

「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 材料・ナノテクノロジー部
-----	--

—目次—

1.概 要

2.プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について

1.事業の背景・目的・位置付け	I -1
1.1 事業の背景	I -1
1.2 事業の目的及び意義	I -3
1.3 事業の位置付け	I -4
2.NEDO の関与の必要性・制度への適合性	
2.1NEDO が関与することの意義	I -6
2.2 実施の効果（費用対効果）	I -7

II. 研究開発マネジメントについて

1.事業の目標	II -1
2.事業の計画内容	II -10
2.1 研究開発の内容及び全体スケジュールと予算	II -10
2.2 研究開発の実施体制	II -14
2.3 研究開発の運営管理	II -15
2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	II -17
3.知的財産権等に関する戦略（知財戦略、知財委員会）	II -17
4.情勢変化への対応	II -19
5.評価に関する事項	II -19

III. 研究開発成果について

1.事業全体の成果

1.1 成果の概要	III-1.1-1
-----------	-----------

2.テーマ毎の成果

2.1 革新鋼板の開発

2.1.1 「残留 γ 高度制御革新鋼板の開発」	III-2.1.1-1
2.1.2 「軽元素の有効利用による革新鋼材の開発」	III-2.1.2-1
2.1.3 「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」	III-2.1.3-1
2.1.4 「中高炭素鋼ベース高強度高延性複層鋼板の開発」	III-2.1.4-1
2.1.5 「複層鋼板の界面構造解析と特性調査」	III-2.1.5-1
2.1.6 「異相界面腐食解析の基盤技術開発（FS 研究）」	III-2.1.6-1
2.1.7 「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）」	III-2.1.7-1

2.2 革新的アルミニウム材の開発

2.2.1 「高強度・高靱性アルミニウム合金の開発」	III-2.2.1-1
----------------------------	-------------

2.2.2 「アルミニウム材新製造プロセス技術開発」	Ⅲ-2.2.2-1
2.2.3 「複層アルミ合金の開発」	Ⅲ-2.2.3-1
2.3 革新的マグネシウム材の開発	
2.3.1 「難燃性マグネシウム合金の信頼性（疲労・破壊・難燃性）評価」	Ⅲ-2.3.1-1
2.3.2 「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」	Ⅲ-2.3.2-1
2.3.3 「高強度マグネシウム材（薄板）の開発」	Ⅲ-2.3.3-1
2.3.4 「高強度マグネシウム材(押出材)の開発」	Ⅲ-2.3.4-1
2.3.5 「難燃性マグネシウム合金の耐食技術の開発」	Ⅲ-2.3.5-1
2.3.6 「難燃性マグネシウム合金の接合技術の開発」	Ⅲ-2.3.6-1
2.3.7 「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）」	Ⅲ-2.3.7-1
2.4 革新的チタン材の開発	
2.4.1 「チタン材一貫製造プロセス技術開発」	Ⅲ-2.4.1-1
2.4.2 「チタン薄板の革新的低コスト化技術開発」	Ⅲ-2.4.2-1
2.4.3 「高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発」	Ⅲ-2.4.3-1
2.5 革新炭素繊維基盤技術開発	
2.5.1 「革新炭素繊維基盤技術開発」	Ⅲ-2.5.1-1
2.6 熱可塑性 CFRP の開発	
2.6.1 「熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・応用加工技術の開発」	Ⅲ-2.6.1-1
2.6.2 「熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工技術基盤技術の開発」	Ⅲ-2.6.2-1
2.7 接合技術開発	
2.7.1 「アルミニウム／CFRP 接合技術の開発」	Ⅲ-2.7.1-1
2.7.2 「残留γ相制御中高炭素鋼板の接合技術の開発」	Ⅲ-2.7.2-1
2.7.3 「中高炭素高の革新的接合技術の開発」	Ⅲ-2.7.3-1
2.7.4 「中高炭素鋼板の PHM による実用 FSW 技術の開発」	Ⅲ-2.7.4-1
2.7.5 「アルミニウム／異種材料の点接合技術」	Ⅲ-2.7.5-1
2.7.6 「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」	Ⅲ-2.7.6-1
2.7.7 「鋼材／CFRP 等樹脂材料の接合技術開発」	Ⅲ-2.7.7-1
2.7.8 「難接合性材料の線接合技術の開発」	Ⅲ-2.7.8-1
2.7.9 「水和物架橋低温接合技術の開発」	Ⅲ-2.7.9-1
2.7.10 「中高炭素鋼／中高炭素鋼の摩擦接合基盤研究」	Ⅲ-2.7.10-1
2.7.11 「構造材料用接着技術の開発」	Ⅲ-2.7.11-1
2.8 戦略・基盤研究	
2.8.1 「新構造材料の技術・研究戦略」	Ⅲ-2.8.1-1
2.8.2 「技術動向調査分析」	Ⅲ-2.8.2-1
2.8.3 「高分子複合材料技術開発動向調査」	Ⅲ-2.8.3-1
2.8.4 「共通基盤技術の研究調査」	Ⅲ-2.8.4-1
2.8.5 「非鉄金属先導研究」	Ⅲ-2.8.5-1

2.8.6 「材料・接合等技術動向調査研究」	Ⅲ-2.8.6-1
2.8.7 「計測解析評価研究」	Ⅲ-2.8.7-1
2.8.8 「中性子線による構造材料解析技術の Feasibility Study」	Ⅲ-2.8.8-1
2.8.9 「構造用接着技術に関する Feasibility Study」	Ⅲ-2.8.9-1
2.8.10 「マルチマテリアル設計技術開発 (FS 研究)」	Ⅲ-2.8.10-1
2.8.11 「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」	Ⅲ-2.8.11-1

IV. 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

1. 事業全体の取り組み及び見通し	Ⅳ-1-1
2. テーマ毎の取り組み及び見通し	
2.1 革新鋼板の開発	
2.1.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	Ⅳ-2.1-1
2.1.2 「各社の取り組み及び見通し」	Ⅳ-2.1-2
2.2 革新的アルミニウム材の開発	
2.2.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	Ⅳ-2.2-1
2.2.2 「各社の取り組み及び見通し」	Ⅳ-2.2-5
2.3 革新的マグネシウム材の開発	
2.3.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	Ⅳ-2.3-1
2.3.2 「各社の取り組み及び見通し」	Ⅳ-2.3-5
2.4 革新的チタン材の開発	
2.4.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	Ⅳ-2.4-1
2.4.2 「各社の取り組み及び見通し」	Ⅳ-2.4-5
2.5 革新炭素繊維基盤技術開発	
2.5.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	Ⅳ-2.5-1
2.5.2 「各社の取り組み及び見通し」	Ⅳ-2.5-4
2.6 熱可塑性 CFRP の開発	
2.6.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	Ⅳ-2.6-1
2.6.2 「各社の取り組み及び見通し」	Ⅳ-2.6-2
2.7 接合技術開発	
2.7.1 「テーマ全体の取り組み及び見通し」	Ⅳ-2.7-1
2.7.2 「各社の取り組み及び見通し」	Ⅳ-2.7-3

V. 成果資料

1. 革新鋼板の開発	
1.1 特許	V-1-1
1.2 論文	V-1-2
1.3 その他外部発表	V-1-3
1.4 展示会への出展	V-1-10
1.5 受賞	V-1-10

1.6 フォラーム等..... V-1-11

2.革新的アルミニウム材の開発

2.1 特許..... V-2-1

2.2 論文..... V-2-2

2.3 その他外部発表..... V-2-4

2.4 展示会への出展..... V-2-11

2.5 受賞..... V-2-11

2.6 フォラーム等..... V-2-12

3.革新的マグネシウム材の開発

3.1 特許..... V-3-1

3.2 論文..... V-3-1

3.3 その他外部発表..... V-3-4

3.4 展示会への出展..... V-3-24

3.5 受賞..... V-3-25

3.6 フォラーム等..... V-3-27

4.革新的チタン材の開発

4.1 特許..... V-4-1

4.2 論文..... V-4-2

4.3 その他外部発表..... V-4-4

4.4 展示会への出展..... V-4-10

4.5 受賞..... V-4-10

4.6 フォラーム等..... V-4-11

5.革新炭素繊維基盤技術開発

5.1 特許..... V-5-1

5.2 論文..... V-5-1

5.3 その他外部発表..... V-5-2

5.4 展示会への出展..... V-5-6

5.5 受賞..... V-5-6

5.6 フォラーム等..... V-5-6

6.熱可塑性 CFRP の開発

6.1 特許..... V-6-1

6.2 論文..... V-6-2

6.3 その他外部発表..... V-6-7

6.4 展示会への出展..... V-6-30

6.5 受賞	V-6-31
6.6 フォラーム等	V-6-31

7.接合技術開発

7.1 特許	V-7-1
7.2 論文	V-7-1
7.3 その他外部発表	V-7-3
7.4 展示会への出展	V-7-9
7.5 受賞	V-7-10
7.6 フォラーム等	V-7-11

8.戦略・基盤研究

8.1 特許	V-8-1
8.2 論文	V-8-1
8.3 その他外部発表	V-8-6
8.4 展示会への出展	V-8-27
8.5 受賞	V-8-28
8.6 フォラーム等	V-8-30

VI. 参考文献

1.革新鋼板の開発	VI-1-1
2.革新的アルミニウム材の開発	VI-2-1
3.革新的マグネシウム材の開発	VI-3-1
4.革新的チタン材の開発	VI-4-1
5.革新炭素繊維基盤技術開発	VI-5-1
6.熱可塑性 CFRP の開発	VI-6-1
7.接合技術開発	VI-7-1
8.戦略・基盤研究	VI-8-1

(添付資料)

- ・プロジェクト基本計画
- ・事前評価関連資料（事前評価書、パブリックコメント募集の結果）

概要

最終更新日 平成 29 年 6 月 20 日

プログラム（又は 施策）名	未来開拓研究プロジェクト		
プロジェクト名	革新的新構造材料等研究開発	プロジェクト番号	P14014
担当推進部/ PM、担当者	材料・ナノテクノロジー部 PM 氏名 宮本一夫（平成 28 年 2 月～平成 29 年 6 月現在） 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 佐藤隆行（平成 26 年 1 月～平成 26 年 5 月） 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 松岡隆一（平成 26 年 1 月～平成 26 年 9 月） 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 今西大介（平成 26 年 1 月～平成 29 年 6 月現在） 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 寺田幸平（平成 26 年 6 月～平成 28 年 5 月） 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 廣井政行（平成 26 年 8 月～平成 29 年 6 月現在） 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 椎野裕（平成 28 年 6 月～平成 29 年 6 月現在） 材料・ナノテクノロジー部 担当者氏名 齋藤英紀（平成 29 年 4 月～平成 29 年 6 月現在）		
0. 事業の概要	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 ₂ 排出量の削減、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。		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>【事業の必要性】</p> <p>エネルギー消費量削減や CO₂ 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、CO₂ 総排出量の 20%近くが自動車からの排出であり、今後の CO₂ 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。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。</p> <p>【位置付け】</p> <p>本事業は経済産業省が推進する、「未来開拓プロジェクト」の一つであり、本研究開発は既存技術の延長線上にない、夢のある「未来技術開拓」を実施するものである。内閣府総合科学技術会議では「平成 25 年度科学技術重要施策アクションプラン」により、重点的取組として「技術革新によるエネルギー消費量の飛躍的削減」を実現するものと登録されている。また、日本再生戦略「グリーン成長戦略」では重点施策の「グリーン部素材が支えるグリーン成長の実現」に基づきグリーン部素材自体の革新的イノベーションを生み出すための基礎から実用化まで一貫通貫の未来開拓型の研究開発を推進し、「グリーン部素材」をテコにした成長を実現する。</p>		
II. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>研究開発項目①「接合技術開発」</p> <p>(1)チタン／チタン連続接合技術の開発</p> <p>【第 1 期目標（平成 27 年度末）】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 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 <p>【第 2 期目標（平成 29 年度末）】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 接合深さ：10 mm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（平成27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）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（平成29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）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

(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（平成27年度末）】

・接合強度：試験片の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140）の引張せん断荷重平均値以上または母材破断

・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（平成29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

(4) アルミニウム／CFRP 接合技術の開発

【第1期目標（平成27年度末）】

・接合強度：試験片の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140）の引張せん断荷重平均値以上または母材破断

・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（平成29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

(5) 鋼材／CFRP 等樹脂接合技術の開発

【第1期目標（平成27年度末）】

・接合強度：母材破断

【第2期目標（平成29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

(6) 構造材料用接着技術の開発

【第2期目標（平成29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

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

【第1期目標（平成27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（平成29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認し、量産プロセスの見通しを得る。

(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発

【第1期目標（平成27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・精錬技術と鑄造、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（平成29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認の見通しを得る。

(b) 上述の溶解・精錬技術と鑄造、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認し、量産プロセスへの見通しを得る。

(3) チタン新製錬技術開発

【第1期目標（平成27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（平成29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

・精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。

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

【第1期目標（平成27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（平成29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

(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（平成27年度末）】

・電解条件の確認

・電析メカニズムの解明

【第2期目標（平成29年度末）】

・AlCl₃系イオン液体新合成法の開発および量産法の提示

・パイロットプラントによる実証実験

(3) 複層アルミ合金の開発

【第2期目標（平成29年度末）】

・熱処理後の耐力600MPa以上

・成形前の伸び20%以上

・製造プロセス設計指針の提示

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

【第1期目標（平成27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（平成29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（平成27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（平成29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（平成27年度末）】

- ・既存の難燃性マグネシウム合金を対象として、発火メカニズムおよび腐食メカニズムの解明と評価手法の導出

【第2期目標（平成29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（平成29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。

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

【第1期目標（平成27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（平成29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

(2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発

【第1期目標（平成27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（平成29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

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

【第1期目標（平成27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（平成29年度末）】

- ・平成27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（平成27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を確立する。

(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を確認し、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解析技術を確認する。

(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を確認する。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（平成29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を確立する。

(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認する。

(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認し、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認するとともに、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認する。

(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。

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

【第1期目標（平成27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（平成29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。

(2) 炭化構造形成メカニズムの解明

【第1期目標（平成27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。

(3) 炭素繊維の評価手法開発、標準化

【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（平成29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⑧「戦略・基盤研究」

(1) 新構造材料の動向調査・技術・研究戦略

【第1期目標（平成27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（平成29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

(2) 共通基盤技術の調査研究

【第1期目標（平成27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（平成29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

事業の計画内容	主な実施事項	H25fy	H26fy	H27fy	H28fy	H29fy	
	接合技術						
	革新的アルミ材料						
	革新的マグネ材料						
	革新的チタン材料						
	革新鋼板						
	熱可塑性 CFRP						
	革新炭素繊維基盤技術						
	戦略：基盤研究						
	開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位：百万円)	会計・勘定	H25fy	H26fy	H27fy	H28fy	H29fy
一般会計							
特別会計 (電源・需給の別)		3,959	4,760	4,300	3,708	3,720	20,447
開発成果促進財源		0	0	1,570	0	-	1,570
総予算額		3,959	4,760	5,870	3,708	3,720	22,017
(委託)		3,959	4,760	5,870	3,708	3,720	22,017
(助成) ：助成率△/□ (共同研究) ：負担率△/□							
開発体制	経産省担当原課	産業技術環境局 研究開発課					
	プロジェクトリーダー	【プロジェクトリーダー】国立大学法人東京大学 名誉教授：岸 輝雄 【サブプロジェクトリーダー】国立大学法人東京大学大学院工学系研究科 教授：影山和郎					

	<p>委託先（*委託先が管理法人の場合は参加企業数及び参加企業名も記載）</p>	<p>委託先：新構造材料技術研究組合（参加40社） 東レ、神戸製鋼所、新日鐵住金、JFE スチール、マツダ、UACJ、川崎重工業、住友電気工業、IHI、日立製作所、日立パワーソリューションズ、日立金属、日立メタルプレジジョン、田中貴金属工業、セメダイン、日産アーク、東邦チタニウム、三協立山、権田金属工業、不二ライトメタル、大日本塗料、総合車両製作所、産業技術総合研究所、名古屋大学、三菱ケミカル、東洋紡、タカギセイコー、本田技術研究所、島津製作所、福井ファイバーテック、カドコーポレーション、スズキ、三菱自動車工業、日産自動車、トヨタ自動車、東邦テナックス、アイシン精機、小松製作所、共和工業、SUBARU 再委託先：サンスター技研、戸畑製作所、ミリオン化学、アート 1、木ノ本伸線、東レエンジニアリング、名機製作所、大成プラス、物質・材料研究機構、宇宙航空研究開発機構、日本マグネシウム協会、茨城県工業技術センター、福井県、石川県、広島県立総合技術研究所、総合科学研究機構、ファインセラミックセンター、大阪大学、近畿大学、大阪府立大学、名古屋大学、秋田大学、広島大学、東京工業大学、大阪工業大学、東北大学、東京大学、北海道大学、岐阜大学、京都大学、佐賀大学、九州大学、岩手大学、長岡技術科学大学、芝浦工業大学、神戸大学、山形大学、金沢工業大学、茨城大学、静岡大学、兵庫県立大学、トヨタテクノクラフト、ヒロテック、東京農工大学、帝京大学、中部大学、岡山大学、豊橋技術科学大学、理化学研究所、高エネルギー加速器研究機構、ナガセケムテックス、横浜ゴム</p>																																																
<p>情勢変化への対応</p>	<p>プロジェクトの進捗状況や技術推進委員会の結果を踏まえ、研究開発事業の見直し、新規テーマの導入を随時行う。また定期的なステージゲート審査により、テーマごとに事業化に向けた研究開発支援を行う。</p>																																																	
<p>中間評価結果への対応</p>	<p>第1回中間評価の指摘事項を踏まえ、企業間でシナジー効果生まれるよう連携強化する等、研究開発マネジメントに反映させている。また、成果の実用化・事業化を加速するために、ユーザー側企業と連携強化するとともに、成果の著しいテーマについてプロジェクトからの早期卒業を促している。</p>																																																	
<p>評価に関する事項</p>	<p>事前評価</p>	<p>平成26年3月実施 担当部 電子・材料・ナノテクノロジー部</p>																																																
	<p>中間評価</p>	<p>第1回：平成27年6月実施 担当部 電子・材料・ナノテクノロジー部</p>																																																
	<p>事後評価</p>																																																	
<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達</p>																																																	
	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="391 1366 470 1512"> <p>高強度高延性中炭素鋼の開発 [テーマ番号22]</p> </td> <td data-bbox="470 1366 478 1512"> <p>高強度高延性による基幹部加工性を有する超高温強度鋼の開発</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="391 1512 470 1624"> <p>革新鋼材の開発 [テーマ番号23]</p> </td> <td data-bbox="470 1512 478 1624"> <p>軽元素の効率的利用による革新鋼材の開発</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="391 1624 470 1758"> <p>鋼板開発 [テーマ番号24]</p> </td> <td data-bbox="470 1624 478 1758"> <p>炭素添加による基幹部加工性を有する超高温強度鋼の開発</p> </td> </tr> <tr> <td data-bbox="391 1758 470 1984"> <p>鋼/非鉄合金複層化の検討 [テーマ番号25]</p> </td> <td data-bbox="470 1758 478 1984"> <p>高強度高延性中炭素鋼の開発</p> </td> </tr> </table>	<p>高強度高延性中炭素鋼の開発 [テーマ番号22]</p>	<p>高強度高延性による基幹部加工性を有する超高温強度鋼の開発</p>	<p>革新鋼材の開発 [テーマ番号23]</p>	<p>軽元素の効率的利用による革新鋼材の開発</p>	<p>鋼板開発 [テーマ番号24]</p>	<p>炭素添加による基幹部加工性を有する超高温強度鋼の開発</p>	<p>鋼/非鉄合金複層化の検討 [テーマ番号25]</p>	<p>高強度高延性中炭素鋼の開発</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>研究開発項目</th> <th>第二中間目標 (平成29年度末)</th> <th>研究開発成果</th> <th>達成度</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>高強度高延性中炭素鋼の開発</td> <td>炭素量0.4%以上、Mn量10%以下で、強度1.5GPa以上、伸び20%以上</td> <td>0.4C-2Mn鋼にベイナイト中のセメントライト形成防止、残留γの微細化により、TS1.5GPa-EL20%を実現した。</td> <td>◎</td> </tr> <tr> <td>中炭素鋼の解析・評価手法の開発</td> <td>炭素濃度の定量化技術のI-PARCの高輝度中性子ラインへ展開するための基盤技術構築</td> <td>中性子Bragg Edge解析の解析精度の改善を行った。また、炭素解析の空間分布解析技術を構築した。</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>革新鋼材の開発</td> <td>稀少元素添加量10wt%未満で、引張強度1.5GPa以上、伸び20%以上を有する中炭素鋼の材料設計と組織制御。</td> <td>高炭素単純組成鋼をベースに軽元素を添加した小ロットサンプルを試作。加工熱処理による組織制御、組織解析、引張特性評価、等を実施し、引張強度1.5GPa、伸び15%以上を可能とする高炭素鋼の理想組織を提示。さらに、引張強度1.8GPa、伸び13%以上を可能とする軽元素を明らかにした。 また、革新鋼材の実用性能評価のため、高強度鋼の耐食性および加工性評価方法の開発に取り組んだ。</td> <td>◎</td> </tr> <tr> <td>その場観察装置の開発</td> <td>その場観察装置の改良と中炭素鋼の中高温域での挙動の観察。</td> <td>500~1200℃の温度域における、非歪イオン(SIM)像観察とESBD解析が可能な複合解析装置を開発し、中・高温域における変態・逆変態挙動および粒界移動その場解析に成功。さらに、粒界・粒内に存在する軽元素の役割の把握のため、高分解能TEM試料作成向けに、狙いのミクロンレベルエリアに限定して極薄膜領域を作成できる装置を導入し、サンプルの作製技術の高度化技術を確立した。</td> <td>◎</td> </tr> <tr> <td>鋼板開発</td> <td>TS≧1.5GPa、El≧20%(TS・El≧30,000)</td> <td>TS≧1.5GPa、El≧19%まで到達</td> <td>◎</td> </tr> <tr> <td>解析・評価手法開発</td> <td>炭素の分析下限が20ppm(点分析)</td> <td>炭素濃度既知の試料をN=16回繰り返し測定することによる測定誤差が概ね20ppm以下</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td></td> <td>鋼組織の3D評価</td> <td>3D-SEMにより、開発鋼の組織解析を行い、熱処理による組織変化を三次元的に評価</td> <td>○</td> </tr> <tr> <td>超高強度-高延性を両立する炭素鋼ベースの複層鋼板の開発</td> <td>中炭素鋼TRIP鋼およびマルテンサイト鋼を用い、層数を3~5層として試作し、1.5GPa以上、伸び20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認する。[第一中間目標：平成27年度終了のFSテーマ]</td> <td>中炭素TRIP鋼およびマルテンサイト鋼を用い、層数を3~5層として試作し、1.5GPa以上、伸び20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認した。</td> <td>△</td> </tr> <tr> <td>鋼/非鉄合金複層化の検討</td> <td>中炭素鋼との複層化に適した非鉄合金を選定し、層の幾何設計とともに界面形成の技術・条件についても検討を進める。[第一中間目標：平成27年度終了のFSテーマ]</td> <td>鋼とMg合金の接合を可能とする条件を導出</td> <td>△</td> </tr> </tbody> </table>	研究開発項目	第二中間目標 (平成29年度末)	研究開発成果	達成度	高強度高延性中炭素鋼の開発	炭素量0.4%以上、Mn量10%以下で、強度1.5GPa以上、伸び20%以上	0.4C-2Mn鋼にベイナイト中のセメントライト形成防止、残留γの微細化により、TS1.5GPa-EL20%を実現した。	◎	中炭素鋼の解析・評価手法の開発	炭素濃度の定量化技術のI-PARCの高輝度中性子ラインへ展開するための基盤技術構築	中性子Bragg Edge解析の解析精度の改善を行った。また、炭素解析の空間分布解析技術を構築した。	○	革新鋼材の開発	稀少元素添加量10wt%未満で、引張強度1.5GPa以上、伸び20%以上を有する中炭素鋼の材料設計と組織制御。	高炭素単純組成鋼をベースに軽元素を添加した小ロットサンプルを試作。加工熱処理による組織制御、組織解析、引張特性評価、等を実施し、引張強度1.5GPa、伸び15%以上を可能とする高炭素鋼の理想組織を提示。さらに、引張強度1.8GPa、伸び13%以上を可能とする軽元素を明らかにした。 また、革新鋼材の実用性能評価のため、高強度鋼の耐食性および加工性評価方法の開発に取り組んだ。	◎	その場観察装置の開発	その場観察装置の改良と中炭素鋼の中高温域での挙動の観察。	500~1200℃の温度域における、非歪イオン(SIM)像観察とESBD解析が可能な複合解析装置を開発し、中・高温域における変態・逆変態挙動および粒界移動その場解析に成功。さらに、粒界・粒内に存在する軽元素の役割の把握のため、高分解能TEM試料作成向けに、狙いのミクロンレベルエリアに限定して極薄膜領域を作成できる装置を導入し、サンプルの作製技術の高度化技術を確立した。	◎	鋼板開発	TS≧1.5GPa、El≧20%(TS・El≧30,000)	TS≧1.5GPa、El≧19%まで到達	◎	解析・評価手法開発	炭素の分析下限が20ppm(点分析)	炭素濃度既知の試料をN=16回繰り返し測定することによる測定誤差が概ね20ppm以下	○		鋼組織の3D評価	3D-SEMにより、開発鋼の組織解析を行い、熱処理による組織変化を三次元的に評価	○	超高強度-高延性を両立する炭素鋼ベースの複層鋼板の開発	中炭素鋼TRIP鋼およびマルテンサイト鋼を用い、層数を3~5層として試作し、1.5GPa以上、伸び20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認する。[第一中間目標：平成27年度終了のFSテーマ]	中炭素TRIP鋼およびマルテンサイト鋼を用い、層数を3~5層として試作し、1.5GPa以上、伸び20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認した。	△	鋼/非鉄合金複層化の検討	中炭素鋼との複層化に適した非鉄合金を選定し、層の幾何設計とともに界面形成の技術・条件についても検討を進める。[第一中間目標：平成27年度終了のFSテーマ]	鋼とMg合金の接合を可能とする条件を導出	△
<p>高強度高延性中炭素鋼の開発 [テーマ番号22]</p>	<p>高強度高延性による基幹部加工性を有する超高温強度鋼の開発</p>																																																	
<p>革新鋼材の開発 [テーマ番号23]</p>	<p>軽元素の効率的利用による革新鋼材の開発</p>																																																	
<p>鋼板開発 [テーマ番号24]</p>	<p>炭素添加による基幹部加工性を有する超高温強度鋼の開発</p>																																																	
<p>鋼/非鉄合金複層化の検討 [テーマ番号25]</p>	<p>高強度高延性中炭素鋼の開発</p>																																																	
研究開発項目	第二中間目標 (平成29年度末)	研究開発成果	達成度																																															
高強度高延性中炭素鋼の開発	炭素量0.4%以上、Mn量10%以下で、強度1.5GPa以上、伸び20%以上	0.4C-2Mn鋼にベイナイト中のセメントライト形成防止、残留γの微細化により、TS1.5GPa-EL20%を実現した。	◎																																															
中炭素鋼の解析・評価手法の開発	炭素濃度の定量化技術のI-PARCの高輝度中性子ラインへ展開するための基盤技術構築	中性子Bragg Edge解析の解析精度の改善を行った。また、炭素解析の空間分布解析技術を構築した。	○																																															
革新鋼材の開発	稀少元素添加量10wt%未満で、引張強度1.5GPa以上、伸び20%以上を有する中炭素鋼の材料設計と組織制御。	高炭素単純組成鋼をベースに軽元素を添加した小ロットサンプルを試作。加工熱処理による組織制御、組織解析、引張特性評価、等を実施し、引張強度1.5GPa、伸び15%以上を可能とする高炭素鋼の理想組織を提示。さらに、引張強度1.8GPa、伸び13%以上を可能とする軽元素を明らかにした。 また、革新鋼材の実用性能評価のため、高強度鋼の耐食性および加工性評価方法の開発に取り組んだ。	◎																																															
その場観察装置の開発	その場観察装置の改良と中炭素鋼の中高温域での挙動の観察。	500~1200℃の温度域における、非歪イオン(SIM)像観察とESBD解析が可能な複合解析装置を開発し、中・高温域における変態・逆変態挙動および粒界移動その場解析に成功。さらに、粒界・粒内に存在する軽元素の役割の把握のため、高分解能TEM試料作成向けに、狙いのミクロンレベルエリアに限定して極薄膜領域を作成できる装置を導入し、サンプルの作製技術の高度化技術を確立した。	◎																																															
鋼板開発	TS≧1.5GPa、El≧20%(TS・El≧30,000)	TS≧1.5GPa、El≧19%まで到達	◎																																															
解析・評価手法開発	炭素の分析下限が20ppm(点分析)	炭素濃度既知の試料をN=16回繰り返し測定することによる測定誤差が概ね20ppm以下	○																																															
	鋼組織の3D評価	3D-SEMにより、開発鋼の組織解析を行い、熱処理による組織変化を三次元的に評価	○																																															
超高強度-高延性を両立する炭素鋼ベースの複層鋼板の開発	中炭素鋼TRIP鋼およびマルテンサイト鋼を用い、層数を3~5層として試作し、1.5GPa以上、伸び20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認する。[第一中間目標：平成27年度終了のFSテーマ]	中炭素TRIP鋼およびマルテンサイト鋼を用い、層数を3~5層として試作し、1.5GPa以上、伸び20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認した。	△																																															
鋼/非鉄合金複層化の検討	中炭素鋼との複層化に適した非鉄合金を選定し、層の幾何設計とともに界面形成の技術・条件についても検討を進める。[第一中間目標：平成27年度終了のFSテーマ]	鋼とMg合金の接合を可能とする条件を導出	△																																															

	研究開発項目	第二中間目標 (平成29年度末)	研究開発成果	達成度
複層鋼板の界面構造解析と特性調査 【一丁目番号9】	複層鋼板の界面構造解析と特性調査	マルテンサイト鋼の3次元構造の解明、複層化による高機能化検討、接合メカニズム解明【第一中間目標：平成27年度終了のFSテーマ】	3次元ミクロ組織解析装置を用いて三次元構造観察を実施、層構造を変化させた複層鋼を用いた評価によって複層化による特性向上を検討 FEMによる歪解析により接合界面の挙動を明確化	○
	複層鋼板の微細組織構造解析技術の確立	マルテンサイト鋼の変形挙動・き裂進展挙の解明【第一中間目標：平成27年度終了のFSテーマ】	その場引張装置を用いた実験により、マルテンサイト鋼の変形挙動・き裂進展挙を解明	○
	複層鋼板の界面接合モデル・水素拡散モデル(プロトタイプ)の構築	FEMおよび第一原理計算によるモデルの構築【第一中間目標：平成27年度終了のFSテーマ】	水素透過試験によって高強度鋼中の水素拡散現象を解明、モデル比較対の評価およびFEMによる解析モデルを構築	○
【一丁目番号10】 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発	高強度・高靱性アルミニウム合金の開発	引張強さ \geq 750MPa 耐力 \geq 700MPa 伸び \geq 12% ラボスケール	押出材・板材ともに中間目標値を達成した。新プロセス導入により、最終目標値達成の指針を得た。	○
	連続電析技術	量産技術確立のため、パイロットプラントの構築し、実証試験を開始する。	地金をA1溶の状態での連続的に製造する試験設備の仕様を検討し、基本構成を決定した。連続電析時に見られる不均一な電析の原因を、多段階電析実験によって調べた。浴面付近での電析を避けることで、均質なA1膜を連続的に電析することが可能と考えられる。	×
	表面の平滑化	平滑性向上の技術確立(添加剤、基板素材、電析条件等)。	パルス電解法により、電解条件が電解A1溶の平滑性および成膜速度に及ぼす影響を検討。浴温の上昇によって、電解A1溶の膜厚および成膜速度は増加し、特に、電流密度158 mA cm ⁻² およびduty比0.5の時、成膜速度は1.064 $\mu\text{m min}^{-1}$ を示した。	△
【一丁目番号11】 アルミニウム材料製造プロセス技術開発	無水AlCl ₃ 新製法	AlCl ₃ 系イオン液体の大量合成法を開発、提案する。	AlCl ₃ を、ボーキサイト由来のAlCl ₃ ・6H ₂ Oから合成する手法を検討したが成功しなかった。一方、疎水性イオン液体を利用した溶媒抽出法により、イオン液体中にAl(III)が導入され、そのイオン液体中において電析したところ、Alを含む電析物が得られた。	×
	共析の制御①	再生Alを利用可能とする。	鋳物級A1ノードから高純度Alの回収を試み、Siの除去能を見出した。	△
	共析の制御②	連続電析によるAl合金製造法を確立する。	カソード電極上に不純物濃度10 ppm以下のA1析出を確認。高融点金属(Nb, Ta)をSmass%以上含む合金を製作。	○
【一丁目番号12】 複層合金製造技術の開発	複層合金設計、組織解析・制御技術の開発	ラボサンプルでの成形前の伸び(20%以上)、成形・熱処理後の耐力(600MPa以上)の両立	伸びと強度のバランスを向上させ、第二中間目標達成する目処を得た。	△
	複層合金製造技術の開発	ラボサンプルでの積層アルミ合金板の製造制御指針の提示	開発合金を用いて、板幅100mmの製造条件を把握した。	△
	①易加工性マグネシウム合金材の開発	引張強度：270MPa以上、伸び：20%以上、難燃性：AZX311以上、押出速度：A6N01以上の特性を示す押出材を製作するための合金設計技術を構築	特定の組成の合金を押出速度60mm/minの高速で押出しすると、押し下り材、T6処理材とも目標値を上回る特性を示すことを試験片レベルで確認	○
②高強度マグネシウム材の開発	引張強度：360MPa以上、伸び：15%以上、難燃性：AZX311以上の押出材および圧延材を製作するための合金設計技術を構築	特定の組成の合金を特定の条件で加工すると、上記の特性を満足する押出材、圧延材を製作できることを試験片レベルで確認	○	
③マグネシウム材の評価手法(難燃性・耐食性)の確立	Mg-Al-Ca-Mn系合金の発火特性、腐食特性のデータベース構築・標準化	発火特性に関しては、添加元素の濃度が発火特性に及ぼす影響をデータベース化し、発火試験の標準化作業に提供した。腐食特性についてはCa添加が腐食特性に及ぼすメカニズム(特に熱処理の影響)を明らかにした。	△	
④難燃性マグネシウム合金の疲労特性及び衝撃変形特性データベースの構築	新たに開発した難燃性マグネシウム合金展伸材の疲労特性及び衝撃変形特性を取得し、データベースを構築する。	疲労特性については、複数の変形モードを対象として、開発した合金(母材・MIG継手)の疲労特性の調査を実施。衝撃変形特性については、特定の合金を対象として、衝撃変形特性や衝撃靱性の取得を実施	△	
⑤新難燃性マグネシウム合金部材の設計指針の構築	疲労試験により得た適用可能なマグネシウム材料のクライテリにより、高速車両構体断面を対象とした疲労試験構体の基本設計を行う。	シミュレーションによる構体輪切り3次元FEMモデルを作成し、気密荷重負荷時の静強度解析と座屈固有値解析を行い、最大荷重(内圧6.4 kPa)負荷時に塑性変形や座屈変形が生じないことを確認した。また、上記輪切りモデルを車両長手方向につなげた一両モデルにより、構体曲げ剛性を検証し、形状を最適化した。	△	
【一丁目番号13】 易加工性マグネシウム合金(押出材)の開発	易加工性Mg材(押出材)の開発	引張強さ270MPa以上、伸び20%以上、AZX311同等以上の難燃性、A6N01合金同等以上の押出速度を達成する押出材を開発	開発合金組成(AX41合金)にて、左記目標値を達成する押出材製造プロセス技術をラボレベルで実証	○
	高強度Mg材(厚板)作製の基礎的検討	・A7N01合金と同等以上の熱的安定性・機械的特性を有する引張強さ360MPa以上、伸び15%以上の厚板材(板厚6mm)を製作するための鍛造、圧延手法調査 ・中板材(板厚3mm)は高強度高延性を有する幅広材(板幅300mm)を製作し、工業化と標準化を加速させる。	・板厚6mm材は圧延スケジュールのチューニングにより引張強さ360MPa、伸び12%を得て目標達成に目処を立てた。 ・板厚3mm材では、実機を用いて板幅300mmにおいて引張強さ357MPa、伸び14%を得た。板幅を500mmまでスケールアップし、更なる幅広化に着手した。	○
	高強度難燃性新合金の開発	・引張強さ \geq 360MPa ・伸び \geq 15% ・AZX311と同等以上の難燃性	ダブルロール鍛造したAX81S合金にて圧延プロセス条件(圧延温度、圧下率、熱処理温度など)を適正化することにより圧延材で目標値を上回る特性を示すことを試験片レベルで解明。パイロット機での目標達成に目途付け	○
【一丁目番号14】 高強度マグネシウム材の開発	高強度マグネシウム材の開発	引張強度：360MPa以上 伸び：15%以上 難燃性：AZX311以上 を満足する合金の開発	引張強度：360MPa 伸び15%以上 難燃性：AZX311以上の特性を発現する合金を開発した	○

