部品の中性子 CT 測定(3次元トモグラフィ)と中性子透過ブラッグエッジ測定の例を図 3-2.9.5-9 (a)に示す。接着剤空隙の 3次元観察等ができる。(c)の枠内の中性子透過ブラッグエッジイメージングが (d)であり、リベット部のブラッグエッジスペクトルが(b)である。このように接合接着部品の中性子による一連の非破壊検査が可能になった。

## II-③：中性子その他量子ビームを用いたハイブリッド計測

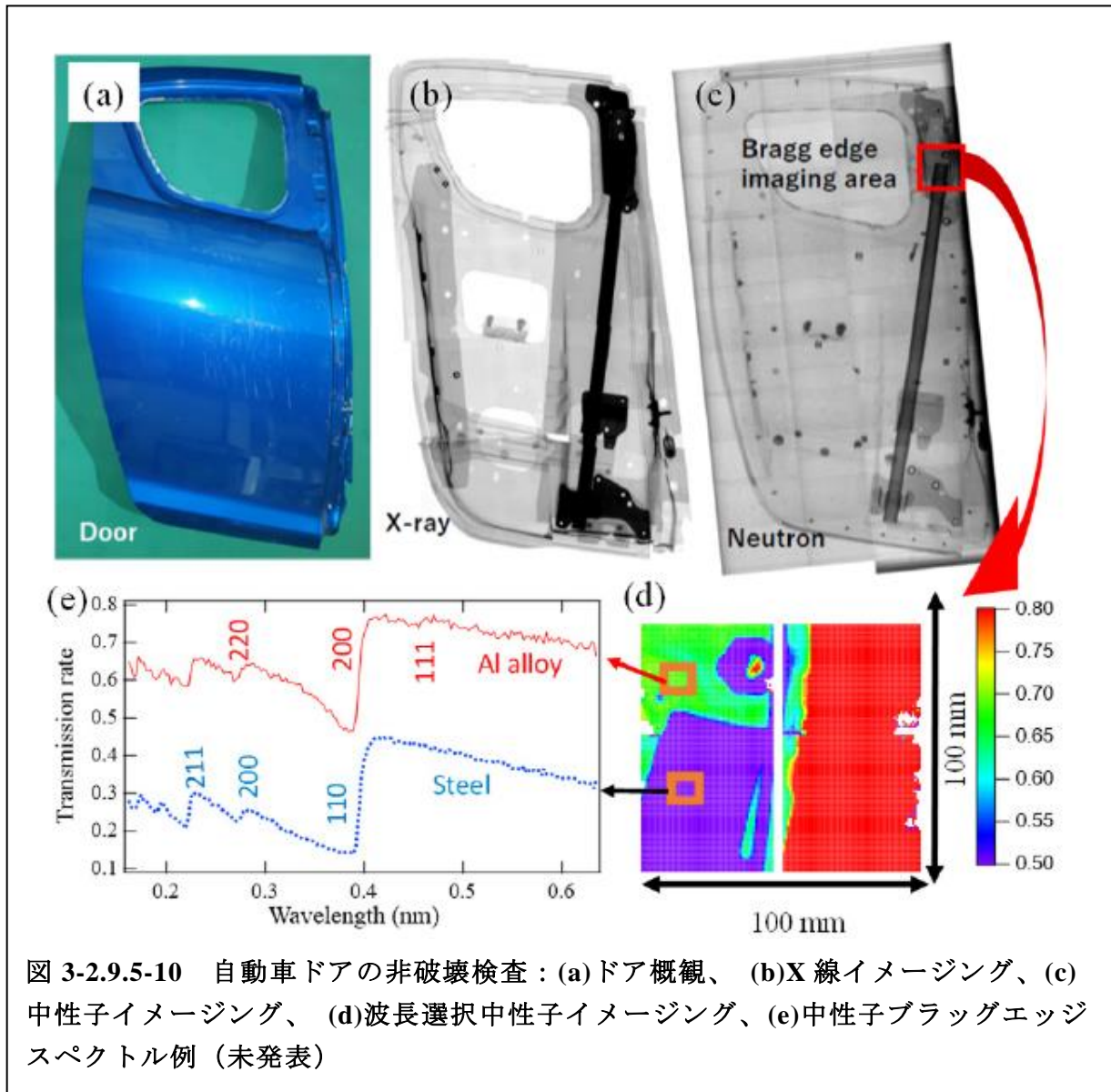
金属構造材料等の典型的な接合試料(FSW、FSSW 等)に対して中性子ラジオグラフィ観察および透過ブラッグエッジ測定だけでなく、X 線ラジオグラフィ、X 線残留応力測定、反射光学顕微鏡観察、走査型電子顕微鏡観察、後方散乱電子回折分析、電子プローブマイクロアナライザー分析等のハイブリッド計測を行い総合的な考察を進めた。代表的な計測例として自動車ドアの非破壊検査事例を図 3-2.9.5-10 に示す。新小型装置ではドアのような大型部品の中性子ラジオグラフィ測定を行うことができる。同じ場所(中性子実験ハッチ内)で X 線ラジオグラフィも測定できるようにした



ので、図 3-2.9.5-10 (a)と(b)のようにコントラストの異なる 2 種類のイメージを相補的に検討することが可能である。両者を比べると中性子は前述したように接着剤の厚さや金属部品の内部を知るのに適していることがわかる。さらに、このような巨視的検査で注目される部位があれば、同じハッチ内で中性子透過ブラッグエッジ測定を行って、結晶性材料のマイクロ組織や歪み等を調べることができる。場合によっては中性子と X 線による可視化により特定した箇所から試料を切り出し、電子顕微鏡等で詳細に調べるという一連の検査手順が有効と考えられる。

また、各種接着試料に対して X 線及び中性子イメージングを行って、被接着試料の種類や厚さにより健全性評価にどちらのビームを用いるのが適当であるか等を明らかにした。これは、目的に応じた探索ビームの選択が必要な例である。

一方、X 線と中性子に対する元素の散乱長の違いから、ナノ析出物の小角散乱コントラストが異なることを利用して、両ビームによる小角散乱プロファイルの比較から、散乱体（鋼中の析出物）の化学組成をバルク平均として同定する手法を確立した。この手法は非鉄合金等のクラスターや析出物にも適用できる。



また、金属板と接着剤の界面構造を走査透過 X 線顕微鏡により同定し、中性子イメージングや小角散乱結果等によるマクロ的とミクロ的観点から接着健全性を評価する手法を開発した。これらは、複数の探索ビームによる計測を相補あるいは相乗的に利用する例である。

上述の成果から、最終目標を達成したと結論した

### 研究開発項目 III：中性子構造材料解析ネットワークの構築

本ネットワークにて、図 3-2.9.5-11 の新小型装置と既存小型装置（北海道大学 HUNS-II、理化学研究所 RANS）ならびに大型装置 (J-PARC) におけるこれまでの標準試料での測定結果ならびに新規の測定結果に関するデータを整理し、各装置における計測精度や計測時間等とともに解析事例集や装置紹介資料を作成した。

なお、上記の計測課題の作成資料については、データ解析と議論内容をまとめた「利用事例」のパートと、計測前にユーザ側が利用施設側に相談する際に用いる「問診票（カルテ）」パートを分けて準備した。「問診票（カルテ）」を参照することで、



ユーザー側は、課題解決に適した計測装置の利用相談を、円滑に進めることが可能になる。作成した資料は ISMA 内に展開し、特に新装置に関する公開部分については HP 上<sup>22)</sup>に展開した。

測定カルテ・ガイドラインを作成し、試料ホルダーや解析ソフトの共通化について、情報管理体制と併せて、ネットワーク内の各機関と議論し、簡便・迅速な計測体制を構築した。三つの小型中性子計測施設には同じ中性子モニターを設置し、測定の安定性等で比較や検討が容易になるようにした。

### (3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.5-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2015FY	0	0	2	0	0	0	0	1	0
2016FY	0	0	5	0	0	0	0	1	0
2017FY	4	0	25	3	0	0	0	1	1
2018FY	3	0	27	0	0	0	0	1	1
2019FY	6	0	36	5	1	1	1	2	1
2020FY	2	0	13	4	1	0	0	1	0
2021FY	2	0	15	1	1	0	0	0	2
2022FY	1	0	2	1	0	0	0	0	1
合計	18	0	125	14	3	1	1	7	6

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.5-4 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2015FY	0	0	0
2016FY	0	0	0
2017FY	0	0	0
2018FY	0	0	0
2019FY	0	0	0
2020FY	1	0	0
2021FY	0	0	0
2022FY	0	0	0
合計	1	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.5.9.3 参考文献

- 1) 大沼 正人、他、Intermediate-angle neutron scattering instrument for quantitative and non-destructive characterization of nanostructures in steels and other alloys、ISIJ International（日本鉄鋼協会発行の欧文学術誌）、57 巻 10 号、1831-1838、(2017)
- 2) 友田 陽、他、種々な方法による Mn-Si-C 鋼の残留オーステナイト体積率測定の比較、鉄と鋼（日本鉄鋼協会和文論文誌）、103 巻 10 号、570-578、(2017)
- 3) 友田 陽、他、In situ observation on transformation behavior upon heating in a 1.5Mn-1.5Si-0.2C steel、ISIJ International（日本鉄鋼協会発行の欧文学術誌）、57 巻 12 号、2237-2244、(2017)
- 4) 池田 義雅、他、小型中性子源の現場利用を目指した残留オーステナイト相分率測定手法の開発、鉄と鋼（日本鉄鋼協会和文論文誌）、104 巻 2 号、138-144、(2017)
- 5) 友田 陽、他、In situ neutron diffraction study on ferrite and pearlite transformations for a 1.5Mn-1.5Si-0.2C steel、ISIJ International（日本鉄鋼協会発行の欧文学術誌）、58 巻 11 号、2125-2132、〔2018〕
- 6) 仲道 治郎、他、Evaluation of nano Size NbC precipitates in HSLA steel through microstructural analysis and small angle neutron scattering、Materials science forum、941 巻 2 号、141-146、(2018)
- 7) 木野 幸一、他、Design of a compact electron accelerator-driven pulsed neutron facility at AIST、Nuclear instruments and methods in physics research section a: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment、927 巻 2 号、407-418、(2019)
- 8) 木野 幸一、他、Pulsed neutron-beam flux with the supermirror neutron guide system



- at AISTANS、European Physical Journal Plus、印刷中 (2022).
- 9) オローク ブライアン、他、Design and construction of an electron accelerator for a pulsed neutron facility at AIST、Nuclear instruments and methods in physics research section B (NIMB) proceedings、462 巻 12 号、41-44、(2019)
  - 10) 友田 陽、Crystallographic characterization of steel microstructure using neutron diffraction、Science and technology of advanced materials (STAM)、20 巻 1 号、1189-1206、(2020)
  - 11) 王 延緒、他、Real time observation of martensite transformation for a 0.4C low alloyed steel by neutron diffraction、Acta Materialia、184 巻 1 号、30-40、(2020)
  - 12) 友田 陽、他、In situ neutron diffraction study on ferrite and pearlite transformations for a 1.5 Mn-1.5 Si-0.2 C Steel、2018 年度 MLF 年報 (MLF annual report 2018)、3 月、33-36、(2020)
  - 13) 木野 幸一、他、Newly constructed compact accelerator-based neutron facility at AIST、EPJ web of conferences、231 巻 3 号、01002、(2020)
  - 14) 友田 陽、他、Influence of carbon concentration and magnetic transition on austenite lattice parameter of 30Mn-C steel、Materials characterization、163 巻 3 号、110243、(2020)
  - 15) 友田 陽、他、その場中性子回折による 1.5Mn-1.5Si-0.2C 鋼におけるフェライト-パーライト変態の検討、鉄と鋼、106 巻 5 号、262-271、(2020)
  - 16) 伊藤 孝憲、量子ビームなどの最新技術を用いた分析解析技術の現状、光アライアンス、10 月、27-38、(2020)
  - 17) 佐藤 節夫、他、Development of neutron intensity monitors、JSPS conference proceedings、3 月、Proc. 33、011090-1-011090-6、(2021)
  - 18) 友田 陽、中性子回折による鋼の高温相変態挙動その場計測、ふえらむ、26 巻 5 号、287-290 (2021)
  - 19) 高橋 佑輔、金属素材の接着接合に関する分析技術、Journal of Surface Analysis (表面分析研究会会誌)、28 巻、2 号、102-109、(2022)
  - 20) NEDO/ISMA/産総研共同プレスリリース、「輸送機器の構造材料・部品分析向けに小型中性子解析装置を開発 –センチメートル厚の金属部品内部の結晶情報を非破壊で分析可能–」、(2020/01/22)  
<https://unit.aist.go.jp/rima/xr-pos/ja/aistans/index.html>
  - 21) 産総研つくばセンターニュース、「産総研中性子解析施設 (AISTANS) の開所式典等を開催 –中性子を活用した非破壊分析等産業利用の更なる発展を目指して–」、(2020/02/25)  
[https://www.aist.go.jp/tsukuba/ja/news/au\\_20200225.html](https://www.aist.go.jp/tsukuba/ja/news/au_20200225.html)
  - 22) 産総研中性子解析施設 (AISTANS) 紹介ページ  
<https://unit.aist.go.jp/rima/xr-pos/ja/aistans/index.html>

## 2.9.6 [テーマ番号 57] 「超高強度化材料の潤滑加工性向上と異種材料接合部の塗装後耐食性向上技術の開発 (FS 研究)」 (2018 年度)

### [テーマ番号 65] 「マルチマテリアル車体における防食表面処理評価技術の開発」 (2019 年度～2022 年度)

#### 2.9.6.1 テーマの概要

##### (1) 背景と目的

車体用軽量化材料は、高強度化された新規金属材料や新規樹脂材料などの採用が見込まれている。これらの材料を車体構成材料として用いる際には、成形加工性や異種材料接合時の塗装品質など、様々な性能を満たさなければならない。これらの新規開発材料が単体及び異種材料接合された際においても車体材料として十分な性能を満たすよう、表面処理技術により適正化する必要がある。

マルチマテリアルからなる車体に新規高強度化材料を適用するためには幾つかの課題が生じる可能性がある。これらの課題において、表面処理技術による性能改善要素の高いものにガルバニック腐食影響が挙げられる。本検討では、高強度化された新規開発材料の表面状態を把握または予測し、自動車材料のマルチマテリアル化において表面処理技術に係わる重要な課題をテーマ 57 (FS 研究) を通じて把握し、本研究 (テーマ 65) へと繋げる。

自動車材料のマルチマテリアル化は材料の多様化とともに今後さらに進展する見込みであるが、同時に新たな課題を生じる可能性が高い。マルチマテリアル化を加速するためには我が国で検討されている材料開発技術、生産技術、自動車品質向上技術のそれぞれを効率化し、全体の技術開発能力を向上していかなくてはならない。マルチマテリアル車体材料の技術開発においては、異種材料接触を想定した際のガルバニック腐食対策が必ず求められる。テーマ 57 (FS 研究) においてもガルバニック腐食は大きな課題であることが分かり、また自動車メーカーからも協調領域で取り組むべきテーマとして、我が国に存在しない共通の評価基準を示す必要があるとの意見が得られた。これより、テーマ 65 ではガルバニック腐食評価の基準を示すと共に、既存技術の融合による防食表面処理技術の最適化提案を行うことでマルチマテリアル材料を市場に展開することを目標とした。

## (2)目標値

表 3-2.9.6-1 研究開発目標 (テーマ 57)

研究開発項目 (実施年度)	第1中間 目標 (2015 年度末)	第2中間 目標 (2017 年度末)	第3中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)
FS1：超高強度化材 料の潤滑加工性向上 (2018年度)			高張力鋼板への潤滑皮膜に よる加工成形性向上効果を 確認するための評価方法確 立と潤滑皮膜適用の妥当性 を判断 (2018年度末)	
FS2：超高強度化材 料の塗装後耐食性へ の影響 (2018年度)			鉄鋼材料ハイテン化する添 加化学成分(C,Si,Mn)が化成 処理性や塗装後耐食性に及 ぼす影響を判断する (2018 年度末)	
FS3：異種材料接合 による塗装後耐食性 への影響 (2018年 度)			鉄鋼材料とアルミ材料との 異種材料接触条件における 化成処理性や塗装後耐食性 への影響を調査 (2018年度 末)	
FS4：大気腐食環境 下における Al 合金 ／高強度鉄鋼材料対 のガルバニック腐食 特性評価 (2018年 度)			Al/Fe 接合材の大気環境下 におけるガルバニック腐食 挙動の評価法確立を検討 (2018年度末)	
FS5：摩擦攪拌接合 法(FSW)により作製 した Al 合金／鉄鋼 対の腐食挙動 (2018 年度)			FSW による接合部で腐食が 進行する起点となる領域を 組織観察と電気化学測定を 用いて解明する (2018年度 末)	

表 3-2.9.6-2 研究開発目標 (テーマ 65)

① 「実腐食環境に則したガルバニック腐食評価技術と防食表面処理技術の開発」

研究開発項目 (実施年度)	第1中間 目標 (2015 年度末)	第2中間 目標 (2017 年度末)	第3中間目標 (2020年度末)	最終目標 (2022年度末)
①-1 腐食環境デー タの取得 (2019- 2022年度)			2019年度から2021年度に かけて実車腐食環境測定を 実施し、融雪塩散布地域の 環境条件を数値化する。	実車腐食環境測定結果およ び屋外曝露耐食性評価結果 より得られたデータをまと め、また腐食試験片の評価 を実施することで実腐食条 件や腐食進行状況の指標を 得る。また、数値モデリン グを利用することにより試 験片形状の最適化を図る (2022年度末)

①-2 ガルバニック腐食評価技術の確立 (2019-2022 年度)			既存腐食評価法における課題の抽出と腐食環境因子と腐食進行の関係を把握する。	既存評価法の課題を明確化する。また、既存評価法の課題抽出結果と合わせ、ガルバニック腐食評価に及ぼす影響因子の調査結果や本評価法におけるガルバニック腐食の影響度を確認し、それらの結果を反映させることで、ガルバニック腐食評価の在り方についての指針を示す。腐食分布の確認や実車走行評価との相関性評価を併せて行う。
①-3 ガルバニック腐食に対する防食表面処理技術の開発 (2021-2022 年度)				表面処理および接着剤を適用した防食仕様を提案する。表面処理の効果、寄与を確認しながら、最適な防錆仕様を提案する。本検討において、実車の腐食挙動の確認や最新防食仕様の確認などを併せて行う。

表 3-2.9.6-3 研究開発目標 (テーマ 65)

② 「異種材料接合材の腐食機構の解明と腐食モニタリング・評価法の研究開発」

研究開発項目 (実施年度)	第1中間 目標 (2015 年度末)	第2中間 目標 (2017 年度末)	第3中間目標 (2020 年度末)	最終目標 (2022 年度末)
②-1 異種材料接合セルによる腐食モニタリング法の開発 (2019-2020 年度)			模擬的に異種材料接合した電気化学セルを利用した腐食モニタリング技術を開発し、複合サイクル腐食試験 (CCT) および実験室大気腐食模擬環境において、腐食評価への有効性を確認 (2020 年度末)	
②-2 異種材料接合材の塗膜劣化評価法の開発 (2019-2020 年度)			異種材料接合材に付与した塗膜の環境劣化を迅速に評価できる電気化学評価システムを開発 (2020 年度末)	
②-3 異種材料接合部の腐食機構の解明 (2020-2021 年度)			電気化学的な腐食モニタリング法やガルバニック腐食評価法によって、異種材料接合試験片のガルバニック腐食試験を行い、異種材料接合部の腐食機構を解明	異種材料接合材の腐食挙動について、開発した腐食モニタリング・腐食評価法を用いた解析により得られた結果を総括し、異種材料接合部の腐食劣化、塗膜劣化の機構について提案する (2021 年度)

### (3)全体計画

テーマ 57 およびテーマ 65 における計画を表 3-2.9.6-4 に示した。各テーマを以下に示したように番号化し、それぞれの計画を示した。テーマ 65 では全テーマ達成時に得られる 3 つの成果を定めている。表 3-2.9.6-4 では、実施計画期間やテーマ間の繋がりと共に、これら 3 つの何れかの成果への係わりを示した。

#### 【期待される 3 つの成果】

- ・融雪塩散布地域を想定したガルバニック腐食評価法の提案
- ・板合わせすき間内部における腐食モデルの提案
- ・ガルバニック腐食のリスク分類とそれに対応する防食仕様の提案

#### 【テーマ番号】

テーマ 57 は 5 つのテーマを実施し、それぞれ FS1-5 として示した。テーマ 65 では 16 テーマを実施し、①-1-1a～②-3 までの個別テーマとして示した。

FS1：超高強度化材料の潤滑加工性向上【日本パーカライジング】

FS2：超高強度化材料の塗装後耐食性への影響【日本パーカライジング】

FS3：異種材料接合による塗装後耐食性への影響【日本パーカライジング】

FS4：大気腐食環境下における Al 合金／高強度鉄鋼材料対のガルバニック腐食特性評価  
【東工大：西方教授】

FS5：摩擦攪拌接合法(FSW)により作製した Al 合金/鉄鋼対の腐食挙動【東工大：西方教授】

#### ① 「実腐食環境に則したガルバニック腐食評価技術と防食表面処理技術の開発」

##### ①-1 腐食環境データの取得

①-1a：腐食環境データの取得【日本パーカライジング】

①-1b：腐食試験片の表面電位測定【NIMS】

##### ①-2 ガルバニック腐食評価技術の確立

①-2a 既存評価方法による課題の抽出【日本パーカライジング】

①-2b ガルバニック腐食の適正評価に関する研究開発【UACJ】

①-2c 機械学習による実車走行試験とガルバニック腐食評価法の相関性評価【マツダ】

①-2d すきま部におけるガルバニック腐食の影響調査【日産自動車】

①-2e 腐食試験片の腐食進行度解析【JFE スチール】

##### ①-3 ガルバニック腐食に対する防食表面処理技術の開発

①-3a ガルバニック腐食に対する防食技術の最適化検討【日本パーカライジング】

①-3b 異種材料接着時の界面状態と表面処理効果の確認【群馬大・荘司教授】

①-3c 接着剤界面剥離に及ぼす表面処理効果の寄与解析【SUBARU】

①-3d ISMA 開発接着剤を用いた接着剤仕様の最適化【東工大・佐藤教授】

①-3e 実車回収パーツの腐食状況調査【本田技研工業】

①-3f 最新防錆仕様の調査【日本パーカライジング・NIMS】

#### ② 「異種材料接合材の腐食機構の解明と腐食モニタリング・評価法の研究開発」

##### ②-1 異種材料接合セルによる腐食モニタリング法の開発【東工大・多田教授】

##### ②-2 異種材料接合部の塗膜劣化評価法の開発【東工大・多田教授】

##### ②-3 異種材料接合部の腐食機構の解明【東工大・多田教授】

表 3-2.9.6-4 テーマ 57 およびテーマ 65 の全体計画

テーマ 番号	2018 年度	2019 年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度	最終成果 目標
FS1	➡	表面処理により高張力材の加工性向上も協調領域の研究テーマとして成立しないと判断				課題の見極め
FS2	➡	高張力鋼表面の化学成分濃化は化成処理性に影響を与えることを確認				課題の見極め
FS3	➡	異種材料接触時のガルバニック腐食の影響は大きい。異材接合部はZr化成処理が適していることを確認→T65へ				課題の見極め
FS4	➡	電気化学インピーダンス法を利用することでガルバニック				課題の見極め
FS5	➡	腐食をモニタリング可能→T65へ Fe/AlのFSW接合部における腐食挙動を調査				課題の見極め
①-1a		融雪塩散布地域で環境データと腐食評価実施	➡			実環境条件の把握 →評価法の設計
①-1b		試験片の電位分布を評価計測		➡		腐食進行度の評価 →腐食リスク分類に反映
①-2a		各国既存評価法の実施	➡			既存評価法の課題把握 →評価法の設計
①-2b		環境データを参考に実環境と 관련된 評価条件を決定		➡		腐食因子と腐食の進行 →評価法の設計・腐食モデルの提案
①-2c		機械計算による相関性の確認		➡		実車走行と評価法の相関性評価 →評価法の設計
①-2d		ガルバニック腐食・すき間腐食の影響を評価		➡		ガルバニック腐食影響の把握 →評価法の設計・腐食モデルの提案
①-2e		腐食の分布や影響を統計分析にて評価		➡		腐食進行度の数値化→腐食モデル、 腐食リスク分類に反映
①-3a		接着剤適用を想定した表面処理条件の決定		➡		表面処理適用条件の決定 →防食仕様の提案
①-3b		接着剤機能劣化条件の確認と破断挙動の評価		➡		異種接合材評価条件と効果の評価 →防食仕様の提案
①-3c		表面処理による接着性寄与の評価		➡		表面処理による効果を確認 →防食仕様の提案
①-3d		開発接着剤の効果・界面挙動の確認		➡		ISMA 開発接着剤の検証 →防食仕様の提案
①-3e		市場回収パーツの腐食評価		➡		実パーツの腐食状況確認→防食仕様 の提案、腐食リスク分類に反映
①-3f		最新の防錆技術適用事例の確認		➡		最適防錆仕様の確認 →防食仕様の提案
②-1		電気化学インピーダンス法による腐食挙動のモニタリング				腐食モニタリング法の提案 →評価法の設計
②-2		電気化学インピーダンス法による塗膜劣化のモニタリング				塗膜劣化モニタリング法の提案 →防食仕様の提案（劣化評価法）
②-3		モニタリング評価を通じたガルバニック腐食機構の理解				ガルバニック腐食メカニズムの提案 →腐食モデルの提案

#### (4)実施体制

テーマ 57 はマルチマテリアル車体における課題の確認や表面処理による防食技術の適用可能性などを検討することにより、取り組むべき協調領域テーマを探索することとした。2018年度において、日本パーカラライジング(株)および東京工業大学(西方教授、多田准教授)にて「超高強度化材料の潤滑加工性向上と異種材料接合部の塗装

後耐食性向上技術の開発（FS 研究）」を実施した。

2019 年度よりテーマ 65 に移行し、「マルチマテリアル車体における防食表面処理評価技術の開発」を実施した。2019 年度より（株）UACJ が参画し、マルチマテリアル車体におけるアルミニウム合金材への影響をはじめ、実環境と相関する腐食評価の設計に着手した。2021 年度より、物質・材料研究機構が参画し、腐食試験片の評価解析を実施した。また、異種材料板合わせ部に接着剤を適用した防食仕様の在り方を評価するために同年度より群馬大学（荘司教授）が参画した。最終年度 2022 年度にあたり、これまでに得られたデータや評価法条件などを精査すること、ガルバニック腐食影響への総合的な見解を得ることを目標として、マツダ(株)、本田技研工業(株)、(株)SUBARU、日産自動車(株)、JFE スチール(株)、東京工業大学（佐藤教授）が参画し、成果の最終評価と総まとめを行う体制を整えた。

テーマ番号	【委託先】	【再委託先】
テーマ番号57	新構造材料技術研究組合 日本パーライジング株式会社(平塚分室)【2018年度】 FS1: 超高強度化材料の潤滑加工性向上 FS2: 超高強度化材料の塗装後耐食性への影響 FS3: 異種材料接合による塗装後耐食性への影響	東京工業大学・西方教授【2018年度】 (国立大学法人) FS4: 大気腐食環境下におけるAl合金／高強度鉄鋼材対のガルバニック腐食特性評価を再委託
テーマ番号65	新構造材料技術研究組合 日本パーライジング株式会社(平塚分室)【2019-2022年度】 ①-1a 腐食環境データの取得 ①-2a 既存評価方法による課題の抽出 ①-3a ガルバニック腐食に対する防食技術の最適化検討 ①-3f 最新防錆仕様の調査 株式会社UACJ(千年分室)【2019-2022年度】 ①-2b ガルバニック腐食の適正評価に関する研究開発 国立研究開発法人物質・材料研究機構(つくば千現分室)【2021-2022年度】 ①-1b 腐食試験片の表面電位測定 ①-3f 最新防錆仕様の調査 マツダ株式会社(広島分室)【2022年度】 ①-2c 機械学習による実車走行試験とガルバニック腐食評価法の相関性評価 本田技研工業株式会社(芳賀分室)【2022年度】 ①-3e 実車回収パーツの腐食状況調査 株式会社SUBARU(太田分室)【2022年度】 ①-3c 接着剤界面剥離に及ぼす表面処理効果の寄与解析 日産自動車株式会社(厚木分室)【2022年度】 ①-2d すきま部におけるガルバニック腐食の影響調査 JFEスチール株式会社(千葉分室)【2022年度】 ①-2e 腐食試験片の腐食進行度解析	東京工業大学・多田教授【2019-2021年度】 (国立大学法人) ②異種材料接合材の腐食機構の解明と腐食モニタリング・評価法の研究開発(②-1、②-2、②-3)を再委託 群馬大学・荘司教授【2021-2022年度】 (国立大学法人) ①-3b 異種材料接着時の界面状態と表面処理効果の確認を再委託 東京工業大学・佐藤教授【2022年度】 (国立大学法人) ①-3d ISMA開発接着剤を用いた接着剤仕様の最適化を再委託

## **(5)運営管理**

テーマ 57 (FS 研究) では研究開発テーマの進捗に従って生じる諸問題の解決や方針変更などの確認を目的として自動車腐食評価に精通する有識者を招聘し、「塗装後耐食性向上委員会」を設置した。委員会は 2018 年度において 2~3 か月毎に開催し、テーマ方針の修正等に適切な助言を得た。また、自動車 OEM5 社の腐食研究者を訪問し、マルチマテリアル車体を題材とした協調領域の研究に期待すべきことをヒアリングした。その結果、共通のガルバニック腐食評価が無いことが国内の協調性を低下させており、本研究で取り組むべき指針を定めることに至った。

テーマ 65 では、有識者を招聘し研究方針の確認などを行う「ガルバニック腐食有識者会議」を設置し、2019-2020 年度にかけて計 7 回開催した。その後、テーマ 65B 「マルチマテリアル車体におけるガルバニック腐食のシミュレーション技術の開発」の設置にあたり両テーマに共通する評価会として新たに「最適防錆技術推進委員会」を設置した。自動車腐食の実態や数値シミュレーションなどに精通する有識者により構成され、2 テーマ共に指針設定のための重要な情報を得ることが可能となった。本テーマでは最終年度に自動車 OEM、材料メーカーの多くの協力を得ることができ、月 1 回の定例会議開催によりテーマ進捗の確認をしながら研究活動を行った。

## **(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030 年度）**

自動車のマルチマテリアル化は軽量化を目標として取り組まれており、車体の部位ごとの機能に応じた材料が適用されている。今後見込まれている EV 化全盛の時代においてもその目標は継続して掲げられるはずであり、CASE をはじめとするモビリティとしてのクルマには更なる長寿命化も期待されている。材料を効率よく、永く使用していくためにもマルチマテリアル化された車体においてガルバニック腐食は重要な課題であり、適切な防食対策を行わなくてはならない。本テーマでは異種材料の板合わせ部を対象とし、ガルバニック腐食影響が高いとされる融雪塩使用環境を模擬した評価法を設計するものであるが、この限定された条件において材料、防錆仕様、車体に精通する拠点が生産官学を問わず連携し、一体となってテーマを遂行してきた。

我々が提案する評価法は、本プロジェクト終了後には公知化することを検討し、産業界に幅広く適用されることを念頭においている。自動車産業に属する幅広い企業や研究機関、大学においても共通の指針をもって評価が可能となり、研究開発や製品開発が大幅に効率化するものと想定される。また、本テーマ内で得られた連携活動をきっかけとして我が国内において産官学が高度に連動した研究体制が構築されることが期待される。



## 2.9.6.2 研究開発成果

### (1)最終目標の達成度

表 3-2.9.6-5 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成度※	未達の場合 原因と解決方針
FS1 超高強度化材料の潤滑加工性向上【日本パーカライジング】	高張力鋼板を用い、潤滑皮膜による加工成形性向上効果を確認するための評価方法確立と潤滑皮膜適用の妥当性を判断する (2018年度)	高強度化した際に要求されるプレス成型の性能評価法を見出した。また、潤滑皮膜を施すことで高強度化材も従来材と同等の加工が行えることを確認した。	○	
FS2 超高強度化材料の塗装後耐食性への影響【日本パーカライジング】	鉄鋼をハイテン化する際の添加化学成分 C、Si、Mn が化成処理性や塗装後耐食性に及ぼす影響を判断する (2018年度)	化成処理性や塗装後耐食性に最も影響する化学成分は Si や C であった。材料製造時の表面状態を調整する必要があることを確認した。	○	
FS3 異種材料接合による塗装後耐食性への影響【日本パーカライジング】	鉄鋼材料とアルミ材料が直接接合された状態を異種材料接触の最悪条件として、化成処理性や塗装後耐食性への影響を調査する (2018年度)	異種接合状態ではリン酸亜鉛皮膜は十分な化成処理性が得られなく、塗装後耐食性も低下した。一方、カソード、アノードの双方に化成皮膜を析出可能なジルコニウム化成処理は良好な塗装後耐食性を示し、防食効果の一つとして有益な情報が得られた。	○	
FS4 大気腐食環境下における Al 合金／高強度鉄鋼材料対のガルバニック腐食特性評価【東工大・西方教授】	Al/Fe 接合材の大気環境下におけるガルバニック腐食挙動の評価法確立を検討。Al/Fe 接合材の大気腐食模擬環境下における腐食劣化挙動を調査する (2018年度)	Al/Fe 材からなる腐食対について、大気腐食模擬環境において電気化学インピーダンスを用いることでガルバニック腐食挙動を Al 材の電荷移動抵抗によって評価できることを見出した。	○	
FS5 摩擦攪拌接合法(FSW)により作製した Al 合金／鉄鋼対の腐食挙動【東工大・西方教授】	FSW による接合部で腐食が進行する起点となる領域を組織観察と電気化学測定を用いて解明する (2018年度)	Al 材とハイテン材の FSW 異材接合材におけるガルバニック腐食特性が材料組織と相関していること、特に Al 合金側の組織変化と対応していることを確認した。	○	

①-1a 腐食環境データの取得【日本パーカライジング】	実車腐食環境測定結果および屋外曝露耐食性評価結果より得られたデータをまとめ、実腐食条件の指標を得る（2022年度）	融雪塩散布地域の環境データを採取したところ、一定期間であれば実環境は絶対湿度一定下で乾湿を繰り返していることが確認された。環境測定結果と腐食評価結果をまとめた。	○	
①-1b 【NIMS】	実環境腐食評価後の試験片を用い、腐食後サンプルの表面電位測定を実施し、電位分布状況を確認する（2022年度）	Fe/Al異種材料の腐食評価前後の電位分布を計測し、ガルバニック腐食の評価を実施した。実車走行試験片の評価も行い、評価結果をまとめた。	○	
①-2a 既存評価方法による課題の抽出【日本パーカライジング】	既存評価方法として、JASO M609法、VDA102-233法、SAE J2334法による評価を実施し、腐食試験片の評価を行う（2021年度）	既存評価法ではJASO法の腐食挙動が大きく異なることが確認された。腐食評価として評価部の腐食形状や最大腐食深さを指標に影響をまとめた（2021年度）	○	
①-2b ガルバニック腐食の適正評価に関する研究開発【UACJ】	条件設定した融雪塩型ガルバニック腐食評価法の再現性を確認すると共に腐食進行度を評価する（2022年度）	融雪塩型ガルバニック腐食評価法を設計した。低温絶対湿度一定条件において融雪塩を想定した塩濃度3条件に設定した際の腐食影響を確認し、最終的な評価結果をまとめた。	○	
①-2c 機械学習による実車走行試験とガルバニック腐食評価法の相関性評価【マツダ】	実車走行評価結果と融雪塩型ガルバニック腐食評価結果について腐食環境条件や腐食評価結果について機械学習を適用し、相関性を確認する（2022年度）	実車走行評価および融雪塩型ガルバニック腐食評価結果から機械計算に不適なデータを除くなどのデータ整理を行い、その後機械学習による相関性評価を実施した。	○	
①-2d すきま部におけるガルバニック腐食の影響調査【日産自動車】	板合わせ部のガルバニック腐食評価におけるガルバニック腐食の寄与について、異なる評価法を併せて実施することでその影響を評価する（2022年度）	すき間腐食影響を差し引くことでガルバニック腐食による影響を評価するための評価を実施した。得られた知見をガルバニック腐食のリスクカテゴリ分類評価に活用した。	○	
①-2e 腐食試験片の腐食進行度解析【JFE スチール】	腐食試験片および腐食評価データを用いて腐食の分布や腐食進行度の予測解析を空間統計や極値解析を用いて評価（2022年度）	腐食生成物を除去した腐食試験片の形状プロファイルデータ等を用い、空間統計や極値解析などによる腐食影響を確認した。得られた知見をガルバニック腐食のリスクカテゴリ分類の情報として活用した。	○	

①-3a ガルバニック腐食に対する防食技術の最適化検討 【日本パーカライズング】	マルチマテリアル接合材料に適用する防食表面処理技術の評価を実施（2022年度）	異種材料接合部に接着剤を用いる際にアルミニウム合金材側に表面処理を適用するための処理条件を設定し、得られた結果を最適防錆仕様決定に適用した。	○	
①-3b 異種材料接着時の界面状態と表面処理効果の確認 【群馬大・荘司教授】	接着剤の機能が低下する湿熱サイクル条件およびガルバニック腐食評価を実施した際の接着耐久性を調査する（2022年度）	接着剤の接着強度低下は高温湿潤環境の影響を受けやすいことが確認され、表面処理はTiやZr系の化成処理をアルミニウム合金材に適用する効果が一部の接着材種によって確認された。	○	
①-3c 接着剤界面剥離に及ぼす表面処理効果の寄与解析 【SUBARU】	異種材料の線膨張係数差による応力剥離の影響を確認し、表面処理の適用効果を評価する（2022年度）	熱履歴により接合部に与える線膨張の影響を確認可能な評価試験片を設計し、湿熱サイクルにおける熱膨張の影響を確認した。	○	
①-3d ISMA 開発接着剤を用いた接着剤仕様の最適化【東工大・佐藤教授】	テーマ番号53で開発された接着剤を用い、本研究テーマ内で検討している表面処理適用材料との組み合わせにおける最適防錆仕様の確認を行う（2022年度）	開発接着剤適用時の耐久劣化評価法設計を行い、汎用接着剤との性能差を評価した。また、接着界面における劣化挙動の確認を通じ、腐食影響などを考察した。	○	
①-3e 実車回収パーツの腐食状況調査【本田技研工業】	スウェーデン市場回収車を対象に異種材料組み合わせにより構成されている部品における腐食部位の評価を行う（2022年度）	評価部位の防錆仕様や腐食の状況の評価観察することで実際に起きているガルバニック腐食の状況を確認した。得られたデータを参考にガルバニック腐食のリスクカテゴリ分類の評価に活用した。	○	
①-3f 最新防錆仕様の調査【日本パーカライズング・NIMS】	実車に適用されている異種材料構成部位における最新防錆仕様の調査を実施（2022年度）	近年生産車種の防食仕様としてBMW最新モデルのマルチマテリアル接合部の防錆仕様を確認した。防錆が懸念される箇所には、一様にシーラーや接着剤が適用されていた。	○	
②-1 異種材料接合セルによる腐食モニタリング法の開発 【東工大・多田教授】	電気化学インピーダンス（EIS）測定により、模擬異種材料接合セルのガルバニック腐食挙動を連続的にモニタリングする（2019年度）	高張力鋼、アルミニウム合金からなる異種材料接合セルについて、そのガルバニック腐食挙動をEIS法によってモニタリング・評価する技術を確立した。	○	

<p>②-2 異種材料接合部の塗膜劣化評価法の開発【東工大・多田教授】</p>	<p>化成処理や電着塗装などの塗装した異種材料接合セルのガルバニック腐食にともなう塗膜劣化過程を把握するモニタリング技術を提案する (2020年度)</p>	<p>EIS 挙動調査結果をもとに、塗膜劣化過程を塗膜容量 Cf と塗膜抵抗 Rf の解析から塗膜の含水状態を評価し、塗膜劣化評価法を確立した。</p>	<p>○</p>	
<p>②-3 異種材料接合部の腐食機構の解明【東工大・多田教授】</p>	<p>無塗装および塗装した異種材料接合材のガルバニック腐食試験の結果解析をもとに、ガルバニック腐食劣化および塗膜劣化機構を提案する</p>	<p>大気腐食環境下、すきま環境、塗装の影響についてガルバニック腐食機構を整理した。また、Al 合金と亜鉛異材接合材のガルバニック腐食挙動についても評価し、Al と鋼材のガルバニック腐食挙動の違いを明らかにし、腐食モニタリングへ検討すべき事項についても整理した。</p>	<p>○</p>	

※◎大きく上回って達成、○達成、X未達

## (2)研究開発の成果と意義

### テーマ 57「超高強度化材料の潤滑加工性向上と異種材料接合部の塗装後耐食性向上技術の開発（FS 研究）」（2018 年度）

#### FS1：超高強度化材料の潤滑加工性向上【日本パーカライジング】

高張力鋼板を用い、潤滑皮膜による加工成形性向上効果を確認するための評価方法確立と潤滑皮膜適用の妥当性を判断した。これらの材料を車体に適用する際は、部位によっては非常に複雑な形状にプレス加工されるために十分な加工特性を付与させる必要がある。

#### 1) 研究開発の概要

本検討では、革新材料として鉄鋼超ハイテン材を適用した際のプレス加工性向上効果を確認するために、従来 590~980MPa 材が採用されている構造部品を対象として革新材料の適用可否を判断した。ピラーをはじめとする構造材料のプレス加工性は、円筒深絞り性評価を基準とすることが一般的であり、本検討においてもこの方法を採用した。円筒押し出し加工の際、板を押える力が小さいと押さえ部にしわが発生してしまうためにしわの発生しない適切な押さえ圧が必要となる。押し出し加工性は材料特性（r 値）でほぼ決定され、適切な r 値に調整することで十分な加工性を得ることができるはずであるが、実際のプレス成型においては高強度化材料ほど材料割れや金型損傷を引き起こしやすく問題となっている。これは、高強度化材料ほど前述のしわ押さえ圧を高く設定しなくてはならず、材料が強く押さえられるために押し出し加工が難しくなっているものと思われる。既存材料を SPC590MPa 材とし、各種ハイテン材を適用した際に同等の加工性が得られる条件の予測を図 3-2.9.6-1 に同色で示した。これは各鋼材の強度に比例してしわ押さえ圧を高めたものであり、通常は材料強度比等倍~2 倍程度のしわ押さえ圧が必要となることをプレスメーカー有識者よりヒアリングした。図 3-2.9.6-1 に示したように、材料ごとにしわ押さえ圧を変動させた際の円筒深絞り性を確認することで超ハイテン材の適用範囲を確認することとした。

材種	しわ押さえ力 (kN)																	
	10	17	20	30	33	40	50	60	66	80	100	120	133	160	166	200	250	300
590MPa	Red		Red	Yellow		Yellow		Green		Green	Blue							
980MPa		Red			Red		Yellow		Yellow		Green		Green		Blue			
1180MPa			Red			Red		Yellow		Yellow		Green		Green		Blue		
1470MPa想定				Red			Red			Yellow	Yellow			Green		Green	Blue	Blue

図 3-2.9.6-1 円筒深絞り加工性評価における同等条件の予測（同等条件を色別に表示している）

#### 2) 方法

##### 2.1) 供試材と潤滑皮膜

冷延鋼板：SPC590 材、SPC980MPa 材、SPC1180MPa 材（それぞれ板厚 0.8mmt）

潤滑皮膜：有機系脱膜型皮膜 皮膜量 5g/m<sup>2</sup>(皮膜乾燥条件 PMT80℃、5s)

試験水準

- ・ 590MPa…SPC590MPa にプレス潤滑油 NOX RUST320 を塗油したもの
- ・ 980MPa…SPC980MPa にプレス潤滑油 NOX RUST320 を塗油したもの
- ・ 1180MPa…SPC1180MPa にプレス潤滑油 NOX RUST320 を塗油したもの
- ・ 1180MPa+潤滑皮膜…SPC1180MPa に潤滑皮膜を 5g/m<sup>2</sup> となるように皮膜処理したものに、プレス潤滑油 NOX RUST320 を塗油したもの

革新材料である 1.5GPa 級のハイテン材は市場での入手が困難なため、図 3-2.9.6-1 に予測性能を参考として示した。材料の成型可否は任意のしわ押さえ圧に対する r 値に依存するものと思われるため、本検討では従来ハイテン材や SPC1180MPa 材の結果を参考に革新材料の性能を予測した。

### 2.2) 円筒深絞り性

円筒深絞り性評価は以下の条件で実施した。プレス加工の絞り比を変更した各条件にて、しわ押さえ圧変動時の加工性を判断評価した。

装置：万能型薄板成型試験機 142-40 型（Erichsen 社製）

プレス加工条件

【絞り比 1.76】

パンチ径：28.4mm

試験片径：50mm

パンチ速度：100mm/min

成型加工の判断は破断の有無で確認した。

### 3) 結果

円筒深絞り性の評価結果を図 3-2.9.6-2~4 に示した。図中での表記については、斜線網掛け部はしわが発生したもの、○印は成型できたもの、×印は破断したものをそれぞれ示す。

材種	しわ押さえ力 (kN)															
	10	17	20	30	33	40	50	60	66	80	100	120	133	160	166	200
590MPa	○		○	○		○		○		○	×					
980MPa	斜線	○			○		○		○		×		×		×	
1180MPa	斜線	斜線	○			○		○		○		○		×		×
1180MPa+潤滑皮膜	斜線	斜線	○			○		○		○		○		○		○

図 3-2.9.6-2 円筒深絞り性（絞り比 1.76）

材種	しわ押さえ力 (kN)													
	5	8	10	15	17	20	30	33	35	38	40	45	50	60
590MPa			○	○		○	○	○						○
980MPa					○		○	×	×		×			×
1180MPa					○		○	○	×		×			×
1180MPa+潤滑					○		○	○	○	○	×	×	×	×

図 3-2.9.6-3 円筒深絞り性 (絞り比 2.0)

材種	しわ押さえ力 (kN)									
	5	8	10	17	20	30	33	40	50	60
590MPa	○		○		○	○		×		×
980MPa		○		×			×		×	
1180MPa			×		○			×		
1180MPa+潤滑		○	○	×				×		

図 3-2.9.6-4 円筒深絞り性 (絞り比 2.1)

図 3-2.9.6-2 に示した絞り比 1.76 の結果から、しわ押さえ圧 40、60、80kN の結果を確認すると、いずれの材料も成型できており、この加工条件においてはそれぞれの材料における r 値が妥当な値であることを示している。一方、しわ押さえ圧 100kN で破断が認められた SPC590MPa 材、SPC980MPa 材に対し、より強度の高い SPC1180MPa 材はしわ押さえ圧 120kN においても成型可能であったことから、今回用いた SPC1180MPa 材の r 値は従来ハイテン材よりも高いものと予測される。次に従来ハイテン材と同等の加工性を判断するために色付けした条件での比較を行うものとする。濃緑色で色分けしたものを例に挙げると、SPC590MPa 材をしわ押さえ圧 80kN で加工した場合と同等条件とするためには、SPC980MPa 材では 133kN、SPC1180 材では 160kN のしわ押さえ圧が必要となる。SPC980MPa 材、SPC1180MPa 材は何れも破断しており、これらの成型加工性は低下した。しかしながら、SPC1180MPa に潤滑皮膜を処理したものは成型可能となった。つまり、この条件で SPC1180MPa 材を採用するためには潤滑皮膜が不可欠であることを示唆している。絞り比 1.76 条件では実際に市場で潤滑皮膜なしで用いられている従来ハイテン材に問題はないとされていることから図 3-2.9.6-2 の結果より黄色で色分けした水準程度が最も加工不可の高い加工条件になるものと予測される。つまり、SPC1470MPa の超ハイテン材を採用する際は 100kN のしわ押さえ圧で加工できれば市場ニーズを満たすものと予測され、SPC1180MPa 材の結果から十分な r 値が得られていればこの絞り比条件では潤滑皮膜を必要としないことが分かった。

次に図 3-2.9.6-4 に示した絞り比 2.1 の結果を先に考察する。この条件では適正しわ押さえ圧となる前に成型時の破断が認められており、従来ハイテン材においてもしわの発生と成型性が両立できていない。つまりこの条件は実際のプレス成型を想定した場合、過度に負荷のかかった条件であると思われる。

最後に図 3-2.9.6-3 に示した絞り比 2.0 の結果を考察する。この条件では赤色で色分けしたものが潤滑皮膜を適用した際の限界加工条件となることを示している。SPC590MPa 材では 20kN のしわ押さえ圧で加工できるが、同条件の加工を想定する

と SPC980MPa や SPC1180MPa 材は潤滑皮膜なしでは破断してしまっている。しかし、潤滑皮膜を施した SPC1180MPa 材は成型加工できており、加工条件が拡大したことを示している。これらの結果より、円筒深絞り試験で想定される潤滑皮膜を適用すべき条件とは絞り比 2.0 程度のプレス加工部において潤滑皮膜を適用することにより超ハイテン材に代替することが可能となることを示唆している。

#### 4) まとめ

革新材料として超ハイテン材を適用した際のプレス加工性向上効果を確認するために、従来 590~980MPa 材が採用されている構造部品を対象として革新材料の適用可否を予測した。本検討における前提としては、未知の高強度化材の  $r$  値は対象とする従来材と同等の  $r$  値であることを前提とした上で、材料強度の違いから適切なしわ押さえ圧を予測することで従来材料と同様のプレス加工を実施した際の仕上がりを予測することが可能となった。本検討で実施した万能薄板試験機を用いた円筒深絞り評価において、従来材を SPC590MPa 材として超ハイテン材の加工性を確認した。追加評価にて SPC980MPa 材以上のハイテン材に対して潤滑皮膜を処理せずに用いた場合、絞り比 2.0 では従来材と同様のプレス加工が行えないことが分かった。一方、潤滑皮膜処理した場合は同条件で成型可能となることも確認した。本検討は潤滑皮膜が効果を発現する適正範囲を予測する方法を見出すことと潤滑皮膜の効果を確認することを目標としており、これらを達成することができた。本検討で得られた検証方法を用い、実際に高強度化材料を用いた部品試作の際には設計図からプレス難易度を予測し、事前に適正な潤滑皮膜処理を行うべきである。

FS1 テーマでは高張力鋼に対して潤滑皮膜の適用効果は確認されたものの、協調領域での研究テーマとして成立し難く本研究への移行は不要と決定した。



## FS2：超高強度化材料の塗装後耐食性への影響【日本パーカライジング】

本検討では、材料開発によって表面状態の変化が大きいと予測される鉄鋼材料に限定した。鉄鋼材料をハイテン化する際に用いられる化学成分量を意図的に変化させた試験材を作製し、表面状態の変化が及ぼす化成処理性や塗装後耐食性への影響を調査した。

### 1) 研究開発の概要

鉄鋼材料をハイテン化する際に添加する化学成分としてC、Si、Mnを添加した試験片を作製した。これらの化学成分が化成処理性や塗装後耐食性に及ぼす影響を判断するために、それぞれの化学成分量を変化させたものは通常配合される量よりも十分多い量とした。試作材の表面状態を把握するとともに、表面処理としてりん酸亜鉛処理やジルコニウム化成処理を行い、化成処理性や塗装後耐食性への影響を調査した。尚、本検討は化学成分がもたらす表面状態への影響を調査する目的で実施したため、試作材のハイテン化処理は行っていない。

### 2) 方法

#### 2.1) 供試材

一般材                   : 軟鋼 SPC-270D   サイズ: 70\*150\*0.8mm

試作材                   : No.1～No.4   サイズ: 70\*150\*1.0mm

試作材は No.1 を標準として、C 添加量を過剰とした No.2、Si 添加量を過剰とした No.3、Mn 添加量を過剰とした No.4 を用いて性能を比較した。

#### 2.2) 処理手順

各種鋼材に対して脱脂（必要に応じて酸洗）、表面調整、りん酸亜鉛処理を行うことでりん酸亜鉛皮膜付き鋼板を得た。各種鋼板に対して脱脂（必要に応じて酸洗）、ジルコニウム化成処理を行うことで化成皮膜付き鋼板を得た。また、表面調整後を除く全ての工程間にて水洗を行った。更に、化成処理後水洗の後には脱イオン水による洗浄も行い、最後にエアブローにて鋼板表面の風乾を行った。脱脂、酸洗、表面調整、りん酸亜鉛処理、ジルコニウム化成処理は以下の手順にて行った。

・脱脂   日本パーカライジング(株)製 FC-E2093（45℃、120sec）にてスプレー処理した。

※本検討に使用した試作鋼板は、表面の撥水性が高く、通常のアルカリ脱脂工程では明らかな水はじきが認められた。このままでは化成処理性に影響を与える可能性があるため、2%硫酸（40℃）で酸洗処理を行う水準を加えた。酸洗した試験片は次いでアルカリ中和（1%NaOH、20℃）を行い、次工程に移行した。

・表面調整   日本パーカライジング(株)製 PL-X（20℃、30sec）を用いて浸漬処理した。

・りん酸亜鉛処理   日本パーカライジング(株)製 PB-L3020（40℃、120sec）を用いて浸漬処理した。

・ジルコニウム化成処理   日本パーカライジング(株)PLC-2010D（38℃、120sec）を用

いて浸漬処理した。

- ・乾燥や塗装 化成処理後は適宜水洗し、必要に応じて風乾や電着塗装を行った。

### 2.3) 表面分析

脱脂処理のみ実施した鋼板やりん酸亜鉛処理やジルコニウム化成処理を行った化成皮膜付き試験片について各種表面分析を実施した。

#### XRF 分析 主に化成皮膜量の分析

使用機器：ZSX-PrimusⅢ（リガク）

X線管：Rh、測定方法：検量線法、フィルタ：OUT

※りん酸亜鉛皮膜の皮膜重量はP定量値からの換算値を用いた。Pの定量にはPKα線を用いた。ジルコニウムの定量にはジルコニウムLa線を用いた。測定径は10mmφまたは30mmφである。

#### SEM/EDS 分析 脱脂後の試験材表面や化成皮膜付き試験材表面の観察・分析

使用機器：(SEM)JSM-IT100 In TouchScope™（日本電子）、(EDS) EMAX Evolution（堀場製作所製） 加速電圧：15.0kV

#### FE-SEM 観察 脱脂後の試験材表面や化成皮膜付き試験材表面の微小部観察

使用機器：SU8020（日立ハイテクノロジー）

加速電圧：3.0kV リターディング電圧：2.5kV、検出器：Upper、Top

観察は本装置のUpper検出器とTop検出器を用いて行った。リターディング時、Upper検出器では2次電子と低角度反射電子、Top検出器では低エネルギーの2次電子が検出される。

#### EPMA 分析 化学成分分布の確認

使用機器：EPMA-1610型（島津製作所）

設定倍率：×3000 加速電圧：8kV（反射電子像観察時15kV）

ビーム径：1μmφ ビーム電流：50nA（反射電子像観察時5nA）

#### GDS 分析 深さ方向の成分分析

使用機器：JY-5000RF（堀場製作所）

電力：35W 周波数：50Hz

#### μ-XPS 分析 微小部における深さ方向の成分分析

使用機器：PHI5000 Versa Probe III（アルバック・ファイ製）

スパッタ間隔×回数：0.25min×24 スパッタレート：9.4nm/min、SiO<sub>2</sub>換算

### 2.4) 塗装後耐食性

塗装後耐食性は、化成皮膜付き試験材に電着塗装を施し、塩温水浸漬試験にて評価した。

塗料種：自動車ボデー用カチオン電着塗装（30℃、膜厚：15μm 狙い、焼付：180℃、26min）

塩温水浸漬試験：電着塗装後試験片の塗膜にクロスカットを施し、5wt%NaCl水溶液（50℃）に240h浸漬した。その後、カット部をテープ剥離し、片側最大剥離幅を測

定した。

### 3) 結果

#### 3.1) 鋼板表面状態の確認

軟鋼表面に見られた粒界の析出物は Mn と O が高強度として検出された。化学成分量を意図的に変化させた試作材 No.1～3 の粒界析出物の成分は O 強度がやや高かった。試作材 No.1 は軟鋼と比べ、成分分布に大きな違いは認められなかった。試作材 No.2 (C rich) は全体的に C 強度がやや高く検出された。試作材 No.3 (Si rich) は全体的に Si 強度が高く検出された。試作材 No.4 (Mn rich) は Mn 強度が全体的に高く、粒界の析出物は Si と O が高強度であった。

表面酸化物の分布を確認するため、EPMAによりO分布を確認した。試作材No.3、4はSiやMnの分布とO分布が一致したため、これらはSiまたはMnの酸化物と考えられる。なお、別途実施したXPSによる酸化膜厚の分析結果から、何れのサンプルにおいても素材酸化膜厚は大きく変わらない結果であった。一方、C分布に着目すると、No.1、No.3、No.4は鋼材全体の化学成分配合量としては同等のC濃度であったが、本マッピング結果では試作材No.1よりもNo.3、No.4の方がCは全体的に高強度となり、表層へのC濃化が確認された。

#### 3.2) りん酸亜鉛処理の化成性および皮膜特性

No.2、4 は軟鋼と同程度のりん酸亜鉛皮膜が析出していることが確認された。No.3 (Si過剰) に関しては、皮膜付着量は多少増加した程度であったが、SEM外観から非常に大きな皮膜結晶となっていることが確認された。尚、標準材である No.1 でも、結晶形状は上市されている軟鋼とは異なる結果となった。

今回、検討した鋼板はミル製造とは製造工程などの違いで表面物性が異なり (いずれの試作材も酸化膜厚は厚くないものの脱脂後に明らかな水はじきが認められた)、りん酸亜鉛の結晶形状や析出性に影響を与えたものと考えられる。そのため、酸洗を行った水準に関しても化成処理性を確認することとした。全ての水準にて皮膜付着量の明らかな増加 (リン酸塩処理としては  $4\text{g/m}^2$  は異常析出に値する) が認められたが、軟鋼や標準材 No.1 は化学成分の表面析出物が少ないためか、酸洗によって表面が鋭敏化し、非常に大きな皮膜結晶となった。

### 3.3) ジルコニウム化成の化成処理性および皮膜特性

ジルコニウム化成の化成処理性を確認するため、ジルコニウム付着量を調査した。ジルコニウム化成はりん酸亜鉛と比較して、鋼板ごとに化成皮膜量が大きく異なる結果となった。特に No.3 (Si rich) ではジルコニウム付着量が高い値となった。No.3 (Si rich) において、ジルコニウム付着量が測定部位によって大きく異なる現象が認められたため、複数回化成処理を行い、ジルコニウム付着量のばらつきを確認した。No.3 (Si rich) 試作材は測定部位における化成皮膜量のばらつきが非常に大きいことが分かった。No.3 (Si rich) 試作材は化成処理後に試験片の部位ごとに異なる外観を示しており、部位ごとに化成処理性が大きく異なっているものと思われた。ジルコニウム化成皮膜が殆ど析出していない部分では塗装後耐食性の低下が懸念される。

これまでの検討より、最も化成処理性に影響を与えた試作材は No.3 (Si rich) であった。試作材 No.3 はりん酸亜鉛処理においては皮膜結晶が粗大化し、ジルコニウム化成処理においては、ほとんど皮膜が析出しない部分や、逆に皮膜が過剰に析出する部分が混在していることが分かった。

表面近傍の Si は別途実施した XPS 測定結果より、シロキサン結合を主とする酸化珪素の皮膜を形成しているものと考えられる。酸化珪素皮膜は化学的に安定であるため溶解しがたく、酸化珪素皮膜上は化成処理反応においてカソードとなるために、この部分に化成皮膜が過剰に析出したものと考えられる。ジルコニウム化成は表面状態の影響を強く受け、部分的な皮膜析出量のばらつきに繋がったものと推察される。

### 4) まとめ

鋼板製造時に添加される化学成分の影響を調査するため、C、Si、Mn を過剰量添加した試作材を作製し、化成処理性を調査した。化成処理性や塗装後耐食性に最も影響する化学成分は Si であり、表面に酸化珪素の安定皮膜を形成することや C 偏析も助長する傾向が確認された。鉄鋼材料の作り込みによって Si の表面偏析は回避できる可能性があると思われるため、革新材料を市場化するには材料製造技術と表面処理技術を連携させ、表面状態を適正化していく必要がある。

FS2 テーマでは高張力鋼の表面状態と化成処理適用時の関係について課題が確認されたため、本研究にて新規材料を検討する際の参考として活用することとした。

### FS3 : 異種材料接合による塗装後耐食性への影響【日本パーカライジング】

本検討では、鉄鋼材料とアルミニウム合金材料（以下 Al 材）が絶縁されることなく電氣的に接合された状態を異種材料接触の最悪条件として、化成処理性や塗装後耐食性への影響を調査した。尚、再委託先においては実環境でのガルバニック腐食を想定した薄水膜付着時の大気腐食を電気化学的に考察し、腐食進行の評価基準を作成するための研究を実施した。

#### 1) 研究開発の概要

鉄鋼材料と Al 材を重ね合わせ、電氣的に短絡した試料を作製した。更に Al 材側を

一定の面積になるようにテープ被覆し、各金属の面積比が異なる試料を作製した。このテストピースに対して、研究開発テーマ②と同様のジルコニウム化成（PLC-2010D）、りん酸亜鉛化成（PL-X、PB-L3020）を行い、XRFにて化成性を確認した。

## 2) 方法

### 2.1) 供試材

鉄鋼材 : SPC-270D サイズ : 70 × 150 × 0.8mm

Al材 : A6061 サイズ : 70 × 150 × 1.0mm

### 2.2) 試験片の作成

鉄鋼材とAl材の背面を接触させた状態で重ね合わせ、板合わせ部に浸水しないようにN式マスキングテープで側面を被覆した。更にガルバニックセル形成時にカソードとなる鉄鋼材の露出面積を一定とし、アノードとなるAl材側の露出部をテープ被覆により変化させた。

### 2.3) 処理手順

塗装前処理は日本パーカライジング(株)製品を用い、以下の手順で実施した。

- ・脱脂 FC-E2093 (45°C,120sec)にてスプレー処理した。
- ・表面調整 PL-X (20°C,30sec)を用いて浸漬処理した。
- ・りん酸亜鉛処理 PB-L3020 (40°C,120sec)にて浸漬処理した。
- ・ジルコニウム化成処理 PLC-2010D (38°C、120sec)を用いて浸漬処理した。
- ・乾燥や塗装 化成処理後は適宜水洗し、必要に応じて風乾や電着塗装を実施した。

### 2.4) 表面分析

りん酸亜鉛皮膜の皮膜重量およびジルコニウム化成皮膜のジルコニウム付着量をXRFにて定量した。また、軟鋼材上に形成したりん酸亜鉛皮膜に関してはSEMにて皮膜形状を確認した。

#### XRF 化成処理皮膜量分析

使用機器 : ZSX-PrimusIII (リガク)

X線管 : Rh、測定方法 : 検量線法、フィルタ : OUT

#### SEM りん酸亜鉛処理皮膜の外観確認

使用機器 : JSM-IT100 In TouchScopeTM (日本電子)

加速電圧 : 15.0kV、倍率 : ×500, ×1000 ×3000

#### (2).3.2.5 塗装後耐食性

電着塗装は自動車ボデー用カチオン電着を用い、膜厚を15μmとし、焼付条件を180°C,26min保持の条件で実施した。

塗装後耐食性は塩温水浸漬試験法で実施し、電着塗装後の試験片の塗膜にクロスカットを施し、50°Cに保った5wt.%NaCl水溶液に240h浸漬した。その後、カット部をテープ剥離し、片側最大剥離幅を測定した。

### 3) 結果

りん酸亜鉛処理およびジルコニウム化成処理を行い、カソード／アノード面積比を変動させた際の化成処理性を確認した。また、化成処理皮膜付き試験片を用いて電着塗装を行い、塗装後耐食性を評価した。

#### 3.1) 化成処理性

カソード／アノード面積変動時のりん酸亜鉛皮膜重量及びジルコニウム化成皮膜のジルコニウム付着量を確認した。

りん酸亜鉛処理では、Al材と軟鋼を短絡させた場合、カソードとなる軟鋼の面積比が大きくなるとAl材上での皮膜付着量が少なくなった。特に鉄鋼材面積比率が90%の時はAl材上にりん酸亜鉛皮膜は殆ど析出しなかった。鉄鋼材上に析出したりん酸亜鉛の付着量に殆ど差異は認められなかったが、皮膜は針状の結晶が殆どであり結晶は粗大化していた。鉄鋼材表面が十分に被覆されるためにはカソード面積は90%以上である必要があるが、この場合Al材にはほとんど皮膜が析出していないことから塗装後耐食性において問題となる。

ジルコニウム化成処理性については、Al材と鉄鋼材を短絡させた場合、カソードとなる鉄鋼材の面積比が大きくなった場合においてもAl材上にジルコニウム化成皮膜は析出した。なお、Al材の面積比が大きくなった場合、カソードとなる鉄鋼材のジルコニウム付着量は増加する傾向にあった。

#### 3.2) 塗装後耐食性

電着塗装を施した化成処理皮膜付き試験材に対し、塩温水浸漬試験を行った。

塩水浸漬試験結果より、りん酸亜鉛処理では異種材料接触せずに評価した水準と比較し、異種材料接触材はいずれも塗装後耐食性が低下した。この傾向はカソードとなる冷延鋼板においても、アノードとなるAl材においても同様の結果であった。

まず、カソードとなる軟鋼において化成処理性と塗装後耐食性の関連性を考察する。軟鋼の面積比が高くなるに従ってりん酸亜鉛処理時の皮膜結晶は粗大化し、塗装後耐食性もこれに従って低下した。りん酸亜鉛処理皮膜をより緻密且つ均一に析出させるためには、先ずアノード起点となる金属のエッチング反応を金属の全面で均一的に起こすことで、アノード反応が起こった近傍で皮膜析出につながるカソード反応を均一に起こすことが重要である。しかし、異種材料接触時にはカソードとなる軟鋼表面に電子が供給され、通常のアノード反応となる金属エッチング反応を伴わずに皮膜析出が異常に析出することで、巨大な粒径の結晶となって析出したものと理解できる。またAl材側では、カソード面積比が高くなるに従ってアノード反応が優先して起こるようになり、皮膜の析出を伴うカソード反応が抑制されるためにりん酸亜鉛の結晶析出がほとんど認められなくなったものと考えられる。つまり、りん酸亜鉛処理は結晶

成長型の成長を伴うためにカソード/アノード反応の影響を強く受け、異種材料接触時にはカソード側では皮膜の異常析出が起り、アノード側では皮膜が析出し難くなる。これは、一般的な化成処理反応の原理に基づくものである。一方、ジルコニウム化成処理は皮膜析出のメカニズムがリン酸亜鉛とは異なっている。ジルコニウム化成皮膜は非晶質の非常に細かな粒子が集積したものとされており、化成処理工程においてもリン酸亜鉛のような結晶成長を伴わない。また、アノード側でも皮膜の析出を伴うことからリン酸亜鉛皮膜とは異なり、カソードで電子を享受した際も一つ一つの皮膜粒子が粗大化することなく金属表面を被覆し、さらにアノード側でも皮膜析出反応が起ることから異種材料接触時にガルバニックセルを形成した双方の金属に好適な皮膜を形成したものと見える。そのため、異種材料接触時においても良好な塗装後耐食性を示したものと考えられる。

#### 4) まとめ

鉄鋼材と Al 材を用いて、異種材料接触時のカソードおよびアノード面積比を変動させた際の化成処理性と塗装後耐食性への影響を調査した。これら 2 種の金属を異種材料接触した際には鉄鋼材側ではカソード反応が優位となり、Al 材側ではアノード反応が優位となる。リン酸亜鉛処理ではカソード比率が 10%を超過した際、異種材料接触状態では軟鋼での析出皮膜は結晶系が粗大化し、金属表面を被覆することなく粗い皮膜が析出した。Al 側ではカソード面積比が増加するに従い、リン酸亜鉛皮膜は析出しづらくなった。化成処理性の結果と同じく、塩温水浸漬試験での塗装後耐食性は異種材料接触することで大きく低下し、カソード面積比率は最大でも 10%程度が限度であることが確認された。しかしながら、腐食初期にカソード面積比が 10%であった場合においても、腐食が進行した場合にはアノードの溶解により、カソード面積比は徐々に増加するはずである。このため、鉄鋼材と Al 材を裸接触した場合においては塗装後耐食性のみならず、材料腐食による強度低下が懸念されるため電氣的に隔絶すべきである。

一方、ジルコニウム化成処理を行った場合は皮膜析出および皮膜成長の原理がリン酸亜鉛処理と異なるために異種材料接触した双方の金属材料に良好な化成皮膜が形成された。この結果、塩温水浸漬評価における塗装後耐食性も良好な結果となった。ジルコニウム化成処理を用いることで実車使用環境においても十分な塗装後耐食性を示すとは言えないが、裸接触したような材料にとってはある程度の防食効果を示すことが示された。

FS3 テーマでは、ガルバニック腐食の影響を明確化するために電位差の大きい異種材料対として鉄鋼材料とアルミニウム合金材料についての化成処理性と塗装後耐食性の評価を行った。その結果、化成処理剤はジルコニウム系を選定すべきと結論付けられた。これは一般的な化成処理とは異なり、ジルコニウム化成剤はアノード側にも皮膜が析出する特徴を有するためである。本成果はガルバニック腐食対策の一つとして考えることもできるため、本研究テーマ 65 にて腐食評価法を設定する際の化成処理法として適しているものと考えられる。本成果は本研究に移行して活用する。

## FS4：大気腐食環境下における Al 合金／高強度鉄鋼材料対のガルバニック腐食特性評価【東工大：西方教授】

### 1) 目的

Al は Fe に比べ卑な金属であり、これらが接合した材料が腐食環境に置かれると、Al がアノード、Fe がカソードとなるガルバニック腐食が進行することとなる。このとき腐食反応の速さは、Al の耐食性と、Fe 上のカソード反応速度に依存する。特に、大気腐食環境では、Fe 上での溶存酸素の還元反応速度が全体の腐食反応速度を支配することとなり、その速度は表面の水膜厚さと強く関係する。そこで、本研究では、Al/Fe 接合材の大気環境下におけるガルバニック腐食挙動の評価法を検討するために、Al-Mg-Si 系 Al 合金 A6061 と 1180 MPa 級超高強度鉄鋼材料からなる異種金属接合対に対してガルバニック腐食試験を大気腐食模擬環境下で実施し、腐食劣化挙動を調査した。また、化成処理した接合対についても同様の試験を実施した。本提案で開発する電気化学モニタリングおよび塗膜劣化評価技術は、すでに耐候性鋼などの実大気環境での腐食モニタリングに適用した実績があり、また、実験室内で大気腐食を模擬した薄膜水下での炭素鋼、耐候性鋼、亜鉛、銅、ステンレス鋼などの腐食の基礎研究でも数多くの研究報告がある。

### 2) 方法

使用した Al 合金は Al-Mg-Si 系 A6061 と鉄鋼材料は 1180MPa 級の冷間圧延鋼板 (SPCC1180) であった。それぞれの材料を 10 mm x 10 mm のサイズに切断し、500  $\mu\text{m}$  の距離を離してエポキシ樹脂に埋め込んで A6061/SPCC1180 腐食試験対を作製した。腐食試験対は、SiC 研磨紙で研磨し、エタノールおよび超純水中で超音波洗浄を実施して用いた。

ガルバニック腐食試験は、恒温恒湿槽中で実施した。腐食対表面に NaCl 溶液を付与し、A6061、SPCC1180 間を電氣的に短絡して、その間に流れるガルバニック電流と腐食対の腐食電位を測定した。このとき、腐食対表面の水膜厚さは、はじめに付与する NaCl 溶液の濃度を調整することで、25°C、95%RH の環境で平衡する 2 M NaCl になるときに、25~100  $\mu\text{m}$  となるように調整した。その他、分極測定、電気化学インピーダンス (EIS) 測定を実施した。

### 3) 結果

25°Cにおいて、バルク溶液中および水膜厚さ 25~100  $\mu\text{m}$  のときの A6061 のアノード分極曲線、SPCC1180 のカソード分極曲線を得た。A6061 のアノード分極曲線から、いずれの条件でも不動態領域と局部腐食の成長による電流増加が生じていることがわかる。不動態保持電流および局部腐食の成長を示す電流増加が開始する電位（以下、孔食電位）と水膜厚さの関係は明確ではなかった。一方、SPCC1180 のカソード分極曲線は、溶存酸素還元の拡散限界電流域がみられた後、水素発生反応による電流増加が観察された。拡散限界電流は、水膜厚さの減少にともなって増加することが確認された。

それぞれの腐食電位をみると、A6061 は-0.81~-0.78 V (SSE)、SPCC1180 は-0.56



～-0.62 V (SSE)にあり、これらの材料が接合された場合、A6061 がアノード、SPCC1180 がカソードとなること推察された。また、A6061 の孔食電位は、-0.65～-0.68 V (SSE)付近にあったため、SPCC1180 と接合した場合、A6061 が局部腐食することが示唆された。

A6061/SPCC1180 対のガルバニック腐食試験における腐食電位とガルバニック電流の時間変化を確認した。腐食電位は-0.7 V (SSE)付近にあり、水膜厚さには殆ど依存しなかった。一方、ガルバニック電流は水膜厚さが減少するにつれ増加し、A6061 の腐食が促進された。これは、SPCC1180 上のカソード反応速度が水膜厚さの減少につれ増加したためといえる。以上のことから、大気腐食環境において A6061 が SPCC1180 と接合した場合、A6061 上で局部腐食が生じ、水膜厚さの増加によって、A6061 の腐食が促進されることが示された。

次に、A6061/SPCC1180 対のガルバニック腐食過程において、没水および水膜下で EIS 測定を行った。EIS 挙動は没水、水膜下によらず低周波数域に容量性半円がみられるが、水膜厚さが減少するにつれ、容量性半円の大きさが大きく減少することがわかった。容量性半円の大きさは、Al のアノード反応の電荷移動抵抗を表すといえ、この抵抗の逆数が腐食速度の指標となるため、水膜厚さの減少とともにガルバニック腐食が促進されることが示された。

化成処理をした後の A6061/SPCC1180 対について、ガルバニック腐食試験を行った。裸状態に比べ、化成処理によってガルバニック電流が減少していることが示された。また、 $Zn_3(PO_4)_2$  化成皮膜の方が若干ガルバニック電流が小さいことが示された。ガルバニック電流の結果同様、 $ZrO_2$  に比べ  $Zn_3(PO_4)_2$  化成処理によってインピーダンスが大きいことが示された。

FS4 テーマでは電気化学インピーダンス法を利用することで、大気腐食環境下を想定した薄水膜付着下の腐食モニタリング法を提案した。本成果は本研究移行後にも評価指標として有用であると考えられたため、テーマ 6 5 移行後も引き続き検討した。

## FS5：摩擦攪拌接合法(FSW)により作製した Al 合金/鉄鋼対の腐食挙動【東工大：西方教授】

### 1) 研究開発の概要

摩擦攪拌接合法（以下 FSW）は、近年注目を集めている異材接合技術であるが、アルミニウム合金と鉄鋼材料というような異種金属を接合した場合、その接合時の入熱や冷却過程、摩擦攪拌ツールによる加工によって、材料組織が複雑に変化し、接合部近傍での腐食特性が不均一化することが予想される。そこで本研究では、FSW による接合部で腐食が進行する起点となる領域を組織観察と電気化学測定を用いて解明することを目的とする。

### 2) 方法

使用したアルミニウム合金は Al-Mg-Si 系のアルミニウム合金（A6061）、鉄鋼材料は 980MPa 級の冷間圧延鋼板（SPCC980）であった。上側に厚さ 1 [mm] の A6061 板材、下側に厚さ 2 [mm] の SPCC980 板材を重ね、上側から FSW 回転ツールによって接合した。この時、回転ツールの走査速度を 25、50、100、300 [mm/min] の 4 段階で変えた。プローブには、WC-Co 超硬合金ツールを用いた。ツールのショルダ径は 10 [mm]、プローブ長は 0.9 [mm]、先端径は 3 [mm] であった。プローブの走査は、ツールの前進角 3°、負荷応力 3.8 kN で鋼板側に 0.1 [mm] 程度押し込んだ状態で行った。

FSW によって作成した材料の接合断面が試料表面になるように、接合方向に対して垂直方向に 3 [mm]×30 [mm] の大きさの試料を切り出した。試料に対して樹脂埋め後のすきま腐食を防止する目的で、カチオン電着塗装を行った。その後、試料に銅線をはんだ付けし、直径 40 [mm] の樹脂に埋めこんだ。

### 3) 結果

25 [mm/min] の速度で接合した接合材をナイトール液でエッチングした。接合中央部に注目すると、接合界面から鋼板側にかけて組織の変化が観察できた。接合界面部分から近い領域では、粒形状が伸長しており、摩擦攪拌の影響を受けた領域であるといえ、TMAZ 領域と考えられる。さらに接合界面から離れると、粒径のみが変化している領域がみられ、この部分が HAZ 領域であると考えられた。ツールの走査速度が 100、300 [mm/min] の場合は、TMAZ、HAZ 領域が明確には観察できなかった。これらより、接合速度が遅いほど FSW ツールによる鋼板側への応力と熱の影響が大きいことが確認できた。

摩擦攪拌による接合部の Al 合金側の SEM 像から、アルミニウム合金側に摩擦攪拌で研削された鋼の一部が混入したことがわかった。一方、その条件より速いツール走査条件では、ほぼ均一な HAZ 領域が確認され、摩擦攪拌部ではほぼ均一な組織となっているといえる。

上記の様な、摩擦攪拌に組織変化が生じた領域について、ビッカース硬さ試験を行い、硬さ変化について調査した。A6061 側の硬さは Hv70 程度で一定であり、それぞれのツールの走査速度による違いがみられなかった。一方、SPCC980 側の硬さに着目すると、走査速度に依存して硬さの違いが生じた。すなわち、300 [mm/min] の場合で

は、接合界面付近から Hv350 程度の硬さで一定値をとり、接合部から離れた母材まで硬さの変化がなかったため組織変化がほとんどないと考えられる。

一方、50、100 [mm/min] の場合では、接合界面近傍に硬さが低い領域 (Hv320 程度) がみられた。25 [mm/min] の場合についても、接合界面近傍で硬さの低い領域が生じていたが、その値が他の条件に比べて非常に小さかった。また、そこから徐々に硬さが上昇していくが、 $X = -1.0$  [mm] では、Hv300 に満たない Hv282 程度の硬さを示し、他の走査速度で接合した試料の同位置よりも軟化していた。接合部よりも十分離れた領域 ( $X = -10, Y = -1$  [mm]) では Hv340 程度であったため、SPCC980 のもとの硬さであり、摩擦攪拌による影響が生じていない領域であると考えられる。ナイタールエッチングした後の組織観察結果と比較すると、組織変化している領域は軟化しており、組織変化していない領域との境界部分で硬さが最小となった。

また、Al 側の接合界面に平行軸方向の硬さ測定結果では、攪拌部は Hv70 程度で一定であるが、そのすぐ外側で Hv60 程度まで軟化していた。さらに接合部から離れると、母材硬さのである Hv100 程度の値まで上昇した。

以上ことから、FSW により SPCC980 側および Al 合金側に組織変化が生じていること、特に Al 側は広い領域に軟化領域が広がっていることが示された。

種々のツール走査速度で接合した A6061/SPCC980 対の腐食試験結果より、水素発生は Al 合金上での局部腐食サイトに対応していることから、ツール走査速度に応じた組織変化の違いによって、局部腐食発生サイトが異なっていることが示された。すなわち、25 [mm/min] の場合、接合部近傍で水素発生がみられたが、その他の走査速度では、接合部から遠く離れた Al 合金上で水素発生がみられた。すなわち、接合時の熱および摩擦攪拌影響によって、局部腐食発生の感受性が変化することが示された。

A6061/SPCC980 対のガルバニック腐食では、Al 合金側がアノードとして局部腐食が発生することは組織の違いによらず変わりはないが、その発生起点 (特に腐食初期過程) については、FSW による組織変化が強く影響することが示された。

#### 4) まとめ

Al 材とハイテン材の FSW 異材接合材におけるガルバニック腐食特性が材料組織と関連していること、特に Al 合金側の組織変化と対応していることを確認した。

FS5 テーマにより、異種接触材料のガルバニック腐食評価においては単体材料の電位等の基本的な条件をまずは定め、その後に構造や接合による条件影響を確認すべきと判断した。本検討はガルバニック腐食評価において重要な知見となった。

#### テーマ 57 (FS 研究) まとめ

本テーマでは、車体のマルチマテリアル化における技術の要素分解から導き出された技術課題について、その影響を調査した。検討した幾つかの研究テーマより、ガルバニック腐食対策が最も重要であると考え、表面処理技術を適用した際の効果を確認するとともに、実際の環境における腐食を再現可能な評価法を提案するべきであると考えた。これを研究テーマ 65 として提案し、本研究として取り組むこととした。

## テーマ 65 「マルチマテリアル車体における防食表面処理評価技術の開発」

(2019 年度～2022 年度)

### ① 「実腐食環境に則したガルバニック腐食評価技術と防食表面処理技術の開発」

#### ①-1 腐食環境データの取得

##### ①-1a：腐食環境データの取得【日本パーカライジング】

腐食環境データに関しては、自動車メーカーが個別に取得している可能性があるが、公開されているデータは存在しないため、共用可能なデータを有していない状況であった。また、促進試験によるガルバニック腐食評価においても実腐食環境と関連させる必要があるため、暴露腐食試験および実車走行腐食試験を実施した。暴露試験は、国内では融雪塩散布地帯の北海道石狩市と、温暖かつ飛来海塩の多い沖縄県宮古島で実施した。実車走行試験では、大型トレーラーのフロア部に試験片や計測器を設置し、ストックホルム～ヨーテボリ間を走行した。

#### 1. 試験片の設計

鉄鋼、アルミ材の組合せにおけるガルバニック腐食影響について、分極データなどを参照し、数値モデリングを利用してカソードが及ぼす犠牲防食範囲を推察した。鉄鋼材料の浸漬電位が $-0.62\text{V}(\text{vsSSE})$ となる範囲を犠牲防食範囲と考えた。実車走行における塩付着量を  $10\text{g}/\text{m}^2$  と想定した場合、接合部 (1cm) に対し、7～8cm 程度の範囲でカソードの影響が認められるが、塩付着量を  $1\text{g}/\text{m}^2$  とするとその範囲は 1cm 程度に抑制される。塩付着量は  $1\sim 5\text{g}/\text{m}^2$  程度となる可能性が高く、これらの予測データから、ガルバニック腐食評価サンプルの構造を決定した。

評価に用いた材料を以下に示した。

鉄鋼材：軟鋼 (270MPa)、高張力鋼 (980MPa)

合金化溶融亜鉛メッキ材：軟鋼 (270MPa)、高張力鋼 (980MPa)

アルミニウム材：A1000、A5169、A6016

CFRTP 材：模擬異方材 (NIMS 供試材)

#### 2. 実車走行腐食試験と屋外暴露試験

大気腐食環境下で進行するガルバニック腐食を評価するためにスウェーデンのストックホルムからヨーテボリまで 2020 年 1 月から 8 月までの間、大型トレーラーを走行させ走行試験を実施した。同じく 2020 年 12 月～2021 年 3 月、2021 年 12 月～2022 年 3 月においても走行試験を実施している。トレーラーの下部に腐食評価試験片と各種センサ類を取り付け、試験片(A)、ACM センサ(B)、温湿度計(C)、飛来物補修ホルダー(D)、電気抵抗センサ(E)、GPS(F)を設置した外観を示した。国内では北海道石狩市の西岸および沖縄宮古島にて静置屋外暴露試験を実施した。

#### 3. 実環境での付着塩分析

走行時に試験片に付着した飛来物をガーゼでふき取り、これに付着したイオン成分を抽出し、イオンクロマトグラフィーにて定量分析を行った。それを採取した面積に換算することで塩の付着量を求めた。その結果、走行試験では冬季に  $1\sim 1.5\text{g}/\text{m}^2$  程度

の塩付着量となった。原子吸光分析や誘導結合プラズマ発光分析法を用いて成分分析を行ったところ、飛来物の主な化学成分は Na、Ca、Cl であり、NaCl:CaCl<sub>2</sub>=5:1（重量比）の比率になることが確認された。

2020 年から 2022 年にかけて各地で実施した塩付着量は ACM センサの出力値から換算した値を用いた。これは、ACM センサに塩水が付着した場合、付着量と水膜厚に応じて出力値が変化することを利用したものである<sup>2)</sup>。基準付着量における出力値を確認するために ACM センサに人工海塩を付着させ、塩の付着量はそれぞれ 0.01 g/m<sup>2</sup>、0.1 g/m<sup>2</sup>、1g/m<sup>2</sup>とした。この人工海塩を付着させた ACM センサを恒温恒湿槽内に設置し、相対湿度を変化させた際の出力値を計測した。これらの結果より、冬季における塩付着量は高い場合に 1~10g/m<sup>2</sup>程度となることが確認された。

#### 4. 実環境の温湿度変化

スウェーデン走行試験における温度および湿度の 3 か年分を観測した。また、北海道および沖縄での屋外暴露試験における温度および湿度を観測した。何れも冬季は容積絶対湿度が 5~10g/m<sup>3</sup> 程度ではほぼ一定となっていることが確認された。北海道の冬季は容積絶対湿度が 5g/m<sup>3</sup> 程度であり、スウェーデンとほぼ等しく、沖縄では夏季の容積絶対湿度は 20~30g/m<sup>3</sup> 程度となることが確認された。

#### 5. 実環境条件での腐食速度

電気抵抗センサである大気腐食センサ(AirCorr-O)の出力値について、スウェーデン走行試験と北海道暴露、沖縄暴露の腐食量を比較した。電気抵抗センサは、厚さ 250 μm の鉄製および 50μm の亜鉛製センサを用いた。センサ部の腐食の進行に伴い金属トラックの有効横断面積が減少することで金属素子の電気抵抗が増加するのを計測するものであり、これにより腐食量を算出している<sup>3)</sup>。

走行試験を開始した1月中旬から3月末までの冬季は腐食量変化が夏季に比べ大きくなっていることが確認された。Fe腐食量から、2000年に実施した走行試験での冬季年間腐食深さ予測値は1~2月期に114 μm/year（但し3月中旬に急速に腐食量が上昇したデータを除いている）となった。同じくZn腐食深さ予測値は、7.6μm/yearとなり、FeとZnの腐食深さ比Fe/Znは15となった。これらの値は計測年の降雪量などの気象要因により変動するものと思われる。一般的にZnは濡れ腐食環境下で腐食が進行し易くなるとされるため、降雪量や融雪塩散布量によってはZn表面が濡れた状態で保持されやすく、Znの腐食量が多くなる可能性がある。

#### 6. 実環境での腐食評価

異種材料接合時のガルバニック腐食影響を調査するため、試験片を用いて評価を実施した。これらは電気化学データを用いて数値モデリングを援用することで設計し、実環境における腐食評価に供している。電気化学評価用の試験片には意図的に 0.1~0.15mm のクリアランスを設けており、このクリアランスを確保するために、樹脂ボルト締結部にはボルト径に合わせた穴を開けたテフロンシートを組合せ、評価対象部

となる板合わせ中央部には塩水を引き込むためのガーゼ（実測 0.1mm）もしくは不織布（実測 0.1mm）を挿入している。

評価に用いた材料および化成処理、電着塗装の仕様を以下に示した。

材料…鉄鋼材料：SPC980MPa 市中材、合金化溶解亜鉛めっき材 市中材（以下 GA 材）

アルミニウム合金材：A6016 材

CFRTP 材

化成処理…ジルコニウム化成処理剤 40℃,120s 処理（日本パーライジング汎用剤）

電着塗装…自動車ボデー標準用カチオン電着塗装 20 $\mu$ ,160℃焼き付け

実環境での腐食評価を行った。2020年1月から8月まで評価を継続し、板合わせ部を解体した。実環境腐食評価において、異種接合材料のうち鉄鋼材-アルミニウム合金材対では両材料共に腐食が認められた。電位差を生じるこの組み合わせを浸漬評価すると鉄鋼材料はカソード防食されるのだが、大気腐食環境下では鉄鋼材料も腐食が進行することが分かる。CFRTP材との組み合わせでは鉄鋼材料は黒錆が発生し、アルミニウム合金材は白錆が発生していた。また、防食材料の例としてアルミニウム合金材-GA材対の評価を行ったが、この組み合わせでは両材料とも腐食は軽微であった。

腐食生成物の分析を行うため断面サンプルを作成し、断面像の観察やラマン分光による腐食生成物の解析を実施した。

次に腐食評価試験後の試験片から腐食生成物を除去し、初期重量との比較から、腐食減量を求めた。この重量減を評価面積で除し単位面積当たりの平均腐食深さとして評価した。また、腐食生成物を除去した試験片を用い、ワンショット3D形状測定機にて腐食後の表面形状を測定した。得られた形状データから各材料の最大腐食深さを求めた。

鉄鋼材料は平均腐食深さと最大腐食深さには約10倍の違いがあるが、アルミニウム合金材料は平均腐食深さに比べ、最大腐食深さが20倍以上高い値を示すことがあり、これは局所的に腐食が進行したことによるものと思われる。

次に実環境腐食評価でのガルバニック腐食電流測定を実施した。スウェーデン走行試験および北海道暴露試験は3月までの降雪期間で高い電流値となっており、融雪塩散布の影響が伺えた。鉄鋼材-アルミニウム合金材対はスウェーデン走行試験と北海道暴露試験では大きな差がなく、同程度のガルバニック腐食電流が計測された。また、アルミニウム合金材-GA材対はどちらも殆ど腐食電流は計測されなかった。CFRTP材と金属材料の組み合わせでは走行試験時の方がガルバニック腐食が進行し易い傾向であった。これは暴露環境の違いによる被水量や樹脂材料表面の損傷影響などの要因によるものと推察される。一方、沖縄暴露での冬季評価ではガルバニック腐食電流は殆ど流れず、夏季に近づくに従い腐食電流が計測され始めた。これは台風を含む降雨の時期と一致していた。沖縄暴露試験での8月には鉄鋼材-アルミニウム合

金材対のアルミニウム合金材側、アルミニウム合金材-GA材対のアルミニウム合金材側の腐食電流が確認された。

## 7. 熱力学平衡計算による腐食予測

水溶液環境における材料の腐食・防食挙動を確認するためには、材料表面上の電気化学反応、溶液・材料界面における物質移動と液物性の変化を総合的に理解する必要がある。しかし、我々が取り扱う界面やすき間など極めて微小な範囲での化合物の析出状態や溶液物性を実測することは容易くない。そこで、このような微小腐食部位に対し、数値計算による化学平衡シミュレーションを適用することで系内が均一な平衡状態になっていると仮定した場合の理想状態における化学的変化の原理を理解することとした。米国 OLI Systems Inc. 社が開発したソフトウェアにより異種材料接合材のすき間における熱力学平衡計算を行い、形成される腐食生成物やすき間内溶液の状態変化などを予測した<sup>4)</sup>。

### 【方法】

- ・材料組み合わせ (2種) 鉄鋼材-アルミニウム合金材、GA材-アルミニウム合金材
- ・形成されるすき間の条件 1cm×4cm (重ね面積) ×0.1mm (クリアランス)
- ・実測データ 上記異種接合材料の実環境腐食におけるガルバニック電流測定値 (A)
- ・合わせ内部の腐食環境 (初期境界条件)

内用液 NaCl:10<sup>-5</sup>、10<sup>-1</sup>mol/kg 但し、評価期間内で内用液は入れ替わらない

酸化剤 酸素 : Const 20%

存在するイオン種 H<sup>+</sup>、OH<sup>-</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>、Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup>

亜鉛腐食生成物 Zn(OH)<sub>2</sub>、ZnCl<sub>2</sub>・4Zn(OH)<sub>2</sub> など※

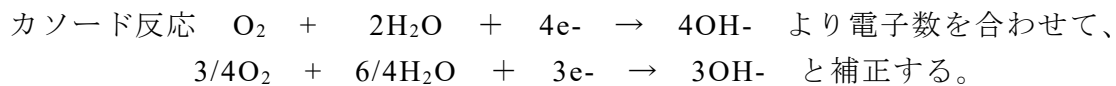
アルミ腐食生成物 Al(OH)<sub>3</sub>、Al(OH)<sub>2</sub>Cl、AlOOH など※

※腐食生成物に関しては OLI データベース情報を確認し計算対象を決定した

### 【仮定条件】

合わせ部内外への物質移動はないものとし、また、合わせ内部ではアノード側では活性な均一腐食が起きていることとする。また合わせ部の内部ではイオンは均一に分布していることと仮定した。我々が実施した実車走行試験におけるガルバニック電流実測値を用い、この電流値から異動する電子総量 (mol) を算出し、これらは全てすき間内の腐食にて均一に消費されるものとした。

鉄鋼材-アルミニウム合金材の場合における生成される化合物の自由エネルギーなどから相の状態や組成を決定した結果、本系では Al(OH)<sub>3</sub> が最も安定な腐食生成物となり、次いで AlOOH が安定析出するものと予測された。これらの腐食生成物が形成される場合は以下のカソード反応、アノード反応となる。



この結果、電子の授受を行う酸化還元反応において全体の反応は  $\text{Al}^{3+} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3$  となり、ここでの  $\text{Al}(\text{OH})_3$  の溶解度積は極めて小さいために溶液内で沈殿となる。この沈殿形成によって溶液内に余剰の水酸化物イオンは存在しなくなるため、鉄鋼材-アルミニウム材が均一腐食した場合には内用液の pH は変化せず、腐食生成物のみが蓄積していくこととなる。さらに任意の pH や塩化物濃度における腐食生成物の安定性も考慮した。Al の腐食生成物は塩化物錯体として  $\text{Al}(\text{OH})_2\text{Cl}$  の形態で錯形成溶解するが、この平衡濃度は極めて低く、 $\text{Al}(\text{OH})_3$  の析出にほとんど影響しないため、やはり均一腐食系と仮定した場合は pH は変化しないこととなる。

同じように GA 材-アルミニウム合金材対について計算した。塩化物濃度が低い場合においては、析出する腐食生成物は Zn 溶解の場合、 $\text{Zn}(\text{OH})_2$  や  $\text{ZnO}$ 、Al 溶解の場合は  $\text{Al}(\text{OH})_3$  などであり、鉄鋼-アルミニウム材対と同様に余剰の水酸化物イオンは存在せず、内部溶液の pH は変化しない予測結果となった。しかし、塩化物濃度が高くなると、固体析出した  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  が  $\text{Zn}(\text{OH})\text{Cl}$ -イオンとして一部溶出することで腐食生成物に消費される水酸化物イオンに余剰分が生じ、pH は反応過程で徐々に上昇する。水酸化物イオン濃度を pH に換算すると、最終的にすき間内 pH は 9.03 まで上昇する予測結果となった。

しかしながら、実際の腐食サンプルは pH9 以上に上昇しているものも多く、今回熱力学平衡計算の前提とした均一腐食ではなく、局部腐食が発生しているなど前提条件とは異なる腐食が進行している可能性が示唆された。

## まとめ

スウェーデンで実車走行試験、国内では融雪塩散布地域である北海道と、高温塩害地区である沖縄でも屋外暴露評価を実施した。実環境の環境条件として温度や湿度の環境データその他、付着塩や腐食環境としての評価を行うことができた。これらのデータは腐食促進試験の条件設定に非常に重要な情報となる。腐食の外観、腐食減量その他、電気化学測定や腐食生成物の分析に加え、今後は腐食の分布についても確認を行うことでガルバニック腐食進行を捉え、その腐食モデルを提案していく予定である。

腐食モデルの提案には、すき間内部で起こる化学変化を考える必要があり、そのために熱力学平衡計算を実施したところ、すき間内の pH は 9 程度になるものと予測されたが、実評価サンプルではこれ以上に pH が局部的に高くなるケースが多く認められた。これは仮定条件とした均一モデルやイオンの均一分布を否定するものであると思われ、不均一腐食モデルを用いた計算を再度行い検証していく必要がある。



## ①-1b：腐食試験片の表面電位測定【NIMS】

### 【目標】

実環境腐食評価後の試験片を用い、腐食後サンプルの表面電位測定を実施し、腐食材料の表面が、実環境においてどのような電位分布となっているのかを確認することで、ガルバニック腐食の進行状態を把握する。

### 【表面電位測定】

表面電位測定システムは、表面電位測定装置（Hirocon Corporation RM201）、X-Y ステージおよび制御用 PC で構成されている。表面電位測定の原理は、物質の仕事関数を測定するために使用されるケルビンプローブと同様である。ケルビンプローブでは、対象材料に対し測定プローブが振動するのに対し、表面電位測定装置は一般に静電電圧計と呼ばれ、プローブは物理的に動かない

検出電極はプローブの内側に設置されている。電極と試料を電氣的に接続すると、プローブの小さな穴（直径；およそ 2mm）を通してコンデンサが形成され、コンデンサの静電容量は、プローブの内側にある機械チョッパーで電界を断続的に遮断することによって変化する。コンデンサ容量の微小な変化に伴い、誘導電流が回路に流れ始め、その誘導電流と内部の標準抵抗から表面電位が推定される。また、X-Y ステージは、表面電位分布を取得するために用いる。

このシステムの特性として、炭素鋼 SM490A で表面電位とプローブと試験片の間の距離の関係を調べた。電極間距離はマイクロメータを備えた Z ステージ上の試料の高さを変えることにより調整した。また、亜鉛/炭素鋼試験片の表面電位測定から、表面電位差に及ぼす電極間距離の影響を調べた。亜鉛/炭素鋼の試験片は、電気亜鉛めっき鋼板の亜鉛めっきの一部を希硫酸溶液に浸漬して除去することによって準備した。

プローブと試料間の距離に対する表面電位の変化を確認した。表面電位は、電極間距離に比例して卑な方向に大きくなる傾向を示した。これは距離が長くなると表面電位測定の対象面積が大きくなることに起因しており、プローブ直下の試料表面の電位変化を正確に追跡するためには、正確に距離を調整する必要があることを意味する。しかしながら、実際には、各測定で距離を正確に制御することは容易ではない。そこで、特定の場所を基準とした表面電位差での評価に着目した。

種々の電極間距離で亜鉛/炭素鋼試料の表面電位を測定した。表面電位プロファイルを確認した。このときの亜鉛と炭素鋼の表面電位差は約 0.5V であり、腐食電位差とよく一致した。亜鉛と炭素鋼の境界は、明瞭に検出されていないが、これはプローブの位置分解能によるものであり、この結果から位置分解能はおよそ 1 から 2mm と推定される。表面電位差は、2mm 未満の距離であれば距離に関係なくほぼ一定の値を示すことから、表面電位の測定の際には、銅板の表面電位を基準として使用し、銅板に対する表面電位差の変化を測定した。

### 【実験方法】

試料には、ハイテンと Al 合金をおよそ 1mm 程度のすき間を介して、銅板上に並列に配置した試験片を用いた。銅板との導通にはカーボンテープを使用した。上側は腐食試験前のハイテンと Al 合金が配置されており（試料 A）、下側では腐食試験後のハイテンと Al 合金が配置（試料 B）されている。腐食試験はハイテン/Al 合金合わせ状態で北欧での実車走行試験により行っており、合わせ部を開いた形でハイテンと Al 合金が配置（線対称）されている。

試料 A では、液薄膜下での表面電位分布測定を行った。0.1M NaCl 溶液を表面に滴下後、実験室内の環境下で乾燥する過程での表面電位分布を連続的に測定した。

### 【結果と考察】

試料 A における液滴滴下前後の表面電位プロファイルを確認した。液滴滴下前のハイテンの電位は Al 合金と比較しておよそ 600mV 貴な電位を示しており、ガルバニックカップルが形成された場合、Al が犠牲的に溶解し、ハイテンの溶解が抑制されることが示唆される。一方、液滴滴下後の電位プロファイルでは、ハイテン、Al 合金ともほぼ同じ電位を示した。これはガルバニックカップルの状態になっていることを示している。表面電位に及ぼすプローブ/試料間の距離の影響が補正できていないため液滴滴下前後での絶対電位の違いを議論することはできないが、ハイテンと Al 合金が同じ電位を示していることから、ハイテン上ではカソード反応、Al 合金上ではアノード反応が生じていることが示唆される。

乾燥後の試料 A の外観と、そのときの電位分布を確認した。ハイテン上で腐食が発生している領域、Al 合金上で溶液にさらされていた領域で電位の変化領域が見られた。

試料 B について、形状像および表面電位分布像を測定した。ここで、形状像はレーザー変位計（キーエンス製 LK-G35）で測定した。形状測定は表面電位測定と同時に行えるが、全く同じ位置での形状と電位の測定は技術的に難しいため、形状像と電位像には位置的に少しずれが生じるが、測定上の問題はない。ハイテン上には鉄の腐食生成物のほか、Al 酸化物と思われる白色の腐食生成物が堆積しており、形状像ではその分布が正確に捉えられている。

Al 合金上では主に、Al の酸化物と考えられる白色の腐食生成物が多く分布しており、ハイテンから生じた赤さびの分布も見られた。一方、電位分布像については、全体的に Al 合金表面の電位は卑、ハイテン上の電位は貴になっており、合わせすき間内においてガルバニック腐食状態になっていたことが示唆される。さらに、Al 合金上の赤い矢印と黄色の矢印の部分に着目すると、かなり電位の低い領域が見られた。これらとあわせになっていたハイテン上では、周囲と異なる電位を示しており、この部分は合わせすき間内においてガルバニック腐食が激しく進んだ領域を示している可能性がある。この点については、さらなる表界面分析が必要と考えられる。

### 【まとめ】

ハイテン/Al 合金試料について、実環境腐食試験前後での表面電位分布測定を実施した。その結果、以下のことがわかった。

- ・液滴滴下前において、ハイテンの電位は Al 合金と比較しておよそ 600mV 貴な電位を示す。
- ・液滴滴下後の電位プロファイルでは、ハイテン、Al 合金ともほぼ同じ電位を示す。
- ・乾燥後の試料において、ハイテン上で腐食が発生している領域、Al 合金上で溶液にさらされていた領域で電位の変化領域が見られた。
- ・腐食試験後の材料において、実環境下でどのような電位分布となっているのかを確認した。
- ・表面電位分布測定により、ガルバニック腐食の進行状態を把握できることが示唆された。

## ①-2 ガルバニック腐食評価技術の確立

### ① -2a 既存評価方法による課題の抽出【日本パーカライジング】

異種材料接触した試験片形状のモデリングを行い、試験片を設計した。既存腐食評価法である JASO-M609 法（日本）、SAE J2334（米国）、VDA233-102（欧州）にてガルバニック腐食の評価を行い、実腐食環境との違いを確認する。腐食の評価は腐食減量を中心に腐食外観、腐食生成物、腐食の分布を確認し、これらを電気化学測定により補完した。

既存評価法のうち JASO 法では実環境腐食と乖離する傾向が認められた。本テーマで設定する腐食評価法は実腐食環境と相関性の高い腐食促進試験法として設計する必要がある。

#### 1. 既存評価方法による課題の抽出（平塚分室：日本パーカライジング㈱）

既存腐食評価法である JASO M609 法、SAE-J2334 法、VDA233-102 法を用いガルバニック腐食データの採取を開始した。①-1 腐食環境データの取得で実施した電着塗装接触材料を用い、腐食進行の確認とガルバニック腐食電流調査を行った。

既存の腐食評価法として JASO-M609 法（日本）、SAE J2334（米国）、VDA233-102（欧州）などの複合サイクル試験を選定した。JASO M609 法は NaCl 濃度が高く、全工程中の塩水噴霧率も非常に高い。この条件では亜鉛めっきの腐食が加速してしまい、実環境における腐食状況とは異なった結果となりやすい。SAE J2334 法は融雪塩を想定しているが、全工程中の湿潤条件率が小さく、塩が濡れた状態で生じるガルバニック腐食を評価するにはやや甘い条件となる可能性が考えられる。VDA 233-102 法は鉄鋼材料と亜鉛めっき材料の腐食率が実環境腐食と近い結果が得られるなどの報告があるが、専用の装置を用いる必要があり汎用性に欠けている。これら各国の腐食評価法を用い、異種材料組み合わせのガルバニック腐食影響を確認した。

既存腐食評価法である JASO M609 法、SAE-J2334 法、VDA233-102 法を用いガルバニック腐食データの採取を開始した。複合サイクル試験装置を用いて実環境腐食評価と同様の評価を行い、ガルバニック腐食の進行を調査した。

各種促進試験腐食評価後の試験片外観を確認した。鉄鋼-アルミニウム対のガルバニック電流積算値から計算し、スウェーデン走行試験 1 年分に相当する促進試験での腐食期間は 1 週間分に相当することが確認されたため、1 週間評価品の腐食状態を走行試験結果と比較した。また、腐食促進を十分に行うため 6 週間評価を継続したところ、何れも走行試験評価と比べて腐食がかなり進行することが分かった。

次に既存促進試験評価でのガルバニック腐食電流測定を実施した。JASO 法は最も高いガルバニック腐食電流が観察され、腐食が著しく促進されているものと思われる。CFRTP 材-アルミニウム合金材対は評価の進行と共にガルバニック腐食電流が著しく高くなったが、CFRTP 材-鉄鋼材対は CFRTP 材-アルミニウム合金材対と比較して低い電流値を維持しており、スウェーデン走行試験の結果と一致しなかった。CFRTP 材は炭素繊維などの分布を含めて試験片の個体差があるため、今後も継続してデータを採取し、再現性を確認していく必要がある。アルミニウム合金材-GA 材対はスウェー

デン走行試験では殆ど腐食の進行が認められなかったが、JASO 法等の腐食促進試験では評価初期よりアルミニウム合金材の腐食電流が得られており、いずれもスウェーデン走行試験とは一致しなかった。これらの現象を理解するためにも最終的にはすき間内部の腐食モデルを理論反応と共に示す必要がある。

次に腐食評価試験片の腐食生成物を除去し、初期重量との比較から腐食減量を求めた。この重量減を評価面積で除し、単位面積当たりの平均腐食深さとして評価した。また、腐食生成物を除去した試験片を用い、ワンショット 3D 形状測定機にて腐食後の表面形状を測定し、観察範囲内における最大腐食深さを確認した。

また、各腐食評価法の評価期間を 1 週間とした場合の評価試験片の平均腐食深さと最大腐食深さを確認した。実車走行試験の結果と同様に、鉄鋼材料は平均腐食深さと最大腐食深さには約 10 倍の違いがあるが、アルミニウム合金材料は平均腐食深さに比べ、最大腐食深さが 20 倍以上高い値を示すことがあり、これは局所的に腐食が進行したことによるものと思われる。評価法としては JASO M609 法は腐食がかなり進行し易く、SAE J2334 法は腐食の進行が緩やかであった。VDA 233-102 法の腐食進行度はこれらの中に位置づけられているものと思われる。これらの結果を踏まえ、実車走行試験結果との相関性を確認した。JASO M609 法は実車走行試験との相関性が著しく低く、実環境を想定したガルバニック腐食評価法としては適していないものと思われる。

### ①-2b ガルバニック腐食の適正評価に関する研究開発【UACJ】

ガルバニック腐食は単体材料の腐食評価とは異なり、組み合わせる材料の種類、材料の形状、塩の種類や付着量、表面の濡れ状態などの影響を強く受けることが知られている。実腐食環境調査における結果を基とし、ガルバニック腐食評価に及ぼす影響因子の効果をそれぞれ確認することで評価法を最適化する際の指標とし、その有効性を確認した。

まず本テーマで使用する候補材料の基礎データとして分極曲線を取得した。測定条件は溶液が5%NaClで、温度を室温の25℃および、融雪塩散布地域を想定した5℃とした。分極曲線より、各材料の腐食電位および腐食電流密度を求めた。これより、温度によって電位の序列「CFRTP >> 鉄鋼材 > アルミニウム材 > 亜鉛めっき材」に変化がないことが確認され、腐食発生時のアノード・カソードの分化に温度の影響はないことが予想された。また、各材料の組成により傾向は大きく変わらないことが分かったため、以降の試験では鉄鋼材:ハイテン、アルミニウム材:A6016、亜鉛めっき材:GAをそれぞれ使用することとした。

次に、恒温恒湿槽を用いて模擬実環境での試験を行い、液膜環境下におけるガルバニック腐食に及ぼす付着塩種と湿度の影響を調査した。2019年度のスウェーデン走行試験より得られた回収泥の分析結果より、模擬融雪塩溶液として0.5%NaCl + 0.095%CaCl<sub>2</sub> + 0.051%MgCl<sub>2</sub>、比較として塩化物イオン濃度を揃えた0.66%NaCl溶液を調製した。ハイテン/A6016、A6016/GAの組み合わせ隙間試験片の隙間に溶液を注入し湿度サイクル試験を行った。この時のガルバニック電流を測定した。本試験では、湿度サイクルに対応して電流の増減が確認された。一方、溶液の供給を試験開始時の一度のみとしたため、電流の絶対値は減衰していった。このことから、ガルバニック腐食の推奨評価試験法としては、定期的に溶液の付与が必要であることが分かった。また、A6016/GAの組み合わせ試験片におけるガルバニック電流のみを抽出したところ、0.66%NaCl溶液ではA6016のみの溶解電流が確認された。一方、模擬融雪塩溶液ではA6016とGAの何れもがわずかに腐食する電流が検出され、これは2019年度の走行試験より得られた電流の傾向と一致しており、推奨評価試験法の溶液条件、すなわち付着塩成分は走行試験より得られた塩成分データを基に成分を適用すべきことが示唆された。

付着塩成分以外にも、実腐食環境調査より様々なデータを取得できている。その中で推奨評価試験法に適用すべき条件として、実環境における温湿度変域の再現と、付着塩量変動時の影響を考慮することがある。前者に関しては、スウェーデンでの走行試験より融雪塩が散布される地域では、絶対湿度が5~10 g/m<sup>3</sup>で一定であることが分かった。後者に関しては、試験期間内で付着塩量に変動があることが分かっている。以上を考慮した上で、融雪塩型自動車ガルバニック腐食評価条件を推奨評価試験法として提案した。温湿度は、絶対湿度を約8 g/m<sup>3</sup>に合わせた乾燥過程(25℃-35%RH)と湿潤過程(10℃-90%RH)を低温対応型の恒温恒湿槽で繰り返すサイクルとした。付着塩成分は、融雪塩成分を参考に、0.5mass%NaCl + 0.1mass%CaCl<sub>2</sub>の混合塩溶液を中心条件とした。付着塩量は、先述の溶液濃度を変化させることで変更が可

能である。また、溶液の付与方法は、様々なサンプル形状に対応するため、浸漬または噴霧のどちらかを選択できるようにした。本条件下でガルバニック電流測定を行った。試験片は走行試験などで用いたものと同じ、組み合わせ隙間試験片を用いた。試験開始直後は試験片の浸漬直後でもあり、大きなガルバニック電流が確認され、温湿度サイクルが進むにつれて電流値は減衰していった。しかし、途中で試験片の浸漬を行うことで再度電流値は大きくなった。

本試験では、A6016/GA の組み合わせ試験片も入っており、以前の検討や走行試験の時と同様に、両方の材料がわずかに腐食する電流が観測された。本組み合わせの耐食性を評価するためには腐食メカニズムの解明が必要である。試験片が曝される環境を想定した材料の腐食特性データを取得した。板合わせ内部の溶液は腐食の進行により、溶解してきたイオンを含みながら pH が上昇する。この pH 変化を想定して A6016 材および GA 材の各 pH における分極曲線を取得したところ、pH9 程度で両材料の腐食電位はほぼ等しくなり、更に高い pH では A6016 材が卑化し GA 材との電位が逆転することが示唆された。この現象を再現するために腐食シミュレーションを実施したところ、材料の電位以外に酸素の還元反応や水素発生のカソード反応も pH への依存性を考慮することで溶液は僅かにアルカリ化することが判明した。しかし、熱力学平衡計算上は腐食生成物形成により水酸化物イオンが消費されるために pH 上昇は殆ど起こらない。A6016 材と GA 材の板合わせすき間部の溶液 pH が 10 以上になるためにはすき間内部で限定的におこる現象が存在するものと思われ、溶液成分の局在化や腐食生成物形成の阻害などがそれに関与している可能性がある。A6016/GA の組み合わせにおける腐食モデルは初期に電位の低い GA 材が腐食し、内部の溶液 pH が僅かに上昇した後、すき間内部で限定的におこる現象が影響し、熱力学平衡計算にて導かれる溶液 pH 以上にアルカリ化する可能性がある。その場合、A6016 材が卑化し、腐食し始める。このようなアルカリ溶液下におかれる状態が長く続く場合は一方的に A6016 材が腐食し続けることとなるが、溶液内部の溶液が乾燥する場合、A6016 材は酸化被膜を再形成し、安定化する。JASO M609 法のように塩水の供給が頻度高く行われる腐食評価の場合は A6016 材が腐食し続ける場合があるが、実車走行試験や本研究で設計したガルバニック腐食評価法の場合は塩水が付着する頻度はそれほど高くなく A6016 材と GA 材のいずれも目立った腐食はせずに良好な耐食性を示したものと考えた。

## ①-2c 機械学習による実車走行試験とガルバニック腐食評価法の相関性評価【マツダ】

本テーマで実施してきたスウェーデンでの実車走行によるガルバニック腐食評価結果とガルバニック腐食評価法から得られた腐食環境条件や腐食評価結果について機械学習を適用し、相関性を確認した。

進め方：まず、ガルバニック腐食データを目的変数とし、市場環境データを関数とした式を作成する。そして、ガルバニック腐食評価法における試験条件（環境データに相当）を式に入れ込み腐食量の計算値を得る。その計算値と実測値の誤差を比較することで、相関性を確認する。本テーマは2022年度7月より開始しており、外注作業にて機械計算のデータ整理を行い得られたデータを解析している。データを解析するにあたり、実車走行試験とガルバニック腐食評価法のデータ数が不足しているために相関性評価においては十分な検証ができない可能性がある。相関性を高めるためには、双方の評価において更なるデータの取得とセンサ類使用条件等の精査が必要となる。塩水付着時のACMセンサを用いた塩付着量予測においては塩水付着時の過剰のセンサ強度を補正するなどの操作が必要であることが確認された。機械計算の結果を精査し、設計した評価法の課題をまとめるものとする。

## ①-2d すきま部におけるガルバニック腐食の影響調査【日産自動車】

### 【概要】

本テーマで実施している板合わせ部のガルバニック腐食評価におけるすきま腐食とガルバニック腐食のそれぞれの寄与について、異なる評価法を併せて実施することで検証する。得られた知見をガルバニック腐食のリスクカテゴリ分類評価に活用した。

### 【実施内容】

異種材の板合わせ部において生じる腐食現象は、ガルバニック腐食に加えてすきま腐食が同時に発生していることが予想される。それぞれの腐食現象が全体の腐食に寄与する程度を明確にするため、すきま腐食のみが生じる腐食試験片を作成し、ガルバニック腐食試験片と同じ腐食環境に曝した場合の腐食量の差分を求めることとした。すきま腐食のみが生じる試験片としては、ガルバニック腐食試験片の片側を同形状の絶縁材と差し替えたものを用意した。ガルバニック腐食は塩濃度や濡れ時間など腐食環境の条件によって腐食量が変化するため、上記の寄与度は環境によって異なることが想定される。この腐食環境と上記寄与度の関係についても考察するため、JASO M609法（試験期間：1週間、6週間）および本活動で作成した融雪塩型自動車ガルバニック腐食評価法（試験期間：6週間）の2つの試験法にて評価を実施する。腐食試験後の試験片は腐食減量および腐食後形状観察を実施し、上記寄与度を定量化する。

### 【日程】

6月中旬～8月上旬：腐食試験

8月上旬～8月中旬：腐食量評価

8月上旬～：結果考察・すきま腐食寄与度の算出



## ①-2e 腐食試験片の腐食進行度解析 【JFE スチール】

### 【目的】

本テーマで実施してきた腐食試験片および腐食評価データを用いて腐食の分布や腐食進行度を腐食孔の粒度解析や空間統計解析を用いて評価し、これらから得られた知見をガルバニック腐食のリスクカテゴリ分類の情報として活用することを目的とした。

### 【実施内容】

- ① 本テーマ内で行われた『スウェーデン実車走行』『JASO 腐食促進試験』および『融雪塩型腐食評価法』による腐食試験に供されたサンプルに対して、面内の深さ分布測定の実施
- ② 得られた面内分布のデータをもとに下記 2 種類の解析方法を用いて、腐食形態の特徴を定量的に表現しサンプル間の比較を行った。
  - i 粒度分布解析  
得られた深さ分布データから腐食孔を円相当径に換算して統計的に解析する。特に、複数の腐食孔が連結したものを分離して個別の腐食孔として取り扱う手法を用いることで高精度での解析を行う。
  - ii 空間統計解析  
得られた深さ分布データの任意位置の腐食深さとその位置から離れた位置の腐食深さとの空間的相関性を表す指標であるバリオグラム解析を行い、腐食形態の特徴を比較する。
- ③ 解析結果をもとに実環境と腐食促進試験を比較し、ガルバニック腐食評価でのキーポイントについてまとめた。

### 【実施計画】

2022 年度上期にデータ取得・まとめを実施し、また、追加評価・解析を行った。

## ①-3 ガルバニック腐食に対する防食表面処理技術の開発

### ①-3a ガルバニック腐食に対する防食技術の最適化検討【日本パーカライジング】

鉄鋼材料とアルミニウム合金材料の異種材料接着を考える場合、何れかの材料-接着剤界面での剥離が起こる場合と材料表面に形成された酸化膜層の剥離が起こる場合が想定される。特にアルミニウム合金の場合は酸化膜の影響を考慮すべきである。主にアルミニウム合金材を対象に材料に自然形成された酸化被膜を一度溶解し、化成処理による薄膜を形成させることで表面状態を安定化させる方法がありチタン系化成処理（Ti 系）とジルコニウム系化成処理（Zr 系）が挙げられる。Ti 系化成処理剤は皮膜析出を考慮すると、化成処理液の pH は 3.0 程度に調整すべきであり、Zr 系化成処理剤は pH4.0 程度にするのが適当である。これら化成処理剤を用いて処理液を調製し、化成処理性を確認した。

狙い皮膜量を Ti 系、Zr 系ともに 10-20mg/m<sup>2</sup>とする場合、処理時間は 30 秒が適切で

あると判断した。なお、実際の生産工程を考慮するとこの処理時間は数秒程度で完結することが好ましいが、その場合は処理液の濃度や温度などを調整することで対応することができる。

次に材料-接着剤界面での剥離が生じた場合を想定した表面処理剤を考案した。材料表面に予めアミノ基を有する有機シラン系皮膜を形成させるものであり、水の浸透によりアルコキシル基が加水分解を起こし皮膜化することを狙いとしている。分子構造の異なる2種の有機シラン化合物 C,D を選定し塗布処理により皮膜形成を確認した。塗工時の仕上がり外観などから Si 付着量として  $100\text{mg}/\text{m}^2$ 以下となる条件で検討を行うこととした。

以上より、材料表面に形成された酸化膜層の剥離が起こる場合と材料-接着剤界面での剥離が起こる場合とを想定した表面処理条件を決定した。これら表面処理した材料の接着性を確認すべく群馬大学にて評価を実施した。

### ①-3b 異種材料接着時の界面状態と表面処理効果の確認【群馬大・荘司教授】

#### 【目的】

せん断引張 (TSS) 試験片を用いて、本事業で開発する腐食促進サイクル試験を実施して接着強度の劣化挙動を調査し、各種表面処理方法ごとのデータベースを構築することを目標とした。また、表面処理を施さない試験片についても調査を行い、強度出現メカニズムおよび耐久性向上メカニズムを検討した。

#### 【実施内容】

本研究開発テーマにおいて検討した融雪塩型自動車ガルバニック腐食評価法を腐食条件として設定した。温湿度は、絶対湿度を約  $8\text{ g}/\text{m}^3$  に合わせた乾燥過程 ( $25\text{ }^\circ\text{C}$ - $35\%\text{RH}$ ) と湿潤過程 ( $10\text{ }^\circ\text{C}$ - $90\%\text{RH}$ ) を低温対応型の恒温恒湿槽で繰り返すサイクルとした。付着塩成分は、融雪塩成分を参考に、 $0.5\text{mass}\%\text{NaCl} + 0.1\text{mass}\%\text{CaCl}_2$  の混合塩溶液を中心条件とした。本研究では、ハイテン 980 材と A6016 材を接着してせん断引張試験片を作製して腐食促進サイクル試験を実施し、接着強度の劣化挙動を調査した。2021 年度は、短縮冷熱サイクル試験を実施した。

試験片として、 $1.2\text{ mm}$  厚のハイテン 980 材と  $1.0\text{ mm}$  厚の A6016 材を接着剤にて接着して、JIS K 6850 に準拠したせん断試験片を作製した。接着剤としては、テーマ 55「マルチマテリアル接合技術の基盤研究 (FS 研究) ②異材接合継手の性能比較」で評価した構造用接着剤 (接着剤  $\alpha$ ) と本研究で準備した接着剤 (接着剤  $\beta$ ) を準備した。接着部の厚さを調整するために、接着剤に  $0.25\text{ mm}$  径のジルコニアビーズを添加した。本研究では、接着強度の劣化挙動に及ぼす表面処理の影響を調査するために、表面処理試験片を準備した。基本的には A6016 材への表面処理に着目したが、鋼板の腐食による影響も調査するために、ハイテン 980 材へ表面処理を施したものも準備した。接着のための焼付までの処理として、次の工程を実施した。

①脱脂：アルカリ脱脂 (120 s) →水洗 (30 s)

②接着剤塗布

- ③脱脂：アルカリ脱脂（120 s）→水洗（30 s）
- ④化成：Zr 系化成（120 s）→水洗（30 s）→RO 水洗（30 s）
- ⑤電着：RO 水洗（30 s）→カチオン電着（180 s）
- ⑥焼付

短縮冷熱サイクル試験は、接着剤  $\alpha$  を用いた試験片に対し、30 および 50 サイクル実施した。接着剤  $\beta$  を用いた試験片に対しては、50 および 80 サイクル実施した。なお、表面処理を施さなかった板材（Blank 材）の接着剤  $\beta$  を用いた試験片については、10 および 30 サイクルの試験も実施した。また、接着剤  $\alpha$  を用いた試験片については、比較のために高温高湿試験も実施した。高温高湿試験の条件は、85°C 85%R.H.にて 360 h とした。

短縮冷熱サイクル試験後の試験片について、引張せん断試験を実施して接着部の強度を評価した。引張せん断試験は、インストロン製万能試験機を用いて、クロスヘッド速度 5 mm/min として実施した。なお、試験時の曲げ変形の影響を抑制するために、A6016 にはハイテン 980 を、ハイテン 980 には A6016 をあて板として貼り合わせて、引張試験片のつかみ部における試験片厚さを揃えるようにした。さらに、引張せん断試験後の破面を観察して、破壊モードを調査した。

## 【評価結果】

### 1. 接着剤 $\alpha$ による評価結果

#### 1.1 短縮冷熱サイクル試験結果

接着剤  $\alpha$  による試験片の短縮冷熱サイクル試験に伴う引張せん断強度の変化を調査し、破面観察より破壊モードを調査した。なお、破壊モードは外観観察レベルの結果であるため、FT-IR や XPS などを用いた詳細調査を実施した。

Blank 材については、接着剤の硬化条件の影響を調査するために、焼付条件を変化させて評価を行った。焼付温度の低下に伴い、やや強度が低下する傾向が見られた。主たる破壊モードは凝集破壊であったため、接着剤の硬化度の影響を受けている可能性が示唆される。他の表面処理条件と同一の焼付条件である 180°C 20 min の試験片については、短縮冷熱サイクル試験前は凝集破壊であったが、試験の実施により、接着部端部において Al/樹脂および Fe/樹脂界面での界面破壊が一部の領域で見られるようになった。しかし、短縮冷熱サイクル試験に伴う引張せん断強度の変化はほとんど認められなかった。

A6016 側の酸化皮膜処理である条件 A および条件 B については、Blank 材と同程度の強度が得られ、短縮冷熱サイクル試験に伴う引張せん断強度の変化についても Blank 材と同様であった。

A6016 側にのみ官能基劣化防止処理を施した条件 C および条件 D については、両者に相違が見られた。条件 C では短縮冷熱サイクル試験の前後とも、条件 A、条件 B および Blank 材と同程度の強度が得られた。一方、条件 D では短縮冷熱サイクル試験前は条件 A、条件 B、条件 C および Blank 材と同程度の強度が得られたが、短縮冷熱サイクル試験の進行に伴い引張せん断強度が低下し、本研究の表面処理条件

では、最も低強度となった。

A6016 とハイテン 980 の両方に処理 C および D の官能基劣化防止処理を施した条件 C' および条件 D' については、他の表面処理および Blank 材に比べ、強度が低くなった。また、条件 C' と D' を比較すると、条件 C および条件 D の場合と同様に、C' の処理の方が D' の処理よりも高強度となった。条件 D' については、短縮冷熱サイクル試験前より他の試験片に比べて低強度であり、短縮冷熱サイクル試験の進行に伴う強度低下は見られなかったが、条件 D と同程度の低強度となった。

以上の結果より、冷熱サイクル試験に関しては、条件 D の官能基劣化防止処理の効果は低く、また、条件 C および D の表面処理を A6016 側に加えてハイテン 980 側に施す効果もあまり期待できないことが明らかとなった。これらの理由については引き続き調査を行う予定である。

## 1.2 高温高湿試験結果

高温高湿試験に伴う引張せん断強度の変化を確認し、破面の外観観察を行い破壊モードを調査した。高温高湿試験により、すべての試験片において強度が低下した。D および D' の処理材の強度低下が大きく、Blank 材と同レベルの低下を示した。本研究の条件では、短縮冷熱サイクル試験よりも高温高湿試験の方が、接着強度の劣化評価には加速性が大きいことがわかる。これは、短縮冷熱サイクルにおける高温高湿放置条件が 50°C95%R.H. であったのに対して、高温高湿試験では 85°C85%R.H. であったことから、同程度の湿度であればより高温の方が劣化評価には有効であることが示唆された。また、Blank 材に比べ、処理条件 A、B、C および C' は高温高湿環境における強度劣化を抑制する効果が高いことが明らかとなった。

### 1.3.1 接着剤 $\beta$ による評価結果

接着剤  $\beta$  による試験片の短縮冷熱サイクル試験に伴う引張せん断強度の変化を調査した。また、引張せん断試験前後の破面観察を行った。接着剤  $\alpha$  と同様、FT-IR や XPS などを用いた詳細調査はまだなされておらず、主たる破壊モードは凝集破壊であったが、今後表面処理層も含めた破壊箇所の同定を実施する。

Blank 材の引張せん断強度は、短縮冷熱サイクル試験の 80 サイクルまでは、強度低下は見られない。また、接着剤  $\alpha$  の結果と比べると、2 MPa 程度強度が高いことが分かった。また、接着剤  $\alpha$  の場合と同様、条件 C' および条件 D' については、短縮冷熱サイクル試験に伴う強度低下は認められなかったが、他の表面処理材および Blank 材に比べ、強度が低くなる傾向がみられた。

接着剤  $\beta$  についても、短縮冷熱サイクル試験に伴う引張せん断強度の低下は認められなかったため、高温高湿条件や腐食サイクル試験条件の結果も考慮して各接着剤の強度低下条件を調査することとした。

### 1.3.2 まとめおよび今後の課題

2 種類の接着剤（接着剤  $\alpha$  : テーマ 55 評価材、接着剤  $\beta$  : 新規評価材）にてハイテン 980 材と A6016 材の接着体を作製して、短縮冷熱サイクル試験による引張せん

断強度変化を調査した。さらに、接着強度の劣化抑制を目的として、板材の表面処理の効果についても調査した。その結果として、以下の成果が得られた。

- (1) 両接着剤ともに、短縮冷熱サイクル試験において、50～80 サイクル程度の負荷条件では顕著な引張せん断強度の低下は認められなかった。
- (2) 両接着剤ともに、A6016 とハイテン 980 の両方に官能基劣化防止処理を施した条件においては、Al の酸化皮膜処理を施した試験片および Blank 材に比べ、強度が低くなった。
- (3) 接着剤  $\alpha$  の接着体について、高温高湿試験（85℃、85%R.H.、360 h）を実施したところ、表面処理の有無によらず、すべての試験片で強度劣化が見られた。Blank 材の強度劣化が最も大きくなったが、本研究における条件 D における官能基劣化防止処理を A6016 のみおよび A6016 とハイテン 980 の両方に施した試験片における劣化も Blank 材と同程度となった。

### ①-3c 接着剤界面剥離に及ぼす表面処理効果の寄与解析【SUBARU】

#### 【目的】

せん断引張（TSS）試験片を用いて、冷熱サイクル試験を実施して接着強度の劣化挙動を調査し、接着剤界面剥離に及ぼす表面処理効果の寄与を明らかにする。また、表面処理を施さない試験片についても調査を行い、強度出現メカニズムを検討する。想定する劣化要素は、1)水分や腐食の影響による界面接着強度の低下、2)熱負荷による材料表面の酸化膜の剥離、3)熱負荷時の異種材料の線膨張係数差による応力剥離の3つがある。1)、2)については、①-3b で影響確認が進められている。そこで、3)について、アルミと鉄の線膨張差で発生する熱伸びの影響を明らかにするとともに、界面接着力の低下に寄与する表面処理効果を区分して評価する。

#### 【実施内容】

本研究開発テーマにおいて検討した線膨張係数差による影響を確認する為の冷熱サイクル試験を決定した。本研究では、ハイテン 980 材と A6016 材を接着してせん断引張試験片を作製して冷熱サイクル試験を実施し、接着強度の劣化挙動を調査する。冷熱サイクル試験は、短縮冷熱サイクル試験の条件 A を基準に、条件 A に対して湿度無しの条件 B、条件 A と B に高温（85℃）を与えた条件 C、D で実施した。

試験片は、1.2 mm 厚のハイテン 980 材と 1.0 mm 厚の A6016 材を接着剤にて接着して、JIS K 6850 に準拠したせん断試験片を作製した。接着剤は、①-3b で評価が進められている構造用接着剤（接着剤  $\beta$ ）と同じ種類を準備した。接着部の厚さを調整するために、接着剤に 0.25 mm 径のジルコニアビーズを添加した。また、本研究では、接着強度の劣化挙動に及ぼす表面処理の影響を調査するために、表面処理試験片を準備した。表面処理は A6016 材への表面処理に着目し、鋼同種板材の接着接合については、ハイテン 980 材への表面処理は施さない仕様（Blank 材）を準備した。接着のための焼付までの処理として、次の工程を実施した。

- 1.脱脂：アルカリ脱脂（120 s）→水洗（30 s）
- 2.接着剤塗布
- 3.脱脂：アルカリ脱脂（120 s）→水洗（30 s）
- 4.化成：Ti エッチング／Zr 系化成（120 s）→水洗（30 s）→RO 水洗（30 s）
- 5.電着：RO 水洗（30 s）→カチオン電着（180 s）
- 6.焼付

冷熱サイクル試験は、線膨張係数差で発生する熱伸びの影響を確認する為、試験片を治具に固定した状態で 15 および 50 サイクル実施した。固定間距離は事前試験を行って歪と荷重の関係を確認し、試験片を塑性変形させる事なく、接着接合部に繰り返し熱負荷を与えられる固定間距離を設定した。

冷熱サイクル試験後の試験片について、引張せん断試験を実施して接着部の強度を評価した。引張せん断試験は、インストロン製万能試験機を用いて、クロスヘッド速度 5 mm/min として実施した。なお、試験時の曲げ変形の影響を抑制するために、A6016 にはハイテン 980 を、ハイテン 980 には A6016 をあて板として貼り合わせて、引張試験片のつかみ部における試験片厚さを揃えるようにした。さらに、引張せん断試験後の破面を観察して、破壊モードを調査した。

1)水分や腐食の影響による界面接着強度の低下、2)熱負荷による材料表面の酸化膜の剥離、3)熱負荷時の異種材料の線膨張係数差による応力剥離影響が接着強度低下に影響するものと思われたため、短縮冷熱サイクル試験の条件 A を基準に、条件 A に対して湿度無しの条件 B、条件 A と B に高温（85℃）を与えた条件 C、D の結果を比較した。その結果、接着強度の低下に対しては材料の線膨張係数差はそれほど大きく影響していなく、主に高温高湿条件で強度が低下しやすくなることを確認した。

### ①-3d ISMA 開発接着剤を用いた接着剤仕様の最適化【東工大・佐藤教授】

#### 【目的】

テーマ番号 53 で開発された接着剤および使用されている接着剤を用い、本研究テーマ内で検討している表面処理適用材料との組み合わせにおける最適防錆仕様の確認を行った。界面強度は最も重要な因子のひとつであり、表面処理は界面強度に対して大きな影響を有している。また、過去の研究から耐腐食および耐久性の向上において化成処理が有効であると報告されている。そこで本研究ではアルミ板に Ti コートの化成処理を施して接着接合強度の向上を調査した。

#### 【接着接合部の湿熱耐性評価】

本項目では、テーマ番号 53 で開発した高じん性エポキシ接着剤、参照用の産総研標準エポキシ接着剤、並びに市販接着剤を用いてアルミ合金を接合し、その湿熱劣化による強度低下を測定した。アルミ合金の接着前表面処理に関しては、酸洗い、サンドブラスト、チタン処理、酸洗いの後にチタン処理を施したものを用い、両者の耐久性の違いを実験的に調べた。

本試験にはテーマ番号 53 で開発した特殊な方法を用いた。本試験法では DCB 試験片を用い、これを Spring-loaded jig に取り付け、接着部を温水浸漬することにより、接着部にき裂を成長させる。また、この時の荷重からモード I 破壊靱性値

( $G_{IC}$ ) の変化を求める。 $G_{IC}$  はき裂の成長とともに減少し、最終的にはある値に収束する。本実験ではこの下限値を求めた。Ti コートは初期には高い  $G_{IC}$  を見せるものの、時間の経過とともに酸洗いと同等か、それより低い値を示した。一方、酸洗いの後にチタン処理を施したものは、特に 63°C で極めて高い  $G_{IC}$  を示しており、かつ長時間に渡りその値を維持している。すなわち、高い耐久性を有していると言える。

#### 【化成処理 (Ti コート) 表面処理の影響の確認】

供試材は CTBN 配合エポキシ系接着剤および表面を化成処理により Ti コートした A6061-T6 被着体を採用した。Ti コート厚みは薄い順に A,B および C の 3 水準を準備した。本試験では Open DCB 試験片を用いて水分劣化を加速して界面の強度評価を実施した。被着体に厚さ 0.15mm の接着剤を貼り付け 63°C 温水に 3h 浸漬した。この条件は界面強度にもっとも厳しいことがわかっている [https://doi.org/10.1080/00218464.2022.2074295]。これら 2 枚をシアノアクリレートで貼り合せて  $G_{IC}$  を測定し、破面を観察した。

いずれの Ti コートも 3h の浸漬で大きく  $G_{IC}$  が低下し、未浸漬の試験片に対してその値は 1/4 程度であった。破面を見ると、いずれも金属面が露出して界面破壊を発生していた。金属露出部を偏光顕微鏡で観察すると、本接着剤の残滓は白色に発光するので確認できるが、この部分にはこの残留はみとめられなかった。また、表面にスジ状の Ti コートが確認され、反対側の被着体から移行したことがわかる。このように剥離はアルミの地金と Ti コート層間で生じていることが分かった。

確認のため破面の EDS 分析を実施した。金属側は面では Ti の検出割合は 0 であったが、接着剤側では Ti が相当量検出された。したがって、試験片は Ti 層から破壊し Ti 層と金属の接合強度が全体の強度を支配しているといえる。

### ①-3e 実車回収パーツの腐食状況調査【本田技研工業】

#### 【目的】

スウェーデン市場回収車を対象に異種材料組み合わせにより構成されている部品における腐食部位の評価を行った。評価部位の防錆仕様や腐食の状況を評価観察することで実際に起きているガルバニック腐食の状況を理解する。得られたデータを参考にガルバニック腐食のリスクカテゴリ分類の評価に活用した。

#### 【実施内容】

スウェーデン市場回収車の異種材料組み合わせと各部品の腐食状況をまとめた。市場回収車の解析対象部位は異種材料組み合わせがよく使用されるフード及びその周辺部品とし、異種材料における腐食挙動を明確にするため、同種材料が使用されている市場回収車も解析対象に含めた。解析対象部位のうち、フード/フードヒンジ接合面において腐食発生が確認された。異種材料組み合わせにおいては、鋼板の腐食由来と考えられる赤褐色の腐食生成物が確認できたが、同種材料組み合わせにおいては、めっき鋼板由来と考えられる白色の腐食生成物が確認された。

材料種の組み合わせによる腐食状況の差異を解析するために、本研究では、①防錆

仕様の解析、②腐食状態の解析をそれぞれ実施した。①防錆仕様の解析においては、市場回収車に使用されている基材材料の組成、表面処理の解析を行うことで、②腐食状態の解析に必要な前提条件の把握を行った。②腐食状態の解析においては、①防錆仕様の解析の結果を踏まえたうえで、異種材料組み合わせと同種材料組み合わせにおける腐食生成物、腐食進行形態、そして腐食量の差異を解析した。これらの解析を通して、ガルバニック腐食の腐食メカニズム及び腐食促進度の把握を行うことで、異種材料組み合わせによる腐食リスクの尺度とした。

#### 【解析スケジュールについて】

防錆仕様の解析データを7月中旬までに取得し、腐食状況の解析を8月初旬に完了できるように試験の推進を行う。また、8月以降はガルバニック腐食のリスクカテゴリ分類に必要な試験を、別途テーマ内での協議の上で推進する。

### ①-3f 最新防錆仕様の調査【日本パーカライジング・NIMS】

#### 【目的】

実車に適用されている異種材料構成部位における最新防錆仕様の調査を実施し、実際に適用されている防錆仕様を参考にガルバニック腐食のリスクカテゴリ分類の参考指標として活用する。

#### 【調査対象】

欧州 OEM の最新モデルのうち、マルチマテリアル材料にて構成されている車種として BMW 社製 iX50 を選定した。以下に実施する調査条件を示す。2022 年 7 月末に調査を開始し、8 月末に中間状況の確認を行った。異種材料の組み合わせ評価部位を決定し、防錆仕様の調査を行った。

#### 1. 材料種調査

対象とする部位の材料組合せは、鉄鋼材料／アルミニウム合金材料の組合せおよび亜鉛めっき材料／アルミニウム合金材料の組合せに加え、樹脂・炭素繊維材料／鉄鋼材料、樹脂・炭素繊維材料／亜鉛めっき合金材料、樹脂・炭素繊維材料／アルミニウム合金材料とした。また、それぞれの組合せの内、鋼板材料（鉄鋼材料および亜鉛めっき材料を含む）について 5 部品、アルミニウム合金材料について 10 部品、樹脂・炭素繊維材料について 5 部品の調査を行った。

#### 2. 表面処理の調査

材料調査に用いた部品のうち、代表的な 5 部品について調査を行う。

#### 3. 異種材料間のクリアランス調査

異種材料部位の合計 9 か所について、クリアランス調査を行う。

#### 4. 接着界面の仕様調査

接着剤の種類および厚さ、シーラーの塗工状態について、接着剤は 5 か所、シーラー



は 2 か所について接着界面の仕様調査を行う。

#### 5. 締結または接着方法調査

異材接合部における締結方法または接着方法について、合計 9 か所の調査を行う。

#### 6. 締結部の防錆仕様調査

異材締結部における材料種や締結材料の表面処理方法について、合計 5 か所の防錆仕様調査を行う。

#### 防食仕様の調査結果

被水が懸念される部位には部位別に加減することなく防食技術が適用されており、鉄鋼材料は亜鉛めっきが適用され、Zr 系の化成処理が施されていた。また、異種材料接触を防止するために被水が懸念される板合わせ内部には接着剤が用いられ、開口部はシーラーで浸水を防止していた。締結部に用いられていたピアッシング材やスクリュー材にもめっき等の防錆技術が適用されていた。

## ②「異種材料接合材の腐食機構の解明と腐食モニタリング・評価法の研究開発」

### ②-1 異種材料接合セルによる腐食モニタリング法の開発【東工大・多田教授】

模擬的に異種材料接触した電気化学セルを用い、2つの材料間に微小電圧を印加することで電気化学インピーダンス（EIS）測定を一定時間ごとに行い、薄水膜付着下におけるガルバニック腐食挙動を連続的にモニタリングした。モニタリングにより得られた EIS 結果を解析し、異種材料接合材のガルバニック腐食速度を評価する手法を確立した。

Al は Fe に比べ卑な金属であり、これら異種金属が接合した材料が腐食環境におかれると、一般には Al がアノード、Fe がカソードとなるガルバニック腐食が進行する。このとき、この材料の腐食劣化は、Al の耐食性と、Fe 上のカソード反応速度に主に依存すると考えられる。一般的に上記のような異種金属接合部材が使用される環境としては大気環境であり、その材料表面には雨水や結露によって生じる薄い水膜下で生じる。このような大気腐食環境では、Fe 上のカソード反応となる溶存酸素の還元反応速度が全体の腐食反応速度を支配することが想定され、その速度は表面の水膜厚さに強く影響される。そこで、2019 年度では、Al/Fe 接合材の大気環境下におけるガルバニック腐食挙動の評価法を検討するために、Al-Mg-Si 系 Al 合金 A6016 と 980 MPa 級超高張力鋼からなる異種金属接合材を模擬した電気化学セルを使って、ガルバニック腐食試験を大気腐食模擬環境下で実施し、ガルバニック腐食機構および速度を評価する手法の開発に挑戦した。

また、異種金属接合部では、製造プロセスおよび接合法に関係して、材料間にわずかな空間（以下”すきま”）が形成されると予想される。上記したように、すきま部においては、Fe 上のカソード反応に関わる酸素や Al 合金側で溶出した金属イオンの物質輸送が制限されることになる。このような物質輸送過程の制限が、すきま構造を有する異種金属接合部のガルバニック腐食挙動に影響する可能性がある。そこで、すきま構造を有する異種金属接合部材のガルバニック腐食挙動を評価するためのすきま腐食モニタリングセルを考案し、その適用性について検討した。

### 実験 1：大気腐食模擬環境における A6016/SPCC980 対のガルバニック腐食速度の評価

#### 【実験方法】

使用した Al 合金は Al-Mg-Si 系 A6016-T4 (Al-alloy) と鉄鋼材料は 980MPa 級の冷間圧延鋼板 (SPCC980、HSS) であった。それぞれの材料を 10 mm x 10 mm のサイズに切断し、500 um の距離を離してエポキシ樹脂に埋め込んで A6016/SPCC980 ガルバニック腐食評価セルを作製した。腐食試験対は、SiC 研磨紙で研磨し、エタノールと超純水中で超音波洗浄を実施して用いた。

ガルバニック腐食試験は、恒温恒湿槽中で実施した。ガルバニック腐食対表面に NaCl 溶液もしくは MgCl<sub>2</sub> 溶液を付与し、A6016、SPCC980 間を電氣的に短絡して、その間に流れるガルバニック電流と腐食対の腐食電位を測定した。このとき、腐食対表面の水膜厚さは、はじめに付与する溶液の濃度を調整することで、25℃、95%RH の環境で平衡する電解質濃度になるときに、25~100 um となるように調整した。そ

の他、分極測定、電気化学インピーダンス (EIS) 測定を実施した。電気化学インピーダンス測定は、周波数範囲 20 kHz~10 mHz、交流振幅 10 mV であった。

### 【実験結果と考察】

2 M NaCl 液薄膜下における A6016/SPCC980 対のガルバニック腐食試験結果について、腐食電位とガルバニック電流の時間変化を確認した。腐食電位は-0.7 V (SSE) 付近にあり、水膜厚さにはほとんど依存しなかった。一方、ガルバニック電流は水膜厚さが減少するにつれ増加し、A6016 の腐食が促進されることがわかった。これは、SPCC980 上のカソード反応である溶存酸素の還元反応速度が水膜厚さの減少につれて増加したためであるといえる。同じ塩化物イオン濃度とした 1 M MgCl<sub>2</sub> 液薄膜下において同じガルバニック対について測定された腐食電位とガルバニック電流の変化を確認した。腐食電位は水膜厚さに依存していなかった。ただ、ガルバニック電流については、25 μm において最も小さくなっているが、100 μm が 50 μm よりも小さくなっており、MgCl<sub>2</sub> 溶液についても NaCl と同様のガルバニック腐食挙動が観察された。

以上のことから、大気腐食環境において A6016 が SPCC980 と接合した場合、A6016 上で局部腐食が生じ、水膜厚さの減少にともなう鋼板上でのカソード反応の増加によって A6016 の腐食が促進されることが示された。

次に、A6016/SPCC980 対のガルバニック腐食過程において、NaCl 液膜下で EIS 測定を行った。高周波数側に容量性半円がみられ、水膜厚さが減少するにつれ、その半円の大きさが減少することがわかった。すなわち、ガルバニック腐食の反応抵抗が小さくなっている。MgCl<sub>2</sub> 液薄膜下での EIS 結果も NaCl と同様の挙動となった。

ここで、この容量性半円発現の物理的意味を検討するために、ガルバニック腐食が進行しているときに測定される電気化学インピーダンスを電氣的等価回路によって検討した。Al 合金側で Al やその他合金成分のアノード溶解が、一方鋼板側で溶存酸素の還元反応が生じているといえる。このとき、それぞれの金属界面では、電気化学反応による反応抵抗成分、物質輸送に関わるインピーダンス、界面の電気二重層に関する容量成分が結合した電氣的等価回路により表すことができるといえる。ここで短絡された A6016/SPCC980 対の電気化学インピーダンス挙動を検討するために、このガルバニック対の腐食電位とほぼ同じ電位 (-0.7 V vs. SSE) において、Al 合金 (A6061) および高張力鋼 (SPCC1180) を三電極式の電気化学法により定電位分極し、そのときインピーダンスを測定し、その挙動と比較した。Al 合金では、比較的小さい容量性半円が、一方鋼板側では大きな容量性半円が観察された。Al 合金側の容量性半円の大きさと、測定された高周波数側の容量性半円の大きさ ( $Z_{0.3}$ : 0.3 Hz におけるインピーダンス) を比較した結果、試験時間に対してほぼ同じ値となった。このことは、A6016/SPCC980 対のガルバニック腐食系で測定された高周波数側の容量性半円は、Al のアノード反応の電荷移動抵抗を表すといえ、この抵抗の逆数が腐食速度の指標となるため、ガルバニック腐食系の電気化学インピーダンス測定から Al 合金の平均溶解速度が測定できるものを示している。この平均溶解速度は、水膜厚さの減少とともに大きくなっており、水膜厚さの減少とともに鋼板上でのカソード反応である溶存酸素の還元反応速度が増加し、それにもなつて Al 合金の溶解が促進されることが示

された。

以上のことから、A6016/SPCC980 対のガルバニック腐食状態において、電気化学インピーダンスを連続的に測定し、高周波数側の容量性半円の大きさから腐食反応速度を検討することが可能であるといえる。また、電気化学インピーダンス挙動から腐食機構についても評価することができたといえる。

## 実験 2：大気腐食模擬環境における A6016/SPCC980 対のガルバニックすきま腐食挙動評価

### 【実験方法】

使用した Al 合金は Al-Mg-Si 系 A6016-T4 (Al-alloy) と鉄鋼材料は 980MPa 級の冷間圧延鋼板 (SPCC980、HSS) であった。ガルバニック腐食セルの作製方法は実験 1 と同様である。ただし、ガルバニック腐食に対するすきま構造の影響を調査するために、鋼板側または Al 合金側に液膜厚さを制限するアクリル製のプレートが付与した。

ガルバニック腐食試験は恒温恒湿槽中で実施した。ガルバニック腐食対表面に NaCl 溶液を付与し、A6016、SPCC980 間を電氣的に短絡して、その間に流れるガルバニック電流と腐食対の腐食電位を測定した。このとき、腐食対表面の水膜厚さは、はじめに付与する溶液の濃度を調整することで、25°C、95%RH の環境で平衡する電解質濃度である 2 M となるときに、100  $\mu\text{m}$  となるように調整した。その他、分極測定、電気化学インピーダンス (EIS) 測定を実施した。電気化学インピーダンス測定は、周波数範囲 20 kHz~10 mHz、交流振幅 10 mV であった。

### 【実験結果と考察】

水膜厚さ 100  $\mu\text{m}$  の条件において並列に設置された鋼板および Al 合金において、板合わせによるすき間形成の影響を確認した。鋼板上にすき間が形成された Case 1 および Al 合金材にすき間が形成された Case 2 を比較した。比較のため、すきま構造を有しない条件で測定された腐食電位およびガルバニック電流変化も確認した。腐食電位は、Case 1、Case 2 いずれの状態でもすきま構造がないときと同じであるが、ガルバニック電流は Case 1 において非常に小さくなっていることがわかる。すなわち、鋼板上にすきま構造を形成すると、水膜上部の大気からの酸素溶解反応を抑制してしまうことで、酸素の拡散流束が小さくなるといえる。これによってガルバニック電流が小さくなったといえる。ただ腐食電位については、Al 合金側の電位が孔食電位付近にあると推察され、鋼板上のカソード反応の大きさにはよらないため、すきま形成の様式に依存せず一定となったといえる。

電気化学インピーダンス変化からわかるように、高周波数側の容量性半円の大きさが Case2 に比べ Case 1 の方が大きくなっている。このことは、鋼板上部にすきま構造を有する場合、Al 合金の平均溶解速度が小さくなっていることを示している。すなわち、すきま構造を形成したことによって、溶存酸素の還元反応が抑制され、それによって Al 合金の溶解速度が減少したことが示された。

以上から、本研究で作製したガルバニックすきま腐食評価セルにおいて電気化学インピーダンス法により連続的に Al 合金の腐食速度をモニタリングできることが示さ

れた。

### 実験 3：乾湿繰り返し腐食環境における A6016/SPCC980 対のガルバニック腐食速度の評価

#### 【実験方法】

使用した Al 合金は Al-Mg-Si 系 A6016-T4 (Al-alloy, AA) と鉄鋼材料は 980 MPa 級の冷間圧延鋼板 (SPCC980、HSS) であった。それぞれの材料を 10 mm x 10 mm のサイズに切断し、500  $\mu\text{m}$  の距離を離してエポキシ樹脂に埋め込んで A6016/SPCC980 ガルバニック腐食評価セルを作製した。腐食試験対は、SiC 研磨紙で研磨し、エタノールと超純水中で超音波洗浄を実施して用いた。

乾湿繰り返し環境におけるガルバニック腐食試験は、恒温恒湿槽中で実施した。ガルバニック腐食対表面に 2 M NaCl 溶液もしくは 1 M  $\text{MgCl}_2$  溶液を付与し、A6016、SPCC980 間を電氣的に短絡して、その間に流れるガルバニック電流と腐食対の腐食電位を測定した。このとき、腐食対表面の水膜厚さは、はじめに付与する溶液の濃度を調整することで、25°C、95%RH の環境で平衡する電解質濃度になるときに、100  $\mu\text{m}$  となるように調整した。その後、25°C一定のまま、湿度を 95%RH と 30%RH の間を 5%RH/h で繰り返し変化させた。電気化学インピーダンス測定は、交流振幅 10 mV、測定周波数 0.3 Hz で行い、腐食速度の指標となるインピーダンスのモニタリングを行った。またガルバニック電流および電位測定を行った。

#### 【実験結果と考察】

NaCl または  $\text{MgCl}_2$  液薄膜を付与した A6016/SPCC980 対を乾湿繰り返し腐食環境に暴露したときに測定された 0.3 Hz のインピーダンスの値と相対湿度変化との関係を確認した。NaCl を付着させた条件では、湿度が低いときにインピーダンスが高く、一方湿度が高いときにインピーダンスが低くなっている。2019 年度までの研究で、Al 合金/高張力鋼のガルバニック腐食試験では、0.3 Hz のインピーダンスの逆数が Al の腐食速度を示すことが明らかになっているが、この結果においても、このインピーダンスの変化から、高湿度側で液膜が形成し、腐食が促進されていることが明らかになった。NaCl の潮解湿度は 75%RH であり、それ以上には水膜が形成し、それ以下では水膜が形成していないため、このような腐食速度の変化を示したと考えられる。なお、 $\text{MgCl}_2$  を付与した場合は、この実験で用いた最低湿度が  $\text{MgCl}_2$  の潮解湿度付近であるため、付着させた  $\text{MgCl}_2$  が吸湿し、ずっと濡れている状態であったため、乾湿繰り返しに対して腐食速度がほぼ一定で推移したと考えられる。

次に同時に測定されたガルバニック電流(a)とカップル電位(b)との関係を NaCl および  $\text{MgCl}_2$  について確認した。これらの結果は、先の  $Z_{0.3}$  の逆数が指標として対応する腐食速度と乾湿繰り返しに対して同様の変化を示した。すなわち、付着させた塩が潮解し、ガルバニック対表面に水膜が形成している場合、ガルバニック電流が大きく、カップル電位が低い状況となり、腐食が促進され、一方水膜が形成していないときはガルバニック電流がほぼ 0 で、腐食が進行しない状態である。さらに、付着水膜の塩濃度が高い条件であり、Al 合金側がアノードと作用していることがガルバニック電流

変化、およびその極性からも明らかである。

以上のことから、乾湿繰り返し腐食環境においても Al 合金/高張力鋼のガルバニック腐食のモニタリングが、0.3 Hz で測定されたインピーダンス値を使って行えることが明確となった。

#### 実験 4：大気腐食模擬環境における A6016/SPCC980 対のガルバニックすきま腐食挙動評価

##### 【実験方法】

実験に使用した Al 合金は Al-Mg-Si 系 A6016-T4 (Al-alloy、AA)、鉄鋼材料は 980 MPa 級の冷間圧延鋼板 (SPCC980、HSS) であった。10 mm 角に切断した試料をエポキシ樹脂に埋め込み、表面を耐水研磨紙で #2000 番まで研磨したものを準備した。また、すきま腐食試験セルを作成し、すきま距離を 100 mm とし、Al 合金 (AA) と高張力鋼 (HSS) とを対向させるように固定し、それを恒温恒湿槽内に設置した。

乾湿繰り返しガルバニックすきま腐食試験は、温度湿度をコントロールして実施した。試験溶液には、5% NaCl を初期に付与し、それを 25°C で 2 h 保持させた後溶液をポンプによって排出した。さらに、60°C、35%RH で 3 h 乾燥させ、続いて 40°C、95%RH の環境に 3 h 保持した。これを 1 サイクルとして合計 14 サイクル試験した。この間、交流インピーダンス測定を実施した。測定周波数は 1 kHz と 10 mHz、交流振幅は 10 mV であった。

##### 【実験結果と考察】

ガルバニックすきま腐食試験で測定された特定周波数 (1 kHz および 0.3 Hz) のインピーダンスの逆数の経時変化を確認した。ここでは、0.3 Hz および 1 kHz で測定されたインピーダンス  $Z_{0.3\text{Hz}}$  および  $Z_{1\text{kHz}}$  の逆数は、それぞれ腐食速度と溶液のコンダクタンスに対応している。水膜が形成して溶液のコンダクタンスが大きくなると  $1/Z_{0.3\text{Hz}}$  が大きくなっていることがわかる。すなわち、水膜が形成することで腐食速度が増加している。また、乾湿サイクルの経過にともなって徐々に溶液のコンダクタンスおよび腐食速度が減少していることが示された。乾湿サイクルにともなうインピーダンス変化の詳細を抽出して示したところ、バルク水中に浸漬されている時の腐食速度は比較的遅く、乾燥過程で温度が高くなることで腐食速度が増加している。また、乾燥直前には腐食速度がピークを示していた。また、吸湿過程でも温度が高く、腐食速度が大きくなることがわかった。

#### ②-2 異種材料接合部の塗膜劣化評価法の開発【東工大・多田教授】

##### 実験 1：化成および有機塗膜を付与した A6016/SPCC980 対のガルバニック腐食挙動評価

##### 【実験方法】

実験に使用した Al 合金は Al-Mg-Si 系 A6016-T4 (Al-alloy、AA)、鉄鋼材料は 980 MPa 級の冷間圧延鋼板 (SPCC980、HSS) であった。実験 1 および 2 と同様に、10

mm 角に切断した試料をエポキシ樹脂に埋め込み、表面を耐水研磨紙で # 2000 番まで研磨したものを準備し、それらを  $ZrO_2$  または  $Zn_3(PO_4)_2$  による化成処理および有機高分子被覆をおこなった。この試料に 100  $\mu m$  の 2 M NaCl を付与して腐食挙動を調査した。

別の実験として、AA と HSS の板材にそれぞれ有機高分子の被覆を施し、60°C の 2 M NaCl 中において腐食試験を行った。3 電極法によって電気化学測定を実施した。また、被覆の劣化過程を調査するためにセルを用いて、3 電極法によって電気化学インピーダンス計測を実施した。試験後、試料を取り出し、セルに再びセットして、電気化学インピーダンスをそれぞれの試料に対して計測した。測定周波数は 20 kHz ~ 10 mHz、交流振幅は 100 mV であった。

### 【実験結果】

化成処理層については、化成処理した試料の表面観察から、 $ZrO_2$  および  $Zn_3(PO_4)_2$  のいずれの化成処理についても均一に AA および HSS 表面に形成できていた。また、有機高分子被覆についても、断面 SEM 写真から均一で 30 ミクロンぐらいの高分子膜が均一に形成されていた。

化成処理をした AA/HSS について測定されたガルバニック電流、カップル電流の経時変化を確認した。カップル電位は、化成処理の違いによらず差異はなかった。ガルバニック電流は、化成処理をしていない場合に比べ、化成処理によって減少したが、化成皮膜の違いによる電流の差異は小さかった。化成処理した AA/HSS 対のガルバニック腐食過程における電気化学インピーダンス挙動の経時変化を確認した。浸漬時間によらずほぼ同じ挙動を示した。また、化成皮膜の種類によらずインピーダンス挙動は同じであった。フィッティングにより求めた電荷移動抵抗  $R_{ct}$  の値についても大きな差はみられず、ガルバニック電流の挙動と同じであった。

ある化成処理に対して有機高分子被覆した AA および HSS 試料の電気化学インピーダンスについて経時変化を測定した。試料の表裏で厚さが異なっていたため、両面で測定した。その結果、被覆が厚い方では、インピーダンスが  $10^8 \Omega$  と極めて高かったが、被覆が薄い方ではインピーダンスが低くなっていた。インピーダンスの低い方では、表面に局所的な腐食が観察された。これらの挙動は、AA および HSS いずれにも共通してみられた。すなわち、化成および有機高分子被覆したサンプルの腐食特性は被覆層の良否に依存しているといえる。

化成処理および有機高分子被覆した A6016/SPC980 対のガルバニック腐食過程における各材料の電気化学インピーダンスを測定した。その結果、いずれについても試験後数時間で被覆が劣化し、それによってインピーダンスが減少することがわかった。

以上から、化成および化成に有機高分子被覆を施した A6016/SPC980 対のガルバニック腐食過程において、腐食挙動を電気化学インピーダンス法によって評価できることが示された。

### ③-3 異種材料接合部の腐食機構の解明【東工大・多田教授】

#### 実験 1: 大気腐食模擬環境における A6061SPCC1180 対のガルバニック腐食速度の評価

##### 【実験方法】

使用した Al 合金は Al-Mg-Si 系 AA6061-T6 (Al-alloy) と鉄鋼材料は 1180 MPa 級の冷間圧延鋼板 (SPCC1180、HSS) であった。それぞれの材料を 10 mm x 10 mm のサイズに切断し、500  $\mu\text{m}$  の距離を離してエポキシ樹脂に埋め込んで AA/HSS ガルバニック腐食評価セルを作製した。腐食試験対は、SiC 研磨紙で研磨し、エタノールと超純水中で超音波洗浄を実施して用いた。

ガルバニック腐食試験は、恒温恒湿槽中で実施した。ガルバニック腐食対表面に NaCl 溶液もしくは  $\text{MgCl}_2$  溶液を付与し、AA、HSS 間を電氣的に短絡して、その間に流れるガルバニック電流と腐食対の腐食電位を測定した。このとき、腐食対表面の水膜厚さは、はじめに付与する溶液の濃度を調整することで、25°C、95%RH の環境で平衡する電解質濃度になるときに、25~100  $\mu\text{m}$  となるように調整した。その他、分極測定、電気化学インピーダンス (EIS) 測定を実施した。電気化学インピーダンス測定は、周波数範囲 20 kHz~10 mHz、交流振幅 10 mV であった。

##### 【実験結果と考察】

2 M NaCl 液薄膜下における AA6061/SPCC1180 対のガルバニック腐食試験結果について、腐食電位とガルバニック電流の時間変化を確認した。液膜厚さは 25~100  $\mu\text{m}$  まで変化させている。腐食電位は -0.72 V (SSE) 付近にあり、水膜厚さにはほとんど依存しなかった。一方、ガルバニック電流は水膜厚さが減少するにつれ増加し、A6061 の腐食が促進されることがわかった。これは、HSS 上のカソード反応である溶存酸素の還元反応速度が水膜厚さの減少につれて増加したためであるといえる。72 h 後の表面の腐食状態から外観にて濃い灰色の部分は局所的に腐食した部分 (ピット) であり、薄い灰色の部分は水酸化アルミニウム ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) で覆われた領域である。AA 上でピットが均一に分布しており、ガルバニック電流が均一に分布していることを示している。

ガルバニック電流と腐食電位の水膜厚さ依存性を検討するために、AA (AA6061) のアノード分極曲線と HSS (SPCC1180) のカソード分極曲線を測定した。AA の腐食電位は、約 -0.79~-0.81 V であり、HSS の腐食電位より卑であった。AA のアノード分極挙動は、いずれの水膜厚さにおいても不動態的な挙動を示し、高電位側で孔食発生、成長による急激な電流の増加が見られた。孔食電位は、バルク水中の AA/HSS カップルの腐食電位と同じであるが、液膜下における孔食電位は、バルク溶液の場合よりも正になり、水膜厚さの減少に伴い貴側に増加した。これは、IR ドロップによる効果であるといえる。これらの結果は、AA が単独で腐食すれば、この環境では不動態化するが、HSS とガルバニック腐食状況であれば、AA は孔食発生することを示すものである。

HSS のカソード分極曲線は、この電位範囲において溶存酸素の還元反応 (ORR) に起因する明確な限界電流領域を示した。よって、限界電流密度は液膜厚さに反比例し



た。また、 $-0.96\text{ V}$  以下では、 $\text{H}_2\text{O}$  の還元による電流増加が見られた。

2 M NaCl 溶液中で測定された AA(AA6061)/HSS(SPCC1180) 対の電位化学インピーダンス (EIS) 挙動を確認した。20 kHz から 0.3 Hz の周波数範囲と 0.1 Hz 以下の周波数範囲に 2 つの時定数が現れた。試験中の腐食電位は  $-0.72\text{ V(SSE)}$  であり、AA 側がアノード、HSS 側がカソードとして腐食が進行し、AA/HSS 間の電氣的等価回路は AA と HSS の  $-0.72\text{ V}$  におけるインピーダンスの和になるといえる。ただし、高周波数側、低周波数側の時定数が AA、HSS どちらのインピーダンスに対応しているかを判断することは困難であるといえる。そこで、ガルバニック腐食が進行している、 $-0.72\text{ V}$  に分極した状態で、AA および HSS の単独の EIS 挙動を測定した。

AA は半円を描き、0.1 Hz 以下では拡散インピーダンスと思われるナイキストプロットとなった。 $-0.72\text{ V}$  では、孔食部における Al のアノード溶解反応と、ピット内のカソード反応および不動態表面での酸素還元反応が生じているといえる。ガルバニック腐食状態では、アルミニウムの溶解が主反応となるため電荷移動抵抗  $R_{ct}(\text{AA})$  は Al 溶解の  $R_{ct}$  に対応しているといえる。 $W_{AA}$  はワールブルグインピーダンスで  $\text{Al}^{3+}$  の拡散に起因するであるといえる。 $C_{dl}(\text{AA})$  は電気二重層のキャパシタンスを示す。

一方、HSS では、大きな半円を示した。 $-0.72\text{ V}$  での HSS 表面は、Fe のアノード溶解反応、ORR と水の還元の両方があるカソード反応となる。インピーダンス測定下における電位摂動に対して、ORR は拡散律速状態であるので応答せず、ナイキストプロット中に ORR の挙動は現れないといえる。よって、HSS の EIS 挙動  $R_{ct}(\text{HSS})$  は、アノード反応の  $R_{ct}$  と水分解のカソード反応の  $R_{ct}$  が並列結合した抵抗成分となっている。 $R_{ct}(\text{HSS})$  が低周波数極限インピーダンスと対応するとき、定常分極曲線における接線の傾きとなる。

$R_{ct}(\text{HSS})$  の電位依存性を調査するために、種々の電位で HSS の EIS 測定を行った。すべての電位において EIS は円弧を描き、その半径から  $R_{ct}$  を見積もった結果、約  $-0.8\text{ V}$  付近に最大値を示した。よって、ガルバニック腐食が進行している状況においては、腐食電位が  $-0.72\text{ V}$  であったため、 $R_{ct}$  の最大値を与える電位より 80 mV 貴であり、本研究のように AA と HSS の面積比が 1 : 1 のガルバニック腐食で生じる HSS の  $R_{ct}(\text{HSS})$  は、鉄のアノード溶解反応で決まるものであるといえる。

最終的に、AA(AA6061)/HSS(SPCC1180) 対ガルバニック腐食状態における電氣的等価回路を考えた。しかし、HSS のインピーダンスは AA の拡散のインピーダンスよりも大きいため、 $W_{AA}$  は無視することができる。 $R_{ct}(\text{AA})$  の値は、 $-0.72\text{ V}$  において  $8\text{ k}\Omega\text{ cm}^2$  であり、AA/HSS 対の  $R_{ct}$  の値 ( $6.5\text{ k}\Omega\text{ cm}^2$ ) にほぼ一致した。AA については、CPE の値もおおよそ良い一致を示した。一方、HSS では、ガルバニック腐食でのフィッティング値が単独の HSS での測定値と大きく乖離し、小さい値を示していた。これは、ガルバニック腐食過程において、AA 側で発生したプロトンによる HSS 側表面 pH 上昇の抑制によって、HSS 側のインピーダンスが低下したことが原因の一つとして考えられる。この点については、今後の検討課題である。

以上の結果から、AA/HSS のガルバニック腐食過程では、高周波数側のインピーダンスから AA のアノード溶解の  $R_{ct}(\text{AA})$  を評価することができることがわかった。こ

の逆数は、AA の溶解速度に対応するため、EIS より AA/HSS 対のガルバニック腐食速度を評価できることとなる。今回では、0.3 Hz 程度より高い周波数での EIS 挙動がその評価に重要となる。この特性周波数を利用すれば、そのインピーダンス値がおおよそ  $R_{ct}(AA)$  に対応するため、ガルバニック腐食速度のモニタリングパラメータに利用できるといえる。

上記のような解析が、液薄膜下でのガルバニック腐食挙動にも応用できるかを検討した。一次の分布定数型電氣的等価回路（TML 型）にて各パラメータの関係は、

$$Z = \left( \frac{Z_w^*}{L} \right) \coth \gamma X_w + R_{sg}$$

$$\gamma = \left( \frac{R_S^*}{Z^*} \right)^{1/2}$$

$$Z_w^* = \left( R_S^* Z^* \right)^{1/2}$$

となる。これらの式より、 $\gamma$  が大きくなると、電流分布がより顕著になることを意味している。AA/HSS ガルバニック対に対して、 $Z^*$  をそれぞれ  $Z_{AA}^*$  と  $Z_{HSS}^*$  として表すことで、液薄膜下の電気化学インピーダンスの等価回路を構築した。

種々の液膜厚さの 2 M NaCl 中で測定された AA(AA6061)/HSS(SPCC1180) 対の EIS 結果を得た。2 つの時定数を持つ EIS 特性は、バルク溶液のそれと非常によく似ていた。また、いずれの液膜厚さにおいてもインピーダンスの時間的变化はほとんど見られなかった。また、いずれの水膜厚さについても、このインピーダンスは典型的な TML 型の挙動を示していた。電極表面上の電流分布は高周波数域の位相差  $\theta$  の変化で評価できるが、1 kHz 以上の高周波数域で、電流分布が生じていた。逆に 1 kHz 以下では、電流分布が一様であることを示している。

TML モデルによるフィッティング結果を確認したところ、実験結果に対して十分に良い一致を示した。そこで、各種パラメータを、カーブフィッティングにより決定した実験結果から、AA/HSS のガルバニック腐食では、液薄膜下でも比較的広い周波数範囲 (<1 kHz) で電流分布が均一となることがわかった。

AA のアノード溶解電流は、電位の指数関数であり、腐食電位における腐食速度  $i_{corr}$  は、以下の方程式で表される。 $k$  は比例定数である。

$$i_{corr} = \frac{k}{R_{ct}(AA)}$$

ここで、 $R_{ct}(AA)^{-1}$  は、AA のピット成長速度を表す指標として使用されている。 $R_{ct}(AA)^{-1}$  を液薄膜厚さに対してプロットしたところ、 $R_{ct}(AA)^{-1}$  は、液薄膜厚さの減少とともに大きくなっており、ピット成長速度が液膜の厚さの減少で促進されることを示

している。25 $\mu\text{m}$  の液薄膜におけるピットの平均成長速度は、100 $\mu\text{m}$  の膜の平均成長速度の 3 倍として推定された。これは、酸素の拡散が促進され、高純度アルミニウム基板上での酸素のカソード還元が増加したためである。これは、ガルバニック電流の液薄膜依存性と一致した。したがって、HSS の表面積を大きくすることで、AA の腐食速度が加速されることが予想される。また、0.3Hz におけるインピーダンスの逆数 ( $Z^{-1}_{0.3}$ ) をプロットしたところ、 $R^{-1}_{ct(AA)}$  と  $Z^{-1}_{0.3}$  とは、いずれの水膜厚さにおいても非常によく一致していることがわかる。AA/HSS 対の EIS 挙動から明らかなように、 $R_{ct(AA)}$  は 0.1~1 Hz の周波数範囲に現れることがわかる。以上の結果からも、液薄膜下においても、0.3 Hz の周波数におけるインピーダンスから腐食速度を評価できることが明らかになった。ただし、乾湿繰り返しのような環境が急速に変化するような状況では、特性周波数に限らず広い周波数範囲での測定が望ましいといえる。

AA6061-T6 (AA) と高張力鋼 (HSS) の 2 M NaCl 溶液中におけるガルバニック腐食挙動について、EIS 挙動により評価した結果、AA は 2 M NaCl 溶液中で不動態化し、同じ表面積を持つ HSS とのガルバニック腐食により孔食を起こすことが示された。AA の電荷移動抵抗はそれぞれ 1 Hz から 0.1Hz で観測された。溶液薄膜下のインピーダンスは、1 kHz 以上の高周波領域で電流分布が不均一になり、典型的な TML 的な挙動を示した。測定されたインピーダンスは、AA/溶液および HSS/溶液の界面に起因する 2 つの TML 回路の並列結合によってうまく説明されることがわかった。

## 実験 2: Al/Zn からなる接合部のガルバニック腐食機構の検討

### 【実験目的】

本研究では、これまで行ってきた AA/HSS ではなく、AA と Zn のガルバニック対におけるガルバニック腐食挙動を調べた。

### 【実験方法】

実験に用いた材料は、工業用純 Al の A1050 と純亜鉛 (純度 99.5%) である。これらを 1.5 cm  $\times$  1 cm の大きさに切断し、#2000 グリットの耐水 SiC ペーパーで研磨した。亜鉛の純度は 99.5% であった。金属とエポキシ樹脂の隙間腐食を防ぐため、カチオン電着塗装で厚さ 20  $\mu\text{m}$  にコーティングした。これらの材料をエポキシ樹脂に 0.5 mm の間隔をあけて埋設した。試験溶液には、脱イオン超純水と分析グレードの薬品で調製した 10 mM から 2 M の NaCl 水溶液を使用した。

ガルバニック電流と電位を測定するために、ゼロ抵抗電流計として機能させるポテンショスタットとデジタル電圧計を用いた。参照電極には、飽和 KCl 溶液に浸した Ag/AgCl 電極 (ESSE = +0.197 V (SHE)) をルギン・キャピラリーに接続して使用した。本論文で示す電位はすべてこの SSE を基準としている。ガルバニック腐食試験は、10 mM~2 M までの異なる濃度の NaCl 溶液中で、3 日間実施した。また、試験中に 30 分間隔で表面形状の変化をデジタルカメラで記録した。この際、腐食生成物の形成過程を明確に観察するために、ダイヤモンドペーストで 0.25  $\mu\text{m}$  まで研磨した試料を使用した。また、実験終了時に光学顕微鏡で顕微鏡写真を撮影した。

ガルバニック腐食試験前後において、A1050 および Zn の分極曲線を測定した。対

極には白金、参照電極には SSE を用いた。ガルバニック腐食試験後に分極曲線を測定する場合は、Zn と AA1050 とを電気化学セルから出さずに短絡を開放し、それぞれの分極曲線を測定した。

### 【実験結果と考察】

試験溶液に 72 時間浸漬したときのカップル電位とガルバニック電流の過渡変化を確認した。NaCl 濃度の増加とともにカップル電位が卑な電位にシフトしている。カップル電位は、試験初期を除き、いずれの NaCl 濃度においても測定終了までほぼ一定の値を示した。一方、ガルバニック電流は、浸漬初期において NaCl 濃度に依存し、大きく値が変化した。すなわち、NaCl 濃度が高い場合は、初期に大きなガルバニック電流が流れたが、最終的には 1 mA 程度に低下した。その他の濃度についても、ガルバニック電流は時間とともに減少し、最終的には 1 mA 程度となった。後の表面観察からもわかる様に、低濃度 NaCl の場合は、Al 上で不動態化するとともに、s 酸素還元反応(ORR)の電流が小さいこと、Zn 上では自己腐食に近い状態となっているためであるといえる。ガルバニック対のカップル電位から考えると、A1050 はカソード分極されている状況にはあるが、カソード電流自体が小さいことがこのようなガルバニック電流の原因となったといえる。一方、高 NaCl 濃度の場合では、浸漬初期において、Al 表面で水素発生による気泡が観察されており、Al 表面において、孔食成長とともに食孔内での水素発生反応が生じているといえる。この状況では、Al 側のアノード反応も大きくなり、ガルバニック電流から考えると Zn 側、Al 側いずれも自己腐食の状況となっているといえる。しかし、浸漬時間が経過するにつれ、水素発生反応が徐々に抑制されていることがわかった。

ガルバニック腐食試験における腐食形態変化を考えた。Zn 側の腐食は進行しており、表面に白色の腐食生成物が堆積していることがわかる。Al 側にも腐食生成物の堆積が見られるが、低 NaCl 濃度の場合は Zn の腐食生成物である。一方、高 NaCl 濃度の試験では、Al 上に水素の泡も確認できた。このように、いずれの濃度においても、Zn の腐食生成物は A1050 に近い部分から堆積しているが、低 NaCl 濃度溶液と高 NaCl 濃度溶液での挙動は、Zn の腐食生成物の堆積の状況が異なっているといえる。すなわち、低濃度溶液にくらべ、高 NaCl 濃度の溶液では、Zn の腐食速度は大きく、Zn の腐食生成物が多く堆積していることがわかった。

ガルバニック腐食試験の種々の浸漬時間において、Zn と A1050 のアノード、カソード分極曲線を測定した。Zn 側のアノード反応は、浸漬時間の増加につれ若干貴側シフトしている。一方、A1050 のカソード分極曲線は酸素還元反応が主であるが、浸漬時間の増加につれ大きく減少していることがわかった。この結果から、反応はカソード制御されていることがわかり、1 $\mu$ A で電流密度が収束した理由は、AA1050 のカソード反応が抑制されたためと推測された。

ガルバニック試験終了時(3 日後)におけるカップル電位とガルバニック電流の NaCl 濃度依存性を示したものである。カップル電位は NaCl 濃度の増加とともに卑方向にシフトしているが、ガルバニック電流はほとんど NaCl 濃度に依存していない。これらの結果は分極曲線のカップル電位および電流から推定される値とほぼ一致した。

このことは、Zn/Al 対のガルバニック腐食において、ガルバニック電流が大きく減少したのは、Zn 上の酸素還元反応特性についても検討する必要があるが、Al 表面における酸素還元反応特性が時間の経過に伴い減少したことに起因していると推定された。

種々の NaCl 濃度においてガルバニック腐食試験中に測定された EIS 挙動を確認した。いずれの NaCl 濃度においても、浸漬時間の経過とともにインピーダンスが増加していることがわかる。さらに、おおよそ 2 つの時定数からなる電氣的等価回路で表すことが可能であること、0.1~1 Hz の中間周波数におけるインピーダンスにおいても増加しており、ガルバニック腐食速度が時間に伴って低下していることなどがわかった。また、浸漬後半においては、低周波数側のインピーダンスが NaCl 濃度によらず同じであり、これはガルバニック電流が NaCl 濃度に依存せず 1 mA 程度であったことと対応している。

以上のことから、Zn/Al 対についても、Al/HSS 対と同様に、中間周波数のインピーダンス解析からガルバニック腐食速度について検討、モニタリングできると示唆された。

### 実験 3: 摩擦攪拌接合した Al 合金/高張力鋼板接合材のガルバニック腐食挙動

#### 【実験目的】

FSW 溶接部の耐食性評価に関する研究は、主に Al 合金で作製した溶接材に対しておこなわれてきた。しかし、溶接部での局部腐食の起点が様々であることが報告されており、局部腐食現象の詳細が明らかになっていない。これは、摩擦攪拌時に、ツール形状や回転速度、走査速度、負荷応力といった様々な溶接条件によって溶接部の金属組織が複雑に変化し、それによってガルバニック腐食挙動が複雑となると予想される。そこで本研究では、FSW で作製した A6061/SPCC980 対に対して、NaCl 水溶液中で腐食試験を行い、溶接部におけるガルバニック腐食挙動と金属組織との関係性を調査することを目的とした。

#### 【実験方法】

##### 試料作製

本研究で用いた Al 合金は Al-Mg-Si 合金 A6061-T6 (以下、A6061)、鉄鋼材料は 980 MPa 級の冷間圧延鋼板 SPCC980 (以下、SPCC) である。厚さ 1 mm の A6061 に厚さ 2 mm の SPCC を重ね、A6061 側から FSW 回転ツールを挿入後、100 mm/min で走査し、接合した。加工プローブには、WC-Co 超硬合金工具を用いた。このツールのショルダ径は 10 mm、プローブ長は 0.9 mm、先端径は 3 mm であった。これを前進角 3°、負荷応力 3.8 kN で SPCC 側に 0.1 mm 程度押し込んだ状態で加工した。次に、溶接部断面を溶接方向と垂直に切り出し、30 mm 幅 × 10 mm 長さ × 3 mm 厚さに加工した。これらをすきま腐食防止のためにカチオン電着塗装をおこない、リード線をはんだ付け後、直径 40 mm のエポキシ樹脂に埋めた。

##### 組織観察とマイクロビッカース硬さ測定

エポキシ樹脂埋めした摩擦攪拌接合材 (A6061/SPCC) は、表面を 2000 番まで耐水

研磨紙で研磨した後、粒径 1  $\mu\text{m}$  のダイヤモンドペーストでバフ研磨した。その後、アセトン中で 5 分間超音波洗浄をおこない、十分に脱脂した。溶接部断面の金属組織の光学顕微鏡観察では、A6061 側を Keller 氏液で 75 秒、SPCC 側を 3% ナイタールで約 10 秒エッチングし、その後 Milli Q 水（純度 99.9%）で洗浄した。また、A6061 の接合断面の走査電子顕微鏡観察をおこなった。さらに、A6061 側の透過電子顕微鏡観察では、試料を機械研磨により 80 $\mu\text{m}$  厚程度まで薄片化したのち 3 mm $\phi$  のディスク状に打ち抜き、twin-jet 法により電解研磨で薄膜化した。

FSW 材の接合部断面のマイクロビッカース硬さ試験をおこなった。接合界面中央から界面を跨ぐ様に 100  $\mu\text{m}$  間隔でビッカース硬さ分布を測定した。さらに、Al 側のビッカース硬さ分布測定も実施した。荷重は 0.1 kgf、圧子保持時間は 10 秒とした。

### ガルバニック腐食試験

FSW 接合部の腐食起点を調査するために、A6061/SPCC ガルバニック対に対し、1 M NaCl 水溶液中で 600 秒間浸漬した。このとき A6061/SPCC 対の腐食電位を Ag /AgCl 電極（飽和 KCl, SSE）に対して測定した。また、比較のために A6061 と SPCC980 のそれぞれの腐食電位測定もおこなった。浸漬試験後の腐食形態を走査電子顕微鏡で観察した。

### 電気化学試験

FSW 接合部のガルバニック腐食挙動を調査するために、A6061/SPCC 対に対して 1 M NaCl 水溶液中で動電位分極試験をおこなった。参照電極に Ag /AgCl 電極（飽和 KCl, SSE）、対極に Pt 板を用いた 3 電極式であった。電位走査速度は 10 mV/min とした。また、比較のために A6061 と SPCC980 単材の分極試験もおこなった。

また、接合した A6061 の孔食電位を評価するためにマイクロアノード分極試験をおこなった。テフロンテープとマスキング剤を用いて材料表面を被覆し、A6061 側の各溶接域（NZ、HAZ、BM）の露出面をそれぞれ作製した。マスキング剤の密着性を高めるため、真空中で乾燥し、十分にすきま腐食対策を施した。試験後には表面を光学顕微鏡で観察し、すきま腐食が発生していないことを確認した。試験溶液は 0.01M NaCl 水溶液中とした。電位走査速度は 10 mV/min とし、腐食電位からアノード方向に分極した。

定電位アノード分極試験では、NZ に対して 0.01M NaCl 水溶液中で電流増加の時間変化を測定した。加えて、T6 熱処理を施した NZ に対しても同様に試験をおこない、電流挙動を比較した。保持電位は、-0.50 vs. SSE とし、900 秒間保持した。試験後は、腐食形態を走査電子顕微鏡にて観察した。

### 【実験結果と考察】

#### FSW 加工後の金属組織と硬さの関係

はじめに FSW 溶接部の金属組織は、主に 4 つの溶接域に分けられることが知られている。摩擦攪拌された攪拌部（Nugget Zone : NZ）、その周囲に熱影響部（Heat Affected Zone : HAZ）、NZ と HAZ の境界には、ツールの回転に伴う塑性変形で結晶

粒が伸長した熱加工影響部（Thermo-Mechanically Affected Zone : TMAZ）が存在する。溶接の熱影響等が及んでいない領域が母材部（Base Metal : BM）となる。

A6061 側と SPCC 側の光学顕微鏡観察結果である。A6061 側では、溶接部中央に摩擦攪拌された NZ が形成されていることが確認された。A6061 側 NZ 近傍の SPCC 側では、金属組織の様子は母材部と大きな変化がなかった。また、溶接部中央の Al 側～SPCC 側のビッカース硬さ結果より、A6061 側 NZ では約 70 Hv、SPCC 側では約 325 Hv だった。一方で、A6061 側のビッカース硬さによると、NZ（Y = 0 ~ - 4 mm）は約 70 Hv で一定であったが、TMAZ（Y = - 5 mm 付近）で約 60 Hv まで軟化し、HAZ（Y = - 5 ~ - 9 mm）では BM（Y = - 10 mm ~）にかけて A6061-T6 相当の硬さ（約 100 Hv）まで回復した。

A6061 側の走査電子顕微鏡観察写真から各接合部の金属組織を比較すると、結晶粒径および形状が変化していた。切片法を用いて平均結晶粒径を算出すると、BM では 14.9  $\mu\text{m}$ 、HAZ では 11.3  $\mu\text{m}$ 、NZ では 5.1  $\mu\text{m}$  であった。BM と HAZ の粒径は同等であったものの、NZ は他の領域よりも等軸で微細な結晶粒となっていた。これは、NZ では攪拌により強い塑性変形を受け、動的再結晶の影響で微細な等軸結晶粒が形成されたためだと考えられた。さらに、A6061 の EDS 点分析の結果より、黒い析出物は  $\text{Mg}_2\text{Si}$ （Point A）、白い析出物は Fe を多く含む Fe-rich 析出物（Point B）と推定できる。また、Point C は Al-matrix の化学組成を表しており、Al の純度が 98.21% と非常に高い。ここで、各溶接域における Fe-rich 介在物の分布やサイズに変化がほとんどないことがわかった。一般的に材料に対して大きな加工を加えると、析出物などの粒子を小さく分断できるといわれているが、FSW により攪拌された A6061 の NZ において、Fe-rich 介在物の分布やサイズはほとんど変化しなかった。

ここで A6061 合金は、Al- $\text{Mg}_2\text{Si}$  擬二元系合金であり、 $\text{Mg}_2\text{Si}$  の準安定相である  $\beta''$  相（ $\text{Mg}_5\text{Si}_6$ ）により強化される析出強化型 Al 合金である。 $\beta''$  相は針状であり、Al-matrix の  $\langle 100 \rangle$  方向に平行に配列することが知られている。透過電子顕微鏡観察では、電子線を  $[001]_{\text{Al}}$  方向に入射しており、BM や HAZ の Al-matrix 中において  $[100]_{\text{Al}}$  や  $[010]_{\text{Al}}$  方向に平行に配列した針状の  $\beta''$  相が析出していることがわかる。また、BM では  $\beta''$  相が密に析出しているのに対し、HAZ では析出量が減少していた。一方、NZ の Al-matrix 中には  $\beta''$  相はほとんど析出しておらず、転位上で少量析出していた。一般的に Al-Mg-Si 合金の時効析出過程は、過飽和固溶体  $\rightarrow \alpha \rightarrow \text{GP}$  ゾーン  $\rightarrow \beta'' \rightarrow \beta' \rightarrow \beta$  と考えられている。摩擦攪拌時の入熱により、NZ で最高温度まで到達し、HAZ では NZ からの距離に応じて到達温度が変化すると予想される。よって、入熱の影響で  $\beta''$  相の一部が Al-matrix 中へ溶解したことで析出強化の効果が失われ、A6061 側で硬さ分布ができたと考えられる。ここで、NZ で HAZ（Y = - 5 mm）よりも 10 Hv 程度硬化していることについては、結晶粒微細化によるためだと考えられる。

### 腐食挙動と組織変化の関係

浸漬試験中の FSW 材接合部の表面観察を行った。試験開始直後と 600 秒後の結果を比較すると、A6061 側で発生した気泡が増加する様子が観察された。また、NZ およびその周辺では気泡の増加は抑えられ、BM 上で気泡の発生が優勢であることが確

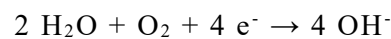
認できた。ここで、FSW 材および A6061 と SPCC 単材の腐食電位測定を実施した。FSW 材の腐食電位は直ちに-0.69 V となり、600 秒間一定であった。SPCC 単材の腐食電位は、-0.35 V からゆるやかに減少し、600 秒後には-0.52 V となった。A6061 単材は、-1.32 V から緩やかに上昇し、600 秒後には- 0.70 V に達した。

FSW 材の分極曲線を確認したところ、腐食電位近傍 (-0.69 V) で FSW 材のアノード電流が急激に増加しており、A6061 単材のアノード分極曲線とよく一致していた。これは、1 M NaCl 水溶液中において、FSW 材の A6061 上において、腐食電位下で孔食が発生し得ることを意味している。また、FSW 材のカソード分極曲線では、-1.0 ~ -0.70 V の電位範囲において、酸素の拡散限界電流域が現れていた。これは、SPCC 単材においても拡散限界電流が現れていたことから、FSW 材の SPCC 上では酸素の還元反応が支配的であることを意味するものである。したがって、FSW 材を 1M NaCl 水溶液に浸漬したとき、それぞれの材料で以下の電気化学反応が進行していると考えられる。すなわち、

アノード反応 (Al 合金側)

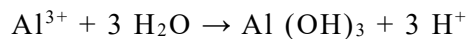


カソード反応 (鋼材側)

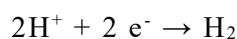


が進行しているといえる。また、A6061 側で気泡が発生したことについては、食孔内部において Al-matrix の溶解反応で溶出した  $\text{Al}^{3+}$  イオンの加水分解反応によりプロトンが生成され、そのプロトンが還元される水素発生反応が生じるためである。

加水分解反応



水素発生反応



浸漬試験後の表面観察を行った。NZ では、孔食などの腐食痕はほとんど確認できなかった。HAZ においても目立った孔食は発生していなかったが、軽微な粒界腐食が発生していた。一方、BM では、孔食が複数箇所で発生しており、介在物周囲の Al-matrix が深く溶解していた。EDX 分析結果より、孔食発生起点は Fe-rich 析出物であることがわかった。ここで、Fe-rich 析出物は Al-matrix に対して貴であり、アノード : Al-matrix / カソード : Fe-rich 析出物となるガルバニック腐食によって孔食が発生したといえる。したがって、Fe-rich 析出物の大きさによってカソード部の面積が変わり、孔食感受性に影響を与えることが予想されたが、各接合域で Fe-rich 析出物の大きさはほとんど変化していなかったことから、A6061 側の各接合部の孔食感受性は、Al-matrix のアノード活性の違いが主として影響することが示唆された。なお、SPCC 側では腐食痕が確認できなかったため、溶接部の初期腐食において、SPCC 上のアノード反応 (金属の溶解反応) は起こらないといえる。また、A6061/SPCC 界面よりも A6061 側の腐食感受性が高かったことについては、摩擦攪拌時に形成された新生面が影響していると考えられる。FSW で作製した Al/Fe 対の界面組織では、数 10 nm 程度のアモルファス層が均一に形成されることが報告されており、Al と Fe の直接的な接触が妨げられたことで界面部の腐食が低減されたと予想された。このことについての詳細は、今後の検討課題としたい。



A6061 側の各溶接域に対してマイクロアノード分極試験をおこなった。各領域の腐食電位は、- 0.57 V (NZ)、- 0.57 V (HAZ)、- 0.64 V (BM) であった。また、電流が急激に上昇した電位を孔食電位 ( $E_{pit}$ ) とすると、- 0.52 V (NZ)、- 0.54 V (HAZ) - 0.57 V (BM) であった。また、BM の不働態保持電流が最も高いことから、不働態皮膜の安定性が低くなっていることが考えられる。つまり、BM で最も孔食が発生しやすく、NZ では発生しにくくなっていることが明らかになった。これらの結果から、 $\beta$ 相の析出量にしたがって Al-matrix のアノード活性が変化し、孔食感受性に影響を与えることが示唆された。

ここで、 $\beta$ 相が孔食発生に及ぼす影響を調査するために、FSW 材に対して T6 処理を施した試料において、A6061 側の NZ での定電位アノード分極を確認した。T6 処理を施したことで A6061 側の全領域で  $\beta$ 相が析出し、ビッカース硬さが母材硬さ程度まで回復してものについて、定電流試験を行った結果、熱処理後の NZ の方が、熱処理前に比べて急激に電流が増加していた。さらに、試験初期の電流挙動をみると、元の NZ ではしばらく振動しつつ一定値を保ち、150 秒後ほどから電流が安定して増加していた。一方で熱処理後の NZ では、試験開始わずか 10 秒ほどで電流が増加し始めており、孔食成長が容易に起こっていることがわかった。これは、熱処理によって NZ 内に  $\beta$ 相が再析出し、Al-matrix が溶解しやすくなったためであると考えられる。熱処理前後の NZ における定電位試験後の孔食の走査電子顕微鏡写真から、いずれも孔食の最大径は約 80  $\mu\text{m}$  であるが、食孔底の溶解形態が大きく異なっていた。熱処理前の NZ で発生した食孔では、結晶粒よりも粒界が優先溶解する特徴的な形態を示していた。これは、結晶粒内の  $\beta$ 相の析出密度が小さく、Al-matrix の溶解速度よりも粒界腐食の進展速度が早いためであると考えられる。一方で、熱処理後の NZ で発生した食孔では、Al のファセット面が現れており、Al-matrix が主として溶解していることがわかる。これらの結果から、 $\beta$ 相の析出密度が高いほど Al-matrix は容易に溶解することが示唆された。

以上のことから、FSW で作製された A6061/SPCC 対の NaCl 水溶液中におけるガルバニック腐食挙動は溶接部の金属組織に強く影響されることがわかった。今後、各製品への FSW の適用が拡大すると様々な接合条件や接合形状が検討され、それに伴って溶接部の金属組織も複雑化することが予想される。したがって、FSW 材の溶接部の腐食挙動を理解するには、摩擦攪拌時の金属組織変化についても同時に深く理解することが重要になる。

## 【まとめ】

摩擦攪拌接合法により作製した Al 合金 A6061 と鋼材 SPCC980 からなる接合対に対して、NaCl 水溶液中において腐食試験を行い、接合部の初期腐食挙動について表面観察、電気化学試験、硬さ試験、組織分析から検討した結果、以下の知見を得た。

- 1) 接合対の腐食初期では、A6061 の母材部から水素発生が確認され、接合部よりも母材部が孔食発生サイトとなることが示された。また同時に、A6061 と SPCC980 が直接接触している界面は、腐食初期において局部腐食サイトとならなかった。

- 2) A6061 の接合部および母材部のマイクロ電気化学分極試験において、母材部の孔食電位が接合部周囲よりも低かった。孔食は、Fe-rich 介在物近傍から発生するが、その感受性は  $\beta''$  相の析出量により決定されることが示唆された。

#### 【テーマ 65 のまとめ】

テーマ 65 では実施した各研究テーマの結果をもとに、①融雪塩散布地域を想定したガルバニック腐食評価法の提案、②板合わせ内部のガルバニック腐食モデルの考案、③ガルバニック腐食のリスクカテゴリ分類と対応する防食表面処理技術の提案を行った。まず、融雪塩散布地域を想定したガルバニック腐食評価法の設計は、実車走行環境が絶対湿度一定であることと融雪塩を含む塩が多い場合に  $1\sim 10\text{g}/\text{m}^2$  の付着量となることから評価条件を決定した。温湿度は、絶対湿度を約  $8\text{g}/\text{m}^3$  に合わせた乾燥過程 ( $25\text{ }^\circ\text{C}-35\%\text{RH}$ ) と湿潤過程 ( $10\text{ }^\circ\text{C}-90\%\text{RH}$ ) を低温対応型の恒温恒湿槽で繰り返すサイクルとした。付着塩成分は、融雪塩成分を参考に、 $0.5\text{mass}\%\text{NaCl} + 0.1\text{mass}\%\text{CaCl}_2$  の混合塩溶液を中心条件とした。想定する評価地によっては塩濃度を 10 倍濃度、 $1/10$  濃度と変更して実施することを可能とした。これらの結果より、A6016 材と GA 材の異種材料対はガルバニック腐食影響が小さく、これは実車走行試験での腐食評価結果と一致した。

腐食影響が殆ど認められなかった A6016/GA の組み合わせにおける腐食モデルを考案した。まず、腐食の初期に電位の低い GA 材が腐食し、内部の溶液 pH が僅かに上昇する。その後、すき間内部で限定的におこる現象が影響し、熱力学平衡計算にて導かれる溶液 pH 以上にアルカリ化する可能性がある。その場合、A6016 材が卑化し、腐食し始める。このようなアルカリ溶液下におかれる状態が長く続く場合は一方的に A6016 材が腐食し続けることとなるが、溶液内部の溶液が乾燥する場合、A6016 材は酸化被膜を再形成し、安定化する。JASO M609 法のように塩水の供給が頻度高く行われる腐食評価の場合は A6016 材が腐食し続ける場合があるが、実車走行試験や本研究で設計したガルバニック腐食評価法の場合は塩水が付着する頻度はそれほど高くなく A6016 材と GA 材のいずれも目立った腐食はせずに良好な耐食性を示したものと考えた。

ガルバニック腐食のリスクカテゴリ分類はガルバニック腐食評価後の最大腐食深さを比較し、その影響を示すこととした。ISO9223 では腐食影響に基づく腐食環境カテゴリを分類しているがそこでの炭素鋼の腐食深さは、腐食影響の小さい順に C1 :  $0.001\text{mm}/\text{a}$  (年間の腐食深さ mm)、C2 ( $0.001\sim 0.025\text{mm}/\text{a}$ )、C3 ( $0.025\sim 0.05\text{mm}/\text{a}$ )、C4 ( $0.05\sim 0.08\text{mm}/\text{a}$ )、C5 ( $0.08\sim 0.2\text{mm}/\text{a}$ )、CX ( $0.2\sim 0.7\text{mm}/\text{a}$ ) となっている。本研究で実施したハイテン材単体の実車走行試験における腐食深さは C5 クラスに分類されており、融雪塩散布地域の自動車は厳しい腐食環境に曝されていることを確認した。この腐食環境のクラス分類を参考に、各材料の最大腐食深さを分類したところ、例えばアルミニウム合金材は単体では C2 に分類される腐食深さで

あったが、鉄鋼材料とガルバニック腐食対を形成した場合は CX に分類されることが分かった。このように各種材料の最大腐食深さを指標として腐食リスクのカテゴリを分類した。これに対応した防食表面処理技術を C1～CX のクラス分類に対し、C1P～CXP として防錆仕様を組み合わせることができる。防錆技術の組み合わせは本研究の成果以外にも実例などを参考にすべきであるが、本研究の成果から選定すると C1P：防食表面処理技術不要、C2P：接着剤+シーラー、C3P：亜鉛めっき+接着剤+シーラー、C4P：亜鉛めっき+接着剤+シーラー+Ti 系化成処理剤の Al 表面処理、C5P と CXP：亜鉛めっき+接着剤+シーラー+Ti 系化成処理剤の Al 表面処理（袋部防錆ワックス）など示すことができる。

#### 謝辞

1990 年代より、自動車の腐食対策においては、各社の競争技術領域として様々な技術や知見が提案されてきた。本研究をはじめるとにあたり、複数社の自動車 OEM に協調領域で取り組むべき課題についてヒアリングしたところ、マルチマテリアルであればガルバニック腐食の影響やその評価法は我が国に必須の課題であり、現代においては協調領域として取り組むべきとの意見を頂いた。テーマ 6 5 では最終的に自動車 OEM、材料メーカー、表面処理メーカー、国研、大学が一体となり協調領域としてマルチマテリアルの課題について取り組むことができた。様々な知見を得ることができ、今後の産業界で有用な情報が得られたものと思われる。

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.6-6 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示 会への出 展	受賞	フォー ラム等※
	査読 付き	その 他	学会 発表・ 講演	新 聞・ 雑誌 等 への 掲載	プレス 発表	その 他			
2019FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	2	1	0	0
2021FY	0	0	0	1	0	5	2	0	0
2022FY	0	0	0	1	0	8	0	0	0
合計	0	0	0	5	0	14	3	0	0

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.6-7 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2019FY	0	0	0
2020FY	0	0	0
2021FY	0	0	0
2022FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9.6.3 参考文献

- 1) Bo rendahl, “Assessment of worldwide corrosivity in road environment”, 7th int., symposium in the field of automotive corrosion, Detroit, USA, June 5–6 (2018)
- 2) 篠原 正、元田 慎一、押川 渡 ; 材料と環境, **54**, 375 (2005)
- 3) T. Prosek, M. Kouril, M. Dubus, M. Taube, V. Huberts, B. Scheffel, Y. Degres, M. Jouannic and D. Thierry ; Studies in Conservation, **58**, 117 (2013)
- 4) 田中耕太郎: 電解質の熱力学に基づく腐食・防食現象のシミュレーション技術, 材料と環境, **62**, p310-316 (2013)

## 2.9.7 [テーマ番号 6 5 B] 「マルチマテリアル車体におけるガルバニック腐食のシミュレーション技術の開発」(2021年度～2022年度)

### 2.9.7.1 テーマの概要

#### (1) 背景と目的

自動車材料のマルチマテリアル化を加速するためには、我が国で検討されている材料開発技術、生産技術、自動車品質向上技術のそれぞれを効率化し、全体の技術開発能力を向上していく必要がある。特にマルチマテリアル車体の材料技術開発においては、異種材料接触を想定した際のガルバニック腐食対策が必ず求められることから、テーマ番号 65 ではマルチマテリアル構造車体の材料重ね接合部を対象に最適な腐食試験法の選定および定量的な防食使用基準（腐食カテゴリー分類）の提案を目標として、融雪塩散布地域での実車走行、腐食促進試験などを実施している。しかしながら、これまでの試験結果から、実車走行と腐食促進試験との結果が大きく乖離することが明らかとなっている。実際の環境下での自動車材料は、付着塩分量や温度、湿度、濡れ時間など多くの腐食因子が影響するため、最適な腐食促進試験条件を選定するためには非常に多くの労力と経費が発生する。

そこで本テーマでは、マルチマテリアル接合部での腐食を適正に再現する腐食促進試験法の選定を促進するため、計算科学を活用した腐食科学に基づく定量的な腐食シミュレーション技術を開発することを目的とした。また、実車での腐食挙動を再現するための腐食シミュレーション技術の開発も行い、マルチマテリアル構造材料の定量的な防食使用基準（腐食カテゴリー分類）の基盤を構築することを目的とした。

#### (2) 目標値

表 3-2.9.7-1 研究開発目標

研究開発項目 (実施年度)	第1中間 目標 (2015年 度末)	第2中間 目標 (2017年 度末)	第3中間 目標 (2020年 度末)	最終目標 (2022年度末)
①マルチマテリアル構造車両における環境境界条件の抽出(2021～2022年度)				代表的な融雪塩散布地域(北欧)の防錆対策重要地域において腐食環境(飛来腐食促進物質、温湿度)を計測するセンサを搭載した車両を試験走行して、自動車腐食における環境境界条件を明らかにする。
②マルチマテリアル構造車両における腐食境界条件の抽出(2021～2022年度)				実際に使用した車両からマルチマテリアル構造の部品を調査し、外観観察からの腐食形態・分布解析や腐食生成物の組成や分布解析、局部腐食速度の推定などについて実施・整理し、腐食実態のデータベースを構築。得られたデータベースから、計算科学に必要な腐食境界条件を明らかにする。

③腐食環境シミュレーション技術の開発（2021～2022年度）				乾湿繰り返し環境下での溶液特性を調査するとともに、気液相平衡計算シミュレーション技術の開発を行う。乾湿繰り返し腐食環境下でのマルチ材料接合部およびその周辺部の電位分布を測定。実験データとの比較により計算シミュレーション技術の妥当性についても検討。
④すき間内部の環境特性評価と有限要素法（FEM）によるマルチ材料接合部ガルバニック腐食の数値シミュレーション法構築（2021～2022年度）				テーマ番号 65 で推奨される乾湿繰り返し試験法に則した実験により、すき間内環境の変化をその場観察する。これらから得られるデータを境界条件として、マルチ材料接合部ガルバニック腐食の FEM 数値シミュレーション技術を構築する。
⑤すき間内部の化学特性の評価（2021～2022年度）				テーマ番号 65 で推奨される乾湿繰り返し試験法に則した実験により生成したすき間内水溶液の実態と腐食生成物の物性を調査し、得られた成果をマルチ材料接合部ガルバニック腐食の FEM 数値シミュレーション技術構築に供する。
⑥すき間内部の環境と腐食の動的モニタリングと FEM によるマルチ材料接合部ガルバニック腐食の数値シミュレーション法構築（2021～2022年度）				乾湿繰り返し試験法に則した実験によりすき間内環境をモニタリングするとともに、時間依存インピーダンス法によりすき間腐食の発生・進展を連続的に追跡する。これらの成果をもとにして、マルチ材料接合部ガルバニック腐食の FEM 数値シミュレーション技術を構築する。
⑦実車の曝露試験とセンシングデータによる境界条件の取得（2021～2022年度）				北海道の曝露試験場におけるガルバニック腐食試験とセンシングデータによる曝露試験での腐食機構および腐食計算科学に必要な境界条件を取得する。

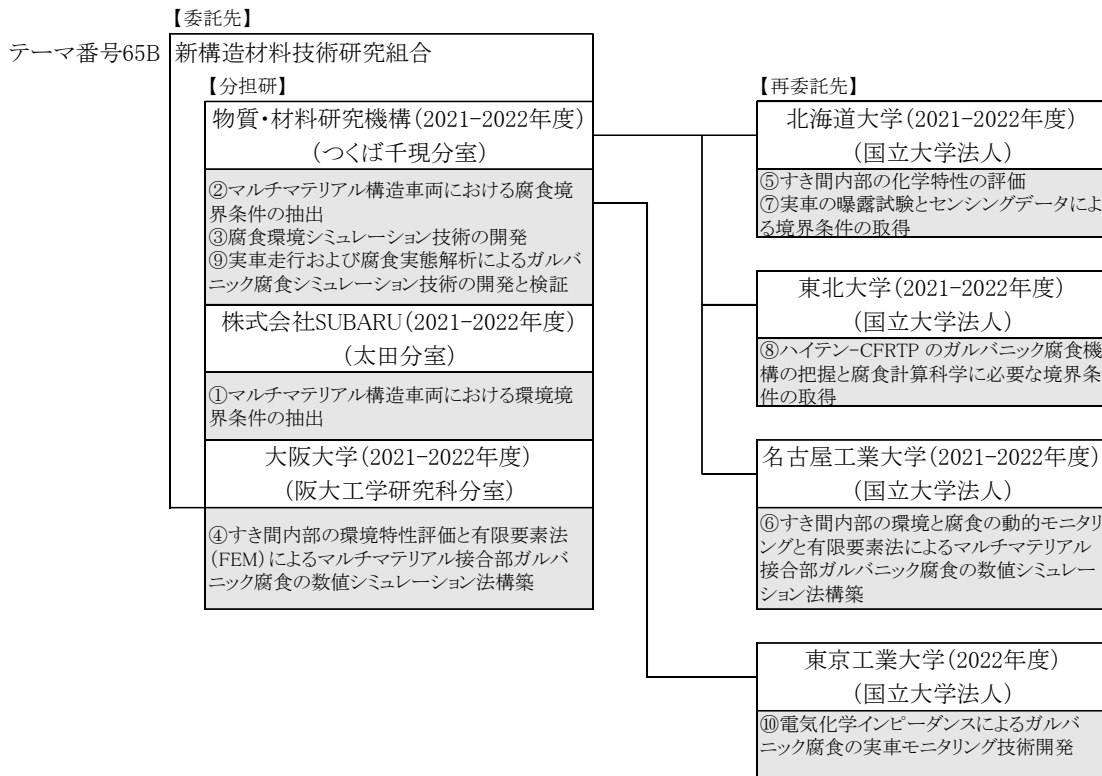
<p>⑧ハイテン-CFRTPのガルバニック腐食機構の把握と腐食計算科学に必要な境界条件の取得（2021～2022年度）</p>				<p>乾湿繰り返し環境を想定した試験条件下でCFRTP-ハイテン鋼のガルバニック腐食の挙動を短絡電流と動電位分極曲線の観点から解析する。また、分極曲線を系統的に取得し、CFRTP-ハイテン鋼のガルバニック腐食の腐食速度を計算する際の溶液/材料界面の境界条件として利用できるように整理する。</p>
<p>⑨実車走行および腐食実態解析によるガルバニック腐食シミュレーション技術の開発と検証（2021～2022年度）</p>				<p>テーマ番号65における各種腐食試験結果、実車走行試験により抽出した環境の境界条件および実車部品の腐食実態解析による腐食の境界条件を用いて、実車における合わせ接合部のガルバニック腐食計算シミュレーション技術を開発する。</p>
<p>⑩電気化学インピーダンスによるガルバニック腐食の実車モニタリング技術開発（2022年度）</p>				<p>大気腐食条件下におけるマルチマテリアル接合部におけるガルバニック腐食反応機構を構築するとともに、実車を想定した腐食環境におけるガルバニック腐食挙動を電気化学インピーダンスにより測定・解析し、ガルバニック腐食速度のモニタリングを可能とする測定・評価技術を開発する。</p>

### (3)全体計画

本テーマではテーマ65における目標達成（1. 最適な腐食試験法の選定、2. 定量的な防食使用基準の確立）に向けて、下記補完技術を提供することを最終目標とした。

1. 腐食促進試験環境におけるマルチマテリアル構造部位のガルバニック腐食計算モデルの構築
2. 実車のマルチマテリアル構造部位におけるガルバニック腐食計算モデルの構築  
 参画機関を3グループに分け、2年間の研究期間で効率的に研究開発を進めた。各グループに対し、表3-2.9.7-1に示した研究開発項目は以下のように対応する。
  - A. 実車のマルチマテリアル構造部位のガルバニック腐食シミュレーション；①、②、⑨
  - B. 腐食促進環境下でのマルチマテリアル構造材料のガルバニック腐食シミュレーション；④
  - C. ガルバニック腐食シミュレーションに必要な界面モデルの構築と基礎データの取得；③、⑤、⑥、⑦、⑧、⑩

#### (4)実施体制



#### (5)運営管理

本テーマでは、月1回の研究進捗会議を開催し、各項目の研究進捗状況を確認するとともに、相互連携が速やかに行えるよう情報の共有を図りながら研究活動を行った。また、有識者からなる“マルチマテリアル車体のガルバニック腐食シミュレーションおよび最適防錆技術推進委員会”を設置し、研究の方向性などを決定するためのニーズや現在の動向などの貴重な情報を獲得する場として開催した。

#### (6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO<sub>2</sub>削減・省エネルギー等@2030年度）

本テーマでの成果により、我が国における計算シミュレーションの有用性が再認識され、DX社会に向けて計算科学の積極的な利活用が期待される。また、我が国における腐食分野での計算シミュレーション研究の推進につながる。

また、本テーマは、目標達成（1. 最適な腐食試験法の選定、2. 定量的な防食使用基準の確立）に向けて、1. 腐食促進試験環境におけるマルチマテリアル構造部位のガルバニック腐食計算モデル、2. 実車のマルチマテリアル構造部位におけるガルバニック腐食計算モデルを提供することを最終目標としている。したがって、本テーマにより最適な防錆設計基準が確立されれば、自動車におけるさらなるマルチマテリアル化が進むと考えられ、車両重量低減による燃費向上やCO<sub>2</sub>削減が期待できる。



## 2.9.7.2 研究開発成果

### (1)最終目標の達成度

表 3-2.9.7-2 最終目標と達成度

研究開発項目	最終目標 (最終年度)	研究開発成果	達成 度※	未達の場合 原因と解決方針
①マルチマテリアル構造車両における環境境界条件の抽出【SUBARU】	代表的な融雪塩散布地域（北欧）の防錆対策重要地域における自動車腐食の環境境界条件を明らかにする。 (2022年度)	各センサを搭載した車両を用い融雪塩散布地域の腐食環境の計測を実施。計測結果より、車両各部位の腐食環境を明確化した。	○	
②マルチマテリアル構造車両における腐食境界条件の抽出【NIMS】	実際に使用した車両からマルチマテリアル構造の部品を調査し、腐食実態のデータベースを構築。計算科学に必要な腐食境界条件を明らかにする。(2022年度)	経年5年のトラック系乗用車を回収し、異種材接合部位を観察・調査した。調査部位は融雪剤 NaCl が巻き上げられる環境であり、腐食生成物としてドーソナイトと Al(OH) <sub>3</sub> が確認された。またフロアパン(Al)と補強部品(Fe)の間にガルバニック腐食による孔あきが確認された。	○	
③腐食環境シミュレーション技術の開発【NIMS】	乾湿繰り返し環境下での溶液特性に関する気液相平衡計算シミュレーション技術の開発。同環境下でのマルチマテリアル接合部の電位分布測定。実験データとの比較による計算シミュレーション技術の妥当性についても検討。(2022年度)	熱力学計算により電位-pH図の計算と乾湿繰り返し環境下での溶液特性（H <sub>2</sub> O 活量と pH）の変化を予測した。溶液中および乾湿繰り返し環境での Al 合金/鋼の突き合わせ構造のガルバニック腐食挙動に対する計算シミュレーションモデルを作成した。計算シミュレーションで得られたガルバニック電流は実験データとよい一致を示した。また、ガルバニック腐食挙動が NaCl 濃度に依存して変化することを見出した。	○	

<p>④すき間内部の環境特性評価と有限要素法（FEM）によるマルチマテリアル接合部ガルバニック腐食の数値シミュレーション法構築【阪大】</p>	<p>テーマ番号 65 で推奨される乾湿繰り返し試験法に則した実験により、すき間内環境の変化をその場観察。これらから得られるデータを境界条件として、マルチマテリアル接合部ガルバニック腐食の FEM 数値シミュレーション技術を構築。（2022 年度）</p>	<p>HT/Al 合金のマルチマテリアル接合部ガルバニック腐食をサイクル試験として実験を実施し、すき間内環境の溶存酸素濃度モニタリングとガルバニック電流の測定を行った。また、これらの材料の基礎的電気化学特性を実測した。さらに、市販の FEM パッケージを用いて、HT/Al 合金のマルチマテリアル接合部ガルバニック腐食のサイクル試験を模擬するシミュレーション技術を開発した。</p>	<p>○</p>	
<p>⑤すき間内部の化学特性の評価【北大】</p>	<p>促進試験環境下でのすき間内水溶液の実態と腐食生成物の物性を調査。（2022 年度）</p>	<p>異種材料の組み合わせ部にはアニオン選択性を示す腐食生成物が形成することが、確認された。塩化物イオンとともに模擬融雪塩水溶液中に含まれる Ca は特に低濃度の際、固定電荷を増大することが見出された。</p>	<p>○</p>	
<p>⑥すき間内部の環境と腐食の動的モニタリングと FEM によるマルチマテリアル接合部ガルバニック腐食の数値シミュレーション法構築【名工大】</p>	<p>促進試験環境下でのすき間内環境のモニタリングと時間依存インピーダンス法によるすき間腐食の発生・進展を連続的な追跡。（2022 年度）</p>	<p>促進試験環境下において組み合わせ試験片のすき間内部環境（pH・塩化物イオン）とインピーダンススペクトルの連続測定を実施し、すき間腐食の発生・進展に起因するパラメータの定量的評価に成功した。</p>	<p>○</p>	
<p>⑦実車の曝露試験とセンシングデータによる境界条件の取得【北大】</p>	<p>北海道の実環境における腐食機構の調査および腐食計算科学に必要な境界条件の取得。（2022 年度）</p>	<p>実車の曝露試験で冬季の影響と場所による影響を明らかにした。異なる組み合わせ方の一部の試料について低温の乾湿繰り返し試験を実施し、温度サイクルによる特異な電流変化を計測した。</p>	<p>○</p>	

<p>⑧ハイテン- CFRTP のガルバ ニック腐食機構の 把握と腐食計算科 学に必要な境界条 件の取得【東北 大】</p>	<p>促進試験環境下で の CFRTP-ハイテ ン鋼のガルバニッ ク腐食挙動の解 析。溶液/材料界面 の境界条件として 利用するための整 理。(2022 年度)</p>	<p>CFRTP-ハイテン鋼のガルバ ニック腐食が、1)塩水浸漬時 の腐食、2)すき間内残留水に よる腐食(浸漬後約 15 時間)、 3)すき間内残留塩の潮解によ る腐食(浸漬後約 15 時間以降) に区分できることを解明。 CFRTP 表面での溶存酸素の還 元は切断端面で生じやすいこ とと、ハイテン鋼局部腐食の 要因が塩化物イオンによる局 所的な脱不働態化に伴う pH 低下であることを解明。さら に、腐食速度を計算する際に 必要なアノード分極曲線を 10℃と 25℃で系統的に計測し た。</p>	<p>○</p>	
<p>⑨実車走行および 腐食実態解析によ るガルバニック腐 食シミュレーション 技術の開発と検証【NIMS】</p>	<p>実車における合わ せ接合部のガルバ ニック腐食計算シ ミュレーション技 術の開発。(2022 年度)</p>	<p>ハイテン-Al 合金合わせ部材 の乾湿繰り返し環境（腐食生 成物の影響，孔食の影響はな し）でのガルバニック腐食シ ミュレーション技術を開発し た。</p>	<p>○</p>	
<p>⑩電気化学インピ ーダンスによるガ ルバニック腐食の 実車モニタリング 技術開発【東工 大】</p>	<p>大気腐食環境下 におけるマルチマ テリアル接合部の ガルバニック腐食 反応機構の構築。 ガルバニック腐食 速度のモニタリ ング技術の開発。 (2022 年度)</p>	<p>Al/ハイテン合 わせ部のガルバ ニック腐食速度 を実車走行環 境において評価 する電気化学 インピーダンス 計測手法を確 立した。</p>	<p>○</p>	

※◎大きく上回って達成、○達成、×未達

## (2)研究開発の成果と意義

### ① マルチマテリアル構造車両における環境境界条件の抽出【株式会社 SUBARU、物質・材料研究機構】

#### 1. 概要

代表的な融雪塩散布地域（北欧）の防錆対策重要地域において腐食環境（飛来腐食促進物質、温湿度）を計測するセンサを搭載した車両を用いて走行試験を実施した。試験結果より車両の各部位の腐食環境境界条件の明確化を行った。

#### 2. 試験路面での事前計測

実際の塩害地域での計測に先立ち、各センサの搭載性等確認するために試験路面を用いた事前検討を実施した。

##### 2.1 計測項目

計測項目はテーマ 65 に合わせ、温湿度、腐食電流(ACM センサ)、腐食速度(電気抵抗式腐食センサ)とした。

##### 2.2 搭載部位

センサ搭載部位は、車体のマルチマテリアル化の進んでいる部位のうち、被水モードや、温湿度環境の異なる部位のうち表 3-2.9.7-3、図 3-2.9.7-1 の計 5 か所とした。

また、外気の温湿度計測用としてセンターピラーに温湿度センサのみ搭載した。

表 3-2.9.7-3 センサ搭載部位

部位	想定される被水モード				温湿度環境
	前走車による水巻き上げ	自転車による水巻き上げ	降雨	結露	
① バンパービーム	○				室外(外気)
② フェンダー	○	○			エンジンルーム内
③ ドア			○		室外(外気)
④ ホールハウス(室内側)				○	室内
⑤ 床下		○			室外(外気)



図 3-2.9.7-1 センサ搭載部位

##### 2.3 計測結果

試験路面での計測を実施した。試験路面は、市場での融雪剤散布環境を模擬したものであり、走行とアイドリング等を組み合わせ、各センサの出力を確認した。

結果、前走車の水巻き上げを模擬した路面での①バンパービームの ACM センサ出力の上昇、アイドリング時における②フェンダー(エンジンルーム内)の温度上昇・湿度低下等の各部位固有の環境を計測可能であることが確認できた。

### 3. 欧州市場計測結果

自動車腐食における環境境界条件を明らかにするために、代表的な融雪塩散布地域（北欧）の防錆対策重要地域において 2.2 の部位にセンサを搭載した車両を用いて 2021 年 11 月 1 日から 2022 年 3 月 17 日までの期間で計測を実施した。

#### 3.1 計測結果

##### 3.1.1 温湿度

車両各部位の温湿度の計測結果より、②フェンダー、④室内を除く部位は外気（センターピラー）と近い温湿度であった。また、計測期間内において融雪剤の主成分である塩化ナトリウムが潮解する相対湿度 75%以上となる期間は、全体の約 70%を占めていた。一方、フェンダーではエンジンによる熱の影響で、走行時の温度上昇・湿度低下がみられ、相対湿度 75%以上となる期間は計測期間の 30%程度であり、他の室外環境の計測部位に対し半分以下の期間であった。

##### 3.1.2 腐食電流 (ACM センサ)

車両各部位の ACM センサの出力値結果より、降雪後(融雪剤散布後)の⑤床下、①バンパービームの出力は、走行・アイドリング時の湿度低下により、一時的に出力が低下するが、停車時は安定して 1~100 $\mu$ A オーダーで推移した。また、室内のセンサは計測期間通期で、計測限界以下の出力であった。

##### 3.1.3 付着塩分析 (ACM センサ)

降雪前後(≒融雪剤散布前後)の ACM センサに付着した塩泥を、イオンクロマトグラフ法を用いて Cl<sup>-</sup>の濃度を定量し、Cl<sup>-</sup>の単位面積あたりの付着量 (mg/m<sup>2</sup>) を算出、それを基に NaCl 換算で車両各部位の付着塩分量を求めた。結果、①バンパービーム、⑤床下では、融雪剤散布前後で付着塩分量が大きく増加していることを確認した。

##### 3.1.4 腐食量・腐食速度 (電気抵抗式腐食センサ)

車両各部位の電気抵抗式腐食センサの出力結果より、降雪の観測された 12/3 以降では、①バンパービーム、⑤床下の腐食速度が他の部位に対し上昇する結果となった。一方、他の部位では、この 2 部位と比較し腐食速度は緩やかであった。

### 4. まとめ(各計測項目の部位別結果・考察)

3.の計測結果を複合し、車両各部位の腐食環境境界条件の明確化を行った。

今回の報告では、各部位の電気抵抗式腐食センサ出力から算出した腐食量・腐食速度に対し、温湿度、付着塩分量の観点から各部位の腐食環境を特徴づけ、床下に対する腐食速度のレベリングを行った。

### 【腐食量・腐食速度】

月別の腐食量・腐食速度の平均値より、各部位の特徴は下記の通り。本特徴に基づき温湿度、付着塩分量の観点から各部位の腐食環境の特徴づけを行う。

- ・ 計測期間内での Fe センサの腐食量は、大きい順に⑤床下、①バンパービーム、②フェンダー、③フロントドア、④室内の順
- ・ 同じエンジンルーム周辺でも①のバンパービームでは、②のフェンダーに対し6倍程度腐食量。
- ・ ④室内は計測期間を通じて腐食なし。
- ・ 腐食速度は、腐食量の大きい①バンパービーム、⑤床下で11月の計測開始時点から徐々に増加、2月にピークを示し、3月にかけては減少する傾向。

### 【温湿度】

各部位の月別の温湿度の平均値より、各部位の特徴は下記の通り。

- ・ ②フェンダーでは、走行時のエンジンの熱により他の部位と比較し、高温・低湿の傾向。
- ・ ①バンパービーム、③フロントドア、⑤床下の温湿度は、おおよそ⑥外気と連動しており、高湿の傾向。
- ・ ⑥外気の相対湿度は計測開始した11月から1月にかけて上昇、それ以降の2月、3月は減少傾向。バンパービーム、③フロントドア、⑤床下も同傾向。

### 【付着塩分量】

市場で計測した ACM センサ出力と相対湿度の計測値と、ラボで計測した検量線を用いて付着塩分量を算出した。各部位の月別の付着塩分量の平均値より、各部位の特徴は下記の通り。

- ・ ③フロントドア、④室内では計測期間を通じて付着塩分量は他の部位と比較して極微量。
- ・ ①バンパービーム、⑤床下は、計測開始後した11月から1月にかけて上昇、以降2月、3月にかけて減少する傾向。

### 【車両各部位の腐食環境】

各部位の計測期間全体での腐食速度、温湿度、付着塩分量の計測結果より、各部位の特徴的な腐食環境は下記の通り。

- ・ ①バンパービームでは前走車の巻き上げた水により被水し、塩分が付着したり、洗い流されたりするといった自車以外の要因で付着塩分量が変動するため、⑤床下に対し腐食速度の変動率が大きい傾向。
- ・ ②フェンダーでは、エンジンの熱により高温・低湿となるため、付着塩分量は①バンパービームと同等であっても、腐食速度は低い傾向。
- ・ ③ドアでは、温湿度環境は⑤床下と同様の高湿環境であるが、付着塩分量が少ないため、腐食速度は低い傾向。

- ・ ④室内では、⑤床下に対し低湿環境且つ、付着塩分量も少ないため腐食速度は極めて低い傾向

## 5. 高温多湿環境下での腐食環境

高温多湿の腐食環境での境界条件を明確にするため、欧州市場環境計測と同様の計測(表 3-2.9.7-3)を試験路面および、実車恒温恒湿槽を用いて計測を実施した。

### 5.1 計測項目

計測項目は欧州市場計測に合わせ、温度、湿度、腐食電流(ACM センサ)、腐食速度(電気抵抗式腐食センサ)とした。

### 5.2 搭載部位

欧州計測で計測部位の部位(表 3-2.9.7-3、図 3-2.9.7-1)のうち⑤床下環境の計測を実施した。

### 5.3 試験条件

実車恒温恒湿槽を用いて相対湿度を 60～90%、温度を 30～50℃の範囲で連続的に変化させた。本試験条件での容積絶対湿度は、20～85g/m<sup>3</sup>の間で変動する。なお、欧州計測に対し温湿度環境を対比させる目的から、あらかじめ欧州計測と同等の塩分(NaCl,1～10g/m<sup>2</sup>)を付着させた状態で計測を実施した。

### 5.4 試験結果

腐食速度および、温度、相対湿度、容積絶対湿度の時刻歴より、腐食速度は相対湿度に応じ 0～4mm/年程度の速度であった。

## ② マルチマテリアル構造車両における腐食境界条件の抽出【物質・材料研究機構】

### 1. はじめに

近年、車両のマルチマテリアル化、特に Al の車両への適用が進んでいる。そのため、Al と鋼の異種材接触部位の腐食のシミュレーション技術開発が求められている。今回、実車腐食の実態を把握し、計算科学に必要な腐食境界条件を明らかにするため、米国融雪塩散布地域で使用された車両を回収し、鋼、Al 合金のマルチマテリアル構造部品の調査を実施した。腐食境界条件を把握するため、車両に付着した泥中の塩化物量、塩種類、腐食生成物といった腐食環境と、マルチマテリアル部位のガルバニック腐食有無や浸食量との関係を調査した。

## 2. 調査方法

### 2.1 調査車両・部位

#### 2.1.1 回収車両

車種：トラック系乗用車

車両登録地：ニューヨーク州

車両回収地：ニューヨーク州アルバニー

走行距離：111,581 マイル

経年：5年8カ月

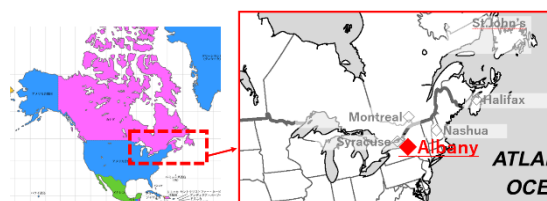


図 3-2.9.7-2 車両回収地域

#### 2.1.2 調査部位

車両におけるマルチマテリアル部位として、キャビン後部左側に位置する、フロアパン (Al) とそれに接する補強部品 (Fe) を調査した。フロアパン、補強部品は面で接触しており、両者の合わせ面には塗装が存在する。補強部品は部品単体で電着塗装されているため合わせ面にも塗装が付きやすいが、フロアパン側の塗装は部品が組付けられた後のボデー電着塗装のため、補強部品との合わせ面には塗装が隙間に入りにくく結果的に膜厚が不十分となる性質がある。

## 2.2 分析方法

まず車両外観を観察し、各部位から泥を採取した。次に泥から塩を水抽出し、ICP 発光分光分析法、原子吸光分析法、イオンクロマトグラフ法にて元素の定量分析を実施した。また、調査部位を一部切り出し Al、Fe の合わせ面の外観観察を実施したのち、腐食生成物を採取、XRD 分析による組成分析を実施。最後に左右反対側の同構造部位を合わせ面ごと切り出しマイクロフォーカス X 線 CT で浸食量調査を実施した。

## 3. 結果

### 3.1 車両外観

車両下回りにおいて、特にフレーム全体に腐食がみられ、厳しい腐食環境にさらされた車両であったことが推定された。

### 3.2 車両の付着塩の分析

車両各部位から回収した付着物の成分分析を実施した。試料によって含有量が異なるが、Na および Cl が検出された。試料によっては Ca が微量に検出された。以上の結果より、北米回収車から採取した付着物中に含まれる塩類（融雪剤）の多くは NaCl と推定される。

### 3.3 調査部位外観

フロアパン(Al)を切り開き、補強部品(Fe)との合わせ面を開いて確認を実施した。合わせ面には Al の腐食生成物とみられる白い固形物が観察された。またフロアパン



には孔あきも観察されたことから、Al と Fe の異種材接触腐食と考えられる。さらに、Fe 補強部品の塗装は、湾曲している部位を中心に剥離していた。

### 3.4 腐食生成物分析

3.3 にて観察された腐食生成物は分析の結果、ドーナイトと  $\text{Al}(\text{OH})_3$  と確認された。

### 3.5 X線 CT 解析

合わせ面の腐食状況を詳しく調査するため、3.4 で観察した部位とは左右反対側にあたる、右側をフロアパンと補強材を合わせた状態のまま切り出し、切断後樹脂埋めしマイクロフォーカス X線 CT にて解析を実施した。Al は数か所孔食に至る腐食が確認され、発生箇所には二つの特徴が見られた。まず一つ目としては、孔食が発生している部分は Fe 補強部品のエッジ部が近傍に位置していた。二つ目としては、Al の孔食が起こっていたのは、Fe の補強材部材が曲がり、べた合わせでなくある程度の隙間が形成されている部位であった。この部位は、3.4 で観察された、Fe 側の電着がとくに剥がれている部位とほぼ一致した。

## 4. まとめ –ガルバニック腐食境界条件

経年 5 年のトラック系乗用車を回収し、異種材接合部位を観察・調査した。調査部位は融雪剤 NaCl が巻き上げられる環境であり、腐食生成物としてドーナイトと  $\text{Al}(\text{OH})_3$  が確認された。またフロアパン(Al)と補強部品(Fe)の間にガルバニック腐食による孔あきが確認された。

## ③ 腐食環境シミュレーション技術の開発【物質・材料研究機構】

### A 液薄膜の熱力学計算

#### 1. 目的

NaCl および NaCl-CaCl<sub>2</sub> 混合塩（融雪塩相当）を含む水膜について、乾湿繰り返し環境下での溶液特性（塩濃度や溶存酸素濃度、pH 等）を熱力学計算により予測・検証することを目的とする。

#### 2. 計算方法

スウェーデン王立工科大学において開発され、Thermo-Calc Software AB 社により販売されている熱力学計算ソフトウェア Thermo-Calc の最新版（ver. 2021b-2022a）に、二種の熱力学データベース：SSUB5（化合物と Gas 相）と TCAQ3（水溶液相）を取り込んで、① 電位-pH 図（Pourvaix 図）と② 乾湿繰り返し環境下での溶液特性（H<sub>2</sub>O 活量、pH 変化）を計算した。マルチマテリアル車体に利用される材料として、溶融亜鉛めっきされたハイテン等の鋼板と耐食性に優れた 6000 系の Al 合金を研究対象に想定し、めっきを含めた各材料の基本元素である、Al、Fe および Zn と純水および融雪塩を想定して NaCl と CaCl<sub>2</sub> を含む混合塩水溶液との反応について、①と

②の計算を行った。

### 3. 計算結果

Al-Fe-Zn-NaCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O 6 元系およびそのサブシステムについて、様々な条件を想定した電位-pH 図が計算できることを確認した。以下(1)~(4)に示す条件での電位-pH 図を計算し、乾湿過程に伴う腐食生成物の相安定性を評価した結果、乾燥による H<sub>2</sub>O 量の減少に伴い、腐食生成物の相安定性が増大することが予測された。

(1) Al, Fe および Zn と純水の電位-pH 図

(2) Al-Fe-H<sub>2</sub>O, Al-Zn-H<sub>2</sub>O および Fe-Zn-H<sub>2</sub>O 系の電位-pH 図

(3) Al-Fe-Zn-H<sub>2</sub>O 系の電位-pH 図

(4) Al, Fe および Zn と NaCl+CaCl<sub>2</sub> 水溶液の電位-pH 図

また、乾湿繰り返し環境下での溶液特性の変化を予測するための例として、以下(5)~(6)に示す計算を行った。その結果、乾燥に伴う塩濃度の上昇に伴い H<sub>2</sub>O 活量が低下すること、および、乾燥に伴い Al が溶解した水溶液の pH 値が低下し、Zn が溶解した水溶液の pH 値が上昇することが予測された。

(5) H<sub>2</sub>O の活量に及ぼす NaCl 量と CaCl<sub>2</sub> 量の影響

(6) Al と Zn が溶解した水溶液の乾湿過程における pH 変化

### 4. まとめ

市販の状態図計算ソフトウェアと熱力学データベースを用いた熱力学計算により多種多様な条件における電位-pH 図の計算と、各種金属イオンが溶解した純水あるいは NaCl+CaCl<sub>2</sub> 混合塩水溶液中の乾湿繰り返し環境下での溶液特性 (H<sub>2</sub>O 活量と pH 値) の変化が予測できることを示した。

## B 液薄膜下でのガルバニック腐食シミュレーション

### 1. 目的

異種材料から構成されるマルチマテリアル構造について、ガルバニック腐食挙動を解析するためのシミュレーション技術を開発することを目的とした。また、実験データとの比較により計算シミュレーション技術の妥当性についても検討した。Al 合金/鋼の突き合わせ構造を対象に、第一段階として溶液中の腐食挙動解析モデルを構築し、その知見を基に第二段階として水膜での腐食挙動解析モデルの構築に取り組んだ。

### 2. 溶液中でのガルバニック腐食挙動解析

#### 2.1 試料および実験方法

ガルバニック腐食試験に使用するサンプルとして、Al 合金および鋼それぞれを 10 mm×10 mm の大きさに切断し、裏面にリード線を取り付けた後に同一のエポキシ樹脂に埋設した Al 合金/鋼二電極試料を作製した。この際、試料間には厚さ 100 μm の絶縁フィルムを配置した。また、Al 合金および鋼単体の動電位分極測定を行うため、それ

ぞれの試料を約 20 mm × 15 mm の大きさに切断し、中央部に 10 mm 四方の領域を残し、それ以外をエポキシ樹脂で被覆することで電極を作製した。

Al 合金/鋼二電極試料の腐食挙動を調査するため、NaCl 溶液中でガルバニック電流と電位の経時変化を測定した。NaCl 濃度は 0.05、0.5、または 5 wt.% とし、室温・非脱気 conditions で測定を実施した。上記のガルバニック腐食試験を 3 時間実施した後に、Al 合金および鋼それぞれの表面での腐食形態を顕微鏡により観察した。

## 2.2 溶液中でのガルバニック腐食挙動

NaCl 溶液中にて、Al 合金をアノード、鋼をカソードとする方向のガルバニック電流が計測された。NaCl 濃度の上昇にともないガルバニック電流は増加し、ガルバニック電位は卑になる傾向がみられた。

ガルバニック腐食試験後、Al 合金では孔食の発生がみられた。本研究に用いた Al 合金には Mg-Si 系金属間化合物および Al-Fe-Si 系金属間化合物を多量に含有しており、これらが起点となり孔食が発生したと考えられる。孔食の大きさは全ての NaCl 濃度でほぼ等しく、約 15 μm であった。一方、NaCl 濃度が高くなるほど発生する孔食の数が増加し、それにともなって孔食の占める面積率も増加した。Al 合金全体に占める孔食部の面積割合は、0.05% NaCl では 0.2%、0.5% NaCl では 1.0%、5% NaCl では 2.5% であった。一方、鋼側に着目すると、高 NaCl 濃度では鋼側はほとんど腐食しなかったが、NaCl 濃度の低下にともなって鋼側の腐食量が増加し、最も NaCl 濃度の低い 0.05 % NaCl 中ではほぼ全面的に鋼が腐食している様子が観察された。

## 2.3 溶液中での数値シミュレーションモデルの構築

上記の NaCl 溶液中でのガルバニック腐食挙動を解析するための数値シミュレーションモデルの構築に取り組んだ。計算にはソフトウェアとして、COMSOL Multiphysics を使用した。図 3-2.9.7-3 に計算に用いたシミュレーションモデルを示す。実験に用いた二電極試料と同様に、幅 10 mm の Al 合金と幅 10 mm の鋼が幅 100 μm の絶縁層を介して隣り合っているモデルを構築した。NaCl 溶液層の厚みは 5 mm 以上とした。計算の支配方程式として、ネルンスト-プランクの式とターフェルの式を用いた。実験での腐食挙動に合わせて、シミュレーションモデルにおいても Al 合金側は孔食部と不働態部から構成した。孔食の個数は NaCl 濃度が高いほど多くなるように設定し、Al 合金全体に占める孔食部の面積率が実測値（0.05% NaCl では 0.2%、0.5% NaCl では 1.0%、5% NaCl では 2.5%）と同一になるようにした。

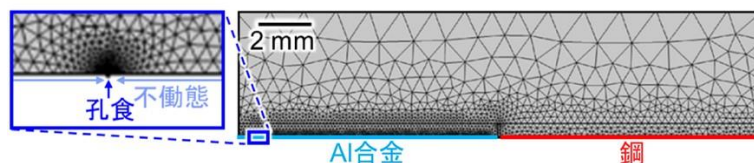


図 3-2.9.7-3 溶液中での数値シミュレーションモデル

## 2.4 数値シミュレーションに使用する境界条件

電極面でのアノード・カソード反応速度についての境界条件は、動電位分極曲線（実測値）をターフェル式に近似することで決定した。なお、Al 合金側の不働態部と孔食部では、アノード反応速度は異なると考えられることから、これらの領域のアノード反応速度に関する境界条件は別々に設定した。まず Al 合金の動電位サイクリック分極曲線（自然浸漬電位からアノード方向に電位を掃引し、孔食発生後、カソード方向に電位掃引方向を変更して測定した分極曲線）を計測した。不働態部の境界条件は、孔食発生前であるアノード方向に電位掃引時の分極曲線をターフェル式に近似して決定した。孔食部の境界条件は、孔食発生後であるカソード方向に電位掃引時の分極曲線をターフェル式に近似して決定した。

## 2.5 数値シミュレーション結果

構築した数値シミュレーションモデルの妥当性を検証するため、ガルバニック電流と電位の計算値と実験値を比較した。図 3-2.9.7-4 はガルバニック電流について、計算値と実験値を比較した結果である。NaCl 濃度一桁上昇するごとに電流値も一桁上昇するという、実験値と同様の傾向が計算値でも確認された。一方、ガルバニック電位についても、NaCl 濃度の上昇とともに卑化するという、実験値と整合性の高い計算結果が得られた。以上の結果から、本研究で作成した数値シミュレーションモデルは現実の腐食現象との整合性が高く、NaCl 溶液中でのガルバニック腐食挙動を高い精度で再現することが可能であると考えられる。

数値シミュレーションの結果を基に、NaCl 濃度に対するガルバニック腐食挙動の変化を解析した。ガルバニックカップル全体では、アノード電流とカソード電流の収支は等しくなる。NaCl 濃度が高い場合（5% NaCl）は、Al 合金でのアノード電流値は鋼でのカソード電流値とほぼ等しい。言い換えると、鋼のカソード電流に見合うアノード電流を Al 合金上で担保できており、鋼上ではアノード反応がほとんど生じない。すなわち、Al 合金をアノード、鋼をカソードとするガルバニック腐食が支配的に生じ、鋼の自己腐食はほとんど生じないと考えられる。

一方、NaCl 濃度の低下にともない、Al 合金での孔食の発生数が減少するため、Al 合金でのアノード電流が減少する。そのため、鋼上でのカソード電流に見合うアノード電流を Al 合金上だけでは担保できなくなり、この不足するアノード電流分を補うため、鋼でもアノード溶解（自己腐食）が生じることが判明した。この傾向は、実際にガルバニック腐食試験後の Al/鋼二電極試料表面で観察された腐食形態と一致する。

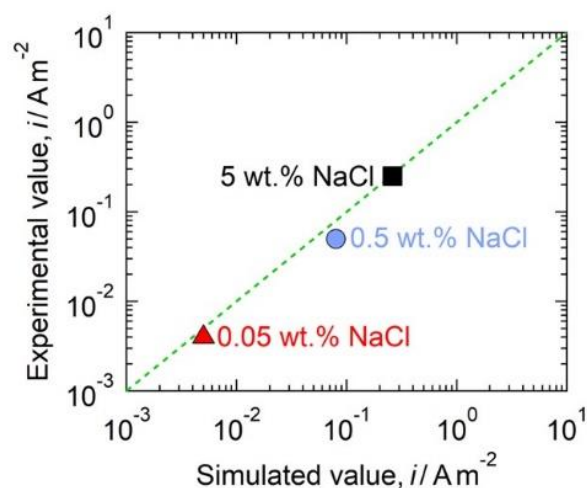


図 3-2.9.7-4 ガルバニック電流の計算値と実験値の比較。

### 3. 水膜中でのガルバニック腐食挙動解析

#### 3.1 実験方法

上記の NaCl 溶液中での実験に加え、NaCl を含有する水膜の乾湿繰り返し環境下でのガルバニック腐食挙動の解析も実施した。この際、Al 合金/鋼二電極試料を温度 298 K、湿度 60%に制御した恒温恒湿槽中に試料面が水平になるように配置し、まず 0.05 % または 0.5 %NaCl を含有する水膜 500  $\mu$ L を試料の上に滴下・形成した。上記の温度および湿度では、試料の上の水膜は約 3 時間で完全に乾燥し、NaCl のみ試料表面に残存する。そこで次に、純水 500  $\mu$ L を試料の上に滴下し、NaCl を含む水膜を再形成した後に、再度 3 時間放置することで乾燥させた。この乾燥-湿潤のサイクルを合計で 12 回繰り返しながら、ガルバニック電流の経時変化を測定した。

乾湿繰り返しにより形成した腐食生成物の組成を調査するため、X 線回折分析 (XRD) を実施した。Cu-K $\alpha$  線源 (45 kV, 200 mA) を用いて 0.02 $^{\circ}$ ごとに測定を行い、スキャン速度は 1 $^{\circ}$  min $^{-1}$ とした。さらに、乾湿繰り返し後の腐食生成物の分布を解析するため、SEM/EDS による観察を実施した。この際、加速電圧は 20 kV とした。

Fe 系の化学種の存在が Al 合金の腐食挙動におよぼす影響を調査するため、動電位アノード分極測定を実施した。まず Al 合金/鋼二電極試料を 0.5 %NaCl 溶液に浸漬し、鋼側のみを定電位分極することで、意図的に Fe さびや Fe イオンを溶液中に形成させた。その後、Fe 成分が存在する溶液中で今度は Al 合金側の動電位アノード分極曲線を測定した。

#### 3.2 水膜の乾湿繰り返し環境でのガルバニック腐食挙動

NaCl を含有する水膜の乾湿繰り返し条件下にて、Al 合金をアノード、鋼をカソードとする方向のガルバニック電流が計測された。乾湿を繰り返すことによるガルバニック電流の変化挙動に着目すると、0.5 % NaCl を含む水膜では、乾湿サイクルを繰り返してもガルバニック電流はほとんど変化しなかった。一方、0.05% NaCl を含む水膜では、初期はガルバニック電流が 0.5 %NaCl の場合よりも低かったが、乾湿を繰り返すごとにガルバニック電流が連続的に増加した。すなわち、NaCl 濃度が低い水膜中では、NaCl 濃度が高い水膜と比較して初期はガルバニック腐食が起こりにくいが、乾湿を繰り返すごとにガルバニック腐食反応が促進されると考えられる。

さらに、0.05% NaCl を含有する水膜で試験を実施した試料では、0.5% NaCl で試験を実施した試料と比較して多量の Fe さびが形成し、Al 合金上にも堆積している様子が観察された。NaCl 溶液中の数値シミュレーション結果を基に考察すると、NaCl 濃度が低い場合は Al 合金で孔食が発生しにくいため、鋼上のカソード電流に見合うアノード電流を Al 合金上のみでは担保できず、鋼の自己腐食が進行したと考えられる。

#### 3.3 低濃度 NaCl でのガルバニック腐食の促進をもたらす要因の解析

Al 合金断面を観察したところ、0.05% NaCl を含む水膜で乾湿繰り返し後の試料では Al 合金上に Fe さびの堆積がみられたが、0.5 % NaCl を含む水膜で試験後の試料では Al 合金上に Fe さびは堆積していなかった。NaCl 濃度が低い場合は鋼の自己腐食が生

じやすいことを考慮すると、この結果は合理的であると考えられる。さらに、Al 合金上に堆積した Fe さびの組成を XRD 分析を行った結果、Fe さびは主に  $\text{FeOOH}$  と  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  から構成されていることが判明した。

12 サイクル乾湿繰り返し後の試料表面に堆積した腐食生成物を除去して Al 合金での腐食形態を観察した。0.5 % NaCl を含む水膜で試験を行った試料では、主要な腐食形態は金属間化合物を起点とした孔食であった。一方、0.05 % NaCl を含む水膜で試験を行った試料では、金属間化合物周辺だけでなく、Al 合金母相部でも腐食が進行している様子が観察された。先行研究では、Fe イオンなどの Fe 成分が存在すると Al の不働態化が阻害されるとの報告例がある。0.05% NaCl を含む水膜で乾湿繰り返し時は鋼の自己腐食反応により形成した Fe さびが Al 合金上にも堆積していたことを考慮すると、0.05% NaCl を含む水膜中では Fe 成分により Al 合金の不働態化が阻害され、このことがガルバニック腐食反応 (Al 合金：アノード、鋼：カソード) の促進をもたらした可能性があると考えられる。

### 3.4 Fe 成分の存在による Al 合金の腐食反応の促進

Fe 成分の存在が Al 合金の腐食反応を促進する要因ではないかと予想し、0.5 % NaCl 溶液中で意図的に Al 合金上に Fe さびを堆積させ、その状態で Al 合金の腐食挙動の変化を解析した。その結果、Fe 成分が存在する環境下では、本来 Al 合金の不働態域である電位域で、アノード電流が増加することが判明した。すなわち、Fe 成分は Al 合金の不働態化を阻害し、アノード反応を促進する効果を有すると考えられる。この Fe 成分による Al 合金の腐食反応の促進は、乾湿繰り返し時、0.05% NaCl を含む水膜でのガルバニック腐食の促進をもたらす一因であると考察される。

### 3.5 水膜下での数値シミュレーションモデルの構築

水膜での腐食挙動を再現可能なシミュレーションモデルの構築に取り組んだ。計算にはソフトウェアとして COMSOL Multiphysics を使用した。水膜下での数値シミュレーションモデルは、基本的には溶液中でのモデルと同様の手法で構築したが、(1) Al 合金での腐食部の面積率および(2) 境界条件に使用する分極曲線は以下に述べるように変更した。

まず、水膜の乾湿繰り返し後の Al 合金での腐食部の面積率については、Al 合金/鋼界面に近いほど大きいことが判明している。これは、Fe イオンや Fe さびなど Fe 成分の存在により Al 合金の不働態化が阻害され、アノード反応が促進されたことと関連していると考えられる。この結果に合わせて、数値シミュレーションにおいても Al 合金側の腐食部の面積は、Al 合金/鋼界面に近づくほど大きくなるように設定した。電極面でのアノード・カソード反応速度についての境界条件は、実測の分極曲線をターフェル式に近似することで決定している。乾湿繰り返し時は、サイクル数の増加に伴って試料表面に腐食生成物が堆積し、分極挙動が変化する。そのため、水膜下での境界条件は、乾湿繰り返し後の試料表面で測定した分極曲線をターフェル式に近似することで決定した。

### 3.6 水膜下での数値シミュレーション結果

構築した水膜下での数値シミュレーションモデルの妥当性を検証するため、計算結果と実験結果の整合性を確認した。水膜の乾湿繰り返し 12 サイクル目の状況を対象としてシミュレーションモデルを構築し、ガルバニック電流密度の計算値と実験値を比較したところ、0.05% NaCl と 0.5% NaCl とともに、計算値と実験値には高い整合性がみられた。実験では、0.5% NaCl では乾湿繰り返し前と 12 サイクル乾湿繰り返し時のガルバニック電流値はほぼ等しいが、0.05 % NaCl では 12 サイクル乾湿繰り返し時のガルバニック電流は乾湿繰り返し前より約 1 桁大きかった。計算結果はこのどちらの傾向とも一致していることから、実験での腐食挙動を高精度に再現していると判断される。前述したように、シミュレーションモデルの構築に際しては、(1) Al 合金での腐食部の面積率および(2) 境界条件に使用する分極曲線を適切に設定することに留意した。本研究により、これら 2 項目を重視することで、水膜下の腐食挙動についても現実と精度の高い計算結果を得られることが明らかとなった。

## 4. まとめ

Al 合金/鋼の突合せ構造を対象に、有限要素法に基づきガルバニック腐食挙動を解析可能な数値シミュレーションモデルの構築に取り組んだ。得られた主な知見は以下のとおりである。

### 【NaCl 溶液中での腐食挙動に関する知見】

1. 電気化学計測の結果、5、0.5、0.05% NaCl 溶液中に Al 合金/鋼突合せ試料を浸漬すると、Al 合金をアノード、鋼をカソードとしてガルバニック腐食が生じることが判明した。この際、Al 合金では金属間化合物を起点として孔食が生じた。さらに、NaCl 濃度が低下するほど、上記のガルバニック腐食に加えて鋼の自己腐食反応も顕著に生じることが判明した。
2. 数値シミュレーションモデルでは、実際の腐食挙動に合わせて Al 合金側を孔食部と不働態部から構成した。さらに、孔食部の大きさと Al 合金全体に占める面積率を、実験データに基づき決定した。このような計算モデルを用いた結果、実験でのガルバニック電流・電位の NaCl 濃度依存性を高精度で再現可能なシミュレーションモデルの構築に成功した。
3. 数値シミュレーションの結果、高濃度 NaCl (5% NaCl) では Al 合金上のアノード電流は鋼のカソード電流とほぼ等しく、主に Al 合金をアノード・鋼をカソードとするガルバニック腐食のみが生じることが判明した。一方、NaCl 濃度の低下に伴い、Al 合金上でのアノード電流が低下するため、Al 合金でのアノード電流が鋼でのカソード電流と比較して低くなり、不足するアノード電流分を補うために鋼の自己腐食反応も進行することが分かった。

### 【NaCl を含む水膜中での腐食挙動に関する知見】

4. NaCl を含む水膜の乾湿繰り返し環境でのガルバニック腐食挙動を調査したところ、溶液中と同様に Al 合金をアノード、鋼をカソードとしてガルバニック腐食が生じるこ

とが判明した。また、ガルバニック腐食挙動は水膜の NaCl 濃度に依存し、NaCl 濃度が低い場合は乾湿を繰り返すごとにガルバニック腐食反応が促進することが判明した。NaCl 濃度が低い場合は、Al 合金のうち鋼近傍にて Fe さびの堆積がみられ、かつ、この領域では Al 合金の腐食反応が促進している様子が観察された。

5. Fe さびや Fe イオンが存在する環境で Al 合金の分極測定を実施した結果、これらの Fe 系成分が存在する場合は Al 合金の不働態化が阻害され、Al 合金でのアノード反応が促進されることが判明した。この Fe 成分による Al 合金の腐食反応の促進が、低濃度 NaCl を含む水膜でのガルバニック腐食 (Al 合金: アノード、鋼: カソード) の促進をもたらす一因であると考察される。

6. 溶液中の数値シミュレーションモデルを基に、(1) 境界条件に用いる分極曲線について乾湿繰り返し後のデータを使用すること、(2) Al 合金での腐食部の面積率を実測値に合わせることを重要視することで、実験との整合性の高い、水膜下での数値シミュレーションモデルの構築に成功した。

#### ④ すき間内部の環境特性評価と有限要素法によるマルチマテリアル接合部ガルバニック腐食の数値シミュレーション法構築【大阪大学】

##### 1. 背景と目的

自動車のマルチマテリアル化によって車体強度を保ちつつ軽量化が実現できるが、耐食性の観点からは、異種金属の接触によるガルバニック腐食とすき間構造形成によるすき間腐食の発生が懸念される。そこで、本研究では電氣的に接触させた Fe と Al との間に形成されるすき間内での腐食現象を、すき間内環境モニタリングと数値シミュレーションを用いて検討した。

##### 2. すき間腐食モニタリング

本研究で用いたマルチマテリアル接触すき間試験体の形状を図 3-2.9.7-5 に示す。本研究では異種材料として高張力鋼 (HT) とアルミニウム合金 (Al) の組み合わせを検討している。2つの試料間は電氣的に絶縁され、さらにガルバニック電流を測定するためのリード線がそれぞれ接続されている。一方、すき間内の電位、溶存酸素(DO)のモニタリングを目的として、参照電極を設置するとともに光学式溶存酸素センサをすき間内に挿入している。

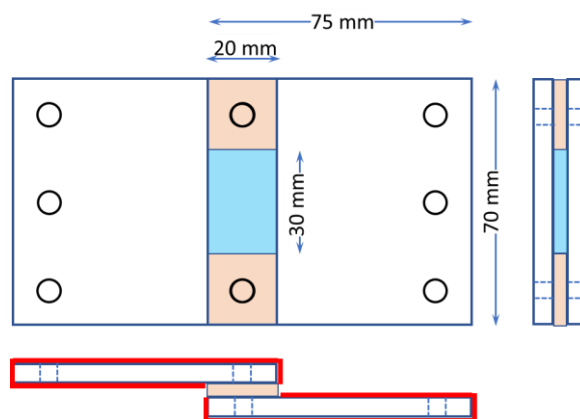


図 3-2.9.7-5 マルチマテリアル接触すき間試験体の形状

本研究では、テーマ 65B 共通仕様のサイクル試験を行った。すなわち、試験液



として 0.5wt% NaCl + 0.1wt% CaCl<sub>2</sub> を基準とし、これより 10 倍および 1/10 の濃度の水溶液を用いた。一方、環境は次のような低温高湿度と高温低湿度の環境を 8 時間ごとに繰り返すサイクル試験としている。

10 °C, 90% RH, 3 h + 遷移時間 1 h  
 25 °C, 35% RH, 3 h + 遷移時間 1 h      8 h / cycle,      週 2 回試験液に浸漬

図 3-2.9.7-6 にガルバニック電流の測定例を示す。図中ガルバニック電流は、試験溶液が 0.5wt% NaCl + 0.1wt% CaCl<sub>2</sub> のときと 0.05wt% NaCl + 0.01wt% CaCl<sub>2</sub> をそれぞれ赤、黒線で示している。この図では、下向きを Al のアノード電流として表記しており、低温高湿度の環境にてガルバニック電流が発生し、高温低湿度環境への遷移の開始とともに急速に低下している。また、試験液への浸漬後にガルバニック電流が急増し、サイクルを重ねるごとに低下している。

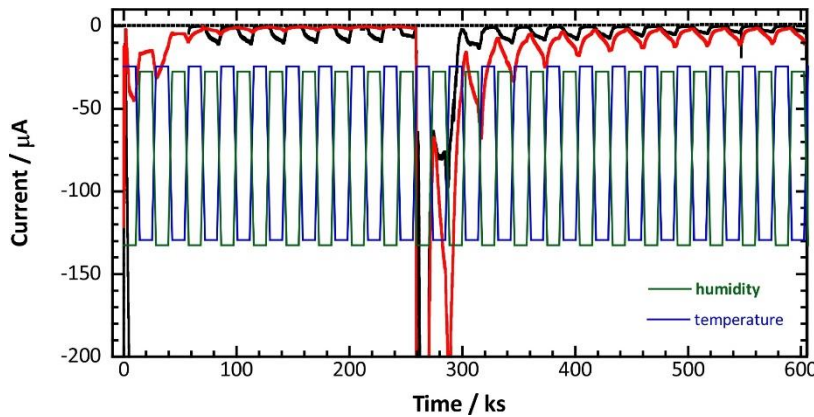


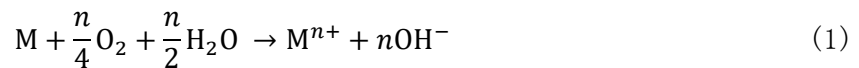
図 3-2.9.7-6 ガルバニック電流の測定例。下向きが Al 合金のアノード方向

### 3. 異種金属接触すき間腐食の数値シミュレーション

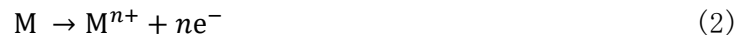
#### 3.1 数値モデル化の基礎式

水溶液中の金属表面で生じる電気化学反応の数値シミュレーションを行うために、本研究で採用した分極特性の設定方法を以下に示す。

水溶液中の溶存酸素による金属 M の腐食反応は、次の反応式で表される。



この反応は、式(2)に示す金属の酸化反応すなわちアノード反応と、式(3)に示す酸素の還元反応であるカソード反応に分解される。



アノード電流密度  $i_a$  [A/m<sup>2</sup>] は以下のターフェル式を用いて記述できる。

$$i_a = i_a^0 \times 10^{\frac{\eta_a}{\beta_a}} \quad (4)$$

$$\eta_a = \phi_s - \phi_l - \phi_{eq,a} \quad (5)$$

ここで、 $i_a^0$  はアノード交換電流密度 [A/m<sup>2</sup>]、 $\eta_a$  はアノード過電圧 [V]、 $\beta_a$  はアノード反応

のターフェル勾配[V/decade]、 $\phi_s$ は電極電位[V]、 $\phi_l$ は電解質電位[V]、 $\phi_{eq,a}$ はアノード平衡電位[V]である。

一方、酸素還元反応では、電極界面での溶存酸素が消費されるため、周囲から溶存酸素が拡散によって供給される。このとき、沖合で濃度一定の対流層があると仮定すると、電極表面付近に拡散層が形成されて酸素の消費と供給とが等しい定常状態となるため、酸素還元電流密度は常に一定となり、以下の式で表される。

$$i_{O_2}^{dif} = \frac{4FD_{O_2}c_{O_2}^{bulk}}{\delta} \quad (6)$$

ここで、 $i_{O_2}^{dif}$ は酸素還元の拡散限界電流密度[A/m<sup>2</sup>]、 $D_{O_2}$ は溶存酸素の拡散係数[m<sup>2</sup>/s]、 $c_{O_2}^{bulk}$ は溶存酸素のバルク濃度[mol/L]、 $\delta$ は拡散層厚さ[m]である。静止水溶液中にある平板電極近傍の拡散層厚さは通常 0.1 ~ 0.5 mm であると言われている。しかし、本研究では狭いすき間内の現象であるため拡散層の存在を考慮せず、ターフェルの式に電極表面の溶存酸素濃度とバルク水溶液の溶存酸素濃度の比、すなわち飽和度をかけた次の式を用いた。

$$i_{O_2} = i_{O_2}^0 \times \frac{c_{O_2}}{c_{O_2}^{bulk}} \times 10^{\frac{\eta_{O_2}}{\beta_{O_2}}} \quad (7)$$

この式は攪拌などによって溶存酸素が電極表面に豊富に存在する場合、表面とバルクの酸素濃度比は 1 となるため、電荷移動律速であるターフェル式と同義となる。一方で、過電圧が大きい場合には、電極表面で溶存酸素が多量に消費されて少なくなり、酸素還元電流が小さくなる。この式により、拡散層厚さを定義することなく酸素還元反応をモデル化することができる。また、酸素還元反応の平衡電位 $\phi_{eq,O_2}$  [V]はネルンストの式より、以下のように記述される。

$$\phi_{eq,O_2} = \phi_{eq,O_2}^0 - \frac{RT}{4F} \ln \frac{c_{OH^-}^4}{p_{O_2}} \quad (8)$$

$$p_{O_2} = 0.201 \times \frac{c_{O_2}}{c_{O_2}^{bulk}} \quad (9)$$

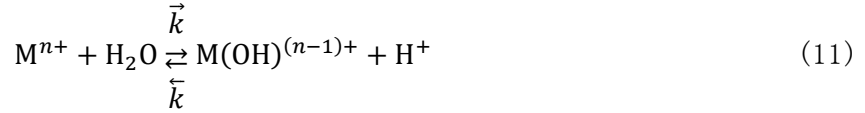
ここで、 $\phi_{eq,O_2}^0$ は酸素還元反応の標準電極電位[V]、 $p_{O_2}$ は酸素分圧[atm]である。なお、電極反応に伴う電解質中の化学種の消費および生成速度 $R_{ij}^e$  [mol/(L·s)]は以下のように記述される。

$$R_{ij}^e = \frac{\nu_{ij}\tilde{i}_j}{n_jF} \quad (10)$$

ここで、 $\nu_{ij}$ は反応 $j$ における化学種 $i$ の化学量論係数、 $\tilde{i}_j$ は反応 $j$ の電流密度[A/m<sup>2</sup>]、 $n_j$ は反応 $j$ における関与電子数である。この式(10)が電極表面の境界条件のひとつとなる。

### 3.2 電解質中の化学反応

水溶液中では電気化学反応以外にも、水の電離平衡や金属イオンの加水分解反応など、様々な化学反応が生じている。水溶液中で金属イオン $M^{n+}$ の加水分解反応が生じているとする。



ここで、 $\vec{k}$ は順方向の、 $\bar{k}$ は逆方向の反応速度定数である。この反応は可逆反応であるため、反応に関わる化学種の濃度は平衡定数 $K$ を用いて、以下の式で表される。

$$K = \frac{c_{\text{M(OH)}^{(n-1)+}} \times c_{\text{H}^+}}{c_{\text{M}^{n+}} \times a_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (12)$$

ここで、 $a_{\text{H}_2\text{O}}$ は水の活量であり、溶媒として存在する水の活量は一般的に 1 として扱う。また、式(11)の反応が平衡である場合、順方向と逆方向の反応速度は等しいため、以下の式が導かれる。ただし、各種濃度は1 [mol/L]で除して無次元化した。

$$\vec{k}c_{\text{M}^{n+}} = \bar{k}c_{\text{M(OH)}^{(n-1)+}} \times c_{\text{H}^+} \quad (13)$$

式(12)と式(13)から平衡定数と反応速度定数の関係式が得られる。

$$K = \frac{\vec{k}}{\bar{k}} \quad (14)$$

従って、いずれかの反応速度定数を任意に決めてやれば、もう一方の反応速度定数は一意に決まる。逆方向の反応速度定数 $\bar{k}$ を $k$ とすると、各化学種の生成及び消費速度は以下のように表される。

$$R_{\text{M(OH)}^{(n-1)+}} = Kk c_{\text{M}^{n+}} - k c_{\text{M(OH)}^{(n-1)+}} \times c_{\text{H}^+} \quad (15)$$

$$R_{\text{H}^+} = R_{\text{M(OH)}^{(n-1)+}} \quad (16)$$

$$R_{\text{M}^{n+}} = -R_{\text{M(OH)}^{(n-1)+}} \quad (17)$$

### 3.3 腐食生成物の電気化学反応に及ぼす影響

腐食生成物のある HT ならびに Al 合金の分極挙動を実験的に求めることにより、腐食生成物がカソード反応抑制に及ぼす効果を定量的に明らかにした。この実験結果をもとにして、すき間内でのカソード電極反応速度に腐食生成物の量に応じて係数を乗ずることにより、腐食生成物が腐食反応を抑制する作用を数値モデルに導入した。

### 3.4 腐食生成物の固定電荷の取り扱い

腐食生成物が堆積すると固定電荷を生じてイオン移動に対する選択性が生じることが知られている。例えば、多孔質固体中に正の固定電荷が存在すると電気的中性を保つために多孔質内に同符号の電荷、すなわちこの場合では正の電荷をもったイオンを排除するので、多孔質固体内に存在できるのは負の電荷をもったイオンとなる。従って、アニオン選択性を持つ多孔質内ではアニオン、すなわち負の電荷をもったイオンしか移動できなくなる。この現象は膜電位として知られており、すなわちイオン選択性を持った膜の両側に濃度の異なる同種の塩水溶液が存在すると、濃度差もとづき電解質は拡散するが、このときイオン選択があるので正負両

イオンが均等には拡散できずに電荷の過不足が生じ、結果として膜の両側間に電位差を発生する。鉄系の腐食生成物はアニオン選択性を示すことが多い。このとき、負電荷をもつ、たとえば塩化物イオンは通過するが、正電荷をもつ水素イオンは透過しにくくなる。一方、すき間内にアニオン選択性の腐食生成物が堆積すると、局部腐食近辺ではアノード溶解によって生成した金属イオンの加水分解により生成する水素イオンの拡散は抑制され、結果として局部腐食近辺での pH 低下が促進されることが考えられる。また、金属イオンの拡散が妨げられ、腐食生成物の堆積範囲が狭くなる効果が予想される。さらに、本研究では固定電荷を模擬する計算手法を考案した。

### 3.5 各種金属の電気化学挙動の調査

腐食挙動の数値シミュレーションには電極反応、物質移動などの各種金属材料ならびに化学種に固有の物性値が必要である。反応に関与する化学種に関与する化学反応の平衡定数については、多くは文献値から得ることができる。一方、電極反応に関する電気化学パラメータについては、環境に依存するために多数の数値が必要であるが、十分なデータは存在しないので、必要な範囲のデータベースを構築する必要がある。本研究では、想定される環境の最低限の範囲内の電極反応パラメータを実験により取得するとともに、文献値を整理した。

### 3.6 異種金属接触ガルバニック腐食の数値モデル化と結果

数値シミュレーションでは 図 3-2.9.7-7 に示すように、実験と同じサイズ(20 mm × 30 mm)のハイテン(HT)電極とアルミニウム合金(Al)電極の間に 0.1 mm × 20 mm のすき間を作成した 2 次元モデルを用いた。すき間内に 0.5 wt% NaCl + 0.1 wt% CaCl<sub>2</sub> または、同化学組成で濃度を 1/10 あるいは

10 倍とした水溶液を満たし、すき間両端では電解液は空気と接触し、その気液界面で溶存酸素濃度は一定となると仮定した。このとき、各電極にはアノード反応として金属の溶解反応が、カソード反応として酸素還元反応とが同時に生じている。ただし、Al は全面腐食ではなく局所的に腐食するため、電極の一部分のみでアノード反応が、その他の大部分ではカソード反応が生じていると仮定した。電解質中では水の電離平衡と Al<sup>3+</sup>の加水分解反応に加えて、Fe<sup>2+</sup>が Fe<sup>3+</sup>になる酸化反応を考慮した。また、本研究ではサイクル試験での 8 時間ごとの低温/高湿度環境のサイクルのモデルを構築するため、溶液内の溶存酸素濃度を 8 時間ごとに初期濃度に回復させた。

Al の腐食面積率を 10%としたときの、HT と Al 合金それぞれのアノード電流を図 3-

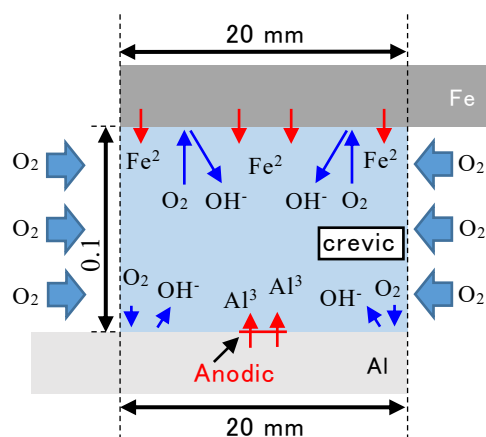


図 3-2.9.7-7 異種金属接触すき間計算モデル

2.9.7-8 に示す。Al 合金が生じるアノード電流は HT のそれよりも 10 倍以上大きい。また、Al 合金のアノード電流は時間の経過とともに増大するのに対し、HT では減少している。これらに対応するガルバニック電流の計算結果を図 3-2.9.7-9 に示す。Al がアノード溶解する方向のガルバニック電流が生じており、Al 合金が HT と比べて優先腐食していることが分かる。

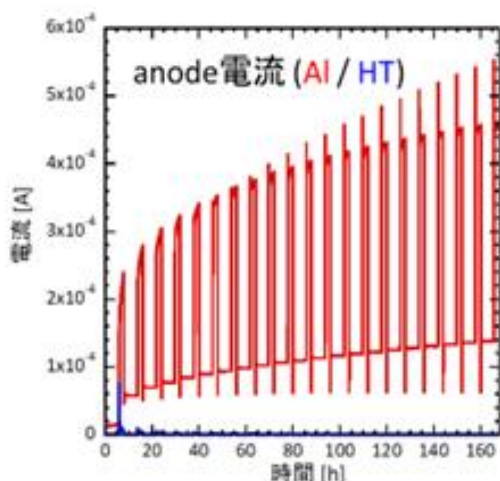


図 3-2.9.7-8 Al 腐食面積率を 10% としたときの HT/Al 合金異種金属接触ガルバニック腐食電流の数値モデル計算例

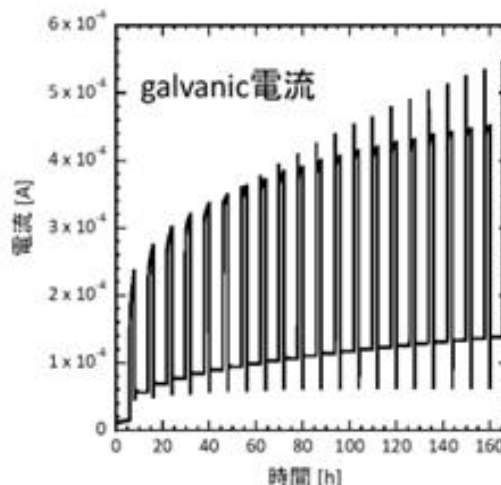


図 3-2.9.7-9 Al 腐食面積率を 10% としたときの HT/Al 合金異種金属接触ガルバニック腐食電流の計算例

ガルバニック腐食では電氣的に接触している 2 種の金属上で、それぞれ金属の腐食に対応するアノード反応と酸素還元等のカソード反応が、原則として等電位にて独立に生じるために、各金属上でのアノード反応とカソード反応とはバランスせず、過不足があるためにガルバニック電流を生じる。このような、収支バランスを模式図として図 3-2.9.7-10 に示す。

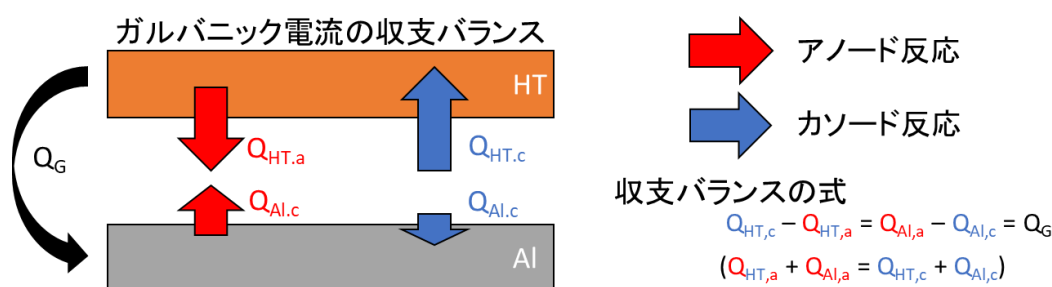


図 3-2.9.7-10 ガルバニック腐食の各金属上のアノード、カソード反応と、ガルバニック電流の収支バランスを示す模式図

本研究の数値シミュレーションで得られた HT と Al のマルチマテリアルすき間ガルバニック腐食量の大きさを整理して図 3-2.9.7-11 に示す。すなわち、Al 合金は HT 接触することにより腐食速度は HT と比べて著しく大きくなっている。また、塩化物の濃度が大きいほど腐食速度が大きいことも明らかである。

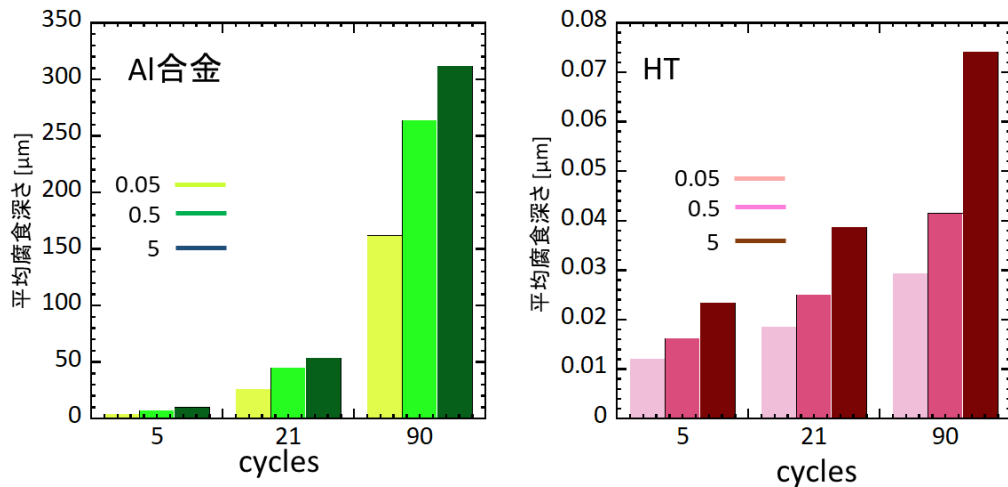


図 3-2.9.7-11 数値モデル計算から得られた、異種金属接触腐食での腐食平均深さ

#### 4. まとめ

マルチマテリアルの接合部となる板合わせ部での異種金属接触すき間内ガルバニック腐食を数値シミュレーションによって予測するために、実験室での加速試験を模擬した試験体でのガルバニック腐食を市販の有限要素法ソフトウェアパッケージを用いて数値シミュレーションを実施した。得られた主な知見は以下のとおりである。

- (1) Al 合金/HT の組み合わせでの異種金属接触すき間内の酸素濃度測定を色素反応型光学式溶存酸素測定器により連続的に測定することができた。
- (2) Al 合金/HT の組み合わせでのマルチマテリアル接触すき間試験体を作成し、0.5 wt% NaCl + 0.1 wt% CaCl<sub>2</sub> を基本組成とする電解質溶液を用い、高温-低湿度 (25 °C, 35% RH) と低温-高湿度 (10 °C, 90% RH) 間のサイクル腐食試験を実施し、この間のガルバニック電流を最長 3 カ月間測定した。さらに、試験後の腐食生成物の解析、ならびに腐食生成物除去後の腐食量を評価した。
- (3) Al 合金/HT の組み合わせすき間内での、高温-低湿度と低温-高湿度間のサイクル腐食試験を模擬する、数値シミュレーションモデルを開発した。この計算シミュレーションでは、金属の種類、初期塩化物濃度、すき間の形状、模擬乾湿取り返しの時間間隔、局部腐食を生じる面積率などを変化させて計算を実行できる。
- (4) Al 合金/HT の組み合わせすき間の塩化物水溶液を電解質とする異種金属接触すき間腐食の数値シミュレーションにより、実験室サイクル試験と同様のガルバニック電流の変化が得られた。
- (5) 数値シミュレーションでは Al 合金の腐食面積率を変化させると、HT と Al 合金の腐食速度は大きく変化した。すなわち、Al 合金の腐食面積率が小さいと、ガルバニック電流が見かけ上 Al 合金が優先溶解している場合でも、HT が優先溶解する。しかし、Al 合金の腐食面積率がある閾値を越すと、Al 合金の優先腐食が生じ、一方 HT の腐食は抑制されることが分かった。

(6) すき間内の溶存酸素、pH、さらに塩化物イオンなど各種化学種の濃度分布とこれらの物質移動速度の経時変化を数値シミュレーションによって算出できた。

## ⑤ すき間内部の化学特性の評価【再委託先：北海道大学】

### 1. 背景・概要

マルチマテリアル接合部でのガルバニック腐食のシミュレーション技術を開発するために、テーマ番号 65 で推奨される乾湿繰り返し試験法に則した実験により生成したすき間内水溶液の実態と腐食生成物の物性を調査し、得られた成果をマルチマテリアル接合部ガルバニック腐食の FEM 数値シミュレーション技術構築に供する。これを実現するため、異種金属接触腐食評価用共通試験片を用いて乾湿繰り返し試験を実施し、異種材料 (Al-GA、Fe-Al、Fe-GA) 合わせ部化学特性評価として、すき間内に充填した腐食生成物のイオン透過性を解析可能とする膜電位測定系を開発した。また、すき間内から採取した溶液を ICP-OES を用いて分析することによる溶出金属イオンの定量法を開発した。さらに NaCl 環境下ですき間内に形成した腐食生成物の化学組成をラマン顕微鏡などにより分析した。