	研究開発項目	第二中間目標 (平成29年度末)	研究開発成果	達成度
難燃性マグネシウム合金の耐食技術の開発 [一丁一番号9]	暴露試験	大気暴露試験3年目と追加試験のデータを取得。データ整理の実施。 新たに既存合金のみならず平成28年度の新規開発合金も評価開始する。	既存マグネシウム合金の3年目の暴露試験板を回収し、評価と共に平成28年度には新規開発合金の暴露試験を開始した。	△
	難燃性マグネシウム合金の塗装処理膜の耐腐食促進試験法の選定 難燃性マグネシウム合金の塗装処理膜の最適化	平成28年度の新規開発合金を母材として表面処理膜(化成処理・塗装膜)の最適(CCT20μg、SST 500時間)を達成する。 また、接合部位の腐食性評価も実施する。	腐食促進試験法の策定は平成26年度で終了。平成27年度からは策定試験方法ならびに既存難燃性マグネシウム合金上でCCT20μg、SST500時間の最適化を実施。 平成29年度は新規開発マグネシウム合金への適正化、並びに合金接合部(複数の接手法)での評価を開始する。	△
	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	開発合金を含めた陽極酸化膜の種々の腐食促進試験とその評価、および暴露試験の3年目の評価のまとめ。	既存マグネシウム合金の陽極酸化膜の種々の腐食促進試験において480時間までの腐食面積の評価を実施。また、平成27年度回収の暴露試験板に於ける腐食減量、浸食深さ等のデータ確認を実施。	△
	難燃性マグネシウム合金表面処理材の耐食メカニズムの解明	陽極酸化および化成処理皮膜の形成および耐食メカニズムの解明。	腐食メカニズムの解明はほぼ終了。屋外大気暴露における、各種促進暴露との挙動の違いや、暴露条件差での腐食挙動についても究明。今後、新規開発合金について腐食速度差の究明及び化成処理の組成と耐食性の関係を究明中。	△
難燃性マグネシウム合金の接合技術の開発 [一丁一番号20]	①TIG溶接技術の確立	開発合金を用いて継手効率70%以上を達成する接合技術の構築。 開発合金を用いて部材を製作するための接合技術の構築。	アルミニウム合金の施工法との比較により、大まかな接合条件範囲を明らかにした。平板突合せ継手では、継手効率70%以上を達成した。	○
	②MIG溶接技術の確立	開発合金を用いて継手効率70%以上を達成する接合技術の構築。 開発合金を用いて部材を製作するための接合技術の構築。	板材突合せ溶接における接合条件範囲や課題を明らかにした。平板突合せ継手では、継手効率70%以上を達成した。	○
	③摩擦攪拌接合(FSW)法の開発	開発合金を用いて継手効率70%以上を達成する接合技術の構築。 開発合金を用いて部材を製作するための接合技術の構築。	アルミニウム合金の施工法との比較により、大まかな接合条件範囲や課題を明らかにした。平板突合せ継手では、継手効率70%以上を達成した。	○
	④非破壊評価技術の開発	各種接合法(MIG、FSW)の接合品質モニタリングの確立と生産への適用における可能性の明確化。	FSW法およびTIG溶接の接合品質モニタリングが可能となり、接合長が伸びた場合の計測法を開発した。	○
	⑤アルミ/マグネ合金の異材接合技術(FS)	アルミニウム合金製車両構体での継手効率と同等の70%以上の継手が得られる可能性を検証する。	MIG、TIG、FSWなどの各種接合法で接合トライを行った結果、継手効率が上がらず、その原因が高い入熱による金属間化合物であることがわかった。	○
MIシステムの性能・信頼性に関するMIシステム適用時の対象性能・対象部材の絞り込み [一丁一番号21]	①MIシステム適用に必要な技術データベース及び予測モジュールの具体的な内容の検証	鉄鋼材(BCC金属)やアルミ合金(FCC金属)用に作製された各種モジュールの新難燃性マグネシウム合金(HCP金属)への適用可能性を明らかにする。	平成29年度開始のFS研究であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行する予定である。	△
	②マグネシウム合金へのMIシステム適用時の対象性能・対象部材の絞り込み	難燃性マグネシウム合金の信頼性データの取得に際してMIシステムの適用が望まれる性能・部材に関する情報を抽出する。	平成29年度開始のFS研究であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行する予定である。	△
	③マグネシウムに関する計算科学手法の研究開発状況の調査	文献調査等により、国内外のマテリアルズインテグレーション及び計算科学を利用したマグネシウム研究開発動向を明らかにする。	平成29年度開始のFS研究であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行する予定である。	△
チタン低濃度原料の溶解脱酸技術の開発 [一丁一番号10]	1.チタン低濃度原料の溶解脱酸技術の開発 (酸濃度:300ppm以下)	脱酸溶解を実現する実機プロセスの技術課題明確化。	低濃度原料の模擬した初期酸濃度の原料を目標値(300ppm)以下に脱酸できる技術を活用したプロセスフローを考案し、この技術を実験で検証した。	○
	2.一貫製造プロセス技術の開発と強度・加工性に優れたチタン材の開発	一貫製造プロセスと、現行材比で強度20%向上させる材料を量産実現するための課題抽出。	一貫製造プロセスのコンセプトを実現するプロセスフローを抽出した。現行材比で強度20%向上させる材料を実験で検証した。	○
チタン薄板の革新的高機能化技術の開発 [一丁一番号11]	高効率チタン薄板製造技術の開発	・高機能化チタン薄板を試作し、引張強度・延性バランスを現行材より20%向上 ・工業的に薄板を製造するプロセスの提案	・実験室規模の試験により、基本プロセスの妥当性を確認し、欠陥の目標(気孔率0.2%以下)を達成。高機能化のための材料選定を行い、薄板の試作評価を実施中。 ・スポンジチタンからチタン梱包体(熱間圧延用の素材)を製造する方法を提案	△
	チタン新製錬技術の開発	有望シーズ技術の実用化にむけた課題検討を行い、製錬プロセス設計指針を提案	・2価チタンイオンを含む塩からのチタン電析技術において、電極表面にチタン膜を平滑に析出させ、さらに、チタン膜を電極から剥離して回収できる条件を把握。 ・チタン管製造プロセスの要素技術を実験室規模で確立	○
チタン高品質スポンジ製造 [一丁一番号12]	高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発	平成27年度までに開発された要素技術を実機スケールで検証し、工業化のための課題点を抽出	Fe汚染低減、O汚染低減、Cl汚染低減、分離工程短縮等、各種要素技術の実機スケール試験を行ない、効果と課題点を検証した	△
革新的炭素繊維製造技術の開発	(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。	中空繊維や大径単糸など、新規前駆体化合物の特徴を生かした各種異形状炭素繊維の作製に成功した。異形でありながら、伸びが1.7%に達するものなど、特徴ある繊維が得られている。	○
	(2)炭化構造形成メカニズムの解明	マイクロ波により太繊維前駆体繊維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。	PAN系前駆体繊維を用いたマイクロ波加熱によるラジックの炭素化実験において、引張弾性率250GPaを示す炭素繊維の製造に成功している。この技術確立する過程で、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。	○
	(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。	繊維単体からコンジットまで、各種特性を精度良く評価するための試験法を新規に開発し、標準化・規格化を提案した。革新炭素繊維に樹脂を浸透させて一方CFRPを作製した。	○

	研究開発項目	第二中間目標 (平成29年度末)	研究開発成果	達成度
熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・応用加工技術の開発 【一丁目事業部2】	(e)LFT-D成形の要素技術の開発	・混練プロセスを完成し、LFT-D中間基材と成形部材の材料特性DBの一部を構築。 ・試験法標準化の道付けを実施。 ・成形プロセスも扱う力学モデルの高度化を行い、CAE解析ソフトに組み込む。	・物性の支配因子である繊維長と分散の分析評価法について課題を明確化した。 ・独自の繊維長（分布）及び配向測定法を確立した。 ・LFT-D材の圧縮特性の基礎データを取得した。 ・成形流動及び反り変形の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。	○
	(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詳細まで含めて確立する。 ・高速マテハン技術の要素技術を確立する ・非破壊検査技術の要素技術を開発する。	・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。 ・精度向上のためのマテハンの改造を行った。 ・安定的なフルバック成形条件を確立した。 ・LFT-D最適設計法の概念を構築し、Hat材での試行を行った。 ・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	・熱可塑性CFRP使用部材同士の高速接合技術を確立する。	・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	・LFT-D成形板の光学特性を解明し、高意匠性外板製造に関する基礎を構築する。	・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次元モデルを作成し、検証した。	○
熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発 【一丁目事業部3】	①熱可塑性CFRPと金属材料との接合技術開発	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 現行のスチール製量産車と同等のライン速度1台/分を表現する指針の策定と供試体による検証	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 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 実装/高信頼性な高速プロセスに焦点を絞り、検討した	△
	②(a)熱可塑性CFRPの中間基材の開発	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	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 重要特性の変動係数5%以内を達成した 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、クラッシュユニオンを成形し、GMT比エネルギー吸収量60%向上を達成した	○
	②(b)熱可塑性CFRPの性能評価技術の開発	開発材料の特性発見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	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 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 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	○
	②(c)熱可塑性CFRPを用いた構造設計技術の開発	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(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 中空部材およびパネル部材の使用割合を最適にすることで、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、	○
	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	○
	アルミニウム/CFRP接合技術の開発 【一丁目事業部4】	プロセス開発	Al/熱硬化CFRPのFLJでCFRP母材破壊レベル	①接合ポテンシャル把握 ・接合部短時間昇温可能 Al/熱硬化CFRPでは熱硬化CFRP表面に熱可塑性接着層を形成させ、接合基材をアルミ/CFRP間に挿入して接合することで母材破壊レベルを確認。 ②接着層、接合基材の設計が重要である。
CFRP設計		Al/熱硬化CFRPのFLJでCFRP母材破壊レベルとなるCFRP設計	③指針確立（熱硬化） 熱硬化CFRP表面への熱可塑性接着層形成および、アルミ/CFRP間への接合基材挿入が必要であることを確認。	△
接合データベース構築		Al/熱硬化CFRPのDB構築	④適正接合条件設定 Al/熱硬化CFRPで接合条件マップ作成開始 ⑤接合法ベンチマーク 接合分科会で評価開始	△
熱可塑性CFRPの低熱溶接技術の開発 【一丁目事業部5】	低抗スポット溶接	1.2GPa中高炭素鋼板でJIS-A級の70%の継手強度	新スポット溶接でナゲット拡大により、せん断継手強度目標を達成した。	○
	線接合	1.2GPa中高炭素鋼板で継手効率70%以上	レーザについては実質接合範囲の拡大と溶接金属部の組織改善により継手の目標強度を達成した。 FSWについては低入熱溶接により接合強度改善が見込まれており、その知見の適用で目標特性達成を図る。	○

	研究開発項目	第二中間目標 (平成29年度末)	研究開発成果	達成度
中高炭素鋼の革新的接合技術の開発 【一丁一丁番号(3)】	1-1)アークスポット溶接部の静的継手特性改善(新日鐵住金)	成分・強度の異なる鋼での継手特性の評価・改善および、部材モデルでの性能確認	モデル部材を製作し、スポット溶接に比べて部材特性が改善することを確認	○
	1-2)継手疲労特性の解明(名古屋大学)	1.5GPa級中高炭素鋼の疲労特性明確化	せん断、剥離モードでの疲労特性を把握。	○
	1-3)溶接残留応力の影響明解明(大阪府立大学)	溶接部の残留応力による継手、部材特性への影響明確化	溶接部残留応力の数値解析技術の構築	○
	1-4)アークスポットプロセスの解析(新日鐵住金)	アークスポット安定溶接技術の開発	中高炭素鋼の中でも炭素量の高い鋼種でも、良好な溶接部が形成できる条件を提示した。	○
	1-5)溶接部形状の数値解析技術(大阪大学)	溶接ビード形成メカニズムの明確化	No.46へ移行	—
	2-1)摩擦接合による継手性能評価(新日鐵住金)	摩擦接合の継手特性、性能の明確化	No.46へ移行	—
	2-2)摩擦接合プロセスの開発	FSLW接合プロセスの開発とその継手特性評価	No.46へ移行	—
	2-3)溶接部特性への金属組織の影響解明(秋田大学)	接合条件による継手特性、接合部組織への影響明確化	No.46へ移行	—
	2-4)摩擦接合の数値解析技術の化初(大阪大学)	摩擦接合プロセスのメカニズム推定	No.46へ移行	—
	FSW法の開発 【一丁一丁番号(4)】 PIMによる炭素鋼/SSV技術の開発	予熱・後熱プロセスを有するFSW法 (PHM-FSW法)による接合プロセス適正条件の明確化	開発材を想定した中高炭素鋼を用いた検討において、高周波予熱を使用したPHM-FSW法により従来FSWと比較し、3倍以上の接合速度を達成。	◎
継手性能		PHM-FSW法において、厚さ1.4~2mm、強度1.2GPa以上の中高炭素鋼に対して接合継手の引張せん断強さが母材強度の70%以上を実現し、かつ従来法による継手引張せん断強さを越える強度を達成	PHM-FSW法において、厚さ1.4mm、強度1.2GPaの開発鋼を用いて継手を製作し、接合継手の引張強さが母材強度の70%以上を達成見込み。	△
アルミニウム/CFRPの点接合技術 【一丁一丁番号(5)】 アルミニウム/鋼板の点接合技術 異材接合部の評価解析	アルミニウム/CFRPの点接合技術	・車体部材適用時の部材性能/品質/コスト/主要量産課題の明確化 ・アルミニウム/CFRP点接合に特化した摩擦接合点接合ロボットの仕様決定	・CFRP製リフトゲートを用いた接合実験で量産時に想定される外乱(板間隙、治具精度、スプリングバック等)に対する余裕度を確認した。 ・研究成果を織り込んだ接合装置の構想設計を完了した。	△
	アルミニウム/鋼板の点接合技術	・車体部材適用時の部材性能/品質/コスト/主要量産課題の明確化	・1000MPa級超ハイテンとの接合でも接合強度の目標を達成できた。	△
	異材接合部の評価解析	・電食に対する防錆技術の確立 ・熱歪み解析手法の運用	・シーラー類の防錆効果の評価方法を決定した。 ・接着剤、CFRPなどをモデル化し、熱歪みを定量的に予測可能にした。	△
	高減衰アルミナレと高減衰接着剤の仕様決定	・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。 ・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。	△
	異材点接合の適用研究(H28年度からテーマ化)	・マルチマテリアルドアの構想設計(構造検討、重量とコストの概算) ・CFRP複合成形の技術課題抽出	・マルチマテリアルドアの基本構造、材料等を決定した。 ・CFRP(芳香族ポリアミドベース)のCAE用材料データを取得した。	△
中高炭素鋼/中高炭素鋼のフュージョンボンド接合技術の開発 【一丁一丁番号(6)】	(1-1) ツール素材の開発	耐熱衝撃などを考慮したツール素材の最適化を図る。	炭素化合物添加量の最適化により、耐摩耗性と耐久損性を両立。	◎
	(1-2) コーティングの開発	耐酸化性や摩擦係数、膜厚の最適化を図る。	窒化物膜の組成改良により、耐摩耗性、耐酸化性、耐衝撃性を改善。 酸化物膜の面粗さ、酸化バリア性、高温硬度を改善。	◎
	(1-3) ツール形状の開発	1.2 GPa級鋼板(1.4mm)の接合継手の引張せん断試験でJIS-A級強度(13.02kN)の100%以上。	ツール形状の改良により、1.2 GPa級鋼板、1.5 GPa級鋼板においてJIS-A級強度の100%の継手強度を達成。	◎
	(2-1) ツール性能の評価	—	(試作ツールについて評価実施中)	○
	(2-2) 接合装置開発	1.2 GPa級鋼板用に最適化された接合プロセスに適するようガン改良する。	1.2 GPa級鋼板を接合可能な小型軽量ガンを試作・改良した。	○
	(2-3) 接合プロセス開発	1.2 GPa級鋼板に最適化された接合プロセスおよび制御プログラムを開発し、継手の特性を向上させる。	1.2 GPa級鋼板の継手強度を向上させるため接合温度制御プログラムを開発し、剥離強度を大幅に改善できることを確認した。	◎
	(3-1) 接合部の評価	共通鋼材の継手基礎データの蓄積。実部材特性を模擬した部材の試作評価、特性把握。	1.2 GPa級0.45C鋼のFSW継手においてTSSが開発目標を超える事を確認。 部材の衝撃曲げ試験において接合法である従来抵抗スポット溶接に対する優位性を確認。	○
	(3-2) 材料特性の影響解明	中高炭素鋼の継手強度発現メカニズム解明の推進。特性改善指針の明確化。	継手の破断経路と接合部ミクロ組織から、強度向上のための継手内硬さ分布・組織制御指針を導出。	○
	(4-1) 組織観察	1.2 GPa級鋼板の接合部の金属組織の詳細観察。	接合継手の金属組織解析、結晶粒解析、熱履歴推定を行い、接合プロセス中の変態挙動を解明。	○
	(4-2) 接合メカニズムの解明	接合界面トレース法による1.2 GPa級鋼板の接合挙動の把握。	1.2 GPa級鋼板について金属箔トレースにより接合中の界面の挙動を把握。	○
鋼材/CFRP等樹脂材料の接合技術開発 【一丁一丁番号(7)】 異材接合材料の接合技術の開発	鋼材/CFRP等樹脂材料の接合技術開発	・継手要素の接合において、界面剥離強度≧母材層間 ・電食による接合部腐食の評価手法の確立	・継手要素試験、析構造体、それぞれにおいて終局時の破 ・電解質を介し単極自然電位測定して腐食の可能性を評価する手法を確立した。	○
		・構造要素の接合において、所要性能を発現し得る最適部材配置設計手法の確立	・鋼とCFRPを最適に部材配置した複合1桁構造と複合柱構造を開発した。複合柱構造の中間部の単位長重量は同じ耐荷力の鋼柱構造の3/4であった。	○
FSW装置開発 【一丁一丁番号(8)】 接合技術開発 FSWツール開発	FSW装置開発	①Ti材接合装置：接合深さ10mm以上可能な実証機製作 ②厚み2mm、強度1.2GPa以上の炭素鋼を線接合可能なロボットFSW装置の開発	①実証機でTi材 (Ti-6Al-4V合金) を接合深さ10mm以上接合可能なことを確認。 ②厚み2mmの炭素鋼において、ロボットFSW装置により線接合可能なことを確認。	○
	接合技術開発	①Ti材接合強度：母材強度の90%以上 ②厚み2mm、強度1.2GPa以上の炭素鋼の線接合材の引張強度が母材強度の70%以上	①Ti材 (Ti-6Al-4V合金) において、母材強度の97%の引張強度を有する接合材が得られることを確認。 ②母材強度1.2GPaのTRIP鋼において、母材強度と同じ(100%)の引張強度を有する接合材が得られることを確認。但し、素材厚みはISMA共通鋼で統一した1.4mm。	◎
	FSWツール開発	①Ti材接合深さ：10mm以上の実証	Ti材 (Ti-6Al-4V合金) において、接合深さ10mmを無欠陥接合可能なことを確認。	◎
革新的新構造材料等研究開発 【一丁一丁番号(9)】 水和物炭素鋼/炭素鋼の接合技術の開発	平成27年度までのFS研究の結果に基づき、目標を設定する	・Ar-FAB、UVUによる表面汚染層の除去条件を把握した。 ・接合前処理により、水和物炭素鋼のためのM-OOHが形成されたと推測された。 ・鋼/Alの接合界面には、アモルファス状のFe、Al酸化物が認められたことから、脱水縮合反応による接合がなされたものと推測された。 ・接合した継手強度は、当初の目標 (FSW継手と同等) には、至らないものの、局所的に強固な接合がなされている可能性が示唆された。	○	

	研究開発項目	第二中間目標 (平成29年度末)	研究開発成果	達成度
中鋼炭素鋼・中鋼炭素鋼の摩擦接合共通基盤研究 [テーマ番号46]	①両面複動式(フラット)摩擦 摩擦接合法の開発(ISMA、新 日鐵住金、阪大)	装置を導入し、強度1.2GPa級中炭素鋼で、引張せん断継手効 率70%以上の手法確立。	両面複動式摩擦摩擦接合法装置の設計した。	△
	②線形摩擦摩擦接合法の開発 (ISMA、新日鐵住金、阪大)	厚さ5mm以下の強度1.2GPa級の中炭素鋼で、母材強度の70% 以上を得る。	界面近傍に大きなひずみを導入できる線形摩擦摩擦接合法を開発す るとともに、厚さ3mm以下の継手作製に成功し、第2期の目標を達 成した。	◎
	③X線透過装置を用いた摩擦 摩擦接合の塑性流動基礎解析 (JFEスチール、阪大)	摩擦部の塑性流動に関する基礎データを取るとともに、 ツール形状の影響を調査する。	塑性流動分布について調査し、流動層ではツール近傍と摩擦部の端 を除いて角どひずみを受けないことを明らかにした。	○
	④継手特性に及ぼす金属組織 の影響解明(新日鐵住金、JFE スチール、神戸製鋼所、阪大、再 委託先)	S55C、S45C、S55Cなどの共通中炭素鋼試料を用いて摩擦 摩擦接合を実施し、継手特性の評価を行い、組織等との関連を調 査する。	共通中炭素鋼試料の摩擦摩擦接合を実施し継手の評価を行い、組 織との関連を調査した。	○
	⑤ツール設計によるFSW特性向 上技術の基礎検討(神戸製鋼 所、再委託先)	ツール形状を最適化し、最適なツール材質を検討する。	ツール形状の僅かな変更でも摩擦能力向上への効果が大いことを 明らかにした。	○
	⑥溶接残留応力の影響解明(新 日鐵住金、再委託先)	摩擦摩擦接合の実験手との整合性を検証し、CAE解析精度の向 上を図る。	摩擦摩擦接合の残留応力・組織分布解析技術を確立した。	○
	⑦摩擦摩擦接合の数値解析技術 の開発(新日鐵住金、再委託先)	摩擦摩擦接合を実施するとともに、粒子法を用いた提案モデ ルの精度を向上させ、塑性流動を予測する。	ツールの挿入プロセスにおけるツール形状および挿入角度の影響の モデル化を行った。	○
構造物用接合 技術の開発 [テーマ番号53]	接着性能	引張せん断強度 10MPa 以上	未実施	△
新構造材料の技術・研究戦略 [テーマ番号29]	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。[平成26年度で終 了。平成27年度よりテーマ番号41から45に再編して実 施した]	・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。 ・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。	○
	②技術動向調査		モーターショー(＠ジュネーブ&パリ)、タイムラー、 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		構造解析向中性子利用技術および構造物用接合技術を新 規FS課題としてテーマアップし、平成27年度よりFS研究と してスタートした。	○
技術動向調査 分析 [テーマ番号30]	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[平成26年度で終 了。平成27年度よりテーマ番号41から45に再編して実 施した]	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。	△
炭素繊維および新規フィ ブライの動向調査 [テーマ番号31]	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 [平成26年度で終了]	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 ブライに関する調査	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[平成26年度で終了]	熱可塑性樹脂をマトリックスとした際の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 接着剤を使用しない接合技術の初期調査を実施した	○
共通基盤技術の研究調査 [テーマ番号32]	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[平成26年度で終 了]	△	△
	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。[平成26 年度で終了。平成27年度よりテーマ番号41から45に再 編して実施した]	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。	○
チタン合金の製造技術開発 [テーマ番号41]	チタン合金の製造技術開発	Ti-Mn-Mo合金の創製[第一期中間目標。平成27年度終 了テーマ]	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	バブル加工の優位性を考察[第一期中間目標。平成27 年度終了テーマ]	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。	○
新たな研究分野の設定 [テーマ番号21]	新たな研究分野の設定	FS課題の策定	総計5課題(中性子、接着技術、腐食、マグネMI、マルチ マテリアル設計)提案	○
	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	後半検討課題案の策定	△
計測解析技術の開発 [テーマ番号43]	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	国内外のユーザー、国外の研究機関とWS開催	△
	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	破壊制御理論の基礎を構築することができた。	△
	軽量金属材料の研究	疲労および水素脆化の解明	疲労き裂進展と水素脆化の関連性を基礎的に解明することができ 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	薄層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	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 [テーマ番号44]	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	インハウス中性子源の加速器部増強計画の67%の製作を完了。	△
	熱可塑性CFRP製造プロセス最 適化の研究	熱可塑性成形プロセスシミュレーション技術の構築	ミクロスケール熱可塑性成形シミュレーションの試計算を実施した。	△
中性子線を用いた計 測精度の明確化 [テーマ番号45]	小型中性子線源を用いた計 測精度の明確化	中性子回折、小角散乱などの測定を行い計測データの妥当性 を検証する。[平成28年度末目標。平成28年度終了テーマ]	中性子回折、小角散乱などの測定を行い計測データの妥当性を検 証した。	○
	小型装置開発のための設計検 討	運転時の放射線発生量などのシミュレーションを実施し、開発 プランを策定する。[平成28年度末目標。平成28年度終了テ ーマ]	運転時の放射線発生量などのシミュレーションを実施し、開発 プランを策定した。	○
接着機構解明に向けた界面 の分析手法・研究方法論の 検討 [テーマ番号45]	接着機構解明に向けた界面 の分析手法・研究方法論の 検討	接着接合機構解明のための手法を検証する	電子顕微鏡観察や、分光法、計算機化学的な手法が有効で あることが確かめられた。	○
	検査手法の検討	その適用可能性を検証	実プロセスに適用可能な検査技術の絞り込みを行った。	○
マルチマテリアル設計技術 [テーマ番号49]	マルチマテリアル設計技術	レベルセット法によるトポロジー最適化技術を適用する ための解析システム構成、ソルバー(計算を実行す るソフトウェア)との連携、設計解析モデルの実現性 等につき検証を行う。		△
	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 [テーマ番号52]	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	鉄鋼試料等の作製と小角散乱、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う。	△
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 [テーマ番号52]	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求 した小型装置による構造材料 評価技術の開発	新規小型中性子装置のための設置場所を整備し、主要な構成 機器を導入するとともに、次年度以降に導入する機器の詳細仕 様を決定する。	平成29年度に導入する機器の多くの仕様を決定するとともに、設置 場所の整備計画の策定を行った。また次年度導入の機器の仕様決 定に着手した。	△
	中性子構造材料解析ネット ワークの構築	平成31年度より実施する。		-

	投稿論文	「査読付き」113件、「その他」35件
	特許	「国内出願」130件、「外国出願」24件、「PCT出願」30件 特記事項：
	その他の外部発表 (プレス発表等)	996件
IV. 実用化・事業化の見通しについて	本中間評価の平成29年度の間目標はほとんどのテーマで達成見込みであり、一部テーマでは最終目標を前倒しで達成している。テーマによっては開発材料のサンプル出荷を開始しており、またプロジェクトを早期に卒業し実用化ステージへの移行を宣言したテーマもある。	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成26年3月 作成
	変更履歴	平成28年2月 改訂

プロジェクト用語集

「革新鋼板の開発」

[テーマ番号 22] 残留 γ 高度制御革新鋼板の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
Bragg Edge 解析	Bragg Edge Analysis	中性子や X 線を結晶性物質に照射した際に回折が起こる条件(Bragg の条件)付近で、透過する中性子や X 線の強度が変化する状態を用いた結晶構造の解析手法。バルク材の透過情報を解析可能なため、材料全体の組織情報を正確に解析できる。
J-PARC(大強度陽子加速器施設)	Japan Proton Accelerator Research Complex	高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構が共同で建設を進めている大強度陽子加速器施設。金属材料の分析に有効な強力な中性子線を発生させられる。
Q&P	Quench & Partitioning	高強度・高延性組織の製造プロセスの名称、または、鋼を後に付けてそのプロセスで製造した鋼のことを示す。 焼鈍時に高温域から 100~300℃程度の温度域に焼入れ(quench)したのち、炭素の分配(partitioning)を行うための再加熱を行うプロセス。
TRIP（変態誘起塑性）	Transformation Induced Plasticity	鉄鋼材料で室温において準安定なオーステナイトを含有する鋼を変形させた際に起こる延性向上に寄与することができる現象のことで、加工中にオーステナイトからマルテンサイトへの変態が誘発されることで加工硬化率が増大し、伸びが上昇する。
TWIP（双晶誘起）	Twining Induced Plasticity	鉄鋼材料で室温において安定なオーステナイトを含有する鋼を変形させた際に起こる延性向上に寄与することができる現象のことで、加工中にオーステナイト中に双晶変形が誘発されることで加工硬化率が増大し、伸びが上昇する。

安定度	Stability	残留 γ の安定度と記載することで、焼鈍板に加工を加えた際に残留 γ の加工誘起変態の起こりやすさとかかわる。一般に安定度は高いほど強度－伸びバランスが向上する。また、安定度はオーステナイト中の炭素濃度に関連している。そのため炭素濃度分布解析が重要となる。
残留オーステナイト (γ)	Retained Austenite	一般に Fe において高温域で安定で、室温では不安定なオーステナイトが室温に準安定状態で残存した組織。

[テーマ番号 23] 軽元素の有効利用による革新鋼材の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
EBSD	EBSD (electron backscatter diffraction)	後方散乱電子回折を利用して、結晶性試料の方位解析をする方法。
FE-SEM	FE-SEM (field-emission SEM)	電界放射型走査電子顕微鏡。
FIB	FIB (focused ion beam)	集束イオンビーム。数 keV~30keV のガリウムイオンビームで、SEM,TEM 用の断面試料を作製する装置。
SIM	SIM (scanning iron microscope)	走査イオン顕微鏡。集束イオンビームで試料を走査したとき放出される 2 次電子を信号として可視化した像。組成コントラスト、結晶方位コントラストが SEM 像に比べて強く現れる。
TOF-SIMS	TOF-SIMS (Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry)	固体試料にイオンビーム（一次イオン）を照射し、表面から放出されるイオン（二次イオン）を、その飛行時間差（飛行時間は重さの平方根に比例）を利用して質量分離する手法。

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
TRIP	TRIP	Transformation Induced Plasticity(変態誘起塑性)の略。
ハイテン	High Tensile Strength Steel	高強度鋼板のこと。

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
FRP	Fiber-Reinforced Plastics	ガラス繊維などの繊維をプラスチックの中に入れて強度を向上させた複合材料。
FRM	Fiber-Reinforced Metal	金属を基材に繊維で強化した複合材料。
TWIP 鋼	TWinning-Induced. Plasticity Steel	加工誘起双晶変形を起こすことで、優れた強度－延性バランスを実現する鋼。

[テーマ番号 26] 複層鋼板の界面構造解析と特性調査

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
複層鋼板	Multi-layer steel plate	異なる組成や組織を持つ鋼と鋼を積層して製造した鋼板。
水素脆化	hydrogen embrittlement	鋼中に含まれる水素により鋼材の強度や延靱性が低下する現象。
有限要素法 (FEM)	Finite Element Method	数値解析の方法の一種で、複雑な形状・性質を単純な小部分に分割することで近似し、全体の挙動を予測する手法。
第一原理計算	first-principles calculation、Ab initio calculation	量子力学のシュレディンガー方程式に則って、物質中の電子運動を計算する方法。
分子動力学法 (MD)	Molecular Dynamics method	古典力学におけるニュートン方程式によって原子・分子の運動を計算することで、系の静的、動的安定構造や、動的過程を解析する手法。
走査型電子顕微鏡 (SEM)	Scanning Electron Microscope	対象物に電子線を照射し放出される電子を解析することで、高倍率で対象物の観察を行うことが可能な電子顕微鏡。
透過型電子顕微鏡 (TEM)	Transmission Electron Microscope	対象物に電子線を照射し透過した電子を解析することで、SEM よりも高倍率で対象物の観察を行うことが可能な電子顕微鏡。
電子後方散乱回折法 (EBSD)	Electron BackScatter Diffraction patterns	電子線回折により結晶粒の大きさや方位を解析する手法
In-Situ 観察	In situ observation	ある状態のまま組織等の観察を行うこと、例えば引張試験中の応力負荷状態で組織観察などを行うこと

[テーマ番号 47] 異相界面腐食解析の基盤技術開発 (FS 研究)

特に無し。

[テーマ番号 48] 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)

用語 (日本語)・略号	English	用語・略号の説明
U 曲げ試験	U-bend test	薄鋼板を U 形状に曲げ、両端をボルト等で固定し、応力を付与した状態で酸浸漬などにより水素を導入し、遅れ破壊特性を評価する方法。
遅れ破壊	Delayed fracture	材料が静的な負荷応力を受けた状態で、ある時間を経過したとき、外見上はほとんど塑性変形を伴うことなく、突然脆性的に破壊する現象。
水素脆化	Hydrogen embrittlement	材料中に吸収された水素により材料の強度や延性又は靱性が低下する現象。
水素割れ感受性	Susceptibility to hydrogen cracking	水素に起因した割れの起こしやすさ。一般に高強度ほど水素割れを起こしやすい。

「革新的アルミニウム材の開発」

[テーマ番号 13] 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
亜結晶粒	subgrain	加工組織（転位組織）から回復過程において形成された安定な転位網（亜粒界）によって囲まれた領域。
延性	ductility	材料が弾性限界を超えた張力を受けても破壊されずに引き延ばされる性質。
応力腐食割れ	stress corrosion cracking	腐食環境下で応力が負荷されると亀裂の進展が促進される現象。
金属間化合物	intermetallic compound	2種類以上の金属からなる化合物。凝固の際に結晶粒界に生成する比較的粗大なものを指すことが多い。
高強度	high strength	引張強さが大きいこと
靱性	toughness	材料の粘り強さを表す特性。
耐力	yield strength	塑性変形が開始する応力。明瞭な降伏点を示さないアルミニウム合金などでは、引張試験において0.2%の永久歪みを生じるときの応力で0.2% offset proof stressともいう。
鋳造合金	casting alloy	鋳造に使われる合金
電磁攪拌	electromagnetic stirring	金属溶湯の周囲に設置した電磁コイルにて発生させた磁界を回転させることにより、内部の金属溶湯に回転力を与え攪拌をする。三相誘導モーターと同じ原理。
伸び	elongation	引張試験において、引張試験後の破断した試験片の永久伸びを元の長さで除した値を百分率で示す。
破壊靱性	fracture toughness	破壊に対する抵抗を表す特性。
引張強さ	tensile strength	引張試験での最大荷重応力
疲労亀裂伝播特性	fatigue crack propagation property	亀裂が繰返し応力によって進展（伝播）する特性。亀裂の進展が小さいほど好ましい。
疲労特性	fatigue property	繰返し応力によって内部損傷が発生し、破断に至る特性。10 ⁷ 回のサイクルに耐える応力を疲労限と呼び、高い値を持つことが好ましい。

マトリックス	matrix	母相と呼ばれ、金属間化合物を除いたアルミニウム合金の素地の部分を指す。
リージョナルジェット	regional jet	地域間輸送用旅客機。概ね 50～100 席クラスの小型のジェット機で大型、中型のジェット機よりも低騒音で必要な滑走路延長も短いという特徴をもつ。

[テーマ番号 14] アルミニウム材新製造プロセス技術開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
圧延アルミニウム箔	Rolling aluminum foil	圧延で製造されるアルミ箔のこと。実用化されている一般的なアルミ箔の製造方法。圧延回数が増える（薄箔化する）とコストが高くなる。
アノード	anode	電極をつないで電気回路形成した際に、電子を放出する側の電極のこと。
アルミナ	alumina	酸化アルミニウム (Al_2O_3) の通称。
イオン液体	Ionic liquid	イオンのみで構成される液体。高導電性、難燃性、低常気圧といった特徴をもつ。親水性のもの、疎水性のものなど多くの種類がある。室温（常温）溶融塩と呼ばれることもある。
1-エチル-3-メチルイミダゾリウムクロリド	1-ethyl-3-methylimidazolium chloride	AlCl_3 -EMIC イオン液体の原料の一つ。吸湿性があるため、不活性ガス雰囲気で使用される。
塩化アルミニウム	Aluminum chloride	AlCl_3 で表されるアルミニウムの塩化物。イオン液体の原料の一つ。
塩化アルミニウム-1-エチル-3-メチルイミダゾリウムクロリド系イオン液体	AlCl_3 -EMIC ionic liquid	AlCl_3 と EMIC を所定のモル比で混合して得られるイオン液体のこと。アルミニウムの電析には AlCl_3 :EMIC=2:1 の酸性浴が主に使用される。
カソードドラム	Cathode drum	工業的には電解銅箔製造工程で使用されているドラム上のカソード。電気分解により表面に金属を析出させるのに使用。
グローブボックス	Glove box	内部に手を入れられるゴム手袋（グローブ）がついている密閉容器のことで、不活性ガス雰囲気に置換して作業ができるようになっている。
集電体	Current collector	活物質、導電剤等を塗布する電池電極材料。リチウムイオン二次電池では負極に銅、正極にアルミが使用されている。

水酸化アルミニウム	Aluminum hydroxide	Al(OH) ₃ で表されるアルミニウムの水酸化物。バイヤー法で製造される。
電解アルミニウム箔	Electrolytic aluminum foil	電解銅箔の手法でアルミ箔を製造する方法。ただし、アルミニウムを析出させるには水溶液を使用できないため、非水溶液および非水溶液を使用できる環境の整備が必要となる。実用化されていない。
電解精製	electrorefining	純度の低い金属をアノードにして電気分解することでカソードに純度の高い金属を析出させる手法のこと。高純度の銅やニッケルなどを得る方法として使用されている。
電解製錬	Electrolytic smelting	電気分解を利用し、鉱石から所望の金属を製造する方法。
電解銅箔	Electrolytic copper foil	カソードドラムに析出させた銅を剥がし、連続的に巻き取ることで薄箔を製造する方法。リチウムイオン二次電池負極集電体に使われている。
電析	Electrodeposition	電気分解により、カソードに還元生成物を析出させること。
バイヤー法	Bayer process	ボーキサイト中のアルミナを抽出する方法。水酸化ナトリウムに溶かし、水酸化アルミニウムを製造し、それを脱水することでアルミナを抽出する。ホール・エルー法と併せて使用される。
ボーキサイト	bauxite	アルミニウムの原料となる鉱石。アルミナを含む。
ホール・エルー法	Hall-Heroult process	現在実用化されている唯一のアルミニウム製錬方法。氷晶石とフッ化ナトリウムからなる高温熔融塩中にアルミナを溶解させ、電気分解によりカソードにアルミニウムを析出させる。
めっき	plating	還元反応を利用し、所望の物質表面に金属の膜を形成させる手法。防食性、装飾性、機能性等を付与することが可能。
熔融塩	Molten salt	熔融状態にある塩のこと。水を含まないため、電気化学的に卑な金属を析出することが可能。アルカリ金属、アルカリ土類金属、アルミの製錬等に使用される。

リチウムイオン二次電池	Lithium ion battery	電解質中のリチウムイオンが電気伝導することで充放電可能な二次電池。高容量で小型軽量の二次電池。
-------------	---------------------	---

[テーマ番号 21] 複層アルミ合金の開発
特に無し。

「革新的マグネシウム材の開発」

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
A6N01 合金	A6N01 alloy	Al-Si-Mg 系アルミニウム合金。構造材として中強度の押出用合金。溶接性に優れる。
A7N01 合金	A7N01 alloy	Al-Zn-Mg 系アルミニウム合金。6N01 合金と比較すると押出特性は劣るが、強度特性に優れた合金。
AZX311 合金	AZX311 alloy	AZ31 合金に約 1mass%のCaを添加した合金。
AZ31 合金	AZ31 alloy	展伸用として一般的なマグネシウム合金。(Mg-3%Al-1%Zn 合金, 質量%)。
難燃性	Flame-retardant	材料が熱や炎に直接さらされた際に、発火に対して抵抗する性質。
時効処理	Aging treatment	金属材料を高温から室温などへ急冷した後に、ある温度に材料を保持することで材料の硬さを増加させる処理。最も硬くなる条件をピーク時効と言う。
応力腐食	Stress corrosion	引っ張り応力や曲げモーメントなどの応力を受けた金属材料が、著しく腐食しやすくなる現象。
T6 処理	T6 treatment	溶体化処理を施した後に、人工時効硬化処理を行う処理。
溶体化（均質化） 処理	Solution treatment (Homogenization treatment)	材料を十分に加熱して合金成分を固体に溶け込ませ（固溶）、その後冷却する処理。
底面集合組織	Basal texture	六方晶の上面と下面を底面と呼び、底面が特定の方位に揃った組織。
AZ91 合金 AM60 合金	AZ91 alloy AM60 alloy	鋳造用として一般的な合金。(AZ91: Mg-9mass%Al-1mass%Zn), (AM60: Mg-6mass%Al-0.2mass%Mn)。
AMX601 合金 AMX602 合金 AZX912 合金	AMX601 alloy, AMX602 alloy, AZX912 alloy	AMX601, AMX602 合金は AM60 合金にそれぞれ 1, 2mass%の Ca を添加した合金。AZX912 合金は AZ91 合金に 2mass%の Ca を添加した合金。
AX41 合金, AX92 合金, AX81G 合金, AX81S 合金	AX41 alloy, AX92 alloy, AX81G alloy, AX81S alloy	プロジェクトで平成 27 年度までに開発した合金。AX41 は高速押出し合金。AX92 は高強度押出し用合金。AX81G は高強度厚