供試材は下地表面処理したプレート (ハイテン 980、Al6016、GA ハイテン 980、CFRTP) をポリアセタール樹脂製ボルト・ナットで締結した後にカチオン電着塗装した複雑な形状を有する。テーマ 65 で考案された北方圏冬期路面状況を反映させた乾湿繰り返し試験 (25°C-35%RH, 3h 間と 10°C-90%RH, 3h 間を 1h 間にて遷移するサイクルを繰り返し、18 および 24 サイクルごとに 0.25h 間、融雪塩環境を模擬した水溶液に浸漬する) を実施する腐食装置を開発した。数週間のサイクル後、供試材すき間からの空気漏れを起こさない腐食生成物を形成させることができた。ラマン顕微鏡、XRF 顕微鏡などから腐食生成物にはプレート材成分の他、浸漬に使用した融雪材成分元素を含むことが示された。電気化学測定 of 妨げにならない素材のみを用いて、乾湿繰り返し試験による腐食生成物の膜電位測定を可能にする特殊な電気化学測定装置を開発した。ハイテン-亜鉛めっきハイテン、ハイテン-アルミニウム、アルミニウム-亜鉛めっきハイテン、CFRTP-ハイテン、CFRTP-亜鉛めっきハイテン、CFRTP-アルミニウム組み合わせ試料すき間に形成した腐食生成物に関して NaCl 水溶液を用いて膜電位測定した結果、腐食生成物はいずれもアニオン選択性を示すことが明らかとなった。また、見かけの輸率および固定電荷は腐食生成物作製時に浸漬した模擬融雪塩水溶液の濃度と成分に依存することがわかった。

### 2. 成果

供試材は下地表面処理したハイテン (H)、アルミニウム (A)、亜鉛めっきハイテン (G)、CFRTP (C) のうち 2 つをポリアセタール樹脂製ボルト・ナットで締結した後にカチオン電着塗装した複雑な形状を有する。

テーマ 65 で考案された北方圏冬期路面状況を反映させた乾湿繰り返し試験を実施する腐食装置 (環境試験機、シーケンサー、ポンプ、電磁弁、フロートスイッチなどから構成) を開発した。ハイテン-アルミニウム (HA) の組み合わせ試料の場合、3 週間の

サイクル後、供試材すき間からの空気漏れを起こさない腐食生成物を形成させることができた。他の組み合わせ試料ではさらに長期の時間を要し、最大 6 週間を要した。ラマン顕微鏡、XRF 顕微鏡などから腐食生成物にはプレート成分の酸化物の他、模擬融雪塩水溶液に含まれる成分（特に Ca）を含むことが明らかとなった。

アクリル樹脂、シリコーン樹脂など電気化学測定妨げにならない素材のみを用いて、組み合わせ試料すき間に形成した腐食生成物の膜電位測定を可能にする特殊な電気化学測定装置を開発した。左右溶液の電極電位は塩橋（KCl を飽和した寒天）を介して計測されるので、左右セルの参照電極（Ag/AgCl/飽和 KCl）間の電位差に含まれる液間電位差はほぼ無視できる。

組み合わせ試料すき間に形成した腐食生成物を介して異なる濃度の NaCl 水溶液を接触させ溶液間の電極電位差( $\phi_R - \phi_L$ )を測定した。測定開始直後、電位差に変動が見られるものの数十分後には一定値を示した。この一定値を膜電位  $E_m$  とした。試料すき間腐食生成物の  $E_m$  と  $\log(a_R/a_L)$  の関係からいずれの腐食生成物もアニオン選択性を示すことが明らかとなった。見かけのアニオンの輸率は組み合わせるプレート材の構成にもよるが概ね腐食生成物作製の際に用いた模擬融雪塩水溶液中の NaCl 濃度の増加とともに減少する傾向が見られた。

$E_m$  の Teorell-Meyer-Sievers (T-M-S) 式依存性から求めた移動度比  $u_+/u_-$  は 1 よりも小さく、腐食生成物はアニオン選択性を示すことがわかった。また、HA と HG の腐食生成物作製に用いた模擬融雪塩水溶液の NaCl 濃度を増やした際、 $u_+/u_-$  は減少するように見えるが、他の試料の腐食生成物では NaCl 濃度依存性は明確ではなかった。一方、固定電荷濃度  $X$  は腐食生成物作製時に浸漬した模擬融雪塩水溶液に CaCl<sub>2</sub> を含む場合、NaCl および CaCl<sub>2</sub> 由来の塩化物イオン濃度の増加とともに減少する傾向にあった（図 3-2.9.7-12）。また、亜鉛めっきハイテンと組み合わせた試料では、低濃度模擬融雪塩水溶液を使用した際、顕著に大きな  $X$  を示す傾向が見られた。

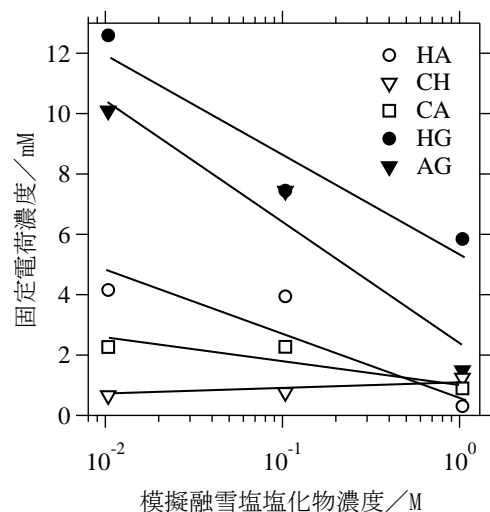


図 3-2.9.7-12 腐食生成物固定電荷濃度の腐食生成物作製時に浸漬した模擬融雪塩水溶液中の塩化物濃度依存性

以上のことから、異種材料を組み合わせたすき間には、カチオンよりもアニオンを優先的に透過させる能力を持つ腐食生成物が形成していることが、確認された。このことは、腐食生成物がより内方への塩化物イオンの透過を抑制する効果に乏しいことを意味する。また、塩化物イオンとともに模擬融雪塩水溶液に含まれる Ca は特に低濃度の際、固定電荷を大きくする効果を示すことが見出された。本研究で導出された腐食生成物の固定電荷濃度は、④すき間内部の環境特性評価と有限要素法によるマルチマテリアル接合部ガルバニック腐食の数値シミュレーション法構築において構築された腐食生成物のイオン透過性数理モデルに利用可能である。



## ⑥ すき間内部の環境と腐食の動的モニタリングと FEM によるマルチマテリアル接合部ガルバニック腐食の数値シミュレーション法構築【再委託先：名古屋工業大学】

### 1. 目的

マルチマテリアル材料の最適な腐食試験法選定を促進するため、計算科学を活用した腐食科学に基づく定量的な腐食シミュレーション技術を開発することを目的とし、本研究開発ではマルチマテリアル車体におけるガルバニック腐食のシミュレーション技術の開発に向けたすき間内部の環境と腐食の動的モニタリングと FEM によるマルチマテリアル接合部ガルバニック腐食の数値シミュレーション法構築に取り組んだ。2021 年度はすき間内部の環境と腐食の動的モニタリングを実施することを目的とし、以下の項目を実施した。

### 2. 実施項目

- ①異種金属接触腐食評価用共通試験片を用いた電気化学測定セルの開発
- ②異種金属接触腐食評価用共通試験片の内部環境モニタリング用プローブ電極の開発
- ③異種金属接触腐食評価用共通試験片を用いた時間依存インピーダンス法による腐食モニタリング手法の開発
- ④異種金属接触腐食評価用共通試験片を用いた電気化学測定セルによる異種金属の腐食と内部環境の同時モニタリング

### 3. 実施項目①：異種金属接触腐食評価用共通試験片を用いた電気化学測定セルの開発

異種金属接触腐食において、構成される異種金属とこれらの金属により構成されるすき間内部環境（電解液の存在状況、塩化物イオンの濃度、pH）の関係を明らかにすることは、マルチマテリアル車体におけるガルバニック腐食のシミュレーション技術の開発において極めて重要である。本研究では、ガルバニック腐食進行過程における異種金属の電気化学データ（電極電位、電流、インピーダンス）とプローブ電極による電解液中の塩化物イオン濃度と pH を同時かつ連続的に測定可能とする電気化学セルを開発した。電極には、アルミニウム合金とハイテン鋼を異種金属として選択し、2枚の板材の電極間距離が 150  $\mu\text{m}$  以下となるように各々の板を固定し、すき間を再現した。2つの板材の対向している面において、各々同じ試験面積となるよう、試験面以外を電着塗装することで絶縁した。異種金属の電気化学データ（電極電位、電流、インピーダンス）とプローブ電極による電解液中の塩化物イオン濃度と pH の同時測定では、2つの板材の試験面における電流線分布を考慮し、参照極は2つの板材の近傍に設置した。この方法により、すき間内を電解液で満たし、塩化物イオン濃度と pH 測定に使用するプローブをすき間内に挿入することで、参照極に対する各々の電極の電極電位を連続的に測定することが可能となる。加えて、アルミニウム合金とハイテン鋼の電気化学データ（電極電位、電流、インピーダンス）を二電極法あるいは三電極法により測定することができる。

#### 4. 実施項目② 異種金属接触腐食評価用共通試験片の内部環境モニタリング用プローブ電極の開発

実施項目①で開発した電気化学セルの電極間に存在する電解液中の塩化物イオン濃度と pH を測定するため、各々のプローブ電極を開発した。塩化物イオン濃度測定に用いるプローブ電極の開発には、直径 0.1 mm の銀線を用いた。プローブ電極には、銀線を 0.1M 塩化カリウム水溶液中に浸漬させ、任意の時間定電流を印加することで銀線表面に塩化銀を形成させたものを使用した。このプローブ電極を作用極として、任意の濃度の塩化物イオン標準溶液中で電極電位を測定した。各々の塩化物イオン標準溶液中で測定された電極電位は測定開始とともにゆるやかに推移し、短時間で定常となることが確認できた。測定に用いた塩化物イオン標準溶液と測定されたプローブ電極の任意の時間における電極電位をプロットすると、直線関係が得られたことから、開発したプローブ電極が塩化物イオンセンサーとして使用できることが明らかとなった。電気化学セルの電極間に存在する電解液中の pH を測定するためのプローブ電極の開発では、直径 0.1 mm のイリジウム線を用いた。イリジウム線をプローブ電極として、任意の pH の緩衝溶液中で電極電位を測定した。各々の緩衝溶液中で測定された自然電位は、緩衝溶液の pH によって異なる値を示した。これらの値は測定開始とともに短時間で定常となることが確認できた。測定に用いた緩衝溶液の pH の値と測定されたプローブ電極の任意の時間における電極電位をプロットすると、直線関係が得られることが確認できたことから、開発したプローブ電極が pH センサーとして使用できることが明らかとなった。

#### 5. 実施項目③ 異種金属接触腐食評価用共通試験片を用いた時間依存インピーダンス法による腐食モニタリング手法の開発

実施項目①で開発した電気化学セルを用いた時間依存インピーダンス法（3D インピーダンス法）による腐食モニタリング手法の開発をおこなった。異種金属接触腐食は、異種金属により構成されるすきま内部環境（電解液の存在状況、塩化物イオンの濃度、pH）に強く起因するため、異種金属接触腐食発生・進展の動的過程の把握は、マルチマテリアル車体におけるガルバニック腐食のシミュレーション技術の開発において極めて重要な課題である。本研究では、実施項目①で開発した電気化学セルにおいて、アルミニウム合金とハイテン鋼の 3D インピーダンスを測定した。一例として、図 3-2.9.7-13 に腐食試験溶液中におけるハイテン鋼の瞬間のインピーダンスを示す。ナイキスト線図において、注目した時間（1 時間、3 時間、6 時間）におけるインピーダンススペクトルが確認できる。注目した時間におけるインピーダンスの値から、ハイテン鋼の腐食進展過程をインピーダンスの変化として捉えることに成功していることが明らかとなった。注目したインピーダンス

スペクトルにおいて、観察される半円の一部から外挿される円弧と実数軸の交点の値を見積り、外挿された円弧の直径の値を電荷移動抵抗として測定時間に対してプロットした。濃度の異なる腐食試験溶液において、電荷移動抵抗は測定開始から数時間ほど増加するが、ある時間経過後からはほぼ同様の値を示すことが明らかとなった。この結果から、試験溶液の濃度に依存してハイテン鋼の腐食進展挙動が異なることが明らかとなった。実施項目①で開発した電気化学セルを用いたアルミニウム合金とハイテン鋼の3Dインピーダンスの測定では、ナイキスト

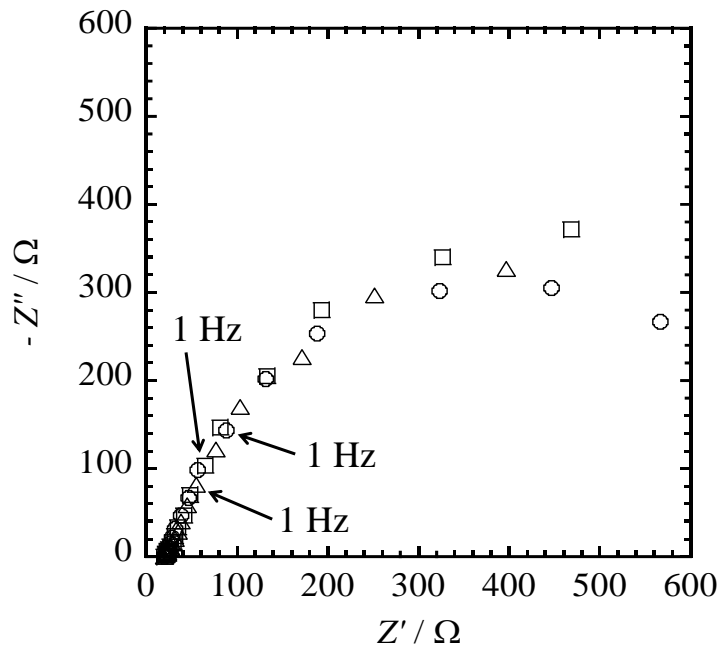


図 3-2.9.7-13 腐食試験溶液中におけるハイテン鋼の瞬間のインピーダンス。ハイテン鋼の3Dインピーダンスを測定し、任意の時間の瞬間のインピーダンスを決定した。図中において、○は1時間、□は3時間、△は6時間後の瞬間のインピーダンスを示している。

ト線図上に2つの半円が観察された。アルミニウム合金とハイテン鋼の3Dインピーダンスの測定をそれぞれ実施すると、電気化学セルを用いたアルミニウム合金とハイテン鋼の3Dインピーダンスの測定において観察された2つの半円は、高周波数領域の半円はアルミニウム合金、低周波数領域の半円はハイテン鋼に起因するものであることが確認できた。この時、電極間に流れる電流の値から、アルミニウム合金の腐食進展が優位であることが確認できた。

## 6. 実施項目④ 異種金属接触腐食評価用共通試験片を用いた電気化学測定セルによる異種金属の腐食と内部環境の同時モニタリング

### 6.1 アルミニウム合金とハイテン

実施項目①で開発した電気化学セルを用いて、実施項目②で開発した塩化物イオンセンサーとpHセンサーおよび③で開発した3Dインピーダンス法による腐食モニタリング手法により、乾湿繰り返し試験中における異種金属接触腐食評価用共通試験片アルミニウム合金とハイテン鋼の腐食と内部環境の同時モニタリングを実施した。すき間内の電解液は腐食試験溶液とし、恒温槽内において乾湿繰り返し試験中に測定をおこなった。測定される3Dインピーダンスの任意の時間における瞬間のインピーダンスから見積もられる溶液抵抗から、乾湿繰り返し試験における電解液の乾燥と湿潤過程を追跡することが可能であることがわかった。この値の推移と塩化物イオンセンサーの応答は良い相関を示しており、瞬間のイン

ピーダンスから見積もられるアルミニウム合金に起因する半円の直径の逆数を腐食速度としてこれらとともにプロットすると、アルミニウム合金の腐食発生と進展が塩化物イオン濃度に強く起因しており、腐食進行とともに pH の値も変化することが明らかとなった。したがって、本研究で開発した新規測定法により、すき間内部の環境と腐食の動的モニタリングが可能であることが示された。

## 6.2 アルミニウム合金と GA

pH センサーおよび 3D インピーダンス法による腐食モニタリング手法により、乾湿繰返し試験中における異種金属接触腐食評価用共通試験片アルミニウム合金と GA の腐食と内部環境の同時モニタリングを実施した。すき間内の電解液は 0.5 mass% NaCl+0.1 mass% CaCl<sub>2</sub> とし、恒温槽内において乾湿繰返し試験中においてアルミニウム合金と GA の電気化学データ（電極電位、電流、インピーダンス）とプローブ電極による電解液中の塩化物イオン濃度と pH を同時かつ連続的に測定をおこなった。アルミニウム合金と GA のガルバニック模擬環境におけるインピーダンススペクトルの測定では、参照極を用いることでアルミニウム合金と GA の電極間の電位差を 0 V に設定し、その状態においてアルミニウム合金と GA のインピーダンススペクトルを測定することで、アルミニウム合金と GA のインピーダンススペクトル、アルミニウム合金のインピーダンススペクトルおよび GA のインピーダンススペクトルを同時に測定している。乾湿繰返し試験における湿潤過程のアルミニウム合金と GA のインピーダンススペクトルではアルミニウム合金と GA のインピーダンスの合算として描かれており、ナイキスト線図上に半円の一部が確認された。この測定において、アルミニウム合金と GA のインピーダンススペクトルは、ナイキスト線図上においてアルミニウム合金は半円の一部を描き、GA はひずんだ半円が描かれることが確認できた。したがって、アルミニウム合金と GA のインピーダンススペクトルにおいて、高周波数領域の軌跡がアルミニウム合金、低周波数領域における軌跡が GA に起因していることが明らかとなった。乾湿繰返し試験中におけるアルミニウム合金および GA のインピーダンススペクトルから見積もられた R<sub>sol</sub> と電極の電流値の経時変化から、乾燥過程と湿潤過程においてこれらのパラメータの相関が確認できた。電流値とインピーダンスから見積もられる腐食速度の経時変化から、湿潤過程においてアルミニウム合金の腐食に起因した電流とインピーダンスから見積もられた腐食速度の経時変化において、同様の推移が見られており、湿潤環境で測定した pH センサーおよび塩化物イオンセンサーも腐食進行に対して応答していることが確認できた。

## 6.3 ハイテンと CFRTP

pH センサーおよび 3D インピーダンス法による腐食モニタリング手法により、乾湿繰返し試験中における異種金属接触腐食評価用共通試験片ハイテン 980 と CFRTP の腐食と内部環境の同時モニタリングを実施した。すき間内の電解液は 0.5 mass% NaCl+0.1 mass% CaCl<sub>2</sub> とし、恒温槽内において乾湿繰返し試験中においてハイテン 980 と CFRTP の電気化学データ（電極電位、電流、インピーダンス）とプローブ電極による

電解液中の塩化物イオン濃度と pH を同時かつ連続的に測定をおこなった。ハイテン 980 と CFRTP のガルバニック模擬環境におけるインピーダンススペクトルの測定では、参照極を用いることでハイテン 980 と CFRTP の電極間の電位差を 0 V に設定し、その状態においてハイテン 980 と CFRTP のインピーダンススペクトルを測定することで、ハイテン 980 と CFRTP のインピーダンススペクトル、ハイテン 980 のインピーダンススペクトルおよび CFRTP のインピーダンススペクトルを同時に測定している。乾湿繰り返し試験における湿潤過程のハイテン 980 と CFRTP のインピーダンススペクトルではハイテン 980 と CFRTP のインピーダンスの合算として描かれており、ナイキスト線図上に複数の時定数から構成されるひずんだ半円が確認できた。ハイテン 980 と CFRTP のインピーダンススペクトルは、ナイキスト線図上においてハイテン 980 はひずんだ半円を描き、CFRTP は複数の時定数から成るひずんだ半円が描かれることが確認できた。したがって、ハイテン 980 と CFRTP のインピーダンススペクトルにおいて、高周波数領域の軌跡がハイテン 980、低周波数領域における軌跡が CFRTP に起因していることが明らかとなった。乾湿繰り返し試験中におけるハイテン 980 および CFRTP のインピーダンススペクトルから見積もられた  $R_{sol}$  と電極の電流値の経時変化から、乾燥過程と湿潤過程における電解液の乾燥・浸透の繰り返しにおける相関が確認できた。電流値とインピーダンスから見積もられる腐食速度の経時変化から、湿潤→乾燥→湿潤におけるハイテン 980 の腐食に起因した電流とインピーダンスから見積もられた腐食速度の経時変化に対して、pH センサーおよび塩化物イオンセンサーから見積もられた pH および塩化物イオン濃度から、乾湿繰り返し初期において腐食の進行速度が大きいことが確認できた。

ハイテン 980、GA、Al 合金、CFRTP を用いた共通試験片のすき間内部環境と腐食の動的モニタリングから得られたパラメータを用いてガルバニック腐食のシミュレーションモデルを検討した。共通試験片のすき間内部環境と腐食の動的モニタリングの測定結果を踏まえ、ガルバニック腐食におけるアノード側とカソード側の反応を考慮し、電流分布および電位分布のシミュレーションを実施した。アノード側では、腐食サイトを検討するため、全面腐食をモデルとしたシミュレーションを検討し、電極間において均一に電流が分布する際の塩化物イオン濃度と pH の値を踏まえた解析をおこなった。これに対し、局部腐食をモデルとしシミュレーションでは、局部腐食サイトに電流が分布するため、反応面積とともに電極間の電流・電位分布を考慮する必要があることが確認できた。このモデルにおいて、共通試験片のすき間内部環境と腐食の動的モニタリングから得られた任意の塩化物イオン濃度と pH の値を設定することにより、電解液の環境を考慮したガルバニック腐食における電流・電位分布を再現することができた。

## ⑦ 実車の曝露試験とセンシングデータによる境界条件の取得【再委託先：北海道大学】

### 1. 背景・概要

北海道の曝露試験場におけるガルバニック腐食試験とセンシングデータによる曝露

試験での腐食機構および腐食計算科学に必要な境界条件を取得した。マルチマテリアル接合部のガルバニック腐食をシミュレーションするために必要な境界条件を取得する目的で、北海道内で実車の曝露試験を実施した。曝露試験箇所は、先行研究により冬季の積雪と腐食速度の速いことが分かっている日本海側の海岸に近い位置とし、境界条件の取得に必要な期間と時期に曝露を実施した。曝露環境の腐食速度をモニタリングするために、腐食モニタリング装置により金属の腐食速度をセンシングする。また、マルチマテリアル接合部のガルバニック腐食をシミュレーションするために必要な境界条件の取得のための実験室における腐食試験を実施した。

## 2. 成果

### 2.1 実車曝露試験

曝露地は、北海道の日本海側（北海道石狩市内、海からの距離数十m）とした。実車曝露試験の様子を図 3-2.9.7-14 に示す。曝露車両のエンジン側を海に向け状態で設置した。曝露車両に取り付けた供試材は、⑤すき間内部の化学特性の評価と同じ下地表面処理したプレート（ハイテン 980、Al6016、GA ハイテン 980、CFRTP）2つをポリアセタール樹脂製ボルト・ナットで締結した後にカチオン電着塗装した、6種類の組み合



図 3-2.9.7-14 実車曝露試験の様子

わせを用いた。設置箇所は、エンジンルーム、室内（リアタイヤハウス上部）、床下（荷室下の補助タイヤ取り付け位置）の3カ所とした。今回設置した箇所は全て、雨や雪が直接かからない箇所である。床下とエンジンルームの大きな差は、試験片の前に遮蔽物（熱交換器）の有無である。エンジン供試材の設置位置における温度と相対湿度を測定するため、試験片設置位置近くに温度・湿度計を設置した。さらに、環境の腐食性を得るために市販の電気抵抗型腐食センサーを温度・湿度計のそばに設置した。センサーに用いる抵抗体の材質はFeを基本とし、腐食環境が厳しいと予想された床下については、Znのセンサーも設置した。また、個人で利用している車を想定し、定期的にエンジンを始動するとともに、曝露状況を把握するために定点カメラ（温度測定機能付き）を用いて一定間隔で測定した。使用した定点カメラは、赤外線での撮影も可能であるため、夜間でも撮影できる。曝露場所の前面は海であり、周辺に建物がほとんどなく、曝露車両は全方向からの風雪を受けることになる。

定点カメラのレンズに降雪が多いときに雪が付着するので、撮影できていない期間

が存在した。しかし、この雪は太陽光もしくは風によりとれるため、再度撮影できている状況であった。レンズへの着雪で撮影が出来ない状況の場合、一晩で実車が雪に覆われる状況であった。実車の床下に設置した温湿度センサーで気温と相対湿度の測定を行った結果、曝露地の冬季の外気温はほぼ氷点下であることが分かった。氷点下で測定される相対湿度の信頼性は明確ではないものの、ほぼ70%以上の高い湿度であった。このことから、気温は低いが比較的湿度の高い状況であったことが示唆された。

電気抵抗式腐食センサーは、抵抗変化から腐食量を算出できることから、2月まで曝露した腐食量を求めた。その結果とセンサーの外観写真を図3-2.9.7-15に示す。外観写真から、Feセンサーについては、エンジンルームと室内の腐食状況はほぼ同程度である。しかし、発錆状態に差が見られる。この2箇所と比較して床下に設置したFeセンサーは、全面に厚い腐食生成物が付着しており、他の箇所に比較して厳しい腐食環境であることがわかる。一方、床下に設置したZnセンサーには腐食生成物が殆ど観察出来ないことから、大気環境における亜鉛の耐食性を確認できる。

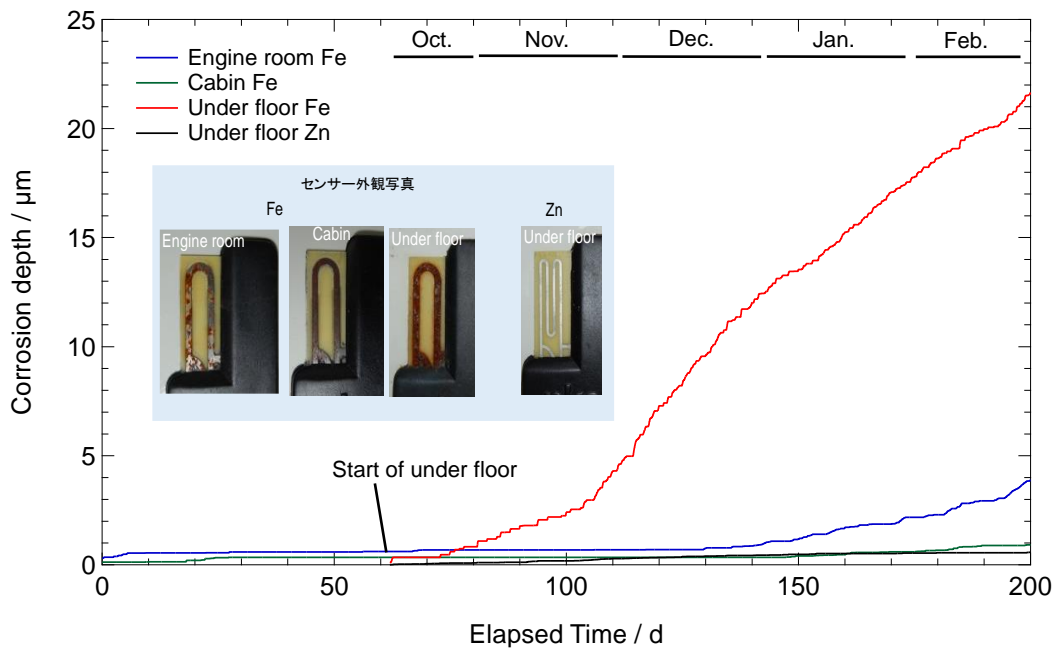


図 3-2.9.7-15 電気抵抗式腐食センサーの応答から算出した腐食量の経時変化とセンサーの外観写真

センサー出力からの腐食厚さは、床下 Fe > エンジンルーム Fe > 室内 Fe > 床下 Zn である。Feセンサーについてみると、曝露期間が短い床下 Feセンサーの腐食厚さが最も大きく、エンジンルーム Feセンサーの約6倍、室内 Feセンサーの約10倍である。このことは、融雪塩の影響を除いても、床下の腐食環境が厳しいことを意味している。床下 Feセンサー出力は、海からの風が強くなる11月以降に傾きが大きくなり、降雪の影響が出始める12月以降で更に大きくなっている。また、エンジンルーム Feセンサー出力も、1月から傾きが大きくなっている。その原因として冬季は風が強まるため飛来塩が増えると考えられる。この結果から、エンジンルーム内は熱交換器により遮蔽効果があるものの、海から激しい風が吹く場合もしくは走行による風の巻き込みが起こる

場合、腐食環境が厳しくなることを示唆される。一方、室内は気候変化の影響をほぼ受けないため、降雪の季節においても同様の速度で腐食していると言える。前述したように、12月以降の外気温はほぼ氷点下であった。今回の結果は、これまでに報告されている結果と同様に、氷点下においても条件が整えば、腐食は進行することが確認できた。

実車に曝露した組み合わせ材に形成した腐食生成物のイオン透過性を調べた結果を表 3-2.7.9-4 に示す。固定電荷濃度(mM)は、0.3 から 1.3 で組み合わせにより変化している。

全ての組み合わせ材でカチオンよりもアニオンを優先的に透過させる能力を持つ腐食生成物が形成していることが確認できた。このことは、腐食生成物がより内方への塩化物イオンの透過を抑制する効果に乏しいことを意味している。さらに、測定結果は比較的濃厚溶液を用いた実験室試験で形成した腐食生成物と同様であるため、曝露試験場の環境が厳しいことが示唆される。

表 3-2.9.7-4 実車の曝露試験で得られた腐食生成物の固定電荷濃度

HA	CH	CA	HG	AG
1.30	0.94	0.93	0.70	0.30

2021 年度の試験で冬季の影響と場所による影響は明らかになったが、季節による腐食への影響を調査する実験については、課題となった。そのため 2022 年度は、実車曝露において、ガルバニック電流の計測を実施した。その結果、設置位置と組み合わせに関係なく、周期的にガルバニック電流は変動した。平均的な電流は、床下>エンジンルーム>室内の順であり、腐食センサーで求められた腐食量の関係と一致していた。床下では、比較するとハイテンとアルミニウムを材の電流が一番大きいですが、どの組み合わせもそれほど大きな差は見られなかった。一方、エンジンルームや室内では、CFRTP との組み合わせの電流が金属同士の接合の電流と比較すると大きくなっていった。この結果は、環境によりガルバニック腐食挙動に差があることを示唆する結果を得た。

## 2.2 実験室での腐食試験

低温環境における、大気腐食を模擬した乾湿繰り返し腐食試験を実施した。供試材はこれまでの実験と同じ、下地表面処理したプレート（ハイテン 980、Al6016、GA ハイテン 980、CFRTP）2つをポリアセタール樹脂製ボルト・ナットで締結した後にカチオン電着塗装した、6種類の組み合わせを用いた。すき間（100 μm）は、先行研究に従い、テフロンシートと不織布を挟むことで形成した。締結の際、トルク管理をすることですき間厚さを制御した。

腐食試験の溶液には、0.5 mass% NaCl+0.1 mass% CaCl<sub>2</sub>を用いた。乾湿繰り返しは2種類の方法で実施した。1つは、5°Cの溶液と大気中での乾湿繰り返し試験（試験 1）、もう1つは、0°C以上の温度と-20°Cとの間での温度サイクルによる試験（試験 2）である。試験 2 の温度サイクルは、溶液に 15 分浸漬後、3 時間 0°C以上に保持、1 時間で冷



却、 $-20^{\circ}\text{C}$ に3時間保持、1時間で昇温の1サイクル8時間とした。溶液の浸漬は $0^{\circ}\text{C}$ 以上に保持期間中に定期的に変更した。本条件は、使用した恒温恒湿装置の湿度制御範囲外であるため、装置による湿度は制御していない。しかし、装置内に20 mass% NaClを入れた容器を設置し、その中に試料をおくことで、大気中保持期間の湿度変化を小さくするようにした。なお、20 mass% NaClは $-20^{\circ}\text{C}$ においても溶液の状態である。

Al6016とGAハイテン980のガルバニック対を試験1の条件で実施した際の電流と電位の変化を測定した。初期はAl6016とGAハイテン980が交互に腐食しているが、時間が経過するに従ってAl6016が腐食するように変化している。試験後の試料の外観写真からAl6016とGAハイテン980ともに腐食していること、すき間部の入り口がより腐食していることが分かった。

試験2で得られる異種金属の組み合わせ結果は以下の通りである。図3-2.9.7-16にハイテン980とAl6016の電流変化を測定示す。試験開始時に溶液に浸漬すると $100\mu\text{A}$ 以上の電流がながれ、その後減少する。サイクルに関係なく、 $-20^{\circ}\text{C}$ の期間に電流は流れない。 $5^{\circ}\text{C}$ における各サイクルの電流変化をみると、一度減少するが、時間が進むに従って増加しその後、再び減少する。溶液に浸漬(74時間)すると電流は増加するが、 $5^{\circ}\text{C}$ の電流はまた同様の変化をしている。図3-2.9.7-17に試験後の組み合わせ材の外観写真を示す。試験後の試料すき間部の外観観察から、Al6016とハイテン980ともに腐食していることがわかる。その他の金属材料の組み合わせ、ハイテン980とGAハイテン980、Al6016とGAハイテン980についても同様の試験を実施した。ハイテン980とGAハイテン980については、GAハイテン980の腐食に対応する電流が流れ、サイ

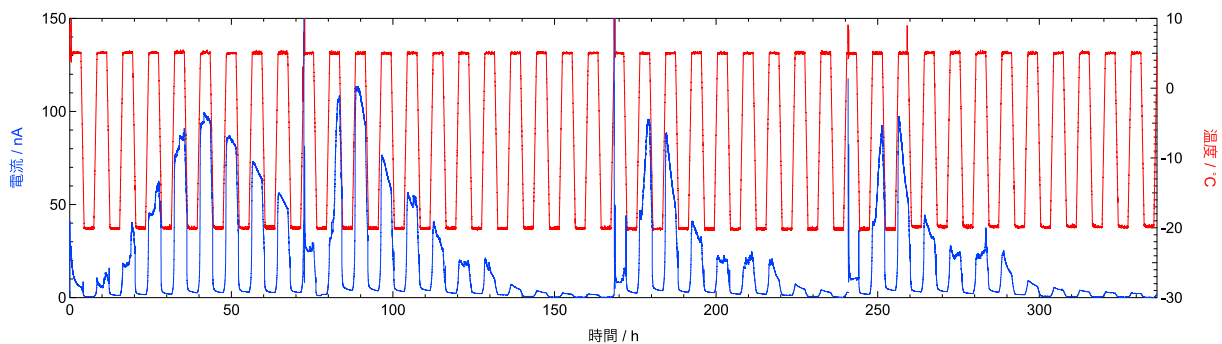


図 3-2.9.7-16 ハイテン 980 と Al6016 との組合により測定された電流 (電流正は Al の腐食に対応)

クルによる電流変化はハイテン980とAl6016の組み合わせと同様の結果を得た。一方、Al6016とGAハイテンについては、殆どの時間においてGAハイテン980の腐食に対応する負の電流が流れていた。しかし、時間が経過するに従って、正の電流(Al6016)の腐食に対応する電流が流れる温度領域があった。この組み合わせにおいて、腐食期間や温度によりアノードとカソードの分担が変化することを示唆する結果を得た。

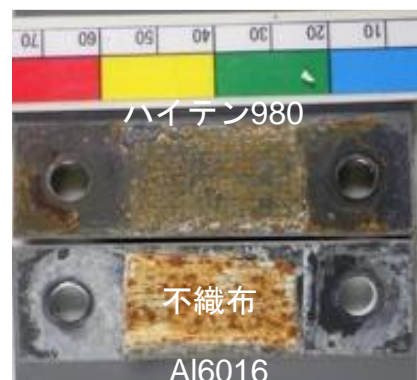


図 3-2.9.7-17 ハイテン 980 と Al6016 組合材の試験後の外観

試験 2 の条件における CFRTP と金属材料との組み合わせ結果は以下の通りである。

CFRTP とハイテン 980 の組み合わせで得られる電流変化について、ハイテン 980 と Al6016 と同様に 5°C の期間において、ハイテン 980 の腐食に対応する電流が流れているが、サイクルによるこの期間の電流変化は異なり、基本的にサイクルが進むに従って電流は減少していた。溶液に浸漬するとレンジを変えないと測定できないほど大電流が流れた。すき間部の面積はどの試料もほぼ同じであることから、大気中ではすき間部の CFRTP のみがカソードを分担しているが、溶液に浸漬すると CFRTP 全体がカソードを分担することが示唆された。試験後の試料外観写真から、ハイテン 980 が腐食したことで生成した赤い腐食生成物がハイテン 980 上だけでなく、CFRTP 側にも観察できた。この結果は、試験期間中大きな電流が流れていたことと良く一致していた。不織布のあった場所のみならず、すき間形成材であるシリコンの下も腐食していた。CFRTP と GA ハイテン 980 や CFRTP と Al6016 との組み合わせ材においても CFRTP とハイテン 980 の組み合わせと同様の電流変化が得られた。また、温度サイクルと浸漬の繰り返しにより電流の増加が得られ、CFRTP の劣化によるものと考えられた。

大気腐食の正確なシミュレーションのためには、温度・湿度の計測が重要であるが、市販の温湿度センサーはセンサー毎、温度毎の相対湿度測定値が変化する。そのため、温度と湿度の計測に適切な温湿度センサーの選定に資する実験を行った。測定には、市販の温湿度センサーを用い、温度と湿度を制御した恒温恒湿槽を用いた。なお、一部を除いて今回使用していたセンサーは、装置メーカーによる校正を受けた物を使用した。測定は、温度と湿度を変化させた後、センサー出力が一定になってから行った。恒温恒湿槽の温度と湿度を基準にすると相対湿度の低い 35% においては、36.3% から 34.8% と比較的同じような相対湿度になっていたが、90% の相対湿度においては、93.7% から 88.2% と装置による差が大きくなった。同じ製品であっても、センサーの保証範囲内ではあるが、温度湿度ともに差が生じていた。同じ原理の湿度センサーを使用している装置を室内（温度 25°C から 15°C の範囲）において長時間の測定を実施した。その結果、相対湿度の変化傾向はほぼ同じであるが、センサーによって 5% 程度の差が生じた。以上の結果から、市販の温湿度センサーの精度には限界があることが確認でき、相対湿度からぬれ時間や水膜厚さを求める際は、市販のセンサーによる測定結果には相対湿度で数% の誤差が含まれていることに注意する必要があることが示唆された。

## ⑧ ハイテン-CFRTP のガルバニック腐食機構の把握と腐食計算科学に必要な境界条件の取得【再委託先：東北大学】

### 1. 背景

自動車材料のマルチマテリアル化を加速するためには、異種材料の接触に伴うガルバニック腐食対策が不可欠である。そこで、本研究では、屋外での腐食環境を模擬した乾湿繰り返し条件下で、熱可塑性炭素繊維強化プラスチック (CFRTP) とハイテン鋼のガルバニック腐食を短絡電流と動電位分極曲線の観点から解析する。そして、最終的には、分極曲線などを系統的に取得し、CFRTP とハイテン鋼のガルバニック腐食

の腐食速度を計算する際の溶液/材料界面の境界条件として利用できるように整理することを目的としている。共通試験片として配布された CFRTP とハイテン鋼の電気化学特性を把握する共に、共通試験片でのガルバニック腐食試験を行い「CFRTP－ハイテン鋼」接合部の腐食劣化機構の解析などを行った。

## 2. 実験結果と成果

### 2.1 CFRTP の電気抵抗

共通試験片として配布された板厚 3.7mm の CFRTP を、幅 3.7mm、長さ 13.5mm に切断し、切断端面を湿式 SiC 紙 1500 番で研磨して試験体とした。表面は受け入れままの状態として、研磨は施さなかった。この試験体に Cu 板を接触させ荷重を加え接触抵抗を低減させたうえで、表面と裏面の間(板厚方向)と端面と端面の間(板幅方向)の電圧と電流の関係を計測した。その結果、CFRTP は板厚方向に対しては非常に大きい電気抵抗を有するが、板幅方向の電気抵抗は比較的小さいことが分かった。したがって、端面(cross-section)を用いた電気化学計測は容易であるが、表面(surface)を用いて電気化学計測を行うことは困難であると思われる。また、端面と表面が共に露出している試験体の場合には、端面の電気化学特性が分極曲線や自然浸漬電位に表れるものと判断される。また、FEM 計算などでは、CFRTP 内部での  $iR$  ドロップを考慮する必要があることも分かった。

### 2.2 CFRTP とハイテン鋼の自然浸漬電位

空気飽和・大気開放の 0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> と 0.5%NaCl 中で、CFRTP とハイテン鋼の自然浸漬電位の経時変化を計測した。以下、電位の基準は SHE とする。CFRTP とハイテン鋼共に、0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> と 0.5%NaCl で、電位の経時変化に関して有意な差異は見られなかった。また、ハイテン鋼では、浸漬して数時間で安定な電位に到達することも分かった。試験面表面には、赤さびの沈殿が生じていたが、水洗時に流れてしまった。赤さびの下(試験片表面)には、黒色の腐食生成物が存在していた。しかし、試験面の一部には、全く腐食していない部分も確認された。CFRTP の自然浸漬電位は、いずれの溶液の場合も、時間に対して殆ど変化せず、電位もほぼ同じ値であった。また、表面にも端面にもまったく劣化は見られなかった。なお、以上の計測から、「CFRTP－ハイテン鋼」の異種金属接触腐食の駆動力となる電位差は、約 0.7 V であることも分かった。

### 2.3 ハイテン鋼の分極挙動

空気飽和・大気開放の 0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> と 0.5%NaCl 中で、ハイテン鋼の動電位アノード分極曲線を計測した。電位の掃引速度は、20 mV min<sup>-1</sup>とした(以下の同様)。測定終了の電流密度が、10<sup>2</sup> A m<sup>-2</sup> (10 mA cm<sup>-2</sup>)程度のもものと、10 A m<sup>-2</sup> (1 mA cm<sup>-2</sup>)程度のもものを行い、腐食形態を比較した。空気飽和下で、ハイテン鋼の電位が上昇すると孔状の腐食が生じることが分かった。分極曲線と侵食形態に関して、0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> と 0.5%NaCl で明瞭な差異は見られなかった。自然浸漬電位の差異は、ハイ

テン鋼表面の微妙な違いによるものと推察される。電流密度*i*の対数と電位*E*の間には、ターフェルの関係に類似した直線関係が成立することが分かった。ただし、腐食形態は孔食であり、ターフェル式とは異なるものであることも分かった。FEM 計算などでハイテン鋼の腐食速度を単純にターフェル式で近似することは不適切であると結論づけられる。

ハイテン鋼の脱気条件下での動電位アノード分極曲線と、空気飽和条件下での動電位カソード分極曲線を計測し、さらに計測後の腐食形態の観察を行った。いずれの計測も、0.5%NaCl と 0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub>で行った。脱気条件下での自然浸漬電位は、-0.3 V であることが分かった。そして、ここからアノード分極した場合にも、腐食形態は孔食状であることが分かった。アノード分極挙動と侵食形態に関して、0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> と 0.5%NaCl で明瞭な差異は見られなかった。また、0.5%NaCl と 0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> でのカソード分極曲線の対比から、ハイテン鋼表面での溶存酸素還元反応に関して、0.5%NaCl と 0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> で本質的な差異はないものと推察される。なお、ハイテン鋼表面での溶存酸素還元反応の拡散限界電流密度は、30 μA cm<sup>-2</sup> 程度であることが分かった。

いままでのハイテン鋼のアノード分極において、全面腐食が見られなかった原因は、自然浸漬状態において鋼表面全体が脱不働態化していなかったことが原因であると考えられる。そこで、-0.8 V で 5 分間、定電位カソード分極を行ってから、電位をアノード分極方向に掃引して分極曲線を計測すると共に、計測後の腐食形態を観察した。溶液には、0.1 M Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(pH 6.0) と 0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> を用いた。なお、0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> の pH は 5.6 であった。その結果、カソード処理により人工的にハイテン鋼を活性化させた際には、アノード分極により全面腐食の形態になることが分かった。この全面的な活性化は、-0.6 V 付近までの電位低下で生じるものと思われる。しかし、たとえ 0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> のような塩化物水溶液であっても、自己活性化では、ここまでの電位低下は起こらず、その後のアノード分極では局部腐食的な腐食形態になるものと判断される。

## 2.4 CF RTP の分極挙動

Cu テープを用いて、端面で導通を形成する電気化学計測用 CF RTP 試験片を作製した。それを用い、0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> での CF RTP(表面・端面)の動電位アノードと動電位カソード分極曲線を計測し、計測後の外観観察を行った。まず、カソード分極に関して、端面では、脱気・非脱気のいずれの条件でも、非常に大きなカソード電流が観察された。表面では、端面に比較して 2~3 桁程度、電流密度が小さくなることが分かった。切断端面からは、炭素繊維のすき間に溶液がしみ込むのではないかと推察される。表面に関しては、形態的な変化は見られなかった。アノード電流に関して、(大)端面>>表面(小)であることが分かった。表面は電流が流れる所が表面被覆の欠陥部などに限定されているのではないかと推察される。

次に、0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> での、CF RTP のカソード分極曲線とハイテン鋼のアノード分極曲線の重ね合わせを行い、異種金属接触腐食挙動の推定を行った。その結

果、脱気・非脱気に関わらず、ハイテン鋼とCFRTP端面との間に、異種金属接触腐食(ガルバニック腐食)が生じることが予測される。また、ハイテン鋼表面の溶存酸素の還元電流が、 $30 \mu\text{A cm}^{-2}$ 程度なので、それを1桁程度上回る速度まで、接触により腐食が加速される可能性があることが分かった。

## 2.5 「CFRTP-ハイテン鋼」のガルバニック電流

送付された試験片を小片化して、電極間距離 10 mm として、CFRTP の表面を用いて、「CFRTP(表面)-ハイテン鋼」ガルバニック対の短絡電流と電位、そして試験後の腐食形態を観察した。溶液は、空気飽和の 0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub>とした。その結果、ハイテン鋼と CFRTP の表面との接触では、短絡電流は  $1 \mu\text{A cm}^{-2}$  であり、顕著な異種金属接触腐食は生じないことが分かった。また、CFRTP 表面にも劣化は見られなかった。これに対して、CFRTP の端面と、ハイテン鋼との接触は、CFRTP(表面)との接触に比較して、短絡電流が約 50 倍以上の増加することが分かった。また、CFRTP の端面の一部にも、溶存酸素還元に伴う強アルカリ化に伴う劣化が生じていることが確認された。以上の検討から、CFRTP-ハイテン鋼のガルバニック腐食を防止するためには、CFRTP の端面防食(端面絶縁)が不可欠であることを見出した。

## 2.6 共通試験片「CFRTP-ハイテン鋼」接合体のガルバニック電流

電極間距離を 10 mm として、共通試験片「CFRTP-ハイテン鋼」接合体のガルバニック電流と電位を計測し、腐食形態を観察した。溶液は、空気飽和の 0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub>とした。その結果、この際の電流と電位は、前節での「CFRTP(端面)」とハイテン鋼の接触時の挙動に類似していることが分かった。すなわち、電流の大部分は「CFRTP の端面」を流れている判断され、CFRTP の端面防食が重要であることが再認識された。

次に、共通試験片「CFRTP-ハイテン鋼」接合体(電極間距離 100  $\mu\text{m}$ )を用いて、ガルバニック電流と電位を計測し、腐食形態を観察した。この場合も溶液は、空気飽和の 0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub>とした。その結果、先の電極間距離 10 mm の場合と比較して、電極間距離を 100  $\mu\text{m}$  にしても、ハイテン鋼の溶解電流密度には顕著な変化は生じないことが分かった。しかし、短絡時の電位は若干増加することも分かった。詳細は不明であるが、CFRTP の端面がハイテン鋼上の外部電流を律速している可能性があるのではないかと推察される。

## 2.7 CFRTP とハイテン鋼の腐食挙動に及ぼす液温の影響

非ガルバニック状態において、CFRTP とハイテン鋼の自然浸漬電位に及ぼす温度の影響を解析した。その結果、CFRTP の自然浸漬電位に対して、温度の影響は非常に小さいことが分かった。また、ハイテン鋼の自然浸漬電位に関しては、浸漬初期には温度の影響が現れるが、長時間経過後は、浸漬電位の差異は小さくなることが分かった。しかし、温度が低い場合には、腐食形態は局部腐食的となり、温度が高い場合には全面腐食的になることが分かった。

次に、電極間距離を 10 mm として、CFRTP の端面を用いて、「CFRTP(端面)-ハイテン鋼」ガルバニック対の短絡電流と電位、そして試験後の腐食形態を観察した。その結果、短絡電流に及ぼす温度の影響はほとんどないことが分かった。短絡時の電位は温度が低い方が高くなるが、ハイテン鋼の自然浸漬電位の温度依存性の影響が現れているのではないかと推察される。

## 2.8 「CFRTP-ハイテン鋼」接合体の乾湿繰り返し環境下でのガルバニック電流

共通試験片「CFRTP-ハイテン鋼」接合体を用い、指定の乾湿繰り返し試験を行った(図 3-2.9.7-18)。試験開始と共に、CFRTP とハイテン鋼とをポテンショスタットを用いて短絡状態にして、乾湿繰り返しに伴う電流と電位を計測した。溶液は、空気飽和の 0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub>とした。その結果、15 分間の浸漬期間の際は、電位が -0.2 V 程度まで低下すると共に、比較的大きなガルバニック電流が流れることが分かった。これに対して、溶液浸漬後の乾湿繰り返し期間では、ガルバニック電流が小さくなる。しかし、乾湿繰り返しに呼応して、電流値が変動することが分かった。さらに、15 分間の浸漬期間の電流値と電位は、ほぼ毎回同じであるが、浸漬後の乾湿繰り返し期間の電流値は浸漬ごとに増加する傾向があることが分かった。

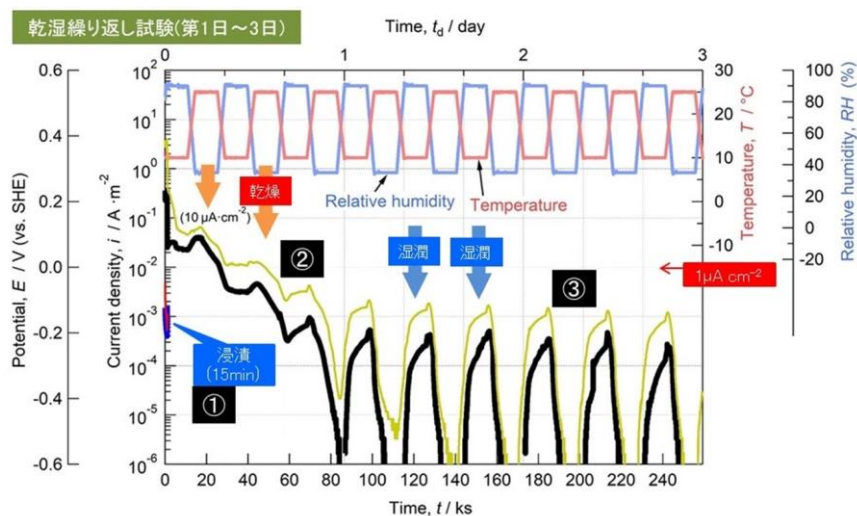


図 3-2.9.7-18 共通試験片「CFRTP-ハイテン鋼」接合体での乾湿繰り返しに伴うガルバニック電流と電位の 1～3 日目の結果、溶液：0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub>(空気飽和)に 15 分間浸漬

さらに、共通試験片「CFRTP-ハイテン鋼」接合体での乾湿繰り返しに伴うガルバニック電流と電位の第 1 日目の結果によると、溶液に浸漬後約 15 時間は、湿潤期間(10°C/90%)よりも乾燥期間(25°C/35%)の方がガルバニック電流の値が大きい。これはすき間内に溶液が比較的多量に残存していて、温度が高いほど腐食反応が活発になるという浸漬条件に近い温度依存性が現れているのではないかとと思われる。その後、15 時間以降や 2 日目では、湿潤期間(90%RH/10°C)は、比較的大きな電流が流れ、乾燥期間(35%RH/25°C)は、比較的小さな電流が流れるようになる。これは、すき間内の溶

液から水分が蒸発し、相対湿度に呼応したすき間内残留塩の潮解による腐食が起きていることを示唆している。4日目と5日目の挙動も、1日目と2日目と同様の挙動となっている。共通試験片「CFRTP-ハイテン鋼」接合体での乾湿繰り返しに伴うガルバニック腐食をモデル化し、数値計算による腐食の予測を行うためには、すき間内の乾燥吸湿の挙動を数値モデル化することが不可欠であることが推察される。

## 2.9 ハイテン鋼の腐食挙動に及ぼす溶液温度の影響と pH 緩衝作用の解明

乾湿繰り返し試験中のガルバニック腐食は、主に 10°C の塩水浸漬中に生じるため、ハイテン鋼の腐食挙動に及ぼす溶液温度の影響の把握を行った。その結果、脱気・非脱気に関わらず、10°C でも 25°C でも、0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> 溶液中では、自然浸漬電位からのアノード分極で局部腐食が生じることが分かった。空気中生成皮膜を除去することが可能であると思われるカソード分極域からの動電位アノード分極を行うと 25°C では全面溶解(全面腐食)となったが、10°C では全面腐食は生じなかった。また、ハイテン鋼のカソード分極曲線を計測した結果、10°C、25°C 共に溶存酸素の還元電流は、40  $\mu\text{A cm}^{-2}$  程度であった。

次に、0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> 溶液の pH 緩衝作用がハイテン鋼の腐食挙動に及ぼす影響を解析した。0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> 溶液の pH は約 5.6 のため、H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> を使用して緩衝作用を付与した 0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub>-2%H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 溶液 (pH 5.6) と、塩化物イオンを含まない 0.7%Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-2%H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 溶液 (pH 5.6) を作製した。H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> を添加した溶液の pH は NaOH で調整した。その結果、pH 緩衝作用のある溶液では、10°C、25°C 共に塩化物イオンの有無に関係なく、自然浸漬からのアノード分極であっても全面溶解が生じることが分かった。したがって、塩化物イオンは局部的な溶解を引き起こし、その結果、その部分のみが過度に酸性化することで、局部的な溶解形態をもたらすものと推定される。以上より、ハイテン鋼のアノード分極挙動は、腐食部と非腐食部に分けて考える必要があることが解明された。

同様の実験を、塩化物の濃度を高めた 5%NaCl-1%CaCl<sub>2</sub> 溶液でも行った。その結果、塩濃度の影響はほとんど認められないことが分かった。すなわち、0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> 溶液に比較し、塩が 10 倍濃縮した場合でも、ハイテン鋼の局部腐食の要因が塩化物イオンによる局部的な脱不動態化に伴う pH 低下であることが解明された。

## 2.10 CFRTP の分極挙動に及ぼす溶液温度と塩濃度の影響

CFRTP に関しても、0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub> と 5%NaCl-1%CaCl<sub>2</sub> 溶液中において、10°C と 25°C で分極挙動を計測し、比較検討を行った。その結果、CFRTP では、脱気状態での分極曲線に、温度と塩濃度の影響が比較的顕著に現れることが分かった。また、塩濃度を濃くすると温度の影響が、温度を高くすると塩濃度の影響が不明瞭になることも見出された。

## 2.11 「CFRTP-ハイテン鋼」のガルバニック腐食の分極曲線による検討

ところで、乾湿繰り返し試験では、NaCl-CaCl<sub>2</sub>溶液は、5%NaCl-1%CaCl<sub>2</sub>溶液よりも濃縮する可能性がある。そこで、NaCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O系状態図からNaClの飽和条件であると推定されるも、20%NaCl-4%CaCl<sub>2</sub>を作製し、ハイテン鋼とCFRTPの分極挙動を計測し、ガルバニック腐食に及ぼす塩濃度と温度の影響を検討した。具体的には、相対湿度約95~75%RHの間に対応する条件で、ハイテン鋼とCFRTPのアノード・カソード分極挙動に及ぼす塩濃度と温度の影響を解析した。その結果、CFRTP端面とハイテン鋼の接触の場合には、温度が高く、しかも塩濃度が高いほど、電流値が高くなる傾向があることが分かった。これは、CFRTP端面からの溶液の侵入が関係していると思われる。また、75%RHに相当する溶液では、電流値が低下することも分かった。これは、塩濃度増加による溶存酸素濃度低下の作用ではないかと思われる。

## 2.12 ハイテン鋼とCFRTPの分極挙動に及ぼす腐食・劣化の影響

乾湿繰り返し試験を1週間行い、腐食もしくは劣化させた試験片の分極曲線を計測した。乾湿繰り返し試験と分極曲線を計測した溶液は、0.5%NaCl-0.1%CaCl<sub>2</sub>である。ハイテン鋼の場合、1週間のサイクル腐食試験により、腐食電位は約0.2V低下したが、分極曲線の電流*i*と電位*E*の関係は、受け入れまま材と同様に、 $E=a+b \log i$ で近似できることが分かった(但し、*a*と*b*は反応に依存した定数)。しかし、分極時の溶解は局部的なものであり、全面溶解ではなかった。CFRTPの場合には、1週間のサイクル腐食試験では、分極挙動に明瞭な差異は見られなかった。

## 3. 結論

- (1) 腐食溶液に浸漬した状態で、ハイテン鋼とCFRTPの端面を接触させた場合、非接触の場合に比較して、50倍程度高い速度でハイテン鋼が腐食する可能性があることを示した。
- (2) 「CFRTP-ハイテン鋼」の共通試験片によるガルバニック腐食の試験を行い、電流の大部分は「CFRTPの端面」を流れている可能性が高く、CFRTPの端面がハイテン鋼上の外部電流を律速している可能性があることを示した。
- (3) CFRTPおよびハイテン鋼の単独での浸漬電位、および「CFRTP-ハイテン鋼」のガルバニック電流の計測を10°Cで行い、25°Cでの試験結果と比較しところ、温度の影響はガルバニック電流には現れないものの、ハイテン鋼の腐食形態は温度により顕著に変化することが分かった。
- (4) 共通試験片「CFRTP-ハイテン鋼」接合体により、乾湿繰り返し試験中のガルバニック電流を計測し、浸漬後約15時間は、すき間内残留水による腐食が進行し、その後は、すき間内残留塩の潮解により腐食が進行する可能性が高いことを見出した。
- (5) ハイテン鋼のアノード分極に関しては、脱気・非脱気に関わらず、10°Cでも25°Cでも、自然浸漬電位からのアノード分極で局部腐食が生じることが分かった。pH緩衝溶液での腐食挙動との対比から、ハイテン鋼の局部腐食は塩化物イオンによる局部的な脱不働態化に伴うpH低下に起因していることが推察された。



(6)CFRTP のカソード分極に対しては、脱気状態での分極曲線に温度と塩濃度の影響が比較的顕著に現れることが分かった。また、塩濃度を濃くすると温度の影響が、温度を高くすると塩濃度の影響が不明瞭になることも見出された。

(7)ハイテン鋼と CFRTP の分極挙動に及ぼす乾湿繰り返し試験による腐食・劣化の影響を解析した。ハイテン鋼の場合、1週間のサイクル腐食試験により、腐食電位は約0.2V低下したが、分極曲線の電流*i*と電位*E*の関係は、は受け入れまま材と同様に、 $E=a+b \log i$ で近似できることが分かった。しかし、分極時の溶解は局部的なものであり、全面溶解ではなかった。CFRTP の場合には、1週間のサイクル腐食試験では、分極挙動に明瞭な差異は見られなかった。

### ⑨ 実車走行および腐食実態解析によるガルバニック腐食シミュレーション技術の開発と検証【物質・材料研究機構】

テーマ番号 65 における各種腐食試験結果、実車走行試験により抽出した環境の境界条件および実車部品の腐食実態解析による腐食の境界条件を用いて、実車における合わせ接合部のガルバニック腐食計算シミュレーション技術を開発することを目的とした。ハイテン-Al 合金合わせ部材に対して乾湿繰り返し環境でのガルバニック腐食モデルを想定し、乾湿繰り返し環境の模擬に着手した。

ハイテン-Al 合金合わせ部材の合わせ部内の乾湿繰り返しは、合わせ部内の溶液を複数のマス目に分け、溶液端部からマスの数が移動することにより模擬した。乾湿繰り返しは、乾燥により 5000 秒で 0.85cm まで溶液端部が移動し、その後、湿潤で溶液が増えていくこととした。ここで、前提条件は以下の通りとした。

- ・ 合わせ部長さ  $L=1\text{cm}$ 、合わせ部厚さ  $t=100\mu\text{m}$
- ・ アノード：Al、カソード：Fe
- ・ y 方向の格子数：1
- ・ 端部の溶存酸素濃度は常に大気と平衡 ( $2.5 \times 10^{-4}\text{mol/L}$ )
- ・ 試験溶液は 0.5%NaCl+0.1%CaCl<sub>2</sub> 溶液
- ・ 孔食、腐食生成物は考慮しない
- ・ 腐食生成物のイオン透過性は考慮しない

ガルバニック腐食で考慮したアノード反応は、 $\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}^-$ 、 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ 、カソード反応は  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ 、 $1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$  であり、それぞれの電位と電流の関係式は実測した分極曲線から導いた。計算には各イオンの価数、モル導電率、拡散係数を用いた。水素イオン濃度は初期の状態から反応により消費するため、全体的に濃度は低下する。乾燥過程では溶液端部で若干の濃度低下が確認された。一方、湿潤過程では溶液端部で濃度の上昇が見られた。酸素濃度も同様に、反応による消費があるため、溶液端部より内側では濃度の低下が見られる。湿潤時の分布は合わせ内部の場所による増減がみられた。塩化物イオン濃度については、溶液端部で濃度の著しい上昇が見られた。

溶液が満たされた状態から乾燥過程でのガルバニック電流の経時変化を以下の条件

で計算した。

- ・ 合わせ部長さ  $L=1\text{cm}$ 、合わせ部厚さ  $t=100\mu\text{m}$
- ・ アノード：Al、カソード：Fe
- ・ 端部の溶存酸素濃度は常に大気と平衡 ( $2.5\times 10^{-4}\text{mol/L}$ )
- ・ 試験溶液：0.5%NaCl+ 0.1%CaCl<sub>2</sub> 溶液
- ・ 腐食生成物のイオン透過性は考慮しない
- ・ 1000 秒ごとに 2 マスずつ乾燥。

ここで、Al の局部腐食については、微小要素内の溶液の Cl<sup>-</sup>濃度が初期濃度に対して 3 倍となったときに発生し、その時のアノード電流密度は初期濃度での分極曲線の電流密度に対して 2 倍になると仮定した。乾燥が始まるとガルバニック電流は時間とともに低下しており、この傾向は④で検証のために行った腐食促進試験の乾燥過程での電流挙動と一致する。また、ガルバニック電流値についても Al の腐食面積率に依存するがオーダーとしてはほぼ一致した。

図 3-2.9.7-19 に Al と Fe のそれぞれで流れるアノード電流から計算して求めた乾湿繰り返し 1 サイクルでの板厚減少量の分布を示す。0 の位置は溶液端部に対応する。溶液端部より奥側で金属の溶解量が大きくなっており、これはすき間内の塩化物イオン濃度の濃縮による孔食発生や濡れ時間の長さ起因すると考えられる。また、Fe に比べて Al の溶解量が非常に大きく、③や④のテーマでの計算で得られたような Fe の大きな溶解は見られなかった。これに

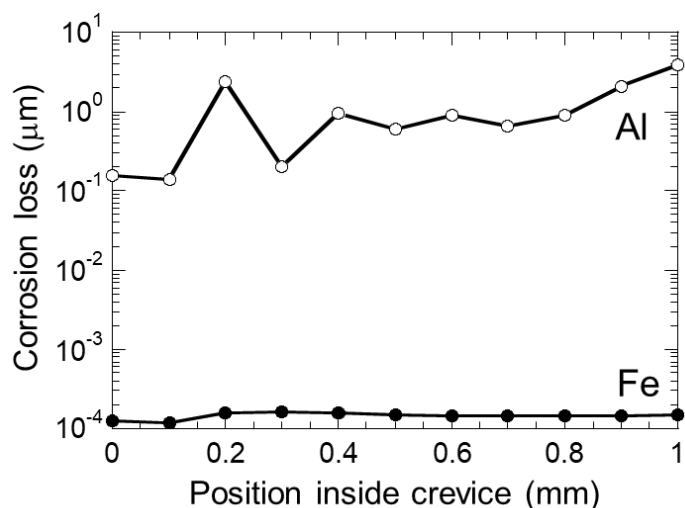


図 3-2.9.7-19 乾湿繰り返し 1 サイクルでの板厚減少量の計算結果

ついては、溶液の初期濃度が比較的高いために、Al 上でも十分なアノード電流が生じるためと考えられる。Al の腐食量については、1 サイクルで 1  $\mu\text{m}$  以上腐食する位置もあることが計算された。これは非常に高い腐食速度であるが、実際には表面に化成処理がなされており耐食性は低い（計算では裸の Al 上で得られた電気化学特性値を使用）、計算で設定した初期塩濃度が非常に高い、この腐食環境が常に維持されるわけではない、腐食生成物による腐食抑制作用が考慮されていないなど、実態とは合わない部分も多いと考えられる。しかしながら、②における融雪塩散布地域でおよそ 5 年走行した実車の Fe/Al 合わせ部の部品調査から、元板厚 1mm の Al で腐食による穴あきの事例が得られており、この部品の場所がさらされていた正確な腐食環境は不明ではあるが、Fe と Al のガルバニック腐食によりこのような穴あき腐食が十分に起こりえることが示された。

## ⑩ 電気化学インピーダンスによるガルバニック腐食の実車モニタリング技術開発

### 【東京工業大学】

#### 1. 目的

大気腐食条件下におけるマルチマテリアル接合部におけるガルバニック腐食反応を考慮し、実車を想定した腐食環境におけるガルバニック腐食挙動を電気化学インピーダンスにより測定・解析することで、ガルバニック腐食速度のモニタリングを可能とする測定・評価技術を開発することを目的とした。特に、実車走行環境データを元に、マルチマテリアル接合部のガルバニック腐食挙動を電気化学インピーダンスにより計測し、種々の腐食状況における腐食速度の評価を実施するとともに、評価を可能とするモニタリングパラメータを抽出した。さらに、実車でのガルバニック腐食のモニタリングに適用できる測定・評価技術とするための課題を明確にした。

#### 2. Al 合金／鋼材のすき間部におけるガルバニック腐食挙動の電気化学インピーダンス法による実車モニタリング

実験に用いた試料は、Al-Si-Mg 合金 A6061 と高張力鋼 SPCC980 との組み合わせで作製したガルバニック腐食試験対（図 3-2.9.7-20、図 3-2.9.7-21）である。灰色ハイライト部が下地金属部で、Al 合金、SPCC が互いに対向するようになっている。すき間距離はマイラーシートを用いて 100  $\mu\text{m}$  とした。あわせて、金属部材の表面には不織布を 1 枚挿入した。この試験対を自動車車体の床下部に設置し、実車走行試験およびその後の腐食試験（定置塩水槽試験、温度湿度サイクル試験）を実施した。ガルバニック腐食挙動の電気化学インピーダンス法によるモニタリングでは、周波数範囲 10 kHz $\sim$ 0.1 Hz、交流電位振幅 7.071 mVrms、両金属短絡状態にて連続的に測定を実施した。

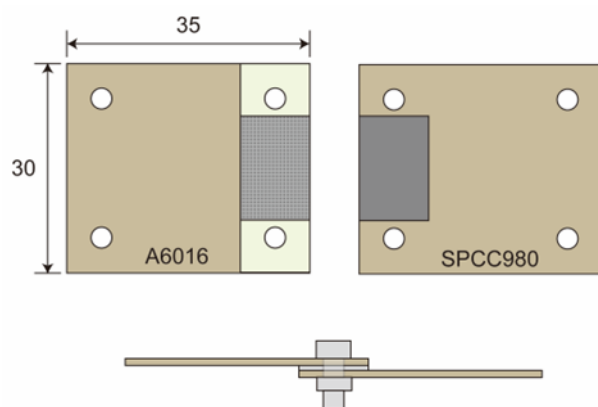


図 3-2.9.7-20 すき間付きガルバニック腐食試験対の模式図

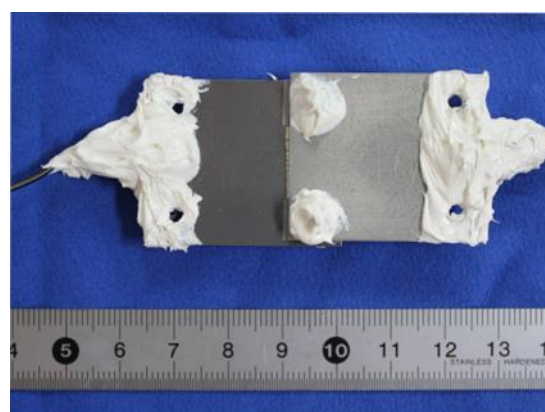


図 3-2.9.7-21 すき間付きガルバニック腐食試験対の外観

車両走行およびその後の各種試験によって得られた、温度、相対湿度、ガルバニック電流の時間変化では、車両走行時の腐食試験液の被水により、ガルバニック電流が増加していること、その後の塩水環境および恒温恒湿試験における温度と湿度サイクルによってガルバニック電流が大きく変化した。特に、温度の増加によってガルバニッ

ク電流が増加した。試験期間において、ガルバニック電流の極性から、A6061 側が主なアノードとなって腐食反応が進行したことが推察された。試験後の写真（図 3-2.9.7-22）から、A6061 および SPCC において腐食が生じたことが確認できた。

また、図 3-2.9.7-23 に示すように、実車走行試験およびその後の試験において、電気化学インピーダンスの測定を行った。その結果、走行時の被水やその後の塩水噴霧によってすき間部に腐食因子が侵入し、それによってガルバニック腐食が発生するこ

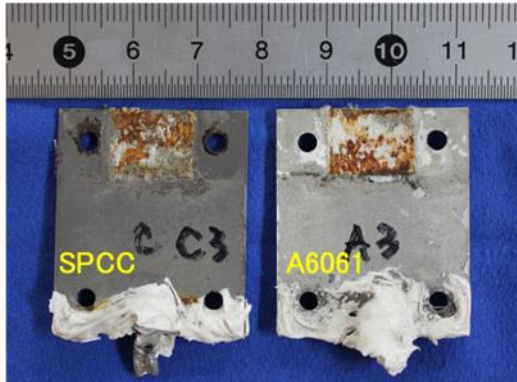


図 3-2.9.7-22 実車走行およびその後の試験後の材料の腐食状況

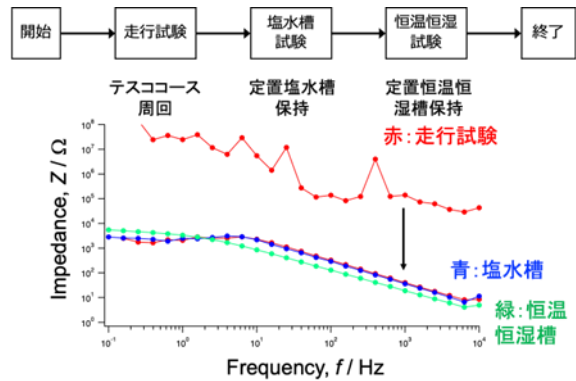


図 3-2.9.7-23 Al 合金／ハイテン鋼におけるガルバニック腐食の電気化学インピーダンスによるモニタリング結果（車体床下部）

とでインピーダンスが減少したことが示された。さらに、試験期間において測定された電気化学インピーダンスの結果から、0.1 Hz のインピーダンス値を抽出し、それを時間に対して整理した結果、ガルバニック電流の変化と同様に、塩水槽試験から恒温恒湿試験において、インピーダンスの値が大きく減少した。これによって、電気化学インピーダンス法によって、ガルバニック腐食挙動のモニタリングに成功した。また、温度の増加によってガルバニック腐食が促進されることが明らかになった。

### 3. まとめ

ハイテン-Al 合金接合部模擬材に対して実車走行状況でのガルバニック腐食モニタリングを電気化学インピーダンス法により実施した。その結果、低周波数のインピーダンスの変化がガルバニック電流の挙動と一致し、電気化学インピーダンス測定によってガルバニック腐食のモニタリングが可能であることが示された。

### 総括；ガルバニック腐食数値シミュレーション技術の開発（まとめ）

本テーマでは、マルチマテリアル構造車体の材料重ね接合部として Al 合金／HT の組み合わせを中心として、最適な腐食試験法選定を促進するためおよび定量的な防食使用基準（腐食カテゴリー分類）の基盤を構築するため、腐食科学に基づく定量的なガルバニック腐食数値シミュレーション技術の開発を行った。

#### (1)腐食促進環境下でのガルバニック腐食数値シミュレーション技術

最適な腐食試験法選定に対しては、④で Al 合金／HT の組み合わせすき間内での高  
3-2.9.7-48

温-低湿度と低温-高湿度間のサイクル腐食試験を模擬する数値シミュレーションモデルを開発した。乾湿繰り返しサイクルの模擬では、サイクル毎に酸素を一時的に飽和させ、次のサイクルまでは成り行き任せとする方法を採用した。また、HTは全面腐食性を示すため、HT上ではアノード反応とカソード反応の双方が一樣に生じることができると仮定し、Al合金は局部腐食を生じることから表面の一部分のみでアノード溶解し、他の部分ではカソード反応のみが生じると仮定した。ここで、Al合金の局部腐食はその面積率を設定した。

腐食挙動の数値シミュレーションには、さらに電極反応、物質移動などの各種金属材料ならびに化学種に固有の物性値が必要である。特に、電極反応に関する電気化学パラメータについては、想定される環境の最低限の範囲内において実験により取得するとともに、文献値の整理も行った。腐食進行に伴い生成する腐食生成物の影響については、腐食生成物のあるHTならびにAl合金の分極挙動の結果をもとに、すき間内でのカソード電極反応速度に腐食生成物の量に応じて係数を乗ずることにより、腐食生成物が腐食反応を抑制する作用を数値モデルに導入した。また、腐食生成物の固定電荷の取り扱いについては、固定電荷を模擬するために代表的な腐食生成物の一部が動けない金属イオンと動けるOH<sup>-</sup>イオンに解離すると仮定した。実際の数値シミュレーションでは、Fe<sup>2+</sup>の拡散係数を非常に小さい値に設定し事実上動けないイオン（固定電荷）として取り扱った。

開発したシミュレーション技術の検証は、実際の乾湿繰り返し腐食試験で生じるAl合金/HTの組み合わせ材のガルバニック電流の比較により行った。すき間の塩化物水溶液を電解質とする数値シミュレーションにおいて、ほぼ同様の経時変化が得られており、Al合金/HTの組み合わせ材、乾湿繰り返し環境など限られた条件での検証ではあるが、当初の目的は達成された。なお、開発した数値シミュレーション技術は、金属の種類、初期塩化物濃度、すき間の形状、模擬乾湿取り返しの時間間隔、局部腐食を生じる面積率などを変化させて計算を実行できる。

## (2)実環境におけるガルバニック腐食数値シミュレーション技術

実環境における数値シミュレーションでは、Al合金/HTの突き合わせ部および重ね合わせ部での計算モデルを構築し、数値シミュレーション技術を開発した。

環境条件については、センサを搭載した実車走行試験により車体の5部位について整理した。相対湿度と付着塩分量で部位ごとに整理することができ、自動車では高湿度で付着塩分量が大きい部位が最も腐食速度が大きいことがわかった。計算シミュレーションにおいては、各部位の腐食挙動を調査する際に、液薄膜の初期溶液濃度などの条件設定に利用できる。

突き合わせ部については、計算の支配方程式にネルンスト-プランクの式とターフェルの式を用い、液薄膜下でのガルバニック腐食数値シミュレーション技術を構築した。実際のガルバニック腐食進行時に生じるAl合金上での腐食発生状況に即してシミュレーションを実施するため、計算モデルにおいてもAl合金側は腐食部と不動態部から構成した。腐食部のサイズやAl合金全体に占める腐食の面積率は、実際の実

験で得られた結果と同じになるように設定した。具体的には、Al 合金側の腐食部の面積は、Al 合金/鋼界面に近づくほど大きくなるように設定した。電極面でのアノード・カソード反応速度についての境界条件は、乾湿繰り返し後の試料で測定した分極曲線をターフェル式に近似することで決定した。

構築した水膜下での数値シミュレーションモデルの妥当性については、乾湿繰り返し腐食試験中に測定されるガルバニック電流密度の比較により行った。数値シミュレーションモデルは異なる初期塩濃度の液薄膜で実験との高い整合性が見られ、本モデルにより実際の腐食状況を高精度にシミュレーションできることが示された。

重ね合わせ部については、溶液端部からの乾燥と湿潤を模擬することが可能な数値シミュレーション技術を構築した。乾燥に伴い端部は移動するが、端部の溶存酸素濃度は常に大気と平衡であると仮定し、実際の分極測定から決定した Fe のアノード反応、カソード反応および Al のアノード反応、カソード反応の電位-電流式を導入してシミュレーションを行った。なお、腐食生成物のイオン透過性は考慮していない。合わせ部長さ、合わせ部厚さ、試験溶液を設定した腐食環境でシミュレーションした結果、合わせ部内部の位置により 1 サイクルでの腐食量が異なることが示された。

重ね合わせ部のシミュレーション技術の妥当性については、②で行った部品調査での腐食実態との比較により行った。融雪塩散布地域でおよそ 6 年走行した車両の部品調査では、フロアパン(Al)と補強部品(Fe)の間にガルバニック腐食による孔あきが確認された。フロアパンの元板厚はおよそ 1mm であり、腐食速度に換算すると 170 $\mu\text{m}/\text{year}$  以上となることがわかった。シミュレーションにおける設定条件としてすき間形状の情報を導入し、開放部からの腐食位置と腐食量について検証を行う予定であったが、今回調査した部品から実際の孔あき部位は重ね合わせ部内部ではなく、突合せ部でシミュレーションできる箇所であった。液薄膜下での 12 サイクル後のガルバニック電流の計算値を Al の溶解速度に換算するとおよそ 200 $\mu\text{m}/\text{year}$  となる。今回調査した部品が何年で孔あき腐食に至ったかは不明であるが、突合せ部の数値シミュレーションにより腐食の実態を再現できることがわかった。また、今回の部品調査では重ね合わせ部内部で孔あき腐食が発生している部品はなく、重ね合わせ部の数値シミュレーションの腐食実態との検証はできなかったが、自動車の構造や防錆処理によっては、本シミュレーションモデルに対応する事例も存在すると推察される。

(3)成果の普及（論文、外部発表等）

表 3-2.9.7-5 論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	論文		その他外部発表				展示会 への出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	査読付 き	その他	学会 発表・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレス 発表	その他			
2021FY	0	0	1	0	0	1	0	0	1
2022FY	1	0	16	0	0	3	0	0	1
合計	1	0	17	0	0	4	0	0	2

(4)知的財産権等の確保に向けた取り組み（戦略に沿った取り組み、取得状況）

表 3-2.9.7-6 特許の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
2021FY	0	0	0
2022FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.9.7.3 参考文献

なし

## 2.9.8 「NEDO 調査事業」

### 2.9.8.1 調査の概要

革新的新構造材料等研究開発事業では、プロジェクト期間中に3回（2014年度、2017年度、2021年度）の調査事業を、プロジェクトの研究開発ステージ（初期、中期、終了前）に応じて、調査目的を設定し、公募により実施した。以下に、各調査事業の目的と調査概要を示す。

#### （1）2014年度調査事業

- 1) 件名：車体軽量化に関わる構造技術、構造材料に関する課題と開発指針の検討（2014年度）
- 2) 目的：車体軽量化に関わる材料とそのマルチマテリアル化に関して仮説に基づいた調査を行い、マルチマテリアル化をめぐる課題と開発目標（数値化）の検討を行い、マルチマテリアル化技術ロードマップを得る。
- 3) 委託先：アーサー・D・リトル（ジャパン）株式会社
- 4) NEDO 成果報告書データベースの管理番号：20150000000632
- 5) 調査概要：

本調査では、運輸機器軽量化に関わる技術についての調査・検討を実施し、「マルチマテリアル化技術ロードマップ」を作成した。具体的には、市場と技術の“これまでの変化“の外挿により“今後の変化の見通し”を立て、マルチマテリアルによる軽量化シナリオを作成し、バックキャストにより技術課題・開発目標設定を実施した。従来のエンジン車を中心に、今後の革新的な構造材料が求められている構造部について議論した。

CO<sub>2</sub> 排出量規制をみると、欧州を先頭に今後も規制の厳格化が継続的に進み、年率4%程度の比率で強化され続けた場合、2030年には60g/km(燃費38km/L)程にまで到達する。一方、国内では次世代車は少なくとも2030年にハイブリッド車が20%以上、電気自動車及びプラグインハイブリッド車が10%以上普及する見通しにあり、欧州等先進国では同等の普及率が想定される。

また、JHFC（水素・燃料電池実証プロジェクト）の総合効率検討作業部会によるとハイブリッド車のCO<sub>2</sub>排出量は、ガソリン車の3分の2程度となることから、プラグインハイブリッド車は電気自動車同様CO<sub>2</sub>を排出しないとすると、CO<sub>2</sub>排出規制と次世代車普及の影響から、従来車のCO<sub>2</sub>排出目標は2020年に104g/km、2030年に72g/kmとなる。

次に、従来車の燃費改善における軽量化の貢献比率を考えると、従来車の燃費改善目標に対して、パワートレインの進化と軽量化は3:1の比率での貢献を期待されており、軽量化が担うべき割合は1/4程度とされている。パワートレインの進化は、ガソリンエンジンの熱効率向上で今後も継続的改善が進む見通しでありCO<sub>2</sub>排出規制にも従来と同等の貢献をするものと想定される。そのため、燃費改善目標に対する軽量化の貢献比率を4分の1とすると、軽量化による燃費改善目標は2020年約1.1km/L増、2030年約3.6km/L増となる。

また、エンジン車は、国土交通省調査より1.0km/Lの燃費向上には概ね100kg



の軽量化が必要となる関係にあることが知られている。加えて、グローバルでみて安全・快適・環境装備が占める重量は継続的に増加する傾向にあり、日本の平均的な自動車の場合、2014年比で2020年には43kg程度、2030年には127kg程度増加すると試算される。以上の試算結果よりCO<sub>2</sub>排出規制の対応には、少なくとも14年比で20年8%減、30年27%減の軽量化目標を達成する必要がある。更に、快適装備等重量化の影響分軽量化しなければならないと考えると努力目標として20年12%減、30年37%減を達成することが必要となる。

軽量化シナリオとしてハイテンの高張力化を前提とするシナリオは、剛性が必要な部位での採用に限界が来るため材料置換が2020年までに必要となることが想定される。材料の特徴を活かし部位別に軽量化目標を達成することを前提とすると、潰さない部位向けにCFRP、外板向けにアルミを採用するシナリオが想定される。CFRPの実用化見通しを前提とすると、2020年に熱可塑性、2030年に熱硬化性CFRPの採用が進むシナリオが想定される。

## (2) 2017年度調査事業

- 1) 件名：近未来の移動体及びそれに貢献する車体軽量化に用いる構造材料の課題と開発指針の調査（2017年度）
- 2) 目的：近未来の自動車の動向として、各国の環境規制等から産業構造の変化が起こっており、このような動向を踏まえて自動車をセグメント分類し、仮説に基づいた具体的なシナリオの構築と、そのシナリオからバックキャストにより実用化に向けた課題と開発目標（数値化等による具体化）を明らかにする。
- 3) 委託先：株式会社三菱総合研究所
- 4) NEDO 成果報告書データベースの管理番号：20180000000643
- 5) 調査概要

本調査では、CO<sub>2</sub>削減目標の状況や電動化、自動運転等の技術変化、新興国の経済成長等の外部環境変化を踏まえ、「革新的新構造材料等研究開発」目標の妥当性の評価検証見直しを行うことを目的として実施した。具体的には、自動車に係る今後の技術面・市場面の見通しを整理した後に、主に電動化、自動運転、エネルギーシステム、リサイクル等の技術は構造材料にもたらす影響を分析した後に、今後の重要セグメントであるマイクロ車、コンパクト車、SUVを取り上げて構造材料の将来目標を定性的に整理した。その後、バッテリー性能、車両走行距離、軽量化値について分析を行い、目標となる軽量化率等を算定した。以下に、概要を示す。

### I. 技術/市場見通しの整理

(技術要素)

- ① 電動化（電池/モーター等）の技術進展
- ② 再生可能エネルギーシステムの普及拡大
- ③ 自動運転レベルの向上
- ④ リサイクル・LCA 技術進展  
が加速する。

(市場見通し)

- ・新興国の経済成長拡大
- ・環境規制等の CO2 排出制約強化
- ・自動車産業構造が加速的に変化  
が起こり、重要セグメントが多様化

## II. 近未来のシナリオの設定 (市場面からの重要セグメント)

新興国成長、先進国のモビリティニーズの変化を踏まえると、従来のボリュームゾーンである C セグメント等に加えて E クラスやマイクロカー等も必要なセグメントとなる。

## III. 技術見通し及び市場見通しの整理 (技術面からの重要セグメント)

特に電池性能は構造材料軽量化要件に大きな影響を及ぼす自動運転はマイクロカー等の構造材料要件を緩和させる可能性をもつエネルギーシステムやリサイクル技術は LCA(CO2 排出量) に大きな影響を及ぼす。

## IV. シナリオの具体化

【マイクロセグメント】都市内/高齢者等の市場が拡大。小型・低価格でありながらも衝突基準等はクリアする車両が出現。

【Cセグメント】新興国を含め、今後もマスマーケットとして拡大。コスト重視のため当面は内燃機関が主流。構造材料のコスト要件はシビア。

【SUVクラス】他セグメントよりもコスト制約が緩い。高付加価値化を目的として、アルミ/CFRP 等はこのクラスからの導入が加速。

## V. 材料課題と目標の具体化

- ・現ハイテン材料目標がクリアできれば市場ニーズからの必要航続距離は達成できる見通しである。一方で、アルミや CFRP については製造・加工コスト(軽量化プレミアム)を低下させる技術開発が必要である。そのため、海外の動向も踏まえた戦略的目標設定が必要となる。
- ・コストダウン・高付加価値化は競争領域の開発であるため、本プロジェクトスコープと各企業の開発目標の整合が必要。
- ・今後のモビリティニーズの多様化に伴い、自動車産業のバリューチェーン全体を見据えた材料開発を進めることも必要である(例:マイクロ EV のデザイン手法、コストダウン方法、そのための強度と延性、製造コストの最適化方法等)

### (3) 2021 年度調査事業

- 1) 件名: 輸送機器の事業環境から見た車体軽量化材料・技術に関する最新動向と課題の調査(2021 年度)
- 2) 目的: 最新の社会情勢の変化を踏まえて自動車を中心とする輸送機器の事業環境を整理し、2030 年、2050 年の自動車種とその普及見通しを仮説立案する。その仮説立案から実用化のためのバックキャストを行い、実現しなければならない目標値(要求仕様、コスト)を明らかにし、車体軽量化技術の社会実装に向けた課題と展望をまとめる。
- 3) 委託先: 株式会社古賀総研

4) NEDO 成果報告書データベースの管理番号：20220000000975

5) 調査概要

輸送部門のエネルギー消費割合を減らし、地球温暖化ガスである炭酸ガス(CO<sub>2</sub>)の排出量を減らすことは喫緊の課題である。そのために、内燃機関のエンジン、電気自動車のモーターの効率向上とともに、その負荷となる車体の軽量化が重要となる。本調査では、自動車の事業環境調査を通して仮説を立て、その仮説のもとに車体軽量化の目標を設定し、車体軽量化技術の実用化に向けた課題を明らかにすることを目的とした。さらに、課題解決の目標を明らかにし、その取り組み状況を調査した。

以下に、具体的な調査のステップとその内容を示す。

調査項目(1)では、社会情勢の変化を俯瞰し、自動車産業に影響を及ぼすであろう社会情勢、社会潮流の変化を調査した。NEDOにおいては、過去に2014年度と2017年度に類似の調査事業を行っている。本調査では、2017年度の調査以降の社会潮流にフォーカスして調査を行い、2017年からの変化を抽出し、さらに2030年、2050年の社会を俯瞰し、自動車産業の環境変化を予測した。

調査項目(2)では、調査項目(1)の調査結果を元に2030年および2050年に主流になる車種としてハイブリッド自動車(HEV)とバッテリー電気自動車(BEV)を選定し、カーボンニュートラルに向けた規制、製品の生涯での環境への影響を考慮するLCA(Life Cycle Assessment)に基づく環境負荷、航続距離を考慮して、車体軽量化の目標値を算出した。さらに、調査項目(3)の調査結果を考慮しながら、算出した目標値を満足する材料構成を仮定し、それを実用化するための課題を抽出した。

調査項目(3)では、車体軽量化に向けて開発中の材料の開発動向を俯瞰すると同時に、NEDOにおいて推進中の「革新的新構造材料等研究開発プロジェクト」の成果の強みと弱みを分析し、社会実装のために解決すべき課題を整理した。その結果をもとに、調査項目(2)で算出した軽量化目標を達成するための材料構成を提案した。

調査項目(4)では、主要国の車体軽量化関連の国家プロジェクトや学会・プレスリリース等による技術発表を調査し、海外における車体軽量化のための構造材料の開発および実用化の動向を明らかにした。中国に関しては、公開情報が少ないので、特許・学術論文の動向調査も行った。また、それらの結果を、軽量化目標を達成するための材料構成に反映した。

調査項目(5)では、調査項目(1)から(4)の調査結果を踏まえて、NEDO「革新的新構造材料等研究開発プロジェクト」の成果を2030年までに社会実装するための課題と展望を整理した。さらに、2050年に向けた今後の技術開発の方向性を整理し、ロードマップとして示した。

調査項目(6)では、各種ステークホルダーである有識者へのヒアリングを行った。対象は、自動車メーカー、部品メーカー、材料メーカー、大学・研究機関の18名であり、社会潮流の変化、事業環境の変化、車体軽量化技術、協業体制、国の施策に対する要望等、幅広く、意見を収集した。

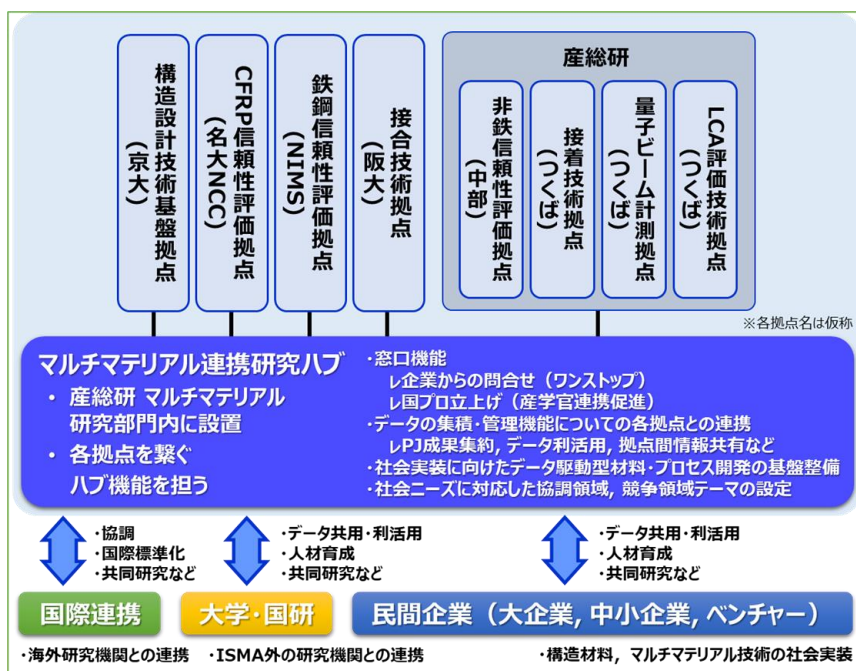
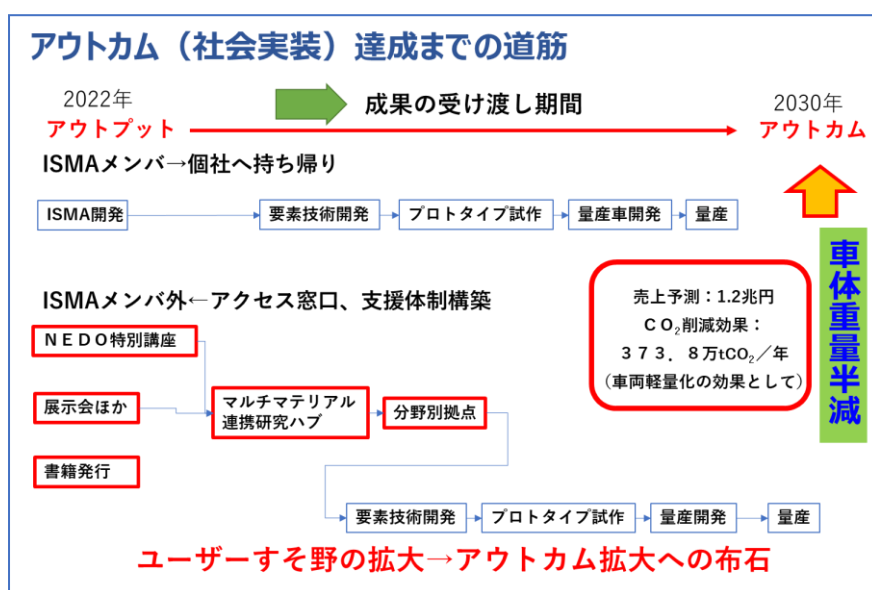
さらに、有識者会議として有識者との意見交換会を開催し、調査結果に関してご意見をいただき、調査結果を取りまとめた。

## 4.成果の実用化・事業化に向けた取り組み及び見通しについて

### 4.1 事業全体の取り組み及び見通し

本プロジェクトで得られた成果は、企業各社が持ち帰って実用化・事業化を図る。10年間のプロジェクトを通じて、企業間、企業-国研・大学間の連携が深まっており、多くの成果が実用化・事業化されることが期待される。

また、協調テーマで得られた技術・データは、各技術分野のデータ等活用拠点で活用・保管し広く社会での活用を目指すと共に、産業技術総合研究所に設置されたマルチマテリアル連携研究ハブが各技術分野間の連携とマルチマテリアル技術に関する窓口として活動する。



近年、EV化が急速に進展しており、バッテリーの重量による車両重量増が問題となっている。本プロジェクトで開発された革新材料、接合・接着技術、設計・評価技術による車体軽量化の重要性が改めて認識されている。早急な実用化が望まれる。

また、国土強靱化政策に見られるように、インフラの重要性が再認識されており、それらにも本プロジェクトの成果が活用されていくものとする。

#### **4.2 組織毎の取り組み及び見通し**

次ページ以降に各組織（企業、国研、大学等）毎の、担当テーマにおける実用化・事業化に向けた取り組み及び見通しを記す。

組織名：株式会社 IHI

[テーマ番号 0 7] 「鋼材／CFRP 等樹脂材料の接合技術開発」

(2014 年度～2017 年度)

[テーマ番号 6 3] 「鋼板と樹脂材料の革新的接合技術及び信頼性評価技術の開発」

(2018 年度～2021 年度)

## (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

[テーマ番号 0 7]

### ・実用化・事業化に向けた戦略

船舶上部構造は桁構造、柱構造、パネル構造が主な構造要素となる。これまでの研究によって桁構造と柱構造の基本的な設計思想とその妥当性の確認は完了した。構造要素（桁、柱、パネル）の開発に目途をつけた段階で、実用化・事業化に必要となる認証取得のため日本海事協会等の船級協会と具体的な試験項目、結果等の取扱いを協議する。実用化は、上部構造小物部材、ドアパネル、デッキ等へと、段階を追って進める。

### ・事業化した場合に対象となる製品、市場規模

世界の船舶の竣工量は 2011 年度をピークに減少しているが、その中でコンテナ船は堅調に増加している。コンテナ船に関しては、大型化が進んでいる。大型化に伴い船体強度維持の観点から重要構造部際の厚板化が不可欠となり船体重量の増加およびそれに伴う燃料消費量の増加が課題となっている。上部構造複合部材化による軽量化は、燃費向上、船体性能向上による差別化が可能であり、大きな経済効果を有すると考えられる。

### ・競合技術に対する優位性（性能面、コスト面）

競合技術として鋼板のさらなる高強度化による軽量化がある。しかし現時点では、耐食性と強度、じん性の両立が難しい。さらに溶接による性能低下も懸念される。こうした技術課題を克服した厚板鋼材が開発されない限り、複合構造化技術は、十分に優位性が確保できる。

[テーマ番号 6 3]

### ・実用化・事業化に向けた戦略

本接合技術をベースとした自動車向けのマルチマテリアル接合部品の供給で実用化を目指す。事業としては受託生産などプロセス提供 および装置販売の両面で事業化を図る。円滑な事業化のため、IHI-Gr（株式会社 IHI 物流産業システム）は CFRP 成形の一貫したシステムを構築している。また、上流工程の整備（プリプレグ製造装置開発等）もすでに行っており、顧客ニーズを製品に反映する体制が整えられている。

#### ・事業化した場合に対象となる製品、市場規模

燃費規制による軽量化トレンドを背景に、CFRP の自動車適用が広がっている。また、CFRP 成形技術向上などによるコストの低減からマルチマテリアル部品の適用が増加すると予想される。まずは、マルチマテリアル部品の供給面でシェアを獲得を目指す。製造販売では自動車用プレス分野で蓄積した多数の設備納入実績と、そこで得たビジネスノウハウを活用してシェアの獲得を目指す。

#### ・競合技術に対する優位性（性能面、コスト面）

自動車用構造材料として、超高張力鋼板、アルミニウム、マグネシウムなどがある。現状、CFRP はコスト高であるが、それぞれの素材の特性を生かした複合構造で付加価値を創出することで、トータルコストで優位性が得られると考えられる。

#### ・量産技術確立の見通し

単純化した自動車部品模擬部材での量産プロセスおよび品質確保についての基礎検証を完了した。今後は自動車メーカーと連携し、実車使用条件や詳細形状を反映した部材での検証を進めていく。

### (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

#### [テーマ番号 07]

#### ・上記の実用化・事業化に向けた戦略に関する具体的な取組状況または計画

本研究開発にて開発した異種材料複合構造部材は、例えば船舶の上部構造に適用することで 10~20%の重量低減が可能であり、それにより燃費向上のみならず低重心化、振動の低減などの性能向上見込まれる。燃費向上による燃料費削減の効果は大きく、船舶のライフサイクルコストを考えると、CFRP 適用によるコストアップをある程度回収することが可能と考えられる。また、CO2 排出量の削減は国際海事機関（IMO）の新設計基準において新造船における段階的な削減が義務付けられており、本技術の適用によりこの点も達成できると考えられる。実用化は、上部構造小物部材、ドアパネル、デッキ等へと、段階を追って進める。

鋼板の製造・加工コストと比較して、CFRP の製造・加工コストは現状では非常に高く、また大型化における課題もある。この点に関しては、必要とされる CFRP の性能を維持しつつ選択が可能な繊維、樹脂および成形方法も含めて検討を行うと共に、船舶の燃費低減から得られるライフサイクルコストも含めたトータルのコストで評価してもらう。

#### [テーマ番号 63]

#### ・上記の実用化・事業化に向けた戦略に関する具体的な取組状況または計画

これまでに部材要素レベルでの性能検証および実証機の製作を完了している。2023 年度にマルチマテリアル部品の供給を目指し、自動車メーカーと連携し実用化・事業化への検討していく。



### (3)波及効果

#### [テーマ番号 07]

構造複合化による部材の軽量化、構造最適化技術は輸送機器のみならず、海洋構造物、橋梁部材等、インフラ分野においても利用価値が高く、波及効果は大きいと考えられる。

#### [テーマ番号 63]

マルチマテリアル部品や製造装置は自動車分野だけでなく、航空機分野や橋梁などのインフラ分野においても利用価値が高く、波及効果は大きいと考えられる。

### 熱可塑性 CFRP の開発

#### [テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発 (2014 年度～2017 年度)

#### (1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し

自動車向け複合材料に関しては実用化・事業化計画は特になし。

本プログラムで開発した技術のうち、可能なものについては航空エンジンに展開することを想定している。民間航空機は全世界でおよそ 20,000 機運航されており、今後とも年間 5%の増加が予想されている。近年は軽量化・高性能化のために複合材の適用が進んでおり、航空機向け複合材の市場も拡大すると考えられる。

航空機向け複合材料技術は、自動車向けよりも実績があり、品質保証のための技術も確立しているが、製造コストの観点で課題があり、自動車向け複合材料技術が優位と考えられる。

#### (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

2030 年ごろに実用化を想定している次世代航空機エンジンへの適用を検討している。

#### (3)波及効果

弊社は世界に先駆けて航空機エンジン用の熱可塑ファン構造案内翼を開発・実用化するなど、熱可塑性複合材料の優れた生産性に着目して、熱可塑性複合材料分野の技術開発を 20 年以上にわたり独自で進めてきた。但し航空機向けでは熱可塑性複合材は熱硬化性複合材料と比較して素材・成形方法・設備のいずれの分野においても産業としての規模が小さく、結果として技術シーズの数も少なく、継続的に技術開発していく上での課題となっている。

一方、現在は航空機向けの需要が複合材料の技術開発動向をリードしているが、今後は航空機以上に低コストが要求される自動車向けの分野において、熱可塑性の低コスト材料・低コスト成形法が発展すると予想される。自動車向け熱可塑複合材料は量産適用事例が少ないという実用化に向けた課題があるが、この点では弊社の培った航空機向け複合材料技術、特に評価技術を応用することで本事業に貢献できる。

以上より、今後の熱可塑性複合材料の発展においては自動車向け航空機向けなどの

適用用途を越えた協力が非常に効果的と考えられる。弊社としては本事業を通じて、自動車向け熱可塑性複合材料の開発に参加することで、航空機向けにも適用可能な技術・企業に関する知見を多く得ることができ、今後の航空機向けの熱可塑性複合材料開発において大きな相乗効果・波及効果が得られると期待している。

組織名：株式会社アート1

[テーマ番号19] 難燃性マグネシウム合金の耐食技術の開発  
(2014年度～2017年度)

のうち、

③難燃性マグネシウム合金の陽極酸化皮膜系塗装下地処理膜の性能評価  
及び表面処理材の暴露試験評価

**(1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

マグネシウムにおける耐食性は従来から課題となっている中、陽極酸化皮膜はその高耐食性が要求される部品への適用が望まれている。その中で小型製品は一部設備を増設することで対応ができ、設備コストは比較的Lowコストで導入が可能であり、量産開始までに要する期間も比較的短期間で生産を開始できる。一方、大型製品については新規にライン設備を行う必要があるため、設備コストに費用並びに導入までの期間が多く必要とされ、コストと期間に懸念点がある。

本技術は従来の陽極酸化皮膜技術よりも高い性能を有している。現状使用されている製品からの置き換えも充分可能である。そのため、その市場規模は、陽極酸化皮膜を使用している製品のうち、大型製品以外が該当すると思われる。

しかしながら耐食性を目的とした製品においては陽極酸化皮膜よりも耐食性は劣るものの、Lowコストな化成処理皮膜が塗装下地処理として行われることが想定される。そのため、化成処理皮膜では実現が難しい高い性能を必要とする部品への適応を想定している。

**(2)実用化・事業化に向けた具体的取組**

化成処理では実現が難しい高耐食性能を有する部品への適応に向けて、車両部品にかかわらず多方面に検討しているが、現段階では具体的な見通しが立っていない。しかしながら、実用化に向けて耐食性の付加価値以外の特性を見出せば、より幅広く部品への適応の可能性が広がるため、高耐食性以外の特性についても評価し、その付加価値を耐食性+ $\alpha$ とする取組を継続していく。

**(3)波及効果**

マグネシウムの耐食性に関しては、促進試験のみならず、当プロジェクトに於ける暴露データからも確実に化成処理より優れた結果が見出されている。上記車両用途以外でも、本結果を基にしてアルマイト(アルミの陽極酸化)と同様に、他分野に関してもその高耐食性のPRを行い、その波及効果を求めてゆくものとする。

組織名：株式会社アルモニコス

[テーマ番号 59] マルチマテリアル車体軽量化に関わる革新的設計技術の開発  
(2018年度～2022年度)

**(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

マルチマテリアルに対応したトポロジー最適化システムは作成したが、実際に運用するにあたり、いくつかの課題がでてきた。材質間の接合、板金モデルに対するトポロジー最適化の結果をどのように反映させるのか等について、どのように対応していくかノウハウの蓄積が必要になる。そのために拠点化を行ない、引き続き開発の継続と共に、実際に運用するためにユーザの意見を集め、実用化に向けての取り組みを続ける。

リバースエンジニアリングシステムについては、トポロジー最適化を行なった結果から、CAD データを作る際の処理の自動化率を高めることによって、より短時間でCAD データの作成ができるようになった。また、作成される面の質を高めることができるようになり、手動で修正する手間を軽減させることができた。

マルチマテリアルに対応したトポロジー最適化システムの市場規模については、機械系 CAE 国内市場規模が、2019 年実績で約 837 億円、2025 年予測で 870 億円であり、そのうち構造系 CAE の市場規模が、10%（現行のシェアから推測）とすると、2025 年の国内市場規模が約 87 億円と予想される。新型コロナウイルス感染拡大の影響により、しばらくは大きく落ちこむが製造業の幅広い業種において設備投資が徐々に回復するとみており、これに伴い機械系 CAE 国内市場も好転に向かうものと考えられる ([https://www.yano.co.jp/press-release/show/press\\_id/2473](https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/2473))

他のトポロジー最適化システムと比較して、レベルセット法を使うことにより、従来の密度法に比べて境界が明確になる、ということが大きなアドバンテージとなる。また、形状の複雑さをコントロールするための係数やコストを考慮する仕組みを取り入れ、より実現化しやすいシステムにしていく。

自動車技術会で実際のユーザに評価していただき、その意見を取り込むことで、より使いやすいシステムにしていく。

**(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組**

マルチマテリアルに対応したトポロジー最適化システムを構築し、そのシステムで車体の設計を行ない、軽量化を行なうこと示すことができた。その結果において、衝突シミュレーションでも軽量化前と同等の性能を維持することが確認できた。

実用化するためには最適化で得られた結果から、製品設計にどのように反映していくかのノウハウが必要となるため拠点化を行い、最適化設計の実績を積み、どのように製品化に取り込むのかの検討を行なうことで、販売、教育、サポートの体制を整える。

リバースエンジニアリングシステムについては、開発した成果を弊社のパッケージソフト spScan に組みこみ、実際にユーザが使えるようにしていく。

### (3)波及効果

ISMA の他のテーマである新材料を使った設計や、接合技術と連携させることにより、より高性能な設計が可能になる。

3D プリンタによって作成する形状の自由度が上がることにより、トポロジー最適化で得られた形状を実現するためのハードルを下げることができる。

まずは自動車の軽量化に向けての開発を進めるが、自動車部品や家電、航空宇宙、船舶などの分野にも適用が可能である。

組織名：株式会社 KADO

[テーマ番号 27] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2014 年度～2022 年度)

**(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

KADO ではコンポジットの成形技術や生産装置技術ノウハウを基に、ラインビルダー（基材の投入から成形から検査までのプロセスを一貫して熟知したインテグレーター）として、更なる知見や、実用性の向上を図るため、研究を行う。

日本が 2050 年までの実現を宣言している「カーボンニュートラル」のカギを握る技術の一つに「カーボンリサイクル」があり、二酸化炭素削減への貢献に加え、自然由来、バイオマス利用などの技術開発への取組みが盛んとなっている。軽量でかつ高強度材である CFRP、特に高速成形が有望とされている熱可塑性 CFRP においては、市場からの注目と期待を感じられるが、自動車産業が求める生産性や品質検査手法の課題が残されている。それらを解決することで、市場での採用は早まると考えられる。また、海外市場視察を行っているが、オートメーション化やマテハン技術への関心は高まっており、研究機関含め民間企業からロボット装置（複合材自動成形技術開発・ロボット成形）の問合せや受注案件が増えているため、経済効果を有すると考えている。SDGs やカーボンニュートラルの取組みからみえるように、環境低負荷は資源循環型社会の構築には必要不可欠である。再生可能な資源（バイオマス）を用いた材料生産は既に多くのメーカーやサプライヤーが着手しており、熱可塑性複合材料向けのバイオ由来の材料の入手も可能な時代になっている。今回の研究成果の技術が応用できると考えており、KADO では研究に着手している。また、次世代空モビリティ（ドローン、空飛ぶクルマなど）への社会実装も日本市場が整備を進めている技術開発のひとつであり、市場規模は増加している。KADO にも問合せがあるが、ドローン産業へは実証実験に参画し、ドローン取付け用搬送箱の試作も行った。ドローンの産業革命ロードマップでは、2022 年度を目標に飛行レベル 4（有人地帯での補助者なし目視外飛行）実現に向け進んでおり、制度が整えば更なる需要が見込める。

**(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組**

KADO では、複合材製品の製作販売や官民から受託研究を行う事業に加え、複合材の加工技術・加工装置の設計・製作・販売を行っており、熱硬化性 CFRP においては、加工装置の販売実績がある。複合材料業界ではオートメーション化への取組みが増えていく可能性が高いといわれており、特に期待されている熱可塑性 CFRP の加工装置やオートメーション化について、KADO の実績やさらなる技術ノウハウを高めることで、装置販売事業に注力している。現状の商品（自動車）に軽量・高強度材である熱可塑性 CFRP において高い期待が持たれている。しかし、原材料の生産過程から製品の生産、リサイクル過程、これらライフサイクルアセスメント全体を踏まえた取組みが必要されている中、熱可塑性 CFRP ならびに成形技術においても低炭素成形をよ

り一層研究する必要がある。今回、開発している材料・技術においては、自動車を中心とした構造材料であり、環境影響に大きな影響力を持つ自動車において採用されることは大いに期待されている。また軽量部材であることで高齢化社会で要望される、軽量の車いすや杖などの福祉用具、作業現場でのアシストスーツ、家電への適用も考えられ、他の産業界においても市場効果が大きいと期待される。ドローン産業への需要の高まりもあり、機体軽量化、量産性、耐衝撃性などの機械的特性、成形性を考慮すると、熱可塑性 FRP の材料が最適であると考え、実証実験後もオートメーション化も踏まえた商品開発への取組みを進めている。

### (3)波及効果

現在、CFRP 業界において熱硬化、熱可塑に関わらず、自動化が進んでおり、今までのような職人を育てるのではなく、商品設計から生産プロセス、成形装置の一連の工程を同時に考える“デジタル・マニュファクチャリング”を考案できるエンジニアの育成が必至であるが、日本の CFRP 産業ではないに等しい。複合材の特徴や性能、成形プロセス、機械装置、ロボット生産技術、これら設計・製作・生産が総合的に判断ができるエンジニアを今回の研究開発を通じて育成を行う。現在、そのようなエンジニア育成も視野に入れたロボットセンター開設に向けて進めており、顧客の仕様環境に合わせた講習をすることにより、自動車関連企業等、更なる高精度や生産スピードを求める顧客からのニーズや、装置購入が難しい中小企業からのニーズにも対応できると考えている。テーマ 27 では、新人社員も研究員登録していただいたことにより、成形トライに参加ができ、人材育成の良い機会となった。今後もこのような取り組みがあれば、複数の企業や研究機関との交流にもなるため、積極的に参加していき、サポート側としても貢献したいと考える。

## [テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発 (2014 年度～2017 年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

KADO ではコンポジットの成形技術や生産装置技術ノウハウを基に、ラインビルダー（基材の投入から成形から検査までのプロセスを一貫して熟知したインテグレーター）として、更なる知見や、実用性の向上を図るため、研究を行う。

日本が 2050 年までの実現を宣言している「カーボンニュートラル」のカギを握る技術の一つに「カーボンリサイクル」があり、二酸化炭素削減への貢献に加え、自然由来、バイオマス利用などの技術開発への取組みが盛んとなっている。軽量でかつ高強度材である CFRP、特に高速成形が有望とされている熱可塑性 CFRP においては、市場からの注目と期待を感じられるが、自動車産業が求める生産性や品質検査手法の課題が残されている。それらを解決することで、市場での採用は早まると考えられる。また、海外市場視察を行っているが、オートメーション化やマテハン技術への関心は高まっており、研究機関含め民間企業からロボット装置（複合材自動成形技術開発・ロボット成形）の問合せや受注案件が増えているため、経済効果を有すると考えている。SDGs やカーボンニュートラルの取組みからみえるように、環境低負荷は資源循環型社会の構築には必要不可欠である。再生可能な資源（バイオマス）を用いた材料生産は既に多くのメーカーやサプライヤーが着手しており、熱可塑性複合材料向けのバイオ由来の材料の入手も可能な時代になっている。今回の研究成果の技術応用できると考えており、KADO では研究に着手している。また、次世代空モビリティ（ドローン、空飛ぶクルマなど）への社会実装も日本市場が整備を進めている技術開発のひとつであり、市場規模は増加している。KADO にも問合せがあるが、ドローン産業へは実証実験に参画し、ドローン取付け用搬送箱の試作も行った。ドローンの産業革命ロードマップでは、2022 年度を目標に飛行レベル 4（有人地帯での補助者なし目視外飛行）実現に向け進んでおり、制度が整えば更なる需要が見込める。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

KADO では、複合材製品の製作販売や官民から受託研究を行う事業に加え、複合材の加工技術・加工装置の設計・製作・販売を行っており、熱硬化性 CFRP においては、加工装置の販売実績がある。複合材料業界ではオートメーション化への取組みが増えていく可能性が高いといわれており、特に期待されている熱可塑性 CFRP の加工装置やオートメーション化について、KADO の実績やさらなる技術ノウハウを高めることで、装置販売事業に注力している。現状の商品（自動車）に軽量・高強度材である熱可塑性 CFRP において高い期待が持たれている。しかし、原材料の生産過程から製品の生産、リサイクル過程、これらライフサイクルアセスメント全体を踏まえた取組みが必要されている中、熱可塑性 CFRP ならびに成形技術においても低炭素成形をより一層研究する必要がある。今回、開発している材料・技術においては、自動車を中心とした構造材料であり、環境影響に大きな影響力を持つ自動車において採用される



ことは大いに期待されている。また軽量部材であることで高齢化社会で要望される、軽量な車いすや杖などの福祉用具、作業現場でのアシストスーツ、家電への適用も考えられ、他の産業界においても市場効果が大いに期待される。ドローン産業への需要の高まりもあり、機体軽量化、量産性、耐衝撃性などの機械的特性、成形性を考慮すると、熱可塑性 FRP の材料が最適であると考え、実証実験後もオートメーション化も踏まえた商品開発への取組みを進めている。

### (3)波及効果

現在、CFRP 業界において熱硬化、熱可塑に関わらず、自動化が進んでおり、今までのような職人を育てるのではなく、商品設計から生産プロセス、成形装置の一連の工程を同時に考える“デジタル・マニファクチャリング”を考案できるエンジニアの育成が必至であるが、日本の CFRP 産業ではないに等しい。複合材の特徴や性能、成形プロセス、機械装置、ロボット生産技術、これら設計・製作・生産が総合的に判断ができるエンジニアを今回の研究開発を通じて育成を行う。現在、そのようなエンジニア育成も視野に入れたロボットセンター開設に向けて進めており、顧客の仕様環境に合わせた講習をすることにより、自動車関連企業等、更なる高精度や生産スピードを求める顧客からのニーズや、装置購入が難しい中小企業からのニーズにも対応できると考えている。新人社員も研究員登録していただいたことにより、たつの分室内（KADO 内）での成形や成形トライ、東京大学でのトライを対応することができ、人材育成の良い機会となった。今後もこのような取り組みがあれば、複数の企業や研究機関との交流にもなるため、積極的に参加していき、サポート側としても貢献したいと考える。

組織名：川崎重工業株式会社

[テーマ番号06] 中高炭素鋼/中高炭素鋼のフリクションスポット接合技術の開発  
(2014年度～2017年度)

**(1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

本テーマでは中高炭素鋼を高強度に点接合するフリクションスポット接合技術を開発した。課題であった打点コストの削減に貢献する長寿命接合工具および中高炭素鋼において高い継手強度を発現させる接合温度制御プロセス及び専用接合ガンが完成した。また、開発では接合継手の品質保証に関わる接合メカニズムについて基礎的な解明を行い、さらに実適用を見据えた模擬部品による構造強度評価を行った。

本開発成果である温度制御接合により、接合が難しい中高炭素鋼であっても、自動車生産で標準的に用いられる抵抗スポット溶接法よりも高い強度特性が得られることを確認しており、本接合法の開発により中炭素鋼板の自動車ボディへの適用に弾みをつけ、自動車ボディ軽量化に寄与する見通しを得た。

接合温度を制御する本接合法については基本特許を取得しており他社の参入が困難な環境を整えた。今後、開発した接合ガンおよびロボットについて中炭素鋼の市販および市場ニーズに応じて製品化を進める。

**(2)実用化・事業化に向けた具体的取組**

展示会等で自動車関連企業をはじめ多くの来場者にそのメリットや優れた性能について PR した。サンプル試作依頼に対し、温度制御接合により従来では得られない高い強度に対して好評を頂き、継続的な営業フォローを実施した。今後、これらの活動によって得られたチャンネルを活かしつつ、中高炭素鋼板が実用化され次第、自動車メーカーおよび関連メーカーの引合いに対応していく。

**(3)波及効果**

既に自動車ボディに使われている超ハイテン鋼（引張強度 1GPa 以上）においても温度制御接合を適用することで、剥離強度が大幅に向上することを確認した。その他にも、高耐摩耗性接合工具への適用に向け開発された超硬材料技術については、切削工具や金型への応用が期待される。

組織名：共和工業株式会社

[テーマ番号 27] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2014 年度～2022 年度)

(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

2022 年までに、車両軽量化に向けた 1 つの工法である LFT-D 成形品実用化のための基本製作基準（強度、成形工法、成形時間等）を確立し、そこにおける金型を含めた成形設備の有り様を確立する（車両製造販売年の 3～4 年前には基礎データを確立し商品設計段階から成形材料、成形工法を決定する必要性が有る）。

(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

材料、構造・設計、設備・型・成形、補強材・接合の各 WG にて、NCC リーダーと企業リーダーとのダブル体制により各 WG 連携を行う。

実形状製作成形における流動挙動、流動強度などを学術的な裏付けを学術支援 WG にお願いし、学術 WG よりのデータの実証実験を行う。計画においては、名古屋大学基本計画に基づく。

(3) 波及効果

熱可塑性樹脂+バージンカーボン繊維の混練製法による LFT-D 成形品実用化以外に LFT-D 製法で作成した成形品及び中間不良材料を樹脂+繊維ごと再生化し、強度保障迄できる方向で調整し、2030 年には実用化でき、SDGS 対応部品の計画推進するメーカーが出てきている。

組織名：株式会社神戸製鋼所

[テーマ番号02] 残留 $\gamma$ 相制御中高炭素鋼板の異種・同種材料接合技術の開発  
(2014年度～2022年度)

**(1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

接合技術に関しては、2018年度まではテーマ22、2019年度はテーマ02で開発した革新鋼板および2018年度まではテーマ21、2019年度はテーマ02で開発した複層アルミを対象に、革新鋼板－複層アルミの異材接合および革新鋼板同士の接合を行うための技術として活用することで、革新鋼板および複層アルミの実用化促進、普及を促すために活用する。この時、ユーザの保有する設備や適用する部位に応じた適切な接合方法を選定して提案できるよう、各種の接合技術を開発し技術提供できるようにする。

本テーマで開発する接合技術については、テーマ22で開発した革新鋼板をユーザに販売する際にユーザソリューションの1つの技術として提供するものになる。そのため、超高強度鋼のマーケットが今後拡大していく中で、適用範囲の拡大が期待される。本技術については接合装置メーカーにライセンスすることでライセンス料の獲得、接合装置メーカーとしても装置の売上増が期待できると共に、本接合技術普及による革新鋼板の実用化による経済効果が期待される。

**(2)実用化・事業化に向けた具体的取組**

接合技術については、革新鋼板をユーザに提供する際に合わせて提示していくことになるので、適用対象の部品や各ユーザの状況に応じて提案できる接合技術群を構築し、様々な状況に対応できるようにしていく。

革新鋼板の接合技術として競合するものは、接着ならびに機械接合となる。接着については、接着剤という消耗品の使用と接合部の信頼性確保という課題がある。また機械接合についてはピン等の消耗品の利用と、高強度ゆえに加工負荷が大きいため生産性が高めにくいという両面からコストがかかる技術となる。これらに対して、コスト面では優位にあるが、各観点から得失を整理して適切な接合技術を選択することが必須となる。

**(3)波及効果**

ここで開発した接合技術を活用することができれば、革新鋼板だけでなく一般鋼材の接合についても容易となるため、生産性の向上が期待される。また、関係する会社、組織の技術者が本技術の周辺技術について検討、対外発表することで本接合分野の技術者の技術力向上に活用できる。

**〔テーマ番号10〕 チタン材一貫製造プロセス技術開発  
(2014年度～2020年度)**

**(1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

溶解脱酸プロセスを含む一貫製造プロセス開発、及び、強度・加工性に優れるチタン材の開発に取り組んだ。プロセス開発に係る技術課題の推進には大きな設備投資を伴うため、先行して市場開拓を進めることが望ましいと考えている。

本プロジェクトの成果は、航空機分野、及びエネルギー・インフラ分野向け（例えば熱交換器向け）への適用を想定している。現時点では、新型コロナウイルス等の影響で、世の中の動向変化が大きい。これらの変化を見極め、実用化に向けた戦略議論を進めていく。

**(2)実用化・事業化に向けた具体的取組**

新型コロナウイルス等の影響のため、近年、世の中の動向が大きく変化している。以後は、事業化に向けて自社内で開発に取り組む所存であるが、まずは、市場動向に注視し計画を改めて策定する必要があると認識している。その上で、現時点での想定取組みを記載する。

チタン材は他の構造材料に比べて、比強度や耐食性といった性能面では総じて優位にあり、適用拡大に向けてのネックはコストである。例えば、チタン合金が多用される航空機分野ではアルミニウム合金が競合となるが、アルミニウム合金は近年多用されつつある CFRP との電食の問題があり、耐力性ではチタン合金に優位性がある。また、純チタン展伸材においてはステンレス鋼が競合するが、耐食性の観点でチタンに優位性がある。しかし、コストの面では、競合材料に対して劣位である。本プロジェクトにおいて、部材の軽量化に資する高強度化と、お客様での工程の低コスト化に貢献できる材料特性の向上の取り組んできており、部材でのコスト差を縮めることに貢献できると考えている。現在は研究開発段階であるが、今後、お客様とのご要望を基に、事業化に向けた取組みを具体化させたい。

**(3)波及効果**

本プロジェクトで開発した要素技術は、プロジェクトで対象としたチタン材の性能向上に限定せず、基盤的な技術として活用でき、今後のチタン産業の発展に寄与できる。

**〔テーマ番号13〕 高強度アルミニウム合金を用いた自動車部品の開発  
(2014年度～2022年度)**

**(1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

・実用化・事業化に向けた戦略

革新 7000 系合金（鍛造）については、ラボレベルで第 2 中期目標を達成した。

引き続き、高強度材料が必要な部品への適用検討を継続するが、強度と耐 SCC 性とのバランスを考慮する必要があり、慎重に検討する。

また革新 7000 系合金（鍛造）の開発過程で開発したプロセス技術（鍛造）について、効果を確認した。直ちに実用化することは難しいが、将来の実用性の可能性を検討継続する。

・ 事業化した場合に対象となる製品、市場規模

革新 7000 系合金（鍛造）；自動二輪車部品、レジャー用品等を対象  
市場規模は数 100kg/月程度

・ 競合技術に対する優位性（性能面、コスト面）

革新 7000 系合金（鍛造）；7150-T77511 材に比べて 25%以上の強度向上、コストは微増

・ 量産技術確立の見通し

革新アルミニウム合金（鍛造）は、いずれも既存設備での量産が可能。

**(2)実用化・事業化に向けた具体的取組**

・ 上記の実用化・事業化に向けた戦略に関する具体的な取組状況または計画

革新 7000 系合金（鍛造）については、強度と耐 SCC 性とのバランスを考慮する必要があり、慎重に検討する。量産規模材で特性確認後、具体的用途を検討する。

・ 自社で実用化しない場合は誰が実用化するのか

（自社で実用化する）

**(3)波及効果**

・ テーマの目的・目標以外に顕著な波及効果（技術的、経済的、社会的、人材育成等）がある場合に記載

本プロジェクトにおける新製造プロセスは他の構造材用アルミニウム合金にも容易に適用が可能であり、金属間化合物の微細分断化による特性向上等により、不純物を多く含むリサイクル材の利用など CO2 の削減、地球規模での資源の有効利用が可能となる。

また本合金開発において重要な析出強化メカニズム、破壊靱性、疲労特性、応力腐食割れ性や一般耐食性等は、各種構造材用アルミニウム合金には非常に重要な特性であり、本プロジェクトで得られる知見は社会的な効果や人材育成の観点からも波及効果は非常に大きい。

[テーマ番号 2 1] 複層アルミ合金の開発 (2014 年度～2018 年度)

[テーマ番号 0 2] 残留  $\gamma$  相制御中高炭素鋼板の異種・同種材料接合技術の開発のうち

⑫複層アルミの合金設計、組織解析・制御技術の開発  
および

⑬ヘテロ界面微細組織解析技術の構築  
(2019 年度～2020 年度)

### (1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し

アルミ化が進んでいる自動車のパネル材に対して、骨格部材では、アルミニウムの適用が遅れている。その一因として、鋼板に比べて強度と伸びのバランスに劣ることが、ボディ骨格の部材設計に大きな制約を生じさせ、設計、加工でのコストアップにつながるとともに軽量化効果も不十分なものとなるためである。従って、従来の鋼板に匹敵する、部材レベルの強度と延性をアルミニウムに具備できれば、骨格部材へのアルミニウムの適用が可能となる。本開発はこのような自動車軽量化促進に向けた道筋を想定しており、潜在ユーザーにも技術 PR しながらユーザーの求める部材を対象にしたアルミニウム素材の創出に繋げることによって実用化を図る。

自動車へのアルミ板材の適用は、海外では欧州、北米が先行しており、アジア地域でも中国市場の増大により、着実に需要が増大することが見込まれている。国内に関しても、海外よりは遅れているものの、今後着実に増大し、市場としては拡大すると予想される。

### (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

想定部材に求められる特性の向上についての取り組みを行う。本開発材の適用の課題は、異材接合技術である。この課題に関しては、テーマ 02 で開発した異材接合技術を活用することで解決できると考えられる。また、スケールアップのための製造技術開発の取組を検討することで実用化を加速できるようにする。

### (3)波及効果

本プロジェクトの開発材は、自動車以外の輸送機や部品類に幅広く活用することが可能であり、他分野におけるアルミニウム合金の適用とそれによる軽量化効果の拡大につながるものである。

[テーマ番号 2 2] 残留  $\gamma$  高度制御革新鋼板の開発 (2014 年度～2018 年度)

[テーマ番号 0 2] 残留  $\gamma$  相制御中高炭素鋼板の異種・同種材料接合技術の開発のうち

⑨接合性に優れる残留  $\gamma$  高度制御革新鋼板の開発  
および

## ⑩残留 $\gamma$ 高度制御のための指導原理の導出 (2019 年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

ユーザに対して、ここで得られた革新鋼板に関する知見を提示すると共に、場合によってはサンプルを提示してユーザが革新鋼板に求める項目を抽出し、その課題を解決する技術開発を行う。

市場動向としては、アメリカの Ducker Worldwide 社が示した自動車用材料の動向予測によると、2016 年に 200 万トン/年の超高強度鋼板の需要が 2025 年には倍増しているとされており、市場については着実に拡大する。国内でも同等と考えられており、国内市場だけでも 30 万トン以上の市場になると予想され、大きな経済効果が見込まれる。

また、CFRP、アルミが競合技術となるが、車体骨格については、しばらく超高強度鋼が主体であり続けることが考えられる。特にここで進めている中高炭素革新鋼板は成分コストの増分がほとんどないため、コスト競争力に優れると考えられる。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

1.5GPa 級革新鋼板に関しては、ユーザとの議論を通じて、材料開発の方向性を修正しながら、周囲技術の開発も並行して進めていながら、ユーザへの PR を進めて採用につなげていく。

革新鋼板の活用の最も大きな課題は接合である。こちらについては、テーマ 02 で本テーマで開発した革新鋼板の接合技術を開発しており、そこで得られた技術を活用することで解決できる。また、協調領域であるテーマ 46 で FSW 技術の開発を進めることで、革新鋼板の接合技術を担保できるようにする。もう一つは水素脆化であり、テーマ 61 で開発した腐食挙動解明およびテーマ 62 で開発した水素脆化挙動評価技術を活用して、革新鋼板適用時の信頼性を担保できる技術を構築し、実用化を加速できるようにする。

ユーザのニーズについては確実にあることが各種情報ソースから入手できており、開発を着実に進めることが重要となる。これまでに、様々な技術者と議論を進めてきており、そこでは革新鋼板を適用することが有効と思われる対象が抽出できつつある。

### (3) 波及効果

革新鋼板の適用のためには、材料設計技術だけでなく、接合技術、成形技術、構造解析技術、水素脆化の評価解析技術や、製鉄所内での加熱、圧延、熱処理技術の高度化も求められる。この検討を進めることで全ての技術領域でのレベルアップを図ることができると共に、そこに関わる技術者の育成という観点でも広がりが期待される。

[テーマ番号 46] 摩擦接合共通基盤研究  
(2016 年度～2022 年度)



### **(1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

中高炭素革新鋼板については、通常の溶融溶接では継手特性の確保が極めて困難であり、そこに対して本テーマにて FSW の継手特性に対する優位性を提示することで、自動車メーカーや部品メーカーにおける実用化の促進を図る。

本テーマで開発する接合技術については、テーマ 22 で開発した革新鋼板をユーザーに販売する際にユーザソリューションの 1 つの技術として提供するものになる。

接合技術の技術提案については、革新鋼板の提案に合わせて実施することとなる。本テーマでの FSW 技術開発が完成する 2023 年以降、技術提案を行い、実用化に向けた課題抽出と個別の技術開発を進める。

### **(2)実用化・事業化に向けた具体的取組**

FSW の実用化については、継手強度というメリットはあるものの、設備の導入コスト、接合にかかる消耗品（ツール）に起因するランニングコスト等の課題がある。その対応策について 2023 年度以降検討していく。

革新鋼板に対するユーザニーズは顕在化しつつあり、その鋼板を用いた部品を組み立てていくための FSW 技術は一つのソリューションとなる。そのため、革新鋼板の販売が成り立てば、実用化の可能性は高まると考えている。

革新鋼板の接合技術として競合するものは、接着ならびに機械接合となる。これらに対して、各観点から得失を整理して適切な接合技術を選択することが必須となる。

### **(3)波及効果**

ここで開発した接合技術を活用することができれば、革新鋼板だけでなく一般鋼材の接合についても容易となるため、生産性の向上が期待される。

[テーマ番号 4 4] 中性子線による構造材料解析技術の Feasibility Study  
(2015 年度～2016 年度)

[テーマ番号 5 2] 中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発  
(2017 年度～2022 年度)

### **(1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

本研究開発にて弊社が担当する中性子の金属組織解析技術について、自社の革新鋼板等の新商品の創出のために、中性子解析技術のユーザーとして活用を検討する。その成果について対外的に広めることで、研究開発の成果である中性子解析技術の活用を広げる。また、自動車のマルチマテリアル化にとって不可欠な接合技術である接着接合技術のミクロ、およびナノレベルの構造解析手法を確立し、その強度発現や強度低下のメカニズムを明らかにすることにより、信頼性のある接着接合技術確立のための知見を創出し、接着接合技術の普及につなげることで、自動車車体マルチマテリア

ル化技術の発展に貢献する。

本テーマで創出した解析技術の活用により ISMA プロジェクトの中の別テーマで開発した革新鋼板等の新規材料の高度化ならびに実用化に貢献することで本解析技術の経済効果を発現させる。米国調査機関の報告によれば、自動車軽量化のために車体のマルチマテリアル化が進み、それに伴い車体組み立てに使用する接合技術の割合が現在主流である抵抗スポット溶接（RSW）から、接着接合技術へと急速にシフトし、2030年頃には両者の割合が逆転すると予想されている（※S, Brett et al. 2017. Technology Roadmaps, Center for Automotive Research, Ann Arbor, MI）。そのため軽量化を目指す自動車産業にとって接着接合技術は必要不可欠な接合技術であり、本テーマで創出した接着接合部の状態解析技術、およびその知見を公開し、自動車業界における接着接合技術の活用を促すことで、国内自動車産業の国際競争力を強化し、本研究プロジェクトの経済効果を発現させる。

本技術開発においては、中性子線を活用した評価技術に対して有力なユーザーとなる鉄鋼3社が各々有効と考える評価技術開発に取り組むことで、幅広いバリエーションの最先端の評価技術をメニューとして有することができる。これにより、鉄鋼メーカーだけでなく、その他の素材メーカーにとっても各社が必要とする有効な技術を選定できる状況になり、中性子評価の活用が広がることが期待される。また、鉄鋼メーカー自身にとっても様々な新規鉄鋼材料に有効な技術群を活用できるようになり、新規材料の創出が加速される。このように有効な技術パッケージが創出できるので事業的に成功すると考えられる。さらに、カーボンニュートラルに向けて今後電気自動車の普及が進むと予想されており、欧米では自動車の軽量化、およびバッテリーパックの設計において、接着接合は必須技術と位置付けられていることから、今後自動車市場における接着接合ニーズはますます高まると予想される。当社においては接着接合技術を活用した部品試作や構造提案などを積極的に行い、自動車構造や電池パックなど、今後軽量化や電動化に向けて接着接合が多用されると期待される技術提案を行う。

接着接合界面におけるミクロ～ナノレベルの物理的・化学的な状態解析に関する研究は散発的なものが多く、これまで系統的な研究が実施されてこなかった。そのような状況下近年接着界面のメカニズム理解に関する産業界の期待の高まりから、接着現象を理解するための研究プロジェクトがいくつか立ち上がっている状況にある。本テーマはその先駆けたるものであり、研究テーマで得られた成果を速やかに公開することで、他研究プロジェクトが本テーマの知見を理解の一助とし、研究開発が促進される相乗効果が期待できる。

また、海外においても接着接合の研究プロジェクトはいくつか行われているが、接着剤の機械特性の理解に特化したものが主体であり、本テーマのように接着メカニズムの基礎理解を主体としたものは少ない。そのため現状では「接着剤の使いこなし」で先行する海外に対し、本テーマは「接着の基礎理解」を促すことで、より優れた接着界面の強度保証技術の開発につながる効果が期待できる。

## (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

プロジェクト完了後も、これまで確立した、ブラッグエッジスペクトルおよび回折

プロファイル形状を用いたオーステナイト中の炭素濃度分布解析技術も含めた、中性子による金属組織解析技術について北海道大学をはじめとした研究機関と連携し、技術レベルアップを図り、神戸製鋼所でも本技術の活用による材料開発を実現する。

また、接着接合界面におけるマイクロ～ナノレベルの物理的・化学的な状態解析を行うためには、接着剤および被着材それぞれの成分が明確である必要があるため、接着剤、並びに被着材の金属素材を標準化する必要がある。そこで接着剤についてはテーマ 53「構造材料用接着技術の開発」と連携し、同テーマにて使用している化学組成・機械特性が自明の標準接着剤を使用する。また被着材の金属素材は JIS 規格に則った市販のアルミニウム合金に、一般的な接着前処理である脱脂・酸洗処理を行った状態のものを標準材、前処理を行っていないものを接着不良材として用いる。分析技術は主に中性子イメージング法を用い、標準材と接着不良材とで接着接合部における接着状態や、接合部への水の侵入状態の差異を調査する。またそれらの強度試験の結果から、接着性に影響を及ぼす因子を明らかにする。また、接着接合界面のナノ構造を詳細に解析するために、分解能の高い X 線を用いた分析手法を中性子と併用し、それぞれの分析のメリット・デメリットを補完することで、信頼性の高い情報を得る。分析の遂行に当たっては、各分析手法に適した分析サンプルの性状、分析条件の調整が必要となるため、テーマ内の各機関（中性子：理化学研究所・物質材料研究機構・産業技術総合研究所、X 線：日産アーク・北海道大学）と連携して精度の高い分析を行い、それぞれの分析から得られた結果を総合し、信頼性の高い考察を行う。

### (3)波及効果

本研究開発で創出した評価技術については、各種素材メーカーから中性子評価装置群（北海道大学、理化学研究所、J-PARC 等）への分析解析の受託業務にて活用される。また、神戸製鋼所も本技術を活用することで新鋼種開発の創出を想定している。また、本研究テーマでは、中性子のみならず X 線やその他多彩な分析技術を併用し、接着界面の分析を行い、各分析手法で同一の標準試料を分析するため、得られた結果を相補的に解析することができる。その結果ユーザーが各種分析方法を併用して利用するようになり、幅広い分析技術が利用される相乗効果が期待できる。また、接着接合は自動車産業のみならず、建築や電子機器などあらゆる製品に適用できる接合技術であるため、本テーマを通じて優れた接着接合保証技術が開発されることによる、将来的な日本国内産業全体への波及効果は極めて大きいと期待できる。

〔テーマ番号 4 7〕 異相界面腐食解析の基盤技術開発（FS 研究）（2017 年度）

〔テーマ番号 6 1〕 超高強度鋼板の腐食挙動解析技術の開発

（2018 年度～2020 年度）

### (1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し

超高強度鋼板鋼板の腐食については、その腐食特性を評価するのは困難であり、そこに対して本テーマにて超高強度鋼板の腐食およびその挙動解析技術に対する優位性

を提示することで、自動車メーカーや部品メーカーにおける実用化の促進を図る。

本テーマで開発する腐食挙動解析技術については、テーマ 22 で開発した革新鋼板をユーザに販売する際にユーザソリューションの 1 つの技術として提供するものになる。

腐食挙動解析技術提案については、革新鋼板の提案に合わせて実施することとなる。今後、実用化に向けた課題抽出と個別の技術開発を進める。

## **(2)実用化・事業化に向けた具体的取組**

腐食挙動解析技術実用化については、設備の導入や維持費などの費用等の課題がある。その対応策について 2023 年度以降検討していく。

革新鋼板に対するユーザニーズは顕在化しつつあり、テーマ 62 の水素脆化挙動評価技術も活用して、革新鋼板適用時の信頼性を担保できる技術を構築し、実用化を加速できるようにする。

## **(3)波及効果**

ここで開発した評価技術を活用することができれば、革新鋼板だけでなく一般鋼材のについても活用が広がり、技術力向上が期待される。

**[テーマ番号 4 8] 超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発 (FS 研究) (2017 年度)**

**[テーマ番号 6 2] 超高強度薄鋼板の水素脆化挙動評価技術の開発 (2018 年度～2020 年度)**

## **(1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

超高強度鋼板の水素脆化については、その水素挙動を評価するのは困難であり、そこに対して本テーマにて超高強度鋼板の水素およびその挙動評価技術に対する優位性を提示することで、自動車メーカーや部品メーカーにおける実用化の促進を図る。

本テーマで開発する水素脆化挙動評価技術については、テーマ 22 で開発する革新鋼板をユーザに販売する際にユーザソリューションの 1 つの技術として提供するものになる。

水素脆化挙動評価技術提案については、革新鋼板の提案に合わせて実施することとなる。今後、実用化に向けた課題抽出と個別の技術開発を進める。

## **(2)実用化・事業化に向けた具体的取組**

水素脆化挙動評価技術実用化については、設備の導入や維持費などの費用等の課題がある。その対応策について 2023 年度以降検討していく。

革新鋼板に対するユーザニーズは顕在化しつつあり、テーマ 61 の腐食挙動解析技術も活用して、革新鋼板適用時の信頼性を担保できる技術を構築し、実用化を加速できるようにする。

### (3)波及効果

ここで開発した評価技術を活用することができれば、革新鋼板だけでなく一般鋼材についても活用が広がり、技術力向上が期待される。

## [テーマ番号 5 5] マルチマテリアル接合技術の基盤研究 (FS 研究) (2018 年度)

### (1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し

実用的な異種材接合法は既に欧州自動車メーカーと接合装置メーカーが複数のプロセスを共同開発的アプローチで発明され、すでに普及段階に入っている。さらには米国や日本を含むアジア各国にその技術を輸出している状態にある。これに対して日本は競争力のある異材接合技術をほとんど発明できていないのが現状である。

神戸製鋼は、マルチマテリアル化の今後の主流となりうる超ハイテン鋼板とアルミ合金の板組に対応可能で、高い継手強度と信頼性が得られる異種材接合法がまだ確立されていないことに着眼し、発明活動を行った。その一つとしてリベット相当消耗材(エレメント)と MAG 溶接法を組み合わせた「アークエレメント法」を発明した。

当開発法は、ISMA 内において 2018～2019 年にかけて協調領域として実施されたテーマ「異材接合継手の性能比較」にエントリーした。結果としてせん断引張強度と十字引張強度が共に最も高い値を示し、その実力が客観的に証明された。本結果は溶接技術誌 2020 年 5 月号、溶接学会誌 2020 年第 89 巻第 3 号に ISMA 事務局から投稿発表されている。

量産技術については、エレメントの供給体制を確立済みであり、かつエレメントの送給機能、接合位置の画像検出による補正機能、アーク溶接といった機能を統合した世界初のロボットシステムを国内ロボットメーカーと既に共同開発、発表済みである。また、当開発法はハンディ施工法としても価値があり、既に国内自動車メーカーで異種材補修用接合技術として採用されている。

### (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

既に実用化に必要な基本的接合装置や消耗材は揃えており、事業化段階に入っている。国内での PR 活動は進めているが、コロナ禍において海外での PR 活動ができておらず、コロナ明けに精力的に進める予定である。現時点で輸出可能な事実上唯一の日本で発明された異種材高強度接合法として普及に努める。

### (3)波及効果

海外では異種材接合法の機構として機械的接合法や接着剤活用が主力に対し、日本国内では溶込み実質ゼロの溶接法での確立を目指す活動が強く、アプローチが対極的であるが、強度の方向性バランス、継手強度の絶対値の観点では、メカニカルな接合機構を取り入れる考え方が有利であることが証明された。神戸製鋼では新たな異種材

接合法の開発でも上記機構をベースに創案していく所存である。

また、自動化の取り組み段階では国内メーカー同士の連携体制が技術レベル、開発スピード、訴求力などの点で単独開発・展開よりも有利であったことから、同業種・異業種に関わらず、他社連携推進を働き掛けていく。

組織名：コニカミノルタ株式会社

[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2019 年度～2022 年度)

**(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

弊社が手掛ける X 線タルボ・ロー検査装置は物質による X 線の散乱や屈折を可視化でき、特に CFRP 等の軽元素で構成された複合材料においてその有効性が発揮される。新規検査装置の参入戦略として、まずは本プロジェクトのように、材料メーカー、成形加工メーカー、装置メーカー、自動車メーカー、アカデミアからなるコンソーシアムに弊社も参画することでユーザー課題を幅広く理解するとともに、要求に適した装置の作りこみを行い、自動車向け CFRP 材料分野における我々の検査装置の有効性の実証を行ってきた。当取り組みの中で学術的アプローチを要するところは名古屋大学と連携して検討。一例としては測定結果と物性発現のメカニズムとを結び付ける小角散乱画像の信号値シミュレーションについて検討を行い、日本複合材料学会誌への論文投稿など実績を残すことができている（論文賞を受賞）。

目指す市場動向としては、熱可塑性と熱硬化性を合わせた自動車用途 CFRP は 2025 年頃には利用技術が向上し、量産モデルへの採用増加が予想されている。それに伴い 2026 年度のものづくり向け非破壊検査機器世界市場も自動車分野が高シェアをキープし、CFRTP の伸びとともに当検査の需要も増加すると考えている。

LFT-D 工法では強化繊維・樹脂の様々な要因が相互に影響して繊維性状や物性に場所による分布やバラツキが生じることが知られている。本格適用に向けては成形材の繊維量分布や配向特性の広範囲な特性把握が望まれているが、弊社装置はその要望に応えることが可能であり、実用化が可能と考えている。

なお競合技術としては、不連続繊維強化 CFRP の繊維分布、配向を評価するには既存技術として熱伝導の異方性評価を用いる方法、X 線 CT を用いる方法等があるが、一度に測定できる範囲と検査時間の点において X 線タルボ・ローを用いる方法が性能・コストの両面において優位と考えている。特に繊維配向解析において、従来の X 線 CT に対して 100 倍以上の大面積を短時間で評価可能であることを示すことができている。

**(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組**

X 線タルボ・ロー検査装置のプロトタイプ機を開発し、本プロジェクトを通して LFT-D 材の非破壊検査で求められる性能を確認。それに答えられる評価装置や解析手法の開発を進めてきた。

具体的には X 線タルボ・ロー検査装置から出力される画像を基に、成形材の繊維量分布や配向特性の把握をするのに適した画像表示するビューを試作。また、LFT-D 工法においては大サイズのサンプルにて同様の画像を取得することが求められることから、画像のタイリング技術を開発した。

事業化に向けた動きとして 2019 年度には受託解析によるテストマーケティングを

開始しており、X 線タルボや弊社装置の特徴を評価する声をいただいている。また NCC 活動成果を横展開できるよう、中京圏、関西圏の顧客からもアクセスしやすい場所である弊社高槻サイトにもプロトタイプ機を設置、撮影要望に対応可能とした。さらに装置量産化の検討を推進している。

### **(3)波及効果**

従来 CFRP の繊維量分布や配向分布の可視化は一度に検査できる面積や所要時間の点から、狭い領域に限られており、流動解析などの CAE 結果との比較も難しいという課題があった。X 線タルボ・ロー検査装置によって、大面積でそれらの情報を可視化することによって、CAE の精度向上や開発工程の簡素化・省力化につながり、大幅な開発工数の低減につながると期待される。また開発した検査技術は自動車以外の CFRP や、さらにはガラス繊維も含めた繊維強化樹脂全般の非破壊検査への適用が期待される。



組織名：三協立山株式会社

- [テーマ番号 16] 易加工性マグネシウム材（押出材）の開発及び高強度マグネシウム材（厚板）作製の基礎的検討（2013年度～2017年度）
- [テーマ番号 34] 革新的マグネシウム材の開発および信頼性評価（2018年度）
- [テーマ番号 35] 革新的マグネシウム材の鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発（2019年度～2021年度）
- [テーマ番号 60] マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズインテグレーション（MI）活用技術の開発（2018年度～2022年度）

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

本プロジェクトにおける易加工性マグネシウム押出材の開発は、単に目標値を達成する材料開発を目的としたものではなく、開発当初より次世代高速車両構体用部材を実用化ターゲットとして明確に設定し、ユーザー側からの意見を常にフィードバックできる体制を構築して研究開発を遂行した。材料開発を目的としたプロジェクトにおいて、開発材に目標の達成が求められることは勿論だが、本開発テーマでは実用化に向けてターゲットを強く意識した工業レベルでのものづくり技術も並行して構築することを重要視した戦略を推進することができた。

本テーマでは実際の高速車両構体用押出部材の段階的な試作開発を通じて実用化への課題を早期に抽出・明確化し、開発材の実用化に向けて着実なステップアップを遂げることができた。事業化においてはターゲットとする市場規模や将来の成長性を見据えつつ、大規模な投資の判断が必須となるが、2019年度からは自動車用部材への実用化展開も視野に入れた開発を実施し、ターゲット市場の拡大を狙った研究開発も推進した。上述の戦略に加え、本開発テーマでは名古屋守山分室が推進する開発材の標準化や、テーマ 60 で実施するデータベース蓄積と密に連携し、構造材としての信頼性に裏付けられた押出材の作製に取り組むことも同時に推進することができた。

実用金属中最軽量であるマグネシウム合金は、各種輸送機器のエネルギー効率の向上や CO<sub>2</sub> 排出量の抑止に直結する金属材料として環境負荷の低減に寄与できるものの、いまだ需要がわずかである。しかしながら、本開発テーマの遂行によって得た成果により、加工性に優れた押出材の安定した提供が実現できれば押出材の低コスト化に繋がり、さらには本開発テーマでターゲットとする高速車両構体用部材や自動車構造部材への適用が実現できれば、マグネシウム押出材の市場規模の飛躍的な成長が見込まれる。無論、本成果はその他輸送機器の構造用部材をはじめとした軽量化が要望されるあらゆる分野への適用の拡大に貢献できると予測する。マグネシウム合金は難加工材ではあるが、本開発テーマによる高度な加工技術の蓄積が相乗効果として我が国のものづくり基幹産業の更なる活性化にも繋がることも予想されることより、国内経済にも好影響を及ぼす効果も大いに期待できると考える。

競合技術に対する優位性について、本開発テーマで実用化のターゲットとした高速車両構体用構造部材には現在、アルミニウム合金展伸材が採用されている。アルミニ

ウム合金展伸材を使った車両構体のさらなる軽量化には既に限界が来ており、大幅な軽量化が期待できるマグネシウム合金展伸材への置換は大いに優位性があり、ユーザーニーズも高い。一方、マグネシウム合金展伸材はアルミニウム合金のそれと比べると現状は高価であるが、本開発テーマで開発中の高速押出加工プロセスを量産化技術に落とし込むことができれば、部材レベルでも十分コスト競争力が生まれる可能性がある。また、車両の走行や路線のメンテナンス等の運用まで含めたトータルコストの観点からも、軽量化によるメリットが創出される。また、本テーマで開発した易加工性難燃性マグネシウム合金は高価なレアアースを添加しない汎用マグネシウム合金であり、市場に受け入れ易いことから、レアアースを添加した他のマグネシウム合金に比べてコスト面やリサイクル面でも大きな優位性があると言える。

一方、同じ次世代材料として CFRP も競合材料として想定されるが、車両構体への適用に際しては定期的な補修に対応できることも材料の重要な選定条件となっている。このことから、補修に必要な接合技術や補修に伴う製品性能の確保の観点でも、金属材料に優位性があると考ええる。以上より、プロジェクト開発合金の工業化・量産化が実現できれば、CFRP に対して十分に競争できるコストレベルにあることから、優位性は大きいあると考える。

量産技術の確立に向けては、本開発テーマで得られた実機レベルでの各種製造プロセス技術をさらに高度化することは勿論のこと、各プロセスの最適化条件の把握、確立のみならず、部材性能や品質の低下を招く製造プロセス条件データを取得、蓄積することも量産技術の確立には極めて有意と考える。取得した製造データはテーマ 60 で確立した MI システムへの取り込みを継続的に推進することで、新たな部材の設計や量産条件の効率的な導出に繋がるものと考ええる。また、部材製造時に発生する各種スクラップ材について、当社では既にインハウスリサイクル技術の構築を進めているが、需要拡大に伴って今後想定される市中スクラップ材のリサイクル技術についても、関連業者と連携しながら先行して開発を進めていく所存である。

## (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

易加工性マグネシウム合金押出部材の開発では、開発材による実際の車両構体用部材を想定した試作開発を積極的に推進した。車両設計に長けた車両メーカーとの密な連携により、開発材の特性を活かした車両設計と部材設計を実施し、2017 年度にはモックアップモデル構体（1/1 サイズ、長さ 1m）の作製、2018～2020 年度にはマグネシウム製高速車両構体の実用化に必須となる、気密疲労試験を実施可能なモックアップ構体（1/1 サイズ、長さ 5m）に使用する各種大型押出部材の作製を完遂し、当該モックアップ構体による気密疲労試験を実施、構体用部材としての設計の妥当性と実用化への課題を明確化することによって、開発材の高速車両用構造材としての実用化の実現に向けて着実に前進してきた。

一方、本開発テーマで得た開発材の高速車両構体用部材への採用実現には、高速車両としてのまだ数多くの評価や試験がある。そのため、営業車での操業運転の開始に至るまでの期間はプロジェクト終了後、少なくとも 10 年が必要と想定している。それゆえ、当分室では開発材の車両構体そのものへの実用化よりも可能な限り早期に実

用化実績と信頼性を得るべく、2021年度には開発合金押出材を使用した高速車両内装材（客室床部材）の試作開発を推進し、東日本旅客鉄道株式会社（JR 東日本）と連携して次世代新幹線高速試験車両（ALFA-X）に適用して実際の運用環境での性能試験を完遂した。本試験により、開発合金部材を適用することで客室床部材としての所望の性能を維持しつつ、20%以上の軽量化を達成できることを実証している。この先行開発が実を結べば、世界初のマグネシウム製高速車両構造体の実用化が実現できることより、国内関連市場に対するインパクトは勿論のこと、国外に対しても大きなアピールに繋がるものと確信する。

これらの早期実用化に向けた先行開発は、大きな設備投資をすることなく既存実働機を活用して進めることが可能である。押出材メーカーとして安価で高品質の材料を安定して供給するだけにとどまらず、関係機関との連携を密にしながら、接合や表面処理（耐食性確保）といった後工程での課題も十分考慮しながら開発を推進する。また、事業化に向けては、輸送機器分野にこだわらず新規開拓と用途開発に資する情報を広く得るべく、前述の先行開発実績を含めて学会発表、メディアやホームページ等の媒体や営業部門を通じて積極的な情報発信を行い、市場の創出と育成・拡大を積極的に推進する。

### (3)波及効果

世界に先駆けて難加工材料である難燃性マグネシウム合金の押出加工プロセス・組織制御技術を工業的に展開することで技術力の向上と低価格化を達成し、高速車両構体用部材や自動車構造部材として実用化を実現できれば、これまでに採用実績がほとんど無く、市場も形成されていないマグネシウム業界の大きな活性化に繋がると確信する。また、波及効果として輸送機器分野のみならず、建材分野やインフラ分野、福祉機器分野等への適用拡大も十分見据えることも可能と考える。輸送部門におけるマグネシウム合金展伸材の適用によるエネルギー効率の向上と輸送能力の向上、及び環境への配慮は、持続可能を目指す社会に対して大きなインパクトと波及効果を生み出すことができると期待する。

本開発テーマに従事し、ユーザーニーズに直結したものづくりを強く意識するとともに、学会等での積極的な成果アピールを推進することができた。このことは社内は勿論、国内における研究レベルの底上げと技術者の人材育成にも大いに貢献できると考える。

組織名：シーカ・ハマタイト株式会社

[テーマ番号 5 3] 構造材料用接着技術の開発（2017 年度～2022 年度）

**(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

車両のマルチマテリアル化を推し進めるためには、異種材料の接合が必要となる。そのなかで接着は有望な手法の1つである。弊社は、自動車用途での接着剤の市場展開に長年の実績があり、近年においても自動車用樹脂製モジュール製造用途等で異材接合に関わる新たな接着剤市場を開拓してきている。我々は、主に CFRP や CFRTF を被着体とする異材接合のための接着剤を開発・研究してきた。本接着剤の適用は、車両製造における従来の構造用接着剤の適用が、電着時や塗装時で必要とする「熱」を利用している点と比較すると、より低温度＝低エネルギーでの接着工程の成立を実現できるという点で画期的であるが、車両製造工程の大幅な見直しを伴うため、現時点では具体的ニーズの発掘や市場規模の算定までには至っていない。その一方で、我々が長年培ってきたウレタン系接着剤に関わる技術を基に本接着剤は開発されているため、ニーズさえあれば自社にて量産化可能な体制は整っている。

**(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組**

実用化に向けてはまずニーズを明確にすることが必要であるが、現状ではまだそれは叶っていない。現在は、CASE（Connected、Autonomous/Automated、Shared、Electric）潮流や CN（Carbon Neutral）潮流に伴った車両製造の大変革期であるので、実用化の機会を伺いたい。

**(3) 波及効果**

実用化に向けては、開発した接着剤の紹介のみを行うのではなく、車両製造ラインにおける新たな接着工程について、網羅的且つ具体的な提案を行える能力も我々には求められていると自覚している。その点において、接合信頼性＝接着信頼性の実証は、極めて重要であると考えるが、我々は、接着剤開発と同時に、接着界面研究と接合性能解析研究を独自に実施してきている。これら技術は、接着剤を取り巻く周辺技術領域への波及効果を期待できる。

組織名：JFE スチール株式会社

- [テーマ番号 2 4] 炭素活用による革新的加工性を有する超高強度鋼板の開発  
(2013 年度～2017 年度)
- [テーマ番号 2 6] 複層鋼板の界面構造解析と特性調査 (2013 年度～2015 年度)
- [テーマ番号 4 4] 中性子線による構造材料解析技術の Feasibility Study  
(2015 年度～2016 年度)
- [テーマ番号 4 7] 異相界面腐食解析の基盤技術開発 (FS 研究) (2017 年度)
- [テーマ番号 4 8] 超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発 (FS 研究) (2017 年度)
- [テーマ番号 5 2] 中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発  
(2017 年度～2022 年度)
- [テーマ番号 6 1] 超高強度鋼板の腐食挙動解析技術の開発  
(2018 年度～2020 年度)
- [テーマ番号 6 2] 超高強度薄鋼板の水素脆化挙動評価技術の開発  
(2018 年度～2020 年度)
- [テーマ番号 6 5] マルチマテリアル車体における防食表面処理評価技術の開発  
(2022 年度)

#### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

自動車需要は、今後もアジアなど新興国中心に伸び代が大きく、2015 年の約 0.9 億台から 2040 年には 1.1～1.3 億台に拡大することが予測されている。自動車用超高強度鋼板は安価でかつ軽量化・安全性向上効果が大きいことから爆発的に需要が拡大することが予想され、経済効果は大きい。衝突安全規制の強化などにより自動車重量は増加するにも関わらず、燃費規制は厳格化するため自動車車体のさらなる軽量化が求められ、軽量化に効果がある自動車用高強度鋼板の需要が大幅に拡大することが予想される。これは電動車においても変わらず、大容量バッテリー搭載により自動車重量が増加する中、航続距離の増加のために、車体の軽量化は必須であり、軽量化に寄与する高強度鋼板のさらなる需要増加が予想される。

レアメタルを多量に含まない超高強度鋼板の開発により、非鉄・非金属材料に対する製造コスト、リサイクル性の圧倒的な優位性を維持したまま、弱点である比強度が大幅に改善され、非鉄・非金属材料並みの軽量化素材となる可能性がある。

中間目標である引張強度 1.2GPa-伸び 15%を有する高強度鋼板の開発は、1 年間前倒しで開発が完了した。最終目標である 1.5GPa-20%を有する高強度鋼板の開発は、5 年間前倒しとなる 2017 年度末 (前半 5 年) に実験室レベルで完了した。単層鋼板では最終目標を達成できない場合に備えて、複層鋼板の FS 研究も実施し、硬い鋼と軟らかい鋼の複層化による大幅な延性改善が確認され、2015 年度末に FS 研究を完了した。2017 年度からは水素脆化や腐食など高強度鋼板の実用化における課題に各企業が協調して FS 研究として取り組み、2018 年度から 2020 年度にかけて本研究を実施し

た。水素脆化等の基礎的な現象を明らかにするため、中性子等量子ビームを用いた構造材料の解析について 2015 年度から FS 研究を、2017 年度から本研究を実施した。さらに、自動車車体がマルチマテリアル構造になると予想されることから、異種材料が接触する場合の防食表面処理評価技術についても 2022 年度から取り組んだ。

上記に加え、独自に溶接性などの実用特性や連続鋳造性、熱間圧延性等の実製造性の検討を進め、2028 年度を目標に、自動車メーカーのニーズに適合する 1.5GPa 級高延性超高強度鋼板の事業化を目指す。

### **(2)実用化・事業化に向けた具体的取組**

開発鋼のプレス成形性や溶接性など実用特性を評価し、得られた結果をフィードバックし、自動車メーカーのニーズに適合する 1.5GPa 級高延性超高強度鋼板開発に展開する。1.5GPa 級鋼の実用化における課題である遅れ破壊、腐食については、協調テーマにおいて得られた知見をフィードバックし、鋼板開発に展開する。また、連続鋳造性、熱間圧延性等の実製造性の検討を進め、事業化の準備を進める。

### **(3)波及効果**

自動車の燃費向上によりエネルギー消費量と CO<sub>2</sub> 排出量が大幅に削減され、鋼板全体で、プロジェクト全体の 2030 年における CO<sub>2</sub> 削減期待効果のおよそ 3 割に相当する CO<sub>2</sub> 削減への寄与が期待される。また、自動車の安全性(耐衝突性)・走行性能の向上により、社会の安心・安全向上に寄与する。本テーマでは、基礎研究について大学への再委託を行っているが、最先端の研究を通じて材料工学分野の人材育成に貢献している。

[テーマ番号 0 4] 中高炭素鋼板の PHM による実用 FSW 技術の開発  
(2013 年度～2017 年度)

[テーマ番号 3 3] 革新的 FSW による超ハイテン接合部材の開発  
(2018 年度～2021 年度)

[テーマ番号 4 6] 摩擦接合共通基盤研究 (2016 年度～2022 年度)

## (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

自動車需要は、今後もアジアなど新興国中心に伸び代が大きく、2015 年の約 0.9 億台から 2040 年には 1.1～1.3 億台に拡大することが予測されている。一方、CO<sub>2</sub> 排出規制への対応のため、車体重量を大幅に削減する必要があり、そのための有力な方策として、自動車車体のマルチマテリアル化が検討されている。自動車車体のマルチマテリアル化では、適材適所に材料選択が施行され、側突部位などには超ハイテンによる接合部材の適用が期待されている。

こうした予測の中、従来のハイテンの強度と伸びを更に上回る超ハイテンは、安価でかつ軽量化および安全性向上効果の大きい素材と考えられるが、従来の溶接技術の適用のみでは十分な接合施工性および継手強度を得ることが困難である。したがって、この超ハイテンに対して接合施工性および継手強度を十分確保可能な新接合技術の開発は必須であり、超ハイテンの爆発的な需要拡大に大きく寄与すると期待されその経済効果も大きい。

第 1、2 期 (2013～2017 年度) においては、中高炭素鋼板を実用的な施工能率で接合可能な FSW プロセスの基礎技術を開発し、中間目標である引張強度 1.2GPa 鋼板の接合において継手強度が母材の 70%以上を達成した。第 3、4 期 (2018～2021 年度) においては、基礎開発に成功した FSW 技術により接合した 1.5GPa 超ハイテンのテラード・ブランク (TWB) 部材をプレス成形し、フルスケール B ピラー部材の試作に成功し最終目標を達成した。また、新構造材料技術研究組合本部、大阪大学、日本製鉄、神戸製鋼所と協力し、FSW による中高炭素鋼継手の組織、材料特性に関して調査し、最終目標を達成した。

従来の FSW による超ハイテン接合は、接合速度 0.4m/min が上限であるのに対し、開発 FSW では、予熱無しでは 3.0m/min、予熱ありでは 6.0m/min まで向上し、現行の TWB 溶接技術であるレーザ溶接並みとすることができた。開発 FSW による継手はレーザ溶接と同等の強度、加工性を示す一方、レーザ溶接と比較して接合中に鋼板に侵入する拡散性水素が顕著に低減することが確認され、レーザ溶接による超ハイテン溶接の将来課題と想定される耐水素割れ性において優位と考えられる。

量産技術の確立においては、ツールの長寿命化及び長距離接合での接合品質確保が主な課題であり、ツール材質、形状の最適化の検討の継続が必要である。

## (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

開発 FSW 技術の実用化には量産において高い施工能率を実現する設備構成と、接

合ツールの耐久性・寿命の向上が必要である。事業化には本技術の導入によるコストに見合う需要と付加価値の向上の見極めが課題となる。これらを解決するためには自動車、設備、材料に関連するメーカーの連携が必要であり、この枠組みを通じて車体マルチマテリアル化が進む中、超ハイテンを適材適所に活用するための重要技術として社会実装を志向する。

### **(3) 波及効果**

開発する新接合技術が自動車製造への超ハイテンの適用を促進することで、自動車の燃費向上によりエネルギー消費量と CO<sub>2</sub> 排出量が大幅に削減され、鋼板全体で、プロジェクト全体の 2030 年における CO<sub>2</sub> 削減期待効果のおよそ 3 割に相当する CO<sub>2</sub> 削減への寄与が期待される。加えて、自動車の安全性(耐衝突性)・走行性能の向上により、社会の安心・安全向上にも寄与すると考えられる。本テーマにより、新構造材料技術研究組合が進める大阪大学接合科学研究所の接合研究拠点化に協力し、最先端の研究を通じて接合科学分野の人材育成に貢献している。



組織名：株式会社島津製作所

[テーマ番号 27] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2018 年度～2022 年度)

[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発  
(2013 年度～2017 年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

当社は国内規模としては最大の分析計測機器の製造メーカーであり、本研究で対象となる評価機器の主たる基盤技術となる物性評価機器においても、国内首位（年間売上 100 億円超）のシェアを維持し、製品開発体制としても十分な体制を有している。本研究でのプロトタイプをもとに、汎用化・ユーザビリティ価値を同時並行開発し、またそれらを適宜知財権利化することによって順次の製品化を図る。

構造材料の CFRP 化は社会的必要性を前提に今後も進むと考えられ、将来的には現在の金属材料（主として鉄鋼）と同等の研究開発・生産設備の需要が見込まれる。その評価機器市場規模は日本国内のみでも 1000 億円を超えると見込まれ（鉄鋼市場規模等から推測）、開発品とともに試験機本体を合わせた事業とする。

開発品の性能面においては、試料調整からデータ出力までを一気通貫で、かつ信頼性の高い結果が得られるシステム製品が最大の差別化要素となる。コスト面では、本研究での成果を用いることにより開発・性能評価費用の低減、量産を視野に入れたコスト低減によって優位性を持たせることができる。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

本研究の中で学会等での発表を実施しているが、一部の製品についてはこの内容を、もとにセミナー発表や販売資料化を実施済である。今後、順次この作業を続けていき、具体的な引き合いの中で製品をさらにカスタマイズし、より汎用性の高いものを開発していく。

### (3) 波及効果

本研究への参加で最新の研究の場が与えられ、異なる技術を持つ多くの企業の研究者との交流ができたことは、若手技術者に非常に良い経験となった。また本研究の効果として、低炭素社会の実現に寄与することは言うまでもない。

組織名：スズキ株式会社

[テーマ番号 27] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2014 年度～2022 年度)

[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発  
(2014 年度～2017 年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

これまでは安全・快適装備の充実や車格の拡大などにより自動車の車重は増加の一途であったが、環境性能対応・ガソリン価格高騰により燃費改善の必要性が高まり、加えて運動性能向上も期待できることから、各社ともに 2008 年頃から大幅削減の目標値を掲げて車体軽量化の取組みを進めている。

今後も、更なる車体軽量化が求められる中、大量生産に適した工法を適用できる熱可塑性 CFRP に着目し、本プロジェクトで各種熱可塑性 CFRP の実力値を掴み、最適な適用部位・形態とその設計・生産技術を習得してきた。

しかし、CFRP の実用化においては、一部事業化されているがリサイクルの課題がある。今後適用を拡大していくためには、CFRP リサイクル技術の確立が必要不可欠となる。また、従来の CFRP に対しては本プロジェクトの熱可塑性 CFRP はコスト優位性があるが、実際には炭素繊維そのものを含む素材コストが他の非鉄軽量材料に対して競争力を持つまで安価ではない。より安価な炭素繊維の製造技術の開発に期待すると共に、更なる生産プロセスの最適化やリサイクル材の適用などにも取り組む必要がある。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

スズキは、「熱可塑性 CFRP の開発プロジェクト」を通じて、熱可塑性 CFRP の生産プロセスに関する基礎技術を獲得することで製品化へのステップを進めていく。

今後、リサイクル技術が確立され、素材価格の低減、生産プロセスの最適化等により、ハイテン材や他の非鉄軽量材料であるアルミ対するの費用対効果において競争力が得られれば、実用化は可能と考える。

### (3) 波及効果

本プロジェクトにおける熱可塑性 CFRP の自動車への適用技術開発の成果は、日本の自動車産業の軽量化技術の幅を広げ、世界的な競争力を高めることが出来ることに加え、波及効果として、既存の複合材料にも適用可能な設計・評価に関する技術を得られることなどが考えられる。

また本プロジェクトは、多くの競合他社や主要な材料メーカー等と一同に会して研究を行える非常に貴重且つ大変勉強になる場となっており、技術者としての幅を大きく広げることが出来る人材育成に最適な場となっている。

組織名：株式会社 SUBARU

[テーマ番号 27] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2014 年度～2022 年度)

(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

従来のガソリンエンジン車での燃費性能向上と EV 開発を目指し、構造の合理化、材料の見直し、機能統合で吸収する車体の軽量化を進める必要がある。車体の軽量化のためのマルチマテリアルの候補の一つである CFRP の適用において、高コストの解決手段として LFT-D の技術開発と部品の実用化を検討する。CF 材料を含めた製造コストの削減、強度/剛性の均一製造品質の確保が LFT-D の実用化課題であり、解決を検討する。

(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

本プロジェクトの LFT-D 製フロア部品の基本性能は把握し、現在炭素繊維複合材を用い、RTM成形した「カーボンルーフ」が一部の特装車に採用されているが、同等以上の品質と低コストを実現できる LFT-D 量産技術が確立できれば、ルーフだけではなく、他の部位の適用も拡大し、新たな付加価値の創出の可能性もある。

(3) 波及効果（技術的・経済的・社会的効果、人材育成等）

本プロジェクトの参画により、大学と他企業との共同研究開発が良い刺激となる。複合材に関する材料開発、評価、解析、設計と製造分野において、体系的な知識と関連データを得られることが考えられる。

[テーマ番号 65] マルチマテリアル車体における防食表面処理評価技術の開発のうち  
接着剤界面剥離に及ぼす表面処理効果の寄与解析  
(2021 年度～2022 年度)

(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

電動化を見据えた車体重量増への対応として、材料置換、構造合理化等により軽量化を進める必要がある。軽量化の手段として車体のマルチマテリアル化が進むに伴い、車体構造の連続化による剛性、振騒性能の向上手段として異種金属接合に構造用接着剤の適用が拡大している。構造用接着剤は長期信頼性を確保していくうえで、異種金属部や接着接合部の経時劣化を抑制する必要がある。そこで、接着強度の劣化挙動を調査するとともに、接着剤界面剥離に及ぼす表面処理効果の寄与を明らかにして指標を定義することで、市場での経時劣化の推定を可能にすることへ貢献するとともに、接着剤界面剥離に効果の高い表面処理の実用化を図る。

## (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

せん断引張（TSS）試験片を用いて、冷熱サイクル試験を実施して接着強度の劣化挙動を調査し、接着剤界面剥離に及ぼす表面処理効果の寄与を明らかにする。また、表面処理を施さない試験片についても調査を行い、強度出現メカニズムを検討する。想定する劣化要素は、1)水分や腐食の影響による界面接着強度の低下、2)熱負荷による材料表面の酸化膜の剥離、3)熱負荷時の異種材料の線膨張係数差による応力剥離の3つがある。1)、2)については、影響確認が進められている。そこで、3)について、アルミと鉄の線膨張差で発生する熱伸びの影響を明らかにするとともに、界面接着力の低下に寄与する表面処理効果を区分して評価することで実用化を図る。

## (3)波及効果

接着接合部における市場での経時劣化を推定することへ貢献するとともに、接着剤界面剥離に効果の高い表面処理の実用化を図る。本開発技術を適用することにより、接着接合部における適正な劣化抑制仕様の選定が可能となることが期待できる。また、本テーマ内での連携活動をきっかけとした共同研究等による人的交流や、技術者の専門性向上が期待できる。

## 〔テーマ番号65B〕マルチマテリアル車体におけるガルバニック腐食のシミュレーション技術の開発」（2021年度～2022年度）

### (1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し

BEV等を見据えた車体重量増への対応として、材料置換、構造合理化等により軽量化を進める必要がある。軽量化の手段として車体のマルチマテリアル化が挙げられるが、異種金属接触部でのガルバニック腐食対策が課題となる。従来ガルバニック腐食に対しては、実車耐久試験や、腐食促進試験結果により対策仕様を検討してきたが、試験期間の長期化、試験水準の物理的制約（設備等）の問題がある。一方、CASEに代表される100年に一度の大変革期といわれる昨今においては、激しい外部環境変化に対応できる開発体制の構築が必要である。ガルバニック腐食対策検討においても、多種多様な材料・表面処理からスピーディに対策仕様を検討・評価する必要があるため、本テーマで開発したシミュレーション技術を活用することで防錆仕様検討の効率化を図る。

### (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

本開発技術により得られたシミュレーション結果と、市場での腐食実態との整合性を確認する。その後、マルチマテリアル構造を有する車体板合せ部等の代表的な部位

へ適用し、実車耐久試験や、腐食促進試験とも併用しつつ徐々に適用部位を拡大していくことで実用化を図る。

### **(3)波及効果**

実車試験や腐食促進試験を用いた防錆仕様選定では、試験や供試材のばらつきを考慮し、安全率を乗じ防錆仕様を選定している。本開発技術を適用することにより、ばらつきを廃した適正な防錆仕様の選定が可能となることが期待できる。

また、本テーマ内での連携活動をきっかけとした共同研究等による人的交流や、技術者の専門性向上が期待できる。

組織名：住友重機械工業株式会社

[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発  
(2014 年度～2017 年度)

**(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

住友重機械では熱可塑性 CFRP の加工に関連する主な商品として射出成形機とプレス装置を保有する。射出成形機においては LFP(Long Fiber Pellet)に対応した装置の販売を行っている。プレス装置については本プロジェクトで東京大学内に構築した成形システムのプレス装置が貴重な経験と考えており、今後もプレス装置の CFRP 対応化を進めていく。また射出成形機とプレス装置の組合せも有力な技術と考えており、最適な加工プロセスを見極めた上で機種開発を実施していく。

CFRP 市場は順調に拡大し、自動車用途は成長の中心になると予想している。CFRP 製造装置市場においても小型部材成形用途では射出成形機が、大型部材成形用途ではプレス装置が拡大するものと考えている。ただし本格的な実用化は 2025 年以降に進むと予想しており、長い視点での戦略が必要である。

**(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組**

自動車用途の成形を考える上で、鍛造技術の革新は重要であり、研究所、事業部一体となって技術検討を行った。熱可塑性 CFRP の成形技術はそのテーマの一つである。本プロジェクトで得られる成果を元に事業化への展開を推進していく。

また鋼材をはじめとする金属材料の性能も向上し、ホットスタンピング等の成形技術も進歩していることから、金属と CFRP の組合せも視野に入れる必要があると考えている。

**(3) 波及効果**

本プロジェクトに参画する時点で、弊社では CFRP に関する研究開発はほとんど実施していなかったが、本プロジェクトをきっかけに CFRP に関する研究開発も行うようになった。機械部品への CFRP 適用による軽量化の検討も開始しており、弊社にとっては有意義な経験であった。

組織名：住友電気工業株式会社

[テーマ番号06] 中高炭素鋼／中高炭素鋼のフリクションスポット接合技術の開発（2013年度～2017年度）

(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

当社が80年以上培ってきた切削工具用超硬合金と30年以上培ってきたPVDコーティングの開発技術を活かし、実用的なツール性能、ツール寿命を有するフリクションスポット接合（以下、FSJ）ツールを開発する。FSJツールの超硬合金素材製造、成形加工、PVDコーティングのプロセスは、切削工具用のプロセスと基本的に同じであるため、事業化、量産化に向けて切削工具の量産技術を応用し量産技術の確立を図る。

2025年の自動車の世界総生産台数は、約1億台に達すると予測されている。衝突安全性の向上や軽量化による燃費、電費向上とそれに伴うCO<sub>2</sub>排出量削減のため、自動車ボディに占める引張強度1.0 GPa以上の超高張力鋼の比率は今後ますます増加する見込みであり、2025年において全鋼板中の20%を占めると予測されている。これらの予測に基づき、引張強度1.0 GPa以上の超高張力鋼を対象に既存の抵抗スポット溶接の20%がFSJに置き換わると仮定すると、ツールの市場として1,800億円/年が見込まれる。

また、本プロジェクトで得られた成果の一部を一般鋼板へ応用展開することで、さらなるFSJ適用量の増加が見込まれることや、今後自動車生産台数が増加すると予想される新興国への販売展開により、爆発的な市場拡大が期待される。

売上損益に関しては、目標を大きく上回るツール寿命10,000打点を達成できたため、当社が販売している超硬合金製切削工具と同等以上の損益が確保できる見通しである。

競合技術としては、現在鋼板接合用に市販もしくは開発されているFSJツールの素材にはPCBN（立方晶窒化硼素焼結体）、コバルト基合金、ニッケル基合金、レニウム合金等の高融点金属、窒化珪素がある。PCBNはツール寿命が長く数万打点と予測されるが、価格が約70万円と非常に高価なため、ツールコストは数十円/打点であり、また突発的な欠損で短寿命となる場合があるため信頼性の面で自動車の生産に使うには難があると思われる。高融点金属は耐酸化性が低いため、シールドガスが必要であるという課題があり、超硬合金+PVDコーティングに比べ耐摩耗性が低く、寿命は短いと予想される。レニウム合金はレアメタルを用いるためツール価格も非常に高価である。窒化珪素は現在市販されているツールは10万円と高価であり、成分の珪素が鋼と反応しやすいため、超硬合金+PVDコーティングに比べ耐摩耗性が低く、寿命は短いと予想される。本テーマで開発した超硬合金+PVDコーティングは、競合ツールに対し低い1打点あたりのツールコストが実現できる見込みであり、競合するツールに比べコスト面、性能面で優位である。

(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

FSJツールの販売形態としては、接合装置販売時の付属品としてのセット販売と、装置販売後の消耗品としての販売の2つの形態がある。接合装置、接合条件、接合

ツールは3つの要素が揃って性能を発揮するものであるため、接合装置の開発を担当した川崎重工業が主体となり、カーメーカーおよび部品メーカーへのプレゼン、接合テストを実施している。

鋼板のFSJはこれまで自動車製造で実用化していない新しい技術のため、FSJを自動車メーカーや部品メーカーで採用いただくには、FSJの製造ラインを新設するか、抵抗スポット溶接ロボットのガンをFSJに改造する必要があるため、フル・モデルチェンジや新車種の発売など、製造ラインの新設や改造のタイミングでの採用を目指して評価を進めている。

### (3) 波及効果

本テーマで開発したFSJツールは、既に自動車ボディに使用されている270 MPa級の軟鋼から1.2 GPa級超高張力鋼までの冷延鋼板、およびダイクエンチ鋼の接合にも適用可能と考えられる。また、本テーマで開発した超硬合金素材やPVDコーティングの技術は、切削工具にも応用が可能な技術である。

FSJは、抵抗スポット溶接に対し消費電力が1/2以下であり、車体製造時のCO2排出量削減、省電力にも貢献できるとともに、ヒュームやチリ、スパッタが発生しないため、製造時の作業環境のクリーン化も期待できる。

[テーマ番号17] 高強度マグネシウム材（薄板）の開発（2013年度～2017年度）

[テーマ番号34] 革新的マグネシウム材の開発および信頼性評価（2018年度）

[テーマ番号35] 革新的マグネシウム材の鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発（2019年度～2020年度）

[テーマ番号60] マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション（MI）活用技術の開発（2018年度～2020年度）

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

マグネシウム合金薄板は自動車用ボディパネルやEVの制御ユニット用ケースとしての実用化が考えられる。自動車用途での実用化には材料要求特性を満たすのみでは全く不十分であり、競合材料（アルミ、樹脂等）に対する価格優位性が強く求められる。現時点ではマグネシウム合金薄板の市場規模が小さいことから量産効果によるコストダウンも図ることができず、アルミや樹脂との競争の土俵にすら上がっていないのが実情である。需要量が見込めない限り設備投資も実施できず自動車用途での実用化は難しく、実用化・事業化のためにはマグネシウム合金薄板の市場開拓を行い量産投資に値する程度の需要量（数万トン/月）が見込める状態にすることが必須である。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

(1)で記述の通り実用化・事業化のためには生産技術開発によるコストダウンと並行して自動車用途以外での軽量化ニーズの高い市場開拓が必須である。本プロジェクトで開発した高成形性合金板材は、ノートPC等のモバイル機器筐体にも適用可能であ



り、モバイル機器筐体は自動車部品と比較すると実用化の際の要求事項は多くない上、軽量化に対するニーズが大きいことから実用化へのハードルは比較的低い。モバイル機器用途でマグネシウム合金板材の需要量を拡大させながら徐々に自動車用途への展開を検討する。

### **(3)波及効果**

マグネシウム合金素材の実用化のためには成形技術や表面処理技術といった周辺技術の開発が不可欠であり、これら周辺技術の発展が波及効果として考えられる。

組織名：セメダイン株式会社

## [テーマ番号 5 3] 構造材料用接着技術の開発（2017 年度～2022 年度）

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

自動車産業は、安全性・快適性・環境性能（軽量化、EV 化など）を向上させるニーズが広がっている。このニーズを実現させる為に構造接着は必須の技術である。

#### ①低温速硬化変成シリコーン系（10MPa、伸び 100%以上）

開発サンプルが、実証試験にて低温時熱歪追従、水、熱などの耐久性、CFRP・AL に対する接着性が PU 系と比べ優位性があることが確認できている。

しかし、OEM メーカーと実用化に向けた取り組みを実施していたが、急速なカーボンニュートラル化により、構造材として CFRP を使用した実用化の可能性が低くなっている。

今後は、本検討技術をカーボンニュートラル化（自動車製造工程のエネルギー削減・低温接着）、建築、電気・電子市場への拡販を実施する。

#### ②高じん性高耐熱エポキシ接着剤（1液熱硬化性エポキシ樹脂型）

本研究で得られた成果、高耐熱・高じん性・高耐久・AL 接着・低温硬化技術を基に、実用化で重要な生技性を兼ね備えたサンプルが完成した。

また、それらの性能を有したままコストダウン品の開発も実施し、事業化に向けた取り組みを実施している。

本開発品の量産化技術についても確立済みである。

### (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

#### ①低温速硬化変成シリコーン系（10MPa、伸び 100%以上）

現在、ターゲットを変更して事業化を目指している。現在実用化を目指しているターゲットは自動車製造時のエネルギー低減技術での事業化である。今後の自動車製造方法の変革、EV 化への適合を目指す。常温から 80℃の低温での接着が可能で、幅広い接着性、ひずみ追従性、高じん性、油面接着性、構造接着として利用可能な弾性率を有する特徴は、今後のカーボンニュートラル化に貢献できると考えている。

また、建築、電気・電子市場への拡販を実施する。

#### ②高じん性高耐熱エポキシ接着剤（1液熱硬化性エポキシ樹脂型）

現在 OEM メーカーと取り組みを実施しており、実用化の目途がついている。今後は、採用予定の OEM メーカーでの適応車種および適応部位拡大と他メーカーでの展開を計画している。

### (3)波及効果

本検討で得られた結果は、社会的要求であるカーボンニュートラル化に有効な技術である。また、2液型変成シリコーン樹脂型は自動車用途のみではなく建築、電気・電子市場でも有用な技術である。

組織名：株式会社総合車両製作所

[テーマ番号20] 難燃性マグネシウム合金の接合技術の開発  
(2014年度～2017年度)

[テーマ番号35] 革新的マグネシウム材の鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発  
のうち  
マグネシウム合金部材の各種接合技術の確立及び鉄道車両構体の製作指針の確立 (2017年度～2021年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

まず、初めに実用化・事業化に向けた戦略を示す。本テーマは難燃性新マグネシウム合金の開発とその適用技術の確立を通して構造用マグネシウム合金の実用化を図ることを目的としてきた。実用化に向けては「次世代高速車両構体」をターゲットとして明確化し、ユーザー側からの意見を常に取り入れる体制を構築して研究開発を遂行した。

研究開発段階からターゲットを強く意識した「ものづくり技術」も並行して構築することを重要視した戦略をとっており、2015年度からは車両構体を想定した部分（側パネル）構体の試作開発に成功した。そして、実用化・事業化の実現に向けて、着実にステップアップを図るステップとして、側パネル構体の作製を通じて実用化への課題を早期に抽出・明確化し、以後の材料開発にタイムリーに反映させることで、2017年度にはカットモデル構体の作製を実現した。

次に市場規模について説明する。現在、市場で実用化されているマグネシウム製品の多くは鋳造品であり、高コストなマグネシウム展伸材の構造部材への適用は中々難しい現状にあるが、本開発テーマの遂行により得た成果により、比強度や加工性に優れた押出材や板材の提供が実現できれば、展伸材のコストダウンに繋がり、さらには本開発テーマのターゲットである高速車両構体用部材に全面的に適用できれば、マグネシウム展伸材の市場規模の飛躍的成長が見込まれる。

例えば、新幹線のアルミニウム合金製車両構体をマグネシウム合金製車両構体に代替できた場合、車両構体（屋根・側構体、妻体、台枠）に利用されるアルミニウム合金は1両当たり約7tであり、上記部品を全てマグネシウムに置き換え、部品は同一形状であると仮定した場合、1両当たり約6tの需要が生まれ、車両製造が1年当たり400両と仮定すると（385両：2013年）、国内Mg合金展伸材需要（約700t）の倍以上の2400tの需要が生まれることになる。さらに自動車用外板にまで展開できれば、一部車種に限定されたとしても国内だけでも上記と同等の量の需要が見込める。

この様に、本プロジェクトの成果により、輸送機器構造部材にマグネシウム合金の適用を実現させることができれば、マグネシウム材産業構造自体を変革させることが可能である。

また、性能面、コスト面での優位性については次のように考えられる。本開発テーマで実用化のターゲットとした高速車両構体用構造部材には現在、アルミニウム合金

展伸材が採用されている。アルミニウム合金展伸材を使った車両構体のさらなる軽量化には限界が来ており、大幅な軽量化が期待できるマグネシウム合金展伸材への置換は大いに優位性がある。

さらに、アルミニウム合金展伸材に対する性能面での優位性(軽量化以外)を明確にするための研究も進めることとし、モックアップモデル構体の作製・評価をふまえて実施する。

一方、マグネシウム合金展伸部材はアルミニウム合金のそれと比べると現状は高価であるが、本テーマで開発中の押出加工プロセスや圧延加工プロセスを量産化技術に落とし込むことができれば、部材レベルでも十分競争力が生まれる可能性がある。また、車両の走行・運用まで含めたトータルコストの観点からも、軽量化によるメリットが創出されると考える。また、本テーマで開発している難燃性マグネシウム合金は高価なレアアースを添加しない汎用マグネシウム合金であり、市場に受け入れ易いことから、レアアースを添加した他のマグネシウム合金に比べてコスト面やリサイクル面でも大きな優位性があると言える。

## (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

本テーマでは開発合金を利用し、高速車両構体を作製するための適用技術を構築し、実用化することを最終目標とした。開発合金の基本組成を早期に決定し、部材化するための実用化技術(接合技術、表面処理技術等)を確立するため、図1に示すように役割分担を明確にし、相互の情報交換を極力多くして総合力が十分に発揮出来るような開発体制を構築した。本体制の下、4つの開発ステップ(①ラボレベル研究開発、②実機レベル研究開発、③部分モデル構体作製、④モックアップモデル構体作製)を設定し、最終的な目標達成(マグネシウム製高速車両構体の実用化)のための各ステップを実施した。

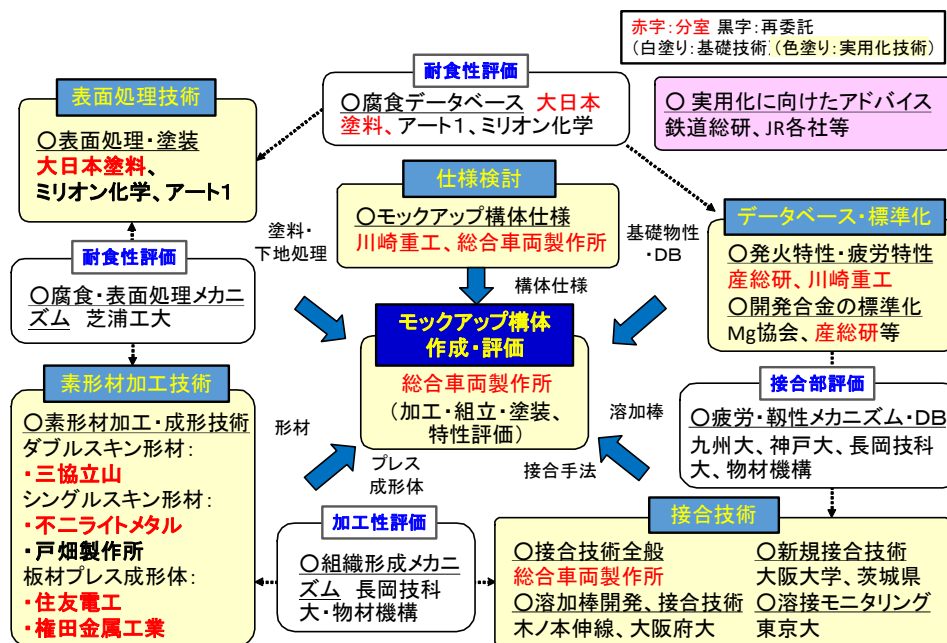


図1 2017年度以降のプロジェクト開発体制

上記ステップを達成するための全体スケジュールは図 2 に示す通りで、2017 年度にはさらにモックアップモデル構体を作製し、マグネシウム製高速車両構体の実用化を加速することができた。

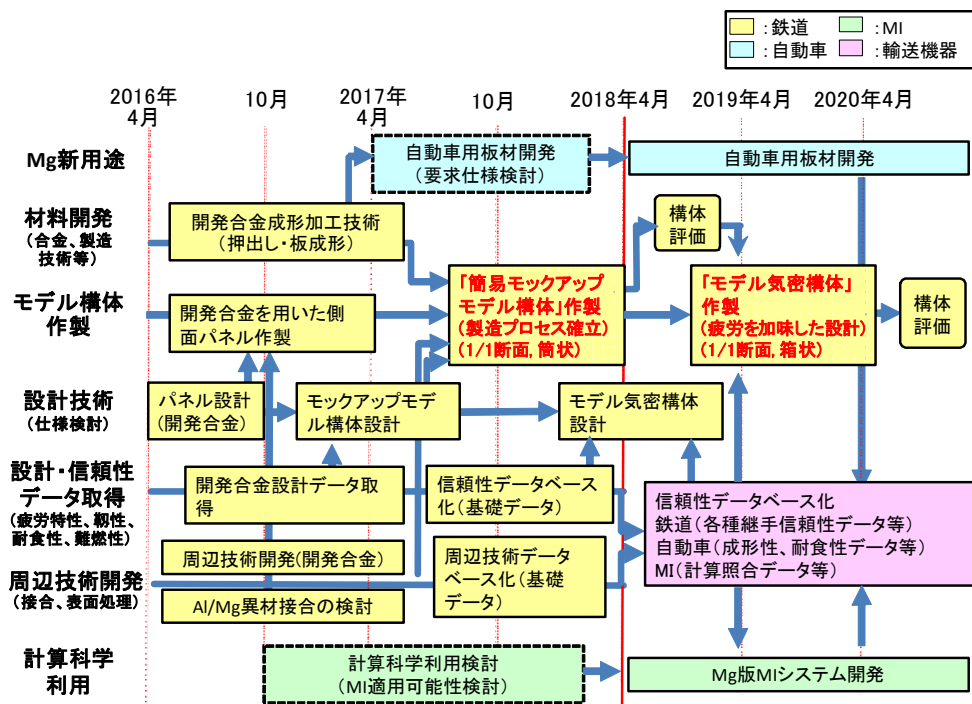


図 2 Mg プロジェクトのスケジュール

実用化・事業化に向けた課題と具体的な取り組みを次に示す。

開発合金を実際の車両構体に適用するための最低条件として、材料の標準化を実施することが挙げられる。また、開発した合金の難燃性を評価するための手法を標準化する必要がある。本研究開発では、再委託先の一つである日本マグネシウム協会と連携して、開発合金の標準化、難燃性の評価手法の標準化をプロジェクトと並行して推進した。

易加工性マグネシウム材（押出材）の開発では、易加工性と押出材特性（機械的性質や難燃性）の両立が合金開発における大きな技術課題と言える。最終目標である押出材の大型化・長尺化においては、保有設備の増強も含めた設備投資も想定しつつ、押出金型の設計改良を主体に対処可否を見極める。

高強度マグネシウム材（厚板）作製の基礎的検討では、板材の幅広化・厚板化に対する高強度化・高延性化の両立が課題であった。事業化に向けては、市場が必要とする大きさの製品提供が不可欠である。順次試作実施結果を反映させて大型化に取り組んでいく。

### (3)波及効果

現在の鉄道車両構体では軽量化・低騒音・低振動が課題となり、日夜技術開発が進められているが、これらの課題は鉄道車両分野のみならず、自動車分野、航空機分野、建材分野等にも当てはまる。このことから、開発した難燃性マグネシウム合金の構

造物への適用による経済波及効果は大きいと考えられる。

前述したように、本研究開発により、高い難燃性を有する高強度マグネシウム合金材が開発され、高速車両構体にマグネシウム合金構造部材が採用されることで、市場規模の飛躍的な拡大が期待できる。さらには、難燃性マグネシウム合金の展伸加工プロセス・組織制御技術を工業的に深化・展開することで技術力の向上と低価格化が達成できれば、これまで特に安全性の観点から敬遠されていた、他の輸送機器（トラック、自家用車、航空機等）においても適用へのハードルが下がると考えられ、マグネシウム合金市場全体のさらなる拡大が期待できる。

また、輸送部門におけるマグネシウム合金展伸材の適用によるエネルギー効率の向上と輸送能力の向上及び環境への配慮は、経済、社会に対して大きな波及効果を生み出すことができると考える。

比較的若い人材が本開発テーマに従事することで、恒常的に科学的に裏付けられたものづくりを強く意識し、学会等での積極的な成果発表や論文投稿を推進すれば、社内は勿論、国内における研究レベルの底上げと人材育成にも貢献できると考える。

組織名：大日本塗料株式会社

[テーマ番号 19] 難燃性マグネシウム合金の耐食技術の開発  
(2014 年度～2017 年度)

[テーマ番号 35] 革新的マグネシウム材の鉄道車両および自動車構造部材への  
適用技術開発 (2018 年度～2022 年度)

[テーマ番号 60] マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグ  
レーション (MI) 活用技術の開発」(2018 年度～2022 年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

マグネシウム合金による軽量化には、鉄道車両関係者が多大の期待を示しており、部品も含め高速車両への検討も試みられている。しかし現状の難燃性マグネシウム合金は他の金属に比べ腐食性が強く、表面処理（化成処理皮膜、陽極酸化、塗装等）が必須となる。本テーマである難燃性はもとより、腐食に対する対策とその信頼性の確立も大きな課題であった。

#### (1)-1：大型鉄道車両に対する表面処理の確立（テーマ 19）

現在までマグネシウムの殆どは採用事例は室内仕様の小物部品を対象としており、鉄道車両の様な大型部材となると、従来の化成処理法は複雑な処理槽方式の適用が難しいものであった。従来の化成処理は浸漬法による複数の複雑な浸漬層が必要とされ、しかも大型構造物となるとその浸漬層自体も大型となる。これでは化成処理が成立しない。よって新規にシャワー方式の様な簡易処理法の検討が必要となる。塗料に対しても、強固な高温焼付塗料が望ましいが、大型構体では、熱による硬化作業は困難であり常温乾燥で使用出来る製品が必要となる。そこで本テーマ 19 では、『シャワー式化成処理』及びその処理に最適化された塗料（下塗り）を開発した。

2016～2017 年度には他の新規マグネシウム材開発部門が作成した側パネル（2016 年度末）、1/1 モデル構体（2017 年度末）を塗装した。その表面処理には本工法を適用し、関係者外への PR も含めて実証した。

よって、新たなマグネシウムの表面処理の工法提案として進めていく。

#### (1)-2：マグネシウム材の屋外大気暴露と、腐食機構の解明について

(テーマ 19&35)

テーマ 19 にて新規表面処理方法を開発する一方で、マグネシウム材の腐食特性は、これ迄その組成を絡めた系統立った屋外大気暴露や腐食機構の解明などのバックデータが不足しており、上記工法を企てたとしてもマグネシウムの耐食性を語るには信頼性が乏しい。そこで、テーマ 19 では、車両用のアルミニウム合金と比較しながら、既存合金及び新規開発合金の暴露懸架を実施し、テーマ 35（2018 年度以降）におい

て、その暴露品の回収と評価を実施した。また、回収暴露板については、腐食生成物の解析と共に腐食機構の解明に努め、腐食信頼性の確保につき評価を実施した。結果、マグネシウムの腐食は屋外大気暴露では降雨と結露が最も大きな因子となっており、マグネシウム材中の微量添加元素にも左右されることが判明した。

よって、一般的に言われる「マグネシウムは腐食に弱い」といった内容に対して、腐食に対する信頼性を得るための具体的な対策手法(表面処理技術や、マグネシウム合金の諸材質・使用環境)のガイドラインへ繋がるものと考えられる。

#### (1)-3 : 表面処理仕様に関する、鉄道車両採用に向けての取り組み (テーマ 35)

テーマ 35【革新的マグネシウム材の鉄道車両への適用技展開】では、開発されたマグネシウム素材の採用と曝露評価に関し、更に具体的に本上記工法の適用に関し継続検討した。表面処理対象を鉄道車両とした場合には適応箇所(外装・内容)及び、コストや意匠性の面から、部位毎に表面処理の仕様(塗装仕様)も異なる。従って、それぞれ適用部署ごとに性質が異なる各種マグネシウム材の採用事例と同様に、表面処理仕様も部位別に異なる為、表面処理仕様についても、マグネシウムの材質を加味した上で、仕様別に屋外大気暴露の評価を進めて、3年の暴露では問題なき実績を確認している

よって、鉄道車両の実用途に則した表面処理の適正度も把握した。

#### (1)-4 : 曝露データ含めた、腐食に関するデータ収集 (テーマ 60)

腐食信頼性を確立する為、屋外大気曝露データに関しデータを蓄積した。最終的には、アルミニウム合金(A6N01)を比較対象に、既存合金・新規開発合金含めた5年曝露の結果を、解析と共にデータベース化した。

以上の取り組み結果をもとにして、

- ・新たに開発した表面処理仕様の展開 と共に、
- ・曝露結果に基づいた腐食機構の解明、
- ・解明した腐食機構と表面処理技術の分析から効果の整合性確認、
- ・鉄道車両の実表面処理仕様に準じた曝露結果確認、
- ・各種マグネシウム材に関する腐食データベースの蓄積 から

鉄道車両へのマグネシウム材の適用への腐食信頼性確保と、本表面処理仕様の適用を目指すものである。



## (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

本検討は、マグネシウム合金の高速車両構体への適用を主眼に取組みを進めた。これまで、定期的に「マグネシウム合金高速車両構体実用化委員会」を通じ実用化を念頭に、東日本旅客鉄道株式会社（JR 東日本）や車両製造各社のアドバイズや意見をいただきながら、素材メーカー・加工メーカー・素材利用の製造メーカー・表面処理メーカー・エンドユーザーが連携協力して評価開発を進めてきたものである。特に屋外大気暴露については年単位の評価期間を必要とし、一朝一夕に短期間で得られるデータではない。より実用途に即した評価といえる。その暴露結果については、エンドユーザーの認知度はもとより信頼性も高いと考えて、本取り組みを進めた。

実用化に向けてのマグネシウム製車両構体の製造に関しては、未だ諸課題・確認事項もあるが、素材開発がより進み 25m 車両構体への採用となればこうしたデータと共にこの新規表面処理手法の展開が進むものと考ええる。また、こうした評価実績により、まずはマグネシウム製外装部品等への適用も関係者含め考えてゆきたい。

## (3)波及効果

鉄道車両構体の作製に関しては、構造強度はもとより、屋外に長期にさらされることから腐食に対する信頼性を確立することが必須であり、本研究は鉄道車両部門に於ける国内外の注目度は大きいと考える。

一方で鉄道車両以外の他の大型構造物に対しても、本研究開発にて開発したシャワー一式簡易化成処理を適用できれば、マグネシウム塗装業界における波及効果も大きいと考える。勿論こうした事例に基づき、新たなマグネシウム合金の適用幅の拡大となれば需要の拡大も期待され、ひいてはマグネシウム材料の生産量の拡大や製造コストの改善も期待される。経済的効果については軽量化により省エネ効果が期待される。

技術的にも様々な難燃性マグネシウム材が開発されており、その腐食特性の評価との腐食性の差異の要因究明を実施することで、マグネシウムの材料開発に当たっての腐食技術レベルの向上にもつながる。

なお塗装業界においては、マグネシウムは被塗物として掲げられる事例が少なく、その結果、業界ではマグネシウム素材の特性詳細を知る機会は殆んど無い。金属素材や接合の開発関係者と情報交換し開発を進めるという点では将来のマグネシウム塗装分野における、腐食関係の塗料設計の技術者育成の面でも有意義である。

組織名：株式会社タカギセイコー

[テーマ番号 2 8] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発  
(2014 年度～2017 年度)

[テーマ番号 5 4] 低圧・超高速 CFRP 成形技術の開発 (FS 研究)  
(2018 年度～2019 年度)

[テーマ番号 2 7 C] 超軽量 CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の開発  
(2020 年度～2022 年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

熱可塑性 CFRP (CFRTP) による軽量量産車に向けた成形加工技術を材料、評価設計およびその加工装置の分野の開発と共創し世に先駆けることにより、国際競争力や他に比べて実用化・事業化での優位性を得る。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

これまで取り組んできた CFRTP の材料および成形技術に加え、必要箇所に必要な形で CFRP を組み合わせた超軽量の CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の開発を通し、CFRTP の軽量化効果を実証する。本プロジェクト内での連携をとりながら CFRP 加工の実用化に向けた要素技術を開発するとともに、複合材料で先行する当社事業と協調していくことで、実用化・事業化に向けた取り組みを進めていく。

### (3) 波及効果

軽量自動車部材適用による事業化は、その生産性、信頼性の観点から他の輸送機器のみならず、広い範囲の産業分野にも適応が可能となり、軽量化が求められる市場の更なる拡大が期待される。また、これらのプロセスを経験することが人材育成に対して大きな役割を果たす。

組織名：田中貴金属工業株式会社

[テーマ番号08] 難接合性材料の線接合技術の開発（2014年度～2017年度）

**(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

日立分室での評価を基にニーズ及び使用条件を把握し、それらに最適な材料組成を見出した。その材料組成に応じた鋳造条件および機械加工条件などを探索する。

ISMA が主眼としている自動車の市場は、米国、欧州及び中国で大きく、中国でも排ガス規制が導入されようとしている。一方 CO<sub>2</sub> の削減目標に対して車両の軽量化が必須であり、高張力鋼板と異種材料の使用が不可欠である。そのため FSW による接合技術が求められている。

**(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組**

事業化に向けたニーズ探索を行ってきたが、具体的な用途はなく市場の成熟を待つ状況にある。今後 ISMA 参画企業へのサンプル提供を行いながらニーズおよび市場の成熟を待ち、事業化に向けた取り組みを検討する。

**(3) 波及効果**

本技術をスポット接合（FSSW）や表面改質（FSP）に適応できる可能性があり、本開発材料をツール以外の耐熱材料として使用できる可能性も見出したい。また、ISMA が主眼とする自動車分野では、燃費と安全性を両立した軽量化に貢献でき、エネルギー分野やインフラ分野でも、素材の長寿命やコスト削減に貢献できる。

人材育成面では、当社の若手社員を本プロジェクトに主体的に参画する経験を通じて、将来当社を率いる中核的な人材に成長することが期待できる。

組織名：帝人株式会社

[テーマ番号 27] 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2014年度～2022年度)

(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

① 実用化・事業化に向けた戦略

- ・ 学術研究支援WGなどを活用し、一企業では実施が難しいテーマについての学術的知見を獲得する。

② 事業化した場合に対象となる製品、市場規模

- ・ 市場規模としては、自動車の需要も、コロナ禍の影響により、グローバルの生産台数は、2020年度に一旦落ち込むが、その後回復すると予想される。電気自動車の普及により軽量化要求が高まり、炭素繊維複合材料の使用率が増えると予想される。

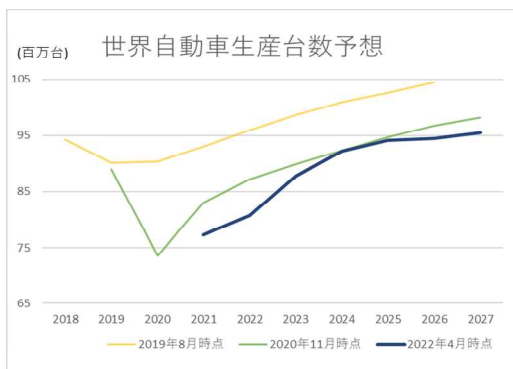


図1 世界自動車生産台数予想

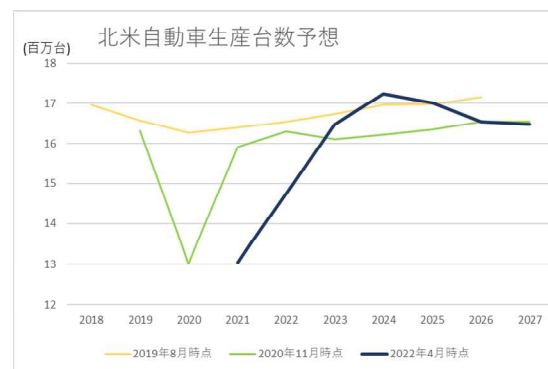


図2 北米自動車生産台数予想

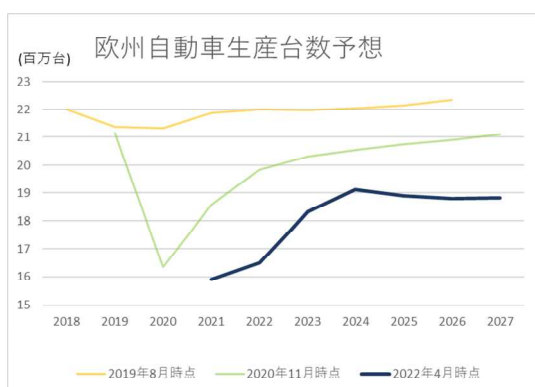


図3 欧州自動車生産台数予想

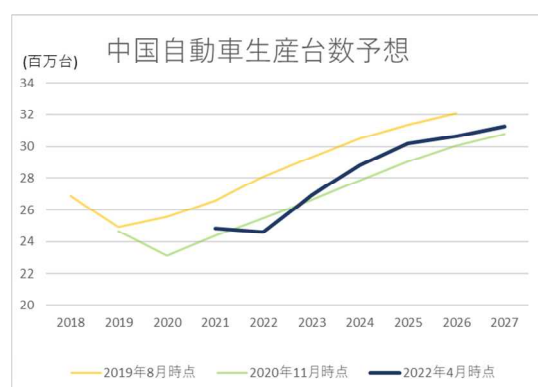


図4 中国自動車生産台数予想

(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

非公開

### (3)波及効果

#### a. 技術的効果

繊維長分布の自動計測、繊維配向、分散性などの分析評価技術

混練・成形時の材料流動性解析・シミュレーション技術

ダイレクト押出し、マテハン、接合などの設備技術

LFT-D と補強材との一体成形、溶着技術

#### b. 人材育成

NCC に参加している各大学、研究機関、企業の研究者との意見・情報交換を通じた人脈形成。

組織名：東邦チタニウム株式会社

[テーマ番号 1 1] チタン薄板の革新的低コスト化技術開発 (2016～2020 年度)

[テーマ番号 1 2] 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発  
(2014～2015 年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略

スポンジチタンは半原料であり、溶解工程を経てチタンインゴットとなった後、加工工程にて成形され板材や棒材、更に板材の加工を重ねることで箔となる。また、チタン粉末は、スポンジチタンなどを原料として、水素化脱水素法やガスアトマイズ法などの粉末化工程を通じてチタン粉末となる。東邦チタニウムは、スポンジメーカーであると同時にインゴットメーカーであるため、高品質スポンジ高効率製造プロセス技術で開発されたスポンジチタンは、高品質スポンジチタンとして、または高品質チタン/チタン合金インゴットの形で顧客へ供給する。他方、チタン新製錬技術で開発されたチタン箔、チタン粉末は、そのまま顧客へ供給するとともに、調質箔や粉末焼結材として顧客に供給する。

高品質スポンジ高効率製造プロセス技術で開発されたスポンジチタンは、高品質かつ低コストであるため、航空機用チタン材市場、一般産業用チタン材市場、高純度チタン市場など、既存のチタン市場にて海外の競合メーカーに対して優位に立てる。また、従来にない高品質かつ低コストのスポンジチタンを造れるため、日本製鉄（富津分室）が開発する高効率チタン薄板の原料として活用され、チタン薄板の革新的な低コスト化に貢献できる。他方、チタン新製錬技術では、加工工程を大幅に省略してチタン箔やチタン粉末を得ることができ、箔や粉末の革新的な低コスト化を実現できる。ひいては、これらの革新的低コスト化技術により、自動車分野を中心とした新たなチタン材市場の創生が期待できる。

既存のスポンジチタン市場は年率約 5%で成長することが予想される成長産業である。その市場は航空機分野、一般工業分野に大別できるが、これまで日本は航空機分野ではスポンジメーカーとして、一般工業分野では展伸材メーカーとして世界的に優位な地位を保ってきた。しかし、近年は、海外後発メーカーの追い上げが激しく、カザフスタン・ウクライナ・中国・韓国等が競合メーカーとして市場での地位を上げており、日本のチタン産業にとっての脅威となっている。

高品質スポンジ高効率製造プロセス技術開発が成功し、海外競合メーカーに対して品質、コスト面で優位に立つことで、成長するスポンジチタン市場での差別化を図りながら、日本のチタン製錬事業の拡大を達成し、世界における日本のスポンジチタンの地位を確固たるものにする。

同時に、高品質スポンジチタンを活用した高効率チタン薄板製造技術や、チタン新製錬技術によって、チタン薄板、チタン箔、チタン粉末等の革新的な低コスト化を実現することで、これらのチタン製品の既存市場で優位な地位を確保することは勿論のこと、これらチタン製品の市場の大幅な拡大につなげる。

## (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

高品質スポンジ高効率製造プロセスでの要素技術について、2019年度までを目途に、個別に実機スケールでの実証試験を行ない、量産技術化のための問題点検証、品質評価と最適化を行なう。実証試験完了後、各技術を集約した新プロセスの実用化の検討を行なう。並行して、個別での実用化が可能な技術については、個別での検討を行ない、適宜、実用化していく。実際、高 Fe 粒の自動選別技術は、2016年度に実用化に成功した。併せて、日本製鉄が開発する高効率チタン薄板に対しては、原料の要求品質、要求量を確認し、それに合わせた生産体制を整えていく。

他方、チタン新製錬のチタン箔の要素技術について、2023年度までを目途に実機スケールでの実証試験を行い量産化技術を確立し、2024年度以降の実用化を目指す。チタン粉末は、2018年度までに得られた成果を活用し、独自に実用化にむけた課題解決策の検討を実施する。

チタン材の既存市場は、航空機分野と一般工業分野に大別される。一般工業分野は、日本展伸材メーカーの国際競争力が高く、その筆頭である日本製鉄と連携しながら新しい工程で製造されたスポンジチタンの評価を進め、製造プロセスの安定性及び信頼性を確認したのち実用化へと展開する。航空機分野は、新たなスポンジチタン製造工程に関しては航空機用認定を取得する必要がある。まずは、機体用向けに実績を積み認定を取得後、エンジン向けの認定を取得することとなる。

高品質スポンジ高効率製造プロセス技術開発については、実証試験の終了後、実用化の検討に入るが、2020年6月現在、新型コロナウイルス感染拡大の影響で航空機需要が著しく低迷しており、スポンジチタンの生産能力は世界的に過剰な状態にある上、今後、航空機需要の回復まで、どの程度の時間がかかるのか見通しは不明瞭である。スポンジチタンの生産能力が過剰な状況下では、実用化のためには、新プラントの増設ではなく、旧プラントから新プラントへの置き換えが前提となるため、新プラント増設に比べて投資採算性を確保しにくい。「新型コロナウイルス感染拡大の影響で落ち込んだスポンジチタンの需要の回復時期」、「競合他社のスポンジチタンの生産能力推移」などを見極めた上で、いつ新プラント建設の投資判断をするのかが実用化に向けての最大の課題である。

他方、チタン新製錬技術開発のチタン箔は、生産性向上などが重要な課題であり、今後、高電流密度化や連続化技術開発などに取り組む。チタン粉末は、酸素低減が重要な課題であり、チタン鉱石などを原料として、独自に該プロセスの改善・改良を行う。

### (3)波及効果

チタンは製錬時に多くの電気を必要とする金属である。同じく電力多消費のアルミニウムの製錬事業が、国内からほとんど撤退したような事態を避けるため、高い電力単価をカバーする新技術を開発しなければ日本国内でチタン製錬事業を続けていくのは困難となる。高品質スポンジ高効率製造プロセス技術やチタン新製錬技術開発は、チタン製錬技術の革新により日本国内でのチタン製錬事業の継続を可能とし、日本の経済および雇用に大きく貢献できる。さらに、チタンの川下事業（展伸材事業）においても日本企業の優位性が確保され、日本のチタン産業全体の発展に寄与するとともに、国際的には日本のシェアを拡大することにより世界での日本のチタン産業の地位を上げることが期待できる。

日本のチタン業界は、高価で加工が難しいチタンを種々の工夫をこらしチタン用途市場を広げ市場開発を積極的に進めたことが、今日のチタン市場の広がり（特に民需分野）に繋がっている。本研究開発を完成させ、世界にその事例を発信していくことで「軽くて強い、耐食性が高くメンテナンスフリー、生体適合性が高く人体に優しい」チタンの優れた性質の恩恵を世界全体が享受することが可能となり、日本が世界でのリーダーシップを引き続き発揮できる。



組織名：東洋紡株式会社

[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発  
(2014 年度～2017 年度)

**(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

実用化・事業化の検討は、基礎研究部門から社内の関連事業体に移管して進めている。軽量／高強度・高剛性／高耐衝撃性を有し、設計できる材料として関連事業体の販売ネットワークに載せて実用化に結びつける。

**(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組**

実用化・事業化に向けた活動は、社内の関連事業体にて進めている。ユーザー候補へのプレゼンテーションやサンプルワークなどを行い、実部材を想定したアプリケーションでの評価の実施を進めている。また、事業化に向けた課題の中の一つに CAE 技術の構築が挙げられる。これについては、本プロジェクト内で得た知見を基に、成形挙動・実部材性能を予測できるような技術構築を、大学・公的研究機関の指導を頂きながら継続している。

**(3) 波及効果**

本プロジェクトによる技術開発により、既存の複合材料にも適用可能な材料評価技術が得られた。これを基に、CAE による予測精度向上や材料データベースの拡充といった波及効果が得られた。また、人材育成の面でも効果が高く、プロジェクト内で川上から川下までの研究員との議論を通じて若手研究員の育成を図った。プロジェクト終了から 5 年が経過したが、参画していたメンバーが、実用化・事業化に向けた活動の中心となっている。このようなことから、市場成長期に活躍できる中核人財に育てる場として非常に有効であるといえる。

組織名：東レ株式会社

[テーマ番号 0 1] アルミニウム/CFRP 接合技術の開発 (2013 年度～2017 年度)

[テーマ番号 2 7] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2013 年度～2022 年度)

[テーマ番号 2 7 C] 超軽量 CFRTTP/CFRP ハイブリッド部材の開発  
(2020 年度～2022 年度)

[テーマ番号 2 8] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発  
(2013 年度～2017 年度)

[テーマ番号 5 1] 革新炭素繊維基盤技術開発 (2016 年度～2020 年度)

[テーマ番号 5 4] 低圧・超高速 CFRP 成形技術の開発 (FS 研究)  
(2018 年度～2019 年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

材料の適材適所使用（マルチマテリアル化）では、設計変数が増える。設計変数が増えると、材料スペックの事前設定は困難となり、材料→成形→加工→組立のバトンリレー型ビジネスモデルは成立しにくい。これらを同時進行させるモデルを、社内組織を横断的に活用して推進する。また、革新炭素繊維（テーマ 51）に関しては、総合的なフィージブルスタディを実施の後、既存設備の改良をベースにスケールアップ技術を構築する。

以下、市場動向について説明する。

#### ① 炭素繊維

自動車向け炭素繊維は、BMW にラージトウを供給している SGL グループのシェアが大きい。自動車向け CFRP は剛性設計の傾向が強く、比較的安価に剛性を補強できるラージトウが汎用される。また、自動車構造材への炭素繊維適用に際しては、価格に加え LCA が重要となる。経済合理性のある高 LCA 型の炭素繊維の開発は、市場に与えるインパクトは大きい。一方で生産規模と時期に関しては、市場動向に合わせる必要がある。

#### ② 中間基材

市場の半分以上を BMW 向けの NCF (Non-crimp fabric) が握る。それ以外は、熱硬化では SMC、プリプレグ、熱可塑ではペレットやシート基材が採用されているが、部材毎に材料形態が異なり、個々の数量は限定的である。実用化検討は、要素技術をストックし、状況に応じ活用・応用するスキームで進められる。加えて昨今は特に開発のキーワードとして、カーボンニュートラル、リサイクルへも注目が集まっており、CFRP 製品からのリサイクル、リユースだけでなく、各種中間基材の端切れなどの工程端材をいかに活用して循環サイクルを回すかの視点も重要となってきた。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

少量で足の速い事業を先行し、実績構築の後、信頼性部材への展開やスケールアップを進める。要素技術は熱硬化・熱可塑問わず幅広く手の内に収め、パッケージ提案

に活用する。新技術を顧客企業に提案する機能は社内に整っており、顧客との技術交流会等を通し、随時製品提案を進めている。製品化時期は、顧客企業のスケジュールに依存する。

また、価値は最終製品にあり、材料、設計、成形および加工技術の組み合わせで形成される。多様な材料形態や加工法を持つ複合材料では、材料、成形技術単独で商品価値を設計できない。オープンの場合要素技術を構築し、クローズの場合で実用化を進めるオープン&クローズ戦略が基本となる。

革新炭素繊維（テーマ 51）では、太デニール化と、強度・弾性率の同時達成、およびスケールアップに耐えられる製糸プロセスの安定化が実用化に向けた重要課題となる。前者はポリマー改質で、後者はポリマーならびに製糸条件の精密化で達成を図る。

なお、持続可能なビジネスとするためには、マーケティングによる事業規模ならびに適社性の検証と、技術総合力を発揮した製品価値のパッケージ提案を進める必要がある。

自動車向け CFRP の市場は当面欧州が牽引する。拡大が期待される中国は国策で内製を推進しており（中国製造 2025）、該市場への参入余地は限定される。従い、国内および欧州自動車メーカーのニーズを注視する。なお、革新炭素繊維（テーマ 51）の適用は、LCA 低減の価値が付与できユーザーニーズを喚起できる。

競合する技術・事業との比較については、上述のとおり、自動車用途は要素技術の組み合わせによる総合力が求められる。革新炭素繊維（テーマ 51）では LCA、CFRTP フォーム材（テーマ 28 に関連）では軽量と剛性の両立、樹脂供給体による高速含浸（テーマ 54）では CFRTP 高速サイクルへの親和性が強みとなる。熱可塑 CFRP（テーマ 27）は、名古屋大学 NCC にて LFT-D 技術による大量生産に適応した軽量車体構造用の材料および設計・製造技術の開発を目的に、性能の定量評価技術を確立して物性向上や解析技術開発、ハイブリッドを含めた基本的な成形技術を確立している。CFRP とアルミニウムとの接合（摩擦重ね接合法/FLJ）にスポットを当てた（テーマ 1）については、技術ポテンシャルの把握を進めることができたが、同時に実用化への課題も明確になっていた。主要な課題として、ロボット設備で実施する 3次元形状への FLJ 適用には、接合部の正確な加圧制御が重要となり、接合部品位（アルミ側外観や接合強度）に大きく影響することが挙げられていた。この課題解決のため、ロボット制御システムメーカーがサポイン事業で開発を進め、加圧力の精密なフィードバック制御を実現し、接合部の外観や強度を 3次元形状にも適用可能なレベルに到達した。自動車メーカーや Tier1 の関心は多いと想定しており、ロボットシステムメーカーでの設備販売も含めて実用化に向けた働きかけを継続する。これらの技術を総合的に活用したマルチマテリアル化により、さらなる優位性拡大が期待できる。

### (3)波及効果

環境負荷の削減や水素などの代替エネルギーの提案に繋がる新製品の開発を通し、目に見えにくい軽量化がもたらすグリーンイノベーションを具体化する。

なお、複合材料は複数の要素技術の集合体であり、全体を俯瞰できる人材育成が急務である。展示会等では海外技術者の貪欲な姿勢が目立つ。今後も各種公的プロジェ

クトへの参画や大学との連携を積極的に推進し、先端材料に興味を持ち、専門的知識や実用的技術と事業的感覚とを兼ね備えた若手研究者を育成する。

## 〔テーマ番号 27〕 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・応用加工技術の開発 (2014年度～2022年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

#### ① 実用化・事業化に向けた戦略

繊維強化熱可塑性樹脂を自動車等の構造部品に適用するには、炭素繊維とポリアミド樹脂等のエンジニアリングプラスチックの複合材料が有利である。加えて自動車部品の物性、成形性のバランスを考慮したハイレート生産という観点からは、非連続繊維強化型（プレス成形可能）の複合材料が重要と考える。昨今は特に開発のキーワードとして、カーボンニュートラル、リサイクルへも注目が集まっており、製品からのリサイクル、リユースだけでなく、各種中間基材の工程端材をいかに活用して循環サイクルを回すかの視点も重要となってきた。

#### ② 事業化対象

2025年頃からは、都市内移動手段として中～小型モビリティを含めてEV車（電気自動車）の市場が拡大すると予測されている。EV車の航続距離延長や環境負荷低減には軽量化が必須であり、CFRPを含む様々な軽量素材のマルチマテリアル化による適用が期待される。

#### ③ 競合技術に対する優位性

既存の射出成形材料やスタンパブルシート基材（ガラス繊維強化ポリプロピレン等）と比較して、本技術のLFT-D成形システムによる成形品（炭素繊維強化エンジニアリングプラスチック）は、設計面や適用部品のバリエーションにおいて自動車の軽量構造部品には優位である。また、LFT-D成形システムは、先行する熱硬化性樹脂系のプリプレグ、RTMやSMCに比較して、成形タクトタイムが大幅に短く、コスト上の量産効果が期待できる。さらには、各種熱溶着手法によって接着剤レスで短時間に接合、組立が可能であり、組立コストにおいても優位と推定する。

#### ④ 量産技術確立の見通し

既存の自動車産業では金属を中心としたサプライヤー体制／インフラが確立している。新たな材料技術を展開する場合、既存インフラのノウハウや設備活用を想定することが適用への効率的なアプローチである。本技術のLFT-D成形システムは、成形・賦形プロセスでは金属のプレス成形技術が、また組立プロセスではスポット溶接技術の発展的展開が図り得るため、実用化・事業化への期待が大きい。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

本プロジェクトで取り組む技術分野（材料・分析技術、構造設計・接合技術、成形・設備化技術、CAE評価・解析技術、ハイブリッド成形技術、リサイクル技術）の各WGと、名古屋大学を中心とした学術支援WGとの連携など、実務活動を積極

的に推進し、情報を多分野、広範囲に集約することによって、自動車メーカーのニーズと共に、LFT-D 成形システムに適合した自社材料の開発課題を明確に把握するように取り組んだ。

また、自動車用途をターゲットに先端材料によるソリューション提案および技術マーケティング機能を保有・推進していた社内組織（オートモーティブセンター）と環境資材や新エネルギー関連部材の開発機能を有する組織（環境・エネルギー開発センター）とを統合・融合し、世界的に需要が拡大する環境・モビリティ領域での事業拡大に向けて新たな組織（環境・モビリティ開発センター）を発足させた。これにより、従来の技術開発力および技術マーケティング機能をさらに強化し、各種先端材料を融合した高度なトータルソリューション提案への取り組みを行っている。

### (3)波及効果

これまで限定的であった熱可塑性複合材料が、大きな市場である自動車構造部品への適用を足掛かりに拡大することが出来れば技術的な波及効果は極めて大きい。

また、既存インフラのノウハウや設備を活用した実用化・事業化を想定しており、既存産業の拡大との両立が期待できる。さらに EV 車普及、リサイクル技術の実用化を伴えば、GHG 低減など社会的波及効果も見込める。

複合材料は複数の要素技術の集合体であり、その普及には全体を俯瞰できる人材育成が急務である。今後も各種公的プロジェクトへの参画や大学との連携を積極的に推進し、先端材料に興味を持ち、専門的知識や実用的技術と事業的感覚とを兼ね備えた若手研究者を育成する働きかけを継続したい。

組織名：東レエンジニアリング D ソリューションズ株式会社

[テーマ番号 27] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発のうち

(j)LFT-D 高速成形最適化技術の開発（2014 年度～2022 年度）

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

成形 CAE 技術の研究開発として、LFT-D 製品の設計技術高度化に向けた、成形 CAE と構造解析の連成解析技術を開発した。

成形・構造連成解析システムの妥当性を確認できたと考える。

成形・構造連成解析技術の実用化に向けた今後の課題は次である。

- ・ LFT-D 物性 DB（配向パラメータと機械的物性の関係）の構築
- ・ 解析精度検証と精度向上（配向特性算出方法の改善等）

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

上記の成形・構造連成解析技術の実用化に向けた今後の課題については、名古屋大学集中研の材料 WG の活動として取り組んでいる。

### (3) 波及効果

名古屋大学集中研の材料 WG、成形 WG および設計・接合 WG にメンバーとして参加し、当社実施成果の報告および議論を通じて若手エンジニアの知見拡充、育成に貢献している。

組織名：株式会社戸畑製作所

[テーマ番号18] 高強度マグネシウム材（押出材）の開発  
（2014年度～2017年度）

[テーマ番号34] 革新的マグネシウム材の開発および信頼性評価（2018年度）

[テーマ番号35] 革新的マグネシウム材の鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発（2018年度～2020年度）

[テーマ番号60] マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズインテグレーション（MI）活用技術の開発（2018年度～2020年度）

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

本開発テーマにおける目標は、高強度アルミニウム合金 A7N01 に匹敵する機械的特性を有する難燃性マグネシウム合金を開発し、その開発合金を用いて、現行の高速車両シングルスキン構体実機に用いられている床材および梁材（いずれもソリッド材）と同断面形状を有する押出型材の作製を工業レベルで実現するため、押出用素材となるビレットの製造プロセスを開発することである。また、高強度が要求される自動車用のドアビーム材（ホロー材）の開発に用いるビレットの製造プロセス開発も遂行している。これらの開発によって難易度の高い難燃性マグネシウム合金の押出に供するビレットの製造技術を構築し、さらに他分野へターゲットを拡大させた事業化戦略を図る。

次世代高速鉄道車両構体全てをマグネシウム合金で作製すると仮定した場合（現行アルミニウム合金製新幹線車両をマグネシウム合金製車両構体に代替した場合）、1年あたりのマグネシウム合金の使用量は、2,400t 程度であるとされている。日本国内におけるマグネシウム合金展伸材の使用量は1年あたり 700t 程度であり、仮に一部のみのマグネシウム合金への代替としてもマグネシウム合金市場全体の大幅な拡大が期待できる。また、本プロジェクトは自動車部品への展伸材適用に向けた研究開発も進めており、マグネシウム合金市場の拡大を加速させることができると考えられる。これまでに押出加工に好適なビレットの開発について指針を得ており、ユーザーニーズに合致するまで作り込みと検証を行っていくことで達成できると考えている。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

次世代高速鉄道車両構体の床材および梁材、自動車部材のドアビームの開発を進めており、いずれも高い強度が要求されている部材である。2016年度までに高強度合金 AX92 を開発し、2017年度からその押出加工に好適なビレット開発を進めることができた。2020年度以降は AX92 合金組成のチューニングを行い、ドアビームの押出加工に好適なビレット開発も進めることができた。

開発合金 AX92 は前述のとおり高強度合金であるため、押出加工の際に設備に大きな負担がかかる。これは製造コストに直結する課題であり、押出加工に好適なビレットの開発が必要である。ドアビーム開発については中空形状であるために押出難易度はさらに高く、合金組成のチューニングを始め、ビレット開発を推進する必要がある。

### (3)波及効果

高い難燃性を有する高強度マグネシウム合金を開発できたことで、自動車部品や他の輸送機器においても適用へのハードルが下がると考えられる。輸送機器のマグネシウム合金への代替による軽量化は、それを支える部材の薄肉・細径化を可能として更なる軽量化の促進と燃費向上に貢献できる。また、このプロジェクトで得られる成果を他分野へと応用・展開することによってマグネシウム市場の拡大、ひいては材料分野全体の活性化にもつながると考えられる。



組織名：株式会社トヨタカスタマイジング&ディベロップメント

[テーマ番号 2 7] 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2018年度～2022年度)

(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

車体軽量化とコストの両立が期待される熱可塑性樹脂炭素繊維強化複合材 CFRTDの中で最も低コストなLFT-Dの実用化に向けて、車体設計へ展開できる技術開発や接合技術開発の推進を行っている。

(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

- ・ LFT-Dの成形性を考慮した板厚最適化形状の検討方法。
- ・ 軽量化、高強度、低コスト化を目指した最適構造の検討。
- ・ 車体部品との相関のある成形構造連成解析手法の検討
- ・ 高速溶着技術の実証

(3) 波及効果

LFT-D成形技術の確立によって、マルチマテリアル車体設計における材料の選択肢の幅が拡がり、軽量・低価格化を実現できる新たな車体構造の提案に繋がることが期待される。さらには自動車以外にもCFRTDの構造部材採用が期待されることで、炭素繊維産業にとって良い経済的効果が期待される。

[テーマ番号 5 9] マルチマテリアル車体軽量化に関わる革新的設計技術の開発  
(2021年度～2022年度)

(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

自動車や航空機等輸送機器の軽量化には、異種材料を適材適所に配置したマルチマテリアル構造の導入が、必要不可欠である。しかし、その設計手法は確立されておらず、現状では単なる材料置換にとどまっている。マルチマテリアル構造最適化の設計手法等の確立をはじめとした総合的な技術開発が急務となっている。

これらの課題を解決するため、本研究の中で開発されたマルチマテリアルトポロジー最適化法の実用化先として、当社ではマルチマテリアル構造化が進んでいる自動車の車体設計への適用をターゲットと考えており、実用化されれば自動車メーカーが数年規模の期間とコストを費やす量産車開発の期間やコストの削減につながるものと考えられる。

そこで、2022年度はマルチマテリアルトポロジー最適化を用いたベンチマークとなり得る既存車体の衝突特性、静・動的剛性を有する軽量なマルチマテリアル車体を提案することを目標に研究を進めた。

## (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

マルチマテリアルトポロジー最適化によって得られたマルチマテリアル車体は、断面内部を補強する構造を有さない空洞状となっており、板厚も設定されていないため、断面構造や板厚について設定する必要がある。

そこで、当社では 2022 年度のマルチマテリアルトポロジー最適化によって得られたマルチマテリアル車体に対し、ベンチマークとなり得る既存車体の衝突特性、静・動的剛性を満足するとともに軽量効果の高い断面構造や板厚の設定に向けて、検討に取り組んだ。

これらの検討および検討の良否確認は、ベンチマーク車体の静・動的剛性を基としたマルチマテリアル車体の板厚最適化によって得られた板厚分布や質量を、ベンチマーク車体と比較することで行い、衝突特性は衝突解析にて確認した。

取り組み①：マルチマテリアル車体の板厚最適化における非設計部品について検討した。車両の衝突特性は車体のみで得られている訳ではないことから、車体以外の各部品についても衝突解析結果を分析することで、車体と同レベルで衝突特性に寄与している部品（衝突機能部品）を非設計部品として洗い出した。衝突機能部品を非設計部品として板厚最適化することで、車体のみで目標を満足する必要がなくなり、余計な質量や性能を得ることを対策できた。

取り組み②：ベンチマーク車体の衝突特性、静・動的剛性を満足する板厚最適化条件について検討した。最適化条件の検討にあたり、ベンチマーク車体の剛性解析や衝突解析の結果から剛性値や変形モードを分析し、その結果を基に板厚最適化したマルチマテリアル車体を衝突解析することで、ベンチマーク車体の衝突特性、静・動的剛性を満足する最適化条件を得た。

取り組み③：①、②でマルチマテリアル車体の板厚最適化におけるベンチマーク車体の衝突特性、静・動的剛性を満足する非設計部品および条件が得られたので、現在は断面構造や板厚の検討による軽量化に取り組んでおり、検討対象（最適化）部におけるベンチマーク車体質量に対して、43%の軽量化に達している。

今後、50%の軽量化を目標に、引き続き軽量効果の高い断面構造や板厚等の設定について検討していく。

## (3)波及効果

マルチマテリアルトポロジー最適化法によって、マルチマテリアル構造化が進んでいる自動車の低予算開発が実現されれば、自動車価格は下がり、新車の販売台数の増加や、それに伴う中古車市場の拡大によって、世界的な自動車の更なる普及による大きな経済効果につながっていくものと考えられる。

組織名：トヨタ自動車株式会社

[テーマ番号 27] 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2014年度～2022年度)

(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

・実用化・事業化に向けた戦略

軽量素材であるCFRPの有力候補の一つとしてLFT-D技術を位置付けており、名古屋大学集中研にて検討中の大型アンダーフロアの成形加工結果を受け、自社にてさらなる成形性、及び力学特性の向上により実用化を図る。

・事業化した場合に対象となる製品、市場規模

LFT-D技術は当初の目標を達成できれば、アルミなどの競合材料と比較して、比剛性が同等以上となることから、対象製品の候補の一つとして、剛性部材への適用が考えられる。

環境対応車#1を頭出しとし、環境対応車#2へ展開。その後、市販車へと展開予定（但し、市場規模は現時点での正確な予測は困難）。

・競合技術に対する優位性（性能面、コスト面）

競合技術となるアルミに対する優位性（軽量化、部品コスト同等）を確保するためには、材料コスト低減、設計合理化、材料製造時や部品製造時（成形加工時）のCO<sub>2</sub>排出量の削減、リサイクル技術確立などの課題の克服が不可欠。

・量産技術確立の見通し

主な課題として、①LFT-D材料特性の向上とばらつき低減、②材料コスト低減、③CO<sub>2</sub>排出量低減、④最適構造設計、⑤ハイサイクル一体成形加工技術がある。

環境対応と材料コスト低減に向け、リサイクルCFを活用した材料開発が必須。

リサイクルCFの活用を含む、これまでの名古屋大学集中研の検討結果を受け、実用化に向けた検討を引き続き推進し、これらの課題解決を図ることができれば、実用化の期待は高まる。

(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

・上記の実用化・事業化に向けた戦略に関する具体的な取組状況または計画

NCCで培われたLFT-D基礎技術をベースに、自社の検討内容も織り込んで、LFT-Dの材料特性を見極め、対象製品候補を検討。

対象製品候補の要求性能に基づく適用検討やコスト競争力の検討を推進し、CFRP部品の実用化を図る。

・自社で実用化しない場合は誰が実用化するのか

LFT-D技術は不連続繊維強化樹脂複合材に分類される。他の不連続繊維強化樹脂複合材を用いた自動車部品の製造の実績を有する、または、製造を検討される企業による実用化を期待。

### (3)波及効果

- ・テーマの目的・目標以外に顕著な波及効果（技術的、経済的、社会的、人材育成等）がある場合に記載

大型一体成形化(モジュール)により、従来の車両構造や、製造の抜本的な革新を起こす。→ 日本の自動車産業構造の革新へ

大学や異業種を含む他企業との密な産学連携を通じて、非常に豊富な技術知識の習得による技術者としての人材育成と、幅広い人的交流による人的ネットワーク構築への効果が大きい。

組織名：豊田通商株式会社

[テーマ番号 27] 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2022年度)

**(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

2035年予測で使用量が増加する見込みのCFRPの内、自動車・風力発電ブレード用途由来のスクラップを対象に水平リサイクルの実現に向けて検討を行う。

具体的には工程廃材のプリプレグ、及び使用済自動車やブレードからの炭素繊維の回収技術を有する企業との提携により、炭素繊維スクラップのリサイクル実現及び事業化に向けて検討を行う予定である。

**(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組**

水素自動車に搭載されている水素タンクからの炭素繊維の回収及び中間基材への加工トライアルの実施に向けて検討する。

最終的には炭素繊維の回収及び自動車構造体等へのリサイクル炭素繊維の利活用による水平リサイクルの実現に向けて取り組みを行う予定である。

組織名：株式会社日産アーク

[テーマ番号 5 2] 中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発  
(2017 年度～2022 年度)

(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

自動車を始めとする輸送用機器では、軽量化を主眼とする構造革新を迅速に進めることが課題であるが、その信頼性担保の手法を疲労試験に委ねる従前の方式は、実用化の大きな阻害要因となっている。この課題に対する解として最も有望なのが、中性子線などの量子ビームを活用した解析で、「非破壊」、「その場観察」を可能とする技術への期待は大きい。小型中性子解析装置の構造材料評価の基盤技術としての測定・解析手法の開発や、中性子等の他の量子ビームにおける相補的な分析手法の構築、また、これらの成果を技術研究組合 ISMA の組合員と共有、展開し、小型中性子解析装置及び中性子等量子ビームを用いた材料開発技術を深化させる。当面は技術組合 ISMA 内で小型中性子解析装置用いた構造材料の測定・解析手法の開発に集中し、金属組織解析技術等の開発に取り組み、革新鋼板、高強度鋼板等の構造材料の開発促進、異種材料接合の分析解析技術の高度化へ寄与する。プロジェクト終了後には構造材料以外の産業界（構造材料、輸送用機器を中心に、電池、電気、電子、エネルギー領域へ拡大）に、中性子線を活用した分析・解析サービスに寄与する。

市場規模算出の根拠：材料分析の国内市場は約 2000 億円（「平成 28 年度 検査・分析委員会 活動報告書」（一般社団法人 研究産業・産業技術振興協会発行））であり、上記の内、鉄鋼、輸送機器、電池、化学素材、電気電子業界の研究開発での材料、部品分析外注費の推定総額が約 200 億円であり、本分野において小型中性子解析装置は研究開発の促進に効率的に寄与すると考えられる。

本プロジェクトにおいて開発する小型中性子解析装置の競合技術としては、主に電子線、X 線となるが、中性子は透過能が高く電子線、X 線では透過できないような数 cm 厚さの鋼板などを分析することが可能となる。また、今回の小型中性子分析装置はブラッグエッジ・イメージングを可能としており、今までブラッグエッジ・イメージングは大型施設（J-PARC）のみで可能であったが、本装置は J-PARC と同等の波長分解能を有し、小型であることから J-PARC と比べランニングコストも安価であり、様々なユーザーに利用が提供可能である優位性がある。

中性子解析の産業利用を促進するためには、解析技術を産業界（企業）の目的に応じた形にカスタマイズして提供する必要がある。この際には、ユーザーの秘匿管理および知財に関する権利保護の視点は強く求められる。また、企業には必ずしも中性子データ解析の経験、知識を有する人材がいない場合も多く、産業利用拡大の阻害要因になる。また解析サービス開始にあたって、施設運営組織、機関との委託・受託関係の調整が必要である。これらに関しては特に研究開発内容である中性子構造材料解析ネットワークの構築の中で、装置側や材料ユーザー側との議論や意見交換を進めることで解決していく。

## (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

産業技術総合研究所の協力の下で、中性子の金属組織解析技術の一つであるブラッグエッジ・イメージングを用いた摩擦攪拌点接合（FSSW）の解析技術、および、異種材料接合の中性子全方位散乱データをリートベルト法によって集合組織、残留応力、微小歪みの解析技術を2020（令和2）年度末までに確立させた。また、引き続き放射光をはじめとする他の量子ビームを積極的に活用し、小型中性子分析装置との相補的な計測・解析を実施することで、さらに革新鋼板、異種材料接合技術開発の進展をサポートしていく。具体的には鋼板、アルミなどの異種材接合の強度と関係するパラメータ（集合組織、残留応力、微小歪み）を明確にし、開発を促進させる。また、金属-接着剤界面と界面強度の関係を議論し、中性子と他の量子ビームの相補的な分析によって明らかにする。中性子構造材料解析ネットワークの構築については、まずプロジェクト後半から ISMA 内での情報共有、展開を実施する。プロジェクト終了後は ISMA で構築した技術を ISMA 非組合員企業、他業界、特に電池、電気、電子、エネルギー領域への事業拡大に繋げる。また、引き続き、産業技術総合研究所の協力の下で、今まで中性子を利用したことがないユーザーに対して、小型中性子装置の優位性をセミナー等により説明し、新たなユーザーの創出を進める。

## (3)波及効果

自動車、輸送機の鋼板、接合の技術開発、実用化にとって透過能の高い中性子構造材料解析技術は必要不可欠であるが、現状、J-PARC でのみ実施可能な状態である。現状、利用機会が少ないことが中性子の認知度を下げている。このような状況下、小型中性子分析装置が設立される意味は大きい。この小型中性子分析装置が町医者的な役割を担い、今まで中性子を使用しなかった企業にも身近な技術として浸透する。それによって構造材料への中性子の有用性が理解され、中性子構造材料解析技術が普及し、更に中性子構造材料解析技術が発展する。また、中性子解析技術に触れる人材が増えることで中性子解析技術に魅惑され興味を持つ人材も増えることが予想される。様々な人材が中性子分析技術に携わることで、多様性が増し、今まで思いつかなかった利用などへも進展する可能性がある。「中性子を使うことの面白さ・有用性」を身をもって体験できる機会を提供、拡大できるのも重要なテーマである。また、中性子は電子線、X線と違って水素、リチウムなどエネルギー分野で重要な元素に対して感度が強く、詳細な議論が可能となり、エネルギー問題に対する課題解決に大きく関与する可能性がある。小型中性子分析装置を活用した解析のニーズは、構造材料を中心に電池、電気電子、エネルギー領域の多方面に拡大し、また、小型中性子装置の安価なランニングコストによって新規ユーザーを獲得しやすく、中性子利用ユーザーが増加し、小型中性子装置のニーズが高まっていくことが期待される。

組織名：日産自動車株式会社

[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発  
(2014 年度～2017 年度)

[テーマ番号 65] マルチマテリアル車体における防食表面処理評価技術の開発  
(2014 年度～2017 年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

本事業で創出された技術成果をもとに、金属と CFRP のハイブリッド構造による軽量化技術開発を進めている。金属、CFRP それぞれの特徴を活かすことによりコストと軽量化のバランスを図る。詳細設計、試作、実車試験に取り組み、自動車製品としての性能（適用車体形状における剛性、衝突、運動性能など）及び生産性（車体組立工程検討、車体寸法精度など）の実証を進めている。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

市場ニーズは、依然、CFRP=高性能、であり、少量生産に限られた高額な車種に限られると考えられている。マーケットとの最初のコミュニケーションはこういった高性能で高額な車で始まるが、低廉化・量産技術を進化させ、CFRP の特性を生かした高性能以外の付加価値をつけたうえで、量産車への展開させることができる。

### (3) 波及効果

本事業で扱う技術開発により、自動車部品に限らず他産業分野でも有用である材料技術や設計手法を生む波及効果がある。自動車は航空機と違い、様々な使用者により、様々な使い方を受ける状況で品質と安全性を確保しなければならない過酷な使用環境に晒される。従って本事業の技術開発により、CFRP が最も過酷な使用環境に耐える技術的知見が見出される可能性があり、この知見は他産業分野の CFRP 適用推進にも効果があると推定する。



組織名：日本製鉄株式会社

**[テーマ番号 1 1] チタン薄板の革新的低コスト化技術開発 (2014～2020 年度)**

**(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

本開発の対象となる市場は、耐食性が主な要求特性である用途（板式熱交換器、電力、化学向け等）や高価ゆえに活用が進まなかった用途（自動車向け（足回り、マフラー等）、民生品）であり、現在のチタン展伸材市場の半分以上を占める。さらに、低コスト化を図ることにより、現行のチタン市場の置き換えではなく、新たなメガ市場を創出することも期待される。

本開発では、実用製品（チタン薄板コイル）の試作とコスト実証までを行った。また、当社既存設備（圧延機等）を最大限活用して大型設備投資を抑えることができる。これらにより、速やかに実用化を図る。

**(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組**

本開発により、低コストのチタン薄板や、その特徴を活かして引張強度・延性バランスを向上させた従来にない高機能チタン板が得られる。これらにより、品質特性を向上しつつある中国製や韓国製チタン薄板より、競争力のある、低コストで強度・延性バランスの優れたチタン薄板の製造が可能になる。

「高効率チタン薄板製造技術開発」で得られた成果は、製品への適用用途を見極めた後、速やかに日本製鉄株式会社が実用化する見込みである。

「チタン新製錬技術開発」は、本開発の結果、実用化の目途があるとの判断がなされた場合、製錬メーカーを中心に、実機化検討やパイロットラインによる検証を実施する。日本製鉄株式会社は、展伸材メーカーの立場から検討を推進する。

**(3) 波及効果**

チタン材の低コスト化により、チタン材の利用が大きく促進され、様々な波及効果が期待される。例えば、チタン材は、現在自動車に主に使用されている鋼材に比べ、密度が小さく比強度に優れているため、チタン材を有効に活用することにより輸送機器の燃費向上によるエネルギー消費量と CO2 排出量の削減ができると期待される。

**[テーマ番号 2 3] 軽元素を有効に用いた革新鋼材の耐食性および成形性向上技術の開発 (2014 年度～2022 年度)**

**[テーマ番号 2 5] 中高炭素鋼ベース高強度高延性複層鋼板の開発 (FS 研究) (2014 年度～2015 年度)**

**[テーマ番号 4 4] 中性子線による構造材料解析技術の Feasibility Study (2015 年度～2016 年度)**

**[テーマ番号 4 7] 異相界面腐食解析の基盤技術開発 (FS 研究) (2017 年度)**

[テーマ番号 4 8] 超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発 (FS 研究) (2017 年度)

[テーマ番号 5 2] 中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発 (2017 年度～2022 年度)

[テーマ番号 6 1] 超高強度鋼板の腐食挙動解析技術の開発 (2018 年度～2020 年度)

[テーマ番号 6 2] 超高強度薄鋼板の水素脆化挙動評価技術の開発 (2018 年度～2020 年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

中間目標である引張強度1.2GPa-伸び15%高張力鋼板の開発は、1年間前倒しで開発が完了した。最終目標である1.5GPa-20%高張力鋼板の開発は、5年間前倒しとなる2017年度末に実験室レベルでの試験片ではあるが、目標特性を得て、基礎開発完了した。2017年度からは水素脆性や腐食など高強度鋼板に不可欠な課題に協調して取り組んだ。2017年度はFS研究(テーマ47、48)として取り組み、プロジェクト後半となる2018年度から3年間本研究(テーマ61、62)として取り組んだ。革新鋼板の実用化・事業化について、各分担研が独自に実機における製造性を検討するとともに、自動車メーカーなどと協議し開発を進める。複層鋼板のFS研究(テーマ25)では、硬い鋼と軟らかい鋼の複層化による大幅な延性改善が確認されるなど有用な知見も得られたが、単層鋼での目標達成に目途が付いたことから、2015年度末にFS研究を完了した。

自動車材料のさらなる軽量化が求められており、自動車の軽量化に寄与する高張力鋼板のニーズは継続的に高く、1.5GPa級冷間プレス用鋼板の需要が多く見込まれる。

また、中性子線による構造材料解析技術についても、2015年度からFS研究(テーマ44)として取り組み、小型中性子線源、大型中性子線源の構造材料解析への適応性や計測精度の現状を定量的に明確化し、中性子施設の利活用方法や現在不足している施設要件を明らかにした。2017年度から6年間本研究(テーマ52)に組み込み、第二相ナノ析出物の化学組成の変化、水素トラップに効果的な析出物形態の解析手法の確立を行った。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

中間目標の1.2GPa鋼板および最終目標の1.5GPa高張力鋼板の事業化、実用化については、分担研各社の戦略、事業環境に従う。高張力鋼板の社会実装時に重要となる腐食と水素脆性評価技術について、協調して研究開発を行い、共通基盤技術として有益な解析技術を獲得した。革新鋼板の早期市場実装にむけ、分担研各社において、継続的な製造性、信頼性向上研究を進め、実用化、事業化の可能性を各分担研が検討していく。

### (3) 波及効果

レアメタルを多量に含まない高張力鋼板の製造技術を、より低強度の鋼板の製造技術に転用することが可能となった。また加工性に優れた1.5GPa高張力鋼板が自動車用

材料に適用され自動車の軽量化に寄与すれば自動車の燃費向上によるエネルギー消費量と CO<sub>2</sub> 排出量が大幅に削減される効果が見込める。また、本研究開発で得られた知見は、自動車用鋼板以外の幅広い材料にとって有益な知見となろう。本テーマでは、基礎研究について大学への再委託を行っているが、最先端の研究を通じて材料工学分野の人材育成に貢献している。

**【テーマ番号 03】 中高炭素鋼の革新的接合技術の開発（2014 年度～2017 年度）**

**【テーマ番号 46】 摩擦接合共通基盤研究（2016 年度～2022 年度）**

### **(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

環境問題を背景とした高燃費化（CO<sub>2</sub> 排出量の削減）や衝突安全性能の向上要求を受け、高張力鋼板の適用拡大が進んできた。例えば、自動車用のピラー類などいわゆる骨格部材においては 1.5GPa 級の中高炭素鋼が実用化されている。

当社は中高炭素鋼の溶接方法として、ワイヤによる溶接金属調整を狙ったアークスポット溶接法（テーマ 03）の開発を行ってきた。しかしながら、さらなる超高張力鋼化（高 C 化）を踏まえると、溶融接合法を用いた改善だけでは、必要な継手特性を確保することが困難になると考えられ、非溶融の摩擦接合の必要性が高まることが予想される。

信頼性のある摩擦接合技術の実用化・事業化に向けては、既存の実績ある溶融接合技術との比較を行い、その位置づけを明確化する必要がある。当社は、本プロジェクトにおいて、中高炭素鋼（C>0.3%）を対象として、代表的な既存溶融接合法である抵抗スポット溶接およびレーザー溶接の継手強度基礎データ収集を行い、摩擦接合の実用化を支援する。

将来的には、当社が従来より進めている、鋼板と利用技術をセットで提案する取り組みにおいて、中高炭素鋼の特性を発揮するための接合ソリューション技術としての活用が期待される。

### **(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組**

前述の通り、当社は摩擦接合技術の実用化支援として、抵抗スポット溶接およびレーザー溶接に関して、中炭素鋼（C>0.3%）の継手強度特性の明確化を目指す。抵抗スポット溶接では、引張せん断強さ（TSS）および十字引張強さ（CTS）を明確化する。また、後通電を行った場合の TSS および CTS も調べ、抵抗スポット溶接の実力値を把握する。レーザー溶接では、重ね溶接および突合せ溶接継手の強度特性を明確化する。

### **(3) 波及効果**

新しい摩擦接合法により、中高炭素鋼が車骨格部材として広く普及されれば、車体の軽量化による燃費向上、CO<sub>2</sub> 削減が可能になる。また、中高炭素鋼の接合に関する基礎知見が得られ、担当技術者の技術力向上に役立つことが期待される。

組織名：日本パーカライジング株式会社

[テーマ番号 3 5] 革新的マグネシウム材の鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発（2019 年度～2022 年度）

[テーマ番号 5 7] 超高強度化材料の潤滑加工性向上と異種材料接合部の塗装後耐食性向上技術の開発（FS 研究）」（2018 年度）

[テーマ番号 6 5] マルチマテリアル車体における防食表面処理評価技術の開発」（2019 年度～2022 年度）

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

テーマ 6 5 で提案する融雪塩散布地域型ガルバニック腐食評価法は我が国共通の大気腐食環境下におけるガルバニック腐食評価法として規格化する計画である。絶対湿度一定環境での腐食評価法として ISO16539 法が提案されており、これに従い新たな環境下での評価法として追加提案する。テーマ 3 5 で提案したマグネシウムを対象としたマルチマテリアル材料同時化成処理技術はマグネシウムを市場化する際の塗装下地として適用することが可能であり、材料開発の最適化に合わせて組成を調整することで市場展開が可能な状態である。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

ISO TC156 WG6 は腐食評価法に関する ISO 基準設計を行っており、本会への規格化提案を実施している。2023 年度に規格化起案し、実施へと移行する計画。

### (3) 波及効果

共通のガルバニック腐食評価法を用いることで、マルチマテリアル車体向け材料の評価を効率化することができ、また、テーマ 6 5 で提案する「腐食環境と材料組み合わせによるガルバニック腐食リスク分類」を活用することで最適且つ効率的な材料開発もしくは防食技術開発に貢献することができる。また、マグネシウムを対象としたマルチマテリアル材料同時化成処理技術を用いることで腐食環境にて用いられるマグネシウム材料を市場化することが可能となる。

組織名：日立金属株式会社（現：株式会社プロテリアル）

[テーマ番号08] 難接合性材料の線接合技術の開発（2014年度～2017年度）

[テーマ番号33] 革新的 FSW による超ハイテン接合部材の開発

のうち

②ロボット適応制御 FSW による超ハイテン部材アセンブリ技術の開発」（2018年度～2021年度）

#### (1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し

超ハイテン鋼やチタン合金などの高強度材料は、従来の溶融接合法では溶接部の強度低下や接合品質などの課題が多く、実用化はほとんどなされていない。これらの難接合材を接合する方法の一つとして FSW が期待されている。FSW はアルミニウム合金や銅合金などを中心として実用化が始まり、広く普及している技術ではあるが、超ハイテン鋼やチタン合金等の高強度材料への適用はツールの耐久性の問題や高価なツールを用いることからなされていない。

今回の研究開発では、難接合材向けの FSW 用ツール合金として、Co 合金の適用可能性について接合条件等を詳細に評価し、大きな品質劣化やツールの致命的な損傷なく、目標とした長距離接合を達成する目途が得られた。これらの高強度材料の接合が可能となれば、自動車や航空機、鉄道車両などの輸送機器部材の軽量化やマルチマテリアル化に貢献できるとともに、FSW ツール市場規模の拡大につながる。

本研究開発を行った日立分室は、合金開発、マスターインゴット製造、ツール製造、接合評価、装置開発が一体となった実施体制が強みである。FSW ユーザーのニーズを分室内で共有化し、そのニーズが具体化した時点で状況に応じて事業化を判断していく。

既に量産化されているアルミニウム合金、銅合金、マグネシウム合金等の比較的強度の低い材料については、摩擦攪拌時の塑性変形に要する応力が小さく、接合温度を低く維持できるため、合金工具鋼製のツールが使用されている。一方、超ハイテン鋼やチタン合金などの難接合材料の FSW では、接合温度が 1000℃程度の高温となるため、PCBN 等のセラミックス系の材料等が使用されているが、非常に高価なため量産化されていないのが現状である。開発した FSW 用ツール合金は、既存のセラミックス系の材料より安価であり、かつ折損のリスクも少ないと考えられ、量産使用時の耐久性の確保ができれば競争力があると考えている。これらは使用条件、被接合材にも依存し、万能ではないので適した用途に展開できるかどうかは課題と考える。

FSW 用 Co 合金ツールは（株）日立メタルプレジジョンの精密鋳造によって製造される。当社はその溶解に必要なマスターインゴットの量産技術の確立を目指し、実験溶解炉を用いた多くの溶解実績を重ね、ノウハウの蓄積を行い、技術確立を行ってきたため供給の準備は整いつつある。しかし、本格的な実用化・事業化の時期は顧客の要望に依存しており、まだその段階には達していないため、実用化・事業化は今後市場動向を注視ながら、状況に応じて判断していく。

Co 合金ツールの耐久性については、接合条件等を詳細に評価し、大きな品質劣化やツールの致命的な損傷なく、目標とした長距離接合を達成する目途が得られた。し

かし、ツールとしての性能は使用条件や被接合材にも依存し万能ではないので、これらを適正化する情報を顧客と共有することで長距離接合化を達成することを見込む。

### **(2)実用化・事業化に向けた具体的取組**

実用化は、(株)日立メタルプレシジョンが直接最終ユーザーである自動車車体、航空機、鉄道車両並びに半導体製造装置関連のメーカーに FSW ツールを販売するか、もしくは FSW 用装置を販売する(株)日立パワーソリューションズなどを介して販売されることを想定しており、弊社はツール素材である合金のマスターインゴットを供給する形でビジネスを行うことになる。なお、2026年までに計画されている Co 合金ツール生産量から試算したマスターインゴットの溶製重量は、既存設備で十分対応可能であることから実用化にあたり大きな障害はないと判断する。

### **(3)波及効果**

FSW 接合技術が普及すれば、今まで接合することができなかった種々の材料、異種材料の接合の可能性が開け、材料選択の幅が広がる。今まで使えなかった新素材が使用可能となったり、組み合わせの自由度が高まることによる技術的、経済的効果が期待される。また、本開発を通じて、大学、企業の材料技術者、接合技術者、装置技術者との交流により、多様性を許容、活用できる人材育成の効果も期待される。

組織名：株式会社日立製作所

[テーマ番号08] 難接合性材料の線接合技術の開発（2014年度～2017年度）

[テーマ番号33] 革新的 FSW による超ハイテン接合部材の開発  
のうち

②ロボット適応制御 FSW による超ハイテン部材アセンブリ技術  
の開発（2018年度～2021年度）

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

本プロジェクトで得られたチタン合金やハイテン鋼の知見をベースに、社内およびグループ会社を中心に溶接部材のニーズ調査をする。その中から FSW の適用が有効と判断される部材に対して、試作と評価を実施する。これにより、チタンまたはその他の高融点材料の FSW の有用性を実証して、事業化の突破口を切り開く。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

日立分室の開発内容を大別すると、FSW 装置、FSW ツール、接合技術の三つとなる。FSW 装置、FSW ツールは独立して事業可能であり、それぞれの営業チャネルを活用して、事業化に向けた活動を既に開始している。事業は独立していても、顧客は共通している場合も少なくないことが判ってきたため、顧客のニーズに従い、技術的な相談をする相手を日立分室内で相互に調整する体制も整っている。今後は実用化することを主眼に試作や試験を積極的に推進する予定である。

### (3) 波及効果

熔融溶接が難しい高融点材料、高機能材料は、有効な接合技術が確立していないのが現状である。このことが、これらの材料の適用が拡大しない一因と考えている。本技術の確立により、高機能材料の適用拡大が期待できる。

組織名：株式会社日立パワーソリューションズ

[テーマ番号08] 難接合性材料の線接合技術の開発（2014年度～2017年度）

[テーマ番号33] 革新的 FSW による超ハイテン接合部材の開発  
のうち

②ロボット適応制御 FSW による超ハイテン部材アセンブリ技術  
の開発（2018年度～2021年度）

### (1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し

自動車分野を中心とした接合に関するニーズを深掘り調査するとともに、本テーマにおける開発技術をベースに、FSW 装置の高付加価値化による接合品質向上及び省スペース化などによる実用性向上を図り、さらには FSW データ管理システムによるオペレータ支援システムや接合ツール寿命などの予兆診断までも含めた高効率生産システムとしてソリューションビジネスへの展開を目指して行く。

自動車などの輸送機器において、燃費向上によるエネルギー消費量削減と CO<sub>2</sub> 排出量削減による耐環境性の向上には軽量化が必須条件であり、現在、自動車メーカーや部品メーカーにおいて超ハイテン材、アルミ合金、マグネシウム合金や CFRP などの樹脂を採用したマルチマテリアル化が進展している。こうした市場環境の中、超ハイテン材などの難接合部材の接合手法として、本テーマ推進により FSW のニーズが加速されることが見込まれ、国内外を問わず FSW 装置や関連システムなどのニーズは飛躍的に拡大していくことが期待され、その経済効果も大きいと推測する。

プレス成形部材のアセンブリ接合において、従来の工作機タイプの FSW 装置で部材形状に対応するためには 5 軸同時制御で複雑な装置構成となり、汎用性も低いため自動車分野における生産設備への適用が容易ではないと推測されることから、汎用性が高いロボット FSW 装置を製品ラインナップに追加するとともに、費用対効果が高いシステム提案により市場における優位性が得られると考える。

本テーマで開発したロボット FSW 装置に使用している多関節ロボットは、従来の工作機タイプに対し、動作の自由度が高く、ローコストでスペース効率にも優れているというメリットがある。その一方で、多関節構造による剛性の低さが接合品質に影響することが実験により分かり、実用化する上で接合品質を向上するための施策が課題となると考えた。この課題に対して、ロボットに掛かる接合負荷の軽減を目的とした小型ヘッドを開発し、さらに接合負荷変動や材料表面状態変化などに適応することを目的とした適応制御システムを開発した。本開発により自動車部品の生産設備として、量産技術確立に寄与できる見通しを得ることができた。

### (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

本テーマにおいて日立分室で実施した FSW 接合プロセス技術開発、FSW ツール量産技術開発及び FSW 装置開発により得られた成果をもとに自動車分野を中心に FSW 装置ビジネスの進展を目指す。具体的には、顧客の製品開発から参画し、顧客製品固有の問題解決において本開発で得られた技術を活かした提案を行うことにより、実用



化および適用製品の拡大に向けた取組を行う。

### **(3)波及効果**

自動車車体の軽量化を目的としたマルチマテリアル化の拡大において、従来技術では接合が困難である超ハイテン材など難接合部材の接合技術開発により、燃費向上によるエネルギー消費量削減と CO<sub>2</sub> 排出量削減など耐環境性の向上で地球温暖化防止に寄与できるものとする。

また本テーマにおける FSW 技術開発は、超ハイテン材のみに留まらず、従来のアルミ合金、銅合金、異材などの接合ニーズに対しても有用な新技術であると考えられ、FSW 装置ビジネスの進展が期待される。

組織名：株式会社日立メタルプレシジョン  
(現：株式会社プロテリアルプレシジョン)

[テーマ番号08] 難接合性材料の線接合技術の開発 (2014年度～2017年度)

[テーマ番号33] 革新的 FSW による超ハイテン接合部材の開発

のうち

②ロボット適応制御 FSW による超ハイテン部材アセンブリ技術の開発」 (2018年度～2021年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

高融点材の接合用に開発する Co 基合金 FSW ツールは、精密鋳造法を用い鋳造から加工完成までを行い、比較的安価に製造する量産化技術を確立することを目的とし、ツールの高温耐久性を上げた種々の開発合金を鋳造して課題を抽出したうえで、バラツキを抑えたツールを供給することにより実用化を目指していく。

現在車体に実装されている超ハイテン材は、焼入れ性を高くして薄板でも強度が確保できるため、自動車に代表される輸送機器の軽量化に大きく貢献することから、今後も市場規模の拡大が期待される。一方 C が高くなることによって溶接が困難になることから新しい接合方法が必要とされている。接合強度が高く歪の少ない FSW はこれらの車体接合に適していることから、耐久性があり且つコストを抑えたツールを供給することで、更なる軽量化の実現と FSW 市場の拡大が見込まれる。

最近では企業との共同研究により、マグネシウムやチタン、鋼材の接合や接合ツールの研究も進み、JIS化も進んでいる。中でも自動車の燃費向上やCO2削減による耐環境性の向上には車体重量の低減が必須の条件であり、自動車・部品メーカーにおいては部品の超ハイテン、アルミ、樹脂等のマルチマテリアル化が進展していることから、これらの材料接合のためFSWのニーズは更に拡大していくものと推測する。

高融点材のツール材としては、高温強度を高めるため貴金属を添加した合金材料の W-Re 合金、Ir 合金や、超硬合金、PCBN 等が開発されているが、非常に高価であり量産化されていないのが現状である。弊社では高融点材料に対し有望な Co 基合金ツールを、精密鋳造法で安価に製造する量産化技術を確立した。一方で本研究開発を行った日立分室は、合金開発、マスター製造、ツール製造、接合評価、装置開発が一体となった実施体制が強みであり、拡販開発及び実用化に向けてグループで取り組んでいく。

本研究で、Co 基合金 FSW ツールを精密鋳造法で安価に製造する量産化技術を確立した。ツール価格を安くするためには生産量の確保によるニアネットシェイプ形状の金型が必須となるため、ニーズを捉えた販路開拓を行う。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

FSW 接合の市場ニーズは環境問題の観点や EV 化による重量増から更なる軽量化、マルチマテリアル化が進むと期待される。輸送機器産業を主体に鉄鋼製品が多用されていることから、軽量化は推奨され超ハイテン化や異種材料の接合が普及することで、

FSW の需要は更に進展すると考える。FSW が有効と思われる、自動車車体関係、鉄道車両、半導体製造装置分野に於いて FSW 実績ある顧客を中心に、本研究で得られたツール形状や接合条件等を合わせた提案を行い、環境問題の観点からも、溶接に変わる接合プロセスとして新規顧客への提案も推進する。一方で超ハイテン材やチタン材の普及状況、接合方法の動向やニーズをリサーチの上事業拡大の可能性をウオッチしていく。

### **(3)波及効果**

低融点材料の FSW が実用化されているように、高融点材料の FSW が普及することで、超ハイテン材や異種材料の組み合わせ等が可能となり、製造方法にも変化を起こすと考えられ、技術的・経済的な効果が期待される。また本開発を通じて分野を超えた異業種との多様な交流と深耕、人材育成の効果も期待される。

組織名：福井ファイバーテック株式会社

[テーマ番号 27] 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2018年度～2022年度)

[テーマ番号 28] 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工基盤技術の開発  
(2013年度～2017年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

CFRTP 材料として、①多軸挿入機による連続繊維中間基材 ②薄層ストランドによる長繊維中間基材 ③熱可塑性引抜成形による最終成形品 ④熱可塑引抜成形品の応用展開による中間基材 を創製することにより、繊維加工メーカーとして事業化を図る。特に、④については引抜成形法による連続生産により、大幅なコスト低減が期待できる。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

上記①・②については、原材料の適正化や生産性等の量産を考慮した生産技術確立の検討を進めている。③については、使用材料の見直しや基材との複合化により大型化や複雑形状への対応の可能性を検討している。④については、薄層引抜成形の安定した連続生産を目指して、強化繊維や成形条件の最適化検討を実施している。

### (3) 波及効果

自動車用途はもとより、使用し易い・加工し易い材料とすることで、他の産業用途としての需要が高まる。特に、熱可塑引抜成形品は熱硬化引抜成形品と異なり、加熱により後加工（曲げ・溶着）ができることから、これまで熱硬化引抜で参入できなかった分野への新規参入に期待ができる。また、連続生産による低コスト化により、汎用材料として中小企業中心の複合材料成形加工メーカーへの展開が浸透すれば全体的な業界の底上げが期待できる。

組織名：不二ライトメタル株式会社

[テーマ番号18] 高強度マグネシウム材（押出材）の開発  
（2013年度～2017年度）

[テーマ番号34] 革新的マグネシウム材の開発および信頼性評価（2018年度）

[テーマ番号35] 革新的マグネシウム材の鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発（2019年度～2021年度）

[テーマ番号60] マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション（MI）活用技術の開発（2018年度～2022年度）

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

本テーマは高性能マグネシウム合金展伸材の開発と、その適用技術の確立を通して、構造用部材としての実用化を推進することを目的としている。鉄道部材開発については「次世代高速車両構体」を、自動車部材開発については「ドアビームやフロントフード」をターゲットとし、ユーザー側からの意見を常に取り入れつつ研究開発を遂行した。鉄道部材開発については、疲労特性等の信頼性データを予測するためのMIシステムの開発も並行して進めた。

本テーマでは、研究開発段階からターゲットを強く意識した「ものづくり技術」を構築することを重要視しており、鉄道部材では2015～2016年度には車両構体を想定した部分（側パネル）構体の試作開発を、2017年度には1/1断面（長さ1m）のモックアップ構体の試作開発を、2019年度には1/1断面（長さ5m）の気密構体モックアップの試作開発を実施した。また、2022年度までに、疲労特性等の信頼性データを予測するためのシステムを開発することを目標とした。自動車部材開発に関しては、2021年度までにフロントフード及びドアビームの1/1スケール部材の試作を目標に開発を進めており、実用化・事業化の実現に向けて着実にステップアップを図った。

当分室における本開発テーマにおける目標は、高強度アルミニウム合金A7N01に匹敵する機械的特性を有する難燃性マグネシウム合金を開発し、その開発合金を用いて、現行の高速車両シングルスキン構体実機に用いられている床材および梁材（いずれもソリッド材）と同断面形状を有する押出型材の作製を工業レベルで実現することである。したがって、その試作品について鉄道総研、車両メーカー、JR各社へアピールしながら作り込みを行った。また、高強度が要求される自動車用のドアビーム材（ホロー材）の開発も遂行した。これらの開発によって範囲度の高い難燃性マグネシウム合金の押出技術を構築し、さらに他分野へターゲットを拡大させた事業化戦略を図る。

鉄道車両部材開発に関しては、これまでの部材試作を通じて、高速車両構体にマグネシウムを適用すると、車体重量を約30%削減できるとの試算が得られている。この試算は、マグネシウムの適用による高速車両構体の軽量化・営業速度の高速化を裏付けるものであり、鉄道車両ユーザー側からも期待が寄せられている。自動車部材開発に関しても、例えばフロントフードに関しては、アルミニウム部材と比較して約20%の軽量化が可能であるとの試算が得られつつあり、自動車ユーザー側からも期待が寄

せられている。開発合金 AX92 を用いた鉄道車両用部材である床材および梁材の形状については車両メーカーに満足いただいているため、形状についてのユーザーニーズに応えることはできていると考えている。また、高強度アルミニウム合金 A7N01 と同等の機械的特性を有し軽量化目標を達成していることから、本開発材料には大きな優位性があると考えられる。自動車部材開発に関しても、6000 系もしくは 5000 系合金に対応する強度や成形性を得られつつある。コスト面については、これまでに押出加工に好適なビレットの開発、最適な押出条件について指針を得ており、ユーザーニーズに合致するまで作り込みと検証を行っていくことで達成できると考えている。

## (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

開発合金 AX92 は前述のとおり高強度合金であるため、押出加工の際に設備に大きな負担がかかる。これは製造コストに直結する課題であり、押出加工に好適なビレットの開発、最適な押出条件の確立を推進する必要がある。ドアビーム開発については中空（ホロー）形状であるために押出難易度はさらに高く、合金組成のチューニングをはじめ、ビレット開発、最適な押出条件の確立を推進する必要がある。

本テーマでは、1/1 スケールの実部材の試作を通じて、実用化に際して必要となる技術を構築することを目標としてプロジェクトを推進している。次世代高速鉄道車両構体の床材および梁材、自動車部材のドアビームの開発を進めており、いずれも高い強度が要求されている部材である。鉄道車両開発に関しては、2016 年度までに開発合金 AX92 を開発し、2017 年度からその押出技術開発および押出加工に好適なビレット開発を進め、2019 年度は気密疲労試験に用いる床材および梁材を供給することができた。2020 年度以降は AX92 合金組成のチューニングを行い、自動車部材であるドアビームの開発を進め、2021 年度末までに実際の自動車部材を試作することにより、基礎技術を構築することができた。

## (3)波及効果

高い難燃性を有する高強度マグネシウム合金を開発できたことで、自動車部品や他の輸送機器においても適用へのハードルが下がると考えられる。輸送機器のマグネシウム合金への代替による軽量化は、それを支える部材の薄肉・細径化を可能としてさらなる軽量化の促進と燃費向上に貢献できる。また、このプロジェクトで得られる成果を他分野へと応用・展開することによってマグネシウム市場の拡大、ひいては材料分野全体の活性化にもつながると考えられる。

組織名：本田技研工業株式会社

[テーマ番号 65] マルチマテリアル車体における防食表面処理評価技術の開発  
(2022年度～2022年度)

(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

① 実用化・事業化に向けた戦略

2022年7月現在はない。ただしガルバニック腐食の検証手法が確立された折には、マルチマテリアル構造の仕様検証手法の一つとして検討したい。

② 事業化した場合に対象となる製品、市場規模

仮に事業化する際には自動車シャーシ部品及びボディ骨格の防錆仕様の最適化を検討する

③ 競合技術に対する優位性

国内で確立されていなかったガルバニック腐食に対する評価手法の考え方及び、その評価手法を活用することによる各種部品の最適化を利点として検討する。

④ 量産技術確立の見通し

量産技術確立の見通しは2022年7月現在は無し。

(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

① 上記の実用化・事業化に向けた戦略に関する具体的な取り組み状況または計画

テーマ内で構築するガルバニック腐食評価法と弊社所有の腐食評価法の比較試験を検討する。比較試験の結果と市場回収品の腐食状況を比較することで、それぞれの腐食評価法の立ち位置を明確化したのち、ガルバニック腐食評価法の具体的な運用方法の検討を行う。

組織名：株式会社本田技術研究所

[テーマ番号 27] 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2014年度～2022年度)

**(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

将来の商品性向上に向けて、CFRPをアルミ以上の汎用材料として取り扱える環境をめざし、そのコストを削減し成形の自由度や量産性を上げる為の手段としてLFT-Dを検討する。

対象製品は、自動車部品が使用重量では一番大きくなる見通しで、具体的にはテールゲート、フロントバルクヘッド等のボディ構造材である。市場規模としては、前述部品の販売台数実績から、300万台程度と見積もられる。

CFを使った場合、性能は一番優れるが、コスト優位性(経済性)から、まずは廉価なGFから量産投入を実施。量産車投入に向けた足掛かりとして、まずは廉価なGFを用いたLFT-Dをピックアップトラック(RIDGELINE)へ実用化済。また衝突骨格部材への適用も類似技術を環境対応車(CLARITY)へ実用化済であり、実用化に向けた準備は進めつつある。

**(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組**

現在も既に外作メーカーでの量産投入・実用化を行っている(但し、繊維はGF)。

将来的には、バッテリーEV車両のIPUアッパーケースが本技術の適用先となる可能性が高く、その場合は自社での内作製造の可能性もある。

**(3) 波及効果**

自動車産業でCFRPを汎用材料化していくことにより、関連産業も含めた新しいビジネス環境が生まれる可能性がある。社内的には他企業や大学との協業作業に参加することが良い刺激となっており将来人材の育成と活性化に役立っている。



[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発  
(2014 年度～2017 年度)

**(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

軽量化を目的とした構造材向け CFRP は、他の燃費向上手段や既存のアルミ等他の軽量化手段とも十分に競える効果量と併せてコスト競争力を有することが必須である。この目的に向け本プロジェクトに参画したことで、低廉高性能を目指す熱可塑性 CFRP ランダム材の実用化研究を推進し、量産車両のパネル構造部材等への適用検討を進めた。しかしながら、コスト障壁、カーボンニュートラル(低 LCA)などの課題が顕在化した為、リサイクル技術との合わせ技などを検討し、事業化に向けた検討の継続を図っていく。

**(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組**

- ・ 熱可塑性ランダム CFRP 材の破壊特性を把握し、同 CFRP 材の破壊予測技術を構築した。
- ・ 既存解析ツールへの組み込み (CAE ソルバーへの構成式の実装) を完了させ、自社内開発への組み込みと適用検討の実施を行っている。  
本プロジェクトへ参画した成果として自社 CAE ソルバーへの実装を行い、ボディ用パネル部品のみならず、他の用途開拓の検討にも使用するに至っている。

**(3) 波及効果**

熱可塑性 CFRP 材料の予測理論と解析ツールをいち早く構築できたことで、自動車関連業界及び他の産業においても、熱可塑性 CFRP の新しい応用検討を生みやすい風土醸成を成し遂げられた。社内的には他企業や大学との協業作業に参加することが良い刺激となり、将来人材の育成と活性化に大いに役立った。

組織名：マツダ株式会社

[テーマ番号05] アルミニウム／異種材料の点接合技術（2014年度～2022年度）

## (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

### (実用化・事業化に向けた戦略)

マルチマテリアル車体を多関節ロボットによる抵抗スポット溶接を前提とした現行の車体組立ラインで製造することは容易ではなく、ラインの新設や大幅な変更が必要となる。

その点、本テーマで戦略的に取り組む二つの異材点接合技術（アルミニウム/鋼板の抵抗スポット溶接、アルミニウム/CFRP およびアルミ厚板の摩擦攪拌点接合）はいずれも多関節ロボットとの組み合わせが可能であり、リベットや接着などの旧来の接合方法に比べると現行の車体組立ラインへの適合性が高い。また、摩擦攪拌点接合は、ツールの回転による摩擦発熱を利用し、副資材も不要な直接接合技術であり、製造プロセスにおける LCA やコスト的にも優位である。即ち、多額の設備投資が不要であり、且つ、従来の鋼板製車体とマルチマテリアル車体の混流生産や海外生産にも展開可能であることから、マルチマテリアル車体実用化のコア技術になるものと考えられる。