		板・中板用合金。AX81S は高強度薄板用合金。
DTA	Differential thermal analysis	試料と基準物質の温度を一定のプログラムに従って変化させながら、その試料と基準物質との温度差を温度の関数として測定する方法。
孔食	Pitting	特定の小部分で腐食が発生する腐食形態の一つ。
TIG 溶接	TIG welding	Tungsten Inert Gas の略で、タングステン-不活性ガス溶接の意。
MIG 溶接	MIG welding	Metal Inert Gas の略で、金属電極棒が溶加材として送給される溶接法の一つ。
下限界応力拡大係数範囲	Threshold stress intensity factor range	応力拡大係数範囲を漸減していった際に、き裂が伝播しなくなった際の値。
有効応力拡大係数範囲	Effective stress intensity factor range	き裂開閉口挙動を考慮した応力拡大係数範囲。一般的な応力拡大係数範囲は、応力拡大係数の最大値と最小値の差。有効応力拡大係数範囲は、応力拡大係数の最大値とき裂開口時もしくは閉口時の応力拡大係数の差。
シャルピー衝撃試験	Charpy impact test	切り欠きのはいった角柱状の試験片に対して高速で衝撃を与えることで試験片を破壊し、破壊するのに要したエネルギーと試験片の靱性を評価するための衝撃試験。
延性・脆性遷移温度	Ductile-(to)-brittle transition temperature	延性脆性遷移が起きる温度。

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
A6N01 合金	A6N01 alloy	Al-Si-Mg 系アルミニウム合金。構造材として中強度の押出用合金。溶接性に優れる。
A7N01 合金	A7N01 alloy	Al-Zn-Mg 系アルミニウム合金。6N01 合金と比較すると押出特性は劣るが、強度特性に優れた合金。

AX41 合金	AX41 alloy	射水分室（三協立山株）における開発合金。
AZ31 合金	AZ31 alloy	展伸用として一般的な Mg-Al-Zn 系マグネシウム合金。(Mg-3mass%Al-1mass%Zn 合金)。
AZX311 合金	AZX311 alloy	Mg-3mass%Al-1mass%Zn-1mass%Ca合金。比較的高い延性を有する AZ31 合金に 1mass%Caを添加した合金。
AZX811 合金	AZX811 alloy	Mg-8mass%Al-1mass%Zn-1mass%Ca合金。相模原分室における開発合金。
DTA	Differential thermal analysis	試料と基準物質の温度を一定のプログラムに従って変化させながら、その試料と基準物質との温度差を温度の関数として測定する方法。
EBSD	Electron backScatter diffraction	電子顕微鏡に組み合わせ、電子線を操作しながら、擬菊池パターン（試料に電子を照射した際に反射電子が試料中の原子面によって回折されることによるバンド状のパターン）を解析することで、ミクロな結晶方位や結晶系を測定する解析。
EPMA	Electron probe microanalyser	電子線を対象物に照射する事により発生する特性 X 線の波長と強度から構成元素を分析する装置。
MIG 接合	MIG welding	半自動溶融接合の一種でシールドガスに不活性ガスを用いて、電極棒が溶加材として溶融する。
T5 処理	T5 treatment	高温加工から冷却後、積極的に冷間加工を行わず、人工時効硬化処理したもの。
T6 処理	T6 treatment	溶体化処理を施した後に、人工時効硬化処理を行う処理。
応力腐食	Stress corrosion	それだけでは腐食を生じなかったようなある腐食環境下で、応力下にある領域が受ける選択的な腐食。
片振り	Pulsating stress	疲労試験において応力比=0 での試験。
側構体	Side body structure	構体の進行方向左右にある部分。
均質化処理	Homogenization	溶解・鋳造後の鋳塊に生成した不均一な晶出物・析出物を固溶させたり、その大きさ

		や密度をコントロールし、均一にしたりするために行う熱処理。
孔食	Pitting	特定の小部分で腐食が発生する腐食形態の一つ。
剛性率	Rigidity	弾性率の一つ。物体のねじれに対する抵抗の大きさを表す定数。
構体	Railway car body	鉄道車両の車体において、台枠・骨組・外板などで構成され車体の強度を担う部分である。
時効処理	Aging treatment	金属材料を高温から室温などへ急冷した後に、ある温度に材料を保持することで材料の硬さを増加させる処理。最も硬くなる条件をピーク時効と言う。
晶出	Crystallization	液相から固相が分かれて生成すること。
靱性	Toughness	破断する前にエネルギーを吸収する性質。
成形性	Formability	割れを生じずに所要の形状への付与のしやすさ。深絞り成形性、張出し成形性、曲げ成形性等がある。
析出	Precipitation	温度による溶解度の変化で材料中に溶け込んでいた原子がもとの材料からはみだし、もとの材料とは異なる結晶をつくる現象。この時に作られた結晶を析出物という。
双晶変形	Twin deformation	金属結晶において、ある剪断応力を受けたとき、すべり（結晶塑性）によらず双晶（2個以上の結晶が一定の幾何学的規則性をもって一体に結合しているもの）の形成によって変形すること。
台枠	Under frame	上部構造の重量を支え、形を安定させるための構造。
妻構体	Gable end body structure	鉄道車両の連結面側の壁部分。
底面集合組織	Basal texture	六方晶の上面と下面を底面と呼び、底面が特定の方位に揃った組織。
電気抵抗率	Electrical Resistivity	電気の通しにくさを表す、寸法によらない物性値。
難燃性	Flame resistance	材料が熱や炎に直接さらされた際に、発

		火に対して抵抗する性質。
熱伝導率	Thermal Conductivity	物質の熱伝導のしやすさを示す値。温度差のある物体において熱移動のおこりやすさで表される。
伸び・延性	Elongation	材料が破断する直前における最大の変形量（ひずみ）を伸びと呼び、もとの長さに対する比率として表す。
反重力 casting	Antigravity-Suction-Casting	金属溶湯内に鑄型を設置し気圧差を利用して鑄造を行う方法。
引張強さ	Tensile strength	材料に引張り変形を加えた際に、破断する前に材料に表れる最大の引張応力
比熱	Specific heat	単位質量の物質の温度を単位温度だけ上昇させるのに必要な熱量。
表面処理	Surface treatment	金属材料が腐食するのを防護するためにめっき、塗装などを行うこと。
疲労	Fatigue	静的破壊力より低い繰り返し応力によって材料が破壊に至る現象。
平面曲げ疲労試験	Plane Bending Fatigue	平板状試験片に曲げモーメントを繰り返し与えることによって材料の疲労寿命を測定する試験
ポアソン比	Poisson's ratio	物体に弾性限界内で応力を加えたとき、応力に直角方向に発生するひずみと応力方向に沿って発生するひずみの比。
ヤング率	Young's modulus	固体を単純に引っ張ったり圧縮したりした場合、長さの弾性変形と外力を結び合わせる比例定数。
溶体化処理	Solution treatment	材料を十分に加熱して合金成分を固体に溶け込ませ（固溶）、その後冷却する処理。
両振り	Alternating stress	疲労試験において応力比=-1 での試験。

[テーマ番号 17] 高強度マグネシウム材（薄板）の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
A7N01 合金	A7N01 alloy	Al-Zn-Mg 系アルミニウム合金。6N01 合金と比較すると押出特性は劣るが、強度特性に優れた合金。

AZX311 合金	AZX311 alloy	Mg-3mass%Al-1mass%Zn-1mass%Ca 合金。比較的高い延性を有する AZ31 合金に 1mass%Ca を添加した合金。
時効処理	Aging treatment	金属材料を高温から室温などへ急冷した後に、ある温度に材料を保持することで材料の硬さを増加させる処理。最も硬くなる条件をピーク時効と言う。
析出	Precipitation	温度による溶解度の変化で材料中に溶け込んでいた原子がもとの材料からはみだし、もとの材料とは異なる結晶をつくる現象。この時に作られた結晶を析出物という。
構体	Railway car body	鉄道車両の車体において、台枠・骨組・外板などで構成され車体の強度を担う部分である。
側構体	Side body structure	構体の進行方向左右にある部分
妻構体	Gable end body structure	鉄道車両の連結面側の壁部分
台枠	Under frame	上部構造の重量を支え、形を安定させるための構造
T6 処理	T6 treatment	溶体化処理を施した後に、人工時効硬化処理を行う処理
溶体化処理	Solution treatment	材料を十分に加熱して合金成分を固体に溶け込ませ（固溶）、その後冷却する処理
AZ91 合金	AZ91 alloy	鋳造用として一般的な Mg-Al-Zn 系マグネシウム合金。(Mg-9mass%Al-1mass%Zn 合金)
晶出	Crystallization	液相から固相が分かれて生成すること。

[テーマ番号 18] 高強度マグネシウム材（押出材）の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
A7N01 合金	A7N01 alloy	Al-Zn-Mg 系アルミニウム合金。6N01 合金と比較すると押出特性は劣るが、強度特性に優れた合金。
AZX311 合金	AZX311 alloy	Mg-3mass%Al-1mass%Zn-1mass%Ca 合金。比較的高い延性を有する AZ31 合金に 1mass%Ca を添加した合金。

AZX611 合金	AZX611 alloy	Mg-6mass%Al-1mass%Zn-1mass%Ca 合金。 AZX311 に比べて、強度が優れ、伸びが劣る。
引張強度	Tensile strength	材料に引張り変形を加えた際に、破断する前に材料に表れる最大の引張応力。
伸び・延性	Elongation	材料が破断する直前における最大の変形量（ひずみ）を伸びと呼び、もとの長さに対する比率として表す。
難燃性	Non combustible	材料が熱や炎に直接さらされた際に、発火に対して抵抗する性質。
調質	Well temper	マグネシウム合金を所定の温度で保持、冷却することで組織及び特性を変化させる手法。
構体	Railway car body	鉄道車両の車体において、台枠・骨組・外板などで構成され車体の強度を担う部分。
側構体	Side body structure	構体の進行方向左右にある部分。
妻構体	Gable end body structure	鉄道車両の連結面側の壁部分。
台枠	Under frame	上部構造の重量を支え、形を安定させるための構造。
AZX912 合金	AZX912 alloy	AZ91 合金に 2mass%の Ca を添加した合金。

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
難燃性	flame retardant	材料が熱や炎に直接さらされた際に、発火に対して抵抗する性質。
暴露試験	Exposure test	材料の大気環境での耐食性、耐候性、耐久性を確認するとともに、促進試験の促進度を決定する尺度を得る試験。
促進試験	Accelerating tests	製品を過酷な条件下に置き、意図的に劣化を進めて製品寿命を検証する試験。
塩水噴霧試験（SST）	Salt spray test	所定濃度の塩化ナトリウム水溶液を噴霧させ、試験材料に付着させ、腐食を促進させ耐食性を評価する方法。
塩水浸漬試験(SDT)	Salt dipping test	所定濃度の塩化ナトリウム水溶液の中に試験片を浸漬させ、腐食を促進させ耐食

		性を評価する方法。
複合サイクル試験 (CCT)	Cyclic corrosion test	塩水噴霧・乾燥・耐湿等の条件を所定のプログラムで繰り返し実施する促進試験
電気化学的手法	Electrochemical method	化学物質の性質を電氣的に計測する手法。電極電位を制御するポテンシオスタット。電流を制御するガルバノスタット等がある。
化成処理	Chemical treatment	素材の表面に処理剤を作用させて化学反応を起こさせることで、耐食性や塗料との親和性など、元の素材とは違った性質を与える処理。通常は、素材を処理材に浸漬、あるいは処理液をシャワー方式により噴霧して処理を行う。ここでは、素材表面に処理剤を塗布して処理を行う手法を塗布型化成処理と呼んでいる。
陽極酸化処理	Anodizing	対象となる材料の表面を陽極として、主に強酸中で電解により対象となる材料の表面を酸化させる処理。
カレントインタラプター	Current interrupter	微小直流定電流を塗装膜に印加し、その応答信号から塗膜の抵抗、容量を解析して塗膜下の腐食程度を判断する手法。
下地処理	Surface treatment	目的とする表面処理を実施する前にその表面処理がしっかり密着するために行う予備的な表面処理。
塗装処理	Coating	材料表面に塗料を塗ることにより防食性を付与する処理。塗料の乾燥を常温で行う処理を常温乾燥処理、塗料の乾燥時に加熱を行う場合を焼付処理と言う。
AZX612 合金	AZX612 alloy	Mg-6mass%Al-1mass%Zn-2mass%Ca 合金。AZ61 合金に 2mass%Ca を添加した合金。
耐湿試験	Humidity test	湿度の高い雰囲気試験片を設置し、腐食を促進させ耐食性を評価する手法。
CASS 試験	CASS test	酢酸性の塩化ナトリウム水溶液に塩化第二銅を添加した水溶液を噴霧する腐食試験。
AZ91 合金	AZ91 alloy	casting Mg-Al-Zn 系マグネシウム合金。(Mg-9mass%Al-1mass%Zn 合金)。

AZX912 合金	AZX912 alloy	AZ91 合金に 2mass%Ca を添加した合金。
AXM030305 合金	AXM030305 alloy	Mg-0.3mass%Al-0.3mass%Ca-0.5mass%Mn 合金
りん酸塩系化成処理	Phosphating	化成処理の代表的な方法の一つで金属表面にリン酸系の金属塩の薄い皮膜(マイクロオーダー)を生成させるもの。
エポキシ系塗装膜	Epoxy resin film	エポキシ樹脂塗料を利用した塗装膜。一般に、耐薬品性、耐磨耗性、密着性に優れている。
ADC12 合金	ADC12 alloy	代表的なアルミダイカスト合金。アルミダイカストの生産量のうち、90%以上で本合金が利用されている。
腐食生成物	Corroded product	周囲の環境と化学反応を起こし、素材表面に生成する物質。いわゆる「さび」。
A6N01 合金	A6N01 alloy	Al-Si-Mg 系アルミニウム合金。構造材として中強度の押出用合金。
孔食	Pitting corrosion	特定の小部分で腐食が発生する腐食形態の一つ。
メラミン	Melamine	塗料硬化剤成分の 1 種。高温反応型の硬化剤。反応には 120℃以上の加温を要する。高温反応型の為、主剤と硬化剤を混合した 1 液型塗料となる。又は、この硬化系塗料/塗装を指す。
ウレタン	Urethane	塗料硬化系の 1 種 (常温硬化)。塗料硬化剤成分としてイソシアネート系樹脂を用いる。
イソシアネート	Isocyanete	ウレタン硬化系皮膜の硬化剤。常温でも反応する硬化剤。その為、主剤と硬化剤を使用時に混合する 2 液型の塗料となる。

[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

用語 (日本語)・略号	English	用語・略号の説明
A6N01 合金	A6N01 alloy	Al-Si-Mg 系アルミニウム合金。構造材として中強度の押出用合金。溶接性に優れる。
A7N01 合金	A7N01 alloy	Al-Zn-Mg 系アルミニウム合金。6N01 合金と比較すると押出特性は劣るが、強度

		特性に優れた合金。
AS, RS	Advancing side, Retreating side	摩擦攪拌接合において、接合ツールの回転方向と接合方向が一致する側を前進側（AS）、一致しない側を後退側（RS）と呼ぶ。
AZ91 合金 AM60 合金	AZ91 alloy AM60 alloy	鋳造用として一般的な合金。(AZ91: Mg-9mass%Al-1mass%Zn), (AM60: Mg-6mass%Al-0.2mass%Mn)。
AMX601 合金 AMX602 合金 AZX912 合金	AMX601 alloy, AMX602 alloy, AZX912 alloy	AMX601, AMX602 合金は AM60 合金にそれぞれ 1, 2mass%の Ca を添加した合金。AZX912 合金は AZ91 合金に 2mass%の Ca を添加した合金。
AX41 合金, AX92 合金, AX81G 合金, AX81S 合金	AX41 alloy, AX92 alloy, AX81G alloy, AX81S alloy	プロジェクトで平成 27 年度までに開発した合金。AX41 は高速押出し合金。AX92 は高強度押出し用合金。AX81G は高強度厚板・中板用合金。AX81S は高強度薄板用合金。
BTR	Brittle temperature range	凝固脆性温度領域。
CMT	Cold metal transfer	フローニクス社が開発した低入熱の MIG 溶接法。
FSW	Friction stir welding	摩擦攪拌接合。
IMC	Intermetallic compound	金属間化合物。
MIG 溶接	MIG welding	Metal Inert Gas の略で、金属電極棒が溶加材として送給される溶接法の一つ。
TIG 溶接	TIG welding	Tungsten Inert Gas の略で、タングステン-不活性ガス溶接の意。
側構体	Side body structure	構体の進行方向左右にある部分。
構体	Car body structure	鉄道車両の車体において、台枠・骨組・外板などで構成され車体の強度を担う部分。
台枠	Underframe	上部構造の重量を支え、形を安定させるための構造。車体の土台となる骨組。
妻構体	end body structure	鉄道車両の連結面側の壁部分。
難燃性	Non combustible	材料が熱や炎に直接さらされた際に、発

		火に対して抵抗する性質。
伸び・延性	Elongation	材料が破断する直前における最大の変形量（ひずみ）を伸びと呼び、もとの長さに対する比率として表す。
引張強度	Tensile strength	材料に引張り変形を加えた際に、破断する前に材料に表れる最大の引張応力。

[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）

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
AX41 合金, AX92 合金, AX81G 合金, AX81S 合金	AX41 alloy, AX92 alloy, AX81G alloy, AX81S alloy	プロジェクトで平成 27 年度までに開発した合金。AX41 は高速押し出し合金。AX92 は高強度押し出し用合金。AX81G は高強度厚板・中板用合金。AX81S は高強度薄板用合金。
機械学習	Machine learning	人間が自然に行っている学習能力と同様の機能をコンピュータで実現しようとする技術・手法。
計算科学	Computational science	数学的モデルとその定量的評価法を構築し、計算機を駆使して科学技術上の問題を解決する学問分野。
難燃性	Flame-retardant	材料が熱や炎に直接さらされた際に、発火に対して抵抗する性質。
マテリアルズインテグレーション(MI) システム	Materials integration (MI) system	材料科学の成果を活用するとともに、理論、実験、解析、シミュレーション、データベースなどの全ての科学技術を融合して材料の研究開発を工学的な視点に立ち支援することを目指す総合的な材料技術ツール。

「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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
スクラップ	Scrap	金属材料の切り屑や、金属製品の廃棄物。
チタン鉱石	Titanium ore	鉱石中に含まれる酸素や鉄とチタンの化合物でチタンの原料となる。

[テーマ番号 11] チタン薄板の革新的低コスト化技術開発

[テーマ番号 12] 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
スポンジチタン	Ti Sponge	チタン展伸材の原料となるスポンジ状の金属チタン。チタン鉱石を製錬して得られる。
チタン梱包体	Titanium package	熱間圧延用の素材（スラブ）。スポンジチタンを圧縮成形したブリケットをチタン厚板で覆った箱。

「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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
炭素繊維	Carbon Fiber	有機繊維の前駆体を加熱炭素化处理して得られる、質量比で90%以上が炭素で構成される繊維。
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。
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。
前駆体化合物	Precursor compound	炭素材料になる前の高分子物質。温度を上げても熔融しない特徴を持つ。
耐炎化	Thermal stabilization	PAN繊維が炭素化時に熔融しないように200-350℃の空气中で数時間加熱する処理のこと。
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。
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。
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）。
樹脂界面接着性	Interfacial adhesion	樹脂と繊維表面の接着性。
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。

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。
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。
不連続繊維強化複合材料	Discontinues 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
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。
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。
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。
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。
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

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。
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。
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。
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。
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。
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。
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。
射出成形	Injection Molding	加熱溶解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。

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）に優れる繊維となる。
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。
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。
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。
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。
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。
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。
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）。
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。

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 込み長さとし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。
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。
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。
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。
Vf	Fiber Volume Fraction	繊維体積含有率。

「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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
RTM	Resin Transfer Molding	金型に強化繊維織物をセットし、それに樹脂を高圧で注入することにより得られる複合材。
EV	Electric Vehicle	電気自動車。
一次構造部材	Primary Structure Member	自動車の車両構造に関して、地面や衝突物から受ける荷重を直接受けて構造体を維持するための高強度・高剛性・高耐久性部材。
一方向性	Unidirectional	層内において強化繊維がすべて互いに平行に並んでいる状態。一方向強化層はプライ（Ply）と呼ばれ、この層の積み重ねは積層板と言われる。
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
NDI	Non Destructive Inspection	非破壊検査のこと。超音波探傷、X線等により部品内部の欠陥状態を検査する方法。
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総称。架橋ネットワーク化前のプレポリマーと硬化剤を混合して熱硬化処理を行うと製品として完成するが、プレポリマーも製品化した樹脂も両者ともエポキシ樹脂と呼ばれる。
LFT-D	Long Fiber Thermoplastic-Direct	比較的繊維長の長い不連続繊維と熱可塑性樹脂を直接コンパウンドして得られる低コストな複合材成形法のこと。
押出素材	Extruded material	混練により生成される中間素材。
開繊性	Fiber Spreading	炭素繊維束やガラス繊維束などの強化繊維束を連続して幅広く、薄く広げた状態にすること。繊維束の厚み方向の繊維本数を少なくすれば（開繊性を高めれば）、繊維束中へのマトリクスの含浸が短時間

		で均一にできるので、成形工程において生産性の向上や品質の向上に有利にはたらく。
強化材	Reinforcement	プラスチックなど、軽量であるが弾性率や強度の低い母材（マトリクス材）に対して、強度を向上させることを目的として混入させる材料。強化材とマトリクスを組み合わせたものを複合材料とよぶ。強化材にはガラス繊維、炭素繊維、ケブラーなどが用いられる。
コンポジット	Composites	2 つ以上の異なる素材を一体的に組み合わせた材料のこと。
混練	Mixing	強化繊維ロービングと樹脂ペレットをスクリー押出機に投入し、混ぜ合わせる。これによって、不連続繊維強化複合材が得られる。
サイクルタイム	Cycle Time	製品を作る場合のかかった時間。最初の工程をスタートし最後の工程までかかった時間のこと。稼働時間のみならず、待ち時間も含まれる。サイクルタイムの短縮によって、品質やコストだけでなく、時間の面で競合との差別化、競争力の強化、及びコスト削減、顧客満足を増大までを図ることができる。
サーモグラフ	Thermograph	サーモグラフィ装置。物質から発せられる赤外線を検出して、ものの温度を調べる装置。コンピュータ画面上で温度を色分けして表示することができる。
射出成形	Injection Molding	加熱溶解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。
チョップドテープ	Chopped Tape	一定の長さに切りそろえたプリプレグテープ。短繊維でマット、スプレイアップ法、コンパウンドに使用される。一方

		向不連続繊維基材。
等方性	Isotropy	物体の物理的性質が方向によって異なること。気体、ふつうの液体、非晶質（アモルファス）の固体（ガラスなど）は等方性を示す。⇔ 異方性
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。
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。使用に際しては、流動性を有するレベルの比較的低分子の樹脂を所定の形状に整形し、その後加熱等により反応させて硬化させる。接着剤やパテでA液（基剤）とB液（硬化剤）を混ぜて使うタイプがあるが、これは熱硬化性樹脂のエポキシ樹脂で、混合により重合反応が起こっている。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。
熱伝導性	Thermal Conductivity	熱伝導において、熱流束密度（単位時間に単位面積を通過する熱エネルギー）を温度勾配で割った物理量。
破断ひずみ	Breaking Strain	外力の作用により、材料が破壊（破断）する時のひずみ。破断する時の応力を破断強度または破断応力ともいう。
パルスサーモグラフィ	Pulse Thermography	NDI の手法のひとつで、ハロゲンランプ等の光源から検査対象物の内部に動的な温度差を発生させ、その結果の表面に生

		じる温度変化を、画像として取得し得られた複数の温度画像から、内部の構造や欠陥を画像化する NDI 法。
比強度	Specific Strength	比重に対する材料の強度。このパラメータが大きいほど、同じ強度の時により軽い部品が作られる。
比剛性	Specific Stiffness	比重に対する材料の剛性。このパラメータが大きいほど、同じ剛性の時により軽い部品が作られる。
賦形性	Formability	プリフォーム配置工程において、成形に用いる型形状に対して、プリフォームを成形すること。熱成形直後における、得られた予備成形体の形状と熱成形に用いた型の形状との一致性の程度を表す。
フラグメンテーション (フラグメント) 試験	Fragmentation Test	マトリックスに単繊維を埋め込み、繊維方向に平行にマトリックスに引張ひずみを加えることによりせん断強度を推定するテスト方法。繊維は破断し、多数の小片に分断される。
プリフォーム	Preform	RTM や C/C コンポジット等の成形用基材で、強化繊維を立体的な形状にしたもの。
プリプレグ	Prepreg	連続した強化繊維にマトリックス樹脂を含浸させた半硬化状態の単層材。
プレヒート	Pre-Heat	成形型に基材を設置する前にあらかじめプリフォームに余熱を与えておくこと。
不連続繊維	Discontinuous Fiber	繊維が短く切断されたもの（短繊維）で、マトリックス樹脂内でランダムに配向される。射出成形用繊維強化樹脂でよく用いられる。
ボイド（空隙）	Void	樹脂の繊維束への含浸が不十分であった場合に、樹脂内や樹脂-繊維間に空気が入り込んだまま成形されてしまい生じる空間。
ポリアミド (PA)	Polyamide	主鎖にアミド結合 (-NH-CO-) をもつものをポリアミドと呼ぶが、主鎖が脂肪族であるものは、ナイロンとも呼ばれる。耐摩耗性、自己潤滑性に優れ耐衝撃性も大きいという長所があるが、アミド結合

		のために吸湿性も強いので寸法安定性が悪く、機械的、電氣的な物性が変化する。結晶化度による影響も大きいので成形時には注意が必要である。
ポリプロピレン (PP)	Polypropylene	エチレンの水素ひと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。
マイクロドロップ レット試験	Microdroplet Test	繊維強化複合材料において、強化繊維と各種樹脂の界面接着性を評価する試験方法。単繊維に樹脂粒（ドロップレット）を付着させ、ドロップレットを固定させて後に繊維の引き抜きを行い、引き抜かれる際の荷重と、繊維の樹脂粒への埋め込み長さの関係から、界面せん断応力を求めることができる。
マテリアルハンドリング (マテハン)	Material Handling	工場内において材料や部品の移動に関する取扱い。移動方法としては、台車、フォークリフト、コンベヤ、ロボット等がある。
マトリクス材	Matrix	複合材料において、強化される側の部材を母材（マトリックス）と呼ぶ。繊維強化プラスチックの場合はプラスチック、繊維強化金属の場合は金属、鉄筋コンクリートの場合はコンクリートがそれぞれマトリックスとなる。
モジュール構造 部材	Module Structure Member	部材をインテグレーションした複合化部材。一体成形できるので、製造コストを安くできる。自動車部品では、従来よりインストルメントパネルモジュールなどがあり、短繊維のガラス繊維強化プラスチックの成形部材として適用されている。
溶着接合	Welding	溶接あるいは高温で加熱して接着させること。二次加工技術（成形が一次加工）の一つ。熱可塑性の樹脂部材を、融点を超えるまで加熱し、圧力を加えると分子

		レベルで結合することを利用した接合方法。樹脂部材を加熱する方法として、超音波溶着、振動溶着、誘導溶着、高周波溶着、熱溶着など、様々な方法がある。
--	--	--

[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

用語(日本語)・略号	English	用語・略号の説明
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics	炭素繊維強化プラスチック。炭素繊維で補強したプラスチック成形品（樹脂成形品）の総称。
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。
CFRTS	Carbon Fiber Reinforced Thermosetting Plastics	炭素繊維強化熱硬化性プラスチック。エポキシや不飽和ポリエステルといった熱硬化性樹脂を母材とする炭素繊維強化複合材料。
CMT	Carbon Fiber Mat Reinforced Thermoplastics	炭素繊維マット強化熱可塑性樹脂。GMTと対比させる形で前プロジェクトで命名したもので、炭素繊維の単糸を面内等方に分散させた CFRTP。
CTT	Chopped Carbon Fiber Tape Reinforced Thermoplastics	炭素繊維テープ強化熱可塑性樹脂。CMTと対比させる形で前プロジェクトで命名したもので、炭素繊維強化熱可塑性樹脂テープを面内等方に分散させた CFRTP。
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastics	ガラス繊維強化プラスチック。ガラス繊維で補強したプラスチック成形品（樹脂成形品）の総称。
GMT	Glass-Mat Reinforced Thermoplastics	熱可塑性樹脂（主に PP）をガラス長繊維マットで強化したプラスチック材料であり、スタンパブルシートとも呼ばれる。通常ガラス短繊維入り熱可塑性樹脂と比べて、長繊維が 50%程度も占めているので強度的に優れ、自動車部品などに使われている。
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。
RTM	Resin Transfer Molding	金型に封入されたドライプリフォームに樹脂（熱硬化性または熱可塑性）を注入する成形法。
SMC	Sheet Molding Compound	強化繊維と樹脂（熱硬化性または熱可塑性）からなるシート状材料を金型の中で積層し圧縮成形する手法。
Vf	Fiber Volume Fraction	繊維体積含有率。単位は%。
アイゾッド衝撃強さ	Izod Impact Strength	衝撃に対する強さを表す指標。単位はJ/m。ノッチと呼ばれる切り込みを付けた試験片を、片持ちはりで支持し、振り型のハンマーで衝撃曲げ打撃を加えて計測する。1回の打撃によって破壊するのに要したエネルギーを、ノッチに沿って計測した試験片の幅で割って求められる。
一次構造部材	Primary Structural Member	自動車の車両構造に関して、地面や衝突物から受ける荷重を直接受けて構造体を維持するための高強度・高剛性・高耐久性部材。
一方向性	Unidirectional	層内において強化繊維がすべて互いに平行に並んでいる状態。一方向強化層はプライ（Ply）と呼ばれ、この層の積み重ねは積層板と言われる。
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。（対義語は等方性）
エッチング	Etching	化学薬品などの腐食作用を応用した塑形ないし表面加工の技法。使用する素材の必要部分にのみ防食処理を施し、腐食剤によって不要部分を除去することで目的形状のものを得る。
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総称。架橋ネットワーク化前のプレポリマーと硬化

		剤を混合して熱硬化処理を行うと製品として完成するが、プレポリマーも製品化した樹脂も両者ともエポキシ樹脂と呼ばれる。
遠赤外線ヒーター	Far-Infrared Radiation Heater	セラミックス、石英、金属酸化面などの比較的低温（500℃～1000℃）の発熱体から放射される光を利用する加熱装置。光のピーク波長は3～5 μm であり、1～15 μm 程度の範囲に分布する。
応力集中	Stress Concentration	材料に切欠きや溝がある場合に、外力を与えた時に他の部分よりも応力が大きくなる現象。部材の断面が大きく変形している部分や、部材の断面に孔（あな）、亀裂、切欠きなどが起こり不連続部分が発生している時、その近くに著しく応力（抵抗力）が集中している。
開繊	Fiber Spreading	炭素繊維束やガラス繊維束などの強化繊維束を連続して幅広く、薄く広げた状態にすること。繊維束の厚み方向の繊維本数を少なくすれば（開繊性を高めれば）、繊維束中へのマトリックスの含浸が短時間で均一にできるので、成形工程において生産性の向上や品質の向上に有利にはたらく。
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よぶ。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。
カップリング剤	Coupling Agent	分子内に水になじみやすい部分（親水基）と油になじみやすい部分（親油基・疎水基）を持つ物質。有機材料と無機材料を結合させる機能を有し、複合材料の力学特性や耐水性、接着性の向上に使われる。
含浸度	Impregnation Rate	ゴム、合成樹脂を織物、紙などの組織や構造のすき間にしみ込ませた状態の程度を表す指標。
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 (ヒドロキシル基)、アルデヒドの -CHO、カルボン酸の -COOH、などがある。
強化材	Reinforcement	プラスチックなど、軽量であるが弾性率や強度の低い母材 (マトリックス材) に対して、強度を向上させることを目的として混入させる材料。強化材とマトリックスを組み合わせたものを複合材料とよぶ。強化材にはガラス繊維、炭素繊維、ケブラーなどが用いられる。
コミングルヤーン	Commingled Yarn	強化繊維と樹脂系マトリックス繊維を組み合わせた混繊糸。
コンソリデーション	Consolidation	プリプレグやセミプレグを裁断後、積層あるいはプリフォームして、複数の部材を合同体として同時に成形すること。後工程での接合の必要が無いのでコスト削減が可能となる。
コンポジット	Composites	2つ以上の異なる素材を一体的に組み合わせた材料のこと。
サイクルタイム	Cycle Time	製品を作る場合のかかった時間。最初の工程をスタートし最後の工程までかかった時間のこと。稼働時間のみならず、待ち時間も含まれる。サイクルタイムの短縮によって、品質やコストだけでなく、時間の面で競合との差別化、競争力の強化、及びコスト削減、顧客満足の増大までを図ることができる。
サイズ剤	Sizing Agent	ある組織や構造に対してインクなど液体の浸透性を抑え、滲みを防ぐ目的で加えられる化学物質。疎水性基と親水性基を持ち、疎水性基を外側に向けて組織に疎水性をもたせる。内添方式と表面方式とがあり、いずれにも天然物と合成物とがある。
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。
サーモグラフ	Thermograph	サーモグラフィ装置。物質から発せられる赤外線を検出して、ものの温度を調べる装置。コンピュータ画面上で温度を色分けして表示することができる。
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。
収束剤	Convergence Agent	サイズ剤。炭素繊維の製造工程や、高次加工工程（織物工程、プリプレグ工程、その他の成形工程）での取扱い性を向上させる。
親和性	Affinity	繊維強化プラスチックにおいては、分子同士の結合しやすさをいう。例えば、分子構造中に水となじみやすい（親和性の高い）水酸基（OH）を持っていれば、吸湿・吸水に優れる物質となる。
スタンピング成形	Stamping Molding	圧縮成形（Compression Molding）の一種で、FRTP（繊維強化熱可塑性プラスチック）のシート状中間基材を金型外で加熱し、連続的に型の中に投入してプレスする成形方法。金型内で中間基材を加熱冷却するヒートアンドクール成形に比べてサイクルタイムを大幅に短縮できるが、品質保証のための高度なマテハン（材料搬送）技術が必要となる。
脱型	De-molding	型から製品を取り出す作業。
ダブルベルトプレス	Double Belt Press	押出機等による連続供給と、ベルトプレスによる連続した加熱・冷却によって、樹脂シート等の加工を行う装置。各ゾーンにおけるプレスロールの高さ調節や温度、圧力設定を行うことにより、製品の厚み制御を行うことができる。

中間基材	Intermediate Material	一方向材、織物、テープ分散シート、マット等、目的に応じた繊維形態と樹脂による、成形直前の材料形態。
チョップドテープ	Chopped Tape	一定の長さに切りそろえたプリプレグテープ。短繊維でマット、スプレИАアップ法、コンパウンドに使用される。一方向不連続繊維基材。
テキスタイル	Textile	織物や布地を意味し、繊維製品全般のこと。
テーププレースメント	Tape Placement	樹脂を含浸させたトウプリプレグやプリプレグテープを、型に配向させて積層する技術。
等方性	Isotropy	物体の物理的性質が方向によって異なること。気体、ふつうの液体、非晶質（アモルファス）の固体（ガラスなど）は等方性を示す。（対義語は異方性）
内圧成形	Inner Pressure Molding	成形型のキャビティ内に中空状の成形素材を配置し、中空素材の内側から圧力を加えて中空素材を成形型に密着させた状態とし、その状態で加熱成形する方法。繊維強化樹脂を用いた中空（閉断面）の部品を製作することができる。
ナノアロイ	Nano-Alloy	ポリマーAのマトリックス中にポリマーBをナノオーダーで分散させた分散構造を作る良流動化技術。ポリマー微粒子を独自に開発してマトリックスポリマー中に均一に分散させることにより、加熱化の熔融状態（流動状態）でのマトリックスポリマー分子間の相互作用の低下が起こり、ポリマー分子の運動性向上による流動性の大幅な向上が実現できる。
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。
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。使用に際しては、流動性を有するレベルの比較的低分子の樹脂を所定の形状に整形し、その後加熱等により反応させて硬化させる。接着剤やパテでA液（基剤）とB液（硬化剤）を混ぜて使うタイプがあるが、これは熱硬化性樹脂のエポキシ樹脂で、混合により重合反応が起こっている。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。
熱伝導性	Thermal Conductivity	熱伝導において、熱流束密度（単位時間に単位面積を通過する熱エネルギー）を温度勾配で割った物理量。
破断ひずみ	Failure Strain	外力の作用により、材料が破壊（破断）する時のひずみ。破断する時の応力を破断強度または破断応力ともいう。
パッチ	Patch	つぎあて。リペア技術において損傷部に追加して貼り合わせる薄板状のCFRTP。
比強度	Specific Strength	比重に対する材料の強度。このパラメータが大きいほど、同じ強度の時により軽い部品がつけられる。
比剛性	Specific Stiffness	比重に対する材料の剛性。このパラメータが大きいほど、同じ剛性の時により軽い部品がつけられる。
表面改質	Surface Treatment	表面層の特性を変化させること。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。
ファイバブリッジング	Fiber Bridging	繊維強化プラスチックにおいて、亀裂進展時に未破断繊維が亀裂を橋渡しすることにより、亀裂進展抵抗が増加する現象。
ファウンテンフロー	Fountain Flow	樹脂を型内に流し込む時に、金型面との

		滑りによって流れるのではなく、流れの中心から金型内壁面へ噴出するように流れていくこと。射出成形の流動末端で生じる。
賦形性	Formability	プリフォーム配置工程において、成形に用いる型形状に対して、プリフォームを形作ること。熱成形直後における、得られた予備成形体の形状と熱成形に用いた型の形状との一致性の程度を表す。
フラグメンテーション (フラグメント) 試験	Fragmentation Test	樹脂に単繊維を埋め込み、繊維方向に平行に樹脂に引張ひずみを加えることによりせん断強度を推定するテスト方法。繊維は破断し、多数の小片に分断される。
プリフォーム	Preform	中間基材とほぼ同義。
プリプレグ	Prepreg	連続した強化繊維にマトリックス樹脂を含浸させた半硬化状態の単層材。
プレヒート	Pre-Heat	成形型に基材を設置する前にあらかじめ中間基材に余熱を与えておくこと。
ブレード	Blade	一方向材を基本として、立体的にファイバーを織り込んだもの。三次元強化基材の一つ。
不連続繊維	Discontinuous Fiber	繊維が短く切断されたもの（短繊維）で、マトリックス樹脂内でランダムに配向される。射出成形用繊維強化樹脂でよく用いられる。
ボイド（空隙）	Void	樹脂の繊維束への含浸が不十分であった場合に、樹脂内や樹脂-繊維間に空気が入り込んだまま成形されてしまい生じる空間。
ホモポリプロピレン	Homo-polypropylene	ポリプロピレン単体のみからなる重合体であり、結晶性は高い。ホモ PP でも触媒の選択・プロセスの相違・更には各メーカーの市場性格の差異によりその物性は微妙に異なる。
ポリアミド（PA）	Polyamide	主鎖にアミド結合（-NH-CO-）をもつものをポリアミドと呼ぶが、主鎖が脂肪族であるものは、ナイロンとも呼ばれる。耐摩耗性、自己潤滑性に優れ耐衝撃性も

		大きいという長所があるが、アミド結合のために吸湿性も強いので寸法安定性が悪く、機械的、電氣的な物性が変化する。結晶化度による影響も大きいので成形時には注意が必要である。
ポリプロピレン (PP)	Polypropylene	エチレンの水素ひと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。
マイクロドロップレット試験	Microdroplet Test	繊維強化複合材料において、強化繊維と各種樹脂の界面接着性を評価する試験方法。単繊維に樹脂粒（ドロップレット）を付着させ、樹脂粒を固定させて後に繊維の引き抜きを行い、引き抜かれる際の荷重と、繊維の樹脂粒への埋め込み長さの関係から、界面せん断応力を求めることができる。
マトリックス材	Matrix	複合材料において、強化される側の部材を母材（マトリックス）と呼ぶ。繊維強化プラスチックの場合はプラスチック、繊維強化金属の場合は金属、鉄筋コンクリートの場合はコンクリートがそれぞれマトリックスとなる。
モジュール構造部材	Module Structure Member	部材をインテグレーションした複合化部材。一体成形できるので製造コストを安くできる。自動車部品では従来よりインストルメントパネルモジュールなどがあり、短繊維のガラス繊維強化プラスチックの成形部材として適用されている。
溶着接合	Welding	溶接あるいは高温で加熱して接着させること。二次加工技術（成形が一次加工）の一つ。熱可塑性の樹脂部材を融点を超えるまで加熱し、圧力を加えると分子レベルで結合することを利用した接合方法。樹脂部材を加熱する方法として、超音波溶着、振動溶着、誘導溶着、高周波溶着、熱溶着など、様々な方法がある。

溶融粘度	Melt Viscosity	樹脂などが溶けた時に、流動する物体の内部に生じる抵抗。粘度＝粘性ともいう。溶融粘度が低いということは流動性が良いことを意味する。
ラマン顕微鏡	Raman Microscope	可視光が分子に当たって散乱する光散乱（＝ラマン散乱）を利用した物質の分析装置。この散乱した光の波長変調を分光器によって調べることによりその組成分析や結晶構造情報を得、顕微鏡と融合させることで局所的な成分や結晶状態を知ることができる。
ラマンスペクトル	Raman Spectrum	ラマン散乱光の波長（色の違い）に対する光強度をグラフ化したもの。スペクトルは複数のピークを持ち、分子に固有の形状を示す。物質の質の評価や不純物の同定を行うことができる。
ランダムチョップ基材	Random Chopped Material	チョップドテープ（一定の長さに切りそろえたプリプレグテープ）をランダムに配向した基材。
臨界繊維長	Critical Fiber Length	繊維を埋め込んだ樹脂材料において、引張応力を適用した時に繊維が切断され、それ以上切断が起こらない時の繊維の長さ。ある繊維長以下になると界面でのせん断を支えることができなくなるため、繊維破断よりも繊維の樹脂内での滑りが先に起きてしまう。
連続繊維	Continuous Fiber	すべての繊維が互いに平行に並んでいる一方向層の形態で用いられる長繊維。編んだり、織ったりして用いることができる。また一方向層を様々な方向に積層することで擬似等方性や直交性、異方性のある板をつくることができる。
ワイブル分布	Weibull Distribution	物体の破壊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。

「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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
CFRP	Carbon fiber reinforced plastics	炭素繊維強化複合材料
FLJ	Friction lap joining	摩擦重ね接合
PA	Polyamide	ポリアミド
PP	Polypropylene	ポリプロピレン
PPS	Polyphenylene sulfide	ポリフェニレンスルフィド

[テーマ番号 02] 残留 γ 相制御中高炭素鋼板の接合技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
摩擦攪拌接合・FSW	Friction Stir Welding	ツールを高速に回転させながら金属板に押し付け、その摩擦熱で金属を高温に温めつつ、金属を拡散流動させて鋼板を接合する技術。
ナゲット	nugget	スポット溶接で形成された溶接金属領域の名称。

[テーマ番号 03] 中高炭素鋼の革新的接合技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
アークスポット溶接	Arc spot welding	被接合材同士の接合面を加圧し、直線方向に摺動することにより発生する摩擦熱を利用した接合方法で、さらに、急冷機構を付与した接合手法。
引張せん断強さ	Tensile Shear Strength (TSS)	引張せん断試験時の破断荷重
十字引張強さ	Cross Tensile Strength (CTS)	十字引張試験（剥離試験）時の破断荷重

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
FSW	Friction Stir Welding	摩擦攪拌接合
PHM	Pre/Post Heating Method	予後熱法

[テーマ番号 05] アルミニウム／異種材料の点接合技術

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
ウエルドボンド	Weld bond	溶接と接着を併用する接合法、抵抗スポット溶接と接着の組合せがその代表例。
界面剥離	Interfacial peeling	接合体がその界面で破断すること。
凝集破壊	Cohesive failure	接合体の樹脂や接着剤が接合界面ではなく、その内部で破壊すること。
金属間化合物	Intermetallic compound	正原子価をもつ金属元素同士が作る化合物、多くは固体としてのみ安定で脆い。
合金化溶融亜鉛めっき鋼板(GA)	Alloyed zinc coated steel sheet	高温で溶かした亜鉛に鋼材を浸し、表面に亜鉛めっきした後、再加熱してめっき層を鉄と合金化するもの。
樹脂官能基	Functional compound	有機化合物を特性づける原子団。機能原子団ともいう。たとえばカルボン酸のカルボキシル基 $-COOH$, アルデヒドのアルデヒド基 $-CHO$, アルコールの水酸基 $-OH$ など。
振動減衰	Vibration damping	自動車の操安性を推し量る上での一つの基準、軽量化により悪化する性能
振動騒音(NVH)	Noise, Vibration, Harshness	自動車の快適性を推し量る上での一つの基準、軽量化により悪化する性能。
スプリングバック	Spring back	金属や炭素繊維などが成形加工時に元に戻ろうとする変形。
炭素繊維強化プラスチック(CFRP)	Carbon fiber reinforced plastics	炭素繊維を樹脂に複合化し、樹脂の機械的性質や物性を改良したプラスチック。
耐シャワー性	Resistance against shower cleaning	車体を塗装前にシャワー洗浄する際の接着剤の飛び散り難さを規定する特性。
貯蔵安定性	Stability of storage	熱硬化型接着剤が室温での保管時に粘度上昇を起し難い特性。
継手効率	Joint efficiency	母材強度に対する溶接継ぎ手の強度、 $(\text{溶接強度}/\text{母材強度})\times 100\%$ で表す。
抵抗スポット溶接	Resistance spot welding	被溶接物に電流を流しジュール熱を発生させ、その母材を溶融させると同時に加圧することによって点接合する溶接法。
点接合	Spot welding	線や面ではなく、点で接合すること、抵抗スポット溶接はその代表例。
電気亜鉛めっき鋼板	Electrolytic zinc	電気めっき法により亜鉛皮膜を形成した

(EG)	coated steel sheet	鋼板。
電食	Galvanic corrosion	材料間の腐食電位の差によって生じるマクロセル腐食、CFRP は腐食電位が高いため金属側の腐食を促進する。
熱歪み	Thermal distortion	材料間の熱膨張差によって接合部材に生じる歪み、自動車の塗装乾燥工程で発生しやすい。
ポリプロピレン(PP)	Polypropylene	プロピレンを重合させた熱可塑性樹脂、自動車部品として幅広く使用されている。
ポリアミド(PA)	Polyamide	アミド結合によって結合してできたポリマー、一般にナイロンと総称される。
ポリフェニレンサルファイド(PPS)	Polyphenylenesulfide	ベンゼン環と硫黄原子が交互に結合した結晶性の熱可塑性樹脂に属する合成樹脂。
モルフォロジー	Morphology	接着剤などの有機合成物のマイクロ組織の形態。

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
引張せん断強さ	Tensile Shear Strength (TSS)	引張せん断試験時の破断荷重。
十字引張強さ	Cross Tensile Strength (CTS)	十字引張試験（剥離試験）時の破断荷重。
0.45C		鋼の炭素含有量が 0.45mass%であること。
バインダー	Binder	超硬合金に用いられる結合剤。

[テーマ番号 07] 鋼材/CFRP 等樹脂材料の接合技術開発

用語（日本語）・略号	English	用語。略号の説明
TEU (20 フィートコンテナ換算個数)	TEU(Twenty-foot Equivalent Unit)	コンテナ船の積載能力を示す単位。1TEU は 20 フィートコンテナ 1 個分を示す。
摩擦重ね圧接法・FLJ	Friction Lap Joining	2 枚の板を重ね、重ね部に片側より回転するツールを押し付け移動させることで、摩擦熱と加圧力を移動線上に与えながら 2 枚の板を接合する手法。
極性官能基	Polar functional group	官能基とは有機化合物の炭化水素の水素部分に置き換わって結合する原子団のことで有機化合物の特性を決定する。極性官能基はこのうち、電気陰性度の高い酸

		素や窒素原子を含む官能基のこと。水酸基、アミノ基、カルボニル基、カルボキシル基などがそれにあたる。
熱可塑性樹脂	Thermoplastic resin	適当な温度に加熱すると軟化して可塑性を持ち、冷却すると固化する樹脂の総称。
熱硬化性樹脂	Thermosetting resin	初期重合物を加熱すると架橋反応を起こし硬化する樹脂の総称。いったん架橋すると再度加熱しても軟化しなくなる。
STEM（走査透過型電子顕微鏡）	Scanning Transmission Electron Microscope	サブナノサイズに集光した電子線を走査しながら試料に照射し、散乱もしくは透過した電子から得られる像を観察する装置。高角度環状暗視野像（HAADF 像）を用いることで、原子レベルの観察が可能となる。
構造設計技術	Structural integrate technology	接合技術、継手および部材の健全性評価技術を用い、新たな接合技術もしくは新たな構造形式を実用化する技術。
継手健全性評価技術	Functional assessments technology	接合した継手に求められる静的強度、疲労強度と言った性能要素を確認し、継手の実用性を確認する技術。
桁	Girder	構造体を構成する構造要素の一つであり、主に曲げ荷重に対応して配置される部材。
柱	Pillar	構造体を構成する構造要素の一つであり、主に圧縮荷重に対応して配置される部材。

[テーマ番号 08] 難接合性材料の線接合技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
AS（前進側）	Advancing Side	FSW において、ツールの回転方向と接合方向の幾何学的関係でツールと材料の相対速度が大きい側。
RS（後退側）	Retreating Side	AS の反対側。
EBSD（電子線後方散乱回折）	Electron backscatter diffraction	電子線をバルク試料表面に照射することで発生する非弾性散乱波がバルク試料の結晶構造に応じて回折する現象
FSW（摩擦攪拌接合）	Friction Stir Welding	円柱状のツールと呼ばれる部材で摩擦熱を発生させて材料を接合する方法。
FSP	Friction Stir Processing	FSW の原理を金属材料の表面改質技術として利用する方法。

FSSW	Friction Stir Spot Welding	円柱状のツールと呼ばれる部材で摩擦熱を発生させて材料を点接合する方法。
SEM（走査型電子顕微鏡）	Scanning electron microscopy	電子顕微鏡の一種であり、電子線を照射することで放出される二次電子・反射電子・X線などを検出することで、試料の表面を観察するもの。
TIG（ティグ）	GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)	タングステン電極からアークを発生させる溶接法。
TRIP（変態誘起塑性）	Transformation induced plasticity	変形によって相変態が誘発され、その結果として大きな塑性変形が発言する現象。
残留応力	Residual stress	接合した後に部材内部に残る応力。
疲労破壊抵抗	Resistance to fatigue failure	繰り返し負荷を受けるときの破壊に対する抵抗で、通常は疲労き裂進展速度の大きさによって表す。

[テーマ番号 09] 水和物低温接合技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語。略号の説明
水和物架橋接合	Hydrate Bridge Joining	水和物架橋を用いた接合。
異種材接合	Mixed material joining	異なった材料の接合。
表面調整	Surface control	表層の改質などを含む表面の調整。
低温接合	Low temperature joining	低温での接合。
ボイド	Void	空孔
SPR	Self Piercing Riveting System	母材にした穴を開けずにリベットを打ち込み、リベットと母材の塑性変形により接合強度を得る機械的接合法。
Tox	Tox	リベットを使わずに、母材を塑性変形させるカシメ接合方法のひとつ。
真空紫外線光・UVU	Vacuum Ultra Violet	電磁波の一種で、紫外線の中でもっとも波長の短い 10-200 nm 付近の領域。
X線光電子光 XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy	サンプル表面に X 線を照射し、生じる光電子のエネルギーを測定すること。サンプルの構成元素とその電子状態を分析すること

		ができる。
FAB	Fast atom beam	高速電子線

[テーマ番号 46] 中高炭素鋼／中高炭素鋼の摩擦接合共通基盤研究

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
FEM	Finite Element Method	有限要素法。数値解析手法の一つ。空間を格子によって分割し、その格子に物理量を変数として割り当て計算をする。
JSH440	JSH440	日本鉄鋼連盟規格における引張強さ440MPa以上の炭素－マンガン鋼。
MPS法	Moving Particle Semi-implicit Method	粒子法。数値解析手法の一つ。計算点を物理量とともに移動する粒子として連続体を扱う。
QT(焼入れ・焼き戻し)鋼	Quenched and Tempered Steel	焼入れ（鋼をオーステナイト組織の状態に加熱した後、水中または油中で急冷することによって、マルテンサイト組織の状態に変化させる熱処理）後に、焼き戻し（マルテンサイト組織の状態から鋼を再加熱し、一定時間保持した後に徐冷することで、焼入れによって硬化した鋼に靱性を与える目的で行われる熱処理）を行なった鋼。
S35C 鋼	S35C Steel	炭素含有量が 0.35mass%である炭素鋼。
S45C 鋼	S45C Steel	炭素含有量が 0.45mass%である炭素鋼。
S55C 鋼	S55C Steel	炭素含有量が 0.55mass%である炭素鋼。
SZ	Stir Zone	攪拌部。FSWにおいて大きな塑性変形により形成された再結晶組織からなる領域。
TMAZ	Thermo-Mechanically Affected Zone	攪拌部（SZ）の外側で加熱と塑性加工を受けた領域。
TRIP(変態誘起塑性)鋼	Transformation Induced Plasticity Steel	加工によってマルテンサイト変態が誘発させ、それによって発現する大きな塑性を利用して強度－延性バランスを意図的に向上させた鋼。

WC	Tungsten Carbide	炭化タングステン
線形摩擦接合・LFW	Linear Friction Welding	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を熱源として材料の軟化・バリの排出により新生面の形成に伴う接合法。
線形摩擦攪拌接合・LFSW	Linear Friction Stir Welding	材料同士を押し付け、線形運動で擦りあわせ、低温で強ひずみ加工を付与し、再結晶により接合する接合法。
抵抗スポット溶接	Resistance Spot welding	2枚以上の母材（被溶接材料）を圧着しつつ電流を流し、その抵抗熱で金属を溶かして接合する接合法。
ナゲット	Nugget	抵抗スポット溶接における溶融金属部。
摩擦攪拌接合・FSW	Friction Stir Welding	ツールを回転させながら、金属板に押し付け、その摩擦熱、加工発熱、材料流動により接合する接合法。
両面複動式(フラット)摩擦攪拌接合法	Flat Friction Stir welding	FSW ツールの耐久性を向上させるため、プローブ部にネジを付与しなくても、重ね接合において上下の流れを発生させることのできる FSW 接合法。

[テーマ番号 53] 構造材料用接着技術の開発

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
EDX	Energy Dispersive X-ray spectrometry	電子線照射により発生する特性 X 線を検出し、元素分析や元素マッピングを行う手法。
EELS	Electron Energy-Loss Spectroscopy	電子が薄片試料を透過する際に原子との相互作用により失うエネルギーを測定することによって、物質の構成元素や電子構造を分析する手法。
LIBS	Laser Induced Breakdown Spectroscopy	サンプル表面に短パルスでレーザーを当てることによって発生するマイクロプラズマを用いた高速な化学分析手法。
SFG	Sum-Frequency Generation Spectroscopy	2 次の非線形光学効果を利用した振動分光法で、表面・界面選択的な分光法。
トモグラフィー	Tomography	試料を連続的に傾斜させて撮影した多数の投影像をコンピュータで画像処理し、3 次元的内部構造を再構成する手法。

「戦略・基盤研究」

[テーマ番号 29] 新構造材料の技術・研究戦略
特に無し。

[テーマ番号 30] 技術動向調査分析
特に無し。

[テーマ番号 31] 高分子複合材料技術開発動向調査
特に無し。

[テーマ番号 32] 共通基盤技術の研究調査
特に無し。

[テーマ番号 41] 非鉄金属先導研究

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
双晶変形	Twin deformation	特定の結晶原子面を境として両側が対称な原子構造をとる場合に現れる特殊な結晶構造で、あるせん断応力を受けた時にすべりによらず双晶形成によって変形する現象。
加工硬化	Work hardening	金属材料が、加工変形によって次第に硬くなる現象。原因は、材料結晶中の転位が加工応力で運動すると同時に増殖して内部応力を蓄積し、数が増えた転移同士の交切などの相互作用で転位が動きにくくなり、硬化が起こる。
双晶誘起塑性	Twinning-induced Plasticity	双晶変形などの変形中に発現する現象が加工硬化率を著しく増加させること。
ポーラス金属	Porous metal	内部に多数の気孔を有する金属で、気孔形態、気孔サイズ、気孔率が異なる様々な材料が含まれる。
摩擦攪拌インクリメンタル加工	Friction stir incremental forming	インクリメンタル加工と摩擦攪拌接合を組合わせた金属薄板成形用に提案された塑性加工プロセスであり、高速回転させた棒状工具を金属薄板に押し込んで移動させることで金属薄板を成形する。

プラトー応力	plateau stress	多孔質材料の破壊過程は、線形弾性領域、プラトー領域、緻密化領域に分けることができる。圧縮応力-圧縮ひずみ曲線において、プラトー領域内の応力で、通常 20~30% の圧縮ひずみでの圧縮応力の平均値。
--------	----------------	--

[テーマ番号 42] 材料・接合等技術動向調査研究
特に無し。

[テーマ番号 43] 計測解析評価研究

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
応力腐食割れ・SCC	Stress Corrosion Cracking	腐食性の環境におかれた金属材料に引張応力が作用して生ずる割れ現象であり、材料表面の酸化皮膜の保護性が局所的に失われることにより発生し、その形態から粒界型 SCC (IGSCC) と粒内型 SCC (TGSCC) に分けられる。
水素脆化	hydrogen embrittlement	鋼材中に吸収された水素により鋼材の強度（延性又はじん性）が低下する現象。水素脆化は、腐食、溶接、酸洗い、電気メッキなどによる水素吸収が原因とされる。この水素吸収による破壊は「遅れ破壊」とも呼ばれる。
破壊力学	fracture mechanics	材料力学をベースとしながらもそれでカバーできない分野に考え出された工学の一分野であり、欠陥もしくはき裂を有する部材・材料について、破壊現象を定量的に取り扱う工学的手法の一つである。
位相最適化	Topology optimization	構造物の位相（空間）を設計変数として最適化する方法。最も自由度の高い構造最適化手法で、既存概念にとられない設計案の導出が可能。

[テーマ番号 44] 中性子線による構造材料解析技術の Feasibility Study

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
ブラッグエッジイメージング	Bragg-edge imaging	中性子を波長分解して透過イメージングするもので、結晶相、結晶歪み、結晶子サイズ、結晶配向などの情報を得ることができる手法である。
小角散乱	Small Angle Scattering	中性子や X 線を試料に入射し、散乱角度が数度以下の小角領域の散乱強度分布を計測する方法で、粒子サイズ等のマイクロ組織情報を得ることができる。

[テーマ番号 45] 構造用接着技術に関する Feasibility Study

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
AFM	Atomic Force Microscope	探針と試料に作用する原子間力を検出するタイプの顕微鏡、原子レベルの分解能を有する。
LIBS	Laser Induced Breakdown Spectroscopy	サンプル表面に短パルスでレーザーを当てることで発生するマイクロプラズマを用いた高速な化学分析手法。
SFG	Sum-Frequency Generation Spectroscopy	2 次の非線形光学効果を利用した振動分光法で、表面・界面選択的な分光法。
STEM-EELS	Scanning Transmission Electron Microscopy and Electron Energy-Loss Spectroscopy	細く絞った電子ビームを薄膜資料に照射し、電子が試料を透過する際に原子との相互作用により失うエネルギーを測定することによって、物質の構成元素や電子構造を分析する手法。
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy	試料表面に X 線を照射し、試料表面から放出される光電子の運動エネルギーを計測することで、試料表面を構成する元素の組成、化学結合状態を分析する手法。
MD シミュレーション	Molecular Dynamics Simulation	原子ならびに分子の物理的な動きのコンピュータシミュレーション手法。

[テーマ番号 49] マルチマテリアル設計技術開発(FS 研究)

特に無し。

[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

用語（日本語）・略号	English	用語・略号の説明
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics	炭素繊維強化プラスチック。
ブラッグエッジ イメージング	Bragg-edge imaging	中性子を波長分解して透過イメージングするもので、結晶相、結晶歪み、結晶子サイズ、結晶配向などの情報を得ることができる手法である。
小角散乱	Small Angle Scattering	中性子や X 線を試料に入射し、散乱角度が数度以下の小角領域の散乱強度分布を計測する方法で、粒子サイズ等のマイクロ組織情報を得ることができる。

I. 事業の位置付け・必要性について

1.事業の背景・目的・位置付け

1.1 事業の背景

我が国の CO₂ 排出総量（2015 年度）は約 12 億 t であり、このうち運輸部門の排出量はこの 17%を占め 2 億 1 千万 t となっている。自動車はこの運輸部門のうち 86%もの排出量を占め、日本全体の CO₂ 排出量の 15%を占めている事になる。

また国内のエネルギー使用量(2014 年度)は 1.4 万 PJ であり、この中の約 23%を運輸部門が占めており、そのうちガソリン、軽油、LP ガス等の石油由来エネルギーは 98%を占めている。

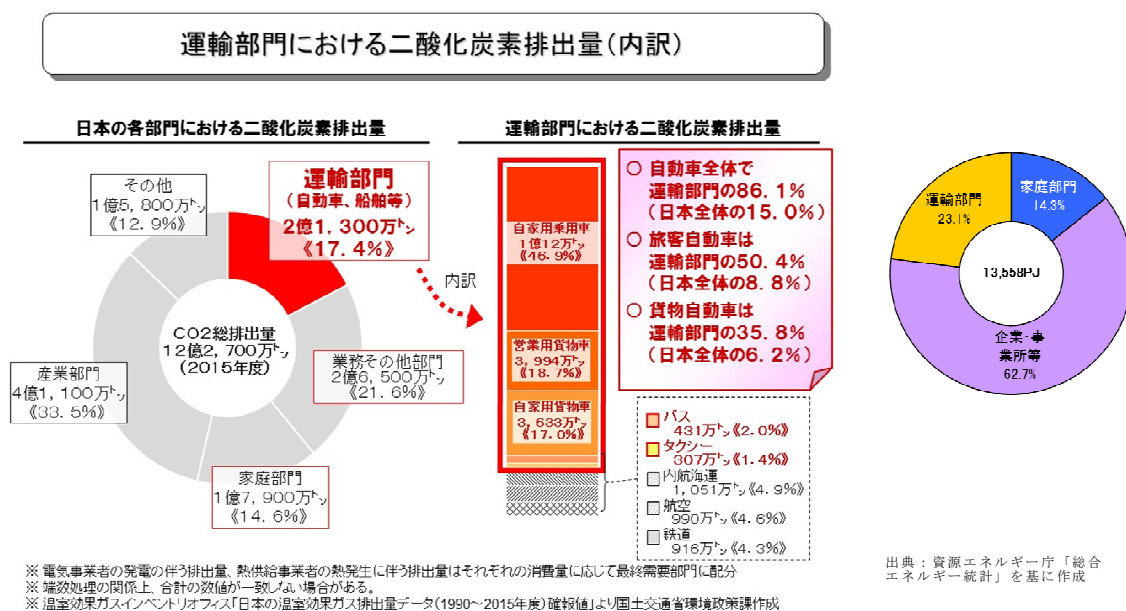


図 I -1 運輸部門における CO₂ 排出量

図 I -2 最終エネルギー消費の構成比の内訳

この中で特に自動車は 83%を占め、自動車の燃費改善は社会的に非常に大きな影響がある。自動車の燃費改善に関しては各国での取り組みが行われている中、特に欧米諸国での CO₂ 排出量規制の強化が進められており、自動車の CO₂ 排出量削減、燃費の向上が強く求められている。今後の CO₂ 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。このような中、自動車用内燃機関の効率向上やハイブリッド自動車の開発、電気自動車の開発により燃費改善が進められているが、これと共に自動車車体の軽量化が燃費の改善に非常に重要になる。

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。

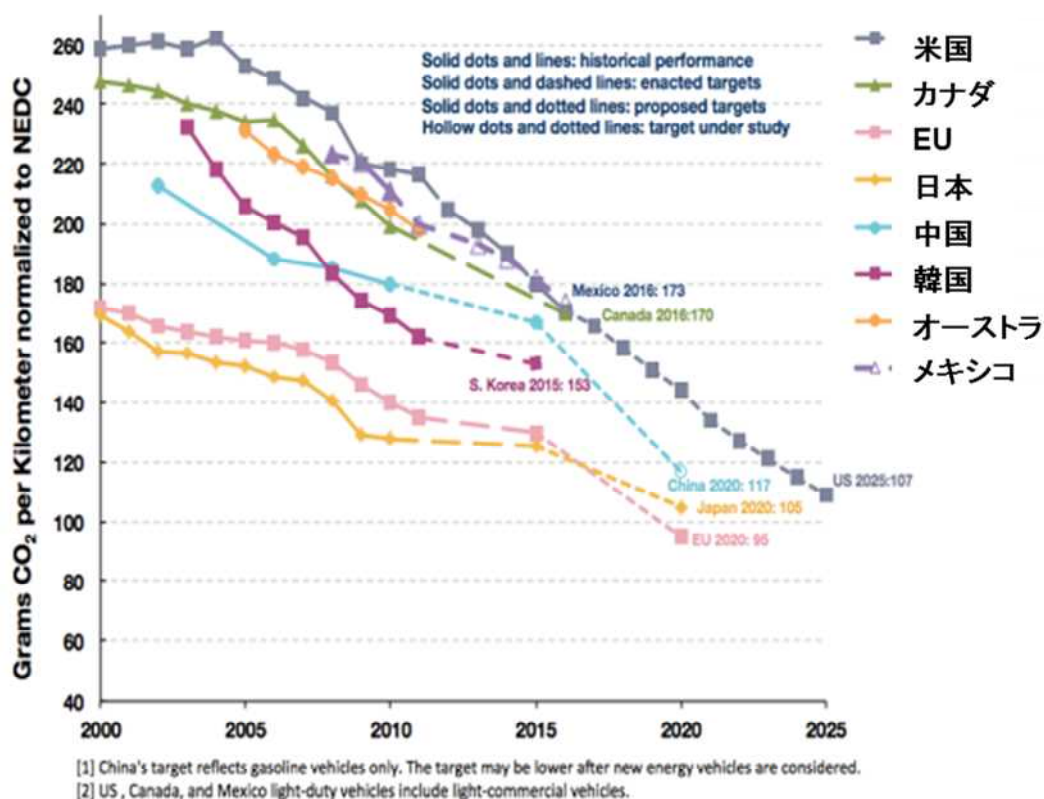


図 I -3 世界の燃費規制動向 (CO₂ 排出量 g/km)

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。）では、「革新的新構造材料等研究開発」において平成 26 年から平成 34 年まで、輸送器機の構造材料の軽量化を目指すこととした。このプロジェクトにおいては、自動車を中心とした輸送機器の抜本的な軽量化に向けて、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 CO₂ 排出量の削減、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。

普通鋼材(引張強度270~330MPa)から
ハイテン鋼(引張強度>440MPa)・
超ハイテン鋼(引張強度>980MPa)
の採用による軽量化

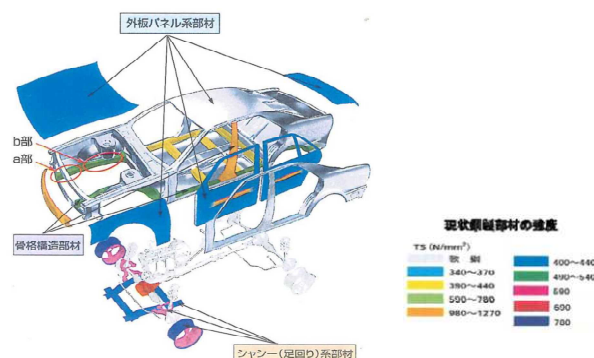


図 I -4 高強度材による構造部材の使用量の削減

1.2 事業の目的及び意義

我が国は高張力鋼では他国を圧倒する技術を有し、また炭素繊維においてもその市場シェアの 70~90%以上を占める等、輸送機器の軽量化に関わる素材の研究開発、事業化において強みを持っている。このような状況下で輸送機器、特に自動車の軽量化に関しては強みとしている素材を応用することで、CO₂ 排出量の削減に繋がる。

そこで、本プロジェクトでは車体等の構造材を形成する素材である、鋼材（鋼板）、アルミニウム材、マグネシウム材、チタン材、炭素繊維、炭素繊維強化樹脂とこれら構造材を接合する接合技術の研究開発を委託事業により輸送機器の CO₂ 排出量の削減を進める。

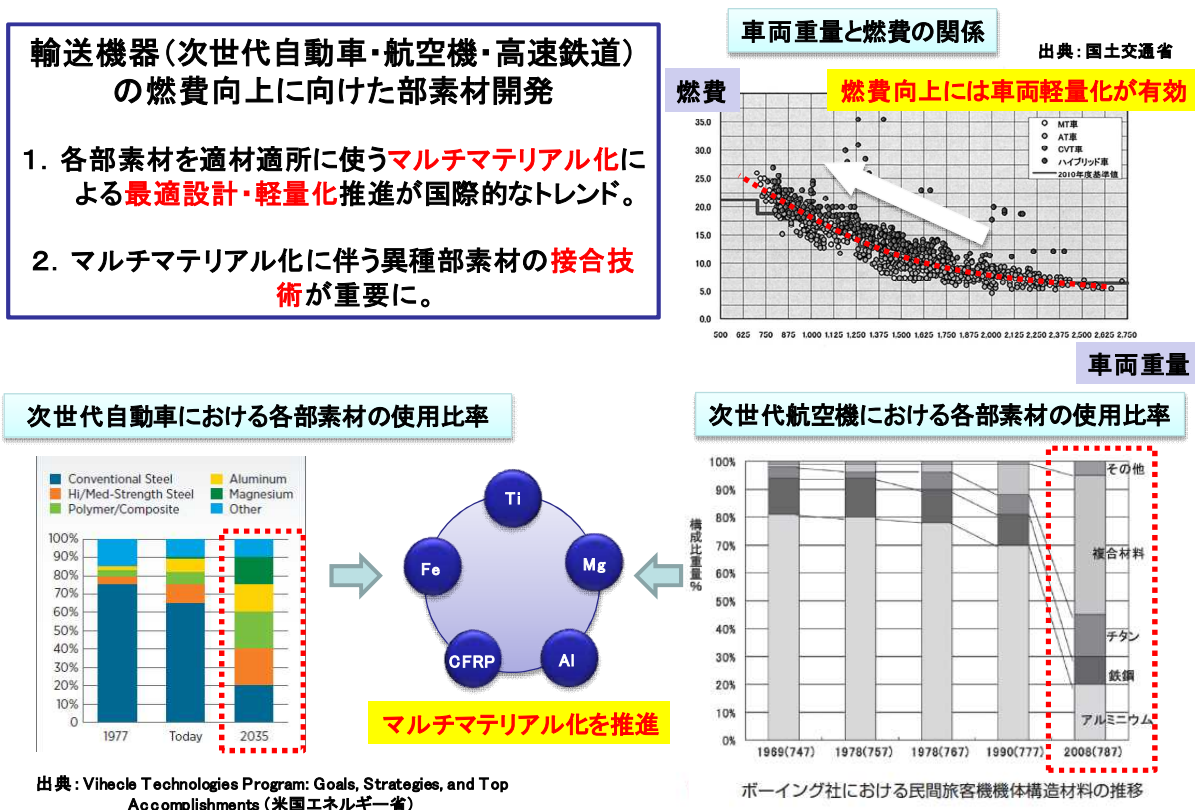


図 I -5 輸送器機軽量化とマルチマテリアル素材の活用

軽量化を実現するために各素材のマルチマテリアル化を進める上で、我が国の素材産業を本プロジェクトで束ね、オールジャパン体制で研究支援をすることにより、軽量化とマルチマテリアルを実現する接合技術をシームレスに進める事が出来る。

また本事業は平成 25 年度より経済産業省の直執行事業としてスタートした 10 年に渡る長期プロジェクトである。平成 26 年度にプロジェクトの円滑な推進のために NEDO にプロジェクト移管され、その際に軽量構造材料の素材としての炭素繊維の研究開発も本事業の委託の一部として加入し、現在のプロジェクトを構成している。図 I -6 に本プロジェクトのスケジュール概要を示す。

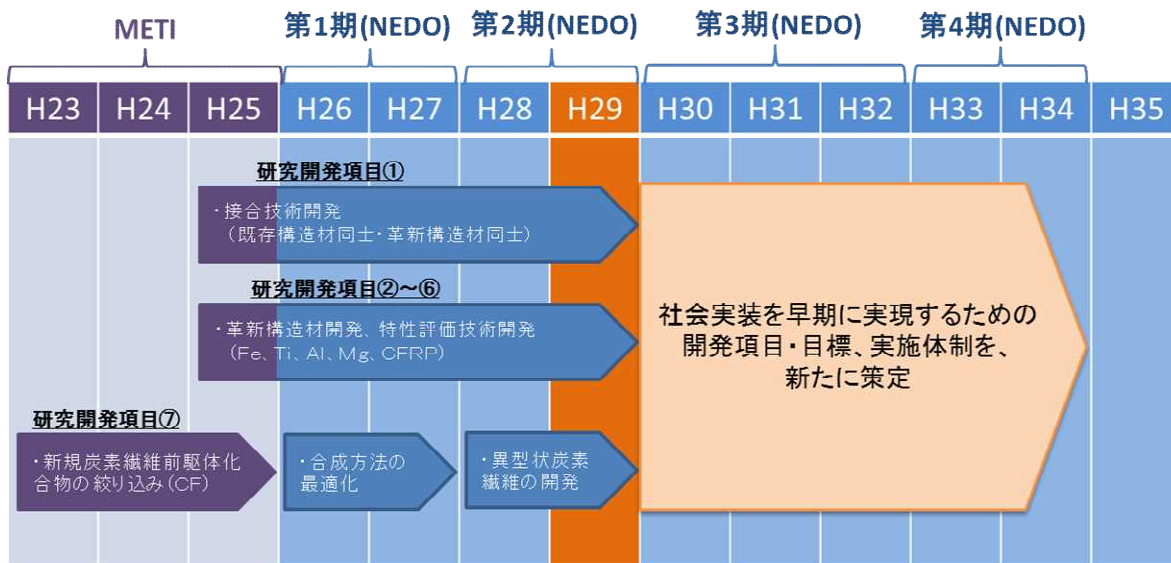


図 I-6 プロジェクトスケジュールの概要

1.3 事業の位置付け

1.3.1 政策的位置づけ

本事業は経済産業省が推進する、「未来開拓プロジェクト」の一つであり、本研究開発は既存技術の延長線上にない、夢のある「未来技術開拓」を実施するものである。内閣府総合科学技術会議では「平成 25 年度科学技術重要施策アクションプラン」により、重点的取組として「技術革新によるエネルギー消費量の飛躍的削減」を実現するものと登録されている。

○我が国が抱えるエネルギー・環境制約等の構造的課題を克服し、将来の成長の姿を描くために、**既存技術の延長線上にない、夢のある「未来開拓技術」**によって日本再生を果たすべく、国が研究開発で新たな道を切り開くべき分野を絞り込み、研究開発投資を重点化し、事業化に至るまで中長期的に推進する体制を構築する。

(総合科学技術会議)

本プロジェクトは「平成25年度科学技術重要施策アクションプラン」の2-3. 政策課題「エネルギー利用の革新」重点的取組④「技術革新によるエネルギー消費量の飛躍的削減」の対象施策として登録されている。

(参考)「平成25年度科学技術重要施策アクションプラン」(抜粋)

2-3. 政策課題「エネルギー利用の革新」

(1) 政策課題のポイント

我が国では、東日本大震災以降のエネルギー制約に対して、省エネによりエネルギー消費量の削減及び電力需要の平準化に取り組んでいる。これらに取組むことは、実質的に新たなエネルギー供給源を確保することと同等の効果があり、消費側での取組を更に強化することが重要である。その際には、生活の質を向上させながらもエネルギー消費量を削減するという、相反する課題も解決する必要がある。また、我が国は、産業・民生・運輸部門の各部門において、様々なエネルギー消費量削減に関する技術力を源泉に高い国際競争力を持っている。しかし、今後も国際競争に打ち勝ち成長するためには、エネルギー消費量削減に関する技術を更に進化させる必要がある。このような状況下、新たなエネルギー有効利用技術を通じて消費量の削減を目指し、「技術革新によるエネルギー消費量の飛躍的削減」を重点的取組に設定する。

(2) 重点的取組④「技術革新によるエネルギー消費量の飛躍的削減」この取組では、例えば、未利用のまま排出されている熱エネルギー等を経済的に回収・変換・蓄積等を行う技術や情報量等の増大により増え続けるエネルギー消費量を根本的に低減する技術、産業・民生・運輸の各部門においてエネルギー消費量を飛躍的に削減する技術等、革新的なエネルギー消費量削減技術の研究開発を推進する。

図 I-7 本プロジェクトの政策的位置づけ

1.3.2 国内外の研究開発の動向と比較

本事業に関わる研究開発を取り巻く状況と、国内外の主要なプレーヤーを表 I-1 に示す。この表からもわかる様に、炭素繊維や鋼材に関しては技術的、生産的優位に立っている事がわかる。しかし、製錬に大きなエネルギーを必要とする非鉄金属はエネルギーコストの安価な北米や中国に対して競争力が弱く、構造材のマルチマテリアル化を進める上で競争力を増す必要がある。