### (事業化した場合に対象となる製品、市場規模)

技術開発のトレンドによると車体のマルチマテリアル化は 2020 年代頃から車の全面改良に合わせて随時拡大するものと予想され、最小（1 モデル）でも年間数万台レベル、主要車種に適用されれば年間数十万台レベル、同業他社が採用した場合にはさらに大きな事業規模に達する。

開発技術を着実に社会へと還元するため、マツダの占有ではなく、海外メーカーを除く国内同業他社への技術ライセンスを検討する。

鋼板、アルミ、CFRP は軽量化材料としては代表的な材料であり、多関節ロボットを使った一般的で簡易的な設備であり、自動車産業の枠を超えて将来拡大していくものと予想される。

### (競合技術に対する優位性[性能面、コスト面])

競合技術として、機械的な締結技術に対しては、防錆対策やラインへの適合性に関しては課題があり、重量や副資材のコスト等を考慮すると本技術は優位性が高く、同一の設備で様々な材料への展開ができることも強みとなると考える。

### (量産技術確立の見通し)

研究開発が 10 年間の長期に及ぶことから、研究テーマの運営にステージ管理を導入して進めてきた。具体的には研究期間を第一期：技術構想の実証（2013 年～2015 年）、第二期：実部品での性能/効果の検証（2016 年～2017 年）、第三期：実用化の主要課題解決（2018 年～2020 年）、第四期：技術展開(2021 年から 2022 年)の四つのステージに分け、各ステージに応じた研究内容/研究体制/資金運用としている。各ステージでの研究内容やゴールを明確に設定することで研究目標の達成を確実なものとするを考えている。

第二、第三期を経て本技術の基本技術は確立済みであり、品質保証や信頼性のロジックの構築やモデル化を進め、各種軽量材料の市場性を見極めながら量産技術として確立していく。

## (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

マルチマテリアル車体を実用化するためのコア技術は異材接合であるが、一方で車体としての基本品質や性能の確保も重要な課題である。そこで本研究開発では、異材接合部のガルバニック腐食や熱ひずみの解析手法、さらに軽量化に伴い悪化する振動騒音性能を補完するための最低限の要素技術も同時に確立することを基本方針としている。これによりマルチマテリアル車体の製造技術に留まらず、車体としての品質/性能も確保でき、実用化の確度をさらに高めることができる。

第一期から第二期で振動騒音の低減技術として取り組んだ高減衰接着材に関しては、本研究テーマの中でメカニズム解明を行い減衰付与の可能性を検討した。その後の材料メーカ等との材料開発や量産開発を通して 2019 年に実用化へ結びつけた。

また、第二期（2016 年～2017 年）から、研究成果の自動車部品への適用を目指したマルチマテリアルドアの検討を開始した。具体的にはドアインナを射出成形による非連続繊維 CFRP とし、アウトパネルにアルミニウム、インパクトバーとして ISMA 革新鋼板や革新アルミ、革新マグネを想定したものである。ドアインナに形状自由度に優れた射出成形を用いることで、部品統合によるコスト削減と性能向上の両立を目指している。

## (3)波及効果

アルミニウム/異種材料の点接合技術は、自動車産業だけでなく、航空機や鉄道車両、電気機器等の他産業にも展開可能である。また、異材の接合が可能となることから、アルミニウムなどの軽金属や樹脂/CFRP などの需要拡大、さらには素材産業の活性化にも繋がるものと考えられる。

### [テーマ番号 6 5] マルチマテリアル車体における防食表面処理評価技術の開発 (2022 年度)

#### (1)実用化・事業化に向けた戦略、見通し

CO<sub>2</sub> 排出量を抑えるため自動車のマルチマテリアル化が進むが、ガルバニック腐食対策が必須となる。対策として、市場環境に耐えられる防錆材料を適用することが挙げられる。そこで本テーマでは、市場環境を再現できるガルバニック腐食の試験法構築に取り組んだ。この試験法により、防錆材料の検討に活用できると考えている。

#### (2)実用化・事業化に向けた具体的取組

広島分室では、スウェーデンでの実車走行によるガルバニック腐食評価結果とガル

バニク腐食評価法から得られた腐食環境条件や腐食評価結果について機械学習を適用し、相関性を確認する。具体的な進め方として、まず、ガルバニク腐食データを目的変数とし、市場環境データを関数とした式を作成する。そして、ガルバニク腐食評価法における試験条件（環境データに相当）を式に入れ込み腐食量の計算値を得る。その計算値と実測値の誤差を比較することで、相関性を確認する。

相関性が高いことが分かれば、試験機にモードを適用し、開発に活用する。

### **(3)波及効果**

自動車以外にも、アルミなどを使用する航空機や、その他船舶、バイクの開発にも活用できる。

組織名：三菱ケミカル株式会社

[テーマ番号 27] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2013 年度～2017 年度)

[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発  
(2013 年度～2017 年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

当社は既存の炭素繊維中間材料の事業拡大を行うために、熱可塑性樹脂をマトリックスにした CFRTTP を開発している。「炭素繊維複合材料 (CFRP/CFRTTP) 関連技術・用途市場の展望 2022、(株) 富士経済」によると CFRTTP の市場規模は 2025 年度の 3 万 t から 2035 年には 11 万 t へ急増するものと見込まれている。同紙によるとこれらの需要のうち自動車用途向けは 2025 年の 4 千 t から 2035 年には 7 万 t に拡大し、今後の有望な市場と考えている。そのため当社の戦略としては、本プロジェクトで開発した CFRTTP の部品設計技術及び成形加工技術を用いて得られるコストパフォーマンスに優れる材料により、量産車への適用拡大を進めることである。しかしながら現在のところ量産車に見合う性能やコストの優位性は確立できていない。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

事業化に向けて鋭意検討したが、量産車に見合うコストパフォーマンスをもつ CFRTTP 技術を見いだせておらず、残念ながら事業化を中断している。今後リサイクルを含めて、性能だけでなく CO<sub>2</sub> の排出規制等の社会ニーズに応えられる材料や加工技術をもって実用化を検討したい。

### (3) 波及効果

材料メーカー、加工メーカー、自動車メーカーが参加した本プロジェクトの波及効果は大きく、部品を設計するうえでの技術的進展や人的交流、さらに産官学の連携により人材育成に顕著な進展が見られた。

[研究開発項目⑧] 革新炭素繊維基盤技術開発 (2014 年度～2015 年度)

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

当社は、「革新炭素繊維基盤技術」の内、「炭素繊維の評価手法開発、標準化」を実施した。東京大学と協力し炭素繊維と樹脂の接着性の評価方法として、「引抜法」を開発した。従来のフラグメント法やマイクロドロップレット法と比較して、引抜法は、操作性、対応樹脂の多様性、界面接着強度の精度に優位性がある。また、その測定のための装置は簡素であり、コスト面でも優位である。本プロジェクトで開発した評価手法については、当社は現段階では、実用化、事業化には取り組んでいない。東京大学が民間の装置メーカーと協力して装置の量産化に取り組んでいる。

## **(2)実用化・事業化に向けた具体的取組**

当社は炭素繊維メーカーであるので、標準化手法に関わる装置の実用化・事業化の計画はない。東京大学が民間の装置メーカーと協力して、装置の実用化・事業化を検討している。

## **(3)波及効果**

炭素繊維の評価手法の開発、標準化を通じて、東京大学や産業技術総合研究所による省エネで生産性の高い革新炭素繊維の製造方法の開発に寄与することができた。

組織名：三菱自動車工業株式会社

[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発  
(2014 年度～2017 年度)

(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

30 年先を見据え、環境への取り組みの方向性と目標を定めた環境計画パッケージを策定している。施策として、走行中の CO<sub>2</sub> 排出低減があり、車両の軽量化は重要な技術と位置付けている。軽量化を図る上で、材料置換技術は重要な柱と考えており、CFRP の特性を生かした軽量構造研究は益々加速すると考えている。

一方で、CFRP 適用に向けては、製造工程における環境負荷低減技術、コスト低減技術の構築が必要と考える。

CFRP の必要性、重要性は高まると考えるが、CFRP の普及には、適用に向けた課題技術の対応が必要な状況と考えている。

(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

環境への取り組みの一環として、軽量化目標を設定し車種展開を含め、戦略を策定して軽量化取り組みを推進している。CFRP の異方性など素材特性を有効に活用出来る部位への適用により、鉄、アルミとのハイブリッド構造の研究に取り組んでいる。

昨今の異種材料適用状況を分析すると欧州では、CFRP を含む炭素繊維の活用が進んでいる。欧州の状況を分析し、日本におけるものづくりへ展開することも並行し検討している。CFRP の生産性、及び調達性、更にはリサイクル率など自動車メーカー以外と産業との連携など CFRP 普及に向けて産学管連携し推進する必要があると考える。

(3) 波及効果

CFRP による軽量構造が実現出来れば、当初目的である軽量化による環境負荷低減が実現出来、カーボンニュートラル社会の実現へ貢献できると考える。

更に、軽量化により、加速性能、操縦安定性の性能向上が見込まれると共に、衝突においても、衝突エネルギーが低減し、乗員への傷害値が抑えられより安全性能向上にも貢献できると考える。更に、現在普及が加速している自動運転においても、車のコントロール性が高まり、よりスムーズで応答性の高い制御が出来るようになり、乗り心地向上に加え安全性向上にも貢献できると考える。

また、産業界においても、CFRP の課題を克服する施策を産学官で推進することで、CFRP の材料製造事業、リサイクル事業など新たな事業拡大のチャンスが生まれ、日本の経済にとっても貢献できると考える。

組織名：ミリオン化学株式会社

[テーマ番号 19] 難燃性マグネシウム合金の耐食技術の開発  
(2014 年度～2017 年度)

[テーマ番号 35] 革新的マグネシウム材の鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発 (2018 年度～2022 年度)

[テーマ番号 60] マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション (MI) 活用技術の開発 (2018 年度～2019 年度)

## (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

実用化・事業化の観点から、テーマ 19 をもとにテーマ 35 のテーマ内で実用化・事業化を加味して確立した技術を主体に記載する。

マグネシウム合金による軽量化には、鉄道車両関係者が多大の期待を示しており、部品も含め高速車両への検討も試みられている。現状の難燃性マグネシウム合金は汎用のマグネシウム合金を含め他の金属に比べ腐食性が強く、表面処理（化成処理皮膜、陽極酸化、塗装等）が必須となる。耐食性に最も寄与するのは塗装であるが、マグネシウム合金はその活性さのためか、塗膜密着性が得られにくい。このため、化成処理などの塗装密着性を向上させる表面処理を行うことが一般的である。

現在までマグネシウム合金の採用事例は室内使用の小物部品が多く、一般的な化成処理法は 4 つの工程を伴う処理槽浸漬方式であり、鉄道車両のような大型部材への適用は困難であった。これらを考慮し、テーマ 19 において簡易処理で塗膜密着性と耐食性を改善する化成皮膜を形成させる処理液組成、テーマ 35 で工法を確立させた。

テーマ 19 やテーマ 35 で確立した技術は難燃性マグネシウム合金の大型部材を想定していたが、汎用マグネシウム合金や小物部材にも適用拡大が可能と考える。また、工法も導入顧客の要望に応えることが可能である。なお、テーマ 19 およびテーマ 35 で積み上げた屋外大気暴露結果を含め腐食解析とその実データをテーマ 60 に適用し、今後の表面処理の信頼性を高めることとする。

テーマ 35 の自動車構造部材への実用化については、マグネシウム合金-アルミニウム合金への同時化成処理について確立した。確立した技術は、工程削減のメリットがあるが、構造部材全体として軽量化効果とバランスさせたコストとする必要があると考える。

## (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

革新的マグネシウム材の高速車両構体への適用については、「マグネシウム合金高速車両構体実用化委員会」において、鉄道各社の意見や要望事項をもとに、素材メーカー、加工メーカー、車両製造メーカー、表面処理メーカーが実用化を念頭に連携して評価開発を進めてきた。その中で、本プロジェクトにて実用化に向けて重要となる製品の信頼性を確保する技術の開発が推進され、短期間で確立した経緯がある。このため、実用化に取組む環境が整っている状況である。

自動車構造部材への適用についても、「自動車 Mg 展伸材適用委員会」やテーマ 35



内の「自動車分科会」において、自動車メーカーのアドバイスをもとに、素材メーカー、表面処理メーカー等が連携し開発を進めた経緯がある。実用化に取り組む環境が整っている状況は、高速車両構体への適用と同様である。

大型部材や構造部材だけでなく、個別の部品の適用検討にもプロジェクトで確立した技術を適用する。こうした取組の結果、マグネシウム合金の適用範囲が拡大することで量的コストダウンが見込まれ、さらなる大型部材や自動車構造部材へマグネシウム合金の適用、実用化の可能性が高まると考える。

### **(3)波及効果**

革新的マグネシウム材に対する大型部材向けの簡易処理法では、これまで不可能であった大型部材に対応が可能になる。マグネシウム合金-アルミニウム合金の同時化成処理では、これまでマグネシウム合金はその反応性から、化成処理液を異なる金属と併用できなかったマグネシウム合金と複数の異なる素材を一つの化成処理ラインで対応可能な汎用性に富んだ化成処理法となる。いずれの技術も汎用のマグネシウム合金への適用も可能であり、マグネシウム合金の適用範囲の拡大にともなう需要拡大や製造効率化などによる製造コストの改善が期待される。

表面処理業界では、材料設計や接合の業界との接点は一般的になく、プロジェクトを通じて多用な業界の技術者と開発を進めるということは、技術者育成で大変有意義であると考えられる。

組織名：株式会社メカニカルデザイン

[テーマ番号 59] マルチマテリアル車体軽量化に関わる革新的設計技術の開発  
(2019年度～2022年度)

**(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

マルチマテリアルボディーにおいては、異種材料界面は不可避の課題であるため、そこに非線形構造解析という差別化の高いツールを適用して取り組む。

**(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組**

自動車に用いられる高張力鋼の市場規模は 1 兆円を超え、我が国のシェアは 50% 近くになるので、継続的な注視が必要と考えられる。一方、炭素繊維は市場規模は 2 千億円規模とまだ小さいが日本のシェアは 60% 近くあり今後、成長が見込まれる分野である。

以上の状況から、接着接合に関する技術開発を積極的に進めている。調布分室では、自動車業界で広く使われている Ansys LS-DYNA、Abaqus などの構造系汎用商用ソフトウェアあるいは COMSOL などのマルチフィジックス系商用ソフトウェアを用いて課題に取り組み、即座に応用のきく形態での開発が期待されている。引き続き、その方針を維持して実用化に結び付けたい。

以上の状況を踏まえ、実用化の準備は十分に進められている。開発終了後には即応できる。

**(3) 波及効果**

汎用有限要素法など、商用ソフトウェアの応用を基本としているため、容易に底辺拡大、横展開が可能である。

組織名：株式会社UACJ

[テーマ番号05] アルミニウム／異種材料の点接合技術（2013年度～2022年度）

(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

・実用化・事業化に向けた戦略

①アルミニウム／CFRPの点接合

本テーマでは FSSW を用いて、アルミニウム板と樹脂（CFRP）との直接点接合を可能にする技術を開発した。本技術は現行スポット溶接ロボットを用いる車体製造ラインへの適合性高く、大きな設備改造をせずに軽量化に有効な車体のマルチマテリアル化が可能になる。

②異材接合部の評価解析

異材接合部において懸念されるガルバニック腐食対策であるシーラーの劣化評価技術の検討を行ってきた。本検討で得られたデータは、今後のマルチマテリアル部品の実用化に貢献する。

③高遮音アルミニウムパネル

自動車及びそれ以外の市場を探索して納入実績を積み重ねる。

④革新アルミインパクトバー

自動車メーカー個別要求仕様聴取を行い、要求仕様達成に向けた開発を行う。

・事業化した場合に対象となる製品、市場規模

①アルミニウム／CFRPの点接合

本技術はアルミニウム板および CFRP を用いる自動車車体を対象とする。市場規模は、現状、アルミニウム板および CFRP を合わせて年間数千億円程度と推定され、軽量化の必要性は高いことから、さらに大きくなると期待される。

②異材接合部の評価解析

本検討技術によって生産できうる製品はないものの、非破壊で高抵抗のシーラーを評価できる技術は有用であり、シーラーを用いる製品に応用が可能と考える。

③高遮音アルミニウムパネル

自動車及び建築内装分野を合わせて年間2億円規模を見込む。

④革新アルミインパクトバー

国産自動車年間生産台数 800 万台のうちアルミドア採用車が 5%として 40 万台、ドア 4 枚×40 万台=160 万本が革新アルミインパクトバーの年間市場規模である。

・競合技術に対する優位性（性能面、コスト面）

①アルミニウム／CFRPの点接合

競合技術としては、リベット、ボルトナット等の副資材を用いる機械的接合、各種接着剤を用いた接着などがある。強度は JIS のアルミスポット溶接 A 級以上の強度を有しており、十分と考えられる。副資材や接着剤等を用いないことから

低コストであり、多様な板厚への対応が可能であり、加熱等の後処理も必要としない。現行ラインへの適合性も高く、コスト面で優位である。

③高遮音アルミニウムパネル

ユニットレベルでの遮音性能として最大 2.0dB の改善を見込む。

④革新アルミインパクトバー

ホットスタンプ製インパクトバー比で約 45%の軽量化を達成した。

・量産技術確立の見通し

①アルミニウム／CFRP の点接合

現行ラインとの親和性は高く、現行スポット溶接機ロボットの溶接機を FSSW に改造することで量産可能と考えられる。

**(2)実用化・事業化に向けた具体的取組**

・上記の実用化・事業化に向けた戦略に関する具体的な取組状況または計画

①アルミニウム／CFRP の点接合

接合品の品質管理に必要な基本的な知見として、アルミ表面性状が接合強度に及ぼす影響、FSSW 接合時にモニタリング可能なパラメータによる強度予測技術について検討中である。

③高遮音アルミニウムパネル

参入市場を拡大するため大型パネル製作工程を検討している。

④革新アルミインパクトバー

自動車メーカーに対して個別要求仕様の聴取を行っている。

・自社で実用化しない場合は誰が実用化するのか

①アルミニウム／CFRP の点接合

自社（UACJ）で実用化する予定はなく、車体を製造する自動車メーカーあるいは部品メーカーにて実用化。

②異材接合部の評価解析

当社での実用化予定はないものの、シーラーメーカーや自動車メーカー、部品メーカーにて実用化されるものとする。

**(3)波及効果**

本テーマで得られた異材接合技術とそのデータは、鉄道車両などの自動車以外の構造材にも適用可能であり、技術的波及効果は大きい。

[テーマ番号 1 3] 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発（2013 年度～2018 年度）  
高強度アルミニウム合金を用いた自動車部品の開発  
（2019 年度～2022 年度）

(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

・実用化・事業化に向けた戦略

前半で開発した革新 7000 系合金については、少量量産を達成した。引き続き、自動二輪車等の高強度材料が必要な部品への適用検討を継続するが、強度と耐 SCC 性とのバランスを考慮する必要がある、慎重に検討する。

また革新 7000 系合金の開発過程で開発したプロセス技術（水素低減、電磁攪拌 鑄造、ねじり鍛錬加工、温間圧延、鍛造、残留応力測定）について、それぞれ効果を確認した。ねじり鍛錬加工について、革新 7000 系合金では亀裂進展速度の低減効果がみられ、さらに一部の合金（6000 系合金）で強度向上効果がみられたことから、基礎技術としてさらなる機能性向上の検証を継続する。直ちに実用化することは難しいが、将来の実用性の可能性を検討継続する。残留応力測定技術については自社装置として買い取り後、直ちに量産材での実用を計画している。

後半で開発した革新 5000 系合金および革新 6000 系合金は、コストを注視しながら自動車、鉄道車両等の輸送機器構造材への適用検討を継続する。

・事業化した場合に対象となる製品、市場規模

革新 7000 系合金；自動二輪車部品、レジャー用品等を対象

市場規模は数 100kg/月程度

革新 5000,6000 系合金；輸送機器構造材（自動車、鉄道車両等）を対象

市場規模は数トン/月～数 10 トン/月

・競合技術に対する優位性（性能面、コスト面）

革新 7000 系合金；7150-T77511 材に比べて 25%以上の強度向上、コストは微増

革新 5000 系合金；O 材では溶接接手効率が 90～100%で、接手強度が従来合金よりも高い。H26 材では高 Mg 合金と同等の強度を有しつつ、SCC 発生の懸念がないことが優位である。

革新 6000 系合金；従来合金の 6082-T6 材に対して 20%の強度向上

・量産技術確立の見通し

革新アルミニウム合金は、いずれも既存設備での量産が可能。

(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

・上記の実用化・事業化に向けた戦略に関する具体的な取組状況または計画

革新 7000 系合金については客先への PR を継続しており、具体的用途を検討中。

革新 5000 系合金については客先と具体的評価について相談中。

革新 6000 系合金については弊社内で開発中の自動車部品への適用検討を進める。

- ・ 自社で実用化し、客先または自社内開発部品へ供給することで進めている。

### (3)波及効果

本プロジェクトにおける新製造プロセスは他の構造材用アルミニウム合金にも容易に適用が可能であり、金属間化合物の微細分断化による特性向上等により、不純物を多く含むリサイクル材の利用など CO<sub>2</sub> の削減、地球規模での資源の有効利用が可能となる。

また本合金開発において重要な析出強化メカニズム、破壊靱性、疲労特性、応力腐食割れ性や一般耐食性等は、各種構造材用アルミニウム合金に非常に重要な特性であり、本プロジェクトで得られた知見は社会的な効果や人材育成の観点からも波及効果は非常に大きい。

また評価技術としての残留応力測定技術を開発したことで、量産材の残留応力低減技術開発が可能になった。さらに J-PARC の中子線回折を利用したことで、今後 J-PARC を利用できる体制を構築できた。

また学会での成果発表により、担当者の人材育成にも結び付けることができた。

## [テーマ番号 1 4] アルミニウム材新製造プロセス技術開発（2013 年度～2022 年度）

### (1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し

2013 年度～2019 年度では、イオン液体を用いた新製錬法に注力し、ボーキサイト由来の  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  からアルミニウムを電析させる一貫製錬プロセスが貫通するに至った。2020 年度からは、近年ニーズの高まっているリサイクル技術に注目し、鋳物級グレードのスクラップアルミニウムから高純度アルミニウム（99.9%以上）を製造する精錬技術（ハイアップグレード技術）の開発に注力した。2023 年度以降の実用化・事業化を見据え、実用化・事業化の見通しを立てることに注力した。

日本では年間約 400 万トンのアルミニウム製品が製造され、その約半分が展伸材として利用される。スクラップは年間約 130 万トン発生しており、そのうち約 100 万トンが主に輸送機器用の鋳物用途として再生利用される。このようなリサイクルは純度の低下を伴うカスケードリサイクルとよばれ、再生不可能なスクラップの蓄積を生じる。また、近年、輸送機器の軽量化に伴うアルミニウム製品の使用量の増加、EV 車の普及に伴う鋳物材使用量の減少が進むにつれてアルミニウムスクラップの発生量は増加していくことが予想される。これらアルミニウムスクラップから、選別・鋳造等の従来技術を用いてのリサイクル手法ではアップグレード可能な純度に限界があり、リサイクルアルミニウムの用途が限定される。本技術によるハイアップグレード技術が確立すれば、スクラップアルミニウムから製造される地金を用いた多品種のアルミニウム製品を製造可能となる。

実施計画を図 1 に示す。2022 年度までに得られた成果を元に、2023 年度からは UACJ 主体で実用化検討、事業化検討を進める。

### (2) 実用化・事業化に向けた具体的取組

新製錬法の開発においては、①ボーキサイト由来の  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  からの電析技術、②連続電析技術、③共析の制御、④表面の平滑化の 4 つの課題に対して再委託先の北海道大学、大阪大学（千葉大学）、京都大学および岩手大学とで分担し、開発に取り組んだ。2019 年度までに一貫製錬プロセスが貫通し、2020 年度からはハイアップグレード技術の開発に向けて、候補となるハイアップグレード用の電解液を用いた電解手法の開発、高速電析技術の開発および成果を用いたコスト試算を実施した。ハイアップグレード用の電解液を用いた電解手法の開発において、当社ではハイアップグレードに最適な材料組織の設計に向けた検討を進めた。

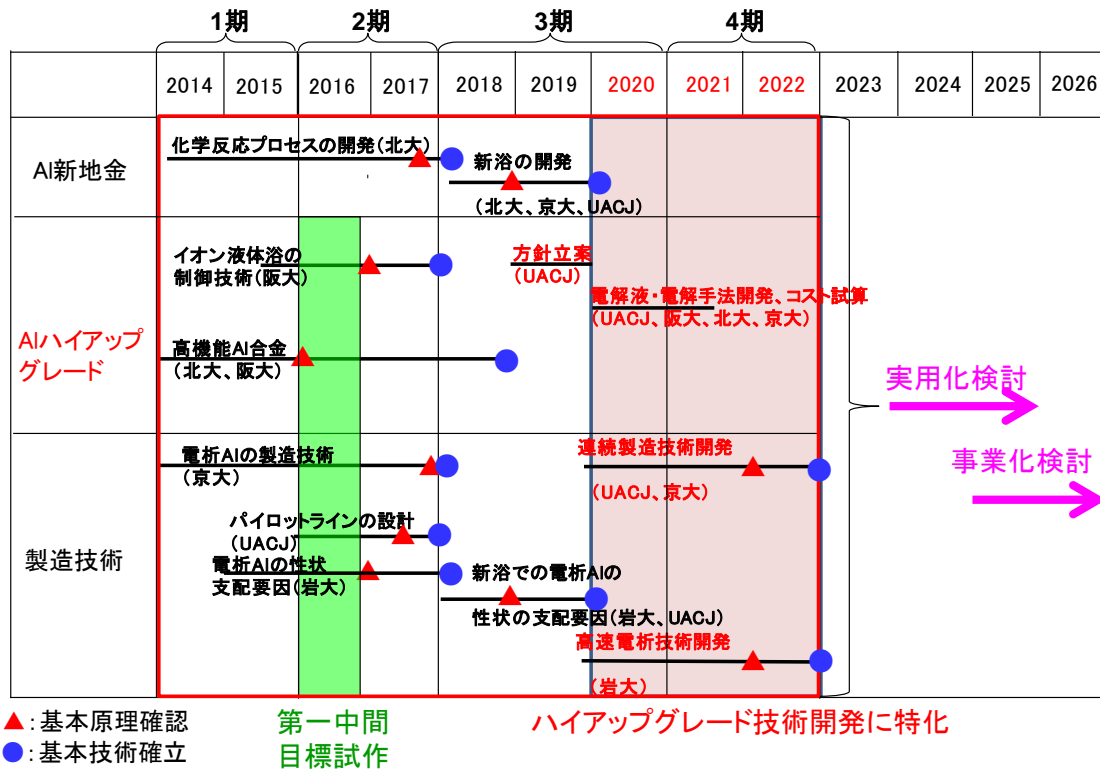


図 1 実施計画

(3)波及効果

電解電圧の低下はすなわち電力原単位の低下に直結するため、CO<sub>2</sub> 排出量の削減に大きく貢献することができ、社会的または経済的效果が多き技術といえる。また、ハイアップグレード技術は、マルチマテリアル化が進む自動車部材を中心に、今後のリサイクル問題解決へ貢献できると考えられる。



[テーマ番号 6 5] マルチマテリアル車体における防食表面処理評価技術の開発  
(2019 年度～2022 年度)

**(1) 実用化・事業化に向けた戦略、見通し**

本テーマにて確立した試験法を、市場におけるガルバニック腐食を適切に評価できる共通試験法として、関係各社・機関と共に規格化する。規格化の際には、本テーマで得られたアルミニウムと異種材料のガルバニック腐食の知見を共有することで円滑な規格化に貢献できる。また、腐食メカニズムを明確にしていくことによって、耐ガルバニック腐食性を有する材料開発にも貢献できる。

**(2) 実用化・事業化に向けた具体的取組**

腐食試験法の規格化に向けて本テーマで得られた知見を総括する。アルミニウム材料のガルバニック腐食に関し、より詳細にメカニズムを解明する。試験法の規格化は当社に加え、自動車 OEM を始めとした関係各社・機関と共に進める。

**(3) 波及効果**

本テーマを通して、当社において各種ガルバニック腐食評価手法を実施できるようになった。今後環境負荷低減を目的としたマルチマテリアル化が様々な分野で進む中で、ガルバニック腐食の防止は重要な課題の一つであるが、本テーマで得られた成果は輸送機器材料以外にも適用可能であり、大きな波及効果が見込まれる。また、本テーマを通して自動車 OEM 各社のガルバニック腐食に関する考えを集約でき、広く我が国の産業競争力向上に資するものと期待される。

組織名：一般財団法人ファインセラミックスセンター

[テーマ番号 27] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2018 年度～2022 年度)

[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発  
(2014 年度～2017 年度)

### (1) 実用化に向けた具体的取組

本プロジェクトにおいて、過熱水蒸気を利用した CFRP からの炭素繊維回収技術の開発に取り組み、航空機用 CFRP 廃材や燃料電池車用 CFRP 製水素タンク廃材を対象として、所定長さに切断されたりサイクル炭素繊維の回収技術の構築を行った。本技術をもとに、高砂工業から炭素繊維回収システムの販売を予定している。

CFRP 製水素タンクは使用年限が定められており、燃料電池車の普及によって、今後、一定量の CFRP 製水素タンク廃材が定期的に排出される可能性が高い。これまで所定長さに切断されたりサイクル炭素繊維の回収技術に取り組んできたが、連続繊維として回収できれば活用の幅が広がり、高付加価値な CFRP として再利用できる可能性がある。本プロジェクトで導入した設備等を活用して、連続繊維回収に関する研究開発を実施する。

### (2) 波及効果

CFRP の製造および利用に関わる様々な機関の研究者との議論を通じて、CFRP リサイクルの必要性やリサイクル炭素繊維に要求される仕様などについて、より深く理解することができた。

組織名：国立大学法人大阪大学

[テーマ番号 4 6] 摩擦接合共通基盤研究 (2016 年度～2022 年度)

[テーマ番号 4 2] 材料・接合等技術動向調査研究 III. データ等活用拠点計画  
②大阪大学接合技術拠点 (2021 年度～2022 年度)

### (1) 実用化に向けた具体的取組

テーマ 46 摩擦接合共通基盤研究は、2016 年度より、鉄鋼三社、ISMA 本部とともに、阪大ほか三大学から成るテーマとして開始した。その後、大阪大学接合科学研究所に新拠点を設け、鉄鋼三社、他の再委託先の三大学との更なる連携を深め、中高炭素鋼・マルチマテリアルに適用できる革新的な固相摩擦接合技術の研究開発を進めてきた。

我々は、大学を中心としたグループを形成しているため、日本発、世界発の新規接合法を次々と開発していくことを使命として考えている。これまでに、フラット摩擦攪拌接合、低温線形摩擦接合、マルチマテリアルの線形摩擦接合、センタードライブ両面 LFW 接合、超高張力鋼板を HAZ 軟化させずに接合可能な「HAZ レス摩擦攪拌接合」、中空構造体の接合を可能にした「反転摩擦攪拌接合法」など、数多くの新規接合法を開発してきた。また、上記の活動により我々で開発した新規アイデアを ISMA 参画の企業に情報提供したり、既に開発されて、実用化されている既存技術のメカニズムの解明や理解の深化に関して情報公開するなど拠点として活動することで実用化・事業化への加速を図っている。そして、大阪大学接合科学研究所のオープンラボを活用して連携を深めながら研究を進めてきた。「使われてこそ技術」の精神で、積極的に企業とも連携を深めていることで、実用化・事業化につながると考えている。

今後、構造材料のさらなる軽量化・長寿命化・強靱化には、軽量材料を中心とした各材料の信頼性の確立とともに、それらを適材適所に組み合わせた部材のマルチマテリアル化の積極的な推進が不可欠である。そこで、大阪大学(接合科学研究所および工学研究科)は、本プロジェクトにおいて「摩擦接合共通基盤研究(46)」、「マルチマテリアル接合技術の基盤研究(64)」および「マルチマテリアル接合技術における継手性能データベースの構築(64B)」などを推進してきた。本プロジェクトで開発された新規接合技術やそれにより創出され、本プロジェクトで導入した装置、蓄積したデータを有効に活用するために、2020 年度に「接合技術拠点」を形成した。以下に活動内容を、図 1 に接合技術拠点での 3 つの大きな活動を示す。

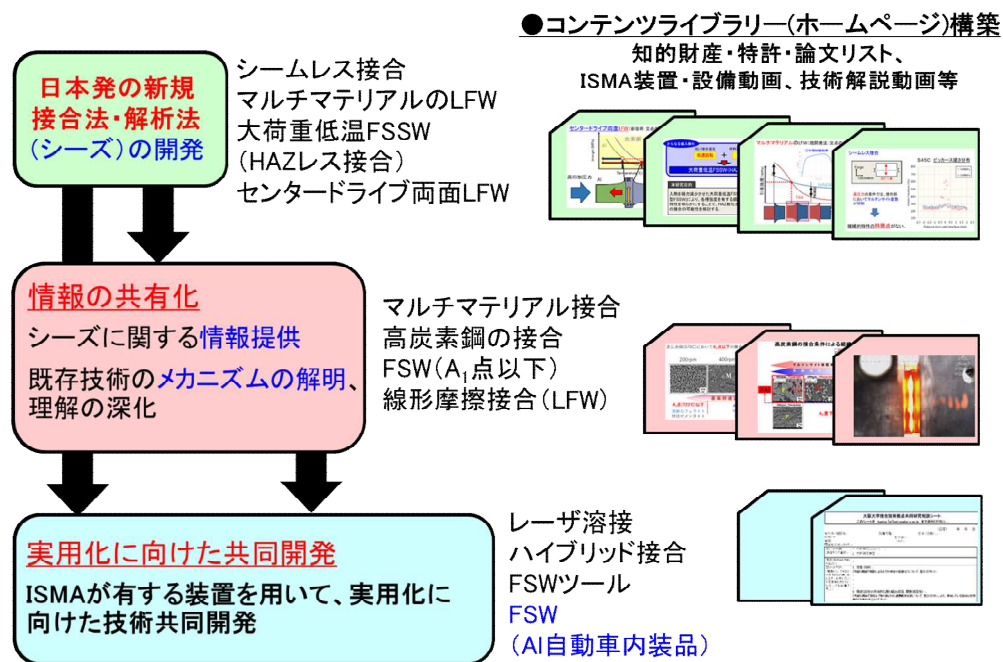


図1 接合技術拠点での3つの大きな活動とコンテンツライブラリー構築

- 日本発の新規接合法(シーズ)の創生、既存装置の整備・高度化によるさらなる技術開発
- 接合メカニズムの解明、理解の深化を目指した継手特性評価、その場観察による現象解析およびシミュレーション技術の構築
- 知的財産整備、コンテンツライブラリー構築
- 企業・中立機関との共同研究の実施
- 共同研究のための協働研究所・共同研究講座の設置、コンソーシアムの形成、中小企業との共同研究促進

上記活動を受け、コンテンツライブラリー(ホームページ <http://www.jwri.osaka-u.ac.jp/~jthub/index.html>)を構築し運用を開始した。このホームページは、ホーム(概要、NEWS & TOPICS)、活動内容、動画ライブラリー、研究設備、知的財産・特許、論文・発表、メンバー、問い合わせ先、サイトポリシーで構成され、逐次更新している。

コンテンツの一つである動画ライブラリーにおいて、新規接合法(シーズ)の原理を説明するとともに、本拠点が所有する接合装置、分析装置群を実際の接合映像も含め紹介し、共同研究に参画して頂く企業への周知を促している。また、知的財産・特許において、大阪大学接合技術拠点を通じて、メンバーが保有する特許を本ホームページ上で公開している。2022年7月現在、255件の特許を公開し、参画して頂く企業の共同研究内容策定の参考にして頂いている。さらに、参画して頂く企業が、速やかに共同研究を進めることのできるように、共同研究相談シートを作成し、本ホームページに掲載するとともに、共同研究を始めるためのフローを明確にした。これまでに、自動車メーカーを含む12社の企業から問い合わせがあり、うち1社と共同研究が開始され、うち4社と共同研究を協議中である。

これらの共同研究を発展させ、協働研究所・共同研究講座の設置をすることで、よ

り深く接合技術を向上させるとともに、早期実用化・事業化を図る。これまでの実績として、本プロジェクトに参加した企業である日本製鉄と「日本製鉄ものづくり未来協働研究所」を立ち上げ、また、本プロジェクトに参加していない企業とも高度ジョイント生産システム構築共同研究部門を立ち上げている。

そして、実用化・事業化において、部品試作などを希望される企業に対しても、2022年6月に大学発ベンチャーとして株式会社 solid phase を設立し、新規接合技術実用化の橋渡しを担う仕組みを形成し、この接合拠点形成を生かし、実用化・事業化を進めていく。

## (2)波及効果

鉄鋼材料を製造する際に、日本の全製造業の45%のCO<sub>2</sub>が排出されると言われているが、種々の産業分野で中高炭素鋼を幅広く用いることで炭素を鋼中に固着させることができるとともに、鋼板の高強度化で鋼の使用量を低減でき、大幅なCO<sub>2</sub>排出の削減が見込まれる。

本プロジェクトを通じて、摩擦接合法による接合現象解明、継手強度発現メカニズムの解明などの最先端の基礎研究を進めることで、接合工学分野の人材育成に大きく貢献している。実際に、当研究所から学生の特任研究員への昇任、ポスドクの助教・准教授への昇任、准教授の主幹研究員への昇任と総計10数名の若手を国内外問わず接合工学分野へ排出している。このように、大阪大学接合科学研究所において、接合技術拠点を構築することは、接合技術レベルの向上、視野の拡大、ネットワーク形成等人材育成の上で有意義である。

## [テーマ番号64] マルチマテリアル接合技術の基盤研究（2019年度～2022年度）

### (1)実用化に向けた具体的取組

自動車産業のみならずあらゆる産業分野で適材適所に材料を用いるマルチマテリアル化は必須であり、そのための信頼性の高い異材接合技術確立のニーズは大きい。高度な異材接合部の評価・解析手法の構築とそれに基づく継手性能の予測が可能となれば、接合プロセス条件と関連付けて異材接合部性能を担保することが可能となるために各産業分野でマルチマテリアル化が飛躍的に進展することが期待できる。開発した異材接合部の評価・解析およびシミュレーション技術の継続した研究開発と実用化は、大阪大学接合技術拠点を中核として実施する。大阪大学接合技術拠点は、大阪大学接合科学研究所と工学研究科が連携して形成する。連携のベースには、学内の横断型教育研究プラットフォーム「つなぐ工学」を活用する。当拠点では、ISMAでの再委託先研究機関と連携して、マルチマテリアル化のための接合プロセス開発、接合現象解析、接合プロセスシミュレーション、強度発現機構の解明および継手性能予測を、ISMAプロジェクトで構築した評価・解析手法、シミュレーション手法を活用、発展させて実施し、得られた成果のデータベース化、システム化を進めると共に、他のISMAデータ活用拠点との連携も行う。また、当拠点は産業界と積極的に連携して、

運営に資する外部資金の導入を図ると共に、研究成果の社会実装、実用化を規格化・標準化も含めて進める。さらに、学協会や国内外の中立研究機関とも連携して、学術面での情報発信にも努める。

## (2)波及効果

本テーマで開発したトランススケールでの接合部評価手法とこれをベースとした継手性能評価シミュレーション技術は、製造業の基盤となる溶接・接合プロセスの高信頼化と性能保証に大きく貢献するものである。SIP 第 1 期において、製造技術の基盤となる溶接・接合技術を特殊工程から性能保証型技術とするためのシミュレーション技術の開発を実施した。本テーマで開発している継手性能評価シミュレーション技術は、これを継承しさらに異材接合へ拡張・発展させるものである。このような性能評価とシミュレーションに基づく性能保証型の溶接・接合技術は、Society5.0 の「統合型材料開発システム」および「新たなものづくりシステム」の実現に貢献する技術開発である。溶接・接合継手性能予測や逆問題である継手性能を保証するための接合プロセス制御指針の提示が可能となれば、従来、試行錯誤的に行われていた、新材料や新構造に対する溶接・接合条件決定が、大幅に短時間化できる。これは自動車産業のみならず製造業における製品の高性能化・高信頼化とともに製造工程の高能率化、省コスト、省人化に繋がるため、我が国のものづくり競争力の向上に大きく寄与し経済再生に大いに貢献する。また、大阪大学接合技術拠点を形成して、大学内にトランススケール評価装置とシミュレーションシステムを設置することで学生や社会人が広く利用することが可能となるために当該分野の研究者、技術者の育成にも貢献できる。

### [テーマ番号 6 4 B] マルチマテリアル接合技術における継手性能データベースの構築 (2020 年度～2022 年度)

#### (1)実用化に向けた具体的取組

本テーマで構築する継手性能データベースは、データ等活動拠点計画で進められている「大阪大学接合技術拠点」を通じて公開する形での事業化を目指す。ただし、利用者の課金額に応じたデータベースの利用範囲を規定するシステムを新たに構築する必要があり、事業開始までは、二年を要すると予想される。具体的には、一年目の前期に、利用者の区分け方案を構築し、後期に区分けに対応した認証システムを構築する、二年目の前期に、継手性能データベースと一年目に構築する認証システムとの連携を構築し、後期において試験運用を進めながら、利用者の課金額に対応した情報を提供可能する継手性能データベースを構築する。

#### (2)波及効果

本テーマで構築する継手性能データベースは、マルチマテリアル接合技術を用いて作製される異材継手の性能であり、革新材料の活用に大きく寄与すると期待され、そ

の技術的・社会的効果は大きいと期待される。また。未知の接合条件で作製された継手性能を予測するアルゴリズムも持っており、革新材料を用いた新たなマルチマテリアル車体設計において、既存の概念に縛られることのない車体設計も可能になり、車体設計における新たな人材の育成にも寄与すると期待される。

組織名：国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学

[テーマ番号 27] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2014 年度～2022 年度)

(1) 実用化に向けた具体的取組

① 市場の見通し

自動車の材料に関する最近の動向としては、適材適所、すなわちマルチマテリアルがトレンドとなっているが、CFRP については、炭素繊維のコストおよび製造時の CO2 排出量がネックとなり、量産車への適用は停滞している。一方で、EV 車の重量増加等を背景に軽量素材へのニーズは高く、今後、炭素繊維の製造時 CO2 排出量削減やリサイクル CF による材料費低減に加えて部品製造時の CO2 低減技術の開発により、量産車への本格的な導入、さらに自動車以外への広範な波及が見込まれる。

② 実用化に向けた基本方針

本プロジェクトで開発した LFT-D (Long Fiber Thermoplastics-Direct) 技術について、企業における実用化の検討、推進を支援するとともに、新たな複合材研究拠点として、樹脂と繊維を使い続ける FRP 水平リサイクル技術の基盤開発に取組み、広く他機関、企業と連携しながら喫緊の課題である環境負荷低減に貢献していく。

③ 取組

- ・ 協調領域から競争領域にまたがる継続的な CFRP 技術支援体制の構築 (拠点化)
- ・ 獲得技術情報を使いやすい形での DB 化と維持・更新
- ・ 獲得技術の標準化を進め市場優位を図る。
- ・ LFT-D を軸とした CO2 低減革新成形法の研究開発推進
- ・ 熱可塑性 CFRP 技術の高度化と社会実装の促進
- ・ 低 CO2 環境対応型 FRP 水平リサイクル技術の研究開発

(2) 波及効果

① 技術的效果

- ・ 計測技術：本プロジェクトで開発した繊維長及び繊維配向等の繊維性状測定・評価技術は不連続繊維強化樹脂複合材料の物性評価法として、計測機器や測定ビジネスの発展に貢献し得る。また今後の測定法標準化により、効率化および試験コスト削減に寄与する。
- ・ CAE シミュレーション技術：本プロジェクトで開発している CAE 技術は開発プログラムの市販化により不連続繊維強化樹脂複合材の成形・設計効率化に貢献する。
- ・ 設備機器・金型技術：本プロジェクトで開発したマテハンシステム及び LFT-D 成形設備、成形金型技術は、LFT-D の実用化に伴い、設備機器及び金型関



連の事業拡大に貢献する。

## ② 経済的社会的波及効果：

- ・ CFRP 関連総生産：自動車産業の生産波及効果倍率は 3.3 倍とされており、本プロジェクト事業化による国内生産および雇用拡大の波及効果が期待できる。
- ・ 他産業への波及：自動車以外の輸送機器、汎用製品への応用が期待できる。
- ・ 産業力強化：材料、設備機器、製造組立に亘る産業基盤の底上げにより、国内自動車産業の優位性堅持をもたらす。

## ③ 人材育成他：

- ・ コンソーシアム体制活動における情報共有、活発な議論、意見交換を通じて、知識・知見・経験の蓄積、見識の拡充、参画メンバーの人脈・ネットワーク形成が図られ、企業内展開のキーパーソンとして期待し得る。

### [テーマ番号 4 2 - III ④] 材料・接合等技術動向調査研究

#### III. データ等活用拠点計画 ④名古屋大学 (NCC) 拠点 (2021 年度～2022 年度)

#### (1) 実用化に向けた具体的取組

##### ① 拠点化

- ・ ポスト P J を通じた新たなコンソーシアム体制の構築
- ・ NCC 設備の一般利用の仕組み整備と LFT-D 技術の普及、支援

##### ② DB 活用システム

- ・ 本プロジェクトで構築した DB 活用システムの維持、改善
- ・ 格納データの更新、拡充 (含連携機関のデータ反映)
- ・ 一般ユーザーによる活用の仕組み検討

#### (2) 波及効果

- ・ 拠点機能の拡充を通じた開発技術の波及
- ・ 開発したシステム (コンテンツを除く) を学内外に共有、活用

組織名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

[テーマ番号 1 3] 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発  
(2013 年度～2018 年度)

(1) 実用化に向けた具体的取組

開発した革新 7000 系合金については、少量量産を達成した。今後は材料メーカーにおいて、自動二輪車等の高強度材料が必要な部品への適用検討を行う。なお、強度と耐 SCC 性とのバランスを考慮する必要がある、慎重に検討を進める。

また革新 7000 系合金の開発過程で開発した各種プロセス技術（水素低減、電磁攪拌鋳造、ねじり鍛錬加工、温間圧延、鍛造、残留応力測定）について、それぞれ効果を確認した。電磁攪拌鋳造については、微細化剤起因の品質課題解決や高力合金の鋳造割れ抑制などへの効果が期待でき、材料メーカーのニーズに合わせ実用化の検討を進める予定である。ねじり鍛錬加工について、革新 7000 系合金では亀裂進展速度の低減効果がみられ、さらに一部の合金（6000 系合金）で強度向上効果がみられたことから、基礎技術としてさらなる機能性向上の検証を継続する。残留応力測定技術については、材料メーカーにおいて量産材での実用化を計画している。

(2) 波及効果

新たな合金開発に加え、様々な周辺技術の開発を行うことができた。これら周辺技術は従来材料にも適用可能な技術であり、広範なアルミニウム部素材の高性能化・高信頼性化が期待でき、アルミニウム業界全体の競争力強化が見込まれる。

さらに、産学官の同分野の研究者・技術者が一定期間継続的に本研究開発テーマに従事することで、各機関の当該分野における研究開発レベルの向上に加え、新たな人的ネットワークの構築なども期待される。

[テーマ番号 1 5] 難燃性マグネシウム合金の信頼性（疲労・破壊・難燃性）評価  
(2013 年度～2017 年度)

[テーマ番号 3 4] 革新的マグネシウム材の開発および信頼性評価 (2018 年度)

[テーマ番号 3 5] 革新的マグネシウム材の鉄道車両および自動車構造部材への適用技術開発 (2019～2022 年度)

[テーマ番号 4 2-IV] 材料・接合等技術動向調査研究の内「異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術開発」 (2019 年度、2021～2022 年度)

[テーマ番号 5 0] Mg 材の性能・寿命に関する MI (マテリアルズインテグレーション) 活用技術開発 (FS 研究) (2017 年度)

[テーマ番号 5 8] マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究 (FS 研究) (2018 年度)

[テーマ番号 6 0] マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション (MI) 活用技術の開発 (2018～2022 年度)

## (1)実用化に向けた具体的取組

本テーマは、高性能マグネシウム合金展伸材の開発と、その適用技術の確立を通して、構造用部材としての実用化を推進することを目的としている。ここでは、鉄道部材開発については「次世代高速車両構体」を、自動車部材開発については「ドアビームやフロントフード」をターゲットとして、ユーザー側からの意見を常に取り入れつつ、研究開発を遂行することができた。また、鉄道部材開発については、疲労特性等の信頼性データを予測するための MI システムの開発も並行して進めることができた。

本テーマでは、研究開発段階からターゲットを強く意識した「ものづくり技術」を構築することを重要視した。鉄道部材では、2015～2016 年度には車両構体を想定した部分（側パネル）構体の試作開発を、2017 年度には 1/1 断面（長さ 1m）のモックアップ構体の試作開発を、2019 年度には 1/1 断面（長さ 5m）の気密構体モックアップの試作を実施した。また、2020 年度には 2019 年度に作製した気密構体を用いて気密疲労試験を実施し、その疲労特性の高さを実証した。さらに、2021 年度には、高速車両構体試験車両の床材を作製し、それを実装することに成功した。また、自動車部材開発に関しては、2021 年度までにフロントフード及びドアビームの 1/1 スケール部材の試作を実施し、その歩行者保護性能等の評価を行った。MI システム開発に関しては、これまで取得した疲労試験や耐食性試験のデータを MI システムに組み込み、今後の研究開発に直接利用できるデータベースとして体系化した。

この様に、各種鉄道車両部材および自動車部材の 1/1 スケールの部材試作を通じて、開発したマグネシウム合金展伸材を用いて部材を試作するための技術を培うことができた。これらの知見は、実用化に際して直接活用することができると考えている。

鉄道車両に関しては、高速車両構体試験車両への床材の実装をすでに完了しており、プロジェクトの目標は達成できたものと考えている。今後は、車両メーカー、素材メーカーが主体となり、試験車両におけるマグネシウム部材の適用箇所を増やすことを検討し、その信頼性を検証することにより、実用化が加速するものと考えている。

自動車に関しては、プロジェクトで開発したマグネシウム合金圧延材を、商業レベルで製造するためのプロセスを素材メーカーにおいて構築しており、対象部材の要求仕様とコストの課題を解決することができれば、実用化は可能であると考えている。なお、国内で作製可能な圧延材の板幅に制限があることから、まずは、素材メーカーが主体となり、現状の板幅で対応可能な、自動車内装部品や、家電製品筐体への適用を推進することになると考えている。自動車ボディー部品などの広幅圧延材への対応については、海外圧延メーカーでの委託生産を検討するのが第一段階であると考えている。なお、国内の鉄鋼メーカー・アルミメーカー所有する圧延機により、マグネシウム合金圧延材を製造する技術を構築することができれば、国内での委託圧延も可能である。そのためには、プロジェクトで検討した室温プレス成形性の改善に加え、冷間圧延性を改善する技術開発が必要であり、プロジェクト終了後は、そちらに研究対象を拡げたいと考えている。

産総研中部センターでは、プロジェクト終了後に「非鉄信頼性拠点」を構築することを予定しており、ここでは、軽量材料をベースとしたマルチマテリアル接合材を対

象として、その信頼性（疲労特性や耐食性）を、最新機器と専門人材を活用して系統的に取得することを予定している。マグネシウムに関連した拠点活動に関しては、関連企業との共同研究に加え、日本マグネシウム協会の各種委員会や、軽金属学会のマグネシウム研究部会と連携して、鉄道部材開発や自動車部材開発に必要な、信頼性データを取得することを予定しており、上記の活動を通じて、実用化研究をサポートしていきたいと考えている。

なお、プロジェクトで開発した MI システムについては、東京大学、物質・材料研究機構と連携して、プロジェクト終了後もマグネシウムに関する信頼性データを継続的に取得することを予定している。ここでは、難燃性マグネシウム合金の溶接継手に加えて、マルチマテリアル部材に焦点を当てることを予定している。上記の活用を通じて、データ駆動型研究開発にも積極的に関与する予定である。

## (2)波及効果

本研究開発の推進により、高い難燃性を有するマグネシウム合金展伸材や優れた室温成形性を有するマグネシウム合金を実用化することができれば、高い難燃特性が要求される航空機、建材へのマグネシウム合金展伸材の用途展開や、高い室温成形性が要求される情報機器筐体等への用途展開を見込むことができる。また、疲労特性、耐食性、耐食性や発火特性のデータベース、及び標準化された素材や評価方法は、上記用途への展開に直接利用することができる。

さらに、若い人材が本研究開発テーマに継続的に従事し、科学的に裏付けられたものづくりを強く推進することができれば、当該研究テーマにおける、研究レベルの底上げと人材育成にも貢献できるものと考えている。

### [テーマ番号 2 7] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発 (2014 年度～2022 年度)

### [テーマ番号 2 7 B] リサイクル炭素繊維の評価技術開発 (2019 年度～2022 年度)

## (1)実用化に向けた具体的取組

本テーマでは、CFRP からマトリックスポリマーを除去して回収されるリサイクル炭素繊維の再活用を促進することを目指し、リサイクル炭素繊維の平均的機械特性および各種不純物の評価分析手法を開発し、品質評価法として確立することに取り組んだ。

リサイクル炭素繊維の製造、流通、再利用に関わるさまざまな関係者が開発技術を活用できるようにするため、開発した評価技術を元として、標準化に取り組むことが本テーマにおける技術の実用化に該当すると考えている。複合材料の強化繊維に関する国際標準規格は ISO/TC61/SC13 で取り扱われている。2006 年から日本が幹事国を務め、日本プラスチック工業連盟が事務局として運営を担っている。北條正樹・京都大学名誉教授が現在委員長を務めておられ、現在活動している「強化材及びその製品」「積層・複合材料」「金属・複合材料アSEMBリ」の3つの作業グループのうち2

つのコンビナーも日本から出しているなど、日本が本分野の国際規格化について主導的な立場にある。我々は、ISO/TC61/SC13 国内関係者と、リサイクル炭素繊維の評価技術に関する国際規格化の進め方について意見交換を行ってきた。その結果、第1歩として、ISO/TC61/SC13 にリサイクル炭素繊維に関する新たな作業グループを設立し、取り扱う最初の新作業項目（NP）としてテーマ 27 にて開発を行った改良型フラグメンテーション試験を用いた繊維強度と界面強度の同時評価技術の国際規格化を提案することを目指すこととした。2022 年度の ISO/TC61/SC13 全体会議（9 月開催）にて上記提案を行い、2022 年度末に NP 投票を実施できるよう準備を行った。テーマ 27B で開発したいいくつかの機械特性評価および不純物評価手法についても、2023 年度以降、新作業グループでの国際規格化に取り組めるよう、提案を進めていくことを想定している。

産総研中部センターでは、プロジェクト終了後に「非鉄信頼性拠点」を構築することを予定しており、名古屋大学 NCC に構築される「CFRP 信頼性拠点」とも連携し、特にリサイクル炭素繊維および再生 CFRP 部材の評価技術について蓄積を進めていく。

## (2)波及効果

本研究開発成果の国際標準規格化等を通じて、リサイクル炭素繊維の活用促進が進むことにより、軽量構造部材としての CFRP および CFRP マルチマテリアルのさらなる普及に貢献できる。また、開発評価技術は、リサイクル品の性状を考慮して手法開発を進めたものであるが、新品の炭素繊維を含むさまざまな強化繊維の簡便かつ高精度な評価技術として活用されるポテンシャルを有するものと考えており、強化繊維や繊維強化複合材料全般の開発促進に貢献できるものと考えている。

[テーマ番号 4 2 - III] 材料・接合等技術動向調査研究 III. データ等活用拠点  
(仮名称) 計画 (2019 年度～2020 年度)

[テーマ番号 4 2 - III①] 材料・接合等技術動向調査研究 III. データ等活用拠点  
計画 ①AIST マルチマテリアル信頼性拠点  
(2021 年度～2022 年度)

## (1)実用化に向けた具体的取組

本プロジェクトにおいては、輸送機器の抜本的な軽量化に向け、革新的接合技術の開発や、輸送機器の次世代の主要な構造材料の高度化等に係る技術開発が一体的に推進されているが、これらの技術開発により創出される貴重なデータや知見などをプロジェクト終了後も実用化・事業化に向けて有効に活用するためには、材料の信頼性や接着・接合技術等の関連する知識を体系的に集積して材料設計に活用する新たな仕組みが必要となる。このため、本プロジェクトでも一部すでに行われている、材料信頼性評価技術、マルチマテリアル接着・接合技術、材料構造の最先端解析・評価技術、材料・製品 LCA 技術などの技術の融合により、本プロジェクト終了後においても、得られたデータの集積・管理・解析等を行い、実用化・事業化に結びつける「データ

等活用拠点：マルチマテリアル信頼性設計研究拠点。以下、研究拠点」の構築が計画されている。本テーマは、これに関連する技術開発動向を精査し、研究拠点の構築を行った。各拠点では、数 10 から 100 社程度が参加するコンソーシアムを構築し、定期的なシンポジウムや意見交換会、また、実用化に向けた共同研究等を行いつつある。さらに、産総研外の拠点（CFRP 信頼性評価拠点（名大 NCC）、接合技術拠点（阪大）、構造設計技術基盤拠点（京大）、鉄鋼信頼性評価拠点（NIMS））とも連携を深めるために、産総研内に「マルチマテリアル連携研究ハブ」を設置し、ワンストップ窓口、広報拠点等の整備を完了した。

## (2)波及効果

研究拠点は、本プロジェクト終了後においてもデータの集積・管理・解析等を行い、実用化・事業化に結びつける事を目指している。しかしながら、本プロジェクト終了後の段階において、本プロジェクトで得られたデータ等のみで、その時点の関連産業の要求に対応するのは困難と考えられる。このため、本プロジェクト終了後の拠点の活動においては、民間企業との共同研究や連携を促進し、それらによりデータ等を随時取得・付加し、これらの課題を解決することが期待される。また、単一の拠点のみでは対応が困難なマルチマテリアル構造等に関しては、上記の「マルチマテリアル連携研究ハブ」が拠点間の仲介を行い、幅広い構造材料の分野で、社会に貢献するものと期待される。

【テーマ番号 4 4】中性子線による構造材料解析技術の Feasibility Study  
(2015 年度～2016 年度)

【テーマ番号 5 2】中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発  
(2017 年度～2022 年度)

## (1)実用化に向けた具体的取組

小型中性子分析装置（産業技術総合研究所 AISTANS、北海道大学 HUNS、理化学研究所 RANS）等を用いた構造材料評価の共通基盤技術となる計測・解析手法の開発や、中性子に加え X 線等も含む各計測装置群の解析手法を複合的に用いて構造材料解析に取り組み、そこでの成果によってもたらされる知見や技術を、ユーザー向けのカタログや事例集に集約して整理することで、小型中性子分析装置及び中性子等量子ビームを用いた材料解析技術等の利用しやすい体制作りを進めている。

産総研を中心に再委託先との協力の下で開発を進めた新規の小型中性子分析装置 AISTANS に関しては、2019 年度に稼働を開始しており、現在まで、様々な構造材料やマルチマテリアルの計測を実施中である。本プロジェクト実施中（2022 年度末まで）は、ISMA 参画企業を中心に材料評価・解析技術を基にした各々の材料開発や接合技術開発に貢献する。

プロジェクト終了後は、本プロジェクトで整理したカタログや事例集を管理・活用することで、小型中性子分析装置や関連する材料解析技術等のユーザー開拓をさらに

進め、産総研の共同研究や技術コンサルティングといった制度を活用して、材料の高度化や新材料開発を進めていく。また、中性子計測は、構造材料以外の解析にも有用で、例えばリチウムイオン二次電池の劣化評価へ活用できることから、様々な企業ニーズへの対応を検討していく。

## (2)波及効果

本プロジェクトにおける小型中性子分析装置等に基づいた構造材料の解析手法やノウハウ等を、プロジェクト中および終了後における各種材料、部材開発に活用する。これらの開発材料・部材は、自動車や航空機などの輸送機器用の軽量化材料・高性能材料などとして、各メーカーに供給・販売されることが想定される。

また、小型中性子分析装置および中性子等量子ビームを用いた構造材料解析技術に基づく受託計測サービスへと展開することも想定され、プロジェクト終了後は、組合員企業をはじめとする各種分析サービス企業への技術移転、そして移転先企業での受託分析サービス等への展開も想定される。その際、各企業が各々有効と考える評価技術開発に取り組むことで、幅広いバリエーションの最先端の評価技術が確立され、その他のメーカーにとっても各社が必要とする有効な技術を選定できる状況になることで、中性子解析の産業活用の幅が広がることが期待される。

### 〔テーマ番号 4 5〕 構造用接着技術に関する Feasibility Study (2015 年度～2016 年度)

### 〔テーマ番号 5 3〕 構造材料用接着技術の開発 (2017 年度～2022 年度)

## (1)実用化に向けた具体的取組

マルチマテリアル化を推し進めるためには、異種材料の接合が必要となる。そのなかで接着は有望な手法の1つである。欧米の中でも特にドイツが自動車用構造接着技術の実用化では進んでいる。これには、ドイツの公的研究機関が中心となった巨大な接着研究拠点があり、自動車メーカーや接着剤メーカーと連携して開発に取り組んでいるという背景がある。このような状況を受けて、産総研では 2015 年に「接着・界面現象研究ラボ」を国内初の接着研究の拠点として設立した。さらに、分野の垣根を超えた連携構築の場として、接着・接合コンソーシアムを設立した。さらに、ISMA 事業で開発した技術を速やかに社会実装につなげるべく、産総研が主体となって多機関が参画できる共同研究体を 2017 年に立ち上げた。この事業ではユーザー企業から、原材料メーカー、接着剤メーカーなど垂直、水平連携して共同研究を実施し、技術の高度化を図っている。また開発した異材接合強度の評価手法については、ISO での国際規格化を進めている。また、開発した評価技術については、全国の公設試験場に技術移転して中小企業も含めて利用してもらうように本年度より活動を始めた。その一環として、人材交流や、WEB 会議、産議連での宣伝活動を実施している。これらの活動を通じて、接着研究拠点の機能を強化して、企業における技術開発にかかる時間を短縮することを目指す。

## (2)波及効果

自動車車体のマルチマテリアル構造実現のために技術開発を行ってきた。一方で次世代自動車の普及のためには、燃料電池や蓄電池を効率よく製造する必要性が生じており、シール技術および接着技術の高度化が求められている。我々の開発した耐久性評価技術やメカニズム解明技術は、この分野でも強力なツールとなる。自動車産業の国際競争力強化のみならず、部素材メーカー、接着剤メーカー、表面処理メーカー、検査機器メーカー等といった幅広い業種の国際競争力強化へ貢献できる。また自動車以外にも、建築や、エレクトロニクス分野、医療分野においても軽量で簡便な接着剤による接合技術が望まれており、これらの分野への波及が期待される。

### [テーマ番号 5 1] 革新炭素繊維基盤技術開発（2016年度～2020年度）

#### (1)実用化に向けた具体的取組

炭素繊維は、製造時の消費エネルギー及びCO<sub>2</sub>排出量が大きく、カーボンニュートラルの流れの中で、益々大きな課題となっている。本テーマは、日本企業が世界の主要な生産・供給プレーヤーになっているPAN系炭素繊維を高機能化・低コスト化する次世代版炭素繊維の開発シーズを大学と主要企業が産学連携によって確立し、その生産を事業化することを目標としてきた。当初から、CO<sub>2</sub>排出量の半減という高い目標を掲げて、性能面でも競争力のある革新炭素繊維の製造を目指した先駆的取り組みである。

本テーマにおいては、開始当初から炭素繊維メーカーが参加し、迅速な事業化への対応に向けてプロセス技術開発も並行して行う実施体制をとり、革新的炭素繊維製造プロセスを量産化につなげるため、新規炭素繊維前駆体化合物の開発ならびにマイクロ波等による炭素化プロセス技術の開発を推進した。本事業では、製造した革新炭素繊維の試作品にて、複合材料としての標準的なコンポジット物性の確認までを行った。事業終了後は、参画企業が事業化に向けた検討を進めているところである。

#### (2)波及効果

本テーマについては、東京大学を中心に、第二期まで炭素繊維の評価手法開発・標準化にも力を入れて研究開発を実施してきた。その結果、到達可能強度の測定のような学術的な成果をあげるとともに、現在、炭素繊維のリサイクル技術や、水素タンク用の新規炭素繊維開発で活躍する若手研究者をプロジェクト研究員から輩出している。

マイクロ波加熱は外部加熱の新しい手法だが、伝熱加熱に対して制御が困難とされていた。しかし本PJの成果公表によって、マイクロ波のフロー系加熱、導電体に対する電磁界理論、新しい計測技術などが明らかにされており、学会やセミナーを通じてマイクロ波科学の発展に寄与している。本事業の「マイクロ波加熱による炭素繊維の製造と複合材料化の検討」の成果に対し、2021年度日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム研究奨励賞が授与されており、技術的、社会的な波及効果が示されている。



また、産総研においては、炭素繊維製造時の CO<sub>2</sub> 削減という目標達成に向けて LCA 評価を取り入れ、前駆体のもつ CO<sub>2</sub> 排出量も含んだ革新炭素繊維製造プロセスの LCA 評価を独自に実施して、論文等でも公表している。カーボンニュートラル社会の実現に向けて、技術の環境適合性をいち早く評価してきた点において、本テーマは、革新的軽量材料に対する LCA/TEA 等技術評価研究の発展にも寄与したと言える。

[テーマ番号 5 6] 新材料の材料代替効果定量技術の開発 (FS 研究) (2018 年度)

[テーマ番号 4 2-II] 材料・接合等技術動向調査研究 (新材料の材料代替効果定量技術の開発) (2019 年度～2022 年度)

### (1) 実用化に向けた具体的取組

輸送機器の構造材料では、ISMA プロジェクト全体の目的でもあるマルチマテリアル化による軽量材料への期待が高まっている。これは、軽量化によって使用時の燃料消費削減、ひいては温室効果ガス排出削減が、社会的要請として強くなってきているためである。一方、軽量化材料の生産、リサイクルにおいても燃料消費あるいは温室効果ガス排出があるため、製品ライフサイクルを通じた環境影響評価、さらには近年の SDGs や ESG 投資に鑑みた社会・経済影響評価を実施した上での素材代替が必要とされている。本テーマでは、その要請にこたえる評価手法として、材料の物質フローやリサイクル性なども加味した、材料のライフサイクル全体を評価できる評価手法を構築するだけでなく、その手法を搭載した評価ツールを開発することで研究開発現場あるいは材料選択時に評価手法を活用可能な状態にすることで、開発成果が実効性のあるアウトプットになると考えている。そのために、評価ツールの開発においては、プロジェクト構成組織に対してヒアリングを実施し、そのニーズをよく踏まえたツールの開発を行った。

### (2) 波及効果

本テーマで開発する手法は、本プロジェクトで対象とする輸送機器の構造材料のために開発するものの、手法の構造としては、いかなる場面の材料選択においても適用可能な手法となる。ただし、その評価のためのデータ整備という意味では、個別に精緻なデータを収集する必要がある。さらには、本手法を日本から発信することの意義は大きく、いまだ世界的に評価手法が確立していない分野であることから、今後の評価のスタンダードが策定されていく可能性を考えた際に、日本の企業にとって納得感のある手法を他国に主張できることにつながる。これは、今まで多くの環境に関連する評価手法が、欧州に端を発することが多く、日本は評価手法を後追いで理解し、対策してきただけに、たいへん有利に働くものと考えている。もう少し直接的な効果としては、新材料・輸送機械の開発現場へ材料代替効果の定量的情報を提供することによって、ライフサイクル全体でリサイクル性が高く省エネ効果が高い新材料の実用化に貢献することができる (経済的・社会的効果)。

組織名：国立研究開発法人物質・材料研究機構

[テーマ番号 07] 鋼材／CFRP 等樹脂材料の接合技術開発

(2014 年度～2017 年度)

[テーマ番号 63] 鋼板と樹脂材料の革新的接合技術及び信頼性評価技術の開発

(2018 年度～2021 年度)

[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発のうち

熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発

(2014 年度～2017 年度)

### (1) 実用化に向けた具体的取組

・実用化の見通し

大学・研究機関を中心とした接合部の信頼性評価技術はより多くの業種・企業に展開が可能であると考えている。多くの自動車メーカーでのヒアリングで、接合部の信頼性評価データだけでも必要性がある。強度・耐久性予測や耐候性評価まで含めた技術は、自動車メーカーのみならず他の業種でも適用が可能である。最終的に、自動車メーカーを中心に活用を打診し、有用性が確認できた段階で、他の業種への展開を検討する。

→ 自動車、その他輸送機器・スポーツ・建築／土木インフラメーカー

プロジェクト期間終了後も、物質・材料研究機構の高分子系ハイブリッド複合材料グループが接合部の信頼性評価の技術開発を続けるとともに、強度および耐久性予測に繋げる。

接着接合に関して、接着剤やプライマ処理の種類、接着剤層厚さや接着長さ等のパラメータ、負荷時の温度、速度（周波数）や応力比（最小／最大応力）等の影響など、被着体が決定していてもより多くの検討事項がある。データ駆動型の研究開発としてはデータの蓄積が解決策として重要であるが、ここに、解析技術を適用し、より少ないデータでより正確なデータ予測ができる手法を検討する。

### (2) 波及効果

欧州の自動車メーカーと大学・研究機関は、実用化を目指し、接合部の力学特性データを取得している。本事業での技術の優位性は、接着接合や力学特性評価の専門家が接合部の信頼性評価データを蓄積しているため、より短い時間で強度・耐久性予測に必要なデータを取得している点であり、その破壊形態に関する知見も有する点である。また、正確な静的強度予測のみならず耐久性予測や耐候性評価まで含めた技術は競合技術を凌駕するものである。自動車メーカーのみならず他の業種（インフラ）でも適用が可能であり、技術的な波及効果は高い。また、試験片の作製や実験には研究業務員・学生・若手社会人も参画しており、人材の育成にも心がけている。

## [テーマ番号 09] 水和物架橋低温接合技術の開発 (2014 年度～2015 年度)

### (1) 実用化に向けた具体的取組

機械的接続部位の接合強度補助手法としての応用可能性：継ぎ手の全体強度としては十分な値に到達しなかったが、接合達成部位については成果の(2).5 項に記述したように化学的理論強度に達していた。また、表面改質を大気圧雰囲気で行うことが可能なので、例えば化学的に安定な有機材料のような、構造材料金属との成形加工が困難な組み合わせについて、接着強度を補強するための手法として実用可能である。具体的な成形加工メーカーとの協業予定は現時点でまだないが、表面改質後の大気中での接合性維持時間の検討などは速やかに開始できる状態にある。

### (2) 波及効果

Society5.0 における軽量かつスマート構造材料への発展：高度に階層化された無線ネットワークに支えられた交通制御や自動運転などの実現には、自動車などの移動体が信号発受信/中継地点として機能する必要がある。そのためには、移動体内部の生体から構造材料を介してクラウドまでの継ぎ目の無いスムーズな信号伝送が必要で、電子部品群を軽量構造材料に内包し、構造材料自体に電氣的機能を発現させるようなマルチスケール・マルチマテリアル接合手法が必要で、本研究で実現された手法はその有力な候補の一つになり得る。

## [テーマ番号 42-III③] 材料・接合等技術動向調査研究/III. データ等活用拠点計画/③ NIMS 鉄鋼信頼性拠点 (2021 年度～2022 年度)

### (1) 実用化に向けた具体的取組

#### 研究データの利活用：

具体的取り組みとして、ISMA で開発した 1.5GPa 級冷間プレス用ハイテンの社会実装の促進につながる研究データの利活用について述べる。

42-III③NIMS 鉄鋼信頼性拠点においては、高強度鋼の水素脆化と腐食を主たる対象として、「関連研究に関するベンチマークとデータ収集；先導的技術研究実施；国プロ立案」を行うために必要なソフトとハードを整備した。その活動はテーマ 65B（ガルバニック腐食）およびテーマ 66（水素脆化）と協働して行った。ここで得られたデータの格納・活用については、NIMS 統合型材料開発・情報基盤部門（MaDIS）との連携を検討した。MaDIS では戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）で導入した材料データプラットフォーム（DICE）のシステムを使えるという優位性があり、NIMS ではこれを活用するコンソーシアムが 2020 年末にスタートしている。検討の結果、DICE-MDR（材料データデポジトリ：下図参照）に、ISMA 終了テーマ（鉄鋼関係）の 61, 62, 65 の公開情報を格納できることを確認した。また現在進行中のテーマ 65B と 66 の公開情報も同様に DICE と連携し利活用できることを確認した。



## (2)波及効果

例えばテーマ 66「鉄鋼信頼性評価技術開発」(2021 年度～2022 年度)で行った超高強度薄鋼板の水素脆性における材料信頼性評価技術(き裂伝ぱ評価技術)の構築によって得られた成果データは、ISMA で開発された 1.5GPa 級冷間ハイテンの自動車骨格部材への実装促進にとどまらず、新規材料の開発や他の破壊現象への展開、水素脆化評価法の標準化、き裂伝ぱ抑制技術の提案といった波及効果が望まれる。

### [テーマ番号 6 6] 鉄鋼信頼性評価技術開発 (2020 年度～2022 年度)

#### (1)実用化に向けた具体的取組

近年、環境負荷や省資源対策の観点から自動車などの輸送機器の軽量化による燃費向上が必要不可欠であり、引張強度 1.5GPa を超える超高強度鋼の開発が盛んに行われている。しかし、鉄鋼材料ではその強度が高くなるほど水素脆化感受性が高くなることが知られており、引張強度 1.5GPa 以上の超高強度鋼では通常の大気環境下において鋼板中に侵入する水素によって水素脆化が生じる危険性が提唱されている。つまり、超高強度鋼を広く社会実装していくためには、水素脆性問題を克服する材料設計が非常に重要である。超高強度鋼に必要な水素脆性に関連した材料信頼性評価技術は、き裂伝ぱ評価技術であると言える。(i) 破壊力学に基づいたき裂伝ぱ過程に対応する特性値によって水素脆性感受性を評価する、(ii) き裂伝ぱ形態といったような材料の壊れ方をしっかりと把握し、破壊特性(き裂伝ぱ特性)発現の起源を明らかにする、(iii) き裂伝ぱとマイクロ組織の相関を明らかにする、ことができれば、マイクロ組織制御によってき裂伝ぱ形態を制御するなど、理論的な背景から破壊特性を向上させていくことが可能になる。さらに、メカニズム(き裂伝ぱ形態、マイクロ組織とき裂の相関)に裏付けされた破壊特性値であれば、超高強度薄鋼板の社会実装化に対する設計指標として安心して使用できると期待できる。平滑材を用いた引張試験やき裂発生を目視で確認するような U 曲げ試験などの従来の力学試験方法では、得られる特性値(破断応力や破断伸び)は水素脆化感受性の材料間の相対指標に過ぎず、得られる特性値がどの破壊過程に対応したものなのかを理解することは非常に困難である。また、水素脆性におけるき裂伝ぱの形態やマイクロ組織との相関を明らかにしていくためには、従

来の解析技術では必ずしも十分であるとは言えない。そこで本研究では、水素脆性評価法の標準化および水素脆性き裂伝ぱの抑制技術に向けて、超高強度薄鋼板の水素脆性における材料信頼性評価技術（き裂伝ぱ評価技術）を構築した。

## **(2)波及効果**

得られた成果は、新規開発材料や他の破壊現象への展開、水素脆化評価法の標準化、き裂伝ぱ抑制技術の提案といった波及効果が望まれる。

## 「革新的新構造材料等研究開発」基本計画

材料・ナノテクノロジー部

## 1. 研究開発の目的・目標・内容

## (1) 研究開発の目的

## ①政策的な重要性

エネルギー消費量削減や CO<sub>2</sub> 排出量削減は、国際的な重要課題である。産業・運輸・民生の各部門で様々な対応が図られており、例えば運輸部門では、世界的に自動車に対する厳しい燃費規制が設定されている。我が国においても、CO<sub>2</sub> 総排出量の 20%近くが自動車からの排出であり、今後の CO<sub>2</sub> 排出量削減に向けて、自動車の燃費向上に係る技術開発が重要となる。

自動車の燃費改善に係る課題には、エンジンを始めとした動力機関の効率向上、車両の軽量化、空気抵抗軽減などがある。中でも動力機関の効率向上に向けた研究開発は精力的に取り組まれ、例えばハイブリッド車の普及に至っているが、これに加えて車両の軽量化もまた、燃費改善効果が高いとされ、重要な取組課題の一つになっている。

近年の車両軽量化技術開発では、軽量材料を適材適所に使うマルチマテリアル化が進められている。その際、異種材料接合が鍵となるが、材質が大きく異なる材料間の接合や、自動車としての安全性を保証する上で欠かせない接合部の性能評価技術など、今後克服すべき数多くの技術課題が残されている。

また、構造材料そのものの軽量化も極めて重要な課題であり、高強度、高延性、不燃性、耐食性、耐衝撃性等の機能が確保された軽量構造材の開発が必要である。それと同時に、これらの機能を損なうことのない接合技術や成形加工技術等の開発が求められる。

## ②我が国の状況

我が国で生産している部素材は、全体シェアから見れば大きくはないが、それぞれ高機能を必要とする、自動車用ハイテン鋼や航空機用炭素繊維などの高級部素材に関して、大きなシェアを有している。この強みを生かし、切れ目なく研究を実施する事で、継続して世界をリード出来るよう努める必要がある。

## ③世界の取組状況

EU や米国では、炭素繊維強化樹脂 (Carbon Fiber Reinforced Plastics、以下、「CFRP」という。) やハイテン等の純粋な材料開発とともに、量産化・接合・シミュレーションなど「材料を使いこなすための技術開発」や「(先進材料を用いた) 車両設計に関する技術開発」も目立ち始めていることから、厳しい燃費規制に対応した車両の軽量化技術の開発競争は

今後激化していくことが予想される。

#### ④本事業のねらい

自動車を中心とした輸送機器の抜本的な軽量化（半減）に向けて、革新的接合技術の開発や、鋼材、アルミニウム材、チタン材、マグネシウム材、炭素繊維及び CFRP 等、輸送機器の主要な構造材料の高強度化等に係る技術開発を一体的に推進する。これにより、輸送機器の燃費向上によるエネルギー消費量と CO<sub>2</sub> 排出量の削減、次世代自動車普及の加速、我が国の部素材産業及びユーザー産業の国際競争力強化を目指す。

### （２）研究開発の目標

#### ①アウトプット目標

輸送機器の抜本的な軽量化（自動車の場合は半減）のために、必要な革新的構造材料技術や革新的接合技術及びマルチマテリアル技術を開発する。

研究開発項目は多岐にわたるため、具体的な開発目標は、別紙の研究開発計画に記載する。

#### ②アウトカム目標

現在使用されている輸送機器の原材料を革新的新構造材料に置き換えることで軽量化を図り、2030 年において、373.8 万 t の CO<sub>2</sub> 削減及び 1.2 兆円規模の売り上げが期待される。

#### ③アウトカム目標達成に向けての取組

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、「NEDO」という。）は、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析・検討するとともに、技術推進委員会や材料使用ユーザーとの連携等を通じて、研究開発の進捗管理や目標の見直しを行うなど、細やかなマネジメントを実行することで、社会ニーズに合った研究開発を推進し、確実な実用化へと繋げる。

### （３）研究開発の内容

上記目標を達成するために以下の研究開発項目について、開発を行う。

それぞれの研究開発項目の具体的な開発内容は、別紙の研究開発計画の通りとする。

#### 【委託事業】

研究開発項目①「マルチマテリアル技術開発」

研究開発項目②「接合技術開発」

研究開発項目③「革新的チタン材の開発」

研究開発項目④「革新的アルミニウム材の開発」

研究開発項目⑤「革新的マグネシウム材の開発」

研究開発項目⑥「革新鋼板の開発」

研究開発項目⑦「熱可塑性 CFRP の開発」

研究開発項目⑧「革新炭素繊維基盤技術開発」

研究開発項目⑨「戦略・基盤研究」

本研究開発は、実用化まで長期間を要するハイリスクな基盤的技術に対して、産官学の複数事業者が互いのノウハウなどを持ち寄り、協調して実施する事業であり、委託事業として実施する。

また、開発成果の社会への浸透を図るため、成果の一部は、開発段階に合わせて順次実用化する。

## 2. 研究開発の実施方式

### (1) 研究開発の実施体制

プロジェクトマネージャーに NEDO 材料・ナノテクノロジー部小川貴弘を任命して、プロジェクトの進行全体の企画・管理やそのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。

本研究開発は、我が国の将来の成長の糧となるイノベーションを創出する未来開拓研究プロジェクトにおいて実施されるものであり、経済産業省が2011年度（研究開発項目⑧）及び2013年度（研究開発項目②～⑦、⑨）に企業、大学等の研究機関（委託先から再委託された研究開発実施者を含む）から公募によって選定し、共同研究契約等を締結する研究体を構築して開始したものである。研究開発項目①のマルチマテリアル技術開発については、研究開発項目⑨において検討していたものであるが、プロジェクト成果を最大化するために特に重要と判断したため、2018年度からは一つの研究開発項目として分離し、実施するものである。

2014年度より NEDO が本研究開発の運営・管理を承継するに当たっては、2013年度までの進捗状況を踏まえて研究開発を実施する。

2013年度の進捗状況を踏まえた研究開発内容・計画及び実施体制の妥当性について、外部有識者による審議を含めた評価を行った上で最適な研究開発体制を構築し、委託して実施する。

なお、各実施者の研究開発能力を最大限に活用し、効率的かつ効果的に研究開発を推進する観点から、NEDO が選定した研究開発責任者（プロジェクトリーダー）新構造材料技術研究組合 理事長 岸 輝雄 氏の下で、各実施者はそれぞれの研究開発テーマを実施する。また、技術動向調査の結果及び各研究テーマの進捗を元とした事業化（出口）を見据えた開発戦略（全体の最終目標達成に向けたテーマ毎の研究開発ロードマップを含む）を構築し、効率的な研究開発・研究成果の実用化を目指す。

研究開発項目③～⑧の個別課題において開発された革新的材料は、①のマルチマテリアル技術開発及び②の接合技術開発と連携し、⑨の戦略・基盤研究における知見も取り入れな



から、速やかに対象部位への適用を図ることで、実用化を促進する。

## (2) 研究開発の運営管理

### ①研究開発の進捗把握・管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO は、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、本事業の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて、技術推進委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる他、随時、プロジェクトの進捗について報告を受けること等により進捗の確認及び管理を行うものとする。また、全体の最終目標の効率的かつ効果的な研究開発の早期達成のため、(新たな課題の対応も含む) 関連技術や市場の動向を随時把握し、最新の技術や知見を取り込むこととし、毎年度、実施方針に掲げられた研究開発プロジェクトの目標や研究開発の内容を評価し、必要に応じて変更するものとする。早期実用化が可能と認められた研究開発については、期間内であっても研究を完了させ、実用化へ向けた実質的な研究成果の確保と普及に努める。また、共通基盤技術領域については、プロジェクト全体の加速化・高度化・効率化につなげるべく、拠点化を含め、適切な体制の構築により、これに取り組む。

### ②技術分野における動向の把握・分析

NEDO は、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析・検討する。なお、調査等を効率的に実施する観点から委託事業として実施する。

### ③ステージゲート方式の実施

研究開発を効率的に推進するため、ステージゲート方式を適用する。NEDO は、経済産業省と密接に連携し、外部有識者による審査を活用し、2016 年度以降の研究開発テーマの継続是非を 2015 年度に決定する。同様に、2017 年度及び 2020 年度にも研究開発テーマの継続是非を判断する。

## 3. 研究開発の実施期間

2014 年度から 2022 年度までの 9 年間とする。但し、研究開発期間を 2014 年度から 2015 年度までの 2 年を第 1 期、2016 年度から 2017 年度までの 2 年を第 2 期、2018 年度から 2020 年度までの 3 年を第 3 期、2021 年度から 2022 年度までの 2 年を第 4 期と区分として実施する。社会情勢等の変化を踏まえ、第 3 期以降の研究開発項目及び目標は、第 2 期の最終年度 (2017 年度) に策定することとする。

なお、研究開発項目②～⑦及び⑨は、2013 年度に、また、研究開発項目⑧は、2011 年度

から 2013 年度に経済産業省で実施し、2014 年度から NEDO が実施する。

#### 4. 評価に関する事項

NEDO は、技術的及び政策的観点から研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による評価を実施する。

中間評価については、第 1 期の最終年度（2015 年度）、第 2 期の最終年度（2017 年度）、第 3 期の最終年度（2020 年度）に実施する。事後評価については、第 4 期終了の翌年度（2023 年度）に実施する。第 3 期以降の研究開発項目及び目標は、中間評価結果を踏まえ、2017 年度末に設定し、必要に応じて新たに実施者を公募する。

なお、中間評価結果、内外の研究開発動向、社会・経済情勢の変化、政策動向の変化等を踏まえ、本事業の必要性、目的、目標、研究開発の内容、推進体制等について見直しを行うこととする。特に、研究開発の最終段階にあるものや早期に成果が見込まれるもの、研究開発成果の進捗が芳しくないもの等については、予算の加速や研究開発の前倒し終了などを弾力的に行うこととする。

評価の時期については、研究開発動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

#### 5. その他の重要事項

##### （1）研究開発成果の取扱い

##### ①成果の普及

NEDO 及び研究開発実施者は、研究成果を広範に導入・普及するように努めるものとする。

##### ②標準化施策等との連携

得られた研究開発の成果については、標準化施策等との連携を図るため、標準案の提案等を必要に応じて実施する。

##### ③知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「未来開拓研究プロジェクトにおける知的財産等の取扱いに関する基本的考え方」に基づき、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第 25 条の規定等に則り、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

また、推進体制を構成する企業等が相互に連携しつつ、研究開発及び事業化を効果的に推進するために、プロジェクト実施者に、知的財産管理規程、再委託契約書、共同研究契約書等を制定させる。

#### ④知財マネジメントに係る運用

「NEDO プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」に従って事業を実施する。

#### (2) 関係省庁の施策との連携体制の構築

文部科学省が実施する「元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>：構造材料領域」の実施体制と緊密に連携するため、各プロジェクトの統括者、主要参加企業、大学等の責任者、所管省庁等の課室長等から構成される連携体制を構築する。当該連携体制では、プロジェクト間の事業計画の調整、成果の共有や取扱いの調整、設備の共用や研究人材交流の促進等について協議を行うものとする。

また、内閣府が実施する「戦略的イノベーション創造プログラム：統合型材料開発システムによるマテリアル革命」の実施体制と緊密に連携する。

#### (3) 基本計画の変更

NEDO は、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制、新規テーマの追加等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

#### (4) 根拠法

本プロジェクトは国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第一号ニに基づき実施する。

#### (5) その他

大学の研究者の企業等への出向を容易にするための取組や守秘義務を課した形でのポストドク等のプロジェクトの参加などの本プロジェクトを活用した実践的人材の育成への取組を促すこととする。また、大学側も、これらの取組を促進する方策について検討するものとする。

#### 6. 基本計画の改訂履歴

2014年3月、制定。

2016年2月、中間評価及び技術推進委員会の結果を踏まえ第2期目標を改定。

2018年2月、中間評価及び技術推進委員会の結果を踏まえ第3期、第4期目標を設定。

2019年2月、PMの変更、SIPプログラム第1期終了によるプログラム名変更を反映。

2021年1月、PMの変更、中間評価及び技術推進委員会の結果を踏まえ第4期目標を改定。

## (別紙1) 研究開発計画 (第1期、第2期、第3期、第4期)

### 研究開発項目①「マルチマテリアル技術開発」

#### 1. 研究開発の必要性

自動車や航空機等輸送機器の軽量化には、異種材料を適材適所に配置したマルチマテリアル構造の導入が、必要不可欠である。しかし、その設計手法は確立されておらず、現状では単なる材料置換にとどまっている。異種材料接合のモデル化も含め、マルチマテリアル構造最適化の設計手法等の確立をはじめとした総合的な技術開発が急務となっている。

#### 2. 研究開発の具体的内容

本研究開発では、これらの課題を解決するために、マルチマテリアル構造設計に適した解析手法であるトポロジー最適化法の適用により、設計ツールを開発する。具体的には、解析対象のモデル化、解析結果の可視化とトポロジー最適化法を連携した解析システムの構築、異材接合を対象としたマルチマテリアル界面評価・モデル化の検討、車体構造適用可能性検討を行い、設計ツールとして完成させ、本プロジェクトの開発材料・接合手法による詳細設計を行い、最終的にマルチマテリアル設計車体の提案を行う。

本研究開発では異種材料の開発成果の集約・連携が重要であるため、連携を促す体制・仕組みを構築し、活動を推進する。具体的には第4期より、各研究開発項目で開発された材料、接合・接着技術を集約して、自動車の部材や車体の部分骨格を試作して軽量化効果の検証を行う。

#### 3. 達成目標

##### (1) マルチマテリアル設計技術開発

##### (a) トポロジー最適化システムの構築

##### 【第3期目標 (2020年度末)】

- ・複数の材料のトポロジー最適設計法を構築する。
- ・線形過渡応答問題のトポロジー最適設計法を構築する。
- ・複数の材料・線形過渡応答問題のトポロジー最適化結果を評価・検討及び他のCAEツールと連携可能なシステムを構築する。

##### (b) マルチマテリアル界面評価・モデル化

##### 【第3期目標 (2020年度末)】

- ・マルチマテリアル界面の評価方法の現状、及び今後のニーズを調査する。
- ・数値解析技術により、マルチマテリアル界面をモデル化する。トポロジー最適化システムとの連携可能な適切な方法を検討する。
- ・有望と考えられる接合法によって作製された試験片をモデル化し、マルチマテリアル界

面として評価検討する。

(c) 車体構造適用可能性検討

【第3期目標（2020年度末）】

- ・複数の材料の利用を想定した対象問題を選定し、そのデータを作成する。
- ・車体構造への展開を目的としたソフトウェアの大規模問題への拡張を検討する。
- ・最適構造の工学的な妥当性を検証・評価する。

(d) マルチマテリアル実設計への適用

【第4期目標（2022年度末）】

- ・開発材料を利用した最適設計法を構築する。
- ・マルチマテリアル最適構造の導出と接合方法を含めた評価を実施し、最終的にマルチマテリアル設計車体の提案を行う。

(2) マルチマテリアルボディの検討・試作

【第4期目標(2022年度末)】

- ・トポロジー最適化法により得られた軽量化マルチマテリアル部材につき、粉末積層造形プロセスによる軽量化の可能性を検討する。
- ・開発材料、接合・接着技術を集約して、自動車の部材や車体の部分骨格を試作し軽量化効果の検証を行う。

研究開発項目②「接合技術開発」

1. 研究開発の必要性

輸送機器の製造では、高強度材の同種接合や、マルチマテリアル化で必要な異種接合の需要が高いものの、現状では、接合強度やコストの面で実用的な技術が十分に確立されていない。例えば自動車の次世代構造材として期待される中高炭素鋼（C>0.3%）や、航空機で多用されるチタン材の接合では、高温加熱時に、変態・炭化物の析出や酸化による材料の脆化が起こるため、従来型の溶融接合法が適用できない。

代表的な非溶融接合の一つである固相摩擦攪拌接合も、中高炭素鋼やチタン材に対しては、攪拌ツールの激しい摩耗・損傷等がネックとなり、現状では適用が困難である。

鋼材／アルミ、鋼材／CFRP、アルミ／CFRP等のマルチマテリアル化で鍵となる異種接合では、低融点側材料の劣化、接合部での脆い金属間化合物の生成、線膨張係数の違いによる歪みの発生、電食など、多くの問題点が残されている。

2. 研究開発の具体的内容

本研究開発では、これらの技術課題を解決するため、コスト競争力に優れ、具体的な用途

が想定された革新的接合技術を開発する。具体的には、中高炭素鋼を含む超ハイテン鋼やチタン材といった難接合材の接合、金属／CFRP 間等の異種接合に適用できる革新的な固相摩擦攪拌接合技術や溶融接合技術等を開発する。また、異種接合固有の電食や熱歪みに関する評価技術の開発を行う。第 2 期より異材接合に対応するための構造材料用接着技術の開発を開始する。また、中高炭素鋼／中高炭素鋼接合技術の開発については、共通基盤技術である摩擦攪拌接合について、実用化に向けた研究を加速する。さらに第 3 期・第 4 期においては、コスト競争力に優れ、用途が想定された革新的接合技術を開発する。すなわち、マルチマテリアル設計技術と連携しながら、材料選択に応じた適切な継手性能を発揮する接合プロセスの技術開発とその基盤研究を実施する。

### 3. 達成目標

#### (1) チタン／チタン連続接合技術の開発

##### 【第 1 期目標 (2015 年度末)】

- ・接合深さ：5mm 以上
- ・接合強度：母材強度の 90%以上
- ・接合装置：設計技術の確立

##### 【第 2 期目標 (2017 年度末)】

- ・接合深さ：10mm 以上
- ・接合強度：母材強度の 90%以上
- ・接合装置：設計技術の確立

#### (2) 中高炭素鋼／中高炭素鋼接合技術の開発

##### 【第 1 期目標 (2015 年度年末)】

##### (a) スポット接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.5mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼で、JIS-A 級 (JIS Z3140:1989) の引張せん断荷重平均値の 70%

##### (b) 連続接合技術開発

- ・接合強度：厚み 2mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼で、母材強度の 70%

##### 【第 2 期目標 (2017 年度末)】

##### (a) スポット接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.5mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼で、JIS-A 級 (JIS Z3140:1989) の引張せん断荷重平均値の 70%以上

##### (b) 連続接合技術開発

- ・接合強度：厚み 2mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼で、母材強度の 70%以上

**【第3期目標（2020年度末）】**

(a) スポット接合技術開発

- ・接合強度:厚み1.4mm、強度1.5GPa以上の中高炭素鋼で、JIS-A級(JIS Z3140:2017)の引張せん断荷重平均値の70%以上、十字引張荷重平均値の70%以上

(b) 連続接合技術開発

- ・接合強度:厚み1.4mm、強度1.5GPa以上の中高炭素鋼同士で、母材強度の70%以上

**【第4期目標（2022年度末）】**

(a) スポット接合技術開発

- ・接合強度:厚み1.4mm、強度1.5GPa以上の中高炭素鋼で、JIS-A級(JIS Z3140:2017)の引張せん断荷重平均値以上、十字引張荷重平均値以上

(b) 連続接合技術開発

- ・接合強度:厚み1.4mm、強度1.5GPa以上の中高炭素鋼同士で、母材強度の90%以上

(3) 鋼材／アルミニウムの接合技術の開発（スポット接合技術）

**【第1期目標（2015年度末）】**

- ・接合強度:試験片の接合で、JIS-A級(JIS Z3140:1989)の引張せん断荷重平均値以上又は母材破断
- ・電食による接合部腐食の電気化学的評価手法の確立
- ・鋼板／アルミニウム間の熱膨張差による熱歪みの評価解析手法の確立

**【第2期目標（2017年度末）】**

- ・高減衰接着剤の仕様決定
- ・電食に対する防錆技術の確立

**【第3期目標（2020年度末）】**

- ・接合強度:抵抗スポット溶接による剥離強度として十字引張荷重平均値が1.5kN以上

**【第4期目標（2022年度末）】**

- ・接合強度:各種実用部品の接合で、JIS-A級(JIS Z3140:2017)の引張せん断荷重最小値以上又は母材破断
- ・接合時間:1点あたり5秒以内

(4) アルミニウム／CFRP 接合技術の開発

**【第1期目標（2015年度末）】**

- ・接合強度：試験片の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140:1989）の引張せん断荷重平均値以上又は母材破断
- ・電食による接合部腐食の電気化学的評価手法の確立
- ・アルミニウム／CFRP 間の熱膨張差による熱歪みの評価解析手法の確立

**【第 2 期目標（2017 年度末）】**

- ・高減衰接着剤の実用組成の決定
- ・電食に対する防錆技術の確立

**【第 3 期目標（2020 年度末）】**

- ・ポリアミド樹脂（PA）、ポリフェニレンスルファイド樹脂（PPS）など高融点樹脂をマトリックスとする CFRP の接合技術の確立
- ・電食の評価手法確立と防錆仕様検討への応用

**【第 4 期目標（2022 年度末）】**

- ・接合強度：各種実用部品の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140:2017）の引張せん断荷重最小値以上又は母材破断
- ・接合時間：1 点あたり 5 秒以内
- ・プロセスモニタリング技術の確立

**（5）鋼材／CFRP 等樹脂接合技術の開発**

**【第 1 期目標（2015 年度末）】**

- ・接合強度：母材破断

**【第 2 期目標（2017 年度末）】**

- ・接合強度：母材破断
- ・電食による接合部腐食の評価手法の確立

**【第 3 期目標（2020 年度末）】**

- ・鋼材／CFRP 複合成形パネルの製作に向けた接合材料の仕様確定
- ・試験片レベルの接合強度：引張せん断強度 15MPa 以上

**【第 4 期目標（2022 年度末）】**

- ・鋼材／CFRP 複合成形パネルの製作
- ・成形パネルの接合強度：引張せん断強度 20MPa 以上



(6) 構造材料用接着技術の開発

【第2期目標 (2017年度末)】

- ・接合強度：引張せん断強度 10MPa 以上
- ・接合部劣化のメカニズム解明及び評価法の確立

【第3期目標 (2020年度末)】

- ・接合強度：金属用接着剤では引張せん断強度 20MPa 以上、プラスチック用接着剤に対しては 7MPa 以上。
- ・接着接合部の耐久性を向上する手法の確立

【第4期目標 (2022年度末)】

- ・接合強度：金属用接着剤は引張せん断強度 28MPa 以上、プラスチック用接着剤に対しては 10MPa 以上。

研究開発項目③「革新的チタン材の開発」

1. 研究開発の必要性

チタン材は、一般的な金属材料と比較して、耐食性や強度に優れるため、長期耐久性が求められる構造部材や、航空機の一部機体や部品など、高い負荷環境下で利用されている。一方、チタンの資源量は比較的豊富であるものの、チタン材は複雑な工程によって製造されており、高いコストが原因でチタン材の普及が妨げられているのが現状である。したがって、チタン材の利用促進のためには、チタン製錬やチタン材製造プロセスの生産性向上が必要となる。また、チタン材のさらなる高機能化によって幅広い応用展開が期待できる。

2. 研究開発の具体的内容

本研究開発では、生産性を向上した新規のチタン製錬技術やチタン材加工技術開発（製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発、連続一貫製造プロセス技術など）を行うとともに、チタン材の構造制御や不純物濃度低減技術等による高機能チタン材の開発を行う。

3. 達成目標

(1) 製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発

【第1期目標 (2015年度末)】

(a) 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス要素技術の開発

- ・鉄含有値：ばらつき範囲 50～500ppm 平均値 200ppm 以下
- ・酸素含有値：ばらつき範囲 100～200ppm 平均値 150ppm 以下

- ・塩素含有値：300ppm 以下
- (b) 上記スポンジチタンを活用した高効率チタン薄板製造プロセス要素技術の開発
  - ・薄板中の気孔率：1%以下
  - ・引張強度・延性バランス：現行材より 20%向上

**【第2期目標（2017年度末）】**

- (a) 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス要素技術の開発
  - ・大型工業製品製造に不可欠な工程技術の要素技術を確立し、量産プロセスの見通しを得る。
- (b) 上記スポンジチタンを活用した高効率チタン薄板製造プロセス要素技術の開発
  - ・工業的に薄板を製造するプロセスの要素技術を確立し、量産プロセスの見通しを得る。

**【第3期目標（2020年度末）】**

- (a) 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス要素技術の開発
  - ・実機スケールで、 $Fe \leq 200ppm$ 、 $O \leq 150ppm$ 、 $Cl \leq 300ppm$  のスポンジチタンを製造可能な技術の確立
  - ・A級スポンジチタンの歩留向上（85%を92%に向上）可能な技術の確立
  - ・スポンジチタンの製造リードタイムを30%低減可能な技術の確立
- (b) 上記スポンジチタンを活用した高効率チタン薄板製造プロセス要素技術の開発
  - ・大型試験設備によりチタン薄板コイルを試作
  - ・上記で試作したチタン薄板の気孔率0.2%以下
  - ・チタン薄板の強度・延性バランスを現行材よりも30%向上
  - ・現行プロセスに比べて薄板製造のリードタイムを15%低減

(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発

**【第1期目標（2015年度末）】**

- (a) スクラップチタンやチタン鉱石などのチタン低廉材料の溶解・精錬要素技術の開発
  - ・精錬後の酸素含有値：300ppm 以下
- (b) 上述の溶解・精錬技術と鋳造、圧延を組み合わせたチタン材連続一貫製造プロセス要素技術の開発
  - ・引張強度：現行材より 20%向上

**【第2期目標（2017年度末）】**

- (a) スクラップチタンやチタン鉱石などのチタン低廉材料の溶解・精錬要素技術の開

発

- ・実機プロセスにおける精錬後の酸素含有値を 300ppm 以下とする要素技術確立の見通しを得る。
- (b) 上述の溶解・精錬技術と鋳造、圧延を組み合わせたチタン材連続一貫製造プロセス要素技術の開発
- ・高速高圧下箔圧延技術：生産性向上の達成に向けた要素技術を確立し、量産プロセスへの見通しを得る。

#### 【第3期目標（2020年度末）】

- ・引張強度が現行材より 20%向上した材の量産プロセス検証

#### (3) チタン新製錬技術開発

#### 【第1期目標（2015年度末）】

- 工業化への展開が可能な低コストでの新規な製錬技術の開発  
(ラボスケールで検証)
- ・鉄含有値：2000ppm 以下
  - ・酸素含有値：1000ppm 以下

#### 【第2期目標（2017年度末）】

- 工業化への展開が可能な低コストでの新規な製錬技術の開発
- ・製錬プロセス設計指針を構築し、量産プロセスへの見通しを得る。

#### 【第3期目標（2020年度末）】

- ・工業化が可能と判断される  $Fe \leq 2000ppm$ 、 $酸素 \leq 1000ppm$  で、現行クロール法よりコスト 20%削減に必要な要素技術を提示。
- ・大型化試験により、A4 判サイズ、数百  $\mu m$  厚さで、 $O \leq 1000ppm$ 、 $Fe \leq 2000ppm$  を試作。

#### 研究開発項目④「革新的アルミニウム材の開発」

##### 1. 研究開発の必要性

アルミニウム材は比強度や延性に優れた軽量材料であり、既に様々な輸送機器に活用されている。しかしながら、現状のアルミニウム材では、輸送機器の更なる軽量化に向けての一層の高強度化や、コスト面での課題がある。したがって、アルミニウム材の物性をより向上させる技術の開発とともに、低コスト化が重要となっている。

##### 2. 研究開発の具体的内容

本研究開発では次世代航空機や自動車等の輸送機器への適用を目指した革新的アルミニウム材の開発を行う。具体的には、アルミニウム材の構造制御技術等を確立することで、強度や延性を向上させた革新的なアルミニウム材を実現する。また、海外メジャー企業並みの低価格を実現できる新規アルミニウム材製造プロセス等の開発を進める。第 2 期よりアルミニウム材を複層化した合金の開発を開始する。

第 3 期後半より、新規アルミニウム材製造プロセスで開発した技術を、リサイクルに適用し新規アップグレードリサイクル技術を開発する。また、自動車用途として耐食性、溶接性に優れる Sc 添加について、その実用性を検証する。

### 3. 達成目標

#### (1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発

##### 【第 1 期目標 (2015 年度末)】

- ・引張強度：660MPa 以上 (現状：600MPa)
- ・耐力 (降伏強度)：600MPa 以上 (現状：550MPa)
- ・伸び：12%以上

##### 【第 2 期目標 (2017 年度末)】

- ・引張強度：750MPa 以上 (現状：600MPa)
- ・耐力 (降伏強度)：700MPa 以上 (現状：550MPa)
- ・伸び：12%以上

##### 【第 3 期目標 (2020 年度末)】

- ・疲労強度を維持しながら高強度化した合金 (引張強度：750MPa) の実機レベル (大型ねじり鍛造装置を用いた) の製造技術開発

##### 【第 4 期目標 (2022 年度末)】

- ・開発合金の実機化製造条件の技術指針確立
- ・Sc 添加アルミニウム合金の自動車用途としての実用性を検証する。

#### (2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発

##### 【第 1 期目標 (2015 年度末)】

- ・電解条件の確立
- ・電析メカニズムの解明

##### 【第 2 期目標 (2017 年度末)】

- ・AlCl<sub>3</sub>系イオン液体の新合成法の開発及び量産法の提示

- ・パイロットプラントによる実証実験

#### 【第3期目標（2020年度末）】

- ・新電析浴において、電析速度  $1.0 \mu\text{m}/\text{min}$  以上の達成
- ・新電析浴を用いた量産ライン設計指針の確定
- ・従来溶製法では製造不可な新電析浴を用いた新 Al 合金及び作製法の指針確定

#### 【第4期目標（2022年度末）】

- ・鋳物級の低純度から新地金以上の高純度アルミニウムへのハイアップグレード技術の指針確定
- ・ハイアップグレード用電解液を用いた高速電解精錬技術の確立
- ・省エネルギーかつ  $\text{CO}_2$  排出量低減が可能なハイアップグレード技術の開発

### (3) 複層アルミ合金の開発

#### 【第2期目標（2017年度末）】

- ・熱処理後の耐力  $600\text{MPa}$  以上
- ・成形前の伸び 20%以上
- ・製造プロセス設計指針の提示

#### 【第3期目標（2020年度末）】

- ・熱処理後の耐力  $700\text{MPa}$  以上
  - ・成形前の伸び 20%以上
- (部材成形性)平面歪領域の破断限界ひずみ 0.15 以上

### 研究開発項目⑤「革新的マグネシウム材の開発」

#### 1. 研究開発の必要性

マグネシウムは、実用金属中で最も軽く、優れた比強度を有することから、CFRP と並び次世代の構造材料として注目されている。しかしながら、マグネシウムは化学的に活性で燃えやすく、加工性が悪いなどの欠点がある。今後、輸送機器用途へと応用するためには、難燃性と加工性（特に展伸性）に優れたマグネシウム材の開発を、資源供給不安の少ない組成（レアアースフリー）により実現することが求められる。

#### 2. 研究開発の具体的内容

本研究開発では可燃性や難加工性といった欠点を克服するため、マグネシウム材の組織制御により強度や延性、難燃性などの材料特性を向上させたレアアースフリーマグネシウム材の開発を行う。また、大型展伸材を製造するための革新的製造プロセス技術等の開発に加

え、マグネシウム材の特性評価技術開発及び利用のための接合技術開発を併せて行う。さらに、第3期より疲労特性を始めとする長期性能を予測するためMI（マテリアルズ・インテグレーション）システムを適用し、上記性能を予測するためのモジュール及び統合されたワークフローを構築する。

### 3. 達成目標

#### (1) 易加工性マグネシウム材の開発

##### 【第1期目標（2015年度末）】

- ・レアアース添加無し
- ・引張強度：250MPa 以上
- ・伸び：15%以上
- ・AZX311 マグネシウム合金と同程度以上の難燃性
- ・AZ31（マグネシウム材）と同程度以上の押出速度

##### 【第2期目標（2017年度末）】

- ・レアアース添加無し
- ・引張強度：270MPa 以上
- ・伸び：20%以上
- ・AZX311 マグネシウム合金と同程度以上の難燃性
- ・A6N01（アルミニウム材）と同程度以上の押出速度

#### (2) 高強度マグネシウム材の開発

##### 【第1期目標（2015年度末）】

- ・レアアース添加無し
- ・引張強度：350MPa 以上
- ・伸び：13%以上
- ・AZX311 マグネシウム合金と同程度以上の難燃性

##### 【第2期目標（2017年度末）】

- ・レアアース添加無し
- ・引張強度：360MPa 以上
- ・伸び：15%以上
- ・AZX311 マグネシウム合金と同程度以上の難燃性

#### (3) マグネシウム材の評価手法の開発

##### 【第1期目標（2015年度末）】

- ・既存の難燃性マグネシウム合金を対象として、発火メカニズム及び腐食メカニズムの解明と評価手法の導出

**【第2期目標（2017年度末）】**

- ・本プロジェクトで開発した難燃性マグネシウム合金を対象として、発火特性、腐食特性及び疲労特性に関するデータベース構築

(4) マグネシウム材の接合技術の開発

**【第2期目標（2017年度末）】**

- ・本プロジェクトで開発した難燃性マグネシウム材を対象として、MIG、TIG、FSW等の接合技術の開発を行う。

(5) 革新的マグネシウム材の開発及び長期性能評価

**【第3期目標（2020年度末）】**

- (5-1)前期で開発した合金を用いて高速鉄道車両適用のための大型部材（長さ 5m 以上）の材料製造技術(押出技術、圧延技術、加工技術)を構築する。
- (5-2)自動車への適用に必要な機械的特性、成形性を有するマグネシウム材の開発と製造技術を確立する。
- (5-3) (5-1), (5-2)で開発した合金を対象として実用化に必要となる長期性能(疲労特性等)データベースを構築する。

**【第4期目標（2022年度末）】**

- (5-2) 自動車への適用に必要な機械的特性、耐食性、成形性を有するマグネシウム材の適用技術(成形技術、スケールアップ技術)を確立する。
- (5-3) (5-1), (5-2)で開発した合金を対象として、実用化に必要となる長期性能(疲労特性等)データベースを機械学習等のデータサイエンスを利用して構築する。

(6) マグネシウム製高速車両構体の開発

**【第3期目標（2020年度末）】**

- (6-1)革新的マグネシウム材を用いて高速車両構体を設計するための技術指針を、一般断面モックアップ構体の作製・評価を通じて構築する。
- (6-2)革新的マグネシウム材を用いて一般断面モックアップ構体を作製するための接合技術及び表面処理技術を構築する。

**【第4期目標（2022年度末）】**

- (6-3) 革新的マグネシウム材の高速車両用構体への適用による試作、検証を行う。

(7) マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション (MI) 活用  
技術開発

【第3期目標 (2020年度末)】

- ・難燃性マグネシウム合金接合部の疲労性能・寿命を、理論や経験則、数値モデリング、データベース、機械学習などにより予測可能とする各モジュールのプロトタイプを完成させる。

【第4期目標 (2022年度末)】

- ・難燃性マグネシウム合金接合部の長期性能 (疲労性能・寿命、耐食性等) を、理論や経験則、数値モデリング、データベース、機械学習などにより予測可能とする各モジュールの検証を実施し、統合したワークフローとして完成させる。

研究開発項目⑥「革新鋼板の開発」

1. 研究開発の必要性

鉄鋼材料は自動車等の主要材料であり、車両軽量化に向けて、薄肉軽量化と衝突エネルギー吸収性の両立を可能にする高強度・高延性化を追求していく必要がある。

近年の高強度・高延性鋼板 (中高炭素鋼板) 開発の動向では、多量のレアメタル添加による高合金化を図る傾向にあるが、製造プロセスでの有害ヒューム発生などの安全面に係る問題や、近年のレアメタル需要増加と資源国による輸出規制などによる価格高騰の背景から、レアメタル多用の製造方法からの脱却が求められている。

2. 研究開発の具体的内容

本研究開発では、レアメタル添加量が極限まで抑えられた次世代中高炭素鋼板の開発を目標とし、鋼板製造工程を精密制御し、レアメタルに代えて鋼材中の既存軽元素が強度や延性などの特性に及ぼす機能を最大限に発現させる技術や、鋼材中の結晶粒微細化・組織制御技術などの各種アプローチの高度化を図る。また同時に、中高炭素鋼開発の加速化に貢献する革新的な解析・評価技術を開発する。具体的には、中性子や放射光、電子線等を用いて、中高炭素鋼中の固溶炭素分布状態や、熱処理や加工プロセスにおける鋼微細組織変態挙動の動的解析技術等を開発する。さらに、第3期より高強度鋼板の異相界面腐食解析及び水素脆化に関する研究開発を開始し、構造用材料としての信頼性の向上を図る。

3. 達成目標

(1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発

【第1期目標 (2015年度末)】

- ・レアメタル添加量：10wt%未満



- ・引張強度：1.2GPa 以上
- ・伸び：15%以上

【第2期目標（2017年度末）】

- ・レアメタル添加量：10wt%未満
- ・引張強度：1.5GPa 以上
- ・伸び：20%以上

【第3期目標（2020年度末）】

- ・レアメタル添加量：10wt%未満、引張強度：1.5GPa 以上、伸び：20%以上の開発鋼において、汎用鋼（590MPa～980MPa 級）と同等の耐食性と水素脆性を目指す

【第4期目標（2022年度末）】

- ・鋼材中の軽元素と耐食性の関係の明確化

(2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発

【第1期目標（2015年度末）】

- ・低濃度炭素検出技術  
炭素定量下限：30ppm
- ・微細粒成長動的観察技術  
像分解能：15nm
- ・加熱加工模擬技術の確立
- ・鋼の歪み挙動解析技術の確立

【第2期目標（2017年度末）】

- ・鋼組織の高速定量解析技術の確立
- ・鋼中のヘテロ構造と軽元素の空間相関評価技術の確立

【第3期目標（2020年度末）】

- ・鋼中のヘテロ構造と軽元素の空間相関評価技術において、空間分解能：200nm 以下、濃度分解能：0.1mass%を目指す
- ・微小電気化学計測技術、局所構造解析技術、マクロ腐食挙動との対比などによるマイクロ及びナノオーダー（ $\mu\text{m}$  以下）の腐食挙動解析技術の確立
- ・薄鋼板の水素脆化挙動に影響を及ぼす応力、ひずみ、水素濃度分布、組織損傷を数百  $\mu\text{m}$  レベルで測定できる技術の確立し、自動車用構造部材としての薄鋼板の水素脆化挙動を適切に評価できる試験方法の確立

#### 【第4期目標（2022年度末）】

- ・薄鋼板の水素脆化挙動に係るき裂伝播挙動解析技術を構築する。また、新規マイクロ組織観察技術を開発し、き裂伝播挙動との関係を明らかにする。

#### 研究開発項目⑦「熱可塑性 CFRP の開発」

##### 1. 研究開発の必要性

炭素繊維と樹脂の複合材料である CFRP は、航空機の構造材等に使用され、機体の軽量化によって省エネに貢献している素材であるが、現在、CFRP のマトリックス樹脂に使用されているのは、主に熱硬化性樹脂であり、生産コストも高いため、大量生産型製品への適用は困難な状況である。さらに、将来的に様々な素材を適材適所に使用していくためには CFRP と金属材料の接合が必要であるが、熱膨張率の差に起因する変形や電食等の課題がある。

##### 2. 研究開発の具体的内容

本研究開発では、これらの課題を解決するため、量産プロセスに適用できるレベルの熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術を開発し、接合部の耐久性等の評価解析技術を確立する。また、熱可塑性 CFRP の中間基材の開発と、その特性に基づいた構造設計、成形加工、性能評価等に係わる技術開発を包括的に実施する。

熱可塑性 CFRP の成形技術では、大型部材の高速成形技術の基盤技術を確立するとともに、多様な高強度・高機能材とのハイブリッド成形技術により、車体構造への適用拡大と実用化を図る。また、熱可塑性 CFRP 材の動的特性、時間依存特性及びその破壊メカニズム解明のための材料特性評価解析技術を開発する。さらに、リサイクル炭素繊維及び革新炭素繊維の適用評価を行い、LCA 上優位な省エネルギー技術を開発する。

##### 3. 達成目標

###### (1) 熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発

###### 【第1期目標（2015年度末）】

- ・CFRP と異種材料（鉄鋼、アルミ合金）との接合の要素技術の見極めを行い、上記接合方式・接合形状における強度設計に必要なデータベースを構築する。

###### 【第2期目標（2017年度末）】

- ・2015年度までに構築した異材接合データベースを基に、現行量産車において多用され一般的に用いられている接合方式（ボルト締結や接着接合）と同等以上の強度を達成するための要素技術及びその設計手法を確立する。また、最適な非破壊評価手法を確立する。

(2) 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工技術の開発

【第1期目標 (2015年度末)】

- (a) 熱可塑性 CFRP の中間基材の開発
  - ・中間基材のバリエーションを拡大し、車体の6割軽量化を実現する中間基材の製造に係る要素技術確立する。
- (b) 熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発
  - ・開発材の静的及び動的力学特性把握のための標準試験法・試験片製作方法を提案する。
- (c) 熱可塑性 CFRP を用いた構造設計技術の開発
  - ・開発材の静的及び動的力学特性を CAE (Computer Aided Engineering) 解析に適用した予測技術確立し、予測精度を既存の鋼板製車体と同等以上とする。
- (d) 熱可塑性 CFRP の成形加工技術の開発
  - ・成形シミュレーション技術を構築する。
- (e) LFT-D (Long Fiber Thermoplastics-Direct) 成形の基礎技術の開発
  - ・炭素繊維と熱可塑性樹脂の混練体の流動特性と材料特性の関係を解析し、混練プロセスの最適条件を解明し、基礎的力学的モデルを提案する。また、初歩的 CAE 解析技術確立する。
- (f) 大物高速成形技術の開発
  - ・初歩的なボディ部材を対象に高速プレス成形技術確立する。また、構造材の剛性確保のために LFT-D 成形品の部分補強を試行する。ハイブリッド構造を達成するためのマテハン技術の概念を決定する。
- (g) 大物高速接合技術の開発
  - ・熱可塑性 CFRP 使用部材同士の接合方法を見極め、最適手法を選択する。
- (h) 高意匠性外板製造技術開発
  - ・高意匠性を支配する技術要因を分析し、基礎技術を見極める。
- (i) 実証評価
  - ・実証評価の実施方法を策定する。

【第2期目標 (2017年度末)】

- (a) 熱可塑性 CFRP の中間基材の開発
  - ・組立パーツの部品点数の半減を実現する中間基材の製造に係る要素技術確立する。
- (b) 熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発
  - ・材料特性発現メカニズムを解明することにより、標準試験法による評価値の妥当性を検証する。
- (c) 熱可塑性 CFRP を用いた構造設計技術の開発

- ・ CAE 解析予測技術を用いた複数部材の一体化設計技術を開発し、組立パーツの部品点数半減と車体の 6 割軽量化のための要素技術を確立する。
- (d) 熱可塑性 CFRP の成形加工技術の開発
  - ・ 成形シミュレーション技術を基にして、繊維配向や形状安定性の予測手法を確立する。
- (e) LFT-D (Long Fiber Thermoplastics-Direct) 成形の基礎技術の開発
  - ・ 量産化につながる混練・押出プロセスの要素技術を確立する。また、LFT-D の材料特性データベースの一部を構築するとともに、試験法標準化への道付けを実施する。さらに、力学モデルの高度化を行い、CAE 解析ソフトウェアに組み込む。
- (f) 大物高速成形技術の開発
  - ・ 複雑なボディ部材の成形技術を確立し、量産化に繋がる要素技術を確立する。ハイブリッド成形技術を確立するとともに、高速マテハン技術の要素技術を確立する。
- (g) 大物高速接合技術の開発
  - ・ 熱可塑性 CFRP 使用部材同士の接合技術を確立する。
- (h) 高意匠性外板製造技術開発
  - ・ 選定した材料、プロセスを用いて、高意匠性付与技術を確立する。
- (i) 実証評価
  - ・ 自動車構造体を想定して、自動車ボディの剛性試験などにより軽量化の検証を行うと共に、量産化に向けた課題の抽出を行う。

### 【第 3 期目標 (2020 年度末)】

- (j) LFT-D 高速成形最適化技術の開発
  - ・ 革新炭素繊維強化熱可塑性 CFRP の LFT-D 成形性及び力学特性を評価する。
  - ・ LFT-D 材の混練 CAE シミュレーション技術の研究を行うと共に、成形流動及び流動配向異方性を考慮した最適設計 CAE 解析技術の研究を行い、剛性最適化技術を開発する。
- (k) 熱可塑性 CFRP 高速ハイブリッド成形技術の開発
  - ・ その場重合成形補強材と LFT-D とのハイブリッド成形技術を開発するとともに、新しく考案したフレック法によるハイブリッド成形の基礎技術を開発する。
- (l) 熱可塑性 CFRP 評価・解析技術の開発
  - ・ 熱可塑性 CFRP の動的・経時特性を評価するとともに、破壊メカニズム解明の研究を行う。
  - ・ 熱可塑性 CFRP の材料特性データベースの一部を構築する。
- (m) 自動車向リサイクル CF 適用化技術の開発
  - ・ リサイクル CF 回収技術の研究を行い、LFT-D 要件に適合する基本プロセスを開発するとともに、設備の改良開発を行う。

- ・リサイクル CF を用いた LFT-D 成形プロセス及び LFT-D 廃材の再利用技術、並びに設備システムの研究を行う。

#### 【第4期目標（2022年度末）】

##### (j) LFT-D 高速成形最適化技術の開発

- ・革新炭素繊維強化熱可塑性 CFRP の LFT-D 成形性及び力学特性を評価する。

##### (k) 熱可塑性 CFRP 高速ハイブリッド成形技術の開発

- ・LFT-D 材と異種材料との組合せによる LFT-D マルチマテリアル要素技術の検討を行う。

##### (l) 熱可塑性 CFRP 評価・解析技術の開発

- ・熱可塑性 CFRP の破壊メカニズムを解明し、材料特性予測技術を確立するとともに、実設計への適用を想定した実用的な材料モデルを開発する。
- ・熱可塑性 CFRP の材料特性データベースを構築する。

##### (m) 自動車向回収 CF 適用化技術の開発

- ・リサイクル CF 回収技術を確立する。
- ・リサイクル CF の LFT-D 成形技術、及び LFT-D 廃材のリサイクル技術を開発する。

##### (3) 超軽量 CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の開発

#### 【第4期目標（2022年度末）】

- ・CFRTP 材料および成形技術を活用して、CFRTP/CFRP（熱可塑/熱硬化）ハイブリッド部材を設計し、軽量化効果を実証する。

#### 研究開発項目⑧「革新炭素繊維基盤技術開発」

##### 1. 研究開発の必要性

現在の炭素繊維製造方法（進藤方式）は、アクリル繊維を空气中高温で耐炎化（焼成）するもので、製造時における消費エネルギー及びCO<sub>2</sub>排出量はいずれも鉄の約10倍と高い。また、製造装置の除熱効率の限界から生産性もなかなか高められないのが現実であり、これらは大きな課題となっている。今後の自動車の軽量化に向けた普及拡大を考えると、近い将来見込まれる炭素繊維の大量需要に的確に対応していくことが必要である。

##### 2. 研究開発の具体的内容

本研究開発では、高温長時間の加熱をマイクロ波に代替することなどにより、消費電力及びCO<sub>2</sub>排出量を半減するとともに、製造速度を向上し生産効率を引き上げる炭素繊維製造プロセスの革新を行う。また、炭素繊維の多機能化を目指した異形状炭素繊維の開発と、製造プロセス等に係わる技術開発を実施する。

第3期では、第2期までの成果と知見をもとに、アクリル系繊維用ポリマーベースの耐炎ポリマーの組成最適化を行い、紡糸プロセスの確立を目指す。さらに炭化工程をマイクロ

波に代替する際の温度制御技術を多段化し、炭素化プロセスの革新を行う。

### 3. 達成目標

#### (1) 新規炭素繊維前駆体化合物の開発

##### 【第1期目標 (2015年度末)】

- ・下記(2)の成果とあわせて、新たな炭素繊維前駆体の効率的な合成プロセス技術を確立し、新たな炭素繊維前駆体を開発する。なお、汎用炭素繊維と同等の特性とは、引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%とする。

##### 【第2期目標 (2017年度末)】

- ・下記(2)の成果とあわせて、異形状炭素繊維の製造技術を確立する。

##### 【第3期目標 (2020年度末)】

- ・アクリル繊維ポリマーをベースとする完全耐炎ポリマーを得る反応プロセスを確立する。これに伴い炭素繊維紡糸工程では、Large Tow (48K) の紡糸技術を確立すると同時に、炭化プロセスも革新炭素繊維に適合するよう処理条件など検討する。炭素繊維として、フィラメント径 7 $\mu$ m で、弾性率 240GPa、強度 4GPa を凌ぐ性能を目指す。

#### (2) 炭化構造形成メカニズムの解明

##### 【第1期目標 (2015年度末)】

- ・(1)の成果とあわせて、新たな炭素繊維の製造技術を開発する。なお、汎用炭素繊維と同等の特性とは、引張弾性率 235GPa、破断伸度 1.5%とする。

##### 【第2期目標 (2017年度末)】

- ・(1)の成果とあわせて、異形状炭素繊維の製造技術を確立する。

##### 【第3期目標 (2020年度末)】

- ・マイクロ波炭化のプロセス多段化など設備を改良すると共に処理条件を最適化し、従来の炭化炉方式に優る大規模生産のための製造技術を確立する。

#### (3) 炭素繊維の評価手法開発、標準化

##### 【第1期目標 (2015年度末)】

- ・圧縮試験、曲げ試験、ねじり試験方法の規格原案を作成し、JIS/ISO化に必要なデータを収集する。また、単繊維の熱膨張率計測試験について、試験装置を開発し、評価手法を確立するとともに、熱可塑性樹脂との界面接着特性試験について、複数の評価手法について比較検討を行い、その結果をテスト報告 (TR) としてとりまとめる。さらに、

新規炭素繊維前駆体から製造される炭素繊維を適用した複合材料の設計やライフサイクルアセスメント（LCA）に活用するためのデータを収集する。

**【第2期目標（2017年度末）】**

- ・熱可塑性樹脂と異形状炭素繊維の界面特性を検証し、その特性発現メカニズムを解明することにより、標準的な力学的試験法を確立する。

研究開発項目⑨「戦略・基盤研究」

1. 研究開発の必要性

10年にわたる長期間での実施を予定している本研究開発では、その間、また将来的に開発技術を着実に社会へと還元していくために、今後の社会動向に合わせた研究開発のビジョンを明確にする必要がある。具体的には、今後中長期的に自動車や航空機に求められる構造材料等の在り方を展望した上で、上記研究開発の方向性や目標、新たな研究開発分野などを設定していく必要がある。

2. 研究開発の具体的内容

材料、部品、自動車や航空機などのメーカーや、全材料を横断的に見渡せる有識者へのヒアリング、内外の技術動向や政策支援の調査、新しい技術の可能性調査（FS）、基盤研究など、本研究開発の方向性検討に必要な調査を全般的に行い、革新的新構造材料等研究開発の効果的な推進に繋げる。また、標準化・規格化活動にも取り組む。

また、本プロジェクトの成果をプロジェクト終了後も活用していくための方策を検討する。

3. 達成目標

(1) 新構造材料の動向調査・技術・研究戦略

**【第1期目標（2015年度末）】**

- ・研究開発のビジョンの明確化
- ・接合技術及び個別材料の技術戦略指針、実用化に向けた課題抽出
- ・プロジェクトの技術・研究戦略の策定
- ・新規材料の輸送機器への適用可能性の明確化
- ・新規材料の研究開発方針の明確化

**【第2期目標（2017年度末）】**

- ・研究開発の実用化・事業化ビジョンの明確化
- ・接合技術及び個別材料の技術戦略の策定
- ・新規材料の実用化に向けた技術課題（構造体関連）の抽出

- ・異種材料接合技術の標準化・規格化の検討体制の構築

**【第3期目標（2020年度末）】**

- ・接合技術及び個別材料の技術戦略の策定
- ・新規材料の実用化に向けた技術課題の抽出
- ・マルチマテリアル構造体に係わる共通基盤技術課題の抽出
- ・異種材料接合技術の標準化・規格化の検討

**【第4期目標（2022年度末）】**

- ・新規材料、接合・接着技術の実用化に向けた技術・コスト課題の明確化
- ・マルチマテリアル構造体に係わる共通基盤技術課題の明確化
- ・異種材料接合技術の標準化・規格化取りまとめ
- ・プロジェクト成果の取りまとめ及び検証
- ・プロジェクト成果をプロジェクト終了後も活用してくための方策を具体的に検討し準備を進める。

**(2) 共通基盤技術の調査研究**

**【第1期目標（2015年度末）】**

- ・構造材料、接合プロセスに関する新たな研究シーズの顕在化
- ・マルチマテリアル設計における、研究方向性の明確化
- ・材料と破壊の基礎メカニズム解明
- ・接合部の非破壊評価手法の確立
- ・プロセスモニタリング／ヘルスマニタリング手法の確立

**【第2期目標（2017年度末）】**

- ・構造材料、接合プロセスに関する新たな研究シーズ(腐食や水素脆化評価など)の顕在化
- ・小型中性子線などによる構造材料評価手法の構築
- ・軽量金属材料（アルミニウム、マグネシウム）に関する計測・評価手法の確立
- ・熱可塑性複合材料の損傷・強度評価手法の確立
- ・構造体接合部設計・評価手法の確立

**【第3期目標（2020年度末）】**

- ・構造体接合部設計・評価手法の抽出
- ・新材料の材料代替効果定量技術の開発課題の抽出
- ・車体軽量化技術の集約化に関する課題の抽出
- ・異種材料接合における腐食課題の抽出



【第4期目標（2022年度末）】

- ・構造体接合部設計・評価手法の確立
- ・新材料の材料代替効果定量技術の確立
- ・車体軽量化技術の集約手法・実行体制の確立
- ・異種材料接合における腐食解析手法の確立

(3) 中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発

【第3期目標（2020年度末）】

- ・新規小型中性子装置を建設し、ブラッグエッジイメージング法による測定の分解能と統計精度を明らかにする。
- ・中性子小角散乱と X 線小角散乱の比較から、ナノ析出物の化学組成、サイズ分布、体積率、形状因子を同定する技術を開発する。
- ・炭素の濃度分布を同定する技術及び析出物と水素局所濃縮の関係を検出する技術を開発する。

【第4期目標（2022年度末）】

- ・ブラッグエッジイメージングのデータから、歪や金属組織のイメージング情報に変換する手法を確立し、接合部の2次元マッピングを実現する。
- ・中性子小角散乱と X 線小角散乱の比較から、ナノ析出物の化学組成、サイズ分布、体積率、形状因子を同定する技術を確立する。
- ・オーステナイト中の炭素濃度分布を検出する技術を開発する。
- ・鋼中の水素局所的濃縮を検出する技術を開発する。

(4) 低圧・超高速 CFRP 成形技術の開発

【第3期目標（2020年度末）】

- ・樹脂供給体における樹脂・基材の基本設計を完了する。
- ・低圧・高速成形の平板形状での成形条件を確立する。
- ・平板での樹脂含浸挙動解析シミュレーション技術を構築する。

(別紙2) 研究開発スケジュール (第1期・第2期)

	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度
研究開発項目① 「接合技術開発」	(1) チタン／チタン連続接合技術の開発			(1) チタン／チタン連続接合技術の開発	
	(2) 中高炭素鋼／中高炭素鋼接合技術の開発			(2) 中高炭素鋼／中高炭素鋼接合技術の開発	
	(3) 鋼材／アルミニウムの接合技術の開発(スポット接合)			(3) 鋼材／アルミニウムの接合技術の開発(スポット接合)	
	(4) アルミニウム／CFRP接合技術の開発			(4) アルミニウム／CFRP接合技術の開発	
	(5) 鋼材／CFRP等樹脂接合技術の開発			(5) 鋼材／CFRP等樹脂接合技術の開発	
				(6) 構造材料用接着技術の開発	
研究開発項目② 「革新的チタン材の開発」	(1) 製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発			(1) 製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発	
	(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発			(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発	
	(3) チタン新製錬技術開発			(3) チタン新製錬技術開発	
研究開発項目③ 「革新的アルミニウム材の開発」	(1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発			(1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発	
	(2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発			(2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発	
				(3) 複層アルミ合金の開発	
研究開発項目④ 「革新的マグネシウム材の開発」	(1) 易加工性マグネシウム材の開発			(1) 易加工性マグネシウム材の開発	
	(2) 高強度マグネシウム材の開発			(2) 高強度マグネシウム材の開発	
	(3) マグネシウム材の評価手法の開発			(3) マグネシウム材の評価手法の開発	
				(4) マグネシウム材の接合技術の開発	
研究開発項目⑤ 「革新鋼板の開発」	(1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発			(1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発	
	(2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発			(2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発	
研究開発項目⑥ 「熱可塑性CFRPの開発」	(1) 熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術開発			(1) 熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術開発	
	(2) 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発			(2) 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発	
研究開発項目⑦ 「革新炭素繊維基盤技術開発」	(1) 新規炭素繊維前駆体化合物の開発			(1) 新規炭素繊維前駆体化合物の開発	
	(2) 炭化構造形成メカニズムの解明			(2) 炭化構造形成メカニズムの解明	
	(3) 炭素繊維の評価手法開発、標準化			(3) 炭素繊維の評価手法開発、標準化	
研究開発項目⑧ 「戦略・基盤研究」	(1) 新構造材料の動向調査・技術・研究戦略			(1) 新構造材料の動向調査・技術・研究戦略	
	(2) 共通基盤技術の調査研究			(2) 共通基盤技術の調査研究	

第1期中間評価

第2期中間評価

(別紙3) 研究開発スケジュール (第3期・第4期)

	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度
研究開発項目① 「マルチマテリアル技術開発」	(1)マルチマテリアル設計技術開発			(1)マルチマテリアル設計技術開発	
				(1)マルチマテリアルボディの検討・試作	
研究開発項目② 「接合技術開発」	(2)中高炭素鋼/中高炭素鋼接合技術の開発			(2)中高炭素鋼/中高炭素鋼接合技術の開発	
	(3)鋼材/アルミニウムの接合技術の開発(スポット接合)			(3)鋼材/アルミニウムの接合技術の開発(スポット接合技術)	
	(4)アルミニウム/CFRP接合技術の開発			(4)アルミニウム/CFRP接合技術の開発	
	(5)鋼材/CFRP等樹脂接合技術の開発			(5)鋼材/CFRP等樹脂接合技術の開発	
	(6)構造材料用接着技術の開発			(6)構造材料用接着技術の開発	
研究開発項目③ 「革新的チタン材の開発」	(1)製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発			(1)製錬・溶	
	(2)チタン材連続一貫製造プロセス技術開発			(2)チタン	
	(3)チタン新製錬技術開発			(3)チタ	
研究開発項目④ 「革新的アルミニウム材の開発」	(1)高強度・高靱性アルミニウム合金の開発			(1)高強度・高靱性アルミニウム合金の開発	
	(2)アルミニウム材製造電析プロセス技術開発			(2)アルミニウム材製造電析プロセス技術開発	
	(3)複層アルミ合金の開発			(3)複層	
研究開発項目⑤ 「革新的マグネシウム材の開発」	(5)革新的マグネシウム材の開発および長期性能評価			(5)革新的マグネシウム材の開発および長期性能評価	
	(6)マグネシウム製高速車両構体の開発			(6)マグネシウム製高速車両構体の開発	
	(7)マグネシアの性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション(MI)活用技術開発			(7)マグネシアの性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション(MI)活用技術開	
研究開発項目⑥ 「革新鋼板の開発」	(1)高強度高延性中高炭素鋼の開発			(1)高強度高延性中高炭素鋼の開発	
	(2)中高炭素鋼の解析・評価手法の開発			(2)中高炭素鋼の解析・評価手法の開発	
研究開発項目⑦ 「熱可塑性CFRPの開発」				(2)熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発	
				(3)超軽量CFRP/CFRPハイブリッド部材の開発	
研究開発項目⑧ 「革新炭素繊維基盤技術開発」	(1)新規炭素繊維前駆体化合物の開発			(1)新規	
	(2)炭化構造形成メカニズムの解明			(2)炭化	
研究開発項目⑨ 「戦略・基盤研究」	(1)新構造材料の動向調査・技術・研究戦略			(1)新構造材料の動向調査・技術・研究戦略	
	(2)共通基盤技術の調査研究			(2)共通基盤技術の調査研究	
	(3)中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発			(3)中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発	
	(4)低圧・超高速CFRP成形技術の開発			(4)低	

第3期中間評価

事後評価

# 事前評価書

作成日 平成26年2月20日

1. プロジェクト名	革新的新構造材料等研究開発
2. 推進部署名	電子・材料・ナノテクノロジー部
3. プロジェクト概要（予定）	
1) 背景	
<p>エネルギー消費量削減やCO<sub>2</sub>排出量削減は、国際的な重要課題である。産業・運輸・民生の各部門で様々な対応が図られており、例えば運輸部門では、世界的に自動車に対する厳しい燃費規制が設定されている。我が国においても、CO<sub>2</sub>総排出量の20%近くが自動車からの排出であり、今後のCO<sub>2</sub>排出量削減に向けて、自動車の燃費向上に係る技術開発が重要となる。</p> <p>自動車の燃費改善に係る課題には、エンジンを始めとした動力機関の効率向上、車両の軽量化、空気抵抗軽減などがある。中でも動力機関の効率向上に向けた研究開発は精力的に取り組まれ、例えばハイブリッド車の普及に至っているが、これに加えて車両の軽量化もまた、燃費改善効果が高いとされ、重要な取組課題の一つになっている。</p> <p>近年の車両軽量化技術開発では、軽量材料を適材適所に使うマルチマテリアル化が進められている。その際、異種材料接合が鍵となるが、材質が大きく異なる材料間の接合や、自動車としての安全性を保証する上で欠かせない接合部の性能評価技術など、今後克服すべき数多くの技術課題が残されている。</p> <p>また、構造材料そのものの軽量化も極めて重要な課題であり、高強度、高延性、不燃性、耐食性、耐衝撃性等の機能が確保された軽量構造材の開発が必要である。それと同時に、これらの機能を損なうことのない接合技術や成形加工技術等の開発が求められる。</p>	
2) 目的	
<p>自動車を中心とした輸送機器の抜本的な軽量化（半減）に向けて、革新的接合技術の開発や、鋼材、アルミニウム材、チタン材、マグネシウム材、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂（Carbon Fiber Reinforced Plastics、以下「CFRP」という。）等、輸送機器の主要な構造材料の高強度化等に係る技術開発を一体的に推進する。これにより、輸送機器の燃費向上によるエネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量の削減、我が国の部素材産業及び川下となるユーザー産業の国際競争力強化を目指す。</p>	

### 3) 実施内容

革新的接合技術の開発や輸送機器の主要な構造材料の高強度化等に係る技術開発を行う。具体的なテーマは以下のとおり。

#### ① 革新的接合技術

コスト競争力に優れ、具体的な用途が想定された革新的接合技術を開発する。具体的には、中高炭素鋼やチタン材といった難接合材の接合、金属／CFRP 間等の異種接合に適用できる革新的な固相摩擦攪拌接合技術や熔融接合技術等を開発する。

#### ② 革新的チタン材の開発

生産性を向上した新規のチタン製錬技術やチタン材加工技術開発（製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発、連続一貫製造プロセス技術など）を行うとともに、チタン材の構造制御や不純物濃度低減技術等による高機能チタン材の開発を行う。

#### ③ 革新的アルミニウム材の開発

次世代航空機や自動車等の輸送機器への適用を目指した革新的アルミニウム材の開発を行う。具体的には、アルミニウム材の構造制御技術等を確立することで、強度や延性を向上させた革新的なアルミニウム材を実現する。また、海外メジャー企業並みの低価格を実現できる新規アルミニウム材製造プロセス等の開発を進める。

#### ④ 革新的マグネシウム材の開発

可燃性や難加工性といった欠点を克服するため、マグネシウム材の組織制御により強度や延性、耐熱性などの材料特性を向上させたレアアースフリーマグネシウム材の開発を行う。また、大型展伸材を製造するための革新的製造プロセス技術等の開発に加え、マグネシウム材の特性評価技術開発を併せて行う。

#### ⑤ 革新鋼板の開発

レアメタル添加量が極限まで抑えられた次世代中高炭素鋼板の開発を目標とし、鋼板製造工程を精密制御し、レアメタルに代えて鋼材中の既存軽元素が強度や延性などの特性に及ぼす機能を最大限に発現させる技術や、鋼材中の結晶粒微細化・組織制御技術などの各種アプローチの高度化を図る。また同時に、中高炭素鋼開発の加速化に貢献する革新的な解析・評価技術を開発する。

⑥熱可塑性CFRPの開発

量産プロセスに適用できるレベルの熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術を開発し、接合部の耐久性等の評価解析技術を確立する。また、熱可塑性CFRPの中間基材の開発と、その特性に基づいた構造設計、成形加工、性能評価等に係わる技術開発を包括的に実施する。

⑦革新炭素繊維基盤技術開発

高温長時間の加熱をマイクロ波に代替することなどにより、消費電力及びCO<sub>2</sub>排出量を半減するとともに、製造速度を向上し生産効率を引き上げる炭素繊維製造プロセスの革新を行う。また、炭素繊維の多機能化を目指した異形状炭素繊維の開発と、製造プロセス等に係わる技術開発を実施する。

(2)規模 総事業費（需給）470億円を想定  
平成25年度、METI直執行予算：41億円  
平成26年度予算：48億円

(3)期間 平成26年度～34年度（9年間）

①～⑥は平成25年度をMETI直執行。

⑦は平成23年度から平成25年度までMETI直執行。  
平成26年度よりNEDO執行予定。

#### 4. 評価内容

##### (1) プロジェクトの位置付け・必要性について

###### 1) NEDOプロジェクトとしての妥当性

本事業は、日本再生戦略「グリーン成長戦略」（平成24年7月31日閣議決定）に定められた重点施策「グリーン部素材が支えるグリーン成長の実現」に則ったものである。

再生可能エネルギー発電設備、蓄電池の高性能化、自動車や航空機の軽量化・省エネ、高断熱住宅等に関する部素材などは、現時点では日本が高い競争力を有しているものの、部素材メーカー単独では製品開発までは行えず、必ずしも部素材の強みを最終製品に反映できていない。

本事業は、国が主導的に関与し、川上から川下までの共同技術開発の支援を行うことで、材料科学分野で生み出された優れた成果を革新的構造材料として輸送機器に適用し、最終製品としての国際競争力を強化することで、グローバル化が進む中で引き続き国内産業を成長させていく取組みであり、社会的、経

済的にも重要である。

本事業で行う研究開発では、素材毎に縦割りではなされてきた従来の研究開発スタイルから脱却し、これらの素材の壁を越えて統合的に事業を推進することで、これまでの技術開発の延長線では成し得ない画期的な部素材を開発する。このような長期的でリスクの高い研究開発は、民間企業が単独で実施することは困難であり、国が積極的に関与し、実施する意義がある。

## 2) 目的の妥当性

世界的に自動車に対する厳しい燃費規制が設定されるなど、運輸部門におけるエネルギー消費量削減やCO<sub>2</sub>排出量削減は、国際的に重要な課題であると認識されている。我が国でも、CO<sub>2</sub>排出量の20%を運輸部門が占めていることから、燃費改善の必要性は大きい。

自動車等輸送用機械分野では、ハイブリッド車の普及に代表される動力機関の効率向上に加えて、車両の軽量化も燃費改善効果が高いとされており、重要な取り組み課題の一つとして挙げられている。単なる軽量化だけではなく、衝突時の安全性等の向上も求められることから軽量でかつ高強度、長寿命の、従来の延長上にはない画期的な材料の開発が必要となっている。

また、軽量材料を適材適所に使うマルチマテリアル化が進められているが、材質が大きく異なる材料間の接合や、安全性を保證するうえで欠かせない接合部の性能評価技術など、克服すべき技術課題が数多く残されている。

日本の部素材産業は、国際的にみても技術的優位性を有しているが、近年、新興工業国の台頭、グローバル化の進展により、企業間の国際的な競争が激化している。そのような中、我が国の材料産業、ひいては製造業の国際競争力を維持するためには、国として、産官学を巻き込んだ新たな手を打つことが求められる。

本技術開発では、以上を踏まえ、自動車等輸送用機械分野での省エネルギー化、安心・安全を図るため、さらなる軽量化、高強度化等が求められている材料について、最新の科学的知見を利用し、革新的材料の製造及び利用する基盤的技術開発を行い、実用化を促進する。

### (1) プロジェクトの位置付け・必要性についての総合的評価

エネルギー消費量削減やCO<sub>2</sub>排出量削減という国際的な課題に対し、大きな貢献が期待できるとともに、グローバル化が進む中で引き続き国内産業を成長させていく取り組みであり、社会的、経済的にも重要である。

また、川上から川下までの連携、素材の壁を越えた事業推進など、民間企業単独では実施が困難であることからNEDOが主導して実施する意義は大きい。

## (2) プロジェクトの運営マネジメントについて

### 1) 成果目標の妥当性

これまでは、各部材がどのような材料と組み合わせられて使用されるかといったユーザー企業からの視点での材料開発はほとんど進められておらず、材料ごとの高性能化に特化した開発が進められてきた。本プロジェクトでは、自動車や高速車両メーカーのニーズ（市場が要求する仕様）に基づき、どの材料をどの構造部材へ適用するかというイメージも持ちながら、各材料（Ti合金、Mg合金、Al合金、革新鋼板、炭素繊維、複合材料）の高性能化・低コスト製造プロセス開発・設計加工技術開発の目標を設定している。

### 2) 実施計画の想定と妥当性

研究開発項目である新部素材開発、異種材料接合技術開発、革新製造プロセス開発は、課題も多く、研究開発期間には長期間を要すると考えられる。そのため、研究期間を第1期（平成26年度～27年度）、第2期（平成28年度～29年度）、第3期（平成30年度～32年度）、第4期（平成33年度～34年度）分けて事業を推進する。

### 3) 評価実施の想定と妥当性

NEDOは、技術的及び政策的観点から研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による評価を実施する。

中間評価については、第1期の最終年度（平成27年度）、第2期の最終年度（平成29年度）、第3期の最終年度（平成32年度）に実施する。事後評価については、第4期終了の翌年度（平成35年度）に実施する。第3期以降の研究開発項目及び目標は、中間評価結果を踏まえ、平成29年度末に設定し、新たに実施者を公募する。

なお、中間評価結果、内外の研究開発動向、社会・経済情勢の変化、政策動向の変化等を踏まえ、本事業の必要性、目的、目標、研究開発の内容、推進体制等についてゼロベースで見直しを行うこととする。特に、研究開発の最終段階にあるものや早期に成果が見込まれるもの、研究開発成果の進捗が芳しくないもの等については、予算の加速や研究開発の前倒し終了などを弾力的に行うこととする。



<p><b>4) 実施体制の想定と妥当性</b></p>
<p>推進体制として技術と事業の両面で世界に勝てる産学官ドリームチームとなっている。また、今までなしえなかった企業間・府省間を超えた連携体制で川上～川下企業のシナジー連携効果まで期待出来る形になっている。</p>
<p><b>5) 実用化・事業化戦略の想定と妥当性</b></p>
<p>戦略・基盤研究にて、自動車や航空機、部品、材料メーカーや、全材料を横断的に見渡せる有識者へのヒアリング、内外の技術動向や政策支援の調査など、本研究開発の方向性検討に必要な調査を全般的に行い、確実な実用化へと結びつける。</p>
<p><b>6) 知財戦略の想定と妥当性</b></p>
<p>委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「未来開拓研究プロジェクトにおける知的財産等の取扱いに関する基本的考え方」に基づき、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に則り、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。</p> <p>また、推進体制を構成する企業等が相互に連携しつつ、研究開発及び事業化を効果的に推進するために、プロジェクト実施者に、知的財産管理規程、再委託契約書、共同研究契約書等を制定させる。</p>
<p><b>7) 標準化戦略の想定と妥当性</b></p>
<p>革新的構造材料の評価技術、新規異種材料接合において、接合部の強度評価技術等物性評価方法の開発を進め、新規材料、接合技術の国際標準化を進める計画である。</p>
<p><b>(2) プロジェクトの運営マネジメントについての総合的評価</b></p>
<p>自動車メーカーなどユーザーのニーズに基づき、プロジェクトの目標を設定しており、それに対する評価や評価結果の対応などマイルストーンも明確である。また、世界をリードする企業、大学、国研が一体となった研究開発体制を敷くとともに、これまで成しえなかった企業間を超えた連携体制で川上～川下企業のシナジー効果まで期待出来る。</p>
<p><b>(3) 成果の実用化・事業化の見通しについて</b></p>
<p><b>1) プロジェクト終了後における成果の実用化・事業化可能性</b></p>

本技術の実現により、自動車の軽量化が可能となり、その結果として次世代自動車として4.5 km/Lという数値目標も裏付けのあるデータから算出されており、実用化・事業化の可能性は非常に高い。

## 2) 成果の波及効果

本プロジェクトでは、技術と事業の両面で世界に勝てる産学官ドリームチームを目指しており、産官学の強い連携を行う。プロジェクトに参画する大学等アカデミアが、企業との開発連携を行う事で、企業側、大学側両者の人材育成につながるものと考えられる。

また、本プロジェクトでは、これまでなしえなかった、企業間、府省間を超えた連携体制を築き、一体的に事業を進めていくことで、川上(部素材)～川下(ユーザー企業)の連携によるシナジー効果が期待でき、日本の部素材産業の国際競争力強化に大きく寄与できるものと考えられる。

輸送機器(自動車、航空機等)の抜本的な軽量化に繋がる技術開発を行うことにより、エネルギー使用量及びCO<sub>2</sub>排出量削減が実現できることの社会的意義は非常に大きい。

## (3) 成果の実用化・事業化の見通しについての総合的評価

環境調和を実現する輸送機器の実現は社会の強い要求であること、産学官の強い連携によるシナジー効果や人材育成が期待できることから、シーズ、ニーズの両面から見て、実用化・事業化の見通しは良い。

「革新的新構造材料等研究開発 基本計画（案）」に対するパブリックコメント募集の結果について

平成26年3月12日  
NEDO  
電子・材料・ナノテクノロジー部

NEDO POSTにおいて標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。

1. パブリックコメント募集期間  
平成26年2月27日～平成26年3月12日
2. パブリックコメント投稿数＜有効のもの＞  
計0件

以上

添付資料

特許論文等リスト（共同研究、再委託研究も含む）

1. 研究開発項目①「マルチマテリアル技術開発」

[テーマ番号49] マルチマテリアル設計技術開発（FS研究）（2017年度）

[テーマ番号59] マルチマテリアル車体軽量化に関わる革新的設計技術の開発  
（2018年度～2022年度）

表 添-1.1-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2017FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2018FY	0	0	0	0	0	4	1	0	0	0	0	0
2019FY	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1
2020FY	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2021FY	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	1
2022FY	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
合計	1	0	0	1	0	11	1	0	0	0	0	3

※1：Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT※	出願日	状態	名称	発明者
1	国立大学法人 京都大学	特願 2020- 216627	国内	2020/12/25	公開	構造最適化装置、構造最適化方法、及び、構造最適化プログラム	古田幸三，西脇眞二，林聖勲，泉井一浩

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Lim Sunghoon et al.	京都大学	Weight reduction design of multi-material vehicle components using level set-based topology optimization	Structural and Multidisciplinary Optimization ,65(4), 1-16	有	2022

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Lim, S., Misawa, R., Maruyama, S., Yamada, T., Izui, K. and Nishiwaki, S.	Kyoto University	Lightweight Design for Automotive Component Using Multi-material Level Set-based Topology Optimization	The 4th International Conference on Computational Design in Engineering	2018/4/02
2	Lim, S., Misawa, R., Maruyama, S., Yamada, T., Izui, K. and Nishiwaki, S.	Kyoto University	Level Set-Based Topology Optimization for Multiple Materials in Automotive Component Design	自動車技術会 2018 春季大会	2018/5/23
3	西脇眞二、三澤亮太、Sunghoon Lim、丸山新一、山田崇恭、泉井一浩	Kyoto University	自動車ボディ構造のマルチマテリアルトポロジー最適化	自動車技術会 2018 春季大会	2018/5/23
4	Lim, S., Izui, K., Nishiwaki, S., and Min, S.	Kyoto University	Multi-Material Topology Optimization in a Magnetic Actuator Using the Hybrid Analysis Method	The Eighteenth Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation	2018/10/29
5	Misawa, R., Lim, S., Maruyama, S., Yamada, T., Izui, K. and Nishiwaki, S.	Kyoto University	On a Solver of Stiffness Maximization Problems in 3D with Multiple Materials Using Reaction Diffusion Equations	International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences	2019/3/28
6	Ryota Misawa, Sunghoon Lim, Shinichi Maruyama, Takayuki Yamada, Kazuhiro Izui, Shinji Nishiwaki	Kyoto University	Topology Optimization for 3D Elastostatic Problems with Mass Constraint Using Multiple Materials	13th World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization	2019/5/22
7	Furuta, K.	Kyoto University	Multi-Material Level Set-Based Topology Optimization for 3d Structures Considering a Material Interface Effect	14th WCCM & ECCOMAS Congress 2020	2021/1/11-2021/1/15
8	丸山新一	京都大学	車体構造の軽量化検討のためのマルチマテリアル・トポロジー最適化ソフトウェアの開発	自動車技術会 2021 春季大会	2021/5/25-2021/5/28

9	井上友景	調布分室	ガルバニック腐食試験の数値解析における孔食発生条件の検討	第68回材料と環境討論会	2021/10/28
10	西脇眞二	京都大学	トポロジー最適化の考え方と、機械構造・デバイスの性能向上を目指したマルチマテリアル、マルチフィジックス問題への展開	長野県工業技術総合センター成果発表会	2021/11/15
11	Furuta, K., Hur, D., Lim, S., Izui, K., and Nishiwaki, S.	Kyoto University	Level set-based multi-material topology optimization regarding structural weight reduction	Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2022	2022/5/22-2022/5/26

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	京都大学	トポロジー最適化による自動車ボデー構造の高性能化・軽量化	自動車技術	2018/11

### (c)プレス発表

なし

### (d)その他

なし

### 1.4 展示会への出展

なし

### 1.5 受賞

なし

### 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	京都大学	革新的新構造材料等研究開発「平成30年度成果報告会」	ポスター	2019/1/21
2	京都大学	革新的新構造材料等研究開発「2019年度成果報告会」	(講演、ポスター)	2020/2/28 (中止)
3	京都大学	革新的新構造材料等研究開発「2020年度成果報告会」	講演	2021/7/10

4	京都大学	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	講演	2022/1/31
5	京都大学	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	講演	2022/12/20

[テーマ番号 4 2 - V] マルチマテリアルボディーの試作 (2021 年度～2022 年度)

表 添-1.2-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2021FY	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
2022FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	2
合計	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	0	3

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

なし

### 1.3 その他外部発表

#### (a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	千葉 晃司	新構造材料技術研究組合	革新材料の実用化と社会ニーズ対応 ー部品試作、リサイクル、LCAー	3 府省合同構造材料プログラム「研究成果報告会」	2021/9/22
2	千葉 晃司	新構造材料技術研究組合	自動車軽量化の現状と鋼板への期待	第 346 回塑性加工シンポジウム<Web 開催> 「低炭素化社会への取り組み」 ーCO2 の回収, 利用, 排出減ー	2022/2/4

#### (b) 新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	新構造材料技術研究組合	マルチマテリアルの実用化と LCA 対応	溶接技術 5 月号	2022/4/25



(c)プレス発表

なし

(d)その他

1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	新構造材料技術研究組合	オートモティブワールド 2023「第13回車の軽量化技術展」	パネル、試作品展示	2023/1/25-27
2	新構造材料技術研究組合	nano tech 2023「第22回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議」	パネル、試作品展示	2023/2/1-3

1.5 受賞

なし

1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	新構造材料技術研究組合	革新的新構造材料等研究開発2021年度成果報告会	講演	2022/1/31
2	新構造材料技術研究組合	自動車技術会フォーラム 2022	講演	2022/7/13
3	新構造材料技術研究組合	革新的新構造材料等研究開発2022年度成果報告会	講演	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

研究開発項目②「接合技術開発」

[テーマ番号01] アルミニウム/CFRP 接合技術の開発  
(2013年度～2017年度)

表 添-2.1-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	1	1
2015FY	0	0	0	1	1	5	0	0	1	0	1	1
2016FY	0	0	0	0	0	11	1	0	2	0	1	1
2017FY	0	0	0	0	0	5	0	0	3	0	0	2
2018FY	0	0	0	0	0	8	0	0	3	0	0	0
2019FY	0	0	0	0	0	7	0	0	3	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2021FY	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0
2022FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	0	2	1	42	1	0	14	0	3	5

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

1.1 特許

なし

1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	永塚公彬* 吉田昇一 郎* 土谷敦岐 ** 中田一博*	*大阪大 学 接合 科学研 究所 ** 東レ 株式会 社	Direct joining of carbon-fiber- reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining	COMPOSITES PART B: ENGINEERING, 73 (2015) 82-88	有	2015/3/1

2	永塚公彬* 肖伯律* 塚本雅裕* 中田一博* 土谷敦岐**	*大阪大学 接合科学研究所 **東レ株式会社	Direct joining of carbon-fiber-reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining	Transactions of JWRI, 44 (2015) 9-14	無	2015/6/1
3	永塚公彬* 肖伯律* 中田一博* 土谷敦岐**	*大阪大学 接合科学研究所 **東レ株式会社	摩擦重ね接合によるアルミニウム合金と炭素繊維強化樹脂の異材接合特性に及ぼすシランカップリング処理の影響	溶接学会論文集, 33 (2015) 317-325	有	2015/11/19

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	永塚公彬*、 吉田昇一郎*、 土谷敦岐**、 中田一博*	*大阪大学 接合科学研究所 **東レ株式会社	摩擦重ね接合による炭素繊維強化熱可塑性樹脂とアルミニウム合金の直接異材接合	一般社団法人 溶接学会 平成 26 年度秋季全国大会	2014/9/11
2	永塚公彬*、 吉田昇一郎*、 土谷敦岐**、 中田一博*	*大阪大学 接合科学研究所 **東レ株式会社	Effect of tool rotation speed on the dissimilar materials joint characteristics of carbon fiber reinforced thermoplastic and aluminum alloy by friction lap joining	YPIC2014	2014/9/17-20
3	永塚公彬*、 田中宏宜*、 土谷敦岐**、 中田一博*	*大阪大学 接合科学研究所 **東レ株式会社	摩擦重ね接合によるアルミニウム合金と樹脂・CFRP の直接異材接合	溶接学会 第 229 回溶接法研究委員会	2015/1/28

4	永塚公彬* 肖伯律* 中田一博* 土谷敦岐**	*大阪大学 接合科学研 究所 **東レ株式 会社	Dissimilar materials joining of aluminum alloy to polymers and carbon fiber reinforced thermoplastic by friction lap joining	The 68th IIW Annual Assembly (IIW2015)	2015/6/28-7/3
5	永塚公彬* 田中宏宜* 中田一博* 土谷敦岐**	*大阪大学 接合科学研 究所 **東レ株式 会社	アルミニウム合金／炭素繊維強化 熱可塑性樹脂の摩擦重ね接合継 手強度に及ぼすシランカップリング 処理の影響	溶接学会 平成 27 年 度秋季全国大会	2015/9/2-4
6	土谷敦岐	東レ株式会 社	Direct joining of carbon-fiber- reinforced plastic to an aluminum alloy using friction lap joining	第 14 回日欧複合材料 会議	2015/9/18
7	永塚公彬* 中田一博* 土谷敦岐**	*大阪大学 接合科学研 究所 **東レ株式 会社	Al 合金と樹脂・CFRP の摩擦重ね 接合性に及ぼす材料因子の影響	溶接学会 第 111 回 軽構造接合加工研究 委員会	2015/11/24
8	中田一博	大阪大学接 合科学研 究所	異種材料接合技術とは一目的と技 術の現状一	先端ものづくり技術交 流セミナー：異種材料 接合の最新技術	2016/3/10
9	永塚公彬* 肖伯律* 中田一博* 土谷敦岐**	*大阪大学 接合科学研 究所 **東レ株式 会社	摩擦重ね接合法による Al 合金と 炭素繊維強化熱可塑性樹脂の異 材接合	金属学会 2016 年春期 (第 158 回)講演大会	2016/3/23-25
10	中田一博	大阪大学接 合科学研 究所	異種材料の溶接・接合技術	スマートプロセスフォー ラム 2016 国際ウエル ディングショー	2016/4/15
11	中田一博	大阪大学接 合科学研 究所	金属板と樹脂・CFRP 板との直接 接合技術	軽量化研究会セミナー	2016/6/22
12	中田一博	大阪大学接 合科学研 究所	異種材料接合技術の現状と今後 の展望	日本接着学会中部支 部講演会	2016/7/22
13	永塚公彬* 呉利輝* 中田一博* 土谷敦岐** 山岡弘人***	*大阪大学 接合科学研 究所 **東レ株式 会社 ***株式会 社 IHI	ロボット摩擦重ね接合法による金属 ／CFRP の直接異材接合	(一社)溶接学会 平成 28 年度秋季全国大会	2016/9/14-16
14	中田一博	大阪大学接 合科学研 究所	異種材料の接合技術の現状	第 77 回研究会「異種 材料の接合」	2016/10/7

15	中田一博	大阪大学接合科学研究所	マルチマテリアル時代の接合技術	産報スマートプロセスセミナー「軽量化のためのマルチマテリアルとものづくり」	2016/11/1
16	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異種材料の接合ー基礎と応用ー	第6回次世代ものづくり基盤技術産業展材料機能ドライブプロセス部会特別講演会	2016/11/16
17	中田一博	大阪大学接合科学研究所	金属と樹脂・CFRP との直接異材接合	第91回接合・複合分科会研究会	2016/11/25
18	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異種材料接合技術の現状と課題	2016年度第5回技術講演会/自動車技術会中部支部	2016/12/9
19	中田一博	大阪大学接合科学研究所	金属/樹脂・CFRP の直接異材接合	広島大学革新的ものづくり研究拠点 H28 年度シンポジウム	2017/3/21
20	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異材接合の接合機構	2017年度軽金属溶接協会年次講演会 基調講演	2017/6/13
21	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異種材料接合の現状と課題	浜松地域イノベーション推進機構主催	2017/8/24
22	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異種材料接合とレーザー加工技術の展開	先進レーザー実用加工研究会	2017/9/1
23	中田一博	大阪大学接合科学研究所	アルミニウムと異種材料接合の基礎	(一社)軽金属溶接協会	2017/11/22
24	中田一博	大阪大学接合科学研究所	自動車における異種材料の接合	平成29年度表面処理団体協議会セミナー	2018/2/16
25	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異種材料間接合技術の最新動向	日本学術振興会プラズマ材料科学第153委員会スクール	2018/2/23
26	中田一博	大阪大学接合科学研究所	「自動車等」軽量化に向けた異種材料接合の展開」	日本鉄鋼協会・日本金属学会関西支部湯川記念講演会	2018/4/4
27	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異種材料接合技術の基礎と現状	第2回 [関西] 接着・接合 EXPO 専門技術セミナー	2018/5/9
28	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異種材料接合の現状と課題	日本溶射学会全国講演大会特別講演	2018/6/6
29	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異種材料接合の基礎とその展開	岩手県次世代溶接・接合技術セミナー	2018/9/21

30	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異種材料接合技術の現状と今後の展開	第3回炭素繊維応用技術研究会	2018/12/4
31	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異種材料接合技術の基礎と現状	第2回接着・接合EXPO 専門技術セミナー	2018/12/5
32	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異種材料接合技術の現状と展開	軽量化革新フォーラム、第9回クルマの軽量化技術展	2019/1/18
33	中田一博	大阪大学接合科学研究所	金属と熱可塑性CFRPとの直接接合とその接合機構	名古屋 TECH Biz EXPO-2019	2019/2/7
34	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異種材料接合技術の現状と今後の展開	異種材料構造接着研究会第2回セミナー	2019/2/14
35	中田一博	大阪大学接合科学研究所	マルチマテリアル化と金属-樹脂・CFRPなどの異種材料接合技術の展開	東京会場:ファースラムミカサエコ、大阪会場:大阪科学技術センター	2019/7/5、19
36	中田一博	大阪大学接合科学研究所	金属/金属および金属/樹脂・CFRPの異種材料接合プロセスとその接合機構	大阪産業創造館「技術力向上セミナー」	2019/9/11
37	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異種材料接合技術の現状と展開	第2回名古屋クルマの軽量化技術展	2019/9/19
38	中田一博	大阪大学接合科学研究所	マルチマテリアル化に向けた異種材料接合の取り組み	軽金属学会第113回シンポジウム「輸送機器のマルチマテリアル化」	2019/11/29
39	中田一博	大阪大学接合科学研究所	ものづくりを支える接合技術	令和2年 新春・技術交流会 特別講演会	2020/1/16
40	中田一博	大阪大学接合科学研究所	マルチマテリアル化に向けての接合技術 ～金属と樹脂・CFRPの異種材料接合とその機構～	ものづくり先端技術セミナー (Webセミナー)	2021/2/24
41	中田一博	大阪大学接合科学研究所	異種材料接合技術の現状と課題	軽量化技術等に係る人材育成セミナー (Webセミナー)	2021/9/28
42	中田一博	大阪大学接合科学研究所	軽金属と多様な材料との異材接合に関わる科学技術の発展と普及	協会賞受賞記念講演、2022年新年講演会 (Webセミナー)	2022/1/27

**(b)新聞・雑誌等への掲載**

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	大阪大学接合科学研究所	アルミ、CFRP 接合 阪大、3次元形状に対応	日刊工業新聞	2016/8/19

**(c)プレス発表**

なし

**(d)その他**

番号	所属・著者等	タイトル	形式、媒体等	発表年月
1	大阪大学接合科学研究所 中田一博	異種材料接合の現状と摩擦エネルギーを利用した最近の研究	スマートプロセス学会誌（スマートプロセス学会）	2015/3/20
2	大阪大学接合科学研究所 中田一博	異種材料接合の進展：異種材料接合はどこまで進んだか	溶接技術（産報出版）	2016/4
3	大阪大学接合科学研究所 永塚公彬、中田一博	摩擦重ね接合法による金属と樹脂・CFRPの接合	異種材料接合技術—マルチマテリアルの実用化を目指して— （株）シーエムシー出版）	2016/11/25
4	大阪大学接合科学研究所 中田一博	CFRPと各種金属との接着・接合技術	車載テクノロジー （株）技術情報協会	2017/6
5	大阪大学接合科学研究所 中田一博	アルミニウム合金と炭素繊維強化熱可塑性樹脂との摩擦重ね接合	樹脂—金属・セラミックス・ガラス・ゴム 異種材接着／接合技術 （サイエンス&テクノロジー（株））	2017/7/26
6	大阪大学接合科学研究所 中田一博	摩擦重ね接合による炭素繊維強化熱可塑性樹脂とアルミニウム合金の直接異材接合	異種材料の接着・接合技術とマルチマテリアル化 （株）技術情報協会	2017/10/31
7	大阪大学接合科学研究所 中田一博	異材接合の接合機構	軽金属溶接（軽金属溶接協会）	2018/1

8	大阪大学接合科学研究所 中田一博	異種材料接合の現状と金属－樹脂・CFRP 直接接合の展開	自動車技術（自動車技術会）	2018/11
9	大阪大学接合科学研究所 中田一博	摩擦重ね接合法による金属と樹脂・CFRP の接合	マルチマテリアルの異種材料接着・接合技術 （（株）シーエムシー出版）	2018/11/22
10	東レ株式会社 土谷敦岐	アルミニウム合金／CFRP 接合技術の開発	軽金属（軽金属学会）	2019/2
11	大阪大学接合科学研究所 中田一博	金属-CFRP の摩擦重ね接合	工業材料（日刊工業新聞）	2019/5
12	大阪大学接合科学研究所 中田一博	摩擦熱を活用した金属と樹脂 CFRP との直接接合技術	炭素繊維および繊維複合材料の分析解析例集 （（株）技術情報協会）	2019/6/28
13	大阪大学接合科学研究所 中田一博	金属樹脂・CFRP 異種材料間の摩擦重ね接合技術と評価	異種材料の接着・接合技術と応用事例（（株）技術情報協会）	2021/1/29
14	大阪大学接合科学研究所 中田一博	アルミニウム合金と樹脂-CFRP との直接異種材料接合とその熱圧着機構	軽金属溶接（軽金属溶接学会）	2021/3

#### 1.4 展示会への出展

なし

#### 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	大阪大学 接合科学研究所 永塚公彬	摩擦重ね接合による炭素繊維強化熱可塑性樹脂とアルミニウム合金の直接異材接合	一般社団法人 溶接学会 平成 26 年度溶接学会優秀研究発表賞	2014/12/22
2	大阪大学 接合科学研究所 永塚公彬	摩擦重ね接合法による Al 合金と炭素繊維強化熱可塑性樹脂の異材接合	日本金属学会 2016 年春期講演大会 日本金属学会優秀ポスター賞	2016/3/24
3	大阪大学 接合科学研究所 永塚公彬	Al 合金と樹脂・CFRP の摩擦重ね接合性に及ぼす材料因子の影響	一般社団法人 溶接学会 軽構造接合加工研究委員会 平成 27 年 優秀講演賞	2016/6/9



## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	東レ株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成26年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	東レ株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成27年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22
3	東レ株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成28年度成果報告会」	講演、ポスター	2017/1/23
4	東レ株式会社	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠 点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
5	東レ株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成29年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号02] 残留γ相制御中高炭素鋼板の異種・同種材料接合技術の開発  
(2014～2022年度)

表 添-2.2-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1
2017FY	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	2
2018FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2019FY	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	1
2020FY	1	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	1
2021FY	3	0	0	0	2	4	2	0	0	0	0	1
2022FY	2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
合計	7	0	0	2	3	17	2	0	0	0	0	10

※1：Patent Cooperation Treaty：特許協力条約

※2：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

### 1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT※	出願日	状態	名 称	発明者
1	㈱神戸製鋼所	特願2014- 008729	国内	2014/1/21	登録	高強度鋼板のレーザ溶接 継手およびその製造方法	村上俊夫
2	㈱神戸製鋼所	特願2014- 217563	国内	2014/10/24	登録	スポット溶接方法	村上俊夫他
3	㈱神戸製鋼所	特願2020- 096805	国内	2020/6/3	公開	車体用構造体	藤田 貢輔他

(※Patent Cooperation Treaty：特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	T. Miura, R. Ueji, H. Fujii, T. Murakami & T. Kobashi	1Joining and Welding Research Institute, Osaka University, 2Kobe Steel, Ltd.	Stability of the retained austenite in low-alloyed transformation induced plasticity-aided steels during friction stir welding	Science and Technology of Welding and Joining (2) 461-469	有	2017/4/19
2	村上俊夫	(株)神戸製鋼所	中高炭素鋼強度高延性鋼板へのレーザ溶接の適用	溶接技術, 65, (2017), 52-56	無	2017/10/20
3	林杉 奥田浩司 山口真弘 佐藤和史 松本克史	京都大学 (株)神戸製鋼所	Nanostructure distribution and strengthening mechanisms in the interface regions of Al-Zn/Al-Mg multilayered composites	Materials Transactions	無	2021/3/26
4	日野綾、 山田敬子	(株)神戸製鋼所	軟X線発行分枝を用いた残留オーステナイト中固溶炭素分析技術	R&D神戸製鋼技報 Vol.71, No.1	有	2021/7/5
5	村上俊夫	(株)神戸製鋼所	軟X線分光分析を用いた微小領域炭素状態分析	日本鉄鋼協会 軽元素研究会 最終報告書	無	2022/3/22

## 1.3 その他外部発表

### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	三浦拓也、上 路林太郎、藤 井英俊、村上 俊夫、小橋泰 三	大阪大 学、神戸 製鋼所	低合金 TRIP 鋼の摩擦攪拌接合部の微細組織形成挙動	溶接学会平成 27 年度春季全国大会	2015/4/23
2	生田明彦、藤 井英俊、村上 俊夫、小橋泰 三	近畿大 学、大阪 大学、神 戸製鋼所	摩擦攪拌点接合用ツールの摩擦攪拌接合への適用	溶接学会平成 28 年度秋季全国大会	2016/9/16
3	生田明彦、藤 井英俊、村上 俊夫	近畿大 学、大阪 大学、神 戸製鋼所	鉄鋼用摩擦攪拌接合ツールの各部形状の役割	溶接学会平成 29 年度秋季全国大会	2017/9/11

4	孫玉峰、藤井英俊、村上俊夫	大阪大学、神戸製鋼所	高強度中炭素鋼板の摩擦攪拌接合	溶接学会平成29年度秋季全国大会	2017/9/12
5	村上俊夫	神戸製鋼所	自動車用超ハイテンに関する高機能化の取組み	日本鉄鋼協会九州支部秋季講演大会	2019/10/11
6	渡邊未来、宮本吾郎、古原忠、小林康浩	東北大学、京都大学	Effects of prior austenite grain size on microstructure of bainite and retained austenite in TRIP steel	鉄鋼協会秋季講演大会	2019/9/12
7	渡邊未来、宮本吾郎、古原忠、小林康浩	東北大学、京都大学	Fe-2Mn-1.5Si-0.4C合金のベイナイト+残留 $\gamma$ 組織に及ぼす旧 $\gamma$ 粒径の影響	鉄鋼協会春季講演大会	2019/3/21
8	林杉、東野行広、奥田浩司、佐藤和史、松本克史	京都大学、神戸製鋼所	Al/Al-Zn粗結晶積層材料の組成傾斜領域における組織解析	金属学会第165回秋期講演大会	2019/9/12
9	林杉、奥田浩司、松本克史	京都大学、神戸製鋼所	アルミニウム複合線材中の名の組織分布のトモグラフィによる解析法の検討	若手研究者・院生による研究発表会(軽金属学会関西支部)	2019/12/23
10	林杉 奥田浩司 山口真弘 佐藤和史 松本克史	京都大学 (株)神戸製鋼所	Al-Zn/Al-Mg複層材料における接合界面付近の局所ナノ組織分布	軽金属学会秋期大会	2020/11/7
11	村上俊夫	(株)神戸製鋼所	自動車用鋼板の超高延性超高強度化に関する研究開発状況	自動車技術会材料検討委員会	2021/3/5
12	大志田達郎 下田陽一朗 鈴木励一	(株)神戸製鋼所	異種金属接合法—エレメントアークスポット溶接(第3報)— ~1.5GPa級超高張力鋼板とアルミニウム合金継手の機械的特性~	日本溶接学会春季講演大会	2021/4/14
13	村上俊夫	(株)神戸製鋼所	自動車用鋼板の超高延性超高強度化に関する研究開発状況	自動車技術会春季講演大会	2021/5/27
14	Toshio Murakami	Kobe Steel, Ltd.	Effects of Retained Austenite Conditions on the Ductility of the Advanced High Strength Steels	THERMEC 2020	2021/6/1-4
15	渡辺未来、宮本吾郎、古原忠、諸岡聡	東北大学 原子力研究機構	(ベイナイト+ $\gamma$ )組織中の不均一な炭素分布と $\gamma$ の熱的安定性の関係	日本鉄鋼協会秋季講演大会	2021/9/2-4
16	村上俊夫	(株)神戸製鋼所	Development of the Innovative Structural Steel Sheets	Materials Research Meeting 2021	2021/12/13
17	村上俊夫	(株)神戸製鋼所	革新鋼板(高強度・高延性鋼板)とその接合技術の開発	自動車技術会フォーラム(2022)	2022/7/13

## (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	㈱神戸製鋼所	「革新鋼板」でオンライン講演／高炉3社が成果披露	鉄鋼新聞, p.3	2022/7/14
2	㈱神戸製鋼所	革新構造材料研究の成果報告会／40件の取り組み発表	鉄鋼新聞, p3	2022/2/2
3	㈱神戸製鋼所	高強度・高延性の「革新鋼板」に挑む／下／神戸製鋼／既存の鋼組織を不均質化／炭素元素を高度利用	鉄鋼新聞, p1	2021/11/29

## (c)プレス発表

なし

## (d)その他

なし

## 1.4 展示会への出展

なし

## 1.5 受賞

なし

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成26年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成27年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22
3	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成28年度成果報告会」	ポスター、発表	2017/1/20
4	神戸製鋼所	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13

5	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成 29 年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26
6	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成 30 年度成果報告会」	ポスター	2019/1/21
7	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「2019 年度成果報告会」	(ポスター、発表)	2020/2/28 (中止)
8	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「2020 年度成果報告会」	(ポスター)、発表	2021/7/1
9	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「2021 年度成果報告会」	(ポスター)、発表	2022/1/31
10	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「2022 年度成果報告会」	(ポスター)、発表	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号03]「中高炭素鋼の革新的接合技術の開発」(2014年度～2017年度)

表 添-2.3-1 特許、論文、外部発表等の件数(内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2014FY	1	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	1	1	0	2	0	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
2017FY	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
合計	1	(11)	1	2	0	11	1	0	0	0	0	3

※1: Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2: 実施者が主体的に開催するイベント(フォーラム、シンポジウム等)

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内外国 PCT	出願日	状態	名 称	発明者
1	新日鐵住金	特願 2014-205891	国内	2014/10/06	登録 (優先権 出願/特 願 2016- 553122)	アークスポット溶接 方法及びそれを実行 する溶接装置	児玉真二他
2	新日鐵住金	PCT/JP2015/078387	PCT	2015/10/6	各国移 行・登録	アークスポット溶接 方法及びそれを実行 する溶接装置	児玉真二他

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Yasuyuki Miyano Rintaro Ueji Masanori Yasuyama  Osamu Kamiaya Ryou Okubo Hidetoshi Fujii	Akita University Osaka university Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp, Akita University Akita University Osaka University	Effect of Welding Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joints of Middle Carbon Steel	International Institute of Welding 2015	有	2015/6/28
2	Seiji Furusako Masatoshi Tokunaga Masanori Yasuyama	Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp.	Improvement of crashworthiness in a hat-shaped component made of 0.44%-carbon steel through arc spot welding	SAE World Congress Experience (WCX 17) 番号 : 2017-01-0476	有	2017/4/6

## 1.3 その他外部発表

### (a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Funikazu Miyasaka	大阪大学	Numerical simulation for fluid flow around a tool of FSW	The 4th East Asia Symposium on Technology of Welding & Joining, Xi'an, China, 口頭発表	2013/9/3
2	Yurika Miyake, Fumikazu Miyasaka, Shuhe Matsuzawa, Shunta Murao, Kenta Mitsufuji, Shinnosuke Ogawa	大阪大学	Development of FSW simulation model-effect of tool shape on plastic flow	TMS2015, Orland, USA, ポスター発表	2015/3/16



3	Miyano Yasuyuki Ueji Rintaro Fujii Hidetoshi	大阪大学	Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joints of Medium Carbon Steels	10th Friction Stir Welding Symposium	2015/5/22
4	宮野泰征 神谷修 大久保療 上路林太郎 藤井英俊	秋田大学 大阪大学	中炭素鋼（S45C）摩擦攪拌接合継手の組織と機械的特性に及ぼす影響	第26回溶接・接合研究会	2015/7/18
5	宮野泰征 上路林太郎 藤井英俊	秋田大学 大阪大学	摩擦攪拌接合により得られる中炭素鋼継手の組織と機械的特性	一般社団法人日本溶接学会平成26年度秋季全国大会	2015/9/11
6	Miyano Yasuyuki Ueji Rintaro Osamu kamiya Ryou Okubo Fujii Hidetoshi	秋田大学 大阪大学	Effect of Heat Input on Microstructure and Hardness of Friction Stir Welded Joints of Middle Carbon Steel	The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation (Visual-JW 2014)	2015/12/28
7	古迫 誠司 児玉 真二 宮崎 康信	新日鐵住金	アークスポット溶接された高強度薄鋼板の継手強度（第5報）	一般社団法人日本溶接学会平成25年度秋季全国大会	2013/9/3
8	古迫 誠司 児玉 真二 泰山 正則 田川 哲哉	新日鐵住金 名古屋大学	アークスポット溶接された高強度鋼板継手の疲労強度（第1報）	一般社団法人日本溶接学会平成27年度春季全国大会	2015/4/23
9	古迫 誠司 児玉 真二 泰山 正則 宮崎 康信	新日鐵住金	アークスポット溶接による高強度鋼板の継手強度向上	鉄鋼協会 第170回秋季講演大会 接合・結合フォーラム 溶接接合プロセスの高効率化	2015/9/17
10	古迫 誠司 徳永 仁寿 泰山 正則	新日鐵住金	アークスポット溶接による中高炭素鋼ハット部材の衝撃吸収特性向上	一般社団法人日本溶接学会平成28年度秋季全国大会	2016/9/14
11	Seiji Furusako Masatoshi Tokunaga Masanori Yasuyama	Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp.	Improvement of crashworthiness in a hat-shaped component made of 0.44%-carbon steel through arc spot welding	SAE World Congress Experience (WCX 17)	2017/4/6

## (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	新日鐵住金	アークスポット溶接による高強度鋼板の継手強度向上	産報出版株式会社 月刊「溶接技術」7月号	2015/7

## (c)プレス発表

なし

## (d)その他（同様の形式で表を作成する）

なし

## 1.4 展示会への出展

なし

## 1.5 受賞

なし

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	新日鐵住金株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	新日鐵住金株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22
3	新日鐵住金株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	ポスター、口頭	2017/1/23
4	新日鐵住金株式会社	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
5	新日鐵住金株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 29 年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号04]「中高炭素鋼板の PHM による実用 FSW 技術の開発」

(2014 年度～2017 年度)

[テーマ番号33]「革新的 FSW による超ハイテン接合部材の開発」のうち「①超ハイ

イテン TWB 部材の開発」(2018 年度～2021 年度)

表 添-2.4-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス 発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	2	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	1
2016FY	2	0	2	0	0	2	0	0	0	0	0	1
2017FY	3	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0	2
2018FY	3	16	2	0	0	3	0	0	0	0	0	1
2019FY	2	10	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1
2020FY	0	24	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2021FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
合計	12	50	7	2	0	11	1	0	0	1	0	9

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内外 国 PCT*	出願日	状態	名 称	発明者
1	JFE スチール (株)	特願 2016-073233 [優先]特願 2017- 528600	国内	2016/3/31	登録	構造用鋼の摩擦攪 拌接合方法及び装 置	松下宗生 他
2	JFE スチール (株)	特願 2016-073234 [優先]特願 2017- 527937	国内	2016/3/31	登録	構造用鋼の摩擦攪 拌接合方法及び装 置	松下宗生 他
3	JFE スチール (株)	特願 2016-199830 [優先]特願 2017- 558591	国内	2016/10/11	登録	摩擦攪拌接合方法 および装置	松下宗生 他

4	JFE スチール(株)	特願 2016-199831 [優先]特願 2017-559718	国内	2016/10/11	登録	摩擦攪拌接合方法および装置	松下宗生 他
5	JFE スチール(株)	PCT/JP2017/11286	PCT	2017/3/22	各国移行・登録	構造用鋼の摩擦攪拌接合方法及び装置	松下宗生 他
6	JFE スチール(株)	PCT/JP2017/11287	PCT	2017/3/22	各国移行・登録	構造用鋼の摩擦攪拌接合方法及び装置	松下宗生 他
7	JFE スチール(株)	特願2017-148785 [優先]特願 2017-528600	国内	2017/8/1	登録	金属板の両面摩擦攪拌接合方法および両面摩擦攪拌接合装置	松下宗生 他
8	JFE スチール(株)	特願2017-175618 [優先]特願2017-528600	国内	2017/9/13	登録	金属板の両面摩擦攪拌接合方法および両面摩擦攪拌接合装置	松下宗生 他
9	JFE スチール(株)	特願2017-175617 [優先]特願 2017-528600	国内	2017/9/13	登録	摩擦攪拌接合方法	谷口公一 他
10	JFE スチール(株)	PCT/JP2017/36092	PCT	2017/10/4	各国移行・登録	摩擦攪拌接合方法および装置	松下宗生 他
11	JFE スチール(株)	PCT/JP2017/36093	PCT	2017/10/4	各国移行・登録	摩擦攪拌接合方法および装置	松下宗生 他
12	JFEスチール(株)	特願2018-052622 [優先]特願2017-528600	国内	2018/3/20	登録	両面摩擦攪拌接合方法及び両面摩擦攪拌接合装置	松下宗生、池田倫正
13	JFEスチール(株)	PCT/JP2018/28516	PCT	2018/7/31	各国移行・登録	金属板の両面摩擦攪拌接合方法および両面摩擦攪拌接合装置	松下宗生、池田倫正

14	JFEスチール(株)	PCT/JP2018/33761	PCT	2018/9/12	各国移行・登録	金属板の両面摩擦攪拌接合方法および両面摩擦攪拌接合装置	松下宗生、池田倫正
15	JFEスチール(株)	特願2019-005166 [優先]特願2017-528600	国内	2019/1/16	登録	両面摩擦攪拌接合用回転ツール	松下宗生、山岸大起、松田広志
16	JFEスチール(株)	特願2019-019902	国内	2019/2/6	登録	両面摩擦攪拌接合方法および両面摩擦攪拌接合装置	山岸大起、松下宗生、松田広志
17	JFEスチール(株)	PCT/JP2019/011734	PCT	2019/3/20	各国移行	両面摩擦攪拌接合用回転ツール、両面摩擦攪拌接合装置、及び両面摩擦攪拌接合方法	松下宗生、池田倫正、松田広志、山岸大起
18	JFEスチール(株)	特願2019-173666 [優先]特願2017-528600	国内	2019/9/25	登録	両面摩擦攪拌接合方法、冷延鋼帯及びめっき鋼帯の製造方法、両面摩擦攪拌接合装置、並びに冷延鋼帯及びめっき鋼帯の製造設備	松下宗生、岩田匠平、木谷靖

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	森貞好昭、雷哲、藤井英俊、松下宗生、池田倫正	大阪大学接合科学研究所、JFE スチール株式会社	摩擦攪拌接合の材料流動挙動に及ぼす鋼の変形抵抗の影響 -高輝度 X 線透過システムによる直接観察-	鉄と鋼、Vol.102、No.2、 P14-19	有	2015/10/22
2	和田拓也、森貞好昭、孫玉峰、藤井英俊、川人洋介、松下宗生、池田倫正	大阪大学接合科学研究所、JFE スチール株式会社	レーザ予熱方式を用いた中炭素鋼の摩擦攪拌接合	鉄と鋼、Vol.104、No.7、 P 368-376	有	2018/3/19

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	雷哲、森貞 好昭、藤井 英俊、松下 宗生、池田 倫正	大阪大学 接合科学 研究所、 JFE ス チール株 式会社	摩擦攪拌接合における鋼の流 動挙動に及ぼす炭素含有量の 影響	溶接学会平成27年度 秋季全国大会	2015/9/03
2	藤井英俊、 雷哲、森貞 好昭、松下 宗生、池田 倫正	大阪大学 接合科学 研究所、 JFE ス チール株 式会社	高輝度X線透過システムを用 いた鋼板FSWの材料流動挙動 の解明	鉄鋼協会平成27年度 秋季講演大会	2015/9/16
3	森貞好昭、 藤井英俊、 雷哲、松下 宗生、池田 倫正	大阪大学 接合科学 研究所、 JFE ス チール株 式会社	Clarification of Material Flow and Defect Formation during Friction Stir Welding by X-ray Radiography	11 <sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding	2016/5/17-19
4	谷口公一、 高田充志、 松下宗生、 池田倫正、 藤井英俊	JFE ス チール株 式会社、 大阪大学 接合科学 研究所	鋼板のFSW における接合ツ ール負荷および接合部特性に 及ぼす予熱の影響	溶接学会平成28年度 秋季全国大会	2016/9/15
5	松下宗生1)、 高田充志1)、 谷口公一1)、 松田広志1)、 池田倫正1)、 藤井英俊2)	1)JFEスチ ール(株) 、 2)大阪大 学	高周波誘導加熱を用いた予熱 プロセスによる薄鋼板FSWの 高速化	溶接学会秋季全国大 会	2017/9/12
6	松下宗生1)、 高田充志1)、 谷口公一1)、 松田広志1)、 池田倫正1)、 藤井英俊2)	1)JFEスチ ール(株) 、 2)大阪大 学	高周波誘導加熱を予熱に用い たハイブリッドFSW技術の開 発	溶接学会春季全国大 会	2018/4/26

7	山岸大起、 松下宗生、 8松田広志、 村上善明	JFEスチ ール(株)	超ハイテンの両面摩擦攪拌接 合部における塑性流動挙動と 機械的特性	溶接学会秋季全国大 会	2018/9/13
8	松下宗生、 山岸大起、 松田広志、 村上善明	JFE ス チール (株)	Plastic flow behavior and mechanical properties in double-sided friction stir weld of advanced high strength steel sheets	TMS2019 Annual Mee ting & Exhibition Symposium for Friction Stir Welding and Processing	2019/3/13
9	山岸大起、 松下宗生、 松田広志、 村上善明	JFEスチ ール(株)	超ハイテンの両面摩擦攪拌接 合における塑性流動の解析	溶接学会秋季全国大 会	2019/9/18
10	松下宗生	JFEスチ ール(株)	革新的FSWによる超ハイテン テーラード・ブランク部材の 開発	2010_SAMPE2020 (YouTube公開)	2020/10/14- 11/13
11	松下宗生	JFEスチ ール(株)	両面摩擦攪拌接合による超 ハイテンテーラード・ブラ ンク材の開発	溶接学会秋季全国 大会（オンライン開催）	2021/9/21- 9/28

#### (b)新聞・雑誌等への掲載

番 号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	JFEスチール(株)	高強度鉄鋼材料の摩擦攪拌接合(FSW)	一般社団法人日本溶接 協会HP: WE-COMマガ ジン第36号(会員限定)	2020/4/3

#### (c)プレス発表

なし

#### (d)その他

なし

#### 1.4 展示会への出展

番 号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	JFEスチール(株)	「nano tech 2022」 NEDOブース	パネル、サンプル	2022/1/26-28

## 1.5 受賞

なし

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	JFE スチール(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	JFE スチール(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22
3	JFE スチール(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	ポスター、口頭	2017/1/23
4	JFE スチール(株)	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
5	JFE スチール(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成29年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26
6	JFE スチール(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成30年度成果報告会」	ポスター	2019/1/21
7	JFEスチール(株)	革新的新構造材料等研究開発 「2019年度成果報告会」	(ポスター)	2020/2/28 (中止)
8	JFE スチール(株)	革新的新構造材料等研究開発 「2020年度成果報告会」	(ポスター)、口頭	2021/7/1
9	JFE スチール(株)	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	(ポスター)、口頭	2022/1/31

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）



[テーマ番号05]「アルミニウム／異種材料の点接合技術」

(2014年度～2022年度)

表 添-2.5-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	7	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
2015FY	5	0	0	1	1	4	2	0	0	0	0	1
2016FY	5	0	0	0	1	9	0	0	0	0	0	1
2017FY	2	0	0	3	4	10	5	0	2	0	0	2
2018FY	1	0	0	3	1	12	0	0	0	0	1	1
2019FY	1	0	0	0	0	5	1	1	0	0	0	1
2020FY	1	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	1
2021FY	1	0	0	3	1	5	2	0	0	0	0	1
2022FY	2	0	0	3	0	6	2	0	0	0	0	2
合計	25	0	0	15	8	53	13	1	2	0	1	11

※1：Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT※	出願日	状態	名 称	発明者
1	マツダ(株)	特願 2014-201745	国内	2014/9/30	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法	田中耕二郎 他
2	マツダ(株)	特願 2014-201762	国内	2014/9/30	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法およびその方法 において使用される樹脂	田中耕二郎 他
3	マツダ(株)	特願 2014-201778	国内	2014/9/30	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法	田中耕二郎 他
4	マツダ(株)	特願 2014-201786	国内	2014/9/30	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法およびその方法 において使用される樹脂	田中耕二郎 他
5	マツダ(株)	特願 2014-201792	国内	2014/9/30	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法	田中耕二郎 他

6	マツダ(株)	特願 2014-201839	国内	2014/9/30	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法	田中耕二郎 他
7	マツダ(株)	特願 2014-201874	国内	2014/9/30	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法およびその方法 において使用される樹脂	田中耕二郎 他
8	マツダ(株)	特願 2015-124960	国内	2015/6/22	登録	摩擦攪拌接合方法および その接合装置	松田祐之 他
9	マツダ(株)	特願 2015-129961	国内	2015/6/29	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法、その方法にお いて使用される金属部材 および金属部材と樹脂部 材との接合体	西口勝也 他
10	マツダ(株)	特願 2015-157427	国内	2015/8/7	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法	田中耕二郎 他
11	マツダ(株)	特願 2015-163901	国内	2015/8/21	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法およびその方法 で使用される樹脂部材	田中耕二郎 他
12	マツダ(株)	特願 2015-166117	国内	2015/8/25	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法、接合体および 接合装置	田中耕二郎 他
13	マツダ(株)	特願 2016-029248	国内	2016/2/18	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法およびその方法 で使用される金属部材と 樹脂部材とからなる接合 部材セット	島田聡子 他
14	マツダ(株)	特願 2016-044889	国内	2016/3/8	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法および接合装置	島田聡子 他
15	マツダ(株)	特願 2016-057316	国内	2016/3/22	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法およびその方法 において使用される金属	西口勝也 他
16	マツダ(株)	特願 2016-066350	国内	2016/3/29	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法およびその方法 において使用される金属	西口勝也 他
17	マツダ(株)	特願 2016-066355	国内	2016/3/29	登録	金属部材と熱硬化樹脂部 材との接合方法およびそ の方法において使用され る金属部材、熱硬化樹脂 部材および熱可塑性樹脂 シート	西口勝也 他

18	マツダ(株)	特願 2017-116473	国内	2017/6/14	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法およびその方法 において使用される金属 部材または樹脂部材	西口勝也 他
19	マツダ(株)	特願 2017-117858	国内	2017/6/15	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法およびその方法 において使用される金属 部材または樹脂部材	西口勝也 他
20	マツダ(株)	特願 2019-036222	国内	2019/2/28	登録	金属部材と樹脂部材との 接合方法および接合装置	田中耕二郎 他
21	マツダ(株) (株)ヒロテック	特願 2020-056334	国内	2020/3/26	公開	金属部材と樹脂部材との 接合構造および接合方法	田中耕二郎 他

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	関口悠 佐藤千明	東工大	Experimental study of the Mode I adhesive fracture energy in DCB specimens bonded with a polyurethane adhesive	the Journal of Adhesion	無	2015/7/25
2	田中耕二郎 西口勝也 杉本幸弘	マツダ	鋼板/アルミ異材抵抗スポット溶接技術の開発	マツダ技報 2016 (第 33号)	有	2016/3/1
3	山形祐樹 Lu,Xi, 関口悠 佐藤千明	東工大	Experimental Investigation of Mode I Fracture Energy of Adhesively Bonded Joints under Impact Loading Conditions	Applied Adhesion Science	無	2017/2/26
4	田中耕二郎 杉本幸弘 西口勝也	マツダ	鋼板/アルミニウム異材抵抗スポット溶接技術の開発	月刊溶接技術	無	2017/4/10
5	関口悠 山形勇樹 佐藤千明	東工大	Mode I fracture energy of adhesive joints bonded with adhesives with different characteristics under quasi-static and impact loading	日本接着学会誌	無	2017/5/1 申請
6	小川裕樹 熊一達 曙絃之 加藤昌彦 菅田淳	広大	Effect of Surface Treatment on Fatigue Properties of Aluminum alloy/ CFRP Joints Produced by Friction Stir Spot Welding Technique	Science and Technology of Welding and Joining	有	2017/6/3
7	田中耕二郎	マツダ	鋼板/アルミ異材抵抗スポット溶接技術の開発	軽金属溶接	無	2017/11/16
8	杉本幸弘	マツダ	自動車のマルチマテリアル化と異材接合技術	溶接学会誌 平成 30 年新年号	有	2018/1/5

9	小川裕樹 熊一達 曙紘之 加藤昌彦 菅田淳 田中耕二郎	広大  マツダ	Effect of Surface Treatment on Fatigue Properties of Aluminum alloy/ CFRP Joints Produced by Friction Stir Spot Welding Technique	Science & Technology of Welding and Joining	有	2017/7/3
10	杉本幸弘	マツダ	自動車のマルチマテリアル化とアルミニウムの適用	アルミニウム協会誌「アルミニウム」2018年1月号	無	2018/1/30
11	西口勝也 田中耕二郎 森田泰博 杉本幸弘	マツダ	アルミニウム/異種材料の点接合技術	マツダ技報 2018(第 35号)	有	2018/10/1
12	西口勝也 田中耕二郎 森田泰博 杉本幸弘	マツダ	アルミと炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の点接合技術開発	自動車技術 Vol.72, No.11	有	2018/11/1
13	西口勝也 田中耕二郎 杉本幸弘	マツダ	アルミニウムと CFRP の異種材料接合技術	軽金属溶接 2019年1月号	無	2019/1/16
14	杉本幸弘 田中耕二郎 西口勝也	マツダ	アルミニウムと異種材料の点接合技術	軽金属 第69巻2号	有	2019/2/28
15	小川裕樹 曙紘之 菅田淳 田中耕二郎	広大  マツダ	Effect of jig constraint state during welding process on fatigue properties of Al/CFRP dissimilar welds and fatigue life evaluation based on singular stress	Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures Volume43, Issue10 Pages 2259-2269	有	2020/9
16	田中耕二郎 小川裕樹	マツダ 広大	アルミニウム/樹脂異種材料点接合の強度特性に及ぼす表面処理の影響	マツダ技報 2020(第 37号)	有	2020/12
17	西口勝也	マツダ	アルミニウム/異種材料の点接合技術	アルミニウム協会アルミニウム	無	2021/5
18	河村力 森田泰博 深堀貢 本田正徳 菅田淳 曙紘之 荒川仁太	マツダ  広大	板厚方向の不均質性を考慮した射出成型複合材の連成解析	日本材料学会	有	2021/8
19	田中耕二郎 深堀貢 西口勝也	マツダ	マルチマテリアル車体の実現に向けたアルミニウム/鋼板抵抗スポット溶接技術の開発	溶接学会誌 第 90 巻7号	有	2021/10
20	杉本幸弘 西口勝也	広大 マツダ	アルミニウム/CFRP 摩擦攪拌点接合の継手強度に及ぼすアルミニウム前処理の影響	表面技術 2021年12月号(第72巻12号)	有	2021/12
21	西口勝也	マツダ	自動車用 6000 系アルミニウム合金に適用される接合技術	協会誌「軽金属溶接」2022年春～初夏発行号	有	2022/7

22	河村力 森田泰博 深堀貢 本田正徳 菅田淳 曙紘之 荒川仁太	マツダ    広大	射出成型複合材の板厚方向の繊維配向不均質性を考慮した自動車用部材の成形-構造連成解析の検討	日本材料学会	有	2022/7
23	杉本幸弘 峰岡清太郎 芹沢久	広大  阪大	アルミニウムと炭素繊維強化樹脂の摩擦攪拌点接合とそのウェルドボンド	軽金属 第 72 巻 10 号 2022 年 10 月	有	2022/9

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	田中耕二郎 西口勝也 杉本幸弘	マツダ(株)	鋼板/アルミ異材抵抗スポット溶接の継手強度に及ぼす鋼板めっき種の影響	軽金属学会第 128 回春期大会	2015/5/16
2	小川裕樹 曙紘之 加藤昌彦 菅田淳 田中耕二郎	広島大学   マツダ(株)	摩擦攪拌点接合によるアルミニウム合金/CFRP 異材接合継手の疲労強度評価	日本材料学会 第 6 4 期通常総会・学術講演会	2015/5/24
3	曙紘之	広島大学	摩擦攪拌点接合によるアルミニウム合金/CFRP 異材接合継手の疲労強度評価	日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス・講演会	2015/11/23
4	菅田淳	広島大学	摩擦攪拌技術を応用したアルミニウム合金/CFRP 異材接合体の疲労強度評価	日本材料学会九州支部第 2 回学術講演会	2015/12/12
5	小川裕樹 曙紘之 加藤昌彦 菅田淳 田中耕二郎	広島大学   マツダ(株)	アルミニウム合金/CFRP 異種材料間における摩擦攪拌点接合継手の疲労強度評価	日本材料学会第 65 期学術講演会	2016/5/28
6	山形祐樹 Lu,Xi, 関口悠 佐藤千明	東工大	Experimental Investigation of Mode I Fracture Toughness of Adhesively Bonded Joints under Impact Loading Conditions Using a High-speed Camera	The 6th asian conference on adhesion	2016/6/17
7	小川裕樹 曙紘之 加藤昌彦 菅田淳 田中耕二郎	広島大学   マツダ(株)	Al 合金/CFRP 異材 FSSW 継手の疲労特性に及ぼす Al 合金表面に付与した官能基の影響	日本機械学会 2016 年度年次大会	2016/9/11
8	大石郁 羽原雄太 大田耕平	広島県立総合技術研究所	摩擦攪拌点接合によるアルミニウム合金と CFRP の異材接合	平成 28 年度溶接学会秋季全国大会 (ポスター発表)	2016/9/14

9	熊一達 小川裕樹 曙紘之 加藤昌彦 菅田淳 田中耕二郎	広島大学    マツダ㈱	Al 合金／CFRP 摩擦攪拌点接合 継手の疲労特性に及ぼす Al 合金 に付与した表面処理の影響	日本機械学会 M&M2016 材料力学カ ンファレンス	2016/10/8
10	山形祐樹 関口悠 佐藤千明	東工大	衝撃負荷下における構造用接着 剤のモード I 破壊じん性の評価	日本機械学会 M&M 講演会	2016/10/8
11	高見明秀	マツダ㈱	マツダにおける異種材料接合技 術の取組み	[ 関 西 ] 高 機 能 素 材 ワールド専門技術セミ ナー	2016/10/5
12	杉本幸弘	マツダ㈱	自動車のマルチマテリアル化と アルミニウムの適用	H28 年度自動車の アルミ化技術講習会特 別講演	2016/11/29
13	菅田淳	広島大学	Al/CFRP 異材 FSSW 接合継手の 疲労強度評価	広島大学革新的ものづ くり研究拠点 平成 28 年度シンポジウ ム	2017/3/21
14	小川裕 熊一達 曙紘之 加藤昌彦 菅田淳 田中耕二郎	広島大学    マツダ㈱	FATIGUE PROPERTIES OF JOINTS PRODUCED FRICTION STIR SPOT WELDING	14th International Conference on Fracture (ICF 14)	2017/6/18
15	杉本幸弘 田中耕二郎 西口勝也	マツダ㈱	自動車のマルチマテリアル化と 異材接合技術	平成 29 年度溶接学会春 季全国大会フォーラム	2017/4/20
16	杉本幸弘	マツダ㈱	異材接合の自動車分野への適用	溶接接合工学振興会セ ミナー	2017/10/25
17	杉本幸弘	マツダ㈱	自動車のマルチマテリアル化と 異材接合技術	富山県工業技術セン ター主催「とやま高機 能素材研究会」	2017/10/27
18	西口勝也 田中耕二郎 森田泰博 杉本幸弘	マツダ㈱	アルミニウム／CF-PP の摩擦攪 拌点接合強度に及ぼす接合条件 の影響	軽金属学会 第 133 回秋期大会	2017/11/4
19	杉本幸弘	マツダ㈱	自動車のマルチマテリアル化と アルミニウムの適用	アルミニウム協会主催 「アルミニウム技術研 修会」	2017/11/7, 13, 14
20	田中耕二郎 杉本幸弘 西口勝也	マツダ㈱	鋼板/アルミ異材抵抗スポット溶 接技術の開発	溶接学会 第 119 回軽構 造接合加工研究委員会	2017/11/29
21	杉本幸弘	マツダ㈱	自動車のマルチマテリアル化と 異材接合技術	マグネシウム協会 平成 29 年度 第 7 回技 術講演会	2018/1/26

22	西口勝也、 田中耕二郎、 森田泰博、 杉本幸弘	マツダ㈱	アルミニウム／CF-PP の摩擦攪拌点接合技術	日本金属学会・日本鉄鋼協会中国四国支部材質制御研究会	2018/1/26
23	杉本幸弘	マツダ㈱	車体のマルチマテリアル化とその要素技術	日本鑄造工学会 東海支部 鑄造先端プロセス研究部会	2018/2/23
24	西口勝也	マツダ㈱	アルミニウムと CFRP の摩擦攪拌点接合技術	自動車技術会 材料部門委員会	2018/4/6
25	西口勝也 田中耕二郎 杉本幸弘	マツダ㈱	アルミニウム/異種材料の点接合技術	溶接学会平成 30 年度春季全国大会オーガナイズドセッション	2018/4/26
26	小川裕樹 曙紘之 菅田淳	広島大学	Al 合金/CFRP 異材 FSSW 接合継手の疲労強度に関する接合条件の最適化	日本材料学会第 67 期通常総会・学術講演会	2018/5/25
27	杉本幸弘	マツダ㈱	アルミニウムと異種材料の点接合技術	日本塑性加工学会 接合・複合分科会	2018/6/15
28	杉本幸弘	マツダ㈱	車体のマルチマテリアル化とその要素技術	技術士会中国本部	2018/7/14
29	杉本幸弘	マツダ㈱	摩擦熱によるアルミニウムと CFRP の異種材料接合	クルマの軽量化技術展 「軽量化革新フォーラム 2018 名古屋」	2018/9/6
30	小川裕樹 曙紘之 菅田淳 田中耕二郎	広島大学 マツダ㈱	Effect of Welding Parameters on Fatigue Strength of Joints Produced Friction Stir Spot Welding	2nd International Conference on Structural Integrity and Durability	2018/10/2
31	西口勝也 田中耕二郎 杉本幸弘	マツダ㈱	アルミニウム/CFRP の異種材料点接合技術	自動車技術会 秋期講演大会	2018/10/17
32	杉本幸弘	マツダ㈱	アルミニウムと異種材料の点接合技術	にいがた産業創造機構 先進的金型研究会	2018/10/23
33	杉本幸弘	マツダ㈱	アルミニウムと異種材料の点接合技術	溶接協会 溶接・接合プロセス研究委員会	2018/11/13
34	高見明秀	マツダ㈱	マツダにおける異材材料接合技術の取組み	「第 2 回 接着・接合 EXPO」	2018/12/7
35	杉本幸弘	マツダ㈱	アルミニウムと異種材料の点接合技術	クルマの軽量化技術展 「軽量化革新フォーラム 2019 東京」	2019/01/18
36	中原文弥 小川裕樹 曙紘之 菅田淳 田中耕二郎	広島大学 マツダ㈱	摩擦攪拌点接合による Al 合金/CFRP 異種接合継手の変動荷重下に対する疲労強度評価	日本材料学会 第 68 期通常総会・学術講演会	2019/5/25
37	田中耕二郎 杉本幸弘 西口勝也 小川祐樹	マツダ㈱ 広島大学	アルミ/樹脂摩擦点接合の接合強度に及ぼすアルミ表面処理の影響	自動車技術会 秋期講演大会	2019/10/9

38	杉本幸弘	マツダ㈱	車体のマルチマテリアル化とその要素技術	東北地域ものづくりセミナー	2019/10/21
39	杉本幸弘	マツダ㈱	車体のマルチマテリアル化とその要素技術	軽金属学会 第113回シンポジウム	2019/11/29
40	杉本幸弘	マツダ㈱	自動車のマルチマテリアル化と異材接合技術	産総研 構造材料シンポジウム	2020/02/18
41	高見明秀	マツダ㈱	マツダにおける異種材料接合技術の取組み	第4回関西 接着・接合 EXPO	2020/10/8
42	高見明秀	マツダ㈱	マツダにおける異種材料接合技術の取組み	第3回 名古屋 クルマの軽量化 技術展	2020/10/21
43	峯岡誠太郎 中原文弥 荒川仁太 小川裕樹 曙紘之 田中耕二郎 菅田淳	広島大学  神戸大学 広島大学 マツダ㈱ 広島大学	Al/CFRP 異材点接合継手の二段変動荷重下における疲労特性評価	日本機械学会 M&M2021 材料力学カンファレンス	2021/9/15
44	杉本幸弘	広島大学	自動車のマルチマテリアル化と異材接合技術	溶接工学企画講座	2021/11/8
45	北川和也 荒川仁太 曙紘之 杉本幸弘 菅田淳	広島大学	摩擦攪拌点接合により接合した Al 圧延材/Al ダイカスト材異材接合継手の動的強度特性評価	先進自動車製造技術における接合技術 2021	2021/11/30
46	野瀬悠生	広島大学	FSSW を用いた Al 異種材接合継手の疲労特性に及ぼすツール形状の影響	溶接学会中国支部主催 第6回学生発表会	2021/12/21
47	西口勝也	マツダ㈱	アルミニウム/異種材料の点接合技術	軽金属学会中国四国支部 70周年記念事業	2022/2/1
48	田中耕二郎 西口勝也 島田聡子 杉本幸弘	マツダ㈱  広島大学	アルミニウム合金ダイカストと圧延材の摩擦攪拌点接合	自動車技術会 2022年春季大会学術講演会	2022/5/27
49	野瀬悠生 荒川仁太 曙紘之 杉本幸弘 菅田淳	広島大学	Al 異種 FSSW 継手の疲労き裂挙動におよぼすツール形状の影響	日本材料学会第71期学術講演会	2022/5/30
50	杉本幸弘	広島大学	自動車のマルチマテリアル化と異材接合技術	島津自動車技術セミナー (ウェビナー)	2022/6/16
51	深堀 貢	マツダ	アルミニウム/異種材料の点接合技術	自動車技術会フォーラム	2022/7/13
52	峯岡誠太郎 荒川仁太 小川裕樹 曙紘之 杉本幸弘 菅田淳	広島大学  神戸大学 広島大学	摩擦攪拌点接合と接着剤を併用した CFRP/Al ウェルドボンド継手の疲労強度評価	第35回疲労シンポジウム	2022/7/22



53	高見明秀	マツダ(株)	摩擦攪拌点接合技術の自動車部品（マルチマテリアルドア）への適用	自動車技術会 2022 年秋 季大会学術講演会	2022/10/12
----	------	--------	---------------------------------	----------------------------	------------

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	マツダ(株)	取材対応「革新的接合技術の開発」	日刊工業新聞	2014/10/13
2	マツダ(株)	取材対応「異種材料を低コストでえ 強固につなぐ」	日経オートモーティブ 2016 年 4 月号	2016/03/11
3	マツダ(株)	取材対応「マツダ 摩擦熱で金属と樹 脂接合」	日経産業新聞 「技術フォーカス」	2016/3/17
4	マツダ(株)	異種材料接合技術について	技術情報協会車載テク ノロジー6月号	2017/6/30
5	マツダ(株)	摩擦熱による異種材料接合技術	(株)エヌ・ティー・エス 「自動車のマルチマテ リアル戦略最前線」	2017/7/26
6	NEDO、マツダ(株)、 (株)UACJ	「アルミ・樹脂 2 秒で接合 マツダ /UACJ」	日経産業新聞	2017/7/27
7	NEDO、マツダ(株)	自動車産業の将来予測と構造材料軽 量化技術の展望	日刊工業新聞	2017/12/13
8	NEDO、マツダ(株)	設計、材料、工法を三位一体で	日刊自動車新聞	2018/2/7
9	マツダ(株)	CFRP とアルミニウムの異材点接合技 術	技術情報協会車載テク ノロジー5月号	2019/5/31
10	マツダ(株)	アルミニウム/樹脂異種材料点接合の 強度特性に及ぼす表面処理の影響	月間 JETI 5月号	2021/4/22
11	マツダ(株)	アルミニウム/樹脂異種材料点接合の 強度特性に及ぼす表面処理の影響	技術情報協会車載テク ノロジー11月号	2021/11/30
12	マツダ(株)	マルチマテリアル化車体の動向と異 種材料接合技術	自動車マルチマテリア ルに向けた樹脂複合材 料の開発	2022/5/31
13	マツダ(株)	アルミニウム/異種材料の点接合技術 及び部材適用研究	プロジェクト書籍	2023/2

### (c)プレス発表

番号	所属	タイトル	発表形式	発表年月
1	マツダ(株) (株)UACJ	CFRP と金属の摩擦攪拌接合	日経 BP 社の取材対応	2019/11/1

#### (d)その他

番号	所属・著者等	タイトル	形式、媒体等	発表年月
1	マツダ(株) 杉本幸弘	モノ造り日本会議 NEDO「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトシンポジウム	講演、パネラー	2017/11/1
2	マツダ(株) 杉本幸弘	NEDO TSC Foresight セミナー (H29 年度第 3 回)	パネラー	2018/2/2

#### 1.4 展示会への出展

なし

#### 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	マツダ(株) 田中耕二郎	鋼板/アルミ異材抵抗スポット溶接技術の開発	軽金属溶接技術賞	2018/6/5

#### 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	マツダ(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	マツダ(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	講演、ポスター	2016/1/22
3	マツダ(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	講演、ポスター	2017/1/23
4	マツダ(株)	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
5	マツダ(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成 29 年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26
6	マツダ(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成 30 年度成果報告会」	講演、ポスター	2019/1/21

7	マツダ（株）	革新的新構造材料等研究開発 「2019年度成果報告会」	（講演、ポスター）	2020/2/28 （中止）
8	マツダ（株）	革新的新構造材料等研究開発 「2020年度成果報告会」	講演、（ポスター）	2021/7/1
9	マツダ（株）	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	講演、（ポスター）	2022/1/31
10	マツダ（株）	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	講演、（ポスター）	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号06]「中高炭素鋼/中高炭素鋼のフリクションスポット接合技術の開発」(2014年度～2017年度)

表 添-2.6-1 特許、論文、外部発表等の件数(内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2016FY	6	0	2	0	0	4	1	0	0	1	0	1
2017FY	3	0	3	0	0	5	2	0	0	0	0	2
合計	11	0	5	0	0	10	3	0	0	1	0	5

※1: Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2: 実施者が主体的に開催するイベント(フォーラム、シンポジウム等)

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT ※	出願日	状態	名称	発明者
1	住友電気工業 (株)	特願 2016-216325	国内	2016/11/4	登録	硬質材料および摩擦攪 拌接合用ツール	青山博香他
2	住友電気工業 (株)	特願 2016-216326	国内	2016/11/4	登録	摩擦攪拌接合用ツール	松川倫子他
7	川崎重工業 (株)	特願2015-2073 54	国内	2015/10/21	登録	摩擦攪拌点接合装置及 び摩擦攪拌点接合方法	大橋良司他
8	川崎重工業(株)	特願2016-0906 11	国内	2016/4/28	登録	点接合装置、点接合方 法及び継手構造	大橋良司他
10	川崎重工業(株)	PCT/JP2016/00 4589	PCT	2016/10/14	各国移 行・登録	摩擦攪拌点接合方法お よび摩擦攪拌点接合装 置	大橋良司他
11	川崎重工業(株)	PCT/JP2016/00 4590	PCT	2016/10/14	各国移 行・登録	摩擦攪拌点接合方法お よび摩擦攪拌点接合装 置	大橋良司他

13	川崎重工業（株）	PCT/JP2017/01 6816	PCT	2017/4/27	公開	摩擦攪拌点接合方法および摩擦攪拌点接合装置	大橋良司他
14	川崎重工業（株）	PCT/JP2017/02 3392	PCT	2017/6/26	格好移行・登録	摩擦攪拌点接合方法および摩擦攪拌点接合装置	大橋良司他
15	川崎重工業（株）	PCT/JP2017/03 9246	PCT	2017/10/31	各国移行・登録	摩擦攪拌点接合装置および摩擦攪拌点接合方法	大橋良司他
16	新日鐵住金（株） 川崎重工業（株）	特願 2017-001972	国内	2017/1/10	登録	継手	西畑ひとみ他、 大橋良司他

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	大橋良司 小林良崇 三宅将弘 福田拓也 津田圭一 内海慶春 泰山正則	川崎重工業(株) 住友電気工業(株) 新日鐵住金(株)	鋼の摩擦攪拌点接合（FSSW）技術	第318回塑性加工シンポジウム	無し	2016/2/24
2	宮崎博香 内海慶春 津田圭一 大橋良司 泰山正則	住友電気工業(株) 川崎重工業(株) 新日鐵住金(株)	鋼の摩擦攪拌点接合における超硬合金ツールの物理特性と損傷の関係	粉体粉末冶金協会平成28年度春季大会	無し	2016/5/24
3	宮崎博香 内海慶春 津田圭一 大橋良司 泰山正則	住友電気工業(株) 川崎重工業(株) 新日鐵住金(株)	鋼の摩擦攪拌点接合における超硬合金ツールの物理特性と損傷の関係（第2報）	粉体粉末冶金協会平成28年度秋季大会	無し	2016/11/10

4	大橋良司 内海慶春 徳永仁寿	川崎重工業(株) 住友電気工業(株) 新日鐵住金(株)	超高張力鋼板への摩擦攪拌点接合適用技術の開発	(一社)溶接学会 軽構造接合加工研究委員会	無し	2016/6/9
5	大橋良司 津田圭一 泰山正則	川崎重工業(株) 住友電気工業(株) 新日鐵住金(株)	進展する超高張力鋼板の摩擦攪拌点接合技術	日刊工業新聞社 モノづくり日本会議	無し	2016/10/6
6	大橋良司 村松良崇 津田圭一 内海慶春 泰山正則	川崎重工業(株) 住友電気工業(株) 新日鐵住金(株)	摩擦攪拌点接合技術の最新動向	第1回 接着・接合EXPO	無し	2017/4/5
7	徳永仁寿 西畑ひとみ 泰山正則 小林良崇 大橋良司 内海慶春	新日鐵住金(株) 川崎重工業(株) 住友電気工業(株)	摩擦攪拌点接合された中高炭素高強度鋼ハット部材の衝撃吸収特性	溶接学会 平成29年度秋季全国大会	無し	2017/9/11
8	小林良崇	川崎重工業(株)	摩擦攪拌点接合によるアルミニウム合金および鋼/アルミニウム合金の接合	軽金属学会関西支部シンポジウム	無し	2017/9/15
9	大橋良司	川崎重工業(株)	超ハイテン鋼およびアルミニウム合金/鋼の異材接合における摩擦攪拌点接合技術の最新動向	S&T出版	無し	2017/11/10
10	内海慶春 宮崎博香 津田圭一 大橋良司 徳永仁寿	住友電気工業(株) 川崎重工業(株) 新日鐵住金(株)	Correlation between physical properties and damage of cemented carbide tool in Friction Stir Spot Welding of ultra-high tensile strength steel sheets.	JSPM International Conference on Powder and Powder Metallurgy	無し	2017/11/8

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	大橋良司 内海慶春 泰山正則	川崎重工業株式会社 住友電気工業株式会社 新日鐵住金株式会社	自動車生産における摩擦攪拌接合技術－超高張力鋼板の摩擦攪拌点接合－	産報出版 溶接技術	2016/7/1
2	大橋良司	川崎重工業株式会社	ISMAレポートNo.7	ISMA広報機関紙	2017/6
3	大橋良司	川崎重工業株式会社	超高張力鋼の摩擦攪拌点接合技術	日刊工業出版 プロダクション 工業材料 12月号	2017/11/12

#### (b)新聞・雑誌等への掲載

なし

#### (c)プレス発表

なし

#### (d)その他

なし

### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	川崎重工業株式会社 住友電気工業株式会社 新日鐵住金株式会社	nano tech 2017	パネル	2017/2/15～17

### 1.5 受賞

なし

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	川崎重工業株式会社 住友電気工業株式会社 新日鐵住金株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	川崎重工業株式会社 住友電気工業株式会社 新日鐵住金株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22
3	川崎重工業株式会社※ 住友電気工業株式会社 新日鐵住金株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	ポスター、講演※	2017/1/23
4	川崎重工業株式会社 住友電気工業株式会社 新日鐵住金株式会社	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
5	川崎重工業株式会社 住友電気工業株式会社 新日鐵住金株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成29年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）



[テーマ番号07]「鋼材／CFRP等樹脂材料の接合技術開発」（2014年度～2017年度）

[テーマ番号63]「鋼板と樹脂材料の革新的接合技術及び信頼性評価技術の開発」（2018年度～2021年度）

表 添-2.7-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2014FY	1	0	0	1	0	6	0	0	0	0	0	1
2015FY	2	0	0	0	0	6	2	0	0	0	1	1
2016FY	2	0	0	4	0	8	2	0	0	1	0	1
2017FY	1	0	0	2	0	4	0	0	0	0	0	0
2018FY	0	0	0	2	0	3	0	0	0	0	0	1
2019FY	0	0	0	1	0	8	0	0	0	0	1	1
2020FY	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
2021FY	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1
合計	7	0	0	10	0	37	5	0	0	1	2	7

※1：Patent Cooperation Treaty：特許協力条約

※2：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

### 1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT※	出願日	状態	名称	発明者
1	(株) IHI	特願 2015-084100	国内	2015/4/16	登録	重ね継手及びその製造方法	猪瀬幸太郎、 他
2	(株) IHI	特願 2015-192604	国内	2015/9/30	登録	桁構造体	猪瀬幸太郎、 他
3	(株) IHI	特願 2017-071888	国内	2017/3/31	登録	柱構造体	猪瀬幸太郎、 他
4	(株) IHI	特願 2017-068664	国内	2017/3/30	登録	桁構造体	猪瀬幸太郎、 他
5	(株) IHI	特願 2017-196025	国内	2017/10/6	登録	金属樹脂接合法	猪瀬幸太郎、 他
6	(株) IHI	特願 2021-084196	国内	2021/5/18	公開	衝突エネルギー吸収構造	猪瀬幸太郎、 他

(※Patent Cooperation Treaty：特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	K. Naito	NIMS	Tensile Properties of Polyimide Composites Incorporating Carbon Nanotubes Grafted and Polyimide Coated Carbon Fibers	J. of Mater. Eng. and Perform., 23 (9) 3245-3256	有	2014/9/1
2	K.Nagatsuka, D. Kitagawa, H. Yamaoka, K. Nakata	阪大	Friction Lap Joining of Thermoplastic Materials to Carbon Steel	ISIJ International, 56-7 (2016) 1226-1231	有	2016/5/24
3	三輪剛士、 北川大喜、 永塚公彬、 山岡弘人、 伊藤和博、 中田一博	阪大 IHI	摩擦重ね接合によるステンレス鋼と炭素繊維強化熱可塑性樹脂との異材接合	溶接学会論文集, 35-1 (2017) 29-35.	有	2016/12/28
4	K. Naito	NIMS	Effect of hybrid surface modifications on tensile properties of polyacrylonitrile- and pitch-based carbon fibers	Journal of Materials Engineering and Performance	有	2016/5/1
5	W. Ma, R. Liu, X. Yu, K. Naito, X. Qu, Q. Zhang	NIMS	Functionalization of Nanodiamond with Four Kinds of Epoxies	Journal of Nanoscience and Nanotechnology	有	2017/1/1
6	K. Naito, Y. Tanaka, JM. Yang	NIMS	Transverse compressive properties of polyacrylonitrile (PAN)-based and pitch-based single carbon fibers	Carbon	有	2017/7/1
7	Y. Tanaka, K. Naito, H. Kakisawa	NIMS	Measurement method of multi-scale thermal deformation inhomogeneity in CFRP using in situ FE-SEM observations	Composites Part A- Applied Science and Manufacturing	有	2017/11/1
8	内藤公喜	NIMS	界面制御型炭素繊維複合強化材料の開発	月刊車載テクノロジー, 3, 24-312	有	2018/12/1
9	小熊博幸、 内藤公喜	NIMS	複合材料を用いた接着構造の力学的性質に及ぼす被着体表面処理の影響	金属, 89(1), 21-25	有	2019/1/1
10	小熊博幸、 内藤公喜	NIMS	Effect of stress ratio on the fatigue fracture mechanism of adhesive single-lap joints: in case of GF/PP plates and an acrylic-based structural adhesive	Procedia Structural Integrity, 19, 224-230	有	2019/12/1

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	北川大喜、永塚公彬、山岡弘人、中田一博	阪大 IHI	摩擦重ね接合による鉄鋼材料／樹脂の直接異材接合	溶接学会平成 26 年度秋季大会	2014/9/11
2	北川大喜、三輪剛、永塚公彬、中田一博	阪大	Dissimilar Direct Joining of SUS304/CFRTP by Friction Lap Joining	Visual JW 2014	2014/11/27
3	三輪剛、北川大喜、永塚公彬、中田一博	阪大	Effect of Joining Speed on Formation of SUS304 / Polyamide 6 Joint by Friction Lap Joining	Visual-JW 2014	2014/11/27
4	内藤公喜	NIMS	炭素繊維の構造、表面状態と強度、密着性評価	炭素繊維の表面特性とマトリックス樹脂との含浸性向上セミナー	2014/4/24
5	K. Naito	NIMS	Interfacial Shear Strength of Carbon Nanotubes Grafted Carbon Fiber/Epoxy	16th European Conference on Composite Materials (ECCM16)	2014/6/26
6	内藤公喜	NIMS	炭素繊維の特徴、強度と樹脂との密着性評価	炭素繊維/樹脂界面の制御と強度評価セミナー	2014/11/14
7	内藤公喜	NIMS	炭素繊維の構造、表面状態と強度、密着性評価	CFRP の繊維／樹脂 界面制御と成形加工技術、技術情報協会, pp.9-19	2015/5/1
8	佐藤拓海、松岡敬、平山朋子、内藤公喜	同志社大 NIMS	SiC ナノ粒子を添加した炭素繊維強化複合材料の摩擦摩耗特性の把握	トライボロジー会議 2015 春姫路	2015/5/27
9	三輪剛士、北川大喜、永塚公彬、中田一博、山岡弘人	阪大 IHI	摩擦重ね接合によるステンレス鋼と炭素繊維強化熱可塑性樹脂との異材接合	溶接学会 平成 27 年度秋季全国大会	2015/9/2-4
10	肖伯律、三輪剛士、北川大喜、永塚公彬、中田一博、山岡弘人	阪大 IHI	摩擦重ね接合によるステンレス鋼とポリアミド 6 との異材接合	溶接学会 平成 27 年度秋季全国大会	2015/9/2-4
11	T. Sato, K. Naito, T. Matsuoka, T. Hirayama	同志社大 NIMS	Friction and Wear Properties of High Modulus Pitch-based Carbon Fiber Reinforced Plastics with SiC Nanoparticles	10th International Conference on Composite Science and Technology (ICCST/10)	2015/9/2
12	H. Oguma, K. Naito	NIMS	Tensile Properties of Novel Carbon/Glass Hybrid Thermoplastic Composite Rods for Tendon	LIMAS2015	2015/11/9
13	内藤公喜	NIMS	炭素繊維の表面改質及び界面特性評価と複合材料特性の向上効果	CFRP 成形における材料設計・含浸性とその制御セミナー	2016/5/16

14	Y. Tanaka, K. Naito, H. Kakisawa	NIMS	Damage evolution in titanium-CFRP hybrid laminates during fatigue and strain measurement at the interface	PRICM9	2016/8/4
15	永塚公彬、呉利輝、中田一博、土谷敦岐、山岡弘人	阪大 東レ IHI	ロボット摩擦重ね接合法による金属/CFRPの直接異材接合	(一社) 溶接学会 平成28年度秋季全国大会	2016/9/14-16
16	Tsuyoshi MIWA, Daiki KITAGAWA, Kimiaki NAGATSUKA, Kazuhiro ITO, Kazuhiro NAKATA, Hiroto YAMAOKA	阪大 IHI	Dissimilar Joint Formation of SUS304 / CFRTP by Friction Lap Joining	The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation (Visual-JW2016)	2016/10/17-18
17	K. Naito, H. Oguma, H.B. Kim	NIMS	Lap Shear Strength of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with Two-part Epoxy Adhesive	ACCM10	2016/10/16
18	永塚公彬	阪大	金属、樹脂・CFRP、セラミックの異種材料接合	溶接学会 若手会員の会研究会	2016/11/10
19	内藤公喜	NIMS	NIMSでの接着接合に関わる力学特性評価について	第2回接着材料クラスター会議	2017/2/2
20	内藤公喜	NIMS	NIMSでの接着研究の取り組み	第1回接着強度に関する勉強会	2017/2/3
21	内藤公喜	NIMS	接着継ぎ手の静的および疲労き裂進展特性について (招待講演)	日本学術振興会産学協力研究委員会一接合界面創成技術第191委員会	2017/4/25
22	内藤公喜	NIMS	複合材接着構造の疲労	第7回SIP「革新的構造材料コロキウム」	2017/6/30
23	内藤公喜	NIMS	複合材料および複合材料を用いた接着継ぎ手の耐久性評価 (招待講演)	石川県次世代産業育成講座・新技術セミナー	2017/11/2
24	内藤公喜	NIMS	接着接合部の疲労耐久性とその評価法	接着・接合技術コンソーシアム 平成29年度第一回耐久性・分析WG	2018/1/19
25	内藤公喜	NIMS	複合材料の内部構造評価法 (招待講演)	複合材料の内部構造評価法に関する講演会	2018/12/20
26	内藤公喜	NIMS	炭素繊維の破壊じん性値	ナノ繊維・粒子添加複合材料研究に関する若手研究者・学生セッション 2019 同志社大学先端複合材料研究センター2018年度末研究成果発表会	2019/3/2

27	境昌宏	室工大	アルミニウム/CFRP のガルバニック腐食と抑制方法	S&T 出版セミナー 「CFRP/金属の構造接着・はく離とガルバニック腐食」	2019/3/28
28	内藤公喜	NIMS	接着接合部におけるモードII破壊じん性の測定（招待講演）	第2回「接着技術者スキルアップ講座」	2019/4/22
29	小熊博幸, 内藤公喜, 小川裕樹	NIMS	Effect of adhesive thickness on the fatigue properties of bonded single-lap joints in case of CFRP and polyurethane adhesive	AB2019	2019/7/11
30	小川裕樹, 内藤公喜, 小熊博幸	NIMS	マルチマテリアル構造の実現に向けた接着接合技術の開発	第7回 NIMS 構造材料研究拠点シンポジウム	2019/8/30
31	小熊博幸, 内藤公喜	NIMS	Effect of stress ratio on the fatigue fracture mechanism of adhesive single-lap joints: in case of GF/PP plates and an acrylic-based structural adhesive	Fatigue Design 2019	2019/11/20
32	小川裕樹, 小熊博幸, 内藤公喜	NIMS	アクリル系接着剤を使用した接着接合継手の疲労特性に与える各種影響因子	溶接構造シンポジウム2019	2019/12/03
33	境昌宏, 森川紘伸, 片山大樹, 内藤公喜	室工大, NIMS	食塩水中における冷間圧延鋼板とCFRP積層板とのガルバニック腐食試験	溶接構造シンポジウム2019	2019/12/3
34	内藤公喜, 小川裕樹, 小熊博幸	NIMS	Mode I fracture toughness of polyurethane adhesive	IAA2020 (新型コロナウイルス対策で出張は取りやめ、ビデオ発表で参加)	2020/3/4
35	小川裕樹, 小熊博幸, 内藤公喜	NIMS	Effect of Adhesive Thickness on Fatigue Properties for Single Lap Bonded Joint with Different Types of Acrylic Adhesives	IAA2020 (新型コロナウイルス対策で出張は取りやめ、ビデオ発表で参加)	2020/3/4
36	内藤公喜	NIMS	接着継ぎ手の静的および疲労荷重下の力学特性評価と破壊機構	一般社団法人日本接着学会 構造接着・精密接着研究会 2021年度 第2回研究講演会	2021/7/20
37	内藤公喜	NIMS	Fatigue crack growth behavior of polyurethane adhesive under mode I loading	IAA2022 (新型コロナウイルス対策によりビデオ発表で参加)	2022/3/4

## (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	NIMS	炭素繊維の構造、表面状態と強度、密着性評価	CFRP の繊維／樹脂 界面制御と成形加工技術	2015/5/1
2	NIMS	Synthesis of a Novel Naphthyl-based Self-catalyzed Phthalonitrile Polymer	Chinese Chemical Letters, Vol.26, pp.727-729	2015/6/1
3	阪大	アルミ、CFRP 接合 阪大、3次元形状に対応	日刊工業新聞	2016/8/19
4	NIMS	マルチスケール接合技術の開発	金属	2017/1/1
5	NIMS	鋼板と樹脂材料の接合技術開発（車体軽量化を目指したマルチマテリアル化）	月刊「溶接技術」	2020/8/25

## (c)プレス発表

なし

## (d)その他

なし

## 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	(株) IHI	ナノテク展 2017	パネル、試作品展示	2017/2/15～ 2017/2/17

## 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	阪大・三輪剛士	摩擦重ね接合によるステンレス鋼と炭素繊維強化熱可塑性樹脂との異材接合	平成 27 年度溶接学会優秀研究発表賞	2015/12/21
2	NIMS・小川裕樹	アクリル系接着剤を使用した接着接合継手の疲労特性に与える各種影響因子	シンポジウム奨励賞（溶接構造シンポジウム 2019）	2019/12/4

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	IHI	革新的新構造材料等研究開発「平成 26 年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	IHI	革新的新構造材料等研究開発「平成 27 年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22

3	IHI	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	ポスター	2017/1/23
4	IHI	3 府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠 点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
5	IHI	革新的新構造材料等研究開発 「平成 29 年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26
6	NIMS. IHI, 室工大	革新的新構造材料等研究開発 「平成 30 年度成果報告会」	ポスター、講演	2019/1/21
7	NIMS. IHI, 室工大	革新的新構造材料等研究開発 「2019 年度成果報告会」	(ポスター、講演) 資料配布のみ	2020/2/28 (中止)
8	NIMS. IHI	革新的新構造材料等研究開発 「2020 年度成果報告会」	(ポスター)、ビデオ講 演	2021/7/1
9	NIMS. IHI	革新的新構造材料等研究開発 「2021 年度成果報告会」	(ポスター)、ビデオ講 演	2022/1/31

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号08] 難接合性材料の線接合技術の開発 (2013年度～2017年度)

[テーマ番号33] 革新的FSWによる超ハイテン接合部材の開発 (2018年度～2021年度)

表 添-2.8-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	1	0	5	0	0	0	2	0	1
2015FY	0	0	0	1	0	5	0	0	1	1	0	1
2016FY	2	0	0	2	0	5	1	0	0	3	0	1
2017FY	0	8	1	3	0	2	0	0	1	1	0	2
2018FY	0	0	0	1	0	4	1	0	0	0	0	1
2019FY	0	0	0	1	0	3	1	0	0	0	0	1
2020FY	0	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	1
2021FY	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
合計	3	(15)	1	10	0	28	3	0	2	7	0	9

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT ※	出願日	状態	名 称	発明者
1	(株)日立パワーソリューションズ	特願 2016-090487	国内	2016/4/28	登録	摩擦攪拌接合装置	小田倉 他
2	(株)日立パワーソリューションズ (株)日立製作所	特願 2017-66641	国内	2017/3/30	登録	摩擦攪拌接合装置及び 摩擦攪拌接合制御装置 並びに摩擦攪拌接合方法	小田倉 他
3	(株)日立パワーソリューションズ	PCT/JP2017/16424	PCT	2017/4/25	各国 移 行・ 登録	摩擦攪拌接合装置	小田倉 他



4	(株)日立パ ワーソリュー ションズ	P10-2018-0035167	外国 (韓 国)	2018/3/27	登録	摩擦攪拌接合装置及び 摩擦攪拌接合制御装置 並びに摩擦攪拌接合方 法	小田倉 他
5	(株)日立パ ワーソリュー ションズ	P201810258847.8	外国 (中 国)	2018/3/27	登録	摩擦攪拌接合装置及び 摩擦攪拌接合制御装置 並びに摩擦攪拌接合方 法	小田倉 他
6	(株)日立パ ワーソリュー ションズ	P15/939970	外国 (米 国)	2018/3/29	登録	摩擦攪拌接合装置及び 摩擦攪拌接合制御装置 並びに摩擦攪拌接合方 法	小田倉 他
7	(株)日立パ ワーソリュー ションズ	P18165079.7	外国 (欧 州)	2018/3/29	各国 /地 域移 行	摩擦攪拌接合装置及び 摩擦攪拌接合制御装置 並びに摩擦攪拌接合方 法	小田倉 他
8	(株)日立パ ワーソリュー ションズ	P18165079.7	外国 (英 国)	2018/3/29	登録	摩擦攪拌接合装置及び 摩擦攪拌接合制御装置 並びに摩擦攪拌接合方 法	小田倉 他
9	(株)日立パ ワーソリュー ションズ	P602018012498.5	外国 (ド イ ツ)	2018/3/29	登録	摩擦攪拌接合装置及び 摩擦攪拌接合制御装置 並びに摩擦攪拌接合方 法	小田倉 他
10	(株)日立パ ワーソリュー ションズ	P18165079.7	外国 (フ ラン ス)	2018/3/29	登録	摩擦攪拌接合装置及び 摩擦攪拌接合制御装置 並びに摩擦攪拌接合方 法	小田倉 他

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番 号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ 番号	査読	発表年月
1	佐藤裕, 他	東北大	Tool material factors for suppression of wear in Co- based alloy tool during friction stir welding of 0.45C steel	Proceedings of 10th International Symposium on Friction Stir Welding, CD-ROM.	有	2014/5/20
2	佐藤裕, 他	東北大	Performance enhancement of Co-based alloy tool for friction stir welding of ferritic steel	Friction Stir Welding and Processing VIII, 39-46.	有	2015/3/16
3	佐藤裕, 他	東北大	Wear of cobalt-based alloy tool during friction stir welding of Ti-6Al-4V alloy	Proceedings of 11th International Symposium on Friction Stir Welding, CD-ROM	有	2016/5/19

4	Tatsuya Nakazawa et al.	Tanaka Kikinzoku Kogyo K.K.	Performance of iridium containing nickel base superalloy tool for friction stir welding of Ti-6Al-4V alloy	Proceedings of 11 <sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, CD-ROM	有	2016/5/16
5	Kunihihiro Tanaka et al.	Tanaka Kikinzoku Kogyo K.K.	Feasibility of Iridium Containing Nickel Based Superalloy Tool to Friction Stir Spot Welding of High Strength Steel	Friction Stir Welding and Processing IX, pp29-35	有	2017/3/3
6	岡崎正和、他	長岡技術科学大学	FATIGUE CRACK PROPAGATION RESISTANCE RELEVANT TO MICROSTRUCTURE IN A FRICTION STIRRED TI-6AL-4V TITANIUM ALLOY JOINT.	International Committee on Aeronautical Fatigue and Structural Integrity ICAF2017	有	2017/6/7
7	Sergey Mironov et al.	東北大	Microstructure and tensile behavior of friction-stir welded TRIP steel.	Materials Science and Engineering A, 717 (2018), 26-33.	有	2018/1/17
8	*M. Okazaki, *M. Muzvidziw **S. Hirano	*Nagaoka University of Technology. **Hitachi Research Lab, Hitachi, Japan	Local Fatigue Crack Propagation Resistance Relevant To Microstructure Uniquely Developed In A Friction Stirred Ti-6Al-4V Alloy Joint	Titanium 2019	有	2019/6/13
9	Masakazu Okazaki, Satoshi Hirano	長岡技術科学大学、日立製作所	Improved Fatigue Strength of A Dissimilar Metal T-Lap Joint Fabricated by Controlled Double-Pass Friction Stir We	Proceeding of Int. Conf. Materials, Machines and Method for Sustainable Development, Springer Nature	有	2020/11/12
10	Masakazu Okazaki, Hao Dinh Duong, Satoshi Hirano	長岡技術科学大学、日立製作所、他	Friction Stir Welding and Processing XI, TMS	Fracture Mechanics Approach to Improve Fatigue Strength of a Dissimilar Metal T-Lap Joint by Friction Stir Welding.	有	2021/3/16

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	佐藤裕	東北大	鋼の摩擦攪拌接合過程における Co 基合金ツールの摩耗抑制因子	溶接学会平成 26 年度 春季全国大会	2014/4/23
2	佐藤裕	東北大	Tool material factors for suppression of wear in Co-based alloy tool during friction stir welding of 0.45C steel	10th International Symposium on Friction Stir Welding	2014/5/20
3	薄田真一	東北大	組織制御による Co 基合金摩擦攪拌接合ツールの高性能化	溶接学会平成 26 年度 秋季全国大会	2014/9/10
4	佐藤裕	東北大	Wear behavior of cobalt-based alloy tool during friction stir welding of ferritic steel	The 9th International Forum on Advanced Materials Science and Technology	2014/12/1
5	佐藤裕	東北大	Performance enhancement of Co-based alloy tool for friction stir welding of ferritic steel	TMS 2015	2015/3/16
6	佐藤裕	東北大	Microstructure modification of cobalt-based superalloy tool to suppress wear during friction stir welding of steels	2nd International Conference on Friction Based Processes	2015/9/15
7	佐藤裕	東北大	Wear behavior and suppression during friction stir welding of ferritic steel in cobalt-base superalloy tool	The 4th International Conference on Scientific and Technical Advances on Friction Stir Welding and Processing	2015/10/01
8	仲沢達也	田中貴金属工業株式会社	鉄鋼の FSW における Ir 添加 Ni 基合金ツールの耐久性	溶接学会平成 27 年度 秋季全国大会	2015/9/3
9	仲沢達也	田中貴金属工業株式会社	高温特性に優れた Ir 添加 Ni 基超合金の開発	日本金属学会 2015 年 秋期(第 157 回)講演大会	2015/9/16
10	杉本一等	日立製作所	Co 基合金ツールによる Ti-6Al-4V 合金の摩擦攪拌接合部のマイクロ組織と強度特性	溶接学会平成 27 年度 秋季全国大会	2015/9/3
11	佐藤裕	東北大	Wear of cobalt-based alloy tool during friction stir welding of Ti-6Al-4V alloy	11th International Symposium on Friction Stir Welding	2016/5/19
12	佐藤裕	東北大	Life prolongation of cobalt-based alloy tool during friction stir welding of medium carbon steel via microstructure modification	69th IIW Annual Assembly and International Conference	2016/7/13
13	佐藤裕	東北大	Development of new tool materials for friction stir welding of steels	2016 International Seminar on Advanced Manufacturing and Welding	2016/8/13

14	Tatsuya Nakazawa et al.	Tanaka Kikinzoku Kogyo K.K.	Performance of iridium containing nickel base superalloy tool for friction stir welding of Ti-6Al-4V alloy	11 <sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding	2016/5/16~19
15	Kunihiiro Tanaka et al.	Tanaka Kikinzoku Kogyo K.K.	Feasibility of Iridium Containing Nickel Based Superalloy Tool to Friction Stir Spot Welding of High Strength Steel	RMW12 The 12th Workshop on Reactive Metal Processing	2017/3/3
16	平野聡、他	日立製作所	FSW による Ti-6Al-4V 合金継手の機械的特性	溶接学会平成 29 年度秋季全国大会	2017/9/11
17	セルゲイ ミロノフ、他	東北大	TRIP 鋼のマイクロ組織と微小硬さに及ぼす摩擦攪拌接合の影響	溶接学会平成 29 年度秋季全国大会	2017/9/12
18	平野 聡1)、佐藤章宏2)、佐藤 裕3)、石田清仁3)	1) (株) 日立製作所、 2) (株) 日立パワーソリューションズ、 3) 東北大学	1.2GPa 級高張力鋼板のFSW	平成 30 年度溶接学会春季全国大会	2018/4/26
19	佐藤裕1)、ミロノフ セルゲイ1)、藤井啓道1)、粉川博之1)、石田清仁1)、平野聡 2)	1) 東北大学、 2) 日立製作所	Co 基合金ツールで得られた TRIP 鋼摩擦攪拌接合部のマイクロ組織と引張特性	溶接学会平成30年度春季全国大会 オーガナイズドセッション	2018/4/26
20	岡崎正和1)、Devidatta Satapathy1)、平野聡 2)	1) 長岡技術科学大学、 2) 日立製作所	ハイテン鋼 FSW の疲労破壊特性	溶接学会平成 30 年度春季全国大会	2018/4/26
21	平野 聡1)、佐藤章宏1)、佐藤 裕2)、石田清仁2)	1) (株) 日立製作所、 2) 東北大学	Ti-6Al-4V 合金 FSW 中の装置負荷特性	平成 30 年度溶接学会秋季全国大会	2018/9/14
22	Masakazu OKAZAKI 1)、*Ranjak AGARWAL 1)、Satoshi HIRANO 2)	1) Nagaoka University of Technology、 2) Hitachi Research Lab, Hitachi , Japan	Fatigue Strength of Dissimilar Metal Friction Stir Welded Joint between TRIP Steel and Mild Steel	THE14TH WORLD CONFERENCE ON TITANIUM	2019/6/13
23	平野聡1)、佐藤章弘1)、佐藤裕2)、石田清仁2)	1) 日立製作所、 2) 東北大学大学院	摩擦攪拌接合による Ti 合金および超ハイテン鋼の接合技術	溶接学会 界面接合研究委員会	2019/5/10

24	Masakazu OKAZAKI、Ranjak AGARWAL、Ken YAMASHITA、Satoshi HIRANO	長岡技術科学大学、日立製作所	Fatigue Strength of Dissimilar Metal Friction Stir Welded Joint between TRIP Steel and Mild Steel	日本機械学会北陸信越支部講演会	2020/3/8
25	Masakazu Okazaki、Satoshi Hirano	長岡技術科学大学、日立製作所	Improved Fatigue Strength of A Dissimilar Metal T-Lap Joint Fabricated by Controlled Double-Pass Friction Stir Welding.	Proceeding of Int. Conf, Material, Machines and Method for Sustainable Development	2020/11/12
26	岡崎正和、山下健、平野聡	長岡技術科学大学、日立製作所	摩擦発熱を利用した超強度鋼の重ね合わせ接合試験片の疲労強度	日本材料学会第59回高温強度シンポジウム	2021/1/25
27	Masakazu Okazaki、Satoshi Hirano	長岡技術科学大学、日立製作所	Fracture Mechanics Approach to Improve Fatigue Strength of a Dissimilar Metal T-Lap Joint by Friction Stir Welding	Friction Stir Welding and Processing XI	2021/3/16
28	岡崎正和、平野聡	長岡技術科学大学、日立製作所	1.5 GPa 級超高強度鋼の FSW による重ね合わせ継手の疲労強度	日本材料学会第70期學術講演会	2021/5/30

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	日立製作所	摩擦攪拌接合（FSW）用ツール合金	まてりあ, 55 巻 10 号, P.461	2016/10
2	日立製作所	難接合性材料の線接合技術の開発	軽金属, Vol.69-No.2, P81-85	2019/2/28
3	Nagaoka University of Technology, Hitachi Research Lab, Hitachi, Japan	Local Fatigue Crack Propagation Resistance Relevant To Microstructure Uniquely Developed In A Friction Stirred Ti-6Al-4V Alloy Joint	Titanium 2019	2019/6/13

### (c)プレス発表

なし

#### (d)その他

番号	所属・著者等	タイトル	形式、媒体等	発表年月
1	日立製作所	日立製作所 基盤技術ブックレット 中核技術／固相技術	技術 PR 用冊子	2015/12
2	日立製作所	チタン合金の摩擦攪拌接合（FSW） 技術	口頭発表；JAXA－日立 研究所 技術交流会 「航空機の軽量化に貢 献する技術」	2017/7/18

#### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	日立メタルプレジジョン	精密工学会秋季大会 (鳥取) 先端技術紹介セッション	カタログ、 FSW ツール展示	2014/9/16～18
2	日立メタルプレジジョン	TECHINNOVATION2014 シンガポール政府主催 JST(科学技術振興機構)と共同展示	パネル、 FSW ツール展示	2014/9/23～24
3	日立分室	関西高機能金属展（2015）	ブース展示	2015/10/7～9
4	田中貴金属工業株式会社	第3回 高機能 金属展	ブース出展（FSW 技術 の紹介）	2016/4/6～8
5	日立メタルプレジジョン	人とくるまのテクノロジー展	パネル、プレゼン	2016/5/25～27
6	日立メタルプレジジョン	日本特殊陶業 展示会	パネル、プレゼン	2016/10/28

#### 1.5 受賞

なし

#### 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	日立分室	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	日立分室	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22
3	日立分室	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	ポスター	2017/1/23

4	日立分室	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
5	日立分室	革新的新構造材料等研究開発 「平成 29 年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26
6	日立分室	革新的新構造材料等研究開発 「平成 30 年度成果報告会」	ポスター	2019/1/21
7	日立分室	革新的新構造材料等研究開発 「2019 年度成果報告会」	(ポスター)	2020/2/28 (中止)
8	日立分室	革新的新構造材料等研究開発 「2020 年度成果報告会」	(ポスター)、発表	2021/7/1
9	日立分室	革新的新構造材料等研究開発 「2021 年度成果報告会」	(ポスター)、発表	2022/1/31

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号09] 水和物架橋低温接合技術の開発 (2014年度～2015年度)

表 添-2.9-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
合計	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	2

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

1.1 特許

なし

1.2 論文

なし

1.3 その他外部発表

(a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	若林千智 泰山正則 児玉真二 重藤暁津  香川豊	新日鐵  国立研究開発法 人物質・材料研 究機構 東京大学	水和物架橋低温接合によ る異種金属接合技術の検 討	溶接学会秋季全国大会	2015/9/4

(b)新聞・雑誌等への掲載

なし



**(c)プレス発表**

なし

**(d)その他**

なし

**1.4 展示会への出展**

なし

**1.5 受賞**

**1.6 フォーラム等**

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	新日鐵住金株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	新日鐵住金株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 4 5] 構造用接着技術に関する Feasibility Study (2015、2016 年度)

[テーマ番号 5 3] 構造材料用接着技術の開発 (2017 年度～2022 年度)

表 添-2.10-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス 発 表	その 他			
2015FY	0	0	0	0	0	39	2	0	0	0	3	1
2016FY	1	0	0	4	0	50	5	0	0	0	1	1
2017FY	0	0	1	3	0	66	3	2	0	1	0	2
2018FY	0	0	0	8	0	38	3	0	0	2	1	2
2019FY	2	0		4	0	24	9	0	0	3	0	1
2020FY	0	0	0	10	0	18	2	0	1	2	5	1
2021FY	0	0	0	5	0	17	0	0	0	0	0	1
2022FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1
合計	3	0	1	31	0	253	24	2	1	8	11	10

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT※	出願日	状態	名 称	発明者
1	産業技術総合 研究所	特願 2017-045037	国内	2017/3/9	公開	き裂先端位置検出方法 および接着剤剥離位置 検出方法	寺崎正・藤 尾侑輝・堀内 伸
2	産業技術総合 研究所	PCT/JP2018/008915	PCT	2018/3/8	公開	き裂先端位置検出方法 および接着剤剥離位置 検出方法	寺崎正・藤 尾侑輝・堀内 伸
3	産業技術総合 研究所	特願 2019-218669	国内	2019/12/3	公開	易接着性ポリオレフィン 成型体及びその製造方 法並びにその製造方法 に用いられる含熱分解材 料塗布液及び熱分解材 料担持シート	島田悟、李成 竺、堀内伸、 秋山陽久、宮 前孝行、伊勢 翔吾、田嶋一 樹、船橋正弘

4	横浜ゴム	特願 2019-228340	国内	2019/12/18	公開	接着剤の選定方法および接着複合体並びに接着複合体の製造方法	横浜ゴム株式会社 発明者 松木裕一、阿部愛美（横浜ゴム）、寺崎正（産総研九州）
---	------	----------------	----	------------	----	-------------------------------	--

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	堀内伸、伯川秀樹、長田英也、杉村博之	AIST、京都大学	Study of the adhesion and interface of the low temperature bonding of vacuum ultraviolet-irradiated cyclo-olefin polymer using electron microscopy	POLYMER JOURNAL 48, 473-479	有	2016/4/1
2	堀内伸	AIST	樹脂-金属接合体の界面特性評価方法の国際標準化	軽金属溶接 54(8) 1-6	有	2016/8/1
3	堀内伸	AIST	電子顕微鏡による接着メカニズムの解明	日本接着学会誌 52(12) 377-382	有	2016/12/1
4	Yoshizo Kawaguchi, Hideki Ohmura, Tadatake Sato	AIST	Detection of trace substances adhered to a metal surface by laser-induced breakdown spectroscopy	Journal of Analytical Atomic Spectrometry 32 609-615	有	2017/31
5	遠山 暢之、山本 哲也、卜部 啓、津田 浩	産業技術総合研究所	パルスレーザー走査法による CFRP/アルミニウム接着接合部の超音波検査	日本複合材料学会誌, 2017, 43(5), p201-295	有	2017/9/15
6	佐藤 正健、川口 喜三、秋山 陽久、大村 英樹	産業技術総合研究所	Detection of contaminants on pre-bond surface by LIBS	Journal of Adhesion, 2018, 94(9) p689-700	有	2018/2/20 (Published on Web)
7	寺崎 正、藤尾侑輝、坂田義太郎、堀内伸、秋山晴久	産業技術総合研究所	Visualization of crack propagation for assisting double cantilever beam test through mechanoluminescence	Journal of Adhesion, 2018, 94(11) p867-879	有	2018/2/20 (Published on Web)
8	叶 嘉星、伊東 峻也、遠山 暢之	産業技術総合研究所	Computerized ultrasonic imaging inspection: from shallow to deep learning	Sensors,2018 18(11) 記事番号 3820	有	2018/11/7

9	遠山 暢之、 叶 嘉星、穀 山 渉、矢代 茂樹	産業技術 総合研究 所	Non-contact ultrasonic inspection of impact damage in composite laminates by visualization of Lamb wave propagation	Applied Sciences-Basel, 2018, 9(1) 記事番号 46	有	2018/12/24
10	遠山 暢之、 山本 哲也、 卜部 啓、津 田 浩	産業技術 総合研究 所	Ultrasonic inspection of adhesively bonded CFRP/aluminum joints using pulsed laser scanning	Advanced Composite Materials, 2019, 28(1) p27-35	有	2019/1/2
11	佐藤 正健、 田代 賢一、 川口 喜三、 大村 英樹、 秋山 陽久	産業技術 総合研究 所	Investigation of the factors affecting the limit of detection of laser-induced breakdown spectroscopy for surface inspection	Plasma Science and Technology, 2019, 21(3), 記 事番号: 034021	有	2019/1/16
12	佐藤 友哉、 伊勢 翔悟、 宮前 孝行、 堀内 伸、秋 山 陽久	産業技術 総合研究 所	Influences of low-pressure ambient pressure N <sub>2</sub> plasma and flame treatments on polypropylene surfaces	International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019, 93, p76-82	有	2019/1/23
13	Nao Terasaki, Yuki Fujio, Shin Horiuchi, Haruhisa Akiyama	産業技術 総合研究 所	Mechanoluminescent studies of failure line on double cantilever beam (DCB) and tapered-DCB (TDCB) test with similar and dissimilar material joints	International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019, 93, p40-46	有	2019/2/2 (Published on Web), 2019/9/1
14	寺崎 正	産業技術 総合研究 所	応力発光による“見える”接 着評価	日本接着学会誌,2019, 55(3), p120-126	有	2019/3/1
15	佐藤 正健、 田代 賢一、 川口 喜三、 大村 英樹、 秋山 陽久	産業技術 総合研究 所	Pre-bond surface inspection using laser-induced breakdown spectroscopy for the adhesive bonding of multiple materials	International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019, 93, p93-101	有	2019/2/18 (Published on Web)
16	H. Akiyama, T. Fukata, T. Sato, S. Horiuchi, C. Sato	産業技術 総合研究 所	Influence of surface contaminants on the adhesion strength of structural adhesives with aluminum	J. Adhesion, 96, 20220, 15, 1311	有	2019/4/8 (Published on Web)
17	A. Hayashi, Y. Sekiguchi, C. Sato	Tokyo Institute of Technology	AFM observation of sea-island structure formed by second generation acrylic adhesive	J. Adhesion, 2021, 97, 2, 155	有	2019/8/4 (Published on Web)
18	泉水 一紘 <sup>2</sup> , 樽井 大志 <sup>2</sup> 宮前 孝行 <sup>1</sup> , 佐藤 千明 <sup>1,3</sup>	<sup>1</sup> 産業技術 総合研究 所, <sup>2</sup> 日産 自動車, <sup>3</sup> 東工大	Evidence of chemical-bond formation at the interface between an epoxy polymer and an isocyanate primer	Chemical Communications, 2019, 55(98) p14833-14836	有	2019/12/6

19	北條恵司、島本一正、秋山陽久、佐藤千明	産業技術総合研究所	Dependence of fatigue limit on stress ratio and influence of cyclic stress on shear strength for an adhesive lap joint	J. Adhesion, 2021, 97, 12, 1153	有	2020/3/19 (Published on Web)
20	K. Shimamoto, S. Batorova, K. Houjou, H. Akiyama & C. Sato	産業技術総合研究所/東京工業大学	Accelerated test method for water resistance of adhesive joints by interfacial cutting of open-faced specimens	J. Adhesion, 2021, 97, 13, 1255	有	2020/4/8 (Published on Web)
21	木村和資	横浜ゴム株式会社	ポリウレタン系接着剤の基礎と進展	日本接着学会 学会誌 Vol.56 No.4 2020	有	2020/4/1
22	K. Shimamoto, S. Batorova, K. Houjou, H. Akiyama & C. Sato	産業技術総合研究所/東京工業大学	Degradation of Epoxy Adhesive containing Dicyandiamide and Carboxyl-Terminated Butadiene Acrylonitrile Rubber due to Water with Open-faced Specimens	J. Adhesion, 2021, 97, 15, 1388	有	2020/6/10 (Published on Web)
23	寺崎 正	産業技術総合研究所	応力発光可視化による評価、設計、予測の革新	成形加工, 32-6, pp.211-214	有	2020/6/15
24	K. Houjou, K. Shimamoto, H. Akiyama & C. Sato	産業技術総合研究所/東京工業大学	Experimental investigations on effect of a wide range of strain rates on mechanical properties of epoxy adhesives and prediction of creep and impact strengths	J. Adhesion, 2022, 98, 5, 449	有	2020/10/29 (Published on Web)
25	Lyu Lingyun, 大沼芳乃、重本友里、花田剛、深田環、秋山陽久、寺崎正、堀内伸	産業技術総合研究所	Toughness and Durability of Interfaces in Dissimilar Adhesive Joints of Aluminum and Carbon-Fiber Reinforced Thermoplastic	Langmuir, 2020, 36, 46, 14046	有	2020/11/11
26	Hsing-Ying Tsai, Yasuyuki Nakamura, Takehiro Fujita and Masanobu Naito	物質・材料研究機構	Strengthening epoxy adhesives at elevated temperatures based on dynamic disulfide bonds	Materials Advances, 2020, Issue 9, doi.org/10.1039/D0MA00714E	有	2020/11/21
27	叶 嘉星、遠山 暢之	産業技術総合研究所	Benchmarking deep learning models for automatic ultrasonic imaging inspection	IEEE Access, 9, 36986	有	2021/3/1
28	北條恵司、島本一正、秋山陽久、佐藤千明	産総研、東工大	Effect of cyclic moisture absorption/desorption on the strength of epoxy adhesive joints and moisture diffusion coefficient	The Journal of Adhesion, 2022, 98, 11	有	2021/5/21 (Published on Web)

29	H.-Y. Tsai, T. Fujita, S. Wang, M. Naito	National Institute for Materials Science	Environmentally friendly recycling system for epoxy resin with dynamic covalent bonding	Science and Technology of Advanced Materials, Vol. 22, 532-542	有	2021/7/16
30	北條 恵司、 島本 一正、 秋山陽久、佐 藤千明	産総研、 東工大	Effect of test temperature on the tensile and fatigue strengths of epoxy adhesive joints	Journal of adhesion, in press	有	2021/9/30 (Published on Web)
31	林明日香、関 口悠、佐藤千 明	東工大	Effect of temperature and loading rate on the mode I fracture energy of structural acrylic adhesives	Journal of Advanced Joining Processes, 5, 100079	有	2021/10/20

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	西野 孝	神戸大	日本学術振興会第167委 員会76回例会	高分子界面の複合評価 と接着	2015/4/22
2	西野 孝	神戸大	界面科学学術講演会	高分子表面はどこまで 顕になっているのか	2015/5/2
3	西野 孝	神戸大	第64回高分子学会年次大会	結晶性高分子表面・界 面の構造と物性	2015/5/28
4	Y. Nakanishi, C. Hongo, T. Nishino	神戸大	第64回 高分子学会年次大 会	Interfacial Structure and Adhesion between Isotactic Polypropylene Applying Primer and Cyanoacrylate	2015/5/29
5	西野 孝	神戸大	第50回 高分子の基礎と応 用講座	表面・界面・接着	2015/6/11
6	西野 孝, 中西佑太, 本郷千鶴	神戸大	第146回ポパール会	プライマー処理を施し たアイソタクチックポリ プロピレンの瞬間接着 剤に対する接着性と 界面構造	2015//7/4
7	清水陽介, 本郷千鶴, 西野 孝	神戸大	第61回高分子研究発表会 (神戸)	アイソタクチックポリ プロピレン/オレフィ ンエラストマー界面の 構造と接着	2015/7/17
8	西野 孝	神戸大	日本ゴム協会 第13回若手 からベテランのためのセミ ナー	高分子表面・界面の構 造・物性解析と接着	2015/8/27
9	遠山暢之	産総研	JASIS2015 コンファレンス	超音波を応用した計測 分析技術	2015/9/4
10	遠山暢之	産総研	新しい非破壊検査に関する 講習会	超音波を利用した CFRPの非破壊検査技 術の開発と適用事例	2015/9/30

11	西野 孝	神戸大学大学院工学研究科	日本接着学会関西支部 2015 年度第 2 回研究会	高分子の表面分析概論	2015/10/14
12	遠山暢之、山本哲也	産総研	日本非破壊検査協会平成 27 年度秋期講演大会	レーザー誘起超音波法による CFRP/金属接着面の欠陥検査	2015/10/15
13	T. Nishino	神戸大学大学院工学研究科	Pacificchem 2015	Structure and Adhesion of Crystalline Polymer Interfaces	2015/12/17
14	堀内 伸	産総研	第 3 回異種材料接合技術研究会	樹脂-金属接合界面特性評価方法の国際標準化と接合メカニズムの解析	2016/1/20
15	佐藤正健	産総研	産総研 中国センターシンポジウム	L I B S による被着体表面検査	2016/1/21
16	堀内 伸	産総研	高分子学会東海シンポジウム	電子顕微鏡による高分子異種界面の解析	2016/1/26
17	川口喜三、大村英樹、佐藤正健	産総研	平成 27 年度 材料・化学シンポジウム	L I B S による被着体表面検査	2016/2/5
18	堀内 伸	産総研	Adhesion Society Annual Meeting	Study on Interface and Adhesion between Aluminum and Plastics using Electron Microscopy	2016/2/22
19	川崎翔太、佐藤千明	東工大	第一回構造接着研究シンポジウム	ハネムーン接着による接着傾斜機能継手の実現	2016/2/29
20	宮原秀一、沖野晃俊	東工大	第一回構造接着研究シンポジウム	接着用の新しい大気圧プラズマ装置	2016/2/29
21	秋山陽久、堀内伸、佐藤千明	産総研	第一回構造接着研究シンポジウム	アルキルボランによる PP の表面グラフト	2016/2/29
22	三浦俊明、船田真紀、下位幸弘、森田裕史	産総研	第一回構造接着研究シンポジウム	PEO 分子の接着挙動における界面構造効果の分子動力学シミュレーション	2016/2/29
23	内藤昌信、藤井義久、山田悟史	物質材料研究機構	第一回構造接着研究シンポジウム	中性子反射率法を用いた接着剤中の水分評価	2016/2/29
24	川崎一則、伯川秀樹、堀内 伸	産総研	第一回構造接着研究シンポジウム	接着用表面前処理のレプリカ法による電子顕微鏡観察と評価	2016/2/29
25	堀内伸、伯川秀樹	産総研	第一回構造接着研究シンポジウム	電子顕微鏡による金属/接着剤界面の解析	2016/2/29
26	宮前孝行	産総研	第一回構造接着研究シンポジウム	各種分光法による接着界面の解析	2016/2/29
27	古川信之、市瀬英明、大塚瑞希、里見暢子、竹市 力	佐世保高専	第一回構造接着研究シンポジウム	オリゴマー型ベンゾオキサジンの反応条件検討および構造解析	2016/2/29

28	市瀬英明、古川信之、大塚瑞希、里見暢子、竹市 力	長崎県工業技術セ	第一回構造接着研究シンポジウム	オリゴマー型ベンゾオキサジンの熱機械的特性解析	2016/2/29
29	Nao Terasaki, Yuki Fujio, Masato Uehara, Tatsuo Tabaru	産総研	2016 Annual Meeting of Adhesive society	Direct visualization of stress distribution in adhesive through mechanoluminescence	2016/2/29
30	川口喜三、大村英樹、佐藤正健	産総研	第一回構造接着研究シンポジウム	L I B Sによる被着体表面検査	2016/2/29
31	遠山暢之、山本哲也	産総研	第一回構造接着研究シンポジウム	レーザー誘起超音波法による CFRP/金属接着面の欠陥検査	2016/2/29
32	山本哲也、遠山暢之	産総研	第一回構造接着研究シンポジウム	同種接合板における段差接合部を伝搬するレーザー誘起超音波の特性評価	2016/2/29
33	寺崎正、藤尾侑輝	産総研	第一回構造接着研究シンポジウム	接着応力分布の発光可視化	2016/2/29
34	田原竜夫、江藤正浩、寺崎正	産総研	第一回構造接着研究シンポジウム	接着強度試験中の AE 計測の試み	2016/2/29
35	上原雅人、藤尾侑輝	産総研	第一回構造接着研究シンポジウム	X 線位相法による金属接着面の非破壊検査の検討	2016/2/29
36	船橋正広、二宮扶実	産総研	第一回構造接着研究シンポジウム	超加速劣化評価法	2016/2/29
37	藤尾侑輝、寺崎正	産総研	第一回構造接着研究シンポジウム	応力発光センサの高感度化と内面欠陥検出法への応用	2016/2/29
38	寺崎正、藤尾侑輝	産総研	第 63 回応用物理学会春季学術講演会	接着状態の応力発光可視化に関する研究	2016/3/19
39	寺崎正、藤尾侑輝、上原雅人、田原竜夫	産総研	Joining in Car Body Engineering 2016	Direct visualization of mechanical stress in adhesive bonds and car body structures through mechanoluminescence	2016/4/19
40	堀内 伸、宮前 孝行、秋山 陽久、川崎 一則	産総研	第 65 回高分子年次大会	ポリプロピレンの接着表面処理効果のメカニズム解明	2016/5/25
41	秋山 陽久、田畑 敦子、堀内 伸、佐藤 千明	産総研	Asian Conference on Adhesion 2016	Trialkylborane-initiated graft polymerization of acrylate monomers onto a surface of a polypropylene plate	2016/6/17
42	堀内 伸、宮前 孝行、秋山 陽久、伯川 秀樹	産総研	第 54 回日本接着学会年次大会	電子顕微鏡による金属／接着剤界面の解析	2016/6/18
43	堀内 伸	産総研	第 90 回「接合・複合」分科会	樹脂—金属接合界面特性評価方法と接合メカニズムの解析	2016/6/22



44	堀内 伸	産総研	関西接着ワークショップ	樹脂-金属異種材料界面特性評価方法と接合メカニズムの解析	2016/7/25
45	西野 孝	神戸大学	フォトポリマー懇話会第 26 回フォトポリマー講習会	コーティングの表面・界面と接着	2016/9/8
46	川口 喜三、大村 英樹、佐藤 正健	産総研	第 77 回応用物理学会秋季学術講演会	LIBS による表面微量付着物の検出感度評価	2016/9/13
47	遠山 暢之、山本 哲也、津田 浩	産総研	第 41 回複合材料シンポジウム	レーザー走査超音波法による CFRP/金属接着研の欠陥検査	2016/9/15
48	堀内 伸、宮前 孝行、秋山 陽久、佐藤 千明	産総研	第 65 回高分子討論会	ポリプロピレンの接着表面処理メカニズムと界面階層構造	2016/9/15
49	Nao Terasaki, Y. Fujio, Y. Sakata, M. Uehara, T. Tabaru	AIST	PRiME 2016/230th ECS Meeting	Direct visualization of stress distribution related to adhesive through mechanoluminescence	2016/10/4
50	C. SATO	TIT/AIST	AIST&IFAM-Workshop on Joint R&D in Adhesive Bonding	Functionally graded joints for reducing thermal deformation	2016/10/25
51	N. Terasaki	AIST	AIST&IFAM-Workshop on Joint R&D in Adhesive Bonding	Visualization of strain distribution related to adhesive through mechanoluminescence	2016/10/25
52	T. Miyamae	AIST	AIST&IFAM-Workshop on Joint R&D in Adhesive Bonding	Analysis of the material surfaces and adhesive interfaces by sum-frequency generation spectroscopy	2016/10/25
53	S. Horiuchi	AIST	AIST&IFAM-Workshop on Joint R&D in Adhesive Bonding	Mechanism of polypropylene adhesion by surface treatments	2016/10/25
54	Y. Shimoi	AIST	AIST&IFAM-Workshop on Joint R&D in Adhesive Bonding	Molecular Dynamics Simulations Investigation of Adhesion Behaviors of Polymer-Metal Interfaces	2016/10/25
55	T. SATO	AIST	AIST&IFAM-Workshop on Joint R&D in Adhesive Bonding	Detection of trace substance adhered on surface by laser-induced breakdown spectroscopy	2016/10/25
56	堀内 伸	産総研	日本レオロジー学会 高分子加工技術討論会	金属-樹脂接合特性評価法の国際標準化と接合メカニズム解析	2016/10/31
57	堀内 伸	産総研	日本接着学会東北支部講演会	電子顕微鏡による接着メカニズム解析	2016/11/17

58	川口 喜三、大村 英樹、佐藤 正健	産総研	第4回 先端計測技術の応用展開に関するシンポジウム	LIBSによる被着体表面検査手法の研究開発	2016/12/8
59	佐藤 正健、川口 喜三、大村 英樹	産総研	レーザー学会第501回研究会「新レーザー技術」	LIBSによる微量表面付着物の検査 - 構造接着による製造現場での活用に向けて	2016/12/12
60	堀内 伸	産総研	先端機能材料 R&D コンソーシアム(FAMCO)講演会	樹脂-金属接合界面特性評価方法の国際標準化とメカニズム解析	2016/12/20
61	西野 孝	神戸大学	Global Research Efforts on Engineering and Nanomaterials (GREEN 2016)	Adhesion and Interphase of Polyolefins	2016/12/23
62	川口 喜三、大村 英樹、佐藤 正健	産総研	レーザー学会学術講演会第37回年次大会	LIBSによる表面微量物質の検出	2017/1/7
63	佐藤 千明	東工大/産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	異種材料の接着接合 - 熱応力・変形に対する対応 -	2017/1/20
64	遠山 暢之	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	レーザー超音波を利用した接着接合部の非破壊検査	2017/1/20
65	佐藤 正健	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	接着前表面の検査手法: LIBS法の適用性評価	2017/1/20
66	寺崎 正	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	応力発光による接着状態の可視化	2017/1/20
67	宮前 孝行	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	和周波発生分光による高分子改質表面、接着界面構造の解析	2017/1/20
68	森田 裕史	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	接着に関わる表面・界面における高分子鎖の構造とダイナミクス	2017/1/20
69	秋山 陽久	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	アルキルボラン含有接着剤によるポリプロピレン被着体表面反応	2017/1/20
70	堀内 伸	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	電子顕微鏡によるポリプロピレンの接着表面処理効果のメカニズム解析	2017/1/20
71	寺崎 正、藤尾 侑輝、坂田 義太郎	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	接着状態の応力発光可視化 - ウィーク・キッキングボド検出に道筋! -	2017/1/20
72	寺崎 正、藤尾 侑輝	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	CFRP 構造部材・破壊予兆の応力発光可視化	2017/1/20
73	田原 竜夫、江藤 正浩、寺崎 正	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	接着強度試験中の AE 計測の試み	2017/1/20
74	上原 雅人、藤尾 侑輝	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	X線位相法による金属接着面の非破壊検査の検討	2017/1/20

75	船橋 正弘、二宮 扶実	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	接着接合体の超加速劣化評価法	2017/1/20
76	杉原 直樹、根岸 晃彬、原賀 康介、関口 悠、佐藤 千明	東工大	第2回構造接着研究シンポジウム	接着合部の熱応力低減	2017/1/20
77	川崎 一則、伯川 秀樹、堀内 伸、秋山 陽久	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	樹脂表面に対して作製した白金レプリカ膜の透過電子顕微鏡観察から評価	2017/1/20
78	三浦俊 明、船田 真紀、下位 幸弘、森田裕史	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	金属高分子界面における接着挙動の力学シミュレーション	2017/1/20
79	堀内 伸、宮前 孝行、秋山 陽久、川崎 一則	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	電子顕微鏡によるポリプロピレン表面処理効果のメカニズム	2017/1/20
80	堀内 伸、伯川 秀樹、秋山 陽久	産総研	第2回構造接着研究シンポジウム	金属/高分子接着における表面処理とメカニズム	2017/1/20
81	松本 拓也、宮垣 晶、本郷 千鶴、西野 孝	神戸大学	第2回構造接着研究シンポジウム	芳香族求電子置換反応を用いたポリエーテルエーテルケトンの表面改質	2017/1/20
82	堀内 伸	産総研	機能性高分子材料研究会 平成28年度第4回研究会	接着の基礎と異種材料の最先端の接着・接合技術について	2017/2/9
83	堀内 伸	産総研	高分子分析研究懇談会第386回例会	電子顕微鏡による高分子界面の解析と接着メカニズム	2017/2/15
84	堀内 伸、佐藤 千明、川崎 一則、宮前 孝行、秋山 陽久	AIST	40 <sup>th</sup> Annual Meeting The Adhesion society	Mechanism of Surface Treatments for Polypropylene Adhesion Improvement Investigated by Electron Microscopy and Surface Spectroscopy	2017/3/1
85	寺崎 正、藤尾侑輝、坂田義太郎	AIST	40 <sup>th</sup> Annual Meeting The Adhesion society	Visualization of non-bonding area in adhesive through mechanoluminescence	2017/3/1
86	三浦 俊明、船田 真紀、下位 幸弘、森田 裕史	産総研	CSW2017	Molecular Dynamics Simulations of Adhesion Interface between Porous Metal and polymer	2017/3/7
87	堀内 伸	産総研	日本接着学会 接着界面科学研究会	異種材料（金属と樹脂）界面の構造解析及びメカニズムの解析	2017/3/7
88	川口 喜三、大村 英樹、佐藤 正健	産総研	第64回応用物理学会春季学術講演会	LIBSによるFe表面の微量付着物の検出	2017/3/14