表 I-1 研究開発を取り巻く状況とプレーヤー

	取りまく状況	主要な技術及びプレーヤー
①軽量化	DH 自動車等における国際的な環境基準が整う中、軽量材料を用いた環境負荷の小さい自動車開発が必須になりつつある。鋼材、非鉄金属材料で技術的優位になる国が違ふ。日本は鋼板に関して優勢。	—
②高強度化	DH 自動車における衝突安全基準は年々厳しくなり、それに適合する高強度材料の開発が求められる。高強度を実現する単体構造設計が重要。また将来の自動運転により安全基準がどのように変わっていくのかも要注意。	—
③-1 鋼材	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。添加レア金属の需要逼迫も懸念材料。	新日鐵住金、JFE、神戸製鋼所、東北大 ポスコ(韓国)、宝山鋼鉄(中国)、武漢鋼鉄(中国)、釜山大(韓国)、オーケリッジ国立研究所(米国)、デルフト大(ドイツ)
③-2 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。	神戸製鋼所、UACJ、産総研、東北大学 アルコア(米国)、アラドシグナル(米国)、コーラスアルミニウム(ドイツ)、ロシア科学アカデミー(ロシア)、中国科学院(中国)
③-3 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。	大阪富士工業、三協立山、熊本大、長岡技科大 アルコア(米国)、ACROSTAK(スイス)、上海交通集団(中国)、中国科学院(中国)、ベングリオン大学(イスラエル)、レイセオン大学(カナダ)
③-4 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。	東邦チタニウム、神戸製鋼所、新日鐵住金、産総研、東北大学 QUESTEK(米国)、ウエスティングハウス(米国)、ディボン(米国)、ロシア科学アカデミー(ロシア)、中国科学院(中国)、ハルビン工業大学(中国)
③-5 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。	東レ、東邦テナックス、三菱レイヨン、東洋紡、帝人、東京大学、名古屋大学 Ten cate(オランダ)、Bond Laminates(ドイツ)、デルフト工科大学(ドイツ)、フラウンホーファー研究所(ドイツ)
③-6 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、外国企業の追従を許さない状況下にある。但し、消費エネルギー及びCO ₂ 排出量が多く、高コストは共通の課題。	東レ、東邦テナックス、三菱レイヨン、東洋紡、帝人、東京大学 Hexcel(米国)、Cytec(米国)、SGL Carbon(ドイツ)
④-1 接合	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(Light-eBody, ExtraLight等)。また、FSW(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。	三菱重工、川崎重工、大阪大学、産総研、東京工業大学 TWI(英国)、EWI(米国)
④-2 接着	RA 欧州での自動車、航空機等への利用が盛ん。大学等での研究も活発であり、企業による製品展開が進んでいる。	日東電工、住友ベークライト、松下電工 3M(米国)、HENKEL(ドイツ)、LORD(米国)、SIKA TECHNOLOGY(ドイツ)、ルノー(フランス)、AIRCELLE(フランス)、CYTEC(米国)、ホルト大(ポルトガル)、プリストル大(英国)、中国科学院(中国)

SEAMクラスターのうち、車体軽量化を扱うプロジェクトは、ENLIGHTとALIVE。また、4つのプロジェクト間の研究成果の公開及び活用は、FiatとVWを含む“Liason Team”が推進している。

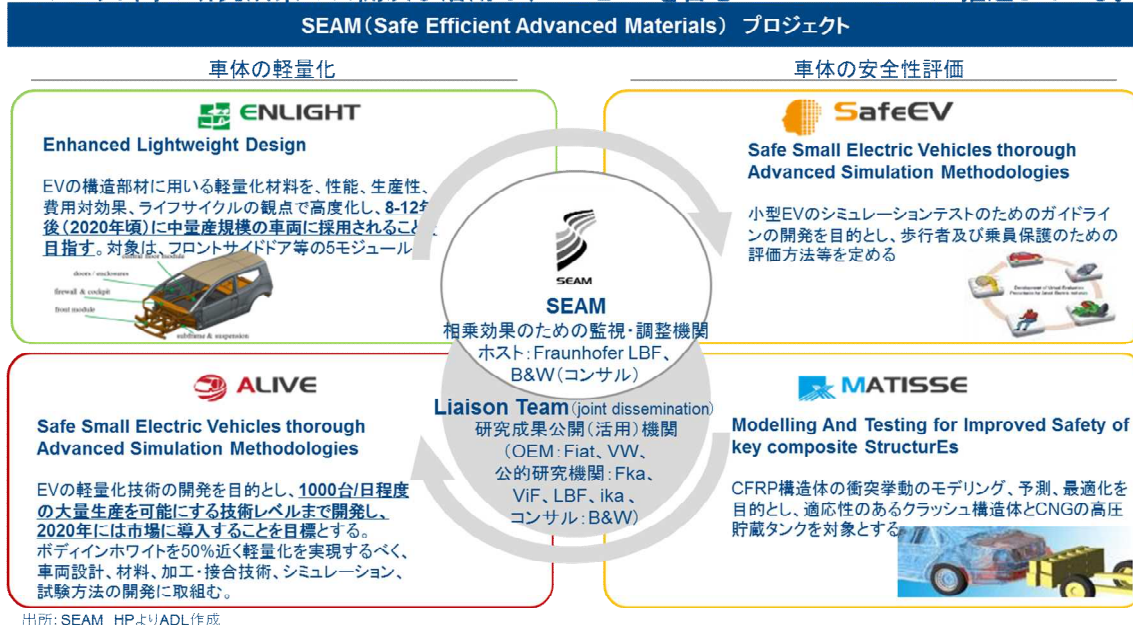


図 I -8 ドイツにおける輸送機器軽量化国家プロジェクト

欧州、特にドイツでは輸送機器軽量化の研究開発が盛んである。図 I -8 にドイツの輸送機器に関わる国家プロジェクトを示す。

2.NEDO の関与の必要性・制度への適合性

2.1 NEDO が関与することの意義

車両軽量化のための革新的新構造材料の開発は、先に述べたように未来開拓プロジェクトの一つで有り、そのプロジェクトの特徴は、

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

であり、これを進めるためにはプロジェクトマネジメントを的確に実施し、定期的なテーマ成果の確認、新規課題の取り込み、事業化の促進をする必要があり、NEDO がこれまでに得た知識と実績を生かして推進すべきプロジェクトである。

II. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

【アウトプット目標】

自動車や高速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、炭素繊維、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。

【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、平成 42 年において、373.8 万 t の CO₂ 削減が期待される。

【各テーマ開発目標】

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

【第 1 期目標（平成 27 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（平成 29 年度末）】

- ・接合深さ：10mm 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（平成 27 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）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（平成 29 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）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

(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（平成 27 年度末）】

- ・ 接合強度：試験片の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140）の引張せん断荷重平均値以上または母材破断
- ・ 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（平成 29 年度末）】

〈当初の目標〉

- ・ 高減衰接着剤の仕様決定
- ・ 電食に対する防錆技術の確立

〈平成 27 年度末修正後の目標〉

- ・ 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

(4) アルミニウム／CFRP 接合技術の開発

【第 1 期目標（平成 27 年度末）】

- ・ 接合強度：試験片の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140）の引張せん断荷重平均値以上または母材破断
- ・ 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（平成 29 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

(5) 鋼材／CFRP 等樹脂接合技術の開発

【第 1 期目標（平成 27 年度末）】

- ・ 接合強度：母材破断

【第 2 期目標（平成 29 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

(6) 構造材料用接着技術の開発（平成 27 年度末に本項目及び目標値を設定）

【第 2 期目標（平成 29 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

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

【第 1 期目標（平成 27 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（平成 29 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。

(2) チタン材連続一貫製造プロセス技術開発

【第 1 期目標（平成 27 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（平成 29 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。

(3) チタン新製錬技術開発

【第 1 期目標（平成 27 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（平成 29 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

- ・精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。

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

【第1期目標（平成27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（平成29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

(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（平成27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（平成29年度末）】

〈当初の目標〉

- ・AlCl₃系イオン液体の大量合成手法の確立
- ・パイロットプラントによる実証実験

〈平成27年度末修正後の目標〉

- ・AlCl₃系イオン液体の新合成法の開発および量産法の提示
- ・パイロットプラントによる実証実験

(3) 複層アルミ合金の開発〈平成27年度末に本項目及び目標値を設定〉

【第2期目標（平成29年度末）】

- ・熱処理後の耐力600MPa以上
- ・成形前の伸び20%以上
- ・製造プロセス設計指針の提示

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

【第1期目標（平成27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（平成29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（平成27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（平成29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（平成27年度末）】

- ・既存の難燃性マグネシウム合金を対象として、発火メカニズムおよび腐食メカニズムの解明と評価手法の導出

【第2期目標（平成29年度末）】

〈当初の目標〉

- ・既存の難燃性マグネシウム合金を対象として、発火特性、腐食特性に関するデータベース構築

〈平成27年度末修正後の目標〉

- ・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〈平成27年度末に本項目及び目標値を設定〉

【第2期目標（平成29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。

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

【第1期目標（平成27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（平成29年度末）】

〈当初の目標〉

- ・レアメタル添加量：10wt%未満
- ・引張強度：1.2GPa 以上
- ・伸び：20%以上

〈平成27年度末修正後の目標〉

- ・レアメタル添加量：10wt%未満
- ・引張強度：1.5GPa 以上を目指す
- ・伸び：20%以上

(2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発

【第1期目標（平成27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（平成29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

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

【第1期目標（平成27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（平成29年度末）】

- ・平成27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（平成27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を確立する。

- (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材料特性を CAE (Computer Aided Engineering) 解析に適用した予測技術を確立し、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 解析技術を確立する。
- (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を確立する。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 (平成 29 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を確立する。
- (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

〈当初の目標〉

- ・自動車構造体を想定して、軽量化及び量産性の検証を行う。

〈平成 27 年度末修正後の目標〉

- ・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。

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

【第 1 期目標（平成 27 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（平成 29 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。

(2) 炭化構造形成メカニズムの解明

【第 1 期目標（平成 27 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。

(3) 炭素繊維の評価手法開発、標準化

【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（平成 29 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⑧「戦略・基盤研究」

(1) 新構造材料の動向調査・技術・研究戦略

【第1期目標（平成27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（平成29年度末）】

〈当初の目標〉

- ・必要に応じて、平成27年度末に設定する。

〈平成27年度末修正後の目標〉

- ・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

(2) 共通基盤技術の調査研究

【第1期目標（平成27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／ヘルスマモニタリング手法の確立

【第2期目標（平成29年度末）】

〈当初の目標〉

- ・必要に応じて、平成27年度末に設定する。

〈平成27年度末修正後の目標〉

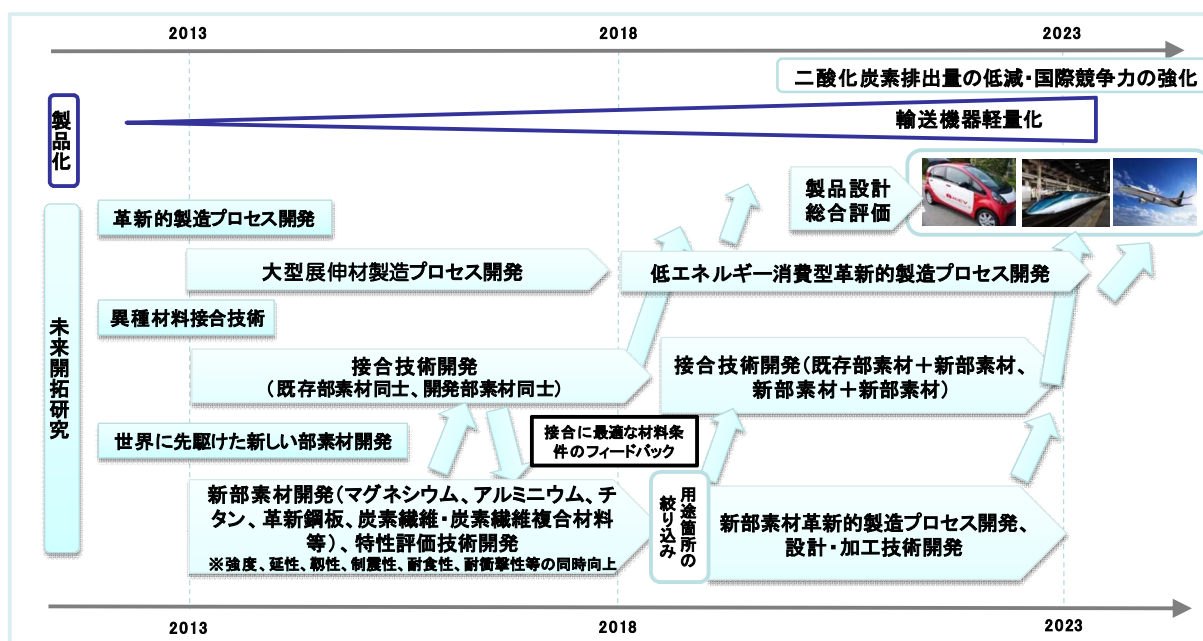
- ・構造材料、接合プロセスに関する新たな研究シーズ(腐食や水素脆化評価など)の顕在化
- ・小型中性子線などによる構造材料評価手法の構築
- ・軽量金属材料（アルミニウム、マグネシウム）に関する計測・評価手法の確立
- ・熱可塑性複合材料の損傷・強度評価手法の確立
- ・構造体接合部設計・評価手法の確立

2.事業の計画内容

2.1 研究開発の内容及び全体スケジュールと予算

2.1.1 研究開発の内容

構造材料の研究開発による輸送機器軽量化を目指す、本事業の全体計画を図Ⅱ-1に示す。



図Ⅱ-1 本事業の全体スケジュール

革新的製造プロセス、異種材料接合技術、軽量化に関わる新しい部素材の開発をまずは平成 25～平成 29 年度のプロジェクト前半の 5 年で実施し、それを基に後半 5 年間で低エネルギー消費型の新たなプロセス、新材料を使いこなす接合技術、設計・加工技術を構築し、最終的には輸送機器の製品設計に結びつけ軽量輸送機器を実現する。

(1)研究開発項目①「接合技術開発」

本プロジェクトで開発する革新的構造材料（鉄鋼、アルミニウム、マグネシウム、チタン、CFRP）による同種・異種材料接合技術を確立するため、被接合材料に適した新規接合方法の開発とその有効性の検証を進める。

	H25	H26	H27	H28	H29	H30-34
ハイテン用接合技術 JFE、新日鐵住金、 神戸製鋼所	1.2GPa級ハイテンの接合技術開発		→	プロセス条件の確認	→	1.5GPa級ハイテン接合技術開発
	技術構想の実証		第一期 →	性能と効果検証	第二期 →	実用化主要課題の解決 最終 →
ハイテン用接合 装置開発 川崎重工	1.5GPa級ハイテンの接合技術開発		第二期 →		→	卒業して個社で実用化 目標 →
鉄鋼/CFRP 接合技術 IHI		構造要素開発	→	構造部材開発	→	大型構造部材への 適用技術開発 →

図 II-2 「接合技術開発」のスケジュール

(2)研究開発項目②「革新的チタン材の開発」

本プロジェクトではチタン材の「革新的新製造プロセス」を実用化することで、高価なチタン材のコストダウンを図ることを最終目標にしている。そのため、まずプロジェクト前半では、それぞれの工程（チタン製錬工程－茅ヶ崎分室、溶解工程－西神分室、圧延工程－富津分室）でラボスケールでの基盤技術の確立をめざし、その後スケールアップ技術を確立し、パイロットプラントなどによる試作実証を経て、事業化に結びつける予定にしている。

	H25	H26	H27	H28	H29	H30-34
スポンジチタン材 東邦チタニウム	パイロットプラントによる要素技術の確立		→	工業化課題抽出	第二期 →	実証小型プラントによる検証 最終 →
低コストチタン材 神戸製鋼所 新日鐵住金	ラポレベル基本技術確立		第一期 →	工業化課題抽出	第二期 →	実証小型プラントによる検証 目標 →

図 II-3 「革新的チタン材の開発」のスケジュール

(3)研究開発項目③「革新的アルミニウム材の開発」

まずは国産ジェットに参入するべく合金開発・量産体制の確立を目指す。続いて海外小型ジェット機メーカーや大型旅客機への展開を図る。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。本研究開発では、その得られた成果を、骨格部材を対象にしたアルミニウム素材開発によって実用化することを狙いとしている。

	H25	H26	H27	H28	H29	H30-34
航空機用高強度材料 UACJ,神戸製鋼所	基本技術の確立		第一期 →	大型設備化設計	第二期 →	実機生産プロセスへの展開 →
自動車用複層材料 神戸製鋼所	要素技術の確立		第一期 →	量産技術の確立	第二期 →	実用化検討 →
			第一期 目標		第二期 目標	最終 目標

図 II-4 「革新的アルミニウム材の開発」のスケジュール

(4)研究開発項目④「革新的マグネシウム材の開発」

本テーマは難燃性新 Mg 合金の開発とその適用技術の確立を通して構造用 Mg 合金の実用化を図ることを目的としている。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ている。

	H25	H26	H27	H28	H29	H30-34
車両構体用部材 三協立山 権田金属工業	高強度厚板材(3mm)作製 技術の基礎的検討		第一期 →	車両用板材開発	第二期 →	板厚材(6mm)の 製造技術開発 →
難燃性Mg接合技術 総合車両製作所	接合施工法の開発 基礎技術確立		第一期 →	信頼性評価技術確立 小型構体試作	第二期 →	大型構体試作による検証 →
			第一期 目標		第二期 目標	最終 目標

図 II-5 「革新的マグネシウム材の開発」のスケジュール

(5)研究開発項目⑤「革新鋼板の開発」

中間目標である 1.2GPa-15%ハイテン鋼板の開発は、1 年間前倒しで開発が完了し、1.5GPa-20%ハイテン鋼板の開発は平成 29 年度末（前半 5 年）で早期に完了させることを目標とする。平成 30 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むとともに、自動車部品に必要な加工性などの課題について各分担研が自動車メーカーや部品メーカーに試作品を提供し競争テーマとして開発を進め実用化・事業化を図る。

	H25	H26	H27	H28	H29	H30-34	
高強度鋼板 JFE,新日鉄住金, 神戸製鋼所	1.2GPa級ハイテンの材料設計 技術確立		第一期目標	1.5GPa級ハイテンの 材料設計	第二期目標	1.5GPa級ハイテンの 実用性評価技術の開発 および実用性評価	最終目標
							→

図 II -6 「革新鋼板の開発」のスケジュール

(6)研究開発項目⑥「熱可塑性 CFRP の開発」

車体軽量化への寄与度が最も高いと期待される CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics、炭素繊維強化プラスチック) の特長であるテーラードデザインの可能性を生かし、強化材の形態や配向状態、樹脂組成、製造プロセスを含めたトータルな材料設計技術を構築する。

	H25	H26	H27	H28	H29	H30-34	
熱可塑性CFRP材料 名大NCC	LFTD要素技術開発		第一期目標	→	実証評価	製品化事業化基盤確立	最終目標
							→
自動車用熱可塑性 CFRP材料 東大コンソ	センターピラー最適構造 設計技術		第一期目標	車体部分的 最適化設計	第二期目標	製品化事業化基盤確立	目標
							→

図 II -7 「熱可塑性 CFRP の開発」のスケジュール

(7)研究開発項目⑦「革新炭素繊維基盤技術開発」

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する。

	H25	H26	H27	H28	H29	H30-34	
革新炭素繊維 基盤技術開発 東京大学 産総研	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 ③炭素繊維の評価手法開発・標準化		第一期目標	異形状/太径 炭素繊維の開発、 高多機能化	第二期目標	実用化検討	最終目標
							→

図 II -8 「革新炭素繊維基盤技術開発」のスケジュール

2.1.2 研究開発予算

表Ⅱ-1 に本事業の平成 34 年度までの予算を示す。平成 25 年度から本事業はスタートしているが、平成 25 年度のみ経済産業省の直執行事業として活動し、平成 26 年度から NEDO にて管理する事業となっている。なお、平成 27 年度には本プロジェクト内のいくつかの研究テーマに開発促進財源投入を行い、研究事業の加速を実施している。

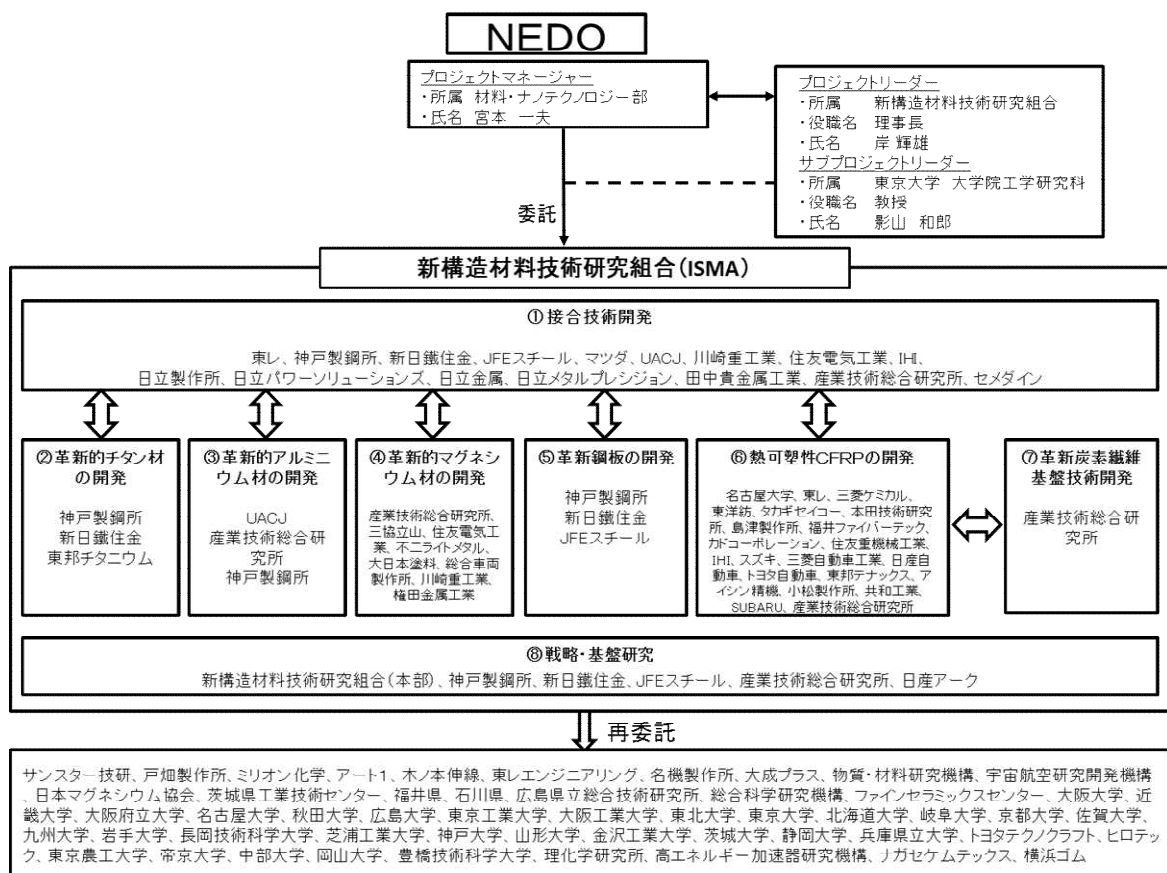
表Ⅱ-1 本事業の予算（単位：百万円）

研究開発項目	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	平成31年度	平成32年度	平成33年度	平成34年度	合計
新構造材料技術	2,212	3,780	3,496	3,708	3,720	4,200	4,110	3,680	3,500	3,000	35,406
熱可塑性CFRP	830										830
革新炭素繊維	918	980	804								2,702
合計	3,959	4,760	4,300	3,708	3,720	4,200	4,110	3,680	3,500	3,000	38,937
加速			1,570								1,570

2.2 研究開発の実施体制

本事業は、平成 25 年度に経済産業省の直執行事業としてスタートした。その後、平成 26 年度からプロジェクトの円滑なマネジメントを行うために NEDO へ移管され、その際に軽量構造材料の素材となる炭素繊維の研究開発も委託事業の一部として加わり研究開発を推進している。

図Ⅱ-9 に事業全体の実施体制を示す。



図Ⅱ-9 革新的新構造材料等研究開発プロジェクト実施体制

2.3 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。

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、平成 30 年度以降の研究開発テーマの継続是非を平成 29 年度に決定する。

PL : 新構造材料技術研究組合 理事長 岸輝雄

SPL : 東京大学 大学院工学系研究科 教授 影山和郎

PM : NEDO 材料・ナノテクノロジー部 主査 宮本一夫

表 II-2 会議体等による運営管理の実績

	主な会議体	開催頻度	メンバー	内容	実績
全体	技術推進委員会	年1回	実、P、委、I、東、N	外部委員による進捗議論	3回
	プロジェクト推進委員会	年1回	P、委、I、N、M	プロジェクト推進のための検討委員会	2回
	コーディネーター会議	不定期	P、委、I	コーディネーターとの会議	6回
接合	全体会議	年2回	実、P、I、N	テーマ共通課題検討	7回
	その他	随時	実、P、委、I	実施者ヒアリング	12回
		不定期	P、委、I	分科会	8回
チタン	全体会議	年2回	実、P、I、N	テーマ共通課題検討	7回
	その他	随時	実、P、委、I	実施者ヒアリング	12回
		不定期	P、委、I	分科会	9回
アルミ	全体会議	年2回	実、P、I、N	テーマ共通課題検討	7回
	その他	随時	実、P、委、I	実施者ヒアリング	12回
		不定期	P、委、I	分科会	9回
マグネ	全体会議	年2回	実、P、I、N	テーマ共通課題検討	7回
	その他	随時	実、P、委、I	実施者ヒアリング	12回
		不定期	P、委、I	分科会	9回
鋼板	全体会議	年2回	実、P、I、N	テーマ共通課題検討	7回
	その他	随時	実、P、委、I	実施者ヒアリング	12回
		不定期	P、委、I	分科会	9回
CFRTP	全体会議	年2回	実、P、I、N	テーマ共通課題検討	7回
	合同会議	年2回	実、I、N	グループ間情報共有	6回
	拠点会議	随時	実、I	個別の進捗確認	6回
	その他	随時	実、委、I、N	研究方向性の確認	7回
炭素繊維	全体会議	年2回	実、P、I、N	テーマ共通課題検討	4回
	推進会議	年2回	実、SP、N	外部委員との技術検討会	6回
	合同会議	月1回	実、SP	テーマ共通課題検討	36回
	個別テーマ研究会	月1回	実、SP	個別の進捗確認	60回
	その他	年4回	実	知財関連の課題検討	12回
戦略基盤	全体会議	年2回	実、P、I、N	テーマ共通課題検討	7回
	技術討論	不定期	実、P、委、I	講演会・勉強会	16回
	先導研究会議	随時	委、I	調査委員会	47回
	調査委員会	随時	P、委、I、N	車体軽量化	4回
	知財委員会	随時	P、委、I	知財委員会	21回
	その他	随時	実、P、委、I	実施者ヒアリング	6回
		不定期	P、委、I	分科会	7回

実：実施者、P：PL、SP：SPL、委：外部委員、I：ISMA、東：東大影山研、N：NEDO

2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

毎年度 NEDO が主催する技術推進委員会で外部有識者の意見をマネジメントに反映し、目標値の追加・見直しや追加予算（加速予算）の投入を行うことで、研究開発を促進し、実用化・事業化の早期実現に繋げている。表 II-3 に平成 28 年度に開催された技術推進委員会での指摘事項とマネジメントへの反映を示す。

表 II-3 技術推進委員会指摘事項のマネジメント反映実績

	指摘事項	対処
革新的接合技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・FSW はチタン系合金について大きな実績を保有するが、その技術を鉄鋼系にも拡大する革新的な技術テーマである。 ・接着剤開発は、実際の利用者やメーカーの視点を入れて実用性の高いものを開発すべき。 	<ul style="list-style-type: none"> ・中高炭素鋼の接合技術分野は、大阪大学接合研を中心とした体制に統合し、FSW 研究を加速している。 ・構造材料用接着技術の開発を公募により新規採択した。実施者に接着剤メーカーを取り込んだ。
革新的チタン材の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・特性について、耐食性、比強度、複合材料との相性等ある。どの特性を生かして、どういった具体的な用途に展開するのか検討すること。 	<ul style="list-style-type: none"> ・想定される用途、部位ごとの要求特性についてユーザーヒアリングを実施した。
革新的アルミニウム材の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・PJ のお題の縛り（輸送機器向け）はあるものの、マーケットは本来限定されないもので、幅広い用途に開発成果を融通するのが良い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・輸送機器向けの開発を推進しつつ、開発成果の波及効果を視野に入れ情報収集している。
革新的マグネシウム材の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・各社の連携十分。世界初の全断面 Mg 構体を必ず実現してほしい。剛性が低いのがネックなので、構造材の設計が重要になる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・既存材のアルミニウムと同等の剛性を持つ構造を設計した。その結果、材料の剛性が低くても軽量化が実現できることを示した。
革新鋼板の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・鉄鋼各社の研究は目標に到達しており、卒業できるものもある。 ・水素脆化は構想段階だが、腐食は非常に具体的ですぐに進めてもらいたい。 	<ul style="list-style-type: none"> ・材料開発については、鉄鋼各社に早期卒業を促している。 ・水素脆化及び腐食に関する FS 研究を開始した。
革新炭素繊維基盤技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・第三期への課題抽出は出来ているが、企業研究との役割分担が明確でない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・関係機関と意見交換し、実用化に向けた課題を抽出した。
熱可塑性 CFRP の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・CF/CFRP の LCA 評価、CFRP のリサイクル技術が必要である。 	<ul style="list-style-type: none"> ・CF/CFRP の LCA 評価を実施し、革新プロセスや CFRP リサイクルの LCA に与える影響を明確化した。
調査・共通基盤技術	<ul style="list-style-type: none"> ・革新的な新合金開発のためには、より高精度で精密な材料組織の分析計測が必要となるので、中性子散乱技術は積極的に利用できると思われる。 ・個別技術の深掘りに加えて、全体最適の観点でのマルチマテリアルを最適化できるような構造を考えられるように出来ると良い。 	<ul style="list-style-type: none"> ・中性子散乱を用いた構造材料等解析技術の開発を公募により新規採択した。 ・マルチマテリアル設計技術に関する FS 研究を開始した。

また、シンポジウムや成果報告会の開催を通じて、事業と成果の PR を行い、本研究開発の重要性とその先進性をアピールしている。

3.知的財産権等に関する戦略（知財戦略、知財委員会）

本プロジェクトは経済産業省の推進している未来開拓型研究プロジェクトであり、参加者間のシナジー効果発揮等によるプロジェクトの目的（研究開発の成功と成果の事業化による国益の実現）達成を確実にするための知的財産についての適切な管理を行い、プロジェクトで発生する知的財産が、原則として組合員に帰属することを前提としている。

また NEDO プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針に沿って、委託先からなる「知財委員会」を整備し、知財の取り扱いや方針等を決定するとともに、委託先

間の知財の取り扱いに関する合意事項が含まれる文書を作成した。これより、事業実施後の実用化に向けた出口戦略を構築・実現するにあたり、戦略的な取り組みを関係者の合意の下で進めている。

4.情勢変化への対応

事業の運営管理として、研究開発の進捗状況や技術推進委員会の結果を踏まえ、研究開発事業の見直し、新規テーマの導入を随時行っている。平成 29 年度については、「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」及び「構造材料用接着技術の開発」の 2 テーマを、FS 研究を経て新規に採択した。

また定期的なステージゲート審査により、テーマごとに事業化に向けた研究開発支援を行っている。

5.評価に関する事項

NEDO は、(1) 事業の位置付け・必要性、(2) 研究開発マネジメント、(3) 研究開発成果、(4) 実用化・事業化に向けての見直し及び取り組みの 4 つの評価項目について、外部有識者による中間評価及び事後評価を実施する。

中間評価は、プロジェクト期間の前半 5 年の中で平成 27 年度及び平成 29 年度に実施する。また後半 5 年も同様に途中で中間評価を行い、最終年度終了後に事後評価を実施する。なお、中間評価等の結果を踏まえ必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止、及び助成事業への移行等の見直しを迅速に行う。評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

表 II-4 平成 27 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
事業の位置付け・必要性	なし。	—
研究開発マネジメント	①世界的な開発動向を調査し、目標値を見直すこと。 ②企業間でシナジー効果が生まれるよう、連携強化すること。	①毎年各研究分野の世界技術レベルの定点調査を実施している。 ②革新チタン材料で、スポンジチタン開発と薄板プロセス開発を統合し、垂直連携テーマとした。 革新鋼板分野で、素材の腐食、水素脆性等の協調テーマを開始した。 中高炭素鋼の接合技術分野は、大阪大学接合研を中心とした体制に統合した。
研究開発成果	③目標の早期達成が見込めるテーマは、計画変更	③革新鋼板分野は成果が顕著であり、最終目標を

	<p>を考慮すること。</p> <p>④今後、国際標準化・規格化等の検討が望まれる。</p>	<p>5年前倒しの平成29年度末に再設定した。</p> <p>④素材研究開発分野毎、推進している。</p>
成果の実用化・事業化	<p>⑤早期にユーザー側企業と連携し、開発対象の目標レベルや必要時期、コストなどを具体化すること。</p>	<p>⑤革新鋼板分野は実用化を早々に進めるためプロジェクトからの卒業を促す。</p> <p>プロジェクト内にユーザー企業を取り込むとともに、外部専門家を招へいし目標レベルを見直している。</p>

Ⅲ. 研究開発成果について

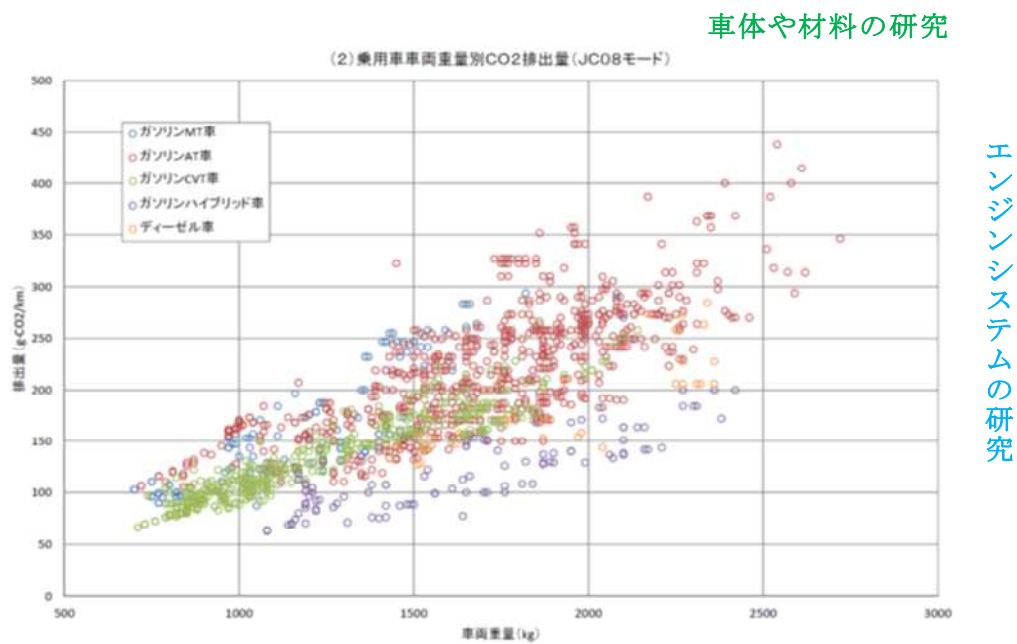
1. 事業全体の成果

1.1 成果の概要

(1) 背景と目的

エネルギー消費量削減やCO₂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、CO₂総排出量の20%近くが自動車からの排出であり、今後のCO₂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。

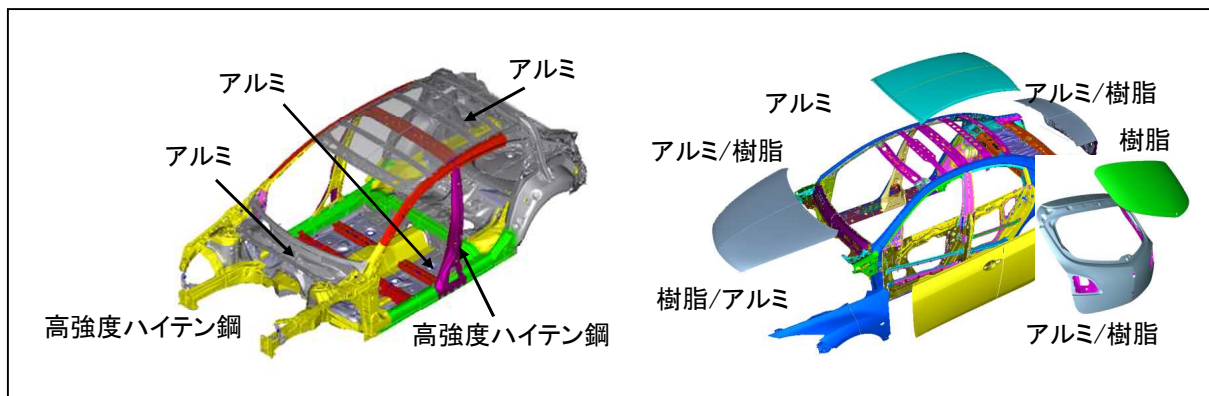
自動車の燃費改善に係る課題には、エンジンを始めとした動力機関の効率向上、車両の軽量化、空気抵抗軽減などがある。中でも動力機関の効率向上に向けた研究開発は精力的に取り組まれ、例えばハイブリッド車の普及に至っているが、エンジンシステムの開発も必要だが、これに加えて車両の軽量化もまた、燃費改善効果が高いとされ、重要な取り組み課題の一つになっている。



図Ⅲ-1.1-1 自動車の重量とCO₂排出量の関係

近年の車両軽量化技術開発では、鉄鋼材料を有効に活用するモノコック車体をベースにしてパネル類などに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。図Ⅲ-1.1-2に鉄鋼材の軽量材を活用した例

を挙げる。



(骨格:青、緑、茶;鉄鋼、鉄鋼材料 クロージャー:灰、緑;樹脂、黄;アルミニウム等)

図Ⅲ-1.1-2 本プロジェクトで扱うモノコック車体の材料構成

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)全体計画

本事業で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 CO₂ 排出量の削減、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。

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を開発する。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。

研究開発項目①「接合技術開発」

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。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。

研究開発項目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。

研究開発項目③「革新的アルミニウム材の開発」

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。

研究開発項目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。

研究開発項目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

研究開発項目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。

研究開発項目⑦「革新炭素繊維基盤技術開発」

革新的高効率製造プロセス基盤技術を開発するため、新規炭素繊維前駆体化合物の開発、炭化構造形成メカニズムの解明、マイクロ波による焼成工程に必要な技術の確立、炭素繊維の評価手法開発、標準化を実施する。

研究開発項目⑧「戦略・基盤研究」

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。

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、平成 42 年において、373.8 万 t の CO₂ 削減が期待される。