89	寺崎 正、藤尾侑輝、坂田義太郎	産総研	第 64 回応用物理学会春季学術講演会	1 次構造 CFRP 部材に関する破壊予兆の応力発光可視化	2017/3/15
90	堀内 伸、宮前孝行、秋山陽久、川崎一則、佐藤千明	産業技術総合研究所	Mechanism of surface treatments for polypropylene adhesion improvement by electron microscopy and surface spectroscopy	ASC Adhesive & Sealant annual spring conference	2017/4/5
91	西野 孝	神戸大学	樹脂界面の接着と残留応力	第 151 回 ラドテック研究会講演会	2017/4/27
92	堀内 伸	産業技術総合研究所	高分子異種接着界面の解析と接着メカニズムに関する研究	第 295 回 新規事業研究会	2017/5/4
93	堀内 伸	産業技術総合研究所	金属-樹脂異種接合界面の特性評価とメカニズム	ナノ構造ポリマー研究協会講演会	2017/5/9
94	寺崎 正、藤尾侑輝	産業技術総合研究所	応力発光による接着状態の可視化とその応用	技術情報協会セミナー（招待講演）	2017/5/23
95	三浦俊明、船田真紀、下位幸弘、森田裕史	産業技術総合研究所	高分子ナノ界面における接着挙動の分子動力学シミュレーション	第 66 回高分子学会年次大会	2017/5/30
96	寺崎 正、藤尾侑輝	産業技術総合研究所	応力発光による接着状態の可視化とその応用	第 235 回ゴム技術シンポジウム（招待講演）	2017/6/12
97	寺崎 正、藤尾侑輝	産業技術総合研究所	応力発光による接着状態の可視化	東レリサーチセンター接着技術交流会（招待講演）	2017/6/13
98	堀内 伸	産業技術総合研究所	樹脂-金属異種接合体の界面特性評価と接合メカニズム	第 28 回プラスチック成形加工学会年次大会	2017/6/15
99	寺崎 正、藤尾侑輝	産業技術総合研究所	応力発光による破壊予兆の可視化と高度設計	17-1 高分子ナノテクノロジー研究会（招待講演）	2017/6/25
100	佐藤 正健、川口 喜三、秋山 陽久、大村 英樹	産業技術総合研究所	Detection of contaminants on pre-bond surface by LIBS	第 4 回構造接着に関する国際会議（AB2017）	2017/7/7
101	船橋正弘、二宮 扶実	産業技術総合研究所	Accelerated degradation of single lap joints using heat and moisture	第 4 回構造接着に関する国際会議（AB2017）	2017/7/7
102	寺崎 正、藤尾侑輝、堀内伸、秋山陽久	産業技術総合研究所	Mechanoluminescent visualization of crack propagation in DBC testing of dissimilar and similar bonding	第 4 回構造接着に関する国際会議（AB2017）	2017/7/7
103	堀内 伸 <sup>1</sup> 、伯川秀樹 <sup>1</sup> 、大沼芳乃 <sup>1</sup> 、板橋雅巳 <sup>2</sup> 、小倉正裕 <sup>2</sup> 、岡村昌浩 <sup>3</sup>	<sup>1</sup> 産業技術総合研究所、 <sup>2</sup> 大成プラス、 <sup>3</sup> JSOL	Characterization of bonding properties of dissimilar joints of carbon fiber reinforced thermoplastic (CFRTP) and metals	AB2017	2017/7/7
104	奥村 優香、松本 拓也、西野 孝	神戸大学	電子線を用いたアイソタクチックポリプロピレンの表面処理と接着性	第 63 回 高分子研究発表会（神戸）	2017/7/14

105	下浦 直樹, 松本 拓也, 西野 孝	神戸大学	重水素化ポリアミド 66 を用いた同種高分子界面の構造解析	第 63 回 高分子研究発表会 (神戸)	2017/7/14
106	堀内 伸	産業技術総合研究所	接着剤接合界面の特性評価と接合メカニズム	エポキシ樹脂協会第 4 1 回公開技術講座	2017/7/27
107	堀内 伸	産業技術総合研究所	電子顕微鏡による高分子界面の解析と接着メカニズムの解明	2017 電子顕微鏡解析技術フォーラム	2017/8/25
108	佐藤 正健、川口 喜三、大村 英樹	産業技術総合研究所	Surface Inspection using LIBS for Adhesive Bonding	2nd Asian Symposium on Laser Induced Breakdown Spectroscopy (ASLIBS2017)	2017/8/29
109	寺崎 正、藤尾侑輝	産業技術総合研究所	マルチマテリアル製造 M3 インテリジェンス	JASIS2017 (千葉、招待講演)	2017/9/6
110	佐藤 正健、川口 喜三、秋山 陽久、大村 英樹	産業技術総合研究所	表面微量付着物の LIBS 検出と接着強度変化	第 78 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/7
111	堀内 伸	産業技術総合研究所	電子顕微鏡による異種接合界面の解析と接着メカニズムの解析	第 7 8 回応用物理学会秋季学術講演会	2017/9/7
112	遠山 暢之	産業技術総合研究所	レーザー走査超音波可視化技術による構造接合部の非破壊検査	JASIS2017 コンファレンス	2017/9/8
113	奥村 優香, 松本 拓也, 西野 孝	神戸大学	電子線処理を施したアイソタクチックポリプロピレンの接着界面における物性評価	第 68 回 コロイドおよび界面化学討論会 (2017)	2017/9/8
114	堀内 伸	産業技術総合研究所	電子顕微鏡による接着界面の解析と接着メカニズム	九州大学先端物質化学研究所講演会	2017/9/8
115	堀内 伸	産業技術総合研究所	脂-金属、CFRP-金属接合の特性評価と接合メカニズム	名古屋工業技術協会第 2 回研究会	2017/9/13
116	佐藤 友哉, 宮前 孝行, 堀内 伸, 秋山 陽久	産業技術総合研究所	和周波発生分光によるプラズマ処理を施したポリプロピレンの表面構造観測	第 11 回分子科学討論会 2017 仙台	2017/9/15
117	堀内伸、秋山陽久、宮前孝行、佐藤千明	産業技術総合研究所	ポリプロピレンの接着表面処理とメカニズム解析	第 6 6 回高分子討論会	2017/9/21
118	PRUKSAWAN Sirawit, SAMITSU Sadaki, NAITO Masanobu	NIMS	Improvement of Adhesive Strength and Ductility of Epoxy Resin Modified with Polyrotaxane	Tsukuba Global Science Week 2017	2017/9/25
119	堀内 伸	産業技術総合研究所	電子顕微鏡による接着界面の解析と接着メカニズムに関する研究	第 3 7 6 回ゴム技術フォーラム	2017/10/3
120	PRUKSAWAN Sirawit, SAMITSU Sadaki, NAITO Masanobu	NIMS	Improvement of Adhesive Strength and Ductility of Epoxy Resin Modified with Polyrotaxane	NIMS WEEK 2017	2017/10/4

121	三浦 俊明、船田真紀、下位 幸弘、森田 裕史	産業技術総合研究所	Adhesion Behavior of Polymer-Metal Interfaces: A Molecular Dynamics Simulation Study	International Joint symposium of 3rd Innovative Measurement and Analysis for Structural Materials and TIA-Fraunhofer workshop	2017/10/5
122	堀内 伸	産業技術総合研究所	樹脂-金属 異種接合体の界面特性と接合メカニズム	第117回東海機能性材料研究会	2017/10/6
123	寺崎 正、藤尾侑輝、坂田義太郎	産業技術総合研究所	炭素繊維複合材料等の接着・接合技術と用途展開	石川県次世代産業育成講座・新技術セミナー（招待講演）	2017/10/16
124	宮前 孝行	産業技術総合研究所	表面処理をすると、高分子表面では何が起きているのか？	第7回CSJフェスタ	2017/10/18
125	佐藤 正健	産業技術総合研究所	LIBSによる接着前表面検査	第7回化学フェスタ2017	2017/10/18
126	寺崎正	産業技術総合研究所	マルチマテリアル戦略を拓く応力発光技術	第7回化学フェスタ2017	2017/10/18
127	寺崎正	産業技術総合研究所	マルチマテリアル戦略を拓く応力発光技術	応力発光コンソーシアムセミナー（招待講演）	2017/10/18
128	堀内 伸	産業技術総合研究所	異種接着界面での化学反応解析	第7回CSJ化学フェスタ	2017/10/18
129	佐藤 友哉、宮前 孝行、堀内 伸、秋山 陽久	産業技術総合研究所	Investigation of Plasma Treatment Effect for Polymer Surface by using Sum Frequency Generation Vibrational Spectroscopy	The 8th International Symposium on Surface Science (ISSS-8)	2017/10/24
130	堀内 伸	産業技術総合研究所	異材接合の接合メカニズムと評価方法	溶接接合工学振興会第28回セミナー	2017/10/25
131	三浦俊明、船田真紀、下位幸弘、森田裕史	産業技術総合研究所	界面接着挙動の分子シミュレーション	第7回CSF化学フェスタ2017	2017/10/28
132	堀内 伸 <sup>1</sup> 、伯川秀樹 <sup>1</sup> 、大沼芳乃 <sup>1</sup> 、板橋雅巳 <sup>2</sup> 、小倉正裕 <sup>2</sup> 、岡村昌浩 <sup>3</sup>	<sup>1</sup> 産業技術総合研究所、 <sup>2</sup> 大成プラス、 <sup>3</sup> JSOL	Characterization of Adhesive Bonding in Dissimilar Joints of CFRP and Metals	第12回中日高分子材料研究討論会	2017/11/22
133	佐藤 友哉、宮前 孝行、堀内 伸、秋山 陽久	産業技術総合研究所	和周波発生分光による N2 プラズマ照射に伴うポリプロピレン表面の分子構造変化の観測	第1回接着・接合研究シンポジウム	2018/2/1
134	宮前 孝行、多賀 康則	産業技術総合研究所、中部大学	表面改質したシクロオレフィンポリマーの表面構造及びガラスとの接合界面の解析	第1回接着・接合研究シンポジウム	2018/2/1
135	川口 喜三、佐藤 正健、大村 英樹	産業技術総合研究所	LIBSによる各種基材上汚染の接着前表面検査	第1回接着・接合研究シンポジウム	2018/2/1

136	佐藤 正健、川口 喜三、秋山 陽久、大村 英樹	産業技術総合研究所	LIBS による接着前表面検査－深さ分析、破断後試料の表面分析－	第1回接着・接合研究シンポジウム	2018/2/1
137	寺崎 正	産業技術総合研究所	応力発光材料の接着接合部強度評価への応用	第1回接着・接合研究シンポジウム	2018/2/1
138	遠山 暢之、山本 哲也	産業技術総合研究所	レーザー誘起超音波法による CFRP/金属接着面の欠陥検査	第1回接着・接合研究シンポジウム	2018/2/1
139	三浦俊明、船田真紀、下位幸弘、森田裕史	産業技術総合研究所	高分子金属ナノ構造における接着シミュレーション	第1回接着・接合研究シンポジウム	2018/2/1
140	船橋正弘、二宮 扶実	産業技術総合研究所	接着接合体の超加速劣化評価法	第1回接着・接合研究シンポジウム	2018/2/1
141	秋山陽久、下位幸広、田畑敦子、堀内伸、佐藤千明	産業技術総合研究所	ボラン系重合開始剤を用いたアクリル接着剤の PP への接着性	第1回接着・接合研究シンポジウム	2018/2/1
142	堀内伸、伯川秀樹	産業技術総合研究所	接着界面における化学反応の解析	第1回接着・接合研究シンポジウム	2018/2/1
143	堀内伸、大沼芳乃、伯川秀樹、寺崎直	産業技術総合研究所	CFRP/金属接合体の界面破壊靱性評価	第1回接着・接合研究シンポジウム	2018/2/1
144	佐藤 正健、川口 喜三、秋山 陽久、大村 英樹	産業技術総合研究所	LIBS による接着前表面検査	H29 年度材料・化学シンポジウム「機能性材料開発に寄り添う分析評価技術」	2018/2/2
145	堀内 伸	産業技術総合研究所	異種材料接合界面特性評価方法の国際標準化と接合メカニズム解明	SAT テクノロジーショーケース 2018	2018/2/8
146	佐藤 正健、川口 喜三、秋山 陽久、大村 英樹	産業技術総合研究所	LIBS による接着前表面検査	H29 年度産総研中国センターシンポジウム in 岡山	2018/2/22
147	佐藤 正健	産業技術総合研究所	レーザープロセスに基づいた材料表面汚染の迅速検査	電子材料研究会「先端電子材料とプロセスング」	2018/2/22
148	佐藤 友哉、宮前 孝行、堀内 伸、秋山 陽久	産業技術総合研究所	Surface Treatment Effects for Polypropylene surface studied by Sum-Frequency Generation vibrational Spectroscopy	6th World Congress on Adhesion and Related Phenomena	2018/2/25
149	船橋 正弘、二宮 扶実	産業技術総合研究所	Accelerated degradation of single lap joints and metal-plastics assemblies using a pressure vessel with heat and moisture	6th World Congress on Adhesion and Related Phenomena	2018/2/26
150	寺崎 正、藤尾侑輝、堀内伸、秋山陽久	産業技術総合研究所	Mechanoluminescent visualization: behavior of crack propagating and fracture frontline on DBC testing	6th World Congress on Adhesion and Related Phenomena	2018/2/26
151	堀内伸、秋山陽久	産業技術総合研究所	Mechanism of Surface Treatments for Adhesive Bonding of Aluminum Alloys	41th annual meeting and 6th WCARP	2018/2/28

152	秋山陽久、下位幸広、田畑敦子、堀内伸、佐藤千明	産業技術総合研究所	Adhesive bonding of polypropylene with alkylborane-containing adhesives	6th World Congress on Adhesion and Related Phenomena	2018/3/1
153	佐藤 友哉, 宮前 孝行, 堀内 伸, 秋山 陽久	産業技術総合研究所	Observation of Molecular Structure of Polypropylene/Liquid Interfaces by Sum-Frequency Generation Vibrational Spectroscopy	日本化学会第 98 春季年会(2018)	2018/3/20
154	寺崎 正、藤尾侑輝、坂田義太郎、堀内伸、秋山晴久	産業技術総合研究所	応力発光による「接着層の破壊靱性値評価」の高度化	応用物理学会春年会	2018/3/20
155	堀内 伸	産業技術総合研究所	CFRP・金属のみえる化	第 2 回トリリオン可視化研究会	2018/3/23
156	寺崎正、藤尾侑輝	産業技術総合研究所	応力発光材料を用いた応力分布の可視化技術	技術情報協会セミナー (招待講演)	2018/6/6
157	堀内 伸	産業技術総合研究所	STEM-EELS/EDX による高分子界面の解析	平成 3 0 年度接着・接合技術コンソーシアム第 2 回企業ワークショップ	2018/5/14
158	堀内 伸	産業技術総合研究所	接着メカニズムに関する研究の現状と課題	接着・接合分析技術セミナー	2018/6/4
159	堀内 伸	産業技術総合研究所	接着メカニズムに関する研究の現状と課題	接着・接合分析技術セミナー	2018/6/7
160	秋山 陽久、深田 環、佐藤 千明、堀内 伸、佐藤 正健	産業技術総合研究所	接着における汚染物質の影響	日本接着学会年次大会	2018/6/14
161	堀内 伸	産業技術総合研究所	CFRP/金属接合界面の破壊靱性	第 56 回接着学会年次大会	2018/6/15
162	寺崎正、藤尾侑輝	産業技術総合研究所	Society5.0 を目指す見える化技術 —応力発光を例として—	デジタルエンジニアリング講習会 (招待講演)	2018/7/13
163	寺崎正、藤尾侑輝	産業技術総合研究所	応力発光材料を用いた構造材料の可視化	東北大学 AD 講演会 (招待講演)	2018/7/30
164	林 明日香	東京工業大学	Impact deformation of adhesive layer measured with tensile split-hopkinsonbar apparatus	12th European Adhesion Conference (EURADH2018)	2018/9/4
165	秋山 陽久、佐藤 千明、堀内 伸、佐藤 正健、深田 環	産業技術総合研究所	Influence of contaminants on adhesive bonding	12th European Adhesion Conference and 4th Luso-Brazilian conference on Adhesion and Adhesives (EURADH/CLBA 2018)	2018/9/5



166	佐藤 友哉, 宮前 孝行, 堀内 伸, 秋山 陽久	産業技術総合研究所	Investigation of the surface treatment effects for polypropylene surface	12th European Adhesion Conference and 4th Luso-Brazilian conference on Adhesion and Adhesives (EURADH/CLBA 2018)	2018/9/6
167	Nao Terasaki, Y. Fujio, S. Horiuchi, H. Akiyama	産業技術総合研究所	Mechanoluminescence visualization of crack propagating and fracture frontline during DBC test in similar and dissimilar material bonding	EURADH/CLBA 2018 (欧州接着学会) (受賞)	2018/9/6
168	堀内 伸	産業技術総合研究所	STEM-EDX/EELS simultaneous analysis of metal/plastic joint interfaces for the investigation of adhesion mechanism	Eurad 2018	2018/9/6
169	船橋 正弘、二宮 扶実、島田 富夫	産業技術総合研究所	Accelerated degradation method for single-lap joints and metal-plastic assemblies using pressure vessels with heat and moisture	12th European Adhesion Conference and 4th Luso-Brazilian conference on Adhesion and Adhesives (EURADH/CLBA 2018)	2018/9/7
170	佐藤 正健、田代 賢一、川口 喜三、大村 英樹、秋山 陽久	産業技術総合研究所	Inspection of Surface Contamination Using LIBS for Adhesive Bonding of Multiple Materials	12th European Adhesion Conference and 4th Luso-Brazilian conference on Adhesion and Adhesives (EURADH/CLBA 2018)	2018/9/7
171	堀内 伸	つくば中央東分室 (産総研)	CFRP/金属接合界面の破壊靱性評価と可視化	第 67 回高分子討論会	2018/9/12
172	船橋 正弘、二宮 扶実 <sup>2</sup> 、島田 富夫	産業技術総合研究所	圧力容器を用いた接合体の加速劣化	第 79 回応用物理学会秋期学術講演会	2018/9/18
173	PRUKSAWAN Sirawit, SAMITSU Sadaki, NAITO Masanobu	NIMS	Homogeneously Dispersed Polyrotaxane in Epoxy Adhesive and Its Improvement in the Fracture Toughness	Tsukuba Global Science Week 2018	2018/9/20
174	寺崎正、藤尾侑輝、坂田義太郎	産業技術総合研究所	CAE 高度化を拓く応力発光 in 高知	3D3 高知県 CAE セミナー (招待講演)	2018/9/21
175	寺崎正、藤尾侑輝、坂田義太郎	産業技術総合研究所	接着評価の応力発光可視化	接着評価研セミナー (招待講演)	2018/10/3
176	堀内 伸	産業技術総合研究所	電子顕微鏡でみる接着界面の構造	8 <sup>th</sup> 化学フェスタ	2018/10/25

177	堀内 伸	産業技術総合研究所	高分子/金属接合界面の解析による接合メカニズムの解明	高分子表面研究会・接着と塗装研究会 合同研究会	2018/10/26
178	阿部愛美	横浜ゴム株式会社 ハマタイト・電材技術部 開発 2G	接着接合性能の可視化技術の開発	接着界面科学研究会第3回例会 10周年記念シンポジウム	2018/11/16
179	寺崎正、藤尾侑輝、坂田義太郎	産業技術総合研究所	CAE 高度化を拓く応力発光	愛知県 CAE セミナー (招待講演)	2018/12/3
180	佐藤 正健、田代 賢一、川口 喜三、大村 英樹、秋山 陽久	産業技術総合研究所	LIBS 法による接着前表面の迅速汚染検査	第2回接着・接合研究シンポジウム	2018/12/6
181	寺崎正	産業技術総合研究所	接着関連技術の海外動向調査報告	接着・接合 EXPO	2018/12/6
182	岡部貫	セメダイン(株)	接着・粘着技術の進化！～次世代社会に向けた開発と将来展望～	接着接合 EXPO	2018/12/5-7
183	堀内 伸	産業技術総合研究所	STEM-EELS analysis of metal-polymer adhesive joint interfaces	IPC2018	2018/12/7
184	寺崎正、藤尾侑輝、坂田義太郎	産業技術総合研究所	構造材料の CAE 高度化を拓く応力発光	ふくい構造材料セミナー (招待講演)	2018/12/16
185	遠山 暢之	産業技術総合研究所	パルスレーザー走査法による構造部材の超音波検査	サステナブル技術連携促進シンポジウム	2018/12/17
186	寺崎正、藤尾侑輝	産業技術総合研究所	マルチマテリアル戦略：応力発光による“見える”接着評価	軽金属学会 (招待講演)	2019/1/30
187	Nao Terasaki, Y. Fujio, Y. Sakata, S. Horiuchi, H. Akiyama, M Abe, Y Matsuki, H Matuda	産業技術総合研究所, 横浜ゴム	Evaluation of adhesive joining design based of mechanoluminescence visualization	アメリカ接着学会	2019/2/18
188	堀内 伸	産業技術総合研究所	Effect of aluminum surface treatment on CFRP/aluminum adhesive joint properties	42th Adhesion Society Annual Meeting	2019/2/19
189	船橋 正弘、二宮 扶実、島田 富夫	産業技術総合研究所	Accelerated degradation of single lap joints and metal-plastics assemblies using a pressure vessel with heat and moisture	第42回米国接着学会年次会議	2019/2/20
190	堀内 伸	産業技術総合研究所	Hierarchical Structures in Polypropylene Adhesive Joint Interphase Characterized by Electron Microscopy	2019 Special Lecture Series (Akron Univ.)	2019/2/22
191	堀内 伸	産業技術総合研究所	異種材接合の特性評価と接合メカニズム	産総研イノベーションシーズ講演会	2019/3/1

192	Nao Terasaki, and Yuki Fujio	産業技術総合研究所	Smart visualization of potent and process of destruction in multi-material and light weighting concept using mechanoluminescent functional material	5th Annual World Congress of Smart Materials-2019 (WCSM-2019) (招待講演)	2019/3/4
193	佐藤 正健、田代 賢一、川口 喜三、大村 英樹、秋山 陽久	産業技術総合研究所	CFRP 付着シリコンオイルの LIBS 法による検出	第 66 回応用物理学会 春季学術講演会	2019/3/9
194	Nao Terasak, Y. Fujio <sup>1</sup>	産業技術総合研究所	Smart visualization of mechanical situation in adhesive joining using mechanoluminescence for multi-material concept	Joining in Car Body Engineering2019 【invited】	2019/4/11
195	岡部 貫	セメダイン(株)	進化する接着剤とこれからの展望	接着接合 EXP	2019/5/23
196	寺崎 正	産業技術総合研究所	応力発光による接着の可視化 スマートな可視化が拓く評価・設計・予測の革新	プラスチック成形加工学会【基調講演】	2019/6/11
197	船橋 正弘、二宮 扶実、島田 富夫	産業技術総合研究所	圧力容器を用いた水蒸気雰囲気下の接合体の加速劣化法 <sup>e</sup>	第 57 回日本接着学会 年次大会	2019/6/20
198	Nao Terasaki, Yuki Fujio, Yoshitaro Sakata	産業技術総合研究所	Visualization of dis-bonding at interface using mechanoluminescent functional particles	9th International Colloids Conference 2019 【注目講演に選出】	2019/6/23
199	遠山 暢之	産業技術総合研究所	超音波が伝わる様子を可視化して欠陥を検出	プラクティカル材料診断フェア	2019/7/2
200	佐藤正健	産業技術総合研究所	レーザー元素分析による迅速表面検査	材料診断フェア in 広島 ～ 樹脂系材料の変革期に応える企業支援ネットワーク	2019/7/2
201	Satoshi MATSUDA, Ryuta NISHIWAKI and Hajime KISHI	University of Hyogo	Adhesion strength of epoxy resin under hot wet environment	Adhesion '19	2019/9/3
202	Hajime Kishi, Koji Kishi, Yudai Nagato, Satoshi Matsuda	University of Hyogo	Structural adhesives with sacrifice particles to lead cohesive failure	Adhesion '19	2020/9/3
203	佐藤正健	産業技術総合研究所	レーザーアブレーションを活用した先端電子材料の検査技術	電気学会 電子・情報・システム部門大会	2019/9/4
204	船橋 正弘、二宮 扶実 <sup>2</sup> 、島田 富夫	産業技術総合研究所	Accelerated degradation test method for single-lap joints and metal-plastic assemblies using pressure vessels with heat and moisture	Adhesion 2019 (欧州 押収接着学会)	2019/9/4

205	秋山 陽久, 深田 環, 伊勢 翔吾, 宮前 孝行	産業技術総 合研究所	Surface treatment and adhesion strength of carbon fiber reinforced thermoplastic resin	Adhesion19	2019/9/6
206	木村和資	横浜ゴム株 式会社	高強度・高弾性ウレタン系 接着剤	日本接着学会中部支部 設立40周年記念講演 会	2019/9/6
207	三浦俊明、船田真 紀、下位幸弘、森田 裕史	産業技術 総合研究所	異種接合界面における接着 挙動の架橋構造効果の分子 シミュレーション	日本物理学会 2019 年 秋季大会	2019/9/12
208	木村和資	横浜ゴム株 式会社	バナナカーブを超える高弾 性、高強度ウレタン系接着 剤の特徴と応用展開—構造 接着で世界をねらう—	東海機能材料研究会講 演	2019/9/13
209	船橋 正弘、二宮 扶 実、島田 富夫、秋 山 陽久、深田 環	産業技術 総合研究所	Accelerated degradation test method for single-lap joints and metal-plastic assemblies using pressure vessels with heat and moisture	1st International Conference on Advanced Joining Processes (AJP 2019)	2019/10/25
210	秋山 陽久	産業技術総 合研究所	構造材料用接着技術の開発 輸送機器の軽量化に向けた 構造材料用の接着技術の現 状と課題	第11回産総研軽量構 造材料シンポジウム	2019/10/31
211	佐藤正健、田代賢 一、川口喜三、大村 英樹、秋山陽久	産業技術総 合研究所	CFRP 付着シリコンオイル の LIBS 法による検出	第3回接着・接合研究 瞬歩ジウム	2019/12/2
212	秋山陽久、深田環	産業技術総 合研究所	第3回接着・接合研究シン ポジウム	第3回接着・接合研究 シンポジウム	2019/12/2
213	天知 秀介	セメダイン (株)	セメダイン接着技術とこれ からの展望	接着接合 EXP	2019/12/5
214	木村和資	横浜ゴム株 式会社	「高機能ウレタン系接着剤 の開発」	東海地域3県1市合同 講演会	2020/2/21
215	船橋 正弘、秋山 陽 久	産業技術総 合研究所	Accelerated degradation test method for single-lap joints and metal-plastic assemblies using pressure vessels with heat and moisture	第43回米国接着学会 年次会議	2020/2/25
216	秋山 陽久	産業技術総 合研究所	被着体の表面処理と汚染の 影響	トリリオンGセミナー	2020/3/27
217	橋向秀治、矢野慎吾、 時田遊	セメダイン (株)	Development of structural adhesive for multi-material using Silyl Terminated Polyether (STP) Adhesive	IAA2020	2020/3/4-5
218	堀内 伸	産業技術総 合研究所	接着接合界面マルチスケ ール解析による接着メカニ ズムの解明	日本顕微鏡学会第76 回学術講演会	2020/5/19
219	堀内 伸	産業技術総 合研究所	電子顕微鏡による接着界面 解析と接着メカニズムの解 明	第56回接着学会年次 大会	2020/6/19

220	堀内 伸	産業技術総合研究所	アルミ-CFRP 接着接合界面の破壊靱性と耐水性	第56回接着学会年次大会	2020/6/19
221	松本拓也、奥村優香、西野 孝	神戸大学大学院工学研究科	電子線照射による表面処理ポリプロピレンの接着性および構造変化	第69回高分子討論会	2020/9/16
222	寺崎 正、藤尾 侑輝	産業技術総合研究所	応力発光 見えるが拓く評価・設計・予測の革新	FIoT コンソ第1回応力発光分科会（招待講演）	2020/9/25
223	寺崎 正、藤尾 侑輝	産業技術総合研究所	応力発光と接着不良	接着・接合技術コンソーシアム 非破壊WG（招待講演）	2020/10/23
224	寺崎 正、藤尾 侑輝	産業技術総合研究所	塗布型応力発光センサによる構造物の機械的挙動・設計・予測の見える化	日本溶射学会2020年秋季講演大会（招待講演）	2020/10/27
225	寺崎 正、藤尾 侑輝	産業技術総合研究所、	応力発光ビジュアルセンシング：機械的挙動“見える化”が拓く評価・設計・予測の革新	ヤマハ発動機技術セミナー（招待講演）	2020/10/29
226	寺崎 正、藤尾 侑輝	産業技術総合研究所	応力発光 DCB 試験、ENF 試験	接着・接合技術コンソーシアム 第1回標準化ワーキンググループ（招待講演）	2020/11/5
227	寺崎 正	産業技術総合研究所	構造接着の海外動向と応力発光	第四回接着・接合研究シンポジウム（招待講演）	2020/11/6
228	寺崎 正、藤尾 侑輝	産業技術総合研究所	応力発光ビジュアルセンシング：機械的挙動の見える化によるプラスチック成形加工の評価、設計、予測の革新	成型プラスチック歯車第141回研究会（招待講演）	2020/12/11
229	橋向秀治	セメダイン	自動車で使用されている接着剤の特徴とマルチマテリアル対応の取り組み	いばらき成長産業振興協会次世代自動車研究会	2020/12/16
230	寺崎 正、藤尾 侑輝	産業技術総合研究所	機械的挙動の見える化によるプラスチック成形加工の評価、設計、予測の革新	プラスチック成形加工学会東海支部（招待講演）	2021/1/26
231	秋山陽久	産業技術総合研究所	被着体の表面処理と汚染の影響	接着評価技術研究会	2021/3/2
232	寺崎 正、藤尾 侑輝	産業技術総合研究所	Mechanoluminescence toward progress of simulation	Mini-International workshop Joining Germany & Japan（招待講演）	2021/3/5
233	秋山 陽久	産業技術総合研究所	Effects of water and contamination on adhesive bonding	Mini-International workshop Joining Germany & Japan（招待講演）	2021/3/5

234	堀内 伸	産業技術総合研究所	3D analysis of joint interfaces by STEM-tomography	Mini-International workshop Joining Germany & Japan (招待講演)	2021/3/5
235	三浦俊明、船田真紀、下位幸弘、森田裕史	産業技術総合研究所	金属・エポキシ樹脂界面における接着挙動の分子シミュレーション	日本物理学会第76回年次大会	2021/3/12
236	堀内伸、劉一建、秋山陽久、赤池幸紀	産業技術総合研究所	STEM-EELS によるアルミ-高分子界面相互作用の解析	高分子年次大開	2021/5/28
237	中野晋也、犬伏洋之助、松田聡、岸肇	兵庫県立大学大学院	エポキシ接着継手の疲労き裂伝ば特性に及ぼす犠牲粒子の効果	日本接着学会第59回年次大会	2021/6/1
238	橋向秀治	古河分室 (セメダイン)	「自動車で使用されている接着剤の特徴とマルチマテリアル化対応の取り組み」	技術情報協会	2021/7/6
239	木村和資	横浜ゴム株式会社	高強度ウレタン系接着剤の開発	技術情報協会	2021/7/6
240	寺崎 正	産業技術総合研究所	次世代モビリティ軽量化を拓く“接着関連技術”-海外動向と国内研究-	人と技術の会令和3年度第1回講演会,	2021/7/8
241	寺崎正、藤尾侑輝、島本一正、秋山陽久	産業技術総合研究所	Mechanoluminescent study of single lap joint with various adhesive thickness	6th International Conference on Structural Adhesive Bonding 2021	2021/7/9
242	寺崎正	産業技術総合研究所	応力発光による接着状態の可視化とその応用、接着接合部における応力発生メカニズム、その管理、その評価	技術情報協会	2021/8/20
243	堀内伸、劉一建、秋山陽久、赤池幸紀	産業技術総合研究所	「STEM-EELS によるアルミニウム/エポキシ接着メカニズムの解析」	高分子討論会	2021/9/6
244	寺崎 正、藤尾 侑輝,	産業技術総合研究所	応力発光による界面強度・機械的挙動の可視化	第70回高分子討論会	2021/9/6
245	矢野 慎吾、橋向秀治	古河分室 (セメダイン)	「エポキシ樹脂/変成シリコーン樹脂ハイブリッド型マルチマテリアル用構造接着剤」	高分子討論会	2021/9/7
246	三浦俊明、船田真紀、下位幸弘、森田裕史	産業技術総合研究所	金属・エポキシ樹脂接着界面における伸長・剥離挙動の分子動力学シミュレーション	第70回高分子討論会	2021/9/7
247	木村和資	横浜ゴム株式会社	弾性接着剤	日本ゴム協会関西支部サタデーセミナー	2021/10/2
248	秋山陽久	産業技術総合研究所	構造材料用の接着技術	CSJ 化学フェスタ 2021	2021/10/20
249	松木裕一、木村和資	シーカ・ハマタイト株式会社	車両のマルチマテリアル化に対応した接着剤の適用事例	先端材料技術展 (SAMPE JAPAN) 2021	2021/12/2

250	秋山陽久	産業技術総合研究所	構造用接着剤の最新の研究開発状況	第5回接着・接合EXPO	2021/12/8
251	堀内 伸、秋山 陽久、寺崎 正、板橋 雅巳	産業技術総合研究所	Interfacial fracture toughness evaluation of adhesive dissimilar bonding of aluminum and carbon fiber reinforced thermoplastic composite (CFRTP)	1st Virtual ESIS TC4 Conference on Fracture of Polymers, Composites and Adhesives	2021/12/20
252	寺崎 正、藤尾 侑輝、坂田 義太郎	産業技術総合研究所	Visualization of dis-bonding at interface using mechanoluminescent functional particles	The 2021 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies	2021/12/20
253	下位幸弘、三浦俊明	産業技術総合研究所	DFT Estimations of Partial Atomic Charges for Metal Oxides: Bulks, Surfaces, and Clusters	The 22nd International Vacuum Congress (IVC-22)	2022/9/12

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	産業技術総合研究所	接着・界面ラボ設立 記念シンポジウムを開催 国内接着研究拠点をめざす	接着剤新聞	2016/3/10
2	産業技術総合研究所	「第一回構造接着研究シンポジウム」を開催	産総研 WEEKLY_No72	2016/3/11
3	産業技術総合研究所	接着技術の国際連携を目指して	産総研 WEEKLY_No101	2016/11/18
4	産業技術総合研究所	電子顕微鏡による接着界面の解析	表面・界面技術ハンドブック	2016/11/25
5	産業技術総合研究所	接着・界面現象研究ラボ シンポジウムを開催、産学官の成果報告 国内接着研究拠点をめざす	接着剤新聞	2017/2/20
6	産業技術総合研究所	「第二回構造接着研究シンポジウム」を開催	産総研 WEEKLY_No111	2017/2/24
7	産業技術総合研究所	応力発光材料を用いた高分子応力分布の可視化技術	高分子の残留応力対策	2017/2/28
8	産業技術総合研究所	海外視察報告 VOL. 1 ～CFRP/接着による自動車 i3/8 のルーツを視察～	接着接合技術コンソーシアムニュースレター (2018、Vo11)	2018/4/20
9	産業技術総合研究所	海外視察報告 VOL. 2 ～CFRP/接着による自動車 i3/8 のルーツを視察～	接着接合技術コンソーシアムニュースレター (2018、Vo12)	2018/8/2
10	産業技術総合研究所	レーザープロセスに基づいた材料表面汚染の迅速検査	電子材料研究会資料 「先端電子材料とプロセスング」	2018/3/28
11	東京工業大学	「接合革命」日本の逆襲	日経 X T E C H	2018/11/21

12	セメダイン(株)	異種材料のクルマもスーパーハイテ ンのクルマも軽くする構造用接着剤 セメダインの変性シリコーン系接着 剤とエポキシ系接着剤 「構造材 料用接着技術の開発」への参画	日経 XTECH WEB	2018/12/5
13	東京工業大学/セメダ イン(株)/横浜ゴム/ナガ セケムテックス	次世代接着剤の活用で「接合革命」 を勝ち抜け	日経 ものづくり 3 月号	2019/3/1
14	セメダイン(株)	変成シリコーン樹脂系構造用接着剤 による異種材接着	ポリマーTECH	2019/7/19
15	横浜ゴム株式会社	ポリウレタン系接着剤の技術動向	接着剤新聞	2020/1/10
16	東京工業大学	続・接合革命 接着の「見える化」 で始まる軽量化 2.0 — Part1 キーパー ソン直撃	日経 XTECH	2020/1/20
17	産業技術総合研究所	続・接合革命 接着の「見える化」 で始まる軽量化 2.0 — Part2 最先端 の分析技術, PP も異材接合も接合原 理を解明、接着界面はここまで見え る 電子顕微鏡の観察レベル	日経 XTECH	2020/1/23
18	産業技術総合研究所	続・接合革命 接着の「見える化」 で始まる軽量化 2.0 — Part2 最先端 の分析技術, 見たくても見えなかつ た「界面」の分子を知る 和周波発 生分光	日経 XTECH	2020/1/24
19	産業技術総合研究所	続・接合革命 接着の「見える化」 で始まる軽量化 2.0 — Part2 最先端 の分析技術, 「力」が光で分かる応 力発光、接着評価も設計も予測も変 える新技術	日経 XTECH	2020/1/27
20	産業技術総合研究所	続・接合革命 接着の「見える化」 で始まる軽量化 2.0 — Part2 最先端 の分析技術, 接着前の材料表面状態 を確認、ゲンバで全数検査の実現を 狙う	日経 XTECH	2020/1/28
21	産業技術総合研究所	続・接合革命 接着の「見える化」 で始まる軽量化 2.0 — Part2 最先端 の分析技術	日経 XTECH	2020/1/29
22	セメダイン(株)	軽量化の正体 CHAPTER03 CASE1 構造接着剤で要所を固める	Motor Fan illustrated	2020/3/14
23	横浜ゴム株式会社	自動車用途のポリウレタン系接着剤	工業材料 Vol.68, No.6	2020/6/15
24	横浜ゴム株式会社	自動車のマルチマテリアル化(異種 部材接合)に向けた高強度ウレタン 系接着剤	月刊誌「車載テクノロ ジー」2020年8月号 P.29-P.33、 技術情報協会	2020/8/1



### (c)プレス発表

番号	所属	タイトル	発表形式	発表年月
1	セメダイン(株)	輸送機器の抜本的な軽量化を目指した「構造材料用接着技術の開発」への参画	セメダイン(株)HP	2017/5/15
2	産業技術総合研究所	「光」と「音」で挑む予防工学最前線	講談社ブルーバック ス、産総研のHPとの 同時掲載	2018/3/8

### (d)その他

番号	所属・著者等	タイトル	形式、媒体等	発表年月
1	木村和資・シーカ・ハ マタイト株式会社	自動車のマルチマテリアル化に向けた高強度ウレタン系接着剤	技術情報協会書籍：自 動車軽量化に向けた樹 脂・樹脂複合材料の開 発	2022/2/22

### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	産業技術総合研究所	接着・接合 EXPO	ブース展示	2017/4/4-7
2	産業技術総合研究所	接着・接合 EXPO	ブース展示	2018/12/5-7
3	セメダイン(株)	接着・接合 EXPO	ブース展示	2018.12.5-7
	セメダイン(株)	接着・接合 EXPO	ブース展示 発表	2019/5/22-24
5	セメダイン(株)	接着・接合 EXPO	ブース展示 発表	2019/12/4-6
6	産業技術総合研究所、 セメダイン(株)、NIMS、 横浜ゴム(株)、ナガセケ ムテックス、東工大	Nano tech 2020	ブース展示 発表	2020/1/29-31

### 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	神戸大学大学院工学研 究科・西野 孝	結晶性高分子固体表面・界面の構造 と物性	平成 26 年度高分子学会 賞	2015/5/28
2	神戸大学大学院工学研 究科・清水陽介, 本郷 千鶴, 西野 孝	エチレン-オクテン共重合体を用いた アイソタクチックポリプロピレン接 着界面の構造および接着性の評価	第 16 回高分子表面研究 討論会, 優秀ポスター 賞	2015/11/18
3	産業技術総合研究所・ 堀内 伸	Study on Interface and Adhesion between Aluminum and Plastics using Electron Microscopy	Best Poster Award (2016 Adhesion Society Annual Meeting)	2016/2/22

4	産業技術総合研究所・寺崎 正、藤尾侑輝、坂田義太郎	1次構造 CFRP 部材に関する破壊予兆の応力発光可視化	第 64 回応用物理学会春季学術講演会ポスター賞	2017/3/15
5	産業技術総合研究所・寺崎 正	Mechanoluminescence visualization of crack propagating and fracture frontline during DBC test in similar and dissimilar material bonding.	EURADH 2018 and CLBA 2018 Best presentation award	2018/9/8
6	NIMS・内藤昌信	生物を規範とした接着・コーティング材料の開発	理事長賞研究奨励賞	2020/4/1
7	産業技術総合研究所・堀内伸	電子顕微鏡による接着界面解析と接着メカニズム解明	日本接着学会学術賞	2020/6/18
8	産業技術総合研究所・寺崎 正	応力発光による“見える”高分子材料・構造物評価	高分子学会パブリシティ賞	2020/9/15
9	NIMS・内藤昌信	生物を規範にした接着・コーティング材料の実用化研究	つくば奨励賞	2021/3/11
10	産業技術総合研究所・秋山陽久、佐藤千明、堀内伸、田嶋一樹、寺崎正、島本一正、藤尾侑輝、赤池幸紀、伊藤祥太郎、下位幸弘、三浦俊明、森田裕史、遠山暢之、永井英幹、佐藤正健、島田悟	接着接合に関する評価技術開発、国際標準化、橋渡しの一体的推進	理事長賞(研究部門)	2021/3/31
11	産業技術総合研究所・島本一正	接着剤の耐久性評価	日本接着学会奨励賞	2022/6/23

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	産業技術総合研究所	第 1 回構造接着研究シンポジウム	パネル、講演	2016/2/29
2	産業技術総合研究所	第 2 回構造接着研究シンポジウム	パネル、講演	2017/1/20
3	産業技術総合研究所, セメダイン(株), 東工大	革新的新構造材料等研究開発「平成 29 年度成果報告会」	パネル	2018/1/26
4	産業技術総合研究所	第 1 回接着・接合技術シンポジウム	ポスター、講演	2018/2/1
5	産業技術総合研究所	第 2 回接着・接合研究シンポジウム	ポスター、講演	2018/12/6
6	産業技術総合研究所, セメダイン(株), NIMS, 東工大	革新的新構造材料等研究開発「平成 30 年度成果報告会」	パネル	2019/1/21
7	産業技術総合研究所	第 3 回接着・接合研究シンポジウム	ポスター、講演	2019/12/2
8	東工大	革新的新構造材料等研究開発「2019 年度成果報告会」	(ポスター、発表)	2020/2/28 (中止)
9	産業技術総合研究所, セメダイン(株), NIMS, 東工大	革新的新構造材料等研究開発「2020 年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2021/7/1

10	産業技術総合研究所, セメダイン(株), NIMS, 東 工大	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/1/28
----	---------------------------------------	--------------------------------	-----------	-----------

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号46] 摩擦接合共通基盤研究 (2016~2022年度)

表 添-2.11-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2016FY	3	0	0	0	2	13	2	0	1	0	4	1
2017FY	0	0	3	1	1	20	1	0	1	1	5	2
2018FY	4	0	0	10	5	49	0	0	0	1	3	1
2019FY	3	4	4	16	2	54	10	0	0	0	5	1
2020FY	0	3	3	13	0	16	5	0	2	0	4	1
2021FY	0	5	0	15	1	27	3	0	2	1	7	2
2022FY	0	1	0	12	0	21	1	0	1	1	1	2
合計	10	13	10	67	11	200	22	0	7	4	29	10

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT ※	出願日	状態	名 称	発明者
1	国立大学法人 大阪大学 新日鐵住金 (株)	特願 2017-017995	国内	2017/2/2	登録	線形摩擦接合方法及び線 形摩擦接合装置	藤井 英俊他
2	国立大学法人 大阪大学 新日鐵住金 (株)	特願 2017-017997	国内	2017/2/2	登録	線形摩擦接合方法	藤井 英俊他
3	国立大学法人 大阪大学 新日鐵住金 (株)	特願 2017-017996	国内	2017/2/2	登録	線形摩擦接合方法	藤井 英俊他
4	国立大学法人 大阪大学	PCT/JP2018/003390	PCT	2018/2/1	公開	線形摩擦接合方法及び線 形摩擦接合装置	藤井 英俊他
5	国立大学法人 大阪大学	PCT/JP2018/003391	PCT	2018/2/1	公開	線形摩擦接合方法	藤井 英俊他

6	国立大学法人 大阪大学	PCT/JP2018/003392	PCT	2018/2/1	各国 移行 ・登 録	線形摩擦接合方法	藤井 英俊他
7	国立大学法人 大阪大学	特願 2018-108249	国内	2018/6/6	出願	摩擦攪拌接合用ツール及 び摩擦攪拌接合方法	藤井 英俊他
8	国立大学法人 大阪大学	特願 2019-030186	国内	2019/2/22	出願	線形摩擦接合用固定冶具	藤井 英俊他
9	国立大学法人 大阪大学	特願 2019-044619	国内	2019/3/12	出願	固相接合用耐候性鋼、固 相接合用耐候性鋼材、固 相接合構造物及び固相接 合方法	藤井 英俊他
10	国立大学法人 大阪大学	特願 2019-044618	国内	2019/3/12	出願	固相接合用鋼、固相接合 用鋼材、固相接合継手及 び固相接合構造物	藤井 英俊他
11	国立大学法人 大阪大学 学校法人 近畿大学	PCT/JP2019/021018	PCT	2019/5/28	各国 移行	摩擦攪拌接合用ツール及 び摩擦攪拌接合方法	藤井 英俊他
12	国立大学法人 大阪大学	18747104	欧州	2019/7/16	公開	線形摩擦接合方法	藤井 英俊他
13	国立大学法人 大阪大学	16/479,043	米国	2019/7/18	登録	線形摩擦接合方法	藤井 英俊他
14	国立大学法人 大阪大学	201880010054.2	中国	201908/2	公開	線形摩擦接合方法	藤井 英俊他
15	国立大学法人 大阪大学	特願 2019-144978	国内	2019/8/7	出願	異材固相接合方法及び異 材固相接合構造物	藤井 英俊他
16	国立大学法人 大阪大学	特願 2019-144986	国内	2019/8/7	公開	固相接合用鋼、固相接合 用鋼材、固相接合継手及 び固相接合構造物	藤井 英俊他
17	国立大学法人 大阪大学	10-2019-7025425	韓国	2019/8/29	登録	線形摩擦接合方法	藤井 英俊他
18	国立大学法人 大阪大学	特願 2019-204361	国内	2019/11/12	出願	異材固相接合方法、異材 固相接合構造物及び異材 固相接合装置	藤井 英俊他
19	国立大学法人 大阪大学	PCT/JP2020/003710	PCT	2020/1/31	公開	線形摩擦接合用固定冶具 及び線形摩擦接合方法	藤井 英俊他
20	国立大学法人 大阪大学	PCT/JP2020/006683	PCT	2020/2/20	公開	固相接合用鋼、固相接合 用鋼材、固相接合継手及 び固相接合構造物	藤井 英俊他

21	国立大学法人 大阪大学	PCT/JP2020/006684	PCT	2020/2/20	公開	固相接合用耐候性鋼、固相接合用耐候性鋼材、固相接合構造物及び固相接合方法	藤井 英俊他
22	国立大学法人 大阪大学	PCT/JP2020/026796	PCT	2020/7/9	公開	異材固相接合方法及び異材固相接合構造物	藤井 英俊他
23	国立大学法人 大阪大学	PCT/JP2020/040395	PCT	2020/10/28	公開	異材固相接合方法、異材固相接合構造物及び異材固相接合装置	藤井 英俊他
24	国立大学法人 大阪大学	15/734,338	米国	2020/12/2	公開	摩擦攪拌接合用ツール及び摩擦攪拌接合方法	藤井 英俊他
25	国立大学法人 大阪大学	19814304.2	欧州	2020/12/4	公開	摩擦攪拌接合用ツール及び摩擦攪拌接合方法	藤井 英俊他
26	国立大学法人 大阪大学	201980037370.3	中国	2020/12/7	公開	摩擦攪拌接合用ツール及び摩擦攪拌接合方法	藤井 英俊他
27	国立大学法人 大阪大学	PCT/JP2021/010577	PCT	2021/3/16	公開	固相接合用鋼、固相接合用鋼材、固相接合継手及び固相接合構造物	藤井 英俊他
28	国立大学法人 大阪大学	17/435,875	米国	2021/9/2	公開	固相接合用耐候性鋼、固相接合用耐候性鋼材、固相接合構造物及び固相接合方法	藤井 英俊他
29	国立大学法人 大阪大学	202080020607	中国	2021/9/10	公開	固相接合用耐候性鋼、固相接合用耐候性鋼材、固相接合構造物及び固相接合方法	藤井 英俊他
30	国立大学法人 大阪大学	17/632,714	米国	2022/2/3	公開	異材固相接合方法及び異材固相接合構造物	藤井 英俊他
31	国立大学法人 大阪大学	20849258.7	欧州	2022/2/4	公開	異材固相接合方法及び異材固相接合構造物	藤井 英俊他
32	国立大学法人 大阪大学	202080055989	中国	2022/2/7	公開	異材固相接合方法及び異材固相接合構造物	藤井 英俊他
33	国立大学法人 大阪大学	17/775,421	米国	2022/5/9	公開	異材固相接合方法、異材固相接合構造物及び異材固相接合装置	藤井 英俊他

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月日
1	Ryosuke Kuroiwa*, Yasuhiro Aoki*, Hidetoshi Fujii*, Gen Murayama**, Masanori Yasuyama**	* Osaka University ** Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation	Linear Friction Welding of Medium Carbon Steel	11th International Symposium on Friction Stir Welding, 11, (2016), P12-1- P12-6.	無	2016/5/20
2	Ryosuke Kuroiwa*, Yasuhiro Aoki*, Hidetoshi Fujii*, Gen Murayama**, Masanori Yasuyama**	* Osaka University ** Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation	Application of Linear Friction Welding to the Thin Carbon Steel Plate	Proceedings of 10th International Conference on Trends in Welding Research & 9th International Welding Symposium of Japan Welding Society, (9WS), (2016), 862-865.	無	2016/10/14
3	青木祥宏* 黒岩良祐* 藤井英俊* 村山元** 泰山正則**	*大阪大学 **新日鐵住金	中炭素鋼の低温線形摩 擦攪拌接合	鉄と鋼, Vol 103, No.7, (2017), 422-428.	有	2017/6/30
4	家下輝也*、 生島一樹*、 柴原正和*、 宮坂史和**	* 大阪府立大 学 ** 大阪大学	粒子法と有限要素法を 用いたFSW力学解析手 法の構築	溶接構造シンポジウム 2017, (2017), 169-176.	無	2017/12/5
5	李承俊、 孫玉峰、 藤井英俊	大阪大学	Stacking-fault energy, mechanical twinning and strain hardening of Fe-18Mn-0.6C-(0, 1.5)Al twinning-induced plasticity steels during friction stir welding	Acta Mater., 148 (2018) 235-248.	有	2018/4/15
6	李承俊、 藤井英俊、 潮田浩作	大阪大学	Thermodynamic calculation of the stacking fault energy in Fe-Cr-Mn-C-N steels	J. Alloys Comp., 749 (2018) 776-782.	有	2018/6/15
7	劉小超、 孫玉峰、 柳楽知也、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	Microstructure Evolution of Cu-30Zn during Friction Stir Welding	J. Mater. Sci., 53 (2018) 10423-10441.	有	2018/7/1
8	光藤健太、 宮坂史和	大阪大学	数値解析によるFSWツ ール形状が材料流動に 及ぼす影響の検討	溶接学会論文集, 36, 3, (2018), 193-198.	有	2018/7/2
9	崔正原、 劉恢弘、 藤井英俊	大阪大学	Dissimilar Friction Stir Welding of Pure Ti and Pure Al	Mater. Sci. Eng. A, 730 (2018) 168-176.	有	2018/7/11

10	劉小超、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	Elucidation of microstructural evolution of beta-type titanium alloy joint during friction stir welding using liquid CO <sub>2</sub> cooling	Mater. Char., 145 (2018) 490-500.	有	2018/11/15
11	李承俊* 孫玉峰* 潮田浩作* 藤井英俊* Se Eun Shin**, Yongbum Park**	*大阪大学**順 天大学校	Friction stir welding of multi-walled carbon nanotubes reinforced Al matrix composites	Mater. Char., 145 (2018) 653-663.	有	2018/11/15
12	麻寧緒、 島川活志、 永塚公彬、 中田一博	大阪大学	Heat generation and thermal conduction in friction lap spot joining aluminum/plastics	4th International Conference “Welding and Failure Analysis of Engineering Materials” (wafa-2018)	無	2018/11/20
13	柳樂知也* 劉小超* 潮田浩作* 藤井英俊* 岩本祐一** 阿野元貴**	*大阪大学 **フルヤ金属	Microstructural evolution of high purity silver during friction stir welding	4th International Conference “Welding and Failure Analysis of Engineering Materials” (wafa-2018)	無	2018/11/20
14	宮垣徹也、 劉恢弘、 釜井正善、 藤井英俊	大阪大学	Low-temperature joining of carbon steel by large load and localized deformation	4th International Conference “Welding and Failure Analysis of Engineering Materials” (wafa-2018)	無	2018/11/21
15	アリフィンクスニン 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	Effect of tool material on friction stir welding of thick steel plate	4th International Conference “Welding and Failure Analysis of Engineering Materials” (wafa-2018)	無	2018/11/21
16	越智真理子 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	Inversion friction stir welding of steel	4th International Conference “Welding and Failure Analysis of Engineering Materials” (wafa-2018)	無	2018/11/22
17	山本啓、 段野芳和、 伊藤和博、 三上欣希、 藤井英俊	大阪大学	Weld toe modification using spherical-tip WC tool FSP in fatigue strength improvement of high-strength low-alloy steel joints	Materials Design, 160, (2018), 1019-1028.	有	2018/12/15
18	李承俊、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	Evaluation of Stacking-fault Energy in Fe-Mn Based Twinning-induced Plasticity Steels after Friction Stir Welding	Mater. Char., 147 (2019) 379-383.	有	2019/1/28



19	Seung-Joon Lee*, Tak Min Park**, Jae-Hoon Nam**, Won Seok Choi**, Yufeng Sun*, Hidetoshi Fujii* and Jeongho Han***	*大阪大学**忠 南大学校 ***韓国科学技 術院	The Unexpected Stress- Strain Response of Medium Mn Steel after Friction Stir Welding	Mater. Sci. Eng., A, 744 (2019) 340-348.	有	2019/1/28
20	R.Kuroiwa*, H. Liu*, Y. Aoki*, S. Yoon*, H. Fujii*, G. Murayama**, M. Yasuyama**	*大阪大学 **日本製鉄	Microstructure control of medium carbon steel joints by low- temperature linear friction welding	Science and Technology of Welding and Joining, 25, (2020), 1-9.	有	2019/4/4
21	X. C. Liu, Y. F. Sun, T. Nagira, K. Ushioda and H. Fujii	大阪大学	Experimental evaluation of strain and strain rate during rapid cooling friction stir welding of pure copper	Science and technology of welding and joining, 24, (2019), 352-359.	有	2019/04/15
22	Y. F. Sun, H. Fujii, Y. Sato, Y. Morisada,	大阪大学	Friction Stir Spot Welding of SPCC Low Carbon Steel Plates at Extremely Low Welding Temperature	Journal of Manufacturing Processes, 35, (2019), 733- 741.	有	2019/5/1
23	X.C. Liu, Y.F. Sun, T. Nagira, K. Ushioda, H. Fujii	大阪大学	Evaluation of dynamic development of grain structure during friction stir welding of pure copper using a quasi in situ method	Journal of Materials Science & Technology, 35, (2019) 1412-1421.	有	2019/6/1
24	X.C. Liu, Y.F. Sun, T. Nagira, K. Ushioda, H. Fujii	大阪大学	Strain rate dependent micro-texture evolution in friction stir welding of copper	Materialia 6 (2019) 100302.	有	2019/6/1
25	T. Nagira*, X. C. Liu*, K. Ushioda*, Y. Iwamoto**, G. Ano** and H. Fujii*	*大阪大学 **フリュア金属	Role of annealing twinning in microstructural evolution of high purity silver during friction stir welding	Science and technology of welding and joining, 24, (2019), 644-651.	有	2019/7/1
26	崔正原、 劉恢弘、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	Effect of an Al filler material on interfacial microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welded Ti/Mg joint	Materials Characterization, 155, (2019) 109801.	有	2019/7/12

27	崔正原、 劉恢弘、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	Dissimilar friction stir welding of immiscible titanium and magnesium	Materialia, 7, (2019) 100389.	有	2019/7/15
28	Chun Cheng, Kota Kadoi, Shun Tokita, Hidetoshi Fujii, Kohsaku Ushioda, Hiroshige Inoue	大阪大学	Effects of Carbon and Chromium on Microstructure evolution and Mechanical Properties of Friction Stir Weldment in Medium-carbon Steel	Materials Science and Engineering: A, 762, (2019) 138060.	有	2019/8/5
29	Kota Kadoi, Chun Cheng, Shun Tokita, Kohsaku Ushioda, Hidetoshi Fujii, Hiroshige Inoue	大阪大学	Effect of Cr and C on Microstructure Evolution of Medium Carbon Steels during Friction Stir Welding Process and their Mechanical Property	7th International Conference on Recrystallization and Grain Growth, (2019)	無	2019/8/8
30	T. Nagira, X.C. Liu, K. Ushioda, H. Fujii	大阪大学	Influences of temperature and Sn-addition on microstructural evolution of Ag during FSW	Science and Technology of Welding and Joining, 25, (2020), 198-207.	有	2019/9/4
31	Seung-Joon Lee*, Se Eun Shin**, Kohsaku Ushioda*, Hidetoshi Fujii*	*大阪大学, **順天大学校	Microstructure, mechanical properties, and damping capacity in stir zone after friction stir welding of Fe-17Mn damping alloy	Journal of Alloys and Compounds, 803, (2019), 901-911	有	2019/9/30
32	Yasuhiro Aoki*, Ryosuke Kuroiwa*, Hidetoshi Fujii*, Gen Murayama**, Masanori Yasuyama**	*大阪大学 **日本製鉄	Linear Friction Stir Welding of Medium Carbon Steel at Low Temperature	ISIJ International, 59, 10 (2019) 1853-1859.	有	2019/10/1
33	B. Vicharapu*, H. Liu*, H. Fujii*, K. Narasaki*, N. Ma**, A. De**	*大阪大学 **IIT Bombay	Probing residual stresses in stationary shoulder friction stir welding process	International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 106 (2020) 1573-1586.	有	2019/11/1
34	李志浩*、 生島一樹*、 柴原正和*、 宮坂史和**	* 大阪府立大学 ** 大阪大学	粒子法-FEM連成解析を用いたFSWに関する力学的検討	溶接構造シンポジウム 2019 (2019), 454-461.	無	2019/12/3
35	Takuya Wada*, Yoshiaki Morisada*, Yufeng Sun*, Hidetoshi Fujii*, Yousuke Kawahito*, Muneo Matsushita**, Rinsei Ikeda**	*大阪大学 **JFEスチール	Friction Stir Welding of Medium Carbon Steel with Laser-Preheating	ISIJ International, 60, 1, (2020) 153-159.	有	2020/1/1

36	Y. F. Sun, H. Fujii, Y. Morisada	大阪大学	Double-Sided Friction Stir Welding of 40mm Thick Low Carbon Steel Plates Using a PCBN Rotating Tool	Journal of Materials Processing Technology, 50, (2020), 319-328.	有	2020/2/1
37	H. Liu, Y. Aoki, Y. Aoki, K. Ushioda, H. Fujii	大阪大学	Principle for obtaining high joint quality in dissimilar friction welding of Ti-6Al-4V alloy and SUS316L stainless steel	Journal of Materials Science & Technology, 46, (2020) 211-224.	有	2020/2/19
38	Mengran Zhou*, Yoshiaki Morisada*, Hidetoshi Fujii*, Jian-Yih Wang**	*Joining and Welding Research Institute, Osaka University **National Dong-Hwa University	Pronounced low-temperature superplasticity of friction stir processed Mg-9Li-1Zn alloy	Materials Science and Engineering: A, 780, (2020), 139071.	有	2020/4/7
39	Xiaochao Liu, Yufeng Sun, Tomoya Nagira, Kohsaku Ushioda, Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Effect of Stacking Fault Energy on the Grain Structure Evolution of FCC Metals During Friction Stir Welding	Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 33, (2020), 1001-1012.	有	2020/5/13
40	Y. Morisada, T. Shirasawa, H. Fujii.	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Medium and high carbon steel joints formed by friction welding below A1 temperature	Science and Technology of Welding and Joining, 25, 5, (2020), 438-445.	有	2020/6/1
41	Thomasrabhu Selvaraj* Shogo Ishida* Jinta Arakawa* Hiroyuki Akebono* Atsushi Sugeta* Yasuhiro Aoki** Hidetoshi Fujii**	*Hiroshima University, **Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Elucidation of fatigue characteristics and fracture mechanism of friction stir spot-welded tension-shear joint steels	Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., 44, 1, (2021), 74-84.	有	2020/8/19
42	藤井英俊	大阪大学	自動車関連材料(鉄系)の新規接合方法 : ISMA 関連	溶接学会誌, 89, 6, (2020), 25-29.	有	2020/9/5
43	生田明彦	近畿大学	摩擦攪拌接合に関する研究動向	日本塑性加工学会誌ぶらすとす, 3, 3, (2020), 617-620.	有	2020/10/1
44	T.Nagira, X.C.Liu, K.Ushioda and H.Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Mechanism of Grain Structure Development of Pure Cu and Cu-30Zn with Low Stacking Fault Energy during FSW	Science and Technology of Welding and Joining, 25, 8, (2020), 669-678.	有	2020/10/15

45	Xiaopei Wang, Yoshiaki Morisada and Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Flat friction stir spot welding of AZ31B magnesium alloy using double side adjustable tools: microstructure and mechanical properties	Science and Technology of Welding and Joining, 25, 8, (2020), 644-652.	有	2020/10/15
46	Zhou Mengran, Sun Yufeng, Morisada Yoshiaki, Ushioda Kohsaku, Fujii Hidetoshi	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Quasi-in-situ investigation into the microstructure and texture evolution of pure magnesium during friction stir welding	Journal of Magnesium and Alloys, 8, 4 (2020), 1071- 1083.	有	2020/12/10
47	C. Cheng, K. Kadoi, H. Fujii, K. Ushioda, H. Inoue	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Improved strength and ductility balance of medium-carbon steel with chromium and titanium fabricated by friction stir welding process	Materials Science Engineering: A, 803, (2021), 140689.	有	2021/1/28
48	千民潤、 麻寧緒、 檜崎邦男、 堤成一郎、 藤井英俊	大阪大学	厚板アルミ FSW によ る熱ひずみと残留応力 の数値解析と実験測定	軽金属溶接, 59, 2 (2021) 59-68.	有	2021/2/16
49	Ramy Gadallah, Seiichiro Tsutsumi, Yasuhiro Aoki, Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Investigation of residual stress within linear friction welded steel sheets by alternating pressure via X-ray diffraction and contour method approaches	Journal of Manufacturing Processes (online) 64, (2021) 1223-1234.	有	2021/3/6
50	Xiaopei Wang, Yoshiaki Morisada, Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Flat friction stir spot welding of low carbon steel by double side adjustable tools	Journal of Materials Science & Technology, 66, (2021), 1-9.	有	2021/3/10
51	Ninshu Ma, Peihao Geng, Yunwu Ma, Katsushi Shimakawa, Jeong-Won Choi, Yasuhiro Aoki, Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Thermo-mechanical modeling and analysis of friction spot joining of Al alloy and carbon fiber-reinforced polymer	Journal of Materials Research and Technology, 12, (2021), 1777-1793.	有	2021/5/1
52	生島一樹 李志浩 木谷悠二 前田新太郎 宮坂史和* 柴原正和	大阪府立大学 *大阪大学	摩擦攪拌接合時の力学 的挙動の数値解析的検 討	軽金属溶接(軽金属溶接 協会誌) Vol59, No5, (2021) 170-176.	有	2021/5/16

53	Buchibabu Vicharapu*,**, Huihong Liu*, Yoshiaki Morisada*, Hidetoshi Fujii* & Amitava De***	*Joining and Welding Research Institute, Osaka University, **Indian Institute of Technology Palakkad, ***Indian Institute of Technology Bombay	Degradation of nickel-bonded tungsten carbide tools in friction stir welding of high carbon steel	The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 115, (2021), 1049-1061.	有	2021/5/19
54	Tomoya Nagira*, **, Xiaochao Liu***, Kohasaku Ushioda*, Hidetoshi Fujii*	*Joining and Welding Research Institute, Osaka University, **National Institute for Materials Science ***Southeast University	Microstructural Evolutions of 2N Grade Pure Al and 4N Grade High-Purity Al during Friction Stir Welding	Materials (Basel), 2021 Jun 28; 14 (13): 3606.	有	2021/6/28
55	Xiaopei Wang, Yoshiaki Morisada, Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Interface development and microstructure evolution during double-sided friction stir spot welding of magnesium alloy by adjustable probes and their effects on mechanical properties of the joint	Journal of Materials Processing Technology, 294, (2021), 117104.	有	2021/8/1
56	Abhishek Sharma Yoshiaki Morisada Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Influence of aluminium-rich intermetallics on microstructure evolution and mechanical properties of friction stir alloyed Al single bond Fe alloy system	Journal of Manufacturing Processes Volume 68, Part A, (2021) Pages 668-682.	有	2021/8/1
57	Xiaopei Wang, Yoshiaki Morisada, Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Interface strengthening in dissimilar double-sided friction stir spot welding of AZ31/ZK60 magnesium alloys by adjustable probes	Journal of Materials Science & Technology, 85, (2021), 158-168.	有	2021/9/20

58	岡田徹、 泰山正則 内原正人 藤井英俊*	日本製鉄株式 会社 *大阪大学	スポット溶接継手強度 に及ぼす塗装焼付け熱 履歴の影響	溶接学会論文集, 39, (3) (2021), 209-217.	有	2021/9/28
59	藤井英俊	大阪大学接合 科学研究所	LFW (線形摩擦接 合)	溶接学会誌, 90 (7), (2021), 39-48.	有	2021/10/18
60	伊藤鉄朗、釜井正 善、森貞好昭、藤井 英俊	大阪大学接合 科学研究所	センタードライブ両面 線形摩擦接合を用いた 鋼とアルミニウム合金 の異材接合	JAAA2021 シンポジウム 「先進自動車製造技術に おける接合技術 2021」講 演論文集, (2021), 34-37.	無	2021/11/12
61	Abhishek Sharma, Yoshiaki Morisada, Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Bending induced mechanical exfoliation of graphene interlayers in a through thickness Al-GNP functionally graded composite fabricated via novel single-step FSP approach	Carbon, 186, (2022), 475- 491.	有	2022/1/1
62	H. Yamamoto, S. Koga, K. Ito, Y. Mikami	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Fatigue strength improvement due to alloying steel weld toes with WC tool constituent elements through friction stir processing	The international journal of advanced manufacturing technology, 119, (2022), 6203–6213.	有	2022/1/19
63	Tohru Okada, Masanori Yasuyama, Masato Uchihara, Hidetoshi Fujii*	Nippon Steel Corporation, * Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Effect of paint baking thermal cycle on joint strength of spot welds	WELDING INTERNATIONAL Volume 36, 2022 - Issue 2 76-86.	有	2022/2/2
64	Xiaopei Wang, Yoshiaki Morisada, Kohsaku Ushioda, Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Double-sided friction stir spot welding of ultra-high strength C- Mn-Si martensitic steel by adjustable probes	Journal of Materials Processing Technology Volume 300, February (2022), 117422.	有	2022/2/1
65	Abhishek Sharma, Yoshiaki Morisada, Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka University	Through-Thickness Localized Strain Distribution and Microstructural Characterization of Functionally Graded Al/GNP Composite Fabricated by Friction Stir Processing	Light Metals 2022, pp 274– 282	有	2022/2/5

66	Peihao Geng* Yunwu Ma* Ninshu Ma* Hong Ma*** Yasuhiro Aoki* Huihong Liu* Hidetoshi Fujii*	* Joining and Welding Research Institute, Osaka University, ** Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, *** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Queen's University	Effects of rotation tool-induced heat and material flow behaviour on friction stir lapped Al/steel joint formation and resultant microstructure	International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 174, (2022), 103858.	有	2022/3/1
67	Zhuoran Zeng 1, Mengran Zhou2, 3, Marco Esmaily 4 Yuman Zhu 4, Sanjay Choudhary 4, James C. Griffith 4, Jisheng Ma 4 Yvonne Hora 4 Yu Chen 4, Alessio Gullino 4, Qingyu Shi 2 Hidetoshi Fujii 3 Nick Birbilis1	1 Australian National University. 2 Tsinghua University. 3 Joining and Welding Research Institute (JWRI), Osaka University 4 Monash University.	Corrosion resistant and high-strength dual-phase Mg-Li-Al-Zn alloy by friction stir processing	Communications Materials	有	2022/4/6
68	Peihao Geng* Ninshu Ma* Hong Ma*** Yunwu Ma* Kazuki Murakami* Huihong Liu* Yasuhiro Aoki* Hidetoshi Fujii*	* Joining and Welding Research Institute, Osaka University, ** Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, *** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Queen's University	Flat friction spot joining of aluminum alloy to carbon fiber reinforced polymer sheets: Experiment and simulation	Journal of Materials Science & Technology, Volume 107, (2022), p.266-289.	有	2022/4/30

69	Abhishek Sharma*, Yoshiaki Morisada*, Toru Nagaoka**, Hidetoshi Fujii*	* Joining and Welding Research Institute, Osaka University, **Osaka Research Institute of Industrial Science and Technology	Enhanced strength- ductility combination in the cold-rolled spark plasma sintered pure aluminium by FSP	Materials Characterization, 188, (2022) 111914.	有	2022/6/1
70	宮野泰征* 鷺谷洋希* 佐藤啓陸* 青木祥宏** 木村光彦*** 潮田浩作** 藤井英俊**	*秋田大学 **大阪大学 ***秋田産技	引張強度 1.4GPa 級焼 戻しマルテンサイト鋼 の摩擦攪拌接合	鉄と鋼, Vol 108, No.12, (2022).	有	2022/6/10 (ウェブ早期公 開)
71	生島一樹、 山内悠暉、 李志浩、 木谷悠二、 九鬼正治、 柴原正和	大阪公立大学	摩擦攪拌接合時の力学的挙動に及ぼすツール形状の影響に関する数値解析的検討	鉄と鋼, Vol 108, No.12, (2022).	有	2022/6/10
72	Peihao Geng* Masashi Morimura*, Hong Ma** Yunwu Ma* Ninshu Ma* Huihong Liu* Yasuhiro Aoki* Hidetoshi Fujii* Gupliang Qin**	* Joining and Welding Research Institute, Osaka University, ** School of Material Science and Engineering, Shandong University	Elucidation of intermetallic compounds and mechanical properties of dissimilar friction stir lap welded 5052 Al alloy and DP590 steel	Journal of Alloys and Compounds, 906, (2022), 164381, 1-17.	有	2022/6/15
73	Peihao Geng* Masashi Morimura*, Song Wu* Yong Liu* Yunwu Ma* Ninshu Ma* Yasuhiro Aoki* Hidetoshi Fujii* Hong Ma** Gupliang Qin**	* Joining and Welding Research Institute, Osaka University, ** School of Material Science and Engineering, Shandong University	Prediction of residual stresses within dissimilar Al/steel friction stir lap welds using an Eulerian- based modeling approach	Journal of Manufacturing Processes, 79 (2022) 340– 355.	有	2022/6/15



74	Abhishek Sharma*, Yoshiaki Morisada*, Toru Nagaoka**, Hidetoshi Fujii*	* Joining and Welding Research Institute, Osaka University, **Osaka Research Institute of Industrial Science and Technology	Influence of the number of FSP passes on the strength-ductility synergy of cold-rolled spark plasma sintered pure aluminum	Journal of Manufacturing Processes, 79, (2022), Pages 296-304.	有	2022/7/1
75	Abhishek Sharma*, Yoshiaki Morisada*, Hidetoshi Fujii*	* Joining and Welding Research Institute, Osaka University,	Investigation of through- thickness microstructural evolution and mechanical properties variation in friction stir alloyed Al-Fe alloy system	Journal of Alloys and Compounds, 921, (2022), 166154.	有	2022/11/15
76	伊藤鉄朗、 釜井正善、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	センタードライブ両面 線形摩擦接合を用いた 鋼とアルミニウム合金 の異材接合	溶接学会論文集、第40 号、第4号、(2022)	有	2022/11/15
77	魚澄将俊、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	熔融 Zn メッキ鋼板の 線形摩擦接合	溶接学会論文集、第40 号、第4号、(2022)	有	2022/11/15
78	宮坂史和	大阪大学	粒子法による LFW プ ロセスモデルの開発	鉄と鋼, Vol 108, No.12, (2022).	有	2022/12/1

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月日
1	黒岩良祐*、 青木祥宏*、 藤井英俊*、 村山元**、 泰山正則**	*大阪大学 **新日鐵住 金	中炭素鋼の線形摩擦接合	溶接学会平成28年度春季 全国大会、講演番号205	2016/4/12
2	黒岩良祐*、 青木祥宏*、 藤井英俊*、 村山元**、 泰山正則**	*大阪大学 **新日鐵住 金	Linear Friction Welding of medium carbon steel	10th International Friction Stir Welding Symposium	2016/5/20
3	牧野滉平*、 宮野泰征*、 神谷修*、 上路林太郎** 泰山正則*** 藤井英俊**	*秋田大学 **大阪大学 ***新日鐵 住金	中炭素鋼 (S55C) 摩擦攪拌接合 継 手の機械的特性に及ぼす入熱量影響	一般社団法人 溶接学会東 北支部 第28回溶接・接 合研究会	2016/7/22

4	光藤健太 宮坂史和	大阪大学	離散要素法による摩擦攪拌接合の数値解析	溶接法研究委員会	2016/8/2
5	家下輝也*、 柴原正和*、 生島一樹*、 宮坂史和**	*大阪府立 大学 **大阪大学	摩擦攪拌接合(FSW)に関する力学シミュレーション手法の確立	溶接学会平成 28 年度秋季 全国大会、ポスター番号 P19	2016/9/14
6	森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	三次元可視化による FSW 材料流動挙動の解明	溶接学会平成 28 年度秋季 全国大会、講演番号 218	2016/9/15
7	黒岩良祐*、 青木祥宏*、 藤井英俊*、 村山元**、 泰山正則**	*大阪大学 **新日鐵住 金	薄板鋼板の線形摩擦接合	溶接学会平成 28 年度秋季 全国大会、講演番号 245	2016/9/16
8	青木祥宏、 黒岩良祐、 藤井英俊	大阪大学	線形摩擦接合におけるバリ生成	溶接学会平成 28 年度秋季 全国大会、講演番号 246	2016/9/16
9	生田明彦*、 藤井 英俊** 村上 俊夫*** 小橋 泰三*	*近畿大学 **大阪大学 ***神戸製 鋼所	摩擦攪拌点接合用ツールの摩擦攪拌接合への適用	溶接学会平成 28 年度秋季 全国大会、講演番号 242	2016/9/16
10	牧野滉平*、 宮野泰征*、 神谷修*、 上路林太郎** 泰山正則*** 藤井英俊**	*秋田大学 **大阪大学 ***新日鐵 住金	JIS-S55C 摩擦攪拌接合継手の機械的特性に関する研究	日本機械学会 東北支部 第 52 期秋季講演	2016/9/17
11	黒岩良祐*、 青木祥宏*、 藤井英俊*、 村山元**、 泰山正則**	*大阪大学 **新日鐵住 金	炭素鋼の低温線形摩擦攪拌接合	日本鉄鋼協会 第 172 回 秋季講演大会	2016/9/22
12	黒岩良祐*、 青木祥宏*、 藤井英俊*、 村山元**、 泰山正則**	*大阪大学 **新日鐵住 金	Application of Linear Friction Welding to a Thin Carbon Steel Plate	10th International Conference on Trends in Welding Research & 9th International Welding Symposium of Japan Welding Society (9WS)	2016/10/14
13	光藤健太 宮坂史和	大阪大学	Numerical Analysis of FSW Employing Discrete Element Method	TMS2017	2017/2/27
14	和田拓也*、 森貞好昭*、 藤井英俊*、 松下宗生**、 池田倫正**	*大阪大学 **JFE ス チール	摩擦攪拌接合中の材料流動挙動に及ぼすレーザー予熱の影響	溶接学会平成 29 年度春季 全国大会	2017/4/19
15	家下輝也*、 柴原正和*、 生島一樹*、 宮坂史和**	*大阪府立 大学 **大阪大学	粒子法と有限要素法を用いた FSW 力学解析手法の構築	溶接学会平成 29 年度春季 全国大会	2017/4/20

16	和田拓也、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	Effect of Laser-preheating on Material Flow during Friction Stir Welding	2017 International Congress on Welding, Additive Manufacturing and associated non-destructive testing, Metz, France	2017/5/17
17	宮坂史和、 光藤健太	大阪大学	摩擦攪拌接合プロセスの可視化	CAVE 研究会	2017/6/22
18	光藤健太、 宮坂史和	大阪大学	A Numerical Calculation of FSW process for stainless steel	69th International Institute of Welding Annual Assembly and International Conference	2017/6/27
19	宮坂史和、 光藤健太	大阪大学	Development of Numerical Model for Friction Stir Welding by Meshless Method	Fimpart2017	2017/7/10
20	光藤健太、 宮坂史和	大阪大学	ステンレス鋼に対するFSW過程の数値解析	溶接法研究委員会	2017/8/8
21	和田拓也、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	レーザ予熱摩擦攪拌接合の攪拌部形成機構	日本鉄鋼協会 第174回秋季講演大会	2017/9/6
22	和田拓也*、 森貞好昭*、 藤井英俊*、 松下宗生**、 池田倫正**	*大阪大学 **JFEスチール	レーザ予熱摩擦攪拌接合の攪拌部形成機構	溶接学会平成29年度秋季全国大会	2017/9/11
23	森貞好昭*、 和田拓也*、 藤井英俊*、 松下宗生**、 池田倫正**	*大阪大学 **JFEスチール	高輝度X線透過装置を用いたFe-Al異材摩擦攪拌接合の直接観察	溶接学会平成29年度秋季全国大会	2017/9/11
24	生田明彦*、 藤井英俊**、 村上俊夫***	*近畿大学 **大阪大学 ***神戸製鋼所	鉄鋼用摩擦攪拌接合ツールの各部形状の役割	溶接学会平成29年度秋季全国大会	2017/9/11
25	孫玉峰*、 森貞好昭*、 藤井英俊*、 村上俊夫**	*大阪大学 **神戸製鋼所	高強度中炭素鋼版の摩擦攪拌接合	溶接学会平成29年度秋季全国大会	2017/9/12
26	松下宗生*、 高田充志*、 谷口公一*、 池田倫正*、 藤井英俊**	*JFEスチール **大阪大学	高周波誘導加熱を用いた予熱プロセスによる薄鋼板FSWの高速化	溶接学会平成29年度秋季全国大会	2017/9/12
27	家下輝也*、 柴原正和*、 生島一樹*、 宮坂史和**	*大阪府立大学 **大阪大学	Construct of Friction Stir Welding simulation method by Particle method and FEM	7 <sup>th</sup> International Conference on Welding Science and Engineering (WSE2017)	2017/10/19
28	宮坂史和、 光藤健太	大阪大学	A numerical model of FSW process for ferrous material	7 <sup>th</sup> International Conference on Welding Science and Engineering (WSE2017)	2017/10/20

29	李承俊、 孫玉峰、 藤井英俊	大阪大学	Stacking-fault energy, mechanical twinning and strain hardening of Fe-18Mn-0.6C-(0, 1.5) Al twinning-induced plasticity steels during friction stir welding	ICFP2017,Osaka,Japan	2017/11/23
30	孫玉峰*、 藤井英俊*、 村上俊夫**	*大阪大学 **神戸製鋼所	Friction stir welding of 1.5GPa high strength TRIP steels	ICFP2017,Osaka,Japan	2017/11/23
31	尹盛煜、 青木祥宏、 藤井英俊	大阪大学	Effect of Process Parameters on Linear Friction Welding of Medium Carbon Steel Plates	ICFP2017,Osaka,Japan	2017/11/23
32	宮野泰征*、 孫玉峰**、 藤井英俊**、 片田康行***、 神谷修***	*秋田大学 **大阪大学 ***NIMS	Mechanical properties and microstructure of friction stir butt welds of high nitrogen-containing austenitic stainless steel	ICFP2017,Osaka,Japan	2017/11/23
33	家下輝也*、 柴原正和*、 生島一樹*、 宮坂史和**	*大阪府立大学 **大阪大学	粒子法と有限要素法を用いたFSW力学解析手法の構築	溶接構造シンポジウム	2017/12/5
34	劉小超、 孫玉峰、 柳楽知也、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	液体CO <sub>2</sub> 急速冷却によるCu-30Znの摩擦攪拌接合における微細組織形成の解明	溶接学会平成30年度春季全国大会	2018/4/24
35	家下輝也*、 生島一樹*、 柴原正和*、 宮坂史和**	*大阪府立大学、 **大阪大学	MPS法-FEM連成解析によるFSW力学解析手法の構築	溶接学会平成30年度春季全国大会	2018/4/25
36	崔正原、 劉恢弘、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	純Al薄膜をフィラー材料として用いた純Tiと純Mgの異材摩擦攪拌接合	溶接学会平成30年度春季全国大会	2018/4/25
37	李承俊*、 孫玉峰*、 潮田浩作*、 藤井英俊*、 韓廷昊** 朴鐸民**	*大阪大学 **忠南大学校	中Mn鋼の摩擦攪拌接合	溶接学会平成30年度春季全国大会	2018/4/25
38	青木祥宏、 尹盛煜、 藤井英俊	大阪大学	線形摩擦攪拌接合法の開発	溶接学会平成30年度春季全国大会	2018/4/26
39	森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	高輝度 X線透過装置を用いた三次元可視化によるFSW材料流動挙の解明	溶接学会平成30年度春季全国大会	2018/04/26
40	宮垣徹也、 劉恢弘、 釜井正善、 藤井英俊	大阪大学	炭素鋼の大荷重局部変形接合	溶接学会平成30年度春季全国大会	2018/4/26

41	尹盛煜、 青木祥宏、 藤井英俊	大阪大学	中炭素鋼板の線形摩擦接合継手特性 に及ぼす接合因子の影響	溶接学会平成30年度春季 全国大会	2018/4/26
42	程春、 門井浩太、 鵜田駿、 藤井英俊、 潮田浩作、 井上裕滋	大阪大学	中炭素鋼FSW部のマイクロ組織に及ぼ す合金元素の影響	溶接学会平成30年度春季 全国大会	2018/4/26
43	崔正原、 劉恢弘、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	Dissimilar friction stir welding of pure Ti and pure Mg using an Al filler material	12th International Symposium on Friction Stir Welding	2018/6/26
44	劉恢弘、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	Clarification of Interface Joining Mechanism of Friction Stir Welding by Cu/Cu-10Zn Interfacial Observation	12th International Symposium on Friction Stir Welding	2018/6/27
45	越智真理子、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	Inversion Friction Stir Welding of Steel	12th International Symposium on Friction Stir Welding	2018/6/28
46	柳楽知也、 呉碩、 伍澤西、 藤井英俊	大阪大学	Friction stir welding of developed high tensile strength steel with reduced rare metal	12th International Symposium on Friction Stir Welding	2018/6/28
47	宮坂史和、 光藤健太	大阪大学	Effect of Preheating on FSW Process by Numerical Simulation	THERMEC'2018	2018/7/10
48	李承俊、 孫玉峰、 藤井英俊	大阪大学	Effect of friction stir welding on the stacking-fault energy, mechanical twinning and strain hardening of C- bearing twinning-induced plasticity steels	THERMEC'2018	2018/7/12
49	光藤健太、 宮坂史和	大阪大学	Development of Numerical Model for FSW Dissimilar Material Joining with Particle Method	70th International Institute of Welding Annual Assembly and International Conference	2018/7/18
50	光藤健太、 宮坂史和	大阪大学	粒子法によるFSW異材接合に対する 数値計算モデルの開発	溶接法研究委員会	2018/8/03
51	李承俊、 藤井英俊	大阪大学	Friction stir welding of Fe-17Mn alloy	溶接学会平成30年度秋季 全国大会	2018/9/13
52	程春、 門井浩太、 鵜田駿、 藤井英俊、 潮田浩作、 井上裕滋、 柳楽知也、 青木祥宏	大阪大学	中炭素鋼摩擦攪拌接合部の微細組織 と機械的特性の関係	溶接学会平成30年度秋季 全国大会	2018/9/13

53	伍沢西、 柳楽知也、 青木祥宏、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	摩擦攪拌接合したCr-Si炭素鋼の組織 と機械的性質	溶接学会平成30年度秋季 全国大会	2018/9/13
54	崔正原、 劉恢弘、 潮田浩作、 藤井英俊、 永塚公彬、 中田一博	大阪大学	純TiとCFRPの異材摩擦攪拌接合	溶接学会平成30年度秋季 全国大会	2018/9/13
55	アリフィンクス ニン、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	厚鋼板のFSWに及ぼす接合条件の影 響	溶接学会平成30年度秋季 全国大会	2018/9/13
56	森貞好昭、 和田拓也、 藤井英俊	大阪大学	局部加熱による高炭素鋼攪拌部の組 織制御	溶接学会平成30年度秋季 全国大会	2018/9/13
57	越智真理子、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	反転摩擦攪拌接合における接合条件 の最適化	溶接学会平成30年度秋季 全国大会	2018/9/13
58	B. Vicharapu*, H. Liu*, H. Fujii*, N. Ma**, A. De**	*大阪大学 **IIT Bombay	Effect of plate thickness on tool durability index in FSW of aluminum alloy	溶接学会平成30年度秋季 全国大会	2018/9/14
59	劉恢弘、 青木洋、 青木祥宏、 藤井英俊	大阪大学	Ti-6Al-4V合金/SUS316L鋼の異材摩 擦圧接	溶接学会平成30年度秋季 全国大会	2018/9/14
60	宮垣徹也、 劉恢弘、 釜井正善、 藤井英俊	大阪大学	大荷重局部変形による炭素鋼の低温 接合	溶接学会平成30年度秋季 全国大会	2018/9/14
61	尹盛煜、 青木祥宏、 藤井英俊	大阪大学	中炭素鋼板の線形摩擦接合継手にお ける微細組織分布	溶接学会平成30年度秋季 全国大会	2018/9/14
62	青木祥宏、 尹盛煜、 藤井英俊	大阪大学	線形摩擦接合における高品質継手の 作製	溶接学会平成30年度秋季 全国大会	2018/9/14
63	光藤健太、 宮坂史和	大阪大学	数値計算を用いたFSW中の材料流動 に関する一検討	溶接学会平成30年度秋季 全国大会	2018/9/14
64	劉恢弘、 青木洋、 青木祥宏、 藤井英俊	大阪大学	チタン合金/ステンレス鋼における異 材摩擦圧接	日本金属学会 2018年秋 期（第163回）講演大会	2018/9/20
65	宮垣徹也、 劉恢弘、 釜井正善、 藤井英俊	大阪大学	A <sub>1</sub> 点以下での接合を実現する局部変 形を活用した新規接合法の開発	日本鉄鋼協会 第176回秋 季講演大会	2018/09/20

66	宮坂史和、 光藤健太	大阪大学	Development of a numerical model for dissimilar joining by FSW	MS&T2018	2018/10/15
67	麻寧緒、 島川活志、 永塚公彬、 中田一博	大阪大学	Heat generation and thermal conduction in friction lap spot joining aluminum/plastics	4th International Conference “Welding and Failure Analysis of Engineering Materials” (wafa-2018)	2018/11/20
68	柳楽知也*、 劉小超*、 潮田浩作*、 藤井英俊*、 岩本祐一**、 阿野元貴**	*大阪大学 **フルヤ金属	Microstructural evolution of high purity silver during friction stir welding	4th International Conference “Welding and Failure Analysis of Engineering Materials” (wafa-2018)	2018/11/20
69	宮垣徹也、 劉恢弘、 釜井正善、 藤井英俊	大阪大学	Low-temperature joining of carbon steel by large load and localized deformation	4th International Conference “Welding and Failure Analysis of Engineering Materials” (wafa-2018)	2018/11/21
70	アリフィンクス ミン、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	Effect of tool material on friction stir welding of thick steel plate	4th International Conference “Welding and Failure Analysis of Engineering Materials” (wafa-2018)	2018/11/21
71	越智真理子、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	Inversion friction stir welding of steel	4th International Conference “Welding and Failure Analysis of Engineering Materials” (wafa-2018)	2018/11/22
72	山本啓、 段野芳和、 伊藤和博、 三上欣希、 藤井英俊	大阪大学	Direct application of friction stir processing to weld toes of high-strength low-alloy steel joints	2019 TMS Annual Meeting & Exhibition	2019/3/14
73	B. Vicharapu*、 H. Liu*、 H. Fujii*、 N. Ma**、 A. De**	*大阪大学 **IIT Bombay	Probing tool durability in stationary shoulder friction stir welding	2019 TMS Annual Meeting & Exhibition	2019/3/14
74	Seung-Joon Lee*、 Yufeng Sun*、 Hidetoshi Fujii*、 Jeongho Han**	*大阪大学 **忠南大学校	Friction stir welding (FSW) of Medium-Mn Steel	2019 TMS Annual Meeting & Exhibition	2019/3/14
75	崔正原、 劉恢弘、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	Microstructure and mechanical properties of dissimilar Ti/Mg joint	2019 TMS Annual Meeting & Exhibition	2019/3/14
76	森貞好昭、 和田拓也、 藤井英俊	大阪大学	Friction stir welding of steel with laser melting	2019 TMS Annual Meeting & Exhibition	2019/3/14
77	青木祥宏、 藤井英俊	大阪大学	Low temperature linear friction welding of Ti-6Al-4V alloy	5th Linear Friction Welding Symposium	2019/3/20
78	稲垣拓也、 青木祥宏、 藤井英俊	大阪大学	Linear friction welding of Ti-6Al-4V alloy and SUS316L Stainless steel	5th Linear Friction Welding Symposium	2019/3/20

79	伍沢西、 柳楽知也、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	Mn-Si炭素鋼の摩擦攪拌接合における微細組織と機械的特性の関係	日本鉄鋼協会第177回春季 学生ポスターセッション	2019/3/21
80	川久保拓海、 柳楽知也、 青木祥宏、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	摩擦攪拌接合を前提とした高C、P添加の耐候性鋼の検討	日本鉄鋼協会第177回春季 学生ポスターセッション	2019/3/21
81	柳楽知也、 劉小超、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	Cu-30Znにおける摩擦攪拌接合中の微細組織形成に及ぼす接合温度の影響	日本金属学会 2019年春季 (第164回) 講演大会	2019/3/21
82	劉恢弘、 藤井英俊	大阪大学	Ti-6Al-4V合金/SUS316L鋼における極低回転摩擦圧接	日本金属学会 2019年春季 (第164回) 講演大会	2019/3/21
83	崔正原、 劉恢弘、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	Ti/Mg 異材継手における微細組織及び機械的性質に及ぼすAl フィラー材料の影響	溶接学会平成31年度春季 全国大会	2019/4/18
84	B. Vicharapu*, H. Liu*, H. Fujii*, K. Narasaki*, N. Ma**, and A. De**	*大阪大学 **IIT Bombay	Modeling of residual stresses in stationary shoulder friction stir welding	溶接学会平成31年度春季 全国大会	2019/4/18
85	柳楽知也、 劉小超、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	低い積層欠陥エネルギーを有するfcc金属における接合温度が摩擦攪拌接合中の組織形成に及ぼす影響	溶接学会平成31年度春季 全国大会	2019/4/18
86	川久保拓海、 柳楽知也、 青木祥宏、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	高C、P 添加の摩擦攪拌接合用耐候性鋼の検討	溶接学会平成31年度春季 全国大会	2019/4/18
87	伍沢西*、 柳楽知也*、 潮田浩作*、 藤井英俊* 宮本吾郎**	*大阪大学 **東北大学	Mn-Si 炭素鋼の摩擦攪拌接合部における組織と機械的性質	溶接学会平成31年度春季 全国大会	2019/4/18
88	程春、 門井浩太、 鴫田駿、 藤井英俊、 潮田浩作、 井上裕滋	大阪大学	中炭素鋼摩擦攪拌接合部の微細組織と機械的特性に及ぼす合金元素の影響	溶接学会平成31年度春季 全国大会	2019/4/18
89	古賀将大、 山本啓、 伊藤和博、 三上欣希、 藤井英俊	大阪大学	高強度低合金鋼溶接継手止端部への摩擦攪拌プロセスにおける施工条件と疲労強度改善の関係	溶接学会平成31年度春季 全国大会	2019/4/18



90	劉恢弘、 藤井英俊	大阪大学	チタン合金/ステンレス鋼における極 低回転摩擦圧接	溶接学会平成31年度春季 全国大会	2019/4/19
91	青木祥宏、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	線形摩擦接合した中炭素鋼継手の微 細組織	溶接学会平成31年度春季 全国大会	2019/4/19
92	稲垣拓也、 青木祥宏、 劉恢弘、 藤井英俊	大阪大学	低温線形摩擦接合によるTi-6Al-4V とSUS316L の異材接合	溶接学会平成31年度春季 全国大会	2019/4/19
93	汪小培、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	両面複動式ツールを用いたマグネシ ウム合金のフラット摩擦攪拌点接合	溶接学会平成31年度春季 全国大会	2019/4/19
94	高嶋康人、 青木祥宏、 藤井英俊、 南二三吉	大阪大学	SPCC鋼FSW重ね継手の引張せん断 強度に及ぼす試験片厚さの影響	溶接学会平成31年度春季 全国大会	2019/4/19
95	崔正原、 劉恢弘、 潮田浩作、 藤井英俊、 永塚公彬、 中田一博	大阪大学	摩擦攪拌接合によるチタンとCFRP の異材接合	軽金属学会 第136回春季 大会	2019/05/10-14
96	藤井英俊	大阪大学	中高炭素鋼の摩擦接合技術（シーム レス接合）	自動車技術会2019年春季 大会学術講演会	2019/5/22
97	森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	摩擦攪拌接合時の塑性流動のX線直 接観察	自動車技術会2019年春季 大会学術講演会	2019/5/22
98	Hidetoshi Fujii	大阪大学	low temperature welding without heat affected zone by linear friction welding	4 <sup>th</sup> International Conference & Exhibition <Aluminium-21/ Joining>, Moscow (2019)	2019/6/4-6
99	藤井英俊、 青木祥宏	大阪大学	鉄鋼材料の低温線形摩擦接合	溶接学会軽構造接合加工 研究委員会	2019/6/5
100	稲垣拓也、 青木祥宏、 劉恢弘、 藤井英俊	大阪大学	Ti-6Al-4VとSUS316Lの異材線形摩擦 接合法の開発	軽金属溶接協会2019年年 次講演大会	2019/6/12
101	藤井英俊、 青木祥宏	大阪大学	摩擦接合技術の可視化と低温線形接 合による継手効率100%継手の達成	摩擦接合技術協会 2019 年度総会、第一回研究会	2019/6/21
102	Hidetoshi Fujii, Yasuhiro Aoki	大阪大学	Low Temperature Linear-Friction- Welding of Steel	IIW, Bratislava, Slovakia.	2019/7/7-12
103	宮坂史和、 光藤健太	大阪大学	A numerical model of FSW lap joint by using particle method	IIW, Bratislava, Slovakia.	2019/7/7-12
104	Kota Kadoi, Chun Cheng, Shun Tokita, Kohsaku Ushioda, Hidetoshi Fujii, Hiroshige Inoue	大阪大学	Effect of Cr and C on Microstructure Evolution of Medium Carbon Steels during Friction Stir Welding Process and their Mechanical Property	7th International Conference on Recrystallization and Grain Growth, (2019), Belgium.	2019/8/8

105	T. Nagira*, X.C. Liu*, K. Ushioda*, Y. Iwamoto**, G. Ano** and H. Fujii*	*大阪大学 **フルヤ金属	Effects of operating temperature and addition of impurity elements on microstructural evolution of Ag during friction stir welding	7th International Conference on Recrystallization and Grain Growth, (2019), Belgium.	2019/8/8
106	柳楽知也、 劉小超、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	純Alの摩擦攪拌接合中における組織形成機構の解明	日本金属学会 2019年秋期大会	2019/9/11-13
107	今川雄大、 山本啓、 伊藤和博、 三上欣希、 藤井英俊	大阪大学	摩擦攪拌プロセスによるWC ツール構成元素の低炭素鋼表面への供給とその組織形成に及ぼすツール摩耗挙動の影響	日本金属学会 2019年秋期大会	2019/9/11-13
108	稲垣拓也、 青木祥宏、 劉恢弘、 釜井正善、 藤井英俊	大阪大学	異種材料の低温線形摩擦接合	第176回鉄鋼協会秋季講演大会	2019/9/11-13
109	Zexi Wu*, Tomoya Nagira*, Kohsaku Ushioda*, Hidetoshi Fujii*, Goro Miyamoto**	*大阪大学 **東北大学	Microstructure and mechanical properties of friction stir welded 0.2%C Si-Mn steel	FSWP2019,Louvain-la-Neuve, Belgium.	2019/9/11-13
110	Y.Morisada, H. Fujii	大阪大学	Inversion friction stir welding for fabricating hollow structures	FSWP2019,Louvain-la-Neuve, Belgium.	2019/9/11-13
111	Takumi Kawakubo, Tomoya Nagira, Kohsaku Ushioda, Hidetoshi Fujii	大阪大学	Application of FSW to high carbon and high phosphorus weathering steel	FSWP2019,Louvain-la-Neuve, Belgium.	2019/9/11-13
112	宮坂史和、 西田圭祐、 光藤健太	大阪大学	A numerical model for dissimilar lap joint FSW by using particle method	FSWP2019,Louvain-la-Neuve, Belgium.	2019/9/11-13
113	程春、 門井浩太、 錫田駿、 藤井英俊、 潮田浩作、 井上裕滋	大阪大学	Effects of Alloy Elements on the Substructure of Martensite and Mechanical Properties of Friction Stir Weld of Medium Carbon Steel	溶接学会2019年度秋季全国大会	2019/9/17
114	今川雄大、 山本啓、 伊藤和博、 三上欣希、 藤井英俊	大阪大学	摩擦攪拌プロセスによるWC ツール構成元素の低炭素鋼表面への供給とその組織形成に及ぼすツール摩耗挙動の影響	溶接学会2019年度秋季全国大会	2019/9/17

115	柳楽知也、 劉小超、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	Al の摩擦攪拌接合中における組織形成に及ぼす接合温度の影響	溶接学会2019年度秋季全国大会	2019/9/17
116	伍沢西、 柳楽知也、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	Mn-Si 炭素鋼の低温摩擦攪拌接合	溶接学会2019年度秋季全国大会	2019/9/17
117	汪小培、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	高輝度X線透過装置を用いたその場観察によるフラット摩擦攪拌点接合機構の解明	溶接学会2019年度秋季全国大会	2019/9/17
118	功刀厚志*、 竹内瞭介**、 崔正原**、 麻寧緒**、 青木祥宏**、 藤井英俊**	*(株)JSOL **大阪大学	有限要素解析によるAZ31/A6061 異材摩擦攪拌接合継手のツールオフセットの影響検討	溶接学会2019年度秋季全国大会	2019/9/17
119	B. Vicharapu, H. Liu, Y. Morisada, H. Fujii	大阪大学	Assessment of tool wear in friction stir welding of high carbon steel	溶接学会2019年度秋季全国大会	2019/9/17
120	李蔚豪、 青木祥宏、 藤井英俊	大阪大学	アルミニウム合金A6061-T6の線形摩擦接合	溶接学会2019年度秋季全国大会	2019/9/18
121	稲垣拓也、 釜井正善、 青木祥宏、 劉恢弘、 藤井英俊	大阪大学	異種材料線形摩擦接合法の開発	溶接学会2019年度秋季全国大会	2019/9/18
122	川久保拓海、 柳楽知也、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	摩擦攪拌接合した耐候性鋼の微細組織と力学特性に及ぼすP 添加の影響	溶接学会2019年度秋季全国大会	2019/9/18
123	宮坂史和、 光藤健太	大阪大学	数値解析による薄板重ねFSWのモデル化	溶接学会2019年度秋季全国大会	2019/9/18
124	青木祥宏、藤井 英俊	大阪大学	Ti-6Al-4V 合金線形摩擦接合継手の微細組織	溶接学会2019年度秋季全国大会	2019/9/19
125	宮坂史和、 光藤健太	大阪大学	Development of a numerical model for dissimilar lap joint FSW by using particle method	Materials Science & Technology (MS&T) 19, (2019), Portland, USA.	2019/9/30
126	Shodai Koaga, Hajime Yamamoto, Kazuhiro Ito, Makoto Takahashi, Yoshiki Mikami, Hidetoshi Fujii	大阪大学	W alloying due to WC tool wear during friction stir processing for fatigue strength improvement of high-strength low-alloy steel joints	The 4th International Symposium on Creation of Life Innovation Materials for Interdisciplinary and International Researcher Development (iLIM-4), Sendai, Japan.	2019/10/3-4

127	Hajime Yamamoto, Yoshikazu Danno, Kazuhiro Ito, Yoshiki Mikami, Hidetoshi Fujii	大阪大学	Direct application of friction stir processing to weld toes of high-strength low-alloy steel joints	International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2019 (ICMaSS2019), Nagoya, Japan.	2019/11/1-3
128	Hajime Yamamoto, Yoshikazu Danno, Kazuhiro Ito, Yoshiki Mikami, Hidetoshi Fujii	大阪大学	Weld toe modification using friction stir processing for fatigue strength improvement of high-strength low-alloy steel joints	International Conference on Materials and Systems for Sustainability 2019 (ICMaSS2019), Nagoya, Japan.	2019/11/1-3
129	Shodai Koaga, Hajime Yamamoto, Kazuhiro Ito, Makoto Takahashi, Yoshiki Mikami, Hidetoshi Fujii	大阪大学	W alloying due to WC tool wear during friction stir processing for fatigue strength improvement of high-strength low-alloy steel joints	Visual-JW 2019 & WSE 2019, Osaka, Japan.	2019/11/21-22
130	Huihong LIU, Yo AOKI, Yasuhiro AOKI, Hidetoshi FUJII	大阪大学	Dissimilar Friction Welding of Ti-6Al-4V Alloy and SUS316L Stainless Steel	Visual-JW 2019 & WSE 2019, Osaka, Japan.	2019/11/21-22
131	Buchibabu VICHARAPU, Huihong LIU, Kunio NARASAKI, Ninshu MA, Hidetoshi FUJII	大阪大学	Computation of Residual Stresses in Friction Stir Based Welding Techniques	Visual-JW 2019 & WSE 2019, Osaka, Japan.	2019/11/21-22
132	Xiaopei WANG, Yoshiaki MORISADA and Hidetoshi FUJII	大阪大学	A novel flat FSSW using double side adjustable tools and its in-situ observation by X-ray radiography	Visual-JW 2019 & WSE 2019, Osaka, Japan.	2019/11/21-22
133	Amlan KAR, Yoshiaki MORISADA, Buchibabu VICHARAPU, Hidetoshi FUJII	大阪大学	Effect of tool rotation speed on microstructure evolution and mechanical properties of dissimilar friction stir lap weld	Visual-JW 2019 & WSE 2019, Osaka, Japan.	2019/11/21-22
134	李志浩*, 生島一樹*, 柴原正和*, 宮坂史和**	*大阪府立大学 **大阪大学	MPS法—FEM連成解析を用いたFSWに関する力学的検討	溶接構造シンポジウム 2019	2019/12/4
135	生田明彦	近畿大学	接合ツール形状が継手性能に及ぼす影響	広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター 摩擦攪拌接合セミナーII	2020/3/5

136	福良篤司、 青木祥宏、 藤井英俊	大阪大学	中炭素鋼の線形摩擦継手特性に及ぼす振動方向の影響	第177回鉄鋼協会春季講演大会	2020/3/17-19
137	生田明彦*、 青木祥宏**、 森貞好昭**、 藤井英俊**	*近畿大学 **大阪大学	鉄鋼用摩擦攪拌接合ツール形状の提案	溶接学会令和2年度春季全国大会	2020/4/22-24
138	汪小培、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	両面複動式ツールを用いた低炭素鋼のフラット摩擦攪拌点接合	溶接学会令和2年度春季全国大会	2020/4/22-24
139	福良篤司、 青木祥宏、 藤井英俊	大阪大学	線形摩擦接合の継手特性に及ぼす振動方向の影響	溶接学会令和2年度春季全国大会	2020/4/22-24
140	青木祥宏、 藤井英俊	大阪大学	炭素鋼の線形摩擦接合におけるHAZ軟化抑制	溶接学会令和2年度春季全国大会	2020/4/22-24
141	李志浩*、 生島一樹*、 柴原正和*、 宮坂史和**	*大阪府立大学 **大阪大学	粒子法を用いたFSWに関する力学的検討	溶接学会令和2年度春季全国大会	2020/4/22-24
142	程春、 門井浩太、 藤井英俊、 潮田浩作、 井上裕滋	大阪大学	中炭素マルテンサイト鋼摩擦攪拌接合部における微細組織と引張特性の関係	溶接学会令和2年度春季全国大会	2020/4/22-24
143	生田明彦*、 青木祥宏**、 森貞好昭**、 藤井英俊**	*近畿大学 **大阪大学	超硬合金を用いた鉄鋼用摩擦攪拌接合ツールの特徴	溶接学会令和2年度秋季全国大会	2020/9/22-24
144	李志浩*、 生島一樹*、 柴原正和*、 宮坂史和**	*大阪府立大学 **大阪大学	粒子法およびFEMを用いたFSWに関する数値解析的検討	溶接学会令和2年度秋季全国大会	2020/9/22-24
145	柳楽知也*、 劉小超**、 潮田浩作***、 藤井英俊***	*NIMS **西北工業大 ***大阪大学	低い積層欠陥エネルギーを有するfcc金属におけるFSW中の微細組織形成機構の解明	溶接学会令和2年度秋季全国大会	2020/9/22-24
146	福良篤司、 青木祥宏、 藤井英俊	大阪大学	複雑な断面形状を有する中炭素鋼部材の線形摩擦接合	溶接学会令和2年度秋季全国大会	2020/9/22-24
147	汪小培、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	両面複動式ツールを用いた低炭素鋼とアルミニウム合金の異材摩擦攪拌点接合	溶接学会令和2年度秋季全国大会	2020/9/22-24
148	生田明彦	近畿大学	接合ツール形状が継手性能に及ぼす影響	広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター 摩擦攪拌接合セミナー	2020/10/21
149	汪小培	大阪大学	マグネシウム合金のフラット摩擦攪拌点接合	2020年度年次講演大会 研究成果発表会	2020/11/18

150	生島一樹、 柴原正和、 野津亮、 丹後義彦*、 木治昇*、 駒田周治*	大阪府立 大学 *ジャパン マリンユ ナイテッ ド	溶接力学問題における機械学習 の応用	日本溶接協会2020年度 第3回化学機械溶接研 究委員会	2020/12/15
151	山本啓、 今川雄大、 伊藤和博	大阪大学	摩擦攪拌プロセスによるWCツール 構成元素の鋼中固溶機構	第243回溶接冶金研究委員 会	2021/1/19
152	Xiaopei Wang Yoshiaki Morisada Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka university	Dissimilar friction stir spot welding of low carbon steel and aluminum alloy by double side adjustable tools	TMS2021 VIRTUAL, On-Line	2021/3/15-18
153	生田明彦*、 青木祥宏**、 森貞好昭**、 藤井英俊**	*近畿大学 **大阪大学	窒化ケイ素製鉄鋼用摩擦攪拌接 合ツールの特徴	溶接学会2021年度 春季全国大会	2021/4/14-19
154	伊藤鉄朗、 崔正原、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	軽金属/CFRP異材線形摩擦接合	溶接学会2021年度 春季全国大会	2021/4/14-19
155	藤井英俊	大阪大学	鉄鋼材料の摩擦接合	土木学会鋼構造委員会	2021/5/20
156	村上和輝、 耿培皓、 麻寧緒、 藤井英俊	大阪大学	Al合金とCFRPのピンレス摩擦攪 拌スポット接合の有限要素シミュ レーションと強度評価	塑性加工学会2021年度 春季全国大会	2021/6/3-5
157	生島一樹、 柴原正和	大阪府立 大学	高速・高精度プロセスシミュレ ーションとデジタルツインを活用 した革新的ものづくり技術開 発と展開	砥粒加工学会 KENMA 研究会 第20回研究会	2021/7/6
158	H. Yamamoto, Y. Imagawa, K. Ito	大阪大学 接合科学 研究所	Investigation of WC-tool- component solution mechanism arose in a steel surface layer during friction stir processing	74th IIW Annual Assembly and Int. Conf	2021/7/7-21
159	藤井英俊	大阪大学	摩擦攪拌接合技術	2021年度溶接工学夏季 大学	2021/7/19-8/2
160	魚澄将俊、 森貞好昭、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	溶融亜鉛めっき鋼板の圧力制御 線形摩擦接合	溶接学会2021年度 秋季全国大会	2021/9/21-28
161	伊藤鉄朗、 釜井正善、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	二面同時接合を可能とするセン タードライブ両面線形摩擦接合 法の開発	溶接学会2021年度 秋季全国大会	2021/9/21-28
162	山下享介、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	摩擦攪拌接合された2相ステンレ ス鋼の板厚方向に沿った微細組 織の不均一性	溶接学会2021年度 秋季全国大会	2021/9/21-28

163	汪小培、 森貞好昭、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	高張力鋼の両面摩擦攪拌点接合 における接合界面形成機構の解 明	溶接学会2021年度 秋季全国大会	2021/9/21-28
164	太田匡人、 森貞好昭、 釜井正善、 藤井英俊	大阪大学	高輝度X線透過装置を用いた摩 擦圧接現象の3次元その場観察	溶接学会2021年度 秋季全国大会	2021/9/21-28
165	サリモハメド 劉恢弘、 潮田浩作、 藤井英俊	大阪大学	A11100とA316Lステンレス鋼に おける摩擦攪拌突き合わせ接合 に及ぼすZn中間層の影響	溶接学会2021年度 秋季全国大会	2021/9/21-28
166	耿培皓、 麻寧緒、 青木祥宏、 藤井英俊	大阪大学	ALE要素技術を用いたアルミと CRRP摩擦スポット接合の界面 温度解析	溶接学会2021年度 秋季全国大会	2021/9/21-28
167	小田怜佳、 山本啓、 伊藤和博、 高橋誠	大阪大学 接合科学 研究所	摩擦攪拌プロセス施工鋼表層の WCツール構成元素固溶量に及ぼ す鋼化学成分の影響	溶接学会2021年度 秋季全国大会	2021/9/21-28
168	山元優士、 山本啓、 伊藤和博、 三上欣希	大阪大学 接合科学 研究所	摩擦攪拌プロセス施工鋼表層の 残留応力とWCツール構成元素固 溶量との関係	溶接学会2021年度 秋季全国大会	2021/09/21-28
169	李志浩、 前田新太郎、 生島一樹、 柴原正和	大阪府立 大学	AI強化学習とFEMを用いた溶接 順序最適化	溶接学会2021年度 秋季全国大会	2021/9/21-28
170	藤井英俊	大阪大学	最新摩擦接合技術による薄板構 造物の接合	溶接学会2021年度 秋季全国大会フォーラ ム	2021/9/24
171	汪小培、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	マグネシウム合金のフラット摩 擦攪拌点接合	軽金属溶接協会 2021 年度年次講演大会研究 成果発表会	2021/11/2
172	藤井英俊	大阪大学	マルチマテリアルの実現に向け た新たな接合技術	2021年度マルチマテリ アル・シンポジウム	2021/11/25
173	山内悠輝、 九鬼正治、 李志浩、 生島一樹、 柴原正和	大阪府立 大学	粒子法-FEM連成解析を用いた FSW解析手法の構築	日本船舶海洋工学会講 演会、ポスターセッシ ョン	2021/11/29
174	伊藤鉄朗、 釜井正善、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学	二面同時接合を可能とするセン タードライブ両面線形摩擦接合 法の開発	軽金属溶接協会2021年 度年次講演大会 研究 成果発表会	2021/12/1
175	太田匡人、 森貞好昭、 釜井正善、 藤井英俊	大阪大学	高輝度X線透過装置を用いた摩 擦圧接現象の3次元その場観察	軽金属溶接協会2021年 度年次講演大会 研究 成果発表会	2021/12/8

176	山内悠暉、 九鬼正治、 李志浩、 生島一樹、 柴原正和	大阪府立 大学	粒子法-FEM 連成解析を用いた FSWに関する力学的検討	軽金属溶接協会2021年 度年次講演大会 研究 成果発表会	2021/12/8
177	柴原正和	大阪府立 大学	超高速FEM熱弾塑性解析法『理 想化陽解法FEM』の開発とその 適用事例	日本技術士会中国本部 機械・電気情報・化学 金属三部会主催 2021 年度機械・電気情報・ 化学金属 三部会合同 新春講演会	2022/1/8
178	柴原正和、 生島一樹	大阪府立 大学	超高速FEM熱弾塑性解析法「理 想化陽解法FEM」の開発とその 応用	Femapユーザコンファ レンス2022	2022/2
179	Abhishek Sharma Yoshiaki Morisada Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka university	Through thickness localized strain distribution and microstructural characterization of functionally graded Al/GNP composite fabricated by friction stir processing	TMS2022	2022/2/27-3/3
180	生田明彦*、 青木祥宏**、 森貞好昭**、 藤井英俊**	*近畿大学 **大阪大学 接合科学研究 所	W-Mo-Re 合金製鉄鋼用摩擦攪拌接 合ツールの特徴	2022 年度溶接学会春季 全国大会	2022/4/13-20
181	三浦拓也、 藤井英俊、 潮田浩作	大阪大学接 合科学研究 所	集合組織解析による 6%Ni 炭素鋼の 摩擦攪拌接合中の材料流動挙動の推 定	2022 年度溶接学会春季 全国大会	2022/4/13-20
182	Abhishek Sharma、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学接 合科学研究 所	摩擦攪拌法を用いた冷間圧延スパー クプラズマ焼結純 Al 接合部の組織 変化と機械的特性	2022 年度溶接学会春季 全国大会	2022/4/13-20
183	魚澄将俊*、 森貞好昭*、 藤井英俊*、 平田弘征**、 富士本博紀**	*大阪大学 接合科学研究 所 **日本製鉄	溶融亜鉛めっき鋼板 LFW 継手の耐 食性に及ぼす接合条件の影響	2022 年度溶接学会春季 全国大会	2022/4/13-20
184	伊藤鉄朗、 釜井正善、 三浦拓也、 森貞好昭、 藤井英俊	大阪大学接 合科学研究 所	センタードライブ両面線形摩擦接合 を用いた異種材料の接合	2022 年度溶接学会春季 全国大会	2022/4/13-20
185	耿培皓、 麻寧緒、 青木祥宏、 藤井英俊	大阪大学接 合科学研究 所	Al/Steel摩擦攪拌重ね溶接の熱塑 性流動に関する数値解析	2022 年度溶接学会春季 全国大会	2022/4/13-20
186	柴原正和	大阪公立 大学	理想化陽解法 FEM による大規 模溶接力学シミュレーションの 実機適用	日本材料学会 第91 回 材料データベース研究 分科会	2022/4/22



187	Ninshu Ma, Peihao Geng, Hidetoshi Fujii	大阪大学接 合科学研究 所	Material flow and thermal-mechanical analysis of Al/steel friction stir lap joining process	溶接学会 第 137 回軽構造 接合加工研究委員会	2022/6/7
188	宮野泰征* 鷺谷洋希* 佐藤啓陸* 青木祥宏** 木村光彦*** 潮田浩作** 藤井英俊**	*秋田大学 **大阪大学 ***秋田産 技	1.4GPa 超級 S55C 調質鋼板を対象と した摩擦攪拌接合	溶接学会 東北支部 第 34 回溶接・接合研究会	2022/7/5
189	Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka university	—	Materials in Car Body Engineering 2022	2022/7/6
190	藤井英俊	大阪大学接 合科学研究 所	革新摩擦接合技術による構造材料接 合技術	自動車技術会フォーラム 2022	2022/7/13
191	Toya Kitamura Fumikazu Miyasaka	大阪大学	Development of Numerical Model for LFW Process Model by Particle Method	International Institute of Welding(IIW2022)	2022/7/18
192	Ninshu Ma, Peihao Geng, Hidetoshi Fujii	大阪大学接 合科学研究 所	Material flow and thermal-mechanical analysis of Al/steel friction stir lap joining process	International Institute of Welding(IIW2022) Commission III	2022/7/20
193	宮坂史和	大阪大学	粒子法によるリニアフリクショ ン溶接モデル開発の基礎的検討	溶接学会 溶第 258 回 接法研究委員会	2022/8/9
194	生田明彦*、 青木祥宏**、 森貞好昭**、 藤井英俊**	*近畿大学 **大阪大学 接合科学研 究所	鉄鋼用摩擦攪拌接合ツール使用時の 攪拌領域温度	2022 年度溶接学会秋季 全国大会	2022/9/8
195	九鬼正治*、 山内悠暉*、 生島一樹*、 宮坂史和**、 柴原正和*	*大阪公立 大学 **大阪大学	摩擦攪拌接合時のツールの形状の影響 に関する数値解析的検討	2022 年度溶接学会秋季 全国大会	2022/9/8
196	魚澄将俊*、 森貞好昭*、 平田弘征**、 富士本博紀**、 藤井英俊*	*大阪大学 **日本製鉄	980MPa 級合金化溶融亜鉛めっき鋼 板の線形摩擦接合	2022 年度溶接学会秋季 全国大会	2022/9/8
197	Fumikazu Miyasaka	大阪大学	Effect of probe and shoulder rotation speed of adjustable Friction Stir Welding for dissimilar lap joint	International Materials, Applications & Technologies 2022	2022/9/13
198	Abhishek Sharma Yoshiaki Morisada Hidetoshi Fujii	Joining and Welding Research Institute, Osaka university	Investigation of through-thickness microstructural evolution and mechanical properties in friction stir alloyed Al-Fe alloy system	Joint International Symposium on Friction Stir Welding and Processing (ISFSWP-2022), Germany	2022/9/28-30

199	Y. Morisada,	Joining and Welding Research Institute, Osaka university	Interface structure and mechanical properties of Al/Fe dissimilar joints fabricated by friction stir welding using an adjustable tool,	Joint International Symposium on Friction Stir Welding and Processing (ISFSWP-2022), Germany	2022/9/28-30
200	A. Noguchi	Joining and Welding Research Institute, Osaka university	Development of a new tool - tilted friction stir welding method,	Joint International Symposium on Friction Stir Welding and Processing (ISFSWP-2022), Germany	2022/9/28-30

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月日
1	大阪大学	鉄鋼大手3社と阪大、中高炭素鋼を摩擦接合	日刊工業新聞	2017/1/30
2	秋田大学・宮野泰征	微生物腐食とFSWで地域に貢献	溶接ニュース, p.1	2017/3/14
3	大阪大学・藤井英俊	金属、摩擦で接合	日経産業新聞	2018/3/19
4	大阪大学・藤井英俊	ISMAプロジェクトテーマ46における研究開発の概要	溶接学会誌, 88, 3, (2019), 166-169.	2019/4/5
5	大阪大学・森貞好昭、藤井英俊	X線透過装置を用いた摩擦攪拌接合の塑性流動現象の可視化	溶接学会誌, 88, 3, (2019), 170-173.	2019/4/5
6	近畿大学・生田明彦	ツール設計によるツール寿命向上技術の基礎検討	溶接学会誌, 88, 3, (2019), 174-179.	2019/4/5
7	大阪大学・宮坂史和	粒子法による摩擦攪拌接合の数値解析技術の開発	溶接学会誌, 88, 3, (2019), 180-182.	2019/4/5
8	大阪府立大学・柴原正和、生島一樹、大阪大学・宮坂史和	粒子法と有限要素法を用いたFSW力学解析手法	溶接学会誌, 88, 3, (2019), 183-187.	2019/4/5
9	大阪大学・青木祥宏	中炭素鋼の線形摩擦攪拌接合	溶接学会誌, 88, 3, (2019), 188-192.	2019/4/5
10	大阪大学・藤井英俊、青木祥宏	異種材料の摩擦接合技術	日本機械学会誌, 122, 1206 (2019), 8-11.	2019/5/5
11	大阪大学・藤井英俊、森貞好昭	摩擦攪拌点接合の実用化を促進するフラット接合技術の開発	溶接技術, 67, 7 (2019), 68-71.	2019/7/1
12	大阪大学・藤井英俊、青木祥宏	摩擦接合技術—摩擦攪拌接合、線形摩擦接合	橋梁と基礎, 53, 8 (2019), 105-108	2019/8/5
13	大阪大学・藤井英俊、青木祥宏	摩擦接合技術の可視化と低温線形接合による継手効率100%継手の達成	摩擦接合, 18, 2 (2019), 3-23.	2019/10/1

14	大阪大学	FSW の基礎と接合の革新	WE-COM マガジン, WE-COM 溶接技術者交流会、(2020) 36	2020/4/1
15	大阪大学・藤井英俊	金属の新接合技術 航空機や電車軽く	日本経済新聞	2020/5/18
16	大阪大学・藤井英俊	複雑線形を摩擦接合 阪大が技術、低温・短時間処理	日刊工業新聞	2020/10/27
17	大阪大学・藤井英俊	北川鉄工所、低温摩擦接合で実用機 阪大から技術	日刊工業新聞	2021/2/22
18	大阪大学・藤井英俊	自動車軽量化と溶接接合技術	溶接ニュース	2021/2/23
19	大阪大学・藤井英俊	製網機メーカーの東洋工業ー自動車部品に参入	中部経済新聞	2021/10/13
20	大阪大学・藤井英俊	技術で新たな価値創造ー溶接・接合技術	日刊工業新聞	2021/12/6
21	ISMA	ISMAプロジェクト 「マルチマテリアル連携ハブ」創設 大阪大学に接合拠点	溶接ニュース	2022/2/8
22	大阪公立大学・柴原正和、生島一樹、前田新太郎	溶接力学シミュレーションの過去と未来	溶接技術, 70,(2022), 94-97.	2022/6/1

### (c)プレス発表

なし

### (d)その他

番号	所属・著者等	タイトル	形式、媒体等	発表年月日
1	近畿大学・生田明彦	新提案 FSW ツールの鉄鋼材料への適用	2015 年度大阪大学接合科学共同利用・共同研究拠点共同研究報告書	2016/7/1
2	大阪府立大学・柴原正和	粒子法と有限要素法を用いた FSW 力学解析手法の構築	2016 年度大阪大学接合科学共同利用・共同研究拠点共同研究報告書	2017/6/1
3	近畿大学・生田明彦	鉄鋼材料用接合ツール形状の各種ツール材料に対する適用性の実証	2019 年度大阪大学接合科学共同利用・共同研究拠点共同研究報告書	2020/8/1
4	大阪大学・藤井英俊	超学校 ONLINE 大阪大学リサーチクラウドカフェ第 2 回「溶かさなくて溶接する」を配信	Youtube、大阪大学接合技術拠点 HP	2020/11/11
5	近畿大学・生田明彦	鉄鋼材料用接合ツール形状が接合温度におよぼす影響	2020 年度大阪大学接合科学共同利用・共同研究拠点共同研究報告書	2021/7/1

6	大阪大学・藤井英俊	「NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)のプロジェクト「ISMA(新構造材料技術研究組合)」の一環として「線形摩擦接合(LFW)と摩擦攪拌接合(FSW)」の説明動画をHPで配信。	大阪大学接合技術拠点 HP	2022/2/22
7	近畿大学・生田明彦	鉄鋼材料用接合ツール形状による攪拌領域温度の検証	2021年度大阪大学接合科学共同利用・共同研究拠点共同研究報告書	2022/7/1

#### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	大阪大学	nanotech 2018	パネル、展示物	2018/2/14~16
2	大阪大学	イノベーションジャパン2018	パネル、展示物	2018/8/30~31
3	大阪大学	nanotech 2022	展示物	2022/1/26~28
4	大阪大学	nanotech 2023	展示物	2023/2/1~3

#### 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	大阪大学・藤井英俊	摩擦攪拌現象を活用した新規低温接合技術に関する研究	文部科学省 平成28年度科学分野の文部科学大臣表彰科学技術賞(研究部門)	2016/4/20
2	大阪大学・宮坂史和	摩擦攪拌接合のツール挿入過程にツール形状が与える影響のモデル解析	溶接学会 溶接法研究委員会「溶接物理・技術奨励賞」	2016/8/2
3	大阪大学・黒岩良祐	炭素鋼の低温線形摩擦攪拌接合	日本鉄鋼協会 第172回秋季講演大会 学生ポスターセッション優秀賞	2016/9/22
4	秋田大学・牧野滉平	中炭素鋼 S55C の摩擦攪拌接合継手の機械的特性に及ぼす入熱量の影響	一般社団法人 日本溶接学会東北支部 平成28年度奨学賞	2017/2/8
5	大阪大学・藤井英俊	鉄鋼材料を中心とした摩擦攪拌接合技術の研究開発	一般社団法人 溶接学会「溶接学会業績賞」	2017/4/19
6	大阪大学・光藤健太、南部成仁、宮坂史和	離散要素法による摩擦攪拌接合の数値解析	一般社団法人溶接学会 溶接法研究委員会「溶接物理・技術奨励賞」	2017/8/8
7	大阪大学・和田卓也	レーザ予熱摩擦攪拌接合の攪拌部形成機構	一般社団法人日本鉄鋼協会「第174回秋季講演大会学生ポスターセッション 優秀賞」	2017/9/7

8	大阪大学・和田卓也	レーザー予熱摩擦攪拌接合の攪拌部形成機構	一般社団法人溶接学会 「平成29年度溶接学会 優秀ポスター発表賞」	2017/12/18
9	大阪大学・芹澤久、宮坂史和	Numerical Analysis of Inhomogeneous Behavior In Friction Stir Processing by Using a New Coupled Method of MPS and FEM	The American Ceramic Society “The Engineering Ceramics Division Best Paper Award: First Place”	2018/1/31
10	大阪大学・宮垣徹也	A <sub>1</sub> 点以下での接合を実現する局部変形を活用した新規接合法の開発	一般社団法人日本鉄鋼協会「第176回秋季講演大会学生ポスターセッション 優秀賞」	2018/9/20
11	大阪大学・李承俊	中Mn鋼の摩擦攪拌接合	一般社団法人溶接学会 「平成30年度溶接学会 優秀研究発表賞」	2018/12/17
12	大阪大学・川久保拓海	摩擦攪拌接合を前提とした高C、P添加の耐侯性鋼の検討	一般社団法人日本鉄鋼協会「第177回春季講演大会学生ポスターセッション 優秀賞」	2019/3/21
13	大阪大学・崔正原	摩擦攪拌接合によるチタンとCFRPの異材接合	軽金属学会 第136回春季大会ポスターセッション 軽金属溶接協会賞	2019/5/11
14	大阪大学・藤井英俊	low temperature welding without heat affected zone by linear friction welding	Arconic Russia Special Award “4th International Conference & Exhibition -Aluminum- 21 /Joining-”	2019/6/4-6
15	大阪大学・稲垣拓也	Ti-6Al-4VとSUS316Lの異材線形摩擦接合法の開発	軽金属溶接協会 2019年度年次講演大会優秀ポスター賞	2019/6/12
16	大阪大学・稲垣拓也	異種材料のための新規線形摩擦接合法の開発	日本鉄鋼協会 第178回秋季講演大会学生ポスターセッション 努力賞	2019/9/12
17	大阪大学・藤井英俊	鉄鋼材料の無変態摩擦接合技術の確立	日本鉄鋼協会 2020年 学術貢献賞（三島賞）	2020/3/17
18	大阪大学・福良篤司、青木祥宏、藤井英俊	中炭素鋼の線形摩擦継手特性に及ぼす振動方向の影響	日本鉄鋼協会 学生ポスターセッション奨励賞	2020/4/14
19	大阪大学・青木祥宏	鉄鋼材料の低温線形摩擦接合	溶接学会 軽構造接合加工研究委員会 講演奨励賞	2020/7/2
20	大阪大学・汪小培	マグネシウム合金のフラット摩擦攪拌点接合	軽金属溶接協会 優秀発表賞	2020/11/18
21	大阪大学・劉恢弘	異種材料の固相接合と接合界面形成機構の研究	大阪大学賞 若手教員部門	2020/11/26
22	大阪大学・劉恢弘	直接接合できないMgとTiの異材摩擦攪拌接合手法の確立	日本マグネシウム協会 日本マグネシウム協会 賞奨励賞	2021/6/10
23	大阪大学・宮坂史和	—	溶接学会関西支部 溶接学会関西支部長特別賞	2021/6/4

24	大阪大学・伊藤鉄朗、 釜井正善、森貞好昭、 藤井英俊	二面同時接合を可能とするセンター ドライブ両面線形摩擦接合法の開発	軽金属溶接協会 溶接 学会ポスターセッション 軽金属溶接協会賞	2021/9/22
25	大阪大学・太田匡人、 森貞好昭、釜井正善、 藤井英俊	高輝度X線透過装置を用いた摩擦圧 接現象の3次元その場観察	軽金属溶接協会 溶接 学会ポスターセッション 軽金属溶接協会賞	2021/9/22
26	大阪府立大学・山内悠 暉、九鬼正治、李志浩 、生島一樹、柴原正和	粒子法-FEM 連成解析を用いたFSW に関する力学的検討	軽金属溶接協会 2021 年度年次講演大会 優 秀発表賞	2021/12/8
27	大阪大学・太田匡人、 森貞好昭、釜井正善、 藤井英俊	高輝度X線透過装置を用いた摩擦圧 接現象の3次元その場観察	溶接学会 溶接学会優 秀研究発表賞	2021/12/17
28	秋田大学・花井惇弥	銅-炭素鋼複合オーバーパックに対する FSW適用に関する研究	2021年度溶接学会東北支 部奨学賞	2022/2/28
29	大阪公立大学・生島一 樹、李志浩、木谷悠二 、前田新太郎、柴原正 和 大阪大学・宮坂史和	摩擦攪拌接合時の力学的挙動の数値 解析的検討	軽金属溶接論文賞	2022/6/7

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	パネル	2017/1/23
2	大阪大学	3 府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠 点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	パネル	2017/6/13
3	大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「平成 29 年度成果報告会」	パネル	2018/1/26
4	大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「平成 30 年度成果報告会」	パネル	2019/1/21
5	大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「2019 年度成果報告会」	(パネル)	2020/2/28 (中止)
6	大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「2020 年度成果報告会」	(パネル)、講演	2021/7/1

7	大阪大学	3府省合同 構造材料プログラム ム「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	講演	2021/9/22
8	大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	(パネル)、講演	2022/1/31
9	大阪大学	ISMA成果発表会@大阪大学	講演	2022/8/1
10	大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	(パネル)、講演	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 55] 「マルチマテリアル接合技術の基盤研究 (FS 研究)」 (2018 年度)

表 添-2.12-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2018FY	1	0	0	3	0	17	0	0	0	0	0	0
2019FY	1	0	1	0	0	8	0	0	0	0	1	0
合計	2	0	1	3	0	25	0	0	0	0	1	0

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT ※	出願日	状態	名 称	発明者
1	川崎重工業	特願 2018-192520	国内	2018/10/11	出願	摩擦攪拌接合装置、その 運転方法、及び継手 構造	武岡 正樹他
2	富士電機	特願 2019-111308	国内	2019/6/14	公開	スポット溶接方法	阿部 陽介他
3	川崎重工業	PCT/JP2019/040048	PCT	2019/10/10	各国 移行・ 公開	摩擦攪拌接合装置、その 運転方法、及び継手 構造	武岡 正樹他

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	飯森 理人, 渋谷 陽二, 田 中 展, 劉 陽	大阪大 学, 日 越 大 学, 崇 城大学	不変量破損則に基づく多軸応力 場での接着界面形状最適	日本機械学会論文集	有	2019/2/25
2	岡根 正 樹, 清水 貴明, 安 井利明, 福本昌宏	豊橋技 術科学 大学、 富山高 専	A5052/SPC270C 摩擦攪拌点接合 継手の疲労強度特性におよぼす 力学的要因	軽金属溶接	有	2018/2



3	豊橋技術 科学大学	T. Yasui, T.W.Bian, A. Hanai, T. Mori, K. Hirosawa and M. Fukumoto	Friction stir girth welding between aluminum and steel rods	Procedia Manufacturing, in press Volume 15, 2018, Pages 1376-1381	有	2018/8
---	--------------	---	--	--	---	--------

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Masato Iimori, Hiro Tanaka, Yoji Shibutani, Yang Liu	Osaka University, Vietnam Japan University, Sojo University	Evaluation of adhesive bonding strength based on failure criterion with stress invariants	Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2018	2018/10/23
2	飯森 理人, 渋谷 陽二, 田中 展, 劉 陽	大阪大 学, 崇城 大学	不変量破損則に基づく多軸応 力場での接着界面形状最適化	日本機械学会第 31 回計算力学講演会	2019/2/25
3	T. Yasui, H. Xu and M. Fukumoto	豊橋技術 科学大学	Effect of welding tool shape on material flow during friction stir butt welding of Al/Fe	Int. Symposium on Joining Technologies in Advanced Automobile Assembly, 福岡	2018/11/27, 28
4	二見隼人, 安 井利明, 福本 昌宏, 波多野 好幸, 藤本亮 輔	豊橋技術 科学大学	アルミ/鉄の摩擦攪拌接合に おける接合部材熱容量の影響	溶接学会平成 30 年 度秋季全国大会, 愛 媛	2018/9/12-14
5	石田誠人, 岡 根正樹, 茶木 智勝, 安井利 明, 福本昌宏	豊橋技術 科学大 学、富山 高専	摩擦攪拌による A6063/ S45C 接合体の繰返し変形挙動	日本機械学会 2018 年度年次大会, 大阪	2018/9/11
6	M. Fukumoto, D. Sugimoto and T. Yasui	豊橋技術 科学大学	Visualization of materials flow in friction stir welding	Thermec 2018 国際会 議, France	2018/7/8-13
7	T. Yasui, T. W. Bian, A. Hanai, T. Mori, K. Hirosawa and M. Fukumoto	豊橋技術 科学大学	Friction stir girth welding of dissimilar metals and its application	Int. Symposium on FSW, Canada	2018/6/26-28

8	M. Okane, Y. Ogura, T. Chaki, H. Sakai, T. Yasui and M. Fukumoto	豊橋技術 科学大 学、富山 高専	Fatigue properties of die-cast Aluminum alloy and carbon steel dissimilar joints by friction stir welding	Int. Symposium on FSW, Canada	2018/6/26-28
9	M. Fukumoto and T. Yasui	豊橋技術 科学大学	Mechanical property of dissimilar metal joints made by friction stirring	CIMTEC 国際会議, Italy	2018/6/4-8
10	小林裕貴,川 端智也,秋山 哲也,北村貴 典	九州工業 大学	複合荷重試験における高張力 鋼板を用いた抵抗スポット溶 接継手強度の荷重角度依存性	令和元年度溶接学会 九州支部 研究発表 会	2019/1
11	Yoshikazu Ohara, Jack Potter, Hiromichi Nakajima, Toshihiro Tsuji, Tsuyoshi Mihara	東北大学	Multi-Mode Nonlinear Ultrasonic Phased Array for Closed Crack Imaging	Meetings on Acoustics (POMA)	2018/10/15
12	Hiromichi Nakajima, Yoshikazu Ohara, Sylvain Hauptert, Toshihiro Tsuji, Tsuyoshi Mihara	東北大学	Incident-Wave-Amplitude Dependence of Closed Crack Imaging by Nonlinear Ultrasonic Phased Array with Fixed- Voltage Amplitude Subtraction	Symposium on Ultrasonic Electronics	2018/10/29
13	Yoshikazu Ohara, Jack Potter, Hiromichi Nakajima, Toshihiro Tsuji, Tsuyoshi Mihara	東北大学	Multi-Mode Nonlinear Ultrasonic Phased Array for Imaging Closed Cracks	Symposium on Ultrasonic Electronics	2018/10/30
14	Yoshikazu Ohara, Sylvain Hauptert, Sinan L	東北大学	Ultrafast Phased Array Imaging with Pump Excitation: an Application to Closed Crack Characterization	Symposium on Ultrasonic Electronics	2018/10/31

15	Kosuke Kikuchi, Yoshikazu Ohara, Toshihiro Tsuji, Tsuyoshi Mihara	東北大学	Development of Soft PZT Phased Array Transducer for Large Amplitude Incidence	Symposium on Ultrasonic Electronics	2018/10/31
16	阿部陽介、吉岡信頼、木下比奈子、山根敏	富士電機、埼玉大学	高電流短時間スポット溶接方式による超高張力鋼(1.2GPa)の溶接特性	第245回溶接法研究委員会	2019/1/29
17	平田 好則	ISMA/ 大阪大学	マルチマテリアル接合技術の基盤研究	ものづくり日本会議 2018 シンポジウム	2018/10/17
18	安部 洋平, 森山 創一郎, 森 謙一郎, 吉岡 大樹	豊橋技術科学大学	セルフピアスリベットニングによるアルミニウム鋳物と高張力鋼板の接合	2019年度塑性加工春季講演会	2019/6/9
19	平田 好則	ISMA/ 大阪大学	NEDO/ISMA プロジェクトにおける接合技術開発 -異材接合の継手性能比較-	2019年度自動車技術会 春季大会学術講演会	2019/5/22
20	廣瀬 明夫	大阪大学	アルミニウム合金/鋼異材接合の継手強度に及ぼす界面金属間化合物層の影響	2019年度自動車技術会 春季大会学術講演会	2019/5/22
21	大畑 充、庄司 博人、廣瀬 明夫	大阪大学	アルミニウム合金と鋼の摩擦点接合継手の強度・破壊挙動の数値シミュレーション	2019年度自動車技術会 春季大会学術講演会	2019/5/22
22	熊本光希、莊司郁夫	群馬大学	Fe/Al 抵抗スポット溶接部のマイクロ組織と接合強度	日本金属学会2019年秋期講演（第165回）大会	2019/9/12
23	小林裕貴, 川端智也, 秋山哲也, 北村貴典	九州工業大学	複合荷重試験における高張力鋼板を用いた抵抗スポット溶接継手強度の荷重角度依存性	令和元年度溶接学会 秋季全国大会(仙台)	2019/9/17-19
24	熊本光希、莊司郁夫	群馬大学	Fe/Al 抵抗溶接部の接合強度に及ぼす溶接条件の影響	スマートプロセス学会 令和元年度学術講演会	2019/11/26
25	熊本光希、莊司郁夫	群馬大学	Fe/Al 異材マイクロ接合部の接合強度に及ぼす金属間化合物層の影響	Mate2020シンポジウム	2020/1/28

**(b)新聞・雑誌等への掲載**

なし

**(c)プレス発表**

なし

**(d)その他**

なし

**1.4 展示会への出展**

なし

**1.5 受賞**

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	大阪大学・大畑 充	アルミニウム合金と鋼の摩擦攪拌点 接合継手の強度・破壊挙動の数値シ ミュレーション	2019 年春季大会 学術 講演会 優秀講演発表賞	2019/8/1(授賞 式は 2020 年 5/21)

**1.6 フォーラム等**

なし

[テーマ番号 6 4] 「マルチマテリアル接合技術の基盤研究」(2019 年度～2022 年度)

表 添-2.13-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス 発 表	その 他			
2019FY	0	0	0	2	0	22	0	0	0	0	3	1
2020FY	0	0	0	4	2	17	0	0	0	0	2	1
2021FY	0	0	0	7	2	21	0	0	0	0	6	1
2022FY	0	0	0	8	0	16	0	0	0	1	1	2
合計	0	0	0	21	4	76	0	0	0	1	12	5

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Tomoki Matsuda, Kiriko Owada, Asahi Numata, Hiroto Shoji, Tomokazu Sano, Mitsuru Ohata, Akio Hirose	Osaka University	Influence of interfacial structure on the fracture behavior of friction stir spot welded dissimilar joints	Materials Science and Engineering: A, Vol. 772 (2020) Article 138743	有	2020/01
2	Tomo Ogura, Reiko Wakazono, Shotaro Yamashita and Kazuyoshi Saida	Osaka University	Dissimilar laser brazing of aluminum alloy and galvanized steel and defect control using interlayer	Welding in the World, Vol. 64 (2020) 697-706	有	2020/02

3	Tomoki Matsuda, Ryoichi Hatano, Tomo Ogura, Reo Suzuki, Hiroto Shoji, Tomokazu Sano, Mitsuru Ohata, Akio Hirose	Osaka University	Effect of mismatch in mechanical properties on interfacial strength of aluminum alloy/steel dissimilar joints	Materials Science and Engineering A, Volume 786, 1 June 2020, 139437	有	2020/06
4	莊司郁夫、熊本光希、伊與田宗慶	群馬大学 大阪工業大学	車載用マルチマテリアル抵抗接合部のミクロ組織および機械的特性評価	月刊車載テクノロジー、第54号(第7巻, 第11号), pp. 50-54 (2020)	有	2020/08
5	廣瀬明夫	大阪大学	異材接合技術の現状	日本鉄鋼協会会報誌「ふえらむ」Vol.25 No.9, 2020, p.554-562	有	2020/09
6	Tomoki Matsuda, Tomokazu Sano, Masanao Munekane, Mitsuru Ohata, Akio Hirose	Osaka University	Microscale tensile test of galvanized steel/aluminum dissimilar joint for estimation of intrinsic interfacial strength	Scripta Materialia, Volume 186, September 2020, Pages 196-201	有	2020/09
7	Koki Kumamoto, Ikuo Shohji, Tatsuya Kobayashi and Muneyoshi Iyota	群馬大学 大阪工業大学	Effect of Microstructure on Joint Strength of Fe/Al Resistance Spot Welding for Multi-Material Components	Materials Science Forum ISSN: 1662-9752, Vol. 1016, pp 774-779 (2021)	有	2021/01
8	尾関 郷、横堀壽光、大見敏仁、松原 亨、勝俣 力	帝京大学	自動車用構造材料 SPFC780Y 溶接材における繰返しひずみ硬化の発現と MSE 法による低侵襲疲労余寿命予測	日本材料強度学会誌 第54巻、3号 (2020), pp.58-64.	有	2021/01
9	廣瀬明夫	大阪大学	マルチマテリアルと異材接合	軽金属 ((一社) 軽金属学会誌) Vol.71(2021), No.4, p.188-196	有	2021/04
10	K. Kumamoto, T. Kosaka, T. Kobayashi, I. Shohji, Y. Kamakoshi	Gunma University	Microstructure and Fatigue Behaviors of Dissimilar A6061/Galvanized Steel Joints Fabricated by Friction Stir Spot Welding	Materials, Vol. 14, 3877, 14 pages	有	2021/07

11	Tomoki Matsuda, Seigo Yamada, Akihisa Takeuchi, Kentarō Uesugi, Masahiro Yasutake, Tomokazu Sano, Mitsuru Ohata, Akio Hirose	Osaka University	Fracture behavior of thermally aged Ag-Cu composite sinter joint through microscale tensile test coupled with nano X-ray computed tomography	Materials & Design Volume 206, August 2021, 109818	有	2021/08
12	築地 慎乃輔、 茂田 正哉、古 免 久弥、田中 学	大阪大学 東北大学	軟鋼／アルミニウム合金異材 抵抗スポット溶接におけるナ ゲット形成過程の 3 次元粒子 法シミュレーションおよび金 属間化合物の厚さの推定	溶接学会論文集 371-378	有	2021/12
13	Eri Ota, Tomoki Matsuda, Hiroto Shoji, Tomo Ogura, Fumikazu Miyasaka, Tomokazu Sano, Mitsuru Ohata, Akio Hirose	Osaka University	Friction stir spot welding of aluminum and carbon fiber reinforced thermoplastic using hybrid surface treatment improving interfacial properties	Materials & Design Vol. 212, 110221	有	2021/12
14	Tomoki Matsuda, Toshiya Ogaki, Kotaro Hayashi, Chihiro Iwamoto, Takashi Nozawa, Mitsuru Ohata, Akio Hirose	Osaka University Ibaraki University National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)	Fracture dominant in friction stir spotwelded joint between 6061 aluminum alloy and galvannealed steel based on microscale tensile testing	Materials & Design Vol. 213 (2022), 110344	有	2021/12
15	武岡正樹、深山 拓真、松田朋 己、小椋智、 大橋良司、廣瀬 明夫	大阪大学	複動式摩擦攪拌点接合を用い たアルミニウム合金/亜鉛 めっき鋼の新規接合法の開発	溶接学会論文集 Vol. 39, pp.379-385	有	2121/12
16	武岡正樹、土田 泰輔、松田朋 己、小椋智、大 橋良司、廣瀬明 夫	大阪大学	スクラビング複動式摩擦攪拌 点接合のアルミニウム合金/超 高張力鋼接合への適用	軽金属溶接 Vol. 60, pp.21-28	有	2022/02

17	廣瀬明夫	大阪大学	マルチマテリアルと接合技術	型技術（日刊工業新聞）Vol.37(2022), No.3, p.18-21	有	2022/03
18	武岡正樹、深山拓真、松田朋己、小椋智、大橋良司、廣瀬明夫	大阪大学	鋼/Al 合金抵抗スポット溶接時の Al 合金溶融部における対流挙動の Ex-situ 観察について	軽金属溶接、60 巻 4 号、pp.14-21(2022)	有	2022/04
19	廣瀬明夫	大阪大学	マルチマテリアル構造に適用する接合の基盤技術について	溶接技術 Vol.70(2022), No.5, 36-41	有	2022/05
20	武岡正樹、土田泰輔、松田朋己、小椋智、大橋良司、廣瀬明夫	大阪大学	スクラビング複動式摩擦攪拌点接合継手における異種金属接合界面の局所特性と微細構造の解析	溶接学会論文集 第 40 巻第 2 号 pp.77-87 (2022)	有	2022/05
21	Naoki Takeoka, Taisuke Tsuchida, Tomoki Matsuda, Tomo Ogura, Ryoji Ohashi, Akio Hirose	Osaka University	Analysis of Mechanical Properties of Dissimilar Material Joint Using Scrubbing Refill Friction Stir Spot Welding	Journal of Advanced Joining Processes, Vol.5, pp.100112 (1-12)	有	2022/06
22	廣瀬明夫	大阪大学	マルチマテリアル車体の異材接合技術	表面技術 Vo.73(2022), No.8,	有	2022/08
23	Naoki Takeoka, Takuma Miyama, Tomoki Matsuda, Tomo Ogura, Ryoji Ohashi & Akio Hirose	Osaka University	Development of aluminum alloy/galvanized steel joining method using refill friction stir spot welding	Welding International, 36:6, 370-378 (No.15 の翻訳)	有	2022/07
24	Naoki Takeoka, Taisuke Tsuchida, Tomoki Matsuda, Tomo Ogura, Ryoji Ohashi & Akio Hirose	Osaka University	Analysis of local characteristics and microstructure of dissimilar metal interface in scrubbing refill friction stir spot welding joint	Welding International 36(9) 555-567 (No.20 の翻訳)	有	2022/09
25	Shinnosuke Chikuchi, Masaya Shigeta, Hisaya Komen & Manabu Tanaka	Osaka University Tohoku University	Particle simulation of nugget formation process during steel/aluminum alloy dissimilar resistance spot welding and thickness estimation of intermetallic compounds	Welding International, 36:7, 434-442 (No.12 の翻訳)	有	2022/07



### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	大畑充、 庄司博人、 廣瀬明夫	大阪大学	アルミニウム合金と鋼の摩擦攪拌点接合継手の強度・破壊挙動の数値シミュレーション	公益社団法人自動車技術会 2019年春季大会 学術講演会	2019/5/22
2	廣瀬明夫	大阪大学	アルミニウム合金／鋼異材接合の継手強度に及ぼす界面金属間化合物層の影響	公益社団法人自動車技術会 2019年春季大会 学術講演会	2019/5/22
3	宮坂史和、 光藤健太	大阪大学	A numerical model of FSW lap joint by using particle method	72th Annual Assembly of International Institute of Welding (IIW2019)	2019/7/8
4	Tomo Ogura, Reiko Wakazono, Shotaro Yamashita and Kazuyoshi Saida	Osaka University	Dissimilar joining between aluminum alloy and galvanized (GA) steel using laser brazing	72th Annual Assembly of International Institute of Welding (IIW2019)	2019/7/9
5	Tomoya Asayama, Tomoki Matsuda, Tomokazu Sano, Akio Hirose	Osaka University	Influence of interfacial microstructure on the strength of resistance spot welded dissimilar joints between galvanized steel and aluminum alloy	European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes (EUROMAT 2019)	2019/9/2
6	Tomohito Uchikawa, Tomoki Matsuda, Tomokazu Sano, Akio Hirose	Osaka University	Influence of microstructure on the fracture behavior of friction stir spot welded joint between aluminum alloy and galvanized steel	European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes (EUROMAT 2019)	2019/9/2
7	廣瀬明夫	大阪大学	マルチマテリアル接合技術－異材接合特性の評価・解析	NEDO「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトシンポジウム	2019/9/6
8	熊本光希、 庄司郁夫、 小林竜也、 伊與田宗慶	群馬大学 大阪工業大学	Fe/Al 抵抗スポット溶接部のミクロ組織と接合強度	日本金属学会2019年秋季講演（第165回）大会	2019/9/12
9	宮坂史和、 西田圭祐、 光藤健太	大阪大学	A numerical model for dissimilar lap joint FSW by using particle method	FSWP2019	2019/9/12
10	浅山智也、 松田朋己、 佐野智一、 廣瀬明夫、 伊與田宗慶	大阪大学 大阪工業大学	GA鋼板とAl合金の抵抗スポット溶接における界面組織形成挙動および界面構造	溶接学会2019年度秋季全国大会	2019/9/17

11	若園怜子、 小椋智、 山下正太郎、才 田一幸	大阪大学	アルミニウム合金と合金化溶融 亜鉛めっき鋼の異材レーザープレ イジングと欠陥制御	溶接学会2019年度秋季 全国大会	2019/9/17
12	内川智仁、 松田朋己、 佐野智一、 廣瀬明夫、 庄司博人、 大畑充	大阪大学	亜鉛めっき鋼とアルミニウム合 金の摩擦攪拌点接合継手におけ る接合強度と界面微細構造の関 係	溶接学会2019年度秋季 全国大会	2019/9/17
13	宮坂史和、 光藤健太	大阪大学	数値解析による薄板重ねFSWの モデル化	溶接学会2019年度秋季 全国大会	2019/9/17
14	宮坂史和、 光藤健太	大阪大学	Development of a numerical model for dissimilar lap joint FSW by using particle method	MS&T19	2019/9/30
15	尾関郷、 横堀壽光、 大見敏仁 松原亨、 勝俣力	帝京大学	MSE法による疲労条件下での自 動車用構造材料SPFC780Y溶接部 の材料特性の変化および低侵襲 疲労余寿命予測	第16回機械、構造物の 強度設計・安全性評価 に関するシンポジウム 、日本材料学会	2019/10/18
16	小椋智	大阪大学	アルミニウム合金のナノ析出組 織制御とその接合技術開発	軽金属学会第137回秋 期大会	2019/11/3
17	Tomoki Matsuda, Ryoichi Hatano, Tomo Ogura, Tomokazu Sano, Akio Hirose	Osaka University	Relationship between the Thickness of Intermetallic Compound Layer and the Interfacial Strength for Aluminum Alloy/Steel Dissimilar Joints	14th International Aluminium Conference (INALCO 2019)	2019/11/13
18	築地慎乃輔、 茂田正哉、 田中学	大阪大学	軟鋼/アルミ異材抵抗スポット溶 接におけるナゲット形成過程の 3次元粒子法シミュレーション	スマートプロセス学会 令和元年度学術講演会	2019/11/26
19	熊本光希、 庄司郁夫、 小林竜也、 伊與田宗慶	群馬大学 大阪工業 大学	Fe/Al 抵抗溶接部の接合強度に 及ぼす溶接条件の影響	スマートプロセス学会 令和元年度学術講演会	2019/11/26
20	熊本光希、 庄司郁夫、 小林竜也、 伊與田宗慶	群馬大学 大阪工業 大学	Fe/Al 異材マイクロ接合部の接 合強度に及ぼす金属間化合物層 の影響	Mate2020シンポジウム	2020/1/28
21	高原渉、 水野敬介、 本條直、 浅井知	大阪大学	分子動力学法によるアルミニウ ムナノ液滴内圧力の考察	Mate2020シンポジウム	2020/1/28
22	松田朋己、 庄司博人、 佐野智一、 大畑充、 廣瀬明夫	大阪大学	溶融亜鉛めっき鋼/A6061合金摩 擦攪拌点接合における界面構造 が破壊挙動に及ぼす影響	日本金属学会2020年春 期講演大会	2020/3/3

23	李志浩、 生島一樹、 宮坂史和、 柴原正和	大阪大学	粒子法を用いた FSW に関する 力学的検討	溶接学会2020年度春季 全国大会	2020/4/22
24	浅田雄也、 荻野陽輔、 浅井知	大阪大学	アークプラズマによる亜鉛めっ き鋼板とアルミニウム合金の異 材接合技術に関する研究	溶接学会2020年度秋季 全国大会	2020/9/9
25	本條直、 高原渉、 廣瀬明夫	大阪大学	分子動力学法によるレナード・ ジョーンズ液体での多元系原子 粒子混合状態の評価	溶接学会2020年度秋季 全国大会	2020/9/9
26	築地慎乃輔、 茂田正哉、 田中学	大阪大学	3次元粒子法を用いた軟鋼/アル ミニウム合金異材抵抗スポット 溶接のナゲット形成シミュレー ションおよび金属間化合物の厚 さ推定	溶接学会2020年度秋季 全国大会	2020/9/9
27	李志浩、生島一 樹、宮坂史和、 柴原正和	大阪大学	粒子法およびFEMを用いたFSW に 関 する 数 値 解 析 的 検 討	溶接学会2020年度秋季 全国大会	2020/9/9
28	高原渉、本條直 、廣瀬明夫	大阪大学	分子動力学法を用いた鉄および アルミニウムのナノ液滴粒子内 の圧力の評価	溶接学会2020年度秋季 全国大会	2020/9/9
29	岩本知広、黒木 颯仁、 松田朋己、佐野 智一、廣瀬明夫	茨城大学 大阪大学	FSSWにより接合したAl合金と銅 の微細組織	溶接学会2020年度秋季 全国大会	2020/9/9
30	松田朋己、大和 田貴理子、沼田 朝陽、庄司博人 、佐野智一、大 畑充、廣瀬明夫	大阪大学	溶融亜鉛めっき鋼/アルミニウム 異材継手におけるマクロ・ミク ロスケール破壊挙動評価	溶接学会2020年度秋季 全国大会	2020/9/9
31	太田依里、松田 朋己、小椋智、 佐野智一、廣瀬 明夫	大阪大学	アルミニウム合金/炭素繊維強 化プラスチック異材摩擦攪拌点 接合の接合性に及ぼすアルミニ ウム合金表面処理の影響	溶接学会2020年度秋季 全国大会	2020/9/9
32	門馬慎、松田朋 己、小椋智、佐 野智一、廣瀬明 夫 伊與田宗慶	大阪大学 大阪工業 大学	アルミニウム合金と合金化溶融 亜鉛めっき鋼板の異材抵抗スポ ット溶接継手における強度支配 因子の検討	溶接学会2020年度秋季 全国大会	2020/9/9
33	大垣俊也、松田 朋己、内川智仁 、佐野智一、大 畑充、廣瀬明夫	大阪大学	異材摩擦攪拌点接合における多 段階負荷プロセスが継手特性に 及ぼす影響	溶接学会2020年度秋季 全国大会	2020/9/9
34	中井拓成、庄司 博人、松田朋己 、小椋智、佐野 智一、廣瀬明夫 、大畑充	大阪大学	鋼/アルミニウム合金の摩擦攪 拌点接合継手の強度予測とその 影響因子の検討	溶接学会2020年度秋季 全国大会	2020/9/9

35	熊本光希、荘司郁夫、小林竜也	群馬大学	A6061/亜鉛めっき鋼板FSSW部のマイクロ組織と接合強度	日本金属学会2020年秋季(第167回)講演大会	2020/9/17
36	熊本光希、荘司郁夫、小林竜也	群馬大学	A6061/亜鉛メッキ鋼板摩擦攪拌点接合部の疲労特性	Mate 2021(Microjoining and Assembly Technology in Electronics)	2021/2/2
37	小椋智、山下正太郎、才田一幸	大阪大学	アルミニウム合金の異材レーザーブレイジング	溶接学会第132回マイクロ接合研究委員会	2021/3/5
38	佐近隆介、岩本知広、黒木颯仁、清水優歌、松田朋己、小椋智、佐野智一、廣瀬明夫	茨城大学 大阪大学	Al合金/合金化溶融亜鉛めっき鋼板接合界面の反応相形態	金属学会春期講演大会	2021/3/16
39	清水優歌、岩本知広、黒木颯仁、佐近隆介、松田朋己、小椋智、佐野智一、廣瀬明夫	茨城大学 大阪大学	摩擦攪拌点接合されたAl合金/合金化溶融亜鉛めっき鋼板接合界面の組織解析	金属学会春期講演大会	2021/3/16
40	岩本知広、黒木颯仁、清水優歌、左近隆介、松田朋己、小椋智、佐野智一、廣瀬明夫	茨城大学 大阪大学	FSSWにより接合したAl合金とGA鋼板の反応相形態	溶接学会2021年度春季全国大会	2021/4/14
41	高原渉、野田賛太、廣瀬明夫	大阪大学	第一原理計算によるB2型金属間化合物FeAlの点欠陥に伴う局所電荷の偏りの解析	溶接学会2021年度春季全国大会	2021/4/14
42	小椋智、若園怜子、山下正太郎、才田一幸	大阪大学	デュアルビームを用いたアルミニウム合金とGA鋼の異材レーザーブレイジング	溶接学会2021年度春季全国大会	2021/4/14
43	松田朋己、大垣俊也、小椋智、佐野智一、大畑充、廣瀬明夫	大阪大学	マイクロメカニカル試験を用いた鋼/アルミニウム合金異材接合部の界面強度評価	溶接学会2021年度春季全国大会	2021/4/14
44	太田依里、松田朋己、小椋智、廣瀬明夫	大阪大学	Al合金 / CFRP異材界面強度に及ぼす支配因子の検討	溶接学会2021年度春季全国大会	2021/4/14
45	太田依里、松田朋己、小椋智、佐野智一、大畑充、廣瀬明夫	大阪大学	FSSWを用いた6061アルミニウム合金/CFRTP異材界面特性に及ぼす表面処理の影響	軽金属学会第140回春期大会	2021/5/15
46	小坂豪志、熊本光希、荘司郁夫、小林竜也	群馬大学	A6061/GA980摩擦攪拌点接合部のマイクロ組織と機械的特性	日本金属学会2021年秋季(第169回)講演大会	2021/8/31

47	松田朋己、大垣俊也、大畑充、廣瀬明夫	大阪大学	マイクロ引張試験を用いた合金化溶融亜鉛めっき鋼/A6061摩擦攪拌点接合部の界面強度評価	日本金属学会2021年秋季(第169回)講演大会	2021/8/31
48	築地慎乃輔、茂田正哉、田中学	大阪大学 東北大学	軟鋼/アルミニウム合金異材抵抗スポット溶接におけるナゲット形成過程の3次元粒子法シミュレーションおよび金属間化合物の厚さ推定	日本鉄鋼協会第182回秋季講演大会	2021/9/2
49	築地慎乃輔、立花瑞樹、永瀬裕也、伊與田宗慶、城鮎美、佐野智一、菖蒲敬久、田中学、茂田正哉	大阪大学 東北大学 大阪工業大学 原子力機構	軟鋼/アルミニウム合金異材抵抗スポット溶接中のナゲット形成過程におけるマランゴニ効果を考慮した対流現象の3次元粒子法シミュレーション	溶接学会2021年度秋季全国大会	2021/9/21
50	高原渉、本條直、廣瀬明夫	大阪大学	アルミニウムと鉄族元素からなる二元系B2型金属間化合物の電子状態	溶接学会2021年度秋季全国大会	2021/9/21
51	中村陵馬、中井拓成、清水万真、庄司博人、松田朋己、廣瀬明夫、大畑 充	大阪大学	鋼/アルミニウム合金の摩擦攪拌点接合継手の強度に及ぼす影響因子の数値シミュレーション	溶接学会2021年度秋季全国大会	2021/9/21
52	林浩太郎、松田朋己、小椋智、廣瀬明夫	大阪大学	マイクロスケール引張試験によるGA980/A6061異材接合継手の界面特性評価	溶接学会2021年度秋季全国大会	2021/9/21
53	武岡正樹、土田泰輔、松田朋己、小椋智、廣瀬明夫 大橋良司	大阪大学	機械的特性と界面反応層の基礎検討 複動式摩擦攪拌点接合を用いた新規異種金属接合法の開発 第一報	溶接学会2021年度秋季全国大会	2021/9/21
54	土田泰輔、武岡正樹、松田朋己、小椋智、廣瀬明夫 大橋良司	大阪大学	アルミニウム合金/非めっき超高張力鋼の接合 複動式摩擦攪拌点接合を用いた新規異種金属接合法の開発 第二報	溶接学会2021年度秋季全国大会	2021/9/21
55	深山拓真、武岡正樹、松田朋己、小椋智、廣瀬明夫 大橋良司	大阪大学	アルミニウム合金/亜鉛めっき鋼の接合 複動式摩擦攪拌点接合を用いた新規異種金属接合法の開発 第三報	溶接学会2021年度秋季全国大会	2021/9/21
56	築地慎乃輔、立花瑞樹、永瀬裕也、伊與田宗慶、城鮎美、佐野智一、菖蒲敬久、古免久弥、田中学、茂田正哉	大阪大学 東北大学 大阪工業大学 原子力機構	軟鋼/アルミニウム合金異材抵抗スポット溶接のナゲット形成過程におけるマランゴニ効果を考慮した対流現象の3次元粒子法シミュレーション	スマートプロセス学会2021年度学術講演会	2021/11/15

57	児島伊織、清水優歌、岩本知広、松田朋己、廣瀬明夫	茨城大学 大阪大学	FSSW 多段階負荷プロセスによって接合されたアルミニウム合金/合金化溶融亜鉛メッキ鋼板の微細組織	「先進自動車製造技術における接合技術2021」JAAA2021	2021/11/30
58	廣瀬明夫	Osaka University	Development of Evaluation and Simulation Technologies for Multi-Material Joining	MATERIALS RESEARCH MEETING 2021 (MRM2021) (Invite)	2021/12/15
59	高原渉、本條直、廣瀬明夫	大阪大学	P-ブロック元素の二元固溶性に関する分子軌道論的検討	Mate2022シンポジウム	2022/2/1
60	永瀬裕也、伊與田宗慶	大阪工業 大学	GAめっき鋼板とアルミニウム合金の異種材料抵抗スポット溶接継手における剥離強度の向上因子に関する検討	日本機械学会 関西支部第97期定時総会講演会	2022/3/16
61	高原渉、太田涼太、廣瀬明夫	大阪大学	二酸化炭素雰囲気でのアルミニウム合金の燃焼に及ぼす添加元素の影響に関する分子軌道論的検討	溶接学会 2022 年度春季全国大会	2022/4/13
62	A.T.Yokobori, Jr., T.Ohmi, G.Ozeki, I.Shohji, T.Matsubara and T.Katsumata,	帝京大学 群馬大学	Deteriorated Characteristics on the Fatigue Strength of Dissimilar A6061/Galvannealed Steel Joints Fabricated by Friction Stir Spot Welding	IIW2022	2022/7/18
63	Tomoki Matsuda, Toshiya Ogaki, Mitsuru Ohata, Akio Hirose	大阪大学	Microscale Tensile Testing to Identify Dominant Factors for Macroscopic Fracture Strength of Friction Stir Spot Welded Joints between 6061 Aluminum Alloy and Steel	IIW2022	2022/7/18
64	Hisashi Serizawa	大阪大学	Study on Mechanical Properties of Advanced Multi-Material Dissimilar Lap Joints	IIW2022	2022/7/18
65	古免久弥、築地慎之輔、田中 学、茂田正哉、 立花瑞樹、永瀬 裕也、伊與田宗 慶、城鮎美、佐 野智一、菖蒲敬 久	大阪大学 東北大学 大阪工業 大学 原子力機 構	溶融金属対流現象を考慮した軟鋼/アルミニウム合金異材抵抗スポット溶接中のナゲット形成過程の3次元粒子法シミュレーション	溶接学会2022年度秋季全国大会	2022/9/8
66	高原渉	大阪大学	異種金属接合界面層内の金属間化合物の内部応力状態	溶接学会2022年度秋季全国大会	2022/9/8
67	中村陵馬、清水万真、庄司博人、大畑充、廣瀬明夫	大阪大学	マルチ破壊モデルによる鋼/アルミニウム合金の摩擦攪拌点接合継手の破断挙動予測	溶接学会2022年度秋季全国大会	2022/9/8

68	佐近隆介、岩本知広、海保風佐、黒木颯仁、松田朋己、廣瀬明夫	茨城大学 大阪大学	複動式摩擦攪拌点接合によるAl合金/合金化溶融亜鉛めっき鋼板の接合界面組織	溶接学会2022年度秋季 全国大会	2022/9/8
69	上野達哉、松田朋己、清水万真、廣瀬明夫	大阪大学	界面性状に着目した高強度合金化溶融亜鉛めっき鋼/アルミニウム合金の摩擦攪拌点接合継手の高強度化	溶接学会2022年度秋季 全国大会	2022/9/8
70	佐藤蓮、松田朋己、清水万真、廣瀬明夫	大阪大学	材料流動挙動に着目したアルミニウム合金/炭素繊維強化樹脂の異材摩擦攪拌点接合過程の評価	溶接学会2022年度秋季 全国大会	2022/9/8
71	深山拓真、松田朋己、神原淳、廣瀬明夫	大阪大学	アルミニウム合金と合金化亜鉛めっき鋼の摩擦攪拌点接合における接合後熱処理の影響	溶接学会2022年度秋季 全国大会	2022/9/8
72	野々村俊希、小坂豪志、荘司郁夫、小林竜也、伊與田宗慶	群馬大学 大阪工業大学	A6061/GA980 抵抗スポット溶接部のマイクロ組織と機械的特性	日本金属学会 2022 年 秋期(第 171 回)講演大会	2022/9/20
73	立花瑞樹、伊與田宗慶	大阪工業大学	温度場制御を行った Fe-Al 異材抵抗スポット溶接継手の接合強度特性	日本機械学会 M&M 2022 材料力学カンファレンス	2022/9/26
74	高原渉	大阪大学	Cu-Sn 系金属間化合物層成長での体積変化による内部応力発生	Mate2023 シンポジウム	2023/1/23
75	大岸俊範、小泉駿人、伊與田宗慶	大阪工業大学	Fe-Al 異材抵抗スポット溶接継手の接合強度に及ぼす Al 溶接部における板厚減少の影響	日本機械学会関西支部 2022 年度関西学生会卒業研究発表講演会	2023/3/15
76	立花瑞樹、伊與田宗慶、佐野智一、菖蒲敬久、林雄二郎、松田朋己	大阪工業大学 原子力機構 大阪大学	Fe-Al 異材抵抗スポット溶接時の Al 合金溶融部内における対流挙動の In-situ 評価	日本機械学会関西支部 第 98 期定時総会講演会	2023/3/16

**(b)新聞・雑誌等への掲載**

なし

**(c)プレス発表**

なし

**(d)その他**

なし

## 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	大阪大学	2022 国際ウエルディングショー	パネル	2022/7/13～16

## 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	大阪大学・大畑充	アルミニウム合金と鋼の摩擦攪拌点 接合継手の強度・破壊挙動の数値シ ミュレーション	自動車技術会 優秀講演 発表賞	2019/10/1
2	大阪大学・小椋智	アルミニウム合金のナノ析出組織制 御とその接合技術開発	軽金属学会 第18回軽 金属躍進賞	2019/11/1
3	Osaka University ・ Tomoki Matsuda	Relationship between the thickness of intermetallic compound layer and the interfacial strength for aluminum alloy/steel dissimilar joints	Outstanding Young Professional Award Bronze Prize	2019/11/15
4	茨城大学・佐近隆介、 岩本知広、黒木颯仁、 清水優歌 大阪大学・松田朋己、 小椋智、佐野智一、廣 瀬明夫	Al 合金/合金化熔融亜鉛めっき鋼板接 合界面の反応相形態	金属学会春期講演大会 優秀ポスター賞	2021/3/16
5	茨城大学・清水優歌、 岩本知広、黒木颯仁、 佐近隆介、 大阪大学・松田朋己、 小椋智、佐野智一、廣 瀬明夫	摩擦攪拌点接合された Al 合金/合金 化熔融亜鉛めっき鋼板接合界面の組 織解析	金属学会春期講演大会 優秀ポスター賞	2021/3/16
6	帝京大学・横堀壽光	HIDA AWARD for Life Time Achievement in Plant Integrity Research/Consulting	HIDA AWARD, Award at the HIDA-8 Conference 20th -22nd 2021 Online (from London), European Technology Development Ltd	2021/4/22
7	大阪大学・太田依里、 松田朋己、小椋智、佐 野智一、大畑充、廣瀬 明夫	FSSW を用いた 6061 アルミニウム合 金/CFRTP 異材界面特性に及ぼす表面 処理の影響	軽金属学会 優秀ポス ター賞	2021/5
8	大阪大学・太田依里、 松田朋己、小椋智、佐 野智一、大畑充、廣瀬 明夫	FSSW を用いた 6061 アルミニウム合 金/CFRTP 異材界面特性に及ぼす表面 処理の影響	軽金属溶接協会 優秀 ポスター賞	2021/5



9	大阪大学・築地慎乃輔 大阪工業大学・立花瑞樹、永瀬裕也、伊與田宗慶 量研・城鮎美 大阪大学・佐野智一 原子力機構・菖蒲敬久 大阪大学・古免久弥、田中学 東北大学・茂田正哉	軟鋼／アルミニウム合金異材抵抗スポット溶接中のナゲット形成過程におけるマランゴニ効果を考慮した対流現象の3次元粒子法シミュレーション	スマートプロセス学会 2021年度学術講演会 スマートプロセス学会 学術奨励賞	2021/11
10	大阪大学・中村陵馬、中井拓成、清水万真、庄司博人、松田朋己、廣瀬明夫、大畑充	鋼／アルミニウム合金の摩擦攪拌点接合継手の強度に及ぼす影響因子の数値シミュレーション	2021年度溶接学会 優秀ポスター発表賞	2021/12/17
11	大阪大学・廣瀬明夫	異材接合技術の現状	日本鉄鋼協会 ふえらむ貢献賞	2022/03/15
12	大阪大学・廣瀬明夫	業績賞	日本溶接協会 業績賞	2022/6/8

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「2019年度成果報告会」	(講演、ポスター)	2020/2/28 (中止)
2	大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「2020年度成果報告会」	講演、(ポスター)	2021/7/1
3	大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	講演、(ポスター)	2022/1/31
4	大阪大学	革新的新構造材料等研究開発プロジェクト「ISMA成果発表会@大阪大学」～マルチマテリアル接合～	講演	2022/8/1
5	大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	講演、(ポスター)	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号64B] マルチマテリアル接合技術における継手性能データベースの構築 (2020年度～2022年度)

表 添-2.14-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2020FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2021FY	0	0	0	0	2	5	0	0	0	0	0	2
2022FY	0	0	0	3	2	4	0	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	3	4	10	0	0	0	0	0	5

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	芹澤 久	国立大 学法人 大阪大 学	マルチマテリアル異材継手の 引張せん断強度特性評価	シンポジウム「先進自 動車製造技術における 接合技術 2021」講演論 文集, 130-137.	無	2021/12/1
2	芹澤 久	国立大 学法人 大阪大 学	マルチマテリアル異材継手の せん断疲労特性評価	シンポジウム「先進自 動車製造技術における 接合技術 2021」講演論 文集, .147-153.	無	2021/12/1
3	藤田 栄	新構造 材料技 術研究 組合	異種材料接合とガルバニック腐 食	日本材料強度学会誌増 刊号, 第 63 回材料強度 と破壊総合シンポジウ ム講演論文集, pp.19-26.	無	2022/5/27
4	芹澤 久	国立大 学法人 大阪大 学	Study on Mechanical Properties of Advanced Multi-Material Dissimilar Lap Joints	Proceedings of IIW2022 - International Conference on Welding and Joining, pp.567-570.	無	2022/7/18
5	杉本幸弘	国立大 学法人 広島大 学	アルミニウムと炭素繊維強化樹 脂の摩擦攪拌点接合とそのウェ ルドボンド	軽金属, 第 72 巻, 第 10 号, (2022) pp.600-604.	有	2022/10/1

6	芹澤久	国立大学法人 大阪大学	マルチマテリアル異材継手の引張せん断強度特性評価	溶接学会論文集, 41 巻, 1 号, (2023).	有	印刷中
7	芹澤久	国立大学法人 大阪大学	マルチマテリアル異材継手のせん断疲労特性評価	溶接学会論文集, 41 巻, 1 号, (2023).	有	印刷中

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	芹澤久	国立大学法人 大阪大学	接合技術の最適化に向けた継手性能データベースについて	SAMPE Japan 先端材料技術展 2020 ONLINE －NEDO 革新的新構造材料等研究開発プロジェクトシンポジウム－	2020/10/14
2	芹澤久	国立大学法人 大阪大学	1.5GPa級超高強度鋼を用いた重ね異材接合継手の引張せん断強度に関する検討	2021年度溶接学会秋季全国大会	2021/9/21
3	芹澤久	国立大学法人 大阪大学	先進マルチマテリアル重ね異材接合継手の引張せん断強度に関する検討	日本金属学会2021年秋期(第169回)講演大会	2021/9/16
4	芹澤久	国立大学法人 大阪大学	マルチマテリアル異材継手の引張せん断強度特性評価	先進自動車製造技術にける接合技術2021 (JAAA2021)	2021/12/1
5	芹澤久	国立大学法人 大阪大学	マルチマテリアル異材継手のせん断疲労特性評価	先進自動車製造技術における接合技術2021 (JAAA2021)	2021/12/1
6	芹澤久	国立大学法人 大阪大学	先進マルチマテリアル重ね異材接合継手のせん断疲労強度に関する検討	日本金属学会2022年春期(第170回)講演大会	2022/3/17
7	芹澤久	国立大学法人 大阪大学	1.5GPa級超高強度鋼を用いた重ね異材接合継手のせん断疲労特性に関する検討	2022年度溶接学会春季全国大会	2022/4/13
8	芹澤久	国立大学法人 大阪大学	Study on Mechanical Properties of Advanced Multi-Material Dissimilar Lap Joints	IIW2022 - International Conference on Welding and Joining	2022/7/18
9	芹澤久	国立大学法人 大阪大学	マルチマテリアル重ね異材接合・接着継手の腐食疲労特性評価試験法の開発	2022年度溶接学会秋季全国大会	2022/9/9
10	芹澤久	国立大学法人 大阪大学	抵抗スポット溶接法による鉄鋼／アルミニウム合金異材接合プロセス解析法に関する検討	日本金属学会 2022 年秋期(第171回)講演大会	2022/9/22

**(b)新聞・雑誌等への掲載**

なし

**(c)プレス発表**

なし

**(d)その他**

なし

**1.4 展示会への出展**

なし

**1.5 受賞**

なし

**1.6 フォーラム等**

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
2	国立大学法人大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「2020年度成果報告会」	講演、(ポスター)	2021/7/1
3	国立大学法人大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	講演、(ポスター)	2022/1/31
4	国立大学法人大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「ISMA 成果発表会@大阪大学」	講演	2022/8/1
5	国立大学法人大阪大学	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	講演、(ポスター)	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

研究開発項目③「革新的チタン材の開発」

[テーマ番号10]「チタン材一貫製造プロセス技術開発」(2014年度～2020年度)

表 添-3.1-1 特許、論文、外部発表等の件数(内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス 発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	2	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2015FY	6	0	3	0	0	13	1	0	0	0	0	1
2016FY	5	0	1	2	0	5	0	0	0	0	0	1
2017FY	4	0	1	0	0	3	0	0	0	0	0	2
2018FY	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	1
2019FY	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	1
2020FY	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1
合計	17	0	5	3	0	36	1	0	0	0	0	8

※1: Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2: 実施者が主体的に開催するイベント(フォーラム、シンポジウム等)

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT ※	出願日	状態	名 称	発明者
1	神戸製鋼所	特願 2014-145823	国内	2014/7/18	公開	チタン板およびその製造方法	伊藤良規 他
2	神戸製鋼所	特願 2014-241022	国内	2014/11/28	公開	チタン板、熱交換器用プレートおよび燃料電池セパレータ	伊藤良規 他
3	神戸製鋼所	特願 2015-169143	国内	2015/8/28	登録	金属チタンの製造方法	鈴木亮輔 他
4	神戸製鋼所	特願 2015-169144	国内	2015/8/28	登録	Ti-Si 系合金の脱酸方法	松若大介 他
5	神戸製鋼所	特願 2015-131029	国内	2015/6/30	登録	Ti-Al 系合金の脱酸方法	工藤 史 晃他
6	神戸製鋼所	特願 2015-180288	国内	2015/9/14	公開	チタン板、熱交換器用プレートおよび燃料電池用セパレータ	伊藤良規 他
7	神戸製鋼所	特願 2016-009417	国内	2016/1/21	登録	α-β 型チタン合金	田村圭太 郎他

8	神戸製鋼所	特願 2016-059165	国内	2016/3/23	公開	チタン板、熱交換器用プレートおよび燃料電池用セパレータ	伊藤良規 他
9	神戸製鋼所	特願 2016-079442	国内	2016/4/12	公開	チタン板	山下浩司 他
10	神戸製鋼所	特願 2017-032273	国内	2017/2/23	登録	Ti-Al 系合金の製造方法	工藤史晃 他
11	神戸製鋼所	特願 2017-032274	国内	2017/2/23	公開	Ti-Al 系合金スクラップの Ti 濃縮方法	工藤史晃 他
12	神戸製鋼所	特願 2017-032275	国内	2017/2/23	公開	Ti-Al 多元系合金の脱酸方法	森川雄三 他
13	神戸製鋼所	特願 2017-032276	国内	2017/2/23	公開	Nb 含有 Ti-Al 系合金の Nb 濃縮方法	松若大介 他
14	神戸製鋼所	特願 2017-074039	国内	2017/4/3	公開	チタン板、熱交換器用プレートおよび燃料電池用セパレータ	伊藤良規 他
16	神戸製鋼所	特願 2017-197905	国内	2017/10/11	登録	Ti-Al 系合金の製造方法	松若大介 他
17	神戸製鋼所	特願 2017-210129	国内	2017/10/31	登録	チタン素材の脱酸方法	松若大介 他
18	神戸製鋼所	PCT/JP2015/074970	PC T	2015/ 9/2	各国移行・ 登録	Ti-Al 系合金の脱酸方法	工藤史晃 他
19	神戸製鋼所	PCT/JP2016/058247	PC T	2016/3/16	各国移行・ 登録	$\alpha$ - $\beta$ 型チタン合金	田村圭太郎 他
20	神戸製鋼所	PCT/JP2016/059256	PC T	2016/3/23	各国移行・ 登録	チタン板、熱交換器用プレートおよび燃料電池用セパレータ	伊藤良規 他
21	神戸製鋼所	PCT/JP2017/011020	PC T	2017/3/17	公開	チタン板、熱交換器用プレートおよび燃料電池用セパレータ	伊藤良規 他
22	神戸製鋼所	PCT/JP2018/006823	PC T	2018/2/23	各国移行・ 登録	Ti-Al 系合金の製造方法	工藤史晃 他

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	戸部 裕史 佐藤 英一	JAXA	Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo 合金の形状記憶特性に及ぼす熱処理温度の影響	軽金属, 2016, vol. 66, pp.174-179	有	2016/4
2	Watanabe, F.Sato, K. Ueda, D.Matsuwaka, T.Narushima	東北大学	Removal of oxygen in Ti-Si melts by arc-melting	Materials Transactions, 2017, vol.58, pp.613-618	有	2017/3
3	吉田 佳典	岐阜大学	螺旋溝付き工具を用いた幅広げ板鍛造における加工条件が板幅拡大率に及ぼす影響	塑性と加工, 2020, Vol. 61, pp. 204-210	有	2020/10

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	阿部賢太	大阪大学	純チタン板の冷間圧延におけるロールコーティングの形成	第65回塑性加工連合講演会	2014/10
2	戸部裕史	ISAS/JAXA	SP-700 超塑性チタン合金における粒界すべりの緩和の微視組織観察	軽金属学会 2015 年春期大会	2015/5
3	戸部裕史	ISAS/JAXA	Microstructural Observation on Accommodation of Grain Boundary Sliding in SP-700 Superplastic Titanium Alloy	ICSAM2015	2015/9
4	宇都宮裕	大阪大学	純チタン板の冷間圧延におけるロールコーティングの TFE 被膜による抑制	平成 27 年度塑性加工春季講演会	2015/5
5	只野裕一	佐賀大学	Constitutive Modeling of Commercial Pure Titanium Using Crystal Plasticity Homogenization Method	4th International Conference on Material Modeling	2015/5
6	宇都宮裕	大阪大学	純チタン板の冷間圧延におけるロールコーティングの形成	日本塑性加工学会圧延工学分科会第 120 回研究会	2015/7
7	鈴木亮輔	北海道大学	硫化チタンの熔融塩還元による低酸素チタンの製造	日本鉄鋼協会	2015/9
8	成島尚之	東北大学	アーク溶解における Ti-Si 融体中の酸素	日本金属学会	2015/9
9	成島尚之	東北大学	Behavior of oxygen in arc-melted Ti-Si alloys	24th International Symposium on Processing and Fabrication of Advanced Materials (PFAM24)	2015/12
10	鈴木亮輔	北海道大学	TiS <sub>2</sub> のカルシウム還元	第 47 回熔融塩化学討論会	2015/10
11	山中謙太	東北大学	高 C 組成を有する $\alpha$ + $\beta$ 型 Ti-4.5 Al-2.5Cr-1.2Si-1.2Fe-0.1C 合金の高温変形	日本鉄鋼協会	2016/3
12	鈴木亮輔	北海道大学	熔融 CaCl <sub>2</sub> を用いた TiS <sub>2</sub> のカルシウム還元	日本鉄鋼協会	2016/3
13	田村圭太郎	神戸製鋼所	$\alpha$ - $\beta$ 型チタン合金 Ti-4.5Al-2.5Cr-1.2Fe-0.1C の被削性に及ぼす Ni、Cu 添加の影響	日本鉄鋼協会	2016/3
14	佐治奈萌子	京都大学	集合組織形成メカニズム解明とミクロ変形挙動解析技術構築	日本金属学会	2016/3
15	佐治奈萌子	京都大学	Effects of Orientation on Anisotropic Tensile Deformation Behavior in Cold-Rolled and Annealed Pure Titanium	The 9th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing	2016/8
16	田村圭太郎	神戸製鋼所	Ni、Cu を微量添加した $\alpha$ - $\beta$ 型チタン合金 Ti-4.5Al-2.5Cr-1.2Fe-0.1C の被削性改善	日本鉄鋼協会	2016/9

17	田村圭太郎	神戸製鋼所	Improving the machinability of $\alpha$ - $\beta$ -type titanium alloy KS Ti-531C for aerospace applications	TITANIUM USA 2016, ITA's 32nd annual Conference & Exhibition	2016/9
18	大山英人	神戸製鋼所	チタン合金の製造方法と技術開発の動向	技術向上ワークショップ (公益社団法人 中国地方総合研究センター)	2016/11
19	長田卓	神戸製鋼所	航空機向けチタン合金材料と鍛造技術	第 321 回塑性加工シンポジウム 「航空機関連産業の現状と市場参入への取組み」	2017/2
20	松若大介	神戸製鋼所	アルミ添加による溶融チタン合金の脱酸	第 161 回金属学会秋期講演大会	2017/9
21	松若大介	神戸製鋼所	アルミ添加による溶融チタン合金の脱酸	第 5 回チタン若手交流会	2017/10
22	関口慶太	JAXA	複相 Ti-4.5Al-2.5Cr-1.2Fe-0.1C-0.3Cu-0.3Ni 合金の連続動的再結晶による組織形成挙動	日本金属学会 2018 年春季大会	2018/3
23	関口慶太	JAXA	Continuous dynamic recrystallization in dual-phase titanium alloy in superplasticity	ISCAM2018	2018/8
24	関口慶太	JAXA	鍛伸集合組織を有する二相チタン合金における高速温間変形中の下部組織形成機構	日本金属学会 2018 年秋季大会	2018/9
25	松若大介	神戸製鋼所	アルミ添加による溶融チタン合金の脱酸	第 83 回レアメタル研究会	2018/11
26	成島尚之	東北大学	水素プラズマを利用したチタン融体からの酸素除去の可能性	日本金属学会 チタン製造プロセスと材料機能研究会	2019/1
27	逸見義男	神戸製鋼所	高被削性チタン合金 KS-531CN の開発	日本チタン協会 総会記念講演会	2019/5
28	松若大介	神戸製鋼所	Deoxygenation of liquid titanium with aluminum addition	The 14th World Conference on Titanium	2019/6
29	成島尚之	東北大学	Recent activities of titanium research and development in Japan	The 14th World Conference on Titanium	2019/6
30	今野昂	神戸製鋼所	Development of $\alpha$ - $\beta$ type titanium alloy Ti-4.5Al-2.5Cr-1.2Fe-0.1C-0.3Cu-0.3Ni having good forgeability and machinability.	The 14th World Conference on Titanium	2019/6
31	逸見義男	神戸製鋼所	Ti-4.5Al-2.5Cr-1.2Fe-0.12C-0.3Ni-0.3Cu 合金の時効に伴う組織変化	日本鉄鋼協会 自主フォーラム 良好な地球環境を継続的に維持するためのチタンとその合金の開発	2019/9
32	古原忠	東北大学	Cu,Ni 添加 Ti-531C 合金の切削加工断面組織のナノ解析	日本金属学会春季大会	2019/9
33	沓掛あすか	岐阜大学	Finite Element Analysis of Ti Rotary Plate Forging with Spiral Grooved Rolls	国際冷間鍛造グループ総会 (52nd CFG Plenary Meeting)	2019/9
34	沓掛あすか	岐阜大学	Finite Element Analysis of Ti Rotary Plate Forging with Spiral Grooved Rolls	日本塑性加工学会第 70 回塑性加工連合講演会	2019/10



35	今野 昂	神戸製鋼所	Cu, Ni 微量添加した熱間鍛造性に優れた Ti-4.5Al-2.5Cr-1.2Fe-0.1C 合金の被削性	日本チタン協会 第7回「チタン若手研究者・技術者交流会」	2019/11
36	今野 昂	神戸製鋼所	熱間加工性に優れた高強度チタン合金の被削性と機械的特性	日本チタン協会 産学連携委員会 チタン研究者・技術者研究交流会	2021/3

#### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	神戸製鋼所	素材開発最前線-強く・軽く	日刊工業新聞	2015/3/22

#### (c)プレス発表

なし

#### (d)その他

なし

#### 1.4 展示会への出展

なし

#### 1.5 受賞

なし

#### 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発「平成26年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発「平成27年度成果報告会」	講演、ポスター	2016/1/22
3	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発「平成28年度成果報告会」	講演、ポスター	2017/1/23
4	神戸製鋼所	3府省合同 構造材料プログラム「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
5	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発「平成29年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26

6	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成30年度成果報告会」	ポスター	2019/1/21
7	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「2019年度成果報告会」	(ポスター)	2020/2/28 (中止)
8	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「2020年度成果報告会」	(ポスター)、発表	2021/7/1

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 1 1] チタン薄板の革新的低コスト化技術開発(2014年度～2020年度)

[テーマ番号 1 2] 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発  
(2014年度～2015年度)

表 添-3.2-1 特許、論文、外部発表等の件数(内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス 発 表	その他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	1	0	0	1	0	9	0	0	0	0	0	2
2015FY	10	0	1	0	2	16	1	0	0	0	0	2
2016FY	9	1	10	5	0	8	3	0	0	0	0	1
2017FY	2	2	3	2	2	16	3	0	0	0	0	2
2018FY	7	0	0	1	0	13	2	0	0	0	1	1
2019FY	4	0	3	1	0	7	1	0	0	0	0	1
2020FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2021FY	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	33	3	18	10	5	69	10	0	0	0	1	11

※1: Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2: 実施者が主体的に開催するイベント(フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名 称	発明者
1	新日鐵住金株式会社	PCT/JP2015/078546 特願 2014-207495 2018-96868	PCT 国内 分割	2015/10/7 2014/10/8 2018/5/21	各国移 行登録 公開	チタン内包構造体およびチタン材	白井善久他
2	新日鐵住金株式会社	PCT/JP2016/072344 特願 2015-149388 2016-567887	PCT 国内	2016/7/29 2015/7/29 2016/7/29	各国移 行登録 登録	チタン複合材および熱 間加工用チタン材	北浦知之他
3	新日鐵住金株式会社	PCT/JP2016/072332 特願 2015-149391 2016-567280	PCT 国内	2016/7/29 2015/7/29 2016/7/29	公開 登録	チタン複合材および熱 間加工用チタン材	北浦知之他

4	新日鐵住金株式会社	PCT/JP2016/072338 特願 2015-149398 2016-568069	PCT 国内	2016/7/29  2015/7/29 2016/7/29	公開  登録	チタン複合材および熱間加工用チタン材	北浦知之他
5	新日鐵住金株式会社	PCT/JP2016/072340 特願 2015-149400 2016-568070	PCT 国内	2016/7/29  2015/7/29 2016/7/29	公開  登録	チタン複合材および熱間加工用チタン材	森 健一他
6	新日鐵住金株式会社	PCT/JP2016/072341 特願 2015-149401 2016-567281	PCT 国内	2016/7/29  2015/7/29 2016/7/29	公開  登録	チタン複合材および熱間加工用チタン材	森 健一他
7	新日鐵住金株式会社	PCT/JP2017/009619 特願 2016-022776 2019-533836	PCT 国内	2017/8/3  2016/2/9 2017/8/3	公開  公開	チタン塊およびその製造方法、ならびにチタンスラブ	白井善久他
8	新日鐵住金株式会社	特願 2016-029506	国内	2016/2/19	登録	チタン複層材およびその製造方法	白井善久他
9	新日鐵住金株式会社	PCT/JP2017/009619 特願 2016-048341 2017-535118	PCT 国内	2017/3/9  2016/2/9 2017/7/7	各国移行登録  登録	チタン材およびその製造方法	北浦知之他
10	新日鐵住金株式会社	PCT/JP2017/013753 特願 2016-074131 2017-003370 2018-509688	PCT 国内	2017/3/31  2016/4/1 2017/1/12 2017/3/15	公開  公開	中性子遮蔽能に優れるチタン複合材およびその加工用梱包体	白井善久他
11	新日鐵住金株式会社	PCT/JP2017/013754 特願 2016-074132 2017-003368 2018-509689	PCT 国内	2017/3/31  2016/4/1 2017/1/12 2017/3/15	公開  登録	チタン複合材およびその熱間加工用の梱包体	白井善久他
12	新日鐵住金株式会社	PCT/JP2017/013756 特願 2016-074133 2017-003369 2018-509690	PCT 国内	2017/3/31  2016/4/1 2017/1/12 2017/3/15	公開  登録	チタン複合材およびその製造方法、ならびにチタン梱包体	白井善久他
13	新日鐵住金株式会社	特願 2015-120352	国内	2015/6/15	登録	チタン酸カルシウムおよび金属Tiの製造方法	鈴木亮輔他
14	京都大学 新日鐵住金株式会社	特願 2016-021152 2020-051219	国内	2016/2/5 2020/3/23	登録 登録	熔融塩電解による金属チタン箔の製造方法	宇田哲也他
15	京都大学 新日鐵住金株式会社	PCT/JP2018/007872 特願 2017-0.38767 2018-541234	PCT 国内	2018/3/1  2017/3/1 2018/3/1	公開  登録	チタン箔またはチタン板の製造方法	宇田哲也他

16	京都大学 新日鐵住金株 式会社	PCT/JP2018/007872 特願 2017-038768 2018-541234	PCT 国内	2018/3/1  2017/3/1 2018/3/1	公開  登録	カソード電極	宇田哲也他
17	東邦チタニウ ム株式会社	PCT/JP2017/006640 GC/2017/32968 特願 2016-032363 特願 2018-501740	PCT 外国 国内 国内	2017/2/22 2017/2/21 2016/2/23 2017/2/22	公開 登録 登録	金属製容器又は管、ス ポンジチタンの製造方 法、及び、チタン加工 品又は鋳造品の製造方 法	井上洋介他
18	東邦チタニウ ム株式会社	特願 2016-201194 特願 2017-174987	国内 国内	2016/10/12 2017/9/12	登録	スポンジチタンの製造 方法	隅田恒他
19	東邦チタニウ ム株式会社	PCT/JP2018/005738 特願 2017-072748 特願 2018-566330 CN/201880019507.8 US/16/498790	PCT 国内 国内 外国 外国	2018/2/19 2017/3/31 2018/2/19 2018/2/19 2018/2/19	公開 登録 登録 登録 公開	スポンジチタン及びスポン ジチタンの製造方法並び にチタンインゴット又はチタ ン合金インゴットの製造方 法	井上洋介他
20	東邦チタニウ ム株式会社	特願 2018-123490	国内	2018/6/28	登録	拡散層を備えた金属製還 元反応容器の製造方法、 高融点金属の製造方法、 および金属製還元反応容 器用コーティング材	渡辺 明治他
21	京都大学、東 邦チタニウム 株式会社	特願 2018-162960	国内	2018/8/31	登録	金属チタンの製造方法	宇田 哲也他
22	東邦チタニウ ム株式会社	PCT/JP2019/028327 特願 2018-162961	PCT 国内	2019/7/18 2018/8/31	公開	金属チタンの製造方法	堀川 松秀他
23	東邦チタニウ ム株式会社	特願 2018-221607 特願 2020-043350 (分割) PCT/JP2019/037401	国内 国内 PCT	2018/11/27 2020/3/12 2019/9/24	登録 公開 公開	スポンジチタンの製造方法 及びチタン加工品又は鋳 造品の製造方法	吉田 稔他
24	東邦チタニウ ム株式会社	特願 2019-024766	国内	2019/2/14	公開	金属製還元反応容器、金 属製還元反応容器の製 造方法、及びスポンジチタ ンの製造方法	渡辺 明治
25	東邦チタニウ ム株式会社	特願 2019-034961	国内	2019/2/27	公開	スポンジチタンの製造方法	井上洋介他
26	東邦チタニウ ム株式会社	特願 2019-034962  PCT/JP2020/002854	国内 PCT	2019/2/27 2020/1/27	登録 公開	チタン粉の製造方法、スポ ンジチタンの製造方法、チ タン粉および、ガス収集装 置	井上洋介
27	東邦チタニウ ム株式会社	特願 2019-100541	国内	2019/5/29	公開	金属製還元反応容器の 蓋体及び、金属の製造方 法	井上洋介
28	東邦チタニウ ム株式会社	特願 2019-152333	国内	2019/8/22	公開	金属製還元反応容器の 蓋体及び、金属の製造方 法	中條 雄太他
29	東邦チタニウ ム株式会社	特願 2020-032199	国内	2020/2/27	公開	剥離性のモニタリング方 法、および金属チタン箔の 製造方法	中條 雄太他

30	東邦チタニウム株式会社	特願 2021-029246 PCT/JP2022/007403	国内 PCT	2021/2/25	公開	チタン箔の製造方法	金子 拓実 他
----	-------------	-------------------------------------	-----------	-----------	----	-----------	---------

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Yuka Yamanaka, Taiki Morishige and Toshihide Takenaka	関西大学	Electrochemical Behavior of Ti in Molten Fluoride-Oxide System	ECS Trans. 2014 volume 64, issue 4, 275-283	有	2014/4/1
2	Shou Shimokawa, Kazuyoshi Nishikawa, Yuka Yamanaka, Taiki Morishige and Toshihide Takenaka	関西大学	Electrochemical reduction of Ti from various Ti compounds in MgF <sub>2</sub> -CaF <sub>2</sub> above 1300K	The 10th international conference on molten salt chemistry and technology (MS10)	無	2015/6/10
3	Toshihide Takenaka, Shou Shimokawa, Kazuyoshi Nishikawa, Yuka Yamanaka, Taiki Morishige	関西大学	INFLUENCE OF TEMPERATURE ON ELECTRODE REACTION OF Ti IN MgF <sub>2</sub> -CaF <sub>2</sub> CONTAINING Ti OXIDE	Proceedings of the 13th World Conference on Titanium (Ti-2015)	無	2015/8/16
4.	Toshihide Takenaka, Kakeru Shimokawa, Kazuyoshi Nishikawa and Taiki Morishige	関西大学	Influence of Cathode Potential on Ti Electrodeposition in Molten Fluoride	ECS Trans. 2016 volume 75, issue 15, 199-206	有	2016/10/1
5.	Toshihide Takenaka, Kakeru Shimokawa, Kazuyoshi Nishikawa and Taiki Morishige	関西大学	Dissolution of Calcium Titanate in CaCl <sub>2</sub> Melt and Its Application to Ti Electrolysis	Materials Transactions Volume 58, Issue 3, 2017, Pages 350-354	有	2017/3/1

6.	櫻村京一郎、三谷智彦、篠原真樹、林幸、菅原弾	中部大学	Microwave Heating Behavior and Microwave Absorption Properties of Barium Titanate at High Temperatures	AIP Advances 6, 065001 (2016)	有	2016/6/1
7.	鈴木亮輔、野口 宏海、羽田大将、夏井 俊悟、菊地 竜也	北海道大学	Reduction of CaTiO <sub>3</sub> in molten CaCl <sub>2</sub> - As basic understanding of electrolysis	Materials Transactions	有	2017/3/1
8.	北村三佳、野口 宏海、夏井 俊悟、菊地 竜也、鈴木亮輔	北海道大学	Observation of Gas Bubbles and Spark Flashing during Electrolysis in CaO-CaCl <sub>2</sub> Melt	Materials Transactions	有	2017/3/1
9	Nobuyoshi Suzuki, Ryosuke O. Suzuki, Shungo Natsui, Tatsuya Kikuchi	北海道大学	Branched morphology of Nb powder particles fabricated by calciothermic reduction in CaCl <sub>2</sub> melt	Journal of Physics and Chemistry of Solids, 110 (2017) pp.58-63. DOI: 10.1016/j.jpcs.2017.05.032	有	2017/6/2
10	Hiromi Noguchi, Shungo Natsui, Tatsuya Kikuchi, Ryosuke O. Suzuki	北海道大学	Reduction of CaTiO <sub>3</sub> by Electrolysis in the Molten Salt CaCl <sub>2</sub> -CaO	Electrochemistry (電気化学および工業物理化学), 86(2) (2018) 82-87 DOI: 10.5796/electrochemistry.17-00078	有	2018/2/1
11	Ryosuke O. Suzuki, Fumiya Matsuura, Shungo Natsui and Tatsuya Kikuchi	北海道大学	Conversion of CO <sub>2</sub> to CO gas using molten CaCl <sub>2</sub> and ZrO <sub>2</sub> anode	Proc. 1st Intern. Conf. on Energy and Material Efficiency and CO <sub>2</sub> Reduction in the Steel Industry, (EMECR2017), (The Iron and Steel Institute of Japan, ISIJ, 11-13 Oct. 2017, Kobe, Japan) pp.360-363.	無	2017/10/1

12	Ryosuke O. Suzuki, Erika Takahashi, Mika Kitamura, Yuta Yashima, Hiromi Noguchi, Shungo Natsui and Tatsuya Kikuchi	北海道大学	Titanium Fabrication via CaCl <sub>2</sub> from FeTiO <sub>3</sub>	Proc. of the 6th Asian Conf. Molten Salts Chemistry and Technology, (June 13-16, 2017, Gyeongju, Korea) OA11_Ryosuke O. Suzuki_Hokkaido University.doc	無	2017/6/13
13	Yu-ki Taninouchi, Katsuhiko Nose, Toru H. Okabe	東京大学	Dissolution Behavior of Iron and Steel Materials in Liquid Magnesium	Metallurgical and Material Transactions B	有	2018/8/1
14	Akihiro Kishimoto, Yuuki Yamada, Kohei Funatsu, Tetsuya Uda	京都大学	Suitable Electrode Materials for Titanium Sheet Deposition	Advanced Engineering Materials	有	2019/10/1
15	奥井利行 白井善久	日本製鉄(株)	スポンジチタン直接圧延による工業用純チタン薄板の製造技術開発	日本製鉄技報、第 418 号、p22	無	2021/8/27

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Yuka Yamanaka, Taiki Morishige and Toshihide Takenaka	関西大学	Electrochemical Behavior of Ti in Molten Fluoride- Oxide System	2014 ECS and SMEQ Joint International Meeting (19th International Symposium of Molten Salts and Ionic Liquids 19). ECS Transactions, 64(4), 275-283 (2014).	2014/10/7
2	山中優佳, 森重大樹, 竹中俊英	関西大学	高温フッ化物溶融塩中での溶質と Ti 還元反応の関係	第 46 回溶融塩化学討論会, 要旨集, 11-12 頁	2014/11/13



3	下川翔, 山中優佳, 森重大樹, 竹中俊英	関西大学	高温フッ化物熔融塩中での Ti 還元反応におよぼす溶質の影響	日本金属学会 2015 年度春季大会	2015/3/18
4	羽田大将, 野口宏海, 夏井俊悟, 菊地竜也, 鈴木亮輔	北海道大学	熔融塩電解を用いた CaTiO <sub>3</sub> の還元	日本鉄鋼協会第 168 回秋季講演大会ポスター (講演要旨集)	2014/9/24-26
5	羽田大将, 野口宏海, 夏井俊悟, 菊地竜也, 鈴木亮輔	北海道大学	CaCl <sub>2</sub> -CaO 熔融塩電解によるチタン酸化物の還元とカソードガス発生	第 46 回熔融塩化学討論会 (電気化学会熔融塩委員会) パワーポイント、紙 (講演要旨集)	2014/11/13
6	野口宏海, 羽田大将, 夏井俊悟, 菊地竜也, 鈴木亮輔	北海道大学	CaCl <sub>2</sub> -CaO 熔融塩電解による CaTiO <sub>3</sub> の還元とカソード電極形状	第 46 回熔融塩化学討論会 (電気化学会熔融塩委員会) パワーポイント、紙 (講演要旨集)	2014/11/13
7	羽田大将, 野口宏海, 夏井俊悟, 菊地竜也, 鈴木亮輔	北海道大学	CaCl <sub>2</sub> -CaO 熔融塩電解を用いた酸化物還元とアノードガス制御	電気化学会第 82 回大会ポスター (講演要旨集)	2015/3/15-17
8	Yuuki Yamada, Akihiro Kishimoto, Tetsuya Uda	京都大学	Electrodeposition Mechanism of Titanium in NaCl-KCl (Poster presentation)	Joint Symposium on Materials Science and Engineering for the Next Generation	2014/6/24
9	Yuuki Yamada, Akihiro Kishimoto, Tetsuya Uda	京都大学	Electrodeposition Mechanism of Titanium in NaCl-KCl (Poster presentation)	10th Workshop on Reactive Metal Processing	2015/3/20
10.	Shou Shimokawa, Kazuyoshi Nishikawa, Yuka Yamanaka, Taiki Morishige and Toshihide Takenaka	関西大学	Electrochemical reduction of Ti from various Ti compounds in MgF <sub>2</sub> -CaF <sub>2</sub> above 1300K	The 10th international conference on molten salt chemistry and technology (MS10) and 5th asian conference on molten salt chemistry and technology (AMS5)	2015/6/10
11.	Toshihide Takenaka, Shou Shimokawa, Kazuyoshi Nishikawa, Yuka Yamanaka and Taiki Morishige	関西大学	Influence of temperature on electrode reaction of Ti in MgF <sub>2</sub> -CaF <sub>2</sub> containing Ti oxide.	The 13th World Conference on Titanium (Ti-2015)	2015/8/16

12.	Kazuyoshi Nishikawa, Kakeru Shimokawa, Yuka Yamanaka, Taiki Morishige and Toshihide Takenaka	関西大学	Influence of electrolysis temperature on reduction of Ti in molten $\text{CaF}_2\text{-MgF}_2\text{-CaO-TiO}_2$	The 10th International Symposium in Science and Technology 2015	2015/8/31
13.	下川翔, 森重大樹, 竹中俊英	関西大学	溶融 $\text{CaCl}_2$ への $\text{CaTiO}_3$ の溶解とTiの電解還元	日本金属学会2015年度秋期大会	2015/9/16
14.	下川翔, 森重大樹, 竹中俊英	関西大学	溶融 $\text{CaCl}_2$ 浴中への $\text{CaTiO}_3$ の溶解度と温度の関係	第47回溶融塩化学討論会	2015/10/28
15.	西川和良, 森重大樹, 竹中俊英	関西大学	フッ化物溶融塩におけるTi還元反応に及ぼす電解温度の影響	第47回溶融塩化学討論会	2015/10/28
16.	Kakeru Shimokawa, Kazuyoshi Nishikawa, Taiki Morishige, Toshihide Takenaka	関西大学	Attempt at Ti electrolysis in $\text{CaCl}_2\text{-CaTiO}_3$ melt	The Twenty-Fourth International Symposium on Processing and Fabrication of Advanced Materials (PFAM XXIV)	2015/12/18
17.	竹中俊英, 森重大樹	関西大学	超高温溶融塩浴を用いたTiの電解製造	チタン製造プロセスと材料機能研究会第2回講演会	2016/1/29
18.	西川和良, 澤田郁弥, 森重大樹, 竹中俊英	関西大学	フッ化物溶融塩を用いた金属Tiの電析における電解温度の影響	電気化学会第83回大会	2016/3/29
19.	山田裕貴, 岸本章宏, 宇田哲也	京都大学(工学部)	塩化物溶融塩中におけるチタンの厚膜電析	資源・素材学会	2015/9/1
20.	宇田哲也	京都大学(工学部)	チタン製錬の革新に向けた挑戦	レアメタル研究会	2015/11/27
21.	篠原真樹, 蟻正智, 檜村京一郎, 三谷智彦	京都大学(生存圏研)	Study on Microwave Absorption Property of Metal Particles by Electromagnetic Simulation	The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem)	2015/12/15
22.	檜村京一郎, 三谷智彦, 篠原真樹	京都大学(生存圏研)	Frequency Dependence of Oxygen Emission of $\text{TiO}_{2-x}$ Particles by Microwave Heating	The 2015 International Chemical Congress of Pacific Basin Societies (Pacifichem)	2015/12/15

23.	羽田大将、北村三佳、野口宏海、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔	北海道大学	熔融塩電解を用いたCaTiO <sub>3</sub> の還元におけるZrO <sub>2</sub> 固体電解質の利用	日本鉄鋼協会第170回秋季講演大会	2015/9/16
24.	羽田大将、北村三佳、野口宏海、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔	北海道大学	CaCl <sub>2</sub> -CaO熔融塩電解によるCaTiO <sub>3</sub> の還元における固体電解質アノード	第47回熔融塩化学討論会	2015/10/28
25.	北村三佳、野口宏海、羽田大将、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔、宇田哲也	北海道大学	炭素陽極とCaCl <sub>2</sub> を用いた酸化物電解における電解電圧と脱ガス促進	第47回熔融塩化学討論会	2015/10/28
26.	Toshihide Takenaka, Kakeru Shimokawa, Kazuyoshi Nishikawa and Taiki Morishige	関西大学	Dissolution of Calcium Titanate in CaCl <sub>2</sub> Melt and Its Application to Ti Electrolysis	The 5th International Round Table on Titanium Production in Molten Salts (Ti-RT2016)	2016/7/10
27.	Kazuyoshi Nishikawa, Humiya Sawada, Taiki Morishige and Toshihide Takenaka	関西大学	Influence of cathode potential on Ti electrodeposition in molten fluoride	PRiME2016 (環太平洋電気化学会)	2016/10/2
28.	岡田晏佳, 西川和良, 森重大樹, 竹中俊英	関西大学	熔融CaCl <sub>2</sub> に添加するCa-Ti-O化合物形態がTi還元にあぼす影響	日本鉄鋼協会・日本金属学会関西支部 鉄鋼プロセス研究会・材料化学研究会	2016/12/19
29.	岡田晏佳, 下川翔, 森重大樹, 竹中俊英	関西大学	熔融CaCl <sub>2</sub> 中におけるCa-Ti-O化合物の種類によるTi還元機構の変化	電気化学会第84回大会	2017/3/25
30.	Kouhei Funatsu, Yuki Yamada, Akihiro Kishimoto, Tetsuya Uda	京都大学	Electrodeposition of Titanium in MgCl <sub>2</sub> -NaCl-KCl	RMW12 (The 12th Workshop on Reactive Metal Processing)	2017/3/3
31.	鈴木亮輔、北村三佳、野口宏海、羽田大将、夏井俊悟、菊地竜也	北海道大学	Reduction of CaTiO <sub>3</sub> in molten CaCl <sub>2</sub> - As basic understanding of electrolysis	The 5th International Round Table on Titanium Production in Molten Salts (Ti-RT2016)	2016/7/10

32.	北村三佳、野口 宏海、夏井俊悟、菊地 竜也、鈴木 亮輔	北海道大学	Observation of gas bubbles and spark flashing during electrolysis of CaO-CaCl <sub>2</sub> melt	The 5th International Round Table on Titanium Production in Molten Salts (Ti-RT2016)	2016/7/10
33.	野口 宏海、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木 亮輔	北海道大学	CaCl <sub>2</sub> -CaO溶融塩電解によるCaTiO <sub>3</sub> の還元	電気化学学会 溶融塩委員会 第48回溶融塩化学討論会	2016/11/24
34.	Haruka Okada, Kakeru Shimokawa, Taiki Morishige, Toshihide Takenaka	関西大学	Electrochemical behavior of various calcium titanate in molten CaCl <sub>2</sub>	The 6th Asian Conference on Molten Salt Chemistry	2017/6/13
35.	Ryosuke O. Suzuki, Nobuyoshi Suzuki, Yuta Yashima, Hiromi Noguchi, Shungo Natsui and Tatsuya Kikuchi	北海道大学	Titanium Fabrication via CaCl <sub>2</sub> from FeTiO <sub>3</sub>	第6回アジア溶融塩会議	2017/6/13
36	船津晃平, 山田裕貴, 岸本章宏, 宇田哲也	京都大学	溶融塩中でのTiの平滑電析と電析Tiの基板からの分離	資源・素材 & EARTH2017	2017/9/28
37	井上洋介	東邦チタニウム株式会社	東邦チタニウム㈱における最近の研究開発事例 ～NEDO:革新的新構造材料等研究開発～	チタン協会 チタン若手研究者 ・技術者交流会	2017/10/27
38	船津晃平, 山田裕貴, 岸本章宏, 宇田哲也	京都大学	溶融塩中でのTiの平滑電析と電析Tiからの剥離回収	チタン若手研究者・技術者交流会	2017/10/27
39	藤井秀樹	東邦チタニウム株式会社	チタン薄板の革新的低コスト化技術開発とチタンによる自動車部品軽量化の取り組み	モノづくり日本会議 第15回新産業技術促進検討会	2017/11/1
40	宇田哲也	京都大学	チタンの新製錬	第80回レアメタル研究会	2018/3/9
41	数土卓也、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔	北海道大学	溶融塩中で析出したLi液滴の高速顕微鏡観察*	日本金属学会2017年秋期(第161回)講演大会	2017/9/6-8

42	鈴木亮輔、高橋絵里加、野口宏海、夏井俊悟、菊地竜也	北海道大学	FeTiO <sub>3</sub> を出発原料としたCaTiO <sub>3</sub> の調製と熔融塩還元によるTi製造	一般社団法人 資源・素材学会	2017/9/26
43	Ryosuke O. Suzuki, Fumiya Matsuura, Shungo Natsui and Tatsuya Kikuchi	北海道大学	Conversion of CO <sub>2</sub> to CO gas using molten CaCl <sub>2</sub> and ZrO <sub>2</sub> anode	1st International Conference on Energy and Material Efficiency and CO <sub>2</sub> Reduction in the Steel Industry (EMECR2017)	2017/10/12
44	鈴木亮輔	北海道大学	熔融塩を用いたCO <sub>2</sub> の炭素とCOへの変換	日本エネルギー学会 天然ガス部会 科学・反応システム分科会 シンポジウム「二酸化炭素の再資源化」	2017/10/18
45	数土卓也, 夏井俊悟, 菊地竜也, 鈴木亮輔	北海道大学	熔融LiCl-KCl中で電析したLi液滴とTi酸化物との濡れ	第49回熔融塩化学討論会	2017/11/30-12/1
46	野口宏海, 鈴木亮輔, 菊地竜也, 夏井俊悟	北海道大学	CaCl <sub>2</sub> -CaO熔融塩電解によるTiO <sub>2</sub> の還元最適化	第49回熔融塩化学討論会	2017/11/30-12/1
47	金子 拓実, 夏井俊悟, 菊地竜也, 鈴木亮輔	北海道大学	熔融CaCl <sub>2</sub> -CaOと液体Bi電極を用いたBi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> の電解還元	平成29年度 日本金属学会日本鉄鋼協会両北海道支部合同冬季講演大会	2018/1/25
48	夏井俊悟、数土卓也、菊地竜也、鈴木亮輔	北海道大学	熔融CaCl <sub>2</sub> -LiCl電解におけるカソード界面と流れ	資源素材学会2018年 春季講演大会	2018/3/27-29
49	藤井秀樹	東邦チタニウム株式会社	チタン薄板の革新的低コスト化技術開発とチタンによる自動車部品軽量化の取り組み	モノづくり日本会議 第15回新産業技術促進検討会	2017/11/1
50	熊本和宏、岸本章宏、宇田哲也	京都大学	温度300℃から400℃程度のヨウ化物熔融塩中におけるチタン電解	資源・素材学会 2018 (福岡)	2018/9/12
51	熊本和宏、船津晃平、岸本章宏、宇田哲也	京都大学	中温度域におけるチタンの熔融塩平滑電析にむけた挑戦	日本金属学会2018年秋季講演大会 (日本鉄鋼協会共同セッション)	2018/9/20
52	渡辺明治、井上洋介、山口雅憲、滝千博	東邦チタニウム(株)	スポンジチタン製造用鋼製容器のFe 溶出におよぼす表層組織の影響	日本鉄鋼協会第176回 秋季講演大会 (日本金属学会共同セッション)	2018/9/20

53	鈴木大輔、中西晴香、堀川松秀、藤井秀樹	東邦チタニウム㈱	電析法による高品質チタン箔の製造	日本鉄鋼協会第176回秋季講演大会（日本金属学会共同セッション）	2018/9/20
54	鈴木大輔	東邦チタニウム㈱	電析法による高品質チタン箔の製造	チタン若手研究者・技術者交流会（日本チタン協会主催）	2018/11/2
55	渡辺明治	東邦チタニウム㈱	反応容器コーティングによるスポンジチタンのFe汚染低減	チタン若手研究者・技術者交流会（日本チタン協会主催）	2018/11/2
56	鈴木大輔	東邦チタニウム㈱	電析法による高品質チタン箔の製造	レアメタル研究会（東京大学岡部研主催）	2018/11/9
57	野口宏海、夏井俊悟、菊地竜也、鈴木亮輔	北海道大学	TiO <sub>2</sub> の電気還元による低酸素Tiの作製	第50回溶融塩委員会（電気化学会）	2018/11/15
58	宇田哲也	京都大学* 依頼講演	チタンの新製錬法の提案	2018年度日本チタン協会技術賞受賞記念講演	2018/11/20
59	宇田哲也	京都大学* 依頼講演	環境に優しい材料~新しいチタン粉とチタン箔の作り方~	平成30年度新材料・新技術利用研究会（一般社団法人生産開発科学研究所主催）	2019/2/5
60	井上洋介、山口雅憲	東邦チタニウム㈱	実機スポンジチタン製造工程におけるTiCl <sub>4</sub> のMg還元反応	日本鉄鋼協会第177回春季講演大会（日本金属学会共同セッション）	2019/3/21
61	渡辺明治、井上洋介、滝千博、山口雅憲	東邦チタニウム㈱	スポンジチタン製造用鋼製表層部に生成するTi拡散層のFe溶出抑制効果	日本鉄鋼協会第177回春季講演大会（日本金属学会共同セッション）	2019/3/21
62	鈴木大輔、中條雄太、持木靖貴、山本仁、堀川松秀、藤井秀樹	東邦チタニウム㈱	電析チタン箔の電極からの剥離性に及ぼす影響因子	日本鉄鋼協会第177回春季講演大会（日本金属学会共同セッション）	2019/3/21
63	井上洋介	東邦チタニウム㈱	Chemical Reactions during Reduction Process of TiCl <sub>4</sub> by Mg in Actual Production Vessel	The 14 <sup>th</sup> World Conference on Titanium	2019/6/14
64	渡辺明治	東邦チタニウム㈱	Effect of Microstructure of Surface Layer in Steel Vessel used for Sponge Titanium Manufacture on Fe elution	The 14 <sup>th</sup> World Conference on Titanium	2019/6/14
65	鈴木大輔	東邦チタニウム㈱	Manufacturing of high quality titanium thin foil by electrodeposition route	The 14 <sup>th</sup> World Conference on Titanium	2019/6/14

66	井上洋介	東邦チタニウム(株)	実機スポンジチタン製造容器浴面上部空間の状態におよぼす反応速度の影響	日本鉄鋼協会 第178回秋季講演大会	2019/9/11
67	中條雄太	東邦チタニウム(株)	A4寸法の高品質チタン箔の製造	日本鉄鋼協会 第178回秋季講演大会	2019/9/11
68	中西晴香	東邦チタニウム(株)	電析法による高品質チタン箔の製造	日本チタン協会 第7回チタン若手研究者・技術者交流会	2019/11/8
69	中條雄太	東邦チタニウム(株)	電析法で製造したチタン箔の電極からの剥離性	資源・素材学会 2020年 春季大会	2020/3/17

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	東邦チタニウム株式会社	素材開発最前線—強く・軽く スポンジチタン 生産性・コストで 優位性	日刊工業新聞	2016/3/22
2	新日鐵住金株式会社 東邦チタニウム株式会社	純チタン薄板の低コスト圧延	鉄鋼新聞	2017/1/24
3	新日鐵住金株式会社 東邦チタニウム株式会社	チタン薄板で新圧延法	日刊産業新聞	2017/1/25
4	新日鐵住金株式会社 東邦チタニウム株式会社	金属の逆襲「チタン—製造プロセスの革新でコスト高を払拭し用途拡大」	日経ものづくり 3月号	2017/3/01
5	北海道大学	第5回溶融塩中でのチタン製錬国際 円卓会議の報告(III)	チタン、65 [2] (2017 ) pp.120-123	2017/4/01
6	新日鐵住金(株) 東邦チタニウム(株)	工業材料の軽量化を目指したチタン材の軽量化技術の現状と展望	工業材料、65[12] (2017) pp.31-34	2017/12/1
7	新日鐵住金株式会社 東邦チタニウム株式会社	チタン材の革新的製造技術の開発	ISMA REPORT No.8	2017/9/14
8	東邦チタニウム(株) 新日鐵住金(株)	チタン薄板の革新的低コスト化技術開発とチタンによる自動車部品軽量化の取組み	自動車技術 2018 Vo 1.72 11 p.28-32	2018/11/1
9	東邦チタニウム(株) 新日鐵住金(株)	チタン薄板の革新的低コスト化技術開発	軽金属 第69巻 第1 号 (2019) p.3-8	2019/1/30
10	東邦チタニウム(株) 日本製鉄(株)	チタン薄板の革新的低コスト化技術開発	チタン Vol.68 No.1 p.64-69	2020/1/1

### (c)プレス発表

なし

### (d)その他

なし

## 1.4 展示会への出展

なし

## 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	国立大学法人京都大学 宇田哲也	チタンの新製錬法の提案	2018 年度日本チタン協会技術賞	2018/11/20

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	新日鐵住金株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	東邦チタニウム株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
3	新日鐵住金株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22
4	東邦チタニウム株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22
5	新日鐵住金株式会社 東邦チタニウム株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	講演、ポスター	2017/1/23
6	新日鐵住金株式会社 東邦チタニウム株式会社	3 府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料 (JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点 (ESISM) ・新構造材料技術研究組合 (ISMA)	ポスター	2017/6/13
7	新日鐵住金株式会社 東邦チタニウム株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 29 年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26
8	新日鐵住金株式会社 東邦チタニウム株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「平成 30 年度成果報告会」	ポスター	2019/1/21



9	日本製鉄株式会社 東邦チタニウム株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「2019年度成果報告会」	(ポスター)	2020/2/28 (中止)
10	日本製鉄株式会社 東邦チタニウム株式会社	革新的新構造材料等研究開発 「2020年度成果報告会」	講演、(ポスター)	2021/7/1

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

研究開発項目④「革新的アルミニウム材の開発」

[テーマ番号13] 高強度アルミニウム合金を用いた自動車部品の開発

(2013年度～2022年度)

表 添-4.1-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	1
2015FY	1	0	0	4	0	11	1	0	0	0	0	1
2016FY	2	0	0	3	0	8	1	1	0	0	0	2
2017FY	1	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	2
2018FY	0	0	0	4	0	5	0	0	0	1	0	1
2019FY	0	0	0	0	0	5	1	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1
2021FY	1	0	0	0	0	5	1	0	0	0	0	1
2022FY	0	0	0	1	0	2	1	0	0	2	0	2
合計	5	0	0	13	0	47	4	2	0	3	0	11

※1：Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT※	出願日	状態	名 称	発明者
1	(株) U A C J	特願 2015-176885	国内	2015/09/08	公開	構造用アルミニウム合金 板及びその製造方法	則包一成 他
2	(株) U A C J	特願 2016-104333	国内	2016/5/25	公開	構造用アルミニウム合金 板	則包一成 他
3	(株) U A C J	特願 2016-175784	国内	2016/9/8	公開	アルミニウム合金鋳塊及 びその製造方法	宇田川智史他
4	(株) U A C J	特願 2017-032153	国内	2017/2/23	公開	韌性に優れる高強度アル ミニウム合金およびその 製造方法	箕田 正 他

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Hang Su <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Kentaro Uesugi <sup>b</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>b</sup> , Nobuto Sakaguchi <sup>c</sup> , Yoshio Watanabe <sup>c</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> JASRI <sup>c</sup> UACJ	Growth behavior of hydrogen micropores in Al-Zn-Mg-Cu alloys during high temperature exposure	In proceeding in: Materials Science & Technology 2015, 1589-1593	有	2015/12
2	Md. Shahnewaz Bhuiyan <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Zhang Peng <sup>a</sup> , Su Hang <sup>a</sup> , Keitaro Horikawa <sup>b</sup> , Kentaro Uesugi <sup>c</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>c</sup> , Nobuto Sakaguchi <sup>d</sup> , Yoshio Watanabe <sup>d</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> Osaka University <sup>c</sup> JASRI <sup>d</sup> UACJ	Combined microtomography, thermal desorption spectroscopy, X-ray diffraction study of hydrogen trapping behavior in 7XXX aluminum alloys	Materials Science and Engineering A 655 (2016) 221- 228	有	2016/01
3	Md. Shahnewaz Bhuiyan <sup>a</sup> , Yuki Tada <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Su Hang <sup>a</sup> , Kentaro Uesugi <sup>b</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>b</sup> , Nobuto Sakaguchi <sup>c</sup> , Yoshio Watanabe <sup>c</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> JASRI <sup>c</sup> UACJ	Influences of hydrogen on deformation and fracture behaviors of high Zn 7XXX aluminum alloys	International Journal of Fracture (2016) 1-17	有	2016/02
4	松井功 尾村直紀 李明軍 村上雄一朗 多田周二	産総研	7075 アルミニウム合金の 水素分析に対する試料加 工条件および試料保管条 件の影響	軽金属、 66 (2016) 67	有	2016/02/28
5	Md. Shahnewaz Bhuiyan <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Zhang Peng <sup>a</sup> , Su Hang <sup>a</sup> , Keitaro Horikawa <sup>b</sup> , Kentaro Uesugi <sup>c</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>c</sup> , Nobuto Sakaguchi <sup>d</sup> , Yoshio Watanabe <sup>d</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> Osaka University <sup>c</sup> JASRI <sup>d</sup> UACJ	Corrigendum to “Combined microtomography, thermal desorption spectroscopy, X-ray diffraction study of hydrogen trapping behavior in 7XXX aluminum alloys”[Mater.Sci.Eng.A 655(2016) 221-228]	Materials Science and Engineering A 668 (2016) 271- 272	有	2016/5/4

6	Hang Su <sup>a</sup> , T Yoshimura <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Md. Shahnewaz Bhuiyan <sup>a</sup> , Kentaro Uesugi <sup>b</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>b</sup> , Yoshio Watanabe <sup>c</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> Osaka University <sup>c</sup> JASRI <sup>d</sup> UACJ	Influences of hydrogen micropores and intermetallic particles on fracture behaviors of Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys	Metallurgical and Materials Transactions 47A (2016): 6077- 6089	有	2016/9/23
7	Hang Su <sup>a</sup> , Md. Shahnewaz Bhuiyan <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Kentaro Uesugi <sup>b</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>b</sup> , Yoshio Watanabe <sup>c</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> JASRI <sup>c</sup> UACJ	Influence of intermetallic particles on initiation and growth behavior of hydrogen micropores during high temperature exposure in Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys	Scripta Materialia (accepted)	有	2017/03/13
8	松井功, 李明軍, 村 上雄一朗, 尾村直紀	産総研	大気雰囲気下での熱処理 による 7000 系アルミニウ ム合金の水素量低減	軽金属, 68 (2018), 150-151.	有	2018/03
9	森 久史 <sup>a</sup> 箕田 正 <sup>a</sup> 尾村直樹 <sup>b</sup> 兒島洋一 <sup>a</sup> 戸次洋一郎 <sup>a</sup> 渡辺良夫 <sup>a</sup> 田中宏樹 <sup>a</sup>	<sup>a</sup> UACJ <sup>b</sup> 産総研	高強度・高靱性アルミニ ウム合金の開発	軽金属, 69 (2019), 9-14.	有	2019/01
10	則包一成 藤森崇起 田中 宏樹	UACJ	高強度 Al-Zn-Mg-Cu 系 合金の組織と引張特性に 及ぼす熱間圧延時の温度 とひずみ速度の影響	軽金属, 69 (2019), 36-41.	有	2019/01
11	村上 雄一朗 李 明軍, 松井 功 尾村 直紀	産総研	往復動電磁攪拌を用いた 角形断面 7150 アルミニウ ム合金の組織微細化	軽金属, 69 (2019), 30-35.	有	2019/01
12	Hang Su, Hiroyuki Toda, Kazuyuki Shimizu	Kyushu University	Assessment of hydrogen embrittlement via image-based techniques in Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys	Acta Materialia, 176 (2019), 96- 108.	有	2019/9
13	Satoshi Miyazaki, Hisashi Mori, Hiroki Tanaka	UACJ	Measurement of Residual Stress Distribution of Aluminum Alloy Thick Plate	Materials Transactions	有	2023/2

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	木村航 久米裕二 小橋眞 金武直幸	名古屋大学	7000系 Al 合金鋳造材の組織微細化に及ぼす圧縮ねじり回転数の影響	第 65 回塑性加工連合後援会	2014/10
2	木村航 久米裕二 小橋眞 金武直幸	名古屋大学	圧縮ねじり加工による 7000 系アルミニウム合金鋳造材の組織微細化と機械的特性	軽金属学会第 127 回秋期大会	2014/11
3	佐々木勝郎 <sup>1</sup> 戸田裕之 <sup>1</sup> 坂口信人 <sup>2</sup> 渡辺良夫 <sup>2</sup> 上杉健太郎 <sup>3</sup> 竹内晃久 <sup>3</sup> 鈴木芳生 <sup>3</sup>	九州大学 *1 UACJ *2 JASRI *3	7150 アルミニウム合金の力学特性におよぼす水素マイクロポアの影響	軽金属学会第 126 回春期大会	2014/05/17
4	吉村卓郎 <sup>1</sup> 戸田裕之 <sup>1</sup> 坂口信人 <sup>2</sup> 渡辺良夫 <sup>2</sup> 上杉健太郎 <sup>3</sup> 竹内晃久 <sup>3</sup> 鈴木芳生 <sup>3</sup>	九州大学 *1 UACJ *2 JASRI *3	7150 アルミニウム合金の力学特性におよぼす水素マイクロポアの影響	日本材料学会第 63 期学術講演会	2014/05/18
5	多田雄貴 <sup>1</sup> 戸田裕之 <sup>1</sup> 坂口信人 <sup>2</sup> 渡辺良夫 <sup>2</sup> 上杉健太郎 <sup>3</sup> 竹内晃久 <sup>3</sup> 鈴木芳生 <sup>3</sup>	九州大学 *1 UACJ *2 JASRI *3	7000 系アルミニウム合金の破壊における水素マイクロポアの影響	軽金属学会第 126 回春期大会	2014/05/18
6	吉村卓郎 <sup>1</sup> 戸田裕之 <sup>1</sup> 上杉健太郎 <sup>2</sup> 鈴木芳生 <sup>2</sup> 竹内晃久 <sup>2</sup> 坂口信人 <sup>3</sup> 渡辺良夫 <sup>3</sup>	九州大学 *1 JASRI *2 UACJ *3	高 Zn7000 系合金の晶出物が損傷破壊に及ぼす影響	軽金属学会第 127 回秋期大会	2014/11/15
7	佐々木勝郎 <sup>1</sup> 戸田裕之 <sup>1</sup> 上杉健太郎 <sup>2</sup> 鈴木芳生 <sup>2</sup> 竹内晃久 <sup>2</sup>	九州大学 *1 JASRI *2	7075 アルミニウム合金における水素脆化挙動の 3D/4D 解析	軽金属学会第 127 回秋期大会	2014/11/16

8	多田雄貴 <sup>1</sup> 戸田裕之 <sup>1</sup> 坂口信人 <sup>2</sup> 渡辺良夫 <sup>2</sup> 上杉健太郎 <sup>3</sup> 竹内晃久 <sup>3</sup> 鈴木芳生 <sup>3</sup>	九州大学 *1 UACJ *2 JASRI *3	高 Zn7000 系アルミニウム合金 の破壊に対する固溶水素量の影 響	軽金属学会第 127 回秋 期大会	2014/11/16
9	細川知希 小橋 眞 金武直幸 久米裕二	名古屋大 学	圧縮ねじり加工した 7150Al 合 金の微細組織と機械的特性に及 ぼす熱処理の影響	軽金属学会 第 128 回春期大会	2015/5/16
10	細川知希 小橋 眞 金武直幸 久米裕二	名古屋大 学	7150Al 合金の機械的特性に及 ぼす熱処理前の圧縮ねじり加工 量の影響	第 66 回塑性加工 連合講演会	2015/10
11	細川知希 小橋 眞 金武直幸 久米裕二	名古屋大 学	7150Al 合金の機械的特性に及 ぼす熱処理前の圧縮ねじり加工 温度の影響	軽金属学会 第 129 回秋期大会	2015/11
12	Hang Su <sup>a</sup> Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Kentaro Uesugi <sup>b</sup> AkihisaTakeuchi <sup>b</sup> , Nobuto akaguchi <sup>c</sup> , Yoshio Watanabe <sup>c</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> JASRI <sup>c</sup> UACJ	Influence of intermetallic particles on fracture behaviors of Al-Zn- Mg-Cu alloys	The 128 <sup>th</sup> conference of Japan Institute of Light Metals, May 16-17 2015, Tohoku University	2015/5/16
13	Hang Su <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Kentaro Uesugi <sup>b</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>b</sup> , Nobuto Sakaguchi <sup>c</sup> , Yoshio Watanabe <sup>c</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> JASRI <sup>c</sup> UACJ	Growth behavior of hydrogen micropores in Al-Zn-Mg-Cu alloys during high temperature exposure	日本金属学会 2015 年 秋期 (第 157 回) 講演大会	2015/9/16
14	Hang Su <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Kentaro Uesugi <sup>b</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>b</sup> , Nobuto Sakaguchi <sup>c</sup> , Yoshio Watanabe <sup>c</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> JASRI <sup>c</sup> UACJ	Growth behavior of hydrogen micropores in Al-Zn-Mg-Cu alloys during high temperature exposure	Materials Science & Technology 2015, October 4-10 2015, Columbus, OH, USA	2015/10/4
15	Hang Su <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Kentaro Uesugi <sup>b</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>b</sup> , Nobuto Sakaguchi <sup>c</sup> , Yoshio Watanabe <sup>c</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> JASRI <sup>c</sup> UACJ	Growth behavior of hydrogen micropores in Al-Zn-Mg-Cu alloys during high temperature exposure	The 129 <sup>th</sup> conference of Japan Institute of Light Metals, November 21-22 2015, Nihon University	2015/11/21

16	Yuki Tada <sup>a</sup> , Md. Shahnewaz Bhuiyan <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Kentaro Uesugi <sup>b</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>b</sup> , Nobuto Sakaguchi <sup>c</sup> , Yoshi Watanabe <sup>c</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> JASRI <sup>c</sup> UACJ	Hydrogen assisted damage and fracture behaviors in high strength 7XXX aluminum alloys	The 129 <sup>th</sup> conference of Japan Institute of Light Metals, November 21-22 2015, Nihon University	2015/11/21
17	則包一成, 中西英貴, 坂口信人	UACJ	Al-Zn-Mg-Cu系合金圧延材の引 張性質に及ぼす集合組織の影響	軽金属学会 第128回春期大会	2015/05/16
18	則包一成, 坂口信人, 田中宏樹	UACJ	Al-Zn-Mg-Cu系合金圧延材の引 張性質・集合組織に及ぼすロー ル温度の影響	軽金属学会 第129回秋期大会	2015/11/22
19	李明軍 尾村直紀 村上雄一朗 松井功 多田周二	産総研	電磁攪拌プロセスによる 7xxx アルミニウム合金鑄造組織の微 細化	日本鑄造工学会第 166 回全国講演大会	2015/05/24
20	則包一成, 田中宏樹	UACJ	7000系合金板の機械的性質に及 ぼす溶体化処理条件の影響	第131回軽金属学会秋 期大会	2016/11/6
21	松井功, 李明軍, 村上雄一朗, 尾村直紀	国立研究 開発法人 産業技術 総合研究 所	熱処理による7075アルミニウム 合金の水素量低減とその引張特 性への影響	日本金属学会 2016年秋期講演大会	2016/9/21
22	Md. Shahnewaz Bhuiyan <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Kentaro Uesugi <sup>b</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>b</sup> , Yoshio Watanabe <sup>c</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> JASRI <sup>c</sup> UACJ	Role of hydrogen on crack propagation behavior in 7XXX aluminum alloys	130th conference of Japan Institute of Light Metals	2016/5/28
23	Hang Su <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Ryohei Masunaga <sup>a</sup> , Kentaro Uesugi <sup>b</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>b</sup> , Yoshio Watanabe <sup>c</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> JASRI <sup>c</sup> UACJ	3D strain mapping applied to hydrogen embrittlement in Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys	9th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM9)	2016/8/1
24	Md. Shahnewaz Bhuiyan <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Kentaro Uesugi <sup>b</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>b</sup> , Nobuto Sakaguchi <sup>c</sup> ,	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> JASRI <sup>c</sup> UACJ	Influence of Hydrogen on Crack Propagation Behavior in 7XXX Aluminum Alloys	2016 International Hydrogen Conference	2016/09/11

25	Hang Su <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Ryohei Masunaga <sup>a</sup> , Kentaro Uesugi <sup>b</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>b</sup> , Yoshio Watanabe <sup>c</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> JASRI <sup>c</sup> UACJ	3D strain mapping applied to hydrogen embrittlement in Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys	Japan Society of Mechanical Engineers M&M 2016 Material Mechanics Conference	2016/10/8
26	Hang Su <sup>a</sup> , Hiroyuki Toda <sup>a</sup> , Ryohei Masunaga <sup>a</sup> , Kentaro Uesugi <sup>b</sup> , Akihisa Takeuchi <sup>b</sup> , Yoshio Watanabe <sup>c</sup>	<sup>a</sup> Kyushu University <sup>b</sup> JASRI <sup>c</sup> UACJ	3D strain mapping applied to hydrogen embrittlement in Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys	IUMRS-ICA 2016	2016/10/20
27	松井功 李明軍 村上雄一朗 尾村直紀	産総研	熱処理による 7075 アルミニウム合金の水素量低減とその引張特性への影響	日本金属学会 2016 年 秋期講演大会	2016/09/21
28	林稔	UACJ	航空機用高強度・高靱性アルミニウム合金の開発	平成 29 年度第 2 回技術情報交換会 (先端材料技術協会 ; SAMPE)	2017/09/28
29	菅野能昌 宇田川智史	UACJ	連続ねじり加工を利用した高強度アルミニウム合金の開発	軽金属学会 第 133 回 秋期大会	2017/11/05
30	尾村直紀	産総研	アルミニウム合金の高強度・高靱化	本多光太郎・湯川記念 合同講演会	2018/10/1
31	小島峻玖 久米裕二	山形大学	7000 系 Al 合金鍛錬押出材の熱処理後の伸びの変化	第 26 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2018)	2018/11/4
32	村上雄一朗	産総研	凝固技術によるアルミニウムの組織制御	軽量構造材料シンポジウム	2018/12/3
33	箕田正	UACJ	高強度高靱性アルミニウム合金の開発 (基調講演)	国際ナノテクノロジー 総合展・技術会議 (nano tech 2019)	2019/1/31
34	戸次洋一郎	UACJ	高強度高靱性アルミニウム合金の開発 (招待講演)	「第 8 回次世代ものづくり基盤技術産業展 (TECH Biz EXPO 2019)」	2019/2/6
35	宮崎悟 森久史 田中宏樹	UACJ	残留応力測定技術開発	軽金属学会 第 136 回 春期大会	2019/5/11
36	菅野能昌 三原麻末	UACJ	次世代航空機用高強度 7000 系アルミニウム合金の開発	軽金属学会 第 136 回 春期大会	2019/5/11
37	村上雄一朗 李明軍 松井功 尾村直紀	産総研	電磁攪拌を用いた矩形断面 7150 アルミニウム合金鑄塊の組織微細化	鑄造工学会 (第 174 回 全国講演大会)	2019/9/28



38	戸次洋一郎	UACJ	航空機用系金属材料	第 112 回シンポジウム 「今後の航空機産業における軽金属材料の役割」	2019/9/13
39	村上雄一朗	産総研	高強度・高靱性アルミニウム合金開発	日本鑄造工学会東海支部 鑄造先端プロセス研究部会	2020/2/21
40	千葉龍平 久米裕二	山形大学	温度とひずみ速度を考慮した端面拘束圧縮試験を用いた GMT モデルの同定	2020 年度塑性加工学会 東北・北海道支部 若手研究発表会	2020/12/15
41	箕田 正 戸次 洋一郎 宮崎 悟	UACJ	高強度・高靱性アルミニウム合金の開発	自動車技術会 2021 年春季大会	2021/5/27
42	箕田 正	UACJ	航空機向け高強度・高靱性アルミニウム合金の開発	SAMPE 例会	2021/7/30
43	阿部英司 <sup>a b</sup> 江草大佑 <sup>a</sup> 青木義雄 <sup>a</sup> 愛須優輝 <sup>c</sup> 箕田正 <sup>c</sup>	東京大学 <sup>a</sup> 物質材料 機構 <sup>b</sup> UACJ <sup>c</sup>	Al-Mg-Sc-Zr 合金押出材における溶質クラスタの形成挙動	軽金属学会第 141 回秋期大会	2021/11/13
44	愛須優輝 箕田正	UACJ	Al-Mg 合金押出材の Sc, Zr 添加による高強度化	軽金属学会第 141 回秋期大会	2021/11/13
45	千葉龍平 久米裕二	山形大学	端面拘束圧縮試験を用いた 7150 アルミニウム合金鑄造まま材の変形抵抗測定	軽金属学会第 141 回秋期大会	2021/11/14
46	箕田正	UACJ	輸送機用アルミニウム材料の開発動向	NEDO「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトシンポジウム	2021/12/3
47	阿部英司 <sup>a b</sup> 江草大佑 <sup>a</sup> 青木義雄 <sup>a</sup> 木下亮平 <sup>a</sup> 佐々木泰祐 <sup>a</sup> 愛須優輝 <sup>c</sup> 箕田正 <sup>c</sup>	東京大学 <sup>a</sup> 物質材料 機構 <sup>b</sup> UACJ <sup>c</sup>	Effect of Mg on precipitation behavior of Al-Mg-Sc-Zr alloy	ICAA18	2022/9/5-8
48	Satoshi Miyazaki Hisashi Mori Hiroki Tanaka	UACJ	Measurement of Residual Stress Distribution of Aluminum Alloy Thick Plate	ICAA18	2022/9/5-8

**(b)新聞・雑誌等への掲載**

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	UACJ	特集 金属の逆襲 素材で攻める -アルミニウム-	日経ものづくり	2017/03/01
2	UACJ	高強度・高靱性アルミニウム合金の開発	アグネ 雑誌「金属」	2019/07
3	UACJ	高強度アルミニウム合金を用いた自動車部品の開発	アルミニウム	2021/5/30

4	UACJ	軽量自動車部品用アルミニウム合金の開発	表面技術	2022/8
---	------	---------------------	------	--------

### (c)プレス発表

番号	所属	タイトル	発表形式	発表年月
1	UACJ	ISMA Report 【特集】高強度・高靱性アルミニウム合金の開発 —航空機の軽量化に挑む—	WEB 掲載	2016/12
2	リナシメタリ	(ニュースレター) リナシメタリ、アルミニウム用結晶制御装置 直径95mmの棒材対応	日刊工業新聞社	2020/7/13

### (d)その他

なし

### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	UACJ	国際ナノテクノロジー総合展・技術会議 (nano tech 2019)	パネル、プレゼン	2019/01/27 ~ 02/01
2	UACJ	第15回 オートモーティブワールド2023	試作品展示	2023/1/25~27
3	UACJ	国際ナノテクノロジー総合展・技術会議 (nano tech 2023)	試作品展示	2023/02/1~3

### 1.5 受賞

なし

### 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	UACJ	革新的新構造材料等研究開発「平成26年度成果報告会」	ポスター	2015/01/20
2	UACJ	革新的新構造材料等研究開発「平成27年度成果報告会」	講演・ポスター	2016/1/22
3	UACJ	第66回塑性加工技術フォーラム	講演	2016/6/28
4	UACJ	革新的新構造材料等研究開発「平成28年度成果報告会」	講演・ポスター	2017/1/23

5	UACJ	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
6	UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「平成29年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26
7	UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「平成30年度成果報告会」	ポスター	2019/1/21
8	UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「2019年度成果報告会」	(ポスター、講演)	2020/2/28 (中止)
9	UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「平成2020年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2021/7/1
10	UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「平成2021年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/1/31
11	UACJ	自動車技術会フォーラム 2022	講演	2022/7/13
12	UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号14] アルミニウム材新製造プロセス技術開発  
(2014年度～2022年度)

表 添-4.2-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	1	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	1
2016FY	5	4	1	0	0	6	0	0	0	0	0	1
2017FY	4	2	3	1	0	5	0	0	0	0	1	2
2018FY	2	0	0	1	1	3	0	0	0	0	0	1
2019FY	0	0	0	0	1	7	0	0	1	0	0	0
2020FY	0	0	0	2	0	3	0	0	0	0	0	1
2021FY	0	0	0	1	0	7	2	0	0	0	0	1
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
合計	12	6	4	6	2	32	2	0	1	0	1	9

※1：Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

### 1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT ※	出願日	状態	名 称	発明者
1	株式会社 UACJ	特願 2015-175244	国内	2015/9/5	登録	アルミニウム箔の製造 方法および製造装置	本川幸翁、布 村順司、児島 洋一
2	株式会社 UACJ	特願 2016-159099	国内	2016/8/15	登録	電解アルミニウム箔の 製造方法	布村順司、本 川幸翁、児島 洋一
3	株式会社 UACJ	特願 2016-161611	国内	2016/8/22	公開	結晶性の電解Al-M n合金箔及びその製造 方法	布村順司、本 川幸翁、児島 洋一
4	株式会社 UACJ	PCT/JP2016- 075874	PCT	2016/9/2	各国 移行	METHOD FOR PRODUCING ALUMINUM	Yukio Honkawa、 Junji Nunomura、 Yoichi Kojima

5	株式会社 UACJ	201680010478.X	外国	2016/9/2	登録	METHOD FOR PRODUCING ALUMINUM	Yukio Honkawa、 Junji Nunomura、 Yoichi Kojima
6	株式会社 UACJ	16842021.4	外国	2016/9/2	登録	METHOD FOR PRODUCING ALUMINUM	Yukio Honkawa、 Junji Nunomura、 Yoichi Kojima
7	株式会社 UACJ	15/825794	外国	2016/9/2	登録	METHOD FOR PRODUCING ALUMINUM	Yukio Honkawa、 Junji Nunomura、 Yoichi Kojima
8	株式会社 UACJ	10-2017-7027654	外国	2016/9/2	登録	METHOD FOR PRODUCING ALUMINUM	Yukio Honkawa、 Junji Nunomura、 Yoichi Kojima
9	株式会社 UACJ	特願 2016-223833	国内	2016/11/17	登録	アルミニウムめっき用 電解液及びアルミニウ ムの製造方法	布村順司、本 川幸翁、兒島 洋一、上田幹 人
10	株式会社 UACJ	特願 2016-226650	国内	2016/11/22	登録	電解アルミニウム箔及 びその製造方法	本川幸翁、布 村順司、兒島 洋一、宇井幸 一
11	株式会社 UACJ	特願 2016-244562	国内	2016/12/16	登録	アルミニウムの製造方 法および製造装置	本川幸翁、布 村順司、兒島 洋一
12	株式会社 UACJ	PCT/JP2017/041916	PCT	2017/11/22	各国 移行	ELECTROLYTIC ALUMINUM FOIL AND METHOD OF MANUFACTURING SAME	Yukio Honkawa、 Junji Nunomura、 Yoichi Kojima、 Koichi Ui
13	株式会社 UACJ	特願 2018-021176	国内	2018/2/8	登録	アルミニウム箔の製造 方法および製造装置	布村順司、本 川幸翁、兒島 洋一、宇井幸 一
14	株式会社 UACJ	特願 2018-523826	国内	2018/2/9	登録	アルミニウムの製造方 法	布村順司、本 川幸翁、兒島 洋一、上田幹 人

15	株式会社 UACJ	PCT/JP2018/004511	PCT	2018/2/9	各国 移行	METHOD PRODUCING ALUMINUM	FOR	Junji Nunomura、 Yukio Honkawa、 Yoichi Kojima、 Mikito Ueda
16	株式会社 UACJ	特願 2018-048389	国内	2018/3/15	登録	電解アルミニウム箔の 製造方法及び製造装置		布村順司、本 川幸翁、兒島 洋一、平藤哲 司、三宅正男
17	株式会社 UACJ	特願 2018-048390	国内	2018/3/15	登録	電解アルミニウム箔の 製造方法及び製造装置		布村順司、本 川幸翁、兒島 洋一、上田幹 人
18	株式会社 UACJ	特願 2018-201121	国内	2018/10/25	登録	水和物を用いたアルミ ニウムの製造方法		布村順司、本 川幸翁、兒島 洋一、上田幹 人

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Tetsuya Tsuda、Yuichi Ikeda、Akihito Imanishi、Shohei Kusumoto、Susumu Kuwabata、Gery R. Stafford、and Charles L. Hussey	Osaka University、National Institute of Standards and Technology、and The University of Mississippi	Electrodeposition of Al-W-Mn Ternary Alloys from the Lewis Acidic Aluminum Chloride-1-Ethyl-3-methylimidazolium Chloride Ionic Liquid	Journal of The Electrochemical Society、 162、 D405-D411 (2015).	有	2015/9/1
2	Tetsuya Tsuda、Gery R. Stafford、and Charles L. Hussey	Osaka University、National Institute of Standards and Technology、and The University of Mississippi	Electrochemical Surface Finishing and Energy Storage Technology with Room-Temperature Haloaluminate Ionic Liquids and Mixtures	Journal of the Electrochemical Society、 164、 H5007-H5017 (2017).	有	2017/8
3	渋江和久	UACJ	(株)UACJの高機能アルミニウム材料開発と将来展望	水曜会誌、 25、 3、 2019	無	2018/10/31
4	兒島洋一、津田哲哉、宇井幸一、上田幹人、三宅正男	UACJ、大阪大学、岩手大学、北海道大学、京都大学	アルミニウム材新製造プロセス技術開発	軽金属、 69、 15、 2019	有	2019/1/30
5	兒島洋一、布村順司、津田哲哉、宇井幸一、上田幹人、三宅正男	UACJ、大阪大学、岩手大学、北海道大学、京都大学	アルミニウム材新製造プロセス技術開発	UACJ Technical Reports、 6、 1、 2019	無	2020/3/31
6	宇井幸一、小林哲士、竹口竜弥、津田哲哉、上田幹人、布村順司、本川幸翁、兒島洋一	岩手大学、大阪大学、北海道大学、UACJ	Investigation on Operating Conditions Influencing the Aluminum Electrolysis Using Chloroaluminate Ionic Liquids	ECS Transactions	有	2020/9/22

7	津田哲哉、細矢 佳、上田幹人、宇井幸一、三宅正男、布村順司、大谷良行、兒島洋一	大阪大学、岩手大学、北海道大学、京都大学、UACJ	イオン液体を用いたアルミニウム電解精製	電気化学	有	2021/3
8	Koichi Ui、Satoshi Kobayashi、Tatsuya Takeguchi、Tetsuya Tsuda、Yukio Honkawa、Jyunji Nunomura、and Yoichi Kojima	Iwate University、Osaka University、Hokkaido University、UACJ Corporation	Influence of Operating Conditions on Deposition Rate and Smoothness of Electrolytic Aluminum Foil Using Chloroaluminate Ionic Liquids	Journal of the Electrochemical Society	有	2021/5/12

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	松井郷、津田哲哉、桑畑進	大阪大学	AlCl <sub>3</sub> -[C <sub>2</sub> mim]Cl室温溶融塩中でのNbイオンの電気化学的反応解析とそのAl-Nb合金電析への応用	第47回溶融塩化学討論会	2015/10/29
2	松井郷、津田哲哉、桑畑進	大阪大学	AlCl <sub>3</sub> -[C <sub>2</sub> mim]Cl室温溶融塩からのAl-Nb合金電析	電気化学会第83回大会	2016/3/29
3	上田幹人、佐藤壱樹、松島永佳	北海道大学	Electrodeposition of Al-W alloys in AlCl <sub>3</sub> -NaCl-KCl molten salt containing WCl <sub>4</sub>	PRiME2016 (molten & ionic liquid 20)	2016/10/3
4	布村順司、本川幸翁、小山高弘、兒島洋一	UACJ	イオン液体電析法により作製した電解Al-Mn合金箔中のMn含有量が膜質に及ぼす影響	軽金属学会 第131回秋期大会	2016/11/6
5	亀本蓮実、津田哲哉、桑畑進	大阪大学	AlCl <sub>3</sub> -[C <sub>2</sub> mim]Cl室温溶融塩中からのAl-Ta合金電析	第48回溶融塩化学討論会	2016/11/25



6	宇井幸一、小林哲士、十和田潤、松友愛香莉、竹口竜弥、津田哲哉、本川幸翁、布村順司、兒島洋一	岩手大学、UACJ	AlCl <sub>3</sub> -EMIC浴を用いる電解Alの性状に及ぼす電解温度の影響	第48回溶融塩化学討論会	2016/11/25
7	上田幹人、東泰平、松島永佳	北海道大学	AlCl <sub>3</sub> ・6H <sub>2</sub> O水溶液から疎水性イオン液体に抽出されたAlイオンの電気化学挙動	電気化学会第84回大会	2017/3/25
8	宇井幸一、小林哲士、十和田潤、松友愛香莉、竹口竜弥、津田哲哉、本川幸翁、布村順司、兒島洋一	岩手大学、大阪大学、UACJ	AlCl <sub>3</sub> -EMIC浴を用いる電解Alの性状に及ぼす添加剤の影響	電気化学会第84回大会	2017/3/26
9	津田哲哉	大阪大学	イオン液体を使用した電気めっき	電気鍍金研究会依頼講演	2017/9/13
10	Koichi Ui、Satoshi Kobayashi、Tatsuya Takeguchi、Tetsuya Tsuda、Yukio Honkawa、Jyunji Nunomura、and Yoichi Kojima	Iwate Univ.、Osaka Univ.、UACJ Corp. Ltd.	Influence of Electrolytic Conditions on Properties of Electrolytic Aluminum Foil Using AlCl <sub>3</sub> -EMIC Melt	化学系学協会東北大会	2017/9/15
11	宇井幸一、小林哲士、万代俊彦、竹口竜弥、津田哲哉、本川幸翁、布村順司、兒島洋一	岩手大学、大阪大学、UACJ	AlCl <sub>3</sub> -EMIC浴を用いる電解Al箔の平滑性に及ぼす電解条件の影響	第34回ARS松島コンファレンス	2017/10/30
12	宇井幸一、小林哲士、万代俊彦、竹口竜弥、津田哲哉、本川幸翁、布村順司、兒島洋一	岩手大学、大阪大学、UACJ	AlCl <sub>3</sub> -EMIC浴を用いる電解Al箔の成膜速度に及ぼす電解条件の影響	第49回溶融塩化学討論会	2017/12/1

13	宇井幸一、小林哲士、万代俊彦、竹口竜弥、津田哲哉、本川幸翁、布村順司、兒島洋一	岩手大学、大阪大学、UACJ	パルス電解によるAlCl <sub>3</sub> -EMIC浴からの電解Al箔の作製	電気化学会第85回大会	2018/3/9
14	東泰平、松島永佳、上田幹人、布村順司、本川幸翁、大谷良行、兒島洋一	北海道大学、UACJ	Al(Tf <sub>2</sub> N) <sub>3</sub> ・6H <sub>2</sub> Oを溶解させた各種有機溶媒中における水の挙動	第50回溶融塩化学討論会	2018/11/14
15	宇井幸一、小林哲士、藤島凌、万代俊彦、竹口竜弥、津田哲哉、本川幸翁、布村順司、兒島洋一	岩手大学、大阪大学、UACJ	AlCl <sub>3</sub> -EMIC浴を用いる電解Al箔の性状に及ぼすパルス電解条件の影響	第50回溶融塩化学討論会	2018/11/14
16	宇井幸一、河野充、小林哲士、万代俊彦、竹口竜弥、津田哲哉、本川幸翁、布村順司、大谷良行、兒島洋一	岩手大学、大阪大学、UACJ	パルス電解によるAlCl <sub>3</sub> -EMIC浴からの電解Al箔の作製-添加剤の影響-	電気化学会第86回大会	2019/3/27
17	宇井幸一、小林哲士、万代俊彦、竹口竜弥、津田哲哉、布村順司、本川幸翁、兒島洋一	岩手大学、大阪大学、UACJ	Effect of Addition of 1, 10-phenanthroline to AlCl <sub>3</sub> -EMIC Melt on Surface Smoothness of Electrolytic Aluminum Foil	11th International Symposium on Molten Salts Chemistry and Technology	2019/5/21
18	宇井幸一、河野充、小林哲士、竹口竜弥、津田哲哉、本川幸翁、布村順司、大谷良行、兒島洋一	岩手大学、大阪大学、UACJ	Effect of Additives on Preparation of Electrolytic Aluminum Foil Using Pulse electrolysis	2019年度化学系学協会東北大会	2019/9/22
19	宇井幸一、小林哲士、万代俊彦、竹口竜弥、津田哲哉、上田幹人、布村順司、本川幸翁、兒島洋一	岩手大学、大阪大学、北海道大学、UACJ	Influence of Electrolytic Condition on Surface Smoothness of Electrolytic Aluminum Foil from AlCl <sub>3</sub> -EMIC Melt	236th ECS Meeting	2019/10/14

20	宇井幸一、河野充、小林哲士、竹口竜弥、津田哲哉、布村順司、大谷良行、兒島洋一	岩手大学、大阪大学、UACJ	AlCl <sub>3</sub> -EMIC浴を用いる電解Al箔の析出形態に及ぼす添加剤の影響	第51回溶融塩化学討論会	2019/10/24
21	宇井幸一、小林哲士、竹口竜弥、津田哲哉、布村順司、本川幸翁、兒島洋一	岩手大学、大阪大学、株式会社UACJ	Investigation on Parameters Influencing the Aluminum Electrolysis using Chloroaluminate Ionic Liquids	10th Asian Conference on Electrochemical Power Sources (ACEPS10-2019)	2019/11/27
22	宇井幸一、小林哲士、竹口竜弥、津田哲哉、上田幹人、布村順司、大谷良行、兒島洋一	岩手大学、大阪大学、北海道大学、UACJ	Investigation on Operating Conditions Influencing the Aluminum Electrolysis Using Chloroaluminate Ionic Liquids	PRiME 2020 (ECS, ECSJ, & KECS Joint Meeting)	2020/10/7
23	布村順司	UACJ	アルミニウム製錬の現状と課題	第2回SPERCイオン液体講演会	2020/1/14
24	大宅翔貴、大谷真理、松島永佳、上田幹人、布村順司、大谷良行、兒島洋一	北海道大学、UACJ	AlCl <sub>3</sub> -NaCl-KCl溶融塩におけるアルミニウム合金鋳物材のアノード溶解挙動	電気化学会第88回大会	2021/03/23
25	津田哲哉	大阪大学	塩化アルミニウム系イオン液体の電気化学	電気化学会第88回大会	2021/3/24
26	大宅翔貴、松島永佳、上田幹人、布村順司、大谷良行、兒島洋一	北海道大学、UACJ	Al鋳物材の塩化物溶融塩へのアノード溶解における表面変化	2021年電気化学会秋季大会	2021/9/8
27	宇井幸一、小林哲士、佐々木邦明、竹口竜弥、津田哲哉、上田幹人、布村順司、本川幸翁、兒島洋一	岩手大学、大阪大学、北海道大学、UACJ	Influence of Pulse Electrolytic Conditions on Properties of Electrolytic Aluminum Foil Using Chloroaluminate Ionic Liquids	240th ECS Meeting	2021/10/12
28	大宅翔貴、松島永佳、上田幹人、布村順司、大谷良行、兒島洋一	北海道大学、UACJ	各種Al-Si合金の溶融塩電解精製におけるアノード表面の溶解挙動	第53回溶融塩化学討論会・電気化学会溶融塩委員会	2021/11/18

29	布村順司、松島永佳、上田幹人、京良彦、兒島洋一	UACJ、北海道大学	Al-Cu二元系合金のEmImCl-AICl <sub>3</sub> イオン液体中でのアノード溶解挙動	2021年電気化学会89回大会	2022/3/17
30	津田哲哉	大阪大学	イオン液体の電気化学でSDGsに貢献する	「熔融塩技術事業化研究会」2021年度 第4回研究会（依頼講演）	2021/7/14
31	津田哲哉	大阪大学	アルミニウム錯アニオンの電気化学的還元反応を利用した金属アルミニウム析出	2021年関西表面技術シンポジウム（依頼講演）	2021/8/30
32	津田哲哉	大阪大学	イオン液体を用いたアルミニウム電解プロセス	日本実験力学会 マテリアル反応工学分科会 主催 令和3年度 第1回講演会（依頼講演）	2022/3/8

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月	
1	UACJ	UACJ と大阪大、アルミスクラップからアルミ地金に精錬する技術開発成果を発表	<a href="https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220203-2264236/">https://news.mynavi.jp/techplus/article/20220203-2264236/</a>	2022/2/3	
2	UACJ	UACJ と大阪大、アルミスクラップからアルミ地金に精錬する技術開発成果を発表（記事の内容自体は上記と同じ）	<a href="https://news.yahoo.co.jp/articles/17a733689465cbb4cb013fe67e82774cc9ec1276">https://news.yahoo.co.jp/articles/17a733689465cbb4cb013fe67e82774cc9ec1276</a>	2022/2/5	

### (c)プレス発表

なし

### (d)その他

番号	所属・著者等	タイトル	形式、媒体等	発表年月
1	岩手大学 竹口竜弥、宇井幸一	Al 材製造電解	令和元年度オープンキャンパスに係る岩手大学「研究室公開案内冊子」	2019/8/7

### 1.4 展示会への出展

なし

## 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	Iwate Univ., Osaka Univ., UACJ Corp. Ltd.	Influence of Electrolytic Conditions on Properties of Electrolytic Aluminum Foil Using AlCl <sub>3</sub> -EMIC Melt	平成 29 年度化学系学協会東北大会 優秀ポスター賞	2017/9/17

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	株式会社 UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	株式会社 UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22
3	株式会社 UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	ポスター、発表	2017/1/23
4	株式会社 UACJ	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
5	株式会社 UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「平成29年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26
6	株式会社 UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「平成30年度成果報告会」	ポスター	2019/1/21
7	株式会社 UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「2019年度成果報告会」	(ポスター)	2020/2/28 (中止)
8	株式会社 UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「2020年度成果報告会」	(ポスター)、発表	2021/7/1
9	株式会社 UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	(ポスター)、発表	2022/1/31
10	株式会社 UACJ	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	(ポスター)、発表	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号21] 複層アルミ合金の開発 (2014年度～2018年度)

[テーマ番号02] 残留γ相制御中高炭素鋼板の異種・同種材料接合技術の開発のうち「⑫複層アルミの合金設計、組織解析・制御技術の開発」および「⑬ヘテロ界面微細組織解析技術の構築」(2019年度～2020年度)

表 添-4.3-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	3	0	2	0	0	5	0	0	2	0	0	1
2016FY	1	4	1	0	0	4	0	0	1	0	1	1
2017FY	1	2	0	0	0	5	1	0	2	0	0	2
2018FY	0	0	0	1	0	1	0	0	2	0	0	1
2019FY	0	0	0	1	0	4	0	0	1	0	0	0
2020FY	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
合計	10	6	3	3	0	20	1	0	8	0	1	6

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT ※	出願日	状態	名 称	発明者
1	(株) 神戸製 鋼所	特願 2015-036717	国内	2015/02/26	公開	クラッド材	前田恭志
2	(株) 神戸製 鋼所	特願 2015-036718	国内	2015/02/26	登録	クラッド板材の圧延方 法	前田恭志
3	(株) 神戸製 鋼所	特願 2015-063100	国内	2015/03/26	公開	アルミニウム合金ク ラッド板およびアルミ ニウム合金クラッド構 造部材	松本克史他

4	(株) 神戸製 鋼所	特願 2015-063101	国内	2015/03/26	登録	アルミニウム合金ク ラッド板およびアルミ ニウム合金クラッド構 造部材	佐藤和史他
5	(株) 神戸製 鋼所	特願 2015-227581	国内	2015/11/20	公開	アルミニウム合金ク ラッド板およびアルミ ニウム合金クラッド構 造部材	松本克史他
6	(株) 神戸製 鋼所	特願 2015-227582	国内	2015/11/20	登録	アルミニウム合金ク ラッド板およびアルミ ニウム合金クラッド構 造部材	佐藤和史他
7	(株) 神戸製 鋼所	特願 2016-043262	国内	2016/03/07	公開	アルミニウム合金ク ラッド板およびアルミ ニウム合金クラッド構 造部材	佐藤和史他
8	(株) 神戸製 鋼所	PCT/JP2016/059275	PCT	2016/03/23	各国移 行	アルミニウム合金ク ラッド板およびアルミ ニウム合金クラッド構 造部材	松本克史他
9	(株) 神戸製 鋼所	PCT/JP2016/059425	PCT	2016/03/24	各国移 行 米 国 、 中 国 登 録	アルミニウム合金ク ラッド板およびアルミ ニウム合金クラッド構 造部材	佐藤和史他
10	(株) 神戸製 鋼所	PCT/JP2017/008918	PCT	2017/03/07	公開	アルミニウム合金ク ラッド板およびアルミ ニウム合金クラッド構 造部材	佐藤和史他
11	(株) 神戸製 鋼所	特願 2021-110753	国内	2021/7/2	公開	アルミニウム合金ク ラッド板及びアルミニ ウム合金クラッド構造 部材	松本克史

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	佐藤和史、松本克史、奥田浩司	株式会社神戸製鋼所、京都大学	Mechanical properties and nanostructure of multi-layered Al-Zn-Mg alloy with compositional gradient	Materials Transactions 60 (2) 254-262	有	2019/01/25
2	林杉、東野行広、奥田浩司、佐藤和史、松本克史	京都大学、株式会社神戸製鋼所	Microstructure analysis of graded interface layers in a model multilayer Al/Al-Zn/Al sample by scanning microbeam small-angle X-ray scattering measurements	Materials Transactions 61 (2) 300-304	有	2020/01/25
3	林杉、奥田浩司、山口真弘、佐藤和史、松本克史	京都大学、株式会社神戸製鋼所	Nanostructure distribution and strengthening mechanisms in the interface regions of Al-Zn/Al-Mg multilayered composites	Materials Transactions 62 (5) 603-609	有	2021/03/26

## 1.3 その他外部発表

### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	奥田浩司、林杉、東野行広、北原周、常石英雅、佐藤和史、宍戸久郎、松本克史	京都大学、株式会社コベルコ科研、株式会社神戸製鋼所	マイクロビーム X線小角散乱/蛍光同時測定による Al-Zn 合金組成傾斜領域の組織分布解析	日本金属学会 2015 年秋期 (第 157 回) 講演大会	2015/09/16
2	佐藤和史、松本克史、奥田浩司	株式会社神戸製鋼所、京都大学	Al-Mg/Al-Zn クラッド材の熱処理による濃度分布および特性変化	軽金属学会 第 129 回秋期大会	2015/11/21
3	奥田浩司、林杉、東野行広、佐藤和史、松本克史	京都大学、株式会社神戸製鋼所	走査マイクロビーム小角散乱法による Al-Zn 多層熱処理材中の組織分布状態の定量化	若手研究者・院生による研究発表会 (軽金属学会関西支部)	2015/12/16



4	奥田浩司、林杉、東野行広、佐藤和史、松本克史	京都大学、株式会社神戸製鋼所	Al-Zn/Al 積層材の組成傾斜領域の組織分布の詳細解析	日本金属学会 2016 年春期（第 158 回）講演大会	2016/03/25
5	佐藤和史、松本克史、奥田浩司	株式会社神戸製鋼所、京都大学	超々ジュラルミン系複層材のマイクロビーム小角散乱法による評価	PF 研究会	2016/03/31
6	前田恭志、岩崎慎、藤井康之	株式会社神戸製鋼所	アルミ合金を用いたフレキシブルテーラードブランクの開発	平成 28 年度塑性加工春季講演会	2016/05/22
7	佐藤和史、松本克史、奥田浩司	株式会社神戸製鋼所、京都大学	Effects of diffusion annealing and artificial aging conditions on mechanical properties in Al-Zn-Mg alloys with laminated structure	The 15 <sup>th</sup> International Conference on Aluminum Alloys	2016/06/14
8	林杉、奥田浩司、松本克史、山口真弘、佐藤和史	京都大学、株式会社神戸製鋼所、株式会社コベルコ科研	Al-Zn 合金積層材料における組成傾斜領域のナノ組織分布及び特性との関係	日本金属学会 2016 年秋季（第 159 回）講演大会	2016/09/22
9	林杉、奥田浩司、松本克史、山口真弘、佐藤和史	京都大学、株式会社神戸製鋼所、株式会社コベルコ科研	組成傾斜領域をもつ Al 合金中のナノ組織分布の可視化と特性	若手研究者・院生による研究発表会（軽金属学会関西支部）	2016/12/21
10	有賀康博	株式会社神戸製鋼所	Advanced metallurgical and surface treatment technologies for aluminum body structure	Automotive Circle Conference –Materials in car body engineering 2017-	2017/05/17
11	前田恭志	株式会社神戸製鋼所	アルミ合金を用いたフレキシブルテーラードブランクの開発	日本鉄鋼協会生産技術部門 第 146 回圧延理論部会	2017/07/12
12	前田恭志	株式会社神戸製鋼所	アルミ合金を用いたフレキシブルテーラードブランクの開発	日本塑性加工学会 圧延工学分科会第 126 回研究会	2017/07/21
13	前田恭志	株式会社神戸製鋼所	Development of Flexible-Tailored Aluminum Sheet	12th International Conference on Technology of Plasticity	2017/09/19
14	山口真弘、三宅乾太、松本克史、奥田浩司	株式会社神戸製鋼所、京都大学	Al-Zn-Mg 系クラッド材の機械的性質に及ぼす Cu 添加の影響	軽金属学会第 133 回秋期大会	2017/11/05

15	松本克史	株式会社 神戸製鋼所	複層アルミ合金の開発	モノづくり日本会議プログラム NEDO「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトシンポジウム	2018/10/17
16	林杉、東野行広、奥田浩司、佐藤和史、松本克史	京都大学、株式会社神戸製鋼所	Al/Al-Zn 粗結晶積層材料の組成傾斜領域における組織解析	日本金属学会 2019 年秋期（第 165 回）講演大会	2019/09/12
17	林杉、奥田浩司、松本克史	京都大学、株式会社神戸製鋼所	アルミニウム複合線材中のナノ組織分布のトモグラフィーによる解析法の検討	若手研究者・院生による研究発表会（軽金属学会関西支部）	2019/12/23
18	林杉、東野行広、奥田浩司、佐藤和史、松本克史	京都大学、株式会社神戸製鋼所	Microstructure analysis of graded interface layers in a model multilayer Al/Al-Zn/Al by scanning microbeam small-angle X-ray scattering measurements	TMS 2020 Annual Meeting & Exhibition	2020/02/23
19	林杉、奥田浩司、西川幸宏、松本克史	京都大学、京都工繊大学、株式会社神戸製鋼所	アルミニウム複合線材中のナノ組織分布のトモグラフィーによる解析法の検討	日本金属学会 2020 年春期（第 166 回）講演大会	2020/03/19
20	林杉、奥田浩司、山口真弘、佐藤和史、松本克史	京都大学、株式会社神戸製鋼所	Al-Zn/Al-Mg 複層材料における接合界面付近の局所ナノ組織分布	軽金属学会第 139 回秋期大会	2020/11/07

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	株式会社神戸製鋼所	強度の異なる Al 合金の積層テーラードブランクの代替狙う	日経 Automotive 7月号, p.18	2017/6/11

### (c)プレス発表

なし

## (d)その他

番号	所属・著者等	タイトル	形式、媒体等	発表年月
1	京都大学・奥田浩司、株式会社神戸製鋼所・松本克史、佐藤和史、宍戸久郎、株式会社コベルコ科研・常石英雅、北原周、稲葉雅之	組成傾斜をもつ多層アルミニウム合金の組織の基礎的解析	平成26年度SPring-8産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2014B), p.32-34, 2014B1597.	2015/08
2	京都大学・奥田浩司、林杉、田中浩登、株式会社神戸製鋼所・松本克史、佐藤和史、株式会社コベルコ科研・常石英雅、稲葉雅之、北原周	熱処理型傾斜機能性構造材料設計のための傾斜組成条件での弱い異方性組織の分布定量化の検討	平成27年度SPring-8産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2015A), p.50-53, 2015A1684.	2016/02
3	京都大学・奥田浩司、林杉、田中浩登、株式会社神戸製鋼所・松本克史、佐藤和史	熱処理型傾斜機能性構造材料設計のための傾斜組成条件での界面近傍組織の検証	平成27年度SPring-8産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2015B), p.51-53, 2015B1597.	2016/08
4	京都大学・奥田浩司、林杉、浴畑嶺、株式会社神戸製鋼所・松本克史、山口真弘	強度・機能特性を両立させる熱処理型アルミニウム基3元系多層合金の総合強度最適化のための組織分布の定量化	平成28年度SPring-8産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2016B), p.65-67, 2016B1580.	2017/08
5	京都大学・奥田浩司、浴畑嶺、株式会社神戸製鋼所・松本克史、山口真弘、三宅乾太	総合強度と加工設計・機能特性を両立させる熱処理型アルミニウム基3-4元系多層合金の最適化設計のための組織分布評価	平成29年度SPring-8産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2017A), p.98-101, 2017A1597.	2018/02
6	京都大学・奥田浩司、浴畑嶺、株式会社神戸製鋼所・松本克史、山口真弘、三宅乾太	軽量・高強度の多層接合複合材料設計のための引張変形下の層内および界面層組織設計の実験的基礎検討	平成29年度SPring-8産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2017B), p.65-68, 2017B1611.	2018/08
7	京都大学・奥田浩司、伊藤樹人、株式会社神戸製鋼所・宇野木諒、田中友己、松本克史	軽量・高強度の多層接合複合材料の変形特性理解のための引張変形中のその場組織評価の実現	平成30年度SPring-8産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2018A), p.94-97, 2018A1591.	2019/02
8	京都大学・奥田浩司、林杉、株式会社神戸製鋼所・宇野木諒、伊原健太郎、松本克史	結晶粒微細化による軽量・高強度の3層接合複合材料の延性向上とその微細組織依存性のその場計測による解明	令和元年度SPring-8産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書(2019A), p.50-53, 2019A1639	2020/03

## 1.4 展示会への出展

なし

## 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	京都大学・林杉	組成傾斜領域をもつ AI 合金中のナノ組織分布の可視化と特性	軽金属学会関西支部院 生若手研究発表会 最優秀発表賞	2016/12/21

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	株式会社神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	パネル	2015/01/20
2	株式会社神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	パネル	2016/01/22
3	株式会社神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	パネル、講演	2017/01/23
4	株式会社神戸製鋼所	3 府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	パネル	2017/06/13
5	株式会社神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成 29 年度成果報告会」	パネル	2018/01/26
6	株式会社神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成 30 年度成果報告会」	パネル	2019/01/21

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

研究開発項目⑤革新的マグネシウム材の開発

[テーマ番号15] マグネシウム合金設計と難燃性評価 (2013~2015年度)

[テーマ番号15] 難燃性マグネシウム合金の信頼性(疲労・破壊・難燃性)評価  
(2016~2017年度)

表 添-5.1-1 特許、論文、外部発表等の件数(内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	2	1
2015FY	1	0	0	8	1	26	0	0	0	0	3	1
2016FY	1	0	0	4	0	13	0	0	0	1	1	1
2017FY	0	0	0	0	0	19	0	1	0	2	2	2
合計	2	0	0	12	1	70	0	1	0	3	8	5

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント(フォーラム、シンポジウム等)

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT※	出願日	状態	名 称	発明者
1	産業技術総合 研究所、権田 金属工業	特願 2015-205480	国内	2015/10/19	登録	マグネシウム合金製造方 法、マグネシウム合金鑄造 材、マグネシウム合金圧延 材、マグネシウム合金成形 体	野田雅史、伊 藤友美、福田 裕太、権田善 夫、斎藤尚 文、鈴木一 孝、千野靖正
2	産業技術総合 研究所 不二ライトメタル 戸畑製作所	特願 2016-125032	国内	2016/06/24	登録	マグネシウム合金の塑性加 工部材	黄新ショウ、 千野靖正、上 田祐規、井上 正士、城戸太 司、松本敏治

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	湯浅元仁, 行武栄太郎, 黄新胜, 鈴木一孝, 斎藤尚文, 千野靖正	産業技術総合研究所 茨城県工業技術センター	Mg-6%Al-1%Zn-2%Ca合金押出材の応力腐食割れと耐食性	軽金属 66 (2016) 266-272.	有	2016/05
2	斎藤尚文, 鈴木一孝, 福田裕太, 伊藤友美, 野田雅史, 権田善夫, 千野靖正	産業技術総合研究所 権田金属工業	Mg-Al-(Zn)-Ca系マグネシウム合金板材の組織および機械的特性に及ぼすAl濃度およびZn添加の影響	軽金属 66 (2016) 246-251.	有	2016/05
3	鈴木一孝, 斎藤尚文, 黄新胜, 湯浅元仁, 千野靖正	産業技術総合研究所	マグネシウム合金の発火温度に及ぼす測定条件の影響	軽金属 66 (2016) 273-279.	有	2016/05
4	野口博司	九州大学	難燃性マグネシウム合金の疲労特性	軽金属 66 (2016) 221-225.	有	2016/05
5	長谷貴之, 川智明, 池尾直子, 向井敏司	神戸大学	小型衝撃三点曲げ試験機の試作およびMg-6Al-1Zn-2Ca合金の衝撃破壊特性評価	軽金属 66 (2016) 258-265.	有	2016/05
6	X. Huang, Y. Chino, Y. Ueda, M. Inoue, F. Kido, T. Matsumoto	産業技術総合研究所, 不二ライトメタル, 戸畑製作所	Microstructure and mechanical properties of AZX912 magnesium alloy extruded at different temperatures	Materials Science Engineering A 679 (2017) 162-171.	有	2016/10
7	Takayuki Hase Tomoaki Kawa Naoko, Ikeo Toshiji Mukai	Kobe University	Development of small-scale impact three-point bending test apparatus and evaluation of impact fracture properties of Mg-6Al-1Zn-2Ca alloy	Materials Transactions 57 (2016) 1872-1879.	有	2016/10
8	鈴木一孝, 千野靖正	産業技術総合研究所	マグネシウム合金の発火特性評価方法について	軽金属溶接 55 (2017) 10-15.	無	2017/01
9	X. Huang, Y. Chino, Y. Ueda, M. Inoue, F. Kido, T. Matsumoto	産業技術総合研究所, 不二ライトメタル, 戸畑製作所	Enhanced mechanical properties of extruded Mg-9mass%Al-1mass%Zn-2mass%Ca alloy	Proceeding of Magnesium Technology 2017, TMS, 269-274.	有	2017/03
10	K. Suzuki, N. Saito, X. Huang, M. Yuasa, Y. Chino	産業技術総合研究所	Effects of Measurement Conditions on Ignition Temperature of Magnesium Alloys	Materials Transactions Vol.58 (2017) 1616-1623.	有	2017/09