(3)実施体制

NEDO から新構造材料技術研究組合（以下、ISMA という）が委託を受け、本プロジェクトを推進している。東京大学 岸輝雄名誉教授をプロジェクトリーダー、東京大学 影山和郎教授をサブプロジェクトリーダーとし、NEDO との指示・協議の下で本プロジェクトを推進する。

ISMA は、事業概要に規定した研究開発テーマを、テーマ毎に再委託・共同実施先とともに遂行する。

(4)運営管理

本事業においては、事業の立ち上げ段階から現在に至るまで適宜適切な運営管理に努めている。また、本事業の進捗状況や成果、将来像について情報共有することを目的とした成果報告会などを実施している。

2.テーマ毎の成果

2.1「革新鋼板の開発」

2.1.1[テーマ番号 22] 残留 γ 高度制御革新鋼板の開発

2.1.1.1 テーマの概要

(1)背景と目的

鉄鋼材料では、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・高延性化が求められている。超高強度化・高延性化のために、低合金鋼で TRIP(Transformation Induced Plasticity)効果を活用した TRIP 鋼が開発された。また、2000 年頃には Mn 量を 30%程度添加した TWIP 鋼が開発された。ただ、TWIP 鋼はレアメタルである Mn を多量添加しており、製造プロセスで有害なヒューム発生等の安全面に係る問題やレアメタル多用の面から採用は限定的となっている。

そのため、レアメタルの使用量を抑えながら高延性化する技術開発に取り組まれている。ここでは、高強度組織であるベイナイトやマルテンサイトを母相として、高延性組織である残留 γ を多量に存在させることが基本思想となっており、具体的な研究事例としては、Mn 量を 5~10%にした中 Mn 鋼や、ベイナイト鋼や Q&P (Quench & Partitioning)鋼などが提案されている。こういった取組みで強度・延性の向上が実現されつつあるが、自動車部品への適用範囲を拡大し、軽量化効果を最大化させるためには、更なる強度・延性バランス向上が必要となる。

そこで、本研究項目では、炭素量 0.4%以上の中高炭素鋼を活用しつつ、TRIP 効果を最大化させることができる新しい材料設計指針として残留 γ の安定度分布制御技術を構築するとともに、その組織制御技術構築を実現するための各種評価技術を開発し、最終目標として強度 1.5GPa、伸び 20%の革新鋼板を創出することを目的とする。

(2)位置付け、目標値

CO₂ 排出量低減を最終の狙いとした全体取組みの中における本研究開発の位置付けは、燃費低減のための自動車の軽量化の実現につながる鋼材の高度評価技術の開発と、その評価技術を活用した画期的な超高強度・超高延性材料の創出である。

革新鋼板の開発目標値については、プロジェクト開始時は強度 1.2GPa 伸び 15%を平成 27 年度の間目標とした後、強度 1.5GPa で伸び 15%達成を平成 29 年度中間目標、強度 1.5GPa で伸び 20%達成を最終目標としていたが、研究の進捗状況が良好だったため、平成 29 年度に最終目標である強度 1.5GPa、伸び 20%を達成するよう前倒し設定することとした。また、それをサポートする解析技術については、鋼板開発に必要なタイミングでの実装をめざして、順次開発していく

表Ⅲ-2.1.1-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
革新鋼板の開発	炭素量 0.4%以上, Mn 量 10wt%以下で 強度 1.2GPa 以上, 伸び 15%以上	平成 27 年度末に基 本計画を変更。目標 を 5 年前倒しし、 炭素量 0.4%以上, Mn 量 10wt%以下で 強度 1.5GPa 以上, 伸び 20%以上 とした。	左記と同様 (最終目標の 前倒し達成)	自動車メー カが将来要 望する材料 特性レベル
解析技術の開発	炭素定量下限 30ppm 以下を可能 とする解析評価技 術の開発	炭素濃度の定量化技 術の J-PARC の高輝 度中性子ラインへ 展開するための基盤 技術構築	炭素定量下限 10ppm 以下を可能 とする解析評価技 術の開発	残留 γ の特 性制御のた めに必要と なる分解能 レベル

(3)全体計画

平成 25 年度に 1.2GPa 級鋼の単純な高炭素化に伴う組織、特性変化挙動を明らかにし、そこから残留 γ の安定度制御による特性改善の可能性を組織の詳細調査により検討をおこなった。

平成 26 年度は、その知見を元に各種方策を用いて残留 γ 安定度制御策を行い、強度・延性バランスの向上の実現について検討を行った。当初の予定では、残留 γ 安定度分布の課題が顕在化し、その対策技術開発が必要となることを想定していたが、期待以上の結果が得られ、早期の中間目標達成を実現できた。

平成 27 年度は 1.2GPa 級鋼での特性向上メカニズムに関する仮説の検証を行い、中高炭素鋼の特性向上について考え方を構築した。また、ここまでで得られた知見を元に 1.5GPa 級鋼での特性向上について検討し、強度 1.5GPa 伸び 15%の目標早期実現に取り組んだ。また、解析技術については炭素濃度分布解析技術として軟 X 線分光分析技術の導入と、炭素濃度の定量下限 30ppm 以下の達成策を提示した。平成 28 年度は現在特性が不足する原因の明確化を行うとともに、軟 X 線分光分析の解析精度高度化を試みた。また、中性子線を活用した解析精度向上を図るため、中性子線源のモデレータの改良を行い、分析精度向上を達成した。

以上の状況を踏まえ、平成 29 年度までに当初の最終目標であった強度 1.5GPa 伸び 20%の達成を目指すとともに、解析技術については、中性子解析について J-PARC への展開可能な基盤技術の構築を図る。

(4)実施体制

実施体制としては、分担研である神戸製鋼所が、材料特性向上に必要な材料設計指針の導出に取り組む。ここで明確化した理想組織を実現するための要素技術として、熱力学データベースの見直しを国立研究開発法人、ベイナイト変態に伴う残留 γ 制御形

成挙動の明確化を大学に再委託して技術開発を進める。

また、解析技術としては、中性子を活用したマクロな組織解析技術を大学への再委託で実施すると共に、微視組織の解析技術については分担研自身で実施するような形で取り組んでいる。

(5)運営管理

再委託先とは年3～5回の会議を行うことで進捗管理ならびに開発技術の分担研への取り込みを図った。再委託先で得られた知見は、材料開発にフィードバックして材料開発を促進できた。また、再委託先にて開発鋼の組織解析を実施し、材料開発の方向性を見直しによる目標早期達成に寄与させることができた。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

革新鋼板開発では、強度 1.2GPa 伸び 26%の特性が得られることを見出した。実用化に向けて、現コンセプトを基にもう一段の特性向上が実現できれば、現在の車体重量（約 200kg）に対して約 10%の軽量化（約 20kg）が達成できると考えられる。さらに最終目標である強度 1.5GPa、伸び 20%の革新鋼板も実現できれば、約 20%の軽量化（約 40kg）が期待される。

売上については、国内の全汎用車を対象とすると約 1000 億円/年のマーケット創出が期待できる。神戸製鋼所では約 30%の約 30 万 t/年、約 30 億円/年の売上が期待される。CO₂削減という観点では、車体重量約 40kg の削減で約 0.2kg/L の燃費改善が期待される。その CO₂削減効果は約 2g/km となるため、鋼板開発全体で約 14 万 t/年、神戸製鋼として約 4 万 t/年の CO₂削減効果が期待される。この時のコストとしては、鋼板の原料コストはほぼ変わらないため、製造時のコスト増加が若干起こるものの影響は小さい。また、中高炭素鋼を利用する際のプレス技術、接合技術において研究開発や設備投資の初期費用が掛かるものの従来技術の延長であるため、初期コスト、ランニングコストとも増加量は小さいと予想される。そのため、ランニングコスト面ではあまり変わらないまま、CO₂削減効果が得られることが期待できる。

2.1.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.1-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成29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
革新鋼板の開発	炭素量 0.4%以上, Mn 量 10wt%以下で 強度 1.5GPa 以上, 伸び 20%以上	0.4C-2Mn 鋼にベイナイト中のセメンタイト形成防止、残留 γ の微細化により、TS 1.5GPa-EL 20%を実現した。	◎	
解析技術の開発	炭素濃度の定量化技術の J-PARC の高輝度中性子ラインへ展開するための基盤技術構築	中性子 Bragg Edge 解析の解析精度の改善を行った。また、炭素解析の空間分布解析技術を構築した。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.1.1-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成34年度末)	達成見通し
革新鋼板の開発	強度－伸びバランスの向上策を検討し、TS 1.5GPa-EL 20%の最終目標を達成した。しかし、更なる特性改善が課題として残されている。	炭素量 0.4%以上, Mn 量 10wt%以下で 強度 1.5GPa 以上, 伸び 20%以上	これまでの各種知見を活用して更なる高性能化を目指す。
解析技術の開発	中性子の活用による炭素濃度分布解析技術の高度化を図るとともに SEM ベースの炭素濃度解析技術の高度化を図っていく。	鋼中のヘテロ構造と軽元素の空間相関評価技術の確立	再委託の成果も含め、良好な知見も含めほぼ達成レベルに到達済み。

(3)研究開発の成果と意義

[1] 革新鋼板の開発

高強度・高延性化の取組みとして、平成25年度はTRIP鋼の強度・延性に及ぼすC量の影響について調査した。その結果、炭素量を0.4wt%まで増加させて適正な条件でオーステンパを施すことにより、中間目標に漸近する強度・延性バランスが確保できることを見出した。また、C量の増加による強度・延性バランスの向上は残留 γ 量増加によるものであることを明らかにした。また、平成26年度は、C量以外の合金元素の影響も含めて検討することで、組織、特性の変化挙動を調査することで、平成27年度は中高炭素鋼をQ&P処理した際の熱処理条件を検討し、炭化物の形成による炭素の消費を抑えつつ、残留オーステナイト量を増加させるプロセスを考案し、引張強度1.5GPa、伸び15%を達成できることを示した。

平成28年度については、特性改善をはかるために、大学で取り組んできた残留 γ 高度制御のための指導原理を活用し、C以外の元素の添加量による変態挙動の制御や、熱処理パターンによる組織形成挙動を制御することで、特性改善を試みた。

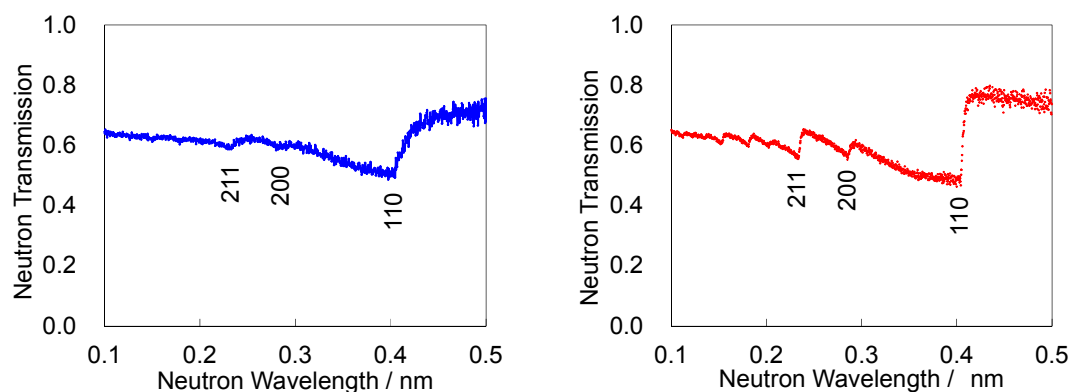
ベイナイト変態中やマルテンサイト形成後の組織変化挙動の中で残留 γ を増量するように制御することで、強度－伸びバランスを大幅に向上でき、強度 1.5GPa、伸び 20%を超える高延性化をできることを示した。

[2]解析技術の開発

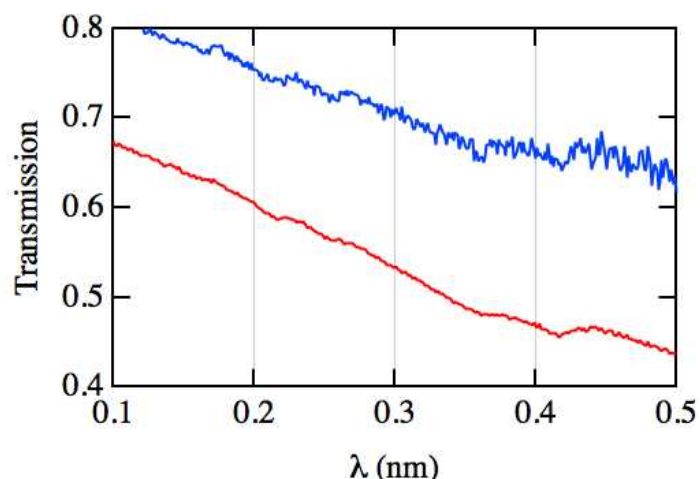
革新鋼板の強度－伸びバランスを高めるためには残留 γ の状態が重要であり、その状態解析を行うことが重要である。革新鋼板の強度－延性バランスの向上には残留 γ の安定度を広く制御することが有効という仮説を持ち、特性向上を図っているため、その制御技術を高めていくためには残留 γ の安定度の把握のため、残留 γ 中の炭素濃度の解析が重要と考えている。その解析手法として、中性子回折を活用したピーク解析によるマクロな炭素濃度分布解析と、残留 γ 中の炭素濃度の存在状態のミクロ解析の両面から取り組んでいる。

中性子回折に関しては、中性子回折の分解能を向上させるための検討を行った結果を、図Ⅲ-2.1.1-1 および図Ⅲ-2.1.1-2 に示す。共に、オーステナイト炭素鋼の解析を行ったところ、カップルドに比べ、デカップルドにすることで指数面での強度変化がクリアに表れるようになった。これは各指数面での面間隔と、中性子の波長がブラッグ条件を満たした際に、回折が起こることで透過光の不連続性が現れることを表しており、この変動がクリアに現れることは炭素濃度解析に必要なピーク解析がより精度よく実施できることを示唆している。ただし、このような処理を施すことで、中性子の回折強度の低下が顕著に起こるようになるため、解析に十分な信号量を検出するためには、測定時間がかかるようになる。

今後、解析に適した条件を探索するため、現状の技術において測定時間と解析精度のバランスの最適化を図るとともに、測定時間・解析精度のバランスを高めるための方策を検討する。



図Ⅲ-2.1.1-1 分解能向上前（左図）後（右図）のフェライトのブラッグエッジ測定結果



図Ⅲ-2.1.1-2 A5 試料における分解能向上前後の比較。赤：向上前、青：向上後

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.1-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
H27FY	0	0	6	1	0	0	0	0	1
H28FY	0	0	4	0	0	0	0	0	1
合計	0	0	10	1	0	0	0	0	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）

(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）

表Ⅲ-2.1.1-5 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	2	0	0
H27FY	0	0	0
H28FY	3	0	0
合計	5	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.1.2[テーマ番号 23] 軽元素の有効利用による革新鋼材の開発の開発

2.1.2.1 テーマの概要

(1)背景と目的

構造材料としての鉄鋼材料で求められる性質は、強度、延性、靱性、耐環境性、等であり、種々の合金元素の添加と組織制御法の選択により、特性の向上が図られている。しかしながら、上記の合金元素の中には埋蔵量が少なく、高価な上に資源リスクが懸念されるものがある。また、鉄中への均一分散が難しく、高温で長時間の熱処理が必要な元素もある。また、一旦、鉄中に固溶すると、分離が難しく、リサイクルの障害になる元素もある。したがって、これらの合金元素の使用量を極力低減しつつ、従来の鉄鋼材料を超える特性が得られれば、コスト削減、資源リスクの回避、易リサイクル性の観点で、社会へのインパクトは大きい。しかしながら、鉄鋼材料における省元素技術の確立のためには、各元素の機能の発現機構の解明とともに、合金元素の代替技術の確立が必要である。

そこで、本研究では、稀少元素の添加量を極限まで抑えられた次世代中高炭素鋼の開発を目標とし、鋼材の金属組織を精密に制御し、稀少元素に代えて鋼材中の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揮させる技術などの高度化を図る。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。特に、軽元素の有効利用を中心課題と捉え、諸特性に及ぼす軽元素と稀少元素の機能の基礎的理解と、鋼中での軽元素のダイナミクスに基づくマルチスケール設計手法を体系化することを主目的とした。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.1.2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
革新鋼材の開発	稀少元素添加量 10wt%未満で、引張強度 1.2GPa 以上、伸び 15%以上を有する中高炭素鋼の材料設計と組織制御。	平成 27 年度末に基本計画を変更。目標を 5 年前倒しとし、 ・レアメタル添加量：10wt%未満 ・引張強度：1.5GPa を目指す ・伸び：20%以上とした。	稀少元素添加量 10wt%未満で、引張強度 1.5GPa 以上、伸び 20%以上を有する中高炭素鋼の材料設計と組織制御 (平成 27 年度末に本目標を 5 年前倒しし、平成 29 年度末目標とした)	高強度鋼でありながら、汎用鋼と同等以上の成形性(伸び)を付与。
その場観察装置の開発	中高温域の粒界移動および結晶方位変化の計測が可能なその場観察装置の開発。	その場解析装置の改良と中高炭素鋼の中高温域での挙動の観察。	中高温域の鋼中組織解析解析手法の確立および鋼組織データベース化システム開発。	革新鋼材の開発を支援。

(3)全体計画

本テーマでは、稀少元素添加量 10wt%未満で高強度を有する中高炭素鋼を実験室レベルでサンプルを試作し、引張強度、延性、熱間加工性に及ぼす微量元素の影響、等に関わるデータ採取を行う。また、微量元素単体およびその化合物は鋼の組織や特性に大きく影響することから、組織形成に及ぼす微量元素の影響を解明するためのその場観察装置(中・高温域の組織観察その場解析装置、等)の開発および、熱力学データの構築に必要な基礎データを取得する。

本検討では、上記の革新鋼材の開発と合わせ、中高温域のその場組織観察技術の開発を狙う。中高温域での材料工学的な定量データを局所領域(複合電子線)とマクロ平均(中性子)の両視点から計測し、中高温域での新たな材料組織挙動の解明に基づく定量計測データを取得できる体制を世界に先駆けて確立し、実用化の鍵となる中高温域での材料組織制御技術を構築することを目的とする。

具体的な計画を以下に記す。

【第1期目標(平成27年度末)】

- ・稀少元素添加量 10wt%未満で、引張強度 1.2GPa 以上、伸び 15%以上を有する中高炭素鋼を実験室レベルで二次試作し、引張特性、加工性、成形性、等を評価。
- ・軽元素を利用して、耐環境性を向上させる材料設計手法を検討。
- ・高温での粒界移動、結晶方位変化の計測。
- ・小型サンプルを用いた成形限界ひずみおよび曲げ性に関する評価方法の検討。

【第2期目標(平成29年度末)】

- ・稀少元素添加量 10wt%未満の中～高炭素鋼をベースにして、引張強度 1.5GPa 以上、伸び 20%以上を有する高強度鋼の材料設計と組織制御を行う。
- ・軽元素の有効利用による耐環境性を向上させる材料設計手法を確立する。
- ・軽元素・特定元素の高温挙動を解明できる新解析手法の確立。
- ・小型サンプルを用いた各種成形性評価方法の検討。

【最終目標(平成34年度末)】

(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：1.5GPa 以上
- ・伸び：20%以上

(2)中高炭素鋼組織の評価手法の開発

- ・微細粒成長動的観察技術 像分解能：10nm
- ・加熱加工模擬システムの開発
- ・鋼の歪み挙動解析システムの開発

(4)実施体制

本テーマは、富津分室・尼崎分室（新日鐵住金株式会社）が 6 再委託先と実施する。

(5)運営管理

新日鐵住金内および再委託先間で定期的な進捗会議を実施し、適切な運営管理に努めてきた。具体的には、1 回／年の頻度で、当社幹部（鉄鋼研究所所長、先端技術研究所）へのキックオフおよび進捗報告会議を実施した。さらに、実務者間で、1 回／月の進捗会議および、2～5 回／年の頻度で再委託先との進捗会議を実施した。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO2 削減・省エネルギー等@2030 年度）

本プロジェクトで開発を目指す高強度高延性中高炭素鋼は、所謂、第 4 世代に該当する高性能な鋼材であり、多分野での適用が期待される。また、資源枯渇のリスクを有するレアメタルの使用量を削減することで、安定的な供給が可能となる。本プロジェクトにおいて、開発鋼材の特性と製造方法が確定した後、具体的な費用対効果を算出する。

2.1.2.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.2-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成29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
革新鋼材の開発	稀少元素添加量10wt%未満で、引張強度1.5GPa以上、伸び20%以上を有する中高炭素鋼の材料設計と組織制御。	高炭素単純組成鋼をベースに軽元素を添加した小ロットサンプルを試作。加工熱処理による組織制御、組織解析、引張特性評価、等、を実施し、引張強度1.5GPa、伸び15%以上を可能とする高炭素鋼の理想組織を提示。さらに、引張強度1.8GPa、伸び13%以上を可能とする軽元素を明らかにした。 また、革新鋼材の実用性能評価のため、高強度鋼の耐食性および加工性評価方法の開発に取り組んだ。	◎	
その場観察装置の開発	その場解析装置の改良と中高炭素鋼の中高温域での挙動の観察。	500～1200℃の温度域における、走査イオン(SIM)像観察とESBD解析が可能な複合解析装置を開発し、中・高温域における変態・逆変態挙動および粒界移動その場解析に成功。さらに、粒界・粒内に存在する軽元素の役割の把握のため、高分解能TEM試料作成向けに、狙いのミクロンレベルエリアに限定して極薄膜領域を作成できる装置を導入し、サンプルの作製技術の高度化技術を確立した。	◎	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.1.2-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
革新鋼材の開発	高炭素単純組成鋼をベースに軽元素を添加した小ロットサンプルを試作。加工熱処理による組織制御、組織解析、引張特性評価、等、を実施し、引張強度 1.5GPa、伸び 20%以上を可能とする高炭素鋼の理想組織を提示。さらに、引張強度 1.8GPa、伸び 13%以上を可能とする軽元素を明らかにした。また、革新鋼材の実用性能評価のため、高強度鋼の耐食性および加工性評価方法の開発に取り組んだ。	希少元素添加量 10wt%未満で、引張強度 1.5GPa 以上、伸び 20%以上を有する中高炭素鋼の材料設計と組織制御	小型サンプル m p 評価で、延性向上のための指針が得られており、最終目標は達成の見込み。実用性能評価結果を踏まえ、適用先を検討する。
その場観察装置の開発	500～1200℃の温度域における、走査イオン (SIM) 像観察と EBSD 解析が可能な複合解析装置を開発し、中・高温域における変態・逆変態挙動および粒界移動その場解析に成功。さらに、粒界・粒内に存在する軽元素の役割の把握のため、高分解能 TEM 試料作成向けに、狙いのミクロンレベルエリアに限定して極薄膜領域を作成できる装置を導入し、サンプルの作製技術の高度化技術を確立した。	中高温域の鋼中組織解析解析手法の確立および鋼組織データベース化システム開発。	組織の形成および特性に軽元素の影響に関するミクロスケール～ナノスケール～原子スケールの冶金データベースを整備し、組織制御および製造条件指針を提示する。

(3)研究開発の成果と意義

革新鋼材の開発

平成 27 年度までは、炭素の有効利用の観点から高炭素鋼をターゲットとした革新鋼材の設計と特性の評価を行った。具体的には希少元素添加量 10wt%未満の範囲で、引張強度 1.2GPa 以上、伸び 15%以上の特性実現するための組織制御と加工熱処理条件の適正化を図った。

平成 28 年度以降は、炭素を含めた軽元素の有効利用の可能性を検討した。具体的には、炭素量 0.5%以上を含む単純組成鋼に、3 種類の軽元素を添加した鋼材について、引張強度 1500MPa 以上、伸び 15%以上の特性を得るための組織制御方法を検討した。

具体的には、実験室レベルで 0.6%C-0.2%Si-0.2%Mn 鋼に軽元素を適宜添加したインゴット (150kg) を真空溶解により作製し、熱間圧延により板状サンプルを得た。サンプルのサイズは、板厚：1.6mm～3mm、板幅：80～160mm、板長：約

1000mm である。板材サンプルはその後、オーステナイト処理後、マルテンサイト組織を得た。

図 III-2.1.2-1 に試験材の引張特性を示す。従来のマルテンサイト鋼は高強度を有するものの、伸びが低位であった。一方、開発材では伸びが向上し、ベース鋼および軽元素添加鋼 1 において引張強度 1500MPa、全伸び 15%以上を示した。さらに、軽元素添加材 2 および 3 では、強度が更に向上し、引張強度 1800MPa 以上、全伸び 13%以上を有することが確認された。図 III-2.1.2-2 は開発材の組織の EBSD 解析および TEM 観察結果の一例を示す。開発材は粒径約 1 μ m のオーステナイトからの焼き入れによって得られたマルテンサイト組織であり、フェライト相やオーステナイト相はほとんど認められない。図 III-2.1.2-3 に引張試験による降伏近傍の挙動を示す。いずれも焼き入れマルテンサイトに特徴的な連続降伏型であるが、オーステナイトの細粒化により、マルテンサイトの降伏強度が上昇する傾向を示す。さらに、軽元素を添加すると降伏強度が大きく増加するものもあり、旧オーステナイト粒の細粒化と軽元素添加の相乗効果によりマルテンサイトの高強度化が実現することが明らかとなった。

図 III-2.1.2-4 は旧オーステナイト粒径に及ぼす軽元素添加の効果を示す。軽元素の添加により旧オーステナイト粒の粗大化が抑制される。また、旧オーステナイト粒が微細であるほど、引張強度－全伸びのバランスが向上する傾向を示す。したがって、旧オーステナイト粒の微細化は、マルテンサイトの延性改善にも有効と判断される。マルテンサイトの延性改善機構については、平成 29 年度以降、検討する。

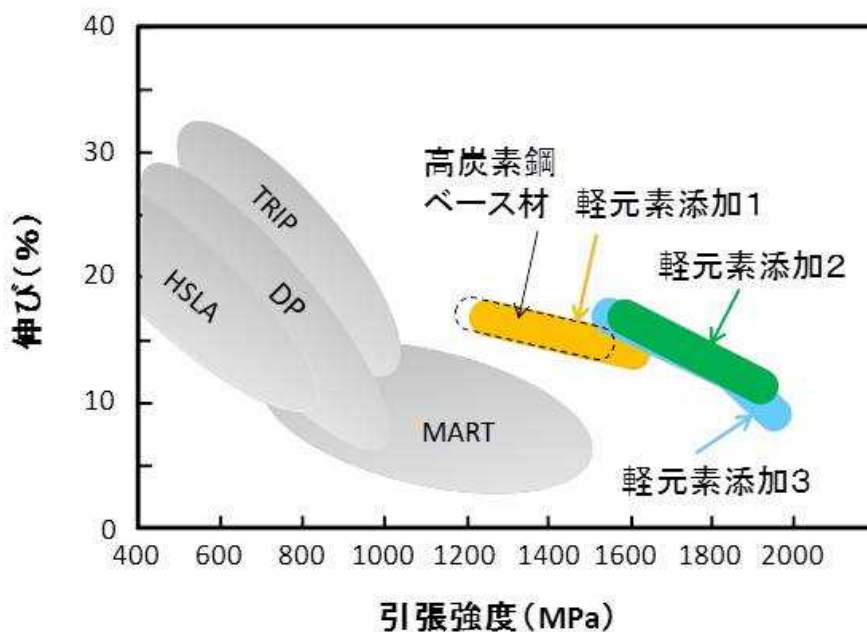
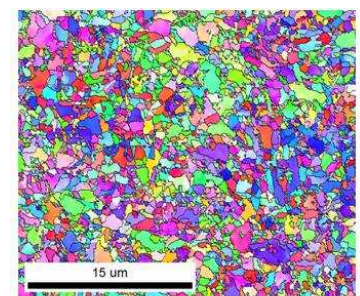
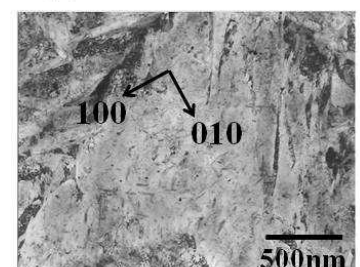


図 III-2.1.2-1 開発材の引張特性



(a) EBSD解析例



(b) TEM観察例

図 III-2.1.2-2 開発材の組織

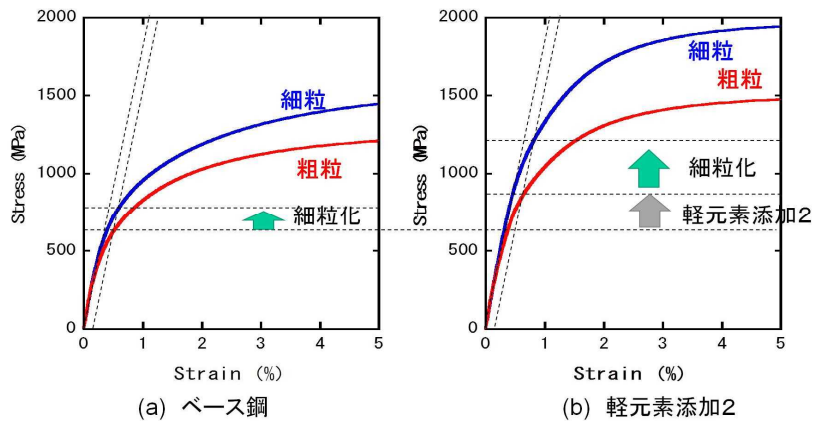


図 III-2.1.2-3 開発材の降伏挙動

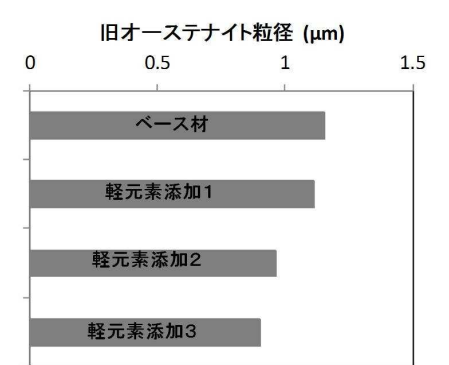


図 III-2.1.2-4 開発材の旧オーステナイト粒径

中高炭素鋼の中高温領域組織変化のその場観察装置の開発

500～1200℃の中高温領域における鉄鋼材料中の結晶粒のイオンビームによる走査イオン（SIM）像観察と電子ビームによる結晶方位解析（EBSD）が可能な複合解析装置を製作した。図 III-2.1.2-5 及び図 III-2.1.2-6 に富津分室に導入された「その場観察装置」の外観を示す。この装置は、市販の集束イオンビーム加工装置（FE-SEM/FIB）をベースに改造を行ったもので、試料移動を伴うことなく SIM 像観察と EBSD が可能なように、イオンビームと電子ビームの角度関係や検出器の配置を最適化した。装置は、図 III-2.1.2-7 に示すように、イオンビームを発生させるイオン銃、電子線を発生させる電子銃、イオン像の検出に用いる検出器、EBSD 測定に用いる EBSD 検出器の 4 つのパーツで構成されている。また、観察試料を 500～1200℃の中高温領域に加熱するための加熱装置（図 III-2.1.2-8）も装備している。純 Fe 板を用いた試験で試料温度が 1200℃まで到達することを確認した。



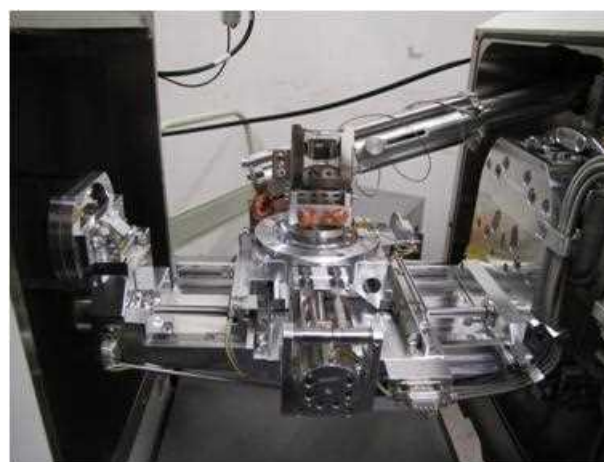
図 III-2.1.2-5 開発されたその場観察装置の外観（本体部）



図 III-2.1.2-6 開発されたその場装置の外観（制御部）

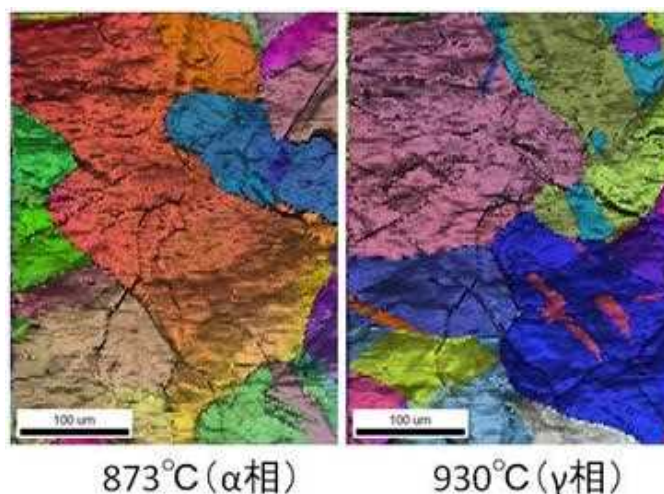


図Ⅲ-2.1.2-7 電子銃,イオン銃,各検出器の配置



図Ⅲ-2.1.2-8 試料加熱装置

図Ⅲ-2.1.2-9 には加熱に伴う純 Fe の相変態をその場観察した結果を示す。純 Fe の α 相 (bcc 構造) から γ 相 (fcc 構造) への相変態温度は 912°C であり、その前後の温度で結晶粒形態や結晶方位の変化が観察された。また、SIM 像による結晶粒形状変化のその場観察も可能となった。今後、導入装置を駆使し、革新鋼材の特性向上と製造条件の最適化のための基礎データを取得していく予定である。



図Ⅲ-2.1.2-9 純 Fe の相変態挙動の観察 (EBSD 測定, IPF マップ)

軽元素の粒界偏析の解析技術

軽元素は粒界偏析傾向が高い。したがって、組織制御や特性制御において、各元素の粒界偏析傾向、偏析量、およびその予測技術の確立が課題である。

平成 28 年度は、高炭素鋼中の B の粒界偏析について解析および予測方法を検討した。図Ⅲ-2.1.2-10 は TOF-SIMS による B の粒界偏析の観察例である。従来、TOF-SIMS により極低炭素鋼における B の粒界偏析は観察されていたが、高炭素鋼マルテンサイト組織の旧オーステナイト粒界での B の偏析を直接観察することは困難であった。しかしながら、サンプル表面の調整を適正化することにより、

高炭素鋼でも、旧オーステナイト粒界での B の偏析を明瞭に検出することが可能となった。

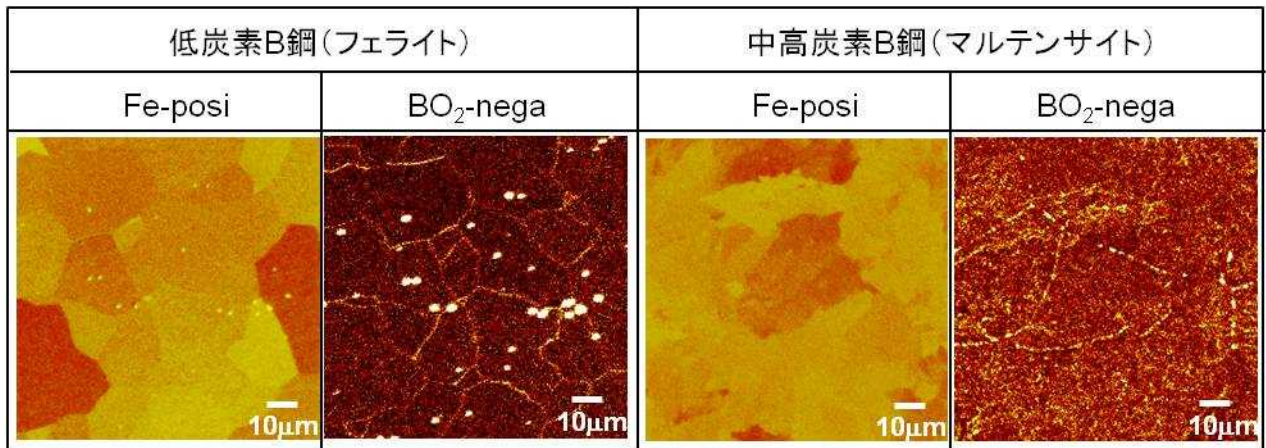
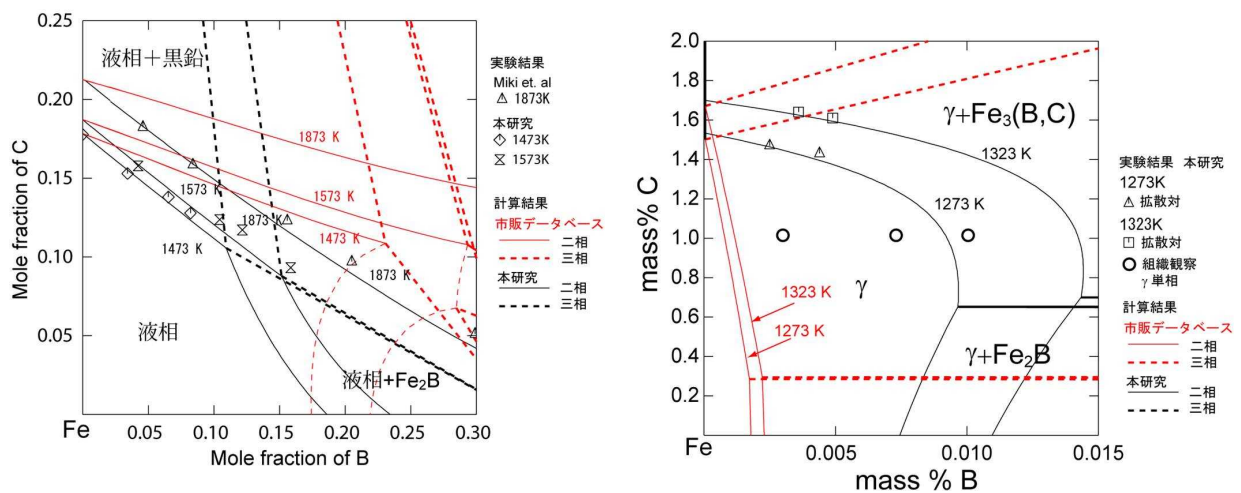