11	M. Yuasa, E. Yukutake, X. Huang, K. Suzuki, N. Saito, Y. Chino	産業技術総合研究所 茨城県工業技術セン ター	Stress Corrosion Cracking and Corrosion Resistance of Mg-6%Al-1%Zn- 2%Ca Extruded Magnesium Alloys	Materials Transactions Vol.58 (2017) 1257-1263.	有	2017/09
12	斎藤尚文, 鈴木 一孝, 野口宗利, 伊藤友美, 野田雅史, 権田 善夫, 千野靖正	産業技術総合研究所 権田金属工業	Mg-6%Al-1%Zn-1%Ca 合金圧延材の平面曲げ 疲労特性に及ぼすミクロ 組織の影響	軽金属 Vol.67 (2017) 625-631.	有	2017/12
13	田口真, 杉本直	川崎重工業	鉄道車両	軽金属 Vol.67 (2017) 460-469.	有	2017/09

### 1.3 その他外部発表

#### (a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	駒井浩	日本マグネシウム協会	マグネシウム需要動 向と海外調査の報告	日本マグネシウム協 会主催講演会第 22 回 マグネシウム技術研 究発表会	2014/06/16
2	駒井浩	日本マグネシウム協会	マグネシウム需要動 向と海外調査の報告	日本マグネシウム協 会主催講演会第 23 回 マグネシウム技術研 究発表会	2014/06/27
3	小原久	日本マグネシウム協会	国内外における難燃 性マグネシウム合金 の技術開発動向	軽金属学会第 127 回 秋期大会	2014/11/16
4	鈴木一孝, 斎藤尚 文, 黄新ショウ, 湯 浅元仁, 千野靖正	産業技術総合研 究所	示差熱分析装置を用 いたマグネシウム合 金の発火温度測定	軽金属学会第 127 回 秋期大会	2014/11/16
5	斎藤尚文, 鈴木一 孝, 千野靖正, 伊藤 友美, 福田祐太, 権 田善夫	産業技術総合研 究所、権田金属 工業	難燃性マグネシウム 合金鑄造材の圧延特 性および機械的特性 に及ぼす主要元素濃 度の影響	軽金属学会第 127 回 秋期大会	2014/11/16
6	黄新ショウ, 千野 靖正, 上田祐規, 井 上 正士, 松本敏治	産業技術総合研 究所、不二ライ トメタル、戸畑 製作所	AZX912 マグネシウ ム合金押出材の機械 的特性に及ぼす組 織・集合組織の影響	軽金属学会第 127 回 秋期大会	2014/11/16
7	井上正士, 上田祐 規, 松本敏治, 春山 康德, 千野靖正, 黄 新ショウ	不二ライトメタ ル、戸畑製作 所、産業技術総 合研究所	Al,Ca 添加量が難燃 性マグネシウム合金 の組織と機械的特性 に及ぼす影響	軽金属学会第 127 回 秋期大会	2014/11/16

8	中田大貴,松本拓也,鎌土重晴,河部望,吉田克仁,弘栄介	長岡技術科学大学、住友電気工業	Mg-Ca-Mn 合金圧延材のマイクロ組織および機械的性質に及ぼす Al 添加量の影響	軽金属学会第 127 回秋期大会	2014/11/16
9	清水和紀,松本泰誠,岩川博昭,花木悟,鎌土重晴	三協立山、長岡技術科学大学	希薄 Mg-Al-Ca-Mn 系合金による高速押出加工	軽金属学会第 127 回秋期大会	2014/11/16
10	中田大貴,安嶋龍太,鎌土重晴,松本泰誠,清水和紀,花木悟	長岡技術科学大学、三協立山	微量な Zn 添加による希薄 Mg-Al-Ca-Mn 系合金押し材の高強度化	軽金属学会第 127 回秋期大会	2014/11/16
11	Ma Lan,佐々木泰祐,宝野和博	物質・材料研究機構	Mg-9Al-1Zn 合金の組織と特性に及ぼす Ca 添加の影響	(一社)日本マグネシウム協会 マグネシウム合金高速車両構体実用化技術委員会	2014/11/16
12	小原久	日本マグネシウム協会	国内外における難燃性マグネシウム合金の技術開発動向	(一社)日本マグネシウム協会マグネシウム合金高速車両構体実用化技術委員会第 24 回技術委員会	2014/12/11
13	中田大貴,鎌土重晴,松本泰誠,清水和紀,花木悟	長岡技術科学大学、三協立山	高速押し用マグネシウム合金に関する研究開発動向(基調講演)	軽金属学会第 128 回春期大会	2015/05/17
14	中田大貴,鎌土重晴,松本泰誠,清水和紀,花木悟	長岡技術科学大学、三協立山	押し加工に伴う希薄 Mg-Al-Ca-Mn 合金の動的再結晶メカニズムとそのマイクロ組織および機械的性質	軽金属学会第 128 回春期大会	2015/05/17
15	松本泰誠,岩川博昭,清水和紀,花木悟,鎌土重晴	長岡技術科学大学、三協立山	希薄 Mg-Al-Ca-Mn 系合金の押し特性に及ぼす添加元素と熱処理の影響	軽金属学会第 128 回春期大会	2015/05/17
16	諏澤和葉,吉田克仁,河部望,中田大貴,鎌土重晴	住友電気工業,長岡技術科学大学	Mg-Al-Ca-合金圧延材の機械的性質に及ぼす Al, Ca 添加量の影響	軽金属学会第 128 回春期大会	2015/05/17
17	湯浅元仁,黄新シヨウ,鈴木一孝,斎藤尚文,千野靖正	産業技術総合研究所	AZX612 マグネシウム合金の腐食特性に及ぼす熱処理の影響	軽金属学会第 128 回春期大会	2015/05/17
18	福田裕太,野田雅史,早川佳伸,斎藤尚文,鈴木一孝,千野靖正	権田金属工業,産業技術総合研究所	難燃性マグネシウム合金の圧延材作製における加工条件の影響	軽金属学会第 128 回春期大会	2015/05/17



19	黄新ショウ, 千野靖正, 上田祐規, 井上正士, 城戸太城, 松本敏治	産業技術総合研究所, 不二ライトメタル, 戸畑製作所	AZX912 マグネシウム合金押出材の機械的特性と組織・集合組織の関	平成 27 年度塑性加工春季講演会	2015/05/30
20	小原 久	日本マグネシウム協会	海外の技術研究動向	(一社)日本マグネシウム協会第 23 回マグネシウム技術研究発表会	2015/06/02
21	M. Lan, T. Sasaki, X. Huang, Y. Chino, T. Ohkubo, K. Hono	物質・材料研究機構, 産業技術総合研究所	Effect of micro-alloying Cu and Zr on the microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy	Mg2015 (The 10th International Conference on magnesium alloys and their applications)	2015/10/13
22	千野靖正	産業技術総合研究所	難燃性マグネシウム合金を鉄道車両部材に適用するための研究開発	軽金属学会第 96 回シンポジウム	2015/11/06
23	中田 大貴, 安嶋龍太, 鎌土重晴, 松本 泰誠, 清水和紀, 佐々木泰祐, Lan Ma, 宝野和博	三協立山, 長岡技術科学大学, 物質・材料研究機構	Mg-Al-Ca-Mn 系合金高速押し材のマイクロ組織・機械的性質に及ぼす Al 添加量の影響	日本機械学会第 23 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2015)	2015/11/14
24	松本拓也, 倉重裕貴, 中田大貴, 鎌土重晴, 諏澤和葉, 吉田克仁, 河部望	住友電気工業, 長岡技術科学大学	Mg-Al-Ca-Mn 系合金圧延材のマイクロ組織および機械的性質に及ぼす圧延条件の影響	日本機械学会第 23 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2015)	2015/11/14
25	安嶋龍太, 中田大貴, 鎌土重晴, 清水和紀, 松本泰誠	三協立山, 長岡技術科学大学	希薄 Mg-Al-Ca-Mn 合金高速押し加工材の時効硬化能および機械的性質に及ぼす Al および Mn 添加量の影響	日本機械学会第 23 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2015)	2015/11/14
26	井上正士, 上田祐規, 島崎英樹, 千野靖正, 黄新ショウ, 松本敏治, 城戸太司, 春山康徳	産業技術総合研究所, 不二ライトメタル, 戸畑製作所	押出温度が AZX912 の押出加工性と機械的特性に及ぼす影響	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/21
27	黄新ショウ, 千野靖正, 上田祐規, 井上正士, 城戸太司, 松本敏治	産業技術総合研究所, 不二ライトメタル, 戸畑製作所	二段押出で作製した AZX912 マグネシウム合金の組織と機械的特性	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/21
28	小川正芳, 松本泰誠, 清水和紀, 中田大貴, 鎌土重晴, 鈴木一孝, 千野靖正	三協立山, 長岡技術科学大学, 産業技術総合研究所	希薄 Mg-Al-Ca-Mn 系合金の高速押し加工と難燃特性	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/21

29	中田大貴, 安嶋龍太, 鎌土重晴, 松本泰誠, 清水和紀, 花木悟, 佐々木泰祐, 宝野和博	三協立山, 長岡技術科学大学, 物質・材料研究機構	Mg-Al-Ca 系合金高速押出し材のマイクロ組織・引張特性に及ぼす Mn 添加量の影響	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/21
30	Ma Lan, 佐々木泰祐, 黄新ショウ, 千野靖正, 宝野和博	物質・材料研究機構, 産業技術総合研究所	AZ91合金の機械的特性と微細組織に及ぼす Cu、Zr 添加の影響	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/21
31	野田雅史, 福田裕太, 伊藤友美, 鈴木一孝, 斎藤尚文, 千野靖正	権田金属工業, 産業技術総合研究所	難燃性 Mg 合金の圧延加工による中板材の高強度・高延性化	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/21
32	斎藤尚文, 鈴木一孝, 千野靖正, 伊藤友美, 福田裕太, 野田雅史, 権田善夫	権田金属工業, 産業技術総合研究所	AZX811 マグネシウム合金板材の組織及び機械的特性に及ぼす圧延条件の影響	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/21
33	小原久, 駒井浩	日本マグネシウム協会	国内外におけるマグネシウム合金展伸材の技術開発動向(基調講演)	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/22
34	千野靖正	産業技術総合研究所	マグネシウム研究の現状と今後の展開	第 7 回産総研軽量構造材料シンポジウム	2015/11/19
35	安嶋龍太, 中田大貴, 鎌土重晴, 松本泰誠, 清水和紀	長岡技術科学大学, 三協立山	希薄 Mg-Al-Ca-Mn 合金高速押出し材の機械的性質およびマイクロ組織に及ぼす Mn 添加量の影響	日本金属学会北陸信越支部・日本鉄鋼協会平成 27 年度北陸信越支部連合講演会	2015/12/05
36	松本拓也, 倉重裕貴, 中田大貴, 鎌土重晴, 苅尾耕司, 諏澤和葉, 吉田克仁, 河部望	長岡技術科学大学, 三協立山	Mg-Al-Ca-Mn 系高濃度合金圧延材の機械的性質及びマイクロ組織に及ぼす中間焼なましの影響	日本金属学会北陸信越支部・日本鉄鋼協会平成 27 年度北陸信越支部連合講演会	2015/12/05
37	駒井浩	日本マグネシウム協会	国内外における難燃性マグネシウム合金の技術開発動向	(一社)日本マグネシウム協会マグネシウム合金高速車両構体実用化技術委員会	2015/12/18
38	千野靖正	産業技術総合研究所	難燃性マグネシウム合金の研究開発動向	(一社)日本マグネシウム協会主催 H27 年度第 2 回技術講演会	2016/01/29
39	湯浅 元仁, 黄 新ショウ, 鈴木 一孝, 斎藤 尚文, 千野靖正	産業技術総合研究所 茨城県工業技術センター	AZX612 及び AZ61 合金押出材の応力腐食割れと耐食性	軽金属学会第 130 回春期大会	2016/05/29
40	石川 武, 藤井 義博	総合車両製作所 日本マグネシウム協会	鉄道車両の軽量化技術開発動向紹介	JR 東日本と DB (Deutsche Bahn)【ドイツ鉄道】との技術交流会	2016/10/05

41	千野 靖正	産業技術総合研究所	マグネシウム研究の現状と今後の展開 ～難燃性マグネシウム合金の実用化を加速するための研究開発～	技術交流サロン in 東広島(主催:東広島市産学金官連携推進協議会)	2016/10/12
42	黄 新シヨウ, 千野靖正, 上田 祐規, 井上 正士, 城戸太司, 松本 敏治	産業技術総合研究所、不二ライトメタル、戸畑製作所	AZX 系マグネシウム合金押出材の組織と機械的特性に及ぼす組成の影響	軽金属学会第 131 回秋期大会	2016/11/06
43	斎藤 尚文, 鈴木一孝, 千野 靖正, 伊藤 友美, 福田裕太, 野田 雅史, 権田 善夫	産業技術総合研究所、権田金属工業	AZX611 マグネシウム合金板材の疲労特性	軽金属学会第 131 回秋期大会	2016/11/06
44	駒井 浩, 小原 久	日本マグネシウム協会	輸送分野におけるマグネシウム合金適用への技術開発動向	軽金属学会第 131 回秋期大会	2016/11/06
45	向井 敏司	神戸大学	マグネシウムの高速変形応答に及ぼすカルシウム添加の影響	軽金属学会第 131 回秋期大会	2016/11/06
46	國谷 耕平, 西水貴洋, 宮下 幸雄	長岡技術科学大学	Mg-Al-Zn-Ca 系合金押出材 TIG 溶接継手の疲労き裂伝ば挙動と溶接プロセスの関係	軽金属学会第 131 回秋期大会	2016/11/06
47	千野 靖正	産業技術総合研究所	我が国の構造材料としてのマグネシウム研究 (ISMA の取り組み)	第 8 回 産総研軽量構造材料シンポジウム (主催:産総研 構造材料研究部門)	2016/11/17
48	千野 靖正	産業技術総合研究所	難燃性マグネシウム合金展伸材の開発と高速鉄道車両への展開	岐阜県よろず支援拠点第3回技術講演会	2017/02/22
49	千野 靖正	産業技術総合研究所	難燃性マグネシウムの課題および結晶組織制御	第 161 回 超塑性研究会	2017/02/23
50	X. Huang, Y. Chino, Y. Ueda, M. Inoue, F. Kido, T. Matsumoto	産業技術総合研究所 不二ライトメタル 戸畑製作所	Enhanced mechanical properties of extruded Mg-9mass% Al-1mass% Zn-2mass% Ca alloy	TMS2017 146th Annual Meeting & Exhibition, Magnesium Technology 2017	2017/03/01
51	國谷 耕平, 西水貴洋, 宮下 幸雄	長岡技術科学大学	難燃性 Mg-Al-Zn-Ca 系合金押出材溶接部の疲労き裂伝ば挙動	日本機械学会 北陸信越支部 第 54 期総会・講演会	2017/03/09
52	千野靖正	産業技術総合研究所	塑性加工によるマグネシウム合金展伸材の高性能化に関する研究	日本塑性加工学会 平成 29 年度塑性加工春季講演会	2017/06/08

53	黄新ショウ、千野靖正 上田祐規、井上正士 城戸太司、松本敏治	産業技術総合研究所、不二ライトメタル、戸畑製作所	Mg-Al-(Zn)-Ca 合金押出材の組織及び機械的特性に及ぼす組成の影響	日本塑性加工学会 平成 29 年度塑性加工春季講演会	2017/06/10
54	千野靖正	産業技術総合研究所	難燃性マグネシウム合金展伸材の実用化を加速するための研究開発	熊本大学 第 67 回高性能 Mg 合金創成加工研究会	2017/07/03
55	千野靖正	産業技術総合研究所	高速車両構体用難燃性 Mg 合金の開発	先端材料技術協会 平成 29 年度第 2 回技術情報交換会	2017/09/28
56	黄新ショウ、千野靖正 上田祐規、井上正士 城戸太司、松本敏治	産業技術総合研究所、不二ライトメタル、戸畑製作所	AZX912 マグネシウム合金押出材の機械的特性に及ぼす溶体化処理条件の影響	軽金属学会 第 133 回秋期大会	2017/11/05
57	斎藤尚文、黄新ショウ、千野靖正、上田祐規、井上正士、松本敏治、上田光二	産業技術総合研究所、不二ライトメタル、戸畑製作所、木ノ本伸線	Mg-9%Al-1%Zn-2%Ca 合金押出材及び MIG 溶接継手の平面曲げ疲労特性	軽金属学会 第 133 回秋期大会	2017/11/05
58	鈴木一孝、中津川勲、黄新ショウ、斎藤尚文、千野靖正、石川武	産業技術総合研究所、総合車両製作所	AZX611 難燃性マグネシウム合金切粉の粉じん爆発特性	軽金属学会 第 133 回秋期大会	2017/11/05
59	千野靖正	産業技術総合研究所	軽量金属マグネシウム合金の構造材料への適用の現状と将来	近畿経済産業局 マグネシウム合金溶接接合セミナー in 関西	2018/01/30
60	千野靖正	産業技術総合研究所	難燃性マグネシウム合金に関する国内外の研究開発状況について		2018/02/07
61	千野靖正	産業技術総合研究所	高性能難燃性マグネシウム合金展伸材の開発状況について	日本 casting 工学会 東海支部 第 83 回 鑄造先端プロセス研究部会	2018/02/23
62	千野靖正	産業技術総合研究所	難燃性マグネシウム合金展伸材の開発動向と将来展望について	名古屋大学 第二回「材料バックキャストテクノロジー」シンポジウム	2018/03/13
63	田口真、杉本直	川崎重工業	鉄道車両用構体の軽量化の取り組みの経緯と軽合金材料への期待	軽金属学会 第 133 回秋期大会	2017/11/05
64	宮下幸雄	長岡技術科学大学	Mg-Al-Zn-Ca 系合金押出材 TIG および MIG 溶接部の疲労き裂伝ば挙動	軽金属学会第 132 回春期大会	2017/5/21

65	木村聖光	長岡技術科学大学大学院	Mg-Al-Ca系難燃性マグネシウム合金押出材の疲労強度特性	日本機械学会 2017年度年次大会	2017/9/5
66	宮下幸雄	長岡技術科学大学	溶接プロセスの影響を考慮した Mg-Al-Zn-Ca系合金押出材溶接継手の疲労設計法の検討	溶接学会平成 29 年度秋季全国大会	2017/9/11
67	木村聖光	長岡技術科学大学大学院	難燃性マグネシウム合金の疲労強度特性に及ぼす押出方向の影響	軽金属学会第 133 回秋期大会	2017/11/5
68	宮下幸雄	長岡技術科学大学	難燃性マグネシウム合金溶接部の疲労設計	溶接構造シンポジウム 2017	2017/12/6
69	宮下幸雄	長岡技術科学大学	難燃性マグネシウム合金溶接部の疲労強度特性に及ぼす溶接プロセスの影響と疲労設計法の提案	日本材料学会高温強度・破壊力学合同シンポジウム(第 55 回高温強度シンポジウム, 第 18 回破壊力学シンポジウム)	2017/12/9
70	九州大学	野口 博司	難燃性マグネシウムの疲労特性	軽金属学会第 133 回秋期大会講演会	2017/5/21

### (b)新聞・雑誌等への掲載

なし

### (c)プレス発表

番号	所属	タイトル	発表形式	発表年月
1	NEDO, ISMA, 産業技術総合研究所, 不二ライトメタル, 戸畑製作所	機械特性を飛躍的に改善した難燃性マグネシウム合金押出材の作製に成功	メディア投げ込み、WEB 掲載	2017/11/01

### (d)その他

なし

### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	産業技術総合研究所	第 6 回次世代ものづくり基盤技術産業展 (TechBiz EXPO 2016)	パネル展示 (題目: 高性能難燃性マグネシウム合金展伸材の開発)	2016/11/16~18

2	(一社)日本マグネシウム協会	第4回高機能金属展	AZX611 シングルスキンパネルの展示	2017/4/5-7
3	ISMA, 産業技術総合研究所, 川崎重工業, 三協立山, 権田金属工業, 住友電気工業, 不二ライトメタル, 大日本塗料, 総合車両製作所	Nanotech 2018	パネル展示 (NEDO プース展示)	2018/02/14-16

## 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	物質・材料研究機構・佐々木泰祐	工業材料部門	日本金属学会 奨励賞	2014/09/24
2	物質・材料研究機構・佐々木泰祐	マルチスケール組織解析による熱処理型高強度展伸マグネシウム合金の開発	軽金属学会 奨励賞	2014/11/15
3	長岡技術科学大学・松本拓也	Mg-Al-Ca-Mn系高濃度合金圧延材の機械的性質及びマイクロ組織に及ぼす中間焼なましの影響	優秀学生発表賞	2015/12/05
4	物質・材料研究機構・佐々木泰祐	高強度高延性展伸マグネシウム合金の開発	第25回日本MRS年次大会 奨励賞	2015/12/10
5	産業技術総合研究所・千野靖正	集合組織制御によるマグネシウム合金板材の室温成形性改善に関する研究	日本金属学会 功績賞	2016/03/23
6	物質・材料研究機構・染川 英俊	軽量金属材料の高性能化に関する研究	平成28年度 文部科学大臣表彰 若手科学者賞	2016/4/20
7	産業技術総合研究所・千野靖正	塑性加工によるマグネシウム合金展伸材の高性能化に関する研究	日本塑性加工学会 学術賞	2017/06/08
8	物質・材料研究機構・染川 英俊	高性能軽量金属材料の創製に関する研究	日本金属学会 功績賞	2018/3/19

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発「平成26年度成果報告会」	ポスター	2015/01/20
2	産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発「平成27年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22
3	産業技術総合研究所 川崎重工	革新的新構造材料等研究開発「平成28年度成果報告会」	ポスター、発表	2017/1/23
4	産業技術総合研究所 川崎重工	3府省合同 構造材料プログラム「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料 (JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点 (ESISM) ・新構造材料技術研究組合 (ISMA)	ポスター	2017/6/13

5	産業技術総合研究所 川崎重工	革新的新構造材料等研究開発 「平成 29 年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26
---	-------------------	----------------------------------	------	-----------

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号16] 易加工性マグネシウム材（押出材）の開発及び高強度マグネシウム材（厚板）作製の基礎的検討（2013年度～2017年度）

表 添-5.2-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	1	0	1	0	0	0	3	0	0
2014FY	1	0	0	1	0	8	3	0	0	5	3	1
2015FY	1	0	0	2	0	21	2	2	2	5	1	1
2016FY	1	0	0	1	0	18	3	3	8	4	2	1
2017FY	0	0	0	2	0	9	1	0	4	5	0	2
合計	3	0	0	7	0	57	9	5	14	22	6	5

※1：Patent Cooperation Treaty：特許協力条約

※2：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT※	出願日	状態	名 称	発明者
1	三協立山(株) 長岡技科大 NIMS	特願 2015-051435	国内	2015/3/13	登録	マグネシウム合金	清水和紀 他 鎌土重晴 他 佐々木泰佑 他
2	権田金属工業 (株) (国研)産業技 術総合研究所	特願 2015-205480	国内	2015/10/19	登録	マグネシウム合金製造方 法、マグネシウム合金鑄 造材、マグネシウム合金 圧延材、およびマグネシ ウム合金成形体	野田 雅史他
3	三協立山(株) 長岡技科大	特願 2017-176104	国内	2016/09/13	登録	マグネシウム合金	清水和紀 他 鎌土重晴

(※Patent Cooperation Treaty：特許協力条約)



## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	N. Sakai <sup>1</sup> , K. Funami <sup>2</sup> , M. Noda <sup>3</sup> , H. Mori <sup>4</sup> ,	1 Chiba Institute of Technology (Currently Sankyo Tateyama, Inc.) 2 Chiba Institute of Technology 3 Chiba Institute of Technology (Currently Gondametal Industry Co., LTD.) 4 Railway Technical Research Institute	Effect of Ca Addition on the High-Temperature Deformation Behavior of AZ31 Magnesium Alloy	Proceedings of THE 8 <sup>TH</sup> PACIFIC RIM INTERNATIONAL CONGRESS ON ADVANCED MATERIALS AND PROCESSING (ISBN 978-0-470-94309-0)	有	2013/08/04
2	T. Ito <sup>1</sup> , M. Noda <sup>2</sup> , H. Mori <sup>3</sup> , Y. Gonda <sup>1</sup> , Y. Fukuda <sup>1</sup> , S. Yanagihara <sup>1</sup>	1 Gondametal Industry Co., LTD. 2 Chiba Institute of Technology (Currently Gondametal Industry Co., LTD.) 3 Railway Technical Research Institute	Effect of Antigravity-Suction-Casting Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-10Al-0.2Mn-1Ca Cast Alloy	共同刊行欧文誌「Materials Transactions」(Vol.55, No.8, p1184-p1189)	有	2014/06/13 (Advance View)
3	伊藤 友美 <sup>1</sup> , 柳原理 <sup>1</sup> , 野田 雅史 <sup>1</sup> , 森 久史 <sup>2</sup>	1 権田金属工業(株) 2 (公財)鉄道総合技術研究所	難燃性マグネシウム合金のすえ込み加工性に及ぼす鋳造初期組織および加工条件の影響	会誌「軽金属」(Vol.65, No.2, p611-p616)	有	2015/12/30
4	斎藤 尚文 <sup>1</sup> , 鈴木 一孝 <sup>1</sup> , 伊藤 友美 <sup>2</sup> , 福田 裕太 <sup>2</sup> , 野田 雅史 <sup>2</sup> , 権田 善夫 <sup>2</sup> , 千野 靖正 <sup>1</sup>	1 (国研)産業技術総合研究所 2 権田金属工業(株)	Mg-Al-(Zn)-Ca 系マグネシウム合金中板材の組織および機械的特性に及ぼす Al 濃度および Zn 添加の影響	会誌「軽金属」(Vol.66, No.5, p246-p251)	有	2016/01/24
5	M. Noda, T. Ito, Y. Fukuda	Gondametal Industry Co., LTD.	Effect of heat treatment and compound on anisotropy of a high strength magnesium alloy sheet processed by hot rolling	The Ninth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM9) proceedings on CD-R	有	2016/08/01
6	Y. Fukuda <sup>1</sup> M. Noda <sup>1</sup> T. Ito <sup>1</sup> K. Suzuki <sup>2</sup> N. Saito <sup>2</sup> Y. Chino <sup>2</sup>	1 権田金属工業(株) 2 (国研)産業技術総合研究所	Effect of Reduction in Thickness and Rolling Conditions on Mechanical Properties and Microstructure of Rolled Mg-8Al-1Zn-1Ca Alloy	Advances in Materials Science and Engineering Volume 2017	有	2017/07/06
7	斎藤 尚文 <sup>1</sup> , 鈴木 一孝 <sup>1</sup> , 野口 宗利 <sup>2</sup> , 伊藤 友美 <sup>2</sup> , 野田 雅史 <sup>2</sup> , 権田 善夫 <sup>2</sup> , 千野 靖正 <sup>1</sup>	1 (国研)産業技術総合研究所 2 権田金属工業(株)	Mg - 6%Al - 1%Zn - 1%Ca合金圧延材の平面曲げ疲労特性に及ぼすミクロ組織の影響	会誌「軽金属」(Vol.67, No.12, p625-p631)	有	2017/12/31

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	伊藤 友美 <sup>1</sup> 福田 裕太 <sup>1</sup> 森 久史 <sup>2</sup> 野田 雅史 <sup>3</sup>	1 権田金属工業(株) 2 (公財)鉄道総合技術研究所 3 千葉工業大学(現権田金属工業(株))	難燃性マグネシウム合金の機械的性質に及ぼす casting 組織と圧延条件の影響	日本金属学会 2014 年春季講演大会	2014/03/23
2	福田 裕太 権田 善夫 伊藤 友美 柳原理	権田金属工業(株)	難燃性マグネシウム合金の casting プロセス及び圧延特性	平成 26 年度塑性加工春季講演会	2014/06/07
3	清水 和紀 <sup>1</sup> 松本 泰誠 <sup>1</sup> 岩川 博昭 <sup>1</sup> 花木 悟 <sup>1</sup> 鎌土 重晴 <sup>2</sup>	1 三協立山(株) 2 長岡技科大	希薄 Mg-Al-Ca-Mn 系合金による高速押出加工	軽金属学会第 127 回秋期大会	2014/11/16
4	中田 大貴 <sup>1</sup> 安嶋 龍太 <sup>1</sup> 松本 泰誠 <sup>2</sup> 清水 和紀 <sup>2</sup> 花木 悟 <sup>2</sup> 鎌土 重晴 <sup>1</sup>	1 長岡技科大 2 三協立山(株)	微量な Zn 添加による希薄 Mg-Al-Ca-Mn 系合金押出し材の高強度化	軽金属学会第 127 回秋期大会	2014/11/16
5	伊藤 友美 <sup>1</sup> 福田 裕太 <sup>1</sup> 柳原理 <sup>1</sup> 権田 善夫 <sup>1</sup> 野田 雅史 <sup>1</sup> 森 久史 <sup>2</sup>	1 権田金属工業(株) 2 (公財)鉄道総合技術研究所	難燃性マグネシウム合金の塑性加工性向上に及ぼす casting 初期組織の影響	軽金属学会第 127 回秋期大会	2014/11/16
6	福田 裕太 <sup>1</sup> 伊藤 友美 <sup>1</sup> 早川 佳伸 <sup>1</sup> 権田 善夫 <sup>1</sup> 野田 雅史 <sup>1</sup> 森 久史 <sup>2</sup>	1 権田金属工業(株) 2 (公財)鉄道総合技術研究所	反重力 casting で作製された難燃性マグネシウム合金の金属組織及び機械的特性に及ぼす圧延条件の影響	軽金属学会第 127 回秋期大会	2014/11/16
7	斎藤 尚文 <sup>1</sup> 鈴木 一孝 <sup>1</sup> 千野 靖正 <sup>1</sup> 伊藤 友美 <sup>2</sup> 福田 裕太 <sup>2</sup> 権田 善夫 <sup>2</sup>	1 (国研)産業技術総合研究所 2 権田金属工業(株)	難燃性マグネシウム合金 casting 造材の圧延特性および機械的特性に及ぼす主要合金元素濃度の影響	軽金属学会第 127 回秋期大会	2014/11/16
8	清水 和紀	三協立山(株)	希薄 Mg-Al-Ca-Mn 系合金による高速押出加工	マグネシウム合金高速車両構体実用化技術委員会(第 24回)	2014/12/11

9	野田 雅史	千葉工業大学(現 権田金属工業 (株))	難燃性マグネシウム合金の 鑄造組織と圧延加工が機械 的特性に及ぼす影響	マグネシウム合金高速車両 構体実用化技術委員会(第 24回)	2014/12/11
10	中田 大貴 <sup>1</sup> 鎌土 重晴 <sup>1</sup> 松本 泰誠 <sup>2</sup> 清水 和紀 <sup>2</sup> 花木 悟 <sup>2</sup>	1 長岡技科大 2 三協立山(株)	高速押し用マグネシウム 合金に関する研究開発動向	軽金属学会第 128 回春期大 会	2015/05/17
11	中田 大貴 <sup>1</sup> 松本 泰誠 <sup>2</sup> 清水 和紀 <sup>2</sup> 花木 悟 <sup>2</sup> 鎌土 重晴 <sup>1</sup>	1 長岡技科大 2 三協立山(株)	押し加工に伴う希薄 Mg- Al-Ca-Mn 合金の動的再結晶 メカニズムとそのマイクロ組 織および機械的性質	軽金属学会第 128 回春期大 会	2015/05/17
12	松本 泰誠 <sup>1</sup> 岩川 博昭 <sup>1</sup> 清水 和紀 <sup>1</sup> 花木 悟 <sup>1</sup> 鎌土 重晴 <sup>2</sup>	1 三協立山(株) 2 長岡技科大	希薄 Mg-Al-Ca-Mn 系合金の 押し特性に及ぼす添加元素 と熱処理の影響	軽金属学会第 128 回春期大 会	2015/05/17
13	伊藤 友美 <sup>1</sup> 野田 雅史 <sup>1</sup> 柳原 理 <sup>1</sup> 森 久史 <sup>2</sup>	1 権田金属工業(株) 2 (公財)鉄道総合 技術研究所	難燃性マグネシウム合金の 金属組織および機械的性質 に及ぼす反重力鑄造条件の 影響	軽金属学会第 128 回春期大 会	2015/05/17
14	福田 裕太 <sup>1</sup> 野田 雅史 <sup>1</sup> 早川 佳伸 <sup>1</sup> 鈴木 一孝 <sup>2</sup> 斎藤 尚文 <sup>2</sup> 千野 靖正 <sup>2</sup>	1 権田金属工業 (株) 2 (国研)産業技術 総合研究所	難燃性マグネシウム合金の 圧延材作製における加工条 件の影響	軽金属学会第 128 回春期大 会	2015/05/17
15	野田 雅史 <sup>1</sup> 伊藤 友美 <sup>1</sup> 福田 裕太 <sup>1</sup> 鈴木 一孝 <sup>2</sup> 斎藤 尚文 <sup>2</sup> 千野 靖正 <sup>2</sup>	1 権田金属工業 (株) 2 (国研)産業技術 総合研究所	熱間圧延加工による難燃性 マグネシウム合金幅広板材 の開発	平成 27 年度塑性加工春季 講演会	2015/05/30
16	松本 泰誠 <sup>1</sup> 岩川 博昭 <sup>1</sup> 清水 和紀 <sup>1</sup> 花木 悟 <sup>1</sup> 鎌土 重晴 <sup>2</sup>	1 三協立山(株) 2 長岡技科大	希薄 Mg-Al-Ca-Mn 系合金の 押し特性に及ぼす添加元素 と熱処理の影響	マグネシウム合金高速車両 構体実用化技術委員会(第 26回)	2015/06/26
17	清水 和紀	三協立山(株)	難燃性マグネシウム合金押 出材の製造技術開発	Mg 合金ものづくり連携勉 強会(新産業創造研究機構)	2015/07/28
18	野田 雅史	権田金属工業 (株)	難燃性マグネシウム合金圧 延厚板材の開発と車両構体 への適用	日本機械学会 2015 年度年 次大会 先端技術フォーラ ム 機械材料・材料加工部 門企画 M&P 最前線 2015	2015/09/15

19	野田 雅史 <sup>1</sup> 森 久史 <sup>2</sup> 伊藤 友美 <sup>1</sup> 船見 国男 <sup>3</sup>	1 権田金属工業(株) 2 (公財)鉄道総合技術研究所 3 元千葉工業大学	Mg-Al-Zn 合金の組織変化と機械的特性に及ぼすカルシウム添加の影響	日本機械学会 2015 年度年次大会	2015/09/16
20	小川 正芳 <sup>1</sup> 松本 泰誠 <sup>1</sup> 清水 和紀 <sup>1</sup> 中田 大貴 <sup>2</sup> 鎌土 重晴 <sup>2</sup> 鈴木 一孝 <sup>3</sup> 千野 靖正 <sup>3</sup>	1 三協立山(株) 2 長岡技科大 3 産総研	希薄 Mg-Al-Ca-Mn 系合金の高速押出加工と難燃特性	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/21
21	中田 大貴 <sup>1</sup> 安嶋 龍太 <sup>1</sup> 松本 泰誠 <sup>2</sup> 清水 和紀 <sup>2</sup> 花木 悟 <sup>2</sup> 鎌土 重晴 <sup>1</sup> 佐々木泰祐 <sup>3</sup> 宝野 和博 <sup>3</sup>	1 長岡技科大 2 三協立山(株) 3 物材機構	Mg-Al-Ca 系合金高速押し出し材のマイクロ組織・引張特性に及ぼす Mn 添加量の影響	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/21
22	野田 雅史 <sup>1</sup> 福田 裕太 <sup>1</sup> 伊藤 友美 <sup>1</sup> 鈴木 一孝 <sup>2</sup> 斎藤 尚文 <sup>2</sup> 千野 靖正 <sup>2</sup>	1 権田金属工業(株) 2 (国研)産業技術総合研究所	難燃性 Mg 合金の圧延加工による中板材の高強度・高延性化	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/21
23	福田 裕太 野田 雅史 早川 佳伸	権田金属工業(株)	難燃性マグネシウム合金圧延材作製における幅広化の影響	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/21
24	斎藤 尚文 <sup>1</sup> 鈴木 一孝 <sup>1</sup> 千野 靖正 <sup>1</sup> 福田 裕太 <sup>2</sup> 野田 雅史 <sup>2</sup> 権田 善夫 <sup>2</sup>	1 (国研)産業技術総合研究所 2 権田金属工業(株)	AZX811 マグネシウム合金板材の組織および機械的特性に及ぼす圧延条件の影響	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/22
25	伊藤 友美 野田 雅史 柳原理	権田金属工業(株)	難燃性マグネシウム合金鋳造材の塑性加工性に及ぼす熱処理条件の影響	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/22
26	野田 雅史 野口 宗利	権田金属工業(株)	Mg-Al-Zn-Ca 系合金切削チップ板材の強度と延性向上	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/22
27	安嶋 龍太 <sup>1</sup> 中田 大貴 <sup>1</sup> 鎌土 重晴 <sup>1</sup> 松本 泰誠 <sup>2</sup> 清水 和紀 <sup>2</sup>	1 長岡技科大 2 三協立山(株)	希薄 Mg-Al-Ca-Mn 合金高速押し出し材の機械的性質およびマイクロ組織に及ぼす Mn 添加量の影響	H27 年度日本鉄鋼協会・日本金属学会北陸信越支部共催総会・連合講演会	2015/12/05

28	野田 雅史, 野口 宗利	権田金属工業 (株)	Mg-Al-Zn-Ca 系合金切削 チップ板材の強度と延性向 上	マグネシウム合金高速車両 構体実用化技術委員会(第 26回)	2015/12/18
29	野田 雅史	権田金属工業 (株)	高強度・高延性を実現する 難燃性マグネシウム合金板 材	ものづくり連携支援事業勉 強会 ((公財)新産業創造研究機 構)	2016/01/19
30	野田 雅史	権田金属工業 (株)	マグネシウム合金の機械的 特性向上と異方性低減に及 ぼす加工プロセスと結晶組 織の影響	日本機械学会 第6回材料力 学部門HCP分科会	2016/02/04
31	安嶋 龍太 <sup>1</sup> 中田 大貴 <sup>1</sup> 鎌土 重晴 <sup>1</sup> 松本 泰誠 <sup>2</sup> 清水 和紀 <sup>2</sup>	1 長岡技科大 2 三協立山(株)	希薄Mg-Al-Ca-Mn合金高速 押出し材における機械的性 質およびマイクロ組織に及ぼ す第二相粒子の影響	軽金属学会第130回春期大 会	2016/05/29
32	中田 大貴 <sup>1</sup> 安嶋 龍太 <sup>1</sup> 松本 泰誠 <sup>2</sup> 清水 和紀 <sup>2</sup> 鎌土 重晴 <sup>1</sup> 佐々木泰祐 <sup>3</sup> 宝野 和博 <sup>3</sup>	1 長岡技科大 2 三協立山(株) 3 物材機構	時効硬化型Mg-Al-Ca-Mn合 金高速押出し材の高性能化	軽金属学会第130回春期大 会	2016/05/29
33	松本 泰誠 <sup>1</sup> 小川 正芳 <sup>1</sup> 清水 和紀 <sup>1</sup> 中田 大貴 <sup>2</sup> 鎌土 重晴 <sup>2</sup>	1 三協立山(株) 2 長岡技科大	希薄Mg-Al-Ca-Mn系マグネ シウム合金の押出特性評価	軽金属学会第130回春期大 会	2016/05/29
34	兵頭 由起 <sup>1</sup> 松下 遼 <sup>1</sup> 瀧川 順庸 <sup>1</sup> 上杉 徳照 <sup>1</sup> 上田 光二 <sup>2</sup> 木ノ本 裕 <sup>2</sup> 清水 和紀 <sup>3</sup> 鎌土 重晴 <sup>4</sup> 東 健司 <sup>1</sup>	1 大阪府立大 2 木ノ本伸線(株) 3 三協立山(株) 4 長岡技科大	希薄Mg-Al-Ca-Mn合金高速 押出材のMIG溶接強度に及 ぼす溶加材組成の影響	軽金属学会第130回春期大 会	2016/05/29
35	野田 雅史 野口 宗利	権田金属工業 (株)	Mg - 8Al - 1Zn - 1Ca合金圧 延材の機械的特性と異方性	軽金属学会第130回春期大 会	2016/05/29
36	福田 裕太 野田 雅史 早川 佳伸	権田金属工業 (株)	難燃性 Mg 合金幅広板材の 強度と延性に及ぼす圧延条 件の影響	軽金属学会第130回春期大 会	2016/05/29
37	伊藤 友美	権田金属工業 (株)	マグネシウム合金展伸材作 製のための鑄造および熱処 理技術	軽金属学会第98回シンポジ ウム「マグネシウム材料の 新展開」	2016/06/03
38	野田 雅史	権田金属工業 (株)	高強度厚板マグネシウム合 金材の加工プロセス制御技 術の開発	第24回マグネシウム技術研 究発表会	2016/06/08

39	清水 和紀	三協立山(株)	実用金属最軽量のマグネシウム素形材を用いた鉄道車両の開発	第7回新産業技術促進検討会 「自動車等輸送機器の軽量化に向けた最新材料開発動向」	2016/10/06
40	野口 宗利 <sup>1</sup> 野田 雅史 <sup>1</sup> 伊藤 友美 <sup>1</sup> 行武 栄太郎 <sup>2</sup>	1 権田金属工業(株) 2 茨城県工業技術センター	高強度高延性を有するMg-8Al-1Zn-1Ca合金接合材の組織と機械的特性に及ぼす接合条件の影響	第67回塑性加工連合講演会	2016/10/23
41	石川 武 <sup>1</sup> 森 久史 <sup>2</sup> 千野 靖正 <sup>3</sup> 清水 和紀 <sup>4</sup> 権田 善夫 <sup>5</sup> 上田 祐規 <sup>6</sup> 吉田 克仁 <sup>7</sup> 山田 晃司 <sup>8</sup>	1 (株)総合車両製作所 2 鉄道総研 3 産総研 4 三協立山(株) 5 権田金属工業(株) 6 不二ライトメタル(株) 7 住友電気工業(株) 8 大日本塗料(株)	難燃性マグネシウム合金による鉄道車両構体部分パネルの製作	軽金属学会第131回秋期大会	2016/11/05
42	中田 大貴 <sup>1</sup> 安嶋 龍太 <sup>1</sup> 徐 超 <sup>1</sup> 鎌土 重晴 <sup>1</sup> 松本 泰誠 <sup>2</sup> 清水 和紀 <sup>2</sup> 佐々木泰祐 <sup>3</sup>	1 長岡技科大 2 三協立山(株) 3 物材機構	2~6wt.%のAlを含むAXM合金の押し出し性と諸性質に及ぼす熱処理条件の影響	軽金属学会第131回秋期大会	2016/11/05
43	安嶋 龍太 <sup>1</sup> 中田 大貴 <sup>1</sup> 鎌土 重晴 <sup>1</sup> 松本 泰誠 <sup>2</sup> 清水 和紀 <sup>2</sup> 佐々木泰祐 <sup>3</sup>	1 長岡技科大 2 三協立山(株) 3 物材機構	Al添加量の最適化によるMg-Al-Ca-Mn高速押出合金の高強度化	軽金属学会第131回秋期大会	2016/11/05
44	早川 佳伸 野口 宗利 野田 雅史	権田金属工業(株)	AX81マグネシウム合金の圧延加工による広幅材の開発	軽金属学会第131回秋期大会	2016/11/05
45	伊藤 友美 <sup>1</sup> 野田 雅史 <sup>1</sup> 森 久史 <sup>2</sup>	1 権田金属工業(株) 2 (公財)鉄道総合技術研究所	難燃性マグネシウム合金圧延材のV曲げ試験条件が曲げ部の表面起伏及び結晶組織に及ぼす影響	軽金属学会第131回秋期大会	2016/11/06
46	福田 裕太 柳原理 野田 雅史	権田金属工業(株)	AX81マグネシウム合金の圧延加工による高強度厚板材の作製	軽金属学会第131回秋期大会	2016/11/06

47	齋藤 尚文 <sup>1</sup> 鈴木 一孝 <sup>1</sup> 千野 靖正 <sup>1</sup> 伊藤 友美 <sup>2</sup> 福田 裕太 <sup>2</sup> 野田 雅史 <sup>2</sup> 権田 善夫 <sup>2</sup>	1 (国研)産業技術 総合研究所 2 権田金属工業 (株)	AZX611マグネシウム合金板 材の疲労特性	軽金属学会第131回秋期大 会	2016/11/06
48	清水 和紀	三協立山(株)	易加工性マグネシウム押出 材の開発	富山大学材料研究会 第50 回研究発表会	2017/02/10
49	佐々木泰祐 <sup>1</sup> 宝野 和博 <sup>1</sup> 石川 武 <sup>2</sup> 上田 光二 <sup>3</sup> 清水 和紀 <sup>4</sup>	1 物材機構 2 (株)総合車両製 作所 3 木ノ本伸線 (株) 4 三協立山(株)	Mg-Al-Ca-Mn 希薄合金 TIG/MIG溶接材の微細組織 と特性	軽金属学会第132回春期大 会	2017/05/21
50	行武栄太郎 <sup>1</sup> 石川 武 <sup>2</sup> 清水 和紀 <sup>3</sup> 藤井 英俊 <sup>4</sup>	1 茨城県産業技 術イノベーションセンター 2 (株)総合車両製 作所 3 三協立山(株) 4 大阪大	高速押出用難燃マグネシウ ム合金の摩擦攪拌接合特性 評価	軽金属学会第132回春期大 会	2017/05/21
51	伊藤 友美 <sup>1</sup> 野田 雅史 <sup>1</sup> 森 久史 <sup>2</sup>	1 権田金属工業(株) 2 (公財)鉄道総合 技術研究所	難燃性マグネシウム合金板 材の曲げ加工性に及ぼす板 厚の影響	軽金属学会第132回春期大 会	2017/05/21
52	福田 裕太 野田 雅史	権田金属工業 (株)	難燃性マグネシウム合金厚 板材作製における圧延加工 プロセスの影響	軽金属学会第132回春期大 会	2017/05/21
53	野田 雅史 <sup>1</sup> 上田 光二 <sup>2</sup> 野口 宗利 <sup>1</sup>	1 権田金属工業(株) 2 木ノ本伸線 (株)	高強度高延性を有する難燃 性Mg合金の機械的諸特性	平成29年度塑性加工春期講 演会	2017/06/09
54	野口 宗利 野田 雅史	権田金属工業 (株)	難燃性Mg合金のスケールア ップに及ぼす加工プロセス の影響	平成29年度塑性加工春期講 演会	2017/06/09
55	兵頭 由起 <sup>1</sup> 越智真理子 <sup>1</sup> 瀧川 順庸 <sup>1</sup> 上杉 徳照 <sup>1</sup> 上田 光二 <sup>2</sup> 木ノ本 裕 <sup>2</sup> 清水 和紀 <sup>3</sup> 鎌土 重晴 <sup>4</sup> 東 健司 <sup>1</sup>	1 大阪府大 2 木ノ本伸線 (株) 3 三協立山(株) 4 長岡技科大	押出性に優れたMg-0.3%Al- 0.3%Ca-0.5%Mn合金のMIG 溶接継手強度に及ぼす溶加 材組成の影響	軽金属学会第133回秋期大 会	2017/11/05

56	田中 圭吾 <sup>1</sup> 中田 大貴 <sup>1</sup> 鎌土 重晴 <sup>1</sup> 徐 超 <sup>1</sup> 佐々木泰祐 <sup>2</sup> 松本 泰誠 <sup>3</sup> 小川 正芳 <sup>3</sup> 清水 和紀 <sup>3</sup>	1 長岡技科大 2 物材機構 3 三協立山(株)	高速押し出したMg-xAl-0.5Ca-0.5Mn (x=2.0~5.5wt.%) 合金の時効硬化特性および機械的性質	軽金属学会第133回秋期大会	2017/11/05
57	野田 雅史 野口 宗利 伊藤 友美 福田 裕太	権田金属工業(株)	難燃性マグネシウム合金板材の組織と平面曲げ疲労特性	軽金属学会第133回秋期大会	2017/11/05

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	千葉工業大学 (公財)鉄道総合技術研究所 権田金属工業(株)	「圧延加工により高強度化した Mg 合金および Al 合金の機械的特性と成形性」	日本機械学会 機会材料・材料加工部門ニューズレター	2014/05/31
2	権田金属工業(株)	難燃性マグネシウム合金のプレス材の開発	素形材 Vol. 56, No. 1, p. 28.	2015/01/20
3	(公財)鉄道総合技術研究所 権田金属工業(株)	ガスバブリング鑄造法による難燃性マグネシウム合金の開発	材料 Vol. 64, No. 3, p. 245.	2015/03/15
4	(公財)鉄道総合技術研究所 権田金属工業(株)	難燃性マグネシウム合金の組織均質化へのソレノイド鑄造法の開発	材料 Vol. 64, No. 4, p. 343	2015/04/15
5	(公財)鉄道総合技術研究所 権田金属工業(株) 元千葉工業大学	<技術開発>難燃性マグネシウム合金の圧延技術	アルトピア Vol.46, No.2, p5-p10	2016/02/15
6	Gondamental Industry Co., LTD.	Effect of heat treatment and compound on anisotropy of a high strength magnesium alloy sheet processed by hot rolling	The Ninth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM9) proceedings on CD-R	2016/08/01
7	三協立山(株) ISMA	特集「2030年に花開く10大材料」	日経Automotive	2017/02/11
8	三協立山(株) (株)総合車両製作所	特集「金属の逆襲」	日経ものづくり	2017/03/01
9	三協立山(株)	革新的マグネシウム材の開発と将来展望	工業材料	2017/12/01



## (c)プレス発表

番号	所属	タイトル	発表形式	発表年月
1	権田金属工業(株)	マグネシウム製品試作開発	権田金属工業(株)ホームページ ( <a href="http://gondametal.co.jp/product_mag/prototype/index.html">http://gondametal.co.jp/product_mag/prototype/index.html</a> )	2015/07/28
2	権田金属工業(株) (国研)産業技術総合研究所	権田金属 高強度・高延性マグネ合金板 産総研と共同開発へ	日刊鉄鋼新聞	2015/09/09
3	三協立山(株)	マグネシウムの新幹線	日経産業新聞	2016/08/30
4	権田金属工業(株)	マグネシウムで建材	日経産業新聞	2016/09/01
5	三協立山(株)	自動車等輸送機器の軽量化に向けた最新材料開発動向	日刊工業新聞	2016/11/08

## (d)その他

番号	所属・著者等	タイトル	形式、媒体等	発表年月
1	(公財)鉄道総合技術研究所・森 久史 (公財)鉄道総合技術研究所・上東 直孝 権田金属工業(株)・野田 雅史 権田金属工業(株)・伊藤 友美 権田金属工業(株)・権田 善夫	難燃性マグネシウム合金に添加されるカルシウムが性質に及ぼす影響	軽金属学会第 128 回春期大会での口頭発表	2015/05/17
2	権田金属工業(株)・野田 雅史 (公財)鉄道総合技術研究所・森 久史 権田金属工業(株)・伊藤 友美	難燃性マグネシウム合金切削屑を用いたリサイクル鑄造材および板材の作製	軽金属学会第 128 回春期大会での口頭発表	2015/05/17
3	権田金属工業(株)・伊藤 友美 共著	Mg - Al - Zn - Ca 合金圧延材の成形性に及ぼす組織と金属間化合物の影響	軽金属学会第 130 回春期大会での口頭発表	2016/05/28
4	権田金属工業(株)・伊藤 友美 共著	Effect of mechanical properties on intermetallic compounds of Mg-Al-Zn-Ca alloy	The Ninth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM9)	2016/08/01
5	権田金属工業(株)	GK 情報レポート第 49 号(Mg 協会奨励賞記事)	社内報	2016/07/26
6	権田金属工業(株)	GK 情報レポート第 51 号(ISMA 加入紹介)	社内報	2017/01/25

7	権田金属工業(株)・野田雅史	Mg 板および条 JIS 規格原案作成委員会	外部委員	2016/08 ～2017/03
8	権田金属工業(株)・野田雅史	Mg 協会高機能 JIS(燃焼委員会)委員	外部委員	2016/08 ～2017/03
9	権田金属工業(株)・野田雅史	軽金属学会テーマセッション企画世話人	外部委員	2016/11
10	権田金属工業(株)・伊藤友美	分析通則 JIS 規格原案作成委員会	外部委員	2016/04 ～2017/03
11	権田金属工業(株)	日本マグネシウム協会 優秀安全賞	平成 28 年度 (第 20 回)	2017/06/08
12	権田金属工業(株)	GK 情報レポート第 53 号(Mg 協会優秀安全賞受賞)	社内報	2017/07/21
13	権田金属工業(株)	GK 情報レポート第 54 号(受託試験・分析)	社内報	2017/10/23
14	権田金属工業(株)	Mg 製品の展示記事公開	会社ホームページ	2018/03/19

#### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	権田金属工業(株)	Asian Symposium Magnesium Alloy	パネル、サンプル	2013/10/07～08
2	権田金属工業(株)	第 64 回塑性加工連合講演会内展示	パネル、サンプル	2013/11/01～03
3	権田金属工業(株)	第 5 回国際マグネシウム展	パネル、サンプル	2013/11/06～08
4	三協立山(株)	第 1 回高機能金属展	サンプル	2014/04/16～18
5	権田金属工業(株)	第 1 回高機能金属展	パネル、サンプル	2014/04/16～18
6	三協立山(株)	第 1 回[関西]高機能金属展	サンプル	2014/09/24～26
7	権田金属工業(株)	第 1 回[関西]高機能金属展	パネル、サンプル	2014/09/24～26
8	権田金属工業(株)	第 6 回日本マグネシウム展	パネル、サンプル	2014/10/15～17
9	権田金属工業(株)	第 2 回高機能金属展	パネル、サンプル	2015/04/08～10
10	権田金属工業(株)	第 2 回[関西]高機能金属展	パネル、サンプル	2015/10/07～09
11	権田金属工業(株)	第 7 回日本マグネシウム展	パネル、サンプル	2015/10/07～09
12	三協立山(株)	Nanotech 2016	パネル・サンプル	2016/01/27～29
13	権田金属工業(株)	協創マッチングフォーラム	プレゼンテーション	2016/02/04
14	権田金属工業(株)	第 3 回高機能金属展	サンプル	2016/04/06～08
15	権田金属工業(株)	第 3 回[関西]高機能金属展	サンプル	2016/10/05～07
16	権田金属工業(株)	第 8 回日本マグネシウム展	サンプル	2016/10/19～21
17	三協立山(株)	軽金属学会第 131 回秋期大会企業交流会	ポスター・サンプル	2016/11/05～06
18	三協立山(株)	第 4 回高機能金属展	ポスター・サンプル	2017/04/05～07
19	権田金属工業(株)	第 4 回高機能金属展	サンプル	2017/04/05～07
20	権田金属工業(株)	第 4 回[関西]高機能金属展	サンプル	2017/09/20～22
21	権田金属工業(株)	第 9 回日本マグネシウム展	サンプル	2017/11/29～12/01
22	ISMA(共同展示)	Nanotech 2018	サンプル	2018/02/14～16

## 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	権田金属工業(株)・伊藤友美	日本マグネシウム協会 奨励賞	一般社団法人日本マグネシウム協会 平成 25 年度(第 17 回)奨励賞	2014/06/18
2	千葉工業大学(現権田金属工業(株))・野田雅史 千葉工業大学(現三協立山(株))・酒井直人 元千葉工業大学・船見国男 (公財)鉄道総合技術研究所・森久史 東日本旅客鉄道(株)・藤野謙司	Mg-3Al-1Zn-1Ca 合金の圧延加工による結晶粒微細化と高強度化	日本塑性加工学会 平成 26 年度日本塑性加工学会論文賞	2014/06/06
3	千葉工業大学(現権田金属工業(株))・野田雅史 元千葉工業大学・船見国男 (公財)鉄道総合技術研究所・森久史 権田金属工業(株)・権田善夫	圧延加工により高強度化した Mg 合金および Al 合金の機械的特性と成形性	日本機械学会 機会材料・材料加工部門 第 91 期部門表彰 優秀講演論文部門	2014/09/08
4	権田金属工業(株)	Expansion Joint for Suspended Ceiling	IMA's 72nd Annual World Magnesium Conference (Awards of Excellence: DESIGNWROUGHT PRODUCT CATEGORY)	2015/05/19
5	権田金属工業(株)・野田雅史	高強度厚板マグネシウム合金材の加工プロセス制御技術の開発	一般社団法人 日本マグネシウム協会 平成27年度マグネシウム協会 奨励賞受賞	2016/06/08
6	権田金属工業(株)・早川佳伸	AX81 マグネシウム合金の圧延加工による広幅材の開発	軽金属学会第131回秋期大会優秀ポスター賞	2016/11/05

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	三協立山(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	ポスター	2015/01/20
2	三協立山(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成27年度成果報告会」	口頭・ポスター	2016/01/22
3	三協立山(株) 権田金属工業(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	口頭・ポスター	2017/01/23

4	三協立山（株） 権田金属工業（株）	3 府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/06/13
5	三協立山（株） 権田金属工業（株）	革新的新構造材料等研究開発 「平成29年度成果報告会」	ポスター	2018/01/26

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 17] 高強度マグネシウム材（薄板）の開発（2013年度～2017年度）

表 添-5.3-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	2
2017FY	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	0	0	7	1	0	0	0	0	6

※1：Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

1.1 特許

なし

1.2 論文

なし

1.3 その他外部発表

(a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	中田大貴 <sup>1)</sup> 鎌土重晴 <sup>1)</sup> 弘栄介 <sup>2)</sup> 吉田克仁 <sup>2)</sup> 河部望 <sup>2)</sup>	1)長岡技大 2)住友電工	Mg-Ca-Mn 系合金圧延材のマイクロ組織および機械的性質に及ぼす Al 添加量の影響	軽金属学会第 127 回大会	2014/11/16
2	諏澤和葉 <sup>1)</sup> 吉田克仁 <sup>1)</sup> 河部望 <sup>1)</sup> 中田大貴 <sup>2)</sup> 鎌土重晴 <sup>2)</sup>	1)住友電工 2)長岡技大	Mg-Al-Ca 合金圧延材の機械的性質に及ぼす Al,Ca 添加量の影響	軽金属学会第 128 回大会	2015/05/17

3	松本拓也 <sup>1)</sup> 倉重裕貴 <sup>1)</sup> 中田大貴 <sup>1)</sup> 鎌土重晴 <sup>1)</sup> 諏澤和葉 <sup>2)</sup> 吉田克仁 <sup>2)</sup> 河部望 <sup>2)</sup>	1)長岡技大 2)住友電工	Mg-Al-Ca-Mn 系合金圧延材のミクロ組織および機械性質に及ぼす圧延条件の影響	日本機械学会 第 23 回機械材料・材料加工技術講演会	2015/11/13
4	松本拓也 <sup>1)</sup> 倉重裕貴 <sup>1)</sup> 中田大貴 <sup>1)</sup> 鎌土重晴 <sup>1)</sup> 諏澤和葉 <sup>2)</sup> 吉田克仁 <sup>2)</sup> 河部望 <sup>2)</sup>	1)長岡技大 2)住友電工	高濃度 Mg-Al-Ca-Mn 系合金圧延材の機械的性質及びミクロ組織に及ぼす圧延焼きなましの影響	日本鉄鋼協会・日本金属学会 北陸信越支部共催 総会・連合講演会	2015/12/5
5	松本拓也 <sup>1)</sup> 中田大貴 <sup>1)</sup> 鎌土重晴 <sup>1)</sup> 苅尾耕司 <sup>2)</sup> 諏澤和葉 <sup>2)</sup> 吉田克仁 <sup>2)</sup> 河部望 <sup>2)</sup>	1)長岡技大 2)住友電工	Mg-Al-Ca-Mn系高濃度合金圧延材の機械的性質及びミクロ組織に及ぼす圧延温度の影響	軽金属学会第 130 回大会	2016/5/29
6	松本拓也 <sup>1)</sup> 中田大貴 <sup>1)</sup> 鎌土重晴 <sup>1)</sup> 苅尾耕司 <sup>2)</sup> 諏澤和葉 <sup>2)</sup> 吉田克仁 <sup>2)</sup> 河部望 <sup>2)</sup>	1)長岡技大 2)住友電工	Mg-Al-Ca-Mn系高濃度合金圧延材の機械的性質及びミクロ組織に及ぼす圧延加工プロセス条件の影響	軽金属学会第 131 回大会	2016/11/5
7	吉田 克仁	住友電工	AZ91板材の紹介と新合金板材の開発状況	マグネシウム協会技術講演会	2016/11/10

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	住友電工	マグネシウム合金圧延材の諸特性	金属	2017年4月

### (c)プレス発表

なし

### (d)その他

なし

### 1.4 展示会への出展

なし

## 1.5 受賞

なし

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	住友電工	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	パネル	2015 年 1 月 20 日
2	住友電工	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	パネル	2016 年 1 月 22 日
3	住友電工	高機能金属展	口頭発表	2016 年 10 月 5 日
4	住友電工	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	パネル、発表	2017 年 1 月 23 日
5	住友電工	3 府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	パネル	2017 年 6 月 13 日
6	住友電工	革新的新構造材料等研究開発 「平成 29 年度成果報告会」	パネル	2018 年 1 月 26 日

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号18] 高強度マグネシウム材（押出材）の開発(2014年度～2017年度)

表 添-5.4-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1
2016FY	1	0	0	2	0	2	0	0	0	0	0	1
2017FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
2018FY	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2019FY	1	0	0	1	0	3	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	2	0	0	4	0	10	0	0	0	0	0	5

※1：Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT※	出願日	状態	名 称	発明者
1	不二ライトメタル（株）、 （株）戸畑製 作所、（国 研）産業技術 総合研究所	特願 2016-125032	国内	2016/06/24	登録	マグネシウム合金の塑性 加工部材	上田祐規、井 上正士、島崎 英樹、松本敏 治、城戸太 司、千野靖 正、黄新ショ ウ
2	不二ライトメタル（株）、 （株）戸畑製 作所、（国 研）産業技術 総合研究所	特願 2019-67078	国内	2019/03/29	公開	マグネシウム合金の塑性 加工部材および製造方法	上田祐規、井 上正士、島崎 英樹、松本敏 治、城戸太 司、千野靖 正、黄新ショ ウ

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)



## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	X. Huang, Y. Chino, Y. Ueda, M. Inoue, F. Kido, T. Matsumoto	産業技術総合研究所, 不二ライトメタル, 戸畑製作所	Microstructure and mechanical properties of AZX912 magnesium alloy extruded at different temperatures	Materials Science Engineering A 679 (2017) 162-171.	有	2016/10/12
2	X. Huang, Y. Chino, Y. Ueda, M. Inoue, F. Kido, T. Matsumoto	産業技術総合研究所, 不二ライトメタル, 戸畑製作所	Enhanced mechanical properties of extruded Mg-9mass% Al-1mass% Zn-2mass% Ca alloy	Proceeding of Magnesium Technology 2017, TMS, 269-274.	有	2017/03/01
3	千野 靖 正、清水 和紀、野 田 雅文、 吉田 克 仁、上田 祐規、石 川 武、田 口 真、山 田 晃司、 堀谷 貴 雄、森 久 史	産 総 研、三 協立山 株、権 田金属 工業 株、住 友電工 株、不 二ライ トメタ ル株、 総合車 両製作 所株、 大日本 塗料 株、川 崎重工 業株、 株 UACJ、 ISMA	高性能難燃性マグネシウム合金 展伸材の開発および鉄道車両構 体への適用に向けた展開	軽金属, Vol.69 (2019), No.1, pp.22-29	有	2019/01/30
4	X. S. Huang, T. Chino, H. Ueda, M. Inoue, F. Kido, T. Matsumoto	産 総 研、不 二ライ トメタ ル株、 株戸畑 製作所	Improvement of mechanical properties of extruded AZX912 magnesium alloy using high-temperature solution treatment	J. Mater. Res. Vol.34 (2019), pp.3725-3734	有	2019/11/14

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	黄新ショウ, 千野靖正, 上田祐規, 井上正士, 松本敏治	産業技術総合研究所、不二ライトメタル(株)、(株)戸畑製作所	AZX912 マグネシウム合金押出材の機械的特性に及ぼす組織・集合組織の影響	軽金属学会第 127 回秋期大会	2014/11/16
2	井上正士, 上田祐規, 松本敏治, 春山康德, 千野靖正, 黄新ショウ	不二ライトメタル(株)、(株)戸畑製作所、産業技術総合研究所	Al,Ca 添加量が難燃性マグネシウム合金の組織と機械的特性に及ぼす影響	軽金属学会第 127 回秋期大会	2014/11/16
3	黄新ショウ, 千野靖正, 上田祐規, 井上正士, 城戸太司, 松本敏治	産業技術総合研究所、不二ライトメタル(株)、(株)戸畑製作所	AZX912 マグネシウム合金押出材の機械的特性と組織・集合組織の関	平成 27 年度塑性加工春季講演会	2015/05/30
4	井上正士, 上田祐規, 島崎英樹, 千野靖正, 黄新ショウ, 松本敏治, 城戸太司, 春山康德	産業技術総合研究所、不二ライトメタル(株)、(株)戸畑製作所	押出温度がAZX912の押出加工性と機械的特性に及ぼす影響	軽金属学会第129回秋期大会	2015/11/21
5	黄新ショウ, 千野靖正, 上田祐規, 井上正士, 城戸太司, 松本敏治	産業技術総合研究所、不二ライトメタル(株)、(株)戸畑製作所	二段押出で作製した AZX912 マグネシウム合金の組織と機械的特性	軽金属学会第 129 回秋期大会	2015/11/21
6	黄新ショウ, 千野靖正, 上田祐規, 井上正士, 城戸太司, 松本敏治	産業技術総合研究所、不二ライトメタル(株)、(株)戸畑製作所	AZX系マグネシウム合金押出材の組織と機械的特性に及ぼす組成の影響	軽金属学会第 131 回秋期大会	2016/11/06

7	X. Huang, Y. Chino, Y. Ueda, M. Inoue, F. Kido, T. Matsumoto	産業技術 総合研究 所 不二ライトメ タル(株) (株) 戸 畑 製 作所	Enhanced mechanical properties of extruded Mg-9mass%Al- 1mass%Zn-2mass%Ca alloy	TMS2017 146th Annual Meeting &Exhibition, Magnesium Technology 2017	2017/03/01
8	斎藤 尚文、黄 新ショウ、千野 靖正、上田 祐 規、井上 正 士、松本 敏 治、行武 栄太 郎	産総研、不 ニライトメタ ル(株)、(株)戸 畑製作所、 茨城県産 業技術イノ ベーション センター	Mg-9%Al-1%Zn-2%Ca合金FSW継 手の平面曲げ疲労特性	軽金属学会第136回春期 大会	2019/05/12
9	石川 武、清水 和紀、上田 祐 規、山田 晃 司、杉本 直、 野田 雅史、吉 田 克仁、千野 靖正	(株)総合車 両製作所、 三協立山 (株)、不二ラ イトメタル(株) 、大日本塗 料(株)、川崎 重工(株)、権 田金属工 業(株)、住友 電工(株)、産 総研	開発難燃性マグネシウム合金による 高速鉄道車両部分構体の試作	軽金属学会第136回春期 大会	2019/05/12
10	黄 新ショウ、千 野 靖正、上田 祐規、井上 正 士、松本 敏治	産総研、不 ニライトメタ ル(株)、(株)戸 畑製作所	優れた機械的特性を有する難燃性 マグネシウム合金展伸材の開発	日本マグネシウム協会第 27回マグネシウム技術発 表会	2019/06/13

**(b)新聞・雑誌等への掲載**

なし

**(c)プレス発表**

なし

**(d)その他**

なし

**1.4 展示会への出展**

なし

**1.5 受賞**

なし

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	不二ライトメタル	革新的新構造材料等研究開発 「平成26年度成果報告会」	ポスター	2015/01/20
2	不二ライトメタル	革新的新構造材料等研究開発 「平成27年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22
3	不二ライトメタル	革新的新構造材料等研究開発 「平成28年度成果報告会」	ポスター、発表	2017/1/23
4	不二ライトメタル	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
5	不二ライトメタル	革新的新構造材料等研究開発 「平成29年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 19] 「難燃性マグネシウム合金の耐食技術の開発」(2014年度～2017年度)

表 添-5.5-1 特許、論文、外部発表等の件数(内訳) 【2018年3月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス 発 表	その 他			
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	1	1
2016FY	0	0	0	1	0	6	0	0	0	0	1	1
2017FY	0	0	0	0	0	5	1	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	1	0	15	1	0	0	0	2	5

※1: Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2: 実施者が主体的に開催するイベント(フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	M. sunakawa, K. Nakamura, R. Shiratori, T. Ishizaki	Shibaura Institute of Technology	Corrosion behavior of flame-resistant Ca-added magnesium alloy in NaCl aqueous solution containing various anion species	Proceedings of EUROCORR 2016, WS B, 1-7 (2016).	無	2016/07/11

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	松村健樹	ミリオン化学㈱	難燃性マグネシウム合金の腐食特性	軽金属学会第128回春期大会	2015/5/17
2	松村健樹	ミリオン化学㈱	難燃性マグネシウム合金の腐食特性	軽金属学会第129回秋期大会	2015/11/22

3	綱川美佳, 神山直純, 白鳥亮太, 石崎貴裕	芝浦工業大学	難燃性マグネシウム合金の腐食特性に及ぼすアニオンの影響	軽金属学会第129回秋期大会	2015/11/22
4	綱川美佳, 石崎貴裕	芝浦工業大学	異種アニオン含有塩水環境下におけるCa添加難燃性Mg合金AZ61の腐食挙動	日本金属学会2016年春期158回講演大会	2016/3/23
5	綱川美佳, 白鳥亮太, 中村嘉恵, 石崎貴裕	芝浦工業大学	異種アニオン含有塩水環境下における難燃性マグネシウム合金AZX612の腐食挙動	軽金属学会第130回春期大会	2016/5/29
6	綱川美佳, 白鳥亮太, 石崎貴裕	芝浦工業大学	異種アニオン含有塩水環境下におけるCa添加難燃性マグネシウム合金のAZ61の腐食挙動	軽金属学会関東支部平成28年度若手研究者ポスター発表会	2016/8/29
7	M. Tsunakawa, K. Nakamura, R. Shiratori, T. Ishizaki	Shibaura Institute of Technology	Corrosion behavior of flame-resistant Ca-added magnesium alloy in NaCl aqueous solution containing various anion species	Eurocorr2016	2016/9/13
8	綱川美佳, 白鳥亮太, 中村嘉恵, 石崎貴裕	芝浦工業大学	難燃性マグネシウム合金の腐食挙動に及ぼす塩水濃度の影響	軽金属学会第131回秋期大会	2016/11/5
9	嶋田雄太, 綱川美佳, 中村嘉恵, 石崎貴裕	芝浦工業大学	Ca添加Mg合金の腐食挙動に及ぼすCa添加量の影響表面技術協会第135回講演大会	表面技術協会第135回講演大会	2017/3/9
10	菊地風斗	ミオン化学(株)技術本部 研究開発室	難燃性マグネシウム合金の腐食特性	軽金属学会第131回秋期大会	2016/11/06
11	綱川美佳, 嶋田雄太, 中村嘉恵, 石崎貴裕	芝浦工業大学	塩水環境下におけるCa添加難燃性マグネシウム合金の腐食速度の算出	軽金属学会第132回春期大会	2017/5/20
12	嶋田雄太, 綱川美佳, 中村嘉恵, 石崎貴裕	芝浦工業大学	AZ61系Mg合金の腐食挙動に及ぼすCa添加量の影響	軽金属学会第132回春期大会	2017/5/20
13	Y. Shimada, M. Tsunakawa, K. Nakamura, T. Ishizaki	Shibaura Institute of Technology	Influence of Ca-addition amount on corrosion behavior of Ca-added Mg alloys	Eurocorr2017	2017/9/5
14	嶋田雄太, 綱川美佳, 中村嘉恵, 石崎貴裕	芝浦工業大学	Ca添加難燃性マグネシウム合金の塩化物水溶液中での腐食挙動に及ぼすカチオン添加の影響	軽金属学会第133回秋期大会	2017/11/5

15	嶋田雄太, 綱川美佳, 中村嘉恵, 石崎貴裕	芝浦工業大学	走査型プローブ顕微鏡を用いたCa添加難燃性Mg合金の腐食挙動の解析	軽金属学会第 133 回秋期大会	2017/11/5
----	------------------------	--------	-----------------------------------	------------------	-----------

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	芝浦工業大学, アート1	Corrosion resistance of composite oxide film prepared on Ca-added flame resistant magnesium alloy AZCa612 by micro-arc oxidation	Corrosion Science	2017/6/13

### (c)プレス発表

なし

### (d)その他

なし

## 1.4 展示会への出展

なし

## 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	芝浦工業大学:綱川美佳, 石崎貴裕	異種アニオン含有塩水環境下におけるCa添加難燃性マグネシウム合金のAZ61の腐食挙動	日本金属学会 2016 年春期 158 回講演大会 第 26 回優秀ポスター省	2016/3/24
2	芝浦工業大学:綱川美佳, 白鳥亮太, 石崎貴裕	異種アニオン含有塩水環境下におけるCa添加難燃性マグネシウム合金の腐食挙動	軽金属学会関東支部, 平成 28 年度若手研究者ポスター発表会, 優秀女性ポスター賞	2016/8/29

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	大日本塗料(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成26年度成果報告会」	パネル	2015/1/20
2	大日本塗料(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成27年度成果報告会」	パネル	2016/1/22

3	大日本塗料(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成28年度成果報告会」	パネル、講演	2017/1/23
4	大日本塗料(株)	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	パネル	2017/6/13
5	大日本塗料(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成 29 年度成果報告会」	パネル	2018/1/26

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）



[テーマ番号20]「難燃性マグネシウム合金の接合技術の開発」(2014年度～2017年度)

表 添-5.6-1 特許、論文、外部発表等の件数(内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	9	2	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	0	1	0	22	5	0	0	4	1	1
2017FY	0	0	0	0	0	5	0	0	2	1	0	2
合計	0	0	0	1	0	39	7	0	2	5	1	5

※1: Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2: 実施者が主体的に開催するイベント(フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	瀧川 順庸* 味原 颯太** 松下 遼** 上田 光二*** 木ノ本 裕*** 上杉 徳照* 東 健司*	*大阪府立大学 大学院工学研究科・化学系 専攻マテリアル工学分野 **大阪府立大学大学院工学研究科・化学系専攻マテリアル工学分野 大学院生 ***木ノ本伸線株式会社	Mg-6Al-1Zn-2Ca 合金の MIG 溶接	軽金属 第 66 巻 第 5 号 (2016),252-257	有	2016/05/30

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
2	鈴木一考、中津川勲、黄新ショウ、斎藤尚文、千野靖正、石川武	産総研、 ㈱総合車両製作所	AZX611難燃性マグネシウム合金切粉の粉じん爆発特性	軽金属学会第133回秋期大会	2017/11/5
3	松本幸樹、西本明生、永塚公彬、石川武、伊藤和博、塚本雅裕、中田一博	大阪大学	レーザ溶接によるAl合金とMg合金の異材接合	溶接学会平成29年度秋季全国大会	2017/9/11
4	FUJII Hidetoshi、MORISADA Yoshiaki、ISHIKAWA Takeshi	大阪大学	Asymmetric double-sided friction stir welding of magnesium alloys.	7 <sup>th</sup> Asian Symposium on Magnesium Alloys	2017/6/11
5	石川武	㈱総合車両製作所	難燃性マグネシウム合金を使用した鉄道車両部分構体の製作	高機能金属展 専門技術セミナー	2017/4/6
6	石川武	株式会社総合車両製作所	難燃性マグネシウム合金による鉄道車両構体部分パネルの製作	一般社団法人軽金属学会	2016/11/6
7	周夢然	国立大学 法人大阪大学	非対称DFSW難燃性マグネシウム合金継手の組織と機械的性質に及ぼすツール回転方向の影響	一般社団法人溶接学会	2016/8/14
8	周夢然	国立大学 法人大阪大学	マグネシウム合金の非対称摩擦攪拌接合に及ぼすカルシウム添加の影響	一般社団法人軽金属学会	2016/11/5
9	石川武	株式会社総合車両製作所	難燃性マグネシウム合金の接合技術を適用した鉄道車両構体部分パネルの製作	超塑性研究会	2017/2/23
10	周夢然、上路林太路、森貞好昭、藤井英俊、石川武	大阪大学、 総合車両製作所	非対称DFSW難燃性マグネシウム合金継手の組織と機械的性質に及ぼすツール回転速度の影響	溶接学会平成28年度春季全国大会、講演番号208	2016/04/12
11	周夢然、森貞好昭、藤井英俊、石川武	大阪大学、 総合車両製作所	非対称DFSW難燃性マグネシウム合金継手の組織と機械的性質に及ぼすツール回転方向の影響	溶接学会平成28年度秋季全国大会、講演番号220	2016/09/15
12	周夢然、森貞好昭、藤井英俊、石川武	大阪大学、 総合車両製作所	Flame-resistant Mg alloy joint formed by asymmetry double-sided FSW	10th International Conference on Trends in Welding Research & 9th International Welding Symposium of Japan Welding Society (9WS)	2016/10/14

13	周夢然、森貞好 昭、藤井英俊、 石川武	大阪大学、 総合車両 製作所	マグネシウム合金の非対称摩擦攪 拌接合に及ぼすカルシウム添加の 影響	軽金属学会第131回秋 期大会、講演番号59	2016/11/6
14	伊藤海太	東京大学	AE法を用いた難燃性マグネシウ ム合金接合中の欠陥の高精度位 置標定	軽金属学会	2016/5/29
15	伊藤海太	東京大学	移動式AEセンサを用いた難燃性 マグネシウム合金FSW中の欠陥 モニタリング	軽金属学会	2016/11/6
16	兵頭由起、松下 遼、瀧川順庸、 上杉徳照、上田 光二、木ノ本裕、 清水和紀、鎌土 重晴、東健司	大阪府立 大学 木ノ本伸線 株式会社 三協立山 長岡技術 科学大学	希薄Mg-Al-Ca-Mn合金高速押出 材のMIG溶接継手強度に及ぼす 溶加材組成の影響	軽金属学会第130回春 期大会	2016/05/28
17	越智真理子、兵 頭由起、松下遼 、瀧川順庸、上 杉徳照、上田光 二、木ノ本裕、清 水と紀、鎌土重 晴、東健司	大阪府立 大学 木ノ本伸線 株式会社 三協立山 長岡技術 科学大学	押出性に優れた希薄マグネシウム 合金のMIG溶接継手強度に及ぼ す溶加材組成の影響	日本材料学会材料 WEEK若手学生研究 発表会	2016/10/12
18	瀧川順庸、上田 光二、木ノ本裕、 上杉徳照、東健 司	大阪府立 大学 木ノ本伸線 株式会社	難燃性マグネシウム合金展伸材の MIG溶接	日本金属学会・日本 鉄鋼協会中国四国支 部 第59回 材質制御 研究会	2016/10/14
19	瀧川順庸、上田 光二、木ノ本裕、 上杉徳照、東健 司	大阪府立 大学 木ノ本伸線 株式会社	難燃性マグネシウム合金MIG溶接 体の継手強度に及ぼす溶加材組 成の影響	軽金属学会第131回秋 期大会	2016/11/06
20	越智真理子、味 原颯大、瀧川順 庸、上田光二、 木ノ本裕、上杉 徳照、東健司	大阪府立 大学 木ノ本伸線 株式会社	高速鉄道車両用マグネシウム合金 MIG溶接継手の強度に及ぼす溶 加材組成の影響	軽金属学会関西支部 若手研究者・院生によ る研究発表会	2016/12/21
21	兵頭由起、松下 遼、瀧川順庸、 上杉徳照、上田 光二、木ノ本裕 清水和紀、鎌土 重晴 東健司	大阪府立 大学 木ノ本伸線 株式会社 三協立山 株式会社 長岡技術 科学大学 大阪府立 大学	希薄Mg-Al-Ca-Mn合金高速押出 材のMIG溶接継手強度に及ぼす 溶加材組成の影響	軽金属学会 第130回春期大会	2016/5/28

22	上田光二	木ノ本伸線株式会社	マグネシウム合金展伸材のTIG溶接・MIG溶接	第3回 関西高機能金属展 メタル専門技術セミナー	2016/10/5
23	越智真理子、松下遼、兵頭由起、瀧川順庸上杉徳照、東健司、上田光二、木ノ本裕、清水和紀、鎌土重晴	大阪府立大学 木ノ本伸線株式会社 三協立山株式会社 長岡技術科学大学	押出性に優れた希薄マグネシウム合金のMIG溶接継手強度に及ぼす溶加材組成の影響	日本材料学会材料WEEK若手学生研究発表会	2016/10/12
24	瀧川順庸、上杉徳照、東健司、上田光二、木ノ本裕	大阪府立大学 木ノ本伸線株式会社	難燃性マグネシウム合金展伸材のMIG溶接	日本金属学会 日本鉄鋼協会中国四国支部 第59回材質制御研究会	2016/10/14
25	瀧川順庸、上杉徳照、上田光二、木ノ本裕、東健司	大阪府立大学 木ノ本伸線株式会社 大阪府立大学	難燃性マグネシウム合金MIG溶接体の継手強度に及ぼす溶加材組成の影響	軽金属学会 第131回秋期大会	2016/11/6
26	越智真理子、味原颯大、瀧川順庸、上杉徳照、東健司、上田光二、木ノ本裕	大阪府立大学 木ノ本伸線株式会社	高速鉄道車両用マグネシウム合金MIG溶接継手の強度に及ぼす溶加材組成の影響	軽金属学会関西支部 若手研究者・院生による研究発表会	2016/12/21
27	上田光二	木ノ本伸線株式会社	マグネシウム合金溶接材料の最新動向	平成28年度 第5回技術講演会 基礎から応用までマグネシウム合金接合技術	2017/3/17
28	行武栄太郎	茨城県工業技術センター、総合車両製作所	難燃性マグネシウム合金FSW接合部の機械的特性	軽金属学会	2015/5/16
29	伊藤海太	東大、総合車両製作所	アコースティック・エミッション法による難燃性マグネシウム合金のTIG溶接欠陥の検出	軽金属学会	2015/5/16
30	宮下幸雄、西水貴洋、國谷耕平	長岡技術科学大学	Mg-Al-Zn-Ca 系合金押出材 TIG溶接継手の疲労強度特性と溶接プロセス	軽金属学会第128回秋期大会	2015/11/22
31	西水 貴洋、伊藤 恵介、宮下 幸雄	長岡技術科学大学	Mg-Al-Zn-Ca 系合金押出材の母材と TIG 溶接継手の疲労強度特性	軽金属学会第127回秋期大会	2014/11/16
32	西水 貴洋、伊藤 恵介、宮下 幸雄、大塚雄市	長岡技術科学大学	Mg-Al-Zn-Ca 系合金押出材 TIG溶接継手の疲労強度と破壊起点	溶接学会平成26年度秋季全国大会	2014/9/11

33	瀧川順庸、上田光二、木ノ本裕、上杉徳照、辻川正人、東健司	木ノ本伸線(株)、大阪府立大学	難燃性マグネシウム合金のMIG溶接	軽金属学会第127回秋期大会	2014/11/16
34	味原颯大、松下遼、瀧川順庸、上杉徳照、東健司、上田光二、木ノ本裕	大阪府立大学、木ノ本伸線(株)	難燃性マグネシウム合金MIG溶接体の欠陥形成および継手強度に及ぼす溶接条件の影響	一般社団法人軽金属学会平成26年度関西支部若手研究者・院生研究発表会(ポスター発表)	2014/12/26
35	上路林太郎、河隅海、藤井英俊、釜井正善、森貞好昭、石川武、橋本健司	大阪大学、(株)総合車両製作所	超音波TIG溶接されたマグネシウム合金溶接部の気孔欠陥と組織	軽金属学会第127回秋期大会	2014/11/16
36	河隅海、上路林太郎、森貞好昭、藤井英俊、釜井正善	大阪大学	Suppression of Weld Defects by Ultrasonic Tungsten Inert Gas Welding of AZ31 Magnesium Alloys	The International Symposium on Visualization in Joining & Welding Science through Advanced Measurements and Simulation(VISUAL-JW2014) にて口頭発表	2014/11/28
37	長谷貴之、川智明、染川英俊、向井敏司	神戸大学、物質材料研究機構	カルシウム添加Mg-Al-Zn合金の破壊靱性	軽金属学会第127回秋期大会	2014/11/16
38	行武栄太郎	茨城県工業技術センター	摩擦攪拌接合による難燃性マグネシウム合金の接合条件の最適化	軽金属学会第127回秋期大会	2014/11/16
39	伊藤海太	東京大学	AE法による難燃性マグネシウム合金の摩擦攪拌接合中のリアルタイム欠陥検出	軽金属学会第127回秋期大会	2014/11/16

**(b)新聞・雑誌等への掲載**

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	大阪大学、(株)総合車両製作所	難燃性マグネシウム合金の超音波TIG溶接技術の開発	日刊工業新聞	2015/1/26
2	木ノ本伸線(株)	難燃性マグネシウム合金製MIG溶接ワイヤ	アルトピアVol.45 No.2	2015/2/15
3	大阪府立大学 木ノ本伸線株式会社	マグネシウムの溶接 第1回 マグネシウム合金の現状と高速鉄道車両構体への適用	溶接技術	2017/1/1
4	木ノ本伸線株式会社 大阪府立大学	マグネシウム合金溶接用溶加材(TIG、MIG)の現状と課題	軽金属溶接	2017/1/16

5	大阪府立大学 木ノ本伸線株式会社	マグネシウムの溶接 第2回 マグネシウム合金の溶融溶接	溶接技術	2017/2/1
6	大阪府立大学 木ノ本伸線株式会社	マグネシウムの溶接 第3回 難燃性マグネシウム合金のミグ溶接	溶接技術	2017/3/1
7	株式会社総合車両製作所	材料固有の魅力を武器に、強さと軽さを磨く	日経ものづくり	2017/3/1

### (c)プレス発表

なし

### (d)その他（同様の形式で表を作成する）

なし

### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	NEDO、ISMA	国際ナノテクノロジー総合展	ポスター展示、実物展示	2018/2/14-16
2	NEDO、(株)総合車両製作所	ナノテク2017展	パネル展示、ミニパンフ配布、実物の部分構体側パネル展示	2017/2/15
3	木ノ本伸線株式会社	第3回高機能金属展	現物展示	2016/4/6~2016/4/8
4	木ノ本伸線株式会社	第3回関西高機能金属展	現物展示	2016/10/5~2016/10/7
5	木ノ本伸線株式会社	軽金属学会 第131回秋期大会	現物展示	2016/11/5~2016/11/6

### 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	大阪府立大学, 越智真理子	押出性に優れた希薄マグネシウム合金のMIG溶接継手強度に及ぼす溶加材組成の影響	ベストプレゼンテーション賞	2016/10/12

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	(株)総合車両製作所	革新的新構造材料等研究開発 「平成26年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	(株)総合車両製作所	革新的新構造材料等研究開発 「平成27年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22
3	(株)総合車両製作所	革新的新構造材料等研究開発 「平成28年度成果報告会」	ポスター、講演	2017/1/23
4	(株)総合車両製作所	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
5	(株)総合車両製作所	革新的新構造材料等研究開発 「平成29年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 34] 革新的マグネシウム材の開発および信頼性評価 (2018年度)

[テーマ番号 35] 革新的マグネシウム材の鉄道車両および自動車構造部材への適用  
技術開発 (2018年度～2022年度)

表 添-5.7-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳 【2023年2月末現在】)

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2018FY	1 (0)	0	0	5 (4)	1 (1)	31 (22)	7 (6)	1	0	6 (2)	2	1
2019FY	2	0	0	4	4	45	5	0	0	4	2	1
2020FY	0	0	0	5	1	32	1	0	0	1	6	1
2021FY	0	0	0	6	0	25	0	2	0	1	2	2
2022FY	0	0	0	1	7	0	0	2	0	2	2	2
合計	3	0	0	21	13	133	13	5	0	12	14	5

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT*	出願日	状態	名 称	発明者
1	川崎重工業 (株)、(株)総合車 両製作所、三 協立山(株)、木ノ 本伸線(株)	特願 2019- 188757	国内	2019/10/15	公開	継手構造及び構体、並び に構造体	田口真、他
2	大日本塗料(株)	特願 2019- 178782	国内	2019/09/30	公開	防食塗料組成物、当該組 成物を用いたマグネシウ ム合金成型物の防食方 法、及び塗装成型物	谷口康人 西川昂志

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)



## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	湯浅元仁、黄新勝、鈴木一孝、斎藤尚文、千野靖正	産業技術総合研究所	Effects of Solution Treatment on Corrosion Properties of Mg-6mass% Al-1mass% Zn-2mass% Ca (AZX612) and Mg-6mass% Al-1mass% Zn (AZ61) Alloys	Materials Transactions, Vol.59, No.7 (2018) pp.1173-1179.	有	2018/05
2	千野靖正、清水和紀、野田雅史、吉田克仁、上田祐規、石川武、田口真、山田晃司、堀谷貴雄、森久史	産総研、三協立山(株)、権田金属工業(株)、住友電気工業(株)、不二ライトメタル(株)、(株)総合車両製作所、川崎重工業(株)、大日本塗料(株)、ISMA、鉄道総研	高性能難燃性マグネシウム合金展伸材の開発および鉄道車両構体への適用に向けた展開	軽金属, Vol.69, No.1 (2019) pp.22-29.	有	2019/01
3	鈴木一孝、斎藤尚文、黄新ショウ、中津川勲、千野靖正	産業技術総合研究所	マグネシウム合金の発火温度に及ぼす合金成分および濃度の影響	軽金属, Vol.69, No.1 (2019) pp.46-53.	有	2019/01
4	黄新勝、千野靖正、上田祐規、井上正士、城戸太司、松本敏治	産業技術総合研究所、不二ライトメタル(株)、(株)戸畑製作所	鉄道車両構体への適用を目指した高強度難燃性マグネシウム合金押出材の開発	素形材 Vol. 60, No.2 (2019) pp.2-7.	無	2019/02
5	伊藤友美、野田雅史	権田金属工業(株)	難燃性マグネシウム合金板材の割れ発生に及ぼすV曲げ試験条件の影響	塑性と加工, 59巻, 691号(2018), pp.158-162.	有	2018/08
6	森久史、千野靖正、石川武、清水和紀、田中宏樹	(株)UACJ, 産総研, (株)総合車両製作所, 三協立山(株)	難燃性マグネシウム合金の鉄道車両構体への適用	溶接学会誌, Vol.88, No.4 (2019), pp.247-251.	有	2019/03
7	上田光二、桑原敏弘、瀧川順庸、石川武	木ノ本伸線(株)、大阪府立大学、(株)総合車両製作所	新難燃性マグネシウム合金 MIG 溶接の高速鉄道車両構体への応用	アルトピア, Vol. 50, No.2 (2020) pp.17-25.	無	2020/01/
8	山田晃司	大日本塗料(株)	マグネシウム合金の腐食特性と塗装	表面技術 Vo.71, No.3, pp.224-229	無	2020/03
9	X.S. Huang, Y. Chino, H. Ueda, M. Inoue, F. Kido, T. Matsumoto	産総研、不二ライトメタル(株)、(株)戸畑製作所	Improvement of mechanical properties of extruded AZX912 magnesium alloy using high-temperature solution treatment	J. Mater. Res. Vol.34 (2019), pp.3725-3734	有	2019/11

10	中津川勲、斎藤尚文、鈴木一孝、千野靖正、福田裕太、伊藤友美、野田雅史、権田善夫	産総研、権田金属工業(株)	Mg-Al-(Zn)-Ca 系マグネシウム合金板材の耐食性に及ぼす Al 濃度および Zn 添加の影響	軽金属, Vol.70, No.2 (2020) pp.56-62	有	2020/02
11	清水和紀、小川正芳	三協立山(株)	鉄道車両構体の軽量化に資するマグネシウム合金押出材の開発	アルトピア, Vol.49, No.8 (2019), pp.9-15	無	2019/08
12	野田雅史	権田金属工業(株)	マグネシウム合金の圧延加工技術	第 35 回軽金属セミナー マグネシウム合金の基礎技術セミナーテキスト	無	2019/08
13	リーゼハオ、佐々木泰祐 ビャンミンジェ、中田大貴、鎌土重晴、吉田雄、河部望、宝野和博	NIMS、長岡技術科学大学、住友電気工業(株)	Effects of Zn Additions on the Room Temperature Formability and Strength in Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn Alloy Sheets	Magnesium Technology 2020	有	2020/02
14	佐々木泰祐、宝野和博	物質・材料研究機構	時効析出を用いたマグネシウム展伸合金の開発	軽金属, Vol.69 (2019), No.4, pp.217-222.	有	2019/04
15	中津川勲、斎藤尚文、鈴木一孝、千野靖正、福田裕太、伊藤友美、野田雅史、権田善夫	産業技術総合研究所、権田金属工業	Influence of Al Concentration and Zn Addition on the Corrosion Resistance of Rolled Mg-Al-(Zn)-Ca Magnesium Alloys	Materials Transactions Vol.61 (2020) 1798-1804.	有	2020/08
16	千野靖正、黄新ショウ、井上正士、上田祐規、城戸太司、松本敏治	産業技術総合研究所、不二ライトメタル、戸畑製作所	高性能難燃性マグネシウム合金押出材の開発と鉄道車両構体部材への展開	マグネシウム Vol.49, No.9 (2020), 3-7.	無	2020/09
17	野田雅史	権田金属工業(株)	マグネシウム合金	軽金属 Vol.70 (2020) 370-372.	有	2020/08
18	Z.H. Li, T.T. Sasaki, M.Z. Bian, T. Nakata, Y. Yoshida, N. Kawabe, S. Kamado, K. Hono	物質・材料研究機構 筑波大学 長岡技術科学大学 住友電気工業	Effects of Zn Additions on the Room Temperature Formability and Strength in Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn Alloy Sheets	Magnesium Technology 2020 pp.105-110.	有	2020/01
19	Z.H. Li, T.T. Sasaki, M.Z. Bian, T. Nakata, Y. Yoshida, N. Kawabe, S. Kamado, K. Hono	物質・材料研究機構 筑波大学 長岡技術科学大学 住友電気工業	Role of Zn on the room temperature formability and strength in Mg-Al-Ca-Mn sheet alloys	Journal of Alloys and Compounds Vol.847 (2020) 156347.	有	2020/07

20	Z. H. Li, T. T. Sasaki, T. Shiroyama, A. Miura, K. Uchida, K. Hono	物質・材料研究機構 筑波大学 LG Japan Lab Inc.	Simultaneous achievement of high thermal conductivity, high strength and formability in Mg- Zn- Ca-Zr sheet alloy	Materials Research Letters Vol.8 (2020) 335- 340.	有	2020/05
21	田口真 石川武	川崎車両株式会社 株式会社、総合車 両製作所	難燃性マグネシウム 合金製構体の気密疲 勞試験（第1報、溶 接接手の疲労強度特 性の改善と難燃性マ グネシウム合金製構 体の開発）	軽金属溶接 Vol.60 (2022) No.1, 9-13	有	2022/01
22	田口真 石川武	川崎車両株式会社 株式会社、総合車 両製作所	難燃性マグネシウム 合金製構体の気密疲 勞試験（第2報 難 燃性マグネシウム構 体の気密疲労試験に よる耐久性の検証）	軽金属溶接 Vol.60 (2022) No.2, 11-15.	有	2022/02
23	X.S. Huang, M.Z. Bian, I. Nakatsugawa, Y. Chino, M. Sato, K. Yamasaki, F. Kido, H. Ueda, M. Inoue	産業技術総合研究所 日本金属 不二ライトメタル	Simultaneously achieving excellent mechanical properties and high thermal conductivity in a high Mn-containing Mg- Zn-Ca-Al-Mn sheet alloy	J. Alloys Compd. Vol.887 (2021) 161394.	有	2021/6
24	T.Nakata, C.Xu, S.Kamado	長岡技術科学大学、 Harbin Institute of Technology	Formation of anomalous twinning and its effect on texture development in a cold-rolled Mg-Zn-Ca alloy sheet	Materials Characterization Vol.181 (2021) 111507.	有	2021/11
25	T.Nakata, C.Xu, Y.Itoh, S.Kamado	長岡技術科学大学 Harbin Institute of Technology	Role of homogenization on tensile properties and microstructures in a dilute Mg-Zn-Ca-Mn alloy sheet	Materials Science Engineering: A Vol. 833 (2021) 142541.	有	2022/2
26	T. Nakata, C. Xu, Nurul Aliea Syafiqah binti Osman, L. Geng, and S. Kamado	長岡技術科学大学 Harbin Institute of Technology	Development of corrosion-resistant Mg- Al-Ca-Mn-Zn alloy sheet with good tensile properties and stretch formability	Journal of Alloys and Compounds Vol.910 (2022) 164752.	有	2022/3
27	田口真 杉本直 梅田啓 武田敏徳 世古将之	川崎車両株式会社 東日本旅客鉄道株 式会社	鉄道車両に適用され るマルチマテリアル 技術	軽金属, Vol.70 (2022), No.5, pp.280-287.	有	2022/5

28	千野靖正, 榎学, 田口真, 森久史, 石川武, 伊藤海太, 行武栄太郎, 清水和紀, 城戸太司, 中津川勲, 山田晃司, 堀谷貴雄	産業技術総合研究所、東京大学、川崎車両(株)、(株)UACJ、(株)総合車両製作所、物質・材料研究機構、茨城県産業技術イノベーションセンター、三協立山(株)、不二ライトメタル(株)、大日本塗料(株)、ISMA	「革新的新構造材料等研究開発」における革新的マグネシウム合金の開発と高速車両構体への適用について	金属, Vol.92(2022),No.6, pp.534-541	無	2022/6
29	田口真	川崎車両株式会社	難燃性マグネシウム合金展伸材による高速車両構体の設計及び評価	金属, Vol.92(2022),No.6, pp.549-554	無	2022/6
30	森久史, 石川武, 千野靖正	(株)UACJ、(株)総合車両製作所、産業技術総合研究所	難燃性マグネシウム合金の車両構体への適用に対する接合技術の検討	金属, Vol.92(2022),No.6, pp.555-561	無	2022/6
31	伊藤海太, 行武栄太郎, 榎学	物質・材料研究機構、茨城県産業技術イノベーションセンター、東京大学	アコースティック・エミッション法による難燃性マグネシウム合金 摩擦攪拌接合中の微小欠陥検出	金属, Vol.92(2022),No.6, pp.562-568	無	2022/6
32	清水和紀, 中田大貴, 鎌土重晴	三協立山(株)、長岡技術科学大学	高速押し出し型難燃性マグネシウム合金の開発と高速車両構体への適用	金属, Vol.92(2022),No.6, pp.569-574	無	2022/6
33	城戸太司, 上田祐規, 松本敏治, 千野靖正, 黄新シヨウ	不二ライトメタル(株)、(株)戸畑製作所、産業技術総合研究所	高強度難燃性マグネシウム合金押出材の開発と高速車両構体への適用	金属, Vol.92(2022),No.6, pp.575-580	無	2022/6
34	中津川 勲, 山下智子, 西川昂志, 谷口康人, 山田晃司, 千野靖正	産業技術総合研究所、大日本塗料(株)	難燃性マグネシウム合金の腐食特性およびその評価技術	金属, Vol.92(2022),No.6, pp.581-586	無	2022/6

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	千野靖正	産業技術総合研究所	高性能難燃性マグネシウム合金展伸材の開発動向について	第5回関西高機能金属展専門技術セミナー	2018/05/09
2	中津川勲、黄新シヨウ、斎藤尚文、鈴木一孝、千野靖正	産業技術総合研究所	溶体処理を施したMg-Al-Zn-Ca合金押出材の耐食性	軽金属学会第134回春期大会	2018/05/26

3	斎藤尚文、鈴木一孝、黄新ショウ、千野靖正、野口宗利、伊藤友美、野田雅史、権田善夫、上田祐規、井上正士、松本敏治	産業技術総合研究所、権田金属工業(株)、不二ライトメタル(株)、(株)戸畑製作所	Mg-Al-Zn-Ca 系合金板材の平面曲げ疲労特性	第26回マグネシウム技術研究発表会	2018/06/14
4	千野靖正、斎藤尚文、鈴木一孝、黄新勝、中津川勲	産業技術総合研究所	難燃性マグネシウム合金展伸材の開発と信頼性評価技術の構築	2018 産業技術総合研究所 中部 センター オープンラボ	2018/06/27
5	中津川勲、黄新ショウ、斎藤尚文、鈴木一孝、千野靖正	産業技術総合研究所	Corrosion behavior of homogenized and extruded Mg-Al-Zn-Ca alloys	11th International conference on Magnesium Alloys and Their Applications	2018/07/26
6	黄新ショウ、千野靖正、上田祐規、井上正士、松本敏治、石川武	産業技術総合研究所、不二ライトメタル、戸畑製作所、総合車両製作所	Mg-9%Al-2%Ca 合金押出材 TIG 溶接継手の平面曲げ疲労特性	軽金属学会第 135 回 秋期大会	2018/11/11
7	千野靖正、斎藤尚文、鈴木一孝、黄新勝、中津川勲	産業技術総合研究所	難燃性マグネシウム合金展伸材の開発と開発合金による高速車両部分構体の試作	フロンティア材料フェア in 中部	2018/12/03
8	千野靖正、斎藤尚文、鈴木一孝、黄新勝、中津川勲	産業技術総合研究所	難燃性マグネシウム合金展伸材の開発と開発合金による高速車両部分構体の試作	産総研コネクティブフォーラム	2018/12/11
9	藤井義博	日本マグネシウム協会	JR東日本における新幹線車両開発の技術課題とニーズ	大阪府立大学・ものづくりイノベーション研究所 5 周年記念講演会	2019/01/15
10	清水和紀	三協立山(株)	マグネシウム合金の押出加工技術	軽金属学会第 35 回軽金属セミナー(燕三条)	2018/10/25
11	清水和紀	三協立山(株)	マグネシウム合金の押出加工技術	軽金属学会第 35 回軽金属セミナー(大阪)	2018/11/26
12	清水和紀	三協立山(株)	日本 Mg 協会平成 30 年度第 6 回技術講演会	日本 Mg 協会平成 30 年度第 6 回技術講演会	2019/01/24
13	清水和紀	三協立山(株)	鉄道車両構体の軽量化に資するマグネシウム合金押出材の開発	第 8 回次世代ものづくり基盤技術産業展	2019/02/06
14	伊藤友美、野田雅史	権田金属工業(株)	難燃性マグネシウム合金板材の成形性に及ぼす金属間化合物の影響	軽金属学会第 134 回 春期大会	2018/05/27
15	野田雅史、野口宗利、上田光二	権田金属工業(株)、木ノ本伸線(株)	Mg-8Al-1Zn-1Ca 合金圧延材および溶接材の平面曲げ疲労	軽金属学会第 134 回 春期大会	2018/05/27

16	野田雅史、野口宗利、伊藤友美、上田光二	権田金属工業(株)、木ノ本伸線(株)	難燃性マグネシウム合金接合継手材の疲労特性と基礎的な破壊挙動	2018年度塑性加工春季講演会	2018/06/01
17	関陽二郎、佐野亮太、伊藤吾郎、伊藤友美、野田雅史	茨城大学、権田金属工業(株)	難燃性マグネシウム合金の耐湿潤ガス応力腐食割れ特性	日本機械学会関東支部・茨城講演会	2018/08/22
18	岡崎祐季、橋本拳志、鬼沢海、伊藤吾郎、車田亮、倉本繁、小林純也、伊藤友美、野田雅史	茨城大学、権田金属工業(株)	難燃性マグネシウム合金の疲労特性に及ぼすき裂進展方向の影響	日本機械学会関東支部・茨城講演会	2018/08/22
19	野田雅史	権田金属工業(株)	マグネシウム合金の圧延加工技術	軽金属学会第35回軽金属セミナー(燕三条)	2018/10/25
20	野田雅史、伊藤友美	権田金属工業(株)	難燃性 Mg-8Al-1Zn-1Ca 合金圧延材の種々の温度における変形挙動	2018年度塑性加工連合講演会	2018/10/27
21	橋本拳志、鬼澤海、伊藤吾郎、車田亮、野田雅史、伊藤友美	茨城大学、権田金属工業(株)	Mg-Al-Zn-Ca 系合金の疲労き裂進展経路解析	軽金属学会第135回秋期大会	2018/11/11
22	佐野亮太、伊藤吾郎、倉本繁、小林純也、伊藤友美、野田雅史	茨城大学、権田金属工業(株)	湿潤大気環境中での変形時に Mg-Al-Zn-Ca 系合金に発生する表面き裂と組織の関係	軽金属学会第135回秋期大会	2018/11/11
23	片桐隼人、伊藤友美	権田金属工業(株)	Mg-8Al-1Zn-1Ca 合金板材の平面曲げ疲労特性に及ぼす金属組織の影響	軽金属学会第135回秋期大会	2018/11/11
24	野田雅史	権田金属工業(株)	マグネシウム合金の圧延加工技術	軽金属学会第35回軽金属セミナー(大阪)	2018/11/26
25	高畑太朗、瀧川順庸、上杉徳照、上田光二、木ノ本裕、東健司	大阪府立大学、木ノ本伸線(株)	Mg-9Al-1Zn-2Ca 合金 MIG 溶接継手の機械的特性に及ぼす溶加材組成の影響	日本金属学会 第163回秋期講演大会	2018/9/19
26	高畑太朗、兵頭由紀、瀧川順庸、上杉徳照、上田光二、木ノ本裕、東健司	大阪府立大学、木ノ本伸線(株)	高速鉄道車両用マグネシウム合金 MIG 溶接継手の機械的特性に及ぼす溶加材組成の影響	日本材料学会 第4回材料 WEEK 材料シンポジウム 若手学生研究発表会	2018/10/16
27	高畑太朗、瀧川順庸、上杉徳照、上田光二、木ノ本裕、東健司	大阪府立大学、木ノ本伸線(株)	Mg-9Al-1Zn-2Ca 合金 MIG 溶接継手の強度・疲労特性に及ぼす溶加材組成の影響	軽金属学会 第135回秋期大会	2018/11/10

28	高畑太朗、瀧川順庸、上杉徳照、上田光二、木ノ本裕、東健司	大阪府立大学、木ノ本伸線(株)	理論的解析と機械学習による難燃性 Mg 合金 MIG 溶接継手の強度予測	軽金属学会関西支部平成30年度若手研究者・院生による研究発表会	2019/1/16
29	高畑太郎、瀧川順庸、上杉徳照、上田光二、木ノ本裕、東健司	大阪府立大学、木ノ本伸線(株)	Mg-9Al-1Zn-2Ca 合金 MIG 溶接継手の強度・疲労特性に及ぼす溶加材組成の影響	軽金属学会 第135回秋期大会	2018/11/10
30	上田光二	木ノ本伸線(株)	展伸材から溶接構造物への展開(実用化溶接技術の最新動向)	一般社団法人日本マグネシウム協会平成30年度第6回技術講演会「マグネシウム展伸材の開発最前線」	2019/1/24
31	上田光二	木ノ本伸線(株)	マグネシウム合金で造る高速鉄道車両部分構体と腰掛フレームの開発	平成30年度マグネシウム合金モノヅクリネットワーク活動報告会	2019/3/5
32	瀧川順庸、上杉徳照、上田光二、木ノ本裕、東健司	大阪府立大学、木ノ本伸線(株)	難燃性マグネシウム合金 MIG 溶接体の継手強度に影響する因子の検討	軽金属学会 第136回春期大会	2019/05/12
33	上田光二	木ノ本伸線(株)	高品質 MIG、TIG 溶接マグネシウム合金線、棒	第1回日中マグネシウム交流会 2019年アジア太平洋マグネシウム産業ハイレベルシンポジウム	2019/7/4
34	上田光二	木ノ本伸線(株)	マグネシウム合金溶接の車両構造物材への応用	日本マグネシウム協会(第12回接合技術分科会例会)技術講演会	2019/10/25
35	岡崎祐季、関陽二郎、佐野亮太、伊藤吾朗、車田亮、倉本繁、小林純也、野田雅史、伊藤友美、上田光二	茨城大学、権田金属工業(株)、木ノ本伸線(株)	Mg-Al-Zn-Ca 系合金 MIG 溶接材における局所的耐湿潤ガス応力腐食割れ特性評価(ポスター発表)	軽金属学会 第137回秋期講演大会	2019/11/2
36	橋本拳志、伊藤吾朗、倉本繁、小林純也、野田雅史、伊藤友美、上田光二	茨城大学、権田金属工業(株)、木ノ本伸線(株)	Mg-Al-Zn-Ca 合金 MIG 溶接材の低ひずみ速度法引張試験による対水素脆化特性評価(ポスター発表)	軽金属学会 第137回秋期講演大会	2019/11/2
37	尾上尊、高畑太朗、上田光二、木ノ本裕、瀧川順庸	大阪府立大学、木ノ本伸線(株)	Mg-4Al-1Ca-0.2Mn 合金 MIG 溶接継手の強度に及ぼす溶加材組成および溶接条件の影響(ポスター発表)	日本鉄鋼協会・日本金属学会 関西支部 マテリアルデザイン研究会	2019/11/15
38	上田光二	木ノ本伸線(株)	難燃性マグネシウム合金の各種用途への適用	日本マグネシウム協会令和元年度第4回技術講演会	2019/12/20

39	尾上尊、高畑太朗、上田光二、木ノ本裕、瀧川順庸	大阪府立大学、木ノ本伸線(株)	高速鉄道車両用 Mg 合金 AXM4102 の MIG 溶接継手強度に及ぼす溶加材組成および溶接条件の影響(ポスター発表)	軽金属関西支部 若手研究者・院生による研究発表会	2019/12/23
40	上田光二	木ノ本伸線(株)	マグネシウム合金製高速鉄道車両構体への MIG 溶接適用の現状について	近畿経済産業局主催 令和元年度 マグネシウム合金ものづくりセミナー	2020/2/4
41	伊藤海太、高橋一輝、行武栄太郎、榎学	物質・材料研究機構、東京大学、茨城県産業技術イノベーションセンター	無線 AE モニタリングを用いた難燃性マグネシウム合金 FSW 中の接合欠陥のリアルタイム検出と要因判別	軽金属学会第 136 回 春期大会	2019/05/12
42	高橋一輝、白岩隆行、榎学、伊藤海太、行武栄太郎	物質・材料研究機構、東京大学、茨城県産業技術イノベーションセンター	難燃性 Mg 合金中の Ca 添加量が摩擦攪拌接合中の AE 挙動に及ぼす影響	第 22 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス	2019/10/23
43	伊藤海太、榎学	物質・材料研究機構、東京大学	AE 連続波形の無線伝送とリモート解析による診断システムの開発	第 22 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス	2019/10/24
44	高橋一輝、白岩隆行、榎学、伊藤海太、行武栄太郎	物質・材料研究機構、東京大学、茨城県産業技術イノベーションセンター	無線 AE 計測による難燃性 Mg 合金の FSW 中の欠陥評価	日本金属学会 2020 年春期(第 166 回)講演大会	2020/03/18
45	田口真	川崎重工(株)	鉄道車両における材料技術の経緯とマルチマテリアル化の取組について	軽金属学会 第 113 回 シンポジウム「輸送機器のマルチマテリアル」	2019/11/29
46	中津川勲、斎藤尚文、鈴木一孝、千野靖正、福田裕太、伊藤友美、野田雅史	産総研、権田金属工業(株)	Mg-Al-(Zn)-Ca 系マグネシウム合金圧延材の耐食性に及ぼす Al 濃度および Zn 添加の影響	軽金属学会第 136 回 春期大会	2019/05/12
47	斎藤尚文、黄新ショウ、千野靖正、上田祐規、井上正士、松本敏治、行武栄太郎	産総研、不二ライトメタル(株)、(株)戸畑製作所、茨城県産業技術イノベーションセンター	Mg-9%Al-1%Zn-2%Ca 合金 FSW 継手の平面曲げ疲労特性	軽金属学会第 136 回 春期大会	2019/05/12
48	黄新ショウ、千野靖正、上田祐規、井上正士、松本敏治	産総研、不二ライトメタル(株)、(株)戸畑製作所	優れた機械的特性を有する難燃性マグネシウム合金展伸材の開発	日本マグネシウム協会 第 27 回マグネシウム技術発表会	2019/06/13
49	中津川勲	産業技術総合研究所	マグネシウム合金展伸材の腐食挙動	日本マグネシウム協会 第 27 回マグネシウム技術発表会	2019/06/13



50	中津川勲、黄新 ショウ、斎藤尚文、 千野靖正	産業技術総合研 究所	Development of frame- retardant Mg-Al-Zn-Ca alloys for wrought products- Evaluation of corrosion resistance -	AIST-NRC Workshop	2019/06/25
51	千野靖正	産業技術総合研 究所	高性能マグネシウム合 金の開発とその実用化 に向けた展開	第 11 回産総研軽量構 造材料シンポジウム	2019/11/22
52	中津川勲	産業技術総合研 究所	マグネシウム合金の腐 食挙動とその評価	第11回産総研軽量構 造材料シンポジウム	2019/11/22
53	千野 靖 正、黄新 勝、中津川勲、斎 藤 尚 文、Bian Mingzhe	産業技術総合研 究所	難燃性マグネシウム合 金展伸材の開発と開発 合金による高速車両部 分構体の試作	産総研テクノブリッジウ ェアin 中部	2019/12/9
54	千野靖正	産業技術総合研 究所	難燃性マグネシウム合 金の発火特性について	日本マグネシウム協会 令和元年度第 4 回技 術講演会	2019/12/20
55	千野靖正	産業技術総合研 究所	高強度難燃性マグネシ ウム合金展伸材の開発 動向	第 9 回 TECH Biz EXPO 講演会・セミナ ー第 9 回 TECH Biz EXPO 講演会・セミナ ー	2020/02/05
56	千野靖正	産業技術総合研 究所	マグネシウム合金材料 の開発・実用化はどこ まで来たか	令和元年度 Mg 合金も のづくりセミナー	2020/02/04
57	Shao Xuanyi、 Driyathep Panwised、 宮下幸雄、Rattana Borrisutthekul	長岡技術科学大 学、スラナリー工 科大学	Mg-Al-Ca-Mn 系合金 と Al-Mg-Si 系合金の 共材および異材抵抗ス ポット溶接	軽金属学会 第 137 回 秋期大会	2019/11/03
58	Shao Xuanyi、 宮下幸雄 Driyathep Panwised、Rattana Borrisutthekul	長岡技術科学大 学、スラナリー工 科大学	難燃性マグネシウム合 金の抵抗スポット溶接と SPR接合	日本機械学会 第27回 機械材料・材料加工技 術講演会	2019/11/22
59	Shao Xuanyi、宮下 幸雄	長岡技術科学大 学	難燃性マグネシウム合 金とアルミニウム合金の 共材および異材 SPR 接合	日本機械学会 北陸信 越支部 第 57 期総会・ 講演会	2020/03/08
60	石川武、清水和紀 、上田祐規、山田 晃司、杉本直、野 田雅史、吉田克仁 、千野靖正	㈱総合車両製作 所、三協立山㈱、 不二ライトメタル ㈱、大日本塗料 ㈱、川崎重工㈱、 権田金属工業 ㈱、住友電工㈱、 産総研	開発難燃性マグネシウ ム合金による高速鉄道 車両部分構体の試作	軽金属学会第136回春 期大会	2019/05/12

61	蟹谷駿、松本泰誠、小川正芳、清水和紀、中田大貴、宮下幸雄、鎌土重晴	三協立山(株)、長岡技術科学大学	高速押出 Mg-Al-Ca-Mn 系合金の平面曲げ疲労特性	軽金属学会第136回春期大会	2019/05/12
62	清水和紀	三協立山(株)	鉄道車両構体の軽量化に資するマグネシウム合金押出材の開発	第 6 回関西高機能金属展	2019/05/22
63	清水和紀	三協立山(株)	難燃性マグネシウム合金押出材の鉄道車両構体への適用	(公財)新産業創造研究機構・先端マグネシウム合金研究会	2020/01/29
64	野田雅史、伊藤友美、上田光二	権田金属工業(株)、木ノ本伸線(株)	難燃性 Mg-8Al-1Zn-1Ca 合金 MIG 継手材の平面曲げ疲労特性に及ぼす組織と溶融部の影響	軽金属学会第136回春期大会	2019/05/12
65	伊藤友美、片桐隼人、野田雅史	権田金属工業(株)	難燃性マグネシウム合金板材の絞り加工性調査	軽金属学会第 136 回春期大会	2019/05/12
66	橋本拳志、伊藤吾朗、倉本繁、小林純也、伊藤友美、野田雅史	茨城大学、権田金属工業(株)	SSRT 試験による難燃性マグネシウム合金溶接材の耐水素脆化特性	軽金属学会第136回春期大会	2019/05/12
67	関陽二郎、岡崎裕季、佐野亮太、伊藤吾朗、車田亮、倉本繁、小林純也、伊藤友美、野田雅史	茨城大学、権田金属工業(株)	Mg-Al-Zn-Ca 系合金の耐湿潤ガス応力腐食割れ特性	軽金属学会第136回春期大会	2019/05/12
68	岡崎裕季、関陽二郎、佐野亮太、伊藤吾朗、車田亮、倉本繁、小林純也、伊藤友美、野田雅史	茨城大学、権田金属工業(株)	Mg-Al-Zn-Ca 系合金溶接材の耐湿潤ガス応力腐食割れ特性	軽金属学会第 136 回春期大会	2019/05/12
69	佐野亮太、伊藤吾朗、倉本繁、小林純也、伊藤友美、野田雅史	茨城大学、権田金属工業(株)	湿潤大気環境下の引張時に Mg-Al-Zn-Ca 系合金に発生する表面き裂とひずみの関係	軽金属学会第 136 回春期大会	2019/5/12
70	野田雅史	権田金属工業(株)	マグネシウム合金の圧延加工技術	軽金属学会第 35 回軽金属セミナー	2019/8/22,10/25,11/26
71	佐野亮太、伊藤吾朗、倉本繁、小林純也、伊藤友美、野田雅史	茨城大学、権田金属工業(株)、木ノ本伸線(株)	Mg-Al-Ca 系合金圧延材の湿潤環境下における脆化挙動	軽金属学会第 137 回秋期大会	2019/11/3

72	木村健太郎、高須飛雅、倉本繁、行武栄太郎、伊藤友美、野田雅史	茨城大学、茨城県産業技術イノベーションセンター、権田金属工業(株)	Mg-Al-Zn-Ca 系合金の機械的特性に及ぼす摩擦攪拌処理加工温度の影響	軽金属学会第137回秋期大会	2019/11/3
73	関陽二郎、岡崎祐季、佐野亮太、伊藤吾朗、車田亮、倉本繁、小林純也、伊藤友美、野田雅史	茨城大学、権田金属工業(株)	Mg-Al-Zn-Ca 系合金の耐湿潤ガス応力腐食割れ特性における第二相粒子分布の影響	軽金属学会第137回秋期大会	2019/11/3
74	佐々木泰祐、ビャンミンジェ、宝野和博	物質・材料研究機構	軽金属材料の 3DAP 解析と合金開発への展開	独立行政法人日本学術振興会 材料の微細組織と機能性第 133 委員会第 244 回研究会	2019/7/10
75	リーゼハオ、佐々木泰祐 ビャンミンジェ、中田大貴、吉田雄、河部望、鎌土重晴、宝野和博	NIMS、長岡技術科学大学、住友電気工業株式会社	Effects of Zn additions on the room temperature formability and strength in Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn alloy sheets	日本金属学会2019年秋期講演大会	2019/9/12
76	リーゼハオ、佐々木泰祐 ビャンミンジェ、中田大貴、鎌土重晴、吉田雄、河部望、宝野和博	NIMS、長岡技術科学大学、住友電気工業株式会社	Effects of Zn additions on the room temperature formability and strength in Mg-1.2Al-0.5Ca-0.4Mn alloy sheets	TMS2020 149th Annual Meeting and Exhibition	2020/3/25
77	岡崎 祐季、関陽二郎車田亮、伊藤吾朗、上田 光二 倉本 繁、小林純也	茨城大学 木ノ本伸線株式会社 茨城大学	Mg-Al-Zn-Ca 系合金 MIG 溶接材の耐水素脆化特性に及ぼす合金組成の影響	軽金属学会 第 138 回春期大会	2020/5/24 (学会発表)
78	岡崎 祐季、関陽二郎伊藤 吾朗 上田 光二 車田 亮、倉本繁、小林 純也	茨城大学 木ノ本伸線株式会社 茨城大学	Mg-Al-Zn-Ca 系合金 MIG 溶接材の耐湿潤ガス応力腐食割れ特性	軽金属学会関東支部若手研究者ポスター発表会	2020/8/1 (学会発表)
79	尾上 尊、高畑太朗、上田 光二、木ノ本 裕瀧川 順庸	大阪府立大学 木ノ本伸線株式会社 大阪府立大学	高速鉄道車両腰掛フレームへの難燃性 Mg 合金適用に向けた MIG 溶接条件最適化による継手疲労特性の向上	第 6 回材料 WEEK 若手学生研究発表会	2020/10/23 (講演)

80	岡崎 祐季、関陽二郎伊藤 吾朗 上田 光二 倉本 繁、小林純也	茨城大学 木ノ本伸線株式会社 茨城大学	Mg-Al-Zn-Ca 系合金 MIG 溶接材の耐水素 脆化特性評価	軽金属学会 第 139 回秋期大会	2020/11/7 (学会発表)
81	尾上 尊, 高畑太朗, 上田 光二, 木ノ本 裕瀧 川 順庸	大阪府立大学 木ノ本伸線株式会社 大阪府立大学	難燃性マグネシウム 合金 MIG 溶接継手 における疲労特性向上 のための溶接条件最 適化	軽金属学会 第 139 回秋期大会	2020/11/7 (学会発表)
82	伊藤海太, 高橋一輝, 行武栄太郎, 榎学	物質・材料研究 機構 東京大学 茨城県産業技術 イノベーションセ ンター	ワイヤレス AE 計測に よる難燃性マグネシウム 合金接合品質のリアル タイム評価	軽金属学会 第 138 回春期大会	2020/05/24 (学会発表)
83	清水和紀、小川正 芳、 中田大貴、鎌土重 晴、 田口 真、石川 武 、 上田光二、千野靖 正	三協立山(株) 長岡技術科学大 学 川崎重工業(株) (株)総合車両製 作所 木ノ本伸線(株) 産業技術総合研 究所	Mg-4Al-1Ca 合金押出 中空型材の高速車両 構体への適用技術開 発	軽金属学会 第 138 回春期大会	2020/05/24 (学会発表)
84	清水和紀	三協立山(株)	難燃性マグネシウム合 金押出し材の鉄道車 両構体への適用	日本塑性加工学会 第 339 回塑性加工シン ポジウム	2020/12/22 (講演)
85	野田雅史, 片桐隼 人, 福田裕太	権田金属工業(株)	Mg-Al-Zn-Ca 合金の 圧延板材の作製と室温 成形性	軽金属学会 第 138 回春期大会	2020/5/24 (学会発表)
86	伊藤友美, 片桐隼 人, 野田雅史	権田金属工業(株)	難燃性マグネシウム合 金材の成形性に及ぼ す試験条件の影響	軽金属学会 第 138 回春期大会	2020/5/24 (学会発表)
87	野田雅史	権田金属工業(株)	室温成形可能な難燃 性 Mg-Al-Zn-Ca 合金 板材に及ぼす組織の 影響	軽金属学会 第 139 回秋期大会	2020/11/8 (学会発表)
88	菊池海斗、中田大 貴、宮下幸雄、鎌 土重晴	長岡技術科学大 学	Mg-Zn-Ca-Al-Mn 合金 圧延板材の諸性質に 及ぼす亜鉛およびカル シウム添加量の影響	軽金属学会 第 139 回秋期大会	2020/11/7 (学会発表)
89	黄新ショウ、千野靖 正、井上正士、上 田 祐規、城戸太 司、松本敏治	産業技術総合研 究所 不二ライトメタル 戸畑製作所	Mg-3Al-1Zn-2Ca マグ ネシウム合金押出材の 機械的特性に及ぼす 溶体化処理条件の影 響	軽金属学会 第 138 回春期大会	2020/05/24 (学会発表)

90	千野靖正	産業技術総合研究所	「革新的マグネシウム材の輸送機器への適用技術開発について」- 高速車両構体への難燃性マグネシウム合金展伸材の適用を目指して-	先端材料技術展 2020(SAMPE Japan)	2020/10/14 (講演)
91	千野靖正	産業技術総合研究所	Development of high-performance flame-retardant wrought magnesium alloys and its application to high-speed railway vehicles	International Magnesium Association Webinar	2020/10/14 (講演)
92	千野靖正、清水和紀、城戸太司、石川武、田口真、堀谷貴雄	産業技術総合研究所 三協立山 不二ライトメタル 総合車両製作所 川崎重工業 ISMA	Development of new flame-retardant wrought magnesium alloys and application of the alloys to high-speed railway body	The 7th International Conference on Magnesium	2020/11/21 (学会発表)
93	千野靖正	産業技術総合研究所	優れた室温成形性を示すマグネシウム合金板材の開発	令和2年度 テクノブリッジフェア in 中部	2021/03/08 (講演)
94	千野靖正	産業技術総合研究所	革新的マグネシウム材料の輸送機器への適用技術開発について	日本マグネシウム協会 第17回情報交流会	2021/03/25 (講演)
95	Shao Xuanyi 宮下幸雄 Duriyathap Panwised, Rattana Borrisutthekul	長岡技術科学大学 スラナリー工科大学	Resistance Spot Welding in Non-combustible Magnesium alloy	JSME 2020 Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing	2020/6/22-26 (学会発表)
96	Shao Xuanyi 宮下幸雄	長岡技術科学大学	Plane Bending Fatigue in TIG and MIG Welds of Non-Combustible Magnesium Alloy	JSME 2020 Conference on Leading Edge Manufacturing/Materials and Processing	2020/6/22-26 (学会発表)
97	Shao Xuanyi 宮下幸雄	長岡技術科学大学	難燃性マグネシウム合金とアルミニウム合金の共材および異材 SPR 接合	日本機械学会北陸信越支部第57期総会・講演会	2020/3/8 (学会発表)
98	Shao Xuanyi 宮下幸雄	長岡技術科学大学	Mg-Al-Ca-Mn 系合金押出材およびその TIG 溶接材の平面曲げ疲労強度特性の評価	溶接学会 2020 年秋季大会	2020/9/9~11 (学会発表)
99	Shao Xuanyi 宮下幸雄	長岡技術科学大学	Mg-Al-Ca-Mn 系合金の共材および異材 SPR 接合	日本機械学会 2020 年度年次大会	2020/9/14 (学会発表)

100	Shao Xuanyi 宮下幸雄	長岡技術科学大 学	Mg-Al-Ca-Mn 系合金 TIG および MIG 溶接 材の平面曲げ疲労強 度特性に及ぼす溶加 材の影響	軽金属学会第 139 回 秋期大会	2020/11/7 (学会発表)
101	Shao Xuanyi 宮下幸雄	長岡技術科学大 学	難燃性マグネシウム 合金 SPR 接合体の引 張せん断試験による 強度評価	日本機械学会第 28 回 機械材料・材料加工 技術講演会	2020/11/19/ (学会発表)
102	Shao Xuanyi 宮下幸雄	長岡技術科学大 学	Mg-Al-Ca-Mn 系合金 TIG および MIG 溶接 材の平面曲げ疲労強 度特性に及ぼす溶接 プロセスおよび溶加 材の影響	溶接学会東部支部 第 5 回 溶接・接合研究 交流会	2021/1/27 (学会発表)
103	佐々木泰祐	物質・材料研究 機構	Mg-Al-Ca 合金圧延材 の特性と組織に及ぼす Zn 添加の影響	軽金属学会 第 138 回春期大会	2020/5/24 (学会発表)
104	Li Zehao	物質・材料研究 機構	Precipitation sequence in a Mg-0.3Ca-0.6Zn alloy	日本金属学会 2020 年秋期第 167 回 講演大会	2020/9/16 (学会発表)
105	佐々木泰祐	物質・材料研究 機構	高強度高成形性マグ ネシウム合金板材の開 発(招待講演)	MRM フォーラム 2020	2020/12/9 (講演)
106	佐々木泰祐	物質・材料研究 機構	Achieving Excellent Room Temperature Formability and High Strength in Wrought Magnesium Alloy Sheets (Invited)	150th TMS2021 Annual Meeting and Exhibition	2021/3/18 (学会発表)
107	Li Zehao	物質・材料研究 機構	Role of Zn on the yielding behavior in Mg-Al-Ca based dilute alloys	日本金属学会 2020 年春期第 168 回 講演大会	2021/3/18 (学会発表)
108	佐々木泰祐	物質・材料研究 機構	高強度高成形性マグ ネシウム合金板材の開 発(基調講演)	日本金属学会 2020 年春期第 168 回 講演大会	2021/3/18 (学会発表)
109	黄新勝、Bian Mingzhe、中津川 勲・千野靖正、佐 藤雅彦、山崎一 正、城戸太司、上 田祐規、井上正 士	産業技術総合 研究所、日本 金属、不二ラ イトメタル	Mg-Zn-Ca-Al-Mn 系 合金の機械的特性 と室温成形性に及 ぼすアルミニウム 濃度の影響	軽金属学会第 140 回 春期大会	2021/5/16
110	千野靖正	産業技術総合 研究所	優れた室温成形性 を示すマグネシウム 合金を自動車に 適用するための研 究開発	Sampe Japan 2021 年度第 1 回(通算 192 回) 技術情報 交換会	2021/7/30

111	千野靖正、黄新胜、中津川勲	産業技術総合研究所	優れた室温成形性を示すマグネシウム合金を自動車に適用するための研究開発	産業技術総合研究所 マルチマテリアル研究部門 2021年度 マルチマテリアルシンポジウム	2021/11/25
112	千野靖正、黄新胜、中津川勲、BIAN Mingzhe、阿子島めぐみ、李沐、阿部陽香	産業技術総合研究所	成形性と放熱性を両立させたマグネシウム合金展伸材の開発	産業技術総合研究所 サステナブルインフラ研究ラボ 公開シンポジウム	2021/12/03
113	千野靖正	産業技術総合研究所	難燃性マグネシウム合金展伸材の鉄道車両への適用に向けた研究開発	高機能素材 Week メタルジャパン協賛団体セミナー	2021/12/08
114	千野靖正、清水和紀、城戸太司、石川武、田口真、堀谷貴雄	産業技術総合研究所、三協立山、不二ライトメタル、総合車両製作所、川崎重工業、ISMA	Development of Innovative Magnesium Alloys and Their Application Technologies for Structural Components of Railway and Automobile	MRM2021 Materials Research Meeting	2021/12/15
115	千野靖正	産業技術総合研究所	加工しやすいマグネシウム合金	nano tech 2022 第21回 国際ナノテクノロジー総合展・技術会議	2022/1/26～2022/1/28
116	千野靖正	産業技術総合研究所	優れた室温成形性を示すマグネシウム合金板材の開発	第11回次世代ものづくり基盤技術産業展 (TECH_BIZ_EXPO) 講演会	2022/2/10
117	千野靖正、森久史、清水和紀、城戸太司、石川武、田口真、堀谷貴雄	産業技術総合研究所、三協立山、不二ライトメタル、総合車両製作所、川崎重工業、ISMA	Development of flame-retardant wrought magnesium alloys and application of the alloys to high-speed railway body	TMS 2022 Annual Meeting & Exhibition (TMS2022)	2022/3/14 ～ 2022/4/30

118	千野 靖正	産業技術総合研究所	革新的新構造材料研究開発プロジェクトにおけるマグネシウムに関する研究開発について（難燃性マグネシウム合金展伸材を高速鉄道車両構体に適用するための研究開発について）	高性能 Mg 合金創成加工研究会第 83 回講演会	2022/3/28
119	Shao Xuanyi , 宮下幸雄	長岡技術科学大学大学	難燃性マグネシウム合金とアルミニウム合金および鋼との異材 SPR 接合	日本機械学会 2021 年度年次大会	2021/09/08
120	Shao Xuanyi , 宮下幸雄	長岡技術科学大学大学	Mg-Al-Ca 合金 TIG および MIG 溶接材の平面曲げ疲労特性に及ぼす溶接プロセスの影響	軽金属学会 第 141 回秋季大会	2021/11/14
121	荻堂盛彬, 宮下幸雄, Shao Xuanyi, Do Minh Duc	長岡技術科学大学大	難燃性マグネシウム合金 AX41 共材および異材 SPR 接合体の引張せん断負荷下での疲労強度特性	日本機械学会 第 29 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2021)	2021/11/19
122	宮下幸雄	長岡技術科学大学	マグネシウム合金の接合材の疲労特性	軽金属学会 第 117 回シンポジウム「マグネシウム合金の接合技術」	2021/11/25
123	宮下幸雄	長岡技術科学大学	マグネシウム合金とその異材接合への SPR および接着併用 SPR の適用	第 30 回 構造接着・精密接着シンポジウム	2021/11/30
124	宮下幸雄	長岡技術科学大学	マグネシウム合金の SPR 異材接合と接合体強度特性	JAAA2021 シンポジウム「先進自動車製造技術における接合技術 2021」	2021/12/01
125	荻堂盛彬, 宮下幸雄, Shao Xuanyi, Do Minh Duc	長岡技術科学大学	難燃性マグネシウム合金 AX41 SPR 接合体の強度特性	溶接学会東部支部溶接・接合研究交流会	2021/12/10
126	清水和紀、松本泰誠、小川正芳、中田大貴、鎌土重晴	三協立山(株) 長岡技術科学大学	鉄道車両構造部材に使用する易加工性マグネシウム合金押出材の開発	軽金属学会第 140 回春期大会	2021/05/16 (学会発表)



127	清水和紀	三協立山(株)	マグネシウム合金押出材の製造技術と用途開発動向	日本機械学会機械材料・材料加工部門第39回 M&P サロン	2021/09/10 (口頭発表)
128	菊池海斗、中田大貴、宮下幸雄、鎌土重晴	長岡技術科学大学	Mg-Zn-Ca-Al-Mn合金圧延板材の微細組織および諸性質に及ぼす圧延条件の影響	軽金属学会第141回秋期大会	2021/11/13
129	伊藤優輔、中田大貴、鎌土重晴	長岡技術科学大学	低濃度 Mg-Zn-Ca -Mn合金圧延板材の引張特性に及ぼす均質化処理条件の影響	軽金属学会第141回秋期大会	2021/11/13
130	佐藤雅彦	日本金属(株)	高い室温成形性と熱伝導率を兼備するマグネシウム合金展伸材の開発	高機能素材 Weekメタルジャパン協賛団体セミナー	2021/12/09
131	Z.H. Li, T.T. Sasaki, X. Luo, T. Nakata, S. Kamado, K. Hono	物質・材料研究機構、京大 ESISM、長岡技術科学大学	Development of bake-hardenable Mg-Al-Ca-Mn-Ce concentrated alloy sheets with good room temperature formability	日本金属学会 2022 年春期講演大会	2022/3/16
132	佐々木泰祐、 Bian Ming-Zhe、 Li Zehao、 宝野和博	物質・材料研究機構、京大 ESISM、	高強度高成形性熱処理型マグネシウム合金板材の開発	日本金属学会 2022 年春期講演大会	2022/3/16
133	Taisuke Sasaki、 Ming-Zhe Bian、 Li Zehao、 Taiki Nakata、 Shigeharu Kamado、 Kazuhiro Hono	物質・材料研究機構、京大 ESISM、長岡技術科学大学	Strategies to achieve excellent room temperature formability and high strength in wrought magnesium alloy sheets	Mg2021	2021/6/15

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	ISMA 他	川崎重工など組合、新幹線部品試作新合金で3割軽く	日本経済新聞電子版	2018/06/12
2	NEDO、ISMA 他	マグネシウム合金で試作	日刊工業新聞	2018/06/13
3	NEDO、ISMA 他	NEDO など 難燃性マグネ合金 大型構造物を試作	日刊産業新聞	2018/06/13
4	NEDO、ISMA 他	マグネ合金製鉄道車両構体試作	鉄鋼新聞	2018/06/13
5	NEDO、ISMA 他	難燃性マグネ合金で高速鉄道車両構体	日刊産業新聞	2018/06/14

6	NEDO、ISMA 他	NEDO、川崎重工など マグネシウム合金製の鉄道車両試作	フジサンケイビジネスアイ	2018/06/25
7	木ノ本伸線(株)	溶接ニュース 7月10日号軽量化特集《企業紹介》	溶接ニュース	2018/7/10
8	木ノ本伸線(株)	マグネシウム合金ものづくりセミナー	日刊工業新聞	2020/02/05
9	木ノ本伸線(株)	マグネシウム合金ものづくりセミナー	溶接ニュース	2020/2/25
10	物質・材料研究機構	材料内部の損傷 音で検出	日刊工業新聞	2019/09/25
11	産業技術総合研究所	鉄道車両の更なる軽量化を目指して(難燃性マグネシウム合金展伸材の適用)	日刊工業新聞	2019/12/18
12	三協立山(株)	難燃性マグネシウム合金を用いた世界最大級の高速鉄道車両部分構体(ボディ)の試作に三協マテリアルが貢献	三協立山グループ CSR 報告書 2019(三協立山(株)ホームページ： <a href="https://www.st-grp.co.jp/">https://www.st-grp.co.jp/</a> )への掲載	2019/09/01
13	産業技術総合研究所	(1) マルチマテリアル研究部門(の研究紹介)p.7、(2) 高強度難燃性マグネシウム合金展伸部材の開発 p.13	産業技術総合研究所 材料・化学領域パンフレット	2020/04/01

### (c)プレス発表

番号	所属	タイトル	発表形式	発表年月
1	NEDO、ISMA、(株)総合車両製作所、川崎重工業(株)、三協立山(株)、権田金属工業(株)、住友電気工業(株)、不二ライトメタル(株)、大日本塗料(株)、産業技術総合研究所、木ノ本伸線(株)、ミリオン化学(株)	世界最大級、難燃性マグネシウム合金を使った高速鉄道車両部分構体の試作に成功 ―軽くて強いマグネシウムで、新幹線などの軽量化、高速化、省エネ化を目指す―	記者会見	2018/06/12
2	NEDO、ISMA	高速鉄道車両向け難燃性マグネシウム合金製の部分構体で気密疲労試験を実施 ―高い信頼性を実証、さらなる軽量化を可能に―	投げ込み	2021/06/07
3	日本金属株式会社、産業技術総合研究所、不二ライトメタル株式会社	～マグネシウム合金展伸材の用途拡大に期待～ 優れた室温成形性と強度、高い熱伝導率を有する 「新マグネシウム合金圧延材」を新開発	投げ込み	2021/10/25
4	NEDO、ISMA	難燃性マグネシウム合金製の床板を新幹線試験車両に適用し、性能試験を実施 ―1両当たり床板の約23%軽量化を達成、省エネ化に貢献―	投げ込み	2022/04/04
5	日本金属株式会社	「ZA系マグネシウム合金材」を使用した異形圧延製品開発のお知らせ	投げ込み	2022/06/09

## (d)その他

なし

### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	産業技術総合研究所、三協立山(株)、権田金属工業(株)、住友電気工業(株)、不二ライトメタル(株)、(株)総合車両製作所、川崎重工業(株)、大日本塗料(株)、木ノ本伸線(株)、ミリオン化学(株)、ISMA	第18回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議	モックアップ構体・ポスター展示	2019/01/30～02/01
2	三協立山(株)	第8回次世代ものづくり基盤技術産業展	サンプル展示	2019/02/06～07
3	木ノ本伸線(株)	第5回関西高機能金属展	現物展示	2018/5/9～2018/5/11
4	木ノ本伸線(株)	第5回高機能金属展	現物展示	2018/12/5～2018/12/7
5	ISMA	nano tech 2019	構体モックアップの展示	2019/01/30～02/01
6	木ノ本伸線(株)	平成30年度 マグネシウム合金ものづくりネットワーク活動報告会	現物展示	2019/2/5
7	木ノ本伸線(株)	第6回関西高機能金属展	現物展示	2019/05/22～24
8	木ノ本伸線(株)	第6回高機能金属展	現物展示	2019/12/4～4
9	木ノ本伸線(株)	近畿経済産業局主催 令和元年度 マグネシウム合金ものづくりセミナー	現物展示	2020/2/4
10	三協立山(株)	富山県ものづくり総合見本市2019	Mg製簡易モックアップ部分構体の展示、ポスター展示	2019/10/31～11/02
11	木ノ本伸線株式会社	第7回関西高機能金属展	現物展示	2020/10/7～2020/10/9
12	産業技術総合研究所、日本金属、不二ライトメタル	第11回次世代ものづくり基盤技術産業展(TECH_BIZ_EXPO)	現物展示	2022/02/09-2022/02/10
13	ISMA	第15回オートモーティブワールド展	自動車 1/1 フロントフード等の展示	2023/01/25～01/27
14	ISMA	Nano tech 2023 国際ナノテクノロジー総合展	自動車 1/1 フロントフード等の展示	2023/02/01～02/03

## 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	大阪府立大学・高畑太朗、兵頭由紀、瀧川順庸、上杉徳照、東健司 木ノ本伸線(株)・上田光二、木ノ本裕	高速鉄道車両用マグネシウム合金 MIG 溶接継手の機械的特性に及ぼす溶加材組成の影響	日本材料学会 第4回材料 WEEK 材料シンポジウム 若手学生研究発表会 ベストプレゼンテーション賞	2018/10/16
2	大阪府立大学・高畑太朗、瀧川順庸、上杉徳照、東健司 木ノ本伸線(株)・上田光二、木ノ本裕	理論的解析と機械学習による難燃性 Mg 合金 MIG 溶接継手の強度予測	軽金属学会関西支部 平成30年度 若手研究者・院生による研究発表会 ベストポスター賞	2019/1/16
3	物質・材料研究機構・伊藤海太、白岩隆行、高橋一輝・東京大学、行武栄太郎・茨城県産業技術イノベーションセンター	Wireless AE measurement during friction stir welding of flame-resistant magnesium alloy	日本非破壊検査協会 学術奨励賞	2019/06/07
4	物質・材料研究機構・佐々木泰祐	金属材料のマルチスケール組織解析と高特性化に関する研究	平成 31 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞	2019/4/17
5	物質・材料研究機構・伊藤海太	アコースティック・エミッション法によるマグネシウム合金接合部の非破壊評価技術の開発研究	令和元年度(第 23 回)日本マグネシウム協会賞 奨励賞	2021/01/14
6	菊池海斗・長岡技術科学大学	Mg-Zn-Ca-Al-Mn 合金圧延板材の諸性質に及ぼす亜鉛およびカルシウム添加量の影響	優秀ポスター発表賞	2020/11/7
7	千野靖正・産業技術総合研究所	組織制御及び集合組織制御による高性能マグネシウム合金展伸材の開発	永井科学技術財団 学術賞	2021/3/16
8	Shao Xuanyi・長岡技術科学大学	難燃性マグネシウム合金の共材および異材接合のプロセスと接合体の強度信頼性評価	2020 年度溶接学会奨学賞	2021/2/ 22
9	佐々木泰祐・材料研究機構	マルチスケール組織解析による金属材料の高性能化に関する研究	つくば奨励賞	2020/12/2
10	佐々木泰祐・材料研究機構	マルチスケール組織解析を活用した金属材料の高性能化の指導原理の構築	本多記念研究奨励賞	2021/2/23
11	佐々木泰祐・材料研究機構	マルチスケール組織解析による金属材料の高特性化に関する研究	第 80 回功績賞・日本金属学会	2022/03/15
12	Taisuke Sasaki, MingZhe Bian, Zehao Li, and Kazuhiro Hono・材料研究機構	Toward Development of Strong and Formable Magnesium Alloy Sheets with Bake-Hardenability	TMS LIGHT METALS MAGNESIUM BEST PAPER – APPLICATION AWARD	2021/11/3
13	千野靖正	組織制御及び集合組織制御によるマグネシウム合金展伸材の高性能化に関する研究	軽金属功績賞	2022/5/27
14	千野靖正	マグネシウム合金展伸材の研究開発とプロジェクト関連事業推進の功績	第25回日本マグネシウム協会賞(功績賞)	2022/6/10

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	産総研、三協立山、権田金属工業、住友電気工業、不二ライトメタル（テーマ34） 総合車両、川崎重工、NIMS、大日本塗料、木ノ本伸線、茨城県産業技術イノベーションセンター、ミリオン化学、芝浦工大（テーマ35）	革新的新構造材料等研究開発 「平成30年度成果報告会」	ポスター	2019/01/21
2	産総研	革新的新構造材料等研究開発 「2019年度成果報告会」	（ポスター、口頭発表）	2020/2/28 （中止）
3	産総研	革新的新構造材料等研究開発 「2020年度成果報告会」	（ポスター）、口頭発表	2021/7/1
4	産総研	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・SIP 統合型材料開発システムによるマテリアル革命（JST） ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点（ESISM） ・新構造材料技術研究組合（ISMA）	口頭発表	2021/9/22
5	産総研	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	（ポスター）、口頭発表	2022/1/31
6	産総研	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	（ポスター）、口頭発表	2022/12/20
7	産総研	革新的新構造材料等研究開発 「最終報告会」	口頭発表	2023/3/16

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号50] 「Mg材の性能・寿命に関するMI（マテリアルズインテグレーション）活用技術開発（FS研究）」（2017年度）

[テーマ番号60] 「マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション（MI）活用技術の開発」（2018年度～2022年度）

表 添-5.8-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2017FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2018FY	0	0	0	1	0	10	0	0	0	0	3	1
2019FY	0	0	0	4	0	23	0	0	0	0	0	1
2020FY	0	0	0	1	0	11	0	0	0	0	2	1
2021FY	0	0	0	1	0	12	0	0	0	0	0	2
2022FY	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	7	1	56	0	0	0	0	5	7

※1：Patent Cooperation Treaty：特許協力条約

※2：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	宮下幸雄 （共著者；木村聖光，萩原悠斗，大塚雄市）	長岡技術科学	難燃性 Mg-Al-Ca 系合金押出材の疲労強度特性とその疲労強度に及ぼす Al 添加量の影響の破壊力学的検討	材料 (67 巻, 12 号, p. 1029-1035)	有	2018/12/15
2	Fabien Briffod, 白岩隆行, 榎学	東京大学	Numerical investigation of the influence of twinning/detwinning on fatigue crack initiation in AZ31 magnesium alloy	Materials Science and Engineering: A (Volume 753, Pages 79-90)	有	2019/4/10

3	Yukio Miyashita, Takahiro Nishimizu, Kohei Kokutani, Yuichi Otsuka	Nagaoka Univ. of Tech.	Fatigue design of weld part in non-combustible magnesium alloy based on fracture mechanics	Procedia Structural Integrity (Part of special issue: Fatigue Design 2019) (Volume 19, Pages 604-609)	有	2019/12/24
4	Fabien Briffod, 白岩隆行, 榎学	東京大学	Monotonic and cyclic anisotropies of an extruded Mg-Al-Ca-Mn alloy plate: Experiments and crystal plasticity studies	Materials Science and Engineering: A (Volume 772, 138753)	有	2020/1/20
5	上田光二 <sup>1</sup> , 桑原敏弘 <sup>1</sup> , 瀧川順庸 <sup>2</sup> , 石川武 <sup>3</sup>	<sup>1</sup> 木ノ本伸線株式会社, <sup>2</sup> 大阪府立大学, <sup>3</sup> 株式会社総合車両製作所	新難燃性マグネシウム合金 MIG 溶接の高速鉄道車両構体への応用	アルトピア (50 (2), 17-25)	有	2020/2/15
6	岡出 健太朗, Fabien Briffod, 白岩 隆行, 榎学	東京大学	AE 法と結晶方位解析による Mg 合金の低サイクル疲労挙動解析	日本材料強度学会誌	有	2020/11/20
7	斎藤尚文 <sup>1</sup> , 上田祐規 <sup>2</sup> , 城戸太司 <sup>2</sup> , 井上正士 <sup>2</sup> , 松本敏治 <sup>3</sup> , 上田光二 <sup>4</sup> , 石川 武 <sup>5</sup> , 千野靖正 <sup>1</sup>	1) 産業技術総合研究所 2) 不二ライトメタル(株) 3) (株) 戸畑製作所 4) 木ノ本伸線(株) 5) (株) 総合車両製作所	Mg-9%Al-1%Zn-2%Ca 合金押出材および MIG 溶接材, TIG 溶接材の平面曲げ疲労特性	軽金属( 72 巻 1 号 p. 8-15)	有	2022/01
8	榎学	東京大学	マテリアルズインテグレーションによるマグネシウム材の疲労寿命予測	金属 Vol.92(2022),No.6, pp.542-548	無	2022/6

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	高畑太朗 <sup>1</sup> , 瀧川順庸 <sup>1</sup> , 上杉徳照 <sup>1</sup> , 上田光二 <sup>2</sup> , 木ノ本裕 <sup>2</sup> , 東健司 <sup>1</sup>	1大阪府立大学 2木ノ本伸線(株)	Mg-9Al-1Zn-2Ca 合金 MIG 溶接継手の機械的特性に及ぼす溶加材組成の影響	日本金属学会 第 163 回秋期講演大会	2018/9/19
2	榎学	東京大学	マテリアルズ・インテグレーションによる性能予測から逆問題解析へ	日本金属学会 2018 年秋期講演大会・基調講演	2018/9/20
3	中島 誓哉, 坂口了太, Fabien Briffod, 白岩 隆行, 榎学	東京大学	Mg 合金における母相及び介在物からの疲労き裂発生の比較	日本金属学会 2018 年秋期講演大会	2018/9/20
4	高畑太朗 <sup>1</sup> , 兵頭由紀 <sup>1</sup> , 瀧川順庸 <sup>1</sup> , 上杉徳照 <sup>1</sup> , 上田光二 <sup>2</sup> , 木ノ本裕 <sup>2</sup> , 東健司 <sup>1</sup>	1大阪府立大学 2木ノ本伸線(株)	高速鉄道車両用マグネシウム合金 MIG 溶接継手の機械的特性に及ぼす溶加材組成の影響	日本材料学会 第 4 回材料 WEEK 材料シンポジウム 若手学生研究発表会	2018/10/16
5	宮下幸雄	長岡技術科学大学	Mg-4%Al-1%Ca 合金溶接材の疲労強度特性	第 26 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2018)	2018/11/4
6	高畑太朗 <sup>1</sup> , 瀧川順庸 <sup>1</sup> , 上杉徳照 <sup>1</sup> , 上田光二 <sup>2</sup> , 木ノ本裕 <sup>2</sup> , 東健司 <sup>1</sup>	1大阪府立大学 2木ノ本伸線(株)	Mg-9Al-1Zn-2Ca 合金 MIG 溶接継手の強度・疲労特性に及ぼす溶加材組成の影響	軽金属学会第 135 回秋期大会	2018/11/10
7	宮下幸雄	長岡技術科学大学	Mg-Al-Ca 系合金の疲労強度および疲労メカニズム	軽金属学会 第 135 回秋期大会	2018/11/11
8	Fabien Briffod, Takayuki Shiraiwa, Manabu Enoki	東京大学	AZ31 マグネシウム合金における疲労き裂発生の数値解析	日本機械学会 M&M2018 材料力学カンファレンス	2018/12/23
9	高畑太朗 <sup>1</sup> , 瀧川順庸 <sup>1</sup> , 上杉徳照 <sup>1</sup> , 上田光二 <sup>2</sup> , 木ノ本裕 <sup>2</sup> , 東健司 <sup>1</sup>	1大阪府立大学 2木ノ本伸線(株)	理論的解析と機械学習による難燃性 Mg 合金 MIG 溶接継手の強度予測	軽金属学会関西支部平成 30 年度 若手研究者・院生による研究発表会	2019/1/16
10	中島 誓哉, 坂口了太, Fabien Briffod, 白岩 隆行, 榎学	東京大学	難燃性 Mg 合金の疲労き裂発生の観察と結晶塑性解析	日本金属学会 2019 年春期講演大会	2019/3/21
11	榎学, Fabien Briffod, 白岩 隆行, 中島 誓哉	東京大学	結晶塑性解析によるマグネシウム合金の疲労寿命予測	軽金属学会第 136 回春期講演大会	2019/5/12



12	伊藤海太 <sup>1</sup> , 榎学 <sup>2</sup>	<sup>1</sup> 物質・材料研究機構, <sup>2</sup> 東京大学	マテリアルズ・インテグレーション技術を用いた難燃性マグネシウム合金の性能予測のためのデータベース設計	軽金属学会第 136 回春期大会	2019/5/12
13	河越大典 <sup>1</sup> , 中田大貴 <sup>1</sup> , 鎌土重晴 <sup>1</sup> , 松本泰誠 <sup>2</sup> , 清水和紀 <sup>2</sup>	<sup>1</sup> 長岡技術科学大学, <sup>2</sup> 三協立山株式会社	Mg-4.0Al-1.0Ca-0.2Mn(mass%) 合金押し出し材の機械的性質に及ぼす組織因子の影響	軽金属学会第 136 回春期大会	2019/5/12
14	瀧川順庸 <sup>1</sup> , 上杉徳照 <sup>1</sup> , 上田光二 <sup>2</sup> , 木ノ本裕 <sup>2</sup> , 東健司 <sup>1</sup>	<sup>1</sup> 大阪府立大学 <sup>2</sup> 木ノ本伸線株式会社	難燃性マグネシウム合金 MIG 溶接体の継手強度に影響する因子の検討	軽金属学会第 136 回春期大会	2019/5/12
15	近成勇太, 中辻竜也, 池尾直子, 向井敏司	神戸大学	マグネシウムの一軸引張および圧縮変形挙動に及ぼすカルシウム添加効果	軽金属学会第 136 回春期大会	2019/5/12
16	伊藤海太	物質・材料研究機構	マテリアルズインテグレーションのための材料データベースの設計	SIP-MI イブニングセミナー	2019/7/3
17	Kaita Ito <sup>1</sup> , Satoshi Minamoto <sup>1</sup> , Takuya Kadohira <sup>1</sup> , Makoto Watanabe <sup>1,2</sup> , Masahiko Demura <sup>1</sup> , Manabu Enoki <sup>2</sup>	<sup>1</sup> NIMS, <sup>2</sup> The Univ. Tokyo	Development of Workflow Subsystems and Structural Material Database with Direct Handling of Materials Parameters	5th World Congress on Integrated Computational Materials Engineering (ICME2019)	2019/7/21
18	Daisuke Egusa	The Univ. Tokyo	Development of prediction techniques for long-term performance of Mg alloys based on Materials Integration approach	5th World Congress on Integrated Computational Materials Engineering (ICME2019)	2019/7/23
19	榎学	東京大学	Materials Integration Project for Structural Materials in Japan	5th World Congress on Integrated Computational Materials Engineering (ICME 2019) • Plenary lecture	2019/7/24
20	Fabien Briffod, 白岩隆行, 榎学	東京大学	Crystal Plasticity Simulation of Fatigue Behavior in Extruded Magnesium Alloy	5th World Congress on Integrated Computational Materials Engineering (ICME 2019)	2019/7/24
21	高畑太郎 <sup>1</sup> , 瀧川順庸 <sup>1</sup> , 上杉徳照 <sup>1</sup> , 上田光二 <sup>2</sup> , 木ノ本裕 <sup>2</sup> , 東健司 <sup>1</sup>	<sup>1</sup> 大阪府立大学 <sup>2</sup> 木ノ本伸線株式会社	難燃性 Mg 合金における実験と機械学習を用いた最適 MIG 溶接条件探索	日本金属学会 2019 年秋期 (第 165 回) 講演大会	2019/09/11

22	榎 学	東京大学	マテリアルズ・インテグレーションによる構造材料の性能の逆問題解析	日本金属学会 2019 年秋期（第 165 回）講演大会	2019/9/11
23	伊藤海太 <sup>1</sup> , 源 聡 <sup>1</sup> , 門平卓也 <sup>1</sup> , 出村雅彦 <sup>1</sup> , 榎 学 <sup>2</sup>	<sup>1</sup> 物質・材料研究機構, <sup>2</sup> 東京大学	マテリアルズインテグレーション技術のための材料データベース開発と運用	日本金属学会 2019 年秋期(第 165 回)講演大会	2019/9/12
24	中島誓哉, Fabien Briffod, 白岩隆行, 榎 学	東京大学	難燃性 Mg 合金の疲労き裂発生及び進展の観察と疲労寿命予測	日本金属学会 2019 年秋期(第 165 回)講演大会	2019/9/12
25	岡出健太郎, 白岩隆行, 榎 学	東京大学	AE を用いた低サイクル疲労試験の Mg 合金の変形機構の解析	日本金属学会 2019 年秋期(第 165 回)講演大会	2019/9/12
26	榎学, Fabien Briffod, 白岩 隆行	東京大学	Prediction of Fatigue Crack Initiation in Magnesium Alloys	Sustainable Industrial Processing Summit (SIPS2019)	2019/10/25
27	Shao Xuanyi, Rafidah binti Ismail, 宮下幸雄	長岡技術科学大学	Mg-Al-Ca-Mn 系合金母材および溶接材の平面曲げ疲労強度特性に及ぼす 平均応力の影響	軽金属学会第 137 回秋期大会	2019/11/3
28	尾上尊 <sup>1</sup> , 高畑太朗 <sup>1</sup> , 上田光二 <sup>2</sup> , 木ノ本裕 <sup>2</sup> , 瀧川順庸 <sup>1</sup>	<sup>1</sup> 大阪府立大学 <sup>2</sup> 木ノ本伸線株式会社	Mg-4Al-1Ca-0.2Mn 合金 MIG 溶接継手の強度に及ぼす溶加材組成および溶接条件の影響	日本鉄鋼協会・日本金属学会 関西支部 マテリアルデザイン研究会	2019/11/15
29	Yukio Miyashita, Takahiro Nishimizu, Kohei Kokutani, Yuichi Otsuka,	Nagaoka Univ. of Tech..	Fatigue design of weld part in non-combustible magnesium alloy based on fracture mechanics	Fatigue Design 2019	2019/11/20
30	河越大典 <sup>1</sup> , 中田大貴 <sup>1</sup> , 鎌土重晴 <sup>1</sup> , 松本泰誠 <sup>2</sup> , 清水和紀 <sup>2</sup>	<sup>1</sup> 長岡技術科学大学, <sup>2</sup> 三協立山株式会社	AXM4102合金押し出し材のマイクロ組織と機械的性質に及ぼす押し出し条件の影響 (学生表彰)	日本金属学会北陸信越支部・日本鉄鋼協会令和元年度北陸信越支部連合講演会	2019/11/30
31	榎 学	東京大学	On the consideration of inverse problem analysis for performance of structural materials	Materials Research Meeting (MRM 2019)	2019/12/11
32	高畑太朗 <sup>1</sup> , 上杉徳照 <sup>1</sup> , 上田光二 <sup>2</sup> , 木ノ本裕 <sup>2</sup> , 瀧川順庸 <sup>1</sup>	<sup>1</sup> 大阪府立大学 <sup>2</sup> 木ノ本伸線株式会社	難燃性Mg合金MIG溶接条件最適化のための実験と機械学習の併用による強度予測モデルの構築	軽金属学会関西支部若手研究者・院生による研究発表会	2019/12/23
33	尾上尊 <sup>1</sup> , 高畑太朗 <sup>1</sup> , 上田光二 <sup>2</sup> , 木ノ本裕 <sup>2</sup> , 瀧川順庸 <sup>1</sup>	<sup>1</sup> 大阪府立大学 <sup>2</sup> 木ノ本伸線株式会社	高速鉄道車両用Mg合金 AXM4102のMIG溶接継手強度に及ぼす溶加材組成および溶接条件の影響	軽金属学会関西支部若手研究者・院生による研究発表会	2019/12/23

34	瀧川順庸 <sup>1</sup> , 上田光二 <sup>2</sup> , 木ノ本裕 <sup>2</sup> , 上杉徳照 <sup>1</sup> , 東健司 <sup>1</sup>	<sup>1</sup> 大阪府立 大学 <sup>2</sup> 木ノ本伸 線株式会 社	難燃性マグネシウム合金MIG溶 接体の高信頼化指針	軽金属学会 第 138 回 春期大会	2020/5/24
35	中津川勲 <sup>1</sup> , 紺野晃弘 <sup>2</sup> , 西中一仁 <sup>3</sup> , 難波信次 <sup>4</sup> , 部谷森康親 <sup>5</sup> , 浅野俊之 <sup>6</sup> , 梅原博行 <sup>7</sup> , 駒井浩 <sup>8</sup> , 千野靖正 <sup>1</sup>	<sup>1</sup> 産業技術 総合研究 所 <sup>2</sup> 日本ウェ ザリングテ ストセン ター <sup>3</sup> ㈱アート1 ミリオン化 学(株) <sup>5</sup> 大日本塗 料(株) <sup>6</sup> 茨城県産 業イノベー ションセン ター <sup>7</sup> 元産業技 術総合研 究所 <sup>8</sup> 日本マグ ネシウム協 会	大気暴露試験により得られたMg- Al 系マグネシウム合金圧延材の 腐食評価	軽金属学会 第 138 回 春期大会	2020/5/24
36	中辻竜也, 妹尾和 樹, 前田智哉, 池 尾直子, 向井敏司	神戸大学	Mg-Al-Ca系難燃性マグネシウム 合金の高速変形特性評価	軽金属学会 第 138 回 春期大会	2020/05/24
37	伊藤海太 <sup>1</sup> , 白岩隆行 <sup>2</sup> , 江草大祐 <sup>2</sup> , 榎学 <sup>2</sup>	<sup>1</sup> 物質・材 料研究機 構 <sup>2</sup> 東京大学	プロセス履歴を含む材料データベ ースの開発と機械学習による性能 予測への適用	軽金属学会 第 138 回 春期大会	2020/5/24
38	岡出 健太郎, Fabien Briffod, 白岩 隆行, 榎学	東京大学	AE 法と結晶方位解析による Mg 合金の低サイクル疲労挙動解析	日本材料強度学会 2020 年学術講演会	2020/8/20
39	Kaige Wu, Manabu Enoki	東京大学	Corrosion of Flame-Retardant Mg Alloys under NaCl Droplet Studied by Acoustic Emission	日本金属学会 2020 年 秋期(第 167 回)講演大 会	2020/9/17
40	岡出 健太郎, Fabien Briffod, 白岩 隆行, 榎学	東京大学	AEと結晶方位解析による Mg合金の繰返し変形挙動解析	日本金属学会 2020 年 秋期(第 167 回)講演大 会	2020/9/17
41	尾上尊 <sup>1</sup> , 高畑太朗 <sup>1</sup> , 上田光二 <sup>2</sup> , 木ノ本裕 <sup>2</sup> , 瀧川順庸 <sup>1</sup>	<sup>1</sup> 大阪府立 大学 <sup>2</sup> 木ノ本伸 線株式会 社	高速鉄道車両腰掛フレームへの 難燃性Mg合金適用に向けた MIG溶接条件最適化による継手 疲労特性の向上	日本材料学会 第 6 回 材料 WEEK 若手学生 研究発表会	2020/10/13

42	尾上尊 <sup>1</sup> , 高畑太朗 <sup>1</sup> , 上田光二 <sup>2</sup> , 木ノ本裕 <sup>2</sup> , 瀧川順庸 <sup>1</sup>	<sup>1</sup> 大阪府立大学 <sup>2</sup> 木ノ本伸線株式会社	難燃性マグネシウム合金MIG溶接継手における疲労特性向上のための溶接条件最適化	軽金属学会 第 139 回 秋期大会	2020/11/7
43	Kaige Wu, Manabu Enoki	東京大学	Uniform-to-pitting corrosion transition in 5083 aluminum alloy monitored by acoustic emission	日本金属学会 2021 年 春期(第 168 回)講演大会	2021/3/18
44	岡出 健太朗, Fabien Briffod, 白岩 隆行, 榎学	東京大学	AEとCPFEMを用いたMg合金の疲労試験中の変形機構解析	日本金属学会 2021 年 春期(第 168 回)講演大会	2021/3/18
45	瀧川順庸1), 上田光二2), 木ノ本裕2), 上杉徳照1), 東健司1)	1) 大阪府立大学 2) 木ノ本伸線株式会社	難燃性マグネシウム合金のMIG溶接体の高信頼化	軽金属学会 第 140 回春期大会	2021/05/16
46	中津川勲1), 山下智子2), 西川昂志2), 谷口康人2), 山田晃司2), 千野靖正1)	1)産業技術総合研究所 2)大日本塗料(株)	Mg-Al-Zn-Ca系マグネシウム合金展伸材の大気暴露腐食挙動	軽金属学会 第 140 回春期大会	2021/05/16
47	中辻竜也, 松本修治, 妹尾和樹, 池尾直子, 向井敏司	神戸大学	衝撃荷重下におけるMg-Al-Ca系難燃性マグネシウム合金の変形挙動	軽金属学会 第 140 回春期大会	2021/5/16
48	伊藤海太1), 白岩隆行2), 榎学2)	1) 物質・材料研究機構 2) 東京大学	機械学習による性能予測精度の向上に資するマグネシウム材料データベースの設計とセキュアな運用	軽金属学会 第 140 回春期大会	2021/5/16
49	白岩隆行, 榎学	東京大学	機械学習によるマグネシウム合金の疲労特性予測	軽金属学会 第 140 回春期大会	2021/5/16
50	Kaige Wu, Manabu Enoki	東京大学	Analysis of pitting corrosion initiation in AZX912 alloy by in-situ 4D imaging and AE monitoring	日本金属学会 2022 年 春期講演大会	2022/03/16
51	岡出 健太朗, Fabien Briffod, 白岩 隆行, 榎学	東京大学	AE法を用いた難燃性Mg合金の変形機構の解析	日本金属学会 2022 年 春期講演大会	2022/03/16
52	瀧川順庸1), 上田光二2), 木ノ本裕2), 上杉徳照1), 東健司1)	1) 大阪府立大学 2) 木ノ本伸線株式会社	難燃性マグネシウム合金のMIG溶接体の高信頼化	軽金属学会 第 140 回春期大会	2021/05/16

53	中津川勲1), 山下智子2), 西川昂志2), 谷口康人2), 山田晃司2) 千野靖正1)	1)産業技術総合研究所 2)大日本塗料(株)	Mg-Al-Zn-Ca系マグネシウム合金展伸材の大気暴露腐食挙動	軽金属学会 第140回春期大会	2021/05/16
54	中辻竜也, 松本修治, 妹尾和樹, 池尾直子, 向井敏司	神戸大学	衝撃荷重下におけるMg-Al-Ca系難燃性マグネシウム合金の変形挙動	軽金属学会 第140回春期大会	2021/5/16
55	伊藤海太1), 白岩隆行2), 榎学2)	1) 物質・材料研究機構 2) 東京大学	機械学習による性能予測精度の向上に資するマグネシウム材料データベースの設計とセキュアな運用	軽金属学会 第140回春期大会	2021/5/16
56	白岩隆行, 榎学	東京大学	機械学習によるマグネシウム合金の疲労特性予測	軽金属学会 第140回春期大会	2021/5/16

**(b)新聞・雑誌等への掲載**

なし

**(c)プレス発表**

なし

**(d)その他**

なし

**1.4 展示会への出展**

なし

**1.5 受賞**

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	大阪府立大学: 高畑太朗, 兵頭由紀, 瀧川順庸, 上杉徳照 木ノ本伸線(株): 上田光二, 木ノ本裕, 東健司	高速鉄道車両用マグネシウム合金MIG溶接継手の機械的特性に及ぼす溶加材組成の影響	ベストプレゼンテーション賞	2018/10/16
2	大阪府立大学: 高畑太朗, 瀧川順庸, 上杉徳照 木ノ本伸線(株): 上田光二, 木ノ本裕, 東健司	理論的解析と機械学習による難燃性Mg合金MIG溶接継手の強度予測	ベストポスター賞	2019/1/16

3	東京大学・榎学	先端構造材料の力学的信頼性の研究	日本鉄鋼協会学術功績賞	2019/3/20
4	尾上尊 <sup>1</sup> , 高畑太朗 <sup>1</sup> , 上田光二 <sup>2</sup> , 木ノ本裕 <sup>2</sup> , 瀧川順庸 <sup>1</sup>	難燃性マグネシウム合金 MIG 溶接継手 における疲労特性向上のための溶接条 件最適化	軽金属学会 第 139 回 秋期大会 ポスターセッ ション 軽金属溶接協会 賞	2020/11/7
5	伊藤海太	アコースティック・エミッション法によるマグ ネシウム合金接合部の非破壊評価技術 の開発研究	令和元年度(第 23 回) 日本マグネシウム協会賞 奨励賞	2021/1/14

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	東京大学	革新的新構造材料等研究開発 「平成 30 年度成果報告会」	パネル、講演	2019/1/21
2	物質・材料研究機構	革新的新構造材料等研究開発 「2019 年度成果報告会」	パネル	2020/2/28 (中止)
3	物質・材料研究機構 東京大学	革新的新構造材料等研究開発 「2020 年度成果報告会」	(パネル)、講演	2021/7/1
4	東京大学	3 府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・SIP 統合型材料開発システムによるマ テリアル革命(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠 点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	パネルディスカッション	2021/9/22
5	物質・材料研究機構 東京大学	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	(パネル)、講演	2022/1/31
6	物質・材料研究機構 東京大学	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	(パネル)、講演	2022/12/20
7	東京大学	革新的新構造材料等研究開発 「最終報告会」	講演	2023/3/16

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

研究開発項目⑥「革新鋼板の開発」

[テーマ番号22] 残留 $\gamma$ 高度制御革新鋼板の開発（2014年度～2018年度）

[テーマ番号02] 残留 $\gamma$ 相制御中高炭素鋼板の異種・同種接合技術の開発（2019年度）

表 添-6.1-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	0	0	0	7	1	0	0	0	0	1
2016FY	3	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	1
2017FY	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	2
2018FY	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1
2019FY	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021FY	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	7	5	1	1	0	16	1	0	3	0	0	7

※1：Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT ※	出願日	状態	名 称	発明者
1	(株) 神戸製 鋼所	特願 2015-038856	国内	2015/02/27	登録	高強度高延性鋼板	大谷茂生他
2	(株) 神戸製 鋼所	特願 2015-038857	国内	2015/02/27	登録	高強度高延性鋼板	大谷茂生他
6	(株) 神戸製 鋼所	特願 2019-26505	国内	2019/2/19	登録	鋼板	村上俊夫他

7	株式会社神戸製鋼所	PCT/JP2020/005370 (中、韓、欧、米、墨)	PCT	2020/2/12	公開	鋼板	村上俊夫他
---	-----------	----------------------------------	-----	-----------	----	----	-------

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	村上俊夫	神戸製鋼所	自動車用高強度鋼板の延性に及ぼす残留オーステナイト存在状態の影響	R&D 神戸製鋼技報 69 (1) ,2019, 29-32	有	2019/7/31

## 1.3 その他外部発表

### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	村上俊夫・大谷茂生	神戸製鋼所	低合金鋼の化学組成と $\gamma$ 相の格子定数の関係	第170回日本鉄鋼協会秋季講演大会(九州大学 伊都)	2015/9/16
2	大谷茂生・村上俊夫	神戸製鋼所	Effects of Carbon Content Distribution of Retained Austenite on Elongation of TRIP Steel Sheets	第170回日本鉄鋼協会秋季講演大会(九州大学 伊都)	2015/9/17
3	村上俊夫	神戸製鋼所	小型中性子源を用いた残留 $\gamma$ 組織解析技術の開発	第2回元素戦略プロジェクト<研究拠点形成型>/大型研究施設連携シンポジウム	2016/1/21
4	村上俊夫・大谷茂生	神戸製鋼所	中炭素TRIP鋼の加工硬化挙動	第171回日本鉄鋼協会春季講演大会(東京理科大学)	2016/03/23
5	(1)金下武士・宮本吾郎・古原忠, (2)村上俊夫・大谷茂生	(1)東北大学金属材料研究所、(2)神戸製鋼所	Fe-2Mn-1.5Si-C 合金のベイナイト変態に伴う $\gamma$ 中への炭素濃化	第170回日本鉄鋼協会秋季講演大会(九州大学 伊都)	2015/9/16
6	Wu Huidong, 宮本吾郎, 古原忠	東北大学金属材料研究所	Fe-0.4C-3Si合金におけるベイナイト不完全変態	第170回日本鉄鋼協会秋季講演大会(九州大学 伊都)	2015/9/17



7	(1)金下武士・宮本吾郎・古原忠, (2)村上俊夫・大谷茂生	(1)東北大学金属材料研究所、(2)神戸製鋼所	Fe-2Mn-1.5Si-0.4C 合金における引張変形に伴う残留オーステナイトの変態挙動	第171回日本鉄鋼協会春季講演大会(東京理科大学)	2016/03/23
8	村上俊夫	神戸製鋼所	TRIP鋼の加工硬化挙動に及ぼす残留 $\gamma$ の安定度分布状態の影響	残留 $\gamma$ の安定性フォーラム	2016/5/17
9	Takeshi Kaneshita, Goro Miyamoto, Tadashi Furuhashi, Toshio Murakami, Shigeo Otani	東北大学・金属材料研究所, 神戸製鋼所	Carbon enrichment in austenite during bainite transformation in Fe-2Mn-1.5Si-C alloys	国際熱処理会議 (Thermec2016)	2016/5/30
10	古原忠、宮本吾郎	東北大学・金属材料研究所	鉄合金のマルテンサイトおよびベイナイトの成長における界面移動の律速過程	日本鉄鋼協会第172回秋季講演大会	2016/9/21
11	村上俊夫	神戸製鋼所	自動車用超ハイテンの研究開発状況	軽量化革新フォーラム2017	2017/1/19
12	Yoshio Akimune, Toshio Murakami, Takashi Ishikawa	ISMA 神戸製鋼所 名古屋大学	Introduction to the Japanese ongoing project named "Innovative Advanced Structural Materials" and research results on steel and composite development	Materials in Car Body and Engineering	2017/5/17
13	村上俊夫	神戸製鋼所	走査型電子顕微鏡ベースでの炭素分布解析	鉄鋼協会軽元素フォーラム	2017/9/19
14	梶田浩和、村上俊夫	神戸製鋼所	残留 $\gamma$ 形成挙動に及ぼす旧 $\gamma$ 粒径の影響	日本鉄鋼協会春季講演大会	2018/3/20
15	村上俊夫	神戸製鋼所	自動車用超ハイテンの研究開発動向	はままつ超ハイテン研究会	2018/11/9
16	渡辺未来、宮本吾郎、古原忠	東北大学	Fe-2Mn-1.5Si-0.4C合金のベイナイト+残留 $\gamma$ 組織に及ぼす旧 $\gamma$ 粒径の影響	日本鉄鋼協会春季講演大会	2019/3/

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	神戸製鋼所		鉄鋼新聞	2016/03/11

### (c)プレス発表

なし

### (d)その他

なし

## 1.4 展示会への出展

なし

## 1.5 受賞

なし

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22
3	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	ポスター、発表	2017/1/20
4	神戸製鋼所	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
5	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成 29 年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26
6	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「平成 30 年度成果報告会」	ポスター	2019/1/21
7	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発 「2021 年度成果報告会」	(ポスター)、発表	2022/1/31

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号23] 軽元素を有効に用いた革新鋼材の開発（2014年度～2018年度）  
 軽元素を有効に用いた革新鋼材の耐食性および成形性向上技術の開発（2019年度～2022年度）

表 添-6.2-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1
2017FY	0	0	0	1	0	7	0	0	0	0	0	2
2018FY	0	0	0	1	0	4	0	0	0	0	0	1
2019FY	0	0	0	2	0	9	0	0	0	0	4	1
2020FY	0	0	0	4	0	10	0	0	0	0	1	1
2021FY	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	1	1
2022FY	0	0	0	2	0	3	0	0	0	0	1	1
合計	2	0	0	14	0	38	0	0	0	0	8	10

※1：Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT※	出願日	状態	名 称	発明者
1	新日鐵住金株 式会社	特願 2014-180552	国内	2014/09/04	登録	結晶観察システムおよび 結晶観察方法	谷山明他
2	新日鐵住金株 式会社	特願 2015-065454	国内	2015/03/27	登録	試験装置およびそれを備 えた電子顕微鏡	谷山明他

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	千葉亜耶、渋川周平、 武藤 泉、菅原 優、原 信義 土井 教史、河野 佳織	東北大  新日鐵住金	Microelectrochemical aspects of interstitial carbon in Type 304 stainless steel: improving pitting resistance at MnS inclusion	Journal of the electrochemical society	有	2015/2/20
2	門脇万里、武藤泉、 菅原優、原信義 土井教史、河野佳織	東北大  新日鐵住金	Microelectrochemical real-time observation of Very Early Stage of Pitting on Primary	Journal of the electrochemical society	有	2017/3/20
3	門脇万里子、武藤泉、 菅原優、原信義 土井教史、河野佳織	東北大  新日鐵住金	Pitting Corrosion Resistance of Martensite of AISI 1045 Steel and Beneficial Role of Interstitial Carbon	Journal of the electrochemical society	有	2017/11/8
4	Mariko Kadowaki、 Izumi Muto、 Yu Sugawara、 Takashi Doi、 Kaori Kawano、 Nobuyoshi Hara	東北大  新日鐵住金	Improving Pitting Corrosion Resistance at Inclusions and Ductility of a Martensitic Medium- Carbon Steel: Effectiveness of Short- Time Tempering	Journal of The Electrochemical Society	有	2018/8/7
5	Mariko Kadowaki、 Izumi Muto、 Kinari Takahashi、 Takashi Doi、 Hiroyuki Masuda 、 Hideki Katayama、 Kaori Kawano、 Yu Sugawara、 and Nobuyoshi Hara	Tohoku University Nippon Steel Corporation NIMS	Anodic Polarization Characteristics and Electrochemical Properties of Fe <sub>3</sub> C in Chloride Solutions	Journal of The Electrochemical Society、166巻、 12号、2019年、 C345-C351ページ	有	2019/8/2
6	Mariko Kadowaki、 Arkapol Saengdeejing、 Izumi Muto、 Ying Chen、 Hiroyuki Masuda、 Hideki Katayama、 Takashi Doi 、 Kaori Kawano、 Hideo Miura、 Yu Sugawara、 and Nobuyoshi Hara	Tohoku University NIMS Nippon Steel Corporation	First-principles analysis of the inhibitive effect of interstitial carbon on an active dissolution of martensitic steel	Corrosion Science 1635巻、2020年 108251	有	2019/10/1

7	千葉亜耶、渋川周平、 武藤 泉、菅原 優、原 信義 土井 教史、河野 佳織	東北大  新日鐵住金	Microelectrochemical aspects of interstitial carbon in Type 304 stainless steel: improving pitting resistance at MnS inclusion	Journal of the electrochemical society	有	2015/2/20
8	門脇万里、武藤泉、 菅原優、原信義 土井教史、河野佳織	東北大  新日鐵住金	Microelectrochemical real-time observation of Very Early Stage of Pitting on Primary	Journal of the electrochemical society	有	2017/3/20
9	K.Fushimi <sup>a</sup> T.Kanazawa <sup>b</sup> A.Fujimura <sup>b</sup> Y.Kitagawa <sup>a</sup> Y.Hasegawa <sup>a</sup> T.Doi <sup>*</sup>	Hokkaido University  <sup>*</sup> Nippon Steel Corporation	Effect of intentional convection on the passivity of an Fe-6Cr surface in pH 4.5 Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> solution	Electrochimica  Acta	有	2020/4/19
10	Mariko Kadowaki <sup>*</sup> 、 Arkapol Saengdeejing <sup>*</sup> 、 Izumi Muto <sup>*</sup> 、Ying Chen <sup>*</sup> 、Gerald S. Frankel <sup>**</sup> 、Takashi Doi <sup>***</sup> 、Kaori Kawano <sup>***</sup> 、Yu Sugawara <sup>*</sup> 、 Nobuyoshi Hara <sup>*</sup>	<sup>*</sup> Tohoku University  <sup>**</sup> The Ohio State University  <sup>***</sup> Nippon Steel Corporation	Roles of Interstitial Nitrogen, Carbon, and Boron in Steel Corrosion: Generation of Oxyanions and Stabilization of Electronic Structure	Journal of The Electrochemical Society, 167卷(8 号), 081503, 2020年	有	2020/4/23
11	谷山 明、網野岳文、 畑 顕吾	日本製鉄株 式会社	Development of In-situ Orientation Mapping and Microstructure Observation System for Ferrite/Austenite and Martensitic Transformations in Steel	ISIJ International	有	2020/04/30
12	Takashi Doi Akitaka Yoshigoe	Nippon Steel Corporation JAEA	Surface segregation effect for prevention of oxidation in Ni - X (X=Sn, Sb) alloy by in situ photoelectron spectroscopy	Surface and Interface Analysis	有	2020/8/19
13	Mariko Kadowaki <sup>*</sup> . <sup>**</sup> 、Arkapol Saengdeejing <sup>*</sup> 、 Izumi Muto <sup>*</sup> 、Ying Chen <sup>*</sup> 、Takashi Doi <sup>***</sup> 、Kaori Kawano <sup>***</sup> 、Yu Sugawara <sup>*</sup> 、 Nobuyoshi Hara <sup>*</sup>	<sup>*</sup> Tohoku University  <sup>**</sup> National Institute for Materials Science  <sup>***</sup> Nippon Steel Corporation	First-Principles Investigation on Work Function of Martensitic Carbon Steels: Effect of Interstitial Carbon on Anodic Dissolution Resistance	Journal of The Electrochemical Society	有	2021 年 11 月

14	武藤泉ほか	東北大	未定	未定	有	
15	伏見公司他	北海道大	未定	未定	有	

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	杉山昌章、谷山	新日鐵住金株式会社	In situ Observation of Reverse Transformation in Steels Using EBSD Measurement at Elevated Temperature	18th International Microscopy Congress (Prague、Czech Republic)	2014/09/09
2	千葉亜耶、渋川周平、武藤泉、菅原優、原信義、土井教史、河野佳織	東北大 新日鐵住金	ステンレス鋼中の MnS 介在物起点の孔食発生に及ぼす固溶炭素の影響	第61回材料と環境討論会	2014/11/26-28
3	千葉亜耶、渋川周平、武藤泉、菅原優、原信義、土井教史、河野佳織	東北大 新日鐵住金	低温浸炭処理によるMnS介在物起点のステンレス鋼の耐孔食性改善	日本鉄鋼協会2015年春期大会	2015/3
4	千葉亜耶、渋川周平、武藤泉、菅原優、原信義、土井教史、河野佳織	東北大 新日鐵住金	Effect of Low-temperature Carburi- zing Treatment on Improving Pitting Corrosion R- esistance at MnS Inclusion in Type 304 St- ainless Steel	ECS 228th Meeting	2015/10/11-16
5	門脇万里子、武藤泉、菅原優、原信義、土井教史、河野佳織	東北大 新日鐵住金	マイクロ電気化学システムを用いたフェライト-パーライト鋼の孔食発生初期段階のその場観察	材料と環境2017	2017/5
6	中川 凌吾、北川 裕一、中西 貴之、長谷川 靖哉、伏見 公志	北海道大学	炭素鋼表面に形成する不働態皮膜のマイクロ観察	材料と環境2017	2017/5

7	伏見 公志、中川 凌吾、北川 裕一、中西 貴之、長谷川 靖哉	北海道大学	Non-uniform distribution of passive film formed on carbon steel	Eurocorr2017 232nd ECS Meeting、	2017/9
8	門脇万里、武藤泉、菅原優、原信義 土井教史、河野佳織	東北大 新日鐵住金	Microelectrochemical Real-time Observation of Very Early Stage of Pitting on Carbon Steel in Chloride Solutions	232nd ECS Meeting	2017/10/1-6
9	伏見公志、金澤友美、北川裕一、中西貴之、長谷川靖哉 土井教史	北海道大学 新日鐵住金	電気化学エリブソ顕微鏡によるFe-Cr二元系合金のアノード溶解挙動の観察	電気化学会第85回大会	2018/3/9-11
10	門脇万里、武藤泉、菅原優、原信義 土井教史、河野佳織	東北大 新日鐵住金	マイクロ電気化学システムによるマルテンサイトの耐孔食性におよぼす固溶炭素の影響解明	日本金属学会 2018年 春期大会	2018/3/19-21
11	Koji Fushimi、Tomomi Kanazawa、Yuichi Kitagawa、Takayuki Nakanishi、Yasuchika Hasegawa、Takashi Doi	Hokkaido University、Nippon Steel & Sumitomo Metal	Mass-transport Effect for Passivation of Fe-6Cr Surface in Acidic Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> Aqueous Solution	The 69th Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry	2018/09/03
12	門脇万里子、武藤 泉、菅原 優、土井教史、河野佳織、原信義	東北大学 新日鐵住金(株)	マルテンサイト鋼の耐孔食性におよぼす固溶炭素の影響解明	(公社)日本金属学会 2018年秋期講演大会	2018/9/20
13	Mariko Kadowaki、Izumi Muto、Yu Sugawara、Takashi Doi、Kaori Kawano、Nobuyoshi Hara	Tohoku University Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation	The Effect of Interstitial Carbon on Pitting Corrosion Resistance of Martensitic Carbon Steels	AiMES 2018 ECS and SMEQ Joint International Meeting(Cancun, Mexico)	2018/10/1

14	門脇万里子、 武藤 泉、菅原 優、土井教史 、河野佳織、原 信義	東北大学 新日鐵住 金(株)	介在物起点の孔食発生におよぼす 固溶炭素の影響解明	(公社)腐食防食学会 第 65 回材料と環境討論 会	2018/10/30
15	藤村諒大、北 川裕一、長谷 川靖哉、伏見 公志	北海道大 学	エリプソ顕微鏡と組み合わせた チャンネルフロー型電気化学セ ルによるpH4.5硫酸ナトリウム水 溶液中でのFe6Crの不働態化挙動	材料と環境2019	2019/5/23
16	藤村諒大、北 川裕一、長谷 川靖哉、伏見 公志	北海道大 学	エリプソ顕微鏡と組み合わせた チャンネルフロー型電気化学セ ルを用いた硫酸ナトリウム溶液 中におけるFe-6Crの不働態化挙 動	電気化学会北海道支部 第25回若手研究者交流 会	2019/06/14
17	藤村諒大、北 川裕一、長谷 川靖哉、伏見 公志、土井教 史	北海道大 学、 日本製鉄	エリプソ顕微鏡用チャンネルフ ロー型電気化学セルを用いたFe- 6Crの不働態化過程に及ぼす硫酸 ナトリウム溶液流量の影響	表面技術協会第140回講 演大会	2019/9/09
18	門脇万里子、 Arkapol Saeng deejing、武藤 泉、陳迎、升 田博之、片山 英樹、土井教 史、河野佳織 、三浦英生、 菅原優、原信 義	東北大学 物質・材 料研究機 構 日本製鉄( 株)	第一原理計算を用いたマルテン サイト鋼の耐食性におよぼす固 溶炭素影響解明	日本金属学会 2019年 秋期(第165回)講演大会	2019/9/12
19	T.Doï、 A.Yoshigoe	Nipponste el、JAEA	Investigation of segregation during oxidation of Ni-X alloy by in-situ photoelectron spectroscopy	18th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis	2019/9/16



20	Mariko Kadowaki、Arkapol Saengdeejing、Izumi Muto、Ying Chen、Hiroyuki Masuda、Hideki Katayama、Takashi Doi、Kaori Kawano Hideo Miura、Yu Sugawara、and Nobuyoshi Hara	Tohoku University NIMS Nippon Steel Corporation	First-Principles Investigation of the Effect of Interstitial Carbon on Corrosion Resistance of Martensitic Medium-Carbon Steel	236th ECS Meeting	2019/10/15
21	藤村諒大、北川裕一、長谷川靖哉、伏見公志、土井教史	北海道大学、日本製鉄	エリブソ顕微鏡用チャンネルフロー電気化学セル中で観測されるFe-Cr合金の不働態化促進	第66回材料と環境討論会	2019/10/21
22	A. Fujimura、Y. Kitagawa、Y. Hasegawa、K. Fushimi、T. Doi	Hokkaido University、Nippon Steel	Passivating behavior of steel surface in channel flow electrochemical cell observed by ellipso microscopy	NACE International East Asia & Pacific Asia Conference & Expo 2019 (NACE EAP 2019)	2019/11/13
23	門脇万里子、Saengdeejing Arkapol、武藤泉、陳迎、土井教史、河野佳織、菅原優、原信義	東北大学 日本製鉄(株)	金属組織中の軽元素による鉄鋼材料の耐食性向上機構の解明	日本金属学会 2020年春期(第166回)講演大会	2020/3/17
24	門脇万里子、Arkapol Saengdeejing、武藤泉、陳迎(東北大); 土井教史、河野佳織(日本製鉄); 菅原優、原信義(東北大)	東北大学 日本製鉄(株)	鉄鋼材料の耐食性におよぼす軽元素の影響解明	材料と環境2020	2020/05/20

25	北海道大学 伏見公志, 金澤朋美、藤村諒大, 北川裕一, 長谷川靖哉, 日本製鉄 土井教史	北海道大学, 日本製鉄	Effect of intentional convection on passivation of Fe-6Cr surface in acidic Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> solution	ISE the 71st Annual Meeting	2020/8/25
26	Koji Fushimi, Tomomi Kanazawa, Akihiro Fujimura, Yuichi Kitagawa, Yasuchika Hasegawa, Takashi Doi	Hokkaido Univ., Nippon Steel	Effect of intentional convection on passivation of Fe-6Cr surface in acidic Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> solution	The 71 <sup>st</sup> of Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry	2020/09/03
27	Akihiro Fujimura <sup>1</sup> , Yuichi Kitagawa <sup>1</sup> , Yasuchika Hasegawa <sup>1</sup> , Takashi Doi <sup>2</sup> and Koji Fushimi <sup>1</sup>	Hokkaido University Nippon Steel Corporation	Measurement of Passivation on Fe-6Cr Using an Ellipso-Microscope Combined with a Channel Flow Electrode Method	PRiME 2020	2020/10/4
28	Mariko Kadowaki*, Arkapol Saengdeejing*, Izumi Muto*, Ying Chen*, Takashi Doi**, Kaori Kawano**, Yu Sugawara*, Nobuyoshi Hara*	*Tohoku University **Nippon Steel Corporation	Beneficial Role of Interstitial Carbon on Corrosion Resistance of Carbon Steels	238th ECS Meeting	2020/10/4
29	藤村諒大, 北川裕一, 長谷川靖哉, 伏見公志	北海道大学	フロー型エリプソ顕微鏡を用いたFe-6Crの不働態化挙動と不働態皮膜評価	第67回材料と環境討論会	2020/10/26
30	大清水海, 北川裕一, 長谷川靖哉, 伏見公志	北海道大学	偏光カメラを用いた鉄表面での水薄膜形成の観察	化学系学協会北海道支部2021年冬季研究発表会	2021/01/26
31	伏見公志、大清水海	北海道大学	NaCl粒子が付着した鋼材表面での水薄膜成長挙動のその場観察	日本鉄鋼協会第181回春季講演大会	2021/03/17
32	門脇万里子*, Arkapol Saengdeejing*, 武藤 泉*, 陳 迎*, 土井教史**, 河野佳織**, 菅原 優*, 原 信義*	*東北大学 **日本製鉄(株)	第一原理計算を用いた炭素鋼 第一原理計算を用いた炭素鋼 第一原理計算を用いた炭素鋼の腐食メカニズム 腐食メカニズムの解明	日本金属学会 2021年春期(第168回)講演大会	2021/3/18

33	藤村諒大, 北川裕一, 長谷川靖哉, 伏見公志	北海道大学	リアルタイムICP-OES用溶液フロー電気化学セルの開発	電気化学会第88回大会	2021/03/24
34	藤村諒大, 庄司淳, 北川裕一, 長谷川靖哉, 土井教史, 伏見公志	北海道大学, 日本製鉄	高い時間応答感度を有するin-situ ICP-OES測定用電気化学セルの開発と適用	電気化学会北海道支部第36回ライラックセミナー・第26回若手研究者発表会	2021/06/26
35	藤村諒大, 庄司淳, 北川裕一, 長谷川靖哉, 土井教史, 伏見公志	北海道大学, 日本製鉄	Online ICP-OES測定法の高感度化と鉄系合金の溶出挙動解析	第68回材料と環境討論会	2021/10/26
36	藤村諒大, 庄司淳, 北川裕一, 長谷川靖哉, 土井教史, 伏見公志	北海道大学, 日本製鉄	その場ICP-OES溶液分析による硫酸酸性溶液中におけるFe基二元系合金の不働態化挙動解析	材料と環境 2022	2022/5/25
	伏見公志他	北海道大学,	未定	未定	Eurocorrosion
	伏見公志他	北海道大学,	未定	未定	

**(b)新聞・雑誌等への掲載**

なし

**(c)プレス発表**

なし

**(d)その他**

なし

**1.4 展示会への出展**

なし

**1.5 受賞**

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	東北大学・武藤 泉	鉄鋼材料の局部腐食の研究	一般社団法人日本鉄鋼協会学術功績賞(里見賞)	2017/3/15

2	北海道大学・藤村諒 大	エリプソ顕微鏡と組み合わせたチャンネルフロー型電気化学セルを用いた硫酸ナトリウム溶液中におけるFe-6Crの不働態化挙動	電気化学会北海道支部第25回若手研究者交流会ライラック最優秀ポスター賞	2019/06/14
3	北海道大学・藤村諒 大	エリプソ顕微鏡用チャンネルフロー型電気化学セルを用いたFe-6Crの不働態化過程に及ぼす硫酸ナトリウム溶液流量の影響	表面技術協会第140回講演大会学生優秀講演賞	2019/09/09
4	北海道大学・藤村諒 大	エリプソ顕微鏡用チャンネルフロー電気化学セル中で観測されるFe-Cr合金の不働態化促進	第66回材料と環境討論会若手講演優秀賞	2019/10/21
5	北海道大学・藤村諒 大	Passivating behavior of steel surface in channel flow electrochemical cell observed by ellipso microscopy	NACE International East Asia & Pacific Asia Conference & Expo 2019 (NACE EAP 2019)、Poster Award	2019/11/13
6	北海道大学・大清水 海	偏光カメラを用いた鉄表面での水薄膜形成の観察	化学系学協会北海道支部2021年冬季研究発表会最優秀講演賞 (Webポスター部門)	2021/02/02
7	北海道大学・藤村諒 大	高い時間応答感度を有するin-situ ICP-OES測定用電気化学セルの開発と適用	電気化学会北海道支部第36回ライラックセミナー・第26回若手研究者発表会ライラックポスター賞	2021/06/26
8	北海道大学・大清水 海	偏光カメラを用いた酸化物薄膜の高感度観察	材料と環境2022学生講演奨励賞	2022/05/27

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	新日鐵住金(株)	革新的新構造材料等研究開発「平成26年度成果報告会」	パネル	2015/1/20
2	新日鐵住金(株)	革新的新構造材料等研究開発「平成27年度成果報告会」	パネル	2016/1/22
3	新日鐵住金(株)	革新的新構造材料等研究開発「平成28年度成果報告会」	パネル、講演	2017/1/23

4	新日鐵住金(株)	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	パネル、パネルディス カッション	2017/6/13
5	新日鐵住金(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成29年度成果報告会」	パネル	2018/1/26
6	新日鐵住金(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成30年度成果報告会」	パネル	2019/1/21
7	日本製鉄(株)	革新的新構造材料等研究開発 「2019年度成果報告会」	(パネル)	2020/2/28 (中止)
8	日本製鉄(株)	革新的新構造材料等研究開発 「2020年度成果報告会」	(パネル)、講演	2021/7/1
9	日本製鉄(株)	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	(パネル)、講演	2022/1/31
10	日本製鉄(株)	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	(パネル)、講演	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号24] 炭素活用による革新的加工性を有する超高強度鋼板の開発  
(2013年度～2017年度)

表 添-6.3-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	2	0	1	0	0	3	9	1	0	0	1	1
2015FY	1	0	1	0	0	6	0	0	0	0	0	1
2016FY	5	0	1	3	0	12	0	0	0	0	0	1
2017FY	3	0	0	3	0	14	0	0	0	0	0	2
2018FY	0	0	1	6	0	5	0	0	0	0	1	0
2019FY	0	0	0	2	0	3	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	3	0	2	0	0	0	0	2	0
2021FY	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0
2022FY	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
合計	11	(28)	4	19	0	48	10	1	0	0	4	5

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT ※	出願日	状態	名 称	発明者
1	JFE スチール 株式会社	特願 2014-242030	国内	2014/11/28	登録	微量炭素定量分析装置 および微量炭素定量分 析方法	田中裕二他
3	JFE スチール 株式会社	PCT/JP2015/058690	PCT	2015/3/23	各国移 行・登 録	微量炭素定量分析装置 および微量炭素定量分 析方法	田中裕二他
4	JFE スチール 株式会社	PCT/JP2016/000339	PCT	2016/01/25	各国移 行・登 録	高強度冷延薄鋼板およ びその製造方法	小幡美絵他
5	JFE スチール 株式会社	PCT/JP2016/003902	PCT	2016/08/26	各国移 行・登 録	高強度薄鋼板およびそ の製造方法	椎森芳恵他

6	JFE スチール株式会社	特願 2016-133433	国内	2016/07/05	登録	高強度鋼板およびその製造方法	植田圭治他
7	JFE スチール株式会社	特願 2016-133434	国内	2016/07/05	登録	高強度鋼板およびその製造方法	植田圭治他
8	JFE スチール株式会社	特願 2016-158813	国内	2016/08/12	登録	METHOD OF SEPARATELY VISUALIZING FERRITE PHASE, MARTENSITE PHASE AND AUSTENITE PHASE IN MULTIPHASE STEEL BY SCANNING ELECTRON MICROSCOPE OBSERVATION AND SPECIMEN OF MULTIPHASE STEEL FOR MICROSTRUCTURE OBSERVATION	シヤルカ ミクメコバ他
9	JFE スチール株式会社	特願 2017-060314	国内	2017/03/27	登録	高強度高延性鋼板およびその製造方法	西山武志他
10	JFE スチール株式会社	特願 2017-060315	国内	2017/03/27	登録	高強度高延性鋼板およびその製造方法	西山武志他
11	JFE スチール株式会社	特願2018-017232	国内	2018/2/2	登録	高強度冷延鋼板およびその製造方法	田中孝明他
12	JFE スチール株式会社	PCT/JP2018/045967	PCT	2018/12/13	各国移行・登録	高強度鋼板およびその製造方法	田中孝明他

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Takako Yamashita, Yuji Tanaka, Masayasu Nagoshi, and Kiyohito Ishida	JFEスチール 東北大学	Novel technique to suppress hydrocarbon contamination for high accuracy determination of carbon content in steel by FE-EPMA	Scientific Reports Vol.6 (2016), 29825	有	2016/6/19
2	Y. Tanaka, T. Yamashita and M. Nagoshi	JFEスチール	Quantitative FE-EPMA measurement of formation and inhibition of carbon contamination on Fe for trace carbon analysis	Microscopy Vol.66 (2017), pp.68-77	有	2016/11/11
3	Wen-Tong Geng, Liang Wan, Jun-Ping Du, Akio Ishii, Nobuyuki Ishikawa, Hajime Kimizuka, and Shigenobu Ogata	大阪大学 JFEスチール	Hydrogen bubble nucleation in $\alpha$ -iron	Scripta Materialia Vol.134 (2017), pp.105-109	有	2017/3/21
4	土田紀之、大倉誠史、田中孝明、田路勇樹	兵庫県立大学 JFEスチール	1GPa級高強度TRIP型複合組織鋼の高速引張変形挙動	鉄と鋼 Vol.103 (2017), pp.597-605	有	2017/10/1
5	山下孝子、榎本正人、田中裕二、名越正泰	JFEスチール 茨城大学	高精度FE-EPMAによる低炭素鋼の初析フェライト変態初期における炭素の分配	鉄と鋼 Vol.103 (2017), pp.622-628	有	2017/11/1
6	Xianguang Zhang, Goro Miyamoto, Yuki Toji, Shoichi Nambu, Toshihiko Koseki, Tadashi Furuhashi	東北大学 JFEスチール 東京大学	Orientation of austenite reverted from martensite in Fe-2Mn-1.5Si-0.3C alloy	Acta Materialia Vol.144 (2018), pp.601-612	有	2017/11/10



7	W.T. Geng, VeiWang, Jin- Xu Li, Nobuyuki Ishikawa, Hajime Kimizuka, Kaneaki Tsuzaki, Shigenobu Ogata	大阪大 学 北京科 学技术 大学 JFEスチ ール 九州大 学	Hydrogen trapping in carbon supersaturated $\alpha$ iron and its decohesion effect in martensitic steel	Scripta Materialia Vol.149 (2018), pp.79- 83	有	2018/5/1
8	Noriyuki Tsuchida, Satoshi Okura, Takaaki Tanaka and Yuki Toji	兵庫 県 立大 学 JFEスチ ール	High-speed Tensile Deformation Behavior of 1 GPa-grade TRIP- aided Multi-phase Steels	ISIJ International Vol. 58 (2018), pp.978- 986	有	2018/5/1
9	Xianguang Zhang, Goro Miyamoto, Takeshi Kaneshita, Yasuki Yoshida, Yuki Toji, Tadashi Furuhara	東北 大 学 JFEスチ ール	Growth mode of austenite during reversion from martensite in Fe- 2Mn-1.5Si-0.3C alloy: A transition in kinetics and morphology	Acta Materialia Vol.154 (2018), pp.1-13	有	2018/5/15
10	Takako Yamashita , Masato Enomoto, Yuji Tanaka, Hiroshi Matsuda, Masayasu Nagoshi	JFEスチ ール 茨城 大 学	Analysis of Carbon Partitioning at an Early Stage of Proeutectoid Ferrite Transformation in a Low Carbon Mn-Si Steel by High Accuracy FE-EPMA	ISIJ International Vol. 58 (2018), pp.1079-1085	有	2018/6/1
11	Liang Wana, Wen Tong Geng, Akio Ishii, Jun-Ping Dub, Qingsong Mei, Nobuyuki Ishikawa, Hajime Kimizuka,, Shigenobu Ogata	武漢 大 学 大阪 大 学 北京科 学技术 大 学 京都 大 学 JFEスチ ール	Hydrogen embrittlement controlled by reaction of dislocation with grain boundary in alpha-iron	International Journal of Plasticity 112 (2019), pp.206-219	有	2018/8/31

12	Xianguang Zhang, Goro Miyamoto, Yuki Toji, Tadashi Furuhara	USTB 東北大学 JFEスチール	Effects of Heating Rate on Formation of Globular and Acicular Austenite during Reversion from Martensite	Metals 9 (2019), 266	有	2019/2/24
13	Tomohiro Aoyama, Šárka Mikmeková, Kaneharu Okuda, Hiroki Hibino	JFEスチール 関西学院大学	Visualization of three different phases in a multiphase steel by scanning electron microscopy at 1 eV landing energy	Ultramicroscopy Vol. 204 (2019), pp.1-5	有	2019/5/1
14	土田紀之、田中孝明、田路勇樹	兵庫県立大学 JFEスチール	その場中性子回折実験による1 GPa級高延性TRIP鋼の引張変形挙動解析	鉄と鋼 Vol.105(2019), pp.918-926	有	2019/9/1
15	Noriyuki Tsuchida, Takaaki Tanaka and Yuki Toji	兵庫県立大学 JFEスチール	Analysis of Tensile Deformation Behavior by in situ Neutron Diffraction Experiments of 1 GPa-grade TRIP Steels with High Elongation	ISIJ International Vol. 60 (2020), pp.1349-1357	有	2020/6/1
16	Noriyuki Tsuchida, Takaaki Tanaka and Yuki Toji	兵庫県立大学 JFEスチール	Effect of Deformation Temperature on Mechanical Properties in 1-GPa-grade TRIP Steels with Different Retained Austenite Morphologies	ISIJ International Vol. 61 (2021), pp.564-571	有	2021/2/1
17	Xianguang Zhang, Goro Miyamoto, Yuki Toji, Yongjie Zhang, Tadashi Furuhara	USTB 東北大学 NIMS JFEスチール	Role of cementite and retained austenite on austenite reversion from martensite and bainite in Fe-2Mn-1.5Si-0.3C alloy	Acta Materialia Vol.209 (2021), pp.601-612	有	2021/3/2
18	土田紀之、田中孝明、田路勇樹	兵庫県立大学 JFEスチール	残留オーステナイト形状の異なる1 GPa級TRIP鋼の機械的特性に及ぼす変形温度の影響	鉄と鋼 Vol.107 (2021), pp.968-976	有	2021/11/1
19	西山武志、仲道治郎	JFEスチール	SEM-FIB/EBSD法を用いたTRIP鋼中残留 $\gamma$ 相の観察および安定性評価	鉄と鋼 Vol.108 (2022),	有	2022/9/1

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	吉田康紀, 宮本吾郎, 古原忠	東北大学	オーステナイト逆変態に及ぼす合金元素の影響	日本鉄鋼協会 学生鉄鋼セミナー	2014/11/19

2	田中裕二,山下孝子,名越正泰	JFE スチール	鋼中微細組織に対応した微量炭素の定量分析	日本鉄鋼協会 第169回春季講演大会	2015/3/19
3	吉田康紀,宮本吾郎,古原忠	東北大学	オーステナイト逆変態に及ぼす合金元素の影響	日本鉄鋼協会 第169回春季講演大会学生ポスターセッション	2015/3/19
4	張献光, 宮本吾郎, 古原忠	東北大学	Reversion of austenite from martensitic Fe-2Mn-1.5Si-0.3C alloy during continuous heating proces	日本鉄鋼協会 第170回秋季講演大会	2015/9/16
5	Takeshi Kaneshita, Yasuki Yoshida, Zhenqing Liu, Goro Miyamoto, Tadashi Furuvara	東北大学	Rerverse transformation of austenite from martensite in Fe-Mn-Si-C alloy during intercritical annealing	Asia Steel International Conference 2015	2015/10/5
6	Xianguang Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuvara	東北大学	Reversion of Austenite from Martensitic Fe-2Mn-1.5Si-0.3C Alloy during Continuous Heating Process	TMS21016	2016/2/16
7	Xianguang Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuvara	東北大学	Orientation analysis of austenite reverted from tempered martensite	日本鉄鋼協会 第171回春季講演大会	2016/3/24
8	田中裕二、山下孝子、名越正康	JFEスチール	EPMAによる鋼中微量炭素分布解析技術の開発	日本鉄鋼協会 第171回春季講演大会	2016/3/24
9	植田圭治、金子真次郎、長滝康伸	JFEスチール	中炭素鋼の結晶粒径に及ぼす繰返し焼鈍の影響	日本鉄鋼協会 第171回春季講演大会	2016/3/25
10	Xianguang Zhang*, Goro Miyamoto, Tadashi Furuvara	東北大学	Reversion during continuous heating in martensitic Fe-2Mn-1.5Si-0.3C alloy	国際加工熱処理学会 (Thermec2016)	2016/5/31
11	シャルカ ミクメコバ, 仲道治郎	JFE スチール	Prospect of energy and angular separation of slow signal electrons for characterization of TRIP steel microstructure	日本電子顕微鏡学会 第72回学術講演会	2016/6/16
12	仲道治郎、名越正泰、西山武志	JFE スチール	Optimizing the 3D Microstructure Observation Conditions of Pearlite Steel through SEM-FIB Technique	M&M 2016( Microscopy & MicroAnalysis)	2016/7/26

13	Xianguang Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuhashi	東北大学	Effect of austenite/ferrite orientation relationship on austenite structure evolution during reversion	環太平洋材料学会 (PRICM2017)	2016/8/2
14	Sarka Mikmekova, Haruo Nakamichi and Masayasu Nagoshi	JFEスチール	Prospect of effective angular and energy separation of signal electrons in SEM for characterization of steels	EMC2016 The 16th Euromean Microscopy congress	2016/8/27
15	山下孝子, 田中裕二, 松田広志, 名越正康	JFEスチール	拡散律速型相変態計算による鋼中炭素分配挙動解析	日本鉄鋼協会 第172回 秋季講演大会	2016/9/21
16	西山武志, 仲道治郎, 名越正泰	JFEスチール	SEM-FIBによる三次元観察条件の検討	日本鉄鋼協会 第172回 秋季講演大会	2016/9/23
17	山下孝子, 田中裕二, 松田広志, 名越正康	JFEスチール	FE-EPMA および拡散律速型相変態計算による鋼中炭素分配挙動解析	日本学術振興会 第172 合金状態図研究会	2016/10/22
18	Wen-Tong Geng, Liang Wan, Jun-Ping Du, Nobuyuki Ishikawa, Hajime Kimizuka, and Shigenobu Ogata	大阪大学	The smallest hydrogen bubble in iron	The 4th International Conference on Material Science and Environmental Engineering	2016/12/17
19	Liang Wan, Wen-Tong Geng, Jun-Ping Du, Akio Ishii, Hajime Kimizuka, and Shigenobu Ogata	大阪大学	Hydrogen embrittlement mediated by reaction between dislocation and grain boundary in iron	TMS 2017 Annual Meeting & Exhibition	2017/2/28
20	土田紀之、大倉誠史	兵庫県立大学	1GPa級TRIP型複合組織鋼の高速引張変形挙動	日本鉄鋼協会 第173回 春季講演大会	2017/3/15
21	田中裕二, 山下孝子, 名越正康	JFEスチール	電子線照射による鉄上のコンタミ形成とその抑制技術	日本鉄鋼協会 第173回 春季講演大会	2017/3/16
22	山下孝子	JFEスチール	FE-EPMAおよび拡散律速型相変態計算による鋼中炭素分配挙動解析	学振第19製鋼委員会計測化学研究会	2017/5/31

23	Liang Wan, Wen Tong Geng, Jun-Ping Du, Akio Ishii, Nobuyuki Ishikawa, Hajime Kimizuka, Shigenobu Ogata	大阪大学 JFEスチー ル	Hydrogen embrittlement of iron controlled by reaction between dislocations and grain boundaries	14th International Conference on Fracture	2017/6/19
24	Mikmekova S, Konvalina I, Tsukiori D, Arai R, Takano M, Okuda K, Mullerova I, Frank L, Nakamichi H	JFEスチー ル	Supersensitive surface imaging with very slow secondary electrons	The 3rd East-Asia Microscopy Conference(EAMC3)	2017/7/31
25	Y.Tanaka, T.Yamashita, M. Nagoshi	JFEスチー ル	Advantage of specimen heating in FE-EPMA for performing quantitative trace carbon analysis in steel materials	M&M2017	2017/8/6
26	Xianguang Zhang, Goro Miyamotoa, Tadashi Furuharaa	東北大学	Effects of initial structure on austenite reversion in Fe-2Mn- 1.5Si-0.3C alloy	日本鉄鋼協会 第174回 秋季講演大会	2017/9/6
27	M. Arif Hamdam, Akinori Yamanaka, Yuki Toji	東京農工 大学 JFEスチー ル	Crystal Plasticity FFT Simulation of Uniaxial Tensile Deformation and Phase Transformation in TRIP Steel	日本鉄鋼協会 第174回 秋季講演大会	2017/9/7
28	田中裕二, 山 下孝子, 名越 正泰	JFEスチー ル	鋼中微量炭素の顕微定量技術	ISSS2017プレシンポジ ウム (鉄鋼協会講演大 会)	2017/9/7
29	Sarka Mikmekova	JFEスチー ル	SE filtering by the latest generation of commercial SEMs	日本顕微鏡学会 SEMの 物理学分科会検討会	2017/11/11
30	Y.Tanaka, T.Yamashit, M.Nagoshi	JFEスチー ル	Quantitative and microscopic analytical technique of trace carbon and its application on microstructural analysis of dual phase steels	ISSS2017	2017/11/15
31	山下孝子	JFEスチー ル	DICTRAによる低炭素鋼の初析フ ェライト変態初期における炭素 の分配挙動の解析	Thermo-Calcユーザー会 議	2017/11/20
32	山下孝子	JFEスチー ル	熱処理材の特性向上に寄与する 分析技術-EPMA-	日本熱処理技術協会秋 季講演大会	2017/12/1

33	田中裕二	JFEスチール	EPMAによる鋼中微量CのX線スペクトル解析	日本鉄鋼協会系元祖研究会	2018/1/5
34	土田紀之, 大倉誠史, 田中孝明, 田路勇樹	兵庫県立大学 JFEスチール	Effect of Strain Rate on Mechanical Properties of a 1GPa-grade TRIP-aided multi-microstructure steel	TMS2018	2018/3/13
35	Xianguang Zhang, Goro Miyamoto, Tadashi Furuhashi	東北大学	Effects of crystallography and element partitioning on growth kinetics of reverted austenite in Fe-2Mn-1.5Si-0.3C alloy	日本鉄鋼協会 第175回春季講演大会	2018/3/21
36	田中裕二, 山下孝子, 名越正泰	JFEスチール	電子線照射によるコンタミ付着とその抑制技術	日本表面科学会第3回関東支部講演大会	2018/4/7
37	Nishiyama Takeshi, Nakamichi Haruo, Nagoshi Masayasu	JFEスチール	Three-dimensional microstructural analysis for novel TRIP steels by SEM-EBSD/FIB	IMC19	2018/9/9
38	Šárka Mikmeková, Tomohiro Aoyama, Kaneharu Okuda	JFEスチール	Image filtering of scanning electron microscopy under super low-energy condition	the 19th International Microscopy Congress (IMC19)	2018/9/10
39	青山朋弘, シヤルカ ミクメコバ, 奥田金晴, 日比野浩樹	JFEスチール 関西学院大学	超低速SEMによる複相鋼組織の分離可視化	日本顕微鏡学会 SEMの物理学分科会討論会	2018/11/9
40	Noriyuki Tsuchida, Takaaki Tanaka, Yuki Toji	兵庫県立大学 JFEスチール	Tensile deformation behavior of 1 GPa-grade TRIP-aided multi-microstructure steels studied by in situ neutron diffraction	TMS2019	2019/3/12
41	青山朋弘, シヤルカ ミクメコバ, 奥田金晴, 日比野浩樹	JFEスチール 関西学院大学	超低速SEMによる複相鋼組織の分離可視化	日本顕微鏡学会 第75回学術講演会	2019/6/17
42	青山朋弘, シヤルカ ミクメコバ, 奥田金晴, 日比野浩樹	JFEスチール 関西学院大学	超低速SEMによる複相鋼組織識別技術	日本鉄鋼協会 第178回秋季講演大会	2019/9/12

43	Tomohiro Aoyama, Šárka Mikmeková, Kaneharu Okuda, Hiroki Hibino	JFEスチール 関西学院大学	Phase visualization of a multiphase steel by scanning electron microscopy at extremely low landing energy	12th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '19 (ALC'19)	2019/10/23
44	古原忠、宮本吾郎	東北大学 JFEスチール	超高強度鋼を実現するオーステナイト逆変態組織制御の研究	産学官広域連携センター中間報告	2020/12/15
45	土田紀之、田中孝明、田路勇樹	兵庫県立大学 JFEスチール	その場中性子回折実験による1GPa級高延性TRIP鋼の引張変形挙動解析	日本鉄鋼協会 第181回春季講演大会	2021/3/18
46	青山朋弘, シヤルカ ミクメコバ, 熊谷和博, 日比野浩樹	JFEスチール ISI CAS 産総研 関西学院大学	超低速SEMにおける0eV近傍のコントラスト発現機構と複相鋼組織観察への応用	日本顕微鏡学会 SEMの物理学分科会検討会	2022/2/24
47	青山朋弘, シヤルカ ミクメコバ, 熊谷和博, 日比野浩樹	JFEスチール ISI CAS 産総研 関西学院大学	超低速SEMにおける0eV近傍のコントラスト発現機構と複相鋼組織観察への応用	第57回表面分析研究会	2022/3/3
48	Xianguang Zhang, Goro Miyamoto, Yuki Toji, Yongjie Zhang, Tadashi Furuhashi	USTB 東北大学 JFEスチール	A comparative study of austenite reversion behavior from martensitic and bainitic initial structure	PTM2022	2022/6/28

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	JFEスチール・NEDO・ISMA	世界最高精度の炭素定量分析装置を開発 自動車用高強度鋼板の開発促進	鉄鋼通信	2015/1/14
2	JFEスチール・NEDO・ISMA	炭素分析精度 10 倍に (新 FE-EPMA 装置を開発)	産業新聞	2015/1/15
3	JFEスチール・NEDO・ISMA	炭素定量分析の精度 10 倍以上 ハイテン開発迅速化に期待	日本金属通信	2015/1/15
4	JFEスチール・NEDO・ISMA	炭素分析装置 精度 10 倍 高張力鋼に活用	日経産業新聞	2015/1/15
5	JFEスチール・NEDO・ISMA	炭素濃度分析 精度 10 倍 ハイテン開発迅速化	日刊工業新聞	2015/1/15
6	JFEスチール・NEDO	JFEスチール炭素分析装置を開発	フジサンケイビジネスアイ	2015/1/15

7	JFE スチール・NEDO・ ISMA	炭素定量分析装置を開発 世界最高精度 車用鋼板の高度化に 活用	鉄鋼新聞	2015/1/15
8	JFE スチール・NEDO・ ISMA	共同で炭素定量分析装置 精度は従来の 10 倍	日刊自動車新聞	2015/1/16
9	JFE スチール・NEDO・ ISMA	鉄鋼材料の炭素含有量 0.01% レベル で定量分析 世界最高精度の FE-EPMA 開発	科学新聞	2015/1/16
10	JFE スチール	自動車用高加工性超高強度鋼板の開 発	金属 Vol.91(2021), pp.419-425	2021/5/1

### (c)プレス発表

番号	所属	タイトル	発表形式	発表年月
1	NEDO, ISMA, JFE スチール	世界最高精度 0.01% レベルの炭素定 量分析装置「FE-EPMA」を開発	共同ニュースリリース 投げ込み形式	2015/01/14

### (d)その他

なし

### 1.4 展示会への出展

なし

### 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	東北大学・吉田康紀	オーステナイト逆変態に及ぼす合金 元素の影響	日本鉄鋼協会 第 169 回春季講演大会学生ポ スターセッション 努 力賞	2015/3/19
2	JFE スチール・山下孝 子	高精度 FE-EPMA による低炭素鋼の初 析フェライト変態初期における炭素の分 配	俵論文賞	2018/09/25
3	兵庫県立大学・土田紀 之	その場中性子回折実験による 1 GPa 級高延性 TRIP 鋼の引張変形挙動解析	俵論文賞	2020/10/9
4	JFE スチール・青山朋 弘	入射電子エネルギー1eV での SEM 観 察による複相鋼組織の分離可視化	第 71 回 日本金属学会 金属組織写真賞優秀賞	2021/3/16



## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	JFE スチール	革新的新構造材料等研究開発 「平成26年度成果報告会」	ポスター	2015/01/20
2	JFE スチール	革新的新構造材料等研究開発 「平成27年度成果報告会」	ポスター	2016/01/22
3	JFE スチール	革新的新構造材料等研究開発 「平成28年度成果報告会」	ポスター、発表	2017/01/23
4	JFE スチール	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
5	JFE スチール	革新的新構造材料等研究開発 「平成29年度成果報告会」	ポスター	2018/01/26

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 25] 中高炭素鋼ベース高強度高延性複層鋼板の開発 (2013年度～  
2015年度)

表 添-6.4-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

なし

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

なし

#### (b)新聞・雑誌等への掲載

なし

#### (c)プレス発表

なし

#### (d)その他

### 1.4 展示会への出展

なし

## 1.5 受賞

なし

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	新日鐵住金(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成26年度成果報告会」	ポスター	2015/01/20
2	新日鐵住金(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成27年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号26]「複層鋼板の界面構造解析と特性調査」(2014年度～2015年度)

表 添-6.5-1 特許、論文、外部発表等の件数(内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	1
2015FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
合計	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	2

※1: Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2: 実施者が主体的に開催するイベント(フォーラム、シンポジウム等)

1.1 特許

なし

1.2 論文

なし

1.3 その他外部発表

(a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	J. P. Du, S. Ogata	Osaka Univ.	Molecular dynamics study of diffusion bonding bcc/fcc interface	The 9th International Conference on Computational Physics, Singapore (ICCP9)	2015/1/7-11
2	T. Q. Nguyen, H. Kimizuka, and S. Ogata	Osaka Univ.	Atomistic Modeling of Hydrogen-Vacancy-Carbon Interactions in Alpha Iron	The 9th International Conference on Computational Physics (ICCP9)	2015/1/7-11
3	J. P. Du, S. Ogata	Osaka Univ.	Atomistic study of the effect of temperature on diffusion bonding between bcc and fcc metals	The 9th Asian Consortium on Computational Materials Science - Virtual Organization (ACCMS-VO) General Meeting	2014/12/20-22

4	T. Q. Nguyen, H. Kimizuka, and S. Ogata	Osaka Univ.	Hydrogen-Vacancy-Carbon Formation in BCC Iron: First- Principles Study	The 9th Asian Consortium on Computational Materials Science - Virtual Organization (ACCMS- VO) General Meeting	2014/12/20-22
---	---	----------------	--	---	---------------

**(b)新聞・雑誌等への掲載**

なし

**(c)プレス発表**

なし

**(d)その他**

なし

**1.4 展示会への出展**

なし

**1.5 受賞**

なし

**1.6 フォーラム等**

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	JFE スチール(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	JFE スチール(株)	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号47] 異相界面腐食解析の基盤技術開発 (FS研究) (2017年度)

[テーマ番号61] 超高強度鋼板の腐食挙動解析技術の開発 (2018年度～2020年度)

表 添-6.6-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2017FY	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1
2018FY	0	0	0	1	0	7	0	0	0	1	1	1
2019FY	0	0	0	3	0	7	0	0	0	0	0	1
2020FY	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0
2021FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022FY	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	0	5	0	22	0	0	0	1	1	3

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	門脇 万里子, 武藤泉, 菅原優, 原信義	東北大学	共焦点レーザー顕微鏡を用いたマイクロ電気化学計測システムによる炭素鋼の孔食発生挙動の観察	材料と環境, 67 巻, 12 号, 2018 年, 497-501 ページ	有	2018/12/15
2	Mariko Kadowaki, Izumi Muto, Hideki Katayama, Hiroyuki Masuda, Yu Sugawara, Nobuyoshi Hara	Tohoku University National Institute for Materials Science (NIMS)	Effectiveness of an intercritical heat-treatment on localized corrosion resistance at the microstructural boundaries of medium-carbon steels	Corrosion Science, 154 巻, 2019年, 159-177 ページ	有	2019/4/18

3	Koji Fushimi, Ryogo Nakagawa, Yuichi Kitagawa, Yasuchika Hasegawa	Hokkaido University	Micro- and nano-scopic aspects of passive surface on pearlite structure of carbon steel in pH 8.4 boric acid-borate buffer	J. Electrochem. Soc., 166(11), C3409-C3416	有	2019/06/12
4	小澤敬祐 山本慎太郎, 森拓弥, 横溝臣智, 李雷, 横山和司, 春名匠	神戸製鋼所	鋼材表面に生成した腐食生成物の機械学習による放射光 XAFS 解析	材料と環境, 69, 73-76 (2020)	有	2020/1/16
5	Mariko Kadowaki, Izumi Muto, Yu Sugawara, Nobuyoshi Hara	National Institute for Materials Science, Tohoku University	Beneficial role of retained austenite in pitting corrosion resistance of Fe-C-Si-Mn steel in chloride environments	Corrosion Science, vol 200, No.110251	有	2022/5/15

### 1.3 その他外部発表

#### (a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	中川 凌吾、北川 裕一、中西 貴之、長谷川 靖哉、伏見 公志	北海道大学	局所電気化学測定による金属組織に依存した不働態皮膜の評価	2017年電気化学会秋季大会	2017/9/10
2	中川 凌吾、北川 裕一、中西 貴之、長谷川 靖哉、伏見 公志	北海道大学	炭素鋼中パーライト相上に形成する不働態皮膜の微小電気化学測定	第64回材料と環境討論会	2017/11/9
3	門脇万里子, 武藤泉, 菅原優, 原信義	東北大学	共焦点レーザー顕微鏡を用いたマイクロ電気化学計測システムによる炭素鋼の孔食発生挙動の観察	(公社)腐食防食学会 材料と環境2018	2018/5/23
4	K. Fushimi, R. Nakagawa, Y. Kitagawa, T. Nakanishi, Y. Hasegawa	Hokkaido University	Passive film formed on pearlite phase of carbon steel in borate buffer solution	The Annual Congress of the European Federation of Corrosion (EUROCORR2018)	2018/08/11

5	Koji Fushimi, Ryogo Nakagawa, Yuichi Kitagawa, Yasuchika Hasegawa	Hokkaido University	Passive Film on Pearlite Phase Formed by Anodic Polarization in pH 8.4 Boric Acid-Borate Buffer	Electrochemical Micro & Nano System Technologies 2018	2018/08/30
6	中川凌吾, 北 川裕一, 長谷川 靖哉, 伏見公 志	北海道大 学	炭素鋼表面に形成したアノード 酸化皮膜の金属組織依存性	表面技術協会第138回講 演大会	2018/09/14
7	中川凌吾, 北 川裕一, 長谷川 靖哉, 伏見公 志	北海道大 学	ホウ酸塩緩衝液環境にて炭素鋼 表面に形成する不働態皮膜の不 均一性評価	第65回材料と環境討論 会	2018/10/29
8	門脇万里子, 武藤 泉, 片山 英樹, 升田博 之, 菅原 優, 原 信義	*東北大学 **物質・ 材料研究 機構	炭素鋼の金属組織境界部での耐 局部腐食性の向上	(公社)日本金属学会 2019年春期(第164回 )講演大会	2019/3/21
9	村瀬義治, 升 田博之, 片山 英樹	物質・材 料研究機 構	S45C 焼鈍材の KFM および EBSD 解 析	(公社)日本金属学会 2019年春期(第164回 )講演大会	2019/3/21
10	良元亮介, 片 山英樹, 星 芳 直, 四反田 功 , 板垣昌幸	東京理科 大	鉄鋼材料のナノ・ミクロスケールでの 腐食解析	材料と環境2019	2019/ 5/21
11	良元亮介, 片 山英樹, 星 芳 直, 四反田 功 , 板垣昌幸	東京理科 大	鉄鋼材料の初期耐食性におよぼす 金属組織の影響	第66回材料と環境討論 会	2019/10/20
12	Koji Fushimi, Ryogo Nakagawa, Yuichi Kitagawa, Yasuchika Hasegawa	Hokkaido University	Passivity of pearlite of carbon steel in borate buffer	The Annual Congress of the European Federation of Corrosion (EUROCORR2019)	2019/09/12
13	奥山遥, 北川 裕一, 長谷川 靖哉, 伏見公 志	北海道大 学	大気腐食におけるNaCl 微粒子の 潮解性と水膜形成に与える影響	第66回材料と環境討論 会	2019/10/20
14	小澤敬祐山本 慎太郎, 森 拓弥, 横溝臣 智, 李雷, 横 山和司, 春名 匠	神戸製鋼 所	鋼材表面に生成した腐食生成物 の機械学習による放射光 XAFS 解析	第66回材料と環境討論 会	2019/10/20



15	K. Fushimi, R. Nakagawa, Y. Kitagawa, Y. Hasegawa	Hokkaido University	Passive Film Formed on Carbon Steel in Boric Acid-Borate Buffer Solutions	NACE International East Asia & Pacific Asia Conference & Expo 2019 (NACE EAP 2019)	2019/11/13
16	片山英樹	物質・材料研究機構	AFM/KFMおよびEBSDによる鉄鋼材料の腐食起点解析	AFM&CSIソリューションセミナー	2019/11/20
17	比嘉完太, 北川裕一, 長谷川靖哉, 伏見公志	北海道大学	ホウ酸塩緩衝液においてSi-Mn鋼表面上に形成する不働態皮膜の物性評価	材料と環境2020	2020/05/20
18	K. Fushimi, K. Higa, Y. Kitagawa, Y. Hasegawa, H. Katayama	Hokkaido University, NIMS	Micro- and Nano-Structure of Passive Film Formed on High Strengthen Steel Surface in pH 6.5 Boric Acid-Borate Buffer Solution	PRiME2020	2020/10/05
19	比嘉完太, 北川裕一, 長谷川靖哉, 伏見公志	北海道大学, NIMS	Si-Mn鋼の組織制御に関わる添加元素の鋼不働態に及ぼす効果	第67回材料と環境討論会	2020/10/26
20	小澤 敬祐, 湯瀬文雄	(株)神戸製鋼所	放射光XRD分析を用いた鋼材表面の腐食挙動解析	第67回材料と環境討論会	2020/10/28
21	奥山遥, 北川裕一, 長谷川靖哉, 伏見公志	北海道大学	炭素鋼試料のラマン分光法による大気腐食のその場観察	化学系学協会北海道支部2021年冬季研究発表会	2021/01/26
22	比嘉完太, 北川裕一, 長谷川靖哉, 片山英樹, 伏見公志	北海道大学	Si-Mn鋼上に形成される不働態皮膜の組織依存性の調査	化学系学協会北海道支部2021年冬季研究発表会	2021/01/26

**(b)新聞・雑誌等への掲載**

なし

**(c)プレス発表**

なし

**(d)その他**

なし

**1.4 展示会への出展**

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	物質・材料研究機構	JASIS2019	パネル、プレゼン	2019/9/4-6

## 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	物質・材料研究機構	鉄鋼材料のナノ・ミクロスケールでの腐食解析	若手講演奨励賞	2019/ 5/21

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	日本製鉄、JFE、神戸製鋼、NIMS、東北大、北海道大	革新的新構造材料等研究開発「平成30年度成果報告会」	パネル、講演	2019/1/21
2	日本製鉄、JFE、神戸製鋼、NIMS、東北大、北海道大	革新的新構造材料等研究開発「2019年度成果報告会」	(パネル、講演)	2020/2/28 (中止)
3	日本製鉄、JFE、神戸製鋼、NIMS、東北大、北海道大	革新的新構造材料等研究開発「2020年度成果報告会」	(パネル)、講演	2021/7/1

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 4 8] 「超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発 (FS 研究)」 (2017 年度)

[テーマ番号 6 2] 「超高強度薄鋼板の水素脆化挙動評価技術の開発」 (2018 年度～2020 年度)

表 添-6.7-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2017FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0
2018FY	0	0	0	1	0	7	1	0	0	0	1	1
2019FY	0	0	0	3	0	15	1	0	0	0	2	1
2020FY	0	0	0	6	0	8	0	0	0	0	0	1
2021FY	0	0	0	6	0	3	0	0	0	0	0	0
2022FY	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
合計	0	0	0	17	0	35	3	0	0	0	4	3

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Mitsuhiro Okayasu, Lele Yang	岡山大学	Influence of microstructure on the mechanical properties and hydrogen embrittlement characteristics of 1,800 MPa grade hot-stamped 22Mn B5 steel	Journal of Materials Science, 54(2019)5061-5073	有	2018/11/26
2	Ken-ichiro Mori, Yohei Abe, Kyohei Sedoguchi	豊橋技術科学大学	Delayed fracture in cold blanking of ultra-high strength steel sheets	CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol.68, No. 1, (2019), 297-300	有	2019/5/1

3	柴山由樹, 北條智彦, 秋山英二	東北大学 金属材料 研究所	U 曲げ試験片を用いた高 強度薄鋼板の水素脆化特 性評価法	日本鉄鋼協会・鉄 と鋼, Vol. 105 (2019), No. 9, pp. 927-934	有	2019/9/1
4	Akinobu Shibata, Yazid Madi, Kazuho Okada, Nobuhiro Tsuji, Jacques Besson	京都大学 パリ国立 鉱山大学	Mechanical and microstructural analysis on hydrogen-related fracture in a martensitic steel	International Journal of Hydrogen Energy Volume 44, Issue 54, 5 November 2019, Pages 29034- 29046	有	2019/10/09
5	Ken-ichiro Mori	豊橋技術 科学大学	Review of shearing processes of high strength steel sheets	Journal of Manufacturing and Materials Processing. Vol. 4, Issue 2 (2020), 54	有	2020/6/7
6	Mitsuhiro Okayasu, Jun Motojima	岡山大学	Microstructure-dependent hydrogen diffusion and trapping in high-tensile steel	Materials Science and Engineering A, 790(2020)139418	有	2020/7/14
7	Mitsuhiro Okayasu, Masaya Sato, Daiki Ishida, Takehide Senuma	岡山大学	The Effect of Precipitations (NbC and carbide) in Fe-C- Mn-xNb Steels on Hydrogen Embrittlement Characteristics	Materials Science and Engineering A, 791(2020)139598	有	2020/7/22
8	Ken-ichiro Mori, Yohei Abe, Yusuke Murai	豊橋技術 科学大学	Prevention of delayed cracking of punched 1.5 GPa ultra-high strength steel sheets by ironing with punched slug	International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Voi. 107, (2020), pp. 2503- 2510	有	2020/8/2
9	河盛 誠、 湯瀬 文雄 、 藤田 陽介 、池上 英 之	(株)神戸 製鋼所、 (株)コベ ルコ科研	ブラスト処理による鋼へ の水素侵入の機構と抑制 方法	日本鉄鋼協会・鉄と 鋼 : vol. 107(2021), pp. 583-593.	有	2021/3/8

10	Akinobu Shibata, Takashi Yonemura, Yuji Momotani, My13eong- heo14m Parkhusaku Takagi, Yazid Madi, Jacques Besson, Nobuhiro Tsuji	京都大学 NIMS JFEスチール パリ国立 鋳山大学	Effects of local stress, strain, and hydrogen content on hydrogen-related fracture behavior in low-carbon martensitic steel	Acta Materialia Volume 210, 116828	有	2021/3/25
11	Mitsuhiro Okayasu, Takafumi Fujiwara	岡山大学	Hydrogen embrittlement characteristics of hot- stamped 22MnB5 steel	International Journal of Hydrogen Energy, 46(2021)19657-19669	有	2021/4/9
12	Yuki Shibayama, Tomohiko Hojo, Eiji Akiyama	東北大学 金属材料 研究所	An Evaluation Method for Hydrogen Embrittlement of High Strength Steel Sheets Using U-bend Specimens	日本鉄鋼協会・ISIJ Internationa ; 61(2021), pp.1104- 1111.	有	2021/4/15
13	Saya Ajito, Tomohiko Hojo, Motomichi Koyama, Eiji Akiyama	東北大学 金属材料 研究所	Effects of ammonium thiocyanate and pH of aqueous solutions on hydrogen absorption into iron under cathodic polarization	日本鉄鋼協会・ISIJ International : 61(2021), pp. 1209- 1214.	有	2021/4/15
14	Yuki Shibayama, Tomohiko Hojo, Motomichi Koyama, Hiroyuki Saitoh, Ayumi Shiro, Ryo Yasuda Takahisa Shobu, Takasi Matsuno, Eiji Akiyama	東北大学 金属材料 研究所 量子科学 技術研究 開発機構 原子力研 究開発機 構 鳥取大学	Effects of stress and plastic strain on hydrogen embrittlement fracture of a U-bent martensitic steel sheet	日本鉄鋼協会・ISIJ International : 61(2021), pp.1322- 1329.	有	2021/4/15

15	Ken-ichiro Mori, Naotaka Nakamura, Yohei Abe, Yuta Uehara	豊橋技術科学大学	Generation mechanism of residual stress at press-blanked and laser-blanking edges of 1.5 GPa ultra-high strength steel sheet	Journal of Manufacturing Processes, Vol. 68, (2021), pp. 435-444	有	2021/6/5
16	Mitsuhiro Okayasu, Ryo Arai, Takehide Senuma	岡山大学	The effects of the microstructural characteristics of Fe-0.33C-1.2Mn-xNb-xMo steels on hydrogen embrittlement fracture	International Journal of Fracture, 231(2021)257-274.	有	2021/9/6
17	味戸沙耶, 北條智彦, 小山元道, 秋山英二	東北大学金属材料研究所	カソード分極下での純鉄の水素吸収へ与えるチオシアン酸アンモニウムとpHの影響	鉄と鋼 Vol.108 (2022), No.11, 掲載決定	有	2022/10

### 1.3 その他外部発表

#### (a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	柴山由樹, 北條智彦, 秋山英二	東北大学金属材料研究所	超高強度焼戻しマルテンサイト薄鋼板における耐水素脆化特性評価法の開発	腐食防食学会 東北支部 講演会	2018/3/16
2	Jun Motojima, Mitsuhiro kayasu Takehide Senuma	Okayama University	Influence of phosphorus on mechanical properties of hydrogen charged hot-stamping steel	International Conference on Mechanical Electric and Industrial Engineering (HangZhou,China)2018.5	2018/5/27
3	Lele Yang, Mitsuhiro Okayasu, Koji Shimotsu	Okayama University	Effect of microstructural characteristics on hydrogen embrittlement properties of hot stamped 22MnB5 steel	International Conference on Mechanical Electric and Industrial Engineering	2018/5/27
4	Mitsuhiro Okayasu, Lele Yang, Koji Shimotsu,	Okayama University	Hydrogen Embrittlement Properties of the Hot Stamped Carbon Steels	20th International Conference on Advance in Ferroalloys (Prague, Czech Republic) 2018. 8	2018/8/13
5	柴山由樹, 北條智彦, 秋山英二	東北大学大学院金属材料研究所	U曲げ加工を施した高強度鋼板の耐水素脆化特性評価法	日本鉄鋼協会第176回秋季講演大会, 東北大学, 学生ポスターセッション, PS-80	2018年9月20日
6	Daiki Ishida, Mitsuhiro Okayasu	Okayama University	A study of hydrogen embrittlement characteristics for hot stamped Fe-C-Nb steels	ASIA PACIFIC SOCIETY for MATERIALS RESERCH(Hokkaido, Japan)2018.7	2018/12/8

7	Lele Yang, Mitsuhiko Okayasu	Okayama University	Hydrogen embrittlement characteristics of carbon steels	2018 Global Research for efforts on Energy and Nanomaterials, Green 2018 (Taiwan) 2018. 12	2018/12/23
8	小林 憲司, 大村 朋彦	新日鐵住金 株式会社	切欠付き板状引張試験による 水素脆化評価における形状因 子の影響	日本鉄鋼協会、第 177 会春季講演大会(2019), No.188	2019/03/21
9	A.T.Yokobori*, N.Yamaji**, T.Ohmi***,	*帝京大学 ** 東北大 学大学院 *** 湘南工 科大学	Mechanical Control and Release of Hydrogen Mechanically Trapped Around a Notch Tip for Steel	World hydrogen technology convention (WHTC) ,2019 June 2-7	2019/6/3
10	T.Ohmi***, A.T.Yokobori,jr.*, N. Yamaji,** S.Sugawara,**** T.Ebata, **** T. Naruse,****	*帝京大学 ** 東北大 学大学院 *** 湘南工 科大学 **** 東北 特殊鋼 (株 )	Estimation of Hydrogen Embrittlement Sensitivity for Electro Magnetic StainlessSteel Under Fatigue Condition Based on the Proposed Test Method Using a Small Scale Specimen	World hydrogen technology convention (WHTC) ,2019 June 2-7.	2019/6/3
11	森謙一郎, 瀬戸 口京平, 上原佑 太, 安部洋平	豊橋技術科 学大学	プレスおよびレーザーブラン キングされた超高張力鋼板の 遅れ破壊	2019年度塑性加工春季 講演会講演論文集, (2019), 23-24	2019/6/8
12	Mitsuhiko Okayasu, Lele Yang	Okayama University	Effect of Hydrogen on the Mechanical Properties of Cold and Hot Stamping Steel Plates	International Conference on Complex Metallic Alloys and Metallurgical Engineering, ICCMAME 2019	2019/8/13
13	Mitsuhiko Okayasu, Lele Yang	Okayama University	Hot Stamping Technology for Carbon Fiber Reinforced Plastics Sheet Using Electric Resistance Heating	International Conference ICCMAME (Italy)2019.8.13-14	2019/8/13
14	柴山由樹, 北條 智彦, 秋山英二	東北大学金 属材料研究 所	U曲げ加工試験片による焼戻し マルテンサイト鋼の水素脆化 特性の評価	日本鉄鋼協会第178回 秋季講演大会, 岡山大 学, CAMP-ISIJ Vol.32 (2019)-702	2019/9/11
15	河盛 誠、湯瀬 文雄、 藤田 陽介	(株)神戸製 鋼所、 (株)コベル コ科研	プラストを用いた脱錆におけ る鋼への水素侵入	日本鉄鋼協会第178回 秋季講演大会 CAMP- ISIJ, 32 (2019), 783.	2019/9/13
16	横堀壽光* 尾関郷* 大見敏仁**	*帝京大学 ** 湘南工 科大学	水素拡散解析 $\alpha$ 法に基づく高強 度鋼における水素環境下での 疲労き裂成長挙動解析	第16回機械、構造物の 強度設計・安全性評価 に関するシンポジウム (日本材料学会)	2019 /10/18

17	Yuki Shibayama, Tomohiko Hoji, Eiji Akiyama, Yuki Toji, Nobuyuki Ishikawa	Graduate school of Engineering, Tohoku University, JFE Steel Corporation	Hydrogen embrittlement property of high-strength steel sheets evaluated by using U-bend specimens	NACE International East Asia & Pacific Area Conference & Expo, Yokohama	2019/11/11-14
18	Yuki Tanaka, Mitsuhiro Okayasu	Okayama University	Mechanical properties of the hot stamped 22MnB5 steel	The 5th global Research Efforts on Energy and Nanomaterials, Green2019 (Taiwan) 12.20-23	2019/12/23
19	森謙一郎	豊橋技術科 学大学	打ち抜きブランク端面の遅れ 破壊の影響因子の抽出	日本塑性加工学会第 336回塑性加工シンポ ジウム, (2020), 1-6	2020/1/28
20	多川魁人, 鈴木 啓史, 高井健一	上智大理工	焼戻しマルテンサイト鋼の曲 げ試験による水素脆化感受性 評価と割れ進展解析	日本鉄鋼協会第179回 春季講演大会 CAMP-ISIJ Vol.33 (2020)-2672	2020/3/18
21	河盛 誠、湯瀬 文雄、 藤田 陽介	(株)神戸製 鋼所、 (株)コベル コ科研	プラストによる鋼への水素侵 入の機構と抑制方法	日本鉄鋼協会第179回 春季講演大会 CAMP-ISIJ, 33 (2020), 264.	2020/3/19
22	柴山由樹, 北條 智彦, 小山元道 , 秋山英二	東北大学金 属材料研究 所	焼戻しマルテンサイト鋼のU曲 げ加工による水素脆化特性に 及ぼす残留応力の影響	日本鉄鋼協会第179回 春季講演大会, 東京工 業大学, CAMP-ISIJ Vol.33 (2020)-273	2020/3/21
23	味戸沙耶, 北條 智彦, 小山元道 , 秋山英二	東北大学金 属材料研究 所	純鉄への水素侵入に与える水 溶液中のチオシアン酸アンモ ニウム濃度とpHの影響	日本鉄鋼協会第179回 春季講演大会, 東京工 業大学, CAMP-ISIJ Vol.33 (2020)-329	2020/3/21
24	栗本 新, 森原竜 司, 清水万真, 庄 司博人, 大畑 充	大阪大学	自動車用1500 MPa級超高強度 鋼部材の水素脆化割れ評価手法 に関する研究	2020年度 溶接学会 秋 季全国大会	2020/9/9
25	河盛 誠、湯瀬 文雄、 藤田 陽介	(株)神戸製 鋼所、 (株)コベル コ科研	プラストによる鋼への水素侵 入の機構と抑制方法	日本鉄鋼協会第180回 秋季講演大会	2020/9/18
26	味戸沙耶, 北條 智彦, 小山元道, 秋山英二	東北大学金 属材料研究 所	チオシアン酸アンモニウムを含む 水溶液中におけるカソード分極下 での純鉄の水素吸収挙動	日本鉄鋼協会第180回 秋季講演大会	2020/9/18
27	柴山由樹, 北條 智彦, 小山元道, 秋山英二	東北大学金 属材料研究 所	焼戻しマルテンサイト鋼のU曲 げ加工による水素脆化特性に及 ぼす残留応力の影響	日本鉄鋼協会第180回 秋季講演大会	2020/9/18



28	柴山由樹, 北條智彦, 小山元道, 松野崇, 秋山英二	東北大学金属材料研究所 鳥取大学	U曲げ試験片の水素脆化と塑性ひずみ・応力分布の関係	日本塑性加工学会 第71回塑性加工連合講演会	2020/11/14
29	森謙一郎, 馬場椋平, 中村尚誉, 安部洋平	豊橋技術科学大学	超高張力鋼板の穴抜き加工に切口面の残留応力と遅れ破壊	第71回塑性加工連合講演会	2020/11/14
30	味戸沙耶, 北條智彦, 小山元道, 秋山英二	東北大学金属材料研究所	チオシアン酸アンモニウムを含む水溶液中におけるカソード分極下での純鉄への水素侵入挙動の安定性	日本鉄鋼協会第181回春季講演大会	2021/3/18
31	河盛 誠, 湯瀬文雄, 藤田 陽介, 池上 英之	(株)神戸製鋼所, (株)コベルコ科研	腐食環境下で鋼に侵入した水素の評価方法	日本鉄鋼協会第181回春季講演大会	2021/3/18
32	柴山由樹, 北條智彦, 小山元道, 秋山英二	東北大学金属材料研究所	U曲げ加工した高強度鋼板の水素脆化特性の支配因子	(公社)腐食防食学会材料と環境2021	2021/5/21
33	森謙一郎, 小寺悠五, 上原佑, 中村尚誉, 安部洋平	豊橋技術科学大学	超高張力鋼板のせん断加工における切口面の遅れ破壊の評価	第72回塑性加工連合講演会	2021/10/29
34	味戸沙耶, 北條智彦, 小山元道, 秋山英二	東北大学金属材料研究所	NH <sub>4</sub> SCNを含む水溶液中におけるカソード分極下での純鉄への水素侵入挙動の時間変化とその要因	(一社)日本鉄鋼協会第183回春季講演大会	2022/3/17
35	高木周作	JFEスチール	超高強度薄鋼板の水素脆化挙動評価技術の開発	自動車技術会フォーラム2022	2022/7/13

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	JFE スチール・東北大学	自動車用超高強度薄鋼板の開発と水素脆化挙動評価技術	溶接学会誌, Vol.88, No.1, pp.41-44	2019/1
2	豊橋技術科学大学	高強度鋼板のせん断加工	ぶらすとす (日本塑性加工学会会報誌), Vol. 3, No. 27, (2020), pp. 136-140	2020/3/25
3	東北大学金属材料研究所	高強度鋼板の水素脆化メカニズム	金属学会誌 まてりあ Vol. 61 (2022), No. 7, pp. 413-418.	2022/7/1

### (c)プレス発表

なし

### (d)その他

なし

## 1.4 展示会への出展

なし

## 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	東北大学大学院・柴山由樹	超高強度焼戻しマルテンサイト薄鋼板における耐水素脆化特性評価法の開発	奨励賞	2018/3/16
2	Okayama University Mitsuhiro Okayasu	Hydrogen Embrittlement Properties of the Hot Stamped Carbon Steels	Best Presentation Award	2018/8/13
3	Okayama University Mitsuhiro Okayasu	Mechanical properties of the hot stamped 22MnB5 steel	Best Presentation Award	2019/8/13
4	京都大学・柴田暁伸	マルテンサイト鋼のマイクロ組織と変形・破壊挙動に関する研究	日本金属学会村上奨励賞	2019/9/11

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	JFE スチール 神戸製鋼所 新日鐵住金	革新的新構造材料等研究開発「平成 30 年度成果報告会」	ポスター	2019/1/21
2	神戸製鋼所	革新的新構造材料等研究開発「2019 年度成果報告会」	講演、ポスター	2020/2/28 (中止)
3	JFE スチール	革新的新構造材料等研究開発「2020 年度成果報告会」	講演、(ポスター)	2021/7/1

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 66] 鉄鋼信頼性評価技術開発 (2021年度～2022年度)

表 添-6.8-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2021FY	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	1
2022FY	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1
合計	0	0	0	1	1	6	0	0	0	0	0	2

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	柴田暁伸	物質・材料研究機構	Multi-scale three-dimensional analysis on local arrestability of intergranular crack in high-strength martensitic steel	Acta Materialia, 234 (2022) 118053.	有	2022/05/21
2	柴田暁伸	物質・材料研究機構	高強度マルテンサイト鋼の水素脆性	日本材料強度学会誌, 55 (2022) 27	無	2022/5/13

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	柴田暁伸	物質・材料研究機構	マルテンサイト鋼における粒界クラックのマルチスケール3次元解析	日本金属学会 第169回秋期講演大会	2021/9/16
2	森戸茂一	島根大学	鋼の焼入組織はどこまで分かっているのか	第92回日本熱処理技術協会講演大会	2021/11/26

3	Ivan Gutierrez-Urrutia	物質・材料研究機構	Investigation of the twin structure in lenticular martensite by advanced SEM techniques: Electron Channeling Contrast Imaging (ECCI) and Transmission Kikuchi Diffraction (TKD)	日本鉄鋼協会 第183回春季講演大会	2022/3/16
4	宮本吾郎	東北大学	亜鉛めっき鋼板の850℃への急速加熱におけるFe/Zn界面反応	日本鉄鋼協会 第183回春季講演大会	2022/3/16
5	味戸沙耶	東北大学	NH <sub>4</sub> SCNを含む水溶液中におけるカソード分極下での純鉄への水素侵入挙動の時間変化とその要因	日本鉄鋼協会 第183回春季講演大会	2022/3/17
6	柴田暁伸	物質・材料研究機構	高強度マルテンサイト鋼の水素脆性	第63回材料強度と破壊総合シンポジウム	2022/5/13

**(b)新聞・雑誌等への掲載**

なし

**(c)プレス発表**

なし

**(d)その他**

なし

**1.4 展示会への出展**

なし

**1.5 受賞**

なし

**1.6 フォーラム等**

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	物質・材料研究機構	革新的新構造材料等研究開発 「2020年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/1/31
2	物質・材料研究機構	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

研究開発項目⑦「熱可塑性 CFRP の開発」

[テーマ番号 27] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発  
(2014 年度～2022 年度)

表 添-7.1-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	25	1	0	8	1	0	3
2014FY	0	0	0	2	0	16	12	0	3	2	0	4
2015FY	2	0	0	1	0	13	2	0	1	4	0	5
2016FY	4	0	2	3	0	20	4	1	3	4	1	2
2017FY	5	0	4	3	0	20	11	1	4	6	0	4
2018FY	1	0	4	1	0	24	7	0	3	9	0	4
2019FY	0	0	0	1	2	30	2	0	2	5	0	3
2020FY	1	0	0	3	0	19	0	0	1	5	0	4
2021FY	3	0	0	3	0	19	1	0	0	6	0	6
2022FY	0	0	1	2	0	2	1	0	1	6	0	3
合計	16	0	11	19	2	188	41	2	26	48	1	38

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT※	出願日	状態	名 称	発明者
1	国立大学法人 名古屋大学他	特願 2015-117288	国内	2015/06/10	登録	配向同定装置、配向同定 方法および分布同定装置	長野方星他
2	スズキ株式会 社他	特願 2015- 188634	国内	2015/09/25	登録	車両用フロアパネル	佐内秀輔他
3	国立大学法人 名古屋大学他	PCT/ JP2016/ 067370	PCT	2016/06/10	各国 移行	配向同定装置、配向同定 方法および分布同定装置	長野方星他
4	本田技研工業 株式会社他	特願 2016-120485	国内	2016/06/17	登録	樹脂成形部材の成形方法 及び成形システム	平脇聡志他
6	スズキ株式会 社他	PCT/JP2016/ 078029	PCT	2016/09/23	各国 移行	車両用フロアパネル	佐内秀輔他
7	三菱自動車工 業株式会社他	特願 2017-65468	国内	2017/03/29	公開	プレス成形金型および樹 脂成形品	馬場教揮他

8	本田技研工業株式会社他	PCT/JP2017/017893	PCT	2017/05/11	各国移行	樹脂成形部材の成形方法及び成形システム	平脇聡志他
9	本田技研工業株式会社他	PCT/JP2017/017897	PCT	2017/05/11	各国移行	熱可塑性樹脂複合材の製造方法及び製造装置	平脇聡志他
10	アイシン精機株式会社他	特願 2017-156489	国内	2017/08/14	登録	合成樹脂部材の溶着方法	森隆行他
11	東レ株式会社他	特願 2017-193769	国内	2017/10/03	登録	繊維配向度の測定方法、繊維配向度測定装置、および繊維配向度測定装置の制御プログラム	山中淳彦他
12	東レ株式会社他	特願 2017-193770	国内	2017/10/03	登録	繊維長測定用プレパラートの製造方法、繊維長測定用分散液の調製方法、繊維長測定方法、繊維長測定用プレパレート、繊維長測定装置、および繊維長測定装置の制御プログラム	山中淳彦他
13	本田技研工業株式会社他	特願 2017-236125	国内	2017/12/08	登録	熱可塑性樹脂材の製造装置	平脇聡志他
14	三菱自動車工業株式会社他	PCT/JP2017/46099	PCT	2017/12/22	公開	プレス成形金型および樹脂成形品	馬場教揮他
15	トヨタテクノクラフト株式会社他	PCT/JP2018/011930	PCT	2018/03/23	公開	接合システム及び接合方法	古屋敷研治他
16	本田技研工業株式会社他	特願 2018-065468	国内	2018/03/29	登録	熱可塑性樹脂複合材料のプレス成形方法	小林正俊
17	日立化成株式会社他	特願 2018-136539	国内	2018/07/20	公開	再生材料の製造方法、複合材料の処理方法及び炭素繊維	清水明他
18	トヨタ自動車株式会社他	PCT/JP2018/030194	PCT	2018/08/13	各国移行	合成樹脂部材の溶着方法	森隆行他
19	東レ株式会社他	PCT/JP2018/036953	PCT	2018/10/02	各国移行	繊維配向度の測定方法、繊維配向度測定装置、および繊維配向度測定装置の制御プログラム	山中淳彦他
20	東レ株式会社他	PCT/JP2018/036949	PCT	2018/10/02	各国移行	繊維長測定用プレパラートの製造方法、繊維長測定用分散液の調製方法、繊維長測定方法、繊維長測定用プレパレート、繊維長測定装置、および繊維長測定装置の制御プログラム	山中淳彦他
21	本田技研工業株式会社他	PCT/JP2018/045114	PCT	2018/12/07	各国移行	熱可塑性樹脂材の製造装置	平脇聡志他
22	高砂工業株式会社他	特願 2020-207310	国内	2020/12/15	公開	炭素繊維回収炉および炭素繊維回収方法	大島士月他

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	立石拓也	名古屋大学	超音波融着による非連続炭素繊維強化熱可塑性複合材のモード I 破壊靱性	第 6 回日本複合材料会議 (JCCM-6)	有	2015/03/04
2	米川考示	名古屋大学	不連続炭素繊維強化熱可塑性樹脂板とアルミニウム合金板の融着体のモード I 層間破壊靱性	第 6 回日本複合材料会議 (JCCM-6)	有	2015/03/04
3	村島基之	名古屋大学	Effect of nano-texturing on adhesion of thermoplastic resin against textured steel plate (テクスチャリングされた炭素鋼板に対する樹脂材料の付着に及ぼすナノテクスチャリングの影響)	Tribology Online, 日本トライボロジー学会	有	2015/09/17
4	増淵雄一	名古屋大学	Distribution function of fiber length in long fiber thermoplastics	Composites Science and Technology	有	2016/10/06
5	山本哲也	名古屋大学	Scaling theory of the flow dynamics of thermoplastics during compression molding	日本レオロジー学会誌	有	2016/10/15
6	後藤圭太	名古屋大学	均質化理論に基づく一方向 CFRTP 積層板の熱弾粘塑性特性評価	計算数理工学会 (JASCOME) 計算数理工学論文集	有	2016/12/02
7	室岡貴晴	名古屋大学	長繊維不連続 CFRTP の表面粗さ生成予測モデルの提案	日本機械学会論文集	有	2018/01/26
8	石川隆司	名古屋大学	Overview of Automotive Structural Composites Technology Developments in Japan	Composites Science and Technology	有	2018/02/08
9	寺田真利子	名古屋大学	Evaluation of measurement method for carbon fiber length using general scanner	Advanced Composite Materials	有	2018/03/01
10	寺田真利子	名古屋大学	Sampling method of carbon fibers for the measurement of the fiber length distribution 繊維長分布測定のための炭素繊維のサンプリング法	Advanced Composite Materials	有	2019/03/22
11	奥村航	石川県工業試験場	熱可塑性 CFRTP 加工技術の開発	高分子学会誌	無	2019/05
12	寺田真利子	名古屋大学	画像解析による炭素繊維複合材料内の繊維分散状態の評価	Journal of Textile Engineering	有	2019/08/01
13	日下高至	名古屋大学	熱可塑性 CFRP による自動車軽量化への挑戦	自動車技術会誌 6 月号	無	2019/06/01

14	山中淳彦	名古屋大学	Evaluation of fiber orientation by X-ray diffraction on discontinuous carbon fiber reinforced polyamide 6 X線回折による非連続炭素繊維強化ポリアミド6複合材料における繊維配向測定方法	Journal of Fiber Science and Technology	有	2020/06/10
15	瀬川和之	名古屋大学	CFRTP / AI合金の接合強度に及ぼす界面微細構造の影響	日本複合材料学会誌	有	2020/07/01
16	小柳潤	東京理科大学	Formulation of non linear Viscoelastic Viscoplastic constitutive equation for Polyamide 6 resin (ポリアミド6樹脂の非線形粘弾粘塑性解析)	Materials	有	2020/11/30
17	山中淳彦	名古屋大学	汎用装置を用いた非連続炭素繊維強化熱可塑樹脂複合材料の分析技術	繊維学会誌 (繊維学会)	有	2021/07/10
18	山中淳彦	名古屋大学	熱可塑粘性樹脂を用いた非連続炭素繊維強化複合材料の成形技術と分析技術に関する話題	科学と工業 (大阪工研協会)	有	2021/09/20
19	市来誠	名古屋大学	ハイブリッド成形した非連続CFRTP製ハット型補強材の軸圧縮挙動の実験と数値解析	日本複合材料学会誌	有	2021/11/15
20	寺田真利子	名古屋大学	Estimation of fiber orientation distribution in carbon-fiber-reinforced polyamide 6 using X-ray diffraction images X線回折画像による炭素繊維強化PA6内の繊維配向分布の推定	Advanced Composite Materials	有	2022/09/11
21	後藤圭太	名古屋大学	内部構造を考慮した非連続CFRTPのマルチスケール解析	日本複合材料学会誌	有	未定

### 1.3 その他外部発表

#### (a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	先端複合材料の自動車・航空機等への浸透と、それを支える名大NCCの役割と今後の方向	第251回 中部社会経済研究所フォーラム	2013/05/23
2	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	我が国におけるCFRP関連の研究開発動向と名古屋大学整備中のNCCの紹介	あいち産業科学総合技術センター 講演会	2013/06/19



3	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	名古屋大学ナショナルコンポジットセンターの紹介	日本塑性加工学会 2013年度第1回 CFRP 成形研究委員会「名古屋大学 NCC における CFRP 研究開発」	2013/07/08
4	山根 正睦	ナショナルコンポジットセンター	「FRTP の過去、現状と課題」～熱可塑性コンポジット 温故知新～	日本塑性加工学会 2013年度第1回 CFRP 成形研究委員会「名古屋大学 NCC における CFRP 研究開発」	2013/07/08
5	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	名古屋大学ナショナルコンポジットセンターの紹介	日本材料学会第131回 衝撃部門委員会	2013/07/12
6	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	ナショナルコンポジットセンターの研究開発の方向性と機能についての紹介	B 日本材料学会東海支部 H25 年度第1回見学会・講演会	2013/08/05
7	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	ナショナルコンポジットセンターの概要と今後の研究開発の方向	第13回 炭素繊維複合材料利用研究会 (広島)	2013/08/26
8	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	先端複合材料の航空宇宙・自動車分野への適用拡大と、それに伴って開設された名大ナショナルコンポジットセンターの紹介	日本技術士会中部支部 秋季例会	2013/09/07
9	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	複合材利用の総括と NCC の紹介	東京国際航空宇宙産業展 2013	2013/10/04
10	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	次世代自動車への適用を狙った低コスト CFRTP 技術	TECH Biz EXPO 2013 - 次世代ものづくり基盤技術産業展	2013/10/10
11	山根 正睦	ナショナルコンポジットセンター	「熱可塑性コンポジットの開発の歴史 過去・現在・未来」～ナショナルコンポジットセンターの役割～	(公財)岡山県産業振興財団炭素繊維複合材料 CFRP 公開講座	2013/10/18
12	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	炭素繊維複合材料研究の最新動向とナショナルコンポジットセンターの展開	公益財団法人科学技術交流財団炭素繊維複合材料応用技術研究会	2013/10/21
13	山根 正睦	ナショナルコンポジットセンター	「熱可塑性コンポジットの開発の歴史」～ FRTP 温故知新～	SAMPE JAPAN 先端材料技術展 2013 特別講演	2013/11/07

14	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	JAXA における先進複合材研究の最新成果と欧米における航空機用複合材技術の新しい方向	(社)中部航空宇宙技術センター先端複合材セミナー「航空機産業における現状とその展望」	2013/11/16
15	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	Exposure of Japanese Challenges and Opportunities	フラウンホーフフォーシンプोजウム『第2回 Green Technology made in Germany — 軽量化設計のための技術』	2013/11/18
16	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	イノベーション拠点形成の意義と NCC の研究開発活動	(独) 産業技術総合研究所 中部センター本格研究ワークショップ	2013/12/10
17	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	複合材技術の現状と将来・設計/評価技術	VR テクノ複合材料技術と NCC 見学会	2013/12/13
18	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	NCC の役割と設備の概要の紹介	VR テクノ複合材料技術と NCC 見学会	2013/12/13
19	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	先進複合材料の開発状況概要と自動車構造への応用の展望	リード エグジビジション ジャパン株式会社 Automotive World 2014	2014/01/17
20	長岡 猛	ナショナルコンポジットセンター	自動車における樹脂系材料の現状および成形加工における課題	岐阜技術革新センター自動車・航空機産業における複合材料に関する最新の取組	2014/01/23
21	山根 正睦	ナショナルコンポジットセンター	「名古屋大学 ナショナル コンポジット センターの紹介」 ～ コンポジットって何? 未来の自動車はどうなるの?～	舞鶴工業高等専門学校・機械工学科特別講演会	2014/01/24
22	山根 正睦	ナショナルコンポジットセンター	「熱可塑性コンポジットの開発の歴史」 ～ FRTP 温故知新～	石川県工業試験場いしかわ次世代産業創造支援センター 協力会講演会	2014/02/04
23	長岡 猛	ナショナルコンポジットセンター	「CFRP 成形加工技術の最新動向」	名古屋市工業研究所 CFRP 成形加工に関する技術講演会	2014/02/19
24	長岡 猛	ナショナルコンポジットセンター	「新規複合成形機による CFRTP 成形技術」	次世代自動車地域産学官フォーラム CFRTP の加工技術に関する講演及び成形機見学会	2014/02/21

25	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	NCC の役割・機能と設備の概要の紹介	日本ファインセラミックス協会 H25 年度第 4 回見学会	2014/03/05
26	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	次世代、複合材料研究開発拠点である名古屋大学 NCC の視察	東海圏開発プロジェクト分科会平成 26 年度第 1 回勉強会（見学会）	2014/05/14
27	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	欧州の複合材研究開発センター (CFK-Valley, EMC2, NCC-UK) を巡っての所感	SAMPE JAPAN 第 151 回技術情報交換会	2014/05/23
28	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	Overview of Recent Advanced Composites Research in Japan: Key Issue for Green and Smart Technology	JSPS France- Japan Workshop	2014/06/13
29	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	日本の先進複合材料研究の最先端の展望：世界に勝つために	JFCC 研究成果発表会	2014/07/04
30	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	CFRTP 自動車協調プロジェクト (熱可塑性 CFRP の開発) への名大 NCC の取組み	名古屋商工会議所第 3 回産業経済委員会	2014/09/01
31	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	名古屋大学ナショナルコンポジットセンターの取り組み	岐阜大学複合材料研究センター(GCC) 総合研究棟Ⅱ 竣工記念講演会	2014/09/29
32	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	自動車構造への CFRP の適用の背景と技術開発の動向(名大ナショナルコンポジットセンターの役割)	自動車技術会中部支部 2014 年度 第 4 回 技術講習会	2014/10/10
33	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	ナショナルコンポジットセンターにおける自動車構造用 CFRP の研究開発の概要	日本繊維機械学会講演会「繊維強化複合材料の最前線」	2014/10/21
34	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	名古屋大学に設立されたナショナルコンポジットセンター (NCC) の研究開発と熱可塑性 CFRP(CFRTP) の今後の展望	東北大学 CFRP 研究会 設立総会 記念講演	2014/10/28
35	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	航空宇宙への CFRP 適用の現状と NCC の研究開発の概要紹介	浜松地域 CFRP 事業化研究会第 10 回浜松地域 CFRP 事業化研究会	2014/10/29
36	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	炭素繊維強化プラスチック (CFRP) のモビリティへの適用現状と自動車用途へ向けた開発の展望	IPF JAPAN 2015 主催者 企画 先端技術セミナー	2014/10/31

37	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	複合材料の航空宇宙・自動車等への応用の動向について	日本機械学会東海支部 第154回 見学会	2014/11/26
38	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	名大に設置されたナショナルコンポジットセンター(NCC)で実施されている研究開発の現状紹介 -大型高速油圧プレス機と耐雷試験装置の役割-	名古屋大学技術部平成 26年度 技術部特別講演および研修報告会	2014/12/03
39	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	名大ナショナルコンポジットセンターで実施している自動車構造へのCFRP適用技術の研究開発	長野県テクノ財団、南信州・飯田産業センター、CFRP特別講義#2	2014/12/04
40	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	名大ナショナルコンポジットセンターの取組みと最新の研究開発成果	プラスチック成形加工学会、新加工技術委員会 第48回研究会	2014/12/11
41	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	CFRPの航空・自動車への応用展開とレーザー加工への期待	ALPROTユーザー連携 実用化推進シンポジウム	2014/12/15
42	長野 方星	ナショナルコンポジットセンター	不連続繊維CFRTPの3次元熱拡散率分布測定および繊維配向同定法への応用	第36回日本熱物性シンポジウム	2015/06/10
43	岩村 亮佑	名古屋大学大学院工学研究科化学・生物工学専攻分子化学工学分野	ポリアミド6を母材とするCFRTPのリサイクル技術および回収炭素繊維の損傷評価に関する研究	第53回炭素材料学会 夏季セミナー	2015/08/10
44	稲垣 良平	名古屋大学大学院工学研究科化学・生物工学専攻分子化学工学分野	CFRTPの力学物性に与える炭素繊維-樹脂界面接着挙動の効果について	第53回炭素材料学会 夏季セミナー	2015/08/10
45	飯田 純也	ナショナルコンポジットセンター	炭素繊維の表面官能基がCFRPの力学物性に与える影響	第53回炭素材料学会 夏季セミナー	2015/08/10
46	飯田 純也	ナショナルコンポジットセンター	炭素繊維の表面官能基がCFRPの力学物性に与える影響	第42回炭素材料学会 年会	2015/12/02

47	増淵 雄一	ナショナルコンポジットセンター	Stretch/Orientation Induced Reduction of Friction of Polymers 伸長流動状態における高分子の摩擦	Pacificchem 2015	2015/12/13
48	石川 隆司	ナショナルコンポジットセンター	不連続繊維 CFRTP の 3 次元熱拡散率分布測定 および繊維配向同定法への応用	平成 27 年度日本伝熱学会東海支部講演会	2016/01/13
49	増淵 雄一	ナショナルコンポジットセンター	Solidificatioin Mechanism of Long Fiber Reinforced Thermoplastic Characterized by Dynamic Viscoelasticity	国際会議 IWEAYR-11	2016/01/19
50	藤田 涼平	ナショナルコンポジットセンター	不連続繊維 CFRTP の 3 次元熱拡散率分布測定に基づく繊維配向同定法への応用 Measurement of 3-D thermal diffusivities for CFRTP having discontinuous fiber, and application to method for measuring fiber orientation	第 1 回環太平洋熱工学会議 The First Pacific Rim Thermal Engineering Conference(PRTEC2016)	2016/03/13
51	山本 哲也	ナショナルコンポジットセンター	繊維-樹脂混練物のプレス成形における流動ダイナミクス	第 7 回日本複合材料会議	2016/03/16
52	西原 寅史	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	刺繍機を用いて連続繊維で部分補強を行った CFRTP に関する研究	日本機械学会東海支部第 65 期総会・講演会	2016/03/16
53	今井 健太	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	CFRTP の超音波溶着に関する基礎的検討	第 7 回日本複合材料会議	2016/03/17
54	寺田 真利子	ナショナルコンポジットセンター	非連続炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合材料における繊維長分布計測法	第 7 回日本複合材料会議	2016/03/17
55	関根 誠	名古屋大学大学院工学研究科機械理工学専攻	不連続繊維 CFRTP の熱拡散率分布測定および繊維配向同定法への応用	テクノフロンティア展 2016	2016/04/20

56	入澤 寿平	名古屋大学大学院 工学研究 科化学・ 生物工学 専攻分子 化学工学 分野	炭素繊維-PA6I 界面接着への炭 素繊維表面官能基の効果につい て	平成28年度繊維学会 年次大会	2016/06/10
57	石川 隆司	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	航空機・自動車における CFRP 適用の現状と展望	エポキシ樹脂技術協会	2016/06/28
58	室岡 貴晴	名古屋大 学大学院 工学研究 科 機械理 工学専攻 機械科学 分野梅原 研究室	熱可塑性樹脂の微小穴への進入 特性の評価	日本機械学会 年次大 会 2016 九州	2016/09/12
59	増淵 雄一	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	炭素繊維ナイロン複合材料の固 化と結晶化における冷却速度の 影響	第 65 回高分子討論会	2016/09/14
60	河原 真吾	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	第 41 回複合材料シンポジウム	不連続繊維 CFRTP の ハット型構造物の曲げ 破壊試験評価	2016/09/15
61	関根 誠	株式会社 ベテル	N+2016 展	不連続繊維 CFRTP の熱 拡散率分布測定および 繊維配向同定法への応 用	2016/09/27
62	石川 隆司	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	2016 年国際航空宇宙展	CFRP を中心とする複 合材料の航空分野への 応用と他産業での CFRP 応用のシナジー 効果	2016/10/14
63	増淵 雄一	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	第 4 回 VENT 研究会	長繊維強化熱可塑性樹 脂の成形加工における ソフトマター物理学	2016/10/20
64	関根 誠	株式会社 ベテル	TECH Biz EXPO 2016	不連続繊維 CFRTP の熱 拡散率分布測定および 繊維配向同定法への応 用	2016/11/16

65	石川 隆司	名古屋大学 ナショナルコン ポジット センター	TECH Biz EXPO 2016	CFRP の各種産業分野 への応用の展開	2016/11/16
66	石川 隆司	名古屋大学 ナショナルコン ポジット センター	JIMTOF2016	炭素繊維強化プラス チックと工作機械の関 わり	2016/11/22
67	石川 隆司	名古屋大学 ナショナルコン ポジット センター	Japan 2nd International Composites Congres	Composite Technology Developmentand Market Prospects in Japan	2016/11/28
68	石川 隆司	名古屋大学 ナショナルコン ポジット センター	Composites Europe	Composite Technology Developmentand Market Prospects in Japan	2016/11/28
69	石川 勝啓	アイシン 精機株式 会社	アイシングループ(12社)	CFを用いた LFT-D 工 法基礎技術開発	2016/12/06
70	岩村 亮佑	名古屋大学大学院 工学研究 科化学・ 生物学 専攻分子 化学工学 分野	第 43 回炭素材料学会年会	ポリアミド6を母材と する CFRTP から回収し たリサイクル炭素繊維 の損傷評価	2016/12/09
71	岩村 亮佑	名古屋大学大学院 工学研究 科 化学・ 生物学 専攻 分子 化学工学 分野	第 43 回 炭素材料学会年会	リサイクル炭素繊維の 界面評価と CFRTP への 再利用手法確立に向け た研究	2016/12/09
72	入澤 寿平	名古屋大学大学院 工学研究 科化学・ 生物学 専攻分子 化学工学 分野	第 43 回 炭素材料学会年会	現場重合型ポリアミド 6 と炭素繊維界面接着 メカニズムと CFRTP の 力学物性・耐熱性への 効果について	2016/12/09

73	島本 太介	国立研究 開発法人 産業技術 総合研究 所	第 8 回 日本複合材料会議 (JCCM-8)	CFRP から取り出した 炭素繊維の簡易長さ評 価法	2017/03/16
74	大竹 遼平	名古屋大 学大学院 工学研究 科 航空宇 宙工学専 攻 構造制 御講座 構 造力学研 究グルー プ	第 8 回 日本複合材料会議 (JCCM-8)	CFRTP/金属接合はりの 界面破壊靱性	2017/03/16
75	石川隆司	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	Current Status of NCC (at Nagoya University) Project for CFRTP Application to Auto-Body 名古屋大学 NCC における自動車 用 CFRTP プロジェクトの現状	CFK Valley Convention	2017/05/16
76	石川隆司	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	Introduction to the Japanese on- going project named "Innovative Advanced Structural Materials" and research results on steel and composite development" 革新構造材料研究開発プロジェ クトおよび成果の概要	ACI	2017/05/17
77	石川隆司	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	非連続炭素繊維強化熱可塑性 CFRTP(LFT-D)の技術開発の現状	日本塑性加工学会	2017/06/16
78	石川隆司	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	自動車への炭素繊維強化プラス チック (CFRP)適用の現状と名古屋大学 NCC での熱可塑 CFRP 技術開発 の紹介	(独)日本学術振興会第 120 委員会	2017/06/23
79	石川隆司	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	Current Status of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) Applications to Automotive Bodies and Introduction of CFRTP Application to Auto-Body Project Conducted in National Composites Center (NCC) Japan	SEA-J Conference on Composite Materials 7 August 2017	2017/08/07
80	石川隆司	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	炭素繊維強化プラスチック (CFRP)の自動車の適用の現状と 名古屋大学ナショナルコンポ ジットセンターのプロジェクト 紹介	第 49 回 繊維学会夏期 セミナー 「繊維科学 の岐路に向けて」	2017/08/09