図 III-2.1.2-10 TOF-SIMS による鉄中 B の粒界偏析の観察例

粒界偏析の予測については、共同（再委託）研究として取り組んでいる。具体的には、熱力学に基づく Hillert の粒界相モデルで粒界偏析を予測する。しかしながら、高炭素鋼中の軽元素の熱力学パラメータは必ずしも十分に確立していない。したがって、モデル実験により、熱力学データベースの高精度化を図った。図 III-2.1.2-11 の Fe-B-C 系の平衡状態図に示すように、データベースの修正により、液相／固相間かつ高炭素－高 B 側の状態図が大きく変化する。粒界相モデル（図 III-2.1.2-12）は液相／母相の自由エネルギーが基本となるため、粒界偏析予測値に大きく影響する。図 III-2.1.2-13 は B の粒界偏析量に及ぼす炭素量の影響を計算したものであるが、従来の計算では B の偏析量が過大に見積もられていたことになる。今後、他の軽元素についても熱力学データベースを確立し、予測精度の向上を図っていく。



(a) Fe-B-C 状態図（液相）

(b) Fe-B-C 状態図（ γ 相）

図 III-2.1.2-11 Fe-B-C 状態図の高精度化および修正

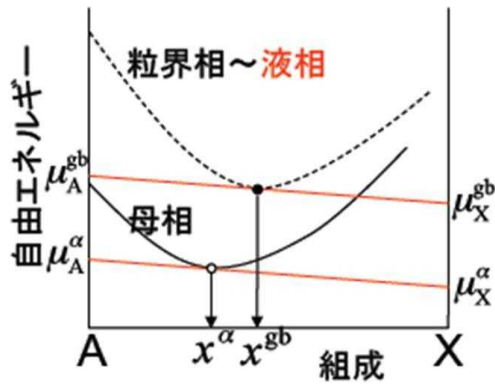


図 III-2.1.2-12 Hillart の粒界相モデル

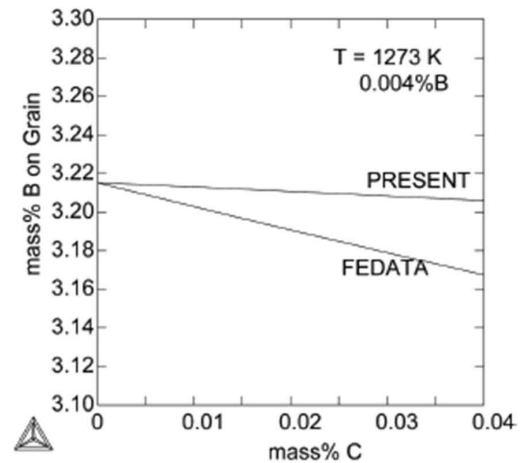


図 III-2.1.2-13 B の粒界偏析に及ぼす炭素量の影響 (修正データベースによる粒界偏析解析)

粒界偏析の原子オーダー解析のためのサンプル作製技術の確立

粒界・粒内に存在する軽元素の役割の把握のため、粒界の原子オーダー解析が必須である。しかしながら、そのためにはサンプル作製においても高度な技術が必要とする。そこで、平成 27 年度末に、高分解能 TEM 試料作成向けに、狙いのミクロンレベルエリアに限定して極薄膜領域を作成できる装置 (図 III-2.1.2-14) を導入し、サンプルの作製技術の高度化を図った。サンプルを極薄化することにより、TEM 内磁場による試料湾曲の影響を受けにくくなり、狙い位置の原子分解能観察が可能となった (図 III-2.1.2-15)。今後、原子のマッピング技術を確立し、粒界や界面での軽元素の存在状態の解明を目指す。



図 III-2.1.2-14 高分解能 TEM 試料作製装置

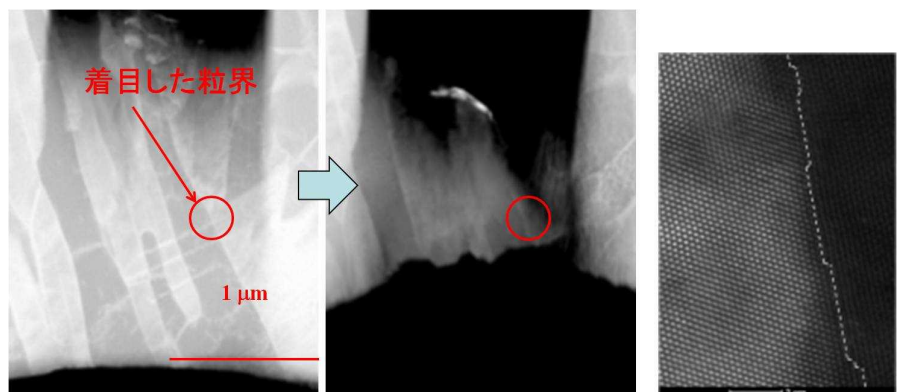


図 III-2.1.2-15 左記装置で作製したサンプルの高分解能電子顕微鏡像

耐環境性の評価手法の検討

革新鋼材の実用性能評価の一環で、耐食性の評価方法を検討した。前述の通り、開発材は耐食性を向上させる合金元素の使用量を最小限に抑えている。さらに、極微細な組織を有することから、腐食起点が多いことが想定され、耐食性向上の観点での組織制御を検討する必要がある。具体的には、耐食性に及ぼす金属組織要因（例えば、粒界、結晶方位、欠陥、介在物、偏析、等）の影響を明らかにして、腐食リスクを下げる組織設計手法を提案する。

そのため、平成 28 年度は、再委託先と共同し、マイクロ組織毎の耐食性評価、腐食生成物の解析技術開発に取り組んだ。

図 III-2.1.2-16 はマイクロ電気化学計測によるパーライト鋼の腐食挙動を評価した一例である。in-situ リアルタイム観察用マイクロ電気化学システムを用いて、アノード分極中の電極面を観察することにより、パーライト鋼中の組織毎の孔食発生機構を動画として捉え解析することに成功した。更に、ラマン分光法による腐食生成物の二次元解析にも成功した(図 III-2.1.2-17)。今後、マルテンサイト等、他の組織に横展開する予定である。

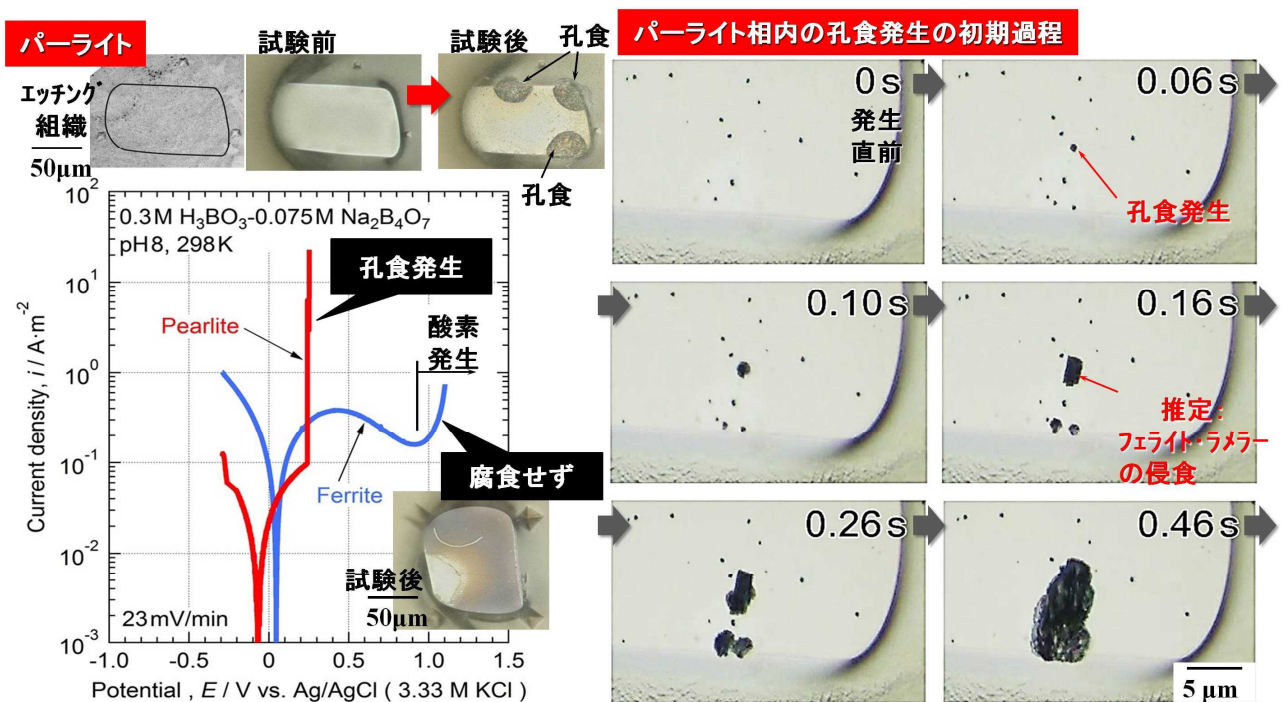
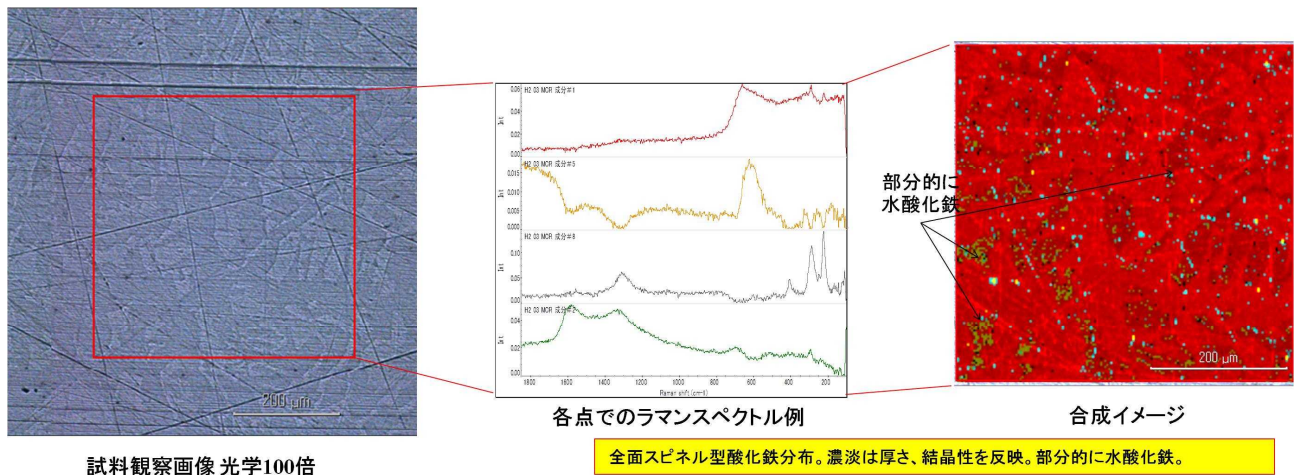


図 III-2.1.2-16 マイクロ電気化学計測による異相界面腐食性評価技術



図Ⅲ-2.1.2-17 腐食生成物の局所構造解析技術開発

革新鋼材の加工性評価技術開発

革新鋼材を薄板として使用する場合、主要な成形様式である張出し、深絞り、伸びフランジ、曲げの評価が必要である。しかしながら、実験室レベルで試作可能なサンプルは幅狭であることから、小型試験片で評価可能な成形性評価技術開発に取り組んだ。

図Ⅲ-2.1.2-18は平成28年度に設計、製作した小型成形試験機である。小型試験片を用いて張出し成形過程のひずみをin-situで計測することにより、各種ひずみ状態におけるプレス成形性を評価することが可能となった。図Ⅲ-2.1.2-19は小型曲げ試験機である。曲げ破断の進展過程を測定することにより、高強度鋼の曲げ加工特性の詳細な評価が可能になった。平成29年度は小型試験片を用いた穴広げ性の評価技術開発を行う予定である。

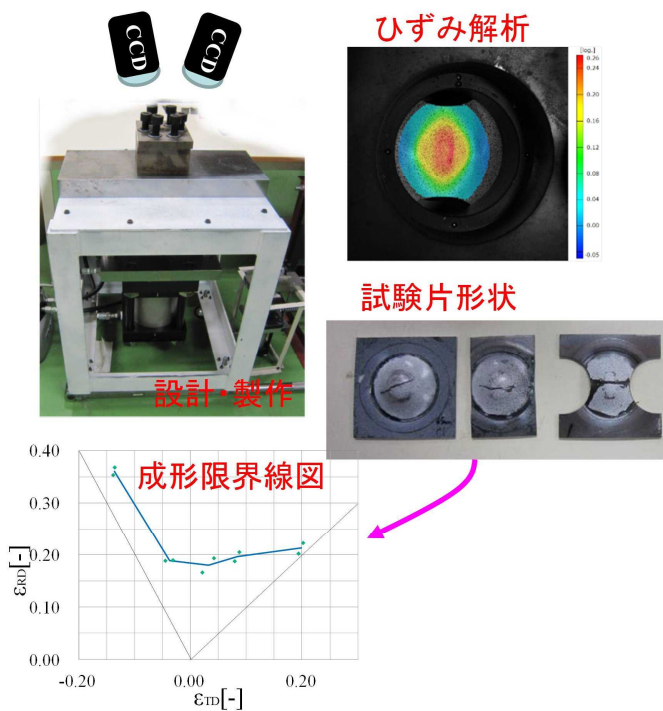


図 III-2.1.2-18 小型張出し成形試験装置

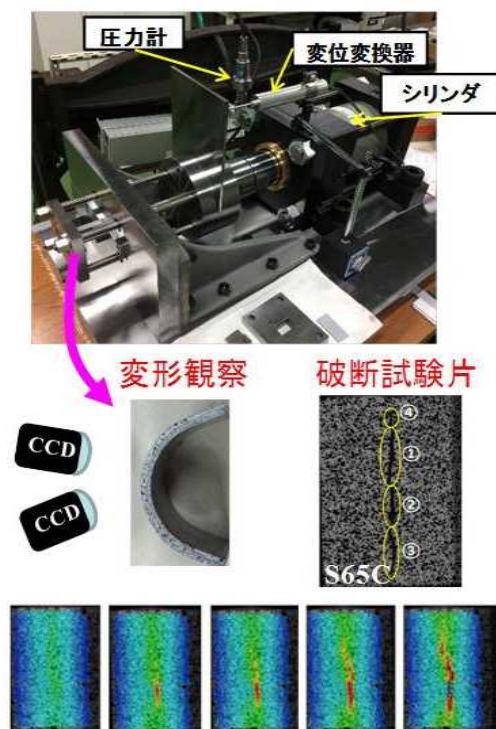


図 III-2.1.2-19 小型曲げ試験装置

摺動特性、信頼性評価方法開発

革新鋼材薄板の実用性を向上させるため、生産性や想定される使用環境での信頼性の向上は大きな課題となっている。生産性向上のためには、製造プロセスや加工時には、表面の摺動特性が重要である。また、本革新鋼材においては耐食性確保に有用な稀少元素を削減していることから、耐食性確保のため、表面処理して実用されることが想定される。それら摺動特性、表面処理プロセスを検討し、最適化するための評価技術開発を行った。開発すべき評価技術には、製造プロセスでの表面反応再現技術、表面状態形成技術、摺動特性評価技術を想定し、表界面解析装置を導入した。

図 III-2.1.2-20 に、導入装置外観を示す。試料の装置内への導入機構、導入後の試料を各処理、解析槽に搬送するためのディストリビューションチャンバーを中心に、クリーニング、アニール、蒸着など表面前処理および簡易な組成、構造評価が可能な前処理チャンバー、トライボ特性評価チャンバー、各種ガス雰囲気下で高温熱処理可能なリアクターチャンバー、革新鋼材の耐食性向上に必要とされる模擬表面処理が可能な熔融金属コーティングチャンバー、試料ストレージチャンバーなどを装備する。

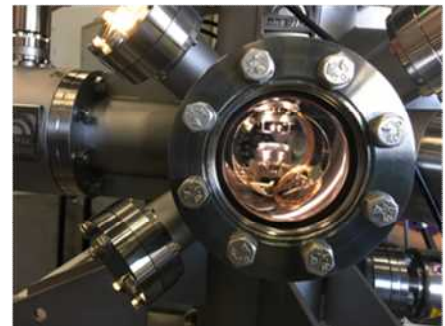


図Ⅲ-2.1.2-20 導入装置外観

導入したトライボ特性評価チャンバーでは、生産性、加工性に及ぼす摺動特性評価のため、各プロセス環境を再現した中でのトライボ特性評価の実現を目指した（図Ⅲ-2.1.2-21）。

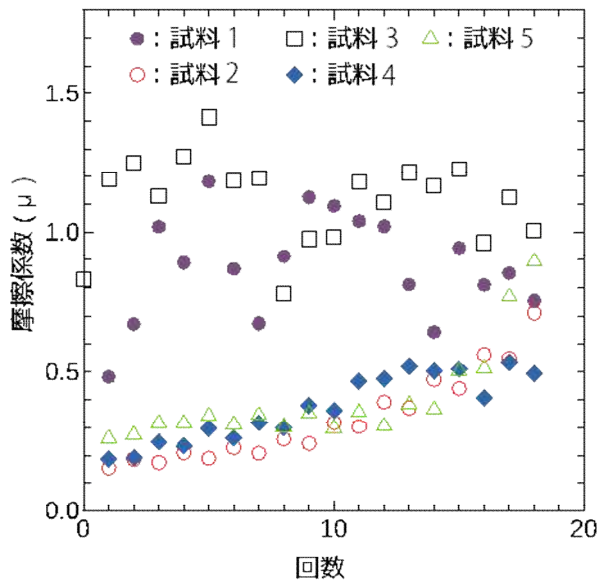
ラボ溶解した模擬鋼材を用い、フェライトパーライト組織(試料1)、マルテンサイト組織(試料2)、焼き戻し温度を変化させて作り分けたマルテンサイト組織鋼(試料3, 4, 5)を作製した。それら試料の摺動特性を、開発したトライボチャンバー内で、トライボ特性を検討した。実験環境は、 1×10^{-4} Pa以下の超高真空を採用した。

鋼材と接触する部材には、直径10mmのSUJ2ボールを用い、2Nないしは10Nの一定荷重を印加しながら、1mm/sの速度での往復摺動下での、摩擦係数を評価した。図Ⅲ-2.1.2-22に、室温(25℃)における荷重5Nでの測定結果を示す。一部試料では、試料温度500℃、荷重5Nでの測定も実施した(図Ⅲ-2.1.2-23)。

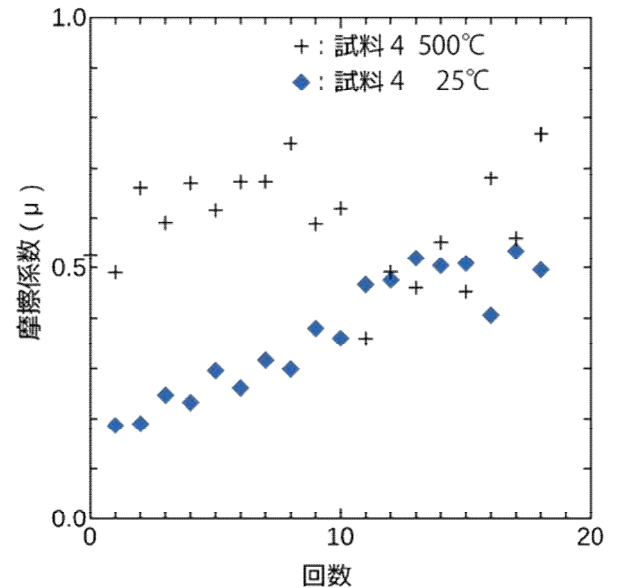


図Ⅲ-2.1.2-21 トライボ特性評価チャンバー

図Ⅲ-2.1.2-22 から、試料 2 のマルテンサイト組織鋼では、初期、最も低い摩擦係数を示し、フェライト-パーライト組織鋼（試料 1）,焼き戻し温度の最も高温の試料（試料 3）は、初期、大きな摩擦係数を示すなど、組織と摺動特性の相間を得ることに



図Ⅲ-2.1.2-22 各試料の摩擦係数変化。室温（25℃）で最大20回の往復摺動下で実施



図Ⅲ-2.1.2-23 試料 4 における、試料温度、室温（25℃）および500℃での摩擦係数変化

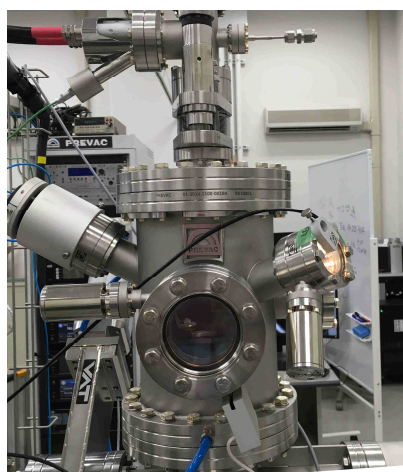
成功した。一般的に、大気中での測定では、フェライト-パーライト組織鋼の摩擦係数も、マルテンサイト組織鋼の値と大差ないことが知られており、高真空下での測定でこそ得られた、組織の持つ、本質的な特性が評価可能となったと考えている。その後、回を重ねるごとにマルテンサイト組織鋼の摩擦係数も増加する傾向を示した。試料 4 では、25℃および 500℃での摺動特性評価も行った。その結果、500℃では、初期から大きな摩擦係数を示すなど、温度による摺動特性の差異検出にも成功した。

摺動特性には、材料のもつ機械特性に加え、環境下での摩擦の結果現れる新生面や同時に生成される摩耗粉の組成、構造のトライボ特性に及ぼす影響が広く議論されている。初期、小さな摩擦係数を示したマルテンサイト組織鋼の摩擦係数が徐々に増加した理由も、こうした摩耗粉の組成、構造が関与するものと考えられる。今後、各種環境下で摩擦特性を評価し、組織因子と雰囲気、摩擦界面の状態、摩耗粉成分の関係を材料ごとに明確にし、開発材製造工程の最適化研究に活用する予定である。

他方、構造材料の使用環境での信頼性向上のためには、耐食性の向上が不可欠である。局所的な腐食進行は構造設計を困難なものとし、腐食反応の過程で鋼材に侵入する水素は、高強度構造材料における水素脆化の主な原因とされる。稀少元素を削減し

軽元素を活用した開発材における耐食性確保には、表面処理が重要な技術となる。従来にはない成分系の鋼材であるから、表面処理材の濡れ性、密着性を十分確保するための温度管理、雰囲気管理の高度なチューニングが必要とされる。そのため、各種環境を再現しながら熔融金属による合金メッキ層を形成できることを目指したコーティングチャンバーを導入した(図Ⅲ-2.1.2-24)。

図Ⅲ-2.1.2-25、Ⅲ-2.1.2-26 は、導入装置で可能となった、熔融亜鉛液滴の材料への濡れ性評価結果を示す。図Ⅲ-2.1.2-25 では、添加元素を減らした模擬材(試料A)、図Ⅲ-2.1.2-26 では、耐食性の添加元素を加えた模擬材(試料B)を使用した。いずれの試料も真空下で 420℃に保持され、口径 1mm の表面処理材滴下ノズルを 700℃に制御した状態で実施した。図Ⅲ-2.1.2-25、Ⅲ-2.1.2-26 を比較することで、試料Aの方が、試料Bより亜鉛の濡れ性が良いという材料組成の違いによる濡れ性の差を反映した結果を得ることに成功した。今後、信頼性向上、製造工程の最適化研究に活用する予定である。



図Ⅲ-2.1.2-24 熔融金属コーティングチャンパー



図Ⅲ-2.1.2-25 試料Aへ熔融亜鉛を滴下した際の液滴



図Ⅲ-2.1.2-26 試料Bへ熔融亜鉛を滴下した際の液滴

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.2-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	1	0	0	0	0	0	1
H27FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
H28FY	1	0	4	0	0	0	0	1	1
合計	1	0	5	0	0	0	0	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）

(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）

高強度、高延性の中高炭素鋼の基本特許および中・高温域の組織観察技術の基本特許は既に出願済である。

耐環境性、成形性、耐久性の評価により、革新鋼材の新たな機能が明らかになった時点で、出願準備を進める方針。

表Ⅲ-2.1.2-5 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	2	0	0
H27FY	0	0	0
H28FY	0	0	0
合計	2	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.1.3[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

2.1.3.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車や輸送機器の軽量化を目的としたハイテンの適用拡大には、強度のみならず加工性（伸び特性）も抜本的に向上させる必要がある。本テーマでは、加工熱処理による基礎素材特性の極限追求をコンセプトに、複相組織鋼板におけるマイクロ組織微細化、炭素を活用した微細且つ安定な残留オーステナイトの確保、さらには焼鈍熱処理時の γ 粒径微細化といった冶金的制御因子の機械的特性に及ぼす影響を明確化することを通し、従来延長線上で見込まれる特性を大幅に上回る高強度・高延性鋼板の組織制御・製造プロセス指針を構築することを目的とする。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.1.3-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
鋼板開発	引張強さ (TS) \geq 1.2GPa、伸び (El) \geq 20% (TS \times El \geq 24,000)	TS \geq 1.2GPa、El \geq 25% (TS \times El \geq 30,000) 平成 27 年度末に目標を 5 年前倒しし下記に修正 TS \geq 1.5GPa、El \geq 20% (TS \times El \geq 30,000)	TS \geq 1.5GPa、El \geq 20% (TS \times El \geq 30,000) (平成 27 年度末に本目標を 5 年前倒しし、平成 29 年度末目標とした)	1.2GPa および 1.5GPa 鋼板の需要急拡大
解析・評価手法開発	炭素の分析下限が 30ppm (点分析)	炭素の分析下限が 20ppm (点分析)	炭素の分析下限が 10ppm (点分析)	複相鋼板 α 相中の固溶炭素濃度

(3)全体計画

①高強度高延性中高炭素鋼の開発

自動車や輸送機器の軽量化を目的としたハイテンの適用拡大には、強度だけでなく加工性（伸び特性）も抜本的に向上させていく必要がある。本テーマでは、加工熱処理による基礎素材特性の極限追求をコンセプトに、複相組織鋼板において従来の延長線上で見込まれる値を大きく超える伸びを実現する。具体的なアプローチは、強度を担うマルテンサイトやベイナイトといった硬質相の超微細化による鋼の生地そのものの高延性化と、加工により変態して延性を高める残留オーステナイトの微細分散による伸びの向上である。従来は、ベイナイトの微細化技術が不十分であり、かつ残留オーステナイトによる高い延性を安定的に実現することができなかった。ここでは、これまであまり注目されてこなかったベイナイトやマルテンサイトの微細化を積極的に行うことで安定なオーステナイトを多量に残存させることによって、革新的な伸びの向上を目指す。平成 26 年度は、現実的な加工熱処理プロセスを前提に、第一中間

目標特性（自主目標）である引張強さ 1.2GPa で伸び 20%を達成する加工熱処理法を 1 年前倒しで確立した。平成 27 年度は、さらに技術を発展させて、第二中間目標特性（自主目標）である引張強さ 1.2GPa で伸び 25%を有する鋼板を 2 年前倒しで開発した。本結果を受けて、平成 27 年度末に、最終目標特性（PJ 公募目標）達成を 5 年前倒しし、平成 29 年度末での達成を目指すこととした。よって、平成 28～29 年度は、最終目標である引張強さ 1.5GPa で伸び 20%を有する鋼板の実験室検討を実施する。

②中高炭素鋼の解析・評価手法の開発

本プロジェクトでは、延性が従来の延長線上にない革新的なハイテンを開発するテーマとして、中高炭素鋼の開発を行う。この中高炭素鋼は従来の解析ツールでは解明できない微細組織を有することから、分析技術も同時に開発する必要がある。特に、微細構造と炭素の分配挙動の関係を解析する手法の開発が重要である。

この課題について、各種製造プロセスによる中高炭素鋼板開発を促進する革新的な解析技術として、電子線等を用いた中高炭素鋼中の炭素の分配状態を解析する炭素分配アナライザーを平成 25 年度に導入した。この技術は、現状、点分析でも 0.1%を若干下回る程度に留まっている炭素の定量下限を、二次元分布評価の場合でも 100ppm 未満に維持できる世界初の炭素分析を実現させるものである。平成 26 年度は、試料前処理方法の検討を含めた炭素濃度分布評価手法の高度化を図り、点分析での炭素定量下限 30ppm を目指すと共に、素材開発への応用展開を行った。平成 27 年度は炭素定量下限 20ppm を当初予定の平成 29 年度から 2 年前倒しで達成した。本結果を受けて、平成 27 年度末に、最終目標達成（炭素定量下限 10ppm）を 5 年前倒しし、平成 29 年度末での達成を目指すこととした。さらに、平成 28～29 年度は、複相組織の三次元解析や高速定量解析技術も開発し、素材開発の設計基盤を強化する。

また、これらの電子ビーム利用技術と並行して、初年度から、大学に委託して鋼材の微細組織評価のための中性子利用技術を探索し、小角散乱による微細析出物の定量評価技術および水素トラップ過程の観察技術の確立を目指した。この研究課題は協調領域として、各社および研究機関が協力して推進することとし、平成27年度よりテーマ44に移行して実施した。

(4)実施体制

本テーマは千葉分室（JFE スチール株式会社）が 4 再委託先と共に実施する。

(5)運営管理

実務者進捗会議を 1 ヶ月に 1 回、運営会議を 3 ヶ月毎に開催。また、再委託先との進捗会議を 3 ヶ月毎に開催。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

自動車の燃費向上によりエネルギー消費量と CO₂ 排出量が大幅に削減され、燃費改善目標（国立環境研究所 AIM PJ チーム試算）である 10～20%相当の CO₂削減で地球温暖化ガスの低減に寄与する。

2.1.3.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.3-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
鋼板開発	TS \geq 1.5GPa、EI \geq 20% (TS \times EI \geq 30,000)	TS \approx 1.5GPa、EI \approx 19% まで到達	◎	
解析・評価手法開発	炭素の分析下限が 20ppm (点分析)	炭素濃度既知の試料を N=16 回繰り返し測定する ことによる測定誤差が 概ね 20ppm 以下	○	
解析・評価手法開発	鋼組織の 3D 評価	3D-SEM により、開発鋼 の組織解析を行い、熱処 理による組織変化を三次 元的に評価	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.1.3-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 ^{注)} (平成 34 年度末)	達成見通し
鋼板開発	TS \approx 1.5GPa、EI \approx 19%	TS \geq 1.5GPa、EI \geq 20% (TS \times EI \geq 30,000)	○達成見込み
解析・評価手法開発	中間目標の定量下限 20ppm 以下を クリア	炭素の分析下限が 10ppm (点分析)	○達成見込み

注) 最終目標達成を 5 年間前倒し、平成 29 年度末達成とした。

(3)研究開発の成果と意義

1) 高強度高延性中高炭素鋼の開発

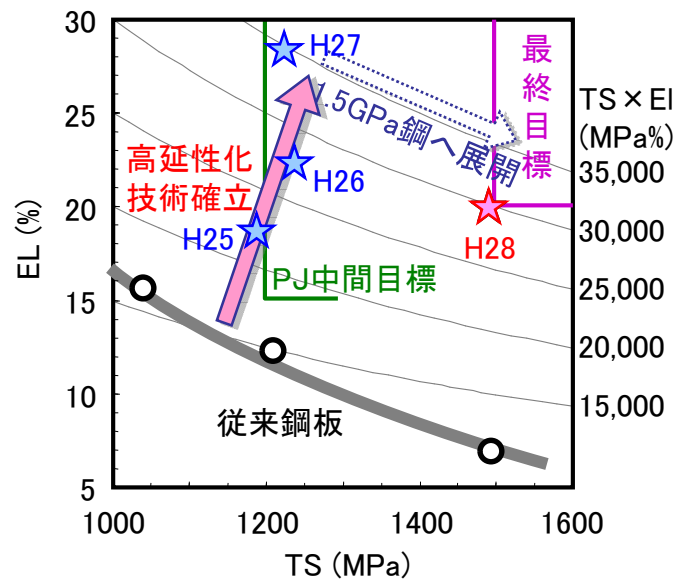
自動車や輸送機器の軽量化を目的としたハイテンの適用拡大には、強度だけではなく加工性（伸び特性）も抜本的に向上させていく必要がある。本テーマでは、従来よりも炭素を積極的に添加した鋼の加工熱処理による基礎素材特性の極限追求をコンセプトに、複相組織鋼板において従来の延長線上で見込まれる値を大きく超える伸びを実現する。具体的なアプローチは、強度を担うマルテンサイトやベイナイトといった硬質相の超微細化による鋼の生地そのもの高延性化と、加工により変態して延性を高める残留オーステナイト相の微細分散による伸びの向上である。従来は、ベイナイトの微細化技術が不十分であり、かつ残留オーステナイトによる高い延性を安定的に

実現することができなかった。ここでは、これまであまり注目されてこなかったベイナイトやマルテンサイトの微細化を積極的に行うことで安定なオーステナイトを多量に残存させることによって、革新的な伸びの向上を目指す。

本研究では、組織単位としてベイナイトやマルテンサイトのブロック構造に着目することで、従来の結晶粒単位に比較して実質的に組織の微細化を実現することを基本方針とした。一般的に中高炭素鋼のベイナイトやマルテンサイトは、おおよそ数十 μm 程度のサイズの結晶粒（旧オーステナイト粒）の内部に数 μm のサイズでパケット構造を有し、さらにパケットの内部に $1\mu\text{m}$ 程度のサイズでブロック構造を有するか、これに類似した組織形態を呈している。ブロックの内部はさらに微細なラス構造を有している。この中で旧オーステナイト粒のみでなく、パケットやブロック構造も境界の方位差が大きく、大角粒界により区分されている。したがって、ブロック構造を結晶粒単位として制御することで微細化による機械的特性向上の効果を享受することが期待される。すなわち、ブロック境界に残留オーステナイトを形成せしめることにより、硬質相の微細化と残留オーステナイトの均一、微細分散を具現化し、このような形態およびサイズの残留オーステナイトが機械的性質、特に延性の向上に及ぼす効果を検証することを研究目的とした。

平成 25 年度には、1.2GPa 級の高延性高強度鋼板の開発を目的として、ベイナイトを主相とした新微細粒組織のための加工熱処理方法を立案した。汎用鋼程度の低炭素低合金鋼に対して、複合化した加工熱処理を実施することにより、従来鋼板の機械的特性を凌駕し、1.2GPa 級の超高強度と 590MPa 級鋼に匹敵する延性を両立できる可能性が示唆された。そこで本基礎技術思想を更に発展することを基本方針として、中間目標特性を達成する加工熱処理法の探索を行った。アプローチとして、平成 26 年度は、中高炭素添加を前提に合金成分組成を適正に調整した上で複合化した加工熱処理を組合せた。さらに、平成 27 年度には、中高炭素添加鋼への加工熱処理条件の適正化を図り、1.2GPa 級の高延性高強度鋼板として理想的な複相組織形態に制御する手法を検討した。その結果、特殊な強加工プロセスを利用することなく、実機製造を想定した現実的な焼鈍プロセスによって、複相組織の主相であるベイナイトの組織サイズを数ミクロン程度に制御する手法を確立し、平成 25 年度の検討鋼に対して格段に微細化を達成した。さらに、加工熱処理過程のミクロ組織変化の核心である炭素の拡散挙動や分布の変化を、新たに開発した炭素分配アナライザを利用して厳密に解析することにより、ベイナイト主相中に安定度の高いサブミクロンサイズの残留オーステナイトを多量に分散させる手法を確立した。上記の手法を用いた研究室実験の結果、図 III-2.1.3-1 に示すとおり、平成 26 年度の開発鋼板では、プロジェクトの共通中間目標である引張強さ 1.2GPa 以上、伸び 15%以上を大幅に上回り、平成 27 年度第一中間目標（自主目標）である引張強さ 1.2GPa 以上と伸び 20%以上を、さらに平成 27 年度の開発鋼板では、平成 29 年度第二中間目標（自主目標）である引張強さ 1.2GPa 以上と伸び 25%以上の両立を、当初計画より前倒しで達成した。さらに、平成 28 年度には、平成 27 年度までの超高延性 1.2GPa 級鋼開発技術を 1.5GPa 級鋼に展開し、化学成分、製造条件を適正化することで、引張強さ約 1.5GPa、伸び約 19%と、最終目標に近い特性が得られている。本技術の活用により、現在、自動車用構造材料の主要部材に用い

られている 590MPa 級鋼を、今回開発した 1.2~1.5GPa 級鋼に置き換えることにより、大幅な車体軽量化による燃費向上と衝突安全性の向上が期待できる。



図Ⅲ-2.1.3-1 開発鋼の機械的特性

2) 中高炭素鋼の解析・評価手法の開発

本プロジェクトの中高炭素鋼は従来の解析ツールでは解明できない微細組織を有することから、分析技術も同時に開発する必要がある。特に、その詳細を学術的に解明するため、微細構造と炭素の分配挙動の関係を解析する手法の開発が重要である。

この課題について、各種製造プロセスによる中高炭素鋼板開発を促進する革新的な解析技術として、電子線等を用いた中高炭素鋼中の炭素の分配状態を解析する技術や、中性子を用いた熱処理や加工プロセスにおける鋼微細組織の変態挙動の動的解析技術等を開発した。初年度には、中高炭素鋼板の開発を促進する炭素分配アナライザを開発・設備化し、中炭素鋼中の組織形成に大きな影響を与える炭素を定量評価する基礎技術を確立した。

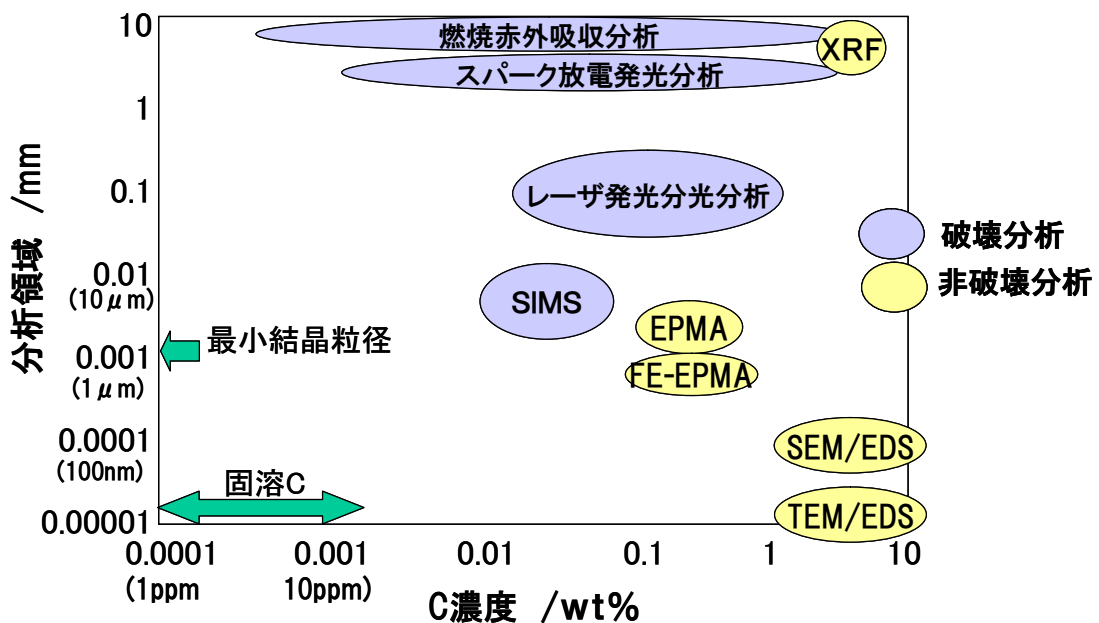
2).1 炭素分配アナライザの開発

2).1.1 組織対応型炭素分配分析手法の選択

まず、鉄鋼材料の組織に対応する C 分布を測定する手法について述べる。

鉄鋼中の C 分析手法は古くから確立されていて、化学分析に相当する分析手法としては C の場合は燃焼赤外線吸収分析を用いるが、この手法は試料を切粉状にして測定するバルク分析である。それに対して、以下に述べる物理解析手法の C 分析手法は固体のまま測定することを特徴とし、それぞれ励起源および測定する信号の種類によって分析面積や検出感度（検出下限）が決まる。