81	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	自動車用 CFRP の最新動向と名古屋大学 NCC で実施している CFRTP の自動車適用技術開発プロジェクト紹介	東京理科大学 複合材料セミナー	2017/09/02
82	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	自動車への熱可塑性 CFRP の適用技術開発を追及している名古屋大学ナショナルコンポジットセンター(NCC)の挑戦の紹介	TEST 2017 第 14 回総合試験機器展	2017/09/15
83	市来誠	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	不連続繊維強化 CFRTP の力学特性に関する分析評価	日本機械学会 M&M 力学カンファレンス	2017/10/07
84	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	自動車構造への CFRP の適用を目指した名古屋大学ナショナルコンポジットセンターでの研究開発プロジェクトの歩み	IPF JAPAN 2017 (国際プラスチックフェア) 【第 9 回】	2017/10/26
85	山中淳彦	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	非連続炭素繊維強化熱可塑樹脂複合材料の配向と物性	成形加工学会 2017 年度秋季シンポジウム	2017/10/31
86	寺田真利子	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	非連続炭素繊維強化複合材料の繊維長分布測定に関するサンプリング方法	第 26 回ポリマー材料フォーラム	2017/11/01
87	山本哲也	名古屋大学大学院工学研究科物質化学専攻	熱可塑性繊維強化樹脂のプレス成形時の配向ダイナミクス	第 58 回高圧討論会	2017/11/08
88	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	非連続炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合材 (CFRTP) を用いた高圧プレスによる自動車構造成形技術紹介	第 58 回高圧討論会	2017/11/09
89	長野方星	名古屋大学大学院工学研究科機械システム工学専攻	Quantitative fiber orientation evaluation of CFRP/CFRTP based on 3-D thermal diffusivity measurement using active lock-in	15th Asia Pacific Conference for Non-Destructive Testing (APCNDT2017), Singapore.	2017/11/13

90	室岡貴晴	名古屋大学工学部 研究科機械理工学 専攻	長繊維熱可塑性 CFRP における 表面粗さ生成モデルの提案	トライボロジー会議 2017 秋 高松	2017/11/15
91	石川隆司	名古屋大学ナショナル コンポジット センター	熱可塑性 CFRP(CFRTP)と熱硬化 性 CFRP の比較と CFRTP の最新 技術動向およびその自動車への 適用技術開発動向	Tech Biz 2017 技術セ ミナー	2017/11/17
92	石川隆司	名古屋大学ナショナル コンポジット センター	Current Status of NCC(at Nagoya Univ.) Project for CFRTP Applications to Auto-Body	JISSE-15 Plenary Lecture	2017/11/28
93	石川隆司	名古屋大学ナショナル コンポジット センター	熱可塑性 CFRP を自動車構造へ 適用する技術開発の歩み	第 10 回福島大学学術研 究交流会	2017/12/01
94	瀬川和之	名古屋大学工学部 機械・航 空宇宙工 学科	熱可塑 CFRP/金属接合板の力学 特性に関する研究	日本機械学会東海学生 会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2018 (TEC18) 第 49 回学生員卒業研究 発表講演会	2018/03/12
95	山本哲也	名古屋大学大学院 工学研究 科物質科 学専攻	Oriental distribution of reinforcing fibers of thermoplastic composites produced by compression molding - Heat & cool vs coldpressing (圧縮成形に よって作成した熱可塑性繊維強 化樹脂の繊維配向分布 - ヒート&クール法とコールドプ レス法の比較)	First International Conference on 4D Materials and Systems	2018/04/20
96	石川隆司	名古屋大学ナショナル コンポジット センター	炭素繊維強化プラスチックの各 種産業分野への適用の動向と展 望	第 2 回ファインケミカ ルジャパン 2018	2018/04/20
97	石川隆司	名古屋大学ナショナル コンポジット センター	CFRTP の種々の産業分野への適 用の現状と展望	第 6 回高機能プラス チック展	2018/05/11

98	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	名古屋大学ナショナルコンポジットセンターにおける CFRTP 開発の取り組みについて	自動車技術会 2018 春季大会	2018/05/23
99	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	CFRTP の種々の産業部屋への適用の現状と展望	第 1 回先端複合材セミナー	2018/05/24
100	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	JAXA における繊維強化プラスチック (CMC) の最新の研究の紹介と名古屋大学ナショナルコンポジットセンターにおける自動車への CFRTP 適用プロジェクトの紹介	公益財団法人特殊無機材料研究所セミナー AIMS-2018	2018/06/04
101	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	熱可塑性炭素繊維強化プラスチック (CFRTP) の自動車構造への適用技術開発の現状と課題	アジア不織布産業総合展示会・会議	2018/06/08
102	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	NCC の取り組みと成果報告	平成 30 年度名古屋大学協力会総会・講演会	2018/07/14
103	奥村航	石川県工業試験場	熱可塑性 CFRP のレーザー接合技術の開発	平成 30 年度石川イノベーション促進セミナー	2018/07/20
104	瀬川和之	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	熱可塑 CFRP/金属接合板の力学特性に関する研究	第 60 回構造強度に関する講演会	2018/08/01
105	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	熱可塑性 CFRP による自動車軽量化への挑戦!	イノベーション・ジャパン 2018	2018/08/31
106	荒井政大	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	炭素繊維強化熱可塑性プラスチック CFRTP の自動車構造への応用について	第 8 回 CSJ 化学フェスタ	2018/10/23

107	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	NCCにおけるCFRTPの自動車構造適用技術開発の現状と今後の展望	第63回FRP総合講演会	2018/10/26
108	奥村航	石川県工業試験場	熱可塑性CFRPのレーザー接合技術の開発	繊維学会秋季研究発表会	2018/11/01
109	奥村航	石川県工業試験場	熱可塑性CFRPのレーザー接合技術の開発	プラスチック成形加工学会 第26回秋季大会	2018/11/26
110	寺田真利子	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	素繊維複合材料における繊維分散性の評価	プラスチック成形加工学会 第26回秋季大会	2018/11/26
111	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の技術動向～自動車分野への応用～	潤滑油製造業地方研修会	2018/11/28
112	奥村航	石川県工業試験場	熱可塑性CFRPのレーザー接合技術の開発	石川県工業試験場 平成29年度研究報告	2018/12
113	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	CFRPあるいはCFRTPの自動車分野への応用の現状と展望	SAMPE平成30年度第4回技術情報交換会	2019/02/21
114	金井誠	東京大学	ピンボール式引抜き試験におけるCF/PA6界面せん断強度の樹脂結晶粒の影響について	第10回日本複合材料会議(JCCM-10)	2019/03/06
115	藤村春孝	名古屋大学工学部機械・航空宇宙工学科	非連続CFRPの繊維配向評価および引張荷重下における破壊モードに関する研究	日本機械学会東海支部第68期講演会(卒業研究発表会)	2019/03/06
116	村瀬健太	名古屋大学工学部機械・航空宇宙工学科	$\epsilon$ -カプロラクタムのその場重合に関する基礎研究	日本機械学会東海支部第68期講演会(卒業研究発表会)	2019/03/06
117	磯貝大成	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	タルボ・ロー干渉計を用いた非連続CFRTPの繊維性状評価	日本機械学会東海支部第68期総会・講演会	2019/03/07

118	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	自動車シャシーへの CFRP 適用の現状と動向	第 3 回ファインケミカルジャパン 2019	2019/03/18
119	寺田真利子	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	画像解析による炭素繊維複合材料内の繊維分散状態の評価	日本繊維機械学会第 72 回年次大会	2019/05/30
120	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	New Development Trends of CFRP/CFRTP to Cars in Japan	PLASCOM 2019	2019/08/22
121	市来誠	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	EVALUATION OF TENSILE PROPERTIES OF PRESS-FORMED DISCONTINUOUS CFRTP PLATES (非連続 CFRTP プレス成形板の引張特性評価)	16th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISSE-16)	2019/09/02
122	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	Feature and Recent Trends of Composites Research Performed in Japan	16th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition (JISS-16)	2019/09/03
123	笠井雄介	名古屋大学工学研究科航空宇宙工学専攻	CFRP の X 線 Talbot-Lau 干渉計画像と強化繊維分布・配向との関係のモデル化	日本複合材料学会 第 44 回複合材料シンポジウム	2019/09/05
124	杉本慶喜	産業技術総合研究所構造材料研究部門	リサイクル炭素繊維への適用を目指したフラグメンテーション試験による繊維強度と界面せん断強度評価	日本複合材料学会 第 44 回複合材料シンポジウム	2019/09/05
125	吉村彰記	名古屋大学工学研究科航空宇宙工学専攻	タルボ・ロー干渉計を用いた CFRP 積層板の繊維方向評価	日本機械学会 2019 年度年次大会	2019/09/08
126	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	海外の炭素繊維覆道材料の最新技術動向と日本の課題	炭素繊維応用技術研究会	2019/09/11

127	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	炭素繊維強化プラスチック (CFRP)の応用分他の展開～航空宇宙から自動車へ～	第2回名古屋オートモーティブワールド	2019/09/20
128	杉本慶喜	産業技術総合研究所構造材料研究部門	リサイクル炭素繊維の特性評価のためのフラグメンテーション試験法の開発	第68回高分子討論会	2019/09/26
129	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	名古屋大学 NCC で実施している自動車に熱可塑 CFRP を適用するプロジェクト紹介とそこでの 3D TIMON® の重要性	3D TIMON	2019/10/04
130	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	Introduction of Discontinuous Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic (CFRTP) Development Project for Automotive Applications	Symposium on bioinspired design of advanced materials	2019/10/10
131	今井洋輔	東京大学工学研究科	繊維熱可塑 CFRP の不確定強度モデルの開発 Development of stochastic strength model for short carbon fiber reinforced thermoplastic	機械学会 M&M2019 材料力学カンファレンス	2019/11/02
132	市来誠	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	非連続 CFRTP 板の繊維配向および引張特性の評価	日本機械学会 M&M2019 材料力学カンファレンス	2019/11/02
133	瀬川和之	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	CFRTP/Al 合金の接合強度に及ぼす界面微細構造の影響	日本機械学会 M&M2019 材料力学カンファレンス	2019/11/02
134	市来誠	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	CFRTP/アルミ合金接合板の界面性状および接合強度	プラスチック成形加工学会第27回秋季大会	2019/11/12
135	瀬川和之	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	$\epsilon$ -カプロラクタムのその場重合による CFRTP 成形	プラスチック成形加工学会第27回秋季大会	2019/11/12

136	萩野谷健吾	日本大学 生産工学 部機械工 学科	現場重合型樹脂を用いたCFRTPの連続成形法の開発	2019年成形加工学会秋季大会	2019/11/13
137	石川隆司	名古屋大学 ナショナル コンポジット センター	熱可塑性CFRPによる生産性向上への取り組み	2019年度本多光太郎・湯川記念合同講演会	2019/11/19
138	荒井政大	名古屋大学 ナショナル コンポジット センター	自動車用熱可塑性CFRPの加工と特殊評価	第28回ポリマー材料フォーラム	2019/11/21
139	杉本慶喜	産業技術 総合研究 所構造材 料研究部 門	リサイクル炭素繊維の特性評価に向けたフラグメンテーション試験法の開発	第28回ポリマー材料フォーラム	2019/11/22
140	石川隆司	名古屋大学 ナショナル コンポジット センター	CFRP（特にCFRTP）の各種産業分野への適用の現状と展望	第8回高機能プラスチック展	2019/12/05
141	石川隆司	名古屋大学 ナショナル コンポジット センター	航空宇宙産業の動向（先進複合材料の適用の寄与）	令和元年度新産業創出研究セミナー第3回	2020/01/14
142	荒井政大	名古屋大学 ナショナル コンポジット センター	熱可塑性樹脂複合材料(CFRTP)の自動車構造材への適用について	第9回次世代ものづくり基盤技術産業展	2020/02/06
143	正木達也	名古屋大学 工学部・工 学研究科	超音波振動を受ける熱可塑性CFRPとAl合金のエネルギー変換特性の評価	第51回学生会卒業研究発表講演会 (日本機械学会東海支部主催)	2020/03/09
144	山邊亮太	名古屋大学 工学部・工 学研究科	熱可塑性CFRP射出成形材の繊維長および配向分布に基づく引張弾性率の予測	第51回学生会卒業研究発表講演会 (日本機械学会東海支部主催)	2020/03/09
145	吉岡海翔	日本大学 生産工学 部機械工 学科	現場重合型PA6を用いたCFRTPシートの機械的特性向上に関する研究	第11回日本複合材料会議	2020/03/16
146	金井誠	東京大学 工学研究 科	ピンホール式引抜き試験によるCF/PA6界面せん断強度の温度依存特性	第11回日本複合材料会議	2020/03/17

147	瀬川和之	名古屋大学大学院 工学研究 科航空宇 宙工学専 攻	CFRTP/AI 合金の接合における金 属表面形状の影響	第 11 回日本複合材料会 議	2020/03/17
148	磯貝大成	名古屋大学大学院 工学研究 科航空宇 宙工学専 攻	タルボ・ロー干涉計を用いた炭 素繊維強化プラスチックの繊維 性状の評価	第 11 回日本複合材料会 議	2020/03/17
149	寺田真利子	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	その場重合により成形された炭 素繊維強化ポリアミド 6 複合材 料に含まれる未反応成分の評価	日本繊維機械学会 第 73 回年次大会	2020/06/04
150	山邊亮太	名古屋大 学大学院 工学研究 科航空宇 宙工学専 攻	熱可塑性 CFRP 射出成形材の繊 維長および 配向分布に基づく引張弾性率の 予測	2020 年繊維学会年次大 会 (繊維学会主催)	2020/06/11
151	寺田真利子	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	熱可塑性 CFRP 射出成形材の繊 維長および繊維配向分布と引張 弾性率との関係	プラスチック成型加工 学会 第 31 回年次大会	2020/06/24
152	後藤圭太	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	内部構造を考慮した非連続 CFRTP の力学特性評価	第 45 回複合材料シンポ ジウム (日本複合材料 学会)	2020/09/25
153	石川隆司	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	CFRP(特に CFRTP)の各種産業分 野への適用の現状と展望	第 8 回関西高機能ブラ スチック展	2020/10/08
154	石川隆司	名古屋大 学ナショ ナルコン ポジット センター	名古屋大学ナショナルコンポ ジットセンター(NCC)の取組み の紹介	CFRP 技術動向セミ ナー ～コンポジットハイ ウェイコンソーシアム の最新の取組み～	2020/10/14
155	藤村春孝	名古屋大 学大学院 工学研究 科航空宇 宙工学専 攻	タルボ・ロー干涉計による CFRP 積層板の X 線散乱特性の 評価	繊維学会 2020 年度秋季 年会	2020/11/05



156	荒井政大	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	CFRPの研究開発に関するナショナルコンポジットセンター(NCC)の取組み	第3回CFRP技術動向セミナー	2020/11/10
157	稲葉光稀	東京理科大学大学院工学研究科機械工学専攻	ランダム繊維を有する熱可塑CFRPの画像処理による配向と含有率の定量化	M&P	2020/11/18
158	寺田真利子	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	その場重合により成形された炭素繊維強化ポリアミド6複合材料に含まれる未反応成分の定量	成形加工シンポジア'20 (プラスチック成形加工学会)	2020/12/01
159	正木達也	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	CFRTPと金属の超音波溶着における樹脂溶融挙動の評価	成形加工シンポジア'20 (プラスチック成形加工学会)	2020/12/01
160	荒井政大	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	熱可塑性樹脂CFRPの自動車用構造材料の応用について	次世代自動車要素技術生産技術研究講座【オンライン講座】	2020/12/07 ~ 12/27
161	荒井政大	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	熱可塑性樹脂CFRPの自動車用構造材料への応用について	2020年度第6回CPC研究会 オンデマンド配信	2020/12/14 ~ 12/18
162	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	熱可塑性CFRPを適用した自動車軽量化のための産学官による開発の現状	自動車技術会中部支部第2回技術交流会	2021/01/22
163	吉岡海翔	日本大学生産工学部機械工学科	現場重合型PA6を用いたCFRTPテープの連続成形法に関する研究	第12回日本複合材料会議	2021/02/23
164	村瀬健太	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	$\epsilon$ -カプロラクタムのその場重合引き抜き成形によるUD-CFRTPの作製	第12回日本複合材料会議(JCCM12) (日本複合材料学会・日本材料学会)	2021/03/02

165	白岩徹	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	LFT-D プレス成形複合材の繊維性状分布を考慮した X-FEM 解析	第 12 回日本複合材料会議 (JCCM12) (日本複合材料学会・日本材料学会)	2021/03/02
166	山中淳彦	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	CFRTP の分析技術の構築	第 2 回「NCC 次世代複合材研究会」CFRP における最新技術動向セミナー	2021/03/05
167	山田基功	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	CFRTP への利用に向けた現場重合型ポリアミド 6 における未反応モノマーの影響に関する研究	日本機械学会東海支部 第 52 回学生会卒業講演会 (日本機械学会東海支部)	2021/03/13
168	荒井政大	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	自動車用 CFRTP の応用とその周辺技術	第 4 回ファインケミカルジャパン 2021	2021/04/15
169	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	熱可塑性 CFRP (LFT-D) を自動車構造に適用する技術の開発	自動車技術会 2021 年春季大会	2021/05/27
170	杉本慶喜	産業技術総合研究所	フラグメンテーション試験による炭素繊維の引張強度分布と繊維/樹脂界面せん断強度の同時評価	プラスチック成形加工学会 第 32 回年次大会	2021/06/16
171	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	NCC における熱可塑 CFRP 研究開発の状況	NCC 次世代複合材研究会プレゼン会	2021/07/08
172	和田匡史	ファインセラミックスセンター	CFRP 製水素タンクからの過熱水蒸気を利用した炭素繊維回収	2021 年度 J F C C 研究成果発表会	2021/07/15
173	木本幸胤	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	熱可塑性樹脂 CFRP の自動車用構造材料への応用について	日本機械学会 2021 年度年次大会	2021/09/06

174	山科拓海	日本大学生産工学部機械工学科	現場重合型 PA6 を母材とした CFRP テープの機械的特性向上に関する研究	M & M 材料力学カンファレンス 2021 (日本機械学会)	2021/09/15
175	藤村春孝	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	X 線小角散乱を用いた非連続繊維強化 CFRTP の繊維配向の定量化と力学特性予測	M & M 材料力学カンファレンス 2021 (日本機械学会)	2021/09/15
176	正木達也	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	熱可塑 CFRP/アルミ合金の超音波溶着接合における最適条件探索	M & M 材料力学カンファレンス 2021 (日本機械学会)	2021/09/15
177	山邊亮太	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	X 線回折画像による炭素繊維強化 PA6 内の繊維配向分布の推定	M & M 材料力学カンファレンス 2021 (日本機械学会)	2021/09/15
178	山中淳彦	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	CFRTP の分析技術の構築	第 342 回塑性加工シンポジウム(日本塑性加工学会) Web 開催	2021/09/30
179	木本幸胤	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	熱可塑性樹脂 CFRP の構造材料への応用について	名古屋プラスチック工業展 出展者プレゼンテーション	2021/09/30
180	藤村春孝	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	タルボ・ロー干渉計を用いた非連続 CFRTP の広域繊維配向解析	第 46 回複合材料シンポジウム (日本複合材料学会)	2021/10/23
181	山科拓海	日本大学生産工学部機械工学科	N-LINE REMOVAL METHOD OF UNREACTED MONOMER FROM CFRTP USING IN-SITU POLYMERIZED PA6	17th JAPAN INTERNATIONAL SAMPE SYMPOSIUM AND EXHIBITION	2021/12/01
182	山科拓海	日本大学生産工学部機械工学科	現場重合型 PA6 を母材とした CFRTP テープの連続成形法	日本大学生産工学部 第 54 回学術講演会	2021/12/11

183	荒井政大	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター（NCC）の活動紹介	コンポジットハイウェイコンソーシアム広域連携セミナー	2022/01/25
184	山邊亮太	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	非連続炭素繊維強化複合材料の繊維長および配向分布に基づく引張弾性率の評価	第13回日本複合材料会議（JCCM-13）	2022/03/07
185	藤村春孝	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	ターボ・ロー干渉計を用いた非連続CFRTPの力学特性予測	第13回日本複合材料会議（JCCM-13）	2022/03/07
186	正木達也	名古屋大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻	非連続CFRTPとアルミ合金A5052の超音波溶着法による直接接合	第13回日本複合材料会議（JCCM-13）	2022/03/07
187	石川隆司	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	CFRPの各産業分野への適用の現状	2022 中部パック	2022/04/21
188	山中淳彦	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター	炭素繊維強化熱可塑樹脂系複合材料の最近の成形技術、物性及び分析技術	プラスチック技術協会	2021/06/09

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	ナショナルコンポジットセンター	名古屋大学に設置されるナショナルコンポジットセンターの概要と使命	会誌 強化プラスチック 8月号	2013/08/23
2	ナショナルコンポジットセンター	CFRTP シャーシ部品 NCC が今期内試作	化学工業日報	2014/04/24
3	ナショナルコンポジットセンター	四大工業地帯は今	日経産業新聞	2014/05/05
4	ナショナルコンポジットセンター	LFT-D 手法で CFRTP 成形 量産化向けシャーシに的	化学工業日報	2014/05/09
5	ナショナルコンポジットセンター	次代への種まき-目立つ産学連携-	日本経済新聞	2014/06/30

6	ナショナルコンポジットセンター	炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の次世代自動車への適用の展望	自動車技術協会会誌	2014/07
7	ナショナルコンポジットセンター	自動車軽量化→コアテクノロジー	日刊工業新聞	2014/08/18
8	ナショナルコンポジットセンター	CFRPの自動車構造への適用のためにNCCで実施している研究開発の概要	月刊誌「素形材」	2014/08
9	ナショナルコンポジットセンター	炭素繊維強化プラスチック(CFRP)の次世代自動車への適用の展望	自動車技術会誌	2014/11/10
10	ナショナルコンポジットセンター	熱可塑性 CFRP 製自動車部品の開発に向けた課題と取り組み	石油化学新報	2014/11/21
11	ナショナルコンポジットセンター	PRESS e 36 号	名古屋大学工学研究科情報誌	2014/12/15
12	ナショナルコンポジットセンター	技術 100 選	日経産業新聞	2015/02/02
13	ナショナルコンポジットセンター	東海地域の大学におけるイノベーション創出拠点	中部経済産業局	2015/03
14	ナショナルコンポジットセンター	名古屋大学の CFRTP 成形法	「日経 Automotive」 2016年4月号	2016/03/11
15	ナショナルコンポジットセンター	NCC 紹介	「イノベーション創出拠点」(平成 28 年 3 月中部経済産業局発行)	2016/03/18
16	ナショナルコンポジットセンター	複合材料の最新動向と自動車を中心とした用途展開	月刊プラスチック 7 月号	2016/07/01
17	ナショナルコンポジットセンター	炭素繊維、ゆくゆくは半値に生産コスト減へ技術革新	日経電子版	2016/07/07
18	ナショナルコンポジットセンター	共和工業株式会社 紹介動画	共和工業会社紹介動画	2016/07/11
19	ナショナルコンポジットセンター	炭素繊維強化プラスチック材料の広がる可能性	日刊工業新聞「工業材料」8月号	2016/08/01
20	ナショナルコンポジットセンター	名古屋大学 NCC で実施している熱可塑性 CFRP,特に LFT-D 技術応用部材の自動車構造への適用プロジェクトの紹介	強化プラスチック 2017年8月号	2017/08
21	ナショナルコンポジットセンター	世界初のシャシー開発 名古屋大学 CFRP で軽量化	電気新聞	2017/10/19
22	ナショナルコンポジットセンター	熱可塑性の CFRP 利用、自動車用シャシー製作技術確立	日刊工業新聞	2017/10/20
23	ナショナルコンポジットセンター	成型しやすいシャシーNEDO・名大熱可塑性樹脂で	日経産業新聞	2017/10/20
24	ナショナルコンポジットセンター	超音波で短時間溶着 アルミ並みコストで	化学工業日報	2017/10/23
25	ナショナルコンポジットセンター	名古屋大学ナショナルコンポジットセンター 世界初、熱可塑性 CFRP 製シャシー量産技術 鉄製より 4 割軽量化タクトタイム 1 分	日刊自動車新聞	2017/10/25
26	ナショナルコンポジットセンター	～10-9INNOVATION の最先端～「熱可塑性 CFRP による自動車軽量化への挑戦～構造部材の軽量化・低コスト化を実現する LFT-D 技術～	Nanotech Japan Bulletin	2017/10/31

27	ナショナルコンポジットセンター	軽くて強いシャシーの新技術	メ〜テレ UP!	2017/10/16
28	ナショナルコンポジットセンター	“炭素繊維強化プラスチック”の新加工技術開発	NHK おはよう東海	2017/10/23
29	ナショナルコンポジットセンター	鉄が減り、熱可塑性 CFRP 台頭	日経 Automotive 2018 年 2 月号	2018/02/11
30	ナショナルコンポジットセンター	熱可塑 CFRP の可能性	MotorFan Illustrated Vol.138 3 月 15 日号	2018/03/15
31	ナショナルコンポジットセンター	ロックインサーモグラフィを用いた炭素繊維複合材料の配向同定法の提案	検査技術 5 月号	2018/05/01
32	ナショナルコンポジットセンター	軽量化材料の“本命”、CFRP 軽いうえに「クール」な印象も付与	日経ものづくり 5 月号	2018/05/01
33	ナショナルコンポジットセンター	LFT-D 工法進化	化学工業日報社	2018/07/12
34	ナショナルコンポジットセンター	自動車軽量化、低燃費化技術生み出す	化学工業日報社	2018/07/17
35	ナショナルコンポジットセンター	国プロにおける CFRP の開発	金属 2018 年 12 月号	2018/12/01
36	ナショナルコンポジットセンター	月刊機能材料 2019 年 1 月号	月刊機能材料 2019 年 1 月号	2019/01/05
37	ナショナルコンポジットセンター	マルチマテリアル化の進展とその溶接・接合技術	溶接ニュース	2019/03/19
38	ナショナルコンポジットセンター	熱可塑性 CFRP による自動車軽量化への挑戦	自動車技術会誌 6 月号自動車技術 vol.73	2019/06/01
39	ナショナルコンポジットセンター	自動車材料としての CFRP・CFRTP —普及への課題と技術開発の方向：名古屋大学 NCC の経験から—	月刊 MATERIAL STAGE 2019 年 11 月号	2019/11/10
40	ナショナルコンポジットセンター	名古屋大学 NCC で実施している熱可塑性 CFRP(LFT-D)を自動車構造の適用する技術の研究開発のその後の発展	強化プラスチック 10 月号	2021/10/01
41	ナショナルコンポジットセンター	For Future 先端技術	日刊工業新聞	2022/06/27

### (c)プレス発表

番号	所属	タイトル	発表形式	発表年月
1	ナショナルコンポジットセンター	“ものづくり”最前線	伊勢志摩サミット配布パンフレット等	2016/05/26
2	ナショナルコンポジットセンター	熱可塑性 CFRP を用いた自動車用シャシーの製作に世界で初めて成功—自動車の体軽量化を低コストで実現へ—	記者会見	2017/10/16

## (d)その他

番号	所属・著者等	タイトル	形式、媒体等	発表年月
1	ナショナルコンポジットセンター	日本材料学会	施設見学	2013/07/12
2	ナショナルコンポジットセンター	日本材料学会東海支部	施設見学	2013/08/05
3	ナショナルコンポジットセンター	炭素繊維複合材料応用技術研究会	施設見学	2013/10/21
4	ナショナルコンポジットセンター	JISSE-13	施設見学	2013/11/13
5	ナショナルコンポジットセンター	名古屋商工会議所	施設見学	2013/11/14
6	ナショナルコンポジットセンター	航空宇宙プログラム	施設見学	2013/12/13
7	ナショナルコンポジットセンター	日本ファインセラミックス協会	施設見学	2014/03/05
8	ナショナルコンポジットセンター	欧州技術動向調査	情報収集,現地視察	2014/03/10~19
9	ナショナルコンポジットセンター	名古屋商工会議所	施設見学	2014/09/01
10	ナショナルコンポジットセンター	日本機械学会東海支部	施設見学	2014/11/26
11	ナショナルコンポジットセンター	欧州技術動向調査	情報収集,現地視察	2015/03/09~18
12	ナショナルコンポジットセンター	NCC 次世代複合材研究会プレゼン会及び島津製作所見学会	企業プレゼン	2016/01/25
13	ナショナルコンポジットセンター	「K2016 国際プラスチック・ゴム産業展」視察	情報収集,現地視察	2016/10/21~28
14	ナショナルコンポジットセンター	JAXA 調布航空宇宙センター講演&見学会	講演, 見学会	2016/11/21
15	ナショナルコンポジットセンター	欧州技術動向調査	情報収集,現地視察	2017/03/12~19
16	ナショナルコンポジットセンター	「浜松工業技術支援センター&ヤマハ天竜工場」見学会及び講演会	講演, 見学会	2017/09/26
17	ナショナルコンポジットセンター	ぎふ技術革新センター	施設見学	2017/10/02
18	ナショナルコンポジットセンター	欧州技術動向調査	情報収集,現地視察	2018/03/04~11
19	ナショナルコンポジットセンター	日本機械学会東海支部	施設見学	2018/03/13
20	ナショナルコンポジットセンター	複合材料界面科学研究会	施設見学	2018/07/20
21	ナショナルコンポジットセンター	「日本製鋼所&広島県立総合技術研究所 西部工業技術センター」見学会	講演, 見学会	2018/10/05
22	ナショナルコンポジットセンター	欧州技術動向調査	情報収集	2019/03/10~17

23	ナショナルコンポジットセンター	福井県工業技術センター&株式会社 SHINDO 見学会	講演, 見学会	2019/10/03
24	ナショナルコンポジットセンター	K2019、デルフト工科大学、DLR 視察	情報収集, 現地視察	2019/10/13~20
25	ナショナルコンポジットセンター	「東レ・カーボンマジック株式会社」見学会	講演・見学会	2021/03/17
26	ナショナルコンポジットセンター	「株式会社アドウェルズ&日本タングステン株式会社」見学会	見学会	2022/11/18

#### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	ナショナルコンポジットセンター	TECH Biz EXPO 2013 - 次世代ものづくり基盤技術産業展	パネル, カタログ	2013/10/09~11
2	ナショナルコンポジットセンター	IPF JAPAN 2014	成形品, パネル, カタログ	2014/10/24~28
3	ナショナルコンポジットセンター	JEC EUROPE2015	成形品, パネル, カタログ	2015/03/10~12
4	ナショナルコンポジットセンター	2015 名古屋プラスチック工業展	LFT-D フロアパネル展示	2015/10/07~10
5	ナショナルコンポジットセンター	SAMPE (先端材料技術展)	フロアパネル、サイドシル展示	2015/12/02~04
6	ナショナルコンポジットセンター	コンポジットコンベンション	パネル展示	2015/12/10~11
7	NEDO の一部(名大NCC)	Nano Tech 2016	ハット型成形体展示	2016/01/27~29
8	ナショナルコンポジットセンター	イノベーション・ジャパン 2016~大学見本市&ビジネスマッチング~	展示	2016/08/25~26
9	ナショナルコンポジットセンター	コンポジットハイウェイ コンベンション 2016	展示	2016/10/11~12
10	ナショナルコンポジットセンター	次世代ものづくり基盤技術産業展 TECH Biz EXPO 2016	展示、セミナー開催	2016/11/16~18
11	ナショナルコンポジットセンター	第9回オートモーティブワールド	展示	2017/01/18~20
12	ナショナルコンポジットセンター	プラスチック成型加工学会 第28回年次大会	展示	2017/06/14~15
13	ナショナルコンポジットセンター	第9回国際プラスチックフェア(IPF Japan 2017)	展示	2017/10/24~28
14	ナショナルコンポジットセンター	第7回次世代ものづくり基盤技術産業展(TEC2017H Biz EXPO)	展示	2017/11/15~17
15	ナショナルコンポジットセンター	SAMPE JAPAN 先端材料技術展 2017 (第15回 SAMPE 先端材料技術国際会議・展示会)	展示	2017/11/29 ~ 12/01
16	ナショナルコンポジットセンター	第10回オートモーティブワールド	展示	2018/01/17~19



17	ナショナルコンポジットセンター	第 17 回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議(nano tech 2018)	展示	2018/02/14～16
18	ナショナルコンポジットセンター	第 12 回計量計測総合展	展示	2018/06/27～29
19	ナショナルコンポジットセンター	イノベーション・ジャパン 2018	展示	2018/08/30～31
20	ナショナルコンポジットセンター	SAMPE JAPAN 先端材料技術展 2018	展示	2018/10/17～19
21	ナショナルコンポジットセンター	1st NONMETALLIC SYMPOSIUM 2018 TOKYO	展示	2018/10/30～31
22	ナショナルコンポジットセンター	2018 名古屋プラスチック工業展	展示	2018/10/31～11/02
23	ナショナルコンポジットセンター	第 11 回オートモーティブワールド	展示	2019/01/16～18
24	ナショナルコンポジットセンター	第 8 回次世代ものづくり基盤技術産業展(TECH Biz EXPO 2019)	展示	2019/02/06～07
25	ナショナルコンポジットセンター	第 3 回ファインケミカルジャパン	展示	2019/03/18～20
26	ナショナルコンポジットセンター	ネクスト・イノベーション・テクノロジーフェア 2019	展示	2019/03/19～20
27	ナショナルコンポジットセンター	SAMPE JAPAN 先端材料技術展 2019	展示	2019/09/04～06
28	ナショナルコンポジットセンター	N+ (エヌプラス) 展 2019	展示	2019/09/11～13
29	ナショナルコンポジットセンター	第 12 回オートモーティブワールド	展示	2020/01/15～17
30	ナショナルコンポジットセンター	nano tech 2020	展示	2020/01/29～31
31	ナショナルコンポジットセンター	第 9 回次世代ものづくり基盤技術産業展(TECH Biz EXPO 2020)	展示	2020/02/05～06
32	ナショナルコンポジットセンター	SAMPE JAPAN 先端材料技術展 2020 ON LINE	展示	2020/10/14 ～11/13 (オンライン)
33	ナショナルコンポジットセンター	N+ (エヌプラス) 展 2020	展示	2020/11/04～06
34	ナショナルコンポジットセンター	IPF Japan 2020 Virtual	展示	2020/11/18～20 (オンライン)
35	ナショナルコンポジットセンター	第 13 回オートモーティブワールド	展示	2021/01/20～22
36	ナショナルコンポジットセンター	TECH Biz EXPO 2021	WEB 企業紹介のみ	2021/02/24 ～07/31
37	ナショナルコンポジットセンター	第 4 回ファインケミカルジャパン	展示	2021/04/14～16
38	ナショナルコンポジットセンター	名古屋プラスチック工業展 2021	展示	2021/09/29 ～10/01

39	ナショナルコンポジットセンター	INNOVATIVE MATERIAL MEETINGS NAGOYA	展示	2021/10/12～14
40	ナショナルコンポジットセンター	SAMPE Japan 先端技術材料展 2021	展示	2021/12/01～03
41	ナショナルコンポジットセンター	第14回オートモーティブワールド	展示	2022/01/19～21
42	ナショナルコンポジットセンター	TECH Biz EXPO 2022	展示	2022/02/09～10
43	ナショナルコンポジットセンター	ファインケミカルジャパン 2022	展示	2022/04/20～22
44	ナショナルコンポジットセンター	中部パック	展示	2022/04/20～23
45	ナショナルコンポジットセンター	SAMPE Japan 先端技術材料展 2022	展示	2022/10/19～21
46	ナショナルコンポジットセンター	第15回オートモーティブワールド	展示	2023/01/25～27
47	ナショナルコンポジットセンター	nano tech 2023	展示	2023/02/01～03
48	ナショナルコンポジットセンター	TECH Biz EXPO 2023	展示	2023/02/08～09

### 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	ナショナルコンポジットセンター	nano tech2017	nano tech 大賞プロジェクト賞 (グリーンテクノロジー部門)	2017/02/17

### 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	ナショナルコンポジットセンター	NCC 次世代複合材研究会プレゼン会及び名刺交換会	企業プレゼン	2013/09/19
2	ナショナルコンポジットセンター	次世代産業高度化セミナー	講演	2013/11/14
3	ナショナルコンポジットセンター	英国 NCC セミナー	講演	2014/03/24
4	ナショナルコンポジットセンター	NCC 次世代複合材研究会プレゼン会及び名刺交換会	企業プレゼン	2014/06/26
5	ナショナルコンポジットセンター	東海北陸連携キックオフイベント	講演,ブース展示	2014/11/12
6	ナショナルコンポジットセンター	東海北陸連携キックオフイベント付帯プレゼンテーション会	企業プレゼン	2014/11/13
7	名古屋大学	革新的新構造材料等研究開発「平成26年度成果報告会」	ポスター	2015/01/20

8	ナショナルコンポジットセンター	NCC 研究会プレゼン会及び見学会	企業プレゼン	2015/06/16
9	ナショナルコンポジットセンター	NCC 研究会特許庁講演及び見学会	講演	2015/07/11
10	ナショナルコンポジットセンター	中経連北経連に向けての NCC 紹介	講演	2015/09/08
11	ナショナルコンポジットセンター	東海北陸コンポジットハイウェイコンソーシアムにおける NCC 紹介セミナー	企業プレゼン	2015/12/10
12	名古屋大学	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	ポスター	2016/1/22
13	ナショナルコンポジットセンター	NCC 次世代複合材研究会プレゼン会及び NCC 見学会	企業プレゼン,見学会	2016/06/09
14	名古屋大学	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	ポスター、発表	2017/1/20
15	名古屋大学	3 府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
16	ナショナルコンポジットセンター	NCC 次世代複合材研究会プレゼン会及び NCC 見学会	企業プレゼン	2017/06/22
17	ナショナルコンポジットセンター	コンポジットハイウェイコンベンション 2017	講演	2017/11/29~30
18	名古屋大学	革新的新構造材料等研究開発 「平成 29 年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26
19	ナショナルコンポジットセンター	NCC 次世代複合材研究会プレゼン会及び NCC 見学会	企業プレゼン	2018/06/13
20	ナショナルコンポジットセンター	NCC 次世代複合材研究会プレゼン会及び名大研究施設見学会	企業プレゼン	2018/09/21
21	名古屋大学	革新的新構造材料等研究開発 「平成 30 年度成果報告会」	ポスター	2019/1/21
22	ナショナルコンポジットセンター	EFFICOMP ワークショップ	講演	2019/03/20
23	ナショナルコンポジットセンター	NCC 次世代複合材研究会プレゼン会及び NCC 見学会	企業プレゼン	2019/06/12
24	ナショナルコンポジットセンター	CFRP における最新技術動向セミナー	講演	2020/02/19
25	名古屋大学 J F C C	革新的新構造材料等研究開発 「2019 年度成果報告会」	(ポスター、発表)	2020/2/28 (中止)
26	ナショナルコンポジットセンター	NCC 次世代複合材研究会プレゼン会	講演、見学会	2020/07/20
27	ナショナルコンポジットセンター	学び直し講座シリーズ「複合材料の基礎」	講演	2020/10/01

28	ナショナルコンポジットセンター	コンポジットハイウェイコンベンション（オンライン）	講演，企業プレゼン	2020/12/22
29	ナショナルコンポジットセンター	第2回 CFRP における最新技術動向セミナー	講演	2021/03/09
30	名古屋大学 J F C C	革新的新構造材料等研究開発 「2020年度成果報告会」	（ポスター）、発表	2021/7/1
31	ナショナルコンポジットセンター	NCC 次世代複合材研究会プレゼン会	企業プレゼン	2021/07/08
32	名古屋大学	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム t 統合型材料開発システムによるマテリアル革命 (JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点 (ESISM) ・新構造材料技術研究組合 (ISMA)	発表	2021/9/22
33	ナショナルコンポジットセンター	第2回学び直し講座シリーズ「複合材料の基礎」	講演	2021/10/26
34	名古屋大学 J F C C	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	（ポスター）、発表	2022/1/31
35	ナショナルコンポジットセンター	第3回 CFRP における最新技術動向セミナー	講演	2022/03/11
36	ナショナルコンポジットセンター	NCC 次世代複合材研究会プレゼン会 及び NCC 見学会	企業プレゼン、見学会	2022/07/21
37	ナショナルコンポジットセンター	第3回学び直し講座シリーズ「複合材料の基礎」	講演	2022/10/06
38	名古屋大学 J F C C	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	（ポスター）、発表	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 27B] リサイクル炭素繊維の評価技術開発 (2019年度～2022年度)

表 添-7.2-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2019FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
2020FY	0	0	0	2	1	3	2	0	0	0	0	1
2021FY	0	0	0	2	0	6	0	0	0	0	0	1
2022FY	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2	0	2
合計	0	0	0	5	1	10	2	0	0	3	0	5

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Chuan Ma, Daniel Sánchez- Rodríguez, 加茂徹	産業技 術総合 研究所	Influence of thermal treatment on the properties of carbon fiber reinforced plastics under various conditions Chuan Ma	Polymer Degradation and Stability, vol.178, pp.109199-1-9	あり	2020/08
2	加茂徹	産業技 術総合 研究所	持続可能な社会における高分子 の使い方 繊維強化プラスチック (FRP)のリサイクル技術の現 状	高分子、vol.69(11), pp.586-590	なし	2020/11
3	杉本慶喜、 今井祐介、 北條正樹、 島本太介、 堀田裕司	産業技 術総合 研究 所、京 都大学	Determination of Carbon Fiber Strength Distribution Using Bundle Fiber Tensile Test: Correction of Measurement System Elongation and Kinetic Friction Between Fibers in the Fiber Bundle.	Journal of Materials Research, vol. 36, pp. 961-969 (2021)	あり	2021/01

4	Chuan Ma, Daniel Sánchez- Rodríguez, 加茂徹	産業技 術総合 研究所	A comprehensive study on the oxidative pyrolysis of epoxy resin from fiber/ epoxy composites: Product characteristics and kinetics	Journal of Hazardous Materials, vol.412, pp.125329-1-9	あり	2021/02
5	榎納好 岐、中里 哲也	産業技 術総合 研究所	Determination of trace elements in polymers using fsLA-ICP-MS with internal standardization by carbon	Journal of Analytical Atomic Spectrometry, vol. 36, pp.1895- 1899	あり	2021/07
6	杉本慶喜	産業技 術総合 研究所	Analysis of the in-plane fiber orientation distribution in carbon fiber composites using wide-angle X-ray diffraction	submitted to COMPOS PART A- APPL S	あり	査読中

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	今井祐介	産業技術 総合研究 所	産業技術総合研究所中部セン ターの取組みの紹介	SAMPE JAPAN 先端材 料技術展 2020 オンライン 併催 CFRP 技術動向 セミナー	2020/10
2	今井祐介	産業技術 総合研究 所	産業技術総合研究所中部セン ター 活動報告	コンポジットハイウェ イコンベンション 2020	2020/11
3	杉本慶喜	産業技術 総合研究 所	リサイクル炭素繊維の力学特性 評価技術について	CPC 研究会	2021/01
4	杉本慶喜	産業技術 総合研究 所、京都 大学	炭素繊維束の引張試験による 繊維強度分布評価法の開発	2021 年繊維学会年次 大会	2021/06
5	榎納好岐	産業技術 総合研究 所	LA-ICP-MS によるプラスチッ ク中の微量元素分析	質量分析学会 同位 体比部会 2021	2021/11
6	加茂徹	早稲田大 学	Development of a New Technology to Measure the Amount of Residual Carbon on the Surface of Recovered Carbon Fiber	Online International Symposium on Feedstock Recycling of Polymeric Materials (e-ISFR)	2021/11
7	榎納好岐	産業技術 総合研究 所	LA-ICP-MS の応用	レーザーアプレー ション分光分析研究 会 第 8 回レーザー アプレーションワー クショップ	2021/12
8	今井祐介	産業技術 総合研究 所	Development of Evaluation Methods for Recycled Carbon Fibers	Materials Research Meeting 2021	2021/12

9	杉本慶喜	産業技術総合研究所	炭素繊維束を用いた繊維引張弾性率および繊維引張強度分布の評価	第13回日本複合材料会議（JCCM-13）	2022/03
10	今井祐介	産業技術総合研究所	リサイクル炭素繊維や機能性微粒子の評価・制御技術に基づくポリマー複合材料の開発	石川県次世代産業育成講座・新技術セミナー	2022/06

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	産業技術総合研究所、京都大学	炭素繊維の力学特性を簡便に精度よく評価する手法を開発	産業技術総合研究所公式ホームページ 最近の研究成果	2021/03/25
2	産業技術総合研究所、京都大学	再生炭素繊維の力学特性評価法 産総研	化学工業日報、朝刊1面	2021/03/29

### (c)プレス発表

なし

### (d)その他

なし

## 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	産業技術総合研究所	nano tech 2020	NEDO ブース	2020/01/29~31
2	産業技術総合研究所	SAMPE Japan 先端技術材料展 2022	ISMA ブース	2022/10/19~21
3	産業技術総合研究所	nano tech 2023	産総研ブース	2023/02/01~03

## 1.5 受賞

なし

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発「2019年度成果報告会」	(ポスター、講演)	2020/02/28 (中止)
2	産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発「2020年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2021/07/01
3	産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発「2021年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/01/31

4	産業技術総合研究所	ISMA成果発表会@名古屋大学	講演	2022/08/26
5	産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）



[テーマ番号 5 4] 低圧・超高速 CFRP 成形技術の開発 (FS 研究)  
(2018 年度～2019 年度)

[テーマ番号 2 7 C] 超軽量 CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の開発  
(2020 年度～2022 年度)

表 添-7.3-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	国内	外国	PCT 出願	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス 発 表	その 他			
2018FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2019FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2021FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2022FY	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	1	1
合計	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	1	3

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

なし

### 1.3 その他外部発表

#### (a) 学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	中山義文	東レ 複合材料 研究所	超軽量 CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の開発	自動車技術会フォーラム	2022/07/13

#### (b) 新聞・雑誌等への掲載

なし

### (c)プレス発表

番号	所属	タイトル	発表形式	発表年月
1	東レ 複合材料研究所	CFRP 製モビリティ部材の高速一体成形技術の開発	記者会見	2023/02/16

### (d)その他

特になし

### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	東レ 複合材料研究所	第 15 回オートモーティブワールド	部材展示、パネル	2023/01/25～27
2	東レ 複合材料研究所	nano tech 2023	部材展示	2023/02/01～03

### 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	東レ株式会社 本間雅登、土谷敦岐、 平野啓之、中山義文、 松谷浩明、武部佳樹、 今井直吉、竹原大洋、 藤岡聖	超軽量革新複合材料“CFRF”の研究開発	第 35 回先端技術大賞 産経新聞社賞	2022/07/14

### 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	東レ	革新的新構造材料等研究開発 「2020 年度成果報告会」	(ポスター)、発表	2021/7/1
2	東レ	革新的新構造材料等研究開発 「2021 年度成果報告会」	(ポスター)、発表	2022/1/31
3	東レ	革新的新構造材料等研究開発 「2022 年度成果報告会」	(ポスター)、発表	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤技術の開発  
(2014 年度～2017 年度)

表 添-7.4-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	8	0	47	5	0	0	0	1	0
2014FY	0	0	0	8	0	27	8	0	0	3	1	1
2015FY	3	0	0	2	2	37	4	1	0	2	0	1
2016FY	3	0	0	16	2	32	1	1	0	1	0	1
2017FY	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
2018FY	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2019FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022FY	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	12	0	0	34	4	143	18	2	0	6	2	5

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT※	出願日	状態	名 称	発明者
1	(株) 島津製 作所	特願 2015-150209	国内	2015/7/30	登録	X線観察用の曲げ試験機	枝廣 雅美他
2	東レ(株)	特願 2015-254943	国内	2015/12/25	登録	遮音構造体	武部佳樹他
3	東洋紡(株)、 (株) 佐藤鉄 工所、(株) 駿河エンジニ アリング	特願 2015-127933	国内	2015/6/25	登録	パイプ成形とその製造方 法	仲井朝美、大 谷章夫、大石 正樹、半田真 一、大芝一 也、佐野智 和、名合聡、 榎本弘、坂口 圭祐、葭原法

4	(一財) ファインセラミックスセンター	特願 2016-126797	国内	2016/6/27	登録	炭素繊維および炭素繊維の熱処理方法	森匡見他
5	東洋紡(株)	特願 2016-222173	国内	2016/11/15	登録	繊維強化熱可塑性樹脂成形体及びその製造方法	坂口圭祐他
6	住友重機械工業(株)	特願 2017--33493	国内	2017/2/24	登録	繊維強化プラスチック成形品およびその成形方法	筑後 了治
7	住友重機械工業(株)	特願 2017--210175	国内	2017/10/31	登録	プレス装置	山内 啓
8	東洋紡(株)	特願 2018-40295	国内	2018/3/7	公開	繊維強化プラスチックの解析方法	住山琢哉他
9	東洋紡(株)、東レエンジニアリング(株)、スズキ(株)	特願 2018-111722	国内	2018/6/12	公開	粘度特性評価方法	板倉大輔他
10	(株)島津製作所	特願 2018-120175	国内	2018/6/25	公開	圧縮試験治具、材料試験機、および材料試験機における平行度調整方法	村上 岳
11	(株)島津製作所	特願 2018-120176	国内	2018/6/25	登録	変位量測定装置、変位量測定方法および変位量測定プログラム	村上 岳
12	(株)島津製作所	特願 2022-92426	国内	2022/6/7	公開	圧縮試験治具、材料試験機、および材料試験機における平行度調整方法	村上 岳

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	S. Yumitori, Y. Arao, T. Tanaka, K. Naito, K. Tanaka, T. Katayama	物質・材料研究機構	Increasing the interfacial strength in carbon fiber/polypropylene composites by growing CNTs on the fibers	Computational Methods and Experimental Measurements XVI, Vol. 55, pp. 275-284.	有	2013/7
2	K. Naito	物質・材料研究機構	The effect of high-temperature vapor deposition polymerization of polyimide coating on tensile properties of polyacrylonitrile- and pitch-based carbon fibers	Journal of Materials Science, Vol. 48, No. 17, pp. 6056-6064.	有	2013/9
3	山下 慎一郎・大澤 勇・松尾 剛・高橋 淳	東京大学	CF/PP のソフトスキン効果に関する研究	日本複合材料学会誌, Vol.39, No.5, pp.176-183.	有	2013/9
4	大澤 勇・高橋 淳	東京大学	マイクロ・ドロップレット試験と CF/PP 界面のせん断強度評価	強化プラスチック, Vol.59, No.9, pp.330-336.	有	2013/9

5	山下慎一郎・大澤勇・松尾剛・張昕・高橋淳	東京大学	3点曲げ試験による CFRTP の縦弾性率および面外せん断弾性率に関する評価	日本複合材料学会誌, Vol.39, No.6, pp.221-230.	有	2013/11
6	山下慎一郎・大澤勇・高橋淳	東京大学	インパルス電流発生装置を用いた CFRTP の被雷時損傷挙動に関する考察	日本複合材料学会誌, Vol.40, No.1, pp.17-24.	有	2014/1
7	Tsuyoshi Matsuo, Takeshi Goto, Jun Takahashi	東京大学	Investigation about the fracture behavior and strength in a curved section of CF/PP composite by a thin-curved beam specimen	Advanced Composite Materials, DOI: 10.1080/09243046.2014.886754	有	2014/2 (online)
8	H. Sheng, X. Peng, H. Guo, X. Yu, K. Naito, X. Qu, Q. Zhang	NIMS	Synthesis of high performance bisphthalonitrile resins cured with self-catalyzed 4-aminophenoxy phthalonitrile	Thermochimica Acta, Vol. 577, pp. 17-24.	有	2014/2
9	F. Zhao, R. Liu, C. Kang, X. Yu, K. Naito, X. Qu, Q. Zhang	NIMS	A Novel High-Temperature Naphthyl-Based Phthalonitrile Polymer: Synthesis and Properties	RSC Advances 4(16) 8383-8390	有	2014/4/1
10	Y. Wan, T. Matsuo, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Effects of curvature on strength and damage modes of L-shaped carbon fiber reinforced polypropylene	Journal of Reinforced Plastics & Composites, Vol.33, No.14, pp.1305-1315.	有	2014/7
11	Y. Wan and J. Takahashi	東京大学	Deconsolidation behavior of carbon fiber reinforced thermoplastics	Journal of Reinforced Plastics & Composites, Vol.33, No.17, pp.1613-1624.	有	2014/8
12	X. Peng, H. Sheng, H. Guo, K. Naito, X. Yu, H. Ding, X. Qu, Q. Zhang	NIMS	Synthesis and properties of a novel high-temperature diphenyl sulfone-based phthalonitrile polymer	High Performance Polymers 26(7) 837-845	有	2014/11/1
13	K. Naito	NIMS	Tensile Properties and Fracture Behavior of Different Carbon Nanotube-Grafted Polyacrylonitrile-Based Carbon Fibers.	Journal of Materials Engineering and Performance 23(11) 3916-3925	有	2014/11/1
14	H. Guo, H. Sheng, X. Peng, X. Yu, K. Naito, X. Qu, Q. Zhang	NIMS	Preparation and Mechanical Properties of Epoxy/Diamond Nanocomposites	Polymer Composites 35(11) 2144-2149	有	2014/11/1

15	R. Liu, F. Zhao, X. Yu, K. Naito, H. Ding, X. Qu, Q. Zhang	NIMS	Synthesis of Biopolymer-Grafted Nanodiamond by Ring-Opening Polymerization	Diamond and Related Materials 50(11) 26-32	有	2014/11/1
16	H. Lee, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大 学	Effect of plasma surface treatment of recycled carbon fiber on carbon fiber-reinforced plastics (CFRP) interfacial properties	Applied Surface Science, Vol.328, pp.241-246.	有	2015/2
17	R. Liu, F. Zhao, H. Zhang, X. Yu, H. Ding, K. Naito, X. Qu, Q. Zhang	NIMS	Preparation of Polyimide/MWCNT Nanocomposites via Solid State Shearing Pulverization (S3P) Processing.	Journal of Nanoscience and Nanotechnology 15 3780-3785	有	2015/5/1
18	内藤公喜	NIMS	ポリマーコーティングおよびカーボンナノチューブ析出による炭素繊維の表面改質技術,	CFRPの成形・加工・リサイクル技術最前線-生活用具から産業用途まで適用拡大を背景として, 株式会社エヌ・ティー・エス 191-211	有	2015/6/1
19	松尾剛・菅満春・村上岳・住山琢哉・坂口圭祐	東京大学・本田技術研究所・島津製作所・東洋紡	不連続系ランダム配向型熱可塑性 CFRP の非線形挙動を有する面外せん断特性の試験法	第 40 回複合材料シンポジウム		2015/9
20	住山琢哉・松尾剛・菅満春・古市謙次・野々村千里	東洋紡・東京大学・本田技術研究所	不連続系ランダム配向型熱可塑性 CFRP の 3 点曲げ挙動における面外異方性を考慮した非線形有限要素解析	第 7 回日本複合材料会議		2016/3
21	K. Naito	NIMS	Effect of hybrid surface modifications on tensile properties of polyacrylonitrile- and pitch-based carbon fibers	Journal of Materials Engineering and Performance	有	2016/5/1

22	K. Tamura, K. Naito, S. Nakayama, C. Nagai, T. Kitazawa, A. Yamagishi	NIMS	Effect of Maleic Anhydride-Grafted Polypropylene on the Morphological and Mechanical Properties of Clay/Polypropylene Nanocomposites	Clay Science	有	2016/6/1
23	HB. Kim, K. Naito, H. Oguma	NIMS	Fracture toughness of adherends bonded with two-part acrylic-based adhesive: double cantilever beam tests under static loading	Applied Adhesion Science	有	2016/6/1
24	Y. Wan and J. Takahashi	東京大学	Tensile and compressive properties of chopped carbon fiber tapes reinforced thermoplastics with different fiber lengths and molding pressures	Composites Part A Vol.87, pp.271-281	有	2016/08/1
25	和田 匡史・森 匡見・北岡 諭	ファイ ンセラ ミック スセン ター	過熱水蒸気を利用した CFRP からの炭素繊維回収技術と繊維表面改質技術	工業材料 vol.64, No.8, pp.69-73	無	2016/8/1
26	武部 佳樹・平野 啓之・本間 雅登・篠原 光太郎・藤岡 聖	東レ (株)	不連続炭素繊維強化プラスチックによる新規な軽量フォーム材の作製	材料, 65 (8), 555-560 (2016)	有	2016/8
27	S. Yamashita, K. Hashimoto, H. Suganuma and J. Takahashi	東京大学	Experimental characterization of the tensile failure mode of ultra-thin chopped carbon fiber tape-reinforced thermoplastics	Journal of Reinforced Plastics and Composites Vol.35, No.18, pp.1342-1352	有	2016/9/1
28	林 崇寛・小林 貴幸・高橋 淳	東京大学	複合材料の軟 X 線吸収係数に関する検討	日本複合材料学会誌 Vol.42, No.5, pp.169-177	有	2016/9/15

29	松尾剛・菅満春・古川健一・住山琢哉・榎本弘・坂口圭祐	東京大学・本田技術研究所・スズキ・東洋紡	面外損傷有限要素モデルを用いた熱可塑性 CFRP クラッシュボックスの軸圧潰耐衝撃性に関する考察	自動車技術会 2016 秋季大会		2016/10
30	松尾剛	東京大学	高速圧縮成形を実現する熱可塑性 CFRP の損傷メカニズムとその衝撃特性を解明する計測技術	工業材料 Vol.64, No.11, pp.85-89	有	2016/11/1
31	S. Yamashita, Y. Nakashima, J. Takahashi, K. Kawabe and T. Murakami	東京大学	Volume resistivity of ultra-thin chopped carbon fiber tape reinforced thermoplastics	Composites: Part A Vol.90, pp.598-605	有	2016/11/1
32	Y. Wan, I. Straumit, J. Takahashi and S. V. Lomov	東京大学	Micro-CT analysis of internal geometry of chopped carbon fiber tapes reinforced thermoplastics	Composites: Part A Vol.91, pp.211-221	有	2016/12/1
33	Y. Wan and J. Takahashi	東京大学	Tensile properties and aspect ratio simulation of transversely isotropic discontinuous carbon fiber reinforced thermoplastics	Composites Science and Technology Vol.137, pp.167-176	有	2016/12/12
34	中村照美,・内藤公喜,・小熊博幸,・内藤昌信	NIMS	マルチスケール接合技術の開発	金属	有	2017/1/1
35	菅沼啓史・山下慎一郎・大澤勇・高橋淳	東京大学	炭素繊維薄層テープ強化熱可塑性樹脂の引張弾性率評価試験におけるバラツキに関する研究	日本複合材料学会誌 Vol.43, No.1, pp.18-24	有	2017/1/15
36	S. Yamashita, T. Sonehara, J. Takahashi, K. Kawabe and T. Murakami	東京大学	Effect of thin-ply on damage behaviour of continuous and discontinuous carbon fibre reinforced thermoplastics subjected to simulated lightning strike	Composites: Part A Vol.95, pp.132-140	有	2017/1/17



37	松尾剛・菅満春・古川健一・住山琢哉・榎本弘・坂口圭祐	東京大学・本田技術研究所・スズキ・東洋紡	面外損傷有限要素モデルを用いた熱可塑性 CFRP クラッシュボックスの軸圧潰耐衝撃性に関する考察	自動車技術会論文集, Vol.48, No.2	有	2017/3
38	大堀敏郎・李漢哲・大澤勇・高橋淳	東京大学	曲げ荷重を受ける不連続炭素繊維強化熱可塑性樹脂板の最適構造設計	日本複合材料学会誌 Vol.43, No.2, pp.65-73	有	2017/3/15

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	T. Matsuo, K. Takayama, J. Takahashi, S. Nagoh, K. Kiriya and T. Hayashi	東京大学	Design and manufacture of anisotropic hollow beam using thermoplastic composites	19th international conference on composite materials	2013/7
2	K. Shinohara, K. Uzawa, H. Murayama, J. Takahashi and I. Ohsawa	東京大学	Fracture mechanism of mechanically fastened CFRTP	19th international conference on composite materials	2013/7
3	N. Mitsui, K. Kageyama, K. Uzawa, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Influence of material flow in compression molding on mechanical properties of discontinuous CF/PP	19th international conference on composite materials	2013/7
4	Y. Nomura, K. Uzawa, H. Murayama, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Comparison of mechanical properties in welding joint methods of CF/PP	19th international conference on composite materials	2013/7
5	Y. Wan, T. Goto, T. Matsuo, J. Takahashi and I. Ohsawa	東京大学	Investigation about fracture mode and strength in curved section of carbon fiber reinforced polypropylene	19th international conference on composite materials	2013/7
6	Y. Sato, J. Takahashi, T. Matsuo, I. Ohsawa, K. Kiriya and S. Nago	東京大学	Elastic modulus estimation of chopped carbon fiber tape reinforced thermoplastics using the monte carlo simulation	19th international conference on composite materials	2013/7

7	S. Yamashita, I. Ohsawa, A. Morita and J. Takahashi	東京大学	Fracture behavior of carbon fiber reinforced polypropylene under artificial lightning strike	19th international conference on composite materials	2013/7
8	H. Wei, T. Akiyama, H. Lee, M. Yamane, J. Takahashi and I. Ohsawa	東京大学	Recycling of market CFRP/CFRTP waste for mass production application	19th international conference on composite materials	2013/7
9	H. Lee, Y. Ozaki, M. Yamane, J. Takahashi and I. Ohsawa	東京大学	Effect of plasma surface treatment of recycled carbon fiber on the mechanical properties of recycled CFRP	19th international conference on composite materials	2013/7
10	K. Suzuki, I. Ohsawa, J. Takahashi and K. Uzawa	東京大学	Numerical study on ultrasonic welding joint for CFRTP	19th international conference on composite materials	2013/7
11	K. Hasegawa, M. Yamane, K. Suzuki, J. Takahashi and I. Ohsawa	東京大学	Influence of the impregnation rate and compression molding conditions on the mechanical properties of CFRTP	19th international conference on composite materials	2013/7
12	T. Tomioka, K. Uzawa, H. Murayama, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Joint efficiency of multi-point spot ultrasonic welding for CFRTP	19th international conference on composite materials	2013/7
13	H. Nakayama, K. Goto, TH. Nam, S. Yoneyama, S. Arikawa, K. Naito, Y. Shimamura, Y. Inoue	物質・材料研究機構	Development Study of Lightweight Structural Materials using UD Carbon Nanotube Sheet	19th international conference on composite materials	2013/7
14	Y. Tanaka, K. Naito, S. Kishimoto, Y. Kagawa	物質・材料研究機構	Measurement of thermal deformation in CFRP laminate at different scales	19th international conference on composite materials	2013/7
15	K. Naito	物質・材料研究機構	Tensile Properties of PAN- and Pitch-based Hybrid Carbon Fiber Reinforced Epoxy Matrix Composites	19th international conference on composite materials	2013/7
16	高橋淳	東京大学	熱可塑性 CFRP の産業応用への新展開	炭素繊維活用フォーラム	2013/7
17	内藤公喜	物質・材料研究機構	連続炭素繊維の特性と破壊挙動	CFRP(炭素複合材料)の含浸性向上技術セミナー	2013/8

18	内藤公喜	物質・材料研究機構	カーボンナノチューブ複合材料を用いたハイブリッド化と量産化技術の開発	第1回カーボンナノチューブコンポジットワークショップ	2013/8
19	王慶華・岸本哲・田中義久・内藤公喜・香川豊	物質・材料研究機構	Generation of overlap-scanning laser microscope moiré fringes using micro grids for in-situ deformation measurement	日本機械学会 2013 年度年次大会	2013/9
20	K. Naito, Y. Inoue, H. Fukuda	物質・材料研究機構	Tensile properties of carbon nanotubes grafted polyacrylonitrile-based carbon fibers	International Conference on Diamond and Carbon Materials 2013	2013/9
21	N. Hirano, Y. Takebe, A. Tsuchiya, H. Muramatsu	東レ	Design and development of discontinuous carbon fiber-reinforced thermoplastic sheets	COMPOSITES WEEK	2013/9
22	S. Yamashita, I. Ohsawa, T. Matsuo, X. Zhang and J. Takahashi	東京大学	Influence of out-of-plane shear modulus on the estimation of flexural modulus of carbon fiber reinforced thermoplastics	COMPOSITES WEEK	2013/9
23	Y. Wan, T. Goto, T. Matsuo, J. Takahashi and I. Ohsawa	東京大学	L-shaped tensile test for determining the minimum radius of CFRTP structure	COMPOSITES WEEK	2013/9
24	J. Takahashi and T. Ishikawa	東京大学	Current Japanese Activity in CFRTP for Industrial Application	COMPOSITES WEEK	2013/9
25	田中義久・内藤公喜・岸本哲	物質・材料研究機構	積層 CFRP の界面に及ぼす熱膨張異方性の影響	M&M2013 材料力学カンファレンス	2013/10
26	Y. Tanaka, K. Naito, S. Kishimoto	物質・材料研究機構	Thermal deformation inhomogeneity of hierarchical microstructure composite materials	International Symposia on Micro and Nano Technology	2013/10
27	内藤公喜	物質・材料研究機構	カーボンナノチューブ析出炭素繊維とその複合材料の力学および機能特性	第2回先端複合材料研究センターコロキウム	2013/10
28	J. Takahashi and T. Ishikawa	東京大学	Current Japanese Activity in CFRTP for Industrial Application	International Workshop "A New Perspective in Advancement of Composite Materials"	2013/10
29	高橋淳	東京大学	CFRP の新規産業展開と技術開発動向 (熱可塑性 CFRP を中心として)	最先端材料技術調査研究委員会	2013/10
30	鵜澤潔	金沢工業大学	国内外の炭素繊維強化熱可塑性樹脂複合材料の開発動向について	M&M2013 材料力学カンファレンス	2013/10

31	内藤公喜	物質・材料研究機構	炭素繊維とポリイミドの密着性・含浸性と引張特性	CFRP における樹脂と炭素繊維の含浸性向上技術セミナー	2013/11
32	鵜澤潔	金沢工業大学	熱可塑性樹脂複合材料の加工技術の現状と今後の動向	学技術交流財団炭素繊維複合材料応用技術研究会第3回炭素繊維複合材料応用技術研究会	2013/11
33	平野啓之	東レ	CFRP の製法と成形	NEDO 技術フォーラム in 四国	2013/11
34	K. Uzawa	金沢工業大学	Basic study of CFRTP joints for automotive applications	The 13th Euro-Japanese Symposium on Composite Materials	2013/11
35	J. Takahashi and T. Ishikawa	東京大学	Current Japanese Activity in CFRTP for Automotive Application	The 13th Euro-Japanese Symposium on Composite Materials	2013/11
36	J. Takahashi and T. Ishikawa	東京大学	Current Japanese Activity in CFRTP for Mass Production Automotive Application	13th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition	2013/11
37	Y. Wan, J. Takahashi and I. Ohsawa	東京大学	Investigation about the springback effect on short fiber reinforced thermoplastics	13th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition	2013/11
38	S. Yamashita, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Electrical and thermal properties of chopped carbon fiber tape reinforced thermoplastics and carbon fiber mat reinforced thermoplastics	13th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition	2013/11
39	K. Hasegawa, K. Suzuki, J. Takahashi and I. Ohsawa	東京大学	Influence of pre-heating conditions and molding pressure on the mechanical properties of CFRTP	13th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition	2013/11
40	S. Zheng, S. Yamashita, I. Ohsawa, A. Morita and J. Takahashi	東京大学	Galvanic corrosion between CFRTP and metal in corrosive environment	13th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition	2013/11
41	H. Wei, H. LEE, J. Takahashi and I. Ohsawa	東京大学	Mechanical properties of carbon fiber mat reinforced thermoplastics made by carbon paper	13th Japan International SAMPE Symposium & Exhibition	2013/11
42	高橋淳	東京大学	量産車用熱可塑性 CFRP の開発動向	自動車技術会 疲労信頼性部門委員会企画シンポジウム	2013/11
43	H. LEE, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Effect of surface treatment of recycled carbon fiber by using plasma	The 5th conference of Systems Innovation	2013/12
44	S. Yamashita, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Structural integrity of carbon fiber reinforced polypropylene after lightning strike	SAMPE SEICO 14	2014/3

45	H. Wei, T. Akiyama, H. Lee, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Mechanical properties of recycled carbon fibers reinforced thermoplastics made by card web	SAMPE SEICO 14	2014/3
46	Y. Wan and J. Takahashi	東京大学	Thermal deformation caused by residual stress in short fiber reinforced thermoplastics	SAMPE SEICO 14	2014/3
47	J. Takahashi and T. Ishikawa	東京大学	Next challenge in CFRTP for mass production automotive application	SAMPE SEICO 14	2014/3
48	高橋淳	東京大学	量産自動車用熱可塑性CFRPプ ロジェクト（東京大学集中研 究）	日本塑性加工学会 第6 回CFRP成形研究委員会	2014/5
49	T. Hayashi, K. Hasegawa, H. Wataki and J. Takahashi	東京大学	Development of novel heat efficient preheating process for high cycle thermoforming of discontinuous CFRTP	16th European conference on composite materials	2014/6
50	T. Ohori, T. Matsuo, K. Furukawa and J. Takahashi	東京大学	Finite element analysis of CFRTP hollow beam under flexural load for an application to vehicle body structure	16th European conference on composite materials	2014/6
51	W. Nagatsuka, N. Hirano, H. Muramatsu, Y. Takebe, A. Tsuchiya and J. Takahashi	東京大学	Design of carbon fiber mat reinforced thermoplastics by controlling fiber/matrix adhesion and volume fraction of fiber	16th European conference on composite materials	2014/6
52	M. Akamatsu, T. Matsuo, T. Ohori, X. Zhang and J. Takahashi	東京大学	Finite element simulation of the delamination propagation of I- shaped CFRTP specimen	16th European conference on composite materials	2014/6
53	H. Wataki, I. Ohsawa, T. Hayashi, K. Suzuki, K. Hasegawa and J. Takahashi	東京大学	Resin impregnation of CFRTP preform by using ultrasonic wave	16th European conference on composite materials	2014/6
54	Y. Wan and J. Takahashi	東京大学	Fiber length effect on tensile and compressive strength of short fiber reinforced thermoplastics	16th European conference on composite materials	2014/6
55	S. Yamashita, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Experimental and theoretical study about electrical and thermal properties of carbon fiber mat reinforced thermoplastics	16th European conference on composite materials	2014/6

56	H. Wei, T. Akiyama, H. Lee, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Mechanical properties of recycled carbon fiber reinforced thermoplastics made by carbon fiber paper	16th European conference on composite materials	2014/6
57	高橋淳	東京大学	複合材料の未来に向けて	SAMPE Japan 平成26年度第1回技術情報交換会	2014/7
58	内藤公喜	NIMS	NIMSでの複合材料研究について	繊維強化樹脂研究会（第3回）研究会	2014/7/10
59	Y. Tanaka, K. Naito, S. Kishimoto	NIMS	Effect of thermal strain inhomogeneity on fiber/matrix interface debonding for carbon fiber-reinforced polymer matrix composite	ACEM14	2014/8/24
60	K. Naito	NIMS	Shear Properties of Carbon Fiber/Epoxy Composite	16th US-Japan Conference on Composite Materials	2014/9/8
61	高橋淳	東京大学	量産車用熱可塑性CFRP	ファインセラミックスシンポジウム	2014/10
62	Y. Tanaka K. Naito	NIMS	Fatigue damage evolution and degradation of the hybrid CFRP	ACCM9	2014/10/15
63	和田匡史	ファインセラミックスセンター	過熱水蒸気を利用した CFRP のリサイクルー炭素繊維回収と繊維表面改質ー	第15回四セラミックス研究機関合同講演会	2014/10/23
64	北岡論	ファインセラミックスセンター	CFRP からの炭素繊維回収と繊維表面改質	炭素繊維応用技術研究会	2014/10/31
65	Y. Wan and J. Takahashi	東京大学	Investigation of the deconsolidation effect of carbon mat reinforced thermoplastics	9th Asian-Australasian Conference on Composite Materials	2014/10
66	H. Wei, W. Nagatsuka, H. Lee, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Manufacturing process and mechanical properties of recycled carbon fiber card web reinforced thermoplastics	9th Asian-Australasian Conference on Composite Materials	2014/10
67	X. Lyu, J. Takahashi and I. Ohsawa	東京大学	Dynamic measurement of elastic modulus of CFRTP by vibration	9th Asian-Australasian Conference on Composite Materials	2014/10
68	X. Lyu, J. Takahashi and I. Ohsawa	東京大学	Damping capacity of carbon fiber reinforced thermoplastics	11th China-Japan Joint Conference on Composite Materials	2014/10
69	J. Takahashi and T. Ishikawa	東京大学	Recent Japanese Activity in CFRTP for Mass Production Automobile	ITHEC 2014	2014/10
70	和田匡史・河合和彦・林一美・北岡論・平博仁	ファインセラミックスセンター	過熱水蒸気処理による CFRP からの炭素繊維回収と繊維表面改質	明日を拓くモノづくり新技術2014	2014/11/27

71	Y. Tsujimura, H. Nishida, J. Takahashi and I. Ohsawa	東京大学	Ultrasonic Thermal Fusion of Thermoplastic Epoxy Composites	10th SPSJ International Polymer Conference	2014/12
72	山下慎一郎・高 橋淳	東京大学	熱可塑性CFRPによる量産車の 軽量化に関する研究開発	第6回システム創成学 学術講演会	2014/12
73	高橋淳	東京大学	炭素繊維リサイクル	カード機セミナー	2015/1
74	長塚渉・高橋淳	東京大学	炭素繊維強化プラスチックの リサイクル動向～CFRPの自動 車展開のために～	日本産業機械工業会3R リサイクル研究会	2015/2
75	Y. Wan and J. Takahashi	東京大学	Effect of tape lengths and impregnation conditions on mechanical properties of carbon fiber tape reinforced thermoplastics	TEXCOMP-12	2015/5/26
76	Y. Shibata, V. Premalal, Y. Shimamura, K. Goto, T. Ogasawara, K. Naito, G. Yamamoto, Y. Inoue	NIMS	Mechanical and Electrical Characteristics of Highly Aligned CNT/Polymer Composite Materials	The 16th International Conference on the Science and Application	2015/6/29
77	X. Lyu, W. Nagatsuka, Y. Wan and J. Takahashi	東京大学	Determination of strain rate dependent young's modulus of carbon fiber reinforced thermoplastics by static and dynamic tests	23rd Annual International Conference on Composites/NANO Engineering (ICCE-23)	2015/7/12
78	Y. Wan and J. Takahashi	東京大学	Bending and impact properties of randomly orientated discontinuous CFRTP with thin- ply structure	23rd Annual International Conference on Composites/NANO Engineering (ICCE-23)	2015/7/12
79	Y. Tanaka, K. Naito, S. Kishimoto,	NIMS	Deformation Monitoring at Different Scales for Detecting Interface Damage of CFRP by Combining Electron Moire and Digital Image Correlation (DIC) Methods	NIMS Conference 2015	2015/7/14
80	K. Naito, V. Premalal, H. Oguma, Y. Shimamura, Y. Inoue	NIMS	Tensile Properties of Carbon Nanotubes-sheets/Carbon Fibers/Epoxy and Carbon Nanotubes-grafted Carbon Fibers/Epoxy Hybrid Composites	ICCM20	2015/7/19
81	T. Ohori, T. Hayashi and J. Takahashi	東京大学	FEA using design optimization technique for an application of carbon fiber reinforced thermoplastics to automobile body structure	20th International Conference on Composite Materials	2015/7/20

82	H. Piao, W. Nagatsuka, H. Lee, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Influence of preheating conditions on the degradation of carbon fiber reinforced polypropylene	20th International Conference on Composite Materials	2015/7/20
83	H. Wei, H. Lee, W. Nagatsuka, I. Ohsawa, K. Kawabe, T. Murakami, K. Sumitomo and J. Takahashi	東京大学	Systematic comparison between carding and paper-making method for producing discontinuous recycled carbon fiber reinforced thermoplastics	20th International Conference on Composite Materials	2015/7/20
84	H. Suganuma, S. Yamashita, X. Zhang, K. Hashimoto, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Influence of dispersion method to dispersibility and mechanical properties of ultra-thin carbon fiber tape reinforced thermoplastics	20th International Conference on Composite Materials	2015/7/20
85	S. Tang, T. Hayashi, H. Lee, W. Nagatsuka, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Flowability of discontinuous carbon fiber reinforced thermoplastics	20th International Conference on Composite Materials	2015/7/20
86	X. Lyu, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Applicability of a tapping method to non-destructive inspection of carbon fiber reinforced thermoplastics	20th International Conference on Composite Materials	2015/7/20
87	M. Akamatsu, T. Ohori, T. Hayashi and J. Takahashi	東京大学	Investigation of the delamination behavior on carbon fiber tape reinforced thermoplastics	20th International Conference on Composite Materials	2015/7/20
88	Y. Wan, T. Ohori and J. Takahashi	東京大学	Mechanical properties and modeling of discontinuous carbon fiber reinforced thermoplastics	20th International Conference on Composite Materials	2015/7/20
89	W. Nagatsuka, T. Matsuo, F. Yano, K. Furukawa and J. Takahashi	東京大学	Formulation about time- and temperature-dependent flexural modulus of discontinuous carbon fiber mat reinforced thermoplastics	20th International Conference on Composite Materials	2015/7/20
90	T. Hayashi, K. Hasegawa and J. Takahashi	東京大学	Novel preheating method with matrix resin impregnation for stamp forming of CFRTP	20th International Conference on Composite Materials	2015/7/20
91	山下慎一郎・橋本幸治・菅沼啓史・高橋淳・川邊和正・村上哲彦	東京大学	炭素繊維薄層テープ強化熱可塑性樹脂の引張強度における繊維長依存性	第40回複合材料シンポジウム	2015/9/18



92	W. Yi and J. Takahashi	東京大学	Tape length determination of chopped CF tape reinforced thermoplastics based on Mori-Tanaka method	40th Symposium on Japan Society of Composite Materials	2015/9/18
93	X. Lyu, W. Yi, J. Takahashi and W. Nagatsuka	東京大学	Measurement of Temperature Dependence of Flexural Modulus of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics by Dynamic Test	40th Symposium on Japan Society of Composite Materials	2015/9/18
94	布谷勝彦	金沢工業 大学	部分加熱によるFRTP曲げ加工の基礎研究	日本複合材料学会第40回複合材料シンポジウム	2015/9/19
95	Y. Tanaka, K. Naito	NIMS	Measurement of Local Deformation and Strain Distribution for Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite (CFRP) during Thermal Loading by using In-situ FE-SEM Observation	ATEM15	2015/10/4
96	鶴沢潔	金沢工業 大学	産業技術連携推進会議 ナノテクノロジー・材料部会 第53回高分子分科会	産業技術連携推進会議 ナノテクノロジー・材料部会 第53回高分子分科会	2015/10/22
97	J. Takahashi	東京大学	Japanese challenge in carbon fiber composites for mass production automotive application	1st International Symposium on Emerging Functional Materials	2015/11/4
98	H. Piao, W. Nagatsuka, H. Lee, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Influence of preheating condition on thermal oxidative degradation of carbon fiber reinforced polypropylene	1st International Symposium on Emerging Functional Materials	2015/11/4
99	H. Lee, S. Tang, T. Hayashi, J. Takahashi, I. Ohsawa, K. Kawabe and T. Murakami	東京大学	Flow Behavior of the Tapes during Compression Molding of Ultra-thin Chopped Carbon Fiber Tape Reinforced Thermoplastics	1st International Symposium on Emerging Functional Materials	2015/11/4
100	W. Nagatsuka, M. Wada, I. Ohsawa, S. Kitaoka and J. Takahashi	東京大学	Influence of Superheated Steam Treatment Condition on Recycled Carbon Fiber	1st International Symposium on Emerging Functional Materials	2015/11/4
101	田中義久・内藤 公喜	NIMS	Quanta 200 FEG を用いた CFRP の界面変形・ひずみ計測	第 33 回マイクロアナリシス研究懇談会	2015/11/26
102	布谷勝彦	金沢工業 大学	EXPERIMENTAL STUDY OF THE SIMPLE BEND FORMING FOR THE FRTP LAMINATED SHEET	JISSE-14	2015/12/7

103	H. Wataki, T. Hayashi, T. Ohori and J. Takahashi	東京大学	Flexural property of jointed structure made by CFRTP	14th JAPAN international SAMPE symposium and exhibition	2015/12/9
104	H. Lee, S. Tang, T. Ohori, T. Hayashi, Y. Wan, J. Takahashi, I. Ohsawa and K. Kawabe and T. Murakami	東京大学	Applicability of FEM to complex shape parts made by ultra-thin chopped carbon fiber tape reinforced thermoplastics	14th JAPAN international SAMPE symposium and exhibition	2015/12/9
105	S. Yamashita, Y. Nakashima, J. Takahashi, K. Kawabe and T. Murakami	東京大学	Tape length dependence of the electrical conductivity of ultra-thin chopped carbon fiber tape reinforced thermoplastics	14th JAPAN international SAMPE symposium and exhibition	2015/12/9
106	T. Nakamura, Y. Wan, H. Wei, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Investigation of sandwich panel made by CFRTS and CFRTP	14th JAPAN international SAMPE symposium and exhibition	2015/12/9
107	H. Wei, W. Nagatsuka, I. Ohsawa, K. Sumimoto and J. Takahashi	東京大学	The influence of glass fibers on the mechanical properties of carbon fiber paper reinforced thermoplastics made by discontinuous recycled carbon fibers	14th JAPAN international SAMPE symposium and exhibition	2015/12/9
108	H. Wei, H. Lee, W. Nagatsuka, Isamu Ohsawa, K. Kawabe, T. Murakami, Ken Sumimoto and J. Takahashi	東京大学	Comparison of Techniques for High-performance re-use of the Recycled Carbon Fiber	The 7th conference of Systems Innovation	2016/1/20
109	内藤公喜	NIMS	炭素繊維の特徴、強度と樹脂との密着性評価	CFRTP の樹脂含浸・成形加工技術セミナー	2016/1/22
110	和田匡史	フラインセラムックスセンター	高温過熱水蒸気の利用技術	2015年度第5回革新的製品創出サロン	2016/1/28
111	志野亮作・玉井佑・越塚誠一・真木晶・石川健	東京大学、三菱レイヨン	粒子法を用いた異方性高粘度流体モデルによるプリプレグのプレス成形解析	第7回日本複合材料会議(JCCM-7)	2016/3
112	福元駿・志野亮作・越塚誠一・林崇寛・石川健	東京大学、三菱レイヨン	粒子法を用いた炭素繊維強化熱可塑性プラスチックのプレス成形解析のための繊維追跡手法の開発と可視化	第21回計算工学講演会	2016/5
113	内藤公喜	NIMS	炭素繊維の表面改質及び界面特性評価と複合材料特性の向上効果	CFRP 成形における材料設計・含浸性とその制御セミナー	2016/5/16

114	W. Nagatsuka, H. Piao and J. Takahashi	東京大学	A Novel CF/PMP Composite for Ultra-Lightening Application	SAMPE Long Beach 2016	2016/5/26
115	北岡諭	ファイ ンセラ ミック スセン ター	繊維強化複合材料の利用技術 の高度化	次世代自動車産業研究 会（6月度技術者会）	2016/6/17
116	D. Kobayashi, Y. Wan, H. Lee, T. Nakamura, H. Wei, J. Takahashi and I. Ohsawa	東京大学	Flow behavior of complex shaped hybrid CFRTP during compression molding	17th European Conference on Composite Materials	2016/6/27
117	Y. Nakashima, H. Suganuma, S. Yamashita and J. Takahashi	東京大学	Evaluation of flexural modulus of ultra-thin chopped carbon fiber tape reinforced thermoplastics	17th European Conference on Composite Materials	2016/6/27
118	Q. Guo, Z. Li, T. Otori and J. Takahashi	東京大学	Design optimization of CFRP rectangular box subjected to arbitrary loadings	17th European Conference on Composite Materials	2016/6/27
119	X. Lyu, J. Takahashi and Y. Wan	東京大学	Analysis of viscoelastic behaviour of ultra-thin chopped carbon fiber tape reinforced thermoplastics with different tape lengths	17th European Conference on Composite Materials	2016/6/27
120	L. Meng, H. Wataki, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Failure analysis of ultra-thin chopped carbon fiber tape reinforced thermoplastic in mechanical joints,	17th European Conference on Composite Materials	2016/6/27
121	W. Nagatsuka, T. Matsuo, T. Murakami, M. Kan and J. Takahashi	東京大学	Evaluation and verification of temperature dependent out-of-plane shear modulus of discontinuous carbon fiber reinforced thermoplastic composite by modified double notched compression method	17th European Conference on Composite Materials	2016/6/27
122	H. Piao, Y. Kiryu, L. Chen, S. Yamashita, H. Wei, I. Ohsawa and J. Takahashi	東京大学	Influences of water absorption on the mechanical properties of discontinuous CF/PA6 and CF/PP	17th European Conference on Composite Materials	2016/6/27
123	Y. Wan and J. Takahashi	東京大学	CFRTP mechanical properties simulation by Mori-Tanaka model and equivalent laminate methods	17th European Conference on Composite Materials	2016/6/27

124	S. Yamashita, T. Sonehara, J. Takahashi, K. Kawabe and T. Murakami	東京大学	Evaluation of lightning resistance of chopped carbon fiber tape reinforced thermoplastics	17th European Conference on Composite Materials	2016/6/27
125	K. Naito, H. Oguma	NIMS	Lap Shear Strength of Similar GF/PP Adherends Bonded with Two-part Acrylic-based Adhesive	ECCM17	2016/6/30
126	R. Shino, T. Tamai, S. Koshizuka, A. Maki, T. Ishikawa	東京大学、三菱レイヨン	NUMERICAL ANALYSES OF MULTI – LAYERED ANISOTROPIC HIGH VISCOUS FLUID USING A PARTICLE METHOD FOR PRESS MOLDING OF CFRTP	THE 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLOW PROCESSING IN COMPOSITE MATERIALS	2016/7
127	Y. Tanaka, K. Naito, H. Kakisawa	NIMS	Damage evolution in titanium-CFRP hybrid laminates during fatigue and strain measurement at the interface	PRICM9	2016/8/4
128	真木晶・石川健・志野亮作・越塚誠一	三菱レイヨン、東京大学	炭素繊維強化熱可塑性樹脂のプレス成形シミュレーション	第41回複合材料シンポジウム	2016/9
129	高橋淳	東京大学	熱可塑性CFRPへの期待と課題	SAMPE Japan シンポジウム「先端材料が拓く自動車の未来」	2016/9/07
130	植村公彦	金沢工業大学	CFRTPとSTEELの機会接合の継手強度プロセスによる初期検討	第41回複合材料シンポジウム	2016/9/15
131	S. DorMohammadi, M. Lee, M. Repupilli, F. Abdi, Y. Wan, J. Takahashi and H. Huang	東京大学	Multi-Scale Computational Modeling of Short Fiber Reinforced Thermoplastics	American Society for Composites 31st Technical Conference and ASTM Committee D30 Meeting	2016/9/19
132	Y. Wan and J. Takahashi	東京大学	Modeling analysis and evaluation of tensile properties of discontinuous CFRTP using homogenization and de-homogenization methods	CAMX	2016/9/26
133	福元駿・玉井佑・志野亮作・越塚誠一・林崇寛・石川健	東京大学、三菱レイヨン	A Fiber Tracking Analysis Method and its Visualization for Press molding of Carbon fiber Reinforced Thermoplastics using a Particle Method	JSST2016	2016/10
134	H.B. Kim, K. Naito, H. Oguma	NIMS	Fracture Toughness of Composites by DCB Tests: Static and Fatigue Loading	ACCM10	2016/10/16

135	松尾剛・菅満春・古川健一・住山琢哉・榎本弘・坂口圭祐	東京大学	面外損傷有限要素モデルを用いた熱可塑性 CFRP クラッシュボックスの軸圧潰耐衝撃性に関する考察	自動車技術会 2016 秋季大会	2016/10/21
136	森匡見	ファインセラミックスセンター	炭素繊維リサイクル回収技術に対する新たな視点	明日を拓くモノづくり新技術 2016	2016/11/30
137	志野亮作・玉井佑・越塚誠一・真木晶・石川健	東京大学、三菱レイヨン	粒子法を用いた長繊維熱可塑性 UD プリプレグのための異方性高粘度流体解析	第 30 回数値流体力学シンポジウム	2016/12
138	内藤公喜	NIMS	NIMS での接着接合に関わる力学特性評価について	第 2 回接着材料クラスター会議	2017/2/2
139	内藤公喜	NIMS	NIMS での接着研究の取り組み	第 1 回接着強度に関する勉強会	2017/2/3
140	北岡諭	ファインセラミックスセンター	過熱水蒸気を利用した CFRP からの炭素繊維回収と繊維表面改質	平成 28 年度資源循環型ビジネス展開セミナー	2017/2/3
141	高橋淳	東京大学	量産車用熱可塑性 CFRP への期待と課題	第30回複合材料セミナー	2017/2/22
142	Y. Wan and J. Takahashi	東京大学	Meso-structural quantification and visualization of ROS of thermoplastic composites	8th Japan Conference on Composite Materials	2017/03/17
143	平野啓之	東レ(株)	超軽量・高剛性炭素繊維構造材料-CFRF®-	SAMPE コンポジット委員会 第 63 回研究会	2017/3

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	東洋紡(株)	東洋紡が高速成形技術 炭素繊維熱可塑性樹脂を利用 車部材作成、最短 5 分	日刊工業新聞 2013 年 5 月 20 日朝刊 12 面	2013/5/20
2	東京大学	「炭素繊維車」20 年に実現	日本経済新聞(朝刊 1 面)	2013/6/22
3	東京大学	炭素繊維再利用技術開発を支援	日経産業新聞(朝刊 11 面)	2013/7/30
4	金沢工業大学	炭素繊維の新素材開発事業で、海洋インフラ	北国新聞	2013/10/31
5	東京大学	CFRTP でクルマを造る	日経 Automotive Technology	2014/3
6	金沢工業大学	北経フォーカス 炭素繊維の可能性	北国新聞	2014/4/10
7	金沢工業大学	【街明かり】炭素繊維の新素材開発始める～鶴澤潔教授～	北国新聞	2014/4/24

8	金沢工業大学	炭素繊維王国へ本格化 トヨタなどの産学官	YOMIURI ONLINE	2014/5/28
9	金沢工業大学	炭素繊維の研究施設オープン	NHK NEWS WEB	2014/6/9
10	金沢工業大学	鶴澤先生インタビュー 炭素繊維複合材料 (CFRP) 量産化へ照準_鶴澤潔教授	建設工業	2014/6/11
11	金沢工業大学	【社説】北陸の炭素繊維、国の認定を拠点化の弾みに	北國新聞	2015/1/28
12	金沢工業大学	炭素繊維を建設分野へ、マッチングハブ金沢開く～鶴澤潔教授	建設工業	2015/2/24
13	金沢工業大学	パリで複合材展開幕、石川の炭素繊維世界に	北國新聞	2015/3/11
14	金沢工業大学	先端技術で創る 炭素繊維複合材料 [金沢工業大学]	日経	2015/8/21
15	金沢工業大学	炭素繊維強化プラスチック (CFRP) を革新的な構造材料として社会に実装する研究を推進	河合塾「Guideline 11 2015」	2015/11/9
16	金沢工業大学	知の拠点は、いま？金沢工大③炭素繊維 金大抑えて「本命」に	北國新聞	2016/2/4
17	東レ (株)	超軽量と高剛性を両立する炭素繊維構造材料を開発	日刊工業新聞他	2016/3
18	東レ (株)	超軽量化を実現する炭素繊維による革新構造“CFRF”の開発	自動車技術、70 (12)、104-105	2016/12

### (c)プレス発表

番号	所属	タイトル	発表形式	発表年月
1	東レ (株)	超軽量と高剛性を両立する炭素繊維構造材料を開発	記者会見	2016/3
2	ファインセラミックスセンター	航空機、次世代自動車の軽量化に貢献する炭素繊維リサイクル回収技術～廃棄物から高機能の炭素繊維を効率的に回収する方策を提案します～	メディア投げ込み、WEB掲載	2016/6/29

### (d)その他

該当なし

### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	金沢工業大学	Matching HUB Kanazawa 2015	パネル	2015/2/23
2	東大集中研	JEC Europe	ジャパンプース	2015/3/10-12
3	金沢工業大学	Matching HUB Kanazawa 2015 Autumn	パネル	2015/2/23
4	金沢工業大学	SAMPE Japan	パネル	2015/12/3

5	金沢工業大学	東海北陸コンポジットハイウェイ	パネル	2015/12/10
6	東レ（株）	Nanotech2017	パネル	2017/2/15-17

### 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	物質・材料研究機構	The effect of adhesive thickness on tensile and shear strength of polyimide adhesive, ELSEVIER Ltd.	Top 25 Hottest Articles, International Journal of Adhesion and Adhesives January to December 2012 full year	2013/9
2	東京大学・高橋淳		協会特別賞、先端材料技術協会（SAMPE Japan）	2014/7/24

### 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	東レ他	革新的新構造材料等研究開発 「平成26年度成果報告会」	ポスター	2015/1/20
2	東レ	革新的新構造材料等研究開発 「平成27年度成果報告会」	ポスター、発表	2016/1/22
3	東レ	革新的新構造材料等研究開発 「平成28年度成果報告会」	ポスター、発表	2017/1/23
4	東京大学	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点(ESISM) ・新構造材料技術研究組合(ISMA)	ポスター	2017/6/13
5	東レ他	革新的新構造材料等研究開発 「平成29年度成果報告会」	ポスター	2018/1/26

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

研究開発項目⑧「革新炭素繊維基盤技術開発」

[テーマ番号51] 革新炭素繊維基盤技術開発 (2016年度～2020年度)

表 添-8.2-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	6	5	1	0	0	12	0	0	0	0	0	1
2014FY	5	12	3	4	0	15	1	0	0	0	1	2
2015FY	1	11	3	1	0	14	4	23	0	1	0	2
2016FY	1	0	0	3	1	13	3	0	0	0	0	1
2017FY	0	0	0	2	0	4	1	0	0	0	0	2
2018FY	1	0	0	2	0	5	1	0	0	0	0	1
2019FY	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	1
2020FY	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021FY	1	0	1	0	1	2	0	0	0	0	1	1
2022FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
合計	16	28	8	12	2	68	12	23	0	1	2	11

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)  
東大への委託時期を含む

1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT※	出願日	状態	名 称	発明者
1	帝人(株)	特願 2017-71657	国内	2017/03/31	登録	加熱方法及び炭素繊維の製造方法並びに炭素化装置及び炭素繊維の製造装置	中島章成、鈴木慶宜
2	帝人(株)	特願 2019-067867	国内	2019/3/29	公開	加熱装置及び炭素繊維の製造装置	鈴木慶宜、中島章成
3	帝人(株)	特願 2021-104492	国内	2021/06/23	公開	軽量炭素繊維、軽量炭素繊維ストランド、炭素繊維強化複合材料、及びこれらの製造方法、並びにマイクロ波加熱炉	圖子博昭、鈴木慶宜、土岐輝

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)



## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	松尾剛、影山和郎	(国大)東京大学、	熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮破壊メカニズムに関する一考察	日本複合材料学会誌 Vol. 40 No. 3	有	2014/5
2	諸星圭祐、藤田和宏、岩下哲雄	(国研)産業技術総合研究所	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(その3) - 横方向圧壊試験に及ぼす圧子サイズの影響 -	材料試験技術 59 巻 3号 142 頁	有	2014/7
3	松尾剛、影山和郎	(国大)東京大学	熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮強度の温度依存性に関する一考察	日本複合材料学会誌 Vol. 40 No. 5	有	2014/9
4	杉本慶喜、岩下哲雄、影山和郎	(国研)産業技術総合研究所	炭素繊維の単繊維による評価試験(その4) - 軸方向圧縮試験 -	材料試験技術 60 巻 1号 52 頁	有	2015/1
5	Daichi Wada, Jun-ichi Sugiyama, Hiroaki Zushi, Hideaki Murayama	(国大)東京大学	An optical fiber sensing technique for temperature distribution measurements in microwave heating	Measurement Science and Technology, 26(8) (2015)	有	2015/8
6	Yoshiki Sugimoto, Masatoshi Shioya, Kazuro Kageyama	(国大)東京大学、(国大)東京工業大学	Determination of intrinsic strength of carbon fibers	Carbon, Vol 100(2016), pp208-213	有	2016/4
7	Daichi Wada; Jun-ichi Sugiyama; Hiroaki Zushi; Hideaki Murayama	(国研)宇宙航空研究開発機構、(国大)東京大学、(国研)産業技術総合研究所	Temperature distribution monitoring of a coiled flow channel in microwave heating using an optical fiber sensing technique	Sensors & Actuators: B. Chemical, 232 (2016) 434-441	有	2016/9
8	杉山順一、森住真紀、圖子博昭	(国研)産業技術総合研究所、(国大)東京大学	炭素繊維の物性と 2.45GHz 帯に対する電磁波応答	信学技報, MW2016-82, pp47-52, 2016	無	2016/9
9	Tsuyoshi Matsuo, Kazuro Kageyama	(国大)東京大学	Compressive failure mechanism and strength of thermoplastic unidirectional composites based on modified kink band model	Composites Part A, Vol 93 (2017), pp 117-125	有	2017/2
10	Yoshiki Sugimoto, Kazuro Kageyama	(国大)東京大学	Analysis of stress distribution near a blunt surface notch tip in an orthotropic fiber under tension	Theoretical and Applied Fracture Mechanics, vol.89(2017),pp29-34	有	2017/6

11	松尾剛、影山和郎（東京大学）、中田政之（金沢工業大学）	（国大）東京大学、金沢工業大学	Prediction of fiber-directional flexural strength of carbon fiber reinforced polypropylene based on time-temperature superposition principle	Journal of Composite Materials, 52(6), 793-805, 2017.	有	2017/6
12	榊田剛、影山和郎、松尾剛、金井誠	(国大)東京大学	溶融含浸法による一方向プリプレグ加工条件とその炭素繊維強化材の機械特性の関係性について	日本複合材料学会誌, 44(5), 166-172, 2018	有	2018/9
13	杉山順一	(国研)産業技術総合研究所	Electromagnetic Relationship between Microwaves and Flow Reactor Systems	The Chemical Record, 19, 146-156, 2019.	有	2018/10
14	鈴木慶宜、土岐輝、杉山順一、羽鳥浩章	帝人(株)、(国研)産業技術総合研究所	革新炭素繊維基盤技術開発～マイクロ波加熱による炭素繊維の製造技術の開発～	強化プラスチック, 67(11), 474-477, 2021.	無	2021/11
15	杉山順一、鈴木慶宜、土岐輝、圖子博昭、田中玲人、八木皓平、峯岸礼子、羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所、帝人(株)、新構造材料技術研究組合	マイクロ波加熱による炭素繊維の製造と複合材料化の検討	日本電磁波エネルギー応用学会論文誌, 2022年6巻 28-33	有	2022/12

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所	溶媒可溶性芳香族高分子を出発物質とする炭素繊維の製造	平成 25 年度繊維学会年次大会	2013/6
2	藤田和宏 小島実希子 岩下哲雄	(国研)産業技術総合研究所	炭素繊維の単繊維による特性評価試験（その 2）－ねじり試験－	第 256 回材料試験技術シンポジウム	2013/7/31
3	入澤寿平、曾根田靖、児玉昌也、羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所	CARBONIZATION BEHAVIOR OF FIBERS FROM SOLVENT-SOLUBLE AROMATIC POLYMERS	The Annual World Conference on Carbon, Carbon2013	2013/7/15
4	羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所	新規前駆体高分子を原料とする炭素繊維の製造	第 44 回繊維学会夏季セミナー	2013/8/9

5	岩下哲雄、諸星圭祐、永井英幹、藤田和宏	(国研)産業技術総合研究所	Temperature dependence of emissivity and electrical resistivity of carbon fiber	日本鉄鋼協会第166回秋季講演大会	2013/9/6
6	K. Higuchi, H. Watanabe, N. Yamada, N. Iwashita	(国研)産業技術総合研究所	Temperature dependence of emissivity and electrical resistivity of carbon fiber	日本鉄鋼協会第166回秋季講演大会	2013/9/18
7	K. Higuchi, H. Watanabe, N. Yamada, N. Iwashita	(国研)産業技術総合研究所	Emissivity and Electrical Resistivity Measurements of Carbon Fiber	The 10th Asian Thermophysical Properties Conference	2013/10/2
8	羽鳥浩章、入澤寿平、曾根田靖、吉澤徳子、児玉昌也	(国研)産業技術総合研究所	芳香族高分子を前駆体とする炭素繊維の製造	日本学術振興会産学協力研究員会 炭素材料第117委員会第308回委員会	2013/11
9	諸星圭祐、岩下哲雄	(国研)産業技術総合研究所	炭素繊維の横方向圧縮特性	日本学術振興会 第117委員会	2013/11/15
10	入澤寿平、杉本慶喜、曾根田靖、児玉昌也、羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所	溶媒可溶性芳香族高分子繊維前駆体炭素繊維の構造と引張特性	第40回炭素材料学会年会	2013/12/3
11	諸星圭祐、岩下哲雄	(国研)産業技術総合研究所	炭素繊維の横方向圧縮特性の評価手法の開発	第40回炭素材料学会年会	2013/12/5
12	羽鳥浩章、曾根田靖、吉澤徳子、児玉昌也	(国研)産業技術総合研究所	人とエネルギーの未来を支える軽量構造材料－革新炭素繊維－	エネルギー技術シンポジウム2013	2013/12/6
13	羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所	Carbon Fibers from Aromatic Polymer Precursors	招待講演 Carbon2014	2014/6/30
14	諸星圭祐、藤田和宏、岩下哲雄	(国研)産業技術総合研究所	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(その3)－横方向圧壊試験に及ぼす圧子サイズの影響－	第260回材料試験技術シンポジウム	2014/7/25
15	樋口健介、渡辺博道、山田修史、岩下哲雄	(国研)産業技術総合研究所	Development of Thermal Expansion Measurement System for Carbon Fib	The 20th European Conference on Thermophysical Properties	2014/8/30
16	永井英幹、諸星圭祐、藤田和宏、岩下哲雄	(国研)産業技術総合研究所	炭素繊維単繊維横方向圧縮試験のFEM解析	計測フロンティア研究部門第11回シンポジウム	2014/9/5
17	金井誠、和田大地、大沢勇、影山和郎、圖子博昭、鈴木貴也	(国大)東京大学	ピンホール治具を用いた単繊維の引き抜き試験法の開発	第39回複合材料シンポジウム	2014/9/18
18	杉本慶喜、入澤寿平、岩下哲雄、影山和郎	(国大)東京大学、(国研)産業技術総合研究所	Assessment of axial compression property of single carbon fiber	ISF2014	2014/9/29

19	富田奈緒子 杉本慶喜、曾根 田靖、吉澤徳 子、児玉昌也、 羽鳥浩章	(国研)産業 技術総合研 究所	芳香族高分子繊維を前駆体とす る炭素繊維の力学特性と構造	第 41 回炭素材料学会年会	2014/12/9
20	佐藤 (帝人株式 会社) (連名者) 齋藤、鈴木、圖 子、村山	東京大学 (帝人)	ポリアクリロニトリル繊維の熱 処理過程における SAXS/WAXD その場解析 (2)	第 4 回 FSBL 成果報告会	2015/1/9
21	諸星圭祐、岩下 哲雄、藤田和宏	(国研)産業 技術総合研 究所	炭素繊維の単繊維による特性評 価試験 (その10) - 三点曲げ試験 -	第 6 回日本複合材料会議 (JCCM-6)	2015/3/5
22	杉本慶喜、藤田 和宏、岩下哲 雄、塩谷正俊、 影山和郎	(国大)東京 大学、(国 研)産業技 術総合研究 所	炭素繊維の単繊維による特性評 価試験(その 11)-炭素繊維の 到達可能強度の評価-	第 6 回日本複合材料会議 (JCCM-6)	2015/3/5
23	藤田和宏、岩下 哲雄	(国研)産業 技術総合研 究所	炭素繊維の単繊維による特性評 価試験 (その12) -ねじり弾性率に及ぼす直径計 測の影響-	第 6 回日本複合材料会議 (JCCM-6)	2015/3/5
24	永井英幹、藤田 和宏、岩下哲雄	(国研)産業 技術総合研 究所	炭素繊維の単繊維による特性評 価試験 (その13) -横方向圧縮による断面の弾塑 性変形-	第 6 回日本複合材料会議 (JCCM-6)	2015/3/5
25	渡辺博道、樋口 健介、岩下哲 雄、山田修史	(国研)産業 技術総合研 究所	炭素繊維の単繊維による特性評 価試験 (その14) -炭素繊維の熱膨張係数の温度 依存性-	第 6 回日本複合材料会議 (JCCM-6)	2015/3/5
26	松尾剛、影山和 郎	(国大)東京 大学	熱可塑性 CFRP のための繊維方 向曲げ試験法の提案と曲げ強度 に関する一考察	第 6 回日本複合材料会議 (JCCM-6)	2015/3/6
27	蜂谷有希子、藤 田和宏、岩下哲 雄、影山和郎	(国大)東京 大学、(国 研)産業技 術総合研究 所	マイクロコンポジット法による ポリプロピレン-CF 界面接着性 の評価	第 6 回日本複合材料会議 (JCCM-6)	2015/3/6
28	岩下哲雄、藤田 和宏	(国研)産業 技術総合研 究所	炭素繊維の単繊維による異方性 の評価試験	日本学術振興会 産学連携 第 117 委員会、第 313 回 委員会	2015/4/10
29	岩下哲雄、杉本 慶喜、藤田和宏	(国研)産業 技術総合研 究所、(国 大)東京大 学、	Monofilament mechanical test for anisotropic properties of carbon fiber	Carbon2015(German Carbon Group (AKK))	2015/7/15

30	富田奈緒子、杉本慶喜、曾根田靖、吉澤徳子、児玉昌也、羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所、(国大)東京大学	Structure and mechanical characteristics of carbon fibers from aromatic polymer precursors	Carbon2015(German Carbon Group (AKK))	2015/7/15
31	松尾剛、影山和郎	(国大)東京大学	Investigation about temperature dependence of unidirectional compressive strength of carbon fiber reinforced thermoplastic composites	20th International Conference on Composite Materials	2015/7/22
32	藤田和宏、岩下哲雄	(国研)産業技術総合研究所	炭素繊維ねじり弾性率に及ぼす外径計測の影響	産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門 第1回シンポジウム	2015/9/4
33	山田修史、渡辺博道、岩下哲雄	(国研)産業技術総合研究所	炭素繊維の熱膨張係数測定法の開発(2)	第36回日本熱物性シンポジウム	2015/10/20
34	岩下哲雄、杉本慶喜、永井英幹、卜部啓、藤田和宏	(国研)産業技術総合研究所、(国大)東京大学	炭素繊維1本の材料試験による異方性評価	第42回炭素材料学会年会	2015/12/2
35	富田奈緒子、杉本慶喜、曾根田靖、吉澤徳子、児玉昌也、羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所、(国大)東京大学	芳香族高分子繊維を前駆体とする炭素繊維の構造制御と力学特性	第42回炭素材料学会年会	2015/12/3
36	羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所	革新炭素繊維基盤技術開発—炭素繊維製造技術の革新を目指して	東海・北陸コンポジットハイウェイコンベンション2015	2015/12/10
37	藤田和宏	(国研)産業技術総合研究所	炭素繊維の単繊維での機械的特性評価試験	2015年度第7回CPC研究会	2015/12/11
38	松尾剛、中田政之、影山和郎	(国大)東京大学、金沢工業大学	熱可塑性CFRPの繊維方向曲げ強度に及ぼす樹脂粘弾性の影響	第7回日本複合材料会議(JCCM-7)	2016/3/16
39	山田修史、渡辺博道、岩下哲雄	(国研)産業技術総合研究所	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(その15) —炭素繊維の熱膨張係数の温度依存性(2)—	第7回日本複合材料会議(JCCM-7)	2016/3/18
40	藤田和宏、岩下哲雄、北條正樹	(国研)産業技術総合研究所、(国大)京都大学	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(その16) —繊維断面形状とその分布の測定—	第7回日本複合材料会議(JCCM-7)	2016/3/18
41	永井英幹、藤田和宏、岩下哲雄	(国研)産業技術総合研究所	炭素繊維の単繊維による特性評価試験(その17) —横方向圧縮弾性率評価範囲の検討—	第7回日本複合材料会議(JCCM-7)	2016/3/18

42	羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所	炭素繊維製造技術の革新を目指して	2016 年第一回 CPC 研究会	2016/5/20
43	杉本慶喜、影山和郎、塩谷正俊	(国大)東京大学、(国大)東工大	PAN 系炭素繊維の到達可能強度の評価	平成 28 年度繊維学会年次大会	2016/6/9
44	影山和郎	(国大)東京大学	炭素繊維の環境付加低減、量産化および低コスト化への試みー革新炭素繊維基盤技術開発の挑戦ー	2016 年 先端材料技術協会	2016/9/7
45	杉山順一、森住真紀、圖子博昭	(国研)産業技術総合研究所、(国大)東京大学	炭素繊維の物性と 2.45GHz 帯に対する電磁波応答	電子情報通信学会マイクロ波研究会	2016/9/15
46	影山和郎	(国大)東京大学	革新的炭素繊維製造プロセスの開発と工業製品への応用	Nanotechnology & Business Opportunities Workshop(台湾)	2016/10/4
47	羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所	自動車等輸送機器の軽量化に向けた最新材料開発動向～NEDO「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクト成果報告～ 革新的な生産性を実現する自動車等用炭素繊維製造技術の開発	モノづくり日本会議 第 7 回新産業技術促進検討会	2016/10/6
48	杉山順一、森住真紀、圖子博昭	(国研)産業技術総合研究所、(国大)東京大学	炭素繊維に対する空洞共振器の電磁波応答	日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム	2016/10/12
49	影山和郎	(国大)東京大学	革新的炭素繊維製造プロセスの開発と工業製品への応用	国際工作機械技術者会議	2016/11/21
50	影山和郎	(国大)東京大学	革新的炭素繊維製造プロセスの開発と工業製品への応用	第 11 回超分子研究会講座	2016/12/9
51	杉本慶喜、影山和郎	(国大)東京大学	弾性率の異なる PAN 系炭素繊維の到達可能強度の評価	第 8 回日本複合材料会議 (JCCM-8)	2017/3/16
52	梶田 剛、影山和郎、松尾 剛、金井 誠	(国大)東京大学	熔融含浸法によるポリプロピレンー方向プリプレグによる炭素繊維強化材の作製とその機械特性評価	第 8 回日本複合材料会議 (JCCM-8)	2017/3/18
53	松尾 剛、影山和郎、梶田 剛	(国大)東京大学	熔融含浸により製作した熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮強度に関する一考察	第 8 回日本複合材料会議 (JCCM-8)	2017/3/18
54	金井 誠、杉本慶喜、影山和郎、松尾 剛、佐々木亘、梶田 剛	(国大)東京大学	円柱形マイクロコンポジット試験片による単繊維の界面せん断強度の計測	第 8 回日本複合材料会議 (JCCM-8)	2017/3/18

55	羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所	Carbon Fibers from New Precursor Polymers	The International Symposium on Carbon Research Frontiers 2017 (シドニー大学)	2017/7/22
56	羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所	Carbon Materials for Energy Applications: Tailored Precursors and the role of nitrogen atom	CARBON 2017 (メルボルン)	2017/7/28
57	金井 誠	(国大)東京大学	繊維・樹脂界面特性測定装置の開発	ICC メンバーズフォーラム	2017/9/21
58	杉山 順一、森住 真紀、圖子博昭	(国研)産業技術総合研究所、新構造材料技術研究組合	微小金属に対する空洞共振器の電磁波応答	第 11 回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム	2017/11/10
59	杉山順一	(国研)産業技術総合研究所	マイクロ波による加熱の基礎と応用	株式会社 R&D 支援センター セミナー	2018/04/26
60	Hiroaki Hatori, Kaito Sakamoto, Kotaro Kawajiri, Kiyotaka Tahara	(国研)産業技術総合研究所	Carbon Fibers from Aromatic Polymer Precursors: Precursor Design for Low CO2 Emission Products	CARBON2018	2018/7/3
61	羽鳥浩章、坂本 魁都、河尻耕太郎、田原聖隆	(国研)産業技術総合研究所	新規芳香族ポリマーからの炭素繊維：低 CO2 排出化のための前駆体設計	日本学術振興会炭素材料第 117 委員会研究会	2018/7/20
62	Hiroaki Hatori	(国研)産業技術総合研究所	Carbon fiber production technology to reduce CO2 emissions	1st Nonmetallic Symposium 2018 Tokyo	2018/10/30
63	Hiroaki Hatori	(国研)産業技術総合研究所	Reducing CO2 Emissions by Carbon Science and Technology: Innovation of Carbon Fiber Production Process	韓国炭素材料学会秋期大会	2018/11/15
64	杉山順一	(国研)産業技術総合研究所	マイクロ波による加熱の基礎と応用	株式会社 R&D 支援センター セミナー	2019/06/19
65	杉山順一、田中玲人、八木皓平、峯岸礼子、羽鳥浩章、鈴木慶宜、土岐 輝、圖子博昭	(国研)産業技術総合研究所、帝人(株)、新構造材料技術研究組合	マイクロ波加熱による炭素繊維の製造	第 13 回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム	2019/10/22

66	杉山順一、鈴木慶宜、土岐輝、 圖子博昭、田中玲人、八木皓平、 峯岸礼子、羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所、帝人(株)、 新構造材料技術研究組合	マイクロ波加熱による炭素繊維の製造と複合材料化の検討	第15回日本電磁波エネルギー応用学会シンポジウム	2021/10/13
67	羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所	革新炭素繊維基盤技術開発	SAMPE Japan 先端材料技術展 2021 NEDO「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトシンポジウム 『サステナブルな社会の実現に向けた輸送機器の軽量化～マルチマテリアル化の動向と課題～』	2021/12/3
68	羽鳥浩章	(国研)産業技術総合研究所	製造時のCO2排出削減を可能とする革新炭素繊維技術の開発	自動車技術会フォーラム 2022	2022/7/13

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	東京大学	特集 鉄並に安くなる炭素繊維 「量産車への搭載がついに始まる低コスト化で日本が世界をリード」	日経ものづくり P41-43	2014/10
2	東京大学	特集「炭素繊維市場テイクオフ」第2回	日刊工業新聞	2015/5/14
3	東京大学	特集「炭素繊維市場テイクオフ」第3回	日刊工業新聞	2015/5/21
4	NEDO/東京大学	「革新炭素繊維基盤技術開発」成果発表	朝日、日経、日刊工業、日経BP、その他を含め全23件	2016/1/14,15
5	東京大学/産総研	産学官連携「低コスト量産実現へ」革新製法開発	石油化学新聞	2016/3/28
6	(国大)東京大学、(国研)産業技術総合研究所	特集「革新炭素繊維基盤技術の開発と自動車への応用」	化学経済	2016/5月号
7	(国大)東京大学、(国研)産業技術総合研究所	生産性10倍の炭素繊維の製造法	日経 Automotive	2016/6月号
8	(国研)産業技術総合研究所	「焼成工程を5分程度に短縮」	日刊工業新聞	2016/11/18
9	(国研)産業技術総合研究所	革新的な生産性を実現する自動車等用炭素繊維製造技術の開発	CPC 研究会会報 2017 「炭素材料の研究開発動向」、	2017/6
10	(国研)産業技術総合研究所	炭素繊維製造技術の革新を目指して	The Chemical Record, 19, pp146-156, 2019.	2018/10/7
11	新構造材料技術研究組合	Electromagnetic Relationship between Microwaves and Flow Reactor Systems	ISMA ウェブサイト	2019/3/18



12	新構造材料技術研究組合	革新炭素繊維基盤技術開発	ISMA REPORT March 2019, No.14	2019/3/20
----	-------------	--------------	-------------------------------	-----------

### (c)プレス発表

番号	所属	タイトル	発表形式	発表年月
1	(国大)東京大学、(国研)産業技術総合研究所	「革新炭素繊維基盤技術開発」の成果発表	NEDO 記者会見	2016/1/14

### (d)その他

なし

### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	(国大)東京大学、(国研)産業技術総合研究所	Nanotech2016	パネル、サンプル展示	2016/1/27～29

### 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	(国大)東京大学・影山和郎、松尾剛	「熱可塑性 CFRP の繊維方向圧縮破壊メカニズムに関する一考察」 第40巻3号 pp.98-105 (2014)	日本複合材料学会誌 論文賞	2015/6/9
2	(国研)産業技術総合研究所・杉山順一、羽鳥浩章、帝人(株)・鈴木慶宜、土岐輝、圖子博昭、(国研)産業技術総合研究所・田中玲人、八木皓平、峯岸礼子、	マイクロ波加熱による炭素繊維の製造と複合材料化の検討	研究奨励賞	2021/10/13

### 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	(国研)産業技術総合研究所	産業技術総合研究所オープンラボ2013	パネル： 炭素繊維モノフィラメントによる評価試験	2013/10/31-11/1
2	(国大)東京大学	革新的新構造材料等技術開発プロジェクト成果報告会	パネル、講演	2014/6/17

研究開発項目⑨「戦略・基盤研究」

[テーマ番号29]「新構造材料の技術・研究戦略」(2014年度)

[テーマ番号30]「技術動向調査分析」(2014年度)

[テーマ番号31]「高分子複合材料技術開発動向調査」(2014年度)

[テーマ番号32]「共通基盤技術の研究調査」(2014年度)

[テーマ番号41]「非鉄金属先導研究」(2015年度)

[テーマ番号42-I]「材料・接合等技術動向調査研究」(2015年度～2022年度)

[テーマ番号43]「計測解析評価研究」(2015年度～2017年度)

表 添-9.1-1 特許、論文、外部発表等の件数(内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス 発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	12	10	15	0	0	2	0	0	0
2014FY	0	0	0	32	0	28	0	0	2	0	0	1
2015FY	0	0	0	4	4	19	2	0	0	0	0	1
2016FY	0	0	0	3	4	17	3	0	0	0	3	1
2017FY	0	0	0	2	5	12	0	0	0	0	0	2
2018FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2019FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2020FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
2021FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	15	23	91	5	0	4	0	3	13

※1: Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2: 実施者が主体的に開催するイベント(フォーラム、シンポジウム等)

1.1 特許

なし

1.2 論文

[テーマ番号32] 共通基盤技術の研究調査

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	津崎兼彰	九州大学	構造材料の新たなフロンティア:壁を超える微視組織と材料特性	日本学術会議材料工学連合講演会講演概要集	無	2013/11/25

2	K. Cho1, M. Niinomi1, M. Nakai1, J. Hieda1, P. F. Santos1, Y. Itoh2, N. Ohtsu3, T. Kozuka3, T. Hattori4, M. Ikeda5	1 東北大学,2 静岡県工業技術研究所, 3 北見工業大学, 4 名城大学, 5 関西大学	Mechanical and biological biocompatibility of newly developed beta-type Ti-Mn alloys for biomedical applications	Materials Science Forum	有	
3	S. Minakuchi and N. Takeda,	東京大学	Recent Advancement in Optical Fiber Sensing for Aerospace Composite Structures	Photonic Sensors Vol.3, No. 4, 2013, PP. 345-354.	無	2013/11/10
4	A.Tochimitsu Yokobori, Jr., Yoshiko Nagumo, Takahiro Yajima and Kenichi Kobayashi	東北大学	The Characterization of Dominating Region of Fracture (Process Region) around a Crack Tip International Conference on Fracture	Proc. of the 13th International Conference on Fracture, (2013)	無	2013/06
5	Ryuji Sugiura, Toshimitsu Yokobori, Kazuto Sata, Masaaki Tabuchi, Kenichi Kobayashi, Masataka Yatomi and Kamran Nikibin	東北大学	Creep Crack Initiation and Growth Behavior in Weldments of High Cr Steels	Proc. of the 13th International Conference on Fracture, (2013)	無	2013/06
6	Haruhisa Shigeyama, A. Toshimitsu Yokobori. Jr., Ryuji Sugiura and Takashi Matszaki	東北大学	Three-Damensional Bacancy Diffusion Analysis Related to Micro Damage of C (T)Specimen for P92Steel under Creep Condition	Proc. of the 13th International Conference on Fracture, (2013)	無	2013/06
7	Daisuke Kobayashi, Masamichi Miyabe, Yukio Kagiya, Ryuji Sugiura, A.Toshimitsu Yokobori	東北大学	An Assessment and Estimation of the Damage Progression Behavior of IN738LC under Various Applied Stress Conditions Based on EBSD Analysis	Metallurgical and Materials Transaction A, 44A (7), (2013), 3123-3135	有	2013/07

8	Haruhisa Shigeyama, RYuji Sugiura, A.Toshimitsu Yokobori,Jr., Takashi Matsuzaki	東北大学	Effect of Multi-axial Stress on Creep Damage Behavior for Notched Specimen of P92 Steel.	Proceeding of the 2013 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, (2013)	無	2013/07
9	Go Ozeki, Ryuji Sugiura, A.Toshimitsu Yokobori,Jr., Yoshiko Nagumo, Hiroaki Takeuchi, Takashi Matsuzaki	東北大学	Effect of Material Microstructure on Creep Damage Formation Behavior for Ni-base Directionally Solidified Superalloy	Proceeding of the 2013 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, (2013)	無	2013/07
10	R.Sugiura, A.T.Yokobori,Jr., J.Park, T.Kawamura, H.Tsukidate	東北大学	Constitutive Low of Creep Deformation for Notched Specimens Related to the Creep Docility and Fracture Lite	Strength, Fracture and Complexity, An International Journal, 8, (2013), 45-57	有	2013/09
11	A.T.Yokobori,Jr., R.Sugiura, H.Takechi, G.Ozeki, A.Ishida, D.Kobayashi and S.Hosono	東北大学	Low of Fracture Life for Directionally Solidified and Poly-crystal Nickel-base Superalloys (CM247LC and IN100) Under Creep-Fatigue Conditions Based on Non Equilibrium Science	Strength, Fracture and Complexity, An International Journal, 8, (2013), 25-44	有	2013/09
12	杉浦隆次、横堀壽光	東北大学	最近の高温クリープ・疲労条件下での寿命予測に関する研究とその展望	日本材料強度学会誌 47巻 2号(2013), 17-22	無	2013/09
13	Takashi Matsuzaki, Ryuji Sugiura, Yoshiko Nagumo and A.Toshimitsu Yokobori, Jr.	東北大学	Crack Growth Characteristic and Damage Evaluation under Creep-Fatigue Interactive Condition for W-Sdded High-Cr Steel	Materials Transactions, 54 (12), (2013), 2215-2224	有	2013/12
14	Go Ozeki, A.Toshimitsu Yokobori, Jr., Ryuji Sugiura	東北大学	Law of crack growth life under creep-fatigue ingeractive conditions for Ni-base Directionally Solidified Superalloy based on Non-Equilibrium Science (The Effect of Stress Holding Time)	Proceeding of the 6th Internatinal 'HIDA'Conference, (2013)	無	2013/12
15	横堀壽光、杉浦隆次	東北大学	高 Cr 鋼（火力ボイラ配管鋼）溶接継手材の余寿命評価	日本工業出版検査技術, (2013)	無	2013/12
16	Haruhisa Shigeyama, Ryuji Sugiura, Takashi Matsuzaki, A.Toshimitsu Yokobori,Jr.	東北大学	Micro and Macro Creep Damage Formation for P92 under Multi-axial Stress related to Circular Notched Specimen	Journal of Material Science and Technology, 30 (1), (2014), 43-49	有	2014/01

17	Daisuke Kobayashi, Masamichi Miyabe, Yukio Kagiya, Yoshiko Nagumo, Ryuji Sugiura, Takashi Matsuzaki, A.Toshimitu Yokobori,Jr	東北大学	Analysis of Damage Behavior Based on the EBSD Method under Creep-Fatigue Conditions for Polycrystalline Nickel-base Superalloys	Journal of Material Science and Technology, 30 (1), (2014), 24-31	有	2014/01
----	---	------	---	---	---	---------

[テーマ番号 41] 非鉄金属先導研究

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	<sup>1,2</sup> K. Cho, <sup>2</sup> M. Niinomi, <sup>2</sup> M. Nakai, <sup>2</sup> H.H. Liu, <sup>2</sup> P.F. Santos, <sup>3</sup> Y. Itoh, <sup>4</sup> M. Ikeda, <sup>5</sup> M. abdel-hady Gepreel, <sup>2</sup> T. Narushima	<sup>1</sup> Osaka University, <sup>2</sup> Tohoku University, <sup>3</sup> Industrial Research Institute of Shizuoka Prefecture, <sup>4</sup> Kansai University, <sup>5</sup> Egypt-Japan University of Science and Technology	Improvement in mechanical strength of low-cost beta-type Ti-Mn alloys fabricated by metal injection molding through cold rolling	Journal of Alloys and Compounds, 664, 272-283	有	2015/12/23
2	<sup>1</sup> P.F Santos, <sup>1</sup> M. Niinomi, <sup>1</sup> H.H.Liu, <sup>2</sup> K.Cho, <sup>1</sup> M.Nakai, <sup>3</sup> Y.Itoh, <sup>1</sup> T. Narushima, <sup>4</sup> M. Ikeda	<sup>1</sup> Tohoku University, <sup>2</sup> Osaka University, <sup>3</sup> Industrial Research Institute of Shizuoka Prefecture, <sup>4</sup> Kansai University	Fabrication of low-cost beta-type Ti-Mn alloys for biomedical applications by metal injection molding process and their mechanical properties	Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials	有	2015/02/17

[テーマ番号 43] 計測解析評価研究

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	荒谷真一、江川博之、大見敏仁、松崎隆、横堀壽光	東北大学 帝京大学	Quasi-static 試験法によるガラス強度測定	日本材料強度学会誌, 48 (4), (2015), 77-87	無	2015/04
2	Go Ozeki, A.Toshimitsu Yokobori, Jr., Ryuji Sugiura and Michifumi Ito	Tohoku University	Law of fracture life under creep-fatigue interactive conditions for Ni-base directionally solidified superalloy based on non-equilibrium science (the effect of stress holding time).	Strength, Fracture and Complexity, An International Journal, 9 (1), (2015), 111-123	有	2015/05

3	M.Tabuchi, H.Hongo, R.Sugiura, A.T.Yokobori,Jr., M.Yatomi and K.Kobayashi	物質・材料研究機 構 東北大学 IHI 千葉大学	Evaluation of damage and fracture of high Cr steel welds at elevated temperatures.	Strength, Fracture and Complexity, An International Journal, 9 (1), (2015), 31-41	有	2015/05
4	横堀壽光、南雲佳子、矢島誉大、飛田洋佑、田淵正明	東北大学	計算力学支援法によるクリープ定数の特定および切欠き材のクリープ寿命則の予測.	日本材料強度学会誌, 49 (1), (2015), 1-11	無	2015/06
5	Y.Shirai A.T.Yokobori Jr., R.Sugiura, T.Fukuda, D.Matsuzaki, H.Ishikawa, K.Ito	Tohoku University	The Effect of Load Frequency on the Temperature Dependence of Fracture Life of Notched Specimens for 9-12Cr Steel under Creep-fatigue Conditions.	Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, (2015)	無	2015/07
6	N.Ishikawa, A.T.Yokobori Jr., T.Ohmi	Tohoku University	Hydrogen-Assisted Cracking Threshold of High-Strength Low-Alloy Steel.	Proceedings of the ASME 2015 Pressure Vessels and Piping Conference, (2015)	無	2015/07
7	山井尚也 <sup>1)</sup> 、安藤明香里 <sup>1)</sup> 、尾関郷 <sup>2)</sup> 、横堀壽光 <sup>2)</sup>	1)東北大学(院)、2)帝京大学	Ni基超合金のクリープ寿命に及ぼす疲労負荷による空孔拡散の力学的効果	日本材料強度学会学術講演会講演論文集、43-48、2016	無	2016/6/16
8	高橋佳希 <sup>1)</sup> 、南雲佳子 <sup>2)</sup> 、陳野和貴 <sup>1)</sup> 、大見敏仁 <sup>3)</sup> 、横堀壽光 <sup>2)</sup>	1) 東北大学(院)、2)帝京大学、3)湘南工科大学	クリープ疲労条件化での12Cr鋼のき裂成長寿命則と微視損傷形成挙動	日本材料強度学会学術講演会講演論文集、49-53、2016	無	2016/6/16
9	Go Ozeki, A. Toshimitsu Yokobori Jr., and Takashi Matsuzaki	Tohoku University	Creep Damage Formation and Crack Initiation / Growth Behavior of Notched Specimen for Directionally Solidified Ni-base Superalloy by Interrupted Observation	ASME 2016 Pressure Vessels & Piping Conference, Vancouver, Canada	有	2016/7/17
10	横堀壽光 <sup>1)</sup> 、安藤明香里 <sup>2)</sup> 、杉浦隆次 <sup>3)</sup> 、松原亨 <sup>4)</sup>	1) 帝京大学、2) 東北大学(院)、3) 日本大学、4) 株式会社パルメソ	QL*パラメータおよびMSE法を用いたNi基超合金切り欠き材のクリープ余寿命評価	第59回材料強度と破壊総合シンポジウム論文集(第59巻)	無	2016/9/16

11	尾関郷、横堀壽光	帝京大学	非平衡科学的手法に基づくNi基超合金切欠き材のクリープ・疲労条件下におけるき裂成長寿命則	第59回材料強度と破壊総合シンポジウム論文集（第59巻）	無	2016/9/16
12	尾関郷、横堀壽光	帝京大学	非平衡科学的手法に基づくNi基超合金切欠き材のクリープ・疲労条件下におけるき裂成長寿命則	日本材料強度学会誌, 50 (1), (2016), 1-9	有	2016/9/30
13	伊藤吾朗ら	茨城大学	2000および7000系アルミニウム合金における疲労亀裂進展挙動と水素脆化感受性	日本金属学会誌	有	2016/11/25
14	A. Toshimitsu Yokobori, Jr. <sup>1)</sup> , Akari Ando <sup>2)</sup> , Go Ozeki <sup>1)</sup> , Toru Matsubara <sup>3)</sup> , Tsutomu Katsumata <sup>3)</sup> and Ryuji Sugiura <sup>4)</sup>	1)Teikyo University,2)Tohoku University,3)Palmer Co. Ltd,4)Nihon University	The Prediction Method of Remnant Life of Creep Fracture Coupled with QL* Parameter and Micro Erosion Method for Notched Specimens of Ni-base super alloys	Life/Defect Assessment & Failures in High Temperature Industrial Structures (HIDA-7), Portsmouth, UK	無	2017/5/16
15	Go OZEKI, A. Toshimitsu YOKOBORI Jr.	Teikyo University	Effect of Pre-damage on Creep Crack Growth Behavior for Directionally Solidified Ni-base Superalloy based on Numerical Analysis	ICF14 (14th International Conference on Fracture), Rhodes, Greece	無	2017/6/18 -2017/6/23
16	横堀壽光	帝京大学	非平衡科学的手法に基づくクリープ疲労相互作用条件下でのNi基超合金（CM247LCおよびIN100）およびP92鋼切欠き材の破壊寿命則	ターボ機械協会蒸気機械委員会平成29年度第1回蒸気タービン技術向上分科会、三井造船株式会社	無	2017/7/28
17	A. Toshimitsu Yokobori, Jr. <sup>1)</sup> , Akari Ando <sup>2)</sup> , Go Ozeki <sup>1)</sup> , Toru Matsubara <sup>3)</sup> , Tsutomu Katsumata <sup>3)</sup> and Ryuji Sugiura <sup>4)</sup>	1)Teikyo University,2)Tohoku University,3)Palmer Co. Ltd,4)Nihon University	The prediction method of remnant life of creep fracture coupled with QL* parameter and micro erosion method for notched specimens of Ni-base super alloys	Materials at High Temperatures, Online, 2017.	有	2017/10/9

18	尾関 郷 <sup>1)</sup> 、横堀 壽光 <sup>1)</sup> 、遠藤 利浩 <sup>2)</sup> 、佐藤 文夫 <sup>2)</sup> 、大見 敏仁 <sup>3)</sup> 、佐藤 和人 <sup>4)</sup>	1) 帝京大学、2) 東北電力株式会社、3) 湘南工科大学、4) 東北大学	空孔拡散解析に基づく溶接部のクリープ微視き裂発生メカニズムの解明	日本機械学会 M&M2017材料力学カンファレンス	無	2017/10/8
19	T. Ishida, M. Ohnuma, B. S. Seong M.Furusaka	Hokkaido University, KAERI	Intermediate-angle neutron scattering instrument for quantitative and non-destructive characterization of nanostructures in steels and other alloys	ISIJ International, 57, pp. 1831 – 1837, 2017	無	2017/10
20	横堀 壽光 <sup>1)</sup> 、大見 敏仁 <sup>2)</sup> 、石川信行 <sup>3)</sup>	1) 帝京大学、2) 湘南工科大学、3) JFEスチール株式会社	α法による、拡散性水素の凝集挙動に及ぼすトラップ水素の影響についての解析	日本材料強度学会誌, Vol.51No.2, 29-34	有	2017/12/10

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

[テーマ番号 32] 共通基盤技術の研究調査

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	津崎兼彰	九州大学	構造材料の新たなフロンティア：壁を超える微視組織と材料特性	日本学会会議材料工学連合講演会	2013/11/25
2	津崎兼彰	九州大学	ESISM としての国土強靱化への貢献：長周期地震動対策と構造材料そしてプラストン	ESISM 構造材料元素戦略研究拠点シンポジウム	2014/01/11
3	津崎兼彰	九州大学	Enhanced ductility in beta Ti alloys: <i>deformation modes and microstructure</i>	2nd ESISM International Workshop	2014/03/11
4	中川 恵友 <sup>1)</sup> 、伊藤 吾朗 <sup>2)</sup> 、中井 学 <sup>3)</sup> 、金谷 輝人 <sup>1)</sup> 、松浦 洋司 <sup>1)</sup>	1)岡山理科大学、 2)茨城大学、 3)(株)神戸製鋼所	7000系アルミニウム合金の疲労特性に及ぼす微量添加元素の影響	軽金属学会第126回春期大会	2014/05/17
5	石澤 真悟 <sup>1)</sup> 、山田 隆一 <sup>1)</sup> 、伊藤 吾朗 <sup>1)</sup> 、車田 亮 <sup>1)</sup> 、中井 学 <sup>2)</sup>	1)茨城大学、 2)(株)神戸製鋼所	航空機用アルミニウム合金の疲労き裂進展特性に及ぼす不純物・添加元素の影響	軽金属学会第126回春期大会	2014/05/17
6	山田 隆一 <sup>1)</sup> 、石澤 真悟 <sup>1)</sup> 、伊藤 吾朗 <sup>1)</sup> 、車田 亮 <sup>1)</sup> 、中井 学 <sup>2)</sup>	1)茨城大学、 2)(株)神戸製鋼所	航空機用アルミニウム合金の疲労き裂進展挙動に及ぼす環境の影響	軽金属学会第126回春期大会	2014/05/17



7	P. F. Santos <sup>1</sup> , M. Niinomi <sup>1</sup> , K. Cho <sup>1</sup> , M. Nakai <sup>1</sup> , J. Hieda <sup>1</sup> , Y. Itoh <sup>2</sup> , M. Ikeda <sup>3</sup>	<sup>1</sup> 東北大学, <sup>2</sup> 静岡県工業技術研究所, <sup>3</sup> 関西大学	Microstructures and mechanical properties of Ti-Mn alloys for biomedical applications produced by metal injection molding and cold crucible levitation melting	第 21 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2013)	2013/11/09
8	趙研 <sup>1</sup> , 新家光雄 <sup>1</sup> , 仲井正昭 <sup>1</sup> , 稗田純子 <sup>1</sup> , 大津直史 <sup>2</sup> , 池田勝彦 <sup>3</sup>	<sup>1</sup> 東北大学, <sup>2</sup> 北見工業大学, <sup>3</sup> 関西大学	新規生体用チタン合金としての低コスト β 型 Ti-Mn 合金の開発	日本チタン協会 第 1 回チタン若手交流会	2013/11/15
9	P. F. Santos <sup>1</sup> , M. Niinomi <sup>1</sup> , K. Cho <sup>1</sup> , M. Nakai <sup>1</sup> , J. Hieda <sup>1</sup> , Y. Itoh <sup>2</sup> , M. Ikeda <sup>3</sup>	<sup>1</sup> 東北大学, <sup>2</sup> 静岡県工業技術研究所, <sup>3</sup> 関西大学	Investigation of relationship between microstructures and mechanical properties of Ti-Mn alloys fabricated by metal injection molding for biomedical applications	第 126 回東北大学金属材料研究所講演大会	2013/11/28
10	K. Cho <sup>1</sup> , M. Niinomi <sup>1</sup> , M. Nakai <sup>1</sup> , J. Hieda <sup>1</sup> , P. F. Santos <sup>1</sup> , Y. Itoh <sup>2</sup> , N. Ohtsu <sup>3</sup> , T. Kozuka <sup>3</sup> , T. Hattori <sup>4</sup> , M. Ikeda <sup>5</sup>	<sup>1</sup> 東北大学, <sup>2</sup> 静岡県工業技術研究所, <sup>3</sup> 北見工業大学, <sup>4</sup> 名城大学, <sup>5</sup> 関西大学	Mechanical and biological biocompatibility of newly developed beta-type Ti-Mn alloys for biomedical applications	International conference on processing & manufacturing & advanced materials 2013	2013/12/04
11	P. F. Santos <sup>1</sup> , M. Niinomi <sup>1</sup> , K. Cho <sup>1</sup> , M. Nakai <sup>1</sup> , J. Hieda <sup>1</sup> , Y. Itoh <sup>2</sup> , M. Ikeda <sup>3</sup>	<sup>1</sup> 東北大学, <sup>2</sup> 静岡県工業技術研究所, <sup>3</sup> 関西大学	Comparison of mechanical properties of low-cost β-type Ti-xMn alloys for biomedical applications fabricated by CCLM and MIM methods	日本金属学会 2014 年春季講演大会	2014/03/22
12	横堀 壽光	東北大学	Potential driven particle diffusion theory and its application to engineering problems	Invited lecture at the Engineering Science Department University of Oxford	2013/11/18
13	A.Tochimitsu Yokobori, Jr.	東北大学	The Characterization of Dominating Region of Fracture (Process Region) around a Crack Tip International Conference on Fracture	13th International Conference on Fracture	2013/06

14	A.Tochimitsu Yokobori, Jr.	東北大学	Non Linearity Characteristics of Crack Growth Life under High Temperature Creep and Fatigue Conditions Based on Non Equilibrium Science	International Symposium for the 70th Anniversary of the Tohoku Branch of the Chemical Society of Japan	2013/09
15	J. T. SIIVOLA, K. KIKUCHI, S. MINAKUCHI AND N. TAKEDA	東京大学	Effect of Temperature and Humidity on Indentation Property of Polymethacrylimide (PMI) Foam Core Sandwich Structures	米国複合材料学会	2013/09/10
16	J. T. SIIVOLA,, S. MINAKUCHI AND N. TAKEDA	東京大学	Application of Fiber-Optic Distributed Sensing System to CFRP-foam Core Sandwich Panel and Its Detection Ability of Local Indentation Damage	米国複合材料学会	2013/09/11
17	DmitryBULGAREV ICH	物質・材料研究機構	Detector for Polarization-Sensitive Time-Domain Terahertz Spectroscopy	5th International Workshop on Far-Infrared Technologies 2014	2014/03/05
18	志波光晴	物質・材料研究機構	非破壊材料信頼性評価	RACE コロキウム	2014/01/16
19	松本良, 金谷重 宏,宇都宮裕	大阪大学	金属レーザ積層造形法による発泡アルミニウム表面への緻密層形成	日本機械学会年次大会	2014/09/07
20	劉陽, 下田昌 利, 渋谷陽二	大阪大学	Parameter-free shape optimization method for strength design of stiffeners on thin-walled structures	Proceedings of the 8th China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems	2014/05/25
21	劉陽, 渋谷陽二	大阪大学	マルチマテリアル構造の界面強度問題に対する最適設計手法	日本機械学会第27回計算力学講演会	2014/11/25
22	劉陽, 下田昌 利, 渋谷陽二	大阪大学	Parameter-free method for shape optimization of stiffeners on thin-walled structures to minimize stress concentration	Journal of Mechanical Science and Technology	2015/01/06
23	K. Cho, M. Niinomi, M. Nakai, J. Hieda, P. F. Santos, Y. Itoh and M. Ikeda	東北大学	Mechanical properties, microstructures, and biocompatibility of low-cost b-type Ti-Mn alloys for biomedical applications	Ceramic Transactions, 251, 21-30	2014/09/26

24	趙 研、新家光雄、仲井正昭、稗田純子、Pedro Fernandes Santos、伊藤芳典、池田勝彦	東北大学	浮揚溶解法および金属粉末射出成型法を用いて作製した低コスト $\beta$ 型 Ti-Mn 合金の力学的特性と微細組織	軽金属学会第 126 回春期大会	2014/05/17
25	趙 研、新家光雄、仲井正昭、稗田純子、Pedro Fernandes Santos、伊藤芳典、池田勝彦	東北大学	金属粉末射出成形を用いて作製した低コスト高強度 $\beta$ 型 Ti-Mn 合金における冷間圧延による飛躍的な機械的強度の向上	第 127 回金属材料研究所講演会	2014/05/28
26	P. F. Santos, M. Niinomi, K. Cho, M. Nakai, J. Hieda, Y. Itoh, M. Ikeda	東北大学	Mechanical behavior and microstructure of low-cost $\beta$ -type Ti-Mn alloys produced by metal injection molding and cold crucible levitation melting methods	第 127 回金属材料研究所講演会	2014/05/28
27	趙 研、新家光雄、仲井正昭、Pedro Fernandes Santos、伊藤芳典、池田勝彦	東北大学	金属粉末射出成形法を用いて作製した低コスト $\beta$ 型 Ti-Mn 合金の冷間圧延による高強度化	日本金属学会第 155 回講演大会	2014/09/24
28	P. F. Santos, M. Niinomi, K. Cho, M. Nakai, J. Hieda, Y. Itoh, M. Ikeda	東北大学	Mechanical properties, microstructures and biocompatibility of low-cost $\beta$ -type Ti-Mn alloys fabricated by CCLM and MIM methods	日本金属学会第 155 回講演大会	2014/09/24
29	趙 研、新家光雄、仲井正昭、Pedro Fernandes Santos、伊藤芳典、池田勝彦	東北大学	金属粉末射出成形法により作製した低コスト Ti-Mn 合金のマイクロ組織および力学的特性	日本歯科理工学会平成 26 年度秋期第 64 回学術講演会	2014/10/04
30	Ken Cho, Mitsuo Niinomi, Masaaki Nakai, Junko Hieda, Pedro F. Santos, Alethea M. Liens, Masahiko Ikeda	東北大学	Evaluation of long-term mechanical and biological biocompatibility of low-cost $\beta$ -type Ti-Mn alloys for biomedical applications	Materials Science & Technology 2014 (Pittsburgh, PA, USA)	2014/10/12

31	Ken Cho, Mitsuo Niinomi, Masaaki Nakai, Junko Hieda, Pedro Fernandes Santos, Yoshinori Itoh, Masahiko Ikeda	東北大学	Development of low-cost high-strength b-type Ti alloys using a metal injection molding	Materials Science & Technology 2014 (Pittsburgh, PA, USA)	2014/10/12
32	趙 研、新家光雄、仲井正昭、Pedro Fernandes Santos	東北大学	低コスト $\beta$ 型 Ti-Mn-Mo 合金の微細組織および力学的特性に及ぼす Mo の影響	軽金属学会第 127 回秋期大会	2014/11/15
33	趙研, 新家光雄, 仲井正昭, 劉恢弘, P. F. Santos, A. M. Liens, 池田勝彦	東北大学	低コスト生体用 $\beta$ 型 Ti-Mn 合金の微細組織および疲労特性の評価	第 128 回金属材料研究所講演会	2014/11/27
34	P. F. Santos, M. Niinomi, K. Cho, M. Nakai, Y. Itoh, M. Ikeda	東北大学	Microstructures and compressive behaviour of low-cost $\beta$ -type Ti-Mn alloys produced by metal injection moulding	第 128 回金属材料研究所講演会	2014/11/27
35	趙 研, 新家光雄, 仲井正昭, 劉恢弘, P.F.Santos	東北大学	第三元素添加を用いた塑性変形メカニズム制御による Ti-Mn 系合金の強度-延性バランスの改善	第 13 回日本金属学会東北支部研究発表大会	2014/12/10
36	趙 研, 新家光雄, 仲井正昭, 劉恢弘, P.F.Santos	東北大学	変形機構制御による Mo 添加 $\beta$ 型 Ti-Mn 系合金の強度-延性バランスの改善	日本鉄鋼協会第 169 回講演大会	2015/3/18-20
37	Pedro F. Santos, Mitsuo Niinomi, Ken Cho, Masaaki Nakai, Huihong Liu	東北大学	Mechanical properties of new Ti-Mn-Mo alloys for use in biomedical applications	日本金属学会第 156 回講演大会	2015/03/18-20
38	小山元道、澤口孝宏、津崎兼彰	九州大学	双晶誘起塑性鋼の双晶変形挙動に及ぼす炭素の影響 (Part 1)	論文誌：鉄と鋼, 100(2014)1246	2014/09/30
39	小山元道、澤口孝宏、津崎兼彰	九州大学	双晶誘起塑性鋼の双晶変形挙動に及ぼす炭素の影響 (Part 2)	論文誌：鉄と鋼, 100(2014)1253	2014/9/30
40	M. Koyama, E. Akiyama, D. Raabe, K. Tsuzaki	九州大学	Factors affecting hydrogen embrittlement susceptibility of twinning-induced plasticity steels	高 Mn 鋼についての国際シンポジウム	2014/09/3
41	M. Koyama, T. Sawaguchi, K. Tsuzaki	九州大学	Role of twin boundary on plasticity and embrittlement in high Mn austenitic steel	塑性に関する国際会議	2015/01/07

42	Narumichi Sato, Masaki Hojo, Masaaki Nishikawa	京都大学	Novel test method for accurate characterization of intralaminar fracture toughness in CFRP laminates	Composites, Part B, Vol.65, pp. 89-98	2014/10/01
43	Masaki Hojo, Masaaki Nishikawa	京都大学	Characterization of crack length dependency for delamination fatigue crack growth behavior in toughened CFRP laminates	6th International Conference on Fatigue of Composites	2015/03/26

[テーマ番号 41] 非鉄金属先導研究

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	<sup>1</sup> P.F. Santos, <sup>1</sup> M. Niinomi, <sup>1</sup> K. Cho, <sup>1</sup> M. Nakai, <sup>1</sup> H. Liu	<sup>1</sup> 東北大学	Mechanical performance of Ti-Mn-Mo alloys for biomedical applications	軽金属学会第 128 回春 期大会	2015/05/16
2	<sup>1</sup> P.F. S, <sup>1</sup> M. Niinomi, <sup>1</sup> K. Cho, <sup>1</sup> M Nakai, <sup>1</sup> H. Liu, <sup>2</sup> Y. Itoh, <sup>3</sup> M. Ikeda	<sup>1</sup> 東北大学、 <sup>2</sup> 静岡県工業技術 研究所、 <sup>3</sup> 関西大学	Mechanical properties of low-cost $\beta$ -type Ti-Mn all oys fabricated by metal injection molding	紛体粉末冶金協会平成 27 年度春季大会	2015/05/26
3	<sup>1</sup> P.F. Santos, <sup>1</sup> M. Niinomi, <sup>1</sup> K. Cho, <sup>1</sup> M. Nakai, <sup>1</sup> H.Liu	<sup>1</sup> 東北大学	Mechanical properties of newly developed $\beta$ -type Ti-Mn-Mo alloys for bio medical applications	第 129 金属材料研究所 講演会	2015/05/29
4	P. F. Santos <sup>1</sup> , M. Niinomi, K. Cho <sup>1</sup> , M. Nakai <sup>1</sup> , H. H. Liu <sup>1</sup> , N. Ohtsu <sup>2</sup> , T. K ozuka <sup>2</sup> , Masahiko Ikeda <sup>3</sup>	<sup>1</sup> 東北大学、 <sup>2</sup> 北見工業大学、 <sup>3</sup> 関西大学	Microstructure, mechanical and biological biocompatibility of low-cost $\beta$ -type Ti-Mn alloys f or biomedical applications	Biomaterials International 2015	2015/05/31
5	<sup>1,2</sup> K. Cho, <sup>2</sup> M. Niinomi, <sup>2</sup> M. Nakai, <sup>2</sup> H. Liu, <sup>2</sup> P.F.Santos, <sup>3</sup> Y.Itoh, <sup>4</sup> M.Ikeda	<sup>1</sup> OsakaUniversity, <sup>2</sup> TohokuUniversity, <sup>3</sup> IndustrialResearch Institute of Shiz uoka Prefecture, <sup>4</sup> KansaiUniversity	Tensile and Compressive Properties of Low-Cost H igh-Strength $\beta$ -Type Ti-M n Alloys Fabricated by Metal Injection Molding	The 13th World Conference on Titanium	2015/08/16
6	<sup>1</sup> P.F. Santos, <sup>1</sup> M. Niinomi <sup>1</sup> K. Cho, <sup>1</sup> M. Nakai, <sup>1</sup> H. Liu	<sup>1</sup> 東北大学、	Development of new Ti- Mn-Mo alloys for use in biomedical applications	The 13th World Conference on Titanium	2015/08/16

7	<sup>1</sup> P.F. Santos, <sup>1</sup> M. Niinomi <sup>1</sup> K. Cho, <sup>1</sup> M. Nakai, <sup>1</sup> H. Liu	<sup>1</sup> 東北大学、	Development of new Ti-Mn-Mo alloys for use in biomedical applications	日本鉄鋼協会第170回講演大会	2015/09/16
8	<sup>1</sup> P.F. Santos, <sup>1</sup> M. Niinomi <sup>1</sup> H. Liu, <sup>1</sup> M. Nakai, <sup>2</sup> K. Cho	<sup>1</sup> 東北大学、 <sup>2</sup> 大阪大学	Mechanical performance of a series of novel Ti-Mn alloys with Mo addition designed as a biomaterial	軽金属学会第129回秋期大会	2015/11/21
9	<sup>1</sup> P.F. Santos, <sup>1</sup> M. Niinomi <sup>1</sup> H. Liu, <sup>1</sup> M. Nakai, <sup>2</sup> K. Cho	<sup>1</sup> 東北大学、 <sup>2</sup> 大阪大学	Mo-added Ti-Mn alloys with improved mechanical performance for use in biomedical applications	第130金属材料研究所講演会	2015/11/25
10	<sup>1</sup> P.F. Santos, <sup>1</sup> M. Niinomi <sup>1</sup> H. Liu, <sup>1</sup> M. Nakai, <sup>2</sup> K. Cho	<sup>1</sup> 東北大学、 <sup>2</sup> 大阪大学	Design, microstructures and mechanical properties of novel beta-type Mo-added Ti-Mn alloys for use in biomedical applications	International Symposium on EcoTopia Science 2015	2015/11/27
11	<sup>1</sup> P.F. Santos, <sup>1</sup> M. Niinomi, <sup>1</sup> H. Liu, <sup>1</sup> M. Nakai, <sup>2</sup> K. Cho, <sup>1</sup> T Narushima	<sup>1</sup> 東北大学、 <sup>2</sup> 大阪大学	Design, microstructural characterization and mechanical evaluation of novel Ti-Mn-Mo alloys for biomedical applications	Twenty-fourth International Symposium on Processing and Fabrication of Advanced Materials	2015/12/18
12	<sup>1,2</sup> K. Cho, <sup>2</sup> P.F. Santos, <sup>1</sup> H. Kobata, <sup>1</sup> Y.H. Yasuda, <sup>2</sup> M Niinomi	<sup>1</sup> Osaka University, <sup>2</sup> Tohoku University	Improvement of strength-ductility balance of $\beta$ -type Ti alloys using a nano-sized $\omega$ phase and twinning-induced plasticity	2015INTERNATIONAL CONFERENCE FOR LEADING AND YOUNG MATERIALS SCIENTISTS	2015/12/24
13	<sup>1</sup> P.F. Santos, <sup>1</sup> M. Niinomi, <sup>1</sup> H. Liu, <sup>1</sup> M. Nakai, <sup>2</sup> K.Cho, <sup>1</sup> T Narushima	<sup>1</sup> 東北大学、 <sup>2</sup> 大阪大学	Development and performance of a Ti-based beta-type alloy for biomedical applications using Mn and Mo additions	The 6th International Symposium for Interface Oral Health Science	2016/01/18
14	<sup>1</sup> P.F. Santos, <sup>1</sup> M. Niinomi, <sup>1</sup> M. Nakai, <sup>1</sup> H. Liu, <sup>1</sup> T Narushima, <sup>2</sup> K. Cho	<sup>1</sup> 東北大学、 <sup>2</sup> 大阪大学	Improved mechanical performance by Mo addition in a series of Ti-Mn alloys developed for biomedical applications	日本金属学会第158回講演大会	2016/03/23

[テーマ番号 43] 計測解析評価研究

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	横堀 壽光	東北大学	The Characteristics of Load Frequency and its Mechanism of Corrosion Fatigue Crack Growth Rate for Ti-6AL-4V Alloys	15th International ASTM/ESIS Symposium on Fatigue and Fracture Mechanics	2015/05/20
2	M. Hojo*, T. Aoki**	* Kyoto University ** University of Tokyo	Characterization of fatigue R-curves based on Gmax-constant delamination tests in CF/PEEK Laminates	20th International Conference on Composite Materials (ICCM20)	2015/7/21
3	横堀 壽光	東北大学	The Law of Fracture Life under Stress and Strain Controlled Creep-fatigue Conditions for Nickel base Superalloy617	10th International EPRI Creep-Fatigue Experts Workshop	2015/11/11
4	横堀 壽光	東北大学	材料の変形と破壊：材料の種類に依らない議論をするため	構造材料コロキウム	2016/02/19
5	横堀 壽光	東北大学	Simulation of Time Sequential Deformation Behaviors of Diseased Blood vessel Wall under Pulsatile Pressure Conditions based on CFD	The 23rd Workshop on Sustained Simulation Performance -Technical Program-	2016/03/16
6	伊藤 吾朗, 車田 亮, 他	茨城大学	2000および7000系アルミニウム合金の疲労き裂進展挙動に及ぼす調質の影響	一般社団法人軽金属学会第130回春期大会	2016/05/28
7	G. Itoh, A. Kurumada, et al.	Ibaraki University	Further study on the effect of environment on fatigue crack growth behavior of 2000 and 7000 series aluminum alloys	Thermec' 2016	2016/06/01
8	Go Ozeki <sup>1)</sup> , A Toshimitsu Yokobori Jr. <sup>1)</sup> and Takashi Matsuzaki <sup>2)</sup>	1) 帝京大学、2) 東北大学	Creep Damage Formation and Crack Initiation/Growth Behavior of Notched Specimen for Directionally Solidified Ni-Base Superalloy by Interrupted Observation	ASME 2016 Pressure Vessels and Piping Conference	2016/07/16
9	Yoshiko Nagumo <sup>1)</sup> , A Toshimitsu Yokobori, Jr. <sup>1)</sup> , Takahiro Fukuda <sup>2)</sup> , Yoshiki Takahashi <sup>2)</sup> and Ryuji Sugiura <sup>3)</sup>	1) 帝京大学、2) 東北大学 (研究当時)、3) 日本大学	The Law of Crack Growth Life under Load Controlled Creepfatigue Conditions for W-added 12% Cr Steel	ASME 2016 Pressure Vessels & Piping Conference	2016/07/16

10	A.Toshimitsu Yokobori,Jr. <sup>1)</sup> , Kazutaka Jinno <sup>2)</sup> , Hiroaki Seino <sup>2)</sup> , Akihito Sakamoto <sup>2)</sup> , Ryuji Sugiura <sup>3)</sup> and Isamu Nonaka	1) 帝京大学、2) 東 北大学(研究当時) 、3) 日本大学、4) 東 北大学	The Fracture Life of Circular Notched Specimens Under Load and Displacement Controlled Creep-fatigue Conditions for P92 Steel	ASME 2016 Pressure Vessels & Piping Conference	2016/07/16
11	Go Ozeki <sup>1)</sup> , A. Toshimitsu Yokobori Jr. <sup>1)</sup> and Takashi Matsuzaki <sup>2)</sup>	1) 帝京大学、2) 東 北大学	Creep Damage Formation and Crack Initiation / Growth Behavior of Notched Specimen for Directionally Solidified Ni-base Superalloy by Interrupted Observation	ASME 2016 Pressure Vessels & Piping Conference, Vancouver, Canada	2016/07/16
12	Go OZEK <sup>1)</sup> , A.Toshimitsu YOKOBORI, Jr. <sup>1)</sup> , Yoshiko NAGUMO <sup>1)</sup> , Ryuji SUGIURA <sup>2)</sup> )	1) 帝京大学、2) 東 北大学	Effect of Crystal Orientation on Creep Crack Growth Behavior for Directionally Solidified Ni-base Superalloy based on Numerical Analysis	2016 International Symposium for Advanced Materials Research, Sun moon lake, Taiwan	2016/08/11
13	G. Itoh et al.	Ibaraki University	Relationship Between Fatigue Crack Growth Behavior and Susceptibility to Hydrogen Embrittlement in 7000 Series Aluminum Alloys	International Hydrogen Conference	2016/9/12
14	尾関郷、横堀壽 光	帝京大学	QL*パラメータおよびMSE法 を用いたNi基超合金切り欠 き材のクリープ余寿命評価	第59回材料強度と破壊 総合シンポジウム	2016/09/16
15	尾関郷、横堀壽 光	帝京大学	非平衡科学的手法に基づ くNi基超合金切欠き材の クリープ・疲労条件下にお けるき裂成長寿命則	第59回材料強度と破 壊総合シンポジウム	2016/09/16
16	尾関郷、横堀壽 光	帝京大学	数値解析による一方凝固 Ni基超合金のき裂成長挙 動におよぼす予損傷の効 果	日本機械学会M& M2016材料力学カンフ ァレンス	2016/10/08
17	横堀壽光、尾関 郷、南雲佳子	帝京大学	高温クリープ・疲労寿命 の非線形相互作用効果の カオス理論解析	日本機械学会M& M2016材料力学カンフ ァレンス	2016/10/08
18	Masato Ohnuma	Hokkaido University	Neutron as a daily tool; towards the application to the steel industry	Danish CANS workshop	2016/11/3



19	Masato Ohnuma	Hokkaido University	Application of Contrast Difference of X-ray and Neutron Measured in Metals and Alloys	12th The International Symposium on Characterization of Metals and Nanostructured Materials by Neutron and X-ray Synchrotron Scattering	2016/11/26
20	伊藤吾朗, 車田亮, 他	茨城大学	7000系アルミニウム合金の疲労特性に及ぼす内在水素の影響	一般社団法人軽金属学会第131回秋期大会	2016/11/05
21	Hiro Tanaka(大阪大学), Mayuko Kimura(大阪大学), Yoji Shibutani(大阪大学), Yang Liu (崇城大学)	大阪大学 崇城大学	Failure criteria of adhesive joints between aluminum circular pipes under multiaxial stress state	13th Asia-Pacific Symposium on Engineering Plasticity and Its Applications	2016/12/06
22	西川雅章	京都大学	炭素繊維複合材料の微視構造と力学特性の関係についての解析的研究	日本材料学会 複合材料部門委員会 第252回定例委員会	2017/2/9
23	A. Toshimitsu Yokobori, Jr. <sup>1)</sup> , Akari Ando <sup>2)</sup> , Go Ozeki <sup>1)</sup> , Toru Matsubara <sup>3)</sup> , Tsutomu Katsumata <sup>3)</sup> and Ryuji Sugiura <sup>4)</sup>	帝京大学	The Prediction Method of Remnant Life of Creep Fracture Coupled with QL* Parameter and Micro Erosion Method for Notched Specimens of Ni-base super alloys	HIDA-7 Conference on Life/Crack Assessment & Failures in Industrial Structures, Portsmouth, UK	2017/5/15-17
24	西川雅章	京都大学	炭素繊維複合材料の微視損傷過程と力学特性に関する計算力学的研究	日本材料学会 複合材料部門委員会 第254回定例委員会	2017/6/2
25	Go OZEKI, A.Toshimitsu YOKOBORI, Jr.	帝京大学	Effect of Pre-damage on Creep Crack Growth Behavior for Directionally Solidified Ni-base Superalloy based on Numerical Analysis	14th International Conference on Fracture, Rhodes, Greece	2017/6/18-23
26	T. Ishida, M. Ohnuma M.Furusaka	Hokkaido University	Data Reduction and Instrumentation Towards Accurate Absolute Intensity for the TOF-SANS Instrument (iANS) at the Compact Accelerator Driven Neutron Source at Hokkaido University	International Conference on Neutron Scattering	2017/7/12

27	M. Ohnuma	Hokkaido University	Active use of Compact Neutron Source to Industrial Applications	International Conference on Neutron Scattering	2017/7/13
28	横堀 壽光	帝京大学	非平衡科学的手法に基づくクリープ疲労相互作用条件下でのNi基超合金 (CM247LCおよびIN100) およびP92鋼切欠き材の破壊寿命則	ターボ機械協会蒸気機械委員会平成29年度第1回蒸気タービン技術向上分科会	2017/7/28
29	大沼 正人	北海道大学	小型加速器駆動中性子源を利用した構造材料研究	日本加速器学会	2017/8/1
30	M. Ohnuma T. Ishida M. Furusaka	Hokkaido University	Combined use of SAXS and SANS measured by in-house facilities	IUMRS-ICA	2017/11/6
31	尾関 郷	帝京大学	空孔拡散解析に基づく溶接部のクリープ微視き裂発生メカニズムの解明	日本機械学会 M&M2016 材料力学カンファレンス, 札幌	2017/10/6-9
32	石田 倫教、 大沼 正人、 古坂 道弘	北海道大学	北海道大学におけるSANS装置 iANS を用いた金属材料測定の新技術開発	日本中性子科学会	2017/12/2
33	L. Yang, Y. Kondo, K. Shimotsu, M. Okayasu	岡山大学	Mechanical properties of the hot stamping carbon steels	2017 GLOBAL RESEARCH EFFORTS ON ENERGY AND NANOMATERIALS, (Taiwan)	2017/12/23
34	山本 慧、北條 正樹、 西川 雅章	京都大学	薄層化 CFRTP/CFRTP 擬似等方積層板の4点曲げにおける損傷観察	第9回日本複合材料会議 (JCCM-9)	2018/3/1

### (b)新聞・雑誌等への掲載

[テーマ番号 41] 非鉄金属先端研究

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	Tohoku University, Kansai University, Meijo University	Evaluation of long-term mechanical and biological biocompatibility of low-cost $\beta$ -type Ti-Mn alloys for biomedical applications	Ceramic Transactions, 254,1-12	2015/09/09
2	Tohoku University, Osaka University, Kitami Institute of Technology, Kansai University	Microstructures, mechanical properties and cytotoxicity of low cost beta Ti-Mn alloys for biomedical applications	Acta Biomaterialia, 26, 366-376	2015/10/15

[テーマ番号 43] 計測解析評価研究

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	大阪大学	Failure criteria of adhesive joints between aluminum circular pipes under multiaxial stress state	Key Engineering Materials	2016/12/15
2	茨城大学	2000 および 7000 系アルミニウム合金における疲労き裂進展挙動と水素脆化感受性	日本金属学会誌	2016/12/31
3	Ibaraki University	Further Study on the Effect of Environment on Fatigue Crack Growth Behavior of 2000 and 7000 Series Aluminum Alloys	Materials Science Forum	2017/01/31

(c)プレス発表

なし

(d)その他

[テーマ番号 29] 新構造材料の技術・研究戦略

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	Yoshio Akimune and Teruo KISHI	ISMA	Introduction to the new project named Innovative New Structural Materials	TMS	2014/02/18

[テーマ番号 30] 技術動向調査分析

番号	所属	タイトル	発表形式	発表年月
1	金属系材料研究開発センター(JRCM)	THERMEC'2013 に参加して	JRCM NEWS No.328 レポート記事	2014/02
2	金属系材料研究開発センター(JRCM)	革新的新構造材料等技術開発「技術動向調査分析」平成 25 年度成果概要 (1) 接合技術編	JRCM NEWS No.334 レポート記事	2014/08
3	金属系材料研究開発センター(JRCM)	革新的新構造材料等技術開発「技術動向調査分析」平成 25 年度成果概要 (2) 構造材料編	JRCM NEWS No.335 レポート記事	2014/09

1.4 展示会への出展

なし

## 1.5 受賞

[テーマ番号 43] 計測解析評価研究

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	帝京大学・横堀壽光		ASTM F04 Twenty Years Service Awards [ASTM]	2016/11
2	大阪大学・渋谷陽二	マルチスケールな材料と構造のサイズ効果に関する先駆的研究	日本機械学会材料力学部門業績賞	2016/10/09
3	帝京大学・尾関郷		Outstanding achievement and contribution to ISAMR2016 Invited Presentation [Asia Pacific Society for Materials Research]	2016/08/13

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	ISMA	革新的新構造材料等研究開発 「平成 26 年度成果報告会」	口頭発表	2015/01/20
2	ISMA	革新的新構造材料等研究開発 「平成 27 年度成果報告会」	口頭発表、ポスター	2016/01/22
3	ISMA	革新的新構造材料等研究開発 「平成 28 年度成果報告会」	口頭発表、ポスター	2017/01/23
4	ISMA	3 府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 革新的構造材料(JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点 (ESISM) ・新構造材料技術研究組合 (ISMA)	口頭発表、ポスター	2017/06/23
5	ISMA	革新的新構造材料等研究開発 平成 29 年度成果報告会	口頭発表、ポスター	2018/01/26
6	ISMA	革新的新構造材料等研究開発 平成 30 年度成果報告会	口頭発表、ポスター	2019/01/21
7	ISMA	革新的新構造材料等研究開発 「2019 年度成果報告会」(中止)	資料配布のみ	2020/02/28
8	ISMA	革新的新構造材料等研究開発 「2020 年度成果報告会」(中止)	資料配布のみ	2021/01/25

9	ISMA	革新的新構造材料等研究開発 「2020年度成果報告会」	口頭発表、ポスター	2021/07/01
10	ISMA	3府省合同 構造材料プログラム 「研究成果報告会」 ・戦略的イノベーション創造プログラム 統合型材料開発システムによるマテリアル革命 (JST) ・京都大学 構造材料元素戦略研究拠点 (ESISM) ・新構造材料技術研究組合 (ISMA)	口頭発表、ポスター	2021/09/22
11	ISMA	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	口頭発表、ポスター	2022/01/31
12	ISMA	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	口頭発表、ポスター	2022/12/20
13	ISMA	革新的新構造材料等研究開発 「最終成果シンポジウム」	ポスター	2023/03/16

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 5 6] 新材料の材料代替効果定量技術の開発 (FS 研究) (2018 年度)

[テーマ番号 4 2 - 2] 材料・接合等技術動向調査研究 (新材料の材料代替効果定量技術の開発) (2019 年度～2022 年度)

表 添-9.2-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス 発 表	その 他			
2018FY	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0
2019FY	0	0	0	0	0	12	1	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	2	0	20	0	0	0	2	0	1
2021FY	0	0	0	4	0	7	0	0	0	0	1	1
2022FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
合計	0	0	0	6	0	52	1	0	0	2	1	3

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

## 1.1 特許

なし

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、 ページ番号	査読	発表年月
1	醍醐市朗 <sup>1</sup> , 田島圭二郎 <sup>1</sup> , 武山健太郎 <sup>1</sup> , パナシユクダリナ <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup> , 林英男 <sup>2</sup> , 小野英樹 <sup>3</sup> , 小林能直 <sup>4</sup> , 中島謙一 <sup>5</sup>	1 : 東京大学, 2 : 東京都立産業技術研究センター, 3 : 富山大学, 4 : 東京工業大学, 5 : 国立環境研究所	Potential Influences of Impurities on Properties of Recycled Carbon Steel	ISIJ International Vol: 61 No.1 Page : 498-505	有	2020/06/24
2	森本慎一郎 <sup>1</sup> , Yanfei Cheng <sup>1</sup> , 水越教男 <sup>1</sup> , 田原聖隆 <sup>1</sup>	1 : 産業技術総合研究所	Methodological Study of Evaluating Future Lightweight Vehicle Scenarios and CO2 Reduction Based on Life Cycle Assessment	Sustainability 2020, 12(14), 5713	有	2020/07/16

3	ドゥヌウイラ パサン <sup>1</sup> , 濱田 航 <sup>1</sup> , 武山 健 太郎 <sup>1</sup> , パナ シユク ダリナ <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 森 本慎一郎 <sup>2</sup> , 田 原聖隆 <sup>2</sup>	1 : 東京大 学, 2 : 産業 技術総合研 究所	Influence of dynamic inventory and different allocation methods for recycling on CO2 savings and payback times of light-weighted vehicles computed under product- and fleet-based analyses: a case of internal combustion engine vehicles	Sustainability 2021, 13(24), 13935	有	2021/10/24
4	Daryna Panasiuk <sup>1</sup> , Ichiro Daigo <sup>1</sup> , Takeo Hoshino <sup>1</sup> , Hideo Hayashi <sup>2</sup> , Eiji Yamasue <sup>3</sup> , Duc Huy Tran <sup>4</sup> , Benjamin Sprecher <sup>5</sup> , Feng Shi <sup>6</sup> , Volodymyr Shatokha <sup>6</sup>	1 : The University of Tokyo , 2 : Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute, 3 : Ritsumeikan University , 4 : Hanoi University of Science and Technology Technical University, 5 : Delft Nanjing University , 6 : National Metallurgical Academy of Ukraine	International comparison of impurities mixing in steel scrap	Journal of Industrial Ecology 2022, 26(3), 1040-1050	有	2021/04/21
5	JunxiLiu <sup>1</sup> , 醍 醐市朗 <sup>1</sup> , パナ シユク ダリナ <sup>1</sup> , ドゥヌウイ ラパサン <sup>1</sup> , 濱 田航 <sup>1</sup> , 星野岳 穂 <sup>1</sup>	1 : 東京大学	Impact of recycling effect in comparative LCA for materials selection - A case study of light-weighting vehicles	The Journal of Cleaner Production 2022, 349, 131317	有	2021/09/26
6	畑山博樹 <sup>1</sup>	1 : 産業技術 総合研究所	The metals industry and the Sustainable Development Goals: The relationship explored based on SDG reporting	Resources, Conservation and Recycling 2022, 178, 106081	有	2021/11/30

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	畑山博樹 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>2</sup> , 田原聖隆 <sup>1</sup>	1: 産業技術総合研究所, 2: 東京大学	Value of Materials within the Sustainable Development Goals	The 13th Biennial International Conference on <i>EcoBalance</i> ( <i>EcoBalance 2018</i> )	2018/10/9-12
2	坂本魁都 <sup>1</sup> , 河尻耕太郎 <sup>1</sup> , 羽鳥浩章 <sup>1</sup> , 田原聖隆 <sup>1</sup>	1: 産業技術総合研究所	Life cycle assessment of advanced production process of carbon fibers using aromatic polymer	The 13th Biennial International Conference on <i>EcoBalance</i> ( <i>EcoBalance 2018</i> )	2018/10/9-12
3	醍醐市朗 <sup>1</sup> , 畑山博樹 <sup>2</sup> , 小林能直 <sup>3</sup> , 中島謙一 <sup>4</sup> , 山末英嗣 <sup>5</sup> , 松八重一代 <sup>6</sup>	1: 東京大学, 2: 産業技術総合研究所, 3: 東京工業大学, 4: 国立環境研究所, 5: 立命館大学, 6: 東北大学	LCI methodologies considering recyclability of materials	The 13th Biennial International Conference on <i>EcoBalance</i> ( <i>EcoBalance 2018</i> )	2018/10/9-12
4	中駄将人 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 榎学 <sup>1</sup>	1: 東京大学	Estimation of Exported Mixed Metal Scrap for Evaluation of End-of-Life Recycling Rates	The 13th Biennial International Conference on <i>EcoBalance</i> ( <i>EcoBalance 2018</i> )	2018/10/9-12
5	額綱将太 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 林英男 <sup>2</sup> , 榎学 <sup>1</sup>	1: 東京大学, 2: 都立産業技術研究センター	How tramp elements in carbon steel are increased by repeated recycling	The 13th Biennial International Conference on <i>EcoBalance</i> ( <i>EcoBalance 2018</i> )	2018/10/9-12
6	河尻耕太郎 <sup>1</sup> , 天沢逸里 <sup>2</sup> , 菊池康紀 <sup>2</sup> , 木下裕介 <sup>2</sup> , 坂本魁都 <sup>1</sup> , 田原聖隆 <sup>1</sup> , 中野勝行 <sup>3</sup> , 山岸健 <sup>4</sup>	1: 産業技術総合研究所, 2: 東京大学, 3: 立命館大学, 4: 産業環境管理協会	将来技術による環境負荷削減効果評価手法の開発	第14回日本LCA学会研究発表会	2019/3/5-7
7	畑山博樹 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>2</sup> , 田原聖隆 <sup>1</sup>	1: 産業技術総合研究所, 2: 東京大学	素材産業による持続可能な開発目標の捉え方に関する現状分析	第14回日本LCA学会研究発表会	2019/3/5-7
8	田島圭二郎 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 榎学 <sup>1</sup>	1: 東京大学	鉄スクラップへ混入する不純物元素によるリサイクル炭素鋼材機能への影響	エコデザイン・プロダクト&サービスシンポジウム (EcoDePS) 2018	2018/12/05



9	額額将太 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 林英男 <sup>2</sup> , 榎学 <sup>1</sup>	1: 東京大学, 2: 都立産業技術研究センター	炭素鋼中 Cu 濃度変化説明モデルの構築	エコデザイン・プロダクト&サービスシンポジウム (EcoDePS) 2018	2018/12/05
10	中駄将人 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 榎学 <sup>1</sup>	1: 東京大学	ベースメタルの使用済み回収率の時系列評価	エコデザイン・プロダクト&サービスシンポジウム (EcoDePS) 2018	2018/12/05
11	畑山博樹 <sup>1</sup>	1: 産業技術総合研究所	持続可能な開発目標に向けた素材産業の意識	日本鉄鋼協会 環境・エネルギー・社会工学部会 「革新的 LCA による鉄鋼材料の社会的価値の見える化」研究会主催シンポジウム 「鉄鋼材料の負荷の評価から価値の評価へ」	2018/09/19
12	醍醐市朗 <sup>1</sup>	1: 東京大学	開ループリサイクルシステムにおける材料 LCA	シンポジウム「鉄鋼材料の負荷の評価から価値の評価へ」	2018/09/19
13	醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup> , 榎学 <sup>1</sup> , 畑山博樹 <sup>2</sup> , 田原聖隆 <sup>2</sup>	1: 東京大学, 2: 産業技術総合研究所	LCI analysis considering recycling	13th Society and Materials International Conference	2019/05/12
14	畑山博樹 <sup>1</sup>	1: 産業技術総合研究所	鉄鋼業と非鉄金属業の SDGs 報告の比較	日本鉄鋼協会 環境・エネルギー・社会工学部会 「革新的 LCA による鉄鋼材料の社会的価値の見える化」研究会主催シンポジウム 「鉄鋼材料のバリューチェーンにおける価値創出」	2019/09/11
15	畑山博樹 <sup>1</sup>	1: 産業技術総合研究所	SDGs の達成に向けた素材産業の取り組みの動向	2019 年度 第 3 回 SPEED 研究会	2019/09/12
16	森本慎一郎 <sup>1</sup>	1: 産業技術総合研究所	自動車構造材料の将来予測に関する一考察	日本マグネシウム協会	2019/10/31
17	バナシュク ダリナ <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	Methodology for investigation of material degradation during recycling	EcoDesign2019	2019/11/27

18	ドゥヌウイラ パサン <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 濱田航 <sup>1</sup> , パナシユクダリナ <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	Toward an empirical LCI methodology that entails recyclability of metals	第 15 回日本 LCA 学会研究発表会	2020/03/10
19	濱田航 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , ドゥヌウイラ パサン <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	リサイクルを考慮した LCI 分析手法の各材料への適用可能性分析	第 15 回日本 LCA 学会研究発表会	2020/03/10
20	堀江空太 <sup>1</sup> , パナシユクダリナ <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	鉄リサイクルにおける Cu 制約の対策技術の導入による環境負荷評価モデルの構築	第 15 回日本 LCA 学会研究発表会	2020/03/10
21	醍醐市朗 <sup>1</sup> , 濱田航 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup> , 林英男 <sup>2</sup>	1: 東京大学, 2: 東京都立産業技術研究センター	鉄鋼材 LCI に向けたリサイクル性評価のための鉄鋼材中 Cu 濃化の観測	第 15 回日本 LCA 学会研究発表会	2020/03/11
22	Daryna Panasiuk <sup>1</sup> , Ichiro Daigo <sup>1</sup> , Takeo Hoshino <sup>1</sup> , Hideo Hayashi <sup>2</sup> , Eiji Yamasue <sup>3</sup> , Huy Tran Duc <sup>4</sup> , Sprecher Benjamin <sup>5</sup> , Feng Shi <sup>6</sup> , Shatokha Volodymyr <sup>7</sup>	1: The University of Tokyo, 2: Tokyo Metropolitan Industrial Technology Research Institute, 3: Ritsumeikan Univ., 4: Hanoi Univ. of Science and Technology, 5: Leiden University, 6: Institute of Science and Technology for Development of Shandong, 7: National Metallurgical Academy of Ukraine	International comparison of alloying elements content of steel bars	第 15 回日本 LCA 学会研究発表会	2020/03/11
23	濱田航 <sup>1</sup> , ドゥヌウイラ パサン <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	鉄鋼材の LCI 分析手法のコンクリートへの適用	日本鉄鋼協会 第 179 回春季講演大会	2020/03/18
24	堀江空太 <sup>1</sup> , パナシユクダリナ <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂	1: 東京大学	地域の経済発展の違いも考慮した鉄鋼材中の Cu 濃度の将来推計モデルの構築	日本鉄鋼協会 第 179 回春季講演大会	2020/03/18
25	濱田航 <sup>1</sup> , 武山健太郎 <sup>1</sup> , ドゥヌウイラ パサン <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	Comparison of recycling approaches in LCA studies of light-weighting vehicles	エコデザイン・プロダクツ&サービスシンポジウム (EcoDePS) 2020	2020/11/17

26	ドゥヌウイラ パサン <sup>1</sup> , 濱田航 <sup>1</sup> , 武山健太郎 <sup>1</sup> , パナシク ダリナ <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup> , 森本慎一郎 <sup>2</sup> , 田原聖隆 <sup>2</sup>	1: 東京大学, 2: 産業技術総合研究所	評価対象と時系列の考慮による軽量化構造材料の導入による自動車の LCA 結果の違い	エコデザイン・プロダクト&サービスシンポジウム (EcoDePS) 2020	2020/11/17
27	Junxi Liu <sup>1</sup> , ドゥヌウイラパサン <sup>1</sup> , 大西 圭祐 <sup>1</sup> , 濱田航 <sup>1</sup> , パナシクダリナ <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup> , 田原聖隆 <sup>2</sup>	1: 東京大学, 2: 産業技術総合研究所	Toward an empirical LCI methodology that entails recyclability of metals	エコデザイン・プロダクト&サービスシンポジウム (EcoDePS) 2020	2020/11/17
28	正島宏一 <sup>1</sup> , 塚原建一郎 <sup>2</sup> , 田原聖隆	1: TCO2 株式会社, 2: 産業技術総合研究所	時間的拡張を行った LCA データベースの開発と課題	エコデザイン・プロダクト&サービスシンポジウム (EcoDePS) 2020	2020/11/17
29	中西翔太郎 <sup>1</sup> , 田原聖隆 <sup>2</sup> , 塚原建一郎 <sup>2</sup> , 正島宏一 <sup>3</sup> , 神崎昌之 <sup>4</sup> , 醍醐市朗 <sup>5</sup>	1: みずほ情報総研株式会社, 2: 産業技術総合研究所, 3: TCO2 株式会社, 4: 一般社団法人サステナブル推進機構, 5: 東京大学	軽量化構造材料の導入による自動車の LCA ツールの開発	エコデザイン・プロダクト&サービスシンポジウム (EcoDePS) 2020	2020/11/17
30	田原聖隆 <sup>1</sup> , 塚原建一郎 <sup>1</sup> , 森本慎一郎 <sup>1</sup> , 畑山博樹 <sup>1</sup> , 正島宏一 <sup>2</sup> , 中西翔太郎 <sup>3</sup> , 神崎昌之 <sup>4</sup> , 醍醐市朗 <sup>5</sup>	1: 産業技術総合研究所, 2: TCO2 株式会社, 3: みずほ情報総研株式会社, 4: 一般社団法人サステナブル推進機構, 5: 東京大学	時間的空間的拡張による軽量化構造材料の導入による自動車の LCA 手法の開発	エコデザイン・プロダクト&サービスシンポジウム (EcoDePS) 2020	2020/11/17
31	武山健太郎 <sup>1</sup> , 大家直也 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	アルミニウム合金の閉ループリサイクルフローの同定	第 16 回日本 LCA 学会研究発表会	2021/03/03
32	ドゥヌウイラ パサン <sup>1</sup> , 濱田航 <sup>1</sup> , 武山健太郎 <sup>1</sup> , パナシク ダリナ <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup> , 森本慎一郎 <sup>2</sup> , 田原聖隆 <sup>2</sup>	1: 東京大学, 2: 産業技術総合研究所	評価対象と時系列とリサイクルによる回避効果の配分手法の考慮による軽量化構造材料の導入時の自動車の CO2 ペーパーバックタイムの違い	第 16 回日本 LCA 学会研究発表会	2021/03/03

33	Junxi Liu <sup>1</sup> , パナシユクダリナ <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	A material property based LCI analysis model for material selection in light-weighting vehicles	第 16 回日本 LCA 学会研究発表会	2021/03/03
34	山岸健 <sup>1</sup> , 大野慧 <sup>1</sup> , 鶴田祥一郎 <sup>1</sup> , 塚原建一郎 <sup>2</sup> , 田原聖隆 <sup>2</sup>	1: 一般社団法人サステナブル推進機構, 2: 産業技術総合研究所	各種パワートレイン別の乗用車製造インベントリデータの推計	第 16 回日本 LCA 学会研究発表会	2021/03/03
35	田原聖隆 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>2</sup>	1: みずほ情報総研株式会社, 2: 産業技術総合研究所	軽量化材料の導入による自動車のライフサイクルにおける環境影響評価手法	第 16 回日本 LCA 学会研究発表会 (公募企画セッション)	2021/03/03
36	中西翔太郎 <sup>1</sup>	1: みずほ情報総研株式会社	軽量化材料の導入による自動車のライフサイクルにおける環境影響評価ツール	第 16 回日本 LCA 学会研究発表会 (公募企画セッション)	2021/03/03
37	濱田航 <sup>1</sup> , 武山健太郎 <sup>1</sup> , ドゥヌウイラ パサン <sup>1</sup> , パナシユクダリナ <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	材料生産プロセスと材料特性に基づくリサイクルによる環境負荷回避効果の配分係数の決定	第 16 回日本 LCA 学会研究発表会	2021/03/04
38	パナシユクダリナ <sup>1</sup> , 武山健太郎 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	MFA-based estimation of recycling indicators for LCA recycling	第 16 回日本 LCA 学会研究発表会	2021/03/04
39	醍醐市朗 <sup>1</sup> , 濱田航 <sup>1</sup> , 武山健太郎 <sup>1</sup> , ドゥヌウイラ パサン <sup>1</sup> , パナシユクダリナ <sup>1</sup> , 星野岳穂	1: 東京大学	Conditions for selecting an allocation approach of the avoided burden by material recycling in life cycle inventory analysis	EcoBalance 2020	2021/03/04
40	パナシユクダリナ <sup>1</sup> , 武山健太郎 <sup>1</sup> , ドゥヌウイラ パサン <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	MFA-based estimation of recycling indicators for LCA recycling	EcoBalance 2020	2021/03/04
41	Junxi Liu <sup>1</sup> , パナシユクダリナ <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	A material property based LCI analysis model for material selection in light-weighting vehicles	EcoBalance 2020	2021/03/04

42	ドゥヌウイラ パサン <sup>1</sup> , 濱田航 <sup>1</sup> , 武山 健太郎 <sup>1</sup> , パナシユク ダリナ <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup> , 森本慎一郎 <sup>2</sup> , 田原聖隆 <sup>2</sup>	1: 東京大学, 2: 産業技術総合研究所	Influence of different allocation approaches and dynamic inventory on CO2 payback times of light weighted vehicles computed under product- and fleet based analyses: case of internal combustion engine vehicles	EcoBalance 2020	2021/03/04
43	谷和樹 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	マグネシウムのマテリアルフロー分析によるリサイクル可能性の評価	日本鉄鋼協会 第181回春季講演大会	2021/03/17
44	大西圭祐 <sup>1</sup> , 武山健太郎 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	使用済み製品からの鉄鋼材回収率推計における不確実性の低減	日本鉄鋼協会 第181回春季講演大会	2021/03/17
45	ドゥヌウイラパサン <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup> , 畑山博樹 <sup>2</sup> , 田原聖隆 <sup>2</sup> , 正島宏一 <sup>3</sup>	1: 東京大学, 2: 産業技術総合研究所, 3: TCO2株式会社	Novel SLCA method for measuring more-good and less-bad social impacts	第17回日本 LCA 学会研究発表会	2022/03/03
46	大西圭祐 <sup>1</sup> , 武山健太郎 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	動的マテリアルフロー分析と帰帰分析による金属素材の用途別使用済み回収率の推計	第17回日本 LCA 学会研究発表会	2022/03/03
47	パナシユクダリナ <sup>1</sup> , JunxiLiu <sup>1</sup> , ドゥヌウイラパサン <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup>	1: 東京大学	Definition of process boundaries for calculation of recycling indicators for recycling modelling in LCA	第17回日本 LCA 学会研究発表会	2022/03/03
48	武山健太郎 <sup>1</sup> , 醍醐市朗 <sup>1</sup> , 星野岳穂 <sup>1</sup>	1: 東京大学	複数の合金種を含む素材を対象とした閉ループリサイクルの評価指標の構築	第17回日本 LCA 学会研究発表会	2022/03/03
49	畑山博樹 <sup>1</sup>	1: 産業技術総合研究所	金属製造業におけるSDGsへの取り組み方について	令和3年度 軽金属学会 東海支部 軽金属支部セミナー	2022/03/10
50	畑山博樹 <sup>1</sup>	1: 産業技術総合研究所	企業報告書から読み解く陸上鉱物資源開発とSDGsの関係	第29回海洋工学シンポジウム	2022/3/7-8
51	畑山博樹 <sup>1</sup>	1: 産業技術総合研究所	SDG報告に見る金属産業のSDGsへの関わり方	第17回日本 LCA 学会研究発表会	2022/3/2-4
52	田原聖隆 <sup>1</sup>	1: 産業技術総合研究所	材料代替効果定量のための新たな LCA 手法の提案	自動車技術会 フォーラム 2022	2022/07/13

## (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	東京大学	建物解体由来のヘビー鉄スクラップに混在する他素材の実態調査	開発技術 Vol: 25 Page : 63-72	2019/07/31

## (c)プレス発表

なし

## (d)その他

なし

## 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	東京大学, 産業技術総合研究所	EcoBalance 2020 「Can we use a life cycle inventory analysis for material selection? – allocation methodology for the burden avoided by recycling among multiple products` life cycles」	オーガナイズセッション	2021/03/02
2	東京大学, 産業技術総合研究所	第16回日本LCA学会研究発表会 「軽量化材料の導入による自動車のライフサイクルにおける環境影響評価手法の課題」	企画セッション	2021/03/03

## 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	東京大学・大西圭祐	動的マテリアルフロー分析と回帰分析による金属素材の用途別使用済み回収率の推計	第17回日本LCA学会研究発表会学生優秀発表賞	2022/03/04

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	産業技術総合研究所 東京大学	革新的新構造材料等研究開発「2019年度成果報告会」	(ポスター)	2020/02/28 (中止)
2	産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発「2020年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2021/07/01
3	産業技術総合研究所 東京大学	革新的新構造材料等研究開発「2021年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/01/31
4	産業技術総合研究所 東京大学	革新的新構造材料等研究開発「2022年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 5 8] マルチマテリアル信頼性設計技術に関する調査研究 (FS 研究)  
(2018 年度)

[テーマ番号 4 2-IV] 異種軽量金属接合部材信頼性評価の基盤技術研究 (2019 年度、2021~2022 年度)

[テーマ番号 3 5-④] 異種軽金属接合部材信頼性評価の基盤技術研究 (2020 年度)

表 添-9.3-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2018FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2019FY	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0
2021FY	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	0	2	0	5	0	0	0	0	0	0

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ペー ジ番号	査読	発表年 月
1	中津川勲、千野 靖正	産業技術総合研究所	Effect of NaCl Concentration on the Galvanic Corrosion Behavior of a Magnesium AZX611/Aluminum A6N01 Alloy Joint	Journal of The Electrochemical Society, 167, 061501	有	2020/03
2	中津川勲、千野 靖正	産業技術総合研究所	AZX611マグネシウム合金 /A6N01アルミニウム合金 接合材のガルバニック腐 食に及ぼす面積比の影響	軽金属 Vol.71 (2021) 82-88	有	2021/02

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	深谷治彦、早川由夫	産業技術総合研究所	コンピュータで探るマルチマテリアルの反応性～金属接合界面の酸化・腐食反応を例として～	産総研テクノブリッジフェア in 中部（講演会）	2020/12/9
2	中津川勲、千野靖正	産業技術総合研究所	AZX611 マグネシウム合金/ A6N01 アルミニウム合金接合体のガルバニック腐食	軽金属学会第 139 回秋期大会	2020/05/24 (学会発表)
3	深谷治彦	産業技術総合研究所	コンピュータで探るマルチマテリアルの反応性～軽量金属接合界面の酸化・腐食反応を例として～	令和 2 年度 テクノブリッジフェア in 中部	2021/03/08 (講演)
4	斎藤尚文、中津川勲、千野靖正、森久史、成田麻未	産業技術総合研究所、名古屋工業大学	難燃性マグネシウム合金/アルミニウム合金爆発圧着材の界面のミクロ組織と機械的特性に対する熱処理の影響	軽金属学会第 140 回春期大会	2021/05/16 (講演)
5	中津川勲、千野靖正	産業技術総合研究所	Mg-Al 系合金 - A6005C アルミニウム合金接合体のガルバニック腐食に及ぼすマグネシウム合金組成の影響	軽金属学会第 141 回秋期大会	2021/11/14 (講演)

#### (b)新聞・雑誌等への掲載

なし

#### (c)プレス発表

なし

#### (d)その他

なし

### 1.4 展示会への出展

なし



## 1.5 受賞

なし

## 1.6 フォーラム等

なし

[テーマ番号 4 2 -Ⅲ]「材料・接合等技術動向調査研究 Ⅲ. データ等活用拠点  
(仮名称) 計画」(2019 年度～2020 年度)

[テーマ番号 4 2 -Ⅲ①]「材料・接合等技術動向調査研究 Ⅲ. データ等活用拠点  
計画 ①AIST マルチマテリアル信頼性拠点」  
(2021 年度～2022 年度)

表 添-9.4①-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳)【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※
	国内	外国	PCT 出願	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2019FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	4

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

### 9.1 特許

なし

### 9.2 論文

なし

### 9.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

なし

#### (b)新聞・雑誌等への掲載

なし

#### (c)プレス発表

なし

#### (d)その他

なし

#### 9.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	(国研) 産業技術総合研究所	nanoTech2022	パネル	2022/01/26~28

#### 9.5 受賞

なし

#### 9.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	名古屋守山分室 産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発 「2020年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2021/07/01
2	名古屋守山分室 産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/01/31
3	名古屋守山分室 産業技術総合研究所	NEDO「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトシンポジウム	講演、パネルディスカッション	2022/10/21
4	名古屋守山分室 産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 4 2 -Ⅲ②] 材料・接合等技術動向調査研究 Ⅲ. データ等活用拠点計画  
 ②大阪大学接合技術拠点 (2021～2022 年度)

表 添-9.4②-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ーラ ム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス 発 表	その 他			
2021FY	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	0
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	0	2

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

1.1 特許

なし

1.2 論文

なし

1.3 その他外部発表

(a)学会発表・講演 :

なし

(b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	ISMA	ISMAプロジェクト 「マルチマテリアル連携ハブ」創設 大阪大学に接合拠点	溶接ニュース	2022/02/08

(c)プレス発表

なし

#### (d)その他

番号	所属・著者等	タイトル	形式、媒体等	発表年月
1	大阪大学・藤井英俊	超学校 ONLINE 大阪大学リサーチクラウドカフェ第2回「溶かさないで溶接する」の配信を HP で紹介。	Youtube、大阪大学接合技術拠点 HP	2021/5/31
2	大阪大学・藤井英俊	「NEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)のプロジェクト 「ISMA(新構造材料技術研究組合)」の一環として「線形摩擦接合(LFW)と摩擦攪拌接合(FSW)」の説明動画を HP で配信。	大阪大学接合技術拠点 HP	2022/02/22

#### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	大阪大学	nanotech 2022	展示物	2022/01/26~28

#### 1.5 受賞

なし

#### 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	大阪大学	NEDO「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトシンポジウム	講演、パネルディスカッション	2022/10/21
2	大阪大学	革新的新構造材料等研究開発「2022年度成果報告会」	(パネル)、講演	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 4 2 -Ⅲ③] 材料・接合等技術動向調査研究／Ⅲ. データ等活用拠点計画  
 ／③ NIMS 鉄鋼信頼性拠点（2021 年度～2022 年度）

表 添-9.4③-1 特許、論文、外部発表等の件数（内訳） 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2021FY	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0
2022FY	0	0	0	0	0	4	0	0	1	0	0	2
合計	0	0	0	0	0	7	0	0	1	0	1	2

※1：Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

1.1 特許

なし

1.2 論文

なし

1.3 その他外部発表

(a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	津崎兼彰	NIMS	Fracture and Microstructure in High-Strength Steels: How can we get fracture-resistant steels?	The 6 <sup>th</sup> International Symposium on Steel Science-ISSS2022	2021 年 11 月
2	津崎兼彰	NIMS	水素が固溶した金属材料の力学特性	日本金属学会関東支部講習会	2021 年 11 月
3	津崎兼彰	NIMS	Advanced High-Strength Steels as Workhorse of Our Society: Contribution and Importance of Martensite and Martensitic Transformation	Materials Research Meeting 2021	2021 年 12 月

(b)新聞・雑誌等への掲載

なし

(c)プレス発表

なし

#### (d)その他

番号	所属・著者等	タイトル	形式、媒体等	発表年月
1	物質・材料研究機構	「NIMS、研究開発進む超々高張力鋼の実用化を支える鉄鋼信頼性拠点を構築中」	テックプラス・マイナビニュース記事掲載 <a href="https://news.mynavi.jp/techplus/article/20230111-2559122/">https://news.mynavi.jp/techplus/article/20230111-2559122/</a>	2023年1月

#### 1.4 展示会への出展

特になし

#### 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	木村勇次*, 増田浩志, 山口隆司, 長崎英二, 森山仁志, 津崎兼彰*	NIMS*	1700MPa級超高力ボルトの力学性能に及ぼすボルト形状寸法の影響	日本鋼構造協会論文賞

#### 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称※	形式	開催年月日
1	つくば千現分室 物質・材料研究機構	NEDO「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトシンポジウム	講演、パネルディスカッション	2022/10/21
2	つくば千現分室 物質・材料研究機構	革新的新構造材料等研究開発「2022年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 4 2 -Ⅲ④] 材料・接合等技術動向調査研究 Ⅲ. データ等活用拠点計画  
④名古屋大学 (NCC) 拠点

表 添-9.4④-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2021FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

**1.1 特許**

なし

**1.2 論文**

なし

**1.3 その他外部発表**

**(a)学会発表・講演**

なし

**(b)新聞・雑誌等への掲載**

なし

**(c)プレス発表**

なし

**(d)その他**

なし

**1.4 展示会への出展**

なし



## 1.5 受賞

なし

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	名古屋大学	NEDO「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトシンポジウム	講演、パネルディスカッション	2022/10/21
2	名古屋大学	革新的新構造材料等研究開発「2022年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 4 2 -Ⅲ⑤] 材料・接合等技術動向調査研究 Ⅲ. データ等活用拠点計画  
 ⑤京都大学 CAE 拠点 (2021 年度～2022 年度)

表 添-9.4⑤-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ーラ ム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2021FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
合計	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

なし

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

なし

#### (b)新聞・雑誌等への掲載

なし

#### (c)プレス発表

なし

#### (d)その他

なし

### 1.4 展示会への出展

なし

## 1.5 受賞

なし

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	ISMA 再委託先 京都大学	NEDO「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトシンポジウム	講演、パネルディスカッション	2022/10/21
2	ISMA 再委託先 京都大学	革新的新構造材料等研究開発「2022年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 4 4] 中性子線による構造材料解析技術の Feasibility Study  
(2015 年度～2016 年度)

[テーマ番号 5 2] 中性子等量子ビームを用いた構造材料等解析技術の開発  
(2017 年度～2022 年度)

表 添-9.5-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス発 表	その 他			
2013FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2015FY	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0
2016FY	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	1	0
2017FY	0	0	0	4	0	25	3	0	0	0	1	1
2018FY	0	0	0	3	0	27	0	0	0	0	1	1
2019FY	0	0	0	6	0	36	5	1	1	1	2	1
2020FY	1	0	0	2	0	13	4	1	0	0	1	0
2021FY	0	0	0	2	0	15	1	1	0	0	0	2
2022FY	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0	0	1
合計	1	0	0	18	0	125	14	3	1	1	7	6

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT※	出願日	状態	名 称	発明者
1	産業技術総合 研究所	特願 2020- 090685	国内	2020/05/25	公開	電子ビームを標的に照射 するためのダクト及び電子 ビームの制御方法	木野幸一、大 島永康、田中 真人、黒田隆 之助、オロー ク ユージェ ン ブライア ン、満汐孝治

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

## 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	友田陽、他	物質・材料研究機構、他	種々な方法による Mn-Si-C 鋼の残留オーステナイト体積率測定の比較	鉄と鋼（日本鉄鋼協会和文論文誌）	有	2017/10
2	大沼正人、他	北海道大学	Intermediate-angle neutron scattering instrument for quantitative and non-destructive characterization of nanostructures in steels and other alloys	ISIJ International（日本鉄鋼協会発行の欧文学術誌）	有	2017/10
3	友田陽、他	物質・材料研究機構、他	In situ observation on transformation behavior upon heating in a 1.5Mn-1.5Si-0.2C steel	ISIJ International（日本鉄鋼協会発行の欧文学術誌）	有	2017/12
4	池田義雅、他	理化学研究所、他	小型中性子源の現場利用を目指した残留オーステナイト相分率測定手法の開発	鉄と鋼（日本鉄鋼協会和文論文誌）	有	2018/02
5	友田陽、他	物質・材料研究機構、他	In situ neutron diffraction study on ferrite and pearlite transformations for a 1.5Mn-1.5Si-0.2C steel	ISIJ International（日本鉄鋼協会発行の欧文学術誌）	有	2018/11
6	仲道治郎、他	JFE スチール、他	Evaluation of nano Size NbC precipitates in HSLA steel through microstructural analysis and small angle neutron scattering	Materials science forum	有	2018/12
7	木野幸一、他	産業技術総合研究所、他	Design of a compact electron accelerator-driven pulsed neutron facility at AIST	Nuclear instruments and methods in physics research section a: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment	有	2019/02
8	オロークブライアン、他	産業技術総合研究所、他	Design and construction of an electron accelerator for a pulsed neutron facility at AIST	Nuclear instruments and methods in physics research section B (NIMB) proceedings	有	2019/12
9	友田陽	産業技術総合研究所	Crystallographic characterization of steel microstructure using neutron diffraction、	Science and technology of advanced materials (STAM)、20 巻 1 号、1189-1206、(2020)	有	2020/01

10	王 延 緒、他	物質材 料研究 機構、 他	Real time observation of martensite transformation for a 0.4C low alloyed steel by neutron diffraction	Acta materialia	有	2020/01
11	友 田 陽、他	産業技 術総合 研究所、他	In situ neutron diffraction study on ferrite and pearlite transformations for a 1.5 Mn-1.5 Si-0.2 C Steel	2018年度 MLF年報 (MLF annual report 2018)	有	2020/03
12	木野 幸 一、他	産業技 術総合 研究所、他	Newly constructed compact accelerator-based neutron facility at AIST	EPJ web of conferences	有	2020/03
13	友 田 陽、他	物質材 料研究 機構、 他	Influence of carbon concentration and magnetic transition on austenite lattice parameter of 30Mn-C steel	Materials characterization	有	2020/03
14	伊藤 孝 憲	日 産 アーク	量子ビームなどの最新技術を用いた分析解析技術の現状	光アライアンス、10 月、27-38、(2020)	有	2020/10
15	佐 藤 節 夫、 他	高エネ ルギー 加速器 研究機 構	Development of Neutron Intensity Monitors	JPS Conference Proceedings 33, 011090 (1)-(6)	有	2021/03
16	友 田 陽	産業技 術総合 研究所 、 新構造 材料技 術研究 組合	中性子回折による鋼の高温相変態挙動その場計測	ふえらむ（日本鉄鋼 協会会報）Vol.26 p.51-54	有	2021/05
17	高橋 佑 輔	神戸製 鋼所	金属素材の接着接合に関する分析技術	表面分析研究会誌	有	2021/12
18	木野幸一	産業技 術総合 研究所、 新構造 材料技 術研究 組合	Pulsed neutron-beam flux with the supermirror neutronguide system at AISTANS	The European Physical Journal Plus	査読 中	2022/xx

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	大沼 正人、 他	北海道大 学。他	Microstructural characterization of steels by compact neutron source	日本鉄鋼協会第 171 回 春季講演大会	2016/03
2	友田 陽、他	物質・材 料研究機 構	Characterization of austenite by quantum beam diffraction	日本鉄鋼協会第 172 回 春季講演大会	2016/03
3	木野 幸一	産業技術 総合研究 所	小型中性子源の設計検討	文部科学省ナノテクノ ロジープラットフォーム 事業平成 28 年度第 1 回産総研微細構造解析 プラットフォーム設備 利用講習会(兼)平成 28 年度 陽電子ビーム利 用材料評価コンソーシ アム研究会(兼)SIP- IMASM 第 5 回研究会 (革新的構造材料 先 端計測拠点)	2016/05
4	木野 幸一	産業技術 総合研究 所	電子加速器による材料分析用中 性子源の検討	ASIS2016 コンファレン ス 分析計測標準研究 部門第 2 回シンポジウ ム	2016/09
5	友田陽、他	物質・材 料研究機 構、他	大型・小型中性子源連携による 鉄鋼組織解析	日本鉄鋼協会第 172 回 春季講演大会	2016/09
6	仲道治郎、他	JFE スチー ル、他	鉄鋼材料組織解析への中性子解 析技術の適用と期待-中性子小角 散乱を用いた鉄鋼中微細析出物 評価-	理研シンポジウム「現 場で使える理研小型中 性子源 RANS の実用化 に向けた挑戦」	2017/01
7	仲道治郎、他	JFE スチー ル、他	小型中性子線源小角散乱を用い た鋼中微細析出物評価	鉄鋼協会 1 型研究会最 終報告シンポジウム	2017/03
8	友田 陽	物質・材 料研究機 構	In situ measurements of microstructure evolution during heat-treatments for engineering steels using quantum beams	International conference on neutron scattering (ICNS) 2017 (Korea)	2017/07
9	オローク ブライアン	産業技術 総合研究 所、他	産業利用のための直線電子加速 器中性子源の開発	第 14 回日本加速器学 会年会	2017/08
10	オローク ブライアン (小川博嗣の 代理)	産業技術 総合研究 所、新構 造材料技 術研究組 合	小型電子加速器中性子源におけ る中性子ターゲットの設計	第 14 回日本加速器学 会年会	2017/08

11	小川 博嗣	産業技術総合研究所、新構造材料技術研究組合	中性子発生用電子ビームターゲットの開発	JASIS 展 2017	2017/09
12	木野 幸一	産業技術総合研究所、新構造材料技術研究組合	材料分析を目指した小型加速器中性子源の設計	JASIS 展 2017	2017/09
13	木野 幸一	産業技術総合研究所	産業利用のための小型電子加速器中性子源の開発 - 最適なパルス中性子ビーム発生のための中性子源研究	日本原子力学会 2017 年秋の大会	2017/09
14	豊川 弘之	産業技術総合研究所	産業利用のための小型電子加速器中性子源の開発 - 電子入射器システムの概要	日本原子力学会 2017 年秋の大会	2017/09
15	小川 博嗣	産業技術総合研究所	高強度小型中性子源のための電子ビームターゲット構造の最適化	第 60 回放射線化学討論会	2017/09
16	木野 幸一	産業技術総合研究所、新構造材料技術研究組合	小型加速器中性子分析施設の設計	第 60 回放射線化学討論会	2017/09
17	友田 陽	物質・材料研究機構	構造材料研究における中性子散乱の利用	第 60 回放射線化学討論会	2017/09
18	今井 英人	日産アーク	Advanced analytical technologies for multi-materials: initiatives at NISSAN ARC	第 3 回内閣府 SIP 革新的構造材料先端計測拠点 TIA-fraunhofer 合同国際シンポジウム	2017/10
19	友田 陽	物質・材料研究機構	Multi-scaled heterogeneities in elasto-plastic deformation and microstructure in steels	The 5th international symposium on steel science2017 (Kyoto)	2017/11
20	木野 幸一	産業技術総合研究所	産業利用を目指した小型電子加速器中性子源の開発	日本中性子科学会 第 17 回年会	2017/12
21	古坂 道弘	北海道大学	未来を振り返る	日本中性子科学会 第 17 回年会	2017/12
22	大沼 正人	北海道大学	ドーナツ形状の非結合型中性子減速材	日本中性子科学会 第 17 回年会	2017/12
23	小川 博嗣	産業技術総合研究所	小型中性子源のための高強度電子ビームターゲットの開発	2017 年度 理研シンポジウム	2017/12



24	木野 幸一	産業技術 総合研究 所	材料分析を目指した小型加速器 中性子源の設計	2017 年度 理研シンポ ジウム	2017/12
25	木野 幸一	産業技術 総合研究 所	産総研（新構造材料技術研究組 合連携スペース）にて建設中の 小型電子加速器中性子施設につ いて	京大炉におけるビーム 利用のための次期中性 子 源 検 討 V ワ ー ク シヨップ	2018/01
26	小川 博嗣	産業技術 総合研究 所	電子加速器中性子源のための電 子ビームターゲット設計	2017 年度 計量標準総 合センター成果発表会	2018/02
27	木野 幸一	産業技術 総合研究 所	材料分析を目指した小型加速器 中性子源の設計	2017 年度 計量標準総 合センター成果発表会	2018/02
28	オローク ブ ライアン	産業技術 総合研究 所	構造材料解析用中性子源のため の弟子線形加速器の開発	2017 年度 計量標準総 合センター成果発表会	2018/02
29	木野 幸一	産業技術 総合研究 所	産総研（新構造材料技術研究組 合つくば中央梅園分室）中性子 源の現状	JCANS ミーティング （北海道大学工学部）	2018/02
30	木野 幸一	産業技術 総合研究 所	産業利用を目指した小型電子加 速器中性子施設とその利用の研 究	2017 年度量子ビームサ イエンスフェスタ（第 9 回 MLF シンポジウム /第 35 回 PF シンポジウ ム）	2018/03
31	オローク ブ ライアン	産業技術 総合研究 所	構造材料解析用中性子源のため の小型電子加速器の開発	日本原子力学会 2018 年春の年会	2018/03
32	木野 幸一	産業技術 総合研究 所	小型電子加速器中性子施設のパ ルス中性子ビームの特性予測	日本原子力学会 2018 年春の年会	2018/03
33	渡津 章、他	産業技術 総合研究 所、他	構造材料研究のための新しい小 型中性子計測装置	産業技術総合研究所 中部センター オープ ンラボ	2018/06
34	権太 聡、他	産業技術 総合研究 所、他	Advanced instrumentation in NMIJ	The 16th NMIJ-KRISS Summit	2018/07
35	仲道 治郎、 他	JFE ス チール、 他	Evaluation of nano size NbC precipitates in HSLA steel through microstructural analysis and small angle neutron scattering	Thermec'2018	2018/07
36	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	小型電子加速器中性子装置の研 究開発	第 1 回量子ビーム計測 クラブ研究会	2018/07
37	伊藤 孝憲	日産 アー ク	産業界における中性子、放射光 の相補の利用	量子ビーム計測クラブ 第 1 回量子ビーム計測 クラブ研究会	2018/07

38	オローク ブライアン、 他	産業技術 総合研究 所、他	電子加速器ベース中性子源の開 発状況報告 Current status of the development an electron accelerator-based neutron source	第 15 回 日本加速器学会年会	2018/08
39	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	Development of a compact accelerator-based pulsed neutron source and simulation of the neutron beam performance and Bragg edge imaging	11th world conference on neutron radiography	2018/09
40	オローク ブライアン、 他	産業技術 総合研究 所、他	構造材料解析用小型中性子源の 開発	日本原子力学会 2018 年秋の大会	2018/09
41	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	産業利用を目指した小型電子加 速器中性子施設とその利用の研 究	部門シンポジウム (JASIS 展)	2018/09
42	オローク ブライアン、 他	産業技術 総合研究 所、他	Development of a linear electron accelerator-based neutron source for analysis of structural materials	29th linear accelerator conference-LINAC18	2018/09
43	田中 真人、 他	産業技術 総合研究 所、他	産総研における小型電子加速器 を用いた中性子分析装置構築の 現状	第 61 回 放射線化学討 論会	2018/09
44	オローク ブライアン、 他	産業技術 総合研究 所、他	Control and interlock system for an electron accelerator based neutron source	12th international workshop on personal computers and particle accelerator controls (PCaPAC)	2018/10
45	木野 幸一	産業技術 総合研究 所、他	電子加速器を用いた中性子源開 発及び中性子ビームによる材料 分析評価技術の開発	NMIJ 若手研究員成果 報告会(入所 3 年目)	2018/10
46	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	産業利用を目指した小型電子加 速器中性子施設とその利用の研 究	部門シンポジウム (JASIS 展) の報告書	2018/11
47	渡津 章、他	産業技術 総合研究 所、他	構造材料研究のための新しい小 型中性子計測装置	フロンティア材料フェ ア in 中部	2018/12
48	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	日本中性子科学会第 18 回年会	日本中性子科学会第 18 回年会	2018/12
49	木野 幸一	産業技術 総合研究 所、他	産総研設置中性子装置でのハイ パワー電子ビーム使用に関わる 対応状況	複合原子力科学研究所 におけるビーム利用を 中心とした次期中性子 源の検討 I ワーク ショップ	2018/12
50	田中 真人、 他	産業技術 総合研究 所、他	産総研電子加速器施設 産総研つくばセンター電子加速 器施設の現状	第 32 回日本放射光学 学会年会・放射光科学合 同シンポジウム (JSR2019)	2019/01

51	オローク ブライアン、 他	産業技術 総合研究 所、他	構造材料解析用中性子源のため の電子線形加速器の開発	NMIJ 成果報告会	2019/02
52	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	構造材料分析を目指した小型加 速器中性子源の設計	NMIJ 成果報告会	2019/02
53	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	材料分析を目指した産総研設置 小型加速器中性子施設の現状	平成 30 年度理研シン ポジウム 安全・安心 を未来に繋ぐ小型中性 子源 RANS・RANS-II ーものづくり・インフ ラ産業で使える中性子 へ。	2019/02
54	オローク ブライアン、 他	産業技術 総合研究 所、他	産総研設置中性子発生用小型電 子加速器の開発状況	平成 30 年度理研シン ポジウム 安全・安心 を未来に繋ぐ小型中性 子源 RANS・RANS-II ーものづくり・インフ ラ産業で使える中性子 へ。	2019/02
55	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	産総研設置小型加速器中性子施 設の構築状況	第 4 回 TIA 光・量子計 測シンポジウム	2019/03
56	オローク ブライアン、 他	産業技術 総合研究 所、他	構造材料解析用中性子源のため の電子線形加速器の開発	第 4 回 TIA 光・量子計 測シンポジウム	2019/03
57	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	産総研に設置される中性子源の 報告	JCANS17	2019/03
58	王 延緒、他	物質・材 料研究機 構、他	SCM 鋼マルテンサイト変態の サーメックマスターを用いた中 性子回折による検討	日本鉄鋼協会・春季講 演大会	2019/03
59	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	産総研設置中性子源	J-PARC ワークショッ プ 小型から大型中性子源 の施設連携研究会	2019/03
60	オローク ブライアン、 他	産業技術 総合研究 所、他	Development of a dedicated, linear electron-accelerator (LINAC) for a compact neutron source at AIST	13th European conference on accelerators in applied research and technology (ECAART13)	2019/05
61	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	Newly constructed compact accelerator-based neutron facility at AIST	8th international meeting of the union for compact accelerator-driven neutron sources	2019/07
62	オローク ブライアン、 他	産業技術 総合研究 所、他	産総研での小型中性子源用電子 加速器の開発状況報告	第 16 回日本加速器学 会年会	2019/07

63	木野 幸一	産業技術 総合研究 所	加速器中性子源の現状と展望 ～新たなイノベーション創出に むけた中性子科学と加速器科学 の融合～「電子加速器を用いた 小型中性子源と産業利用：加速 器に関する課題」	第 16 回日本加速器学 会年会	2019/07
64	古坂 道弘	産業技術 総合研究 所	小型加速器で生まれる中性子が 飛び交う別世界	第 14 回先進原子力科 学技術に関する連携重 点研究討論会、日本原 子力研究開発機構・量 子科学技術研究開発機 構 施設利用共同研 究、弥生研究会成果報 告会	2019/08
65	黒田 隆之介	産業技術 総合研究 所	産総研加速器施設における光・ 量子ビーム技術の産業利用への 取組みと超電導加速器への期待	応用超電導加速器コン ソーシアム設立記念シ ンポジウム	2019/09
66	松本 隆、他	日産アー ク	「スマート社会に向けた量子 ビーム解析への期待と分析会社 の責務」	産業技術総合研究所分 析計測標準研究部門第 5 回シンポジウム	2019/09
67	木野 幸一	産業技術 総合研究 所	構造材料分析のための中性子 ビーム施設と活用	産業技術総合研究所分 析計測標準研究部門第 5 回シンポジウム	2019/09
68	大島 永康	産業技術 総合研究 所	構造材料分析のための小型中性 子解析装置の開発	先端材料技術展 ( SAMPE Japan ) 「革新的新構造材料等 研究開発」プロジェクトに関するシンポジウ ム	2019/09
69	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	産総研設置の小型電子加速器中 性子施設の現状	日本原子力学会（富山 大学）	2019/09
70	田中 真人、 他	産業技術 総合研究 所、他	産総研つくばセンターにおける 小型電子加速器を用いた中性子 施設の構築の現状	2019 年度第 62 回放射 線化学討論会	2019/09
71	佐藤 節夫、 他	高エネル ギー加速 器研究機 構、他	Development of neutron intensity monitors	The 3rd J-PARC symposium (J- PARC2019)	2019/09
72	オローク ブライアン、 他	産業技術 総合研究 所	Development of a LINAC based neutron source at AIST	The 4th Japan-China joint workshop on positron science (JWPS 2019)	2019/10
73	友田 陽	産業技術 総合研究 所	NEDO「革新的構造材料等研究 開発」における中性子を用いた 構造材料解析に関して	第 2 回量子ビーム計測 クラブ研究会	2019/11
74	木野 幸一	産業技術 総合研究 所	産総研設置の新小型中性子解析 装置の開発	第 2 回量子ビーム計測 クラブ研究会	2019/11

75	オローク ブライアン	産業技術 総合研究 所	新小型中性子解析装置用の電子 加速器の開発	第 2 回量子ビーム計測 クラブ研究会	2019/11
76	友田 陽	産業技術 総合研究 所	New insights on phase transformations in steels revealed by in situ neutron diffraction	3rd Asia-Oceania conference on neutron scattering	2019/11
77	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所	Current status of the new compact accelerator-based neutron facility at AIST	Materials research meeting 2019 Materials innovation for sustainable development goals	2019/12
78	大島 永康	産業技術 総合研究 所	構造材料分析のための小型中性 子解析装置の開発	2019 年度 理研シンポ ジウム	2019/12
79	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所	産総研設置小型加速器中性子施 設の現状	2019 年度 理研シンポ ジウム	2019/12
80	オローク ブライアン、 他	産業技術 総合研究 所、他	産総研設置中性子発生用小型電 子加速器の開発状況	2019 年度 理研シンポ ジウム	2019/12
81	田中 真人、 他	産業技術 総合研究 所、他	産総研電子加速器施設 産総研つくばセンター電子加速 器施設の現状	第 33 回日本放射光学 会年会 放射光科学合 同 シンポジウム (JSR2020)	2020/01
82	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	産総研設置中性子装置の状況	複合原子力科学研究所 におけるビーム利用を 中心とした次期中性子 源の検討Ⅱワーク ショップ	2020/01
83	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	構造材料分析を目指した小型加 速器中性子源からのビーム	2019 年度 計量標準総 合センター成果発表会	2020/02
84	オローク ブライアン、 他	産業技術 総合研究 所、他	構造材料解析用中性子源のため の電子線形加速器の開発	2019 年度 計量標準総 合センター成果発表会	2020/02
85	大沼 正人	北海道大 学	北海道大学中性子源 (HUMS- II) が目指すもの - 「混ざり方」のサイエンスとそ の産業応用	ISMA 中性子解析装置 披露式/産総研中性子 解析施設 (AISTANS) 開所式 並びに小型中 性子産業利用ワーク ショップ	2020/02
86	大竹 淑恵、 他	理化学研 究所	理研小型中性子源システム RANS	ISMA 中性子解析装置 披露式/産総研中性子 解析施設 (AISTANS) 開所式 並びに小型中 性子産業利用ワーク ショップ	2020/02

87	大島 永康	産業技術 総合研究 所	テーマ番号 52 紹介 「中性子等量子ビームを用いた 構造材料等解析技術の開発」	ISMA 中性子解析装置 披露式/産総研中性子 解析施設 (AISTANS) 開所式 並びに小型中 性子産業利用ワーク ショップ	2020/02
88	木野 幸一	産業技術 総合研究 所	AISTANS の特徴と最新データ	ISMA 中性子解析装置 披露式/産総研中性子 解析施設 (AISTANS) 開所式 並びに小型中 性子産業利用ワーク ショップ	2020/02
89	大島 永康	産業技術 総合研究 所	中性子解析装置の紹介	接着・接合技術コン ソーシアム 接着・界面現象研究ラ ボツアー&第7回企業 ワークショップ	2020/02
90	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所	産総研設置中性子装置での ファースト中性子ビーム First neutron beam from a compact neutron source at AIST	量子ビームサイエンス フェスタ	2020/03
91	オローク ブライアン、 他	産業技術 総合研究 所、他	産総研での小型中性子源用電子 加速器の開発状況報告 Current status of the development of an electron accelerator for a compact neutron source at AIST	量子ビームサイエンス フェスタ	2020/03
92	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所、他	産総研設置の小型電子加速器中 性子施設のコミッショニング Commissioning of a compact electron accelerator-driven pulsed neutron facility at AIST	日本原子力学会 2020 年春の年会	2020/03
93	友田 陽、他	産業技術 総合研究 所、他	1.5Mn-1.5Si-0.2C 鋼における フェライト-パーライト変態そ の場中性子回折	日本鉄鋼協会春季講演 大会	2020/03
94	友田 陽	産業技術 総合研究 所、他	Current developments of neutron scattering measurements for steel research	日本鉄鋼協会春季講演 大会国際セッション	2020/03
95	石田 倫教、 他	JFE ス チール株 式会社、 他	中性子小角散乱法を用いた鋼中 ナノサイズ NbC 析出物分布形態 の評価法検討	日本鉄鋼協会第 179 回 春季講演大会シンポジ ウム・茨城県中性子利 用研究会令和元年度第 4回 iMATERIA 研究会	2020/03
96	オローク ブライ アン、他	産業技術 総合研究 所	産総研での小型中性子源用電子 加速器の開発状況	第 17 回日本加速器学 会年会	2020/09
97	木野 幸一、 他	産業技術 総合研究 所	小型電子加速器中性子施設 AISTANS からのファースト中性子 ビーム	日本原子力学会 2020 年秋の大会	2020/09

98	木野幸一、他	産業技術 総合研究 所	小型電子加速器中性子施設 AISTANS における中性子ビームの 測定	日本中性子科学会第 20 回年会	2020/11
99	オローク ブライ アン	産業技術 総合研究 所	中性子発生用電子加速器の開発	NMIJ・量子ビーム計測ク ラブ研究会	2020/11
100	木野 幸一、他	産業技術 総合研究 所	Current status of the compact electron accelerator-driven neutron facility AISTANS	UCANS-Web 2020	2020/11
101	田中 真人、他	産業技術 総合研究 所	産総研における小型電子加速器を 用いた中性子解析施設 (AISTANS)	第 63 回放射線化学討 論会	2020/12
102	田中 真人、他	産業技術 総合研究 所	産総研における小型電子加速器を 用いた中性子解析施設 (AISTANS)の構築の現状	第 34 回日本放射光学 会年会・放射光科学合 同シンポジウム	2021/01
103	木野 幸一、他	産業技術 総合研究 所	構造材料分析を目指した小型加速 器中性子源の中性子ビーム最新状 況	2020 年度計量標準総合 センター成果発表会	2021/02
104	オローク ブライ アン、他	産業技術 総合研究 所	構造材料解析用中性子源のため の電子戦形加速器の開発	2020 年度計量標準総合 センター成果発表会	2021/02
105	木野 幸一、他	産業技術 総合研究 所	New compact electron accelerator- driven neutron facility AISTANS	Asian Forum for Accelerators and Detectors 2021(AFAD 2021)	2021/03
106	木野 幸一、他	産業技術 総合研究 所	小型中性子施設 AISTANS の電子 ビーム強度向上と中性子ビーム評 価	日本原子力学会 2021 年春の大会	2021/03
107	谷山 明	日本製鉄 株式会社	量子ビームを活用した先進組織解 析技術の開発	第 168 回日本金属学会 春季講演大会	2021/03
108	友田 陽	産業技術 総合研究 所	Current developments of neutron scattering measurements for steel research	日本鉄鋼協会第 181 回 春季講演大会	2021/03
109	内藤 昌信	物質・材 料研究機 構、新構 造材料技 術研究組 合	接着界面への水の浸透解析に おける中性子イメージングの 利用	RANS シンポジウム	2021/05
110	木野 幸一	産業技術 総合研究 所	AISTANS の現状	日本中性子施設連携 ワーキンググループ内 での中性子施設の活動状 況報告会	2021/09
111	木野 幸一、他	産業技術 総合研究 所、東工 大、高エネ 研	小型電子加速器中性子施設 AISTANS からのファースト中 性子ビーム First neutron beam from the compact electron accelerator-driven pulsed neutron facility (AISTANS)	日本原子力学会 2021 年秋の大会	2021/09

112	友田 陽、 他	産業技術 総合研究 所、日産 アーク、 新構造材 料技術研 究組合	Neutron Bragg-edge transmission imaging for FSSW-joined Mg alloy plates	10th International Conference on Mechanical Stress Evaluation by Neutron and Synchrotron Radiation MECASENS 2021	2021/11
113	高橋 佑輔	神戸製鋼 所、 新構造材 料技術研 究組合	金属素材の接着接合と表面状 態の関係	日本接着学会 構造 接着・精密接着シン ポジウム	2021/11
114	伊藤 孝憲	日産アーク、新構 造材料技 術研究組 合	異種材接合の中性子全方位散 乱を用いた集合組織解析 “Textures analysis using neutron all directions scattering for different materials junction”	ANSTO（オーストラ リア中性子施設）/ J- PARC Science and Technology Workshop	2021/11
115	木野 幸一	産業技術 総合研究 所	AISTANS におけるスパーミラーガイ ド管による中性子ビームの輸送	日本中性子科学会 第 21 回年会	2021/12
116	田中 真 人、他	産業技術 総合研究 所、東京 工業大学 、 新構造材 料技術研 究組合	産総研つくばセンター電子加 速器施設の現状	第 35 回日本放射光 学会年会・放射光科 学合同シンポジウム	2022/01
117	木野 幸 一、他	産業技術 総合研究 所、東京 工業大学 、 新構造材 料技術研 究組合	構造材料分析を目指した小型 加速器中性子源の中性子ビー ム最新状況	2021 年度計量標準総 合センター成果発表 会	2022/01
118	オローク ブライア ン、他	産業技術 総合研究 所、東京 工業大学 、 新構造材 料技術研 究組合	構造材料解析用中性子源のた めの電子線形加速器の開発	2021 年度計量標準総 合センター成果発表 会	2022/01
119	大沼 正人	北海道大 学	量子ビームによる微細組織解 析 ～ISMA プロジェクトを 中心として	日本金属学会北海道 支部会	2022/01



120	高橋 佑輔 、 伊藤 孝憲	神戸製鋼 所、 日産アーク、 新構造材料技術研究組合	Study of adhesive and adhesion interface structure by spectroscopic analysis	2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL APPLICATIONS OF ADHESIVES 2022	2022/03
121	木野 幸一 、他	産業技術 総合研究所 新構造材料技術研究組合	Neutron performance and its future prospect of the compact electron accelerator-driven neutron facility AISTANS	UCANS9(Union for Compact Accelerator- driven Neutron Source)	2022/03
122	大沼 正人	北海道大 学	How to survive for next two decades? ~ In the case of SANS in Hokkaido University Neutron Source ~	UCANS9(Union for Compact Accelerator- driven Neutron Source)	2022/03
123	高橋 佑輔	神戸製鋼 所	Study of adhesive and adhesion interface structure by spectroscopic analysis	2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL APPLICATIONS OF ADHESIVES 2022	2022/03
124	大島 永康	産業総合 技術研究所、新構 造材料技術研究組 合	産業界が使いやすい中性子源 を目指して～AISTANS の起 動	第3回中性子産業利 用の研究会 (茨城県中性子利用 研究会 令和4年度 第1回 iMATERIA 研究会 合同開催)	2022/04
125	高橋 佑輔	神戸製鋼 所、新構 造材料技術研究組 合	金属素材の接着接合技術	日本アルミニウム協 会 車両委員会 技術と情報 第19 回講演会	2022/07

### (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	産業技術総合研究所	構造材料開発の高度化を目指した小型加速器中性子施設の構築に着手	産総研ニュースでの web 掲載	2017/08
2	産業技術総合研究所	構造材料高度化へ中性子分析施設	化学工業日報	2017/08
3	産業技術総合研究所	小型の加速器中性子施設を設置	鉄鋼新聞	2017/08
4	新エネルギー・産業技術総合開発機構、新構造材料技術研究組合、産業技術総合研究所	NEDO など 小型中性子解析装置を開発 センチ厚も非破壊で	日刊産業新聞	2020/01

5	新エネルギー・産業技術総合開発機構、新構造材料技術研究組合、産業技術総合研究所	NEDO ら 非破壊分析用小型中性子解析装置を開発	オプトロニクスオンライン	2020/01
6	新エネルギー・産業技術総合開発機構、新構造材料技術研究組合、産業技術総合研究所	非破壊で厚い金属検査 NEDO 小型中性子解析装置	化学工業日報	2020/01
7	新エネルギー・産業技術総合開発機構、新構造材料技術研究組合、産業技術総合研究所	NEDO など 小型中性子解析装置開発、非破壊で分析	日刊ケミカルニュース	2020/02
8	産業技術総合研究所	産総研中性子解析施設 (AISTANS) の開所式典等を開催 - 中性子を活用した非破壊分析等産業利用の更なる発展を目指して -	産総研つくばセンターニュースでの web 掲載	2020/02
9	株式会社日産アーク、新構造材料技術組合 (夏島分室)	量子ビームなどの最新技術を用いた分析解析技術の現状	光アライアンス	2020/10
10	産業技術総合研究所、新構造材料技術研究組合 (つくば中央梅園分室)	産業技術総合研究所の新規中性子解析施設 (AISTANS) の紹介	放射線化学会 会誌 110 号	2020/10
11	産業技術総合研究所、新構造材料技術研究組合 (つくば中央梅園分室)	小型加速器駆動中性子解析施設 AISTANS の開発	日本加速器学会誌「加速器」 Vol.17 No.3	2020/10
12	産業技術総合研究所、新構造材料技術研究組合 (つくば中央梅園分室)	Opening ceremony for AISTANS	NMIJ News Letter No.12	2020/11
13	株式会社日産アーク、新構造材料技術研究組合	AI 接着界面の走査型透過 X 線顕微鏡による観察	Photon Factory News No.39	2021/08
14	産業技術総合研究所 新構造材料技術研究組合	構造材料研究における小型中性子源の活用	日本中性子科学会会誌「波紋」2022 年 11 月号	2022/11

### (c)プレス発表

番号	所属	タイトル	発表形式	発表年月
1	新エネルギー・産業技術総合開発機構、新構造材料技術研究組合、産業技術総合研究所	輸送機器の構造材料・部品分析向けに小型中性子解析装置を開発 —センチメートル厚の金属部品内部の結晶情報を非破壊で分析可能—	メディア投げ込み、web掲載	2020/01
2	産業技術総合研究所、新構造材料技術研究組合（つくば中央梅園分室）	産総研中性子解析施設（AISTANS）の開所式典等を開催—中性子を活用した非破壊分析等産業利用の更なる発展を目指して	産総研・つくばセンターニュース	2020/04
3	日産アーク、神戸製鋼所、新構造材料技術研究組合	Photon Factory での産業利用ユーザーグループの取り組み	日産アーク・トピックス・お知らせ	2021/09

### (d)その他

番号	所属・著者等	タイトル	形式、媒体等	発表年月
1	新構造材料技術研究組合、産業技術総合研究所	ISMA 中性子解析装置披露式/産総研中性子解析施設(AISTANS)開所式	式典を主催にて開催	2020/02

### 1.4 展示会への出展

番号	所属	展示会名	出展形式	開催年月日
1	新エネルギー・産業技術総合開発機構、新構造材料技術研究組合、産業技術総合研究所	nano tech 2020 第19回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議、“中性子による材料・マルチマテリアル構造の非破壊イメージング技術の開発”	展示会（NEDOブース）	2020/01/9-31

### 1.5 受賞

番号	所属・氏名	タイトル	受賞名	受賞年月日
1	物質材料研究機構、新構造材料技術研究組合・友田 陽	中性子鉄鋼材料強度学の開拓	学会賞・西山賞（日本鉄鋼協会）	2016/03
2	物質材料研究機構、新構造材料技術研究組合・友田 陽	鉄鋼の熱処理によるマイクロ組織制御のその場中性子散乱回折による解析	学術功績賞・林賞（日本熱処理技術協会）	2016/05

3	北海道大学・古坂 道弘	先導的なパルス中性子源散乱装置および測定技術の開発	第 15 回日本中性子科学会学会賞	2017/12/02
4	物質材料研究機構、新構造材料技術研究組合・友田 陽	中性子線による金属材料の組織と弾塑性変形挙動の解析	まてりあ賞（日本金属学会）	2018/09/19
5	産業技術総合研究所、新構造材料技術研究組合（つくば中央梅園分室）・友田 陽、他	In-situ neutron diffraction study on ferrite and pearlite transformations for a 1.5Mn-1.5Si-0.2C Steel	澤村論文賞	2019/09/20
6	産業技術総合研究所、新構造材料技術研究組合（つくば中央梅園分室）・友田 陽	鉄鋼材料のマイクロ組織制御と力学特性解析に関する研究	製鉄功労賞	2020/03/17
7	日本製鉄株式会社、新構造材料技術研究組合（富津分室）	産総研中性子解析施設（AISTANS）の開所式典等を開催－中性子を活用した非破壊分析等産業利用の更なる発展を目指して－	第 62 回日本金属学会技術賞	2021/03/16

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発「平成 29 年度成果報告会」	ポスター、発表	2018/01/26
2	産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発「平成 30 年度成果報告会」	ポスター、発表	2019/01/21
3	北海道大学 理化学研究所 産業技術総合研究所	小型中性子産業利用ワークショップ	発表	2020/02/25
4	産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発「2019 年度成果報告会」	（ポスター、発表）	2020/02/28 （中止）
5	産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発「2020 年度成果報告会」	（ポスター）、発表	2021/07/01
6	産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発「2021 年度成果報告会」	（ポスター）、発表	2022/01/31
7	産業技術総合研究所	革新的新構造材料等研究開発「2022 年度成果報告会」	（ポスター）、発表	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

[テーマ番号 5 7] 超高強度化材料の潤滑加工性向上と異種材料接合部の塗装後耐食性向上技術の開発 (FS 研究) (2018 年度)

[テーマ番号 6 5] マルチマテリアル車体における防食表面処理評価技術の開発 (2019 年度～2022 年度)

表 添-9.6-1 特許、論文、外部発表等の件数 (内訳) 【2023 年 2 月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス 発 表	その 他			
2019FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020FY	0	0	0	0	0	2	1	0	0	1	0	0
2021FY	0	0	0	1	0	5	2	0	0	0	0	0
2022FY	0	0	0	1	0	8	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	0	5	0	14	3	0	0	1	0	0

※1 : Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2 : 実施者が主体的に開催するイベント (フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Tran Van Nam, Azusa Ooi, Eiji Tada, Atsushi Nishikata	東京工業大学 物質理工学院	EIS Characteristics of Galvanic Couple of Aluminum Alloy and High-strength Steel under Thin Solution Films.	Journal of Electrochemical Society,p167	有	2020/10
2	梅田真裕, 小崎匠, 吉岡信明	日本パーカラライジング(株)	マルチマテリアル車体におけるガルバニック腐食評価技術の開発	日本パーカラライジング技報 34 号	有	2022/1/27
3	藤田栄, 小崎匠, 芹澤久	ISMA,日本パーカラライジング(株),大阪大学接合科学研究所	異種材料接合とガルバニック腐食	日本材料強度学会増刊号, 55, p19-26	有	2022/5

4	小崎 匠, 梅田真裕	日本 パーカライ ジング (株)	融雪塩散布地域環境を再現可能 なガルバニック腐食評価法の提 案	表面技術協会 8月号	有	2022/8
5	小崎 匠, 梅田真裕	日本 パーカライ ジング (株)	融雪塩散布地域環境を再現可能 なガルバニック腐食評価法の提 案	日本パーカライジング技 報 35号	有	2023/1

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番 号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	小崎 匠	日本パーカライジ ング(株)	マルチマテリアル腐食 評価技術について	SAMPE Japan NEDO「革新的 新構造材料等研 究開発」プロ ジェクトシンポ ジウム	2019/9/6
1	K. Noguchi, E. Tada, A. Ooi, A. Nishikata	東京工業大学 物質 理工学院	Galvanic Corrosion Behavior of Al Alloy A6061 / High-Tensile Strength Steel Couples Jointed By Friction Stir Lap Welding in an NaCl Solution	PRiME2020 (Online)	2020/10/4
2	N. V. Tran, A. Ooi, E. Tada, A. Nishikata	東京工業大学 物質 理工学院	EIS Study of Galvanic Corrosion of Al Alloy Coupled with High Strength Steel in Simulated Atmospheres	PRiME2020 (Online)	2020/10/4
3	小崎 匠	日本パーカライジ ング(株)	実腐食環境に則したガ ルバニック腐食評価技 術と防食表面処理技術 の開発	オートモーティ ブワールド 2021	2021/1/21
4	小崎 匠	日本パーカライジ ング(株)	実腐食環境に則したガ ルバニック腐食評価技 術と防食表面処理技術 の開発	自動車腐食防食 学会 第29回幹部会	2021/2/22
5	野口光太 郎, 多田英 司, 大井 梓, 西方 篤	東京工業大学 物質 理工学院	NaCl 水溶液中におけ る摩擦攪拌接合法によ り作製した Al 合金/ 鉄鋼対の初期腐食挙動 に及ぼす Al 合金組織 の影響	第68回材料と環 境討論会	2021/10/26- 28

6	小崎 匠	日本パーカライジング (株)	実腐食環境に則したガルバニック腐食評価技術	ISO TC156 WG6 定例会	2021/7/13
7	Takumi Kozaki, Masahiro Umata, Takahiro Momii, Yoshiyuki Oya, Yoshihiko Kyo, Sakae Fujita	Nihon Parkerizing.Co.,Ltd. UACJ, ISMA	Research for Proposing Guidelines for Galvanic Corrosion Evaluation of Multi-Material Automotive bodies	MRM2021 Material Research Meeting	2021/12/15
8	小坂豪志、 荘司郁夫、 小林竜也	群馬大学大学院理工学 府	Ti 系化成処理による鋼/Al 合金接着剤継手の耐久性向上効果	日本金属学会 2022 年秋期講演大会	2022/9/6
9	J. Jang, 多 田英司, 大 井 梓	東京工業大学 物質 理工学院	Galvanic corrosion behavior of Zn and Al couples in NaCl solutions	2022 年電気化学会 秋季大会	2022/9/8-9
10	J. Jang, 多 田英司, 大 井 梓	東京工業大学 物質 理工学院	NaCl 中における Zn/Al 対のガルバニック腐食挙動の EIS 法による検討	日本金属学会 2022 年秋期 (第 171 回) 講演大会	2022/9/20-23
11	小崎 匠	日本パーカライジング (株)	実腐食環境に則したガルバニック腐食評価技術と防食表面処理技術の開発	自動車技術会 フォーラム 2022 (22FORUM-14)	2022/7/13
12	榎井 隆宏, 京良彦,村田 拓也,小崎 匠,梅田真裕	株式会社 UACJ, 日本 パーカライジング (株)	ガルバニック腐食試験法の開発とガルバニック腐食評価	材料と環境	2022/10/5-6
13	小崎匠, 沖 修一, 佐藤 晃, 鈴木拓 真, 小池正俊	日本パーカライジ ング (株), SUBAR (株)	実車走行車での腐食モニタリング	材料と環境	2022/10/5-6
14	小崎 匠	日本パーカライジ ング (株)	マルチマテリアル構造車体の板合わせ内部の平衡論的考察による腐食モデル提案	材料と環境	2022/10/5-6
15	梅田 真裕, 小崎匠	日本パーカライジ ング (株)	実車走行試験によるマルチマテリアル構造車体を想定したガルバニック腐食解析	材料と環境	2022/10/5-6

## (b)新聞・雑誌等への掲載

番号	所属	タイトル	掲載誌名	発表年月
1	東京工業大学 物質理工学院	EIS Characteristics of Galvanic Couple of Aluminum Alloy and High-strength Steel under Thin Solution Films.	Journal of Electrochemical Society	2020/10
2	日本パーカライジング(株) (株)UACJ 東京工業大学	異種金属接合	化学工業日報	2019/10/7

## (c)プレス発表

なし

## (d)その他

なし

## 1.4 展示会への出展

なし

## 1.5 受賞

なし

## 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	日本パーカライジング	革新的新構造材料等研究開発 「2019年度成果報告会」	(ポスター、講演)	2020/2/28 (中止)
2	日本パーカライジング	革新的新構造材料等研究開発 「2020年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2021/7/1
3	日本パーカライジング	革新的新構造材料等研究開発 「2021年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/1/31
4	日本パーカライジング	革新的新構造材料等研究開発 「2022年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）



[テーマ番号 6 5 B] 「マルチマテリアル車体におけるガルバニック腐食のシミュレーション技術の開発」(2021年度～2022年度)

表 添-9.7-1 特許、論文、外部発表等の件数(内訳) 【2023年2月末現在】

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表				展示 会へ の出 展	受賞	フォー ラム等 ※2
	国内	外国	PCT 出願 ※1	査読 付き	その 他	学会 発表 ・ 講演	新聞・ 雑誌等 への 掲載	プレ ス 発 表	その 他			
2021FY	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1
2022FY	0	0	0	1	0	16	0	0	3	0	0	1
合計	0	0	0	1	0	17	0	0	4	0	0	2

※1: Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

※2: 実施者が主体的に開催するイベント(フォーラム、シンポジウム等)

### 1.1 特許

なし

### 1.2 論文

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年月
1	Mariko Kadowaki, Hideki Katayama, Masahiro Yamamoto	NIMS	Galvanic Corrosion Behavior of AA6016/SM490 Couple during Wet-Dry Cycles in NaCl-containing Droplets: Effect of Fe rust on Corrosion Acceleration	Journal of The Electrochemical Society (査読中)	有	

### 1.3 その他外部発表

#### (a)学会発表・講演

番号	発表者	所属	タイトル	会議名	発表年月
1	小崎 匠、佐藤 晃	SUBARU	実車走行車での腐食モニタリング	腐食防食学会 第69回 材料と環境討論会	2022/10/4
2	近藤展代, 猪又豊生, 川口博史, 浅井幹雄, 片山英樹	NIMS	Al/鋼マルチマテリアル構造車体における腐食境界条件の抽出	腐食防食学会 第69回 材料と環境討論会	2022/10/4
3	門脇万里子、片山英樹	NIMS	AA6016 合金/鋼突き合せ部のガルバニック腐食挙動におよぼす塩化物濃度の影響	腐食防食学会 材料と環境 2022	2022/05/27

4	門脇万里子、 片山英樹、 山本正弘	NIMS	有限要素法による Al 合金/鋼突 合せ部の NaCl 溶液中でのガルバ ニック腐食機構の解析	腐食防食学会 第 69 回 材料と環境討論会	2022/10/4
5	片山英樹、大 沼郁雄、門脇 万里子	NIMS	マルチマテリアル構造部位にお けるガルバニック腐食挙動理解 のための計算シミュレーション の構築	腐食防食学会 第 69 回 材料と環境討論会	2022/10/4
6	藤本慎司	大阪大学	腐食現象の数値モデル化の課題	日本金属学会 2022 年秋 期大会	2022/09/22
7	藤本慎司	大阪大学	ハイテン/Al 板合わせ部位にお けるガルバニック腐食の計算シ ミュレーション	腐食防食学会第 69 回材 料と環境討論会	2022/10/4
8	野村耕作、庄 司淳、北川裕 一、長谷川靖 哉、伏見公志	北海道大 学	鋼と Al 合金のすき間内部に形成 した腐食生成物の膜電位測定	化学系学協会北海道支 部 2022 年冬季研究発表 会	2021/01/25
9	野村耕作、伏 見公志	北海道大 学	異種金属のすき間内部に形成し た腐食生成物の膜電位測定	材料と環境 2022	2022/05/27
10	野村耕作、坂 入正敏、伏見 公志	北海道大 学	炭素鋼/CFRTP すき間内部に形 成したガルバニック腐食生成物 のイオン選択性	電気化学会北海道支部 50 周年記念若手研究者 発表会	2022/06/11
11	K. Fushimi, K. Nomura, S. Shoji, Y. Kitagawa, Y. Hasegawa	Hokkaido Univ.	Ion selectivity of corrosion products formed in the crevice of steel and aluminum alloy	EUROCORR2022	2022/08/31
12	野村耕作、坂 入正敏、伏見 公志	北海道大 学	マルチマテリアル板合わせ部内 に生成した腐食生成物のイオン 選択性	第 69 回材料と環境討論 会	2022/10/04
13	渡部梨子、星 芳直	名古屋工 業大学	アルミニウム合金/ハイテン対の ガルバニック腐食評価に対する 電気化学インピーダンス法の適 用	2022 年電気化学秋季大 会	2022/9/9
14	星 芳直、渡 部梨子	名古屋工 業大学	3D インピーダンス法によるアル ミニウム合金/ハイテン対のガル バニック腐食解析	第 69 回材料と環境討論 会	2022/10/4
15	坂入正敏	北海道大 学	Galvanic corrosion behavior of metals at low temperature	Eurocorr2022	2022/8/31
16	坂入正敏	北海道大 学	マルチマテリアル構造車体の低 温塩害環境での腐食挙動	第 69 回材料と環境討論 会	2022/10/4
17	武藤 泉、西本 昌史、菅原 優	東北大学	CFRTP/ハイテン鋼のガルバニッ ク腐食挙動と腐食機構解析	(公社)腐食防食学会第 69 回材料と環境討論会	2022/10/4

(b)新聞・雑誌等への掲載

なし

### (c)プレス発表

なし

### (d)その他

番号	所属・著者等	タイトル	形式、媒体等	発表年月
1	NIMS・片山英樹	マルチマテリアル車体におけるガルバニック腐食のシミュレーション技術の開発	講演、ISMA2021 年度成果報告会	2022/01/31
2	北海道大学・坂入正敏	金属の腐食に及ぼす雪と温度の影響	講演、ISMA 成果発表会@北大	2022/07/22
3	北海道大学・伏見公志	革新構造材料腐食生成物のその場評価技術	講演、ISMA 成果発表会@北大	2022/07/22
4	大阪大学・藤本慎司	腐食シミュレーション	講演、ISMA 成果発表会@阪大	2022/08/01

### 1.4 展示会への出展

なし

### 1.5 受賞

なし

### 1.6 フォーラム等

番号	所属	フォーラム等の名称	形式	開催年月日
1	NIMS	革新的新構造材料等研究開発 「2021 年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/1/31
2	NIMS	革新的新構造材料等研究開発 「2022 年度成果報告会」	(ポスター)、講演	2022/12/20

※：実施者が主体的に開催するイベント（フォーラム、シンポジウム等）

## 2. 分科会公開資料

次ページより、推進部署・実施者が、分科会において事業を説明する際に使用した資料を示す。

## 資料 5

# 「革新的新構造材料等研究開発」(終了時評価)

2014年度～2022年度 9年間

## プロジェクトの概要 (公開版)

2023年4月21日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

材料・ナノテクノロジー部

主査・プロジェクトマネージャー

小川 貴弘

# 革新的新構造材料等研究開発

材料・ナノテクノロジー部 小川 (PM)  
高性能材料 (構造材料) 分野の技術戦略

## プロジェクトの概要

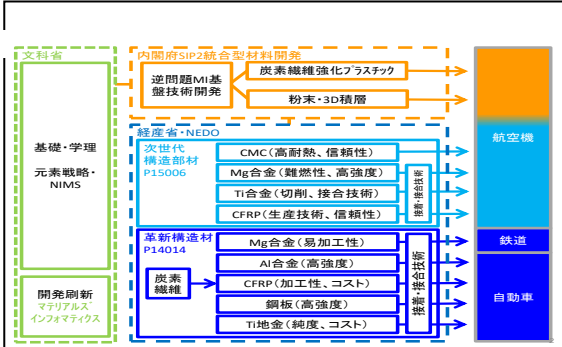
自動車燃費改善、電費向上に係る課題には、動力機関の効率向上、電池性能向上、車両の軽量化、空気抵抗軽減などがある。中でもエンジン燃焼効率の向上や電池容量の向上に向けた研究開発は精力的に取り組まれている。これに加えて車両の軽量化もまた、燃費改善、航続距離延伸に繋がる重要な取組課題の一つになっている。

本事業では、自動車、航空機、鉄道車両等の抜本的な軽量化 (半減) に向けて、革新的なアルミニウム材、チタン材、マグネシウム材、鋼板、炭素繊維及び炭素繊維強化樹脂 (CFRP)、これらの材料を適材適所に使うために必要なマルチマテリアル技術・接合技術の開発等を実施する。

運輸部門における二酸化炭素排出量 (2016年度)

自動車全体で運輸部門の86.2% (我が国全体の15.4%)

## 既存プロジェクトとの関係



## 想定する出口イメージ等

**アウトプット目標**

自動車や鉄道車両メーカーのニーズに基づき、各材料 (Ti合金、Mg合金、Al合金、革新鋼板、CFRP等) の高性能化・低コスト製造プロセス開発・設計加工技術開発の目標を設定。

- マルチマテリアル技術：マルチマテリアル設計車体の提案
- 接合技術：目標は組み合わせ毎に設定
- 革新チタン材：引張強度・延性バランスを30%以上向上、自動車部材の試作
- 革新アルミ材：引張強度750MPa、伸び12%以上、自動車部材の試作
- 革新マグネ材：引張強度270MPa、伸び20%以上、高速鉄道車両モックアップ構体試作
- 革新鋼板：引張強度1500MPa以上、伸び20%以上、汎用鋼並み耐食性・水素脆性確保
- 熱可塑性CFRP：大型部材の高速成形技術確立と車体構造への適用
- 革新炭素繊維：耐炎化工程不要の製造技術開発 (引張弾性率240GPa、強度4GPa)

**アウトカム目標**

自動車車両軽量化目標：半減@2030年

二酸化炭素排出量：374万tCO<sub>2</sub>/年  
原油使用量削減効果：719億円/年

**出口戦略 (実用化見込み)**

運輸機器の軽量化を実現する構造素材の研究開発を推進し、世界各国の環境規制に適合した輸送機器の生産につなげる。開発が完了した研究テーマは順次企業研究へと移行する。

**グローバルポジション**

開始 (2013年) → 事業終了時 (2023年)

- 接合技術 : RA~DH → DH
- 革新チタン材 : DH → DH~LD
- 革新アルミ材 : RA → DH
- 革新マグネ材 : RA → DH
- 革新鋼板 : DH → DH~LD
- 熱可塑性CFRP : DH~LD → LD
- 革新炭素繊維 : LD → LD

LD：リーディング  
DH：デッドヒート  
RA：ランアフター

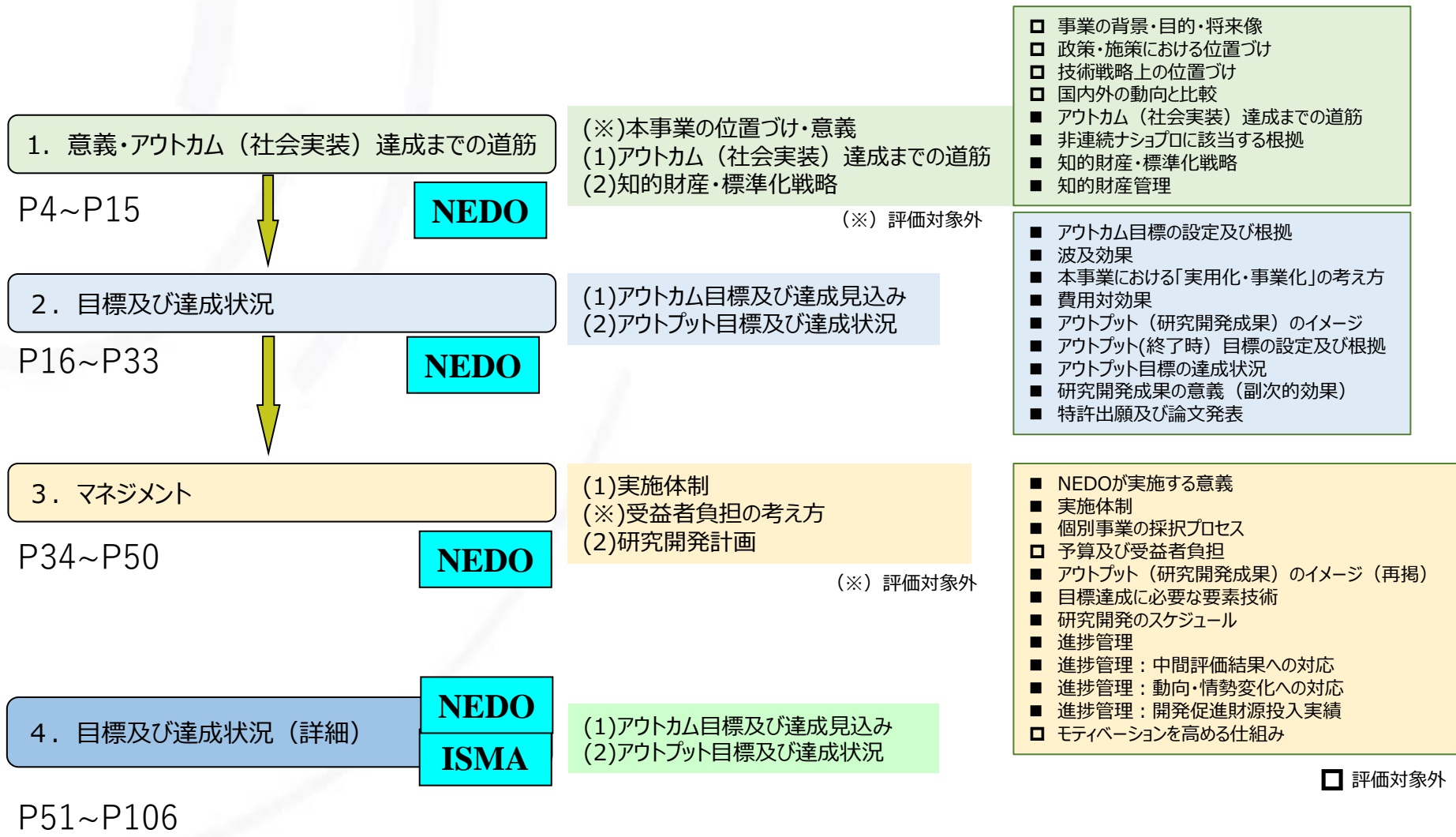
## 事業計画

期間：2013~2022年度 (10年間)  
総事業費 (NEDO負担分)：およそ378億円 (委託)

**<研究開発スケジュール・評価時期・想定する予算規模>**

	第2期		第3期			第4期		2023
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
マルチマテリアル			マルチマテリアル設計技術の開発					
接合技術	プロセス条件確認	構造部材開発	実用化課題の解決、大型部材へ適用技術					
革新チタン材	ラボプロセス検証		大型試験設備による検証					
革新アルミ材		大型設備化検討	大型部材への適用技術開発					マルチマテリアル化構造の部材、車体の実証 信頼性評価技術による検証
革新マグネ材	車両用素材開発	小型構体試作	大型構体製造技術 MI活用技術開発					
革新鋼板	ハイテン加工性評価		ハイテン素材の信頼性向上技術開発					
熱可塑性CFRP	車体の部分的最適設計		大型構体製造技術の確立					
革新炭素繊維	異形炭素繊維製造技術確立		耐炎化工程不要製造技術開発					
戦略基盤	技術動向調査	基盤技術検討	技術動向調査					
評価時期		中間評価			中間評価			終了時評価
予算 (億円)	37.1	37.2	35.1	28.3	36.2	30.2	26.9	

# 報告内容



5-1

## <評価項目 1> 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

(※) 本事業の位置づけ・意義 \* 評価対象外

(1) アウトカム（社会実装）達成までの道筋

(2) 知的財産・標準化戦略



# 報告内容



## 1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

NEDO

(※)本事業の位置づけ・意義  
(1)アウトカム（社会実装）達成までの道筋  
(2)知的財産・標準化戦略

(※) 評価対象外

## 2. 目標及び達成状況

NEDO

(1)アウトカム目標及び達成見込み  
(2)アウトプット目標及び達成状況

## 3. マネジメント

NEDO

(1)実施体制  
(※)受益者負担の考え方  
(2)研究開発計画

(※) 評価対象外

## 4. 目標及び達成状況（詳細）※

NEDO

ISMA

(1)アウトカム目標及び達成見込み  
(2)アウトプット目標及び達成状況

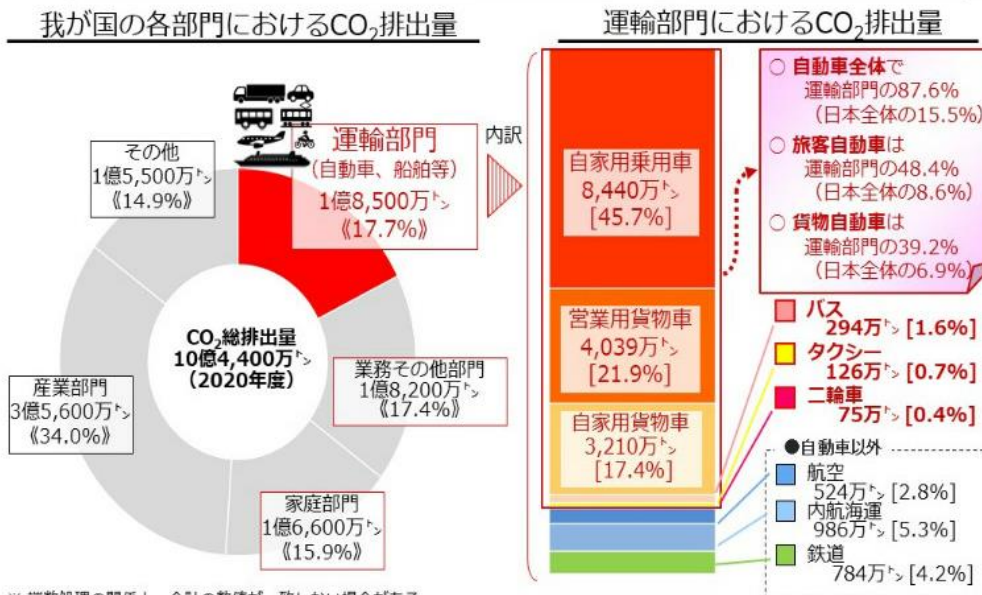
- 事業の背景・目的・将来像
- 政策・施策における位置づけ
- 技術戦略上の位置づけ
- 国内外の動向と比較
- アウトカム（社会実装）達成までの道筋
- 非連続ナショプロに該当する根拠
- 知的財産・標準化戦略
- 知的財産管理

□ 評価対象外

# 事業の背景・目的・将来像

- 国内年間CO<sub>2</sub>排出総量は約10億44百万トン。うち運輸部門は約17.7%（約1億8200万トン）を排出。自動車は運輸部門の88%を占め、日本全体の16%を排出している。
- 国内のエネルギー消費量は1.2万PJ。うち運輸部門は約22%を消費、その内訳はガソリン、軽油、LPガス、潤滑油等、石油系エネルギーを98%利用している。
- **自動車の燃費改善技術は非常に社会的影響が大い**

## 運輸部門における二酸化炭素排出量



※ 端数処理の関係上、合計の数値が一致しない場合がある。  
 ※ 電気事業者の発電に伴う排出量、熱供給事業者の熱発生に伴う排出量は、それぞれの消費量に応じて最終需要部門に配分。  
 ※ 温室効果ガスインベントリオフィス「日本の温室効果ガス排出量データ（1990～2020年度）確報値」より国土交通省環境政策課作成。  
 ※ 二輪車は2015年度確報値までは「業務その他部門」に含まれていたが、2016年度確報値から独立項目として運輸部門に算定。

出典  
 2022年国土交通省HP  
 運輸部門における二酸化炭素排出量

# 政策・施策における位置づけ

## 革新的新構造材料等研究開発は経産省未来開拓プロジェクトの一つ

### 1. リスクの高い中長期的テーマ

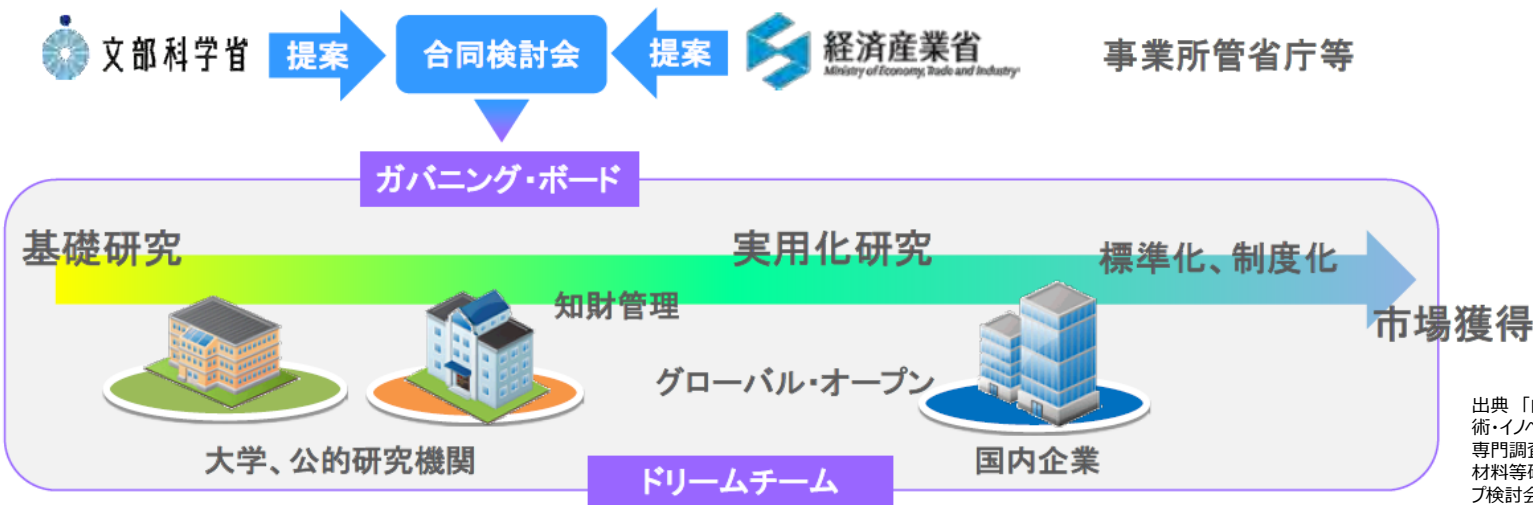
- 短期の対策に加え、事業化まで10年を超えるような、**リスクが高い研究開発を国が主導**
- エネルギー・環境制約など、抜本的な対策が必要な分野に集中投資

### 2. 省庁の枠を超えた連携

- 経産省、文科省の局長級をヘッドとする**合同検討会**で連携テーマを設定
- 両省のプロジェクトを一体的に運営する**ガバニング・ボード**を設置、**基礎から事業化まで一気通貫**

### 3. ドリームチーム

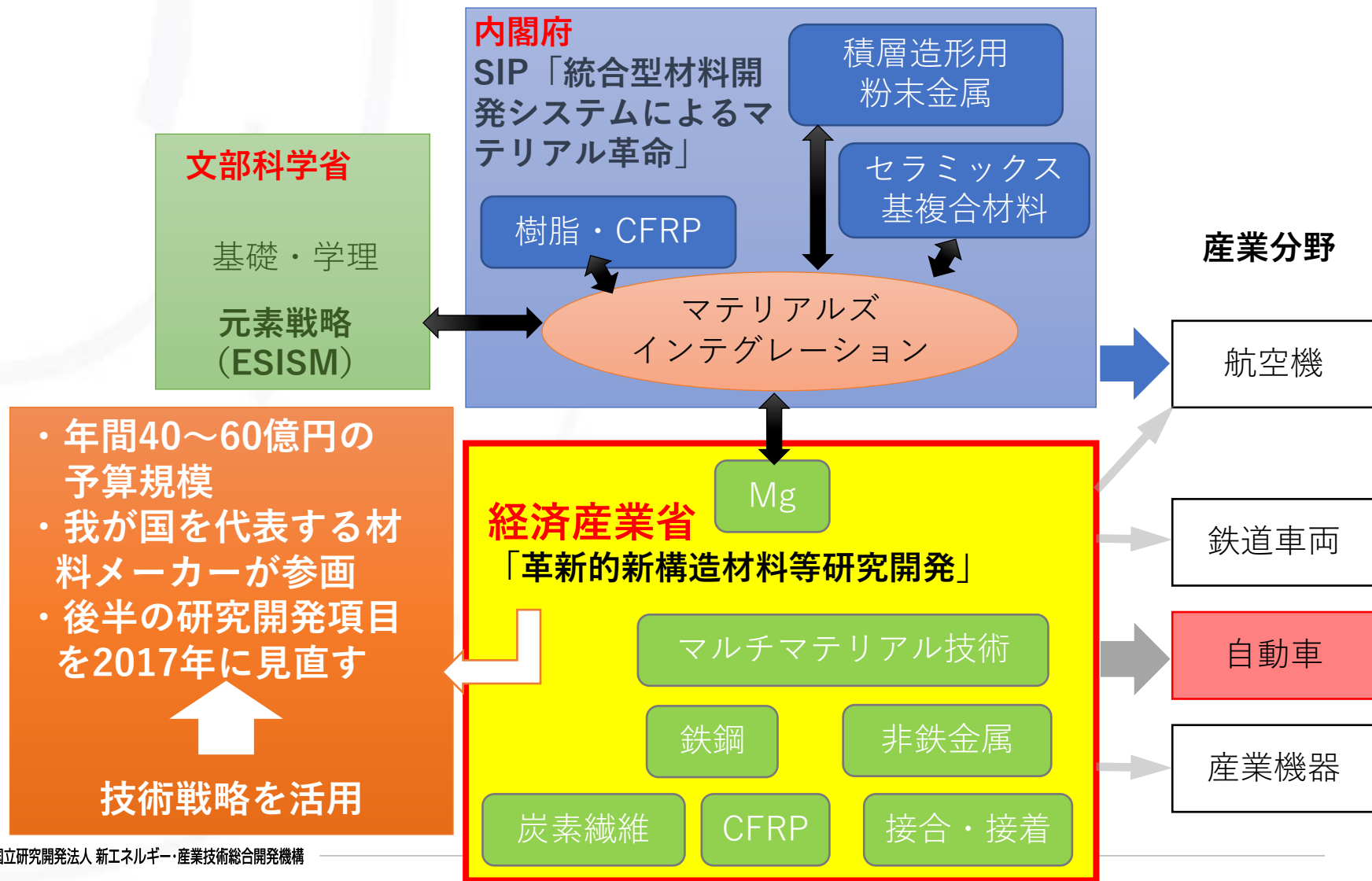
- 技術と事業の両面で世界に勝てる産学官**ドリームチーム**（国益確保を前提に外国企業の参加も検討）
- 事業化促進のための適切な知財管理



出典「内閣府 総合科学技術・イノベーション会議 評価・専門調査会「革新的新構造材料等研究開発」フォローアップ検討会 平成26年9月29日配布資料4-2」

# 技術戦略上の位置づけ（他事業との関係）

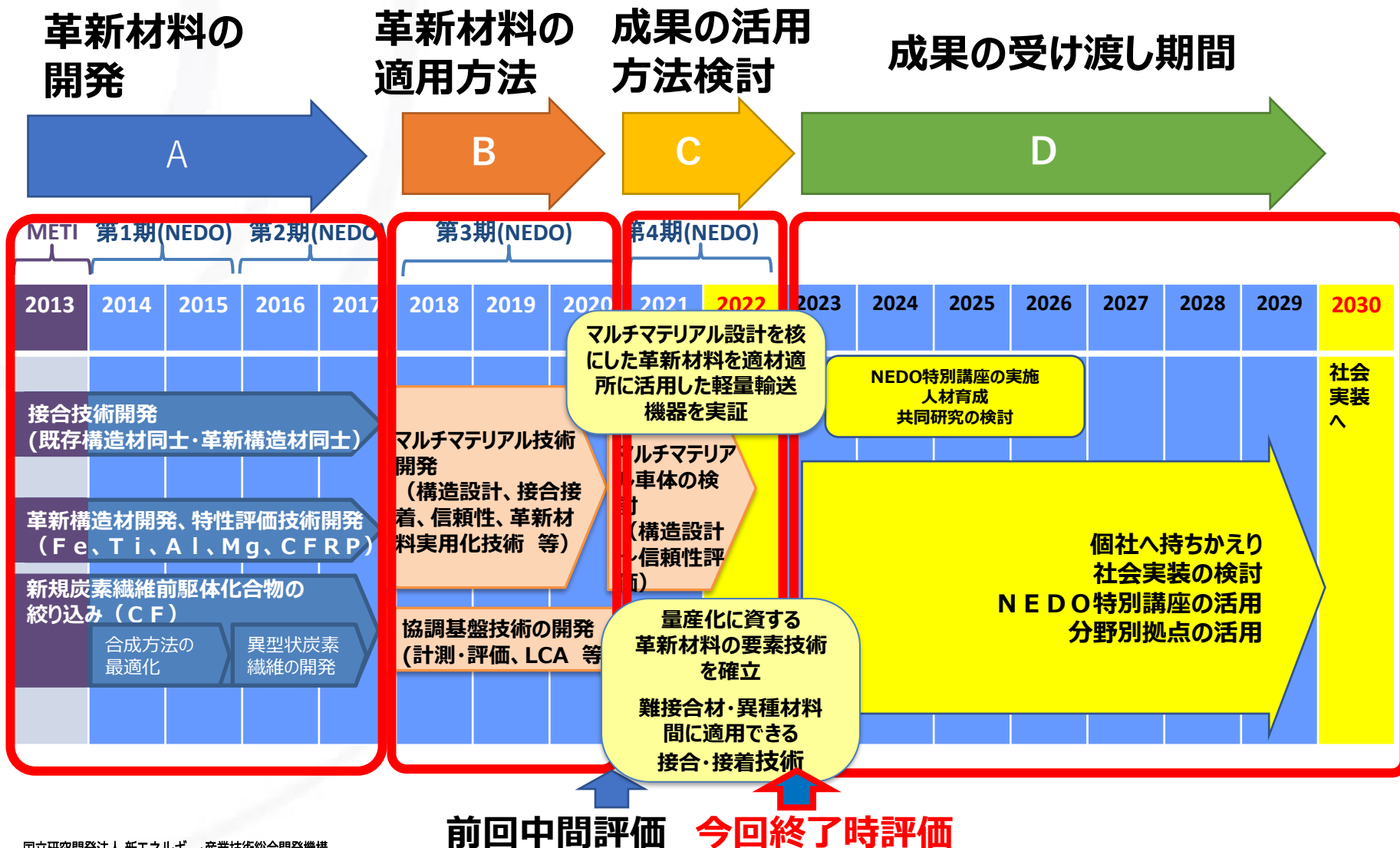
構造材料の高性能化、軽量化をめざし、経済産業省、内閣府、文部科学省がそれぞれ分担しながら研究開発を進めている



# 国内外の動向と比較

	現在		プロジェクト終了後	
①マルチマテリアル技術開発	RA ～ DH	マルチマテリアル構造設計に適した解析手法であるトポロジー最適化法の適用により、設計ツールを開発しており、さらに、開発した設計ツールをもとに、高性能なマルチマテリアル車体設計を実現しようとしている。欧州が先行。	DH	開発材料・接合方法を適用可能な最適設計法を構築し、マルチマテリアル最適構造の導出と接合方法を含めた評価を実施し、最終的に混流生産可能なマルチマテリアル軽量化車体の提案を目指す。これにより他国との競争力を維持する。
②接合技術	RA ～ DH	自動車の軽量化（マルチマテリアル化）に向けて、日米欧で開発競争が激化している。欧米では異業種が連携したコンソーシアム型の国家プロジェクトが立ち上がっている。また、TWIに関する基本特許は英国のものだが、2015年にExpireし、周辺特許は日本勢が多くを抑えている。	DH	下記の部材開発と併せて接合技術を開発することで、次世代の部材に適合した実用性のある接合技術の実現を目指す。これにより他国との競争力を維持する。
③革新チタン材	DH	スポンジチタンのシェアは中国に次ぐ25%、延伸加工材のシェアは10%。航空機等の重要部材では優位を保っているが、高いエネルギーコストと複雑な生産工程がネック。	LD	精錬・加工プロセスの生産性向上と高機能化により、特に航空機向けなどの高付加価値分野で競争力を向上。
④革新アルミニウム材	RA	日系企業のアルミ合金のシェアは14%。精錬・加工まで垂直統合している海外メジャーと比較して生産性が劣る。自動車メーカーと連携して海外進出。	DH	本PJにて新規合金製造プロセスを開発し、現行法では到達不可能な「海外メジャー並」の低価格化を実現し、品質面でも優れたアルミ合金を開発することで市場シェアを拡大する。
⑤革新マグネシウム材	RA	マグネシウム合金の市場シェアは10%と低い状況。今後は、難燃性が鍵だが、日本や韓国にて性能改善の成果が出ている。	DH	合金設計技術からプロセス技術、評価技術、データベースの構築などを一体的に推進し、強度・延性・難燃性等の優れた材料を開発し、より多くの市場を獲得する。
⑥革新鋼板	DH	欧州とシェア40～50%で市場を分け合っているが、中国・韓国の競争力も向上しつつあり、競争力低下が懸念される。添加レアメタルの需要逼迫も懸念材料	DH ～ LD	レアメタル添加量を極限まで抑制した上で強度を向上させる技術開発により、競争力を向上。
⑦熱可塑性CFRP	RA ～ DH	航空機、産業機器、スポーツ用品業界等では熱硬化性CFRPの需要が多く、加工技術も欧州が進んでいるが、熱可塑性CFRPは、我が国でも基盤技術が出来た段階で、材料も成形加工技術は、世界中がまだこれからの状況。	LD	熱可塑性CFRPの易加工性、リサイクル性、加工コスト等の優位性から適用需要は拡大が可能に。低コスト炭素繊維開発との相乗効果で、現在、約10%程度の世界のCFRP製品市場の大幅拡大が期待出来る。
⑧革新炭素繊維	LD	材料開発技術力は極めて高く、世界の主要生産企業7社中、我が国の企業3社で市場シェアの約70%をほぼ独占しており、外国企業の追随を許さない状況下にある。但し、消費エネルギー及びCO <sub>2</sub> 排出量が多く、高コストは共通の課題。	LD	低コスト炭素繊維の実現に伴い、使用用途の拡大・環境負荷低減が進むことで世界的に炭素繊維の使用量増大が期待出来、国際優位性は盤石なものとなる。世界市場シェアの独占も視野に入れられる。

# アウトカム（社会実装）達成までの道筋



# アウトカム（社会実装）達成までの道筋

2022年  
アウトプット



成果の受け渡し期間

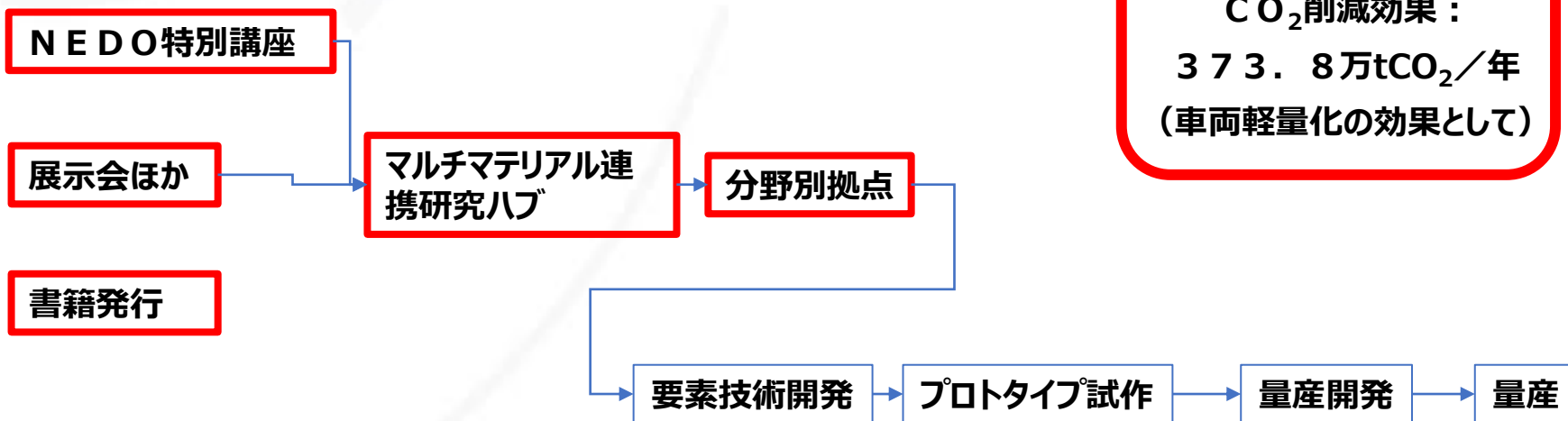
2030年  
アウトカム

ISMAメンバー→個社へ持ち帰り



車体重量半減

ISMAメンバー外←アクセス窓口、支援体制構築



売上予測：1.2兆円  
 CO<sub>2</sub>削減効果：  
 373.8万tCO<sub>2</sub>/年  
 (車両軽量化の効果として)

## ユーザーすそ野の拡大→アウトカム拡大への布石

# 非連続ナショナルプロジェクトに該当する根拠

## ◆非連続ナショナルプロジェクトの考え方

	内容
非連続的な価値の創造	画期的で飛躍的な変化を伴う価値が創造され、提供されることにより、生活、環境、社会、働き方などを変える
技術の不確実性	難易度が高い技術的課題や、新領域へのチャレンジなどにより、目標とする特性値や技術は従来の延長上にはなく、リスクが特に高い

	理由
①非連続的な価値の創造	本事業は、国が主導的に関与し、川上から川下までの共同技術開発の支援を行うことで、材料科学分野で生み出された優れた成果を革新的構造材料として輸送機器に適用し、最終製品としての国際競争力を強化することで、グローバル化が進む中で引き続き国内産業を成長させていく取組みであり、社会的、経済的にも重要である
②技術の不確実性	本事業で行う研究開発では、素材毎に縦割りでなされてきた従来の研究開発スタイルから脱却し、これらの素材の壁を越えて統合的に事業を推進することで、これまでの技術開発の延長線では成し得ない画期的な部素材を開発する。このような長期的でリスクの高い研究開発は、民間企業が単独で実施することは困難であり、国が積極的に関与し、実施する意義がある。

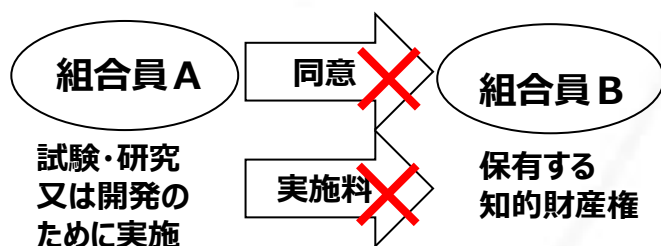


# 知的財産・標準化戦略

## 本プロジェクトの知財の基本方針

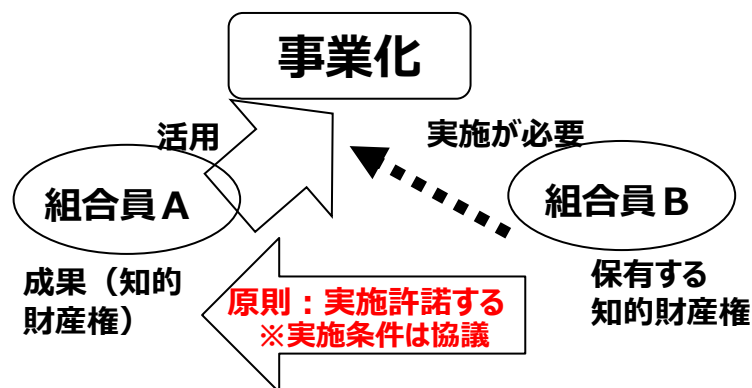
- 参加者間のシナジー効果発揮等によるP Jの目的（研究開発の成功と成果の事業化による国益の実現）達成を確かにするための知的財産についての適切な管理を行う。
- プロジェクトで発生する知的財産は、原則として参加者に帰属

### 【研究開発段階】



◇組合員は、他の組合員が保有する知的財産権について本プロジェクトの試験、研究又は開発のために実施する必要がある場合は**同意を得ることなく、かつ無償で実施できる**

### 【実用化段階】



◇組合員が本プロジェクトの成果を事業化するために、他の組合員が保有する知的財産権について実施許諾を求めた場合、（実施許諾を求められた）他の組合員は、当該事業化をするために**必要な範囲で、原則として実施許諾を行う**

# 知的財産・標準化戦略

## ● オープン／クローズ戦略の考え方

非公開	公開	
<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 原則として全ての成果は非公開</li> <li>◎ ただし、知財委員会への手続きを経て公開できることとしている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 学術研究・基礎研究的要素が強く、非競争領域である共通基盤研究</li> <li>◎ 産業利用が見込まれる発明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>→ 論文発表、学会発表の積極的推進</li> <li>→ 国際出願を念頭において権利化</li> </ul>

## 出願方針と標準化

- ・競争テーマでは、分野により積極出願/ノウハウとして秘匿の使い分け
- ・出願に当たっては外国での権利化も積極的に行う（PCT出願）
- ・協調テーマでは、積極的な成果の公開。
- ・リサイクルや腐食・防食等の材料の利用拡大に資する分野では、評価方法の標準化を検討

# 知的財産管理

## ▶ 知的財産権取扱規程の制定

### ◇ 経済産業省が策定した**成果管理方針**に基づき「**知的財産権取扱規程**」を制定

- ・ 知的財産権の帰属
- ・ 知的財産権の組合員間での実施許諾
- ・ 成果の秘匿及び届出
- ・ 知財委員会の役割 等について規定

## ▶ 知財委員会の運用

- ◇ メンバーは研究統括を委員長として、案件毎に技術企画部長（又は知財・戦略室長）、各テーマの業務管理者、外部委嘱者から委員長が2名以上を指定する
- ◇ 特許出願等の権利化、論文等による**成果公表の是非**等について判断し決定する
- ◇ **権利化に関する審議**は委員会を開催（現在のところ**1回／月**で開催している）
- ◇ 成果の公表については書面による審議とする

5-2

## ＜評価項目 2＞ 目標及び達成状況

- (1) アウトカム目標及び達成見込み
- (2) アウトプット目標及び達成状況

# 報告内容

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

NEDO

(※)本事業の位置づけ・意義  
(1)アウトカム（社会実装）達成までの道筋  
(2)知的財産・標準化戦略

(※) 評価対象外

2. 目標及び達成状況

NEDO

(1)アウトカム目標及び達成見込み  
(2)アウトプット目標及び達成状況

- アウトカム目標の設定及び根拠
- 波及効果
- 本事業における「実用化・事業化」の考え方
- 費用対効果
- アウトプット（研究開発成果）のイメージ
- アウトプット（終了時）目標の設定及び根拠
- アウトプット目標の達成状況
- 研究開発成果の意義（副次的効果）
- 特許出願及び論文発表

3. マネジメント

NEDO

(1)実施体制  
(※)受益者負担の考え方  
(2)研究開発計画

(※) 評価対象外

4. 目標及び達成状況（詳細）

NEDO

ISMA

(1)アウトカム目標及び達成見込み  
(2)アウトプット目標及び達成状況

□ 評価対象外

## アウトカム目標の設定及び根拠

自動車を中心とした輸送機器の抜本的な軽量化（半減）に向けて、革新的接合技術の開発や、鋼材、アルミニウム材、チタン材、マグネシウム材、炭素繊維及びCFRP等、輸送機器の主要な構造材料の高強度化等に係る技術開発を一体的に推進する。これにより、輸送機器の燃費向上によるエネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量の削減、次世代自動車普及の加速、我が国の部素材産業及びユーザー産業の国際競争力強化を目指す。

現在使用されている輸送機器の原材料を革新的新構造材料に置き換えることで軽量化を図り、2030年において、373.8万tのCO<sub>2</sub>削減及び1.2兆円規模の売り上げが期待される。

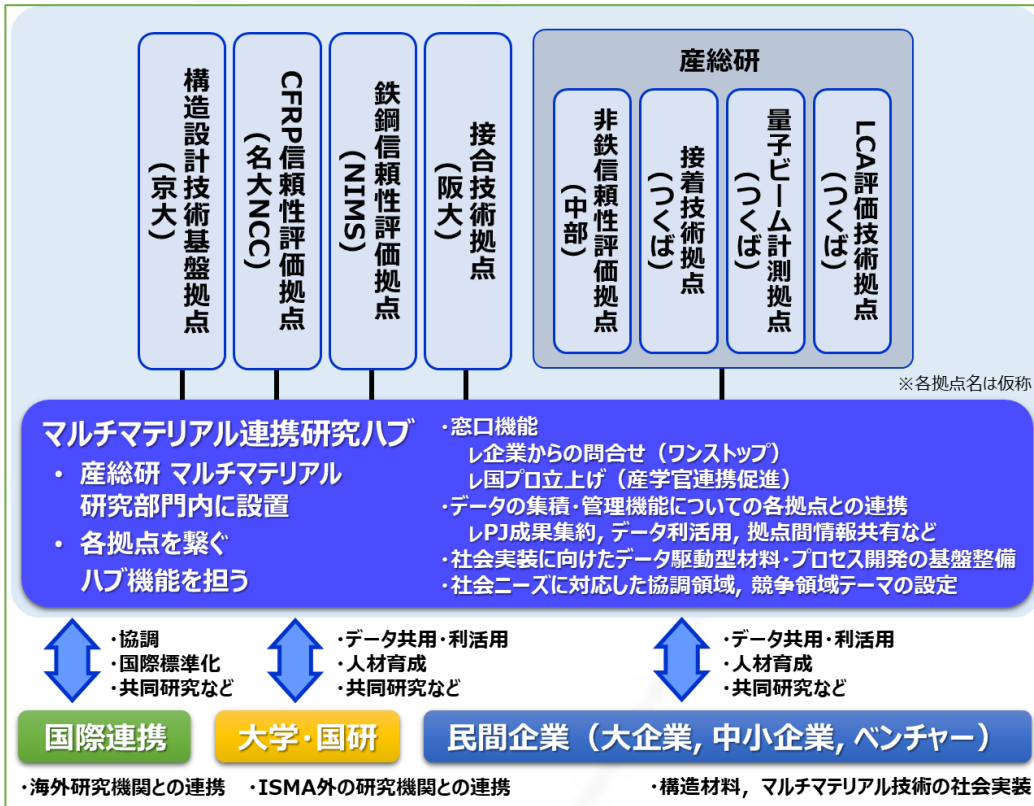
**プロジェクト費用の総額 378億円（10年間推定）**

**売上予測 1.2兆円**

**CO<sub>2</sub>削減効果 373.8万tCO<sub>2</sub>/年  
（車両軽量化の効果として）**

**※売上、効果は、2030年度の推定値**

# 波及効果



マルチマテリアル構造部材の拠点を構築したことで自動車のみならずインフラや航空機など他の構造物のマルチマテリアル化の促進が図られる。

NEDO特別講座を通じて学生等に材料開発に興味をもってもらい、人材育成を図る。

## 本事業における「実用化・事業化」の考え方

当該研究開発に係る**試作品**、サービス等の社会的利用(顧客へのサンプル提供等)が開始されること、軽量化のための技術開発・材料開発がなされることであり、さらに、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の**販売**や利用により、企業活動(売り上げ等)に貢献することをいう。



# 本事業における「実用化・事業化」の考え方

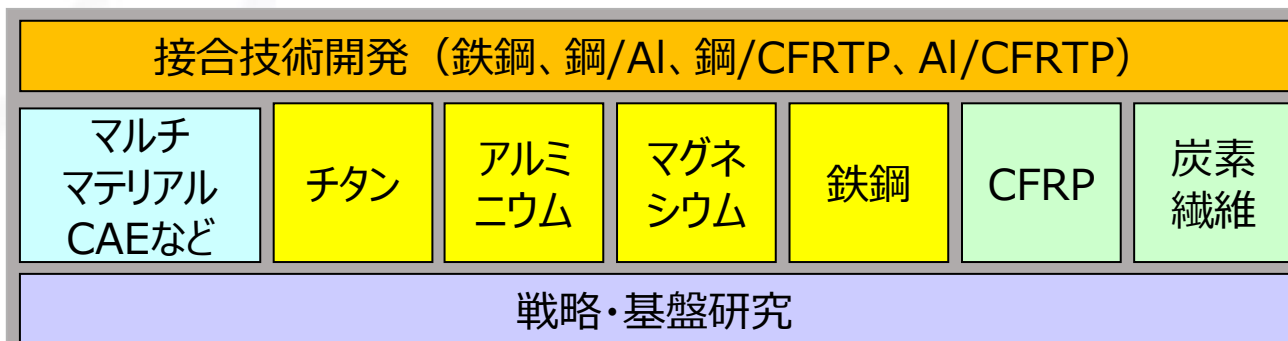
開発目標設定に  
ユーザが関与

アドバイザーボード  
ユーザ企業が実施者

成果の実用化の加速  
に向けた取り組み

企業での実証フェーズへの移行を促す  
(持ち帰り、サンプル提供など)  
共通基盤課題の強化

研究開発  
の実施



円滑・  
迅速な  
社会  
実装へ

試験・評価法の  
標準化・規格化

試験・評価法開発  
開発材料のJIS化

知財活用体制  
の整備

全組合員で『知的財産権の取  
扱いに関する合意書』を締結

## 費用対効果

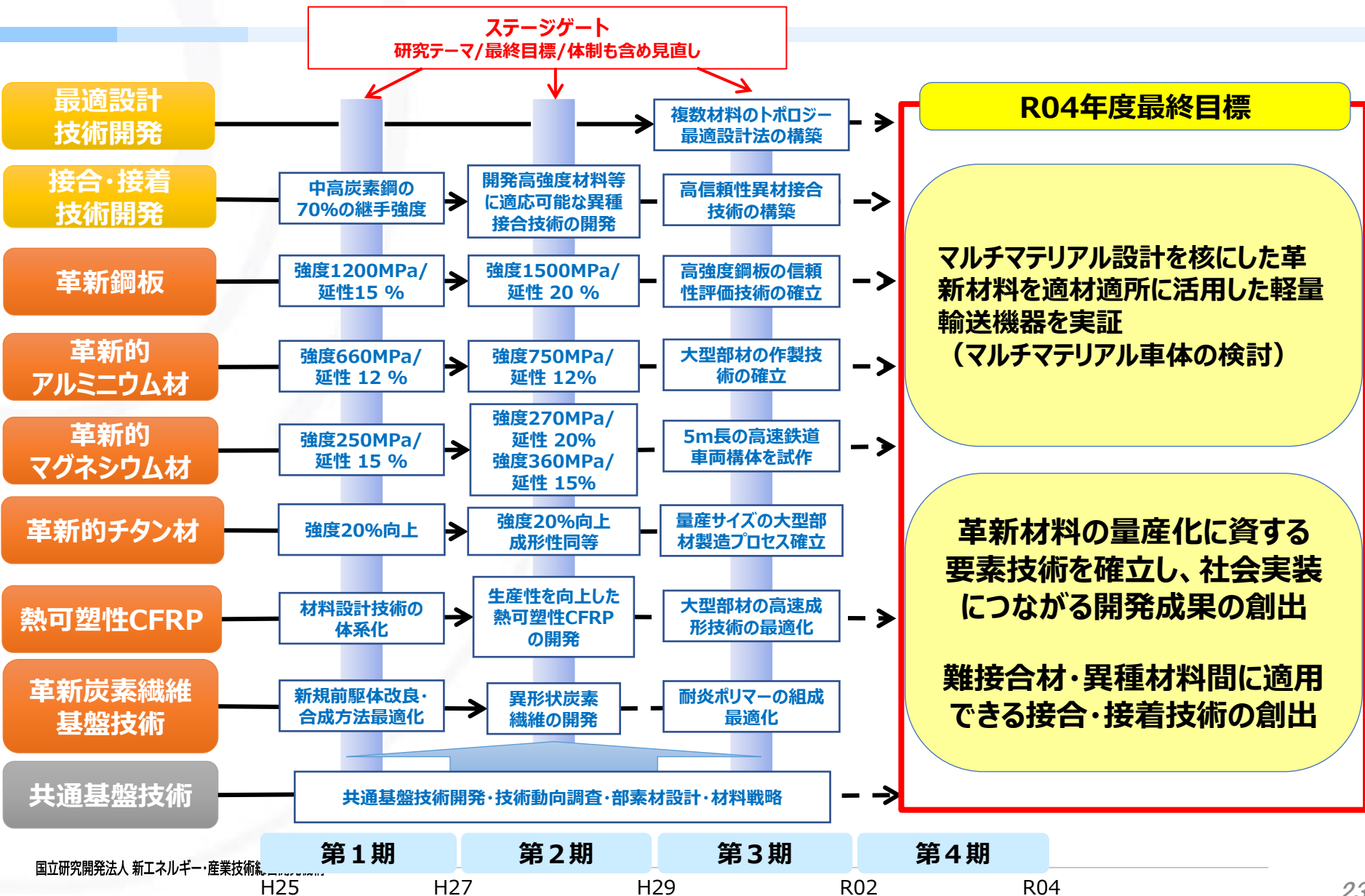
**プロジェクト費用の総額 378億円（10年間）**

**売上予測 1.2兆円**

**CO<sub>2</sub>削減効果 373.8万tCO<sub>2</sub>/年  
（車両軽量化の効果として）**

**※売上、効果は、2030年度の推定値**

# アウトプット（研究開発成果）のイメージ



# アウトプット(終了時)目標の設定及び根拠

年次	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
依託元	METI			NEDO						
研究期間	第1期			第2期		第3期			第4期	
先行Proj.の融合と課題の新設	革新炭素繊維開発			中性子線開発・接着技術開発課題を新設		マルチマテリアル車体の設計、接合基盤研究、CFやALのリサイクル課題を新設			マルチマテリアル車体におけるガルバニック腐食、鉄鋼信頼性、革新材料・接合技術の部品適用課題を新設	
	熱可塑性CFRP		合流		合流					
終了課題	終了FS課題 複層鋼板、水接合基礎フェーズへ			卒業課題 Ti接合、FSW機器・チップ等の実用化・事業化へ			卒業課題 Ti材料、CF材料、鉄道用Mgの実用化・事業化へ			

## 1.1 全分野のプロジェクト基本計画の達成状況（1）

研究開発項目	2014-2015 H26-27	中間 評価1	2016-2017 H28-29	中間 評価2	2018-2020 H30-R02	中間 評価3	2021-2022 R03-04	終了時 評価
①「マルチマテリアル技術開発」					<p>(1) マルチマテリアル設計技術開発</p> <p>(a) トポロジー最適化システムの構築</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>複数の材料のトポロジー最適設計法を構築する。</li> </ul> <p>(b) マルチマテリアル界面評価モデル化</p> <p>(c) 車体構造適用可能性検討</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>複数の材料の利用を想定した対象問題を選定し、そのデータを作成する。</li> <li>車体構造への展開を目的としたソフトウェアの大規模問題への拡張を検討する。</li> <li>最適構造の工学的な妥当性を検証・評価する。</li> </ul>	達成	<p>(1) マルチマテリアル設計技術開発</p> <p>(d) マルチマテリアル実設計への適用</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>開発材料を利用した最適設計法を構築する。</li> <li>マルチマテリアル最適構造の導出と接合方法を含めた評価を実施し、最終的にマルチマテリアル設計車体の提案を行う。</li> </ul> <p>(2) マルチマテリアルボディーの検討・試作</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>トポロジー最適化法により得られた軽量化マルチマテリアル部材につき、粉末積層造形プロセスによる軽量化の可能性を検討する。</li> </ul>	達成

詳細は説明せずに結果(達成)のみ  
報告します 以下(6)まで

## 1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況(2)

研究開発項目	2014-2015 H26-27	中間 評価1	2016-2017 H28-29	中間 評価2	2018-2020 H30-R02	中間 評価3	2021-2022 R03-04	終了時 評価
②「接合技術開発」	(1) チタン/チタン 連続接合技術の開発 ・接合深さ：5mm 以上 ・接合強度：母材強度の90%以上	達成	(1) チタン/チタン連続接合技術の開発 ・接合深さ：10mm 以上・接合強度：母材強度の90%以上	達成				
	(2) 中高炭素鋼/中高炭素鋼接合技術の開発(スポット接合技術と連続接合) ・接合強度：厚み1.5mm、強度1.2GPa 以上の中高炭素鋼で、JIS A 級 (JISZ3140 :1989) の引張せん断荷重平均値の70%	達成	(2) 中高炭素鋼/中高炭素鋼接合技術の開発(スポット接合技術と連続接合) ・接合強度：厚み1.5mm、強度1.2GPa 以上の中高炭素鋼で、JIS A 級 (JISZ3140 :1989) の引張せん断荷重平均値の70%以上	達成	(2) 中高炭素鋼/中高炭素鋼接合技術の開発(スポット接合技術と連続接合) ・接合強度：厚み1.4mm、強度1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、JIS-A 級 (JIS Z3140 :2017) の引張せん断荷重平均値の70%以上、十字引張荷重平均値の70% 以上	達成	(2) 中高炭素鋼/中高炭素鋼接合技術の開発(スポット接合技術と連続接合) ・接合強度：厚み1.4mm、強度1.5GPa 以上の中高炭素鋼で、JIS-A 級 (JIS Z3140 :2017) の引張せん断荷重平均値以上、十字引張荷重平均値以上	達成
	(3) 鋼材/アルミニウムの接合技術の開発(スポット接合技術)・JIS A 級 (JIS Z3140 :1989) の引張せん断荷重平均値以上又は母材破断	達成	(3) 鋼材/アルミニウムの接合技術の開発(スポット接合技術) ・高減衰接着剤の仕様決定	達成	(3) 鋼材/アルミニウムの接合技術の開発(スポット接合技術) ・接合強度：抵抗スポット溶接による剥離強度として十字引張荷重平均値が1.5kN 以上	達成	(3) 鋼材/アルミニウムの接合技術の開発(スポット接合技術) ・接合強度：各種実用部品の接合で、JIS-A 級 (JIS Z3140 :2017) の引張せん断荷重最小値以上又は母材破断	達成
	(4) アルミニウム/CFRP 接合技術の開発 ・接合強度：試験片の接合で、JIS A 級 (JIS 3140 :1989) の引張せん断荷重平均値以上又は母材破断	達成	(4) アルミニウム/CFRP 接合技術の開発 ・高減衰接着剤の実用組成の決定	達成	(4) アルミニウム/CFRP 接合技術の開発 ・ポリアミド樹脂 (PA)、ポリフェニルスルファイド樹脂 (PPS) など高融点樹脂をマトリックスとする CFRP の接合技術の確立	達成	(4) アルミニウム/CFRP 接合技術の開発 ・接合強度：各種実用部品の接合で、JIS-A 級 (JIS Z3140 :2017) の引張せん断荷重最小値以上又は母材破断	達成
	(5) 鋼材/CFRP 等樹脂接合技術の開発 ・接合強度：母材破断	達成	(5) 鋼材/CFRP 等樹脂接合技術の開発 ・接合強度：母材破断	達成	(5) 鋼材/CFRP 等樹脂接合技術の開発 ・鋼材/CFRP 複合成形パネルの製作に向けた接合材料の仕様確定	達成	(5) 鋼材/CFRP 等樹脂接合技術の開発 ・鋼材/CFRP 複合成形パネルの製作	達成
				(6) 構造材料用接着技術の開発 ・接合強度：引張せん断強度10MPa以上	達成	(6) 構造材料用接着技術の開発 ・接合強度：金属用接着剤では引張せん断強度20MPa 以上、プラスチック用接着剤に対しては7MPa 以上	達成	(6) 構造材料用接着技術の開発 ・接合強度：金属用接着剤は引張せん断強度28MPa 以上、プラスチック用接着剤に対しては10MPa 以上

## 1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況(3)

研究開発項目	2014-2015 H26-27	中間 評価1	2016-2017 H28-29	中間 評価2	2018-2020 H30-R02	中間 評価3	2021-2022 R03-04	終了時 評価
③「革新的チタン材の開発」	(1) 製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発 ・スポンジチタンで、鉄含有値：ばらつき範囲 50～500ppm 平均値 200ppm 以下	達成	(1) 製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発 ・大型工業製品製造に不可欠な工程技術の要素技術を確立し、量産プロセスの見通しを得る。	達成	(1) 製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発 ・実機スケールで、Fe≤200ppm、O≤150ppm、Cl≤300ppmのスポンジチタンを製造可能な技術の確立	早期達成		
	(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発 ・精錬後の酸素含有値：300ppm 以下	達成	(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発 ・実機プロセスにおける精錬後の酸素含有値を300ppm 以下とする要素技術確立の見通しを得る。	達成	(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発 ・引張強度が現行材より20%向上した材の量産プロセス検証	早期達成		
	(3) チタン新製錬技術開発 ・鉄含有値：2000ppm 以下	達成	(3) チタン新製錬技術開発 ・製錬プロセス設計指針を構築し、量産プロセスへの見通しを得る。	達成	(3) チタン新製錬技術開発 ・工業化が可能と判断される Fe≤2000ppm、酸素≤1000ppm で、現行クロール法よりコスト20%削減に必要な要素技術を提示	早期達成		
④「革新的アルミニウム材の開発」	(1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発 ・引張強度：660MPa 以上 (現状 600MPa)	達成	(1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発 ・引張強度：750MPa 以上 (現状 600MPa)	達成	(1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発 ・疲労強度を維持しながら高強度化した合金 (引張強度：750MPa) の実機レベル (大型ねじり鍛造装置を用いた) の製造技術開発	達成	(1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発開発合金の実機化製造条件の技術指針確立	○
	(2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発 ・電解条件の確立	達成	(2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発 ・AlCl <sub>3</sub> 系イオン液体の新合成法の開発 及び 量産法の提示	達成	(2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発 ・新電析浴において、電析速度 1.0μm/min以上の達成	達成	(2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発 ・鋳物級の低純度から新地金以上の高純度アルミニウムへのハイアップグレード技術の指針確立	○原料をAL 廃材に置き換え
			(3) 複層アルミ合金の開発 ・熱処理後の耐力600MPa 以上	達成	(3) 複層アルミ合金の開発 ・熱処理後の耐力700MPa 以上	早期達成		

## 1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況(4)

研究開発項目	2014-2015 H26-27	中間 評価1	2016-2017 H28-29	中間 評価2	2018-2020 H30-R02	中間 評価 3	2021-2022 R03-04	終了時 評価	
⑤「革新的マグネシウム材の開発」	(1) 易加工性マグネシウム材の開発・レアアース添加無し・引張強度：250MPa 以上	達成	(1) 易加工性マグネシウム材の開発 ・レアアース添加無し・引張強度：270MPa 以上	達成					
	(2) 高強度マグネシウム材の開発・レアアース添加無し・引張強度：350MPa 以上	達成	(2) 高強度マグネシウム材の開発 ・レアアース添加無し・引張強度：360MPa 以上・伸び：15% 以上	達成					
	(3) マグネシウム材の評価手法の開発 ・既存の難燃性マグネシウム合金を対象として、発火メカニズム及び腐食メカニズムの解明と評価手法の導出	達成	(3) マグネシウム材の評価手法の開発 ・難燃性マグネシウム合金を対象として、発火特性、腐食特性 及び 疲労特性 に関するデータベース構築	達成					
			(4) マグネシウム材の接合技術の開発 ・開発材の接合技術の開発	達成					
					(5) 革新的マグネシウム材の開発及び長期性能評価 ・前期で開発した合金を用いて高速鉄道車両適用のための大型部材(長さ5m以上)の材料製造技術(押出技術、圧延技術、加工技術)を構築する。	達成	(5) 革新的マグネシウム材の開発及び長期性能評価 ・前期で開発した合金を用いて鉄道車両のための大型部材(長さ25m以上)の量産技術の技術指針を構築する。	達成	
					(6) マグネシウム製高速車両構体の開発 ・革新的マグネシウム材を用いて高速車両構体を設計するための技術指針を、一般断面モックアップ構体の作製・評価を通じて構築する。	達成	(6) マグネシウム製高速車両構体の開発 ・革新的マグネシウム材製の実物長高速車両構体を設計するための技術指針を構築する。	達成	
					(7) マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション(MI)活用技術開発 ・難燃性マグネシウム合金接合部の疲労性能・寿命を、理論や経験則、数値モデリング、データベース、機械学習などにより予測可能とする各モジュールのプロトタイプを完成させる。	達成	(7) マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション(MI)活用技術開発 ・難燃性マグネシウム合金接合部の長期性能(疲労性能・寿命、耐食性等)を、予測可能とする各モジュールの検証を実施し、統合したワークフローとして完成させる。	達成	



## 1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況(5)

研究開発項目	2014-2015 H26-27	中間 評価1	2016-2017 H28-29	中間 評価2	2018-2020 H30-R02	中間 評価3	2021-2022 R03-04	終了時 評価	
⑥「革新鋼板の 開発」	(1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発・レアメタル添加量：10wt %未満・引張強度：1.2GPa以上・伸び：15 %以上	達成	(1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発 ・レアメタル添加量：10wt %未満・引張強度：1.5 GPa以上・伸び：20 %以上	達成	(1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発 ・開発材において汎用鋼(590MPa~980MPa級)と同等の耐食性と水素脆性を目指す	達成	(1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発 ・鋼材中の軽元素と耐食性の関係の明確化	達成	
	(2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発 ・低濃度炭素検出技術 炭素定量下限：30ppm	達成	(2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発 ・鋼組織の高速定量解析技術の確立	達成	(2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発 ・鋼中のヘテロ構造と軽元素の空間相関評価技術において、空間分解能：200nm以下、濃度分解能：0.1mass%を目指す	達成	(2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発 ・薄鋼板の水素脆化挙動に係るき裂伝播挙動解析技術を構築する。また、新規ミクロ組織観察技術を開発し、き裂伝播挙動との関係を明らかにする。	達成	
⑦「熱可塑性 CFRPの開発」	(1) 熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術開発 ・CFRPと異種材料(鉄鋼、アルミ合金)との接合の要素技術の見極めを行い、上記接合方式・接合形状における強度設計に必要なデータベースを構築する。	達成	(1) 熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術開発 ・2015年度までに構築した異材接合データベースを基に、現行量産車において多用され一般的に用いられている接合方式(ボルト締結や接着接合)と同等以上の強度を達成するための要素技術及びその設計手法を確立する。	達成					
	(2) 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発 ・LFT-D (Long Fiber Thermoplastics-Direct) 成形の基礎技術の開発 ・大物高速成形技術の開発	達成	(2) 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発 ・量産化につながる混練・押出プロセスの要素技術を確立する。 ・複雑なボディ部材の成形技術を確立し、量産化に繋がる要素技術を確立する。ハイブリッド成形技術を確立するとともに、高速マテハン技術の要素技術を確立する。	達成	(2) 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発 ・LFT-D高速成形最適化技術の開発 ・熱可塑性CFRP高速ハイブリッド成形技術の開発	達成	(2) 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発 ・多様な補強材とLFT-Dとのハイブリッド成形技術について構造部材による技術検証を行い、技術を確立する。	達成	
							(3) 超軽量 CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の開発 ・CFRTP 材料および成形技術を活用して、CFRTP/CFRP (熱可塑/熱硬化) ハイブリッド部材を設計し、軽量化効果を実証する。	達成	

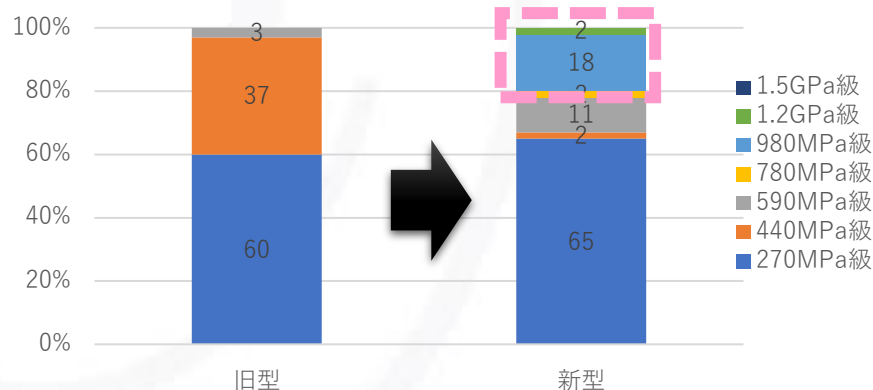
## 1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況 (6)

研究開発項目	2014-2015 H26-27	中間 評価1	2016-2017 H28-29	中間 評価2	2018-2020 H30-R02	中間 評価3	2021-2022 R03-04	終了時 評価
⑧「革新炭素繊維 基盤技術開発」	(1) 新規炭素繊維前 駆体化合物の開発 ・新たな炭素繊維前駆 体を開発する。引張弾 性率 235GPa、破断 伸度 1.5 %	達成	(1) 新規炭素繊維前駆体化合 物の開発 ・前期成果とあわせて、異形状 炭素繊維の製造技術を確立する。	達成	(1) 新規炭素繊維前駆体化合物 の開発 ・炭素繊維として、フィラメント 径7μmで、弾性率240GPa、強度 4GPaを凌ぐ性能を目指す。	達成		
	(2) 炭化構造形成メ カニズムの解明 ・新たな炭素繊維前駆 体を開発する。引張弾 性率 235GPa、破断 伸度 1.5 %	達成	(2) 炭化構造形成メカニズム の解明 ・異形状炭素繊維の製造技術を 確立する。	達成	(2) 炭化構造形成メカニズムの 解明 ・マイクロ波炭化のプロセ ス多段化など設備を改良すると共 に処理条件を最適化し、従来の炭 化炉方式に優る大規模生産のため の製造技術を確立する。	達成		
			(3) 炭素繊維の評価手法開発、 標準化 ・圧縮試験、曲げ試験、ねじり 試験方法の規格原案を作成し、 JIS ISO 化に必要なデータを収 集する。	達成	(3) 炭素繊維の評価手法開発、 標準化 ・熱可塑性樹脂と異形状炭素繊維 の界面特性を検証し、その特性発 現メカニズムを解明することによ り、標準的な力学的試験法を確立 する。	達成 ：リ サイ クル 繊維 で 2022 まで 継続		
⑨「戦略・基盤研 究」	(1) 新構造材料の動 向調査・技術・研究 戦略・研究開発のビ ジョンの明確化	達成	(1) 新構造材料の動向調査・ 技術・研究戦略 ・研究開発の実用化・事業化 ビジョンの明確化	達成	(1) 新構造材料の動向調査・技 術・研究戦略 ・マルチマテリアル構造体に係わ る共通基盤技術課題の抽出	達成	(1) 新構造材料の動向調査・技 術・研究戦略 ・プロジェクト成果の取りまとめ 及び検証	達成
	(2) 共通基盤技術の 調査研究 ・構造材料、接合プロ セスに関する新たな研 究シーズの顕在化	達成	(2) 共通基盤技術の調査研究 ・構造体接合部設計・評価手法 の確立	達成	(2) 共通基盤技術の調査研究 ・新材料の材料代替効果定量技術 の開発課題の抽出	達成	(2) 共通基盤技術の調査研究 ・異種材料接合における腐食解析 手法の確立	達成
					(3) 中性子等量子ビームを用い た構造材料等解析技術の開発 ・新規小型中性子装置を建設し、 ブラッグエッジイメージング法に よる測定分解能と統計精度を明 らかにする。	達成	(3) 中性子等量子ビームを用い た構造材料等解析技術の開発 ・ブラッグエッジイメージングの データから、歪や金属組織のイ メージング情報に変換する手法を 確立し、接合部の2次元マッピ ングを実現する。	達成
					(4) 低圧・超高速CFRP 成形技 術の開発 ・樹脂供給体における 樹脂・基材の基本設計を完了する。	達成	⑦「熱可塑性 CFRP の開発」の (3)に移動	

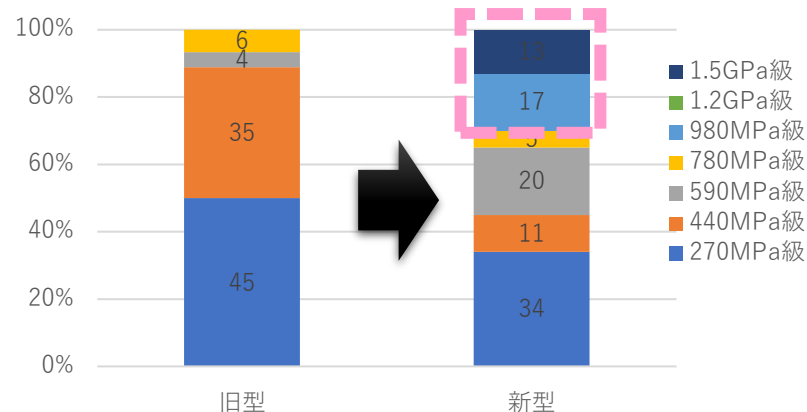
# 研究開発成果の意義 (副次的成果)

日産自動車は新型「ノートe-Power」に、1.5GPa級冷間プレス材を初適用し、アッパーボディー、プラットフォームともにハイテン、超ハイテンの採用率が向上した。(出典：Nikkei automotive 2021.4)

旧型と新型車の使用材料比較 (アッパーボディー)



旧型と新型車の使用材料比較 (プラットフォーム)



## ■ 超ハイテン鋼の導入による燃費向上の一例

(出典：NEDO成果報告会「車体軽量化に関わる構造技術、構造材料に関する課題と開発指針の検討」最終報告書)

	従来の車体事例		超ハイテン鋼の導入例		
	素材	部材重量 [kg]	素材	重量変化[kg]	軽量化率 [%]
補強部位	980MPaハイテン鋼	50	1.5GPa超ハイテン鋼	-6.5	-13%
構造部位	590MPa鋼	130	1.2GPa超ハイテン鋼	-23.4	-18%
衝撃吸収部位	440MPa鋼	80	980MPaハイテン鋼	-13.6	-17%
外板部位	340MPa鋼	80	変更なし	0	0%

ハイテン、超ハイテン材の置き換えで、構造部重量で43.5kgの軽量化、約0.5km/Lの燃費向上に相当。

## 研究開発成果の意義（副次的成果）

★JFEスチール プレスリリース（2020/12/23）より抜粋

<https://www.jfe-steel.co.jp/release/2020/12/201223.html>

このたび、当社が開発した**1.5GPa(1470MPa)級高張力冷延鋼板**が、冷間プレス用途として世界で初めて(当社調べ)、自動車の骨格部品に採用されました。冷間プレスによる車体骨格部品の強度としては、世界最高レベルとなります。本鋼板は、複数の自動車メーカーの部品に採用されており、既に部品加工メーカーへの供給を開始しています。

※日産は新型「ノート」のセカンドクロスレインフォースに**1.5GPa級鋼板**を適用。

(出典：日経 Automotive 2021.4)

★日本製鉄 プレスリリース（2021/1/18）より抜粋

[https://www.nipponsteel.com/news/20210118\\_100.html](https://www.nipponsteel.com/news/20210118_100.html)

日本製鉄株式会社（以下、日本製鉄）東日本製鉄所君津地区では、第6CGL（溶融亜鉛めっき設備）の商業運転を1月16日に開始しました。本CGLは、月産能力は33千トン、**強度1.5GPa級の超ハイトン鋼板の製造が可能**です。



**ISMAのプロジェクトが自動車メーカーでのハイトン鋼から超ハイトン鋼への移行を加速し自動車構造部材への採用へ流れを生み出した。**

# 特許出願及び論文発表

## 10年間の実績報告

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	総数
	年度	年度	年度	年度	年度	年度	年度	年度	年度	年度	
	委託	委託	委託	委託	委託	委託	委託	委託	委託	委託	
実績額推移 (百万円) (経済産業省)	3,960	4,760	5,870	3,708	3,729	3,512	2,827	3,620	3,019	2,688	37,693
	(NEDO)	(NEDO)	(NEDO)	(NEDO)	(NEDO)	(NEDO)	(NEDO)	(NEDO)	(NEDO)	(NEDO)	
特許出願件数 (件)	1	31	47	60	31	30	16	11	10	1	238
発表総数 (報)	9	117	229	215	275	273	236	153	109	130	1,746
論文発表 (報)	1	8	30	34	44	44	38	58	41	40	338
取材広報	2	10	13	25	28	55	93	67	53	66	412
フォーラム等 (件)	0	1	1	1	2	1	0	0	1	2	9

特許：国内出願 238、PCT出願 73、外国出願（PCTからの移行含む） 232  
国内登録 133、外国登録 108

5-3

## ＜評価項目 3＞ マネジメント

(1) 実施体制

(※) 受益者負担の考え方 ※ 終了時評価においては対象外

(2) 研究開発計画

# 報告内容

## 1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋



NEDO

(※)本事業の位置づけ・意義  
(1)アウトカム（社会実装）達成までの道筋  
(2)知的財産・標準化戦略

(※) 評価対象外

## 2. 目標及び達成状況



NEDO

(1)アウトカム目標及び達成見込み  
(2)アウトプット目標及び達成状況

## 3. マネジメント

NEDO

(1)実施体制  
(※)受益者負担の考え方  
(2)研究開発計画

(※) 評価対象外

## 4. 目標及び達成状況（詳細）

NEDO

ISMA

(1)アウトカム目標及び達成見込み  
(2)アウトプット目標及び達成状況

- NEDOが実施する意義
- 実施体制
- 個別事業の採択プロセス
- 予算及び受益者負担
- アウトプット（研究開発成果）のイメージ（再掲）
- 目標達成に必要な要素技術
- 研究開発のスケジュール
- 進捗管理
- 進捗管理：中間評価結果への対応
- 進捗管理：動向・情勢変化への対応
- 進捗管理：開発促進財源投入実績
- モティベーションを高める仕組み

□ 評価対象外

# NEDOが実施する意義

車両軽量化のための革新的新構造材料の開発は、以下3点を満たす未来開拓型研究プロジェクトに位置付けられている。

## 1. リスクの高い中長期的テーマ

- 短期の対策に加え、事業化まで10年を超えるような、リスクが高い研究開発を国が主導
- エネルギー・環境制約など、抜本的な対策が必要な分野に集中投資

## 2. 省庁の枠を超えた連携

- 経産省、文科省の局長級をヘッドとする合同検討会で連携テーマを設定
- 両省のプロジェクトを一体的に運営するガバニング・ボードを設置、基礎から事業化まで一気通貫

## 3. ドリームチーム

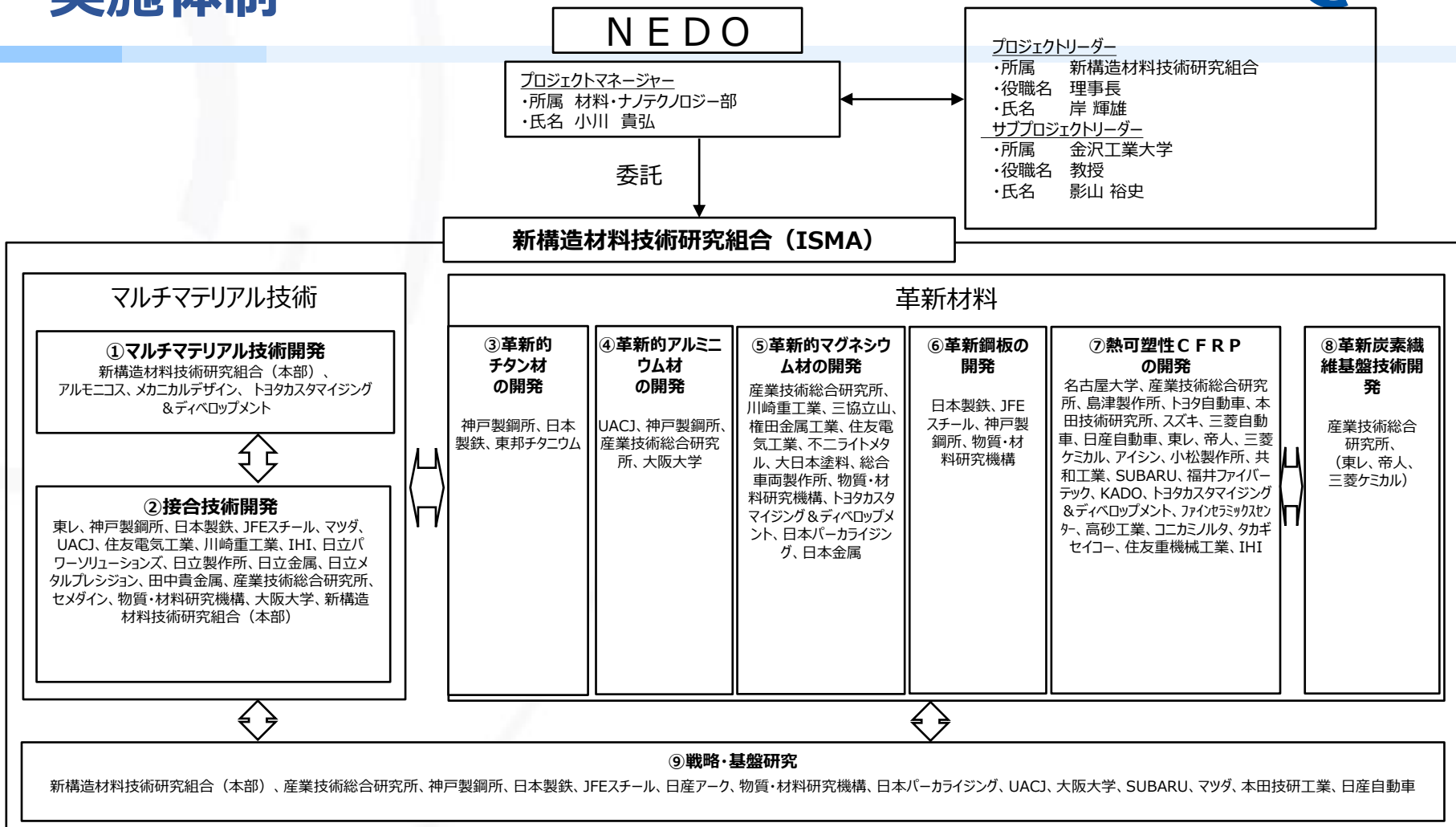
- 技術と事業の両面で世界に勝てる産学官ドリームチーム
- 事業化促進のための適切な知財管理



**N E D O がもつこれまでの知識、実績を  
活かして推進すべき事業**



# 実施体制

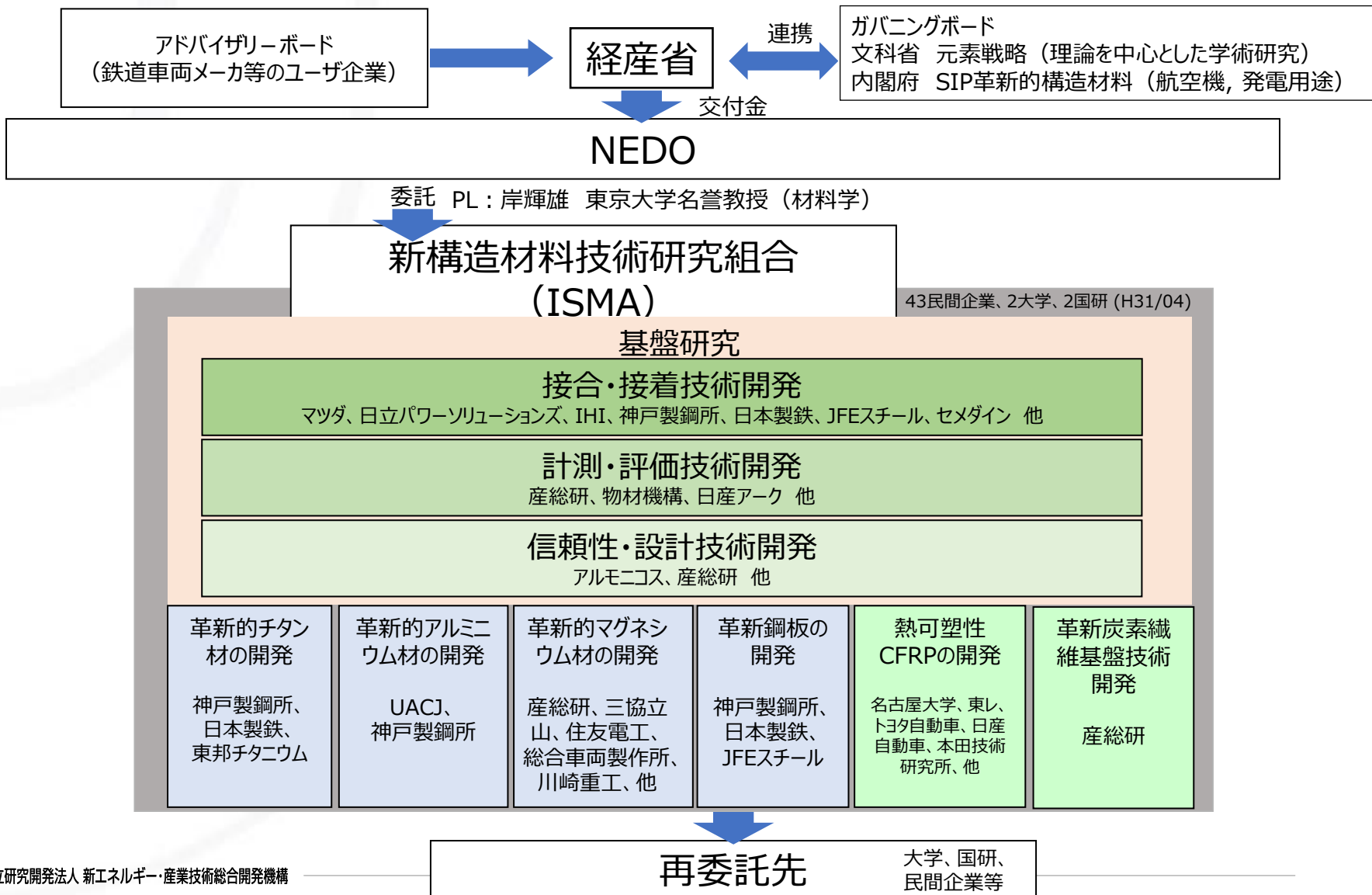


アート1、川崎車両、木ノ本伸線、サンスター技研、シーカ・ハマタイト、大成プラス、デンカ、東レエンジニアリングDソリューションズ、戸畑製作所、豊田通商、ナガセコムテックス、日立化成、ヒロテック、富士電機、ミロン化学、名機製作所、石川県工業試験場、茨城県産業技術イノベーションセンター、宇宙航空研究開発機構、海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所、金属系材料研究開発センター、軽金属溶接協会、高エネルギー加速器研究機構、高分子学会、総合科学研究機構、長崎県工業技術センター、日本原子力研究開発機構、日本マグネシウム協会、広島県立総合技術研究所、福井県工業技術センター、理化学研究所、量子科学技術研究開発機構、秋田大学、茨城大学、岩手大学、大阪工業大学、大阪公立大学、岡山大学、金沢工業大学、関西大学、岐阜大学、九州工業大学、九州大学、京都工芸繊維大学、京都大学、近畿大学、群馬大学、神戸大学、佐賀大学、佐世保高専、静岡大学、芝浦工業大学、島根大学、上智大学、千葉大学、中部大学、帝京大学、東京工業大学、東京大学、東京農工大学、東北大学、豊橋技術科学大学、長岡技術科学大学、名古屋工業大学、日本大学、兵庫県立大学、広島大学、北海道大学、室蘭工業大学、山形大学、立命館大学、早稲田大学



# 実施体制 (責任体制)

各技術研究組合は競合メーカ・競合業種が結集して形成。大学・国研と共に協調領域を重点的に開発。各参加企業は知的財産権取扱規程に同意し、知財を拠出し共有・相互利用。



## 個別事業の採択プロセス

### 第2期から第3期へ新規テーマについての公募を実施

- 【公募】
- ・革新鋼板の腐食解析技術開発
  - ・革新鋼板の水素脆化（遅れ破壊）評価技術開発
  - ・マグネシウムのM I（マテリアルズインテグレーション）技術開発
  - ・マルチマテリアル設計技術開発
  - ・鋼材/CFRP等樹脂接合技術の開発（自動車部材用途）

公募予告 2018年（1月4日）⇒公募（2月9日）⇒公募〆切（3月19日）

#### 【採択】

採択審査委員会（4月12日）

➢採択審査項目；NEDOの標準的採択審査項目に加え、**本プロジェクトに適用される特別約款**に合意することが採択の要件を審査項目に加えた。

留意事項；

研究の健全性・公平性の確保に係る取組；公募の際にその他の研究費の応募・受入状況を確認し、不合理な重複及び過度の集中がないか確認した。

（参考：公募要領の留意事項(18)）

# 予算 (委託100%)

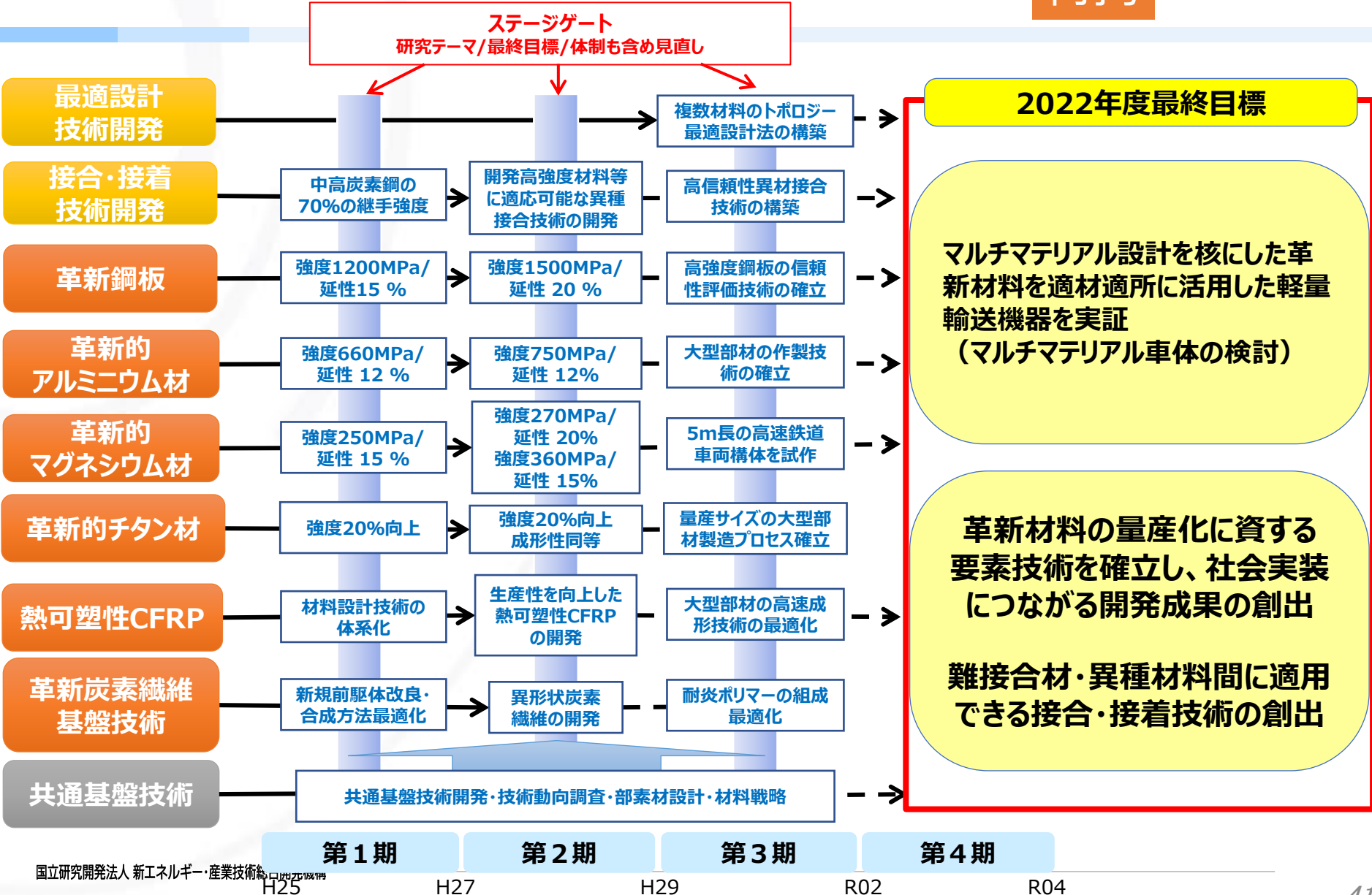
## ◆プロジェクト予算

(単位：百万円)

研究開発項目	2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	合計
新構造材料技術	2,212	3,780	3,496	3,708	3,544	3,512	2,827	2,738	2,536	2,400	30,753
熱可塑性CFRP	830	-	-	-	-	-	-	-	-	-	830
革新炭素繊維	918	980	804	-	-	-	-	-	-	-	2,702
合計	3,960	4,760	4,300	3,708	3,544	3,512	2,827	2,738	2,536	2,400	34,285
加速			1,570		185			882	483	288	3,408

再掲

# アウトプット (研究開発成果) のイメージ



再掲

# 目標達成に必要な要素技術

年次	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
依託元	METI			NEDO						
研究期間	第1期			第2期		第3期		第4期		
先行Proj.の融合と課題の新設	革新炭素繊維開発			熱可塑性CFRP		中性子線開発・接着技術開発課題を新設		マルチマテリアル車体の設計、接合基盤研究、CFやALのリサイクル課題を新設		マルチマテリアル車体におけるガルバニック腐食、鉄鋼信頼性、革新材料・接合技術の部品適用課題を新設
終了課題	終了FS課題 複層鋼板、水接合基礎フェーズへ			卒業課題 Ti接合、FSW機器・チップ等の実用化・事業化へ			卒業課題 Ti材料、CF材料、鉄道用Mgの実用化・事業化へ			



## 進捗管理

### PMによる進捗管理

PMは、PLや研究開発実施者と密接に連携し、研究開発の進捗状況を把握した。  
また、毎月、従事日誌および適宜ヒヤリング等により実施状況を確認し、目標達成の見通しを常に把握することに努めた。  
年1回、外部有識者による技術推進委員会を開催し各テーマ毎の進捗状況について議論を行った。

進捗等確認	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
技術推進委員会 ステージゲート(1回/年)								◎				
実施者ヒヤリング				◎	◎	◎			○			

### PLによる進捗管理

各分野別の研究開発の進捗管理を下記の会議にて実施し問題をチェックした。

- ・全テーマリーダー会議 (1回/年)
- ・PL+各テーマリーダー懇談会 (随時)
- ・テーマ間融合委員会 (3回/年)

進捗等確認	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
全テーマリーダー会議(1回/年)						◎						
PL+テーマリーダー 懇談会(随時)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
テーマ間融合委員会(3回/年)	◎					◎					◎	



# 進捗管理：中間評価結果への対応

## 2020年度中間評価での指摘事項と対応状況

カテゴリ	指摘事項	対応状況
事業の位置付け・必要性	なし。	—
研究開発マネジメント	<p>【1】ユーザーが関与する体制を構築しているとは言い切れず、差別化が有望視できる検査技術の開発や残留応力の評価手法などが、他のテーマに十分に展開（応用）されていないなど、実施者間の連携関係が十分に明確だったとは言い難い。</p> <p>【2】「材料」「接合」「トポロジー最適化」「実装」での各要素および横串での「コスト設計」が明確でなく、推定できる範囲でも、今後は明示することが望まれる。</p>	<p>これまでもマグネシウム製車両構体の開発では材料 メーカーに加え、車両を製造している川崎重工業、総合車両製作所も加わり体制を構築している。また、マルチマテリアル設計技術開発とマルチマテリアル防食評価技術の開発では自動車技術会の委員を有識者として、ユーザー視点を取り入れマネジメントを行ってきた。第4期からは自動車の部材や部分骨格において軽量化の検証を行う予定であり、ユーザー企業出身者が主体的に関与し、またテーマ間の成果を連携できる体制を構築する予定である。検査技術、評価手法等については、これまで各テーマを軸に検討を行っていたが、第4期は他のテーマに横展開するべくマネジメントを行っていく。</p> <p>第4期から行う自動車の部分試作や部分骨格の試作を通して、可能な範囲でコスト設計を明確化していく。</p>

# 進捗管理：中間評価結果への対応

## 2020年度中間評価での指摘事項と対応状況

カテゴリー	指摘事項	対応状況
研究開発成果	<p>【3】成果は、事例実行の域にとどまり、定量的な評価が行われていない事業も見られた。これらの状況に対して、解決の方針は示されていたが、達成できなかった原因の分析は不十分であるように思われる。</p> <p>【4】報告書上では最も主幹となる、車体軽量化の50%の目標値の定義が明確でなく、今後、輸送機器の使用条件をどのように変更した上で、どの部分の質量を50%軽量化するのかの定義が必要と思われる。</p>	<p>1年ごとに行われる技術推進委員会にて達成できなかった要因についても説明し外部委員からコメントをいただき次年度の目標設定に反映している。</p> <p>2015年、2017年と2回にわたり自動車の車体軽量化シナリオについて調査事業を行なっている。軽量化の定義については、調査事業の結果等をもとにNEDO技術戦略研究センター作成の高機能材料（構造材料）分野の技術戦略（非公開）において考察がなされ、個別材料の目標に落とし込まれている。その目標をもとにプロジェクトの最終成果として各部品の試作評価、シミュレーションを行い、来年度行う調査事業にて今後の自動車車体軽量化の動向を参考に、軽量化における最適化案を最終の成果報告書に明示する。</p>
成果の実用化・事業化	<p>【5】技術の実用化に向けた戦略や具体的取組は確認できるが、それらを市場に提供するための事業化の計画及びマイルストーンの検討は見え難かった。これに伴い、市場への製品提供のための市場の要求分析、解決方針や経済的・社会的効果の分析及び予測について、十分であったとは言い難い。今後は、新構造材料技術研究組合（ISMA）を中心とした本プロジェクトで得られた成果を、我が国の産業に対して普及する体制づくりを立案していただきたい。</p>	<p>事業化計画は各企業の戦略に基づくため公開しづらい。一方、市場要求や経済的・社会的効果の分析及び予測については、2017年度調査以降の社会情勢の変化を踏まえた調査を実施し、出口戦略に反映していく。産業界への普及については、すでにPJ内に鉄鋼メーカーや自動車メーカーが参画しており、実用化を見据えた研究開発を行っているところであるが、今後2年間では産業界への還元について、分野ごとに拠点化を進めデータの蓄積をはかるとともに、PJ終了後を見据えた具体的な検討を経産省と開始しているところである。</p>

# 進捗管理：動向・情勢変化への対応

## 2021年度調査事業

輸送機器の事業環境から見た車体軽量化材料・技術に関する最新動向と課題の調査を行った。

### 背景

#### 開発プロジェクト

革新的新構造材料等研究開発：事業期間：2014年度～2022年度

- エネルギー使用量及びCO2排出量削減を図るため、その効果が大きい輸送機器（自動車、鉄道車両等）の抜本的な軽量化に繋がる技術開発
- 輸送機器の原材料を革新的新構造材料等に置き換えることで、抜本的な軽量化（自動車の場合50%軽量化）

#### 関連調査事業

- 車体軽量化に関わる構造技術、構造材料に関する課題と開発指針の検討（2014年度）
- 近未来の移動体及びそれに貢献する車体軽量化に用いる構造材料の課題と開発指針の調査（2017年度）

### 目的

輸送機器、特に国内産業での事業規模が大きい自動車に対して、以下を明らかにする：

- 自動車産業に与える社会潮流・事業環境
- 環境問題を考慮した、車体軽量化の数値目標
- NEDO開発プロジェクトの成果と社会実装に向けた課題
- 海外における関連技術動向

# 進捗管理：動向・情勢変化への対応

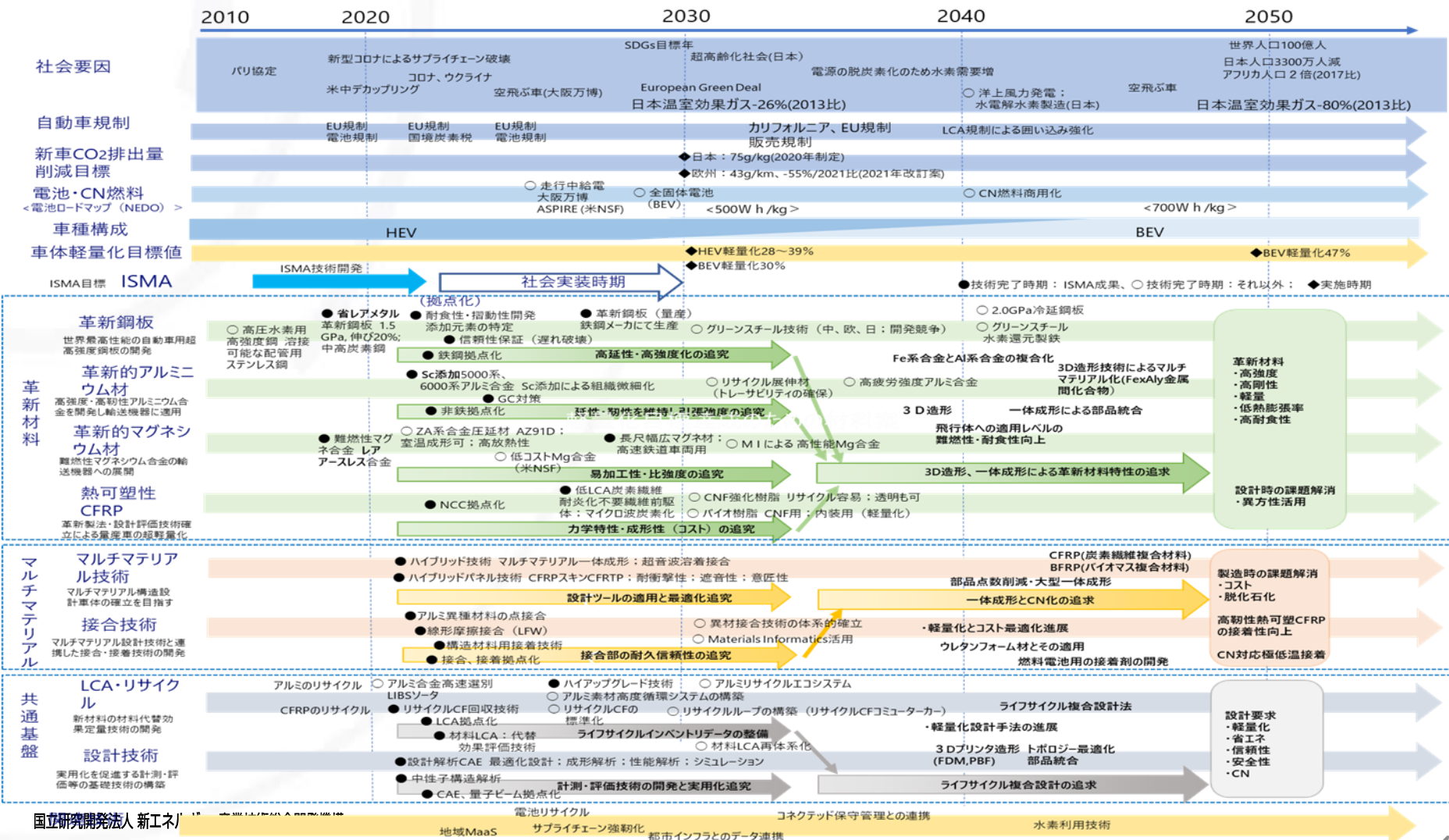
調査内容	アウトプット
(1) 社会情勢の変化を踏まえた事業環境調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・新潮流のキーワード抽出</li> <li>・前回の2017年の調査結果からの拡張による事業環境予測</li> </ul>
(2) 自動車軽量化の仮説立案(2030、2050年の姿)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2030年、2050年の車種別の軽量化目標</li> <li>・軽量化目標達成のための材料案</li> </ul>
(3) 自動車のマルチマテリアル化への課題	<ul style="list-style-type: none"> <li>・開発中の材料の開発状況と強み/弱みのまとめ</li> <li>・「革新的新構造材料等研究開発」事業の成果のまとめ</li> <li>・材料ごとの社会実装のための課題のまとめ</li> </ul>
(4) 海外の自動車用構造材マルチマテリアル化と市場動向の調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・国/地域単位での市場動向と技術開発動向の特徴のまとめ</li> <li>・国/地域での実用化、開発例</li> </ul>
(5) PJ 成果による軽量化車両の普及に向けた課題と展望のまとめ	<ul style="list-style-type: none"> <li>・2030年実用化に向けたISMA成果、2050年に向けた技術課題と開発動向を示すロードマップ</li> </ul>

(6) 有識者の意見収集	ヒアリング調査	所属	実施件数	意見交換会*	所属	人数
		自動車メーカー	5		大学関係者	3
		部品メーカー	2		民間企業関係者	2
		材料メーカー	8			
		大学・研究機関	3		合計	5
合計	18					

\* 意見交換会は2回開催

# 進捗管理：動向・情勢変化への対応

- 事業環境：CN（カーボンニュートラル）に向かって規制が強化され、自動車の事業環境が急速に変化する
- 車種構成：日本においては、2030年まではHEVが主体、その後BEVが主体となる



# 進捗管理：開発促進財源投入実績

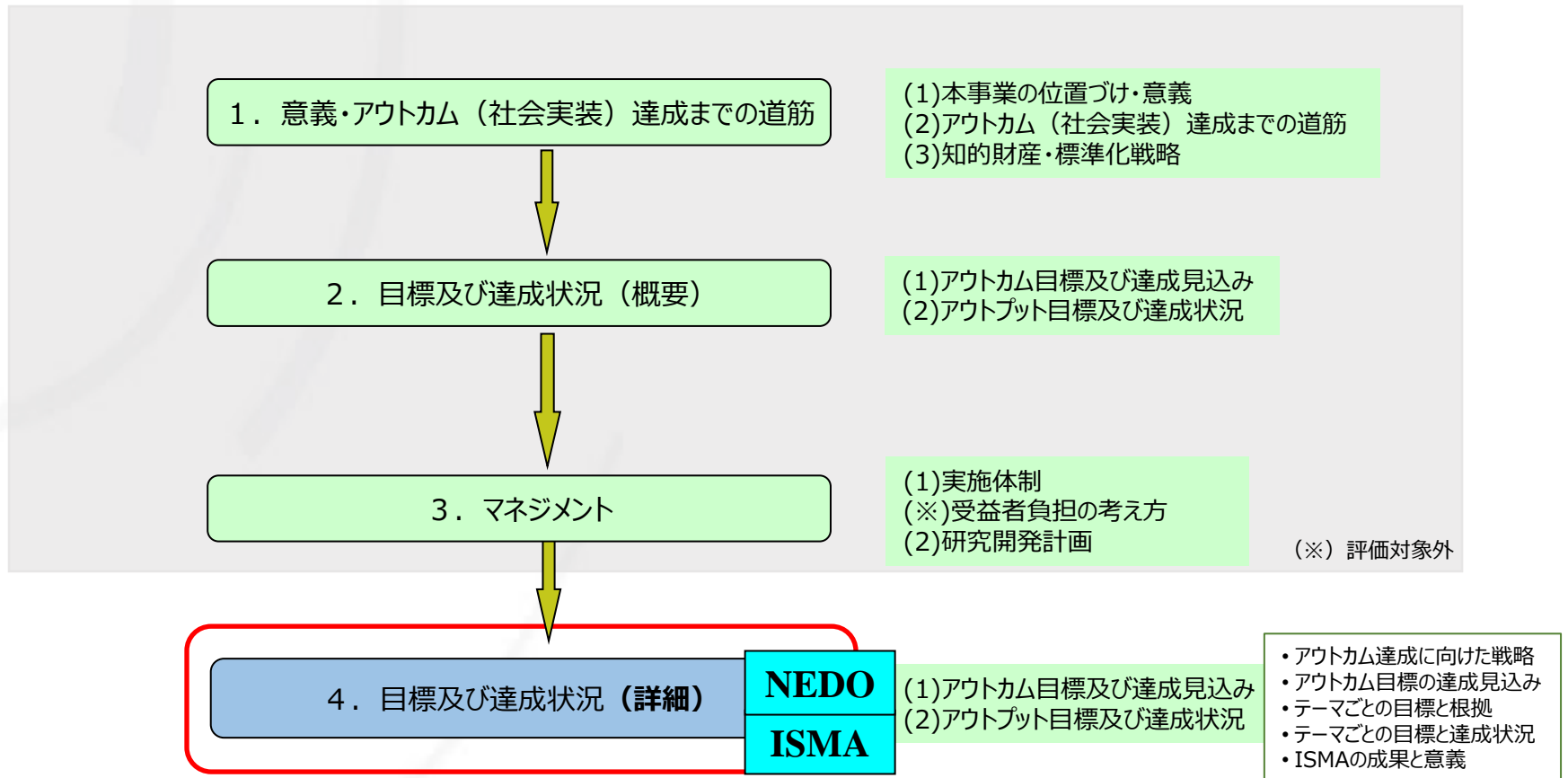
件名	年度	金額 (百万円)	目的	成果
線形摩擦攪拌 (LFW)装置 他	2020年度	882	接合する異材の材料性能に合わせて圧力を制御し、テーラードブランク材への応用を見据えて基盤技術を確立する。	厚さ2mmの強度1.5GPa級中高炭素鋼で、母材強度の80%以上を得る手法を確立。(2022年度末)
マルチマテリアル部 材試作加速他	2021年度	483	片面マルチマテリアルボディーの構造部材試作、評価の数量を増やし、実用化要件を満足する結果を得るため。	実用化要件に即した構造部材試作品を提示することで、ユーザー企業に早期社会実装を促すことができる。
中性子源改造 (計測ライン増設) 他	2022年度	288	中性子源改造(計測ライン増設)によって、健全性検査のための透過イメージング像を、従来の2次元から3次元に拡張して分析情報を高品質化し、これを様々なマルチマテリアル接合部の解析支援に用いてISMA-PJ全体を加速する。	先端材料/接合技術開発のための世界的な計測拠点が構築できる。製品を、高速に大面積で3次元解析することで、劣化(割れ・腐食減肉・破壊・接合不良・接着不良、他)箇所を効率的に見つけ出し、ブラッグエッジイメージング装置とで、マイクロ～ミクロの詳細結晶解析が可能になる。

5-4

## ＜評価項目 4＞ 目標及び達成状況（詳細）

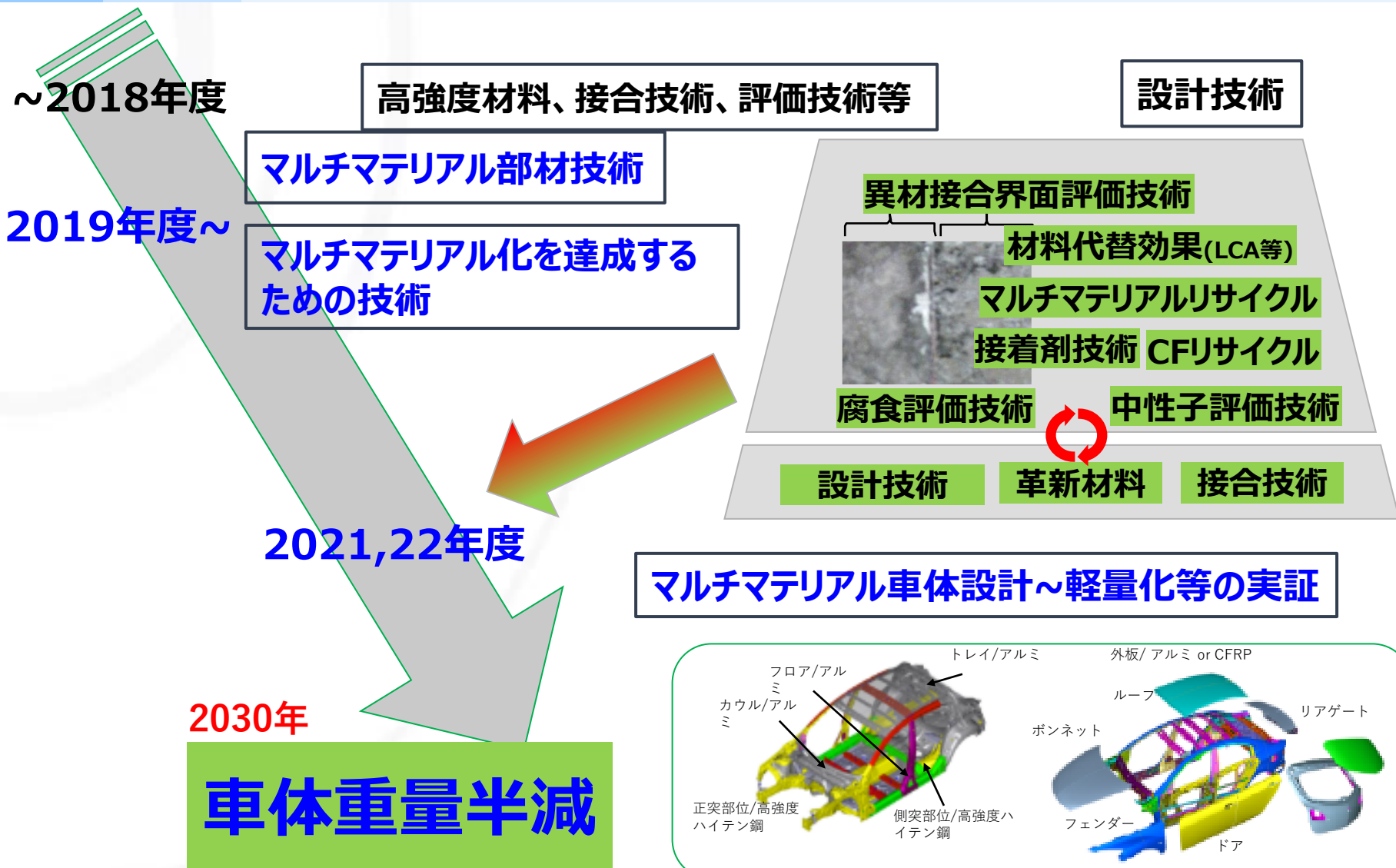
- (1) アウトカム目標及び達成見込み
- (2) アウトプット及び達成状況

## 報告内容

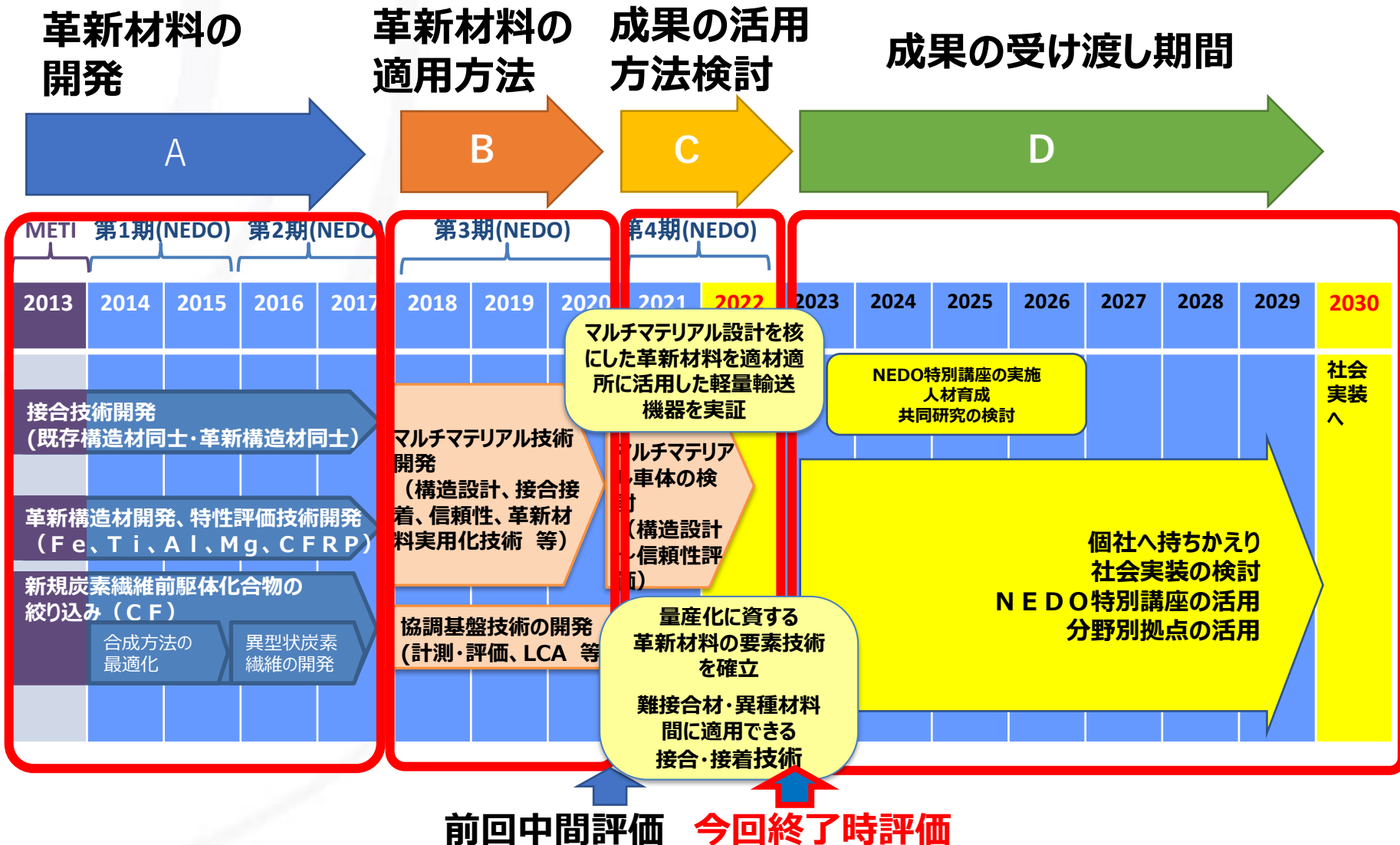




# アウトカム（社会実装）達成までの道筋



# アウトカム（社会実装）達成までの道筋



# アウトカム（社会実装）達成までの道筋 全体計画

## 成果の活用 方法検討

## 成果の受け渡し期間

C

D

従来であれば、プロジェクトの成果は企業（個社）が持ち帰り事業化、実用化を進めていたため、国民が成果を活用できる場がなかった。

第4期(NEDO)

2021 2022 2023 2024 2025 2026 2027 2028 2029 2030

マルチマテリアル設計を核にした革新材料を適材適所に活用した軽量輸送機器を実証

NEDO特別講座の実施  
人材育成  
共同研究の検討

社会実装へ

量産化に資する革新材料の要素技術を確立  
難接合材・異種材料間に適用できる接合・接着技術

個社へ持ちかえり社会実装の検討  
NEDO特別講座の活用  
分野別拠点の活用  
※詳細は次ページにて

協調基盤技術の開発  
(計測・評価、CA等)

## 第4期にて

- ・事業終了後も成果を活用できる場、方法の検討
- ・成果の発信の仕方（構造物試作、展示会、書籍など）
- ・基本計画、実施方針に基づいたアウトプットの目標達成

# アウトカム（社会実装）達成までの道筋 全体計画

2022年  
アウトプット



成果の受け渡し期間

2030年  
アウトカム

ISMAメンバ→個社へ持ち帰り



ISMAメンバ外←アクセス窓口、支援体制構築

N E D O 特別講座

展示会ほか

マルチマテリアル連携研究ハブ

分野別拠点

要素技術開発

プロトタイプ試作

量産開発

量産

売上予測：1.2兆円  
 CO<sub>2</sub>削減効果：  
 373.8万tCO<sub>2</sub>/年  
 (車両軽量化の効果として)

車体重量半減

## ユーザーすそ野の拡大→アウトカム拡大への布石

# アウトカム（社会実装）達成までの道筋 予算の確保

## 事業イメージ

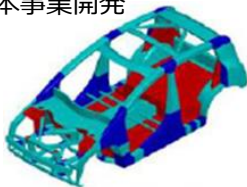
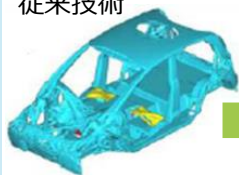
### (1) 最適設計開発、ボディー試作による開発技術の実証

- マルチマテリアル化に対応した最適設計ツールの開発
- 本事業で開発した革新的な軽量材料、**マルチマテリアル化技術の実証を目的とした自動車ボディーの試作**

#### ①CAEによるマルチマテリアル形状最適化

従来技術

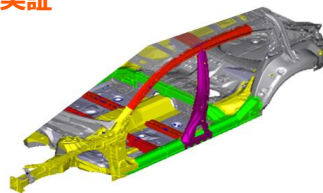
本事業開発



単一素材における形状最適化

複数材料を組み合わせたマルチマテリアル形状最適化

#### ②片面マルチマテリアルボディーの試作・実証



本事業で開発した革新的な軽量材料、接合・接着技術、設計技術等をフル活用したボディーの試作・実証

### (2) 計測・評価技術

- 本事業で開発した中性子計測装置による信頼性評価技術の強化。
- 自動車部材を想定した成形性や腐食・脆化等の評価手法の確立と本事業で開発したマルチマテリアル部素材の評価。

### (3) 基盤構築

- 各研究開発拠点**において本事業成果として蓄積されている革新的材料評価技術、マルチマテリアル化技術等を一体的に活用するために必要な**データの利活用体制を整備し、社会実装にむけた実用化研究開発を加速化。**

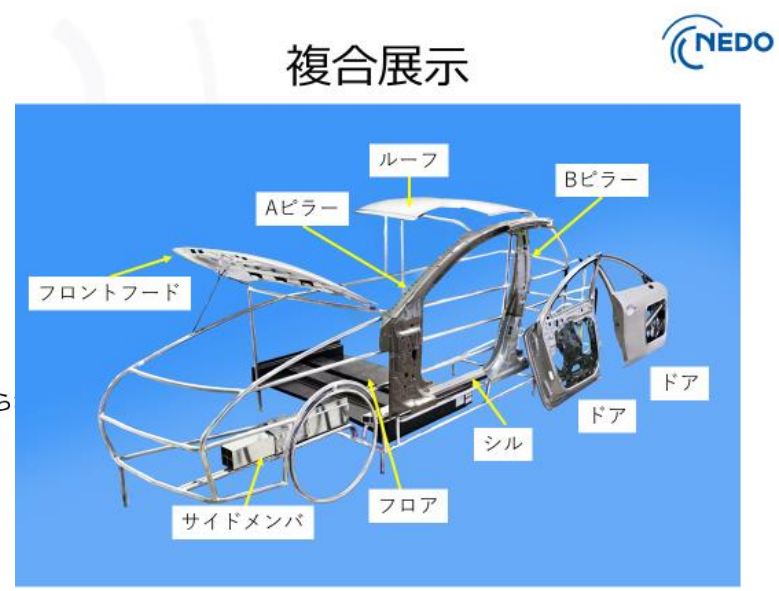
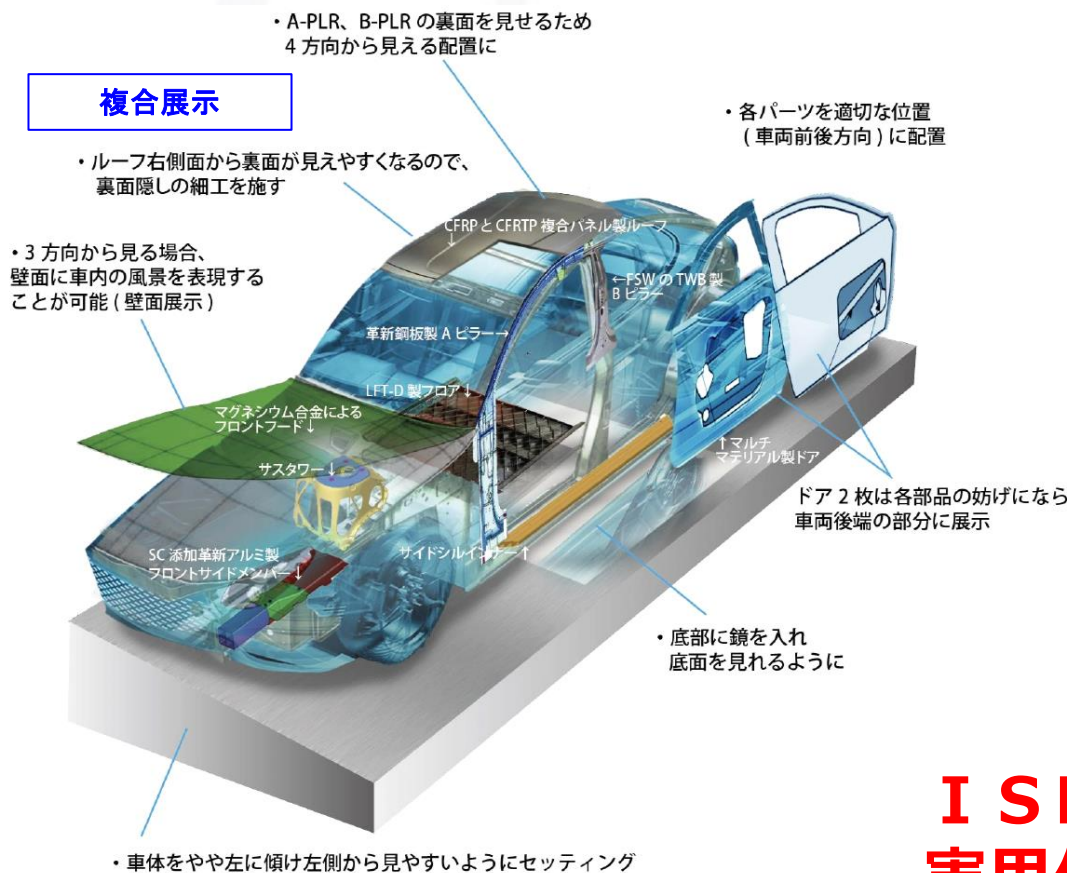
## 財務省への概算要求 ISMAと予算を確保！

マルチマテリアル構造部材試作の予算確保

分野別拠点構築の予算確保

# アウトカム（社会実装）達成までの道筋 成果の発信

## ① 成果の発信ー 1 ボディ試作



**I S M Aでの開発材料を用いて  
実用化ポテンシャルの高さを  
部品試作にて検証**

# アウトカム（社会実装）達成までの道筋 **成果の発信**



2023 ナノテク展 NEDOブース 2023年2月1-3日





# アウトカム（社会実装）達成までの道筋 **拠点構築**

・事業終了後も成果を活用できる場、方法の検討

## ②拠点構築の検討

METI、NEDO、ISMA、産総研、NIMS、ガバニングボード等の外部委員  
ふくめ構造材事業の在り方を検討  
ユーザーやMETI内原課へのヒヤリングをもとに今後の方向性を決定



これまでの産学の意見を踏まえ、ISMA事業については、当初の目的を達成していることから一旦終了することが妥当ではないか。他方、**残りのプロジェクト期間内に成果の拠点化を進め、プロジェクト終了後も成果活用できる体制構築を目指す**ことが必要ではないか。

**各研究開発拠点において**本事業成果として蓄積されている革新的材料評価技術、マルチマテリアル化技術等を一体的に活用するために必要なデータの利活用体制を整備し、**社会実装にむけた実用化研究開発を加速化。**

# アウトカム（社会実装）達成までの道筋 拠点構築

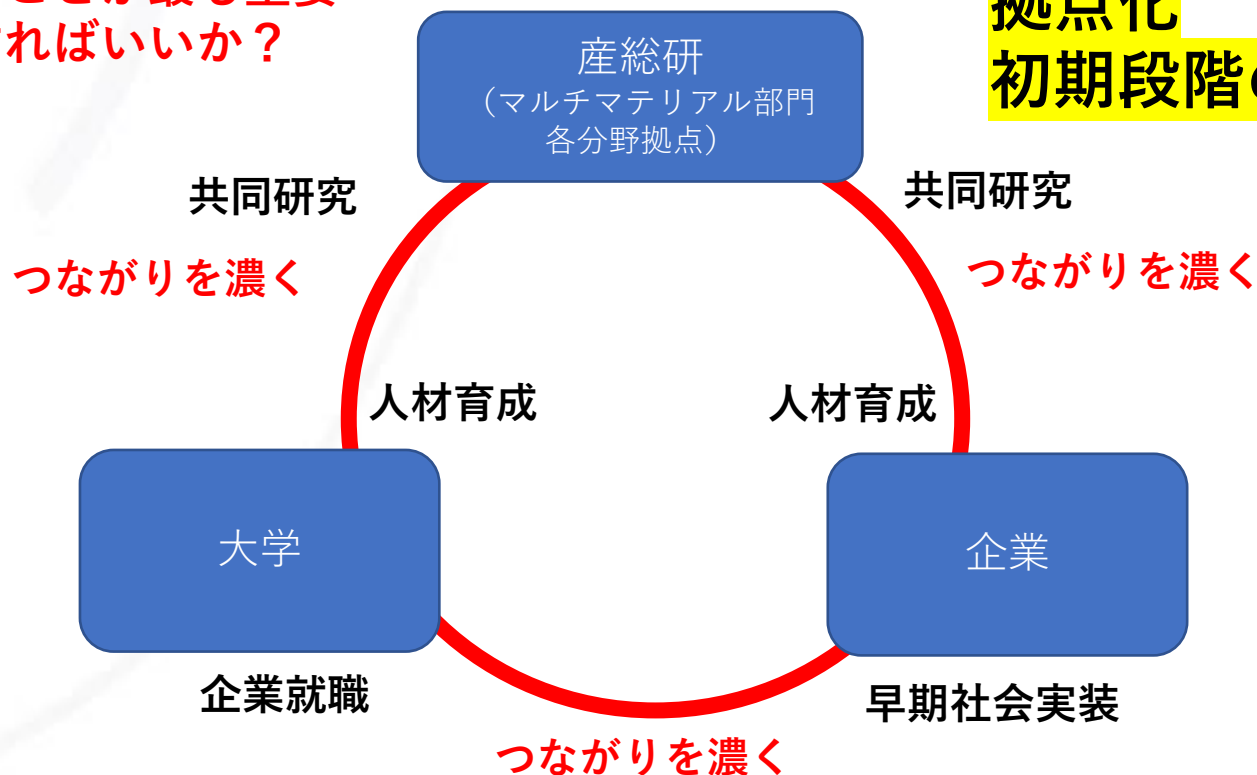
## ★世界最高峰の構造材料開発の実施機関

民間企業、大学からこのように認識してもらうことが最も重要  
それにはどうすればいいか？

★ISMA事業で種をまく

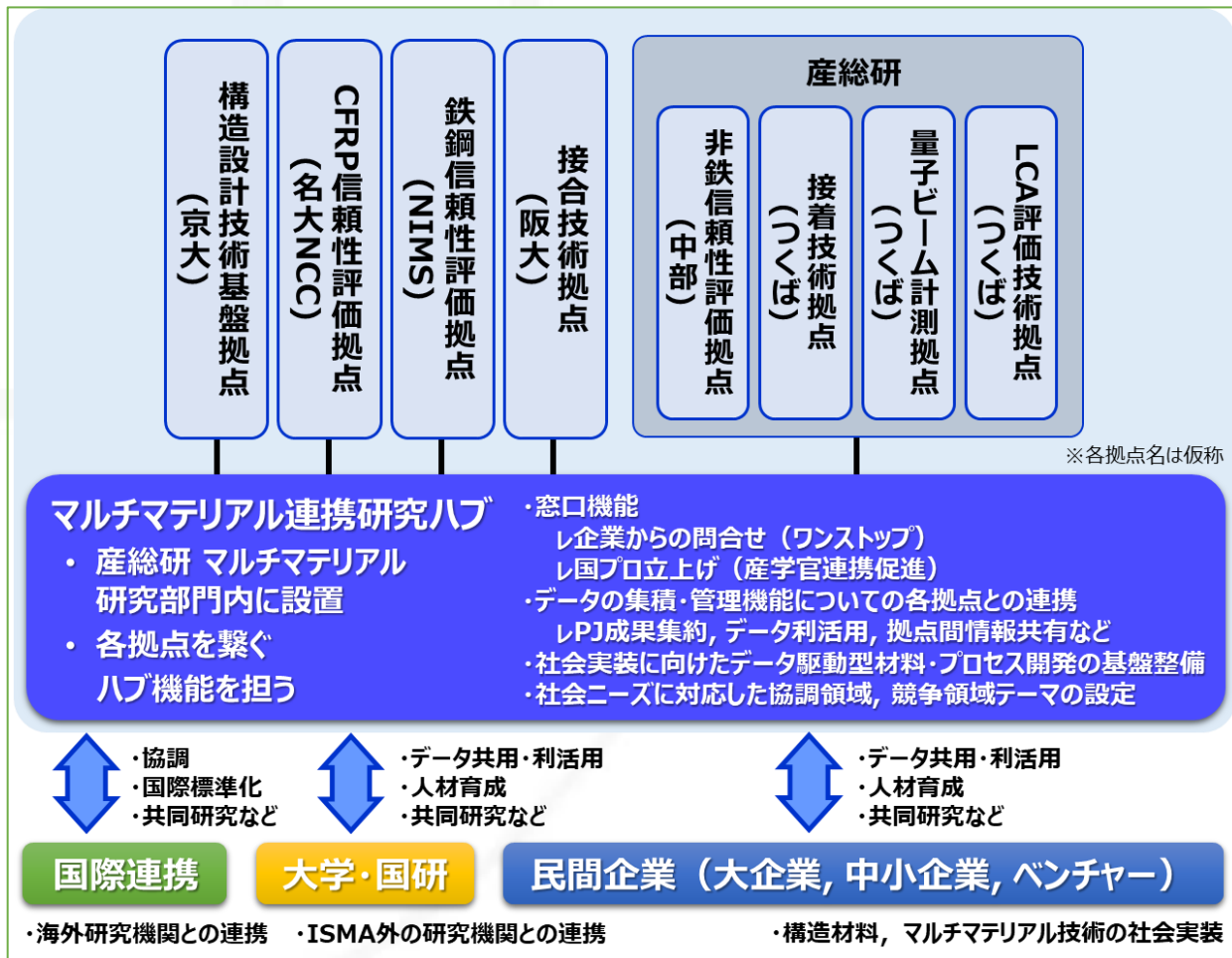
民間企業、大学からの問い合わせ窓口  
国際連携は？

**拠点化  
初期段階の構想図**



# アウトカム（社会実装）達成までの道筋 拠点構築

## ★世界最高峰の構造材料開発の実施機関



### STEP1

- ★各拠点の紹介機能
- ★維持管理予算
- ★産業界へのアピール
- ★ASIT外との連携



### STEP2

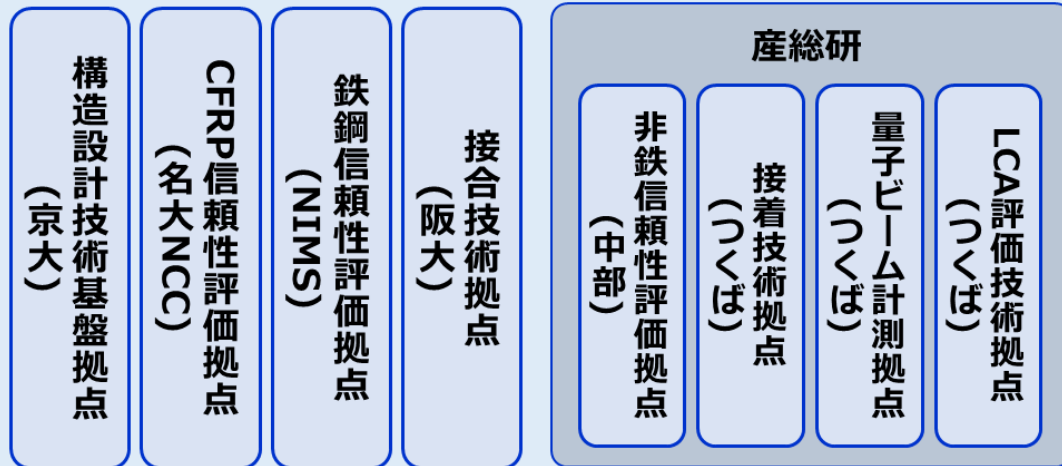
- ★データを陳腐化させないための方法



### STEP3

- ★新規国プロ
- ★人材育成
- ★国際連携

# アウトカム（社会実装）達成までの道筋 拠点構築



※各拠点名は仮称

分野毎に  
拠点構築  
(8拠点)

**マルチマテリアル連携研究ハブ**

- 産総研 マルチマテリアル研究部門内に設置
- 各拠点を繋ぐハブ機能を担う

- 窓口機能
  - レ企業からの問合せ（ワンストップ）
  - レ国プロ立上げ（産学官連携促進）
- データの集積・管理機能についての各拠点との連携
  - レPJ成果集約，データ利活用，拠点間情報共有など
- 社会実装に向けたデータ駆動型材料・プロセス開発の基盤整備
- 社会ニーズに対応した協調領域，競争領域テーマの設定

各拠点の連携を  
フォローする  
研究ハブの設置

外部問合せからの  
窓口機能

国際連携  
・協調  
・国際標準化  
・共同研究など

大学・国研  
・データ共用・利活用  
・人材育成  
・共同研究など

民間企業（大企業，中小企業，ベンチャー）  
・データ共用・利活用  
・人材育成  
・共同研究など

**国際連携**      **大学・国研**      **民間企業（大企業，中小企業，ベンチャー）**

- 海外研究機関との連携
- ISMA外の研究機関との連携
- 構造材料，マルチマテリアル技術の社会実装

**PJ実施期間内で  
窓口機能を稼働**

# アウトカム（社会実装）達成までの道筋 **拠点構築**

2022年10月21日（金）13時00分～

タイトル；NEDO「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトシンポジウム

2022年度テーマ：マルチマテリアル構造材料研究拠点シンポジウム

～構造材料の新たな価値とイノベーション創出をめざす～



# アウトカム（社会実装）達成までの道筋 **NEDO特別講座**

プロジェクト名（P06046 / 技術戦略センター）  
**NEDOプロジェクトを核とした人材育成、産学連携等の総合的展開**

講座名  
**マルチマテリアル構造部材に係る特別講座**  
**2023/10より講座開始**

## ★予算的にも各拠点を支援

### 概要

「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトの開発成果を大学や企業の人材育成や技術開発に有効に活用すると共に、構造部材における材料のマルチマテリアル化を幅広い分野で実用化や普及を加速させる。当該、プロジェクトに参画していない大学や企業の参加も積極的に促し、従来**部材をマルチマテリアル化した場合の信頼性評価技術、LCAなどについて理解を深めるとともに製品開発における企業の裾野を広げる。**



1. 人材育成
2. 人的交流等の展開
3. 周辺研究の実施

# アウトカム（社会実装）達成までの道筋 **NEDO特別講座**

## 各拠点でのNEDO特別講座 内容(案)

	講座 拠点	実習内容	受講者数	講座	実習
1	接着技術拠点	A)接着試験法基礎講座 B) 接着試験法講座	10名×1日×1回 4名×5日×1回	3日	2日
2	量子ビーム計測拠点	量子ビーム計測入門	最大4名×2日×1回	1日	1日
3	LCA評価拠点	材料代替効果定量手法入門講座	10名×1日×?	90分	90分
4	非鉄信頼性評価拠点	非鉄軽量材料信頼性基礎講座	8名×2日間×1回	1日	1日
5	鉄鋼信頼性評価拠点	A) 疲労寿命予測入門講座 B) 水素脆化評価入門講座	5名×1日×2回 5名×1日×2回	半日 半日	半日 半日
6	構造設計技術基盤拠点	A)レベルセット・トポロジー最適化入門講座 B)構造最適化プロフェッショナル講座	3名×1日×2回 4名×5日×1回	半日 2.5日	半日 2.5日
7	接合技術拠点	A) 溶接・接合プロセス解析入門講座 B) 固相接合基礎講座	10名×1日×2回 5名×2日×2回	0.5日 0.5日	0.5日 1.5日
8	CFRP信頼性評価拠点	CFRPの成形法と材料特性評価の入門講座	10名×1日×1回 5名×1日×2回	1日	2日

# アウトカム（社会実装）達成までの道筋 NEDO特別講座

## 鉄鋼信頼性評価拠点 NEDO特別講座 検討内容の一例

A. Shibata et al. *Mater Sci Technol* 2017.

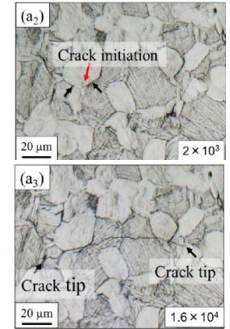
### Aコース：疲労寿命予測入門講座

疲労き裂の成長予測には破壊力学が有効である。材料の疲労寿命の大部分は、き裂の成長寿命に支配されるので、破壊力学で疲労寿命を算出できるように思われるが、微小疲労き裂の特異性のため単純ではない。本講座では、まず、破壊力学による疲労き裂進展評価の基礎と、微小疲労き裂の特徴に関する講義を行う。その後、実習として、通常の疲労試験とNIMSが開発した自動顕微鏡システムによるマイクロな疲労き裂の発生・進展挙動の観察を行い、これらの疲労データを破壊力学により評価する。また、併せてNIMSの様々な最新設備の見学を行う。

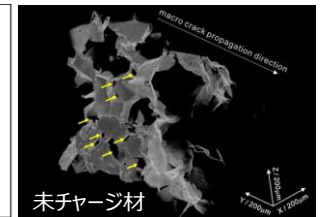
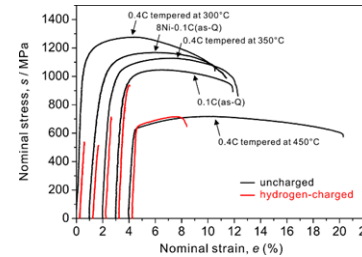
### Bコース：水素脆化評価入門講座

本講座では、鉄鋼を対象として、遅れ破壊など材料中に侵入した水素が引き起こす破壊現象の事例と機構についての講義とともに、試験片への水素チャージ法や侵入水素量と力学特性の評価法についての実習を行う。講義では、高強度鋼とステンレス鋼における水素脆化の事例とそれぞれに異なる破壊メカニズムとともに、材料を安全に使用するための対策について学ぶ。実習では、講義での理解をもとに、自動車用ハイテン材を対象とした評価法を学ぶ。また、併せてNIMSの様々な最新設備の見学を行う。

疲労き裂進展追跡装置と観察例



高強度鋼平滑材の水素脆化と粒界き裂の3次元観察



Shibata et al. *Mater Sci Technol* 2017



# 「革新的新構造材料等研究開発」 (終了時評価)

2014年度～2022年度 9年間

## プロジェクトの概要

新構造材料技術研究組合

2023年4月21日

実施者：新構造材料技術研究組合 (ISMA)

技術企画部 プロジェクトマネージャー室 部長、  
研究統括代行 秋宗 淑雄

# 説明内容

## 1.アウトプットの目標値と達成状況

### 1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況

### 1.2 全分野のTRL評価

### 1.3 アウトカムに繋がる大型設備・ラインの構築

- ・ IHIの鋼/CFRP部品製造ライン
- ・ NCCのLFTD (CFRTP) 試作ライン
- ・ 産総研の中性子ビームライン

## 2.アウトカムへの橋渡し状況

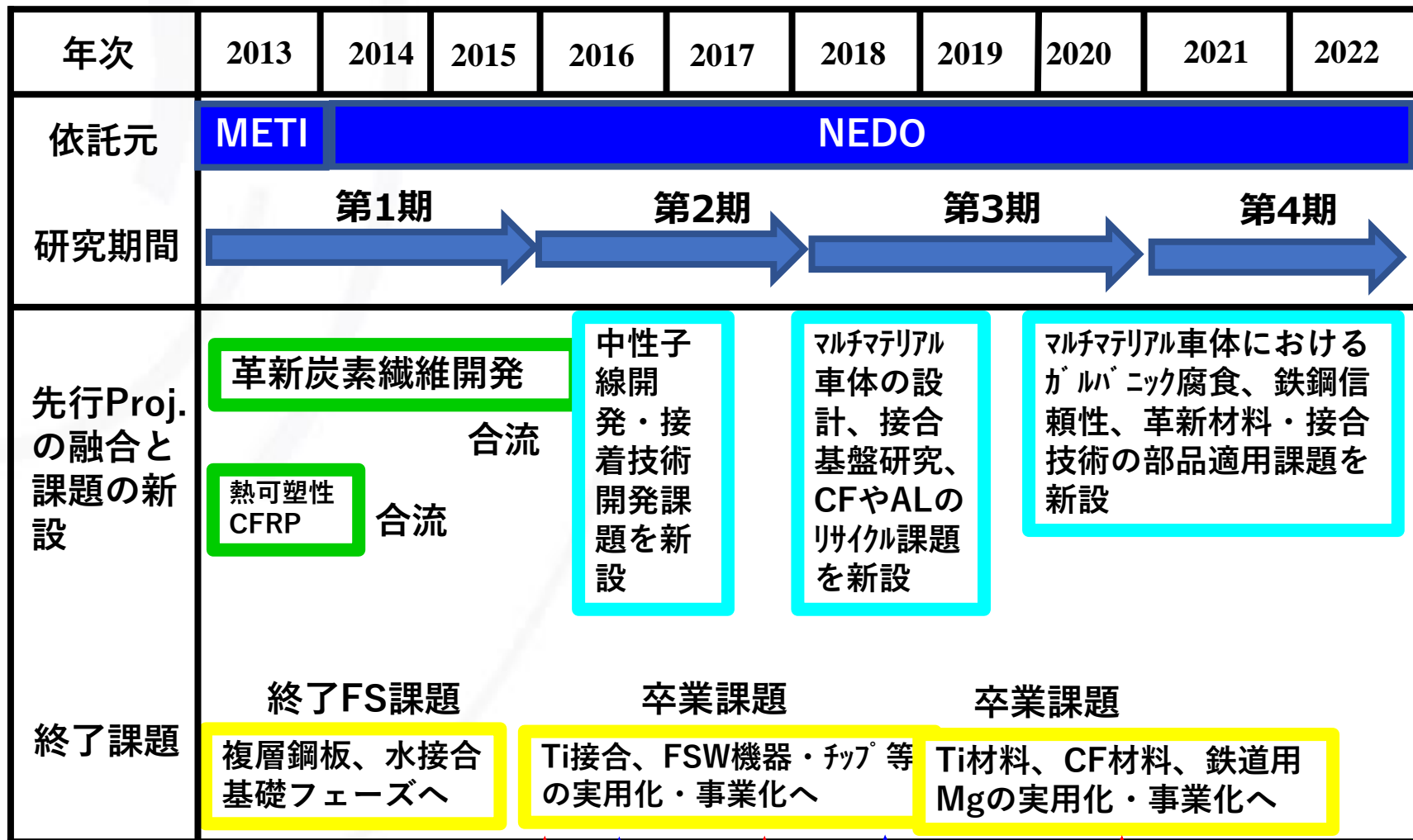
### 2.1 技術開発成果を記録する拠点化状況

### 2.2 新素材による部品試作での実証

## 3.成果の創出状況

### 3.1 知財報告件数

# 研究開発のスケジュール



# 1.1 全分野のプロジェクト基本計画の達成状況（1）

研究開発項目	2014-2015 H26-27	中間 評価1	2016-2017 H28-29	中間 評価2	2018-2020 H30-R02	中間 評価3	2021-2022 R03-04	終了時 評価
①「マルチマテリアル技術開発」					(1) マルチマテリアル設計技術開発 (a) トポロジー最適化システムの構築 ・複数の材料のトポロジー最適設計法を構築する。 (b) マルチマテリアル界面評価モデル化 (c) 車体構造適用可能性検討 ・複数の材料の利用を想定した対象問題を選定し、そのデータを作成する。 ・車体構造への展開を目的としたソフトウェアの大規模問題への拡張を検討する。 ・最適構造の工学的な妥当性を検証・評価する。	達成	(1) マルチマテリアル設計技術開発 (d) マルチマテリアル実設計への適用 ・開発材料を利用した最適設計法を構築する。 ・マルチマテリアル最適構造の導出と接合方法を含めた評価を実施し、最終的にマルチマテリアル設計車体の提案を行う。 (2) マルチマテリアルボディーの検討・試作 ・トポロジー最適化法により得られた軽量化マルチマテリアル部材につき、粉末積層造形プロセスによる軽量化の可能性を検討する。	達成

# 1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況（2）

研究開発項目	2014-2015 H26-27	中間 評価1	2016-2017 H28-29	中間 評価2	2018-2020 H30-R02	中間 評価3	2021-2022 R03-04	終了時 評価
②「接合技術開発」	(1) チタン/チタン連続接合技術の開発 ・接合深さ：5mm 以上・接合強度：母材強度の90%以上	達成	(1) チタン/チタン連続接合技術の開発 ・接合深さ：10mm 以上・接合強度：母材強度の90%以上	達成				
	(2) 中高炭素鋼/中高炭素鋼接合技術の開発（スポット接合技術と連続接合） ・接合強度：厚み1.5mm、強度1.2GPa 以上の中高炭素鋼で、JIS A 級（JISZ3140 :1989）の引張せん断荷重平均値の70%	達成	(2) 中高炭素鋼/中高炭素鋼接合技術の開発（スポット接合技術と連続接合） ・接合強度：厚み1.5mm、強度1.2GPa 以上の中高炭素鋼で、JIS A 級（JISZ3140 :1989）の引張せん断荷重平均値の70%以上	達成	(2) 中高炭素鋼/中高炭素鋼接合技術の開発（スポット接合技術と連続接合） ・接合強度：厚み1.4mm、強度1.5GPa以上の中高炭素鋼で、JIS-A級（JIS Z3140 :2017）の引張せん断荷重平均値の70%以上、十字引張荷重平均値の70% 以上	達成	(2) 中高炭素鋼/中高炭素鋼接合技術の開発（スポット接合技術と連続接合） ・接合強度：厚み1.4mm、強度1.5GPa以上の中高炭素鋼で、JIS-A級（JIS Z3140:2017）の引張せん断荷重平均値以上、十字引張荷重平均値以上	達成
	(3) 鋼材/アルミニウムの接合技術の開発（スポット接合技術） ・JIS A 級（JIS Z3140 :1989）の引張せん断荷重平均値以上 又は 母材破断	達成	(3) 鋼材/アルミニウムの接合技術の開発（スポット接合技術） ・高減衰接着剤の仕様決定	達成	(3) 鋼材/アルミニウムの接合技術の開発（スポット接合技術） ・接合強度：抵抗スポット溶接による剥離強度として十字引張荷重平均値が1.5kN 以上	達成	(3) 鋼材/アルミニウムの接合技術の開発（スポット接合技術） ・接合強度：各種実用部品の接合で、JIS-A級（JIS Z3140:2017）の引張せん断荷重最小値以上又は母材破断	達成
	(4) アルミニウム/CFRP 接合技術の開発 ・接合強度：試験片の接合で、JIS A 級（JIS 3140 :1989）の引張せん断荷重平均値以上 又は 母材破断	達成	(4) アルミニウム/CFRP 接合技術の開発 ・高減衰接着剤の実用組成の決定	達成	(4) アルミニウム/CFRP 接合技術の開発 ・ポリアミド樹脂（PA）、ポリフェニルスルファイド樹脂（PPS）など高融点樹脂をマトリックスとする CFRP の接合技術の確立	達成	(4) アルミニウム/CFRP 接合技術の開発 ・接合強度：各種実用部品の接合で、JIS-A級（JIS Z3140:2017）の引張せん断荷重最小値以上又は母材破断	達成
	(5) 鋼材/CFRP 等樹脂接合技術の開発 ・接合強度：母材破断	達成	(5) 鋼材/CFRP 等樹脂接合技術の開発 ・接合強度：母材破断	達成	(5) 鋼材/CFRP 等樹脂接合技術の開発 ・鋼材/CFRP 複合成形パネルの製作に向けた接合材料の仕様確定	達成	(5) 鋼材/CFRP 等樹脂接合技術の開発 ・鋼材/CFRP 複合成形パネルの製作	達成
				(6) 構造材料用接着技術の開発 ・接合強度：引張せん断強度10MPa以上	達成	(6) 構造材料用接着技術の開発 ・接合強度：金属用接着剤では引張せん断強度 20MPa 以上、プラスチック用接着剤に対しては7MPa 以上	達成	(6) 構造材料用接着技術の開発 ・接合強度：金属用接着剤は引張せん断強度 28MPa 以上、プラスチック用接着剤に対しては 10MPa 以上

# 1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況（3）

研究開発項目	2014-2015 H26-27	中間 評価1	2016-2017 H28-29	中間 評価2	2018-2020 H30-R02	中間 評価3	2021-2022 R03-04	終了時 評価
③「革新的チタン材の開発」	(1) 製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発 ・スポンジチタンで、鉄含有値：ばらつき範囲 50～500ppm 平均値 200ppm 以下	達成	(1) 製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発 ・大型工業製品製造に不可欠な工程技術の要素技術を確立し、量産プロセスの見通しを得る。	達成	(1) 製錬・溶解・熱延工程を革新的に短縮した高機能チタン薄板製造技術開発 ・実機スケールで、Fe≤200ppm、O≤150ppm、Cl≤300ppmのスポンジチタンを製造可能な技術の確立	早期達成		
	(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発 ・精錬後の酸素含有値：300ppm 以下	達成	(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発 ・実機プロセスにおける精錬後の酸素含有値を300ppm 以下とする要素技術確立の見通しを得る。	達成	(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発 ・引張強度が現行材より20%向上した材の量産プロセス検証	早期達成		
	(3) チタン新製錬技術開発 ・鉄含有値：2000ppm 以下	達成	(3) チタン新製錬技術開発 ・製錬プロセス設計指針を構築し、量産プロセスへの見通しを得る。	達成	(3) チタン新製錬技術開発 ・工業化が可能と判断される Fe≤2000ppm、酸素≤1000ppm で、現行クロール法よりコスト20%削減に必要な要素技術を提示	早期達成		
④「革新的アルミニウム材の開発」	(1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発 ・引張強度：660MPa 以上（現状 600MPa）	達成	(1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発 ・引張強度：750MPa 以上（現状 600MPa）	達成	(1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発 ・疲労強度を維持しながら高強度化した合金（引張強度：750MPa）の実機レベル（大型ねじり鍛造装置を用いた）の製造技術開発	達成	(1) 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発開発合金の実機化製造条件の技術指針確立	○
	(2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発 ・電解条件の確立	達成	(2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発 ・AlCl <sub>3</sub> 系イオン液体の新合成法の開発 及び 量産法の提示	達成	(2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発 ・新電析浴において、電析速度 1.0μm/min以上の達成	達成	(2) アルミニウム材製造電析プロセス技術開発 ・鋳物級の低純度から新地金以上の高純度アルミニウムへのハイアップグレード技術の指針確立	○原料をAL 廃材に置き換え
			(3) 複層アルミ合金の開発 ・熱処理後の耐力600MPa 以上	達成	(3) 複層アルミ合金の開発 ・熱処理後の耐力700MPa 以上	早期達成		

# 1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況（4）

研究開発項目	2014-2015 H26-27	中間 評価1	2016-2017 H28-29	中間 評価2	2018-2020 H30-R02	中間 評価3	2021-2022 R03-04	終了時 評価
⑤「革新的マグネシウム材の開発」	(1) 易加工性マグネシウム材の開発・レアアース添加無し・引張強度：250MPa 以上	達成	(1) 易加工性マグネシウム材の開発 ・レアアース添加無し・引張強度：270MPa 以上	達成				
	(2) 高強度マグネシウム材の開発・レアアース添加無し・引張強度：350MPa 以上	達成	(2) 高強度マグネシウム材の開発 ・レアアース添加無し・引張強度：360MPa 以上・伸び：15% 以上	達成				
	(3) マグネシウム材の評価手法の開発 ・既存の難燃性マグネシウム合金を対象として、発火メカニズム及び腐食メカニズムの解明と評価手法の導出	達成	(3) マグネシウム材の評価手法の開発 ・難燃性マグネシウム合金を対象として、発火特性、腐食特性 及び 疲労特性 に関するデータベース構築	達成				
			(4) マグネシウム材の接合技術の開発 ・開発材の接合技術の開発	達成				
					(5) 革新的マグネシウム材の開発及び長期性能評価 ・前期で開発した合金を用いて高速鉄道車両適用のための大型部材（長さ5m以上）の材料製造技術（押出技術、圧延技術、加工技術）を構築する。	達成	(5) 革新的マグネシウム材の開発及び長期性能評価 ・前期で開発した合金を用いて鉄道車両のための大型部材（長さ25m以上）の量産技術の技術指針を構築する。	達成
					(6) マグネシウム製高速車両構体の開発 ・革新的マグネシウム材を用いて高速車両構体を設計するための技術指針を、一般断面モックアップ構体の作製・評価を通じて構築する。	達成	(6) マグネシウム製高速車両構体の開発 ・革新的マグネシウム材製の実物長高速車両構体を設計するための技術指針を構築する。	達成
					(7) マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション（MI）活用技術開発 ・難燃性マグネシウム合金接合部の疲労性能・寿命を、理論や経験則、数値モデリング、データベース、機械学習などにより予測可能とする各モジュールのプロトタイプを完成させる。	達成	(7) マグネシウム材の性能・寿命に関するマテリアルズ・インテグレーション（MI）活用技術開発 ・難燃性マグネシウム合金接合部の長期性能（疲労性能・寿命、耐食性等）を、予測可能とする各モジュールの検証を実施し、統合したワークフローとして完成させる。	達成

# 1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況（5）

研究開発項目	2014-2015 H26-27	中間 評価1	2016-2017 H28-29	中間 評価2	2018-2020 H30-R02	中間 評価3	2021-2022 R03-04	終了時 評価
⑥「革新鋼板の 開発」	(1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発・レアメタル添加量：10wt %未満・引張強度：1.2GPa以上・伸び：15 %以上	達成	(1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発 ・レアメタル添加量：10wt %未満・引張強度：1.5 GPa以上・伸び：20 %以上	達成	(1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発 ・開発材において汎用鋼（590MPa～980MPa級）と同等の耐食性と水素脆性を旨す	達成	(1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発 ・鋼材中の軽元素と耐食性の関係の明確化	達成
	(2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発 ・低濃度炭素検出技術 炭素定量下限：30ppm	達成	(2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発 ・鋼組織の高速定量解析技術の確立	達成	(2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発 ・鋼中のヘテロ構造と軽元素の空間相関評価技術において、空間分解能：200nm以下、濃度分解能：0.1mass%を旨す	達成	(2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発 ・薄鋼板の水素脆化挙動に係るき裂伝播挙動解析技術を構築する。また、新規ミクロ組織観察技術を開発し、き裂伝播挙動との関係を明らかにする。	達成
⑦「熱可塑性CFRPの開発」	(1) 熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術開発 ・CFRPと異種材料（鉄鋼、アルミ合金）との接合の要素技術の見極めを行い、上記接合方式・接合形状における強度設計に必要なデータベースを構築する。	達成	(1) 熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術開発 ・2015年度までに構築した異材接合データベースを基に、現行量産車において多用され一般的に用いられている接合方式（ボルト締結や接着接合）と同等以上の強度を達成するための要素技術及びその設計手法を確立する。	達成				
	(2) 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発 ・LFT-D（Long Fiber Thermoplastics-Direct）成形の基礎技術の開発 ・大物高速成形技術の開発	達成	(2) 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発 ・量産化につながる混練・押出プロセスの要素技術を確立する。 ・複雑なボディ部材の成形技術を確立し、量産化に繋がる要素技術を確立する。ハイブリッド成形技術を確立するとともに、高速マテハン技術の要素技術を確立する。	達成	(2) 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発 ・LFT-D高速成形最適化技術の開発 ・熱可塑性CFRP高速ハイブリッド成形技術の開発	達成	(2) 熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発 ・多様な補強材とLFT-Dとのハイブリッド成形技術について構造部材による技術検証を行い、技術を確立する。	達成
							(3) 超軽量CFRTP/CFRPハイブリッド部材の開発 ・CFRTP材料および成形技術を活用して、CFRTP/CFRP（熱可塑/熱硬化）ハイブリッド部材を設計し、軽量化効果を実証する。	達成



# 1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況 (6)

研究開発項目	2014-2015 H26-27	中間 評価1	2016-2017 H28-29	中間 評価2	2018-2020 H30-R02	中間 評価3	2021-2022 R03-04	終了時 評価
⑧「革新炭素繊維 基盤技術開発」	(1) 新規炭素繊維前 駆体化合物の開発 ・新たな炭素繊維前駆 体を開発する。引張弾 性率 235GPa、破断 伸度 1.5 %	達成	(1) 新規炭素繊維前駆体化合 物の開発 ・前期成果とあわせて、異形状 炭素繊維の製造技術を確立する。	達成	(1) 新規炭素繊維前駆体化合物 の開発 ・炭素繊維として、フィラメント 径7μmで、弾性率240GPa、強度 4GPaを凌ぐ性能を目指す。	達成		
	(2) 炭化構造形成メ カニズムの解明 ・新たな炭素繊維前駆 体を開発する。引張弾 性率 235GPa、破断 伸度 1.5 %	達成	(2) 炭化構造形成メカニズム の解明 ・異形状炭素繊維の製造技術を 確立する。	達成	(2) 炭化構造形成メカニズムの 解明 ・マイクロ波炭化のプロセ ス多段化など設備を改良すると共 に処理条件を最適化し、従来の炭 化炉方式に優る大規模生産のため の製造技術を確立する。	達成		
			(3) 炭素繊維の評価手法開発、 標準化 ・圧縮試験、曲げ試験、ねじり 試験方法の規格原案を作成し、 JIS ISO 化に必要なデータを収 集する。	達成	(3) 炭素繊維の評価手法開発、 標準化 ・熱可塑性樹脂と異形状炭素繊維 の界面特性を検証し、その特性発 現メカニズムを解明することによ り、標準的な力学的試験法を確立 する。	達成 ：リ サイ クル 繊維 で 2022 まで 継続		
⑨「戦略・基盤研 究」	(1) 新構造材料の動 向調査・技術・研究 戦略・研究開発のビ ジョンの明確化	達成	(1) 新構造材料の動向調査・ 技術・研究戦略 ・研究開発の実用化・事業化 ビジョンの明確化	達成	(1) 新構造材料の動向調査・技 術・研究戦略 ・マルチマテリアル構造体に係わ る共通基盤技術課題の抽出	達成	(1) 新構造材料の動向調査・技 術・研究戦略 ・プロジェクト成果の取りまとめ 及び検証	達成
	(2) 共通基盤技術の 調査研究 ・構造材料、接合プロ セスに関する新たな研 究シーズの顕在化	達成	(2) 共通基盤技術の調査研究 ・構造体接合部設計・評価手法 の確立	達成	(2) 共通基盤技術の調査研究 ・新材料の材料代替効果定量技術 の開発課題の抽出	達成	(2) 共通基盤技術の調査研究 ・異種材料接合における腐食解析 手法の確立	達成
					(3) 中性子等量子ビームを用い た構造材料等解析技術の開発 ・新規小型中性子装置を建設し、 ブラッグエッジイメージング法に よる測定の分解能と統計精度を明 らかにする。	達成	(3) 中性子等量子ビームを用い た構造材料等解析技術の開発 ・ブラッグエッジイメージングの データから、歪や金属組織のイ メージング情報に変換する手法を 確立し、接合部の2次元マッピ ングを実現する。	達成
					(4) 低圧・超高速CFRP 成形技 術の開発 ・樹脂供給体における 樹脂・基材の基本設計を完了する。	達成	⑦「熱可塑性 CFRP の開発」の (3)に移動	

# 1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況

## プロジェクト全期間の成果まとめ(1)

### ・研究テーマ関連図

赤字は2022実施

#### 1. 革新材料の開発

- ・革新鋼板（強度1.5Ga, 伸び20%）：目標達成
- ・革新アルミ（750MPa, 12%）：目標達成
- ・革新マグネ（360MPa, 15%）：目標達成
- ・革新炭素繊維（4.0GPa, 1.7%）：目標ほぼ達成
- ・熱可塑性CFRP (LFT-D)：プロセス実証達成  
平均強度 130MPa

#### 2. 革新材料の評価・解析

- (23) 軽元素の有効利用革新鋼材
- (61) 超高強度鋼板の腐食
- (62) 超高強度薄鋼板の水素脆化
- (65) マルチマテリアル防食表面処理評価
- (65B) ガルバニック腐食のシミュレーション
- (52) 中性子線解析
- (51) 革新炭素繊維（太径化）
- (54-27C) 低圧・超高速CFRP
- (66) 鉄鋼信頼性評価技術

革新材料力学特性

#### 3. 革新材料の接合技術の開発

- ・FSW：リニア接合（A1点以下）実証
- ・FSSW（FSJ）：革新鋼板、ツール開発：目標達成
- ・外加圧スポット溶接：革新鋼板：目標達成
- ・アークスポット溶接：革新鋼板：目標達成
- ・レーザー溶接：革新鋼板：目標達成
- ・接着：構造材料用接着剤開発

#### 4. 異材接合

- (2) 革新鋼板／アルミの異種材料接合
- (63) 鋼板と樹脂材料の革新的接合技術
- (64) マルチマテリアル異材接合基盤研究
- (64B) 異材接合継ぎ手性能DB作成
- (53) 異種材料用接着剤技術開発（塗装前後対応可）
- (46) 異材摩擦接合共通基盤研究

異材接合力学特性

ベース車両



# プロジェクト全期間の成果まとめ(2)

ベース車両

赤字は2022実施

## 5. マルチマテリアル設計

- ・トポロジー最適化設計  
(衝突特性を含む)
- (59) マルチマテリアル車体軽量化  
に 関わる革新的設計技術

## 6. マルチマテリアル部材試作

- (5) アルミニウム/異種材料の点接合技術 (ドア)
- (33) 革新的FSWによる超ハイテン接合部材 (Bピラー  
想定)
- (27) CFRTPの開発及び構造設計・応用加工 (フロア)
- (35B) 革新マグネの自動車構造部材への適用 (フード)
- (27C)超軽量CFRTP/CFRPハイブリッド部材の開発
- (42-4) 1/2車体構造作製

バーチャル展示

実証モデル展示

車体軽量化 (目標50%)

## 7. リサイクル&LCA

- (27A) 炭素繊維リサイクリング
- (27B) リサイクル炭素繊維評価
- (42) 新材料の材料代替効果定量技術 (LCA)
- (14) アルミニウムのアップグレードリサイクル

## 8. 革新製造プロセス、鉄道車両への適用、MI

- (35A) 革新マグネの鉄道車両への適用
- (60) マグネシウムMI
- (10) チタン材一貫製造プロセス
- (11) チタン薄板の革新的低コスト化技術
- (14) アルミニウム材新製造プロセス
- (42) 拠点化(AIST,NIMS,京大、阪大、名大)

まとめ

## 融合推進委員会（ISMA内部推進委員会）での研究方針の議論

### 目的：

- ・プロジェクトの4期2年については、材料開発からそれぞれの成果を組み合わせ、マルチマテリアル化を進め、マルチマテリアル部品の試作・評価を目指す。
- ・成果としては、材料開発に目途を得、部材・車体試作などの実証試験に移行、接合は異材接合にシフトさせ、CAEや部材に結び付けていく、また新たな課題としてLCA、リサイクル、拠点化にも取り組む。
- ・プロジェクト全体を分かりやすく解説した書籍づくりを目指す。

会議体：委員長；岸PL、佐藤委員、長井委員、吉川委員、福富査員、吉田(豊)委員、志田委員（司会）、篠崎専門調査員、千葉専門調査委員、ISMA-PM

開催頻度：2019年は3回、2021年度に4回（2020年度はコロナのため休止）

### 結論：

- ・2020年度からの新課題を検討し、異材接合、CAE、部材試作、LCA、リサイクル、拠点化などに注力する実施方針を確認できた。
- ・成果創出するための項目（強度、延性、寿命、接合性、材料配置、衝突性、コスト、軽量化、LCA、TRL）などを検討をすすめ、2021年度のTL会(非公開)にて全TLに報告。
- ・プロジェクト全体を分かりやすく解説した書籍づくりを実施。

# 説明内容

## 1.アウトプットの目標値と達成状況

1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況

1.2 全分野のTRL評価

1.3 アウトカムに繋がる大型設備・ラインの構築

- ・ IHIの鋼/CFRP部品製造ライン

- ・ NCCのLFTD (CFRTP) 試作ライン

- ・ 産総研の中性子ビームライン

## 2.アウトカムへの橋渡し状況

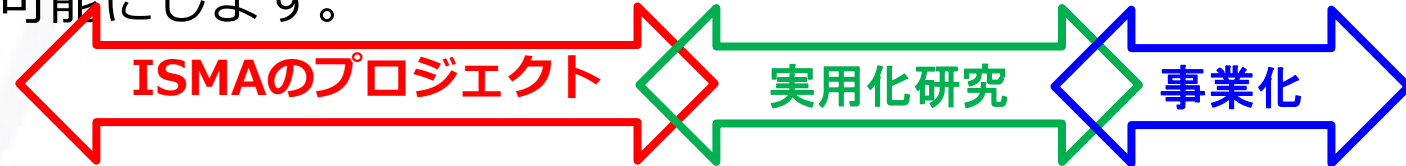
2.1 技術開発成果を記録する拠点化状況

2.2 新素材による部品試作での実証

## 3.成果の創出状況

# (参考) TRL(Technology readiness level) による 技術成熟度によるテーマ評価

技術成熟度レベル (TRL) は、取得プロセス中にプログラムの重要な技術要素 (CTE) 中の技術の成熟度を推定する方法です。それは、技術要件および実証技術力を判定する方法論です。TRLは、9が最も成熟した技術であるとし、1から9までの9段階で評価します。評価軸は技術的な成熟度の横並びでの議論を可能にします。

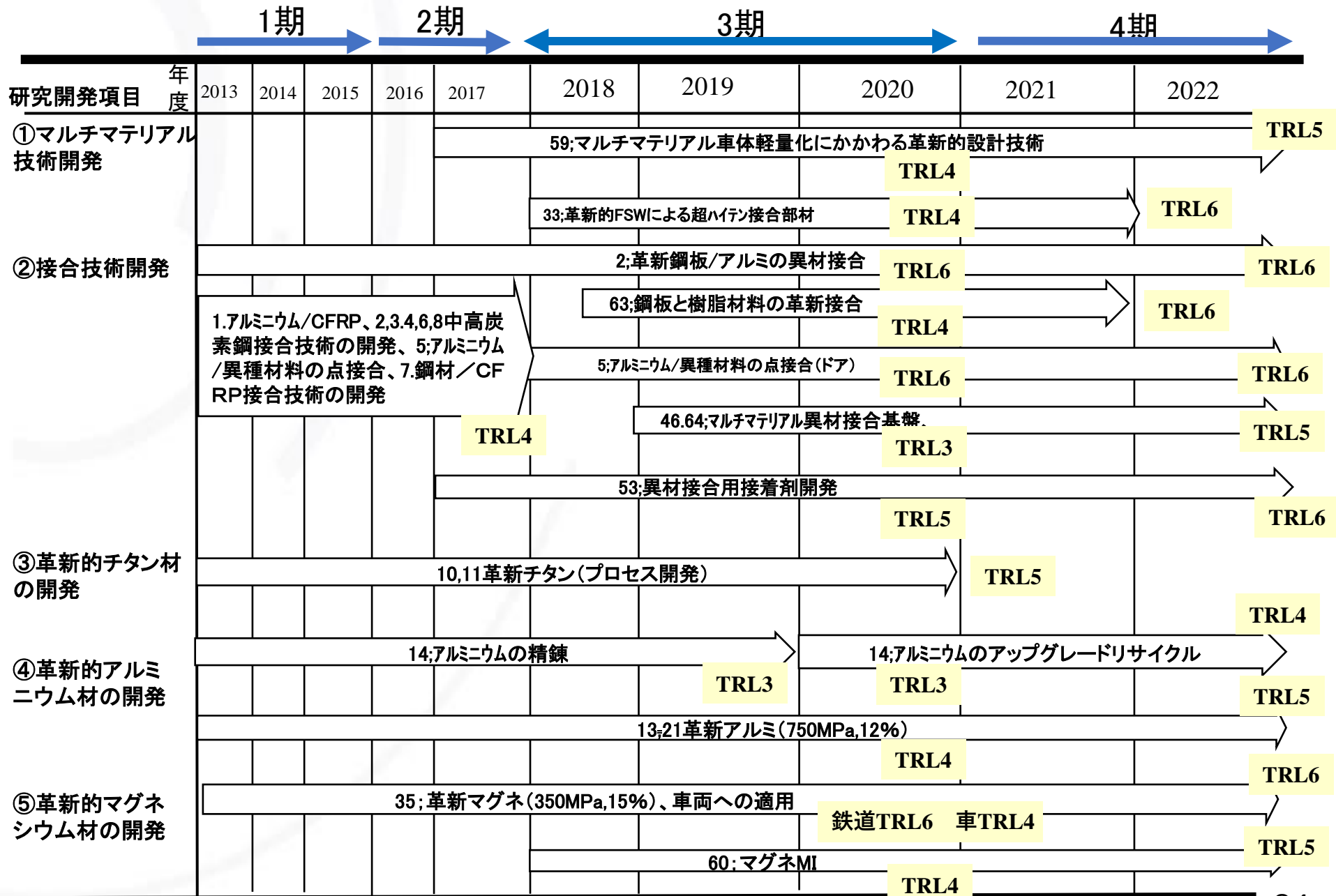


提案機関	TRL.1	TRL.2	TRL.3	TRL.4	TRL.5	TRL.6	TRL.7	TRL.8	TRL.9
総合科学技術会議	科学的な原理・現象の発見	原理・現象の定式化	技術コンセプトの確認 (POC)	研究室レベルでの試験	想定使用環境での試験	実証・デモンストレーション	実機環境でのシステム・プロトタイプの実証	システムの完成・有効性確認	事業化/既存の材料、装置、製品、システム、工程の改良
DOE	科学研究は適用R&Dへの変換を開始	本発明が始まります	実際のR&Dが開始される -	基本的技術のコンポーネントを統合	ブレッドボード技術の忠実度が大幅に向上	モデル/プロトタイプは、当該環境でテストされている	計画運用システムでのプロトタイプ完成	技術は働くことが証明されている	最終的な形が完成
産総研橋渡	基本原理・現象の発見	原理・現象の定式化	技術コンセプトの確認 (POC)	研究室レベルでの試験	想定使用環境での試験	実証・デモンストレーション	トップユーザーテスト (システムレベル)	パイロットライン	大量生産

## 1.2 全分野のTRL評価：プロジェクト終了時に想定される状態と拠点での対応

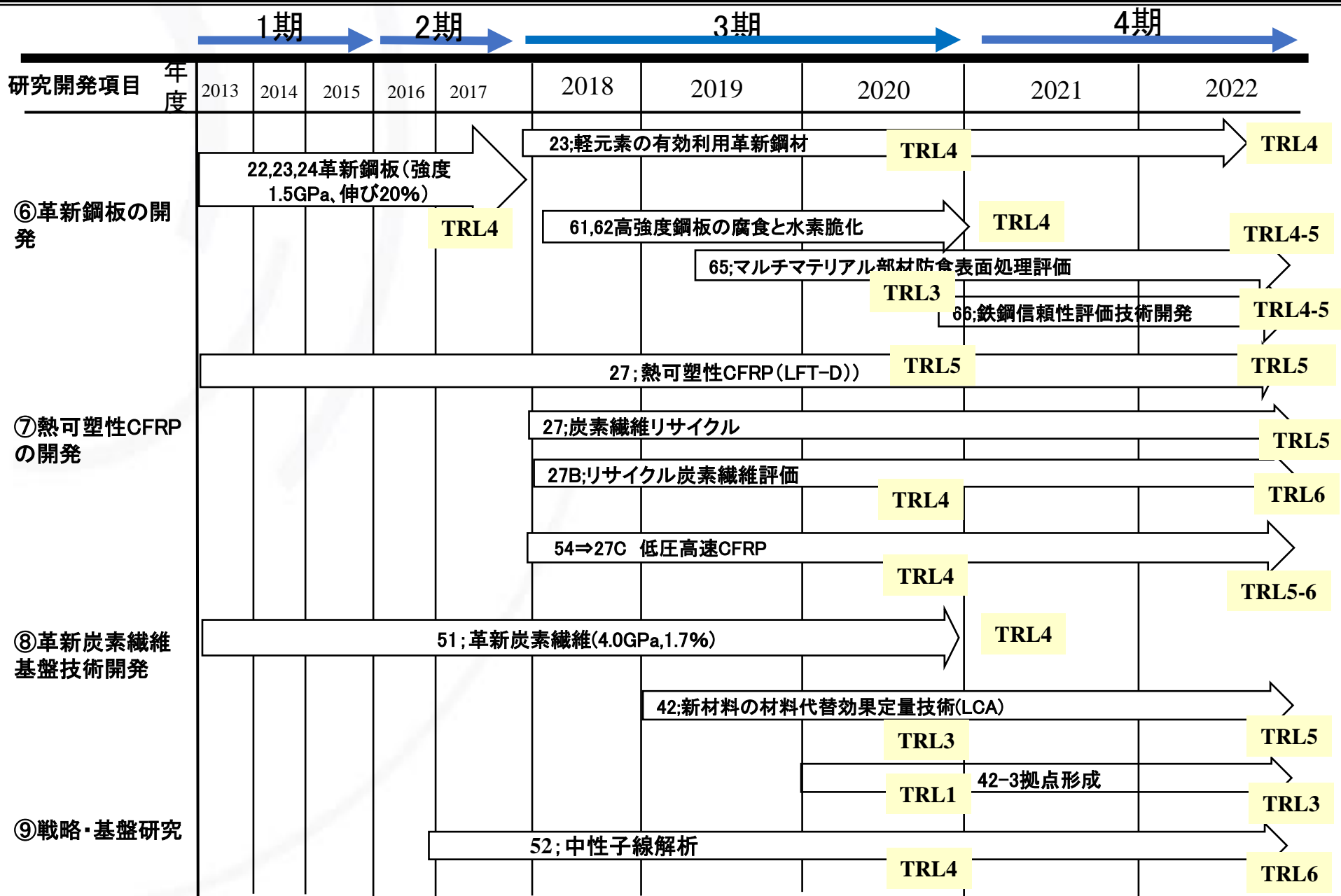
分野		終了時のTRL予想	終了時の技術状態	各機関：終了後の進め方	自動車用途として2030年
マルチ マテリアル 技術	構造設計 (京大)	TRL5	トポロジー最適設計法を構築し提案(サスター-試作)	材料構成・接合方法を加味した設計方法から板組へのフィードバック検討	材料構成・板組・接合方法を加味した設計方法の指針提案
	リサイクル技術/ LCA (AIST)	AL:TRL4 CF:TRL6 LCA:TRL5	AL:アップグレードリサイクルの技術指針提示、CF:物性評価指針を提示、LCA:ソフトウェアの提示	AL:工程廃材からの量産化技術に着手、CF:工程廃材からの量産化技術の確立・標準化提案、LCA:データの検証	AL:廃材からの量産化技術の提案、CF:廃材からの量産化・標準化提案、LCA:実輸出入フロー組み込み
	接合 (阪大) /接着(AIST)	TRL6	自動車製造工程での接合法・接着剤の選択肢提供が可能	実工程・実部品への応用と評価	実工程・実部品・実車への応用
	計測評価技術 (AIST・NIMS)	中性子： TRL6 鉄信頼性： TRL5	中性子：測定業務の受託が可能 鉄鋼信頼性:亀裂進展挙動確認	中性子：業務受託のノウハウ蓄積、鉄鋼信頼性:現象ごとの亀裂進展挙動データ収集	中性子：評価センターとして自立、鉄鋼信頼性:現象ごとの亀裂進展挙動把握
材料技術	鉄/非鉄金属 (AIST)	TRL5	市中材よりも低コストで高強度材製造プロセスに指針Mg材でのMIにめど。	実機での量産性確認、低コスト低CO2技術構築、Mgは防食指針と材料フローの検討	リサイクル・輸出入を考えた量産・材料フロー確立
	炭素繊維複合材料 (名大NCC)	TRL5	大面積部品での強度保障にめど	低コスト・均一性能化につながる技術構築	プロセスの低コスト化・均一性能化にめど
	炭素繊維	TRL4	3期で終了：直接耐炭化紡糸プロセス確立、マイクロ波炭化にめど	次の国家プロジェクトで低コスト・低CO2化技術構築	各種自動車部品への活用を目指し低コスト化のめどを得る。

# 実用化・事業化に向けた具体的取り組み；終了時のTRL（開始時のTRLは3とする）





# 実用化・事業化に向けた具体的取り組み ; 終了時のTRL (開始時のTRLは3とする)



# 説明内容

## 1.アウトプットの目標値と達成状況

1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況

1.2 全分野のTRL評価

1.3 アウトカムに繋がる大型設備・ラインの構築

- ・ IHIの鋼/CFRP部品製造ライン

- ・ NCCのLFTD (CFRTP) 試作ライン

- ・ 産総研の中性子ビームライン

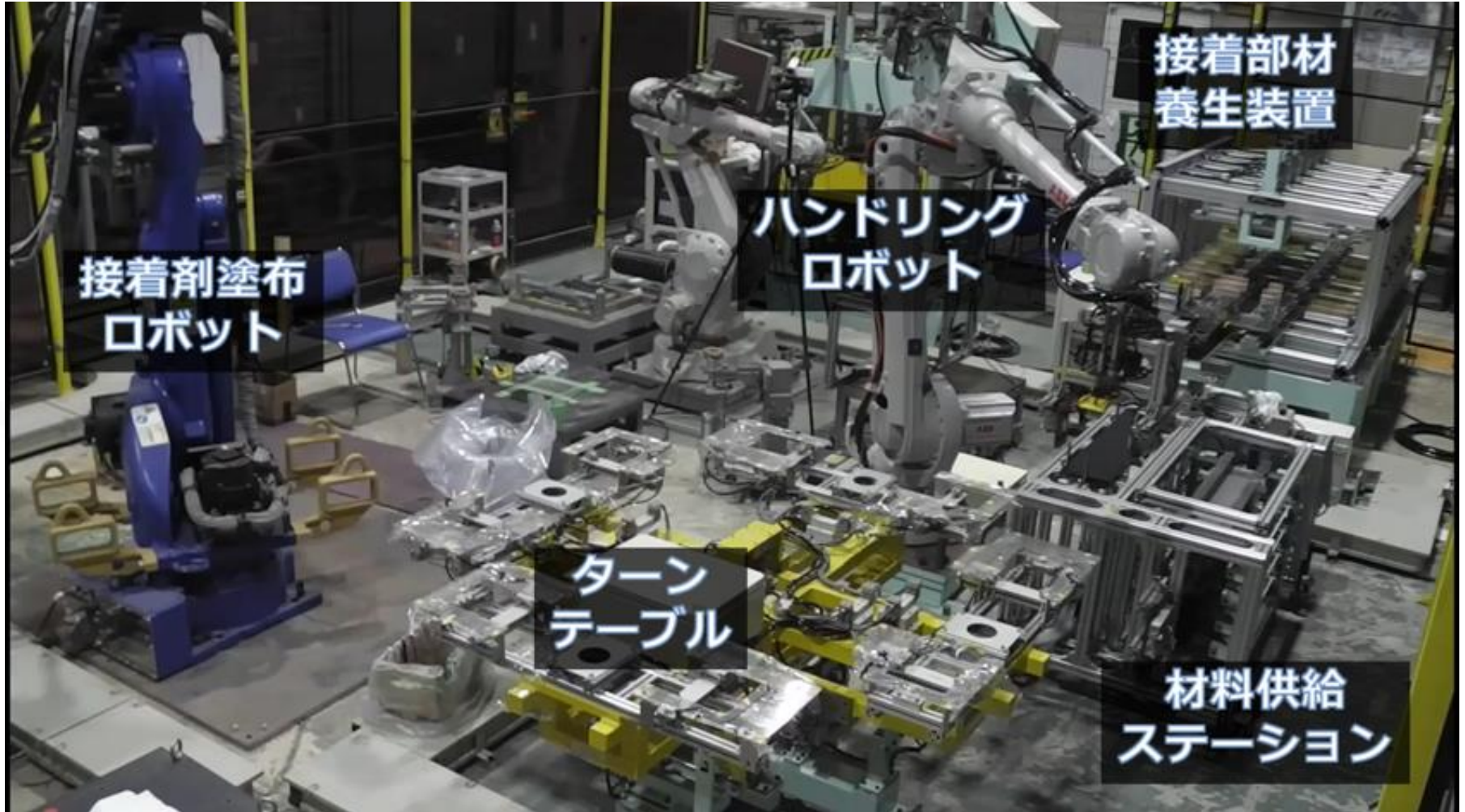
## 2.アウトカムへの橋渡し状況

2.1 技術開発成果を記録する拠点化状況

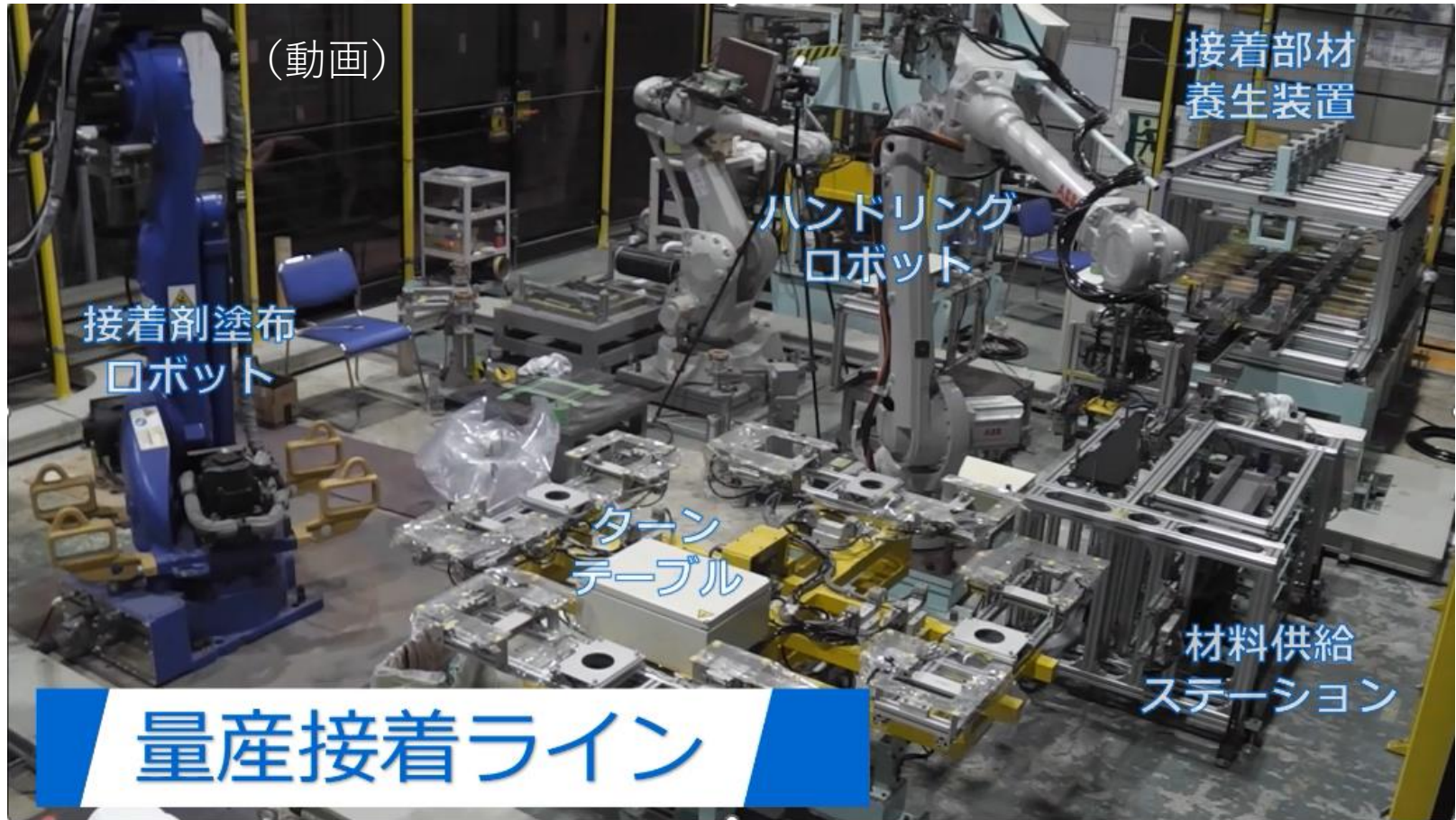
2.2 新素材による部品試作での実証

## 3.成果の創出状況

### 1.3 大型設備・ラインの構築状況 ・ IHIの鋼/CFRP部品製造ライン



・ IHIの鋼/CFRP部品製造ライン

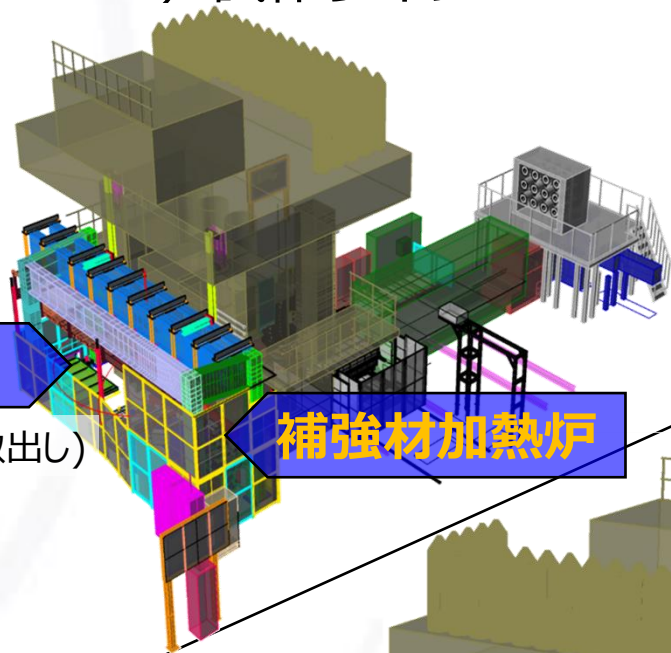


# 1.3 アウトカムに繋がる大型設備・ラインの構築 ・NCCのLFTD (CFRTP) 試作ライン



**マテハンロボット②**

(補強材チャージ&成形品取出し)



**補強材加熱炉**



**3500tプレス機**

**保温搬送装置**

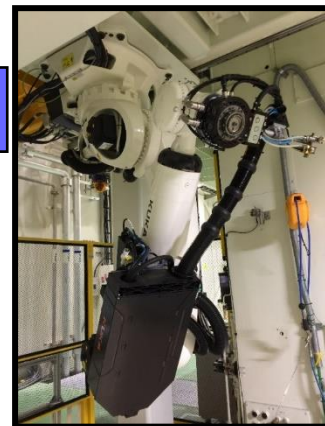
CFクリールスタンド→

**マテハンロボット①**

(LFT-Dプレス機チャージ)

**混練・押出機**

**断裁装置**



# 1.3アウトカムに繋がる大型設備・ラインの構築

- ・ NCCのLFTD (CFRTP) 試作ライン

(動画)



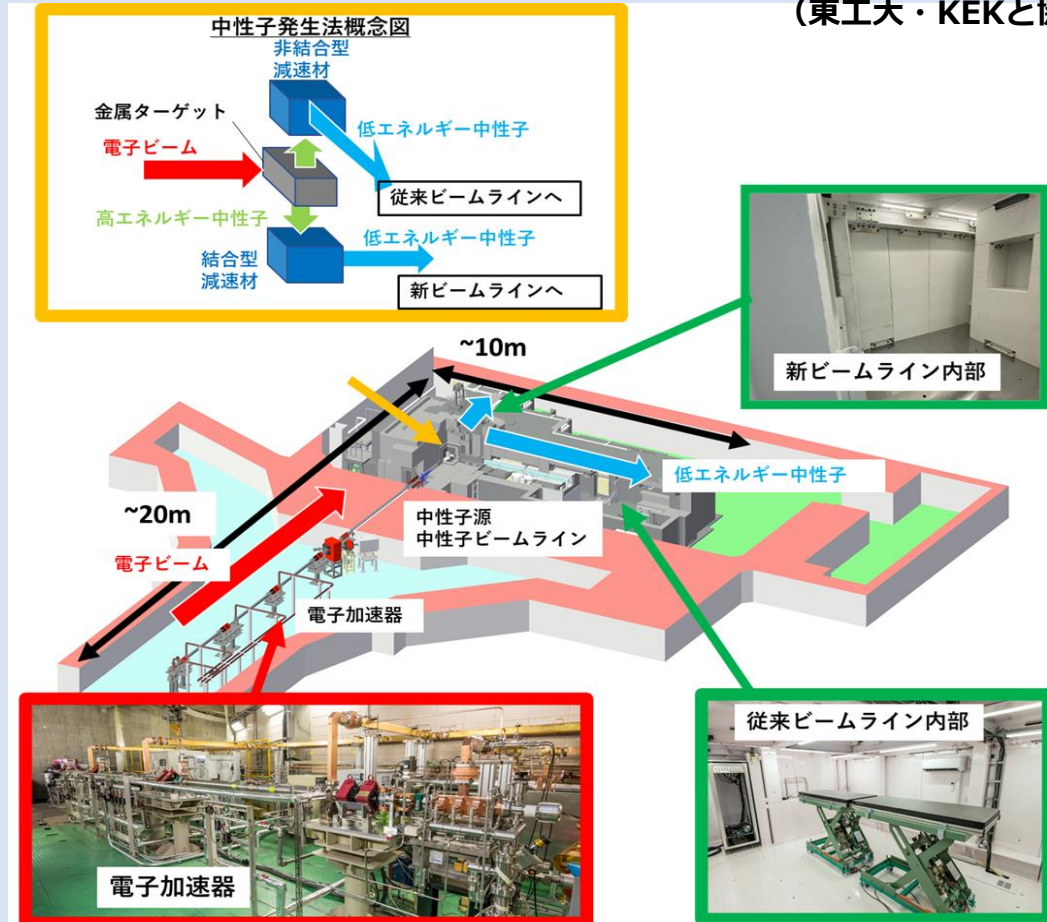
# 1.3アウトカムに繋がる大型設備ラインの構築

- ・産総研の中性子ビームライン

## 新小型中性子計測装置の建設と3小型施設連携による産業利用の拡大

### ISMA小型中性子計測装置AISTANS(産総研)の新設

(東工大・KEKと協力)



### HUNS-II(北大)



小角散乱によるナノ析出物の定量測定ほか

ISMA

Innovative Structural Materials Association

産総研、東工大、高エネ機構、理研、北大の共同で2つのビームライン完成：  
構造材料素材から自動車ドアなど大型車両パーツの中性子&X線ラジオグラフィ、  
3D-CT測定、中性子ブラッグエッジ透過イメージング測定ほか。

# 説明内容

## 1.アウトプットの目標値と達成状況

- 1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況
- 1.2 全分野のTRL評価
- 1.3 アウトカムに繋がる大型設備・ラインの構築
  - ・ IHIの鋼/CFRP部品製造ライン
  - ・ NCCのLFTD (CFRTP) 試作ライン
  - ・ 産総研の中性子ビームライン

## 2.アウトカムへの橋渡し状況

- 2.1 技術開発成果を記録する拠点化状況
- 2.2 新素材による部品試作での実証

## 3.成果の創出状況



# (参考) マテリアル革新力強化のための政府戦略に向けて

戦略準備会合（取りまとめ座長：大野英男・東北大学総長） マテリアル革新力強化のための戦略策定に向けた準備会合  
2020年6月2日

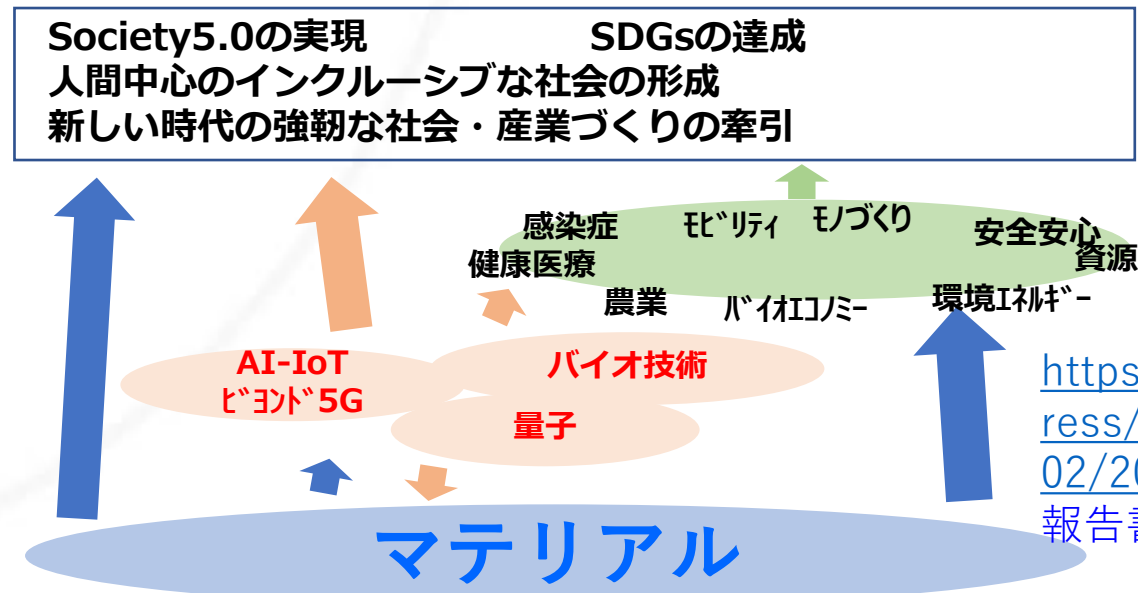
○我が国の強みに立脚した、「マテリアル革新力」（マテリアル・イノベーションを創出する力）を強化するための政府戦略を、産学官共通のビジョンの下で早急に策定する必要

○目指すべき将来像

「マテリアルで産業を牽引し、世界でリーダーシップを発揮する国」

「マテリアルの魅力で、世界から優れた研究者を引き付ける国」

「マテリアルで新しい価値と産業を生み出し、世界に貢献できる国」



<https://www.meti.go.jp/press/2020/06/2020060202/20200602002.html>  
報告書から転載

## 2.アウトカムへの橋渡し状況

### 2.1 技術開発成果を記録する拠点化状況

本プロジェクトにおける拠点化の目的・目標・実施内容（2021-22）

#### (1)目的

これまでのプロジェクトの成果、特に各種部材の信頼性に係る評価技術・データ、材料設計ツール、LCA評価等の、複数企業が共有・相互利用することが望ましい**共通基盤的技術・データを集約・管理・解析・提供する**他、関連する規格化・国際標準化の戦略的な検討、人材育成を行うための体制を整備。

#### (2)目標

これを通じ、研究成果を活かした、自動車関連産業の実用化研究の加速、事業参加機関以外の企業、大学、国研等や他分野への**マルチマテリアル技術の橋渡し・横展開**を図る。

#### (3)拠点での実施内容

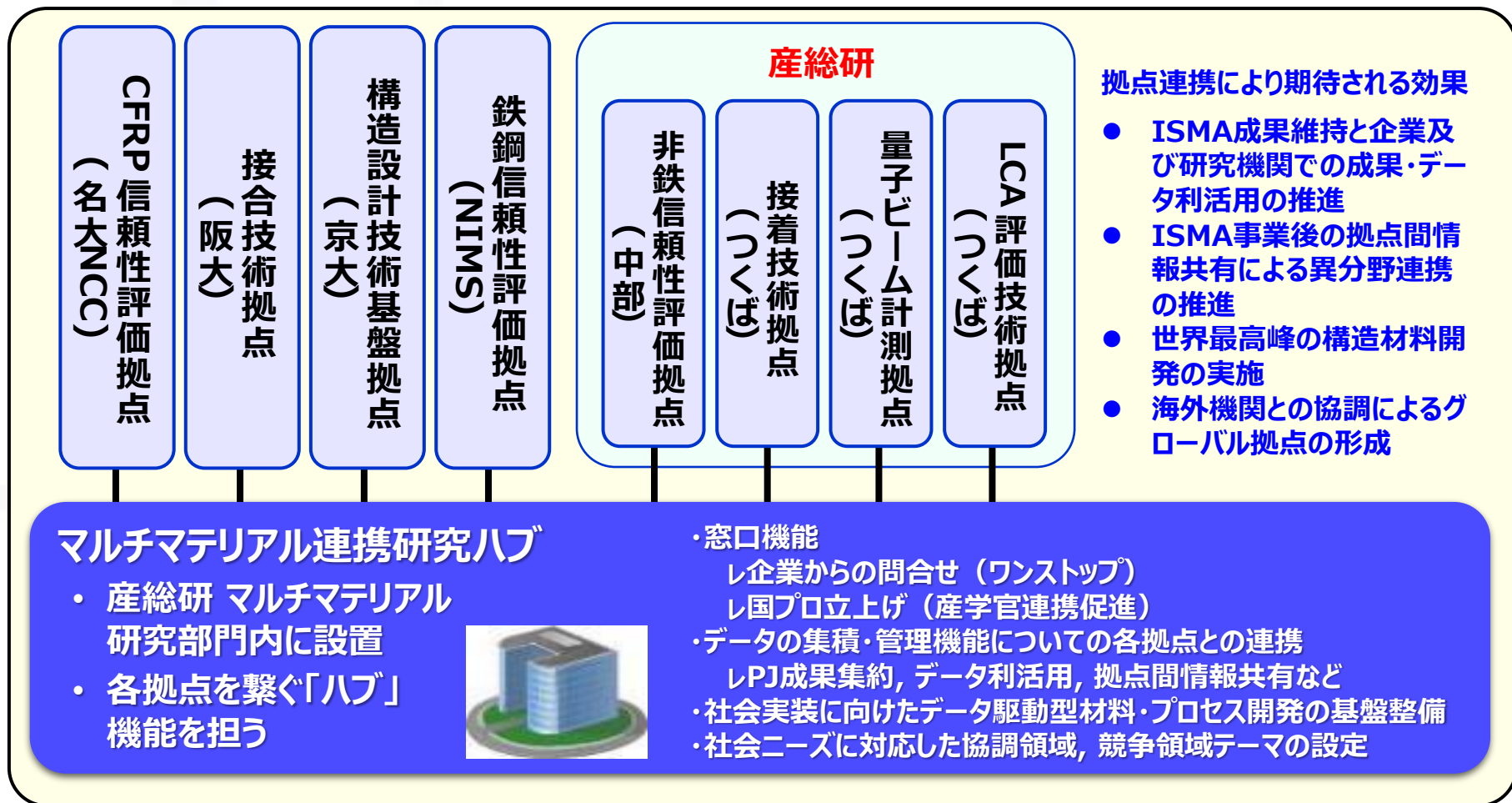
・データ創出・活用可能な共用施設・設備の整備・高度化

高品質なデータとデータ構造を創出する**共用基盤を整備**するとともに、データ専門人材・技術者を育成・確保

・マテリアルデータの中核拠点形成とネットワーク形成

オープンデータ、シェア（クローズド）データを対象に、セキュアな環境の下、**データとデータ構造を蓄積・管理する中核拠点形成**と拠点間連携

# 拠点計画の概要



## 2.アウトカムへの橋渡し状況

### 2.2 新素材による部品試作での実証

オートモーティブワールド2023「第13回 クルマの軽量化 技術展」

2023年1月25-27日

「革新材料・革新接合技術を適用したマルチマテリアルボディ部品試作」



## 展示会動画による革新材料実用化に向けた取り組み

### 6.1 展示会動画による全体像の説明

#### (動画)

個別課題（マルチ、CFRP、鋼材、AL、拠点）の説明

### 6.2 テーマ5：マルチマテリアル部材(ドア)の試作

；革新材料（鋼板、アルミニウム、マグネシウム、接着剤）と異材接合技術を織り込んだマルチマテリアルドア（マツダ株式会社）

### 6.3 テーマ27C：超軽量CFRTP/CFRPハイブリッド部材の開発

；超軽量CFRTP/CFRPハイブリッド部材を適用した自動車ルーフモデル（東レ株式会社）

### 6.4 テーマ2：革新鋼板を用いたAピラー4部品ASSY（株式会社神戸製鋼所）

### 6.5 テーマ13：革新アルミニウム合金を用いたフロントサイドメンバーおよびサイドシルインナー（UACJ株式会社）

### 6.6 テーマ46：接合技術拠点（大阪大学）の構築



AL-CFRP製マルチマテリアルドア  
(マツダ)



マグネシウム製フロントフード  
(トヨタ カスタマイジング&ディベロップメント)



AL製フロントサイドメンバー  
(UACJ)



AL製サイドシルインナー  
(UACJ)



CFRTP製フロアパネル  
(名古屋大学NCC)



CFRP製ルーフ  
(東レ)



1.5GPaハイテン製Aピラー 4部品ASSY  
(神戸製鋼)



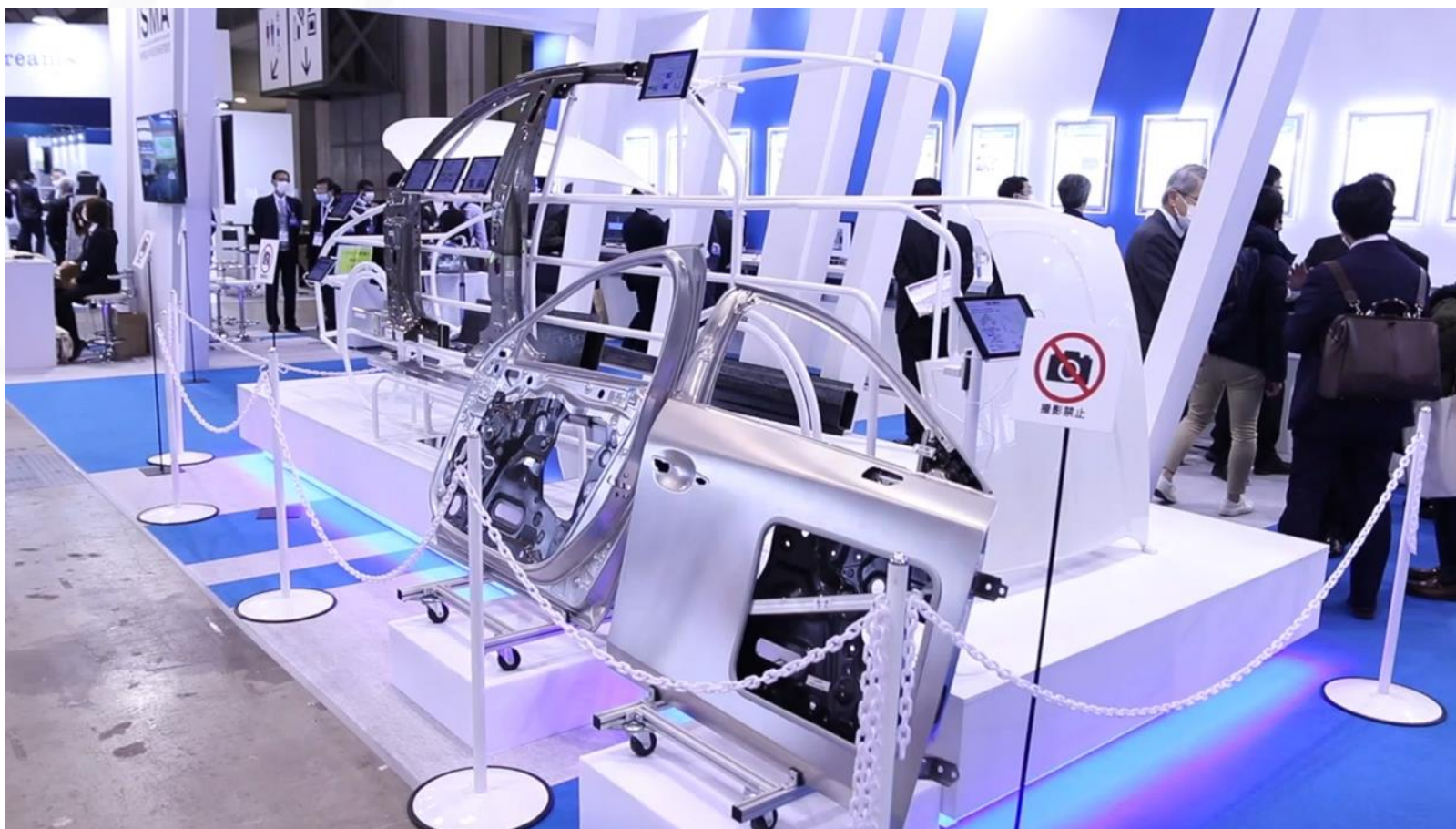
1.5GPaハイテン製 Bピラー 4部品ASSY  
(JFE&ISMA)



トポロジー最適化設計+3D造形：鉄AL製  
サスタワー(日本積層造形)



オートモティブワールド2023「第13回 クルマの軽量化 技術展」  
2023年1月25-27日  
「革新材料・革新接合技術を適用したマルチマテリアルボディ部品試作」  
(動画)



# マルチマテリアル連携研究ハブ（国立研究開発法人産業技術総合研究所）への移設



# 説明内容

## 1.アウトプットの目標値と達成状況

1.1 全分野のプロジェクト基本計画達成状況

1.2 全分野のTRL評価

1.3 アウトカムに繋がる大型設備・ラインの構築

- ・ IHIの鋼/CFRP部品製造ライン

- ・ NCCのLFTD (CFRTP) 試作ライン

- ・ 産総研の中性子ビームライン

## 2.アウトカムへの橋渡し状況

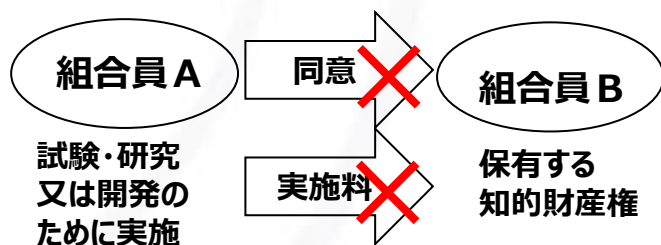
2.1 技術開発成果を記録する拠点化状況

2.2 新素材による部品試作での実証

## 3.成果の創出状況

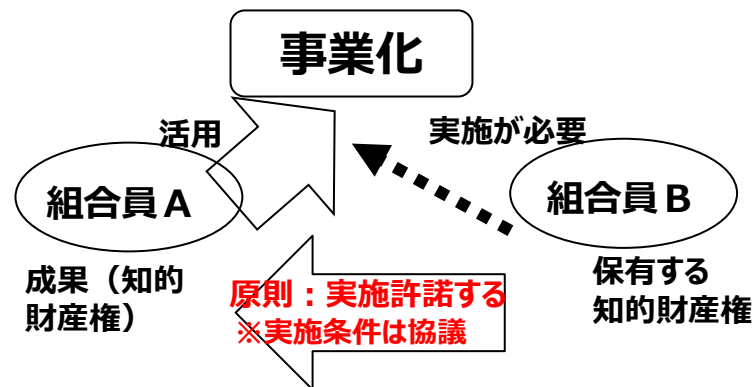
## ▶ 実用化・事業化を目指した戦略的な知的財産権等の活用

### 【研究開発段階】



◇ 組合員は、他の組合員が保有する知的財産権について本プロジェクトの試験、研究又は開発のために実施する必要がある場合は **同意を得ることなく、かつ無償で実施できる**

### 【実用化段階】



◇ 組合員が本プロジェクトの成果を事業化するために、他の組合員が保有する知的財産権について実施許諾を求めた場合、(実施許諾を求められた) 他の組合員は、当該事業化をするために **必要な範囲で、原則として実施許諾を行う**

## ▶ オープン／クローズ戦略の考え方

非公開	公開
<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 原則として全ての成果は非公開</li> <li>◎ ただし、知財委員会への手続きを経て公開できることとしている</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◎ 学術研究・基礎研究的要素が強く、非競争領域である共通基盤研究</li> <li>◎ 産業利用が見込まれる発明</li> </ul>

論文発表、学会発表の積極的推進  
国際出願を念頭において権利化

## 10年間の実績報告

	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	総数
	年度	年度	年度	年度	年度	年度	年度	年度	年度	年度	
	委託	委託	委託	委託	委託	委託	委託	委託	委託	委託	
実績額推移 (百万円) (経済産業省)	3,960 (NEDO)	4,760 (NEDO)	5,870 (NEDO)	3,708 (NEDO)	3,729 (NEDO)	3,512 (NEDO)	2,827 (NEDO)	3,620 (NEDO)	3,019 (NEDO)	2,688 (NEDO)	37,693
特許出願件数 (件)	1	31	47	60	31	30	16	11	10	1	238
発表総数 (報)	9	117	229	215	275	273	236	153	109	130	1,746
論文発表 (報)	1	8	30	34	44	44	38	58	41	40	338
取材広報	2	10	13	25	28	55	93	67	53	66	412
フォーラム等 (件)	0	1	1	1	2	1	0	0	1	2	9

特許：国内出願 238、PCT出願 73、外国出願（PCTからの移行含む） 232  
国内登録 133、外国登録 108

## 革新構造材料とマルチマテリアル

— 輸送用機器の軽量化のための材料・接合・設計技術—  
新構造材料技術研究組合編著

岸輝雄 監修

出版:

上巻下巻: 日本語(オーム社)

上巻: 英語(シュプリンガー)

2023年6月予定

### 上巻

#### 序章 本書の背景と構成

#### 第1章 材料開発

1-1 鉄鋼材料

1-2 アルミニウム合金

1-3 マグネシウム合金

1-4 チタン製造

1-5 炭素繊維

1-6 炭素繊維強化プラスチック(CFRP)

#### 第2章 マテリアルズインテグレーション(MI)

#### 第3章 接合・接着技術

3-1 マルチマテリアル接合技術

3-2 中高炭素鋼の接合技術

3-3 異種材料の接合技術(開発)

3-4 接着技術

3-5 継手性能データベース

#### 第4章 解析・評価技術

4-1 腐食

4-2 ガルバニック腐食

4-3 水素脆化

4-4 非破壊試験

#### 第5章 構造設計技術

5-1 CAEとは

5-2 トポロジー最適化

5-3 マルチマテリアル設計

5-4 トポロジー最適化の3D積層造形への適用

#### 第6章 マルチマテリアル部材試作

#### 第7章 リサイクル・ライフサイクルアセスメント

7-1 リサイクル

7-2 ライフサイクルアセスメント(LCA)

#### 第8章 終わりに

8-1 技術準備レベル (TRL) から見た本プロジェクト

8-2 研究拠点形成による今後の展開

#### 下巻 プロジェクト成果総覧

第1章 材料開発

第2章 接合・接着技術

第3章 解析・評価技術

第4章 構造設計技術

第5章 マルチマテリアル部材試作

第6章 リサイクルとライフサイクルアセスメント(LCA)

第7章 プロジェクト成果

第8章 さらになる発展に向けて

**ご清聴ありがとうございます。**

## 資料 6 - 1

# 「革新的新構造材料等研究開発」(終了時評価)

2014年度～2022年度 9年間

## プロジェクトの詳細 (公開版)

### 6.1 革新材料の実用化に向けた取り組み

実施者：新構造材料技術研究組合 (ISMA) 技術企画部

プロジェクトマネージャー室 部長、研究統括代行 秋宗 淑雄

2023年 4月21日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

材料・ナノテクノロジー部



## 6.1 革新材料の実用化に向けた取り組み 展示会動画によるプロジェクト成果全体像の説明

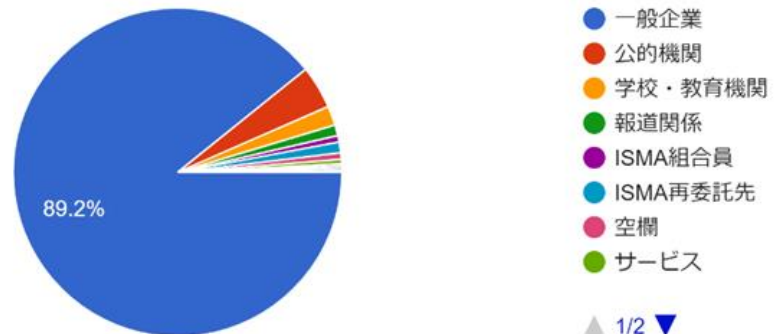
- ① 複合展示 : 1件(7部品)
- ② 単独展示 : 13件
- ③ VRデモ : 1件
- ④ ポスター展示 : 22件
- ⑤ ミニセミナー : 25件

(動画)

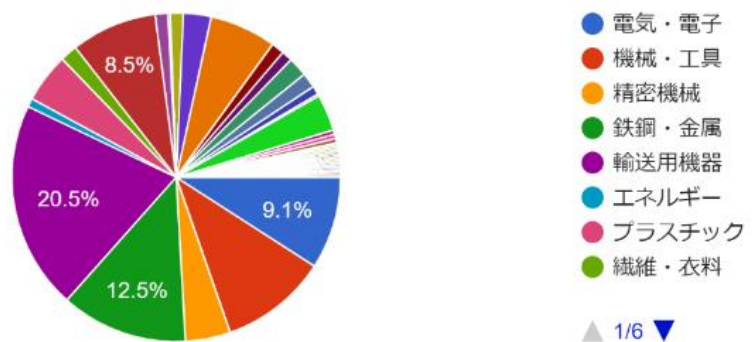
- ・ **ブース入場者数：4020名**
- ・ バーコード読み取りデータ：1725件
- ① 企業 : 1,457件 (「会社名」列で文字列「会社」を含む件数)
- ② 省庁 : 2件 (「会社名」列で文字列「省」「庁」を含む件数)
- ③ 研究組織 : 35件 (「会社名」列で文字列「研究」を含み、うち「会社」を除外した件数)
- ④ 大学 : 15件 (「会社名」列で文字列「大学」を含む件数)
- ⑤ その他 : 216件 (上記いずれにも属さない件数)
- ⑥ 国籍 : 日本1,599件／韓国67件、台湾9件、インド6件、インドネシア・U.S.A. 5件、不明8件

# ブース入場者 グラフ

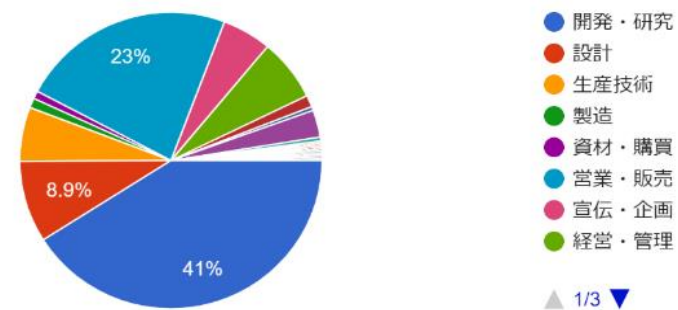
所属先  
473 件の回答



業種  
473 件の回答



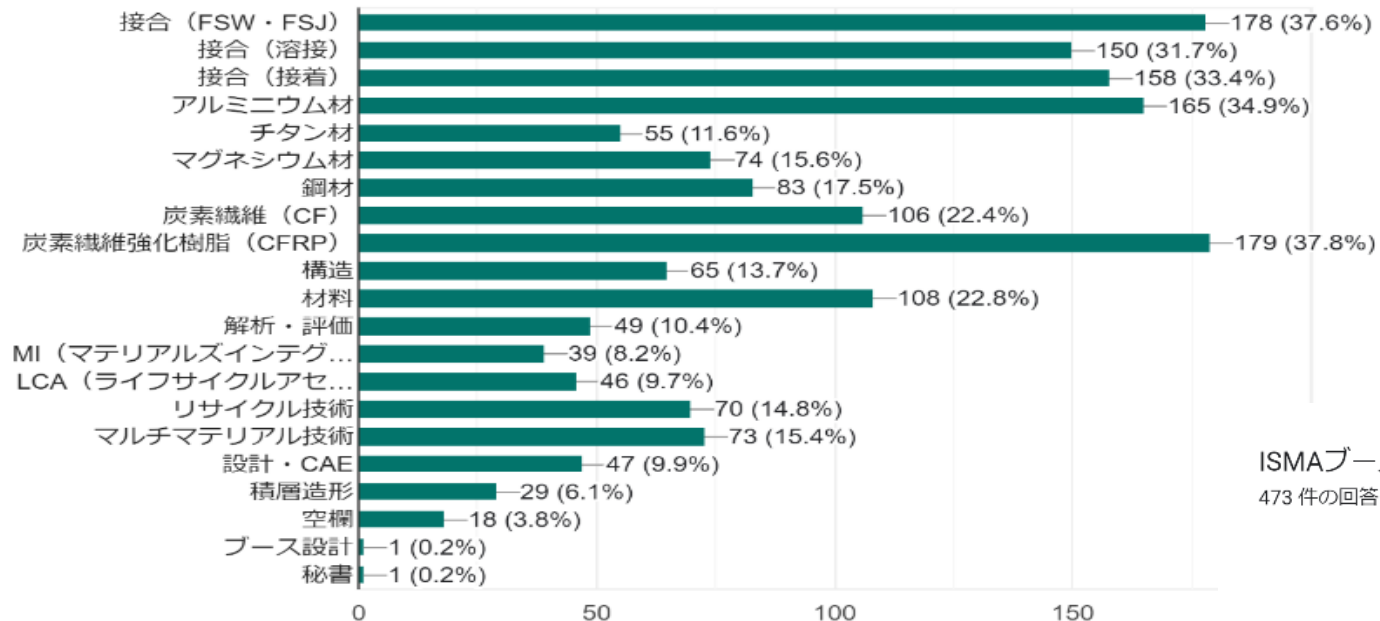
職種  
473 件の回答



## ・記述アンケート結果(回収473件)

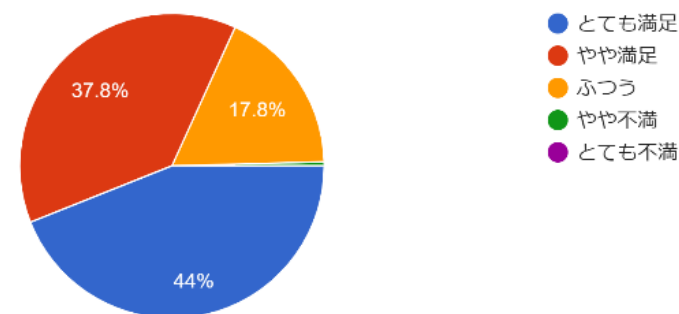
### 興味のある分野・領域 (複数回答可)

473件の回答



### ISMAブースの満足度

473件の回答



## 個別課題（マルチマテリアル、CFRP、鋼材、AL、拠点）の説明

- |                    |   |
|--------------------|---|
| 資料6-2 マツダ(株)       | テーマ5 : マルチマテリアル部材(ドア) の試作<br>; 革新材料 ( 鋼板、アルミニウム、マグネシウム、接着剤) と異材接合技術を織り込んだマルチマテリアルドア |
| 資料6-3 東レ(株)        | テーマ27C : 超軽量CFRTP/CFRPハイブリッド部材の開発<br>; 超軽量CFRTP/CFRPハイブリッド部材を適用した自動車ルーフモデル          |
| 資料6-4 (株)神戸製鋼所     | テーマ2 : 革新鋼板を用いたAピラー4部品ASSY  |
| 資料6-5 (株)UACJ      | テーマ13 : 革新アルミニウム合金を用いたフロントサイドメンバーおよびサイドシルインナー                                       |
| 資料6-6 大阪大学 接合科学研究所 | テーマ46 : 接合技術拠点 (大阪大学) の構築   |

# 「革新的新構造材料等研究開発」(終了時評価)

2014年度～2022年度 9年間

## プロジェクトの詳細 (公開版)

### 6.2 マルチマテリアル部材(ドア)の試作

「アルミニウム／異種材料の点接合技術」(テーマ番号5)

実施者：マツダ株式会社 技術研究所 先端材料研究部門 主幹研究員  
深堀 貢

2023年 4月21日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

材料・ナノテクノロジー部

# テーマ毎の目標と根拠

研究開発テーマ	最終目標	根拠
①アルミニウム/CFRP&アルミニウム厚板の点接合技術 (摩擦攪拌点接合)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・車体部材の接合強度でJIS -A級の引張せん断荷重最小値以上または母材破断を実現</li> <li>・1点あたりの接合時間は5秒以内</li> <li>・多関節ロボットによる施工技術と品質保証手法の確立</li> </ul>	車体の強度部材に適用可能な接合強度と抵抗スポット溶接と同等の生産性の確保
②アルミニウム/鋼板の点接合技術 (抵抗スポット溶接)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・車体部材の接合強度でJIS -A級の引張せん断荷重最小値以上または母材破断を実現</li> </ul>	車体の強度部材に適用可能な接合強度の確保
③異材接合部の評価解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>・車体の設計開発での実運用</li> </ul>	マルチマテリアル車体の品質確保
④高遮音アルミパネル&高減衰接着剤の仕様検討 (2014～2017年)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・車体部材適用時の部材性能/品質/コストの明確化</li> <li>・量産仕様の決定</li> </ul>	車体軽量化とともにお客様に満足して頂ける機能の達成
⑤異材点接合の適用研究 (2016～2022年)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・マルチマテリアルドア材料/工法の決定</li> </ul>	マルチマテリアルドア部材としての性能とコストの両立

# テーマ毎の目標達成状況

研究開発テーマ	目標 (2023年2月)	成果 (2023年2月)	計画との差異	今後の課題と 解決方針
①アルミニウム /CFRP&アルミニウム 厚板の点接合技術 (摩擦攪拌点接合)	<ul style="list-style-type: none"> <li>車体部材の接合強度でJIS -A級の引張せん断荷重最小値以上または母材破断を実現</li> <li>1点あたりの接合時間は5秒以内</li> <li>多関節ロボットによる施工技術と品質保証手法の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>JIS -A級の引張せん断荷重と接合時間5秒以内/点を実現したアルミニウム/CFRP点接合技術。</li> <li>アルミニウム厚板点接合への同様な目標の達成による本技術のマルチマテリアル適用性の実証。</li> <li>多関節ロボットを使った実部材の接合実証と工程での品質管理を実現する強度保証ロジック。</li> </ul>	○	
②アルミニウム/鋼 板の点接合技術 (抵抗スポット溶接)	<ul style="list-style-type: none"> <li>車体部材の接合強度でJIS -A級の引張せん断荷重最小値以上または母材破断を実現</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>JIS -A級の引張せん断荷重と接合時間5秒以内/点を実現したアルミニウム/鋼板点接合技術。</li> <li>工程での品質管理を実現する強度保証ロジック。</li> </ul>	○	

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み（中間）／一部達成（事後）、×未達

# テーマ毎の目標達成状況

研究開発テーマ	目標 (2023年2月)	成果 (2023年2月)	計画との差異	今後の課題と 解決方針
③異材接合部の評価解析	・車体の設計開発での実運用	(ガルバニック腐食)市場と相関のある劣化モードの構築及びCAEによる机上予測技術を構築し実運用済み。 (熱歪み予測)接着剤の硬化過程を考慮した工程での熱歪み予測技術の構築と市場を想定した熱歪みを構築し実運用済み。	○	
④高遮音アルミパネル&高減衰接着剤の仕様検討 (2014～2017年)	・車体部材適用時の部材性能/品質/コストの明確化	・遮音効果最大化のための音響CAEを完了。	○	
	・量産仕様(高減衰接着剤)の決定	・熱可塑性樹脂の添加による温度範囲拡大の可能性を見出した。材料メーカーとの材料開発・量産開発を経て2019年から国内外の各仕向の量産車に全車種展開している。	◎ 量産化のため大幅達成と評価	
⑤異材点接合の適用研究 (2016～2022年)	・マルチマテリアルドアの材料/工法の決定	・マルチマテリアルドアの接合工法の検証を完了し、多関節ロボットを使った接合性を実証。 ・アルミニウムとCFRPを複層化することで衝突性を確保。	○	

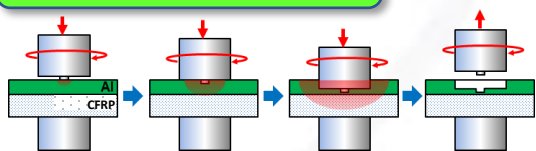
◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み(中間) / 一部達成(事後)、×未達



# 個別テーマ①アルミ/CFRP点接合の成果と意義

アルミ抵抗スポット溶接JIS A級を超える接合強度を含む開発目標を実現し、基本技術を確認した。また、実体ドアを使った試作研究を通し、実用性が高いことを検証した。本接合技術は、材料に対する展開性も高く、基本技術となることが期待される。

## 接合プロセス



ツールをアルミ内で攪拌しその発熱を利用し樹脂と接合  
 図1 接合過程

## 生産性&展開性

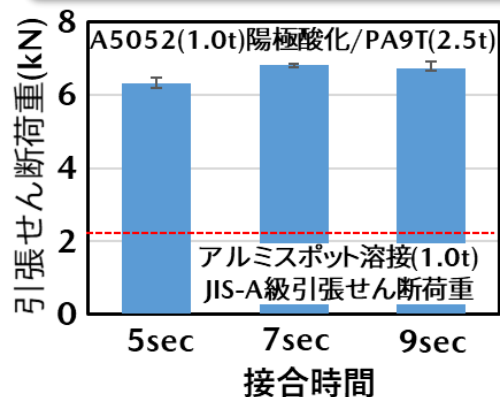


図2 接合時間と接合強度  
 国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

## 耐久信頼性

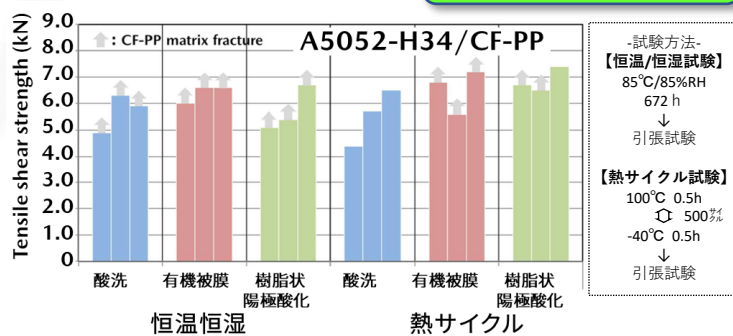


図4 アルミ/CFRP継手の耐久信頼性

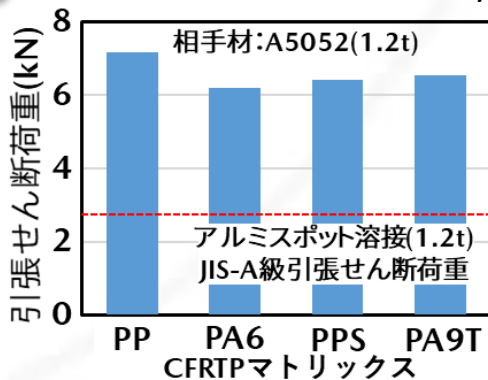


図3 各種CFRTPマトリックス、アルミ素材での接合強度

## ドア試作研究

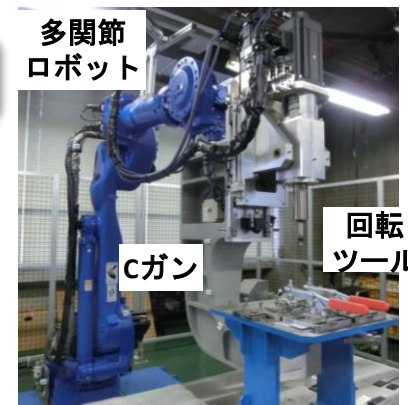
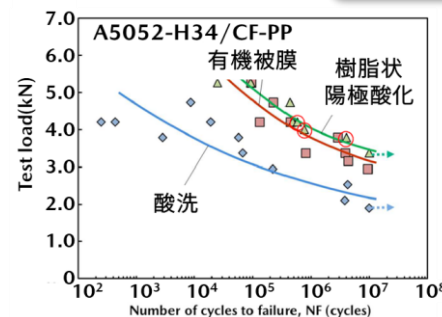


図5 FSSW接合装置

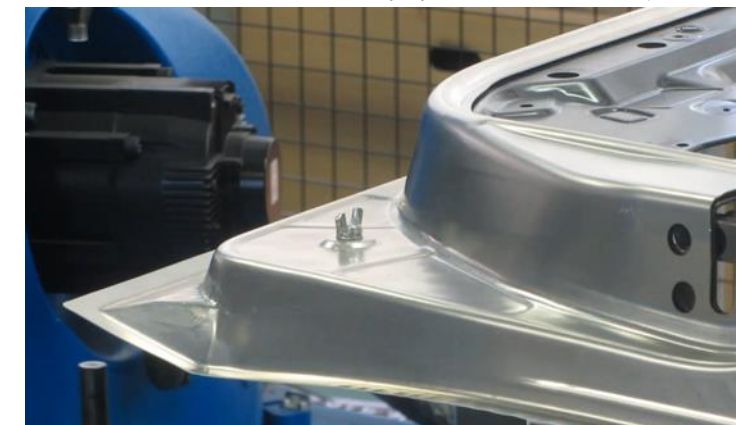
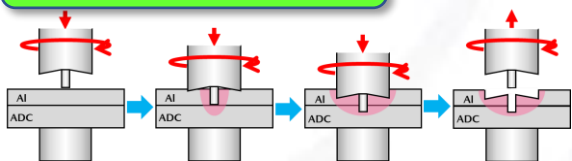


図6 ドア試作の状況 (動画)

# 個別テーマ①アルミ厚板点接合の成果と意義

軽量車体構造を想定し、ダイカストを含むアルミ厚板(2.0t以上想定)同士の点接合技術を開発し、接合強度を含む開発目標を実現し、基本技術を確立した。摩擦攪拌点接合は、CO<sub>2</sub>低減に対しても優位であり、本プロジェクトの取組みにより展開性が拡大し、将来を見据えた投資が可能となる。

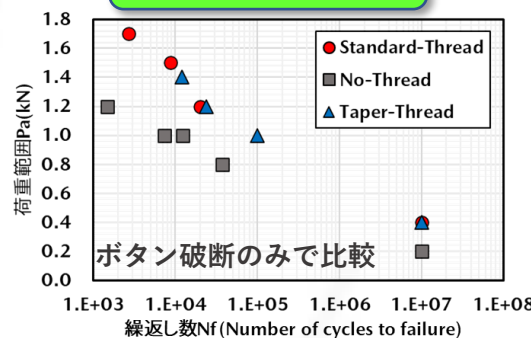
## 接合プロセス



ツールを下板のアルミ内まで挿入・攪拌し、塑性流動を利用し接合

図7 接合過程

## 耐久信頼性



## モデル化

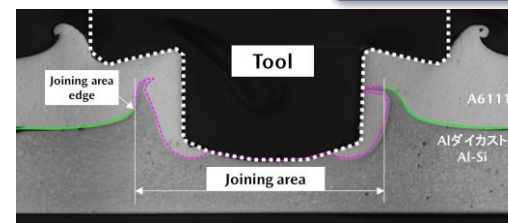


図11 圧延材(上板)/ダイカスト(下板)の組合せ

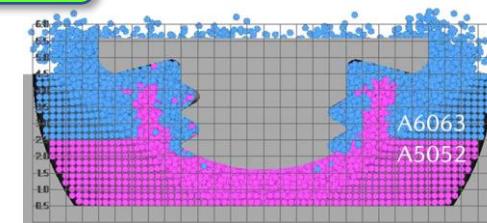


図12 粒子法CAEの解析例  
Particleworks Prometech Software, Inc.

## 生産性&展開性

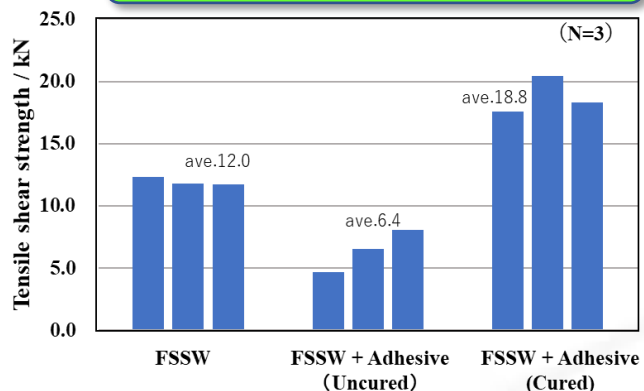
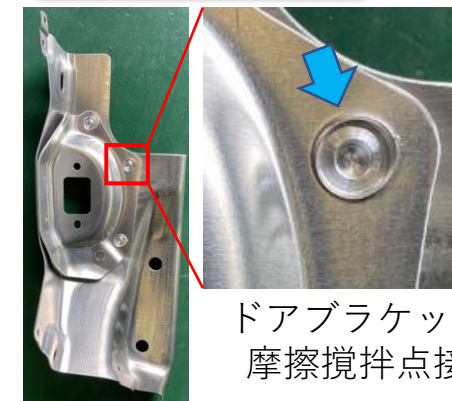


図8 接着剤併用

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

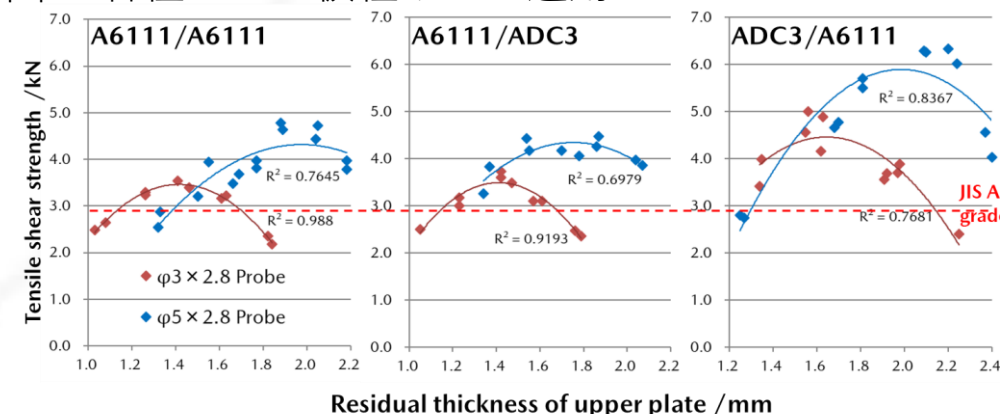
## ドア試作研究



ドアブラケットの摩擦攪拌点接合

図13 ドアブラケットへの適用例

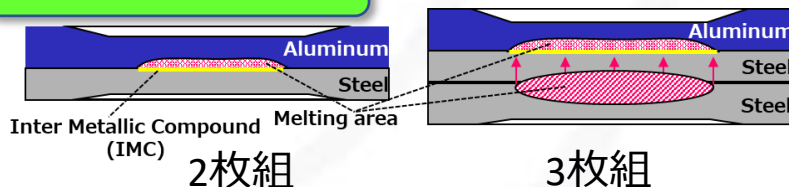
図9 各種アルミ板組みへの適用



# 個別テーマ②アルミニウム／鋼板の点接合の成果と意義

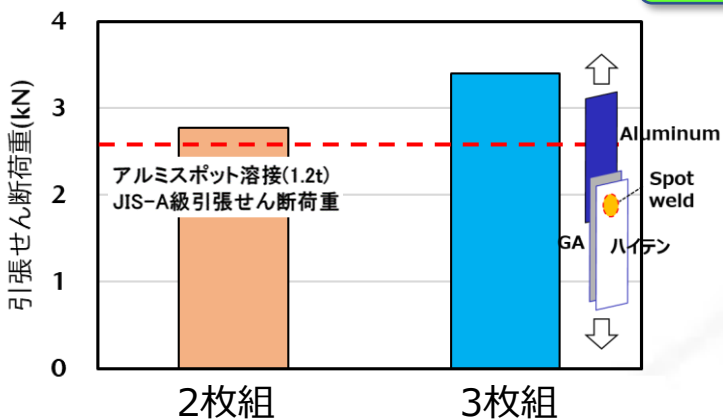
汎用的な抵抗スポット溶接設備を使い、2枚重ねだけでなく、3枚重ねについても接合可能な基本技術を確認した。共通の設備を利用し、スチール車体とマルチマテリアル車体の混流生産の実現が期待できる。

## 接合プロセス



鋼板の抵抗発熱を利用してアルミの溶融を促して接合

図14 接合時の発熱状態の模式図



(含む980MPa鋼板)(含む1180MPa鋼板)

図15 超ハイテン材への適用

## 展開性

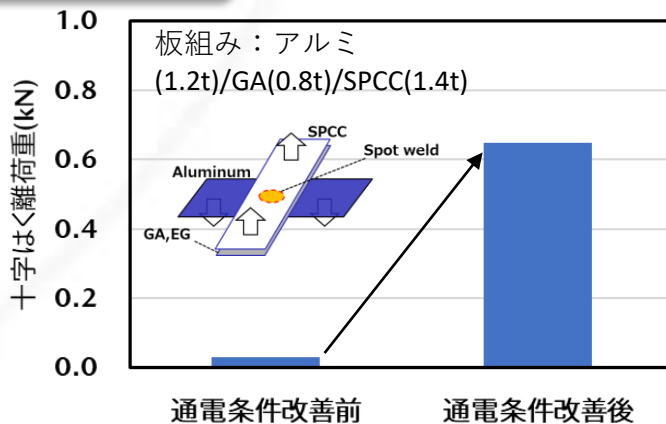


図16 接着剤との併用(接着剤未硬化状態の強度)

## モデル化

電極 1 / 電極 2	R8/R8	R150/R25
試験片		
CAE		

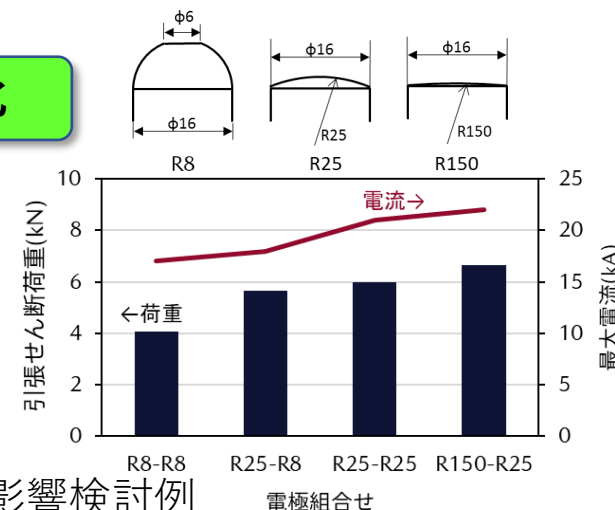


図17 モデルを用いた電極形状の影響検討例

## ドア試作研究

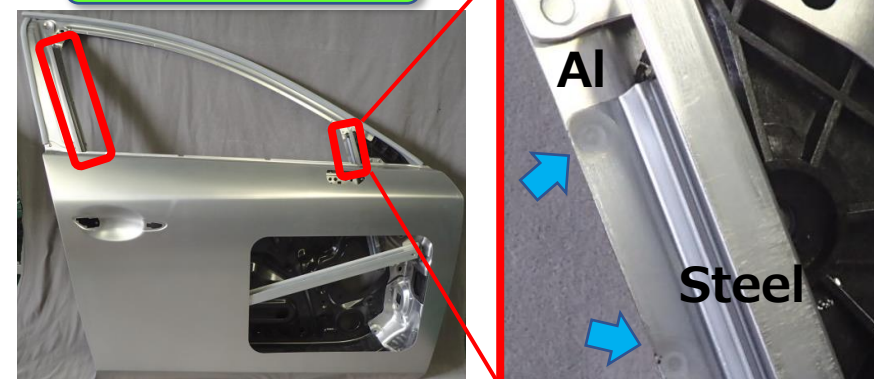


図18 ドア部品への適用例

# 個別テーマ③異材接合部の評価解析の成果と意義

マルチ材料化構造に付随した課題であるガルバニック腐食や熱歪みに対し、解析ベースでの基本技術を確認し、実運用へ展開した。

ガルバニック腐食モデルは、シーラの仕様検討に、熱歪み解析は、締結仕様検討で運用中である。

## ガルバニック腐食

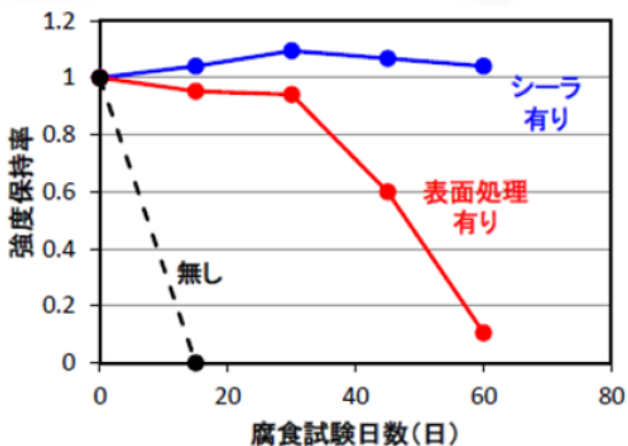


図20 腐食試験日数と継手強度保持率の関係

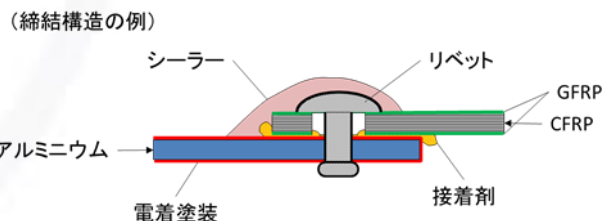


図19 締結構造モデル

## モデル化

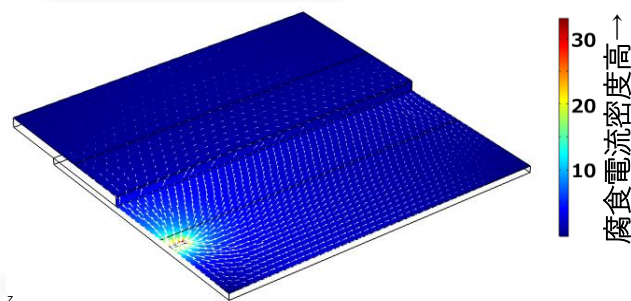


図21 CAE解析例 (ガルバニック電流密度)

## 熱歪み

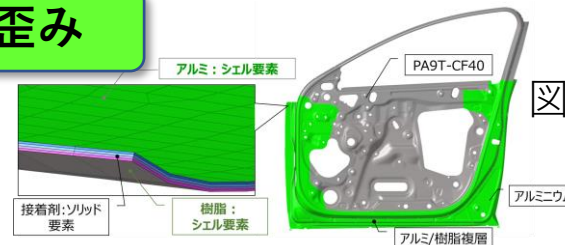


図22 マルチ材料ドアの熱歪み解析モデル

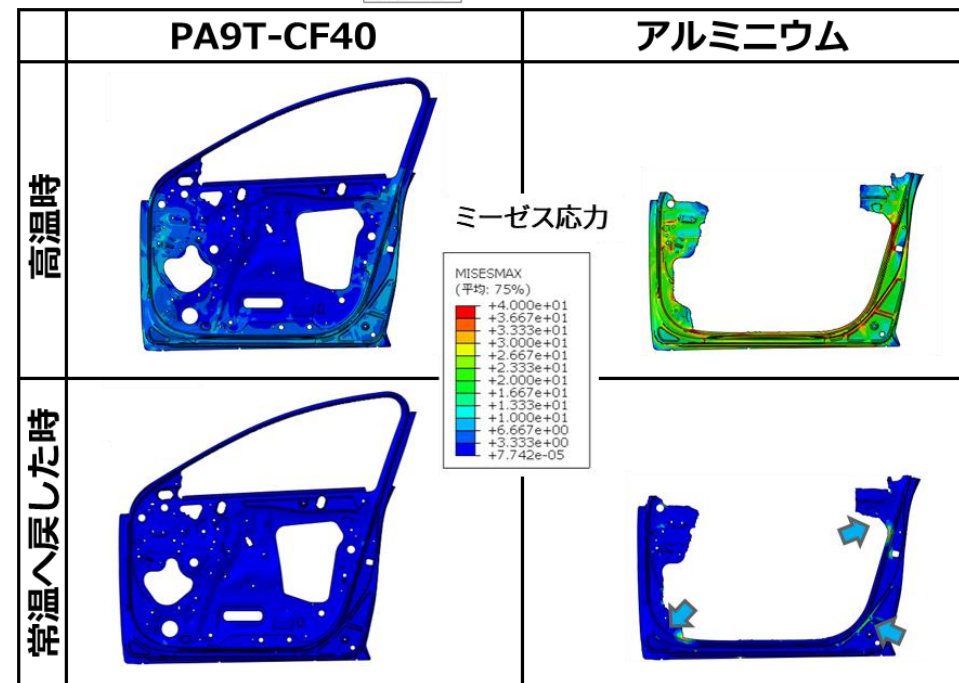


図23 マルチ材料ドアの熱歪み解析結果

# 個別テーマ⑤異材点接合の適用研究の成果と意義

本プロジェクトで開発したアルミニウム/異材点接合技術をマルチマテリアルドアへ織込み、試作研究を通して実用性を検証した。また、マルチマテリアルドアの衝突性能及び耐ガルバニック腐食性能を確保し、約40%軽量なドア構造をCAEで導出した。本接合技術は、組立ラインの大幅変更や設備投資が抑制できることから、マルチマテリアル車体実用化のコア技術になるものと考えられる。

## 衝突性能

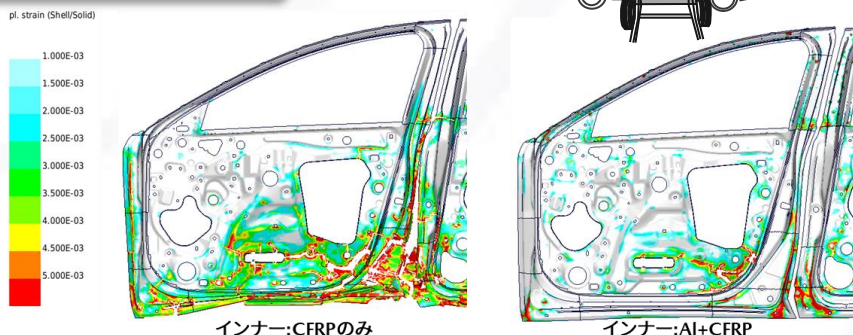


図24 衝突解析結果

## 耐ガルバニック腐食性能&熱歪み

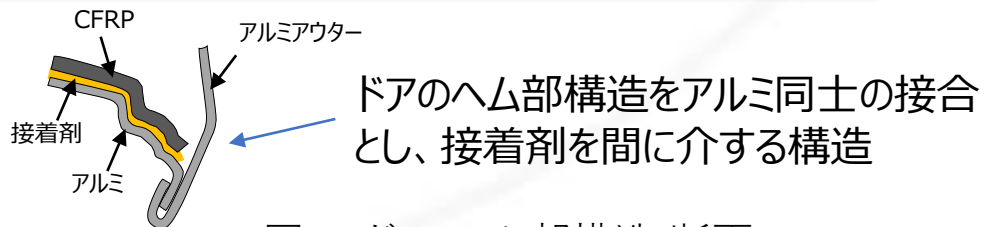


図25 ドアヘム部構造(断面)

①アルミ/CFRTP  
摩擦攪拌点接合

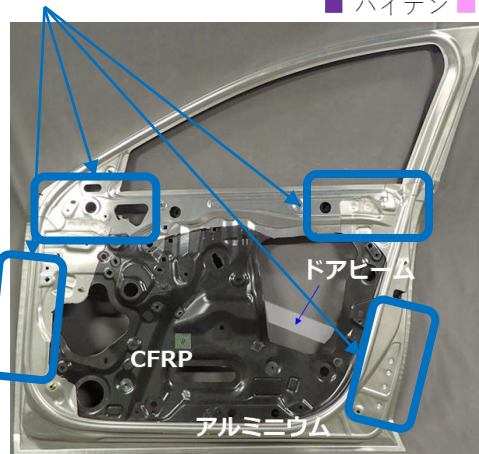


図27 マルチマテリアルドアへの異材点接合の適用

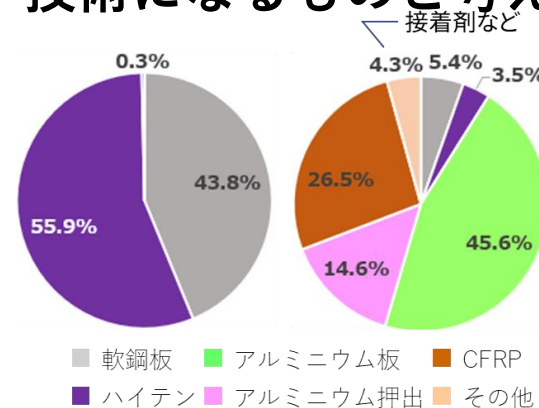
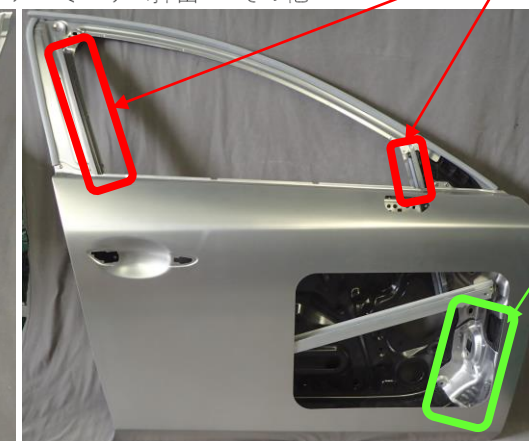


図26 マルチマテリアルドアの質量構成

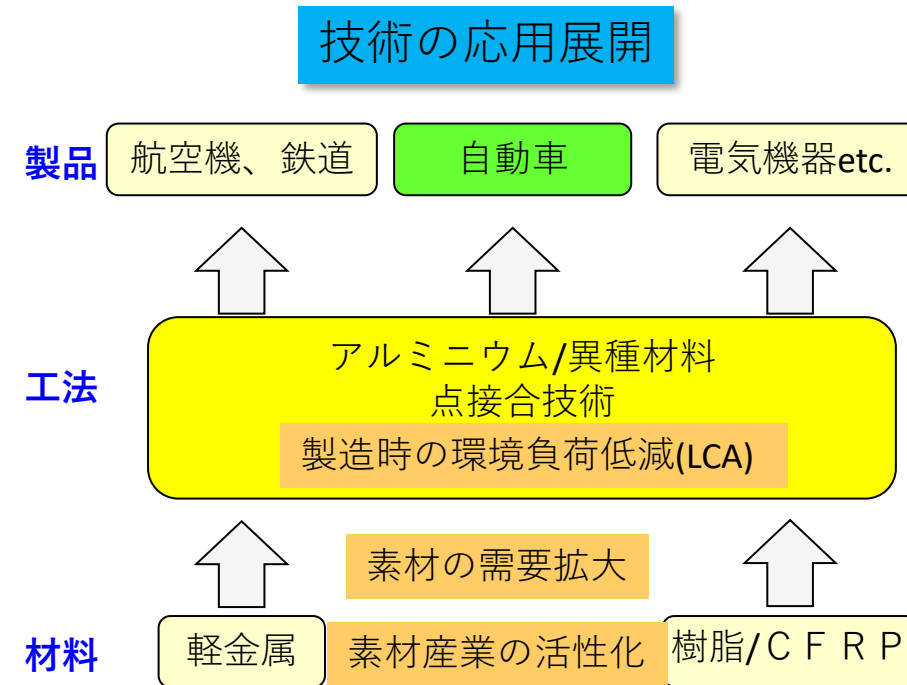
②アルミ/鋼板  
抵抗スポット溶接



# 2030年までの社会実装への道筋と波及効果

サブラインで製造可能な自動車用ドアへの適用を想定した競合優位なマルチマテリアル化技術(接合技術、評価解析技術)を確立し、実用化した上で、メインラインへの織込み検討を目指す。  
 本接合技術は、様々な産業にも応用でき、異種材料の接合が可能となることから、製造時の環境負荷低減(LCA)やアルミニウムなどの軽金属や樹脂、CFRPなどの需要拡大、さらには素材産業の活性化にも繋がる。

	第一期	第二期	第三期	第四期	実装期間		
	2013-2015	2016-2017	2018-2020	2021-2022	2023-2030		
①アルミニウム/CFRP& アルミニウム厚板の点接合技術 (摩擦攪拌点接合)	研究開発				サブラインを想定した適用検討	サブラインへの織込み具体化	実用化開発
②アルミニウム/鋼板の点接合技術 (抵抗スポット溶接)							
③異材接合部の評価解析	研究開発				サブラインを想定した適用検討	サブラインへの織込み具体化	実用化開発
④高遮音アルミパネル & 高減衰接着剤の仕様検討 (2014 ~ 2017年)	研究開発		◎実運用へ一部適用				
⑤異材点接合の適用研究 (2016 ~ 2022年)	研究開発				サブラインを想定した適用検討	サブラインへの織込み具体化	メインラインへの織込み検討
	◎高減衰接着剤の量産化						



## 資料 6 - 3

# 「革新的新構造材料等研究開発」(終了時評価)

2014年度～2022年度 9年間

## プロジェクトの詳細 (公開版)

### 6.3 超軽量CFRTP/CFRPハイブリッド部材の開発

「超軽量CFRTP/CFRPハイブリッド部材の開発」(テーマ番号27C)

実施者：東レ株式会社 複合材料研究所 主任研究員

武部 佳樹

2023年 4月21日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

材料・ナノテクノロジー部

# 目標と根拠

【最終目標】超軽量CFRTP/CFRPハイブリッド部材を適用した自動車ルーフモデルを作製し、現行スチールの50%軽量化を達成

研究開発テーマ	最終目標	根拠
①CFRTP/CFRP複合パネルの開発	開発した複合パネルを用いて、実用化に向けた特性（NVH等）を評価し、自動車部材への適合性を明確にする。	CFRTPコア、CFRPスキンのそれぞれの材料開発を進めてきた。複合パネルとして、自動車向けの実用評価をおこない、適合性を明確にする。
②CFRTP/CFRP複合パネルの形状賦形	ルーフを模擬した小型成形品の成形実証と、小型成形品と実ルーフ部材の性能を比較して理論づけを行う。特に重要なスキンコアの接合の健全性を図る。	複合パネルで最も重要となるスキン/コアの接合について、ルーフを模擬した小型成形品を評価して、接合の健全性を図る。
③CFRTP/CFRPハイブリッド部材の形状設計	ルーフ部材のCAE解析、成形技術、材料技術を連動させ、50%軽量化を実現する形状設計をおこなう。	CAE解析にて50%軽量化する複合パネルの構成を導出してきた。成形、材料の観点から検証し、最終形状に落とし込む必要がある。
④CFRTP/CFRPハイブリッド部材の成形	ルーフ部材を成形し、現行スチールの50%軽量化を達成する。また、実用評価評価と塗装性について検討する。	CFRTP/CFRPハイブリッド部材を試作して、部材としての軽量性を実証する必要がある。



# 目標達成状況

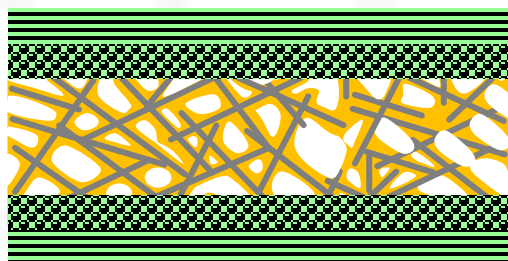
研究開発テーマ	目標 (2023年2月)	成果 (2023年2月)	計画との差異	今後の課題と解決方針
①CFRTP/CFRP複合パネルの開発	開発した複合パネルを用いて、実用化に向けた特性（NVH等）を評価し、自動車部材への適合性を明確にする。	衝撃、遮音を評価し適合性を確認	○	
②CFRTP/CFRP複合パネルの形状賦形	ルーフを模擬した小型成形品の成形実証と、小型成形品と実ルーフ部材の性能を比較して理論づけを行う。特に重要なスキンコアの接合の健全性を図る。	小型成形品と実ルーフにおいて、スキン/コアの接合の健全性を確認	○	
③CFRTP/CFRPハイブリッド部材の形状設計	ルーフ部材のCAE解析、成形技術、材料技術を連動させ、50%軽量化を実現する形状設計をおこなう。	解析、成形、材料を連動させて、50%軽量化を実現する形状を決定	○	
④CFRTP/CFRPハイブリッド部材の成形	ルーフ部材を成形し、現行スチールの50%軽量化を達成する。また、実用評価評価と塗装性について検討する。	5分成形実証、耐環境下での剛性、遮熱性、塗装性の適合を確認	◎	

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み（中間）／一部達成（事後）、×未達

# CFRTP/CFRPハイブリッド部材の構成材料

目標：CFRPスキンと超軽量CFRTPフォームコアのサンドイッチ構造体(従来スチール対比50軽量化)

CFRTP/CFRPサンドイッチ構造体



スキン材

コア材

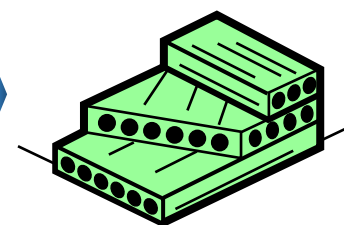
軽量性・剛性に優れる

CFRP(炭素繊維複合材料)

熱硬化性プリプレグ

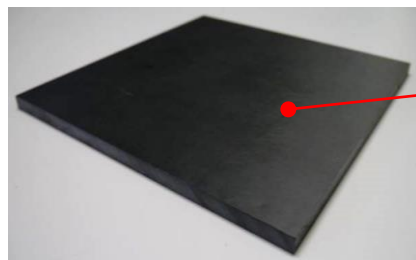


成形品(積層体)

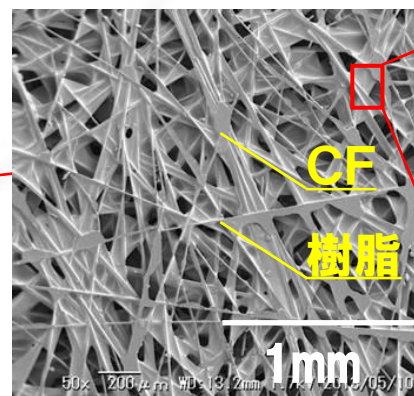


力学特性に優れる

CFRTPフォーム  
(炭素繊維多孔質材料)

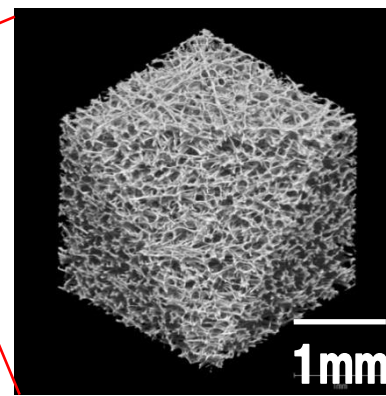


光学顕微鏡写真



CF  
樹脂

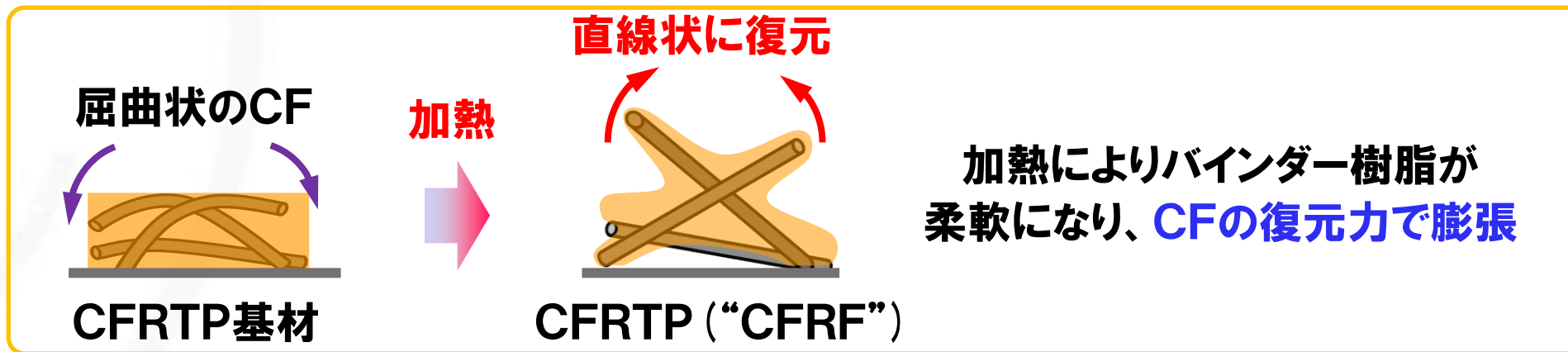
X線CT画像



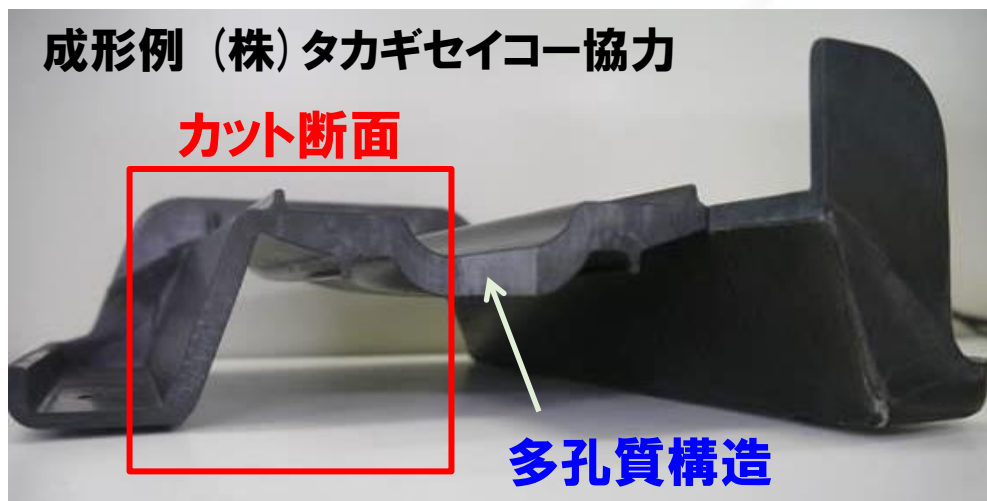
CFの交点を樹脂で結着  
CFの短繊維が  
三次元のネットワーク形成

# CFRFコアの特徴

## 【膨張性】



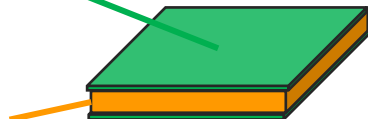
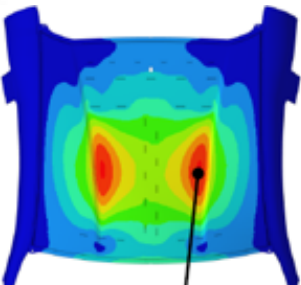
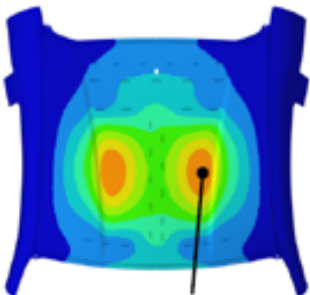


## 【プレス成形による形状賦形】 高い膨張性を利用し、プレス成形にて形状賦形可能



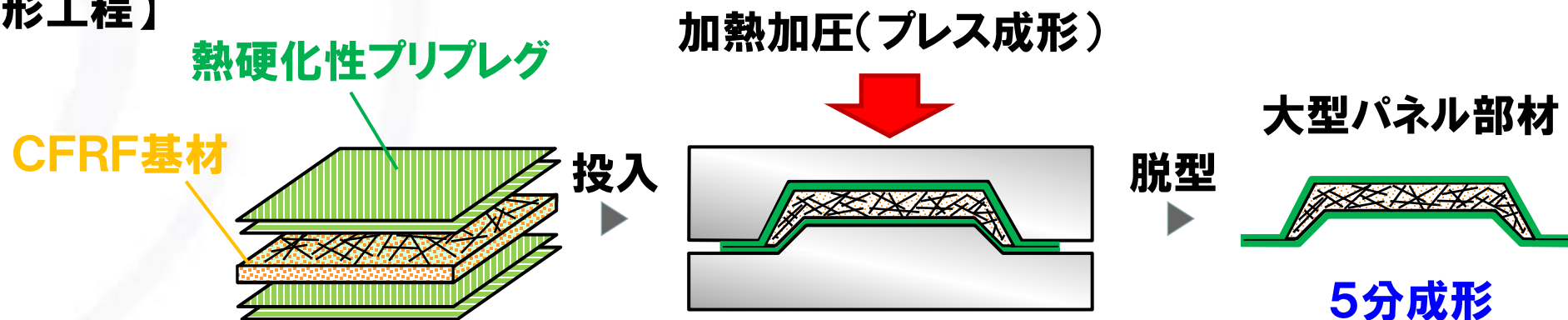
# ループモデルの形状設計

## CAE解析から、現行スチールと等価剛性で50%軽量化可能な形状

	スチール製ループ (ベンチマーク)	ハイブリッド製ループ	
		面外剛性	面外+面内剛性
構成	 比重7.48、ヤング率206GPa	CFRPスキン (0.3mm) CFRTPコア (1.3mm) 	CFRPスキン (0.6mm) CFRTPコア (1.1mm) 
剛性評価 (面荷重)	 最大変位: 1(相対値)	 最大変位: 0.9(相対値)	<仕様変更のポイント> スキン層に高弾性率 CFの使用、厚み増加
厚み (mm)	0.65	1.90	2.30
重量 (kg)	5.7	1.5 (-74%)	2.8 (-50%)

# 高速一体成形技術

## 【成形工程】



同一金型内で同時に形状賦形、熱硬化成形、スキンコアの接着 (ワンショットで成形)

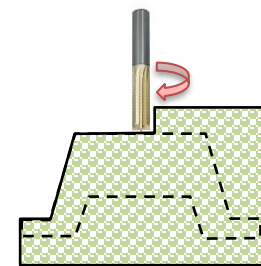
### 〈スキンコアの接着〉



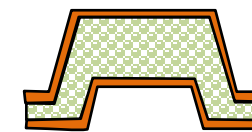
熱硬化性プリプレグの樹脂の一部が  
多孔質内へ侵入して接着

### 〈従来の成形技術〉

コア削り出し



オートクレーブで  
スキンの硬化  
スキンコアの接着



別々の工程で時間を要する

# ルーフモデル成形品

## 【成形品（塗装前後）】

成形品



成形性問題なし  
コア内部への水分の侵入を防止するため、  
端部パックした構成

塗装



塗装品

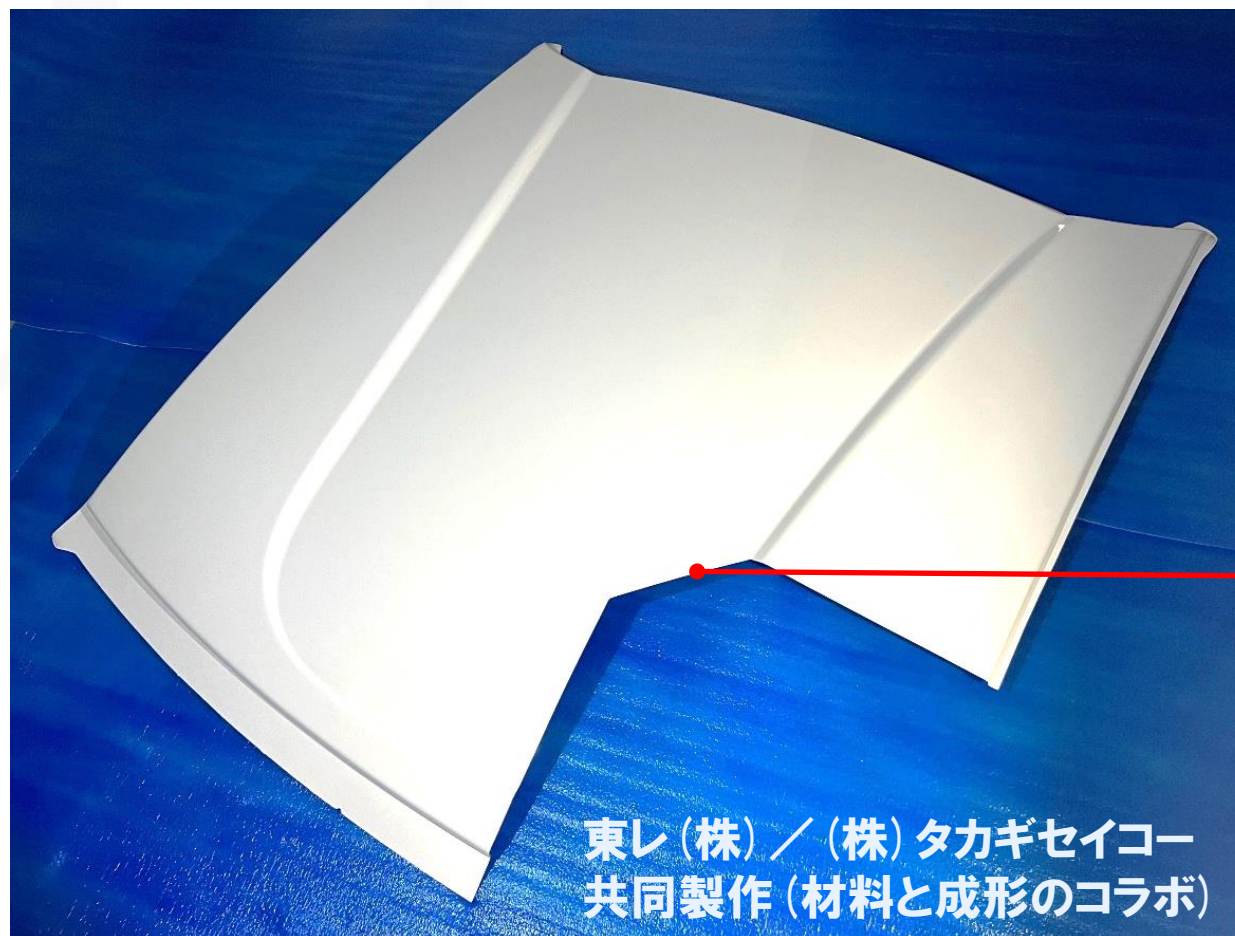


塗装性問題なし

**50%軽量化可能な実物大ルーフのプレス成形の実証  
ハイサイクル生産システム(5分成形)の実現**

# ルーフモデル成形品 (展示品)

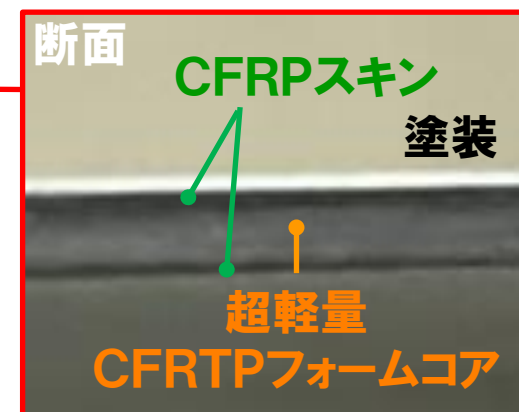
第15回 オートモーティブワールド、nanotech2023に展示



寸法:縦1.2m×横1.2m×厚2.3mm 重量:2.6kg(塗装込み)

従来スチールと等価剛性  
従来比50%軽量化モデル

従来のオートクレーブ成形対比  
成形速度10倍



スキンコア接合面の健全性確認

# 実用特性① 剛性

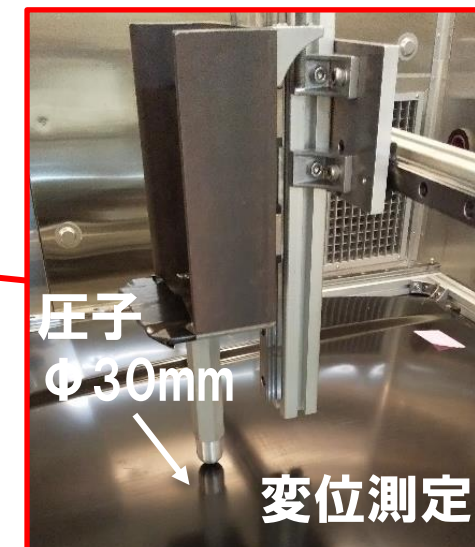
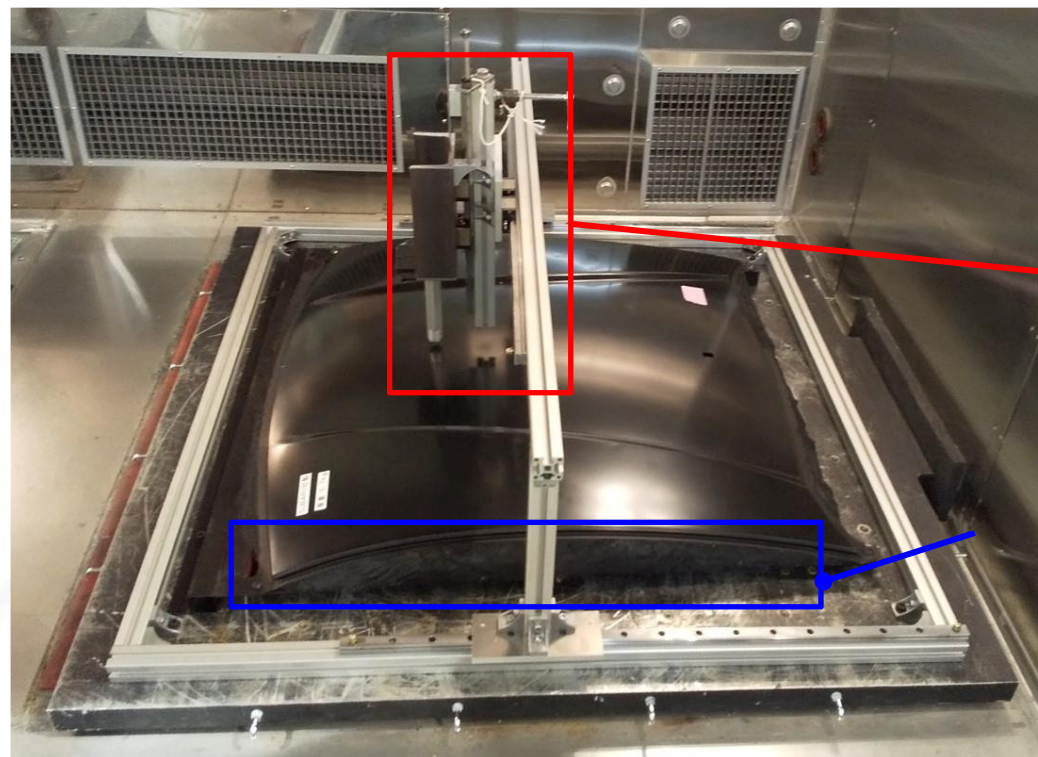
## 【評価環境】

環境試験機内にルーフを設置し、荷重を変えて押込変位を測定

試験温度：-40℃、25℃、80℃



環境試験機

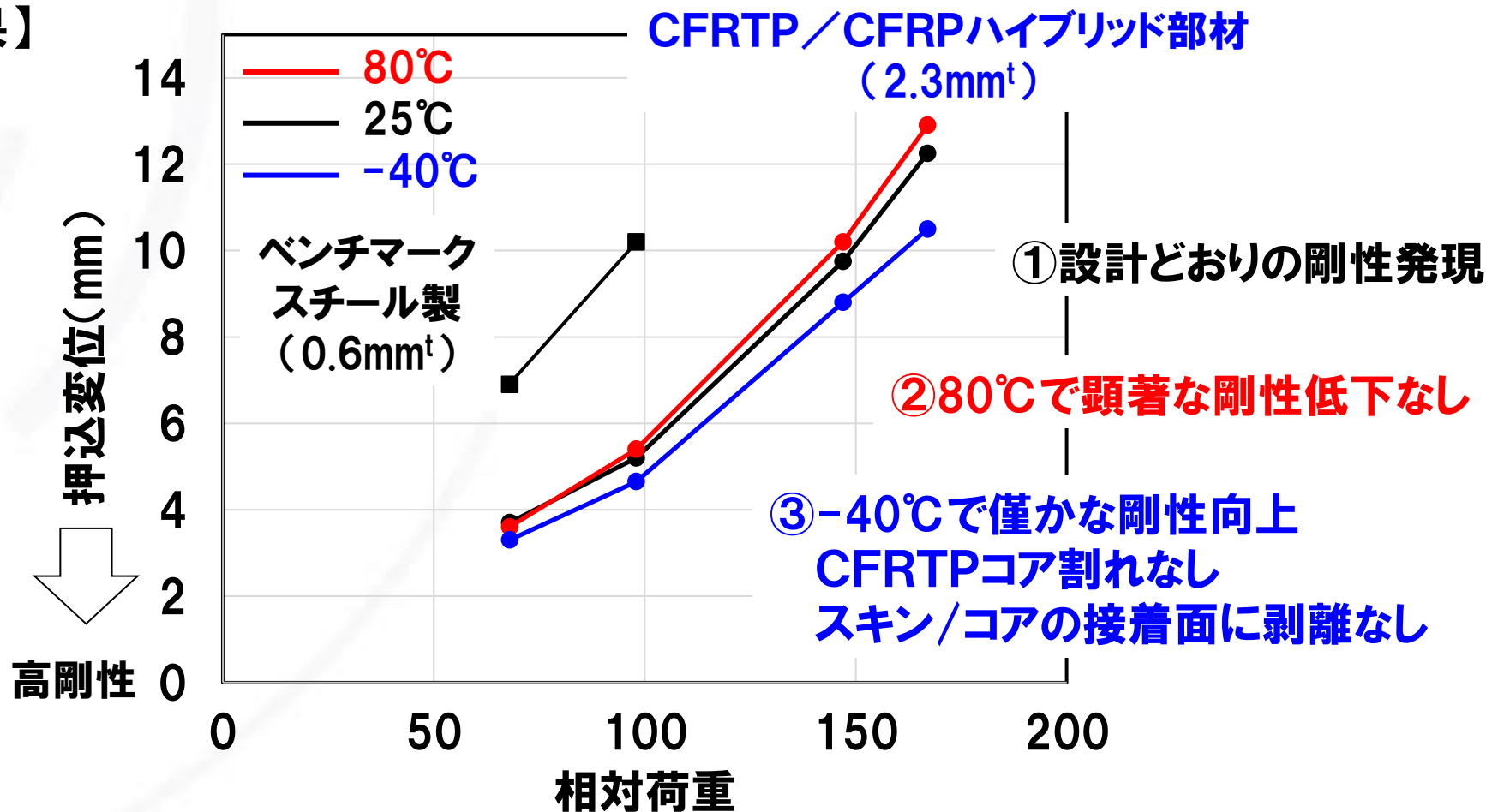


車体への取り付け模擬し、周囲をコンクリートで固定



# 実用特性① 剛性

## 【剛性評価結果】

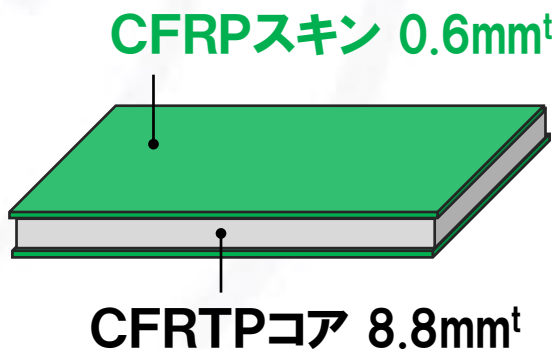


-40°C ~ 80°C 環境下での剛性の安定性を確認

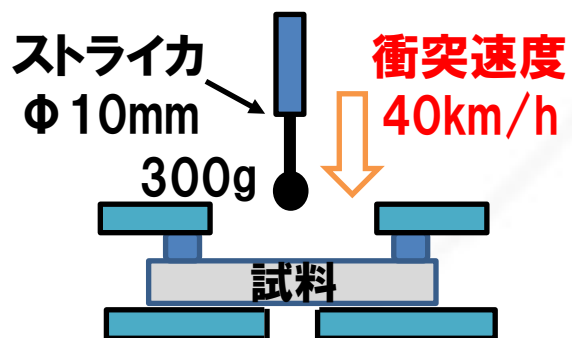
# 実用特性② 衝撃特性

## 【パネル部材の面外方向の衝撃試験】

### 〈積層構成〉



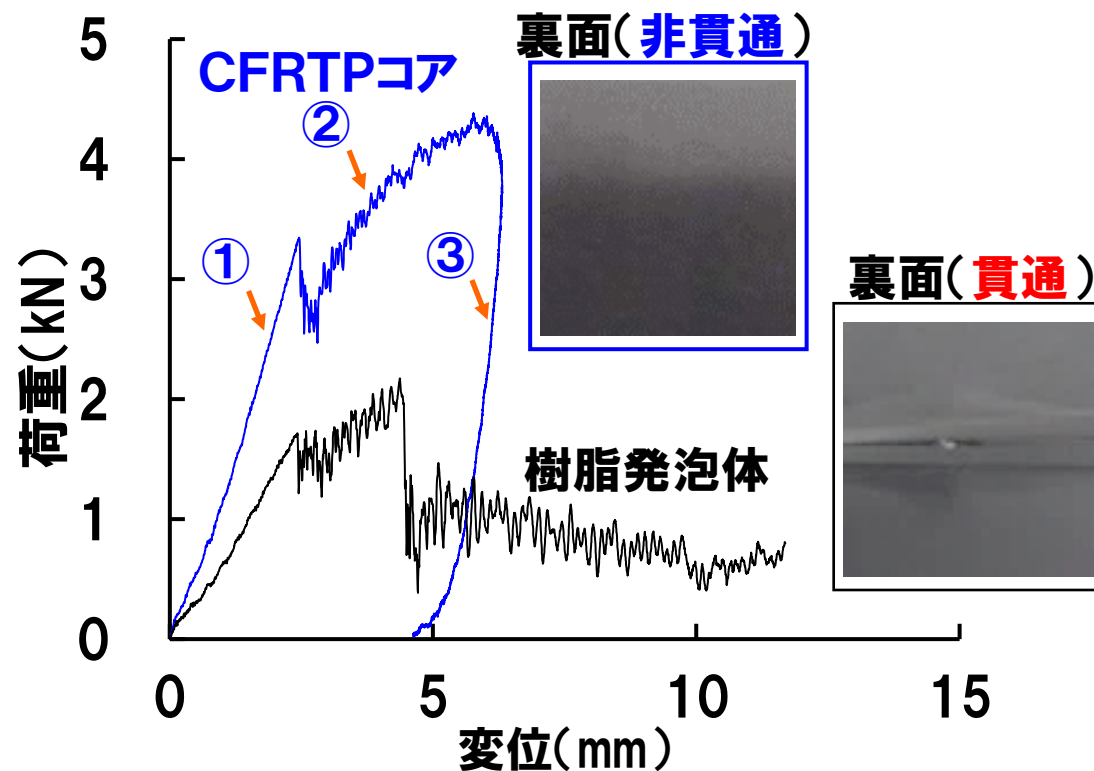
### 〈試験条件〉



試験条件: ISO 6603-2

## CFRTP/CFRPハイブリッド部材の特長

- ①初期変形に高い弾性率発現、
- ②逐次変形で衝撃を吸収
- ③ストライカーを反発



# 実用特性③ 遮音性

【パネル部材の遮音性】モビリティの騒音を想定

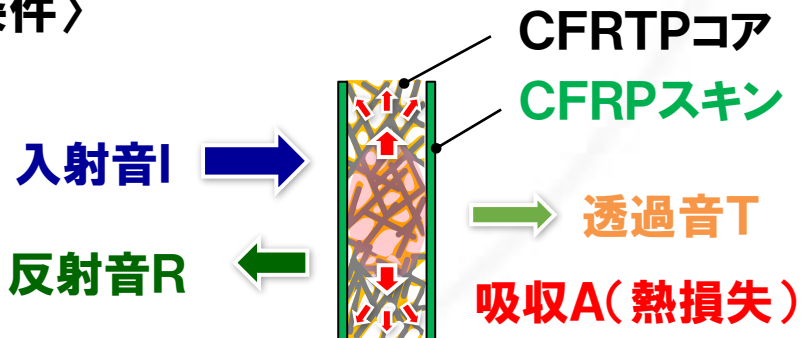
〈積層構成〉

CFRPスキン 0.6mm<sup>t</sup>

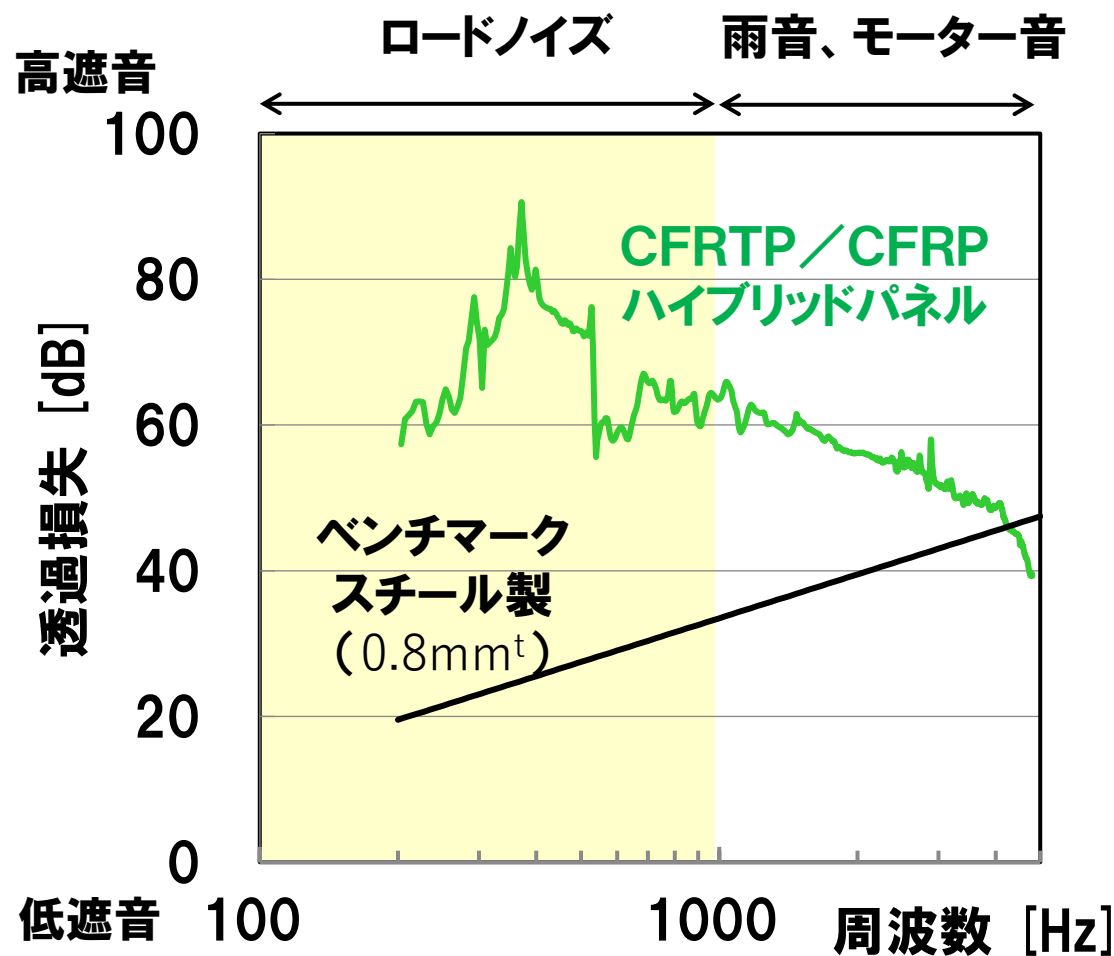


CFRTTPコア 3.8mm<sup>t</sup>

〈試験条件〉



透過率  $\gamma = \frac{\text{透過音エネルギー}}{\text{入射音エネルギー}}$   
 透過損失(dB) =  $10\log_{10}(1/\gamma)$



**遮音ポテンシャル高い  
(多孔質コアによる吸音効果)**

# まとめ

- 1. 超軽量CFRTPコアとCFRPスキンのサンドイッチをルーフ部材としたプレス成形にて、従来スチールの50%軽量化を達成した。  
また、5分間の高レート成形を実証した。**
- 2. ルーフの性能評価をおこない、室温及び、環境下(低温、高温)においても面外剛性が安定することを確認した。**
- 3. 軽量化以外にも、衝撃性、遮音性、遮熱性といった新たな機能性を有することを確認した。**
- 4. ルーフ部材をはじめ、次世代モビリティ向けの軽量パネル部材としての適用が期待される。**

# 市場価値 展示会での声

## 展示会での自動車関係者の声

- ✓バンパー等の樹脂製品と同等の成形時間であり、**高レート生産可能な価値ある技術**である。
- ✓ルーフの周囲はプリプレグ同士でパックした構造とし、コアへの水分侵入による凍結、塗装溶剤侵入による劣化等を抑制している点は**実用的**である。
- ✓剛性評価結果について、高温ではコアの軟化による剛性低下が懸念されたが、剛性低下は顕著ではなく、低温においても健全性は保たれている。将来、ルーフとしても車種の制約はあるが適用できる可能性はある。
- ✓特に、**既存車種の一部においてハードトップのルーフに適用可能**である。  
理由は、両車ともすでにベース車で振じり剛性が確保されており、ルーフは軽ければよいのでこのような車には適している。  
オールマイティに適用するため車体の振じり剛性を含めた車体設計時点から参画する必要がある。

# 社会実装までの道筋 (2030年)

## 現状と戦略

- ✓ プレスリリース「CFRP製モビリティ部材の高速一体成形技術の開発」を実施し(2/16)、市場へアピール。
- ✓ 現在、研究開発段階。2030年代の事業化を目指す。
- ✓ 本プレス成形技術が活かせるパネル部材であれば積極的な置き換えを狙う。  
軽量高剛性以外にも衝撃特性、遮音性、遮熱性に優れるため、機能性を重視した部材として顧客提案をおこなっていく。
- ✓ 将来的には、自動化に伴い、自動車の形状、素材そのものが見直されると想定される。  
本サンドイッチ材は錆びないため、金属材料よりも耐久性に優れ、20～30年使用できる材料として顧客価値があると想定される。
- ✓ 軽量・高剛性のみならず、多機能な材料として多用なニーズを調査し、取り込んでいく。  
小型形状の用途での実績を積むことで、材料や部材としての認知度/信頼性を構築する。

# 本成果の経済効果

## 本技術による製造コスト削減効果

従来サンドイッチと比較すると、工程削減(コア材切削やスキンコアの接合など)、高レート生産から製造コストの削減に貢献する技術である。

東レは既に部材同士の接合を高レートで実施可能な技術を保有している。今回は成形部分に関し、これらのシナジー効果で複合材料製造のハードルを下げて、用途拡大を進めていく。

## 本技術によるCO2排出削減効果

本技術ではワンショット工程のため、使用エネルギーはプレス成形(5分)のみである。実際のCO2削減効果は案件毎に試算して、顧客に提案していく。(現状は比較製品がないため、削減効果が定量化できていない)

## 資料6-4

# 「革新的新構造材料等研究開発」(終了時評価)

2014年度～2022年度 9年間

## プロジェクトの詳細 (公開版)

### 6.4 革新鋼板を用いたAピラー4部品ASSY

「残留 $\gamma$ 高度制御革新鋼板の開発」(テーマ番号22)

「残留 $\gamma$ 相制御中高炭素鋼板の異種・同種材料接合技術の開発」(テーマ番号02)

実施者：株式会社神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所 材質制御研究室 室長  
村上 俊夫

2023年 4月21日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

材料・ナノテクノロジー部



# テーマ毎の目標と根拠

## ・ 残留 $\gamma$ 高度制御革新鋼板の開発 (テーマ番号22)

### 主なテーマのみ抜粋

研究開発テーマ	最終目標	根拠
① 残留 $\gamma$ 高度制御による高強度・高延性化技術の開発 (2014～2019年度)	レアメタル量 10wt%未満 引張強度 1.5GPa以上 伸び 20%以上 汎用鋼と同等の耐食性と 水素脆性を旨す	1.5GPa級にて、プロジェクト開始当時の汎用的な 高強度鋼 (590MPa～980MPa級鋼) と同等の 成形性として設定。

## ・ 残留 $\gamma$ 高度制御革新鋼板の異種・同種材料接合技術の開発 (テーマ番号02)

研究開発テーマ	最終目標	根拠
② 残留 $\gamma$ 相制御中高炭素鋼のスポット溶接 (2014～2019年度)	中高炭素鋼板同種接合で JIS-A級同等の継手強度 確保	テーマ22で開発する残留 $\gamma$ 高度制御革新鋼板を 自動車ボディに適用するために、JIS規格を満足する 抵抗スポット溶接継手を実現することが必要なため。
⑮ 革新鋼板製実車体模擬部品の実現 (2021～2022年度)	実車のAピラーを模擬した 革新鋼板製部品 (Aピラー-ASSY) の実現	最新の自動車車体部品への革新鋼板の適用性を 検証するため。

# テーマ毎の目標達成状況

## ・ 残留γ高度制御革新鋼板の開発 (テーマ番号22)

主なテーマのみ抜粋

研究開発テーマ	目標 (2023年2月)	成果 (2023年2月)	計画との差異	今後の課題と解決方針
①残留γ高度制御による 高強度・高延性化技術の開発 (2014～2019年度)	レアメタル量<10wt% (Mn等) 引張強度 >1.5GPa 伸び > 20%	・0.4C-2.0Mnで <b>TS 1.5GPa - EL 20%達成</b> ・目標相当特性の 大型鋼板を実現	◎ 最終目標を前倒し達成 実大部品試作可能な 材料の実現まで進展し 大幅達成と評価	-

## ・ 残留γ高度制御革新鋼板の異種・同種材料接合技術の開発 (テーマ番号02)

研究開発テーマ	目標 (2023年2月)	成果 (2023年2月)	計画との差異	今後の課題と解決方針
②残留γ相制御中高炭素鋼のスポット溶接 (2014～2019年度)	中高炭素鋼板 同種接合で JIS-A級同等の 継手強度確保	スポット溶接で <b>対JIS-A級継手 強度同等以上を 達成</b>	○ 計画通り達成	-
⑮革新鋼板製実車体模擬部品の実現 (2021～2022年度)	実車のAピラー 模擬部品の実現	<b>Aピラー4部品 Assyを実現</b> → 展示会に出展	○ 計画通り達成	-

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み (中間) / 一部達成 (事後)、×未達

# 残留γ中高炭素革新鋼板の開発-1

## 革新鋼板開発の目標と当初コンセプト

- 世界最高クラスの特徴を目標に設定

引張強度 : 1.5GPa

伸び : 20%

- 達成手段

TRIP効果で伸びに寄与する残留γ量増量  
残留γの伸び向上効果を改善

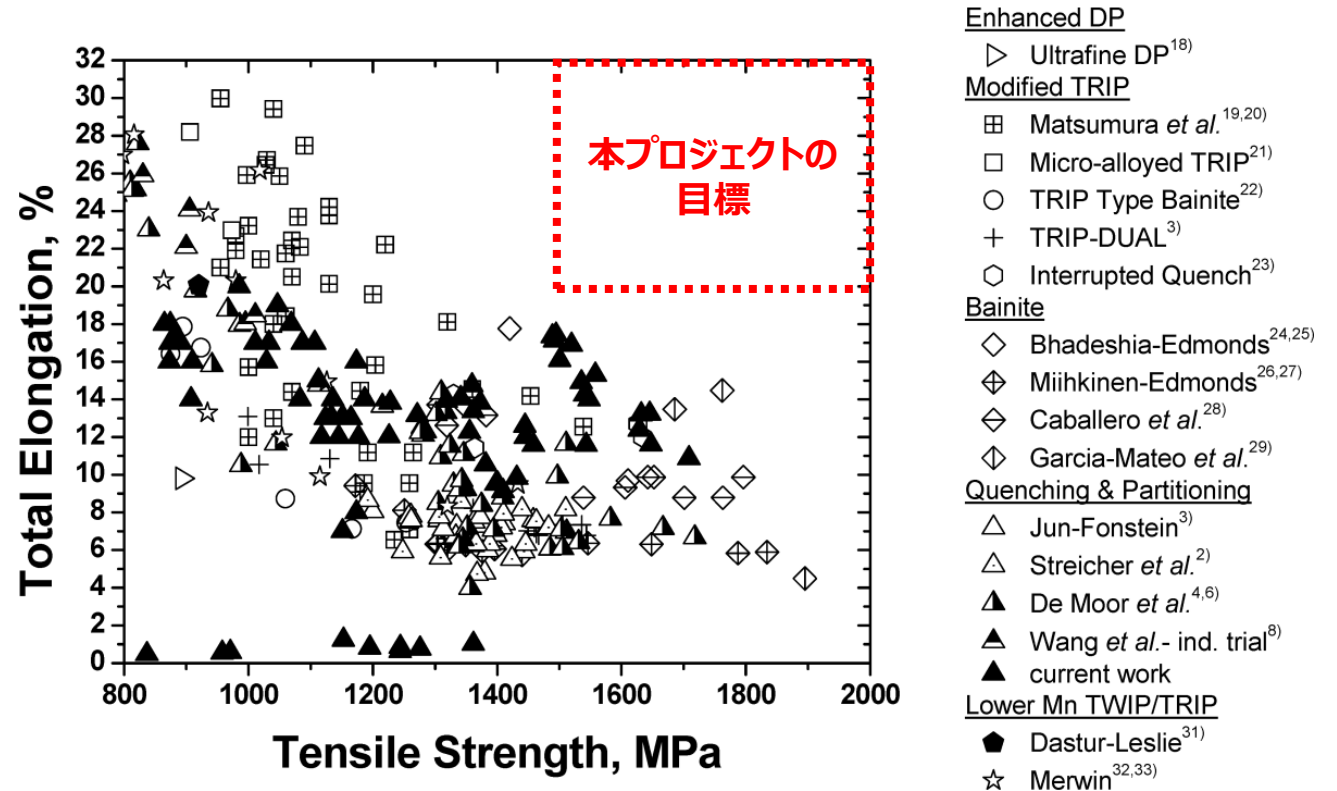


Cの増量 (通常 0.2% → 0.4%)  
残留γ制御による伸び向上効果最大化

Cの増量に伴う溶接性の劣化を  
中高炭素鋼に対応した接合技術を開発することで対応

鋼材開発と接合技術開発を平行して推進

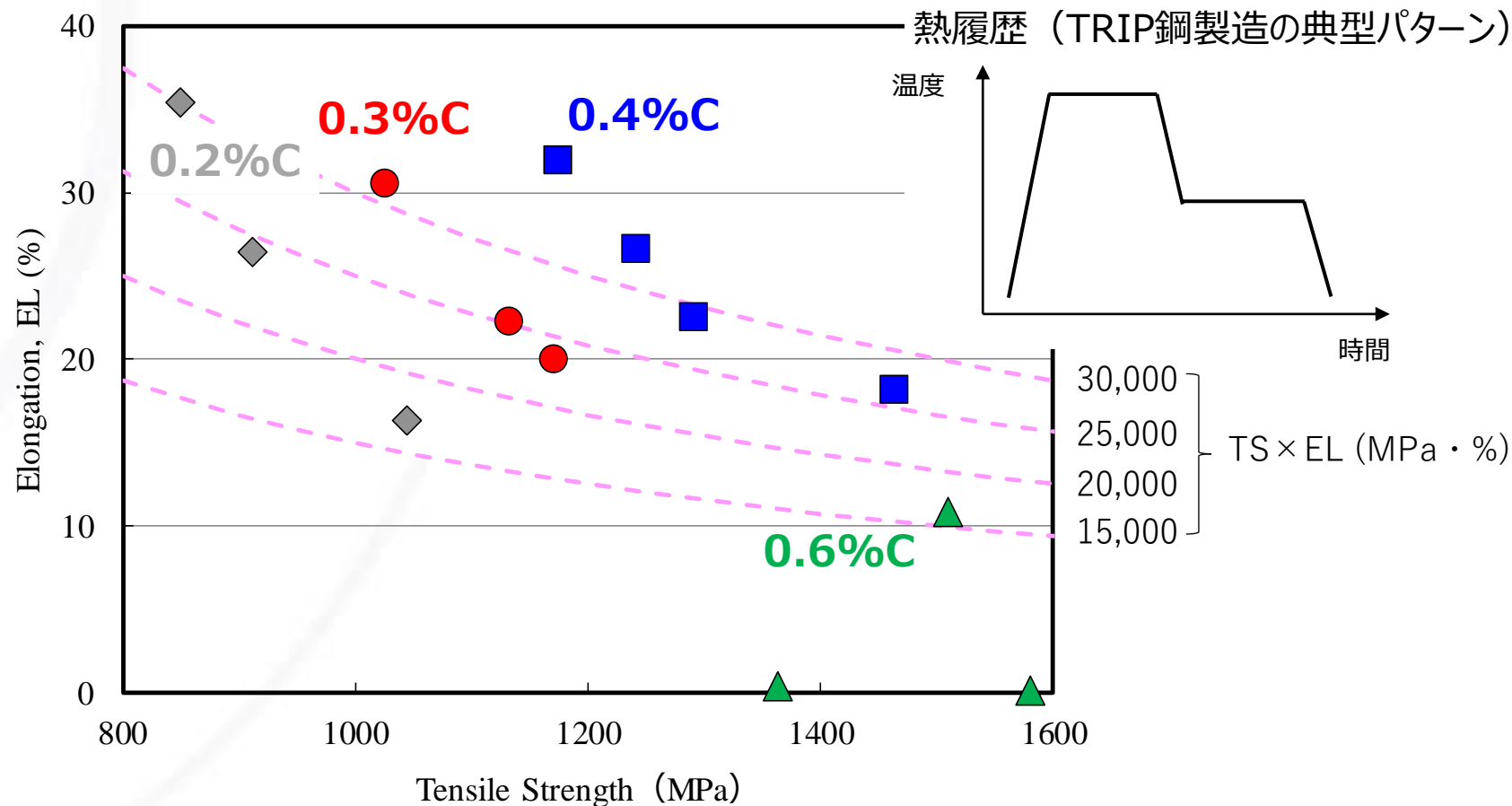
## ISMAプロジェクト開始当時の高強度・高延性化に関する取組状況



E. De Moor, et al. : ISIJ International, 51 (2011), p.137.

# 残留 $\gamma$ 中高炭素革新鋼板の開発-2

## 強度・延性に及ぼす C量の影響



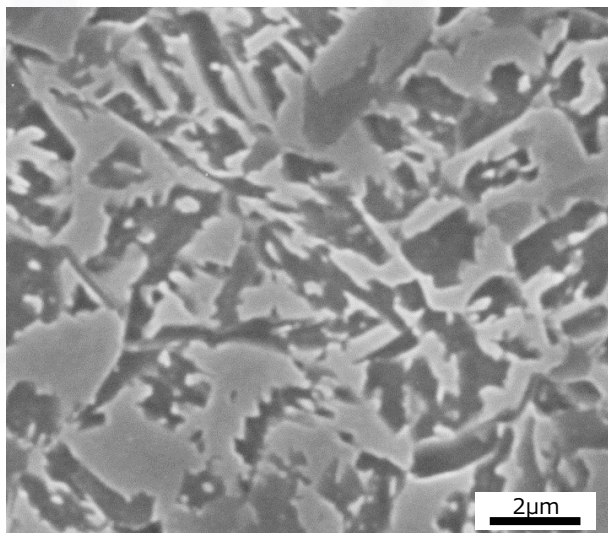
C量が0.4%程度までは強度－伸びバランスが向上。目標に近い特性を確保。

懸念事項：伸び向上に伴う他の成形性（穴広げ率： $\lambda$ ）の劣化

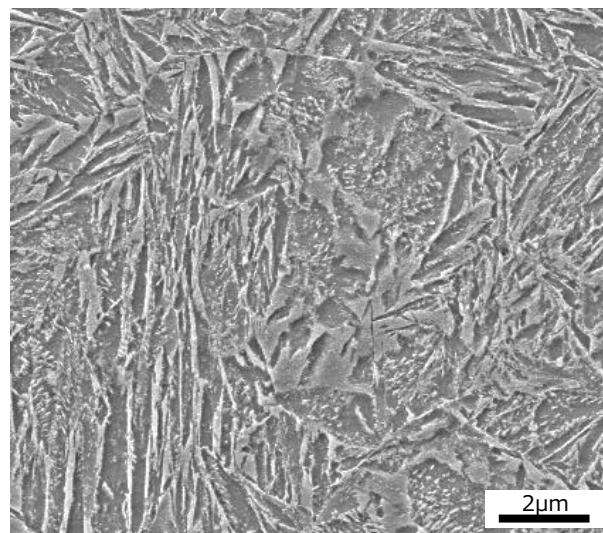
# 残留 $\gamma$ 中高炭素革新鋼板の開発-3

## 組織と特性の関係

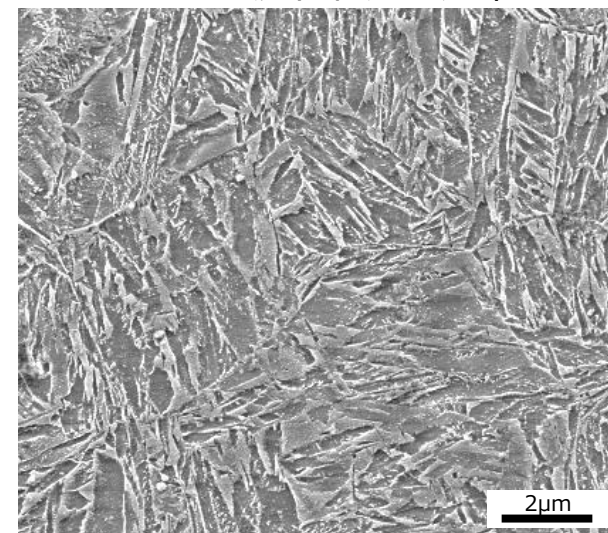
オーステンパ



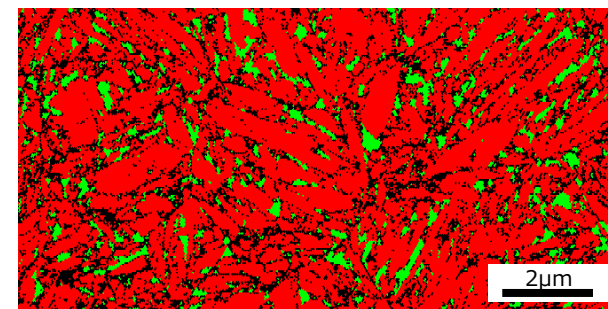
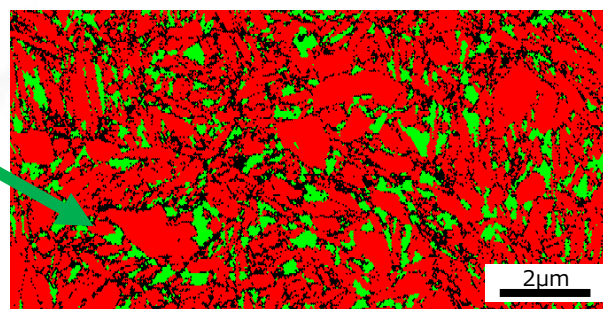
Quench & Partioning  
(マルテンサイト+残留 $\gamma$ )



Quench & Partioning  
+ 合金炭化物形成元素



残留オーステナイト



EL = 16%,  $\lambda$  = 0.3%

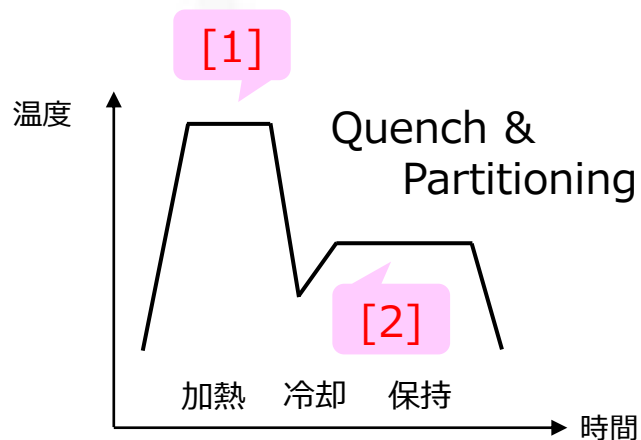
EL = 21%,  $\lambda$  = 13%

EL = **20%**,  $\lambda$  = **26%**

組織微細化により、1.5GPa級で良好な伸びと穴広げ率を兼備

# 残留γ中高炭素革新鋼板の開発-4

## 組織微細化の アプローチ



## アプローチ [2] に基づき大型鋼板を試作

大型鋼板の機械的特性

Steel Type	YS 〔%〕	TS 〔%〕	EL 〔%〕	λ 〔%〕
High EL type	1294	1463	17	24
High YS type	1384	1535	14	24

### 部品試作に活用

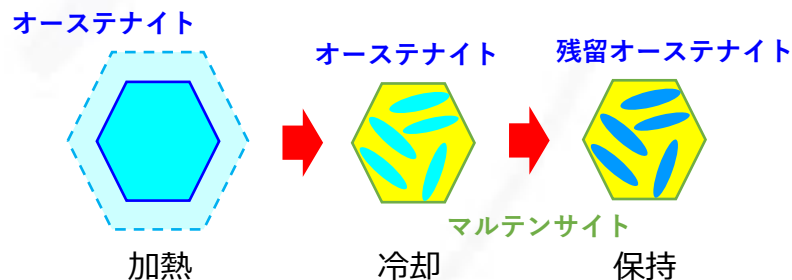
- ・Aピラー
- ・ドアインパクトビーム  
(広島分室 (マツダ様) 連携)

1月 Automotive World

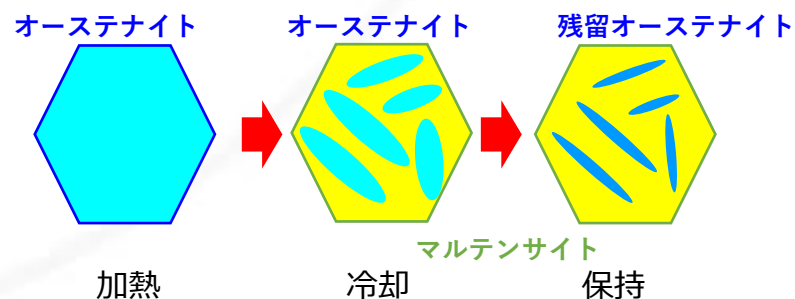
2月 NanoTech展

で展示

[1] 初期組織  
(旧γ粒径)  
微細化

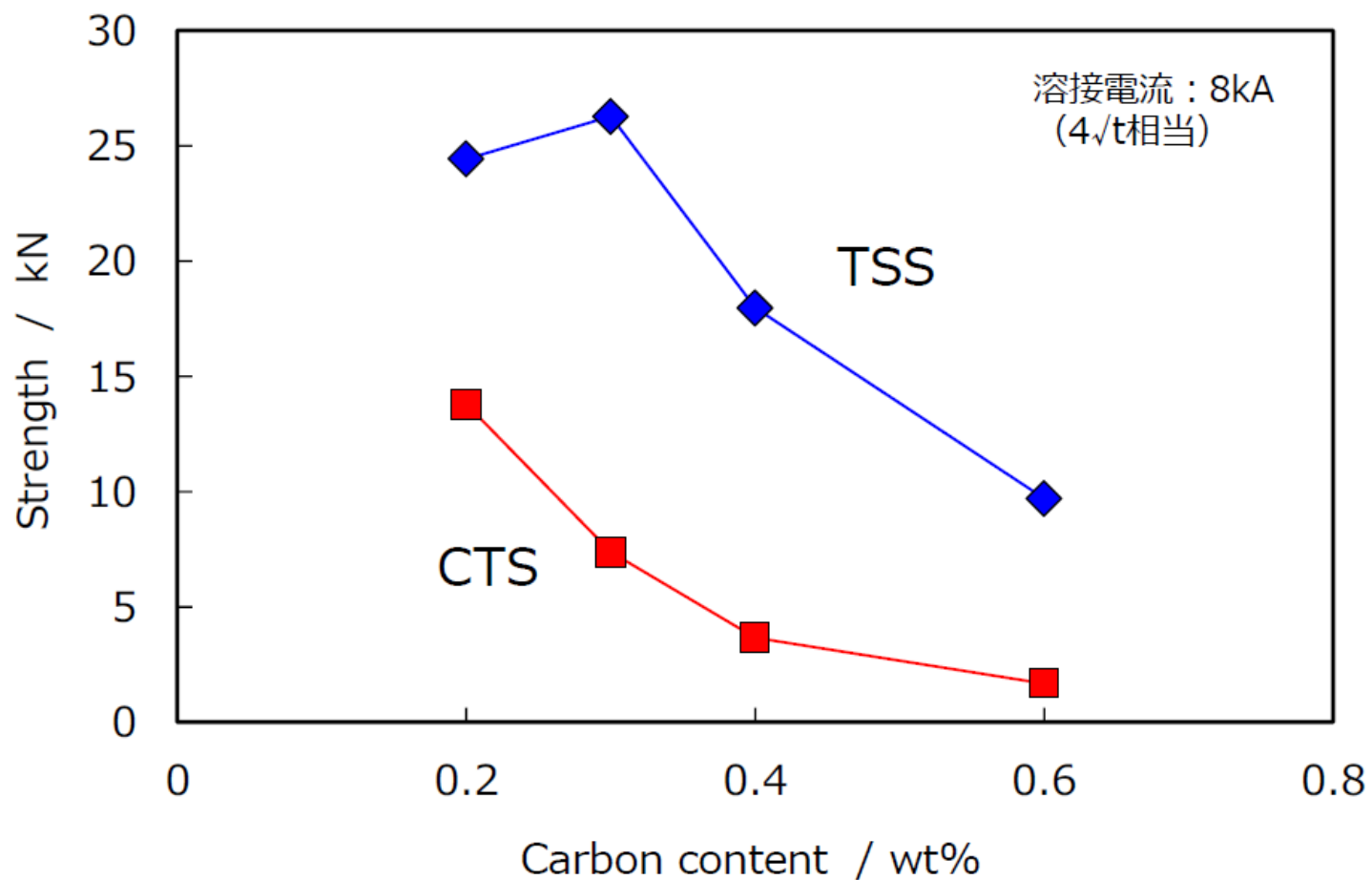


[2] オーステンパ中  
の変態促進による  
微細化



# 革新鋼板の接合技術-1

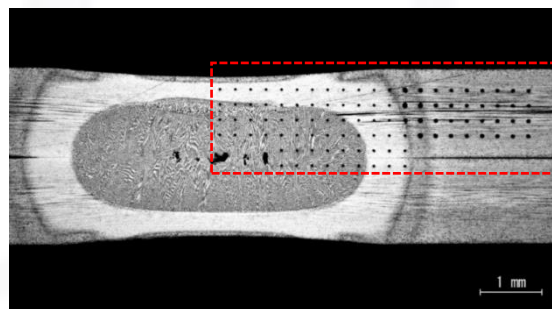
抵抗スポット溶接  
継手強度に及ぼす  
C量の影響



C量の増加に伴い、引張せん断強度（TSS）、十字引張強度（CTS）が大きく劣化

# 革新鋼板の接合技術-2

## 革新鋼板の抵抗スポット溶接 継手強度改善方法



テンパー通電長時間化は  
再硬化領域を拡大



**[B] 長時間化**  
(本通電+テンパー通電 長時間化)

371	371	374	373	383	382	382	394	413	422	448	405	411	448	467	480	475	486	483	476	483
697	688	699	684	696	699	685	679	676	618	434	411	380	434	473	475	485	478	476	485	485
705	668	696	702	660	688	708	717	668	682	682	501	399	432	462	501	483	475	483	478	485
693	676	685	711	693	693	682	699	691	676	724	688	420	420	470	492	501	497	495	490	508
705	688	702	671	685	685	696	690	679	702	693	702	-	-	-	-	-	-	-	-	-
690	644	626	696	682	673	665	671	688	702	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

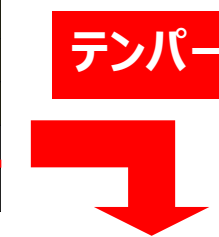
■ 本通電のみ

712	711	702	727	717	714	720	711	714	717	720	480	433	476	508	501	497	486	494	490	494
682	688	706	681	730	699	698	707	727	714	714	702	418	480	519	497	494	497	492	499	490
720	699	688	699	720	703	671	673	685	699	693	702	429	452	523	521	502	497	494	494	504
688	724	676	689	690	679	705	673	688	646	717	730	636	442	521	508	492	495	495	506	497
-	-	-	-	671	690	693	699	693	660	679	717	668	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	682	660	641	649	690	662	717	720	688	-	-	-	-	-	-	-	-

溶接部が硬化・脆化



テンパー通電で  
Ac3以上に加熱された  
領域は再硬化



テンパー通電多段化で  
再硬化領域を  
軟質化

**[C] 多段化**  
(本通電+テンパー通電 2段通電化)

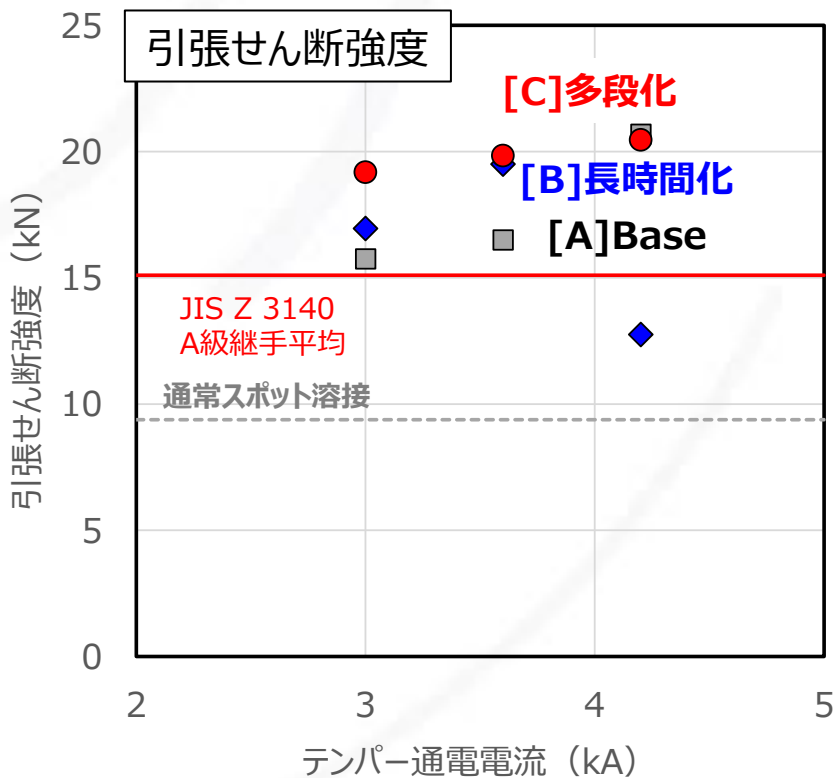
563	561	574	561	565	555	563	572	574	555	557	557	403	436	480	494	492	480	481	463	483
446	430	454	480	453	444	457	470	475	488	508	525	497	418	470	494	475	476	481	483	475
480	485	478	476	459	445	414	412	424	437	457	494	521	395	473	492	478	476	467	478	485
494	495	476	480	483	494	470	460	423	408	421	448	494	403	463	501	483	481	478	475	485
467	467	460	-	475	467	476	463	467	424	373	432	-	-	-	-	-	-	-	-	-
459	433	-	-	459	457	465	468	470	430	377	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



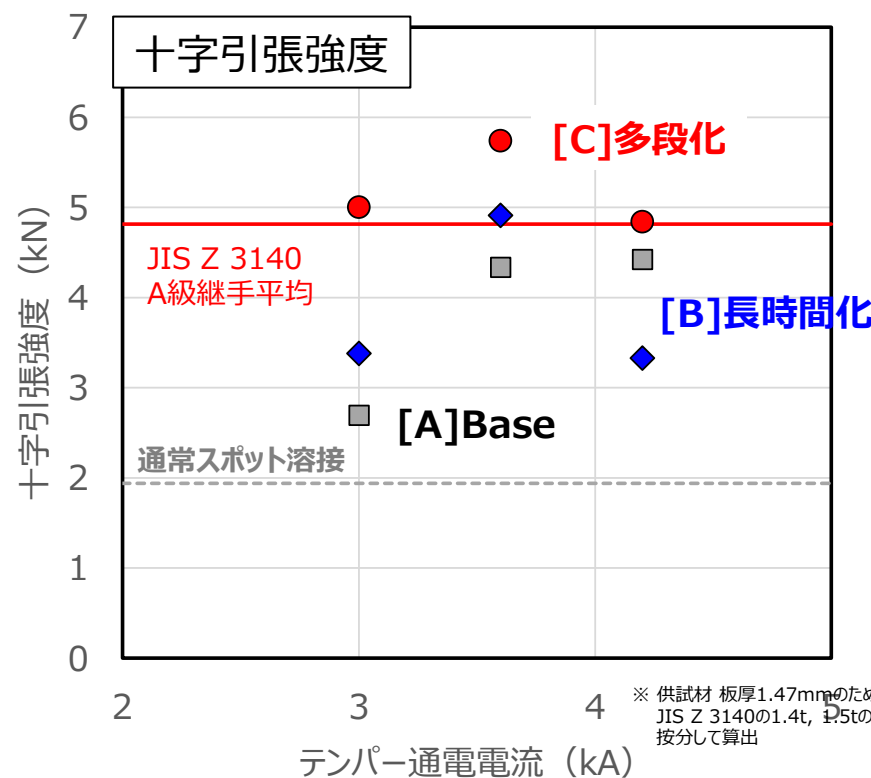
# 革新鋼板の接合技術-3

## 革新鋼板の抵抗スポット溶接 継手強度改善方法

通常スポット ➡ [A]Base スポット溶接+テンパー通電



[B]長時間化 スポット溶接+テンパー通電 長時間化  
[C]多段化 スポット溶接+多段 テンパー通電

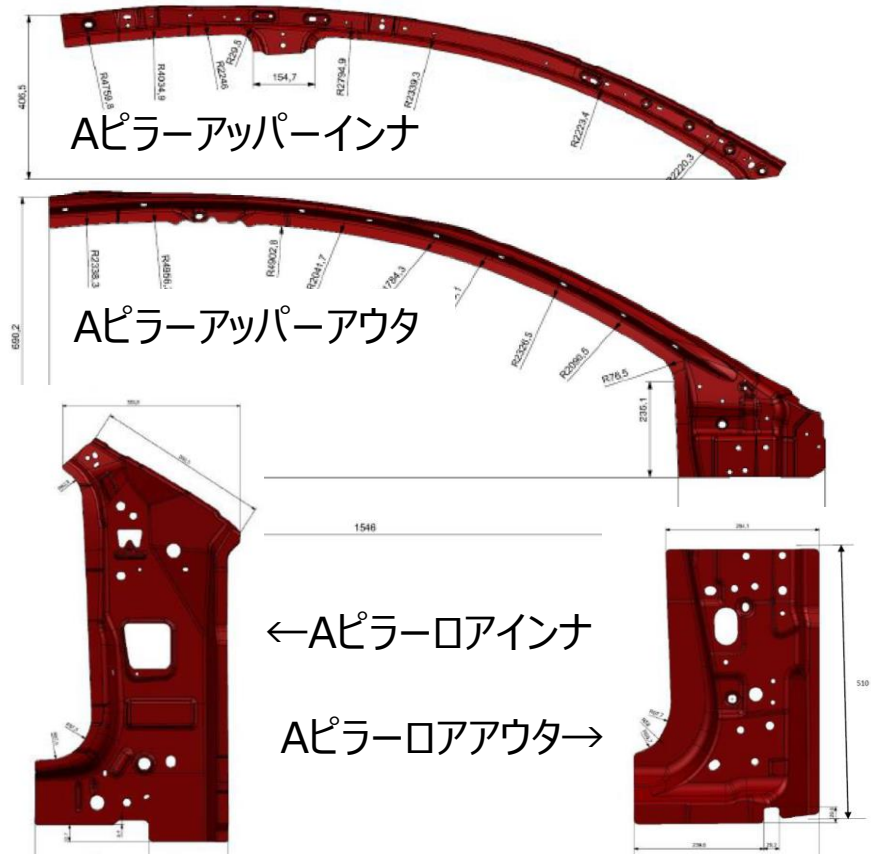
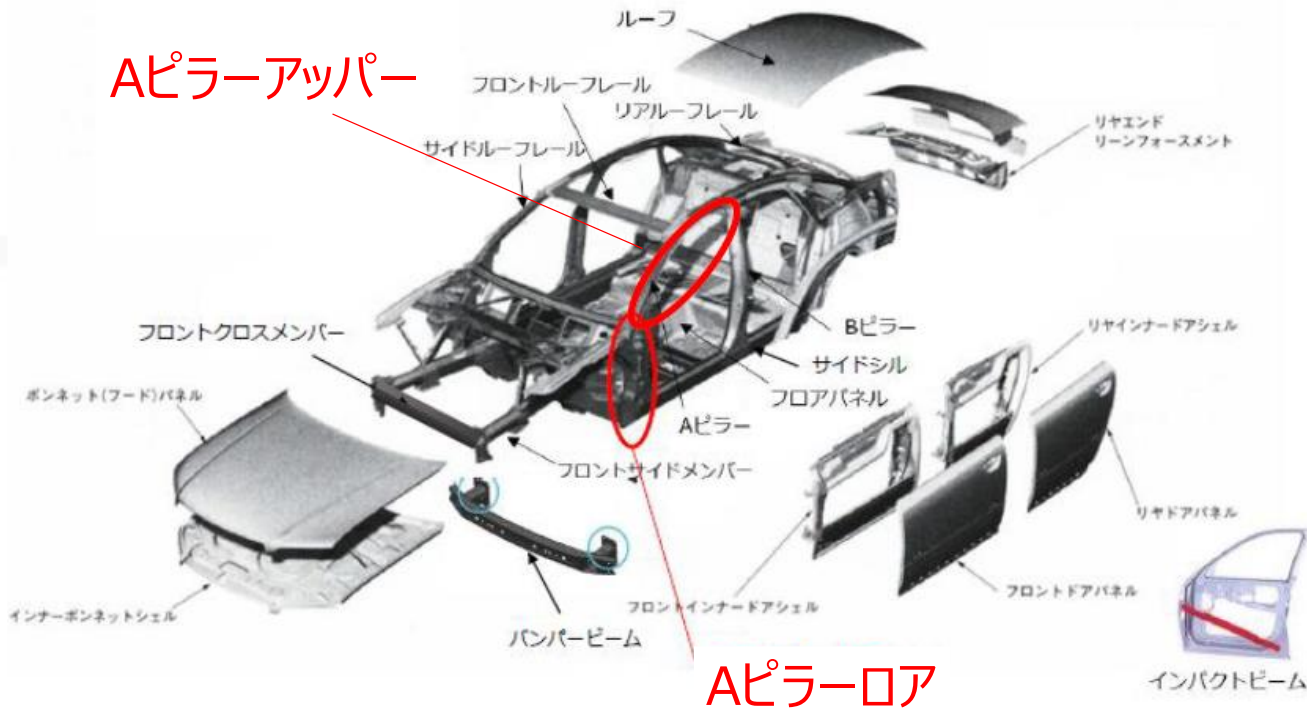


※ 供試材 板厚1.47mmのため  
JIS Z 3140の1.4t, 1.5tの基準値を  
按分して算出

多段テンパー通電により革新鋼板でJIS A級継手相当の特性を実現

# 革新鋼板を活用した部品試作- 1

## 革新鋼板を用いた部品試作 (Aピラー-4部品ASSY部品)



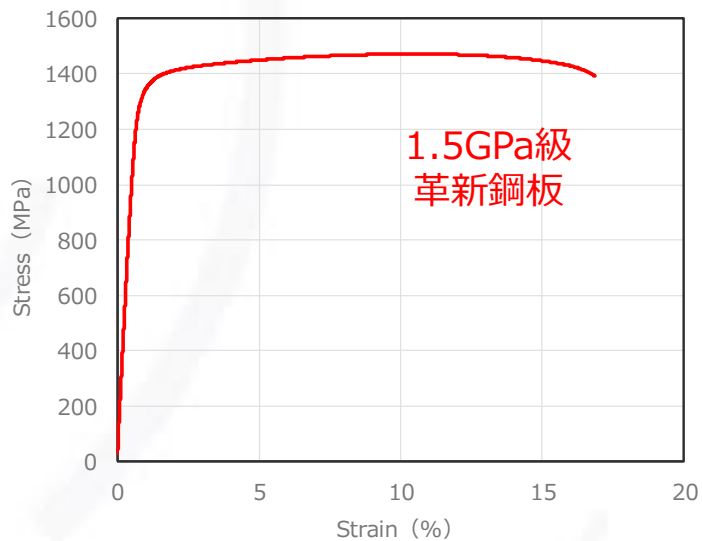
リバースエンジニアリングで作成した実車相当のAピラー部品形状 (ISMA本部)

実車相当のAピラーの〔アッパー + ロア〕×〔アウト + インナ〕を組み立て、ASSY部品を作製

# 革新鋼板を活用した部品試作-2

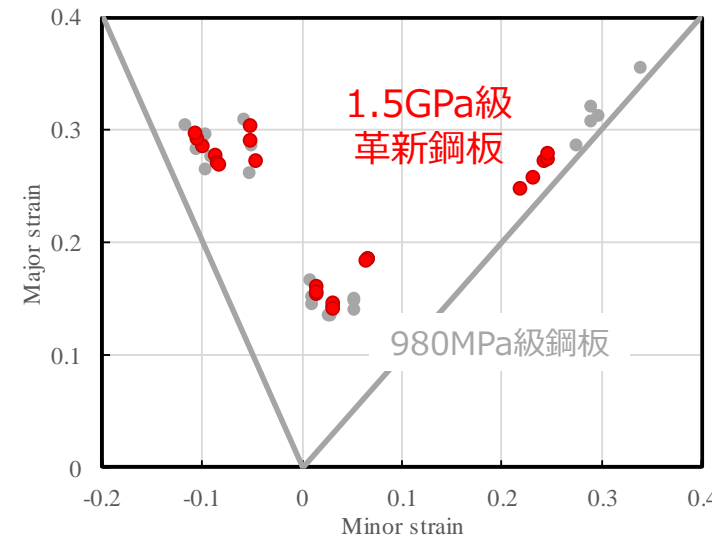
## 革新鋼板の材料DBの構築

応力-歪線図



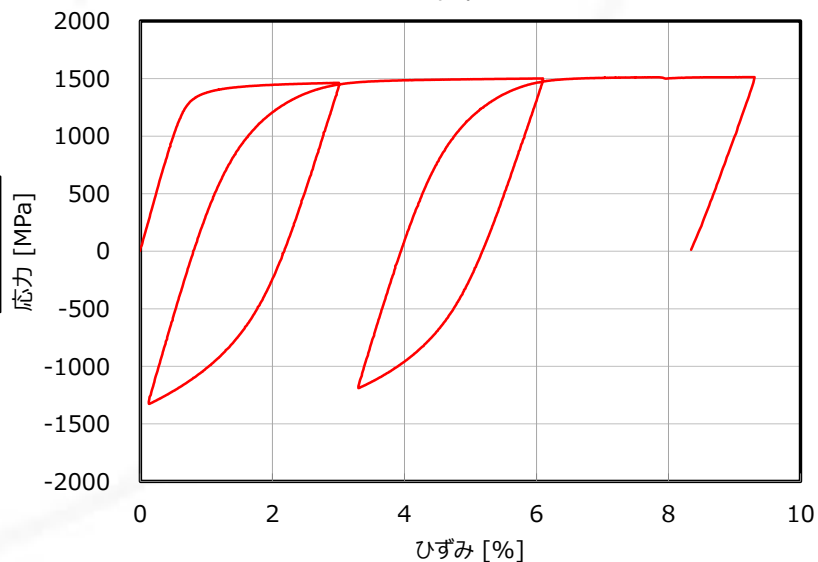
成形限界線図

成形解析時の破断限界を示す



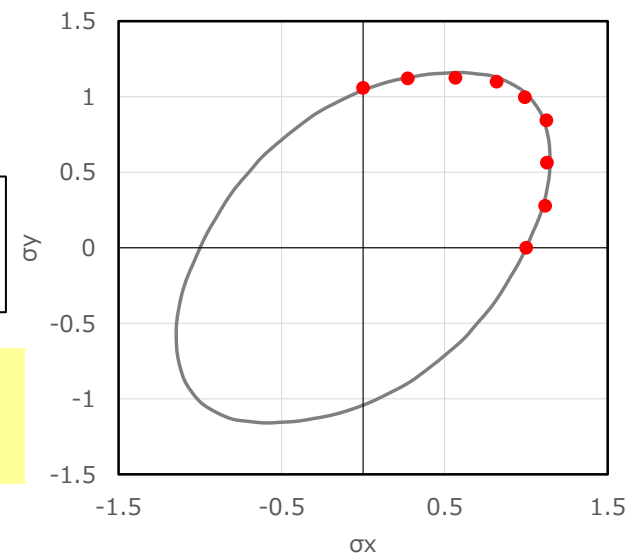
サイクリック試験  
(吉田-上森モデル)

スプリングバックの予測精度向上



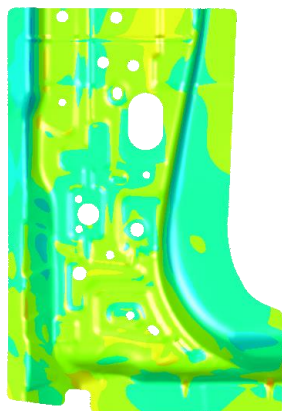
2軸引張試験結果と降伏関数計算値

成型時の鋼板特性の異方性を考慮



# 革新鋼板を活用した部品試作-3

## 革新鋼板を用いた実部品試作

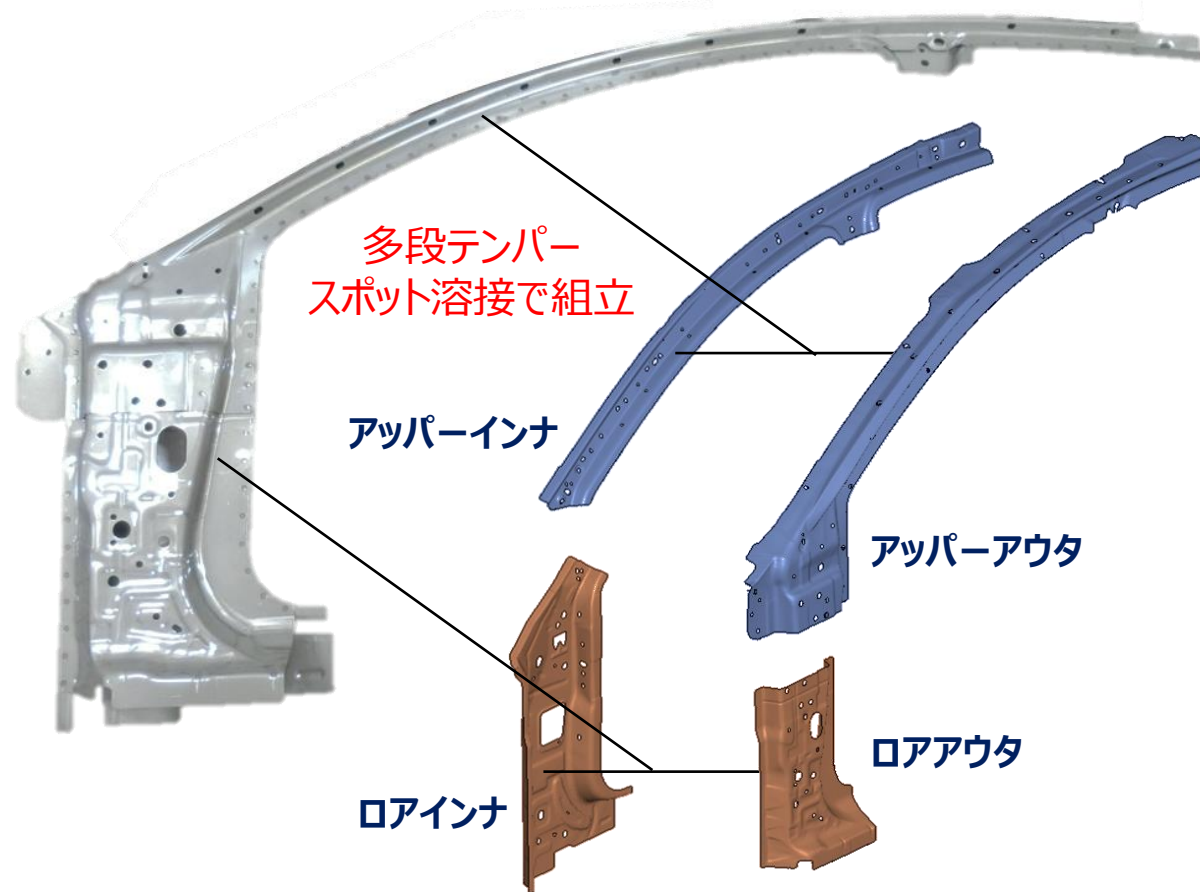


目標形状  
通り

精度 3mm以内で  
プレス部品作製

革新鋼板製Aピラーロアアウト

## 革新鋼板製 Aピラー4部品ASSY部品



革新鋼板 (1.5GPa級冷延鋼板) 製 AピラーASSY部品を実現

# 革新鋼板の実用化に向けた取り組み

## 2030年までの社会実装への道筋

### 【革新鋼板】

ユーザに対して、本プロジェクトで得られた革新鋼板に関する知見を提示、議論を通じて革新鋼板に求められる項目や周辺技術を抽出し、その課題を解決を進めることで社会実装を目指す。

### 【接合技術】

革新鋼板をユーザに提供する際のソリューション技術として提示することで、革新鋼板と合わせて社会実装を目指す。革新鋼板同様に求められる個別の技術課題に対応するための技術開発を進めていく。

## 資料 6 – 5

# 「革新的新構造材料等研究開発」(終了時評価)

2014年度～2022年度 9年間

## プロジェクトの詳細 (公開版)

### 6.5 革新アルミニウム合金を用いたフロントサイドメンバー およびサイドシルインナー

「高強度アルミニウム合金を用いた自動車部品の開発」(テーマ番号13)

実施者：(株)UACJ R&Dセンター 第一研究部長 箕田 正

2023年 4月21日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

材料・ナノテクノロジー部

# テーマ毎の目標と根拠

研究開発テーマ	最終目標	根拠
自動車向け革新アルミニウム合金の開発	自動車部品用Al-X-Sc合金の開発	Sc(スカンジウム)添加により、高強度化した5000系および6000系合金を開発する。
超軽量フロントサイドメンバーの設計・試作	革新アルミニウム合金を用いた実証試作	ベンチマークのハイテンから、革新アルミニウム合金を用いた設計への変更により、34%以上の軽量化率を達成する。
軽量サイドシルインナーの設計・試作	革新アルミニウム合金を用いた実証試作	ベンチマークのアルミニウム合金従来材(6000系)から、革新アルミニウム合金6000系に置換することにより、現行材よりも軽量化する。

# テーマ毎の目標達成状況

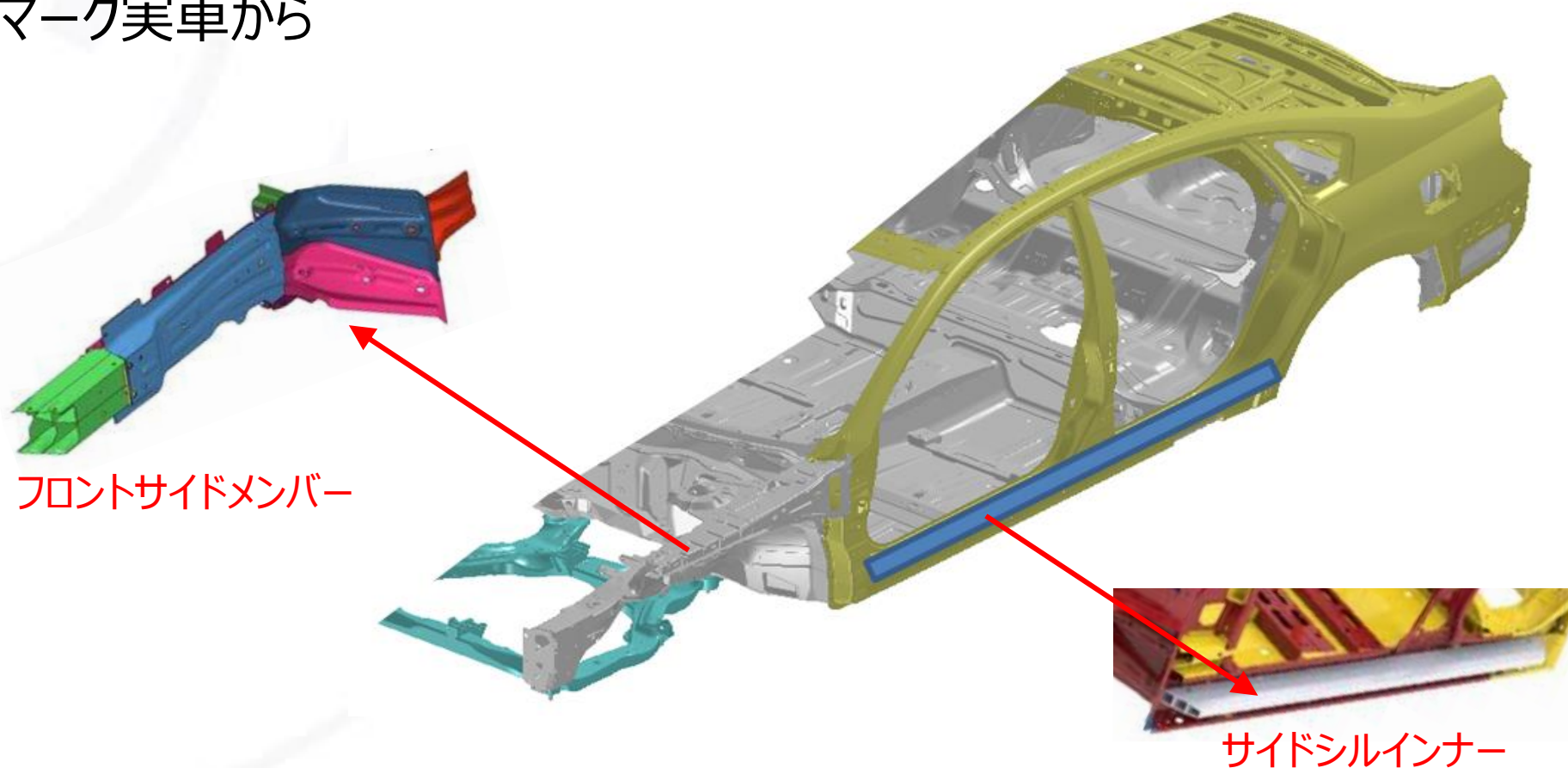
研究開発テーマ	目標 (2023年2月)	成果 (2023年2月)	計画との差異	今後の課題と解決方針
自動車向け革新アルミニウム合金の開発	自動車部品用Al-X-Sc合金の開発	革新5000合金 革新6000合金 を開発	○ 計画どおり目標達成	
超軽量フロントサイドメンバーの設計・試作	革新アルミニウム合金を用いた実証試作	実証試作により、 45%軽量化	○ 計画どおり目標達成	
軽量サイドシルインナーの設計・試作	革新アルミニウム合金を用いた実証試作	実証試作により 9%軽量化	○ 計画どおり目標達成	

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み（中間）／一部達成（事後）、×未達



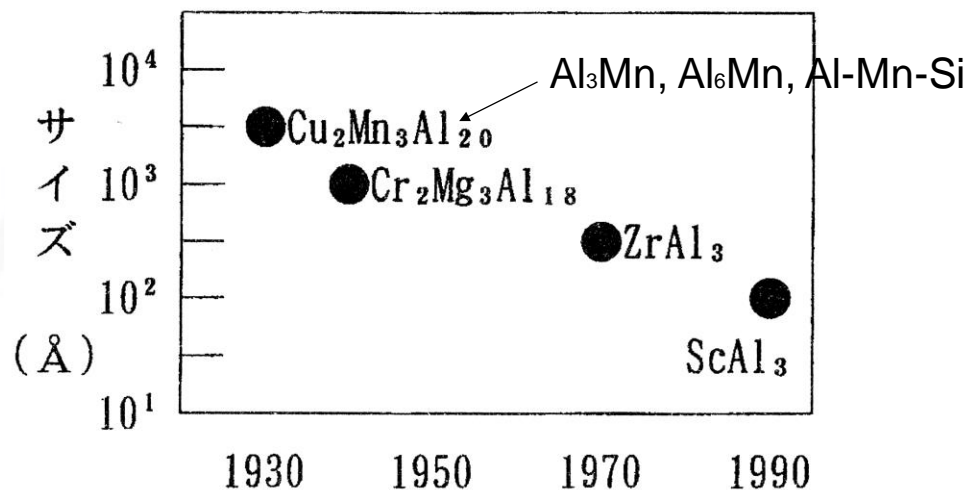
# 個別テーマの成果と意義

〈実証試作部品〉  
ベンチマーク実車から

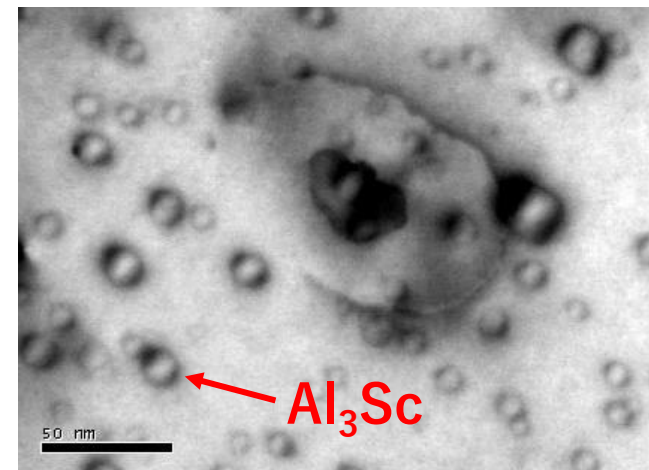


# 革新アルミニウム合金開発の成果と意義

## ● Scについて



アルミニウム合金の組織制御元素



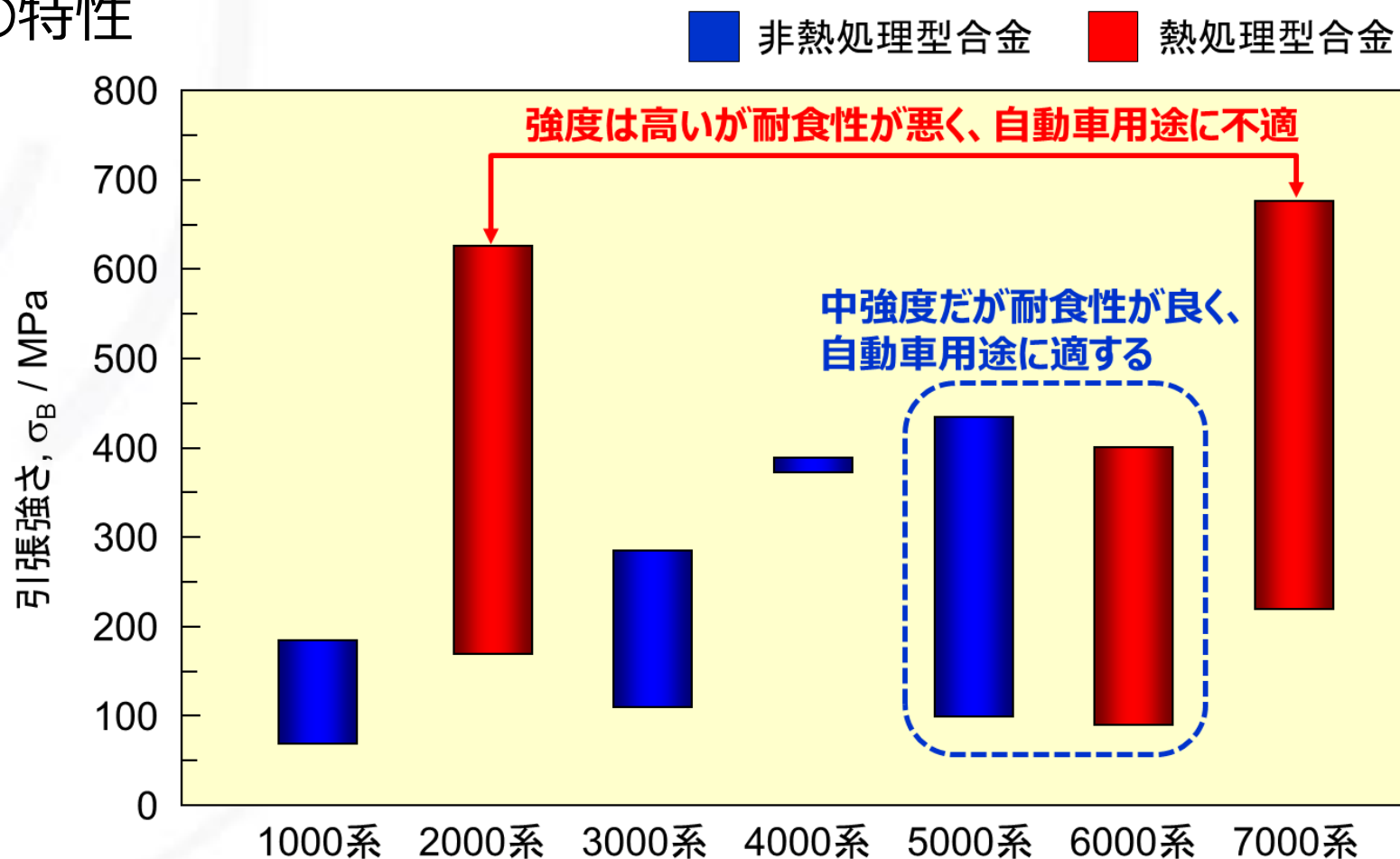
$\text{Al}_3\text{Sc}$ 分散粒子の例

再結晶抑制効果： $\text{Mn} < \text{Cr} < \text{Zr} < \text{Sc}$

Scは再結晶抑制効果に加え、析出強化（強度向上）にも働く  
 ⇒自動車用革新アルミニウム合金として、5000系、6000系ベースのAl-X-Sc合金を開発し、超軽量自動車部品への適用を進める。

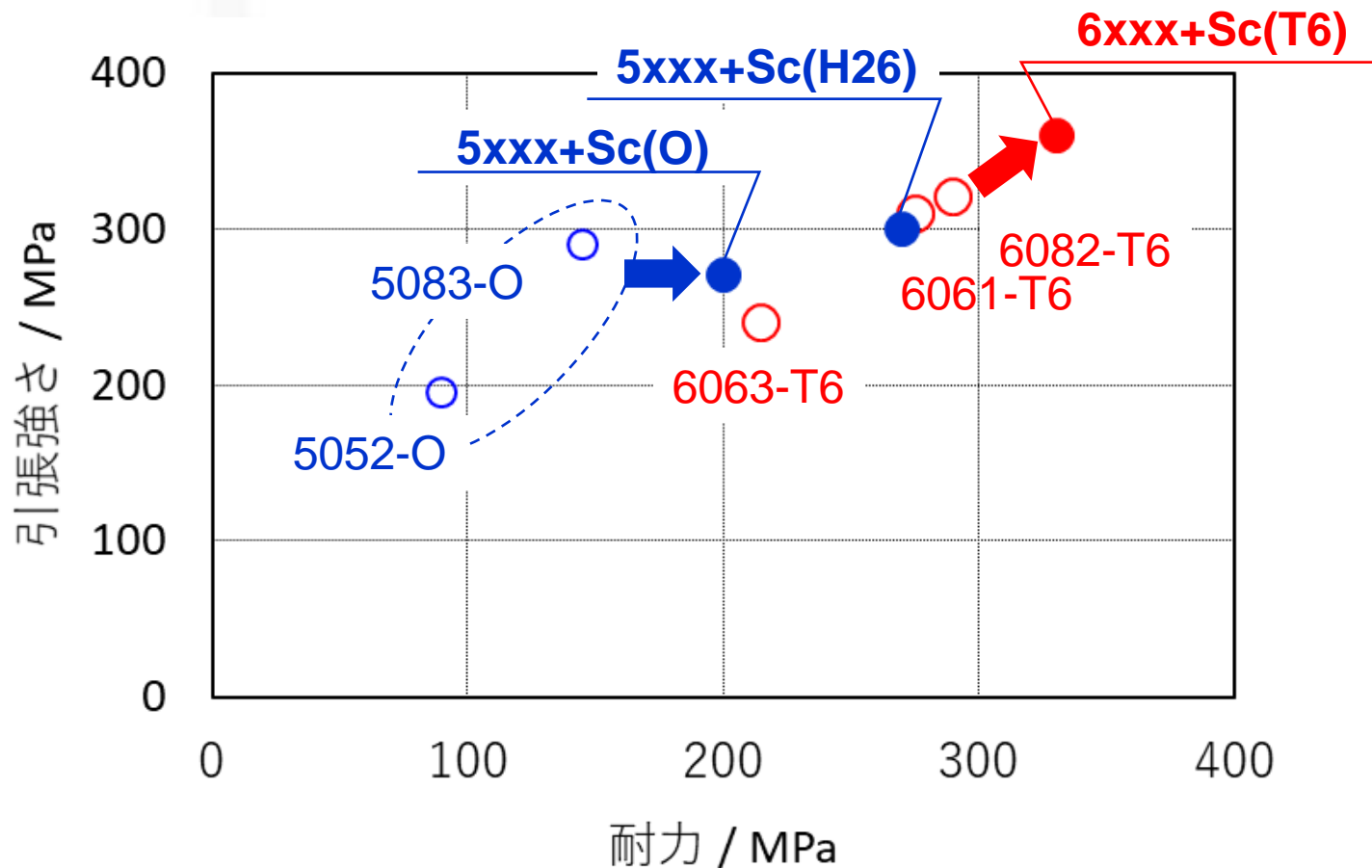
# 革新アルミニウム合金開発の成果と意義

## ● ターゲット合金の特性



アルミニウムハンドブックに記載の強度 (O, H, T調質を含む)

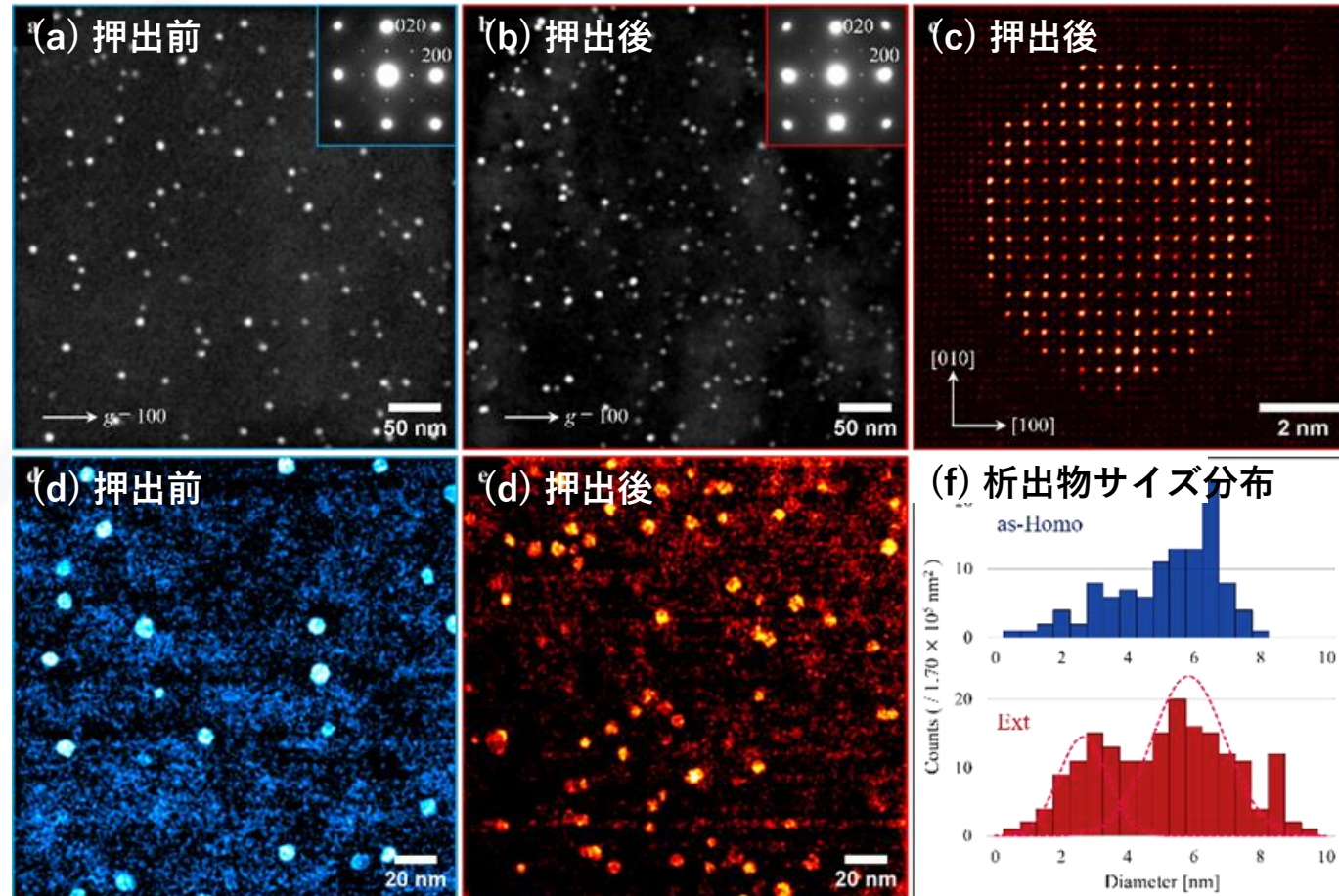
# 革新アルミニウム合金開発の成果と意義



代表合金の引張強さと耐力の関係

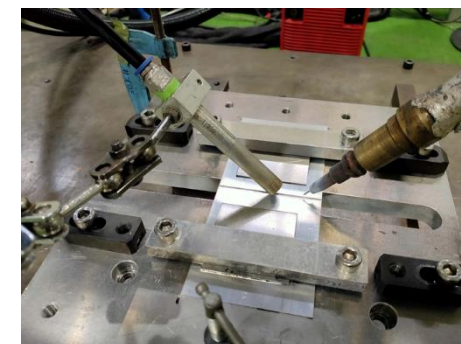
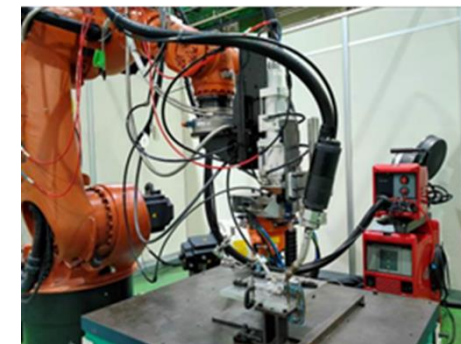
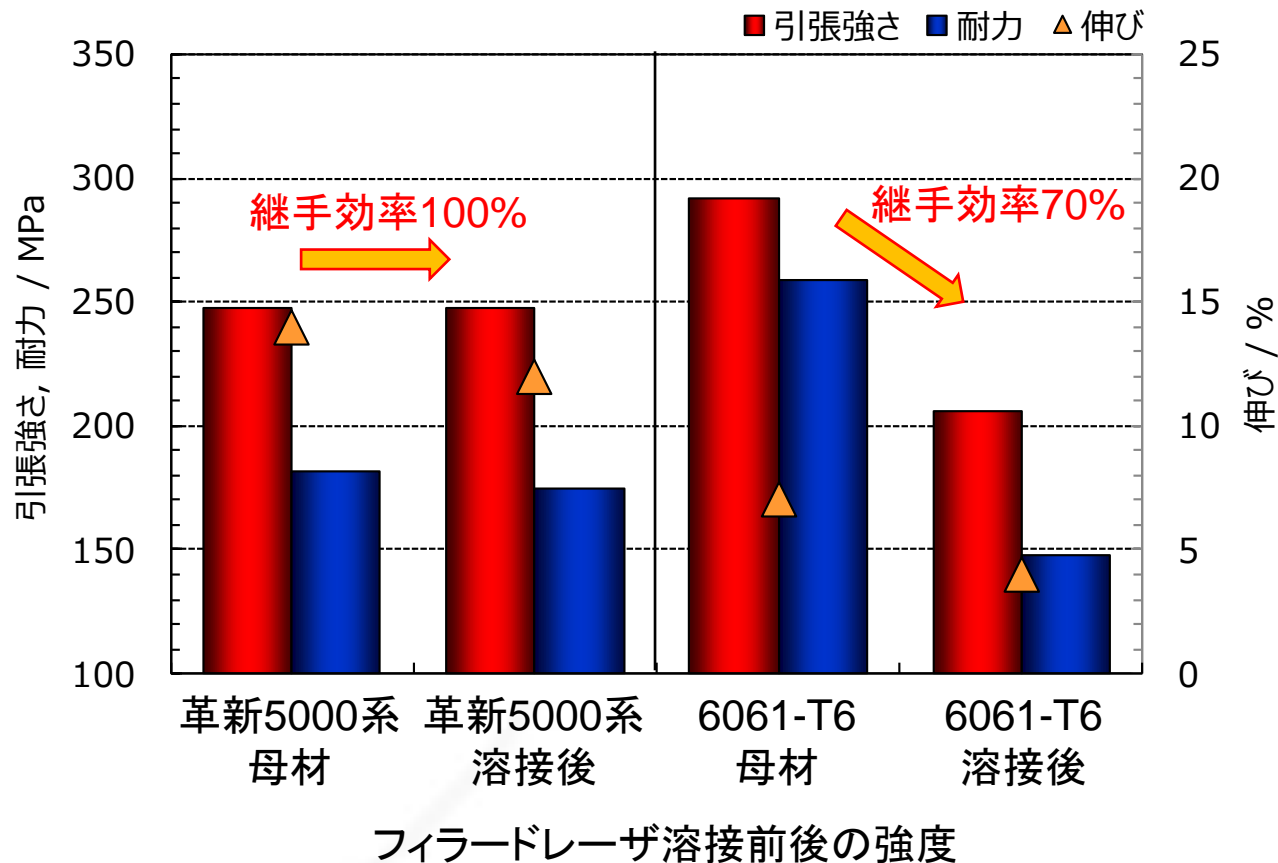
- ・スカンジウム(Sc)を添加した革新アルミニウム合金を開発
- ・5000系、6000系合金とも、従来合金よりも高強度化を達成

# 革新アルミニウム合金開発の成果と意義



革新5000系合金押出材の微細組織観察により、押出前の直径6nm程度の微細析出物に加え、押出後の直径3nm程度の微細析出物相による高強度化を確認

# 革新アルミニウム合金開発の成果と意義



・革新5000系合金(O材)は優れた溶接性(溶接継手効率)を有する

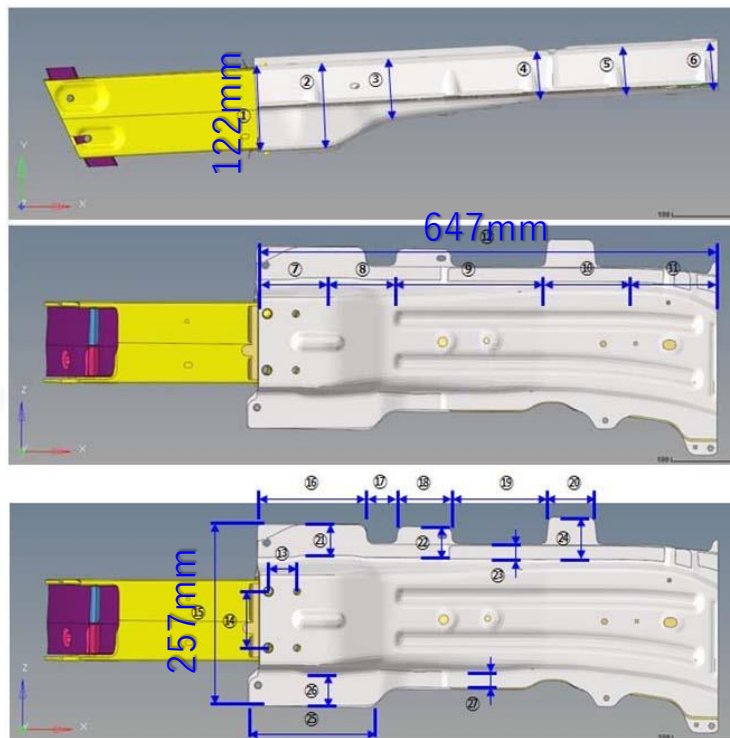
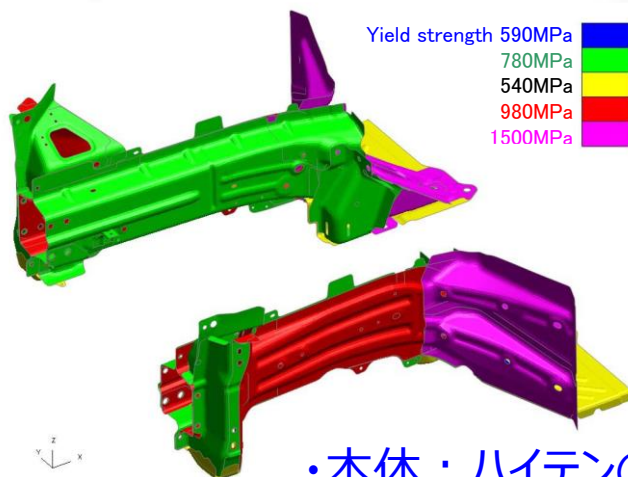
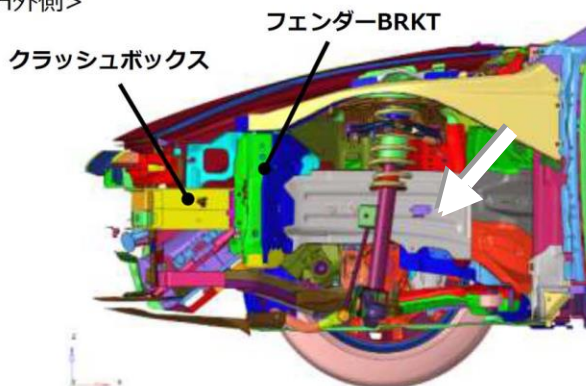
# 革新アルミニウム合金開発の成果と意義

	革新5000系合金 O材	革新5000系合金 H26材	革新6000系合金 T6材
引張強さ	270MPa	300MPa	360MPa
耐力	200MPa	270MPa	330MPa
伸び	16%	9%	14%
中空材押出	○	×	○
耐食性（一般）	○	○	○
耐SCC性	○	○	○
溶接性（継手効率）	90-100%	70-80%	67-70%
最適用途	中空構造体 (溶接あり)	板プレス品	中空構造体 (溶接なし)

# 超軽量フロントサイドメンバー設計・試作の成果と意義

## ● ベンチマーク実車部品 (オリジナル) の情報

<LH外側>



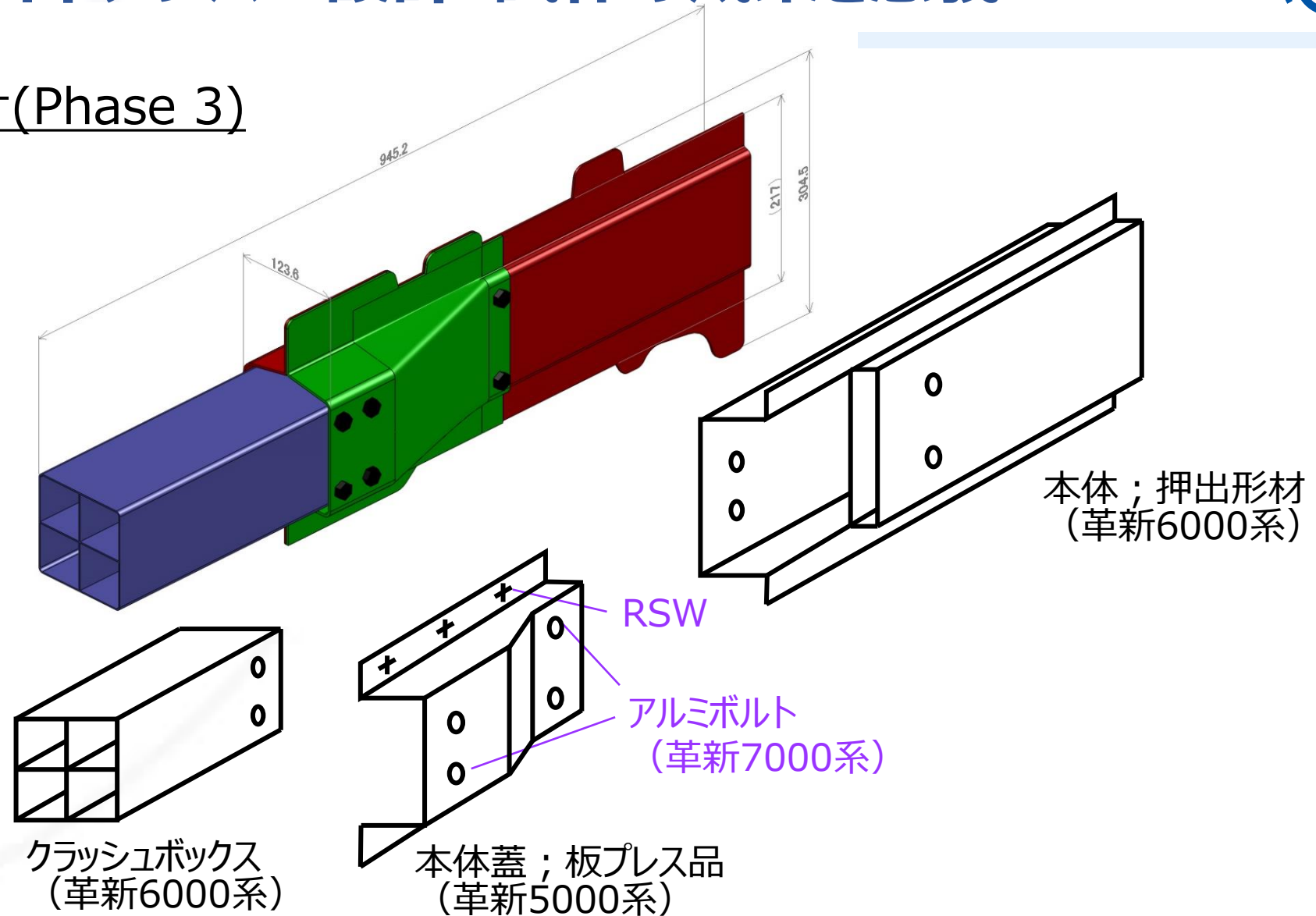
位置	寸法 [mm]	位置	寸法 [mm]
①	122	⑬	40
②	122	⑭	80
③	88	⑮	257
④	69	⑯	154
⑤	69	⑰	42
⑥	71	⑱	78
⑦	87	⑲	134
⑧	102	⑳	70
⑨	218	㉑	44
⑩	110	㉒	44
⑪	128	㉓	20
⑫	647	㉔	59
		㉕	180
		㉖	40
		㉗	18

- ・本体；ハイトンの板プレス品で構成
- ・クラッシュボックス；6000系一般材(引張強さ240MPa(推定値))



# 超軽量フロントサイドメンバー設計・試作の成果と意義

## ●革新アルミ化設計(Phase 3)



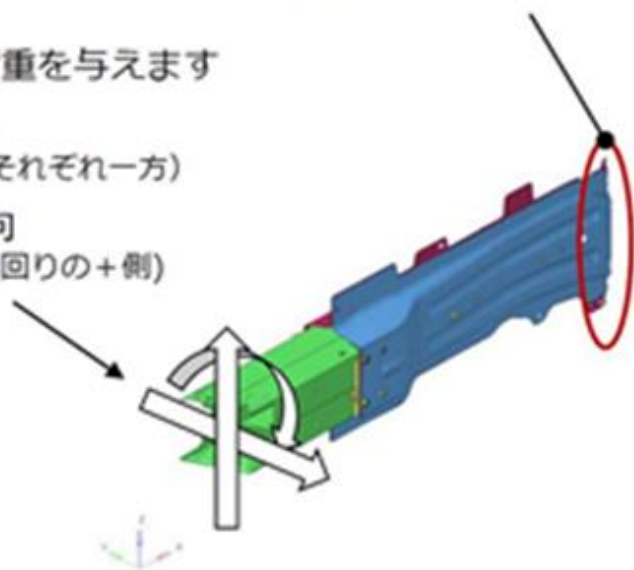
# 超軽量フロントサイドメンバー設計・試作の成果と意義

## ● 剛性解析

### 静解析

先端部に単位荷重を与えます

- ・ 曲げ×2方向  
(左右・上下のそれぞれ一方)
- ・ 捩じり×1方向  
(車両進行方向軸回りの+側)



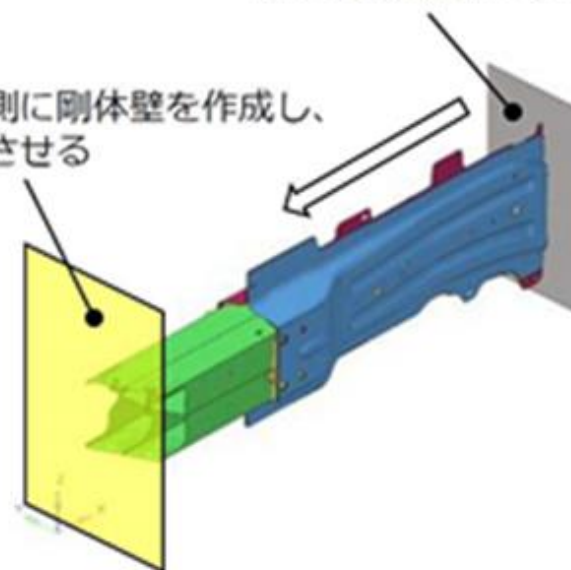
後端部の節点を完全拘束する

材料データは弾性とします。  
剛性を変位で、強度を応力で評価します。

### 衝突解析

後端側に剛体壁を作成し、  
初速55km/hを与える

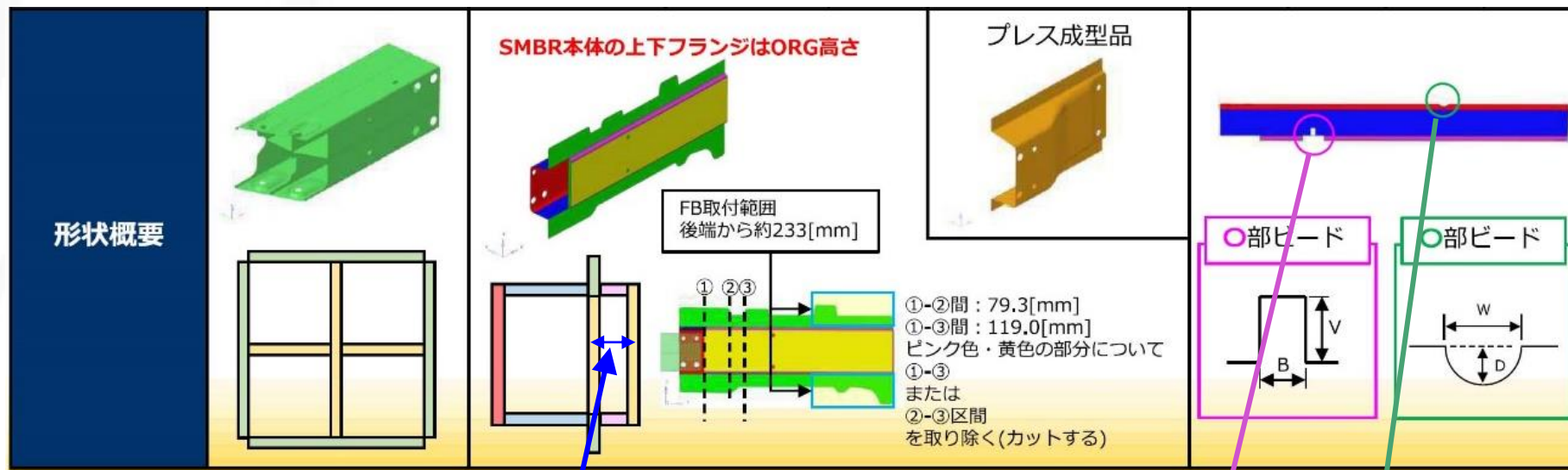
先端側に剛体壁を作成し、  
衝突させる



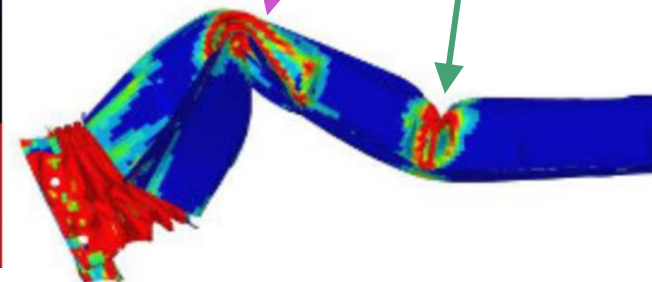
材料データはひずみ速度依存無しの  
弾塑性とします。  
変形のモード、最大荷重、荷重-変位履歴を  
指標として評価します。

# 超軽量フロントサイドメンバー設計・試作の成果と意義

## ● 衝突解析



モデル名	CBOX	SMBR本体			SMBR蓋	前ビード		後ろ	
	板厚	板厚	カット範囲	小空間幅		横(B)	縦(V)	幅(W)	深さ(D)
ORG	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-
6000B_M10	1.6	2.7	②-③	7.0	2.9	10.0	15.0	20.0	6.0
6000B_M11 (φ220)	1.6	2.7	②-③	7.0	2.9	10.0	15.0	20.0	6.2
6000B_M11_OA (φ220)	1.6	2.7	②-③	15.0	2.9	10.0	15.0	20.0	6.2
6000B_M11_OB (φ220)	1.6	2.7	②-③	20.0	2.9	10.0	15.0	20.0	6.2

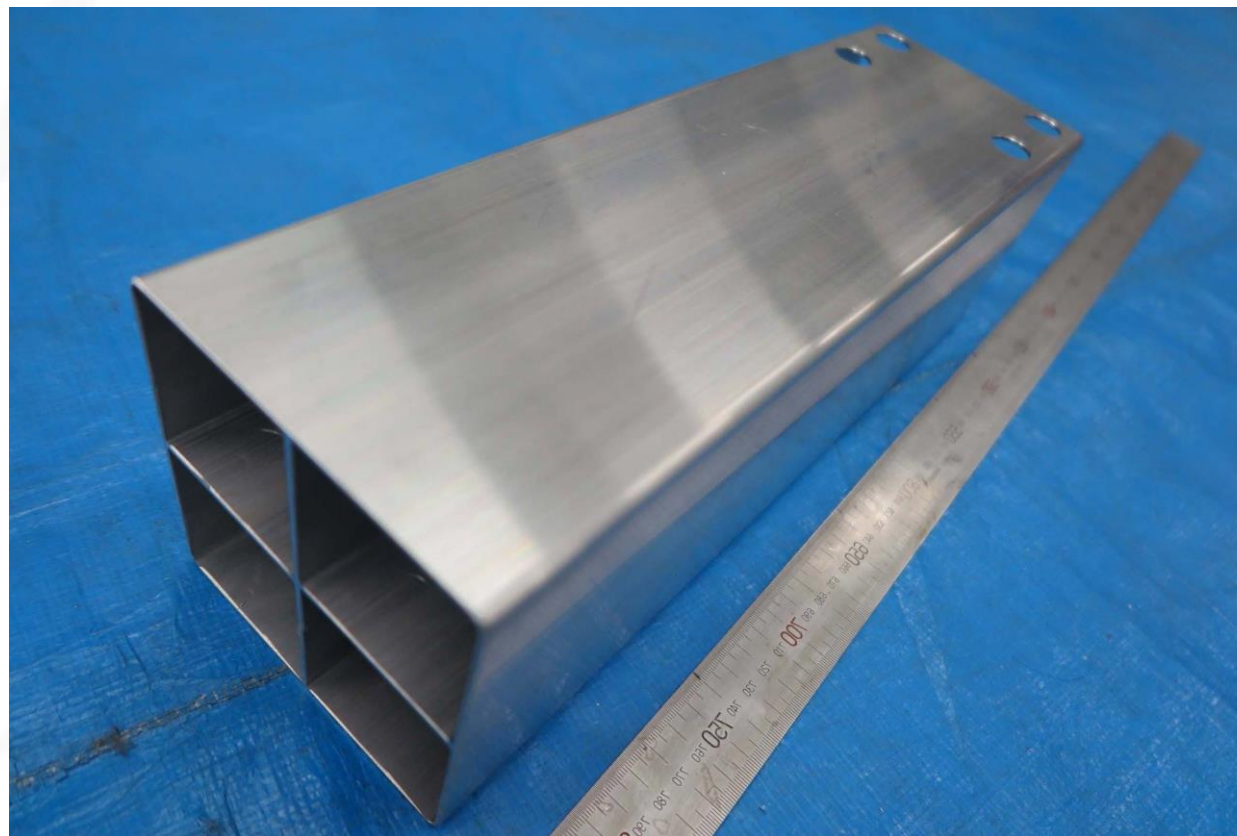


厚さ分布の調整により、曲げ剛性と衝突エネルギー吸収特性を調整し、さらにビード形状により、折れモードを調整

# 超軽量フロントサイドメンバー設計・試作の成果と意義

## ● 試作部品(クラッシュボックス)

合金	引張強さ(MPa)	耐力(MPa)	破断伸び(%)
革新6000系合金	360	320	13



# 超軽量フロントサイドメンバー設計・試作の成果と意義

## ● 試作部品(蓋)

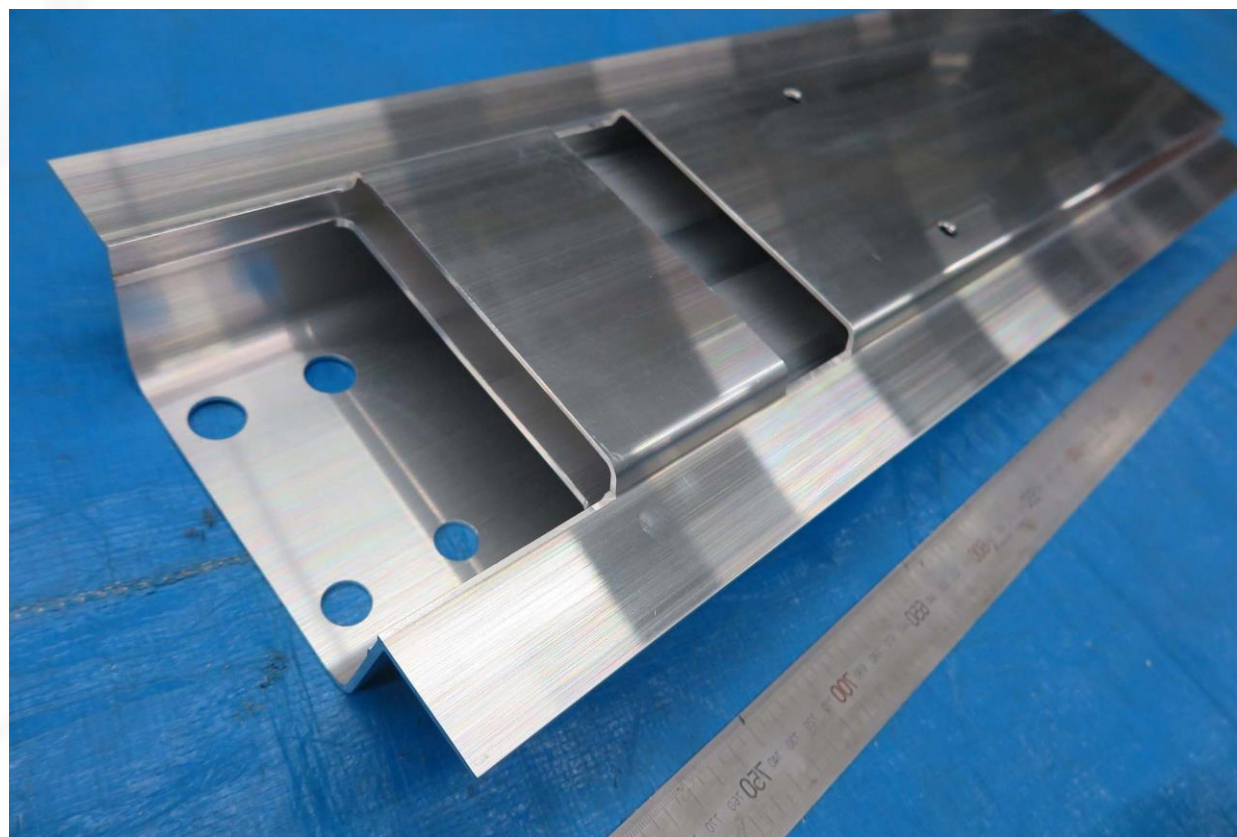
合金	引張強さ(MPa)	耐力(MPa)	破断伸び(%)
革新5000系合金	310	290	6



# 超軽量フロントサイドメンバー設計・試作の成果と意義

## ● 試作部品(本体)

合金	引張強さ(MPa)	耐力(MPa)	破断伸び(%)
革新6000系合金	360	320	13



# 超軽量フロントサイドメンバー設計・試作の成果と意義

## ● 試作部品(ボルト・ナット)

合金	引張強さ(MPa)	耐力(MPa)	破断伸び(%)
革新7000系合金	760	730	10



# 超軽量フロントサイドメンバー設計・試作の成果と意義

## ● 試作結果

**ベンチマーク実車部品（オリジナル）に対して45%の軽量化を達成**

部品	オリジナル重量	革新設計重量	オリジナル比
①クラッシュボックス	1.08kg	0.86kg	80.2%
②サイドメンバー本体	6.77kg	3.48kg	51.4%
①+②	7.85kg	4.34kg	55.4%

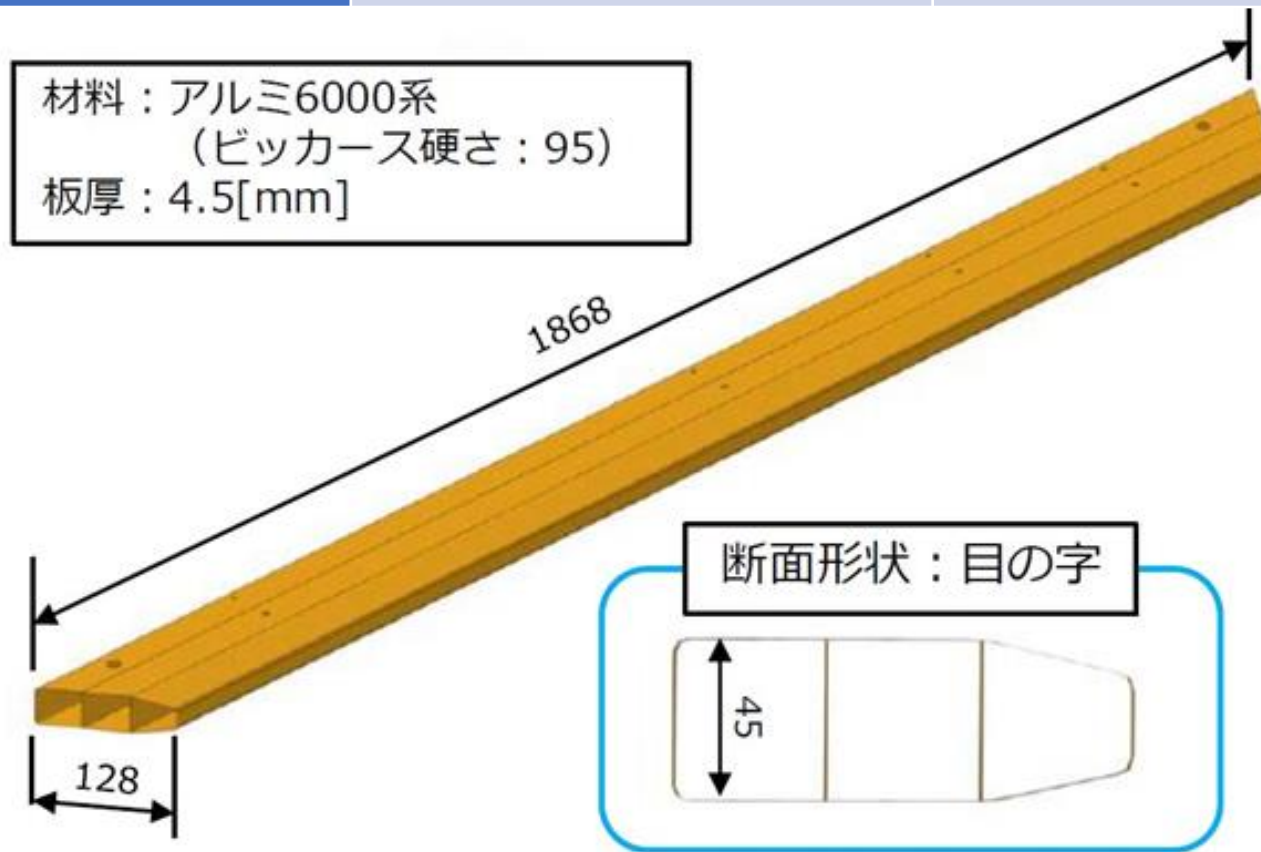




# 軽量サイドシルインナー設計・試作の成果と意義

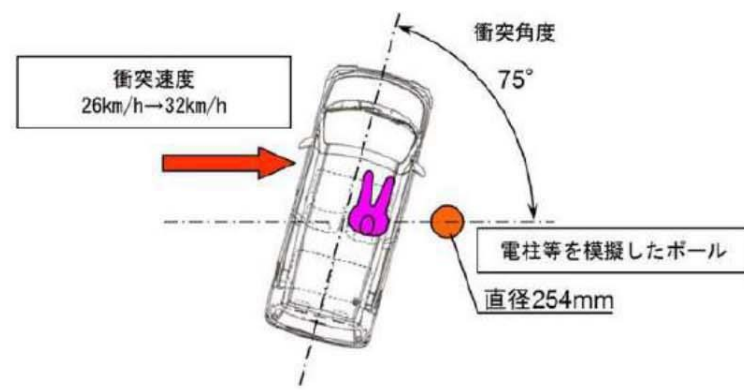
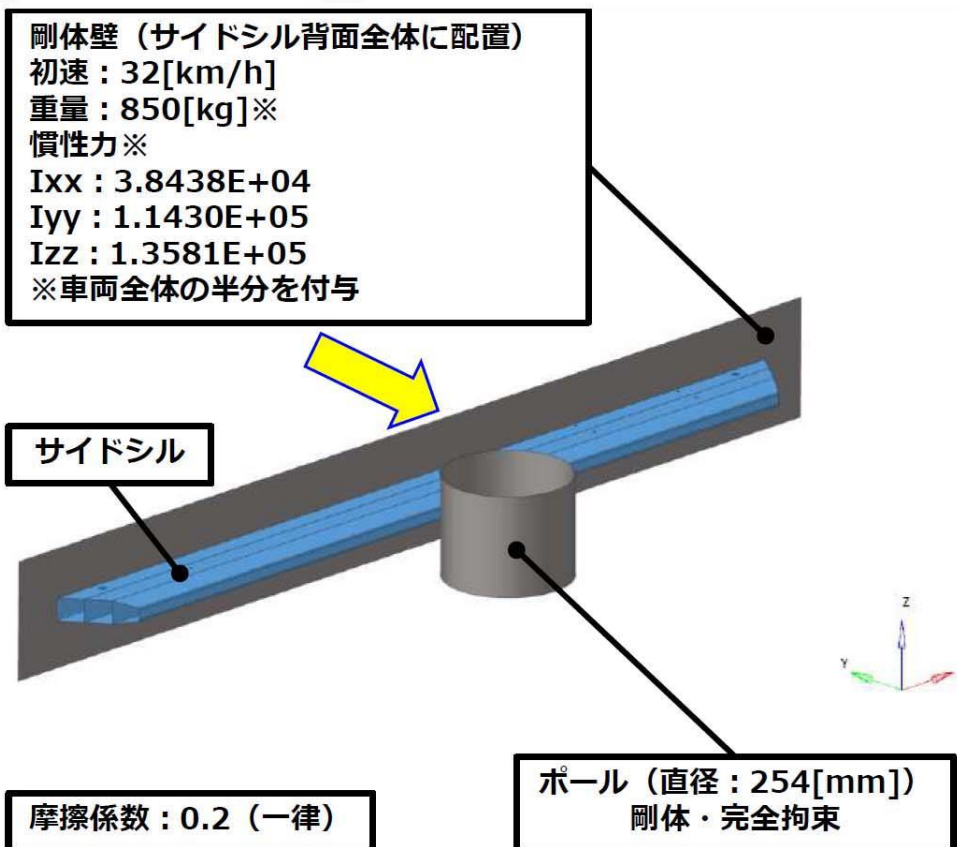
● ベンチマーク実車部品（オリジナル）の情報

硬さ（測定値）	引張強さ（推定値）	耐力（推定値）
HV95	285MPa	255MPa



# 軽量サイドシルインナー設計・試作の成果と意義

## ● 解析条件



上記ボール側突試験条件を参考に  
 ・押し子（ボール模擬）の直径  
 ・押し子の初速  
 に関する、解析条件を決定した。

参考：  
<http://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.milt.go.jp%2Fcommon%2F001110821.pdf&cLen=181371&chunk=true>

各材質に対してボール側突の荷重履歴がオリジナルと同等になる板厚分布を調査

# 軽量サイドシルインナー設計・試作の成果と意義

## ● 試作結果

ベンチマーク実車部品（オリジナル）に対して9%の軽量化を達成

	材質	重量	オリジナル比
オリジナル	6000系-T6	8.95kg	100%
革新設計	革新6000系-T6	8.15kg	91%



# 個別テーマの成果と意義

本研究の革新アルミニウム合金に用いたスカンジウムは、現時点では高価であるが、オーストラリアのNi,Co鉱山での副産物としての採掘が始まっており、今後の低価格化によって革新アルミニウム合金の実用化を進める予定である。また革新5000系合金(O材)は優れた溶接継手効率を有することから、自動車以外にも鉄道車両などの溶接構造材への実用化が期待できる。

さらに本試作における革新アルミニウム合金を用いた部品設計では、中空押出材を用いた設計指針を確立できたことから、今後のアルミニウム合金製自動車部品設計に活かすことができ、アルミニウム合金部品の拡大によってCO<sub>2</sub>の削減効果が期待できる。

## 資料 6 – 6

# 「革新的新構造材料等研究開発」(終了時評価)

2014年度～2022年度 9年間

## プロジェクトの詳細 (公開版)

### 6.6 接合技術拠点の構築

「摩擦接合共通基盤研究」(テーマ番号46)

「大阪大学接合技術拠点」(テーマ番号42-3)

実施者：大阪大学 接合科学研究所 教授 藤井 英俊

2023年 4月21日

国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

材料・ナノテクノロジー部

# テーマ毎の目標と根拠

研究開発テーマ	最終目標	根拠
摩擦接合共通基盤研究 (テーマ番号46)	(a) 重ね摩擦接合技術開発 接合強度：厚み1.4 mm、強度1.5 GPa以上の中高炭素鋼で、引張せん断試験で母材強度の <b>80 %以上</b> 、またはスポット接合のJIS-A 級 (JIS Z3140:2017) の引張せん断荷重平均値以上、十字引張荷重平均値以上  (b) 突合せ摩擦接合技術開発 接合強度：厚み2 mm、強度1.5 GPa以上の中高炭素鋼で、母材強度の <b>80 %以上</b>	継手強度の評価基準として、JIS規格相当を採用
大阪大学接合技術拠点 (テーマ番号42-3)	<b>協働研究所・共同研究講座</b> の設置および <b>フォロー窓口</b> の設置	本プロジェクト終了後においても継続的に接合技術の発展に寄与することを目的とした。

# テーマ毎の目標達成状況

研究開発テーマ	目標 (2023年2月)	成果 (2023年2月)	計画との差異	今後の課題と 解決方針
摩擦接合 共通基盤研究 (テーマ番号 46)	<p>(a) 重ね摩擦接合技術開発 接合強度：厚み1.4 mm、強度1.5 GPa 以上の中高炭素鋼で、引張せん断試験で 母材強度の80 %以上、またはスポット接合 のJIS-A 級 (JIS Z3140:2017) の引張 せん断荷重平均値以上、十字引張荷重平 均値以上</p> <p>(b) 突合せ摩擦接合技術開発 接合強度：厚み2 mm、強度1.5 GPa以 上の中高炭素鋼で、母材強度の80 %以 上</p>	<p>(a) 重ね摩擦接合技術開発 中高炭素鋼板の重ね摩擦接合継手において、 Si、Mn添加量が高く焼戻し軟化抵抗の高い 1.5 GPa級中高炭素鋼板を母材とし、適切な 条件での重ね摩擦撈拌接合を施した後、塗装 焼付相当の熱処理を施すことで、母材強度の <b>95 %</b>まで改善できることを実証した。</p> <p>(b) 突合せ摩擦接合技術開発 焼戻し軟化抵抗を示すCr-Mo成分系の1.5 GPa材により、接合速度向上により冷却速度を 制御することで継手強度を向上し、継手効率 <b>90 %以上</b>を達成した。</p>	<p>◎</p> <p>目標に対する成果以外に、 <b>多くの我が国発、世界初 の新規接合法</b> (シーズ) を開発し、特許権利化も 継続的に進めていることか ら、目標を大きく上回って 達成と評価</p>	<p>本プロジェクト 終了後も、積 極的に企業と も連携を深め ていくことで我 が国の技術的 優位性を活か した実用化・ 事業化を進め ていく。</p>
大阪大学 接合技術拠点 (テーマ番号 42-3)	協働研究所・共同研究講座の設置および フォロー窓口の設置	協働研究所、共同研究部門・講座をそれぞれ 設置するとともに、大学発ベンチャーを立ち上げた。 フォロー窓口として拠点HPを立ち上げ運用し、 複数の共同研究を実現した。	<p>◎</p> <p>本プロジェクト終了後も、 <b>接合技術拠点</b>として継続 的に機能できる枠組みが 形成されたため、目標を大 きく上回って達成と評価</p>	

◎ 大きく上回って達成、○達成、△達成見込み (中間) / 一部達成 (事後)、×未達

# 摩擦接合技術開発体制の変遷

METI			NEDO						
2013年度	2014年度	2015年度	2016年度	2017年度	2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度

テーマ2：残留γ相制御中高炭素鋼板の接合技術の開発／革新的FSW技術の探索（神戸製鋼所分室）

テーマ3：中炭素鋼の革新的接合技術の開発／摩擦攪拌接合プロセスの開発（新日鐵住金分室）

テーマ4：中高炭素鋼板のPHMによる実用FSW技術の開発  
X線透過装置を用いた鋼板FSWの塑性流動基礎解析（JFEスチール分室）

大阪大学接合科学研究所に摩擦接合の拠点形成、高炉3社連携・統合し新たなテーマを立ち上げ

**テーマ46：中高炭素鋼/中高炭素鋼の摩擦接合共通基盤研究（ISMA・鉄鋼各社分室）**

- ① フラット摩擦攪拌接合法の開発
- ② 線形摩擦攪拌接合法の開発
- ③ X線透過装置を用いた摩擦攪拌接合の塑性流動基礎解析
- ④ 継手特性に及ぼす金属組織の影響解明
- ⑤ ツール設計によるFSW特性向上技術の基礎検討
- ⑥ 溶接残留応力の影響解明
- ⑦ 摩擦攪拌接合の数値解析技術の開発
- ⑧ マルチマテリアルの摩擦接合

**我が国発、世界初の新規接合法**

- ・両面複動式(フラット)摩擦攪拌接合法
- ・低温線形摩擦接合法、センター駆動両面LFW法
- ・大荷重低温FSSW（HAZレス接合）

摩擦接合拠点を継続しつつ、阪大が**分担研・分室**となり、高炉3社とともに研究を**充実**

**テーマ46：摩擦接合共通基盤研究**

- 1) 新規接合法の開発、マルチマテリアルの摩擦接合法の開発
- 2) 摩擦接合の可視化、一般化、共通化
- 3) LFWを用いた技術実証
- 4) 接合技術の拠点形成

**テーマ42-3：大阪大学接合技術拠点**

摩擦接合の拠点





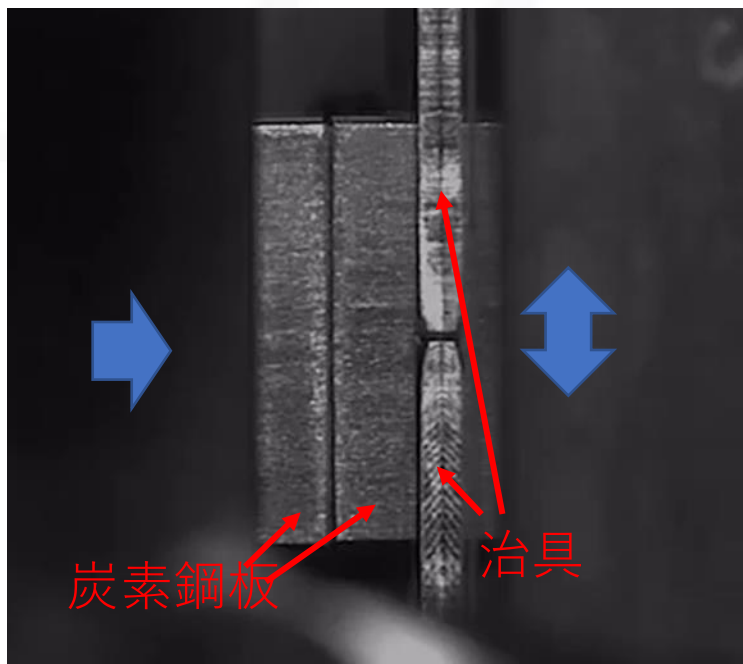
# 我が国発、世界初の新規接合法の開発

## ○低温線形摩擦接合(LFW)法の開発(阪大、日本製鉄)：

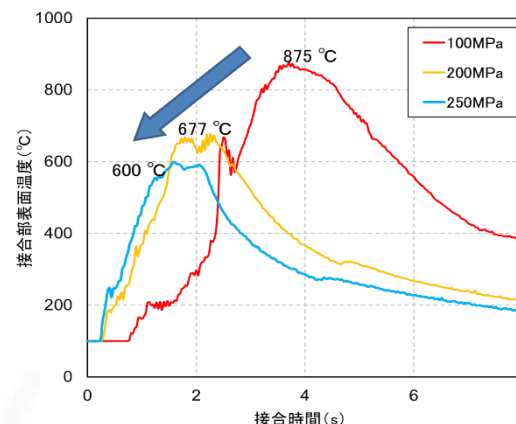
### 線形摩擦接合 (Linear Friction Welding: LFW)

材料同士を**押し付け**、**線形運動**で**擦りあわせた**際に生じる摩擦熱を熱源とした接合法

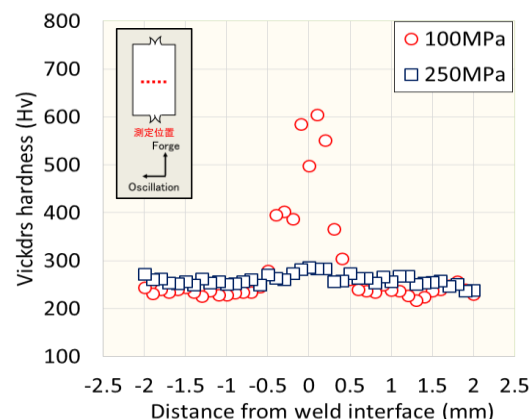
1/20スロー再生



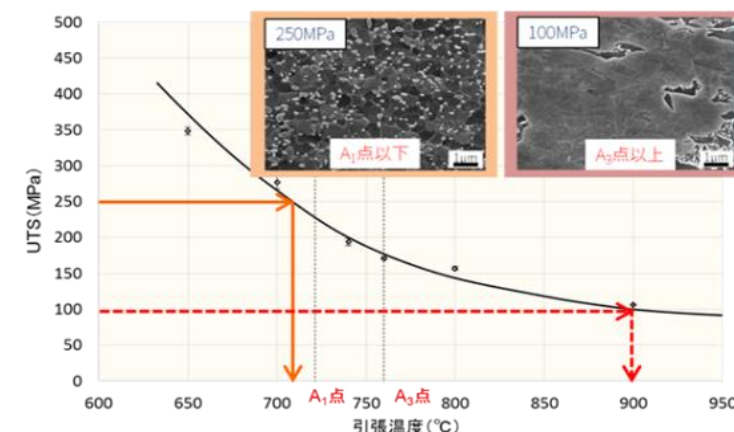
LFWの接合時の映像 (動画)



LFW接合部温度の時間変化



LFW継手のビッカース硬さ



母材(S45C)の強度の温度依存性とLFW接合部組織の関係

・線形摩擦接合(LFW)において、**印加圧力**により接合温度を制御できることを明らかにするとともに、高炭素鋼のLFW継手において、変態温度(A<sub>1</sub>点)以下の**低温で接合**することに成功した。この時、接合部硬さが母材とほぼ同等な継手作製に成功し、シームレス接合と命名。(日、米、中、韓で特許権利化済、欧州は審査中、論文済み)

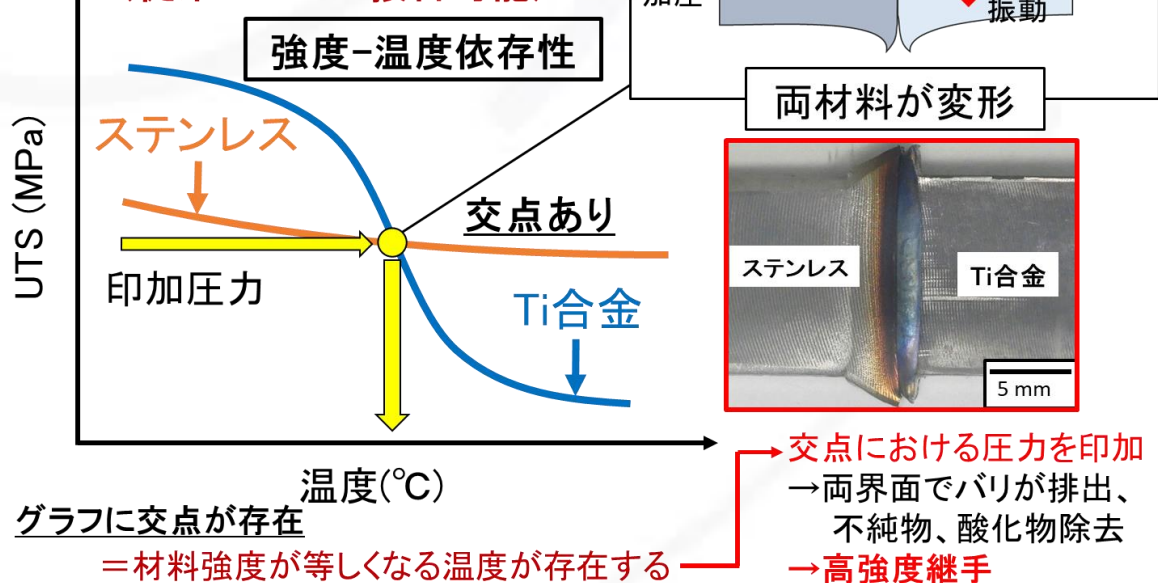
# 異材接合のための我が国発、世界初の新規接合法の開発

## ○センター駆動両面LFW法の開発：

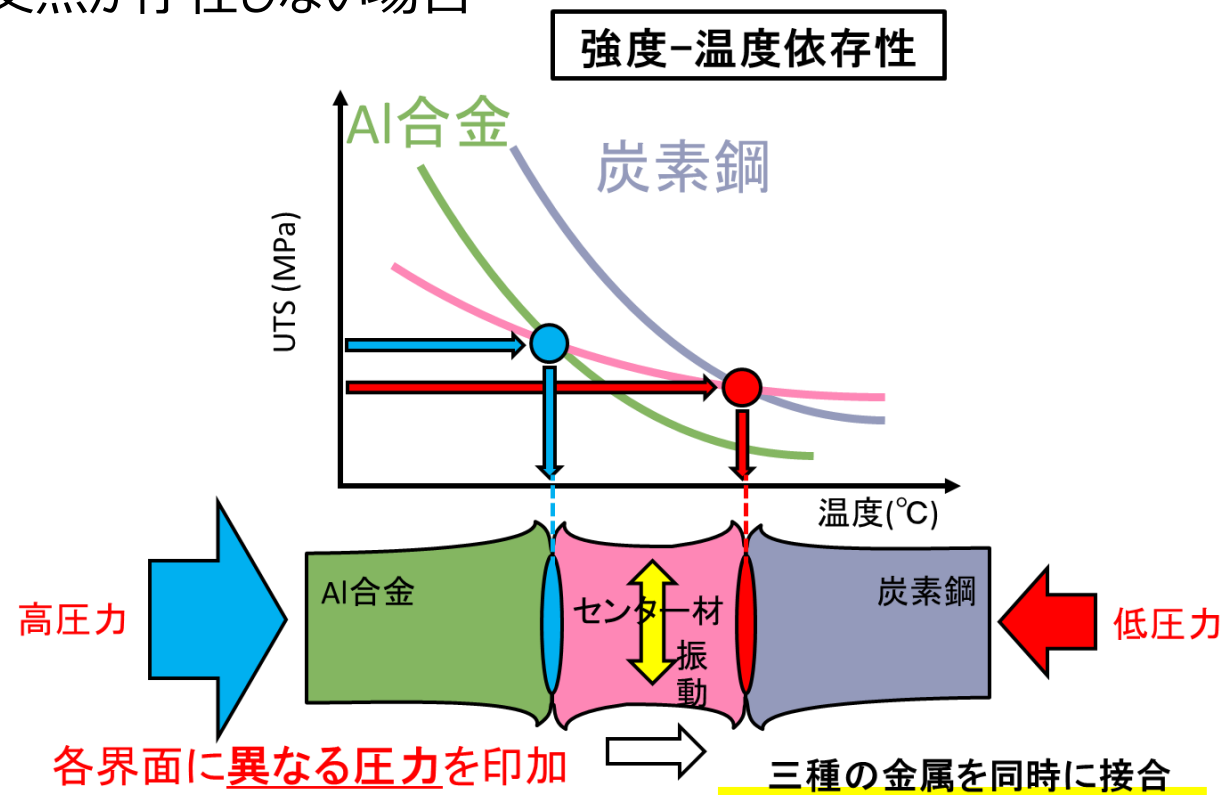
### 交点が存在する場合

接合可能なものと困難なものが存在する

例1：Ti合金とステンレス鋼  
(従来のLFWで接合可能)



### 交点が存在しない場合



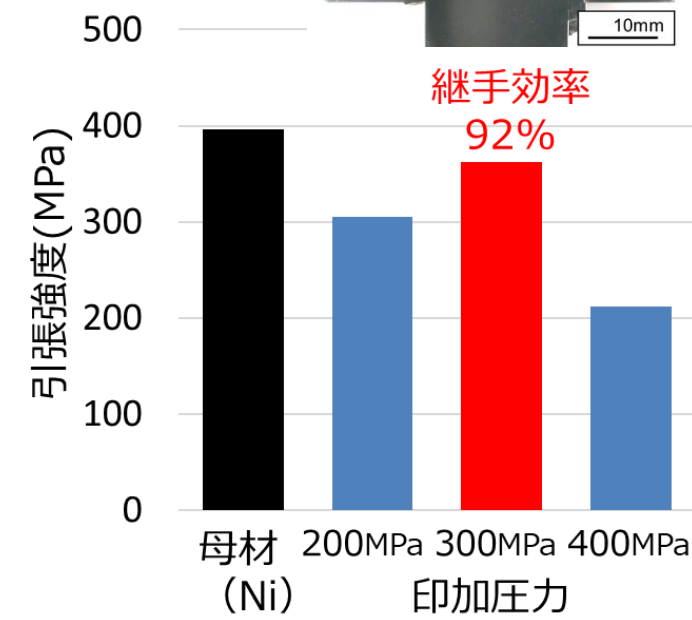
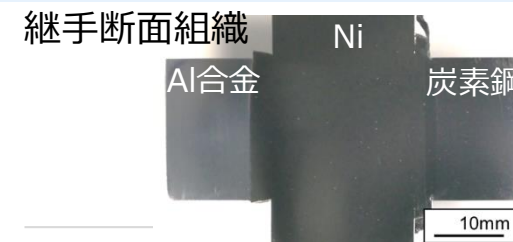
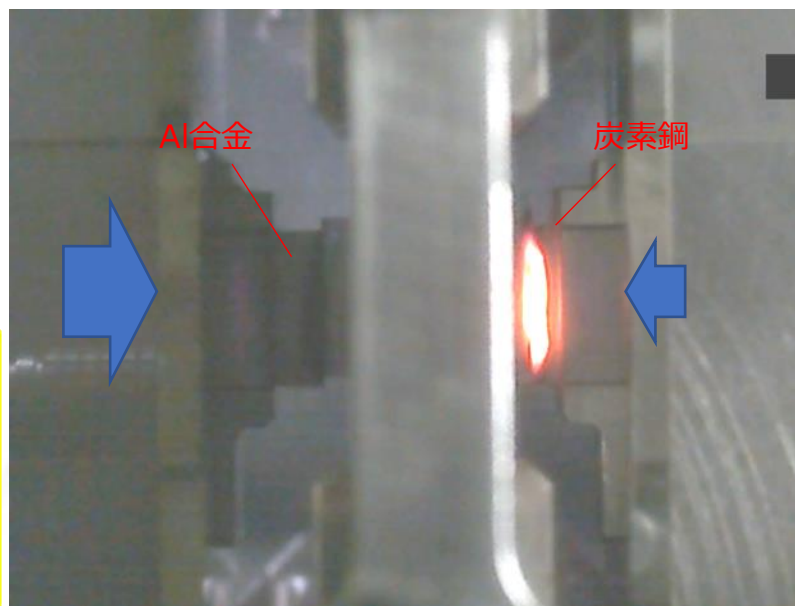
# 異材接合のための我が国発、世界初の新規接合法の開発

## ○センター駆動両面LFW法の開発：

装置外観



接合時の映像 (動画)

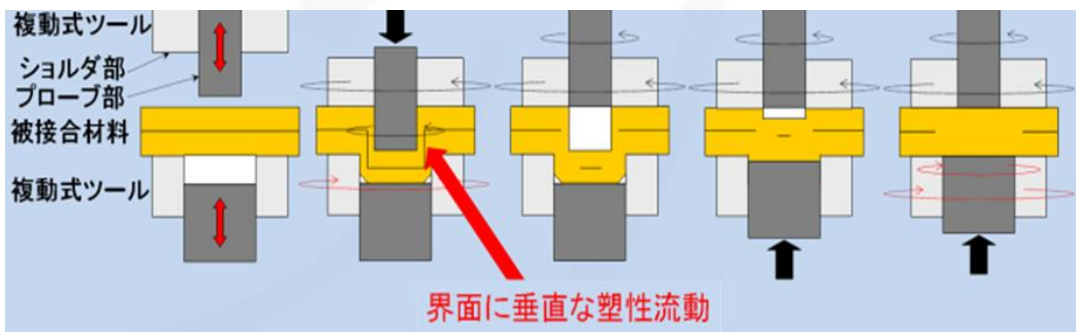


印加圧力300 MPaの条件で最高強度363 MPaを得た(継手効率92%)

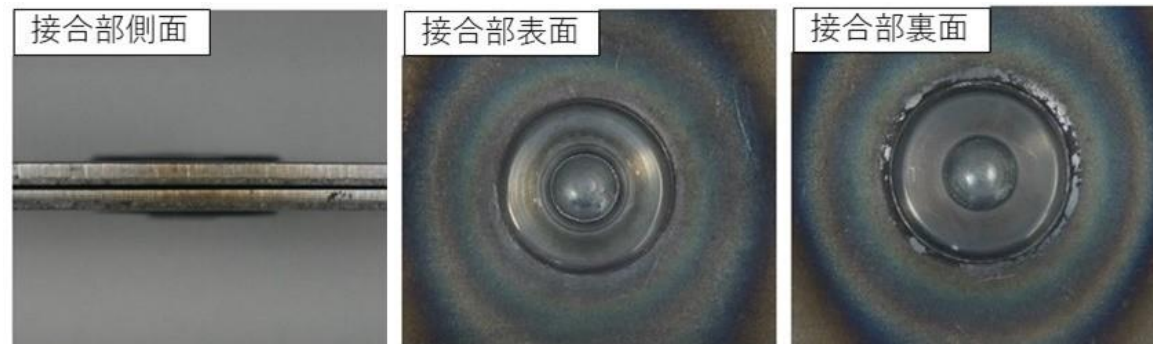
国内外に特許出願済み、論文済み

# 我が国発、世界初の新規接合法の開発

○両面複動式(フラット)摩擦攪拌接合法の開発：



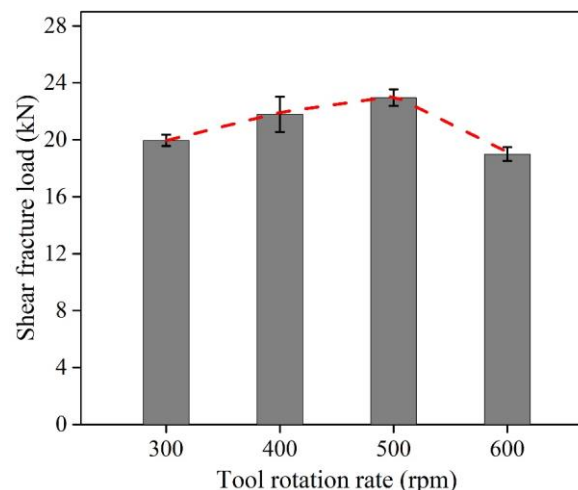
フラットFSWの模式図



鋼フラットFSSW継手の接合部外観



フラットFSW装置外観



継手のせん断引張強さ

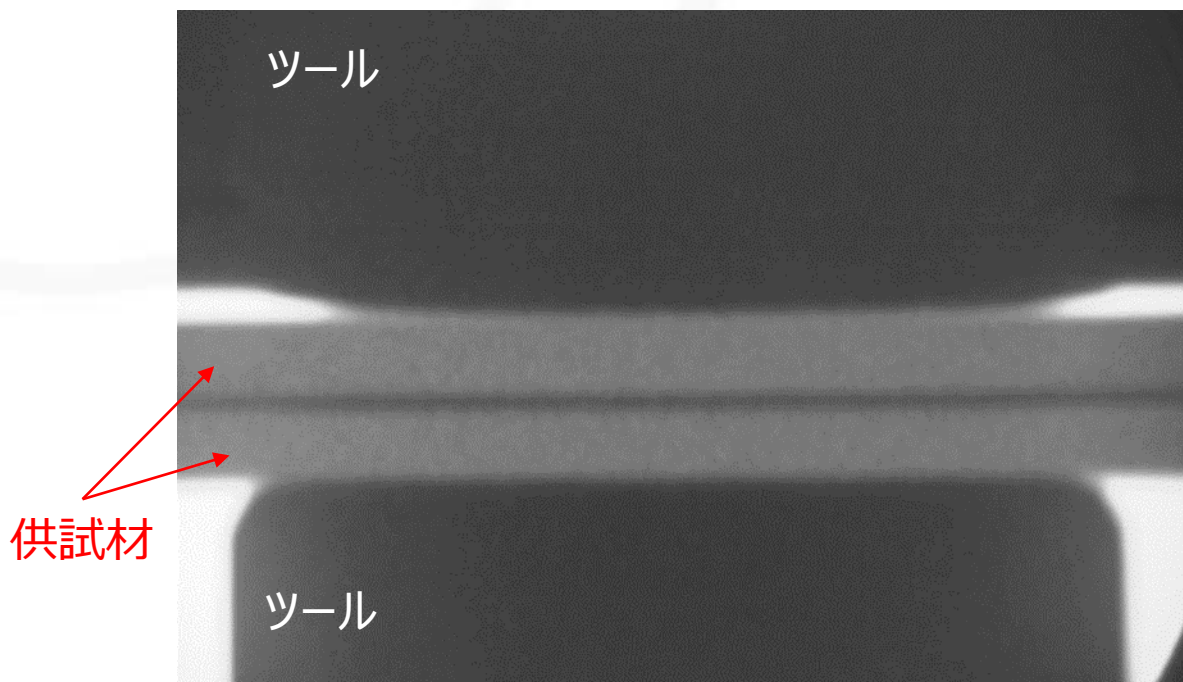
- ・凹部のない無欠陥の**フラットFSSW接合部**を得ることに成功。
- ・継手強度は接合端部の組織に影響される。

国内外に特許出願済み、  
論文済み

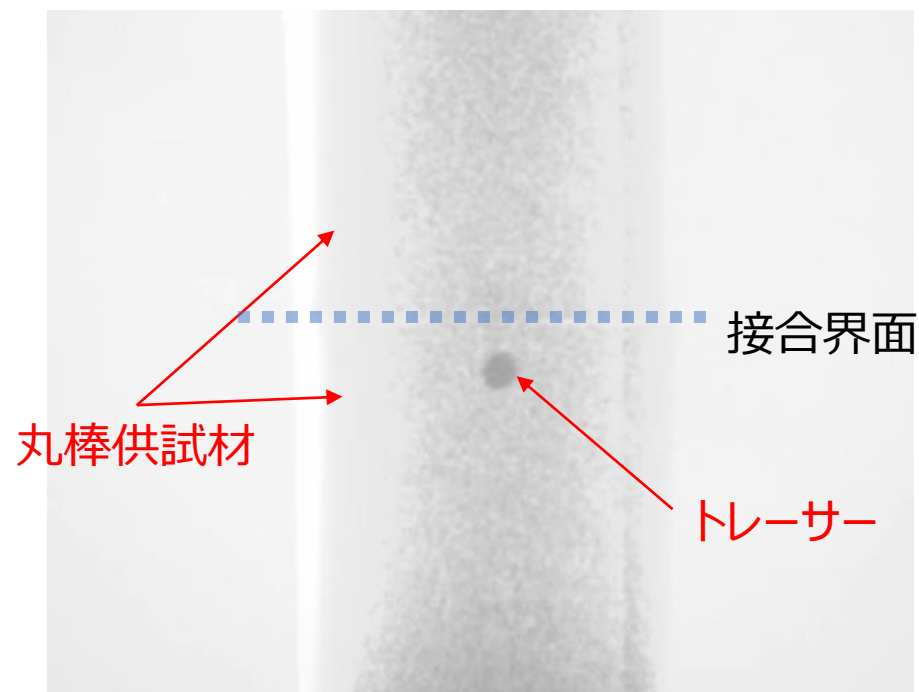
# 摩擦接合の可視化

○フラットFSW装置+X線透過装置を用いた接合現象解明(阪大、JFEスチール)

## フラットFSSW (動画)



## FW(摩擦圧接)への展開

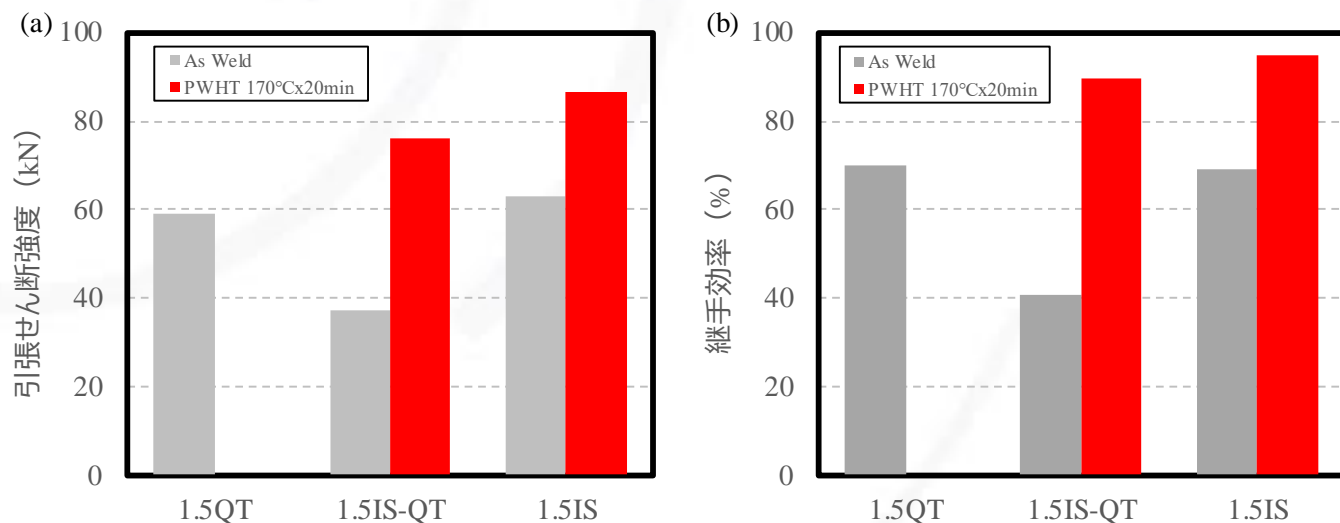


・フラットFSSWの接合界面形成機構の**三次元可視化**に成功し、継手強度の支配因子である接合部有効板厚の制御指針を明示。(論文済み)

# 1.5 GPa鋼材で継手効率90 %以上を達成

○重ね・突合せ摩擦接合継手の接合強度（神鋼、JFEスチール）

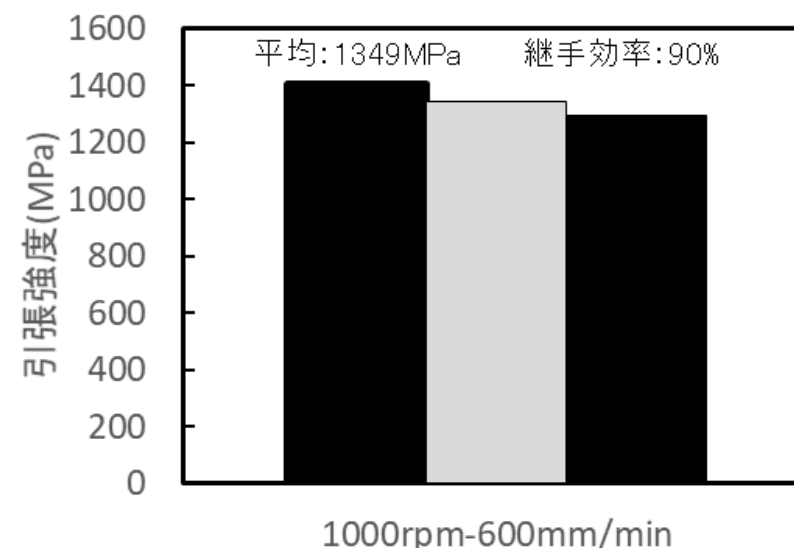
## 重ね摩擦接合



重ね摩擦接合継手の(a)引張せん断強度、(b)継手効率に及ぼす素材の影響：  
1.5QT(S45C 調質材), 1.5IS-QT(革新鋼板組成-調質材), 1.5IS(革新鋼板)

Si、Mn添加量が高く焼戻し軟化抵抗の高い1.5 GPa級鋼板を母材とし、適切な条件での重ね摩擦撈拌接合を施した後、塗装焼付相当の熱処理を施すことで、**母材強度の95 %を達成**

## 突合せ摩擦接合



突合せ摩擦接合継手の引張強度：供試鋼SCM・回転数1000rpm-接合速度600mm/min

焼戻し軟化抵抗を示すCr-Mo成分系の1.5 GPa級鋼板を母材とし、接合速度向上により冷却速度を制御することで継手強度を向上し、**継手効率90 %以上を達成**

# 接合技術拠点の設立

## 接合技術拠点での3つの大きな活動と目的

### プロセス：(テーマ46：藤井)

- ・我が国発、世界初の新規接合法（シーズ）の開発
- ・接合メカニズムの解明、理解の深化
- ・接合分野でのグループ形成

### 評価・解析：(テーマ64：廣瀬)

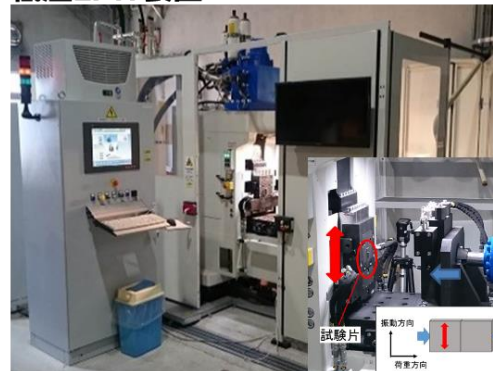
- ・継手特性評価、その場観察による現象解析
- ・シミュレーション技術構築

### データベース構築(テーマ64-B：芹澤)

- ・ISMAが共有するプロセス、データの集約、高度化

## ISMAが共有する装置を用いた技術開発

低温LFW装置



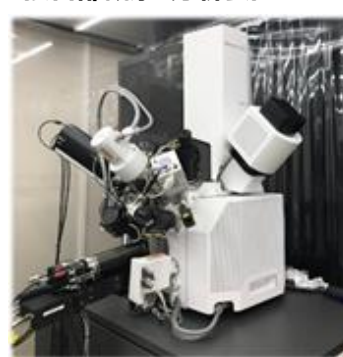
センター駆動両面LFW装置



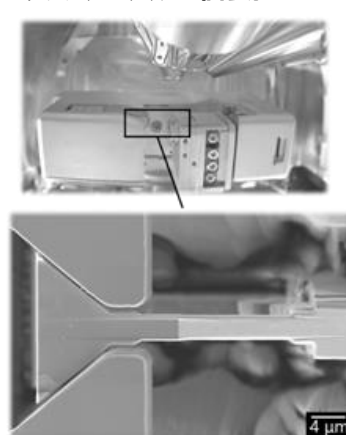
フラットFSW装置



メゾ・マイクロスケール異材接合部観察・分析装置



IN-Situ SEM FIB内ナノメカニカル評価装置



# 2013年ISMA設立、2014年共通研究棟竣工、2016年高炉3社連携

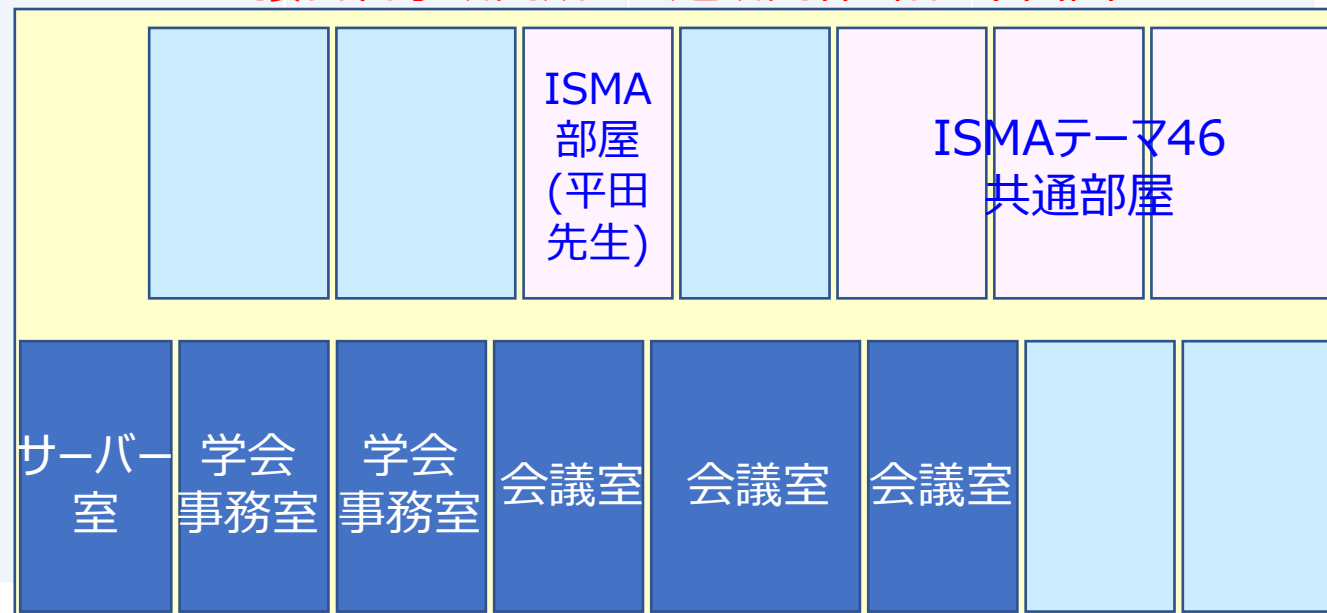
## 産学連携・開発成果の実用化に向けた活動（～2016年度まで）

METI/NEDO/ISMA					After ISMA
2013～2016年度	2017～2018年度	2019～2020年度	2021年度	2022年度	2023年度

- ・ISMA開始 (2013年度)
- ・共通研究棟竣工 (2014年度)
- ・高炉3社連携テーマ46立ち上げ (2016年度)

接合科学研究所オープンラボを利用して、研究開発を促進

接合科学研究所 共通研究棟2階 平面図



接合科学研究所 共通研究棟外観





# 接合技術拠点の変遷

## 産学連携・開発成果の実用化に向けた活動 (2017～2018年度)

METI/NEDO/ISMA				After ISMA	
2013～2016年度	2017～2018年度	2019～2020年度	2021年度	2022年度	2023年度

- ・ISMA開始 (2013年度)
- ・共通研究棟竣工 (2014年度)
- ・高炉3社連携テーマ46立ち上げ (2016年度)

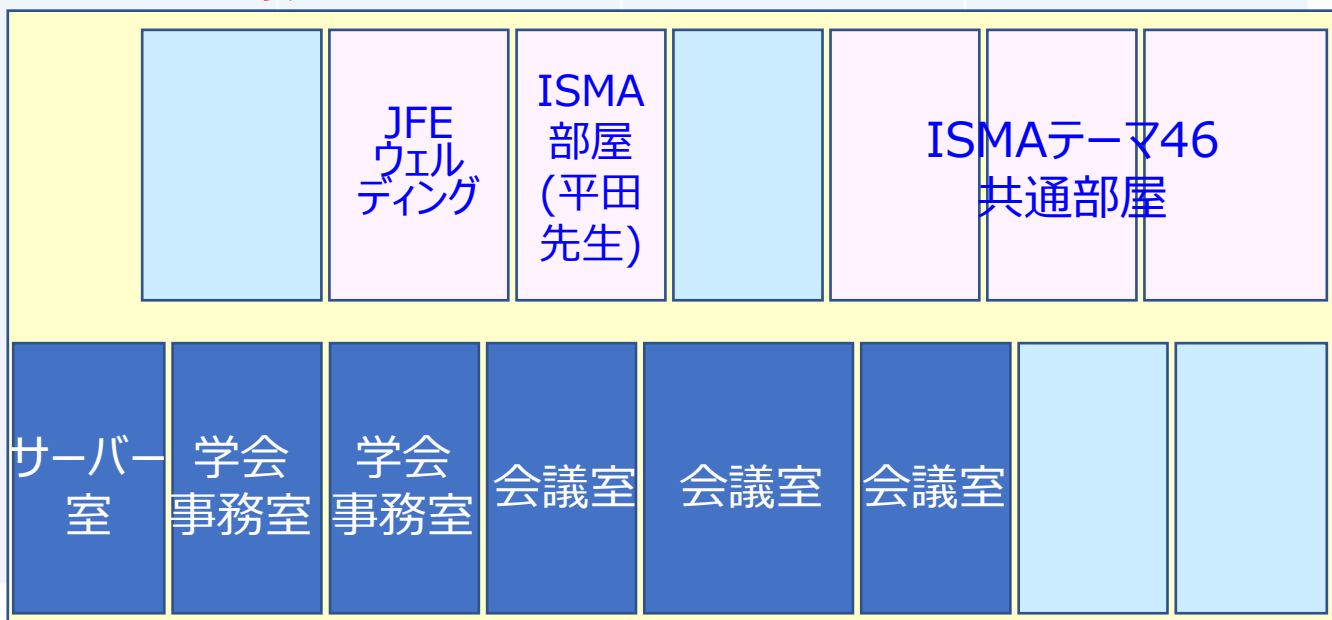
・JFEウェルディング協働研究所設置 (第1期:2018年度)

接合科学研究所オープンラボを利用して、研究開発を促進

接合科学研究所 共通研究棟外観



接合科学研究所 共通研究棟2階 平面図



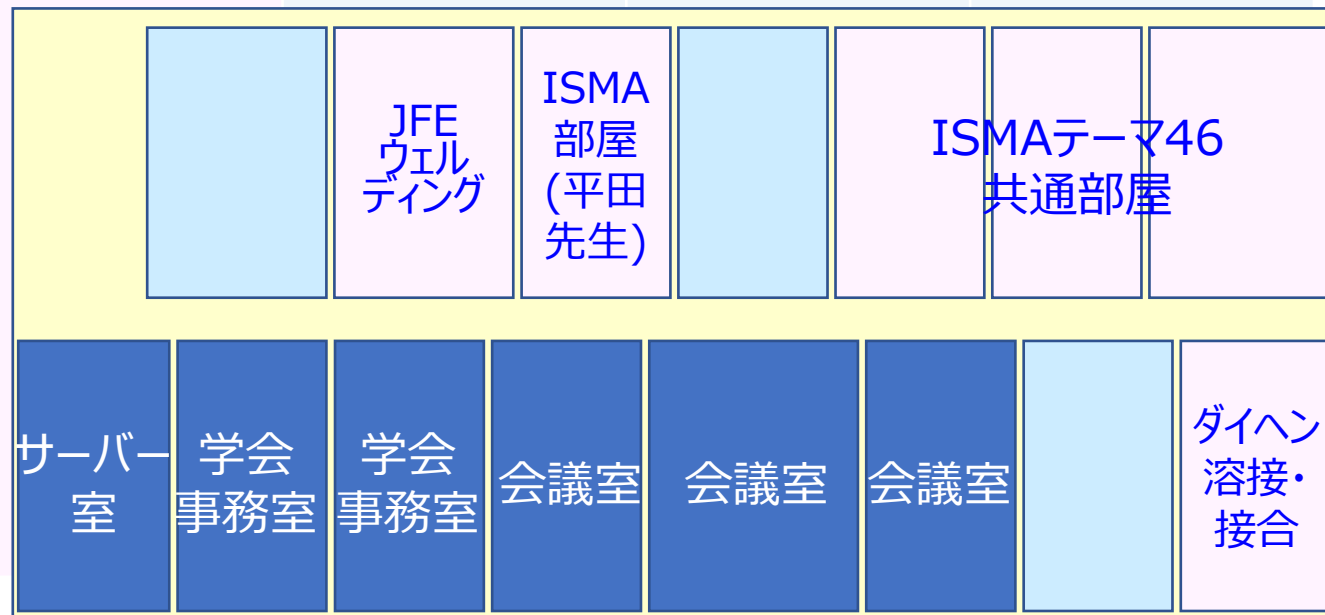
# 接合技術拠点の変遷

## 産学連携・開発成果の実用化に向けた活動 (2019～2020年度)

		METI/NEDO/ISMA			After ISMA
2013～2016年度	2017～2018年度	2019～2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ISMA開始 (2013年度)</li> <li>・共通研究棟竣工 (2014年度)</li> <li>・高炉3社連携テーマ46立ち上げ (2016年度)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・JFEウェルディング協働研究所設置 (第1期:2018年度)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・阪大分担研・分室 (2019年度)</li> <li>・ダイヘン溶接・接合協働研究所設置 (第1期:2019年度)</li> </ul>			

接合科学研究所 共通研究棟2階 平面図

接合科学研究所 共通研究棟外観



# 接合技術拠点の変遷

## 産学連携・開発成果の実用化に向けた活動 (2021、2022年度)

接合科学研究所  
共通研究棟外観



METI/NEDO/ISMA			After ISMA																							
2013～2016年度	2017～2018年度	2019～2020年度	2021年度	2022年度	2023年度																					
・ISMA開始 (2013年度)  ・共通研究棟竣工 (2016年度)	・JFEウェルディング 協働研究所設置 (第1期:2018年度)	・阪大分担研・分室 (2019年度) ・ダイヘン溶接・接合 協働研究所設置 (第1期:2019年度)	・ISMA/NEDO 接合技術拠点 立ち上げ  ①日本製鉄ものづくり未来協働 研究所設置(2021年度)  ②高度ジョイント生産システム構築 共同研究部門設置(三菱電機) (2021年度)  ③JFEウェルディング協働研究所 第2期設置(2021年度)  ④ダイヘン溶接・接合協働研究所 第2期設置(2022年度)																							
接合科学研究所 共通研究棟2階 平面図																										
<table border="1"> <tr> <td>②高度 ジョイント (三菱電機)</td> <td>③JFE ウェルディング</td> <td>ISMA 接合 技術 拠点</td> <td>ISMA テーマ 64B 部屋</td> <td>①日本 製鉄 ものづく り</td> <td>ISMAテーマ46 共通部屋</td> <td></td> </tr> <tr> <td>サーバー 室</td> <td>学会 事務室</td> <td>学会 事務室</td> <td>会議室</td> <td>会議室</td> <td>会議室</td> <td>ISMA テーマ 64B サーバー 室</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>④ダイヘン 溶接・ 接合</td> </tr> </table>						②高度 ジョイント (三菱電機)	③JFE ウェルディング	ISMA 接合 技術 拠点	ISMA テーマ 64B 部屋	①日本 製鉄 ものづく り	ISMAテーマ46 共通部屋		サーバー 室	学会 事務室	学会 事務室	会議室	会議室	会議室	ISMA テーマ 64B サーバー 室							④ダイヘン 溶接・ 接合
②高度 ジョイント (三菱電機)	③JFE ウェルディング	ISMA 接合 技術 拠点	ISMA テーマ 64B 部屋	①日本 製鉄 ものづく り	ISMAテーマ46 共通部屋																					
サーバー 室	学会 事務室	学会 事務室	会議室	会議室	会議室	ISMA テーマ 64B サーバー 室																				
						④ダイヘン 溶接・ 接合																				
・ISMA終了																										

# 接合技術拠点の変遷

## 産学連携・開発成果の実用化に向けた活動 (2023年度以降)

接合科学研究所  
共通研究棟外観



METI/NEDO/ISMA					After ISMA
2013～2015年度	2016～2018年度	2019～2020年度	2021年度	2022年度	2023年度
接合科学研究所 共通研究棟2階 平面図					
					<p>①ニューノーマルものづくり コンソーシアム室 設置</p> <p>②NEDO特別講座</p> <p>③自動車メーカー 合同体協働研究所 (2023年10月 予定)</p>

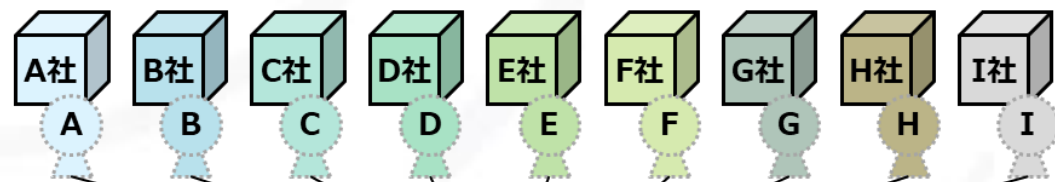
# 接合技術拠点の今度の展開

## 自動車メーカー合同体による阪大協働研究所設立 (2023年10月開始に向け、検討中)

### 協働研究所によるコンソーシアム実行イメージ

前提条件：協働研究所を設置し、その中で2テーマの技術開発を実行

#### 自動車メーカー



出向→ 阪大の職員

#### 協働研究所

所長 (阪大先生)

副所長 (自動車メーカー)

部屋1：テーマ①



部屋2：テーマ②

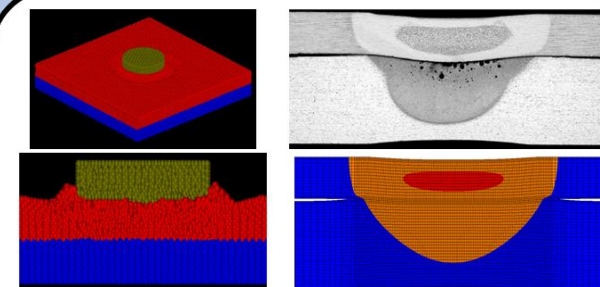


成果は共有

## NEDO特別講座・実習の内容(案)

### Aコース：溶接・接合プロセス解析入門講座

溶接・接合におけるプロセスの諸現象を数値シミュレーションし、構造物の製造・使用問題を解決するためのツールの使い方を把握することが目標。



摩擦攪拌点および抵抗スポット溶接接合プロセス解析

### Bコース：固相接合基礎講座

革新的固相接合である摩擦攪拌接合、線形摩擦接合等摩擦接合の基本原則と現状を把握するとともに、実際に継手を作製し、摩擦接合の良さを知ること新たなニーズを探索するとともに、実用化に向けた課題を見出すことが目標。



摩擦攪拌接合(FSW)・線形摩擦接合(LFW)装置

# 開発成果の実用化に向けた今後の活動

## 鋼のFSW（摩擦攪拌接合）のISO化

2022年2月10日に鋼のFSW（摩擦攪拌接合）のISO化の審議がIIW（国際溶接会議）の下部組織で開始され、2022年4月8日に、日本溶接協会内規格委員会内に、「鉄系FSW規格検討委員会」を立ち上げ、以下の構成メンバーのもと、現在、ISO化を検討中。

### 構成メンバー

主査： 大阪大学 藤井

顧問： 大阪大学 平田先生

オブザーバー： 埼玉大学 山根先生

事務局： (一社) 日本溶接協会

委員： 大阪大学、(株) 神戸製鋼所、JFEスチール(株)、日本製鉄(株)、  
(株) 日立製作所、川崎重工業(株)、(一社) 日本溶接協会、JFEエンジニアリング(株)、  
(株) WISE企画、トライエンジニアリング(株)、(株) 山本金属製作所

赤字： ISMA分担研において、FSWを実施していたメンバー

# 開発成果の実用化に向けた今後の活動

本研究開発で生み出された革新的摩擦接合技術を実用化するために、下記の研究開発を検討中。

## ① 高機能鋼材の資源回生に資する革新的な接合・分離プロセスの開発

研究開発テーマの技術的ポイント：

従来溶接が困難とされるCu およびSn 添加鋼材を対象に、世界をリードする日本の溶接・接合分野の知見に基づき、**低温固相接合技術による接合技術**の確立と溶接割れ・脆化を利用した分離技術を開発する。**鋼中不純物の制約緩和とリサイクルの高度化のための基礎的知見の収集**と自動車製造における技術検証によって、鉄資源循環をベースとする社会全体の資源回生に資する革新的高機能鋼部材の基盤製造技術を確立する。

実施体制：

国研－企業－大阪大学－一財

## ② 低温摩擦接合を活用した革新的航空機エンジン製造プロセス開発

研究開発テーマの技術的ポイント：

我が国発世界初の新規接合法である**低温線形摩擦接合(低温LFW)**を適用し、革新的航空機エンジン製造プロセスを確立する。本提案は、航空機エンジンの圧縮機に多用されている**ブリスク製造**で課題とされた**素材の無駄を排除し、加工時間短縮**を目的とする。本技術ではTi合金の課題であるCold Dwell疲労を含むDwell疲労による寿命低下も抑制する技術も提供し、世界の当該業界における日本の地位向上を図る。

実施体制：

大阪大学－企業1－企業2－一財

## 参考資料 1 分科会議事録及び書面による質疑応答



**研究評価委員会**  
**「革新的新構造材料等研究開発」(終了時評価)分科会**  
**議事録及び書面による質疑応答**

日 時 : 2023 年 4 月 21 日 (金) 9 : 30~16 : 50

場 所 : NEDO 川崎本部 1901 会議室 (オンラインあり)

出席者 (敬称略、順不同)

<分科会委員>

分科会長	松田 健二	富山大学 学術研究部 都市デザイン学系 教授
分科会長代理	奥田 章順	株式会社航想研 代表取締役社長
委員	大窪 和也	同志社大学 理工学部 機械理工学科 教授
委員	小笠原 俊夫	東京農工大学 工学研究院 先端機械システム部門 教授
委員	清水 孝太郎	三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング株式会社 政策研究事業本部 持続可能社会部長/上席主任研究員
委員	福岡 俊康	三菱重工業株式会社 民間機セグメント 複合材構造開発グループ グループ長
委員	柳本 潤	東京大学 大学院工学系研究科 機械工学専攻 教授

<推進部署>

林 成和	NEDO 材料・ナノテクノロジー部 部長
佐々木 訓	NEDO 材料・ナノテクノロジー部 統括主幹
小川 貴弘(PM)	NEDO 材料・ナノテクノロジー部 主査
小野塚 偉師	NEDO 材料・ナノテクノロジー部 主査
廣井 政行	NEDO 材料・ナノテクノロジー部 専門調査員
笹木 隆弘	NEDO 材料・ナノテクノロジー部 専門調査員
佐久間 渉	NEDO 材料・ナノテクノロジー部 職員

<実施者>

岸 輝雄(PL)	新構造材料技術研究組合(ISMA) 理事長
影山 裕史(SPL)	金沢工業大学 大学院工学研究科 高信頼ものづくり専攻 教授
秋宗 淑雄	ISMA 技術企画部、プロジェクトマネージャー室 部長、研究統括代行
深堀 貢	マツダ株式会社 技術研究所 先端材料研究部門 主幹研究員
高見 明秀	マツダ株式会社 技術研究所 技監
武部 佳樹	東レ株式会社 複合材料研究所 主任研究員
上坂 聡	株式会社タカギセイコー 先端技術開発センター 複合材製品開発 G グループ長
村上 俊夫	株式会社神戸製鋼所 技術開発本部 材料研究所 材質制御研究室 室長
箕田 正	株式会社 UACJ R&D センター 第一研究部長
藤井 英俊	大阪大学 接合科学研究所 教授

<オブザーバー>

土屋 哲男 経済産業省産業技術環境局 研究開発課 研究開発企画調査官  
併)先端テクノロジー戦略室企画調整官

三村 憲一 経済産業省産業技術環境局 研究開発課 産業技術プロジェクト推進室  
研究開発専門職 (材料担当)

<評価事務局>

森嶋 誠治 NEDO 評価部 部長

山本 佳子 NEDO 評価部 主幹

木村 秀樹 NEDO 評価部 専門調査員

中島 史夫 NEDO 評価部 専門調査員

## 議事次第

(公開セッション)

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明
  - 5.1 意義・アウトカム (社会実装) 達成までの道筋
  - 5.2 目標及び達成状況
  - 5.3 マネジメント
  - 5.4 目標及び達成状況 (詳細)
    - 9年間 プロジェクトの概要
  - 5.5 質疑
6. プロジェクトの詳細説明
  - 6.1 実用化に向けた取り組み (展示会動画で説明あり) /ISMA
  - 6.2 マルチマテリアル部材 (ドア) の試作 /マツダ
  - 6.3 超軽量CFRTP/CFRPハイブリッド部材の開発 /東レ
  - 6.4 革新鋼板を用いたAピラー4部品 ASSY /神戸製鋼所
  - 6.5 革新アルミニウム合金を用いたフロントサイドメンバーおよびサイドシルインナー /UACJ
  - 6.6 接合技術拠点の構築 /大阪大学
7. 全体を通しての質疑
8. まとめ・講評
9. 今後の予定、その他
10. 閉会

## 議事内容

(公開セッション)

### 1. 開会、資料の確認

- ・開会宣言 (評価事務局)
- ・配布資料確認 (評価事務局)

### 2. 分科会の設置について

- ・研究評価委員会分科会の設置について、資料1に基づき事務局より説明。
- ・出席者の紹介 (評価委員、評価事務局、推進部署)

【松田分科会長】 富山大学の松田です。今回、分科会長を仰せつかりました。非常に壮大なプロジェクトの最終評価であるということで、皆様のご発表及び成果について大変期待を持ちながら臨ませていただく次第です。本日はどうぞよろしくお願いいたします。

【奥田分科会長代理】 株式会社航想研の奥田です。私はもともと三菱総合研究所にいました。主に航空機関係ではあったものの、自動車とも関連していたため、本日はいろいろと伺えることを楽しみにしております。どうぞよろしくお願いいたします。

【大窪委員】 同志社大学の大窪です。材料力学と複合材料の力学を専門にしております。今日は、成果を拝聴させていただきたく思います。よろしくお願いいたします。

【小笠原委員】 東京農工大学の小笠原です。このプロジェクトは、非常に素晴らしい成果が出されているものと思っており、大変楽しみにしております。本日はよろしくお願いいたします。

【清水委員】 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティングの清水です。ただいま海外におりますため、本日はオンラインで出席する形となりましたことをご容赦いただきたく存じます。事前に資料を拝見し、大変素晴らしい成果を出されている事業であるという印象を持っております。私の専門としては、主に材料技術と資源等の社会的な位置づけ、価値、市場動向といった分野になりますので、そういった観点より、本日の議題においていろいろと意見を申し上げたく思っております。どうぞよろしくお願いいたします。

【福岡委員】 三菱重工 民間機セグメントの福岡です。私自身は、航空機構造の強度評価や、実験・試験、認証を専門としており、現在は複合材を適用して将来航空機の軽量化を目指す部門にいます。今日のテーマは非常に私が目指しているものと似ておりますし、事前に資料を拝見いたしまして、素晴らしい成果が出されていると感じますので、大変楽しみにしております。よろしくお願いいたします。

【中島専門調査員】 以上、今分科会の評価委員の皆様は、ただいまご挨拶をいただいた6名の先生方に加えまして、午後からは東京大学の柳本先生にもご参加いただき、計7名となっております。

### 3. 分科会の公開について

評価事務局より資料2及び3に基づき説明し、本分科会においては、議題の全てを公開とすることとした。

### 4. 評価の実施方法について

評価の手順を評価事務局より資料4-1から4-5に基づき説明した。

### 5. プロジェクトの概要説明

- 5.1 意義・アウトカム (社会実装) 達成までの道筋
- 5.2 目標及び達成状況
- 5.3 マネジメント
- 5.4 目標及び達成状況 (詳細)

## 9年間 プロジェクトの概要

実施者である PL 及び SPL による挨拶の後、推進部署より資料 5 に基づき説明が行われた。

その後、実施者より上記の説明が行われた上で、それらに対し下記のとおり質疑応答が行われた。

### 5.5 質疑

【松田分科会長】 ご説明ありがとうございました。

ただいまの説明に対して、何かご意見、ご質問等がございましたら、お受けいたしますが、技術の詳細については、次の議題 6 での取り扱いとなるため、ここでは主に意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋、目標及び達成状況、マネジメントについての議論となりますので、よろしく願いいたします。

福岡委員、どうぞ。

【福岡委員】 三菱重工の福岡です。ご説明ありがとうございました。非常に広範囲にわたって成果を出されていると思うのですが、目標設定についてお伺いいたします。50%の重量軽減を目指す際に、個々の材料に対してや、個々の技術に対して重量軽減の目標値を配分されたのではないかと思います。例えば、鉄鋼ですとどれぐらいの強度が必要となる、アルミですとどのぐらいの強度を向上させるというような具体的な目標が定められていると思いますが、どのようにして各技術分野に目標を配分されたのでしょうか。

また、もう 1 点として、「研究期間中に目標の見直しを行った」という説明があったかと理解しております。その点について、具体的にどのように目標を見直しされたのかを、差し支えない範囲で教えていただけたら幸いです。以上 2 点について、よろしくお願いします。

【ISMA\_秋宗】 ISMA の秋宗よりご説明いたします。先ほどの目標値の決め方についてですが、特に自動車の車体が決まっていない、つまり衝突したときにどのぐらいの強度が必要かというのが明示されていないという状態からのスタートとなったのですけれども、「バナナカーブ」と呼ばれているストレスストレインカーブの右側のところで、今までにない特性値をまずは求めることを 1 期の目標としていました。2 期において、その数字でよかったか悪かったかというところを、先ほどの A ピラー、B ピラーの衝突耐性のところになりますが、ある自動車の構造で衝突をさせたときのシミュレーション結果等から、その数値はほぼ正しかったのだらうという後づけでの検証にはなりましたが、確認はできたものと考えております。また、多分できていると思うのですが、数字的にまだばらつきが生じる素材が幾つかあるため、それについては、テストピースサイズのように短ければできるものの、実物大、例えば鉄道車両用になると、25m の一環押出しをしなくてはならず、そこについては、まだこの中ではできていないところとなります。

また、2 つ目の質問の目標の見直しにつきましては、各テーマによって少し違うのですが、チタンについてはプロセスでの簡略化やプロセスで低コスト化を目標にしていたので、そこは特性ではなく、そういうプロセスで 20% ぐらいなどのある程度の想定値を設けまして、そこが達成できたところで終了というような形にしているものがございます。それから CF のところですが、非常に競争領域になる部分がございます。そして期間が 10 年間ありましたので、海外メーカーから「こういう炭素繊維が使える」とあるとか、そういった売り込み等も各社にはございますので、それらを踏まえてプロジェクトを終了するなど、ある目標値を達成したところで終了という形を取りながら、テーマ及び目標値に対する変更などを実施しているところです。

【福岡委員】 分かりました。ありがとうございました。

【松田分科会長】 それでは、小笠原委員、お願いします。

【小笠原委員】 ご説明ありがとうございました。大変すばらしい成果が出ており、非常に興味深くお聞きし

ておりました。私からは、今後の拠点について質問をさせていただきます。1つ目は、資料 63 ページ、64 ページのところですが、この拠点に関して、事前にこういったものをつくられて、今後運営しながら社会実装につなげていくというのは非常に素晴らしいことだと思います。この拠点について、今考えられている運営期間というのをどのぐらいの期間として想定されているのかを伺います。

2つ目は、拠点を運営するというのはそれなりに予算がかかるものと思いますが、その拠点の書き方として「実施機関」となっており、そういったしますと、今ある拠点の設備であるとか、研究者であるとか、大学の場合はスペース等であるとか、そういったところを維持していかななくてはいけないと思うのですが、そういった運営の予算措置というのは考えられているのでしょうか。また、その予算措置というのは各個別の機関がやられるのか、それとも、ある程度まとまったプロジェクトという形で予算の申請を行っていかれるのか。以上2点について、よろしく願いいたします。

**【NEDO 材料・ナノテクノロジー部\_小川 PM】** まず拠点機関についてですが、基本的には、特に期間は設けておりません。最初から世界的な拠点の構築を目指すということですので、基本的には「未来永劫」とは言いませんが、しっかりとマルチマテリアル構造部材の拠点として、日本に誇る拠点をずっと続けていってほしいという形で検討してきておりました。また、NEDO としても「NEDO 特別講座」というものを 10 月から開校予定であります。それについては、約 3 年半ということまで今予定しております。その期間については NEDO からの予算が出ますので、講座及び周辺研究という形でサポートをしていくというのが一つございます。

また、2つ目の予算措置については、特にまとまったところでの検討は現状ないのですが、先ほど申したように、まず NEDO 講座においてフォローをさせていただくのが一つとなります。それから、やはり拠点を継続していくためには、予算、運営費が非常に重要であり、ここが拠点を検討していく上でのポイントとなっております。では第一に、どのように予算を確保し運営をしていくのかといったものを課題に上げ、各 WG (ワーキング・グループ) で取り組んできたところです。また、ISMA の各分野においては、拠点構築といった話の前からコンソーシアムを形成している拠点がございました。ですので、そこを参考にさせていただきながら、それを基に WG の中でコンソーシアムをどういう形で形成していたのか等をご説明いただきまして、コンソーシアムを構成していない拠点の参考とし、どういう形で予算を取っていければ運営していけるのかというのを踏まえながら、検討しております。

**【小笠原委員】** そういたしますと、今後としましては、ある種、各拠点の自主努力的な運営という形が基本となっていくのでしょうか。

**【NEDO 材料・ナノテクノロジー部\_小川 PM】** 基本的には、そのようになります。

**【小笠原委員】** 分かりました。ありがとうございます。

**【松田分科会長】** それでは、大窪委員、お願いします。

**【大窪委員】** 同志社大学の大窪です。小笠原先生のご質問とも関連いたしますが、資料 62 ページのところでも伺います。今の人材育成に関する話として、大学と企業の中での人材育成については、どのようなイメージをお持ちなのでしょう。先ほどのご回答を伺いますと、各拠点でという話ではありましたが、全体として育成の方法をどのような形でされるのか。例え話として、NEDO 様のほうで何かグレードといいますか、「英検 1 級」のように「何とか 1 級」といったような証明であるとか、能力検定を行われていくようなイメージは持っておられるのでしょうか。あるいは、何らかの賞といったものも含めたところでの考えをお持ちであるかどうか伺いたく思います。

この観点を伺う背景としましては、私は大学が勤務機関でありますので、エンジンが好きという学生はいるものの、なかなか構造が好きという学生はいないといった認識であり、そういった部分での人材育成をどのようにイメージされているのか、ぜひ NEDO 様のご見解を伺いたく質問をさせていただく次第です。

**【NEDO 材料・ナノテクノロジー部\_小川 PM】** ありがとうございます。まず NEDO のほうで、そういった能力検定といったところまではまだ考えてございません。いろいろお話を聞きますと、材料に関わる研究をされている学生さんが非常に少なくなっていることは耳にしております。特に日本人が少なくなると外国の方が非常に多くなっているということでもありますので、まずマルチマテリアルに触れていただくということが重要ではないかと思っております。そういうところで、各分野に拠点を設けさせていただき、人材育成もお願いするという意味で、各拠点の講座の内容を検討していただいております。そういった意味で、初心者向けであるとか、各企業のプロフェッショナル向けということで 2 つの講座を設けて人材育成を図るということを考えております。まず初心者向けのほうであれば、特に学生さんに来ていただきまして、どういうマルチマテリアル構造部材の評価ができるのかであるとか、そういう本当に入門編といったところから実際に材料開発に興味を持っていただきたい。そして、さらにそういう研究開発がその拠点でできるのだということで、産総研に来ることで、例えば企業の研究等に関わっていただいて、「企業はこのようすばらしい研究をしているのか」というように興味を持っていただけたらと。それぞれ講座に来ていただいた学生さんが、引き続きその企業に入っても材料研究の開発に携わっていただけるのではないかと構想を念頭に置いて、拠点づくりというものを検討してまいりました。

**【大窪委員】** 分かりました。ありがとうございました。

**【松田分科会長】** それでは、清水委員、お願いします。

**【清水委員】** 清水です。事前質問に対しまして、ご回答いただきありがとうございました。その上で、接合技術の開発目標について伺いたします。私も自動車メーカー様や材料メーカー様との関係性は理解しており、一般的には接合部で破断、界面破断をするよりは母材破断が望ましいというのは承知していますが、目下、環境に配慮した設計、サーキュラーデザインというものも含め、今、欧州などで盛んに議論をされているところであり、やはりリサイクルのしやすい、単体分離がしやすい設計というのが大変重視をされているという認識でございます。一方で、安全性の確保というのが非常に重要な観点であるというのも大変承知しておりますが、その一方で、従来のように、いつまでも母材破断が望ましいという自動車材料メーカー様の役割分担、責任の仕分け、また設計目標というのは、どこかでいずれ限界が来てしまうのではないかと思います。今回は、過去の 10 年前の目標というのが大前提となると思いますから、現段階ではやむを得なかったとは思いますが、今後、将来的な適用可能性等を考えていくと、単体分離のしやすさといったところなども視野に入れた接合技術が求められてくるのではないのでしょうか。ですので、そういった今後の展開の在り方についてのご見解を伺えれば幸いです。

**【金沢工業大学\_影山 SPL】** ありがとうございます。大変よいご質問であると同時に、非常に難しくもあるところでございます。

**【清水委員】** すみません。現状のところでの課題ではないかとも思うのですが、少し将来のことを考えますと、大変すばらしい成果であると感じておりますので、そういう海外動向によって使えなくなってしまうのなら大変残念だという思いからこのような質問をさせていただいた次第です。

**【金沢工業大学\_影山 SPL】** ありがとうございます。自動車材料というのは結構たくさんありまして、内装材料や外装材料であるとか、あるいは、こういった構造材料であるとかいろいろとあるわけですが、リサイクルという観点としては、清水委員のおっしゃられるように、分けられるような設計をするというのは極めて重要であると考えます。ただ、反面、信頼性の面であるとか、リサイクルのための分離エネルギーを考えると、LCA 的な観点からの評価が必要となり、かなり難しい問題になるのではと考えております。現在、実際に車のリサイクルはどのように行われているのかということ、エンジンなどといったユニットなど、後から付加価値がつくような部品については、取り外しております。そして付

加価値がつかないようなものと言ってしまえば言葉が正しくないかもしれませんが、そのようなものについてはシュレッダーによって、完全ではありませんがエネルギーやコストをそれほどかけずに、各素材に分離し易くしているわけです。ただ最後にシュレッダーにダストが残ってしまうので、そのダストをどのように処理するかということが結構難しい問題になってしまうわけです。そういった現実的な問題もございます。ISMA では、構造材料に取り組んでいるわけですが、構造材料は大きく二つに分けられます。一つは水素タンクのようなユニットになります。ユニットは比較的分離が容易で車両から取り外してリサイクルが可能なのですが、車体になりますと多くの素材がしっかり組み合ったマルチマテリアルになりますので、分離に多くのエネルギーが必要になり、LCA 的に分離エネルギーを小さくできるような接合構造を考えるか、もしくは、私が前々から提案させていただいているような燃やせる接合構造にできないかなどを考えていく必要が出てきます。燃やすというのは分離をすることになりますし、燃やせるような接合材料を開発することになるわけです。今後の実用化を考えますと、まだまだ、現実的な面でいろいろと考えなければなりません。また、自動車材料のリサイクルについては、構造材以外の内外装材料など別の分野でもいろいろとやられていますので、そちらも横目で見つつ、車両全体としての構造材料のリサイクルを考えていく必要があります。また構造材料もそうですがリサイクルは大きく分けて二つあると思います。一つは成形工程内で発生する端材のリサイクルです。この端材は結構多く出てきますがほぼ新品で単一素材ですので、確実にリサイクルできるはずで。それともう一つは、最後まで残った廃棄材のリサイクルです。廃棄材は劣化もしていませんし、多くの素材が絡み合っています。先ほどお話しましたように分離しやすいであるとか、あるいは燃やせるような材料を使うであるとか、いろいろな形で議論をしている最中です。この構造材料だけでなく、内外装材料なども検討が行われているところだと思いますので、それらと関連しながらいろいろと考え、行動していく必要があるものと理解しております。ご回答になっておりましたら幸いです。

**【清水委員】** 大変難しい事情であるというのは、私も少し自動車リサイクルの現場でやっておりましたので承知しております。願わくは、今のようなお考えの方法などを、ぜひ日本国内にとどまらずといえますか、国際標準化という部分が今後の少し課題ではないかと感じております。やはり今のような設計の在り方、こういう接合の技術が是であるということが広まるようなルールづくりも含めてやられていくとよいのではないかと思います。どうもありがとうございました。

**【金沢工業大学\_影山 SPL】** ありがとうございます。国際協調というのは極めて重要だと思っており、絶対にやっていかなくてはいけない部分であると考えております。反面、これは国際競争になるかもしれませんが、日本ならではのやり方というののもあってもよいのではないかといいたいと思います。そういうところもいろいろと頭を使い、整理しながら見えるようにしていかななくてはいけないのではないかと考えております。例えば、サプライチェーンを日本から見た場合、現在は成り立つけれども、継続的に成立するかどうかが見えない場合があります。今の世の中の情勢を見ている限りは不安要素だらけと言えるのではないのでしょうか。先行して議論できれば、日本ならではの現実的なリサイクル、廃棄処理、接合方式などが考えられ、さらには新しいサプライチェーンが生まれてきそうな気もしております。そういった危機意識も持って、今のように様々な観点から議論を続けていければよいのではないかと考えている次第です。

**【清水委員】** ありがとうございます。

**【松田分科会長】** 今の議論に関して、大阪大学の藤井先生からもコメントをいただけるようですので、よろしく願いいたします。

**【大阪大学\_藤井】** ありがとうございます。阪大接合研の藤井です。溶接・接合の観点から少しコメントをさせていただきます。発想を少し変えますと、実は溶接・接合というのは、もう長年、接合時に割れないようにするという発想がございまして、いかに割らずに接合をするかというのが長年の課題であり



ました。ですので、逆に言うと、加熱して冷却すると割れやすい材料というものは山ほどあるわけであり、そちらのほうがむしろ多いのです。そういった難しい材料を、ハイテン材料になるなどすると接合が難しくなるわけですが、そういったものをいかに接合するかということを考えてやってみましたので、分離をしたいということであれば、従来の溶接法を使うと意外と簡単にできます。一方で、このISMAの10年間で高度な接合技術も開発してきており、今まで接合が不可能であったような材料も接合ができるようになっていきます。すなわち、今まで割れていたような材料も接合が可能になっています。そういったことを考えますと、この開発した新技術で接合できる、そういった難しい材料を高度な接合技術で接合するようにすると、従来の溶接技術で逆に分離解体に利用するということが可能になると理解しております。ですので、素材の開発、あるいは接合技術の高度化をトータルに考えると、分離解体、接合分離を総合的に考えて物事を進めるという方法もないことはないと思います。これは、また再び国が一体となって、あるいは世界が一体となってやらなくてはいけない大きな構想となりますが、原理的にはそういったことは可能だと思います。回答になっていましたら幸いです。

【清水委員】 今のようなお考えは大変すばらしく思います。ご説明いただきまして、どうもありがとうございました。

【大阪大学\_藤井】 ありがとうございます。

【松田分科会長】 それでは、奥田分科会長代理、お願いします。

【奥田分科会長代理】 航想研の奥田です。丁寧なご説明をしていただきまして、ありがとうございました。

お話を伺い、材料開発からマルチマテリアル化、それから成果を活用する拠点をつくるというの、すばらしいゴールであると思った次第です。その上で少しお伺いしたいのが、いろいろとデータも蓄積されており、それを拠点でいろいろと、いろいろな方々と結びつけてやっていくということですが、今回、構造部位、構造関係のお話だと思いますけれども、例えば航空機で言えば、構造関係というのは一番利益率が低いところとなりまして、これを今、欧米は変えようとしております。どのように変えようとしているかと申しますと、単純な構造部位だけでなく、航空機で言えばキャビンに関するところになります。先ほどキャビンの部位といった話がありましたが、そういうものを含めて全て製造を低コスト化ができないだろうかといったプロジェクトがヨーロッパ等で進められている状況です。そういったことを考えると、この拠点のところでは何か、自動車であるとか、航空機でもよいのですが、構造事業の将来に関して、この拠点から発信されていかれると非常によいのではないかと思います。最初のお話にもあったように、この10年でもかなり自動車の環境も変わりました。そして、多分この次の10年で、自動車もそうですが航空機も結構変わると思います。そうすると、構造の研究をするというときに、例えば水素を利用するのであれば、その水素の構造関係をどう取り組んでいくのか、組み込んでいくのかと。あるいは、バッテリーを使うのであれば、これは既に試験なども行われているのですが、その構造部位でキャビンの人々を、バッテリーの熱暴走が起きたときにどのように守るのかといったように新しいテーマがいろいろと出てくると思うのです。そういうものをこの拠点で、コンサル的な機能も含めて発信されていくと、いろいろな方々に関心を持っていただけるのではないかと思います。また、航空の立場からすると、こういう拠点が航空においてもあったのなら非常によいのではないかと思いますので、そういった将来に向けての提案という観点で、この拠点の機能というのをどのように考えておられるのか教えてください。

【NEDO 材料・ナノテクノロジー部\_小川 PM】 ありがとうございます。最初としましては、本当に拠点を構築し始めたところとして、まずは予算確保等から行ってきたのですが、最終的なステップ3では新しい国プロであるとか、国際連携等もぜひやっていきたいといったところを考えております。ですので、マルチマテリアル連携研究ハブが中心となりながら、国際的なシンポジウムの開催であるとか、そ

ういったところも含めて今後できたらということで検討をしております。今、マルチマテリアル連携研究ハブというのを産総研・中部センターのほうに設置させていただいておりますが、産総研自体として、なかなかホームページを活用するなどといった外に対するアピールが非常に苦手というところもステップ1の段階ではございました。しかしながら、そういったところについても、まずしっかりとホームページを構築するといったところからやっていきたいと思いますというように、本当に初期の段階ではそういったところから検討を進めてきた次第です。ぜひそういったところを含め、今後拠点を発展させていきたいと思っております。

【奥田分科会長代理】 ぜひ、いろいろな人たちを巻き込む仕組みというのをつくっていただけるとよいのではないのでしょうか。

【NEDO 材料・ナノテクノロジー部\_小川PM】 ありがとうございます。

【ISMA\_秋宗】 よいご指摘を賜りまして、ありがとうございます。ぜひNEDOと拠点で今のような、少しポジティブな考えを取り入れたものに発展できればと願っております。

【金沢工業大学\_影山 SPL】 私のほうからも少しコメントをさせていただきます。構造材料の設計になりますと、2つの考え方があると思います。一つは、インテグレートみたいな恰好で一体化し、強度や軽量化を狙う考え方です。個人的には私はこの考え方です。もう一つは、分解しやすい構造にしようとする考え方です。今後もディスカッションしながら検討を進めていかなければならない案件という気がしております。例えば、テスラはバッテリーも構造材の一つとして考え、バッテリーを一体鋳造したシンプルな車体成形方式をとっています。ただ、反面、事故時などの補修という面ではかなり苦勞しているのも事実のようです。そういったところも含めて考えていく必要があります。拠点間でいろいろと話し合っていく、そういった姿も目指して考えている次第です。

【松田分科会長】 どうもありがとうございました。

ほかにもご意見等がまだあるかと思いますが、予定の時間がまいりましたので、議題5に対する質疑応答は以上とし、次の議題に移ります。

## 6. プロジェクトの詳細説明

### 6.1 実用化に向けた取組（展示会動画で説明あり）/ISMA

実施者より説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【松田分科会長】 ご説明ありがとうございました。

ただいまの説明に対して、何かご意見、ご質問等がございましたら、お受けいたします。委員の皆様、いかがでしょうか。

それでは、松田より少し伺います。冒頭の展示に関して、参加者における割合につきまして、どのような方がご参加されたかをお示しいただきましたが、こちらの広報といたしますか、事前の皆様へのアナウンスといったところでは、大体想定どおりの皆様に足を運んでいただけたという感触でしょうか。それとも、割と想定していなかった業種の方が参加されたということもあるのでしょうか。そういった参加者に関するところでは、どのような解析をされているか教えてください。

【ISMA\_秋宗】 全体としては、想定していた方々であったという印象でありました。車の軽量化展だけにかかわらず、自動車技術会の展示等にも来られる方々であったかと思っております。やはり、その中で軽量材を中心にまずは見に来られたというところでは、鉄鋼会社の方においては若干ご不満だったのではないかというコメントも、その場で直接少しいただいたところもありました。

【松田分科会長】 分かりました。ありがとうございます。ほかに、委員の皆様からは何かございますか。

それでは、もう一つ今のところと関連した質問をさせていただきますが、アンケート等でのご説明の

部分で、いわゆる接合のところや炭素繊維に対して大変注目が集まっていたという印象です。そういったところについても、想定内というお考えでしょうか。

【ISMA\_秋宗】 我々としては、組合に参加をしていただいた企業様の技術を公平にご紹介するというのを一つメインに置いていた次第です。その上で、最終的に出された内容として、割とそういう分野で区切っていきますと接合が多かったような気がしており、そこは少し予想外でもありました。あと CFR について、もう大分世の中に知れ渡っているものと思っはいたのですが、意外と皆様まだといいますか、実用化になっている例が非常に少ないといったところもありますので、これから使っていこうという会社様がやはり多いような印象を持ったところになります。

【松田分科会長】 分かりました。ありがとうございます。委員の皆様、ほかにご質問はございますか。

よろしいでしょうか。それでは、特に質問等がないようですので、議題 6.1 に対する質疑応答はここまでとし、次の内容に移ります。

## 6.2 マルチマテリアル部材（ドア）の試作/マツダ

実施者より説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【松田分科会長】 ご説明ありがとうございました。

ただいまの説明に対して、何かご意見、ご質問等がございましたら、お受けいたします。

小笠原委員、どうぞ。

【小笠原委員】 ご説明ありがとうございました。非常に興味深く聞かせていただき、技術成果もすばらしく思いました。単純な質問になりますが、今回アルミと CFRP の点接合は、摩擦点接合を使用されていますが、その後でガルバニック腐食の評価をしておられるかと思えます。そちらのほうは、少し違う接合構成だったように思うのですが、実際の摩擦攪拌接合の場合にもガルバニック腐食については、あまり気にしなくても大丈夫だという理解でよろしいでしょうか。

【マツダ株式会社\_深堀】 ご回答いたします。基本的に材料の電気的な特性に基づいてガルバニック腐食が発生しますので、水が介在するような環境に使用するとどうしても腐食が発生します。ですので、今回ガルバニック腐食のスライドでご説明しました絵は、リベットで描いているのですが、実際に各種接合技術について、こういったもので接合した場合でも、シーラーを塗布して水の侵入を防ぐという構造が必要になってくると考えております。シーラーの仕様設定に、こういった解析技術を開発し、そういった構造で対応していこうと思っております。

【小笠原委員】 よく理解できました。きちんとシーラーをシールして、しっかりとそれを予測できる技術を確立されたため、組み合わせることで技術的には問題がないということですね。

【マツダ株式会社\_深堀】 そのとおりでございます。

【小笠原委員】 よく分かりました。もう一つだけ伺いますが、実用化に向けた今後の課題としてはどのようなものを想定されているのでしょうか。

【マツダ株式会社\_深堀】 接合技術としては、やはり量産化をするとなるとロバスト性と品質の保証技術といった部分がまず一番に必要になってくると考えています。また、午前中の話題にもありましたが、材料のリサイクルといった観点も考慮して接合技術を開発する必要があるのではないかと考えております。そして、接合技術と同時に、部材の設計技術といったものも併せて実用化へと展開していきたいと思っはいたる次第です。

【小笠原委員】 ありがとうございます。

【松田分科会長】 それでは、福岡委員、お願いします。

【福岡委員】 三菱重工の福岡です。今の議論の中で一部回答されていた点もございますが、念のため確認を

させていただきます。この攪拌接合をした後の品質保証、検査はどのような手法で行われる予定でしょうか。

【マツダ株式会社\_深堀】 例えばこういう継手に関しては、外観上を見ても分かりませんので、まずは非破壊の検査技術を使いまして、強度との相関を取りながら、そういった量産に適用できるようなものを開発していこうと考えております。

【福岡委員】 ありがとうございます。非破壊検査のうち、例えば超音波検査とか X 線検査などの具体的検査方法を伺ってもよろしいでしょうか。

【マツダ株式会社\_深堀】 このプロジェクトの中でも、超音波であるとかサーモビュアであるといったものでいろいろな評価をしており、一長一短あるというのを確認できていますので、いろいろと試しながら量産に使えるものを絞り込んでいきたいと考えている次第です。

【福岡委員】 分かりました。ありがとうございます。

【松田分科会長】 それでは、大窪委員、お願いします。

【大窪委員】 同志社大学の大窪です。少し確認をさせていただきます。このような接合方法をされますと、特に接着剤を利用した場合に熱残留応力を生むような予想をするのですが、そのような影響というのは特にないのでしょうか。

【マツダ株式会社\_深堀】 残留応力というのは、接着剤を硬化させた後という認識で合っているでしょうか。

【大窪委員】 接着剤を硬化させた後の接合ということではないのですか。

【マツダ株式会社\_深堀】 点接合した後に硬化をさせる形となっております。

【大窪委員】 点接合をされた後の硬化になるのですね。失礼いたしました。少し誤解をしておりましたが、今のご説明で理解いたしました。

【松田分科会長】 ほかに、ご質問はございますか。

それでは、松田より 1 点だけ伺います。摩擦攪拌での点接合の場合、接合した後の外観と伺いますか、現状お見せいただいたものであれば、少し中央にくぼみがあるような状況ですが、あれは使われる部位が隠れてしまうといったようなことで、その後に何か加工をして取り払うであるとか、そういったことは特に行う必要はないという理解で正しいでしょうか。

【マツダ株式会社\_深堀】 どうしても見える部位と見えない部位というものが、外観に対しての要求が違ってまいりますので、例えばこういう複動式で表面を平滑にするであるとか、そういったものも実用化をしていく上では考える必要があると思っております。

【松田分科会長】 分かりました。ありがとうございます。委員の皆様、ほかにご質問はございますか。

よろしいでしょうか。それでは、特に質問等がないということですので、議題 6.2 に対する質疑応答はここまでとし、次の内容に移ります。

### 6.3 超軽量 CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の開発/東レ

実施者より説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【松田分科会長】 ご説明ありがとうございました。

ただいまの説明に対して、何かご意見、ご質問等がございましたら、お受けいたします。

大窪委員、どうぞ。

【大窪委員】 同志社大学の大窪です。少し確認をさせていただきます。資料 6 ページにコア層の図がございいますが、これは一例という形で、スキン層ももっと厚い場合もオーケーですし、コア層ももう少し薄くなったり違ったりするといったケースであっても対応できる技術であるという理解で合っているでしょうか。

【東レ株式会社\_武部】 その理解で合っております。

【大窪委員】 今回の事例では、このスキン層は上下対称であると思いますが、特にそれも限定されずに、例えば上だけ厚いであるとか、下だけ薄いといったケースにおいても特に問題はないということでしょうか。

【東レ株式会社\_武部】 実際に実証まではしておりませんが、最終成形物等の形状により、そこは設計仕様であるかと考えております。要はカナッペといいますが、スキン層だけが例えば1mm、コア層が1mmといった2層の積層となれば、やはりスキン層のほうが剛性は高いということもありますので、少し一部の形状方向に反ってしまう、形状が変わってしまうといったことはあるかと思えます。ただし、それは平板、面板でのお話ですから、例えばそれを製品の形状で緩和することもできると考えますし、そこは案件ごとの設計要素になるかと思えます。

【大窪委員】 設計要素として自由度があるということですね。

【東レ株式会社\_武部】 おっしゃるとおりです。

【大窪委員】 アプリといいますが、製品によっては荷重方法が特定されておりますので、上下対称でなくともよいというのか、ないほうが軽量効果の得られるアプリがあろうかと思うのですが、そういうところにも対応できるというお話として確認させていただきました。

また、模式図が同じように資料7ページにあります、その中で見ると分かりやすいのですが、発泡には限界がありまして、適切な発泡率の範囲、高さ、この図で言えば断面の高さになりますけれども、そういったものがあるというのが技術のポイントになるのでしょうか。

【東レ株式会社\_武部】 おっしゃるとおりでございます。発泡する限界の高さもありますし、最小量というものもございます、その中でいろいろ設計するといったところになります。ただし、これは模式図的に台形を示しておりますが、このように例えば形や厚みが変わるところだとしても発泡力がございますので、隙間なく埋めるといいますか、そういったことができるため、非常に設計の自由度は高いものと考えております。

【大窪委員】 分かりました。この絵でちょうど端といいますが、発泡材がない領域がありますが、ここはどのようなになっているのでしょうか。

【東レ株式会社\_武部】 こちらは、発泡量が少し小さくなるような形で密度は少し高くなりますが、それは一枚物の材料を使った場合にそのような特徴がありまして、当初からそういうものの形状を少し薄くしたり厚くしたりと変えていくことで、同じ発泡量で製品一体化のものができると考えております。

【大窪委員】 先ほど言われました「アンカー効果」というものも、その端のところでも一応発揮をされているということでしょうか。

【東レ株式会社\_武部】 発揮されております。

【大窪委員】 よく分かりました。ありがとうございます。

【松田分科会長】 それでは、奥田分科会長代理、お願いします。

【奥田分科会長代理】 航想研の奥田です。ご説明どうもありがとうございました。少し伺いますが、あまりそういう例はないのかもしれませんが、これは修理とかはどのようにされるのでしょうか。やはり複合材料系というのは、なかなか熱交換のものだったりというのは、傷やリペアというところで大変だったりするのではないかと思うのですが。

【東レ株式会社\_武部】 今回のテーマの中ではリペアまでは検討をしていないのが正直なところでございます。そちらは非常に難しい部分ではございますが、例えば航空機などではCFRP自体を取り外して新しいCFRPを埋めるというようなリペア技術もございますので、それが自動車に直接当てはまるかどうかというところは要検討になるものの、ないという断言はしないでおきたいと思えます。

【奥田分科会長代理】 分かりました。あともう一つ、確か次世代モビリティの軽量化によるところが将来の

まとめの部分として書いてありましたが、これというのは何か想定されているものがあるのでしょうか。

【東レ株式会社\_武部】 現在は特にございませんが、ドローンをモビリティと呼ぶかどうかというところはあるのですが、まず比較的小さい部品のほうで実績を積んでいく。実装の件数を増やしていくところで、例えば自動車等については非常に安全性に対する考えが厳しいと思いますから、そちらの信頼をどんどん高めていくという意味も含め、そういう次世代モビリティとしております。また、剛性もありながら軽量化もできますので、移動体というものにつきましては、やはり燃費であるといったところ非常に有用なのではないかと考えております。

【奥田分科会長代理】 東レ様は、eVTOLが結構フロントランナー的に走られていると思いますので、何かこれもうまく活用できると面白いのではないかと思います。

【東レ株式会社\_武部】 ありがとうございます。

【松田分科会長】 それでは、清水委員、お願いします。

【清水委員】 ご説明どうもありがとうございました。大変興味深い技術であると思ってお聞きしておりました。今の奥田先生の話とも少し重複するかもしれませんが、まず1つ目として、例えば少しこすってしまう、少しへこんでしまったという場合に、容易に復元、修理をすることは可能なのでしょうか。また、2つ目として、接合としては、やはりビス止めなどが主体になってくるのか。3つ目として、プレス成型をした場合に、このように少し多層構造しているようなものというのは、なだらかな形状のものは比較的よいかと思うのですが、仮に凹凸が激しい形状でプレスをするような場合においては力学的な弱点というものがでてしまう可能性もあるのでしょうか。もしくは、その辺も含めて検証をされているなどといったところも含めまして、以上3点についてお伺いいたします。

【東レ株式会社\_武部】 リペアにつきまして、形状修理といったものを実際にお示しできるものがないのですが、現状でも自動車部材の一部には繊維強化のプラスチックが使用されていることもありますから、それに準じた修理方法になるのではないかと考えております。

また、2点目につきましては、弊社CFRP同士の接合をする技術やCFRPと金属の接合というものについては保有しておりますので、そちらを活用することで接合面も問題ないというように考えております。

また、3点目については、形状の成型についてどこまでかというところには限界があるかとは思いますが、今回の形状で言えば、コアの材料のほうは様々な形状に追随いたします。もう一つは、スキンの材料になりますが、そちらは繊維が連続しているものですから、形状復元にはある程度の限界がございます。それを見極めた上で、製品設計をしていくということが重要ではないかと思います。また、どのような形状までいくとどのような特性面、物性面に悪影響をもたらすのかという部分は、今後の設計課題であるご理解いただけたらと思います。

【清水委員】 分かりました。2つ目の接合に関しては、従来のCFRPと同等の接合技術が適用可能という理解でよろしいでしょうか。

【東レ株式会社\_武部】 おっしゃるとおりでございます。

【清水委員】 分かりました。ありがとうございます。

【松田分科会長】 ありがとうございます。それでは、松田からも1つ伺います。接合については、先ほどの1つ前のご発表のほうでも確かあったかと思いますが、あれは御社からの供給材となるのでしょうか。アルミ材との何か接合のデータが示されていたかと思うのですが。

【東レ株式会社\_武部】 弊社からの供給材というわけではありません。

【松田分科会長】 分かりました。いずれにしろ、強度的には非常によいデータが、基準値よりも高い数字が出ていたように理解しております。ありがとうございました。

それでは、予定の時間がまいりましたので、議題6.3に対する質疑応答はここまでとし、次の議題に移ります。

#### 6.4 革新鋼板を用いたAピラー4部品 ASSY /神戸製鋼所

実施者より説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【松田分科会長】 ご説明ありがとうございました。

ただいまの説明に対して、何かご意見、ご質問等がございましたら、お受けいたします。

柳本委員、どうぞ。

【柳本委員】 東大の柳本です。どうもありがとうございました。加古川の設備を使って実際の量産に近い寸法のものをつくられて評価をされているということは大変素晴らしいことだと思いますが、説明でおっしゃっていたように、若干特性が劣ってくることもあるように見えます。これは大きな問題ではないとは思いますが、熱履歴が理想的な状態でないというようなことが原因となっているのでしょうか。

【株式会社 神戸製鋼所\_村上】 今回、実際にトライした回数に限られておりまして、その限られた回数の中で、ラボで設定した温度を実際の設備の中で再現するのは、難しさがあります。そこを調整するとともに、ラボとのバイアスを見込みながらやっていく中で、ベストだったのがこれぐらいの特性であったということがございます。ですので、さらにつくり込んでいったり、実機のプロセスに合わせて少し成分を調整したり、そういったことで最終的な目標を実現する可能性は十分あるものとして考えております。

【柳本委員】 分かりました。ありがとうございます。調整可能な範囲の差であるということですね。それからもう一つ、これを実機化して実際にお客様に提供をするとすると、ばらつきがどの程度出るのかというのが少し気になるかと思えます。Quench & Partioning ですから、急冷してまた昇温するという少し複雑な熱履歴が入っていきますので、通常の鋼板に比べて何かばらつきを抑えるための難しさといったものがあるものでしたら、教えていただきたいです。

【株式会社 神戸製鋼所\_村上】 そこに関しては、一定のばらつきが生じるのはしょうがないところです。ただ、そこをどのように制御するのかという部分に関しては鉄鋼メーカーとしていろいろなノウハウがございますので、ここでのご回答は差し控えさせていただきますたく存じます。

【松田分科会長】 ありがとうございました。ほかに、ご質問ございますか。

清水委員、お願いします。

【清水委員】 簡単に一つだけ伺いたいします。私の理解が追いついていなければ申し訳ありませんが、残留オーステナイトのコントロールをしていくという話と、そして溶接性の話にも触れられていたかと思うのですが、このあたりは従来も同業他社様において似たようなことをなさっていたのではないかと理解しているところであります。今回一番大きく変わってきた部分、新規性というのは、どのあたりになるのかといったところを、もしよければ簡潔に伺えると助かります。

【株式会社 神戸製鋼所\_村上】 ご指摘のとおり、残留オーステナイトの制御技術というのは鉄鋼メーカーにおいて、国内、国外ともに非常に精力的に取り組んでいる領域になります。そういう意味で言えば、炭素量を0.4%にしなが、強度、伸び、穴広げ率というバランスを全て満足できるようにその技術を調節したといえますか、ブラッシュアップを行ったところが組織制御の観点において一つ新しいところとなります。また、こういった材料は接合技術としては、今まで「継手強度を担保することができないだろう」と言われていたところを、メカニズムを考えながら継手強度を、JISを少し超えるレベルではありますが、何とかそこまでレベルアップができた部分が新規性であると考えております。

【清水委員】 分かりました。理論的にベストなレシピを設計したということと、それに見合う接合技術を

確保できたところが一番新しいという理解で合っているでしょうか。

【株式会社 神戸製鋼所\_村上】 その2つを同時に実現できたということになります。

【清水委員】 分かりました。ありがとうございます。

【松田分科会長】 それでは、小笠原委員、お願いします。

【小笠原委員】 東京農工大学の小笠原です。大変すばらしい成果を上げられていると思います。私の質問は、柳本先生の内容と重なるのですが、先ほど材料のばらつきといったお話がありまして、今回0.4%カーボンでスポット溶接するということで、その後、テンパー通電という工程が入りますが、そのあたりに関しての工程のロバスト性であるとか、ばらつきといったところはいかがでしょうか。もう十分に実用化ができるといいますか、どういった自動車会社でも十分に実用化がされるようなロバスト性のあるものとして考えてもよろしいのでしょうか。

【株式会社 神戸製鋼所\_村上】 こちらの技術も、かなりレベルとしては、まだ途上であると考えております。まずはチャンピオンとして特性が出たという状況です。プロセス的なウィンドウとしては、かなり狭く、それを広げるであるとか、あともう一つとして、実用的に今の段階ではまだ厳しいと思っているものとしてタクトタイムが長いという点がございます。この ISMA のプロジェクトの中でも、異材接合で一点当たりの時間というのを設定されているものがございますが、そこには入っているのですが、実際は今使われているスポット溶接に比べると非常に長く、それをいかに短い時間で実現できるかといったところを改善しなければ、実用には乗っていかないレベルであると考えております。

【小笠原委員】 そのあたりも、自動車会社と一緒にやるにしても、ある程度のところまでは御社で進められていく形になるという理解でしょうか。

【株式会社 神戸製鋼所\_村上】 そこが提案できるレベルまでいかなければ、次には進みにくいのではないかと考えております。

【小笠原委員】 承知いたしました。ありがとうございます。

【松田分科会長】 ほかに、ご質問ございますか。

よろしいでしょうか。それでは、特に質問等がないようですので、議題 6.4 に対する質疑応答はここまでとし、次の議題に移ります。

## 6.5 革新アルミニウム合金を用いたフロントサイドメンバー及びサイドシルインナー/UACJ

実施者より説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【松田分科会長】 ご説明ありがとうございました。

ただいまの説明に対して、何かご意見、ご質問等がございましたら、お受けいたします。

大窪委員、どうぞ。

【大窪委員】 同志社大学の大窪です。資料 10 ページに今回の新材料の主に機械的特性が載っているのですが、靱性についてはいかがとなるでしょうか。

【(株)UACJ\_箕田】 正確に靱性としての測定は行っておりませんが、こちらの表に示すように、伸びとして考えた場合には、従来合金と同等レベルの伸びが出ていますので、靱性につきましても従来合金と同レベルであるものとして考えております。

【大窪委員】 分かりました。強度と耐力と伸びがこのぐらいありますので、多分改善が期待できると思うのですが、簡単に測定ができるといいますか、端を押すだけで靱性が計られるような簡易測定もありますので、もしよろければご評価いただけるとよいのではないかと思います次第です。

【株式会社 UACJ\_箕田】 承知いたしました。ありがとうございます。

【松田分科会長】 それでは、福岡委員、お願いします。



【福岡委員】 三菱重工の福岡です。興味深いお話をありがとうございました。今回、強度を改善されたというのは、この新しく追加した元素のスカンジウムが効いていると理解いたしました。将来に向けては、この材料元素のコストダウンが社会実装への課題であることも分かりましたが、この材料を使えば、御社以外でも、誰でもできてしまうというような技術なのか、それとも、御社のノウハウがあってこそこの技術にたどり着いたのかというところでは、どちらとなるのでしょうか。

【株式会社 UACJ\_箕田】 結局、元素を添加するだけで特性を得るというのは難しく、やはりプロセス条件というもの大きな一つのポイントになってまいります。今回も、いかにスカンジウムの析出物を微細に、高密度に析出させるかといったところで、熱処理条件であるとか、そういったところの調整を行っております。その調整がどこまで難しいものであるかという問題もございますが、そこにノウハウがありますから、やはり開発段階において必要になってくる要素であると考えている次第です。

【福岡委員】 分かりました。ありがとうございます。では、労働賃金の安い国が、この材料を持っていけばすぐにできるというような、そういった技術ではないという理解になるのでしょうか。

【株式会社 UACJ\_箕田】 その理解で合っております。その条件の確立というのが、やはり必要になってくるものと考えております。

【福岡委員】 分かりました。ありがとうございます。

【松田分科会長】 それでは、清水委員、お願いします。

【清水委員】 ご説明どうもありがとうございました。大変興味深い材料技術であると思いながら拝聴させていただいた次第です。こちらについて、海外における類似技術の違いや競争力について伺います。こちらは結構、国防用途において戦闘機の材料であるとか、そういった分野でも多く使われているものであるかと思えます。身近なところとしては、金属バットなどにも使用されていると過去に聞いたことがあるのですが、これを中国、ロシア、アメリカのこういう類似材料と比較した際の優位性といった観点としてはどのように理解すると正しいでしょうか。

【株式会社 UACJ\_箕田】 例えば、現在市場に出ているスカンジウムを添加したアルミ合金というのは、先ほどおっしゃったような野球のバットであるとか自転車のフレームといったところに使用されています。こういった部品というのは、強度を出すという目的よりも、むしろ再結晶抑制効果で、7000系合金をベースにした合金になっており、溶接近傍での再結晶を抑制するであるとか、あとバットであればテーパ状に冷間加工を行いますので、その冷間加工に伴う再結晶の抑制といったことを一番の目的として、スカンジウムを添加した合金が使われているという情報を得ております。ロシア等においては、今は航空機向けを主体とし、こういうスカンジウムを添加した5000系合金をベースにした開発が進められているとのことですが、現時点ではまだ実用化には至っていないものと聞いております。大きなポイントとしましては価格というところがございますので、そこが一つのネックにはなっていると思うのですが、今後コストダウンというのが進んでいくことでは、どんどん実用化モードに入っていくのではないかと予想をしている次第です。また、そちらの合金との大きな違いとしては、今のところ今回開発した「革新5000系(O材)」については、非常に溶接継手効率が高いことを確認していることに加え、さらに中空の押出材ができるというような組成設計にしているところがございます。今のところ、そういう中空型材かつ溶接継手効率が非常に高い合金を開発されたという情報までは弊社のほうには入ってきておりませんので、こういった材料で溶接用途の輸送機器への展開というものが、ほかのメーカーや海外でやられているところとの一つの違いと言えるのではないかと考えております。

【清水委員】 あまり上手な質問ができておらず、また釈迦に説法になってしまうかもしれませんが、結構チタン材などでは、ロシア品を皆様お使いにならなくなられて、代わりに日本産品への需要が拡大しているようなケースもあるかと思えます。今回開発された材料が、ある種そういう新しいマーケットと

して日本が取っていくことができるきっかけになるのではないかという思いも込めて、お伺いさせていただいた次第です。

【株式会社 UACJ\_箕田】 今回、5000 系でスカンジウムを入れた合金というものは、今までに使われていない一つの新しい分野になると思いますので、そこを強くしていくというのが大きなポイントではないかと考えます。

【清水委員】 分かりました。ありがとうございます。

【松田分科会長】 それでは、柳本委員、お願いします。

【柳本委員】 柳本です。ご説明ありがとうございました。析出物の微細化について 2 点伺います。まず 1 点目として、押出しによって微細化するというお話がございましたけれども、これというのは、析出物の総量が変わっていないのか、それとも総量が変わっているのか、どちらとなるのでしょうか。

【株式会社 UACJ\_箕田】 総量も変わっているものと理解しております。

【柳本委員】 分かりました。グラフを拝見すると、少し変わっているように思ったもので伺った次第です。また 2 点目として、この押出しについてですが、これはパイプの押出しでこの状況が実現できるのか、それともビレット押出しでこれをやられているのでしょうか。

【株式会社 UACJ\_箕田】 通常の工業レベルで行っているビレットからの押出しとなります。

【柳本委員】 ビレット技術での押出しでこれをやられているのですね。分かりました。ありがとうございます。

【松田分科会長】 それでは、奥田分科会長代理、お願いします。

【奥田分科会長代理】 航想研の奥田です。ご説明どうもありがとうございました。価格が高いというのが多分課題になってくるかと思うのですが、それ以外の部分の技術のところにおいては、特に実用化に向けての大きな課題はないのでしょうか。また、スカンジウムについて、やはりエアバスが AM (Additive Manufacturing) 用にかなり独占的に買っているところがありますから、そういうところを考えると、これは基本的に副産物であると思いますので、その辺の需給のところでは、これを実用化したときの量であるとか確保するところとしてどのように考えられているのでしょうか。以上 2 点について伺います。

【株式会社 UACJ\_箕田】 現状では、「年間 15t である」などと言われているのですが、今回の Ni-Co 鉱物の副産物というものがあることに加え、大きなところとしては、今、東京大学でレアアース泥のコンソーシアムがございまして、南鳥島沖の深海から高濃度のレアアースが取れると。その中でも、かなりの量のスカンジウムが含まれておりますので、それが例えば実現できれば、そういう供給における問題は特に生じないようになるのではないかと考えている次第です。

【奥田分科会長代理】 ありがとうございます。

【松田分科会長】 ありがとうございます。それでは、予定の時間がまいりましたので、議題 6.5 に対する質疑応答はここまでとし、次の議題に移ります。

## 6.6 接合技術拠点の構築/大阪大学

実施者より説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

【松田分科会長】 ご説明ありがとうございました。

ただいまの説明に対して、何かご意見、ご質問等がございましたら、お受けいたします。

奥田分科会長代理、どうぞ。

【奥田分科会長代理】 航想研の奥田です。ご説明どうもありがとうございました。少しお伺いしますが、先ほどの説明において、LFW のところで圧力をかけると接合温度が変わっていくというのは、これは大

阪大学様の独自のご研究であるという理解で合っているでしょうか。

【大阪大学\_藤井】 圧力によって温度を制御できるというのが独自の考え方になります。従来は、弱い力で押して摩擦熱を発生させ、柔らかくなってから押してバリを出すという方法でしたが、大阪大学の場合は、最初から圧力をかけております。それも、従来の常識を超えるような圧力をかけておりますので、温度が上がった瞬間にバリが出る。すなわち、温度が上がったことが、圧力によってセンサのような働きをし、それ以上に温度が上がらないという仕組みになっております。

【奥田分科会長代理】 そうすると、先ほど航空機のエンジン、プリスクの話があったかと思いますが、MTUがLFWを使用しているのですけれども、多分技術的には違ってきているところがあるのではないかと気がいたします。確か、プリスクへの取組は日本の航空機産業として一つのターゲットであると思いますので、そういった意味で、日本独自の技術を使い、プリスクのところで新しい取組ができる非常に面白いのではないかと考えた次第です。また、技術拠点にどんどんと入ってこられた、増えていかれたというのは、大阪大学様がいろいろと営業と言ってはなんですが、こういうような情報発信をされて、それでこのようにメンバーが増えていかれたという形になるのでしょうか。

【大阪大学\_藤井】 こういう ISMA の報告会などが多数ありますので、そういったところで、「こういった成果が得られた」ということを発表する機会をいただいております。そういった成果をお聞きになられて、その技術をやってみたいと思っただけなのではないかと理解しております。特別に伺って「お願いします」というような活動はあまり行っておりませんし、逆に、それをやってもあまり振り向いてはいただけないのですが、そういう発表を聞いていただいていることが、そこにつながっているのだと思います。

【奥田分科会長代理】 先ほど言ったエンジンメーカーの MTU は、日本にとってはある意味パートナーではあるのですが、コンペティターでもありますから、そういう意味では、日本独自の技術でそういった取組ができると非常にすばらしいのではないかと思います。

【大阪大学\_藤井】 ありがとうございます。この技術を用いると、Ti 合金でいうと  $\beta$  トランザス以下で接合できますので。通常  $\beta$  トランザス以上でやりますと、必ず  $\beta$  の中に針状  $\alpha$  が出ていきますけれども、等軸の  $\alpha$  と  $\beta$  からなる組織をつくることもできますので、そういう微細組織で接合することも可能です。

【奥田分科会長代理】 ありがとうございます。

【松田分科会長】 それでは、清水委員、お願いします。

【清水委員】 ご説明どうもありがとうございました。大変興味深い技術であると思いつつ拝聴していた次第です。本日の前半のときにも少しお答えをいただいたのですが、今ちょうどスライドを出している左側のところで、こういう脆化も利用した新しい解体設計に通じるようなところも開発されているということで、今回開発された高圧力をかけたときの摩擦接合温度をコントロールするのは、基本的に接合時の冷却脆化を起こさせてやるというメカニズムの中でお考えになられているのでしょうか。また、脆化が起きた場合の破断方法というのは、基本的に界面で破断を起こすことを目指されて、この左側の研究開発を行われているのでしょうか。今回開発された成果というのが大変興味深いものであり、今後の発展の可能性を知りたく思い伺いいたします。

【大阪大学\_藤井】 こちらに記載しているのは、本プロジェクトとは直接的には関係のないものとなります。本プロジェクトがいかにか活用できるかというのをアイデアとして記載しております。これは 1 か月ぐらい前に出したものになるのですが、たまたま本日こちらの内容をご質問されたためちょうど答えたのですけれども、まず脆性になるかどうかというのは材料によっても異なります。例えばリンやサルファといったもののように、溶かすことによって偏析するというものに関しては、溶かさなければよいので、固相接合で十分です。一方で、炭素のように変態をすると割れてしまう、変態時に割れてしま

うというものに関しては、変態させるとよろしくないため、700℃以下にすることが大事です。そういったことも、この方法ですと温度を任意に変化させることができるため、そういう対象によって温度を変えることとなります。あとは、今後電炉材をたくさん使うことになると、銅やすずというものが不純物として多くなってくのではないかと考えておりますが、そうすると、逆に割れやすい材料というもの、接合しにくい材料というものが増えていきます。すぐにはならないとは思いますが、先手を打って、そういったものが将来増えてくることを想像しながら接合技術を高度化しておくことも必要ではないかと考えております。

【清水委員】 こちらも釈迦に説法になりますが、銅やすずはもちろん当然のこと、恐らくステンレス鋼、クロム、ニッケルといったあたりも、そういう管理対象に今後になっていくのではないかと思います。伺っておりました。ありがとうございました。

【大阪大学\_藤井】 ありがとうございます。

【松田分科会長】 それでは、福岡委員、お願いします。

【福岡委員】 三菱重工の福岡です。大変興味深いお話をありがとうございました。少し私が原理原則を勘違いしているのかもしれませんが、資料7ページの異種接合について、非常に興味深い動画も見せていただいたのですけれども、前のページのグラフでご説明をいただいたように、アルミと炭素鋼には交点がないため、そこにセンター材を入れるのは非常に面白いアイデアだと感じましたが、圧力について、この絵で見ると、左が「高圧力」で右が「低圧力」と書いてありまして、これだけを見るとバランスしていないのですが、この力の差分というのは、次のページの図ですと、センター材の上下で差分の反力を取っているという仕組みになるのでしょうか。

【大阪大学\_藤井】 おっしゃるとおりです。ここにある試料は実は見えていなくて、治具が今見えている状況です。ですから、治具の真ん中に試料がありまして、全体で支えている状況になります。ですので、少し圧力を変えて行うというのは、無理があると言えば無理がある方法になります。しかしながら、この場合、先ほどこちらは先に赤くなっていて、左側は後で変形をしたように、実は両側を同時に押しているのではなく、若干先に鉄を押しており、アルミを後から押し始めているのです。そういうように、若干タイミングのずれを起こすことで、やっとこのようにきれいに接合できるようになったというところで、多少のノウハウがございます。

【福岡委員】 ありがとうございます。同時ではなくとも、今ご説明にあったように、シーケンシャルに左右バランスさせた接合方法のほうが、より社会実装をするときにもアプリケーションが増えるのではないかと伺っておりました。

【大阪大学\_藤井】 ありがとうございます。

【福岡委員】 あとは、圧力がキーだとするのならば、力をバランスさせるためには、例えば接合の面積で調整するなどアイデアになるのでしょうか。

【大阪大学\_藤井】 おっしゃるとおりです。圧力を高いほうを小さくすれば、力は同じですので、そういった場合は、ずれないで済むものと思います。

【福岡委員】 勉強になりました。ありがとうございます。

【松田分科会長】 ほかに、ご質問ございますか。

よろしいでしょうか。それでは、特に質問等がないようですので、議題6.6に対する質疑応答はここまでとし、次の内容に移ります。

## 7. 全体を通しての質疑

【松田分科会長】 議題7に移ります。全体を通して、委員の皆様、何かご質問等があれば、よろしくお願

いたします。

清水委員、どうぞ。

**【清水委員】** 少しコメントをいたしますが、全体を通して大変すばらしい技術成果であったと思っております。特に10年前の当時を振り返りまして、当初掲げられていた比較的野心的な目標も含め、全て達成できていたところが大変すばらしいです。特に軽量化を進めることで、自動車をはじめとする輸送機械の省エネルギー性能を向上させるという期待が最もよくクリアされているのではないかと思います。そこで直面する必要十分な接合技術の確立という面でも大変大きな成果を包括的に解決できていたという印象です。一方で少し気になった点として、大変ここまですばらしい技術成果を生み出されているものの、やはり自動車というマーケットを念頭に置いている以上、当然、日本国内市場だけではない売り込みというものを考えていく必要があるのではないかと思います。そうした場合には、こういう新しい接合技術や軽量化された効果といったものが海外の市場でも受け入れられやすくするための土台をつくるということも大事だと思います。その点では、国際標準化、ISO 等を含め、いろいろなルール形成の場というものがあるかと思いますが、そうしたところをもう少し今後ご検討いただけたらとよいのではないのでしょうか。具体的には、今回提案されているそれぞれの素材のよさ、軽量化、引張強度など多々あると思います。そして接続技術についても大変すばらしい利点があると思いますが、そうしたものが、定量的かつ客観的に評価できるような物差しとしての規格が今後あるとよいのではないかと考えます。一方で、国際標準化というのは、何か放っておけばできるというものではなく、それなりに人手のかかるものですから、今回の ISMA 様という組織が今後何かしらの形で継続ができたのならよいのではないかと、こちらは事業外になってしまうのかもしれませんが、そのように感じた部分もございました。ですので、参画企業の方々において、またご検討をいただけるたらし、それが社会への波及効果としても、より大きくなるのではないのでしょうか。以上です。

**【松田分科会長】** ありがとうございます。それでは、福岡委員、お願いします。

**【福岡委員】** 今、清水委員から標準化の観点でのコメントがございましたが、私もこちらの部分において、少し質問をさせていただきたく思います。最後の大阪大学の藤井先生のところでは、ISO という具体的な国際標準化に向けた取組方針を伺えたのですが、そのほかの方のご説明の中では特にそういった部分が含まれていなかったように感じます。私が質問票へのご回答の全てに目を通し切れていないため、理解できていない点もあるかもしれませんが、もし可能であれば、本日プレゼンをいただきました方々から一言ずつ、例えば今後考えていくであるとか、既に考えられているのであれば、それがどんな戦略であるかというのを可能な範囲で伺えたら幸いです。

**【松田分科会長】** ありがとうございます。そうしましたら、小川様から順番に一言ずつお願いしてもよろしいでしょうか。

**【NEDO 材料・ナノテクノロジー部\_小川 PM】** ご質問ありがとうございます。まず、本日は時間の関係上、少し企業の方をピックアップしてご説明いただいたところになります。ですので、本日ご発表いただいた企業のほかにも、例えばサイクル CF の国際標準化等は現在検討をしているところでございます。こちらプロジェクトの中で実際に進めており、近いうちに ISO 化になっていくものと考えている次第です。また、接着のほうでも、本プロジェクトとは違うのですが、国際連携等を行っており、こちらにおいても今、非常によい成果が出ている状況になります。特に自動車の接着剤関係はドイツが主力で行われていますが、欧州のほうで標準化を進められてしまうと、なかなか日本の意見が入っていかないところもございますから、積極的にそちらのほうを学会等と連携させていただき、ぜひ日本の技術もそういう標準化となるようにと現在進めているところでございます。

**【松田分科会長】** ありがとうございます。続きまして、深堀様、お願いします。

**【マツダ株式会社\_深堀】** マツダの深堀です。先ほどの藤井先生からのお話にあった ISO 化に関して、私ど

も参画をさせていただきながら進めている状況になります。そういう接合技術を汎用化していく必要があると思っていますから、今後とも進めていく所存です。

【松田分科会長】 ありがとうございます。続きまして、武部様、お願いします。

【東レ株式会社\_武部】 東レの武部です。なかなか私どもの検討内容における標準化というのは、少し違う経路であるため差し控えさせていただきますが、海外という観点では、弊社、熱可塑性材料を使用した関連会社もごございますし、さきのプレスリリースも海外に向けて広報しておりました。そういったところで技術のアピールとともに、お客様、社会への貢献といったところで進めているところになります。以上です。

【松田分科会長】 ありがとうございます。続きまして、村上様、お願いします。

【株式会社 神戸製鋼所\_村上】 神戸製鋼所の村上です。接合技術に関しては、先ほど深堀様がおっしゃいましたように、弊社も FSW の ISO 化に関わっておりますので、そういったところで関連していきたいと考えております。また、材料の観点としては、自動車用材料の場合は、そういった ISO というよりも、ユーザーごとに規格をつくる傾向があるため、そちらは個社ごとにアプローチをしながら議論を行っていく形になると考えるところです。海外に対するアプローチにつきましては、ISMA のプロジェクト内でも欧州における自動車学会にて、ISMA 本部様と連携してご報告をさせていただくなど議論を進めているところですが、まずは日本の中での展開を考えた上で、将来的にはそういうところも検討していくべきと考えております。以上です。

【松田分科会長】 ありがとうございます。続きまして、箕田様、お願いします。

【(株)UACJ\_箕田】 UACJ の箕田です。アルミにおきましては、前半の 7000 系合金は航空機向けをターゲットにしており、もともと航空機で使う場合には規格化が必要だという前提で検討をしてきておりました。後半になって少しテーマが変わりましたので、今の規格化のところはペンディングをしているのですが、将来的にまた航空機として使うことを考えていく際には、規格化を進めていくことになります。また、後半のスカンジウムを添加した合金については、現状、自動車向けをターゲットにしているということに加え、鉄道車両といったところをターゲットに考えている次第です。この場合には、先ほどの神戸製鋼の村上様と同様に、個社での認定といった形になりますので、そちらはそういった動きになるものとして考えております。

【松田分科会長】 ありがとうございます。それでは、藤井先生、お願いします。

【大阪大学\_藤井】 私大阪大学の藤井です。私のほうは、先ほど申し上げたとおりですが、FSW に関しては幾つかある接合方法の中でも少し歴史のある方法であり、やっとならば ISO にこぎ着け始めたというところになります。ですので、もっと新しい接合技術が広く使われるようになってからの話であると思います。現状としてはこういった形として考えている次第です。

【松田分科会長】 ありがとうございます。続きまして、秋宗様、お願いします。

【ISMA\_秋宗】 ISMA 本部の秋宗です。今までのご説明の中で、融雪塩散布地域のガルバニック腐食に関するところが少し抜けておりました。その評価方法の ISO 化というところにおいても検討を進めていることを補足させていただきます。

【松田分科会長】 ありがとうございます。福岡委員、どうぞ。

【福岡委員】 今日のプレゼンの中で少し分からなかった部分に対し、今の皆様のお話を伺い、しっかり戦略的に関わられていることを理解いたしました。どうもありがとうございました。

【松田分科会長】 ありがとうございます。それでは、ほかにかがでしょうか。

柳本委員、どうぞ。

【柳本委員】 柳本です。今日は半分しか伺うことができず申し訳ございません。いろいろとありがとうございました。今ご説明がありましたように、こういう大きな組織体につくられて 10 年もおやりになられ

たということで、プロジェクト後に続く非常にいろいろな成果を出されているものとして強く認識いたしました。また、非常に大事な点として、例えば構造材料を見たときに、その材料置換というのは進むものの、構造材料がなくなるということはありえないと思っておりますし、構造材料をより先進的なものに持っていくというのは我が国における宿命であると考えます。そのときに、こういう ISMA のような組織体をつくられて、こういう大きなプロジェクトを進めたという経験を、いかにその後に継承するかという観点が極めて重要なポイントになるのではないのでしょうか。もちろん、実施者の方の世代も変わっていきますし、推進側の体制も変わってくるではありますが、これをいかにこの後に、例えば 2045 年を見据えたときに何をやるのかであるとか、続けていくような考察、作戦を練っていくことも非常に大事ではないかという気がいたします。もし、今の部分について何か、先生方及び実施者の方からコメントなり要望がありましたら、伺いたく思います。

【松田分科会長】 ありがとうございます。岸 PL、お願いします。

【ISMA\_岸 PL】 今の点に関しては、始める前から気にしていた部分となります。始めたときから終わるときには拠点でもつくらないとどうしようもないと。そして、その拠点をつくる際に、途中では ISMA の継続をも考えてはどうかという議論を随分といたしました。ですが、単に継続というのは資金も伴いますから、すぐにはいかないということもありまして、5 か所の拠点をつくり継続するという方向に持っていったところなんです。また、私個人も、本当にやりたいテーマが今めじろ押しでございます。そういうことから言っても、いい意味での拠点の活動に期待をいたしますし、早めにフィージビリティスタディを通して若干の資金の投入を忘れないでほしいと願っている次第です。

【柳本委員】 ありがとうございます。

【松田分科会長】 ありがとうございます。ほかに、いかがでしょうか。

奥田分科会長代理、お願いします。

【奥田分科会長代理】 航想研の奥田です。本日は、どうもありがとうございました。10 年間にわたる研究開発の話伺い、技術開発にしるマルチマテリアルにしる、非常によい成果を上げられているものとして理解いたします。特に、今お話のあったように、今後の継続を考えて拠点をつくられたというのは本当に素晴らしいことであり、ここは高く評価されるべきものと思っております。恐らく今後の問題としては、今おっしゃられていたように、設立した拠点をどのように活用していくかということだと思いますが、研究成果は非常に素晴らしいものですので、これを活用していくことは十分にできるはずだと考えます。確か資料 63 ページの図にもありましたが、拠点の中で、例えば海外との連携であるとか、企業様を取り込んでいくといったことがあるかと思いますが、特に個人的に非常に注目したいのは、ベンチャーや中小企業のところなんです。航空機の世界も、今、電動化や水素化といった新しい動きが起きていますが、海外でそれをリードしているのは、ほとんどがスタートアップとなっております。ですから、この拠点の中で、そういうスタートアップの方々を引っ張り出してきて、それで次のステップをどんどんつくっていただきたいと思います。

それからもう 1 点として、お金の問題もあると思うのですが、それは要するに営業みたいな話であり、顧客をどのように取り込むのかということになります。そういう意味であれば、自動車だけでなく、ほかの業種であるとか、航空機においてもこういうものがあれば非常によいのではないかと考えておりますし、そういったお客様を取り込むユーザー会のようなものを設置するであるとか、いろいろな方策があると思います。そういったことから、今後この拠点をどのようにして継続的に次のステップへと生かしていくのか、将来へ向けたところとして何かお考えがありましたら、お聞かせいただきたいと思います。

【松田分科会長】 ありがとうございます。秋宗様、お願いします。

【ISMA\_秋宗】 ISMAの秋宗よりご回答いたします。この2年間で一番苦勞をしているのが、各拠点での資金調達の話であったと思います。5か所ある中でルールがそれぞれ違うといったところにおいて統一に行くのは非常に難しく、まずはそれぞれのところで、できるだけ企業を入れたコンソーシアムをつくっていただきたいというのが一番の優先順位であったと考えます。そして2番目に、企業と行くのが何となく肌に合わないところにおいては、国の別のプロジェクトに参加をして、その中での参加者におけるグループ化で研究開発及び発展をしていってほしいという、その二本立てぐらいで来ており、8か所がほぼ次につながる話を実行できているという認識を持っているのですが、そこから先の話に向けてはなかなか難しいもので、やっている方も今後、リーダーは代わられると思いますから、ここでまたどういう形で継続させていくのかというのは、それぞれの中で議論を行っていただき、我々としては終わりとなりますが、国ないしはNEDOがある程度サポートをしていくということが必要になってくるのではないかと思うところです。

【奥田分科会長代理】 どうもありがとうございました。ぜひ、継続性を維持して取り組んでいただけたらと思います。

【松田分科会長】 ありがとうございました。岸PL、お願いします。

【ISMA\_岸 PL】 一つだけ付け加えさせていただきます。朝の内閣府のSIPプロジェクトの話になります。これは、こちら(革新的新構造材料等研究開発)が自動車中心となり、そちら(SIPプロジェクト)は航空機になるのです。航空機の場合は、今上げられていたように、割とスタートアップ的な雰囲気がございます。第3期のSIPは、ベンチャーをつくるという材料研究が前面に出ており、ベンチャーを目指したSIPということになっています。そのあたりが、どうも航空機と自動車の違いでありまして、自動車というのは、朝にもお話をしたように巨大な産業でございます。いい意味でのヒエラルキーが出来上がっているのではないかという気もいたしますので、少しこの辺は難しいところです。

あともう一つとして、本当は構造材料というのは面白い材料で、案外変わらないといえますか、なくなるのではありません。鉄の後にアルミが出たから鉄がなくなるということはないと。鉄が出てアルミが出て、そしてチタンが出てマグネシウムが出て、CFRPが出ているという中で、前のものが消えるということはほとんどありません。そういったところで、どのように維持をしながら傳承するのかという、特別な考え方も必要です。もちろん、本当はこういうISMAのようなものが継続していると面白いとは思いますが。

【奥田分科会長代理】 少し今、航空機のスタートアップの話をいたしました。実はスタートアップはきっかけでございまして、実際の研究開発の中身を見ますと、それこそ実績のある方々がそれを指導されているのです。スタートアップだけではできませんので。そういった意味では、今回この研究成果をやられている皆様は、本当に実績のある非常に高いレベルのことをやっておられますから、スタートアップを入れてきて、そこがやるのではなくて、そこを指導していくというような形のやり方もすごく重要ではないかと思った次第です。

【松田分科会長】 ありがとうございました。それでは、予定の時間がまいりましたので、議題7の全体質疑はここまでとし、次の議題に移ります。

## 8. まとめ・講評

【松田分科会長】 議題8に移ります。

これから講評をお一人ずつ行ってまいります。その発言順序につきましては、冒頭に行った挨拶と逆の順番となりまして、最初に柳本委員から始まり、最後に私、松田ということで進めてまいります。

それでは、柳本委員、よろしく申し上げます。



【柳本委員】 柳本です。非常に長い期間をかけられた大変重要な成果を出され、それら全体をまとめられたことに対し深く敬意を表します。また、10年プロジェクトということで、研究内容をその時期によってかなり柔軟に変更する形を取られており、新しいテーマを取り込むこともあれば、あるテーマは外に出すといったことをされながら築き上げられた10年の成果を見させていただけたことは、大変うれしい限りでございました。また、重要なポイントとしては、先ほども申しましたように、これをいかに継承していくかということだと思います。ただ継承するのではなく、これを発展的継承としてどのように行っていくのかというのは、大変深い問いになりますので、もうプロジェクトは終わってしまったものの、引き続き事業者様、そしてPLを含めた皆様でお考えいただけたのなら、大変ありがたいと思います。以上です。

【松田分科会長】 ありがとうございます。続きまして、福岡委員、よろしくお願います。

【福岡委員】 福岡です。今日は、1日どうもありがとうございました。柳本先生と重なってしまいますが、10年間という非常に長い期間の研究を推進され、かつ、これだけ多くの関係者、関係組織があるという中でしっかりと成果を出されている。それも目標を上回る成果を出されたことは非常に素晴らしいと思います。私自身、新しい材料、新しい工法を使うという製品のアプリケーション側の仕事をしているのですが、今回のようなさらに良い材料を目指した活動というのは、日本が得意とする材料技術という観点でも、非常に価値が高い研究成果と思いました。また、最後に質問いたしました国際競争化という観点についても、皆様しっかりとしたお考えを持たれており、非常に頼もしく思った次第です。今後とも期待しております。改めまして、本日はどうもありがとうございました。

【松田分科会長】 ありがとうございます。続きまして、清水委員、よろしくお願います。

【清水委員】 清水です。先ほどの議題7において、少しこちらの講評と混同したコメントを差し上げてしまったのですが、改めて述べさせていただきたく思います。まず、先ほど福岡先生のほうから追加で質問をいただいたことにより、いろいろと標準化について伺うことができまして、非常にうれしく思っております。全体を通じて、当初設定された目標を、社会情勢の変化に応じながら柔軟に見直しをされ、そして一部においては繰り上げて目標達成をされたことは大変素晴らしい成果であったと思います。特に、脱炭素、省エネルギーといった問題を前にしながら、大変技術的な観点から解決されたことに敬意を表す次第です。その一方で、一部、脱炭素、持続可能性といったテーマにつきましては、いろいろと社会情勢の変化もございまして、必ずしも自動車だけにとどまらない話もありますので、ぜひ今回の成果をそうした新しい社会ニーズ、市場の要求に対して応えられるような形で生かされると、なおよいのではないかと思います。標準化につきましても、一部追加でコメントを賜りましてありがとうございます。願わくは、こういうテーマにつきましては、やはり新しいコンセプトを日本から打ち出すぐらいのつもりで臨めると本当はよいのではないかとと思うところです。要素技術の標準化というのも大事ですが、そもそも材料と接合という、古くて新しいテーマであるのかもしれませんが、このコンセプトそのものを日本がつくり変えて、そこにおける用語や概念の定義、そして、そこにひもづく新しい評価技術の設定といったところにも踏み込めるとよいのではないかと期待をするところです。以上です。

【松田分科会長】 ありがとうございます。続きまして、小笠原委員、よろしくお願います。

【小笠原委員】 小笠原です。本日は、長い時間にわたりまして、どうもありがとうございました。既に3人の委員の先生方がおっしゃられているように、技術の成果について大変素晴らしい成果が得られているものと理解してございます。非常に幅広い技術分野として、材料から成形、接合技術、マルチマテリアルといったところを非常にきちんとマネジメントされたISMA様の役割というのが非常に大きかったのではないのでしょうか。目標設定についても、岸先生がおっしゃいましたように、この10年間で社会情勢が非常に変わっているという中で、その2年、3年できちんと見直しをされながら目標値を変

更されたというのも大変すばらしかったと思います。今後においては、拠点運営というのが少し心配な点でございますが、大阪大学様が非常にすばらしい一つのケースをつくっておられますので、こういったことがほかに波及し、拠点がきちんとしたものとなって今後も運営をされていくことを願います。そうしたことで、先ほどあった国際標準化であるとか、また今後の周辺技術のプロジェクトへもつながっていき、よりよいものとなるのではないのでしょうか。以上です。

【松田分科会長】 ありがとうございます。続きまして、大窪委員、よろしく願います。

【大窪委員】 大窪です。本日は、朝から本当に多彩な発表をいただきましてありがとうございます。非常に多くの切り口から、いろいろな意味における材料構造の研究開発をされていることが大変よく分かりました。ほかの委員の方々がおっしゃったとおりですが、成果がすばらしかったからこそ成果の継承と発展において非常に大事であると改めて考えさせられた次第です。資料の43ページにおいて2030年までの構想を示されておりますが、非常に社会的にも期待できる、終了後も期待を持てるプロジェクトになっているものと感じております。特に、若い方への技術伝承の観点として、技術と、そして接合を考えておられるのであれば、恐らく違うことも各社様において考えられていらっしゃるでしょうし、そういう今後の発展を大変期待できる成果であったと思っております。以上です。

【松田分科会長】 ありがとうございます。続きまして、奥田分科会長代理、よろしく願います。

【奥田分科会長代理】 奥田です。これまでの議題において多くお話をさせていただきましたので、これ以上あまり話すこともないと思うところでもあります。本当に皆様の成果には敬意を表したく思います。本日の議論の中でも出ていましたように、今後の10年間においても動きがまた大きく変わるのであろうといったところは、まさにそのとおりだと考える次第です。しかしながら、皆様はもう既にその10年を見通していろいろな課題を見つけていることと思います。「課題」という言葉は、言い換えれば、これが「事業機会」になるわけです。課題が事業機会になり、その事業機会になったものが、恐らく拠点の継続に結びついていく。そのように思いますので、ぜひ今後10年においてもいろいろなとチャレンジをしていただけたら幸いです。ありがとうございます。

【松田分科会長】 ありがとうございます。それでは最後に、本日の分科会長を仰せつかりました松田より講評を行います。本日は、長時間にわたりましてご説明をいただいたこと、そして資料の準備におかれましても非常に綿密に行っていただきまして、誠にありがとうございます。先ほど来、お話に出ているように、10年間と一口に申しましても、これというのは非常に長い期間に当たります。本当にプロジェクトを牽引された岸先生をはじめ、関係された皆様に対しまして心より敬意を表する次第です。各テーマそれぞれの表において達成であるとか、「○」や「◎」といった表記がございましたが、私自身も材料組織をやっている身として、あの「○」の裏には非常に多くの時間を皆様が費やされたものとして理解しております。本当に陰でこのプロジェクトを支えてこられた多くの皆様に対しまして御礼を申し上げたく思います。革新的な材料創製、技術の開発ということで、拠点及びテーマとして8つになるかと思いますが、それを目指され、さらにそれを達成されたということは本当に大きな偉業であると感じております。ぜひとも、これを「拠点」という言葉だけで残されることなく、既に委員の先生方からも上げられているように、ただただデータの集積という形で終わらせられることなく、それを質的にも人的にも今後継続的に発展と展開をさせていただくような仕組みであるとか、そういったことへの関わりを持っていただきながら、日本の材料科学、産業の活性化、国際化に向けて新たな活路を。産業界、工業界におけるものを見いだせるように、そういった指針といいますか、我々の灯台になっていただけるようなことを心より期待いたします。以上です。

【中島専門調査員】 委員の皆様、ご講評を賜りまして誠にありがとうございます。ただいまのご講評を受けまして、経済産業省の土屋様、材料・ナノテクノロジー部の林部長、岸PLより順にコメントを賜りたく思います。それでは、最初に土屋様から、どうぞよろしく願います。

**【経済産業省\_土屋】** 経済産業省 開発課の土屋と申します。最終結果報告会におきまして、皆様、朝早くから大変お疲れさまでございました。特に実施者の ISMA の関係者並びに実施研究機関の皆様からは、目標の妥当性、成果、さらには今後の社会実装に向けた取組等についてご説明いただき、そして委員の先生方におかれましては、評価とともに今後に向けた示唆に富むご意見を賜りましたこと誠にありがとうございました。ご存じのように、本プロジェクトは 10 年前に岸先生を代表として立ち上げた経産省のビッグプロジェクトであります。その進捗成果、あるいはプロジェクトの在り方を含め注目をされておりましたが、いずれのテーマにおいても目標を達成され、さらには新しい機能の発現なども見いだされてきておりました。さらに、本日ご評価をいただいた先生方からのご意見、そして展示会に出席した際のアンケート結果から、80%以上の方が「満足した成果である」といった内容であったことから判断しましても、本プロジェクトというのは大きな成果が得られたものと理解してございます。一方、プロジェクト自体の目標は達成をしたわけではあるものの、社会実装に向けてはまだまだ課題や少し時間があるように思います。本プロジェクトでは、迅速な社会実装に向け、5 機関 9 拠点を形成したということであり、今後はその拠点を軸にし、産学官が密に連携されたエコシステムとなりまして、多様な分野での社会実装となることを期待しております。また、こうしたイノベーションシステムを機能させるためには、特にものづくりにおける人材育成が非常に喫緊な課題であります。こうした課題に対しても、本年度から NEDO 講座として人材育成を行っていくなど、今後に向けた取組においても期待をいたします。経産省では、CO<sub>2</sub>削減に対する GX プロジェクトはもとより、本プロジェクトでも後半取り組んでいただいたサーキュラーエコノミーの実現に向けた成長志向型の循環型の経済対策というものを順次取り組んでまいります。本日もスカンジウムの問題などが上がりましたが、資源の乏しい日本においては、いかに効率よく資源循環を行うかというところで、日本の強みである高強度・高純度、高耐久部材と再部材化していくなどの課題がありますが、そのためには今回のテーマであるマルチマテリアルの接合分離技術や、高強度でありながら分離しやすいような設計技術などといった課題に対しても、本プロジェクトの成果が生きていくものと期待しております。最後になりますが、本プロジェクトの成功というのは、岸先生の強いリーダーシップとドリームチーム構成に加え、評価委員の先生方並びに NEDO 関係者の皆様のご尽力のたまものであると思っております。社会実装に向けては、今後とも皆様からご協力をいただけましたら幸いです。本日はどうもありがとうございました。

**【中島専門調査員】** 土屋様、ありがとうございました。続きまして、林部長、どうぞよろしく願いいたします。

**【NEDO 材料・ナノテクノロジー部\_林部長】** 材料・ナノテクノロジー部の部長をしております林でございます。皆様、本日は長時間にわたりましてご議論をいただきまして、誠にありがとうございました。また実施者の皆様、岸先生をはじめ、ISMA の皆様におかれましては、これまでの研究成果をしっかりとまとめていただきまして、今日は遺憾なくご発表をいただけたのではないかと考えております。一部、恐らく公開という形の中では少しお話をいただけなかった部分もあるのかもしれませんが、それはまたしっかり各社でのノウハウとして取っていただくことにより、事業化に向けて進めていただくこととして期待をさせていただき次第です。また、拠点化の考え方であるとか、あるいは拠点における今後の継続について、ご指摘をたくさん頂戴いたしました。それに対しましては、私どもの事業というのは未来永劫続けるわけにはいかないという部分がもちろんございますが、発展的な次への進歩というところにおいては大いに応援をしてまいる所存です。奥田先生方から頂戴した「課題＝事業機会である」といったご意見は、非常に貴重なキーワードであると感じました。これはビジネスの新しい考え方でもあると思います。今、グリーンイノベーションというような形で政府が進めている政策においても共通する概念であるのではないのでしょうか。新たに決まってしまった、「たが」というものは、

実は突破することによって新たなイノベーションが生まれる。それにより新たなビジネスチャンスであるとか、我が国の競争力が高まるものと思っております。今回の拠点のほうでも、事業の成果ということをまずは種にして始めていかれると思いますが、この拠点の形成過程もそうですし、ISMA の皆様、あるいは企業の皆様ともに研究されてきたその考え方や、ご苦労された経験というものが非常に貴重な財産になっていると思います。その拠点における教育であるとか、あるいは、また新たに持ち込まれた課題に対する対応に大いに役に立つのではないかと私は考えます。ぜひ、そういった無形の財産も含めまして、今後、私どもとしましても、新しい次のステップとしてのよいご提案があった際には、喜んで採択という方向で行っていきたいと思っておりますし、当然、経済産業省の皆様にもご協力をいただきながらの予算化ということもしてまいりたいと思っております。ここはお願いとしか言えませんが、そういったことをしてまいる所存です。ISMA の皆様、企業の皆様にもご支援をいただきながら、我が国の産業技術力の強化へとつなぐような仕事をさせていただけたらと思っておりますので、今後ともどうぞよろしくお願いいたします。皆様、本日は大変お疲れさまでございました。

【中島専門調査員】 林部長、ありがとうございます。それでは最後に、岸 PL、どうぞよろしくお願いいたします。

【ISMA\_岸 PL】 評価委員の先生方、本日はどうもありがとうございます。また、METI はもちろんのこと、NEDO の皆様、本当にお世話になりました。少しだけコメントをさせていただきますが、国プロというのは協調的にやるためにつくったものでありますが、本当に面白いテーマというのは、協調的ではなく競争的となります。そして、我々が一番苦労したところもその点にありました。例えばデータを表に出せないなどが挙げられるでしょうか。しかし、最先端で最も大事なのは競争領域なのです。国プロというのは、競争と協調を含んでこそ面白いのだということを知ってまいりましたし、国プロづくりというのは、その辺に一番の重要点があると感じております。それから、標準、規格はもちろんのこと、国際連携の話においては、本当は G7 などと一緒にこういう研究を行う時代ではないかという気もしております。その一方で、経済安全保障であるとか、リサーチ・インテグリティ、これがまた非常に厳しくなってやりにくくなっているのも事実であるかと思っております。ですから、国際的な連携というのが今後のこういったプロジェクトの非常に重要な課題であると感じている次第です。それから一つ重要なのは、プロジェクトの大きさになります。今回本当に思ったところですが、これだけプロジェクトが大きいから、各材料とそれに共通した接合、それから CAE に手を出せました。そういったことから、時には、「大きいからできる」という話もあるかと思っております。大きいことでは効率が悪くなるというのが一般的ですので、この兼ね合いが今後の国プロの大きな課題であると感じるところでもあります。その点、非常に今回はご支援をいただきましてやりやすかったということをつけ加えさせていただきます。あと若干の課題としては、METI のアドバイザリーボードで、「こういう METI のプロジェクトではあるが、学術的な貢献もしているのですか」と聞かれて、なかなかそこに対する返事は難しいところもあると感じているところです。当然研究でありますから、実用化までを含めた学術貢献というのが重要であると感じております。そういったところとなりますが、改めまして皆様、本当に大変お世話になりました。一定の成果を出せたのではないかと考えるとともに、今後の継続は特に重要であると受け止めております。最後に、この分野の発展を祈りまして、私からのお礼の言葉に代えさせていただきます。どうもありがとうございます。

【中島専門調査員】 岸 PL、ありがとうございます。

【松田分科会長】 それでは、以上で議題 8 を終了といたします。

9. 今後の予定、その他

10. 閉会

## 配布資料

資料 1	研究評価委員会分科会の設置について
資料 2	研究評価委員会分科会の公開について
資料 3	研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘と非公開資料の取り扱いについて
資料 4-1	NEDO における技術評価について
資料 4-2	評価項目・評価基準
資料 4-3	評点法の実施について
資料 4-4	評価コメント及び評点票
資料 4-5	評価報告書の構成について
資料 5	プロジェクトの概要説明資料（公開）
資料 6	プロジェクトの詳細説明資料（公開）
資料 7-1	事業原簿（公開）
資料 7-2	事業原簿（非公開）
資料 8	評価スケジュール
番号なし	質問票（公開 及び 非公開）

以上

以下、分科会前に実施した書面による公開情報に関する質疑応答について記載する。

「革新的新構造材料等研究開発」（終了時評価）分科会

ご質問への回答（公開分）

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 5・全体 (最終ユーザー 想定)	最終ユーザとして、海外の自動車メーカも想定しているのでしょうか。	小笠原 委員	海外の自動車メーカも想定していますが、サプライチェーンの構築を考えると、まずは日本メーカからになると想定します。また、海外にも特許を多く出願していますので海外メーカにも相当の影響があると考えています。いずれにしても開発技術の採用は各企業の方針によりますが、材料置換や従来技術からの置換により省エネルギー効果を生み出すことから、海外の自動車メーカにも積極的に採用いただきたいと考えます。
資料 5・全体 (社会実装への 課題)	資料全体を通して、社会実装に向けたサーキュラーエコノミーやサプライチェーン、(国際)標準化などの観点からの技術課題抽出と具体的な取り組みに対する説明があまりなかったように感じました。(資料 7 では所々に記載がありました。) これらの観点からの研究開発は各社による自主的な取り組みだけでは限界もあり、公的な支援が効果的なように感じています。社会実装に向けた今後 10 年間の具体的な活動の中で、これらの観点からの取り組	小笠原 委員	社会実装までは様々な課題が残っていると思っており、本プロジェクトではサーキュラーエコノミーやサプライチェーンまで踏み込むことができませんでした。その課題を解決するために拠点を構築しました。一つの拠点では解決できない課題を各拠点が連携することで解決スピードも上がります。また国内だけでは解決できない場合にも国際連携を進めることで課題解決を進めることができます。国際標準化につきましても、積極的に海外の拠点や学会に参加いただき、場合によっては日本主導の標準化を目指します。(接着関連では一部国際連携をしています)

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
	みをどのように進めることを想定しているのかをご教示いただけませんかでしょうか。		
資料 5・P10 (社会実装への課題)	社会実装段階での課題として、現時点で想定されている項目があれば教えて頂きたい。(例： 素材コストダウン、特殊製造工程の自動化、など)	福岡委員	<p>社会実装を進めるためには、製造面では、革新素材に適した製造プロセス技術、加工技術を開発または普及させることが必要であり、品質面では、時間依存型の特性（疲労、腐食、水素脆化）評価技術の開発が必要だと考えています。</p> <p>素材によっては、コストダウンも必要ですし、LCA の観点からその材料に変えたら CO<sub>2</sub> が減るのかという検討やリサイクル出来るのか考慮することも必要です。</p> <p>また、素材のコストダウンだけでなく、部品点数が削減出来るかなどの検討も必要です。</p> <p>適用分野を日本の自動車メーカーと考えた場合には、混流生産出来るのか（どうしたら出来るか）も課題となります。</p>
資料 5・P13 (知財)	実用化段階で他組合員の保有する知財の実施が必要な場合、原則実施許諾する基本方針となっているが、無償許諾という意味ではなく、特許使用に対する対価を支払う、もしくは相互使用交渉する、といった有償協議が前提との理解で正しいか？	福岡委員	<p>その通りです。</p> <p>参考 「革新的新構造材料等研究開発」プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針 3.(8) 知的財産権の実施許諾 ②プロジェクトの成果の事業化のための実施許諾 プロジェクト参加者がフォアグラウンド IP を用いてプロジェクトの成果を事業化するために必要な範囲で、他のプロジェクト参加者は、保有する知的財産権について実施許諾することを原則とする。</p>

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
			<p>ただし、知的財産権を実施許諾することにより、当該知的財産権の保有者の既存又は将来の事業活動に影響を及ぼすことが予想される場合には、実施許諾を拒否することができるものとする。このほか、例外として認める範囲（特に、バックグラウンド IP の取扱い）については、プロジェクト参加者間の合意に基づき必要な範囲で明確化するものとする。</p> <p>実施の範囲、実施料その他の事項について当事者間の協議が難航し、プロジェクトの成果の事業化に支障を及ぼすおそれがある場合は、知財運営委員会において調整し、合理的な解決を図るものとする。</p> <p>③プロジェクト参加者以外の者への実施許諾との関係プロジェクト参加者が、保有するフォアグラウンド IP について、他のプロジェクト参加者を実施許諾する場合、プロジェクト参加者以外の者を実施許諾する場合と同等又はそれよりも有利な条件で行うものとする。</p>
資料 5・P18 (軽量化による CO <sub>2</sub> 排出量削減効果)	CO <sub>2</sub> 削減効果には軽量素材製造時の CO <sub>2</sub> 排出量増加の悪影響も加味しているか？または、社会実装段階で評価に取り入れる予定はあるか？	福岡委員	<p>プロジェクト開始時には、軽量素材の使用による重量減、それに伴う CO<sub>2</sub> 削減量の算定が行われていました。その後の急速な社会情勢の変化により、製造時・廃棄時の CO<sub>2</sub> 排出量も加味した LCA 視点が必須となり、新材料の材料代替効果定量技術の開発を行っています。</p> <p>社会実装を担う各メーカーは、当然 LCA 視点を取り入れながら社会実装を進めて行くものと考えられます。</p>
資料 5・P18 (車体軽量化目標の妥当性)	研究開始時点での想定より、将来の地上モビリティにおける（化石燃料でない）電気・水素動力が占める割合が増大していると考えるが、車体重量軽減	福岡委員	<p>実施者としては、2023 時点での自動車の車体構造がモノコックボディであり、走行時の CO<sub>2</sub> 削減に貢献するため、story は順当だと考えています。</p>



資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
	(=半減)は現時点でも妥当な目標と 考えてよいか? (非化石燃料動力モ ビリティに対する軽量化の貢献度、ま たは、軽量素材の製造時排出CO <sub>2</sub> やコ ストを加味した場合、目標を変更する 必要性はないか?)		
資料5・P19- 21 (社会実装の モニタリン グ)	2023年度以降の「各社持ち帰り」フ ェーズにおいて、経済産業省や NEDO、もしくは産総研のハブなど によって、各社での社会実装活動に 対する定期的なモニタリングを実施 する予定でしょうか。それとも従前 の国プロのように、各企業からの社 会実装への取り組み状況について定 期的にNEDOに対して報告を求め る程度の受動的な活動を想定されて いるのでしょうか。	小笠原 委員	連携研究ハブにはモニタリングとし ての役割は持たせていませんが、 それぞれの分野で課題がある場合 に各拠点が連携し課題解決を行 うとともに新規国プロへの参加等 も検討していきます。 なお、NEDOは、NEDOプロジェクト で得られた成果の活用状況や社会 的・経済的裨益の把握等を目的と して、終了したNEDOプロジェクト を対象に追跡調査・評価を実施し ています。具体的には、プロジェクト 終了後5年間の研究開発進捗状況 に関するアンケート調査等実施し 、その後も実用化の状況など必要 に応じ、成果等のヒアリングを実 施しています。
資料5・P22 (社会実装へ の支援)	本事業により個々の技術としては優 れた成果が達成されておりますが、 「各社持ち帰り」が原則とは言え、 社会実装に向けて一定の公的資金 による支援も有効だと思われま す。財務省への概算要求をしてく るということですが、どのような スキームで、どのような規模の 予算確保を検討し、どこに予算 投下されることを想定している のかをお差	小笠原 委員	財務省への概算要求は2021年度、 2022年度のプロジェクト予算 のことであり、プロジェクト終 了後の予算要求ではありません。 ただし、2023年10月からの NEDO特別講座を各拠点で開 講予定ですので、その講座開講 予算はNEDO負担で支援する予 定です。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
	し支えのない範囲で教えていただけませんか。基本的にはマルチマテリアル連携研究ハブや、各研究拠点の運営を支援対象としているのでしょうか。それとも、各企業へのフォローアップとして、社会実装のための個別予算の提供を想定しているのでしょうか。		
資料 5・P25 (マルチマテリアル車体設計における接合条件)	マルチマテリアル設計技術開発では、「接合方法を含めた評価」を実施しているが、隣接する接合相手との相性（接合可否、所要強度など）を加味した最適化を行なった、という理解で合っているか？	福岡委員	トポロジー最適化の段階では、接合方法の影響は考慮せず、剛体接合を仮定しています。なぜなら、トポロジー最適化では多くの剛性制約のもと、質量の最小化を行っており、接合方法が剛性に与える影響は小さいと考えられるからです。 トポロジー最適化から得られた最適構造から作成した板組構造では、衝突性能の定量的な評価を行うため、接合方法の影響を考慮した接合モデルを導入して解析を行っています。
資料 5・P26 -29 (マルチマテリアル連携研究ハブの役割とマネジメント)	産総研に設置予定の「マルチマテリアル連携研究ハブ」が成果の社会実装において果たすべき役割は大きく、その活動に期待をしています。ハブを運営するための体制・予算・設置期間・責任と権限など、具体的な内容についてはどのようにお考えでしょうか。すでに予算措置はなされているのでしょうか。 ハブには一定の権限と責任を有し、連携業務統括にリーダーシップを発揮する	小笠原委員	マルチマテリアル連携研究ハブの運営は、産総研のマルチマテリアル研究部門長を長とする合計3名程度で運営します。運営に対する特段の予算措置はありません。各拠点の紹介や拠点間連携の仲介といったフォローアップが中心となります。一方、現在計画している NEDO 特別講座等の予算を伴うプロジェクト等を積極的に利用し、且つハブのホームページの作成と活用を通じて成果普及に努めたいと考えます。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答 説明
	プロジェクトマネージャーが置かれる予定でしょうか。それとも、フォローアップを中心とした受動的な活動が中心になるのでしょうか。		
資料 5・P37, P41 他 (アウトカム 目標)	<p>アウトカムとして、378 億円の投入と売上予測 1.2 兆円という数字が強調されています。本プロジェクトで開発された「革新的新構造材料」は、基本的には従来材料の置換となるものと理解しています。新構造材料の実用化（社会実装）により、従来の構造材料の売上額に対して市場（売上額）はどの程度、増大（成長）するとお考えでしょうか。換言すれば、1.2 兆円のうち本事業による売り上げ拡大はどの程度と見込んでいるのでしょうか。</p> <p>それとも軽量化による CO<sub>2</sub>削減効果という付加価値の方がはるかに重要なので、材料置換に伴う売上額の差を議論することにはあまり意味がないという理解の方が正しいでしょうか。その場合は、市場規模 1.2 兆円というのを強調されていることにはどのような意図があるのでしょうか。</p>	小笠原 委員	<p>2017 年当時に算出しています。2014 年度の世界の自動車生産量は約 9 千万台であり、Energy Technology Perspective2012 の予測では 2020 年には約 1 億台、2030 年には約 1 億 3 千万台が見込まれています。経産省の「金属素材競争力強化プラン」によると、このように伸張している自動車産業に対して、2013 年度での自動車等の構造・骨格を形成する素材産業は輸出額（約 5.2 兆円）であり、自動車の輸出額（約 12 兆円）の約半分です。2030 年には自動車用構造材料の輸出額は 7.5 兆円になり、このうち半数の自動車に軽量構造材料が適用されるとすると、3 兆円超の売り上げが見込まれます。これから、材料置換および日本企業のシェアを関したシナリオから 1.2 兆円の事業規模と推測しました。プロジェクト当初は CO<sub>2</sub> 排出量削減量から原油削減効果を明示していましたが、事業規模を金額に置き換えて明示しています。</p>

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料5・P53 図の左下 (重量半減の 達成見込み)	2030年には、車体重量が半減する結果になるような図が書かれています。この事業の成果により、重量が半減する見込みが成立しているのでしょうか？成果の記述に際しては、強度や破断ひずみなどの力学的な特性値の成果は記述されていますが、全体の結果としての車体重量の低減の定量的な成果の達成値、または予測値の記載が要らないでしょうか？検討下さい。	大窪 委員	プロジェクト開始時には、軽量素材の使用による重量減、それに伴うCO <sub>2</sub> 削減量の算定が行われていました。その後の急速な社会情勢の変化により、製造時・廃棄時のCO <sub>2</sub> 排出量も加味したLCA視点が必須となり、プロジェクトにおいて新材料の材料代替効果定量技術の開発を行っています。 社会実装を担う各メーカーは、当然LCA視点を取り入れながら社会実装を進めて行くものと考えられます。 なお、開発した革新材料・技術を用いたマルチマテリアル車体部品の試作・評価の結果、実用化の必要要件に対して大きな課題はなく、軽量化は部品毎に異なりますが30%~60%（資料7-1表3-2.1.2-3）となり、また、トポロジー最適化計算では40%強の削減効果（資料7-1 p3-2.1.1-43）を達成しました。
資料5・ P57,P58,P96 (諸課題への取 り組み)	アウトプットの目標設定においては、性能目標と製造技術・量産技術の確立が主たる対象とされてきたと理解しました。マルチマテリアル化（異材接合）やCFRPを量産品である自動車へ適用するのにあたっては、性能や量産技術の確立に加えて、アフォーダブルなコスト、LCA・リサイクル、サーキュラーエコノミー、サプライチェーン等に関わる（技術的な）諸課題の解決も重要ではないかと感じています。本事業ではCFRPの工程廃材リサイクルなどの例を除くと、この点での課題設定についてはあまり積極的にはなされ	小笠原 委員	本プロジェクト開始当初は、革新材料の研究開発が目標でしたが5年での達成が見込まれてきたためマルチマテリアル化という目標にシフトしました。その中でCFRTPやアルミはリサイクルの課題を取り入れ、またLCAでの代替え材料による環境影響評価ツールの作成を行いました。リサイクルについては大きな課題の一つであることから、自社での取り組みのほか、NEDOの他のプロジェクトで実施しているものもあります。※マルチマテリアル連携研究ハブは、そのような課題についての解決策等も拠点との連携を図りながら早期社会実装を目指します。 ※P21003 アルミニウム素材高度資源循環システム構築事業  本プロジェクトは車体軽量化のための材料開発、の位置づけで研究を開始しています。前半の5年間で車体を軽量化できる可能性のある材料開発を行いました。鉄鋼材料、アルミニウム材

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
	<p>ていないように感じられました。これらの観点からの研究開発課題の抽出と課題解決について、本事業ではどのような方針で取り組まれてきたのでしょうか。また今後はどのように対応していくことを想定しているのでしょうか。来年度からの「各社持ち帰り」の中で、「自主的」に取り組んでいただくことを前提としているのでしょうか。もしくはリサイクル技術については材料メーカーではなく、ユーザやリサイクルメーカーが確立することが前提となっているのでしょうか。</p>		<p>料、チタン材料、マグネシウム材料、カーボン繊維強化複合材料で、強度向上に努めています。</p> <p>後半の5年間はLCA、リサイクル、腐食・水素脆化の研究を行いました。金属のリサイクルは、工程から供給される品質が分かっている材料からの回収技術、カーボン繊維のリサイクルは、水素タンクに限定した材料からのリサイクルとしています。LCAは産総研のIDEAデータベースを活用したソフト開発を行っています。腐食では海外での走行試験実施後のサンプル評価まで実行しました。プロジェクト評価としては多くの課題でTRL5からTRL6までの技術の実証段階をクリアしたものと考えています。</p> <p>一方、サプライチェーンについては量産化にかかる開発となるため個社での業務と想定しています。サーキュラーエコノミクスは、マーケットからの回収は前NEDOプロジェクトで実施しており、このプロジェクトでは実施しないこととしました。</p> <p>本プロジェクトではTRL6-7以降は個社での開発領域ですが、終了後5年間は知財規定に沿った活用になると推測しています。前半は持ち帰り研究中心、後半は協調領域として公的機関をテーマリーダーとして協調課題を増加させてきました。プロジェクト終了後は当該公的機関は分野拠点としてその分野の技術のハブとなりますので拠点機関中心に事業のフォローを行って行く予定です。</p>

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 5・P63 (拠点の国際 関係)	開発した技術の「国際標準化」について具体的な戦略や予定があれば教えて頂きたい。	福岡 委員	各事業者による成果の標準化に関する取り組みが行われています。 詳細は資料 7-1 4.成果の実用化・事業化に向けた取り組み及び見通しについて の該当箇所を参照ください。 ・マグネシウム開発合金の標準化、難燃性評価手法の標準化 ；4-2-総合車両-3、4-2-産業技術総合研究所-3 ・融雪塩散布地位型ガルバニック腐食評価法の ISO TC156 WG 6 規格化；4-2-日本パーカライジング-1 ・革新炭素繊維の評価手法の標準化；4-2-三菱ケミカル-2 ・マルチマテリアル接合技術の評価・解析手法、シミュレーシ ョン手法等の標準化；4-2-大阪大学-5 ・熱可塑性 CFRP の繊維長及び繊維配向等の繊維性状測定・評 価技術の標準化；4-2-名古屋大学-1 ・リサイクル炭素繊維の平均的機械特性および各種不純物の評 価分析手法の国際標準化；4-2-産業技術総合研究所-3,4
資料 5・P79 図の中央付近 (車体重量半 減の見通し)	ここでは、2 つの展示により、車体の軽量化の 50%の目標が達成したようにも見えますし、あるいは、この段階から 50%の目標値を設定したように見えます。車体の 50%の目標は、どの単位または範囲で（例えばある部品の範囲等で）達成できたのでしょうか？資料 6 中には重量低減の効果の記載がありますが、資料 5 中のどこかにも、重量低減の成果に関する記載が要らないのでしょうか？検討下さい。	大窪 委員	本プロジェクトは、「自動車を中心とした輸送機器の抜本的な軽量化（半減）」に向けて、革新的接合技術の開発や、鋼材、アルミニウム材、チタン材、マグネシウム材、炭素繊維及び CFRP 等、輸送機器の主要な構造材料の高強度化等に係る技術開発を一体的に推進してきました。 結果を、出来れば車体全体での軽量化効果を数値で示せると良かったのですが、そこまでには至りませんでした。 なお、開発した革新材料による軽量化効果については、開発した革新材料・技術を用いたマルチマテリアル車体部品の試作・評価の結果、軽量化は部品毎に異なりますが 30%～60%（資料

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
			7-1 表 3-2.1.2-3) となり、また、トポロジー最適化計算では40%強の削減効果(資料 7-1 P3-2.1.1-43)を達成しました。
資料 5・P79 資料 6-3、 資料 6-5 (車体重量半減の見通し)	マルチマテリアル最適設計と試作を通じ、車体重量の半減は達成できたか? もしくは 2030 年に達成できる見通しを得たか?(資料 6-3 ではルーフは重量半減、資料 6-5 ではサイドシルは9%軽減、など必ずしも個々要素では半減できておらず、全体としての達成程度を教えてください。)	福岡 委員	結果を、出来れば車体全体での軽量化効果を数値で示せると良かったのですが、そこまでには至りませんでした。開発した革新材料による軽量化効果については、開発した革新材料・技術を用いたマルチマテリアル車体部品の試作・評価の結果、部品毎に異なりますが 30%~60% (資料 7-1 表 3-2.1.2-3) となり、また、トポロジー最適化計算では 40%強の削減効果(資料 7-1 P3-2.1.1-43)を達成しましたので、2030 年ではほぼ半減を達成する見通しです。
資料 6-2・P7 左下のグラフ (グラフ記載 補足)	「(980MPa 含む) (1180MPa 含む)」の記載の意味がわかりません。何の条件の値の事でしょうか?	大窪 委員	2枚重ねの場合は、アルミニウムと980MPaの引張強さの鋼板で実施しており、3枚重ねの場合は、その板組の中に1180MPaの引張強さの鋼板を含んでいる、という意味です。
資料 6-2・ P10 (アルミ・ CFRP 製部材 のリサイク ル)	マルチマテリアル部材のリサイクル技術確立は、社会実装上の大きな課題ではないとのご判断でしょうか。もしくはリサイクルについては、材料メーカーではなく、ユーザである自動車メーカーやリサイクル企業が取り組むべき課題なので、材料メーカーの R&D 対象外ということになるのでしょうか。	小笠原 委員	アルミニウムや CFRP のリサイクル技術は、軽量化を進める上で非常に重要だと考えています。そのために、自動車メーカーに求められるのはより分別しやすい設計や材料種の集約があります。また、接合に関しても易解体性を考慮した技術の開発が必要になると考えます。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 6-3・ P14 等全般に 関連して (CFRP ハイ ブリッド部材 のリサイク ル)	ハイブリッド部材はリサイクルでの問題 はありますか？従来素材と比べての 経済的な優位性について可能な範囲で お聞かせください	奥田 委員	CFRP スキン は熱硬化材、超軽量 CFRTP コアは熱可 塑性材と異なる樹脂系であるため、別 々の回収システムが必要と考えられま す。リサイクルの観点では、従来素材 と比べての経済的な優位性は認められ ません。
資料 6-3・ P16 (CFRP 部材 のリサイク ル)	CFRP 部材のリサイクル技術確立は、 社会実装上の大きな課題ではないとの ご判断でしょうか。もしくは CFRP の リサイクルについては、材料メーカー ではなく、ユーザである自動車メーカ やリサイクル企業が取り組むべき課題 なので、材料メーカーの R&D 対象外 という考え方でしょうか。	小笠原 委員	CFRP 製品 からのリサイクル、リユースだけでなく 、各種中間基材の端切れなどの工程端 材をいかに活用して循環サイクルを回 すかの視点も重要と考えています。
資料 6-4・P4 等全般に 関連して (海外にお ける革 新的な鋼 板材・接 合技術開 発)	海外では同様な材料や接合技術の開 発は行われていますか？もし、行われ ている場合、比較評価はどのようにな りますか？	奥田 委員	アメリカの エネルギー省が実施したプロジェクト では、0.3C-1.6Si-3Mn 鋼の Q&P 材 で 1.5GPa-EL19%の材料をラボベース で実現した例などがありますが、伸び と背反する特性である穴広げ率や遅 れ破壊特性まで考慮した材料設計はな されておらず、かつ、それを実機で製 造できることを示した点は、技術的に 優位性があります。 一方、接合技術については、超高強 度・高延性材料を実際に用いた接合 技術の研究を行うことは、材料開発を 行った当事者以外は現状では実施で きないため、得られた知見については 独自知見になっていると考えていま す。



資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 6-4・P5 グラフ中 (数値の補足 説明)	凡例となっている 15,000 等の数値の記載の意味が不明瞭です。何の値でしょうか？	大窪 委員	図の作成過程で表記が消えてしまい申し訳ございません。 TS×EL (引張強度(MPa)と伸び(%))の積) です。その旨を表記いたします。 TS 1500MPa (1.5GPa)と EL 20%をかけて、TS×EL = 30,000 のライン上が本プロジェクトにおける目標の目安となり、そこに対する達成度を把握しやすくするために、25,000、20,000、15,000 の線を記載しています。
資料 6-4・P5 グラフ中 (伸び 0 材)	0.6%C の条件の鋼の一部のデータでは Elongation の値が 0 となっていますが (横軸上にプロットがありますが)、これは間違いないのでしょうか？完全脆性材料、との意味でしょうか。	大窪 委員	完全にゼロでは無いですが、コンマ数%とゼロに近い値になっています。完全では無いですが、少し塑性変形した段階で脆性的に破壊するような、脆い材料となっていました。0.6%C 鋼でも熱処理を工夫して、組織制御してやれば、もう少し延性を高められる可能性があります。熱処理条件を横並びで評価した結果としては、高 C 化が行き過ぎると脆化が起こるといった結果になります。
資料 6-4・P5 グラフ中 (穴広げ率)	ここではじめて「穴広げ率：λ」、との用語が使われています。この変数の定義を記載下さい。	大窪 委員	JIS Z 2256 (金属材料の穴広げ試験方法) に規定されている成形性の指標の一つになります。鋼板に打ち抜きで 10mm の穴をあけ、その穴を円錐状のポンチで押し広げるような変形を加えた際に、割れが生じるまでどれだけ穴が広がるかを評価する試験方法になります。強度や伸びと背反する傾向があり、高強度・高伸び材では劣化する傾向があります。
資料 6-5・ P23 (スカンジウム)	スカンジウムは高価で、基本、副産物として得られますが、今後の低価格化をどのようにお考えでしょうか？また、他の用途、例えば、AM 向け粉末などとの兼ね合い (航空機向けでは多	奥田 委員	豪州で採掘されている酸化スカンジウムは、既に低価格化が始まっていると聞いており、添加元素としての Sc も低価格化が進むと考えています。また Sc は凝固組織の微細化効果とともに、積層造形後の熱処理による強度向上が可能のため、AM 向け素材としての用途の可能性も考えています。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
	少高くても使いつつあります) は、どのようにお考えでしょうか？		
資料 6-6・P4 (LFW 技術 の優位性)	海外での LFW の開発状況 (例えば、航空機エンジン向けの MTU など) と比較しての優位性、課題があればお聞かせください	奥田 委員	海外では、Ti 合金の航空機エンジン部材を LFW を用いて製造する手法が開発されています。ただし、この場合の LFW は従来の技術で、固相接合ではあるものの比較的高温で接合されています。したがって、接合部は変態を伴う組織となり、後熱処理による組織の最適化が必要です。 一方、本事業で開発した低温 LFW 技術によって、接合温度を制御することが可能となりましたので、B トランザス以下の低温で接合することで組織を変態させず接合を完了させることができます。この技術は、既に鉄鋼、Al 合金、Ti 合金などで確認済みですが、今後、それぞれの部材に適用するためには、Dwell 疲労など、より用途に特化した特性の把握が必要となります。
資料 6-6・ P19 (LFW の 航空機エンジン 適用への課題)	LFW を航空機エンジン向けに適用する場合の、今後、特に解決すべき課題についてお聞かせください	奥田 委員	航空機エンジン部材に適用するためには、様々な温度における引張特性、疲労特性、クリープ特性、破壊靱性、Dwell 疲労特性などの把握や、応力除去熱処理の必要性確認および熱処理後の機械的特性調査、ブリスク部材製造技術の開発などが必要です。
資料 7-1 位置 づけ必要性 1-7 資料 7-1 実用 化事業化 4- 1-1 (社会実 装に向けたモ ニタリング)	実用化は今後徐々に進むと思います。効果を今後継続的に、10 年程度の期間にわたり Measure していく予定はあるのでしょうか？	柳本 委員	NEDO は、NEDO プロジェクトで得られた成果の活用状況や社会的・経済的裨益の把握等を目的として、終了した NEDO プロジェクトを対象に追跡調査・評価を実施しています。具体的には、プロジェクト終了後 5 年間の研究開発進捗状況に関するアンケート調査等実施し、その後も実用化の状況など必要に応じ、成果等のヒアリングを実施しています。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
料 7-1 と 資料 6-2、6-3 との比較 (成果達成 度)	誤解がございましたら恐縮ですが、資料 7-1 の 4,5 ページ 2.1.1.2 研究開発成果の表 3-2.1.1-2 ではすべての事項が◎と評価されております。一方で、例えば資料 6-2 の 3,4 ページ、6-3 の 3 ページ等の「計画との差異」では○が主で、◎ が少なく辛口にチェックされているように思われました。総括と個別での評価の観点が異なるようにお見受けしますが、何か理由があればお教えください。	松田 委員	総括と個別の評価ではなく、対象が異なるためです。 表 3-2.1.1-2 ではマルチマテリアル設計技術の開発の達成度は各目標とも上回る◎と評価しています。 資料 6-2 の P3,P4 マルチマテリアル部材ドアの試作や資料 6-3 の P3 超軽量 CFRTP/CFRP ハイブリッド部材の開発では目標通り○と評価しています。
資料 7-1 研究開発項目 ② (接合技術開 発目標の考え 方)	循環経済を念頭においたものづくりのあり方も今後は求められる。今回、目標はいずれも母材破断となるレベルを目指すところがあるが、界面破断で同等のものを目指すことは合理的な目標とはなり得なかったのか。ものづくりの現場における実用性、また（製品の）安全性等に関する観点から背景事情があったのであれば、ご回答を頂きたい。環境配慮設計・易解体設計という観点で考えれば、異種材がなるべく混ざらないように界面で単体分離を進めたほうがよいと考えることもできる（使用済み製品を破碎処理する際に界面破断が優先的に起こるのであれば、それは単	清水 委員	現時点の自動車メーカーの認識として、接合部が破断することは母材よりも強度が低いことを示しており、その継手接合を施工したのは自動車メーカーであるので、製造者責任の視点から母材破断であることを求めます。もし、母材が破断した場合（自動車の場合、衝突しても一般には座屈変形などをして破断には至りません）には、設計とおりの母材が調達できているのかどうかということになります。 一般に、溶接接合構造物の安全性の考え方には、第 2 次大戦中の艦艇が水素脆化によって、溶接部で破断し、船体が真っ二つに折れたことなどが大きく影響しています。 ご質問の易解体性については、リサイクルや LCA などの点から必要ですが、何よりも重視すべきは、乗員の安全性の確保が最優先されると考えています。

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
	体分離を促す易解体設計となるのではないかと考えるため)。		
資料 7-1 研究開発項目 ③ 研究開発項目④ 研究開発項目⑤ (革新的チタン・アルミ・マグネの自動車以外の用途)	自動車以外の用途に向けた検証・実験はどこまで進めてきているのかご回答を頂きたい(特に航空機・宇宙・防衛等)	清水委員	<ul style="list-style-type: none"> <li>・チタン：チタン合金の大型鋳塊を使用し、実際の航空機用模擬部品を切削加工で試作し、その時の被削性の検証を行っています。</li> <li>・アルミ：7000系開発材を実機で製造し、それを用いて実際の航空体用構造部品を試作し、性能の検証まで完了しています。</li> <li>・マグネ：高速鉄道車両の実構体と床パネルの試作を実施し、特性・性能の検証を行っています。</li> </ul>
資料 7-1 革新的マグネシウム合金全体 (実用化)	気密疲労試験は終了しましたのでTRL5レベルには十分到達したと思います。今後の実用化はJRとに委ねられているとの認識でよろしいでしょうか？あるいは今後実用化研究を進められる予定でしたら、教えていただきたい思います。	柳本委員	JR および車両メーカーとの共同研究に進んでいくものと思います。
資料 7-1 熱可塑性CFRP全体 (コスト)	自動車車体への適用を考えた場合、それに見合うコストとなる見通しは得られたのでしょうか？	柳本委員	<p>まずは、素材と部品性能から検討しました。</p> <p>コスト的には広く自動車車体に適用するほどには至っていませんが、コストにも合う箇所から採用されていくものと考えます。</p> <p>また、LCAの観点が重要になっていますので、革新的炭素繊維の実用化やリサイクル技術の普及も重要と考えます。</p>

資料番号・ ご質問箇所	ご質問の内容	委員名	回答
			説明
資料 7-1 研究開発項目 ⑨ (戦略・基盤 技術の優位 性)	世界市場で比較を得るためには、どのような領域がいまだ競争領域となっており、また協調領域となっているのか、自動車及び付随用途を中心に戦略立案の基礎となっている認識をご回答いただきたい。また、それを踏まえて立案した標準化戦略との関係性についても改めてご説明を頂きたい。この度開発した接合技術や素材の評価方法等ではすでに評価手法が何かしらの形で存在しているので、改めての標準化には着手していないものが多いと考えればよいのか。	清水 委員	自動車業界では、電動化、自動運転、MaaSといった領域が競争領域となり、多くの人員が割かれていると認識しています。そのため、自動車メーカーにおいて材料開発に割ける材料関係の人員は少なくなっています。そのため、自動車業界における材料開発はだんだん協調領域になってきていると考えます。そういう意味では、本プロジェクトのような多くの材料メーカーが集まり、そこにユーザーである自動車メーカーも加わり、共通の目標で開発するという取組は、時宜にかなったものであったと考えます。 そうした中で、材料メーカー、表面処理メーカー、自動車メーカーが集まり、マルチマテリアル部材の腐食評価技術の開発を行い、国際標準化を進めているところです。 また、多くの材料・技術を開発していることから、統一的な標準化戦略というよりは、個別分野・材料毎の標準化になりますが、マグネシウム合金の規格化、リサイクル炭素繊維の評価方法の標準化なども行っています。接合技術の標準化については検討中です。
資料 7-1 実用 化・事業化 4-1-1 (拠点間の連 携、拠点の存 続)	成果の事業化見通しを目的として、研究組合内で議論を重ね、拠点を形成したことは評価できます。 1)マルチマテリアル連携研究ハブに各拠点の代表者が集まった会議は年に何回計画されているのか、2)8拠点は何年間設置されるのか、教えて頂けないでしょうか。	柳本 委員	1)企業等からの連携の案件があった場合に関連する拠点との会議は行う予定です。 2)各拠点の設置期間ですが、全ての拠点が何年と言うことではありません。現在、各拠点でコンソーシアム等の民間企業との連携を開始しています。各テーマが社会実装されるまでは、何らかの活動を行うと考えます。 また、2023年度以降、各拠点は人材の育成と産学官の交流をはかる目的でNEDO特別講座を活用することを想定しています。

## 参考資料 2 評価の実施方法

## NEDOにおける技術評価について

### 1. NEDOにおける技術評価の位置付けについて

NEDOの研究開発の評価は、事業の実施時期毎に事前評価、中間評価、終了時評価及び追跡評価が行われ、研究開発のマネジメントにおけるPDCAサイクル（図1）の一角と位置づけられています。さらに情勢変化の激しい今日においては、OODAループを構築し、評価結果を計画や資源配分へ適時反映させることが必要です。

評価結果は、被評価事業等の資源配分、事業計画等に適切に反映させることにより、事業の加速化、縮小、中止、見直し等を的確に実施し、技術開発内容やマネジメント等の改善、見直しを的確に行っていきます。

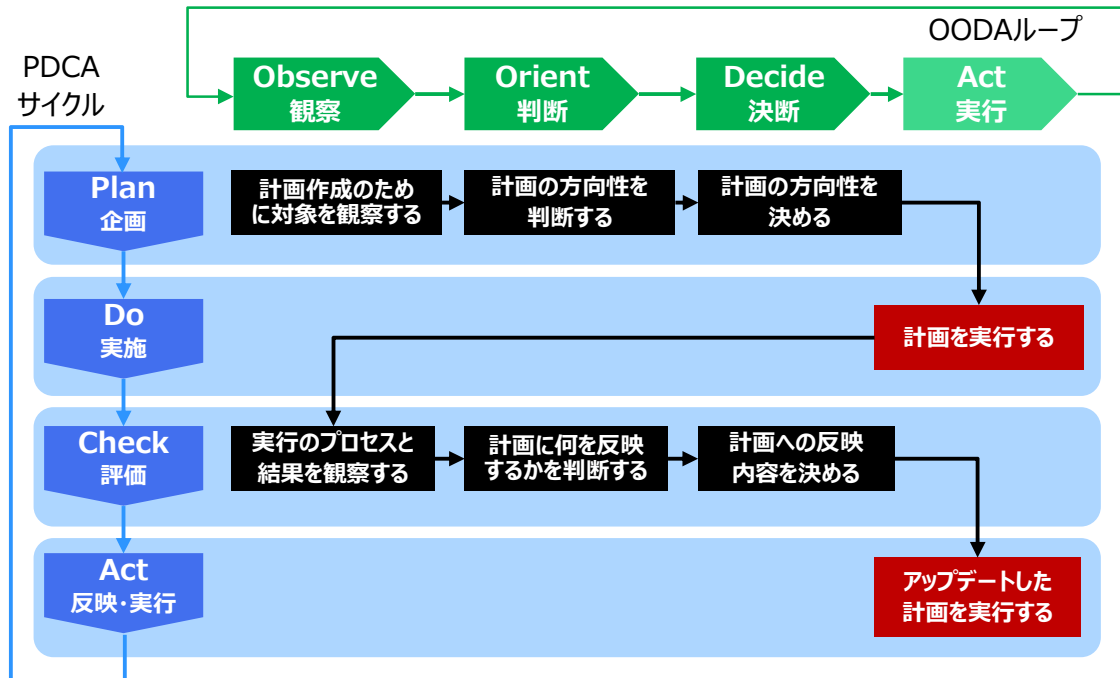


図1 研究開発マネジメント PDCA サイクルと OODA ループ組み合わせ例

### 2. 技術評価の目的

NEDOでは、次の3つの目的のために技術評価を実施しています。

- (1) 業務の高度化等の自己改革を促進する。
- (2) 社会に対する説明責任を履行するとともに、経済・社会ニーズを取り込む。
- (3) 評価結果を資源配分に反映させ、資源の重点化及び業務の効率化を促進する。

### 3. 技術評価の共通原則

技術評価の実施に当たっては、次の5つの共通原則に従って行います。

- (1) 評価の透明性を確保するため、評価結果のみならず評価方法及び評価結果の反映状況を可能な限り被評価者及び社会に公表する。なお、評価結果については可能な限り計量的な指標で示すものとする。
- (2) 評価の明示性を確保するため、可能な限り被評価者と評価者の討議を奨励する。
- (3) 評価の実効性を確保するため、資源配分及び自己改革に反映しやすい評価方法を採用する。
- (4) 評価の中立性を確保するため、可能な限り外部評価又は第三者評価のいずれかによって行う。
- (5) 評価の効率性を確保するため、研究開発等の必要な書類の整備及び不必要な評価作業の重複の排除等に務める。

### 4. プロジェクト評価の実施体制

プロジェクト評価については、図2に示す実施体制で評価を実施しています。

- (1) 研究開発プロジェクトの技術評価を統括する研究評価委員会をNEDO内に設置。
- (2) 評価対象プロジェクト毎に当該技術の外部の専門家、有識者等を委員とした分科会を研究評価委員会の下に設置。
- (3) 同分科会にて評価対象プロジェクトの技術評価を行い、評価報告書（案）を取りまとめた上、研究評価委員会に諮る。
- (4) 研究評価委員会の審議を経て評価報告書が確定され、理事長に報告。

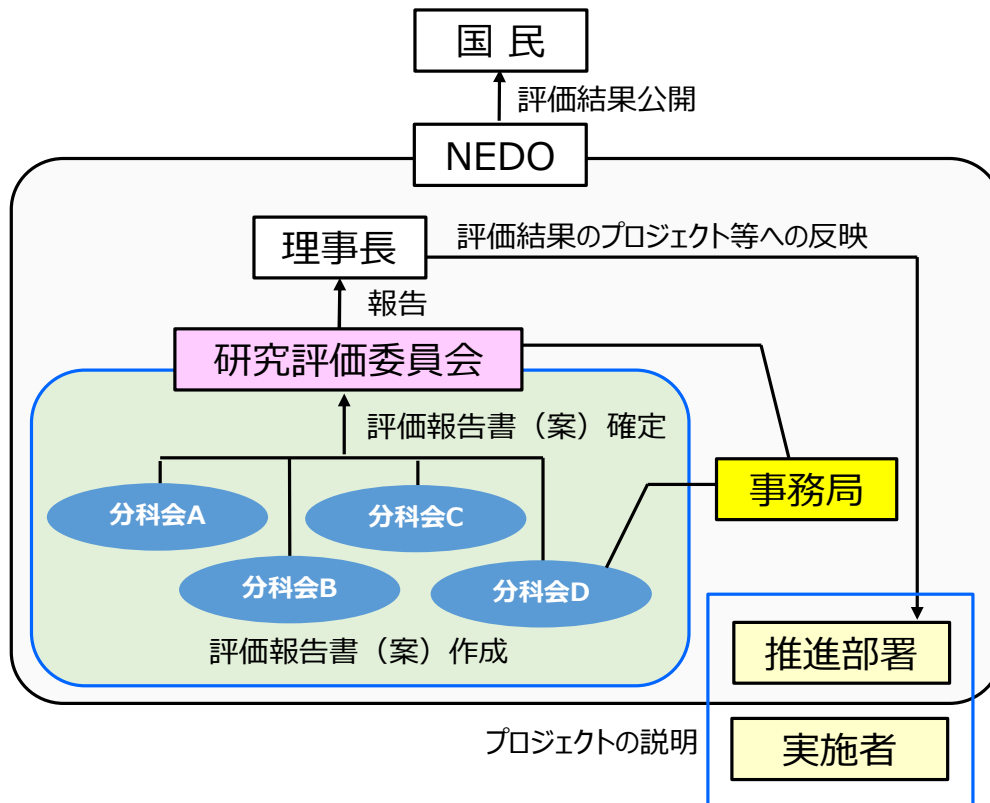


図2 評価の実施体制



## 5. 分科会委員

分科会は、研究開発成果の技術的、経済的、社会的意義について評価できる NEDO 外部の専門家、有識者で構成する。

## 6. 評価手順

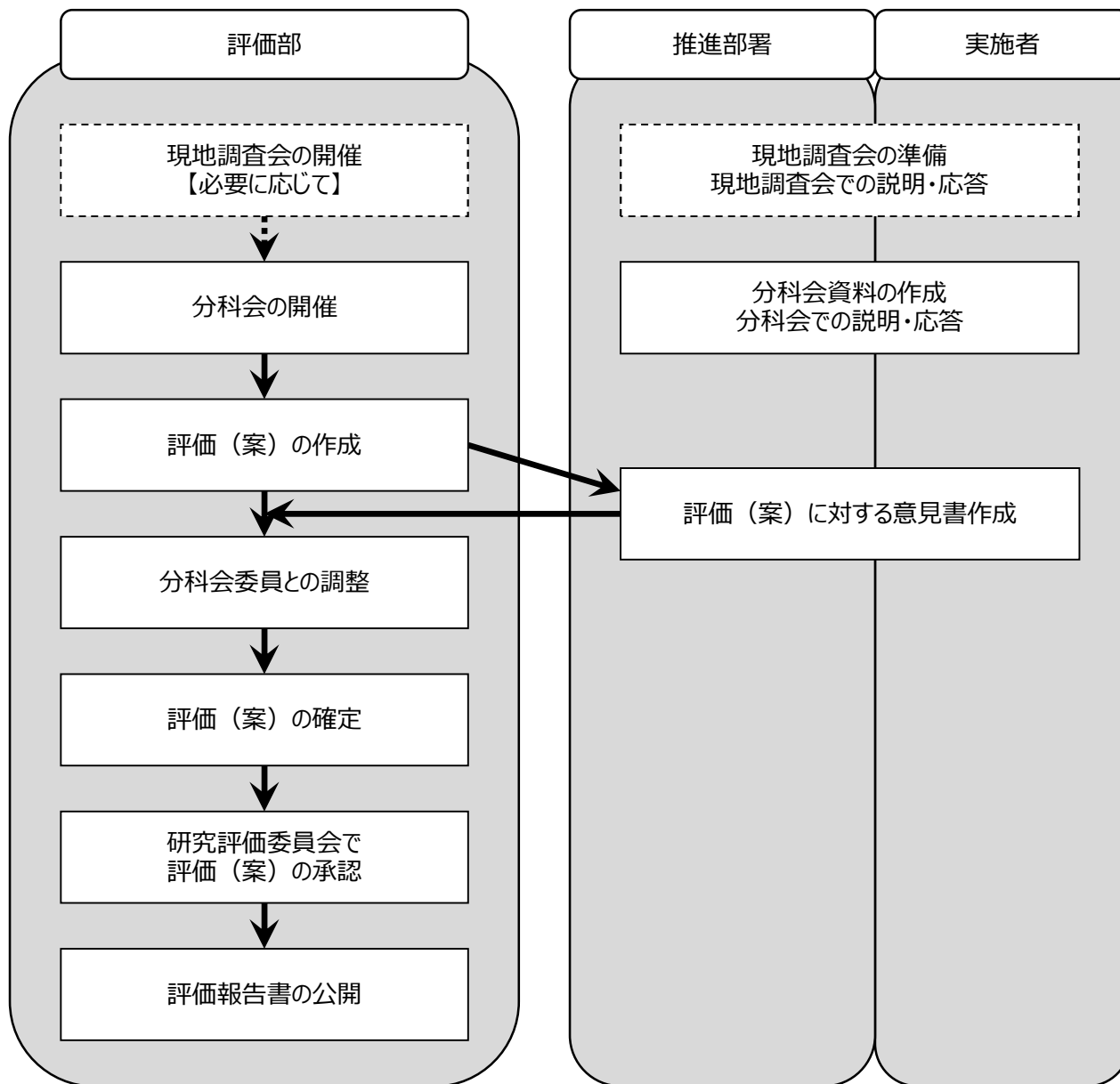


図 3 評価作業フロー

「革新的新構造材料等研究開発」（終了時評価）分科会に係る  
評価項目・評価基準

1. 意義・アウトカム（社会実装）達成までの道筋

(1) アウトカム達成までの道筋

- ・「アウトカム達成までの道筋」\*の見直しの工程において、外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を考慮したか。

※ 「アウトカム達成までの道筋」を示す上で考慮すべき事項

- ・将来像（ビジョン・目標）の実現に向けて、安全性基準の作成、規制緩和、実証、標準化、規制の認証・承認、国際連携、広報など、必要な取組が網羅されていること。
- ・官民の役割分担を含め、誰が何をどのように実施するのか、時間軸も含めて明確であること。
- ・本事業終了後の自立化を見据えていること。
- ・幅広いステークホルダーに情報発信するための具体的な取組が行われていること。

(2) 知的財産・標準化戦略

- ・オープン・クローズ戦略は、実用化・事業化を見据えた上で、研究データも含めた上で、クローズ領域とオープン領域が適切に設定されており、外部環境の変化等を踏まえてもなお、妥当であったか。
- ・本事業の参加者間での知的財産の取扱い（知的財産の帰属及び実施許諾、体制変更への対応、事業終了後の権利・義務等）や市場展開が見込まれる国での権利化の考え方は、オープン・クローズ戦略及び標準化戦略に整合し、研究開発成果の事業化に資する適切なものであったか。
- ・標準化戦略は、事業化段階や外部環境の変化に応じて、最適な手法・視点（デジュール、フォーラム、デファクト）で取り組んでいたか。

2. 目標及び達成状況

(1) アウトカム目標及び達成見込み

- ・外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえてアウトカム指標・目標値を適切に\*見直していたか。
- ・アウトカム目標の達成の見込みはあったか（見込めない場合は原因と今後の見通しは妥当であったか）。

※ アウトカム目標を設定する上で考慮すべき事項

- ・本事業が目指す将来像（ビジョン・目標）と関係のあるアウトカム指標・目標値（市場規模・シェア、エネルギー・CO<sub>2</sub>削減量など）及びその達成時期が適切に設定されていること。
- ・アウトカムが実現した場合の日本経済や国際競争力、問題解決に与える効果が優れていること。
- ・アウトカム目標の設定根拠は明確かつ妥当であること。
- ・達成状況の計測が可能な指標が設定されていること。

(2) アウトプット目標及び達成状況

- ・外部環境の変化及び当該研究開発により見込まれる社会的影響等を踏まえてアウトプット指標・目標値を適切に※見直していたか。
- ・最終目標は達成しているか。未達成の場合の根本原因分析や今後の見通しの説明は適切だったか。
- ・副次的成果や波及効果等の成果で評価できるものがあったか。
- ・オープン・クローズ戦略や実用化・事業化の計画を踏まえて、必要な論文発表、特許出願等が行われていたか。

※ アウトプット目標を設定する上で考慮すべき事項

- ・アウトカム達成のために必要なアウトプット指標・目標値及びその達成時期が設定されていること。
- ・技術的優位性、経済的優位性を確保できるアウトプット指標・目標値が設定されていること。
- ・アウトプット指標・目標値の設定根拠が明確かつ妥当であること。
- ・達成状況の計測が可能な指標（技術スペックとTRL※の併用）により設定されていること。

※TRL：技術成熟度レベル（Technology Readiness Levels）の略。

3. マネジメント

(1) 実施体制

- ・実施者は技術力及び実用化・事業化能力を発揮したか。
- ・指揮命令系統及び責任体制は明確であり、かつ機能していたか。
- ・実施者間での連携、成果のユーザーによる関与など、実用化・事業化を目指した体制となっていたか。
- ・個別事業の採択プロセス（公募の周知方法、交付条件・対象者、採択審査の体制等）は適切であったか。

- ・本事業として、研究開発データの利活用・提供方針等は、オープン・クローズ戦略等に沿った適切なものであったか。また、研究者による適切な情報開示やその所属機関における管理体制整備といった研究の健全性・公平性（研究インテグリティ）の確保に係る取組をしたか。

## (2) 研究開発計画

- ・アウトプット目標達成に必要な要素技術の開発は網羅され、要素技術間で連携が取れており、スケジュールは適切に計画されていたか。
- ・研究開発の進捗を管理する手法は適切であったか（WBS<sup>※1</sup>等）。進捗状況を常に関係者が把握し、遅れが生じた場合、適切に対応していたか。

※1 WBS：作業分解構造(Work Breakdown Structure)の略。

- ・研究開発の継続又は中止を判断するための要件・指標、ステージゲート方式による個別事業の絞り込みの考え方・通過数などの競争を促す仕組みの運用は妥当だったか。

本研究評価委員会報告は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）評価部が委員会の事務局として編集しています。

NEDO 評価部

部長 三代川 洋一郎

担当 中島 史夫

\* 研究評価委員会に関する情報は NEDO のホームページに掲載しています。  
([https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu\\_index.html](https://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_index.html))

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番地

ミューザ川崎セントラルタワー20F

TEL 044-520-5160 FAX 044-520-5162