ここで、分析面積を縦軸に、感度を横軸にして、各手法の適用範囲をプロットしたものを図Ⅲ-2.1.3-2 に示す。C に対する測定感度が最もよい燃焼赤外法は幅広い C 濃度を網羅することができる手法であるが、前述のように試料を切粉にする必要があるため、分析面積は広く平均的な情報となる。一方、電子線マイクロアナライザー (EPMA) や走査型電子顕微鏡 (SEM) あるいは透過型電子顕微鏡 (TEM) など電子線を照射し、放出される特性 X 線を検出する手法では、分析面積を絞り局所的な情報を得ることができるが、検出下限が上昇し、特に TEM、SEM で用いられるエネルギー分散型 X 線分析装置(EDS)ではパーセントオーダー以上含有しないと検出できない。すなわち、図Ⅲ-2.1.3-2 は分析面積が小さくなるほど感度が劣化するような右下がりの傾向がある。



図Ⅲ-2.1.3-2 鉄鋼材料の C 分析手法とそれらの感度・分析面積

図Ⅲ-2.1.3-2 に示した各物理解析手法の特徴について簡単に述べる。

燃焼赤外線吸収分析(ガス分析)と同等の感度を有し、かつ固体のまま分析可能であるのがスパーク放電発光分析(カントバック)である。スパーク放電発光分析法の C 濃度の適用範囲は 0.001%以上 5.5%以下となっている。この手法は簡単な試料前処理で分析できるため工程分析によく用いられる手法である。さらに、工程分析に用いられる手法としてレーザー発光分光分析があるが、これはレーザー光を照射し生成するレーザー励起プラズマ中の発光により定量分析を行うもので、カントバックよりも分析面積は小さい。一方、2 次イオン質量分析法 (SIMS) は表面分析手法として知られているが、イオン照射により励起される 2 次イオンを検出しているため、深さ方向のプロファイルが得られる。しかし、これらレーザー発光分析法と SIMS は、C の検出下限が 0.01%程度までであり、鉄鋼材料でも低炭素鋼板など生産量の多い製品の C 分析に対しては感度が不足している。

本プロジェクトで目的とする、鋼板中の C を測定する場合は、特に分析面積を結晶

粒径よりも小さくする必要がある。上記の手法は、C の感度はよいがいずれも破壊分析手法であり、測定時に組織が破壊されるので本プロジェクトの目的には適さない。

それに対して、蛍光X線分析 (XRF)、EPMA、SEM および TEM は非破壊分析であるため鉄鋼材料の組織などを維持したまま分析が行える。しかし、これらの非破壊分析手法はいずれも特性X線を検出する手法であるためCなど軽元素の感度が乏しいことが特徴である。中でも、分析走査電子顕微鏡(SEM/EDS)、分析透過電子顕微鏡(TEM/EDS)は、さらにビーム径の細い電子線を照射することができるため極微小領域の分析が可能だが、エネルギー分散型のX線検出器 (EDS) を用いるために、分析精度が高くないのが難点である。特に C など軽元素の感度が非常に低いために、これらも本プロジェクトの目的に適さない。

図Ⅲ-2.1.3-2 においては、EPMA は電子線を照射するため分析面積が小さく、波長分散型のX線検出器 (WDS) により EDS よりも高感度でかつ精度よく分析できるので、非破壊分析で微小領域の C 分析を行うのにもっとも適していると考えられる。とくに、最近では電子銃をフィールドエミッション型(FE)のタイプにした装置も市販されていて、結晶粒径が数ミクロンの複相組織に対応した元素分布の測定も可能になっている。以上より、本プロジェクトにおける組織対応型 C 分配測定はフィールドエミッション型の電子線マイクロアナライザ(FE-EPMA)を採用することにした。

2).1.2 開発した FE-EPMA における炭素分析

鋼板の微細組織に含まれる炭素量を、微細組織に応じて0.1%を大きく下回る精度で分析することを目標として、炭素のコンタミネーション（試料表面汚染）を大幅に低減させる特殊仕様を組み込んだ独自のマイクロアナライザを製作し導入した。

EPMAを用いた炭素分析においては、試料に本来含まれる炭素からの信号とコンタミネーションから発生する炭素信号を区別できないため、1%以下の微量炭素を高い信頼性で分析することが困難である。炭素分配アナライザを開発する上で次の2点に重点的に取り組んだ。

- ① コンタミネーション発生の抑制
- ② 炭素分析の高感度化

①については炭素分析の信頼性を下げる原因であるコンタミネーションの発生を抑制する対策として、一つは液体窒素トラップを活用、もう一つは近年SEM用に普及しているプラズマクリーナー装置を組み込んだ。これらの対策により、コンタミネーション付着量を従来よりも大幅に抑制することに成功した。

②炭素分析の高感度化については、コンタミネーションが付着し分析値に影響を及ぼす前に炭素分析を終えるために重要な技術である。軟X線領域において検出感度の高い分光結晶を装置に3台組み込み、感度を3倍向上することに成功した。個々の分光結晶の信号は多結晶加算プログラムを新たに組み込んだ。このような検出器構成を持つEPMA装置は世界初である。

図Ⅲ-2.1.3-3に開発した炭素分配アナライザの装置外観を示す。また、炭素濃度測定用の標準試料 (C=0.001~0.680%) を用いて、確立したコンタミネーション削減技術による測定条件にてN=13回の繰り返し測定を行ったときの、それぞれの試料のC

アナライザによる炭素定量値(b)、化学分析値との差(c)および、それぞれの試料の定量値の標準誤差を表Ⅲ-2.1.3-4に示す。いずれの試料においても標準偏差が0.003%以下となっており、30ppmの定量精度を達成した。



図Ⅲ-2.1.3-3 炭素分配分析用 FE-EPMA の外観

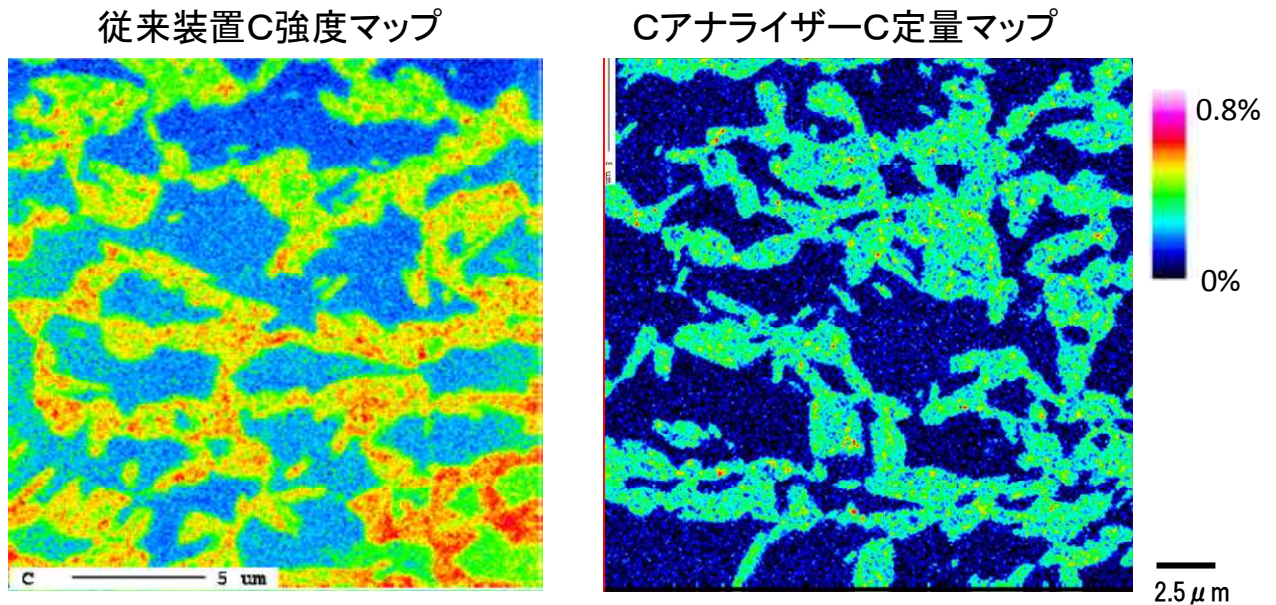
表Ⅲ-2.1.3-4 炭素分配アナライザの C 分析定量精度

			mass%, N=13
a)化学分析値	b) FE-EPMA 測定値	c) b)-a)	d) 標準偏差
0	0.002	0.002	0.003
0.089	0.089	0	0.003
0.188	0.179	-0.009	0.001
0.281	0.283	0.002	0.003
0.46	0.472	0.012	0.003
0.68	0.674	-0.006	0.003

Fe-0.15%C-2%Si-1.5%Mn 鋼を冷延後、 $\alpha+\gamma$ 2 相域の 800℃で 100s 保持し、ついで 600℃まで冷却後、室温まで急冷した試料の $\gamma\rightarrow\alpha$ 変態における C 分配挙動を、開発した FE-EPMA で測定した。分析条件は加速電圧 9 kV、照射電流 5×10^{-8} A で、ビーム径最小 (Focused) とした。これらの条件で、C マッピング分析を実施した。FE-EPMA による定量方法は、C は Fe-C 合金標準試料を用いた検量線法を用いた。

FE-EPMA による C 定量マッピング分析結果を図Ⅲ-2.1.3-4 に示す。いずれも複組織に対応した元素分配が明瞭に得られているが、従来装置はフェライト中の炭素濃度が

高く、コンタミネーションの影響によるものと考えられる。一方、開発した FE-EPMA では、フェライト相中の炭素濃度が低く、 γ 中の炭素の分布が明確な炭素濃度マッピング測定ができていることが明らかになった。



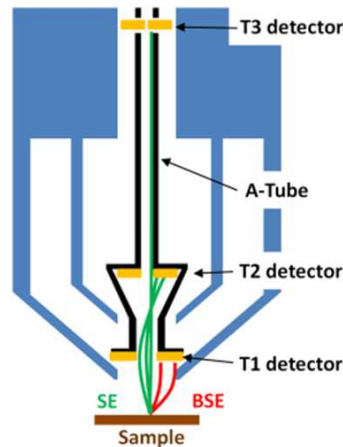
図Ⅲ-2.1.3-4 鋼板複相組織の FE-EPMA 分析例

2).2 鋼組織の 3D 評価技術開発

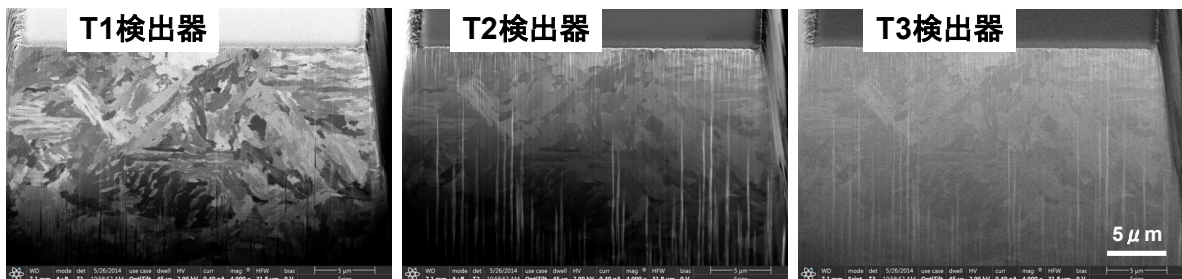
鋼板開発を行うにあたり、材料組織のうち γ 相の形態が非常に重要になる。そのために、前述のように γ 相、 α 相の C 分布の高精度な測定に加え、 γ 相の形態についての情報も重要である。従来から γ 相の形態については、走査電子顕微鏡(SEM)や透過電子顕微鏡(TEM)により評価してきた。しかし、今回の開発目標である高強度-高延性材の特性を達成するためには、 γ 相の形態や α 相の形態についても、二次元的な情報に加えて、三次元情報の取得が必要である。そのために、平成 25 年度から三次元ミクロ組織解析装置の仕様について検討を行い、平成 26 年度に導入を行った。装置は、SEM と集束イオンビーム(FIB)より構成され、FIB 加工で試料の断面組織を作製し、一断面の SEM 観察を行い、引き続き FIB 加工により新たな断面組織を作製し、連続して解析を続けることで三次元像を構築する。また、SEM による組織解析に加え、電子線後方散乱回折(EBSD)による観察機能を加えて、結晶組織情報の解析を行えるものとした。

FIB により作製した断面組織は、平滑なために従来の SEM 装置ではコントラストが形成されずに連続像の観察が困難であった。このため、導入装置については、FIB 断面の SEM 像取得機能と EBSD 解析の安定性を重視して選定を行った。この結果、FEI 社製の Scios を平成 27 年 1 月に導入した。今回導入した装置は、図Ⅲ-2.1.3-5 に示すように、カラム内に 3 つの検出器(T1、T2、T3)を持っている。この内、ポールピース

内に新たに開発された反射電子検出器（T1 検出器）により、これまでは困難であった FIB で作製した平滑面の組織観察が可能となった。図Ⅲ-2.1.3-6 に、SEM 加速電圧 2kV で撮像した、FIB で作製した同一断面の SEM 像を示す。図から、T1 検出器では結晶の形態について観察可能であるが、T2 および T3 検出器は、表面の凹凸等は観察できるが、結晶組織の情報を得ることが困難であることが分かる。このように T1 検出器を用いた SEM 連続像の観察から、三次元組織の構築が可能となった。



図Ⅲ-2.1.3-5 三次元マイクロ解析装置（FEI 社製、Scios）の検出器模式図



図Ⅲ-2.1.1-6 FIB で作製した同一断面 SEM 像の検出器による違い（加速電圧：2kV）

今回の開発材は、残留オーステナイトを含む鋼板であるために、鋼中の BCC 相（フェライト、マルテンサイト、ベイナイト）と FCC 相（オーステナイト）の識別が必要となる。このため、組織の特定は非常に重要になる。そこで、対象となる組織の識別を行うために、三次元組織のスライス・観察方法について検討を行い、観察条件を最適化した。パーライト鋼での組織観察条件最適化の例を図Ⅲ-2.1.3-7 に示すが、3D 組織観察最適化により、パーライトラメラを連続的に捕え、的確な 3D 組織評価が実施されていることがわかる。同時に、EBSD を用いた三次元組織観察方法の検討もを行い、組織の三次元 EBSD 像の取得が可能になった（図Ⅲ-2.1.3-8）。また、平成 27 年

度に導入したメゾスケール高速アナライザーについては、測定条件について検討を行い、低倍から高倍のマルチスケールでの組織観察が可能となるとともに、元素分析の短時間化を行うことが出来た。この検討により、今後の三次元組織観察領域の選定や試料全体把握について適用が可能となり開発に寄与することが期待される。

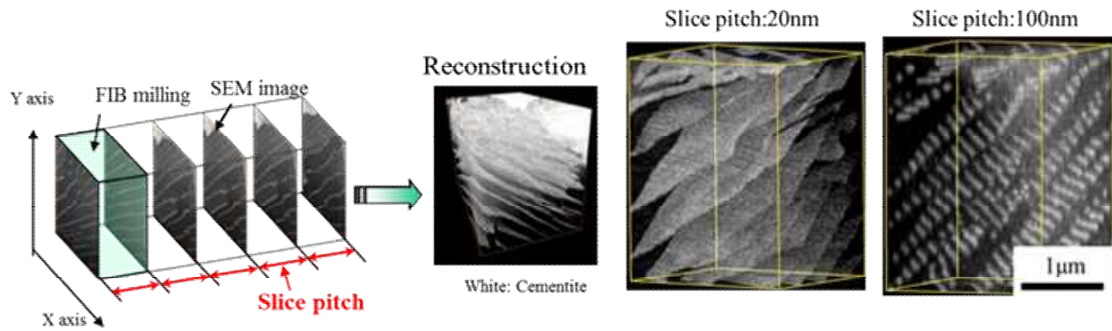


図 III-2.1.3-7 三次元像観察の模式図及び 3D 組織像構築に及ぼす FIB 加工条件の影響

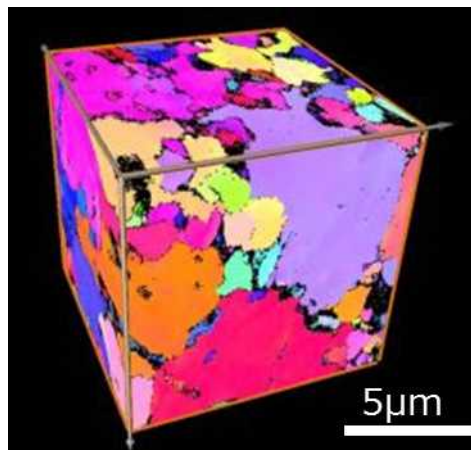


図 III-2.1.3-8 3D-EBSD を用いた三次元像

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.3-5 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	3	9	1	0	0	1	1
H27FY	0	0	6	0	0	0	0	0	1
H28FY	3	0	12	0	0	0	0	0	1
合計	3	0	21	9	1	0	0	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）

(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）

表Ⅲ-2.1.3-6 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	2	0	0
H27FY	1	0	1
H28FY	6	0	1
合計	9	0	2

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.1.4[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

2.1.4.1 テーマの概要

(1)背景と目的

複層鋼板は、従来の FRP や FRM の複合材料では設計に取り入れられていなかった「延性」の向上を材料の中心設計に取り入れ、異なる強度・延性を有する鋼板を複層化した金属-金属の複合材料である。これによって、これまで超高強度を達成できるも極めて延性が低いために構造材料への適用が困難であった焼入ままのマルテンサイト鋼を構成層として複層化によってその延性を向上させることができるとともに、従来の鉄鋼材料の設計で熱力学的に制約されていた複数の相の空間配置や分率、組成を自由に設計できることになり、モノリシックな鉄鋼材料では到達できない超高強度と高延性を両立する新規の鉄鋼材料を可能とするものである。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.1.4-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
超高強度—高延性を両立する炭素鋼ベースの複層鋼板の開発	研究開発の本格的な実施を目指して、次世代の移動体の大幅軽量化に資する強度 1.5GPa 以上、伸び 20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認する。	平成 27 年度までの FS 研究		高強度鉄鋼材料で 1.5GPa、伸び 20%以上を達成するのは難しく、単層の革新鋼板では、上記の特性を実現するための成分およびプロセスウィンドウが極めて狭い。それに対し、複層鋼板では比較的簡便な方法で上記特性を実現する可能性がある。
鋼／非鉄合金複層化の検討	中高炭素との複層化に適した非鉄合金を選定し、層の幾何設計とともに界面形成の技術・条件についても検討を進め、その結果の複層材の特性評価にも取り組む。	平成 27 年度までの FS 研究		

(3)全体計画

研究開発の本格的な実施を目指して、次世代の移動体の大幅軽量化に資する強度 1.5GPa 以上、伸び 20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認する。平成 27 年度まで FS 研究として可能性を見極める。

(4)実施体制

本テーマは尼崎分室（新日鐵住金株式会社）が、再委託先 1 大学とともに実施した、

(5)運営管理

新日鐵住金内部および再委託先との進捗会議を定期的を実施し、適切な運営管理に努めてきた。具体的には、1 回／年の頻度で、当社幹部（鉄鋼研究所所長、先端技術研究所所長）へのキックオフおよび進捗報告会議を実施した。さらに、実務者間で、1 回／月の進捗会議および、3 回／年の頻度で再委託先との進捗会議を実施した。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO2 削減・省エネルギー等@2030 年度）

強度 1.5GPa、伸び 20%の複層鋼板が達成された場合、フロントメンバーに適用すれば約 30%の軽量化、B ピラーなどのサイドメンバーに適用すれば約 38%の軽量化が可能と試算している。他方、スクラップ鋼をはじめとする劣質原料から構成層を形成しても高性能な金属材料を達成可能であるため、資源の乏しい我が国の資源戦略、鉄鋼や金属の生産の環境負荷の低減、などの点から大きなインパクトにつながる。

2.1.4.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.4-2 第一中間目標と達成度

研究開発項目	第一中間目標 (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
超高強度—高延性を両立する炭素鋼ベースの複層鋼板の開発	研究開発の本格的な実施を目指して、次世代の移動体の大幅軽量化に資する強度 1.5GPa 以上、伸び 20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認する。	中高炭素 TRIP 鋼およびマルテンサイト鋼を用い、層数を 3~5 層として試作し、1.5GPa 以上、伸び 20%以上の複層鋼板の実現可能性を確認した。	○	
鋼／非鉄合金複層化の検討	中高炭素との複層化に適した非鉄合金を選定し、層の幾何設計とともに界面形成の技術・条件についても検討を進める。	鋼と Mg 合金の接合を可能とする条件を導出	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.1.4-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
超高強度—高延性を両立する炭素鋼ベースの複層鋼板の開発	平成 27 年度で FS 研究を終了した。		
鋼／非鉄合金複層化の検討	平成 27 年度で FS 研究を終了した。		

(3)研究開発の成果と意義

本研究では、中高炭素鋼ベースのマルテンサイト鋼の高強度を活かしつつ高延性を達成する手段として、高延性層との複層化によるマルテンサイトの低延性克服を狙う。平成 27 年度までに、複層の界面強度の確保、構成層の幾何設計、各構成層の組織・力学特性とそのバランスの最適化により、モノリシックな鋼では未達の超高強度—高延性の両立と実用化の可能性を検討した。

1) 構成層の特性制御・複層幾何設計

複層鋼板の特性は、構成層の特性と幾何設計指針から予測可能である。複層材料の一様変形を阻害する変形形態は、高強度層が単独で脆性的に破断する形態（Tunneling crack）と、界面が剥離することにより高強度層が高延性層の力学的拘束を失い脆性的に破断する形態（H-shaped crack）の 2 種類が考えられている。Tunneling crack の発生を抑制する条件は、弾性体と仮定すると、

$$t_A \leq \frac{4K_{IC}^2}{\pi\sigma^2} \quad (1)$$

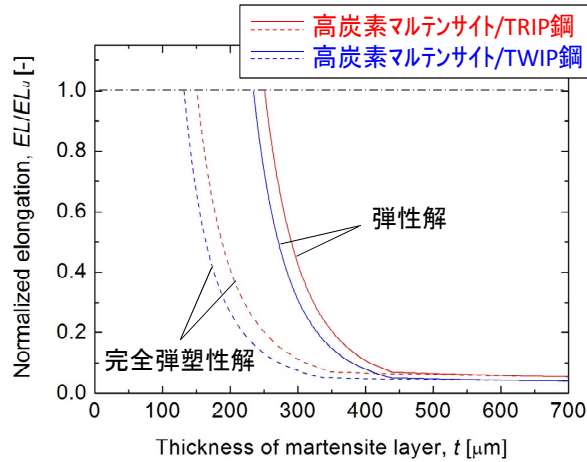
完全弾塑性体と仮定すると、

$$t_A \leq \frac{2\sqrt{3}K_{IC}^2\sigma_y}{\sigma^3} \quad (2)$$

で記述される。ここで、 K_{IC} は破壊靱性値、 σ は一軸引張応力、 t_A は高強度層の厚さである。図Ⅲ-2.1.4-1 に式(1)と(2)から求められる高強度層（マルテンサイト鋼）の破断伸びと高強度層の厚さの関係を示す。上式に従えば、高強度層の厚さが減少するに伴い、破断伸びが増加する。高炭素マルテンサイト鋼を高強度層とし、高炭素 TRIP 鋼または TWIP 鋼と組み合わせる場合には、マルテンサイト層の厚さが約 150 μm 以下の場合に脆性破壊が抑えられ、延性を持つと予測される。

つまり、高炭素マルテンサイト鋼／TRIP 鋼、または TWIP 鋼との複層鋼板の設計には、マルテンサイト層厚を 150 μm 以下にすることが望ましい。複層鋼板の層数は、板

厚が1mmの場合には7層、0.75mmの場合には5層に相当する。

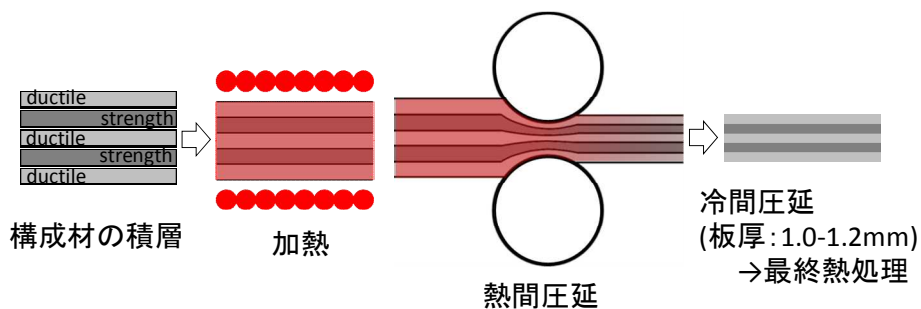


図Ⅲ-2.1.4-1 複層鋼板の破断伸びの予測

2) 複層鋼板の試作・評価

構成層を高炭素マルテンサイト鋼、高炭素 TRIP 鋼、高炭素 TWIP 鋼とし、1)幾何設計に従い、複層鋼板を試作した。

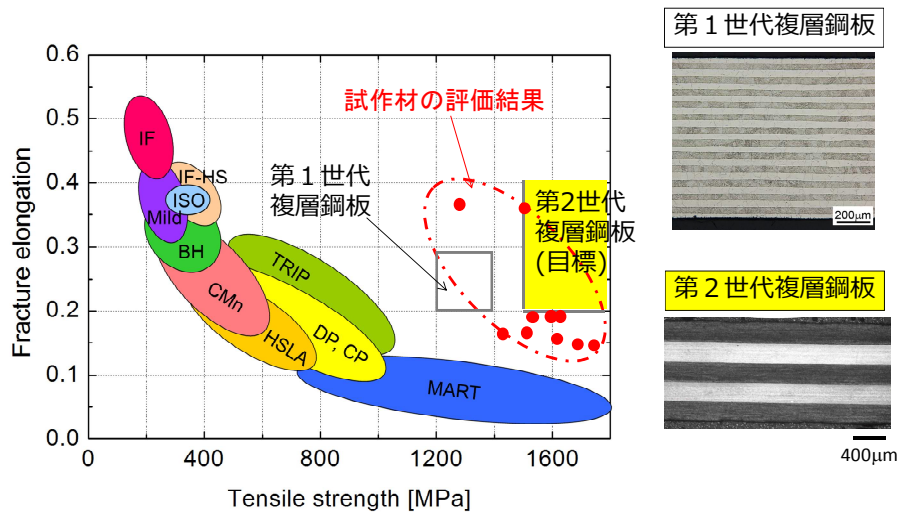
炭素を0.4~0.6%含む鋼において、複層鋼板生成後、各構成層がマルテンサイト、TRIP、TWIPになるよう成分設計を行った。まず、各鋼を真空溶製後、熱間圧延により2.5~6mmの板材を得た。これらの熱延材を5層積層し、四周溶接を行った後、1050℃で加熱後、図Ⅲ-2.1.4-2に示すような熱間圧延を行った。熱延後の板厚は3.0~3.5mmである。熱間圧延材は、焼き戻し後、冷間圧延を行い、1.0~1.2mmの板厚を得た。その後、適正な熱処理条件を選び、各層の組織制御を行った。



図Ⅲ-2.1.4-2 複層鋼板の試作方法

3) 第2世代複層鋼板の特性

図Ⅲ-2.1.4-3 に目標特性に対する複層鋼板試作材の引張特性を示す。一部、目標に到達しており、本研究で進めている材料設計指針は妥当であると判断される。



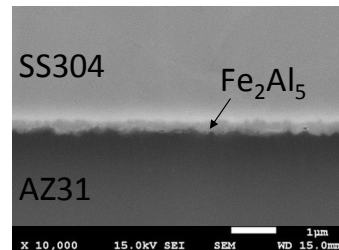
図Ⅲ-2.1.4-3 高炭素マルテンサイト／高炭素TRIP鋼またはTWIP鋼の積層鋼板の目標性能と結果

4) 鋼／非鉄金属の複層化

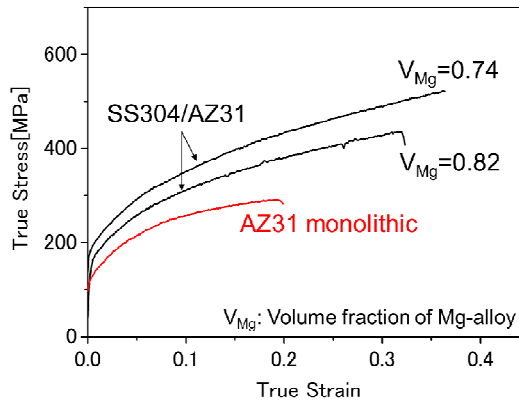
鋼と非鉄金属との複層化の検討を開始し、ステンレスと Mg 合金の複層化を試みた（図Ⅲ-2.1.4-4）。従来、鋼と Mg 合金の接合強度は弱く、複層材料としての延性確保が困難であった。しかしながら、反応型液相拡散接合（TLP 接合）により、界面に Fe_2Al_5 反応相を生成させることにより（図Ⅲ-2.1.4-5）、界面強度が5倍程度向上することが明らかになった。そこで、TLP 接合により SUS304 と AZ31 合金の複層化を図り、引張特性を評価した。その結果、AZ31 単体の強度、伸びを大幅に超える特性を示すことが明らかとなった（図Ⅲ-2.1.4-6）。



図Ⅲ-2.1.4-4 鋼／Mg 合金の複層化



図Ⅲ-2.1.4-5 鋼／Mg 合金界面の化合物制御



図Ⅲ-2.1.4-6 鋼/Mg 合金複層材料の引張特性

5)まとめ

中炭素～高炭素をベースとした鋼板を構成層とし、製造性の観点から層数を3～5層に抑え、強度1500MPa、伸び20%以上の複層鋼板の実現可能性を検討した。具体的には、文部科学省の先行プロジェクトで確立した複層鋼板の設計原理に基づき、中高炭素TRIP鋼およびマルテンサイト鋼の複層化を検討し、目標特性達成のための材料およびプロセス条件の指針を提示した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.4-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H27FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	0	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）

(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）

複層鋼板の基本特許はすでに日・米・韓・中・欧で成立。

表Ⅲ-2.1.4-5 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.1.5[テーマ番号 26] 複層鋼板の界面構造解析と特性調査

2.1.5.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車等の輸送機器の軽量化に向けて開発が進められている革新的鋼板開発に際し、その有効な一つ的手段である複層鋼板について、その界面構造解析と特性調査や微細組織構造解析技術の確立により複層化による高強度・高伸び特性の発現機構や耐水素脆化特性や靱性向上といった高性能化に対する検討を行い、さらに FEM および第一原理計算などの解析手法により、複層鋼板の界面接合モデル・水素拡散モデル(プロトタイプ)を構築することで、複層鋼板の界面強度発現機構に対する検討を行うことを目的とする。

(2)位置付け、目標値

複層鋼板の界面構造解析と特性調査として、複層鋼板の微細組織構造解析技術とマルテンサイト鋼の 3 次元構造解明を通じたき裂伝播抑制に好適な組織指針の導出を通じた高機能化(高伸び、水素脆化特性等)を達成するための複層材料構成・層構成の追究、接合メカニズムの解明、FEM および第一原理計算などの解析手法による複層鋼板の界面接合モデル・水素拡散モデルの構築を通じた複層鋼板の界面強度発現機構に対する検討を完了させる。

表Ⅲ-2.1.5-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
複層鋼板の界面構造解析と特性調査	- マルテンサイト鋼の 3 次元構造の解明 - 複層化による高機能化検討 - 接合メカニズム解明	(平成 27 年度末にて FS 検討終了)	(平成 27 年度末にて FS 検討終了)	複層鋼板の構成・層構成の追究および製造プロセスの探索
複層鋼板の微細組織構造解析技術の確立	- マルテンサイト鋼の変形挙動・き裂進展挙の解明	(平成 27 年度末にて FS 検討終了)	(平成 27 年度末にて FS 検討終了)	変形破壊形態の明確化による、高強度・高延性化の指針の明確化
複層鋼板の界面接合モデル・水素拡散モデル(プロトタイプ)の構築	- FEM および第一原理計算によるモデルの構築	(平成 27 年度末にて FS 検討終了)	(平成 27 年度末にて FS 検討終了)	複層化による高性能化のクライテリア形成および高強度鋼における耐水素脆化特性向上の指針の明確化

(3)全体計画

① 複層鋼板の界面構造解析と特性調査

高強度マルテンサイト鋼板ならびに複層鋼板を実験室的に作製し、その基本的な材料特性を調査する。本結果と後述する再委託研究結果を複合的に解析・評価することで、高機能化(高伸び、水素脆化特性等)を効果的に発現させるための諸条件を明確化する。

【平成 26 年度】

母材マルテンサイト鋼の変形・破壊機構解明に対して、高強度マルテンサイト鋼を対象として、その三次元構造解析を行う。これらの組織解析と平行してき裂伝播実験を行い、破壊機構に対する微視組織構造の影響を調査する。複層化による高機能化検討に対しては、複層鋼板に加えて、層厚比を変更した合わせ材を使用した複層鋼板を実験的に追加作製し、その変形挙動観察、および水素浸入実験を行う。複層界面の接合メカニズム解明に対しては、各種異種材料を使用したモデル拡散対を作製し、その剪断強度評価を行い、限界剪断エネルギーに及ぼす接合条件の影響を導出する。

【平成 27 年度】

母材マルテンサイト鋼の変形・破壊機構解明に対しては、微細マルテンサイト鋼に対しても同様のき裂伝播実験および三次元構造解析を行い、微視組織構造の差異が変形・破壊機構に対してどのように影響を及ぼすかを明確化する。複層化による高機能化検討に対しては特に水素脆化特性に対する合わせ材の影響を系統的に取りまとめる。複層界面の接合メカニズム解明に対しては、高精度の電子顕微鏡等を用いた界面構造解析を行い、接合条件、接合強度と界面構造との関係を明確化する。

② 複層鋼板の微細組織構造解析技術の確立

本テーマは、母材となる高強度マルテンサイト鋼および低強度(低炭素)鋼をはじめとした各種合わせ材の組み合わせによる積層鋼板に対して、その変形挙動、き裂進展挙動を解析すると共に、最新の解析機器(SEM, 高分解能 TEM, EBSD 等)を用いた組織観察・方位解析を行い、高機能化に対して好適な微視組織構造や複層構成に対する知見を取得することを目的とする。

【平成 26 年度】

マルテンサイト鋼母材ならびに複層鋼板を用い、In-Situ 引張試験による変形挙動観察ならびに解析を継続して実施する。更に、各鋼板の結晶方位解析、すべり系解析を平行して行い、複層化により発現する高伸び特性に影響を及ぼす因子を明確化する。

【平成 27 年度】

微細マルテンサイト鋼母材および同鋼を母材とした複層鋼板に対して平成 26 年度と同様の実験・解析を実施する。これらの実験・解析により、き裂伝播に対して好適なマルテンサイト組織構成、複層化による高機能化(特に高伸び特性)発現に影響する因子を明確化する。

③ 複層鋼板の界面接合モデル・水素拡散モデル(プロトタイプ)の構築

本テーマは、FEM や第一原理計算法などの数値計算法を用いて、複層鋼板の界面接

合モデル・水素拡散モデルのプロトタイプ構築に関する検討を行うことを目的とする。

【平成 26 年度】

第一の技術課題である複層鋼板の水素拡散モデルのプロトタイプ構築に対しては、炭素を含む鋼中の水素拡散現象のモデル化を進める。第一原理計算法と経路積分計算法の連成解析を行うソフトウェアを使用して拡散現象のモデル化を行い、モデルの適正化を図っていく。

複層鋼板の界面接合モデルのプロトタイプ構築に対しては、異相界面のモデルとして BCC 鉄 - FCC ニッケル界面を取り上げ、分子動力学法により界面接合メカニズムを原子レベルで解析する。

【平成 27 年度】

平成 26 年度に予定している各種数値計算を継続して行うと共に、JFE スチールにて実施する各種実験(水素浸入試験、拡散対の剪断強度試験等)結果と照らし合わせることで、複層鋼板の水素拡散モデル(プロトタイプ)、界面接合モデル(プロトタイプ)の双方を構築する。

(4)実施体制

本テーマは、千葉分室（JFE スチール株式会社）が再委託先 2 大学と共に実施する。

(5)運営管理

テーマ(26)登録研究員による実務者進捗会議を 1 ヶ月に 1 回開催。また、再委託先との進捗会議を 3 ヶ月毎に開催。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO2 削減・省エネルギー等@2030 年度）

アジアなど新興国を中心に安価で、かつ自動車の軽量化・安全性向上効果の大きい超高強度鋼板のニーズは爆発的に拡大することが予想されており、1.5GPa 級冷間プレス用鋼板の需要は、2020 年で 200 万 t/年以上、2030 年で 300 万 t/年以上に達する可能性がある。また、自動車の燃費向上によるエネルギー消費量と CO₂ 排出量が大幅に削減され、燃費改善目標（国立環境研究所 AIM PJ チーム試算）の 10~20%相当の CO₂ 削減で地球温暖化ガスの低減に寄与する。

2.1.5.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.5-2 第一中間目標と達成度

研究開発項目	第一中間目標 (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
複層鋼板の界面構造解析と特性調査	マルテンサイト鋼の 3 次元構造の解明、複層化による高機能化検討、接合メカニズム解明	3 次元マイクロ組織解析装置を用いて三次元構造観察を実施、層構造を変化させた複層鋼を用いた評価によって複層化による特性向上を検討 FEM による歪解析により接合界面の挙動を明確化	○	
複層鋼板の微細組織構造解析技術の確立	マルテンサイト鋼の変形挙動・き裂進展挙動の解明	その場引張装置を用いた実験により、マルテンサイト鋼の変形挙動・き裂進展挙動を解明	○	
複層鋼板の界面接合モデル・水素拡散モデル(プロトタイプ)の構築	FEM および第一原理計算によるモデルの構築	水素透過試験によって高強度鋼中の水素拡散現象を解明、モデル拡散対の評価および FEM による解析モデルを構築	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.1.5-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
複層鋼板の界面構造解析と特性調査	平成 27 年度末にて FS 検討終了		
複層鋼板の微細組織構造解析技術の確立	平成 27 年度末にて FS 検討終了		
複層鋼板の界面接合モデル・水素拡散モデル(プロトタイプ)の構築	平成 27 年度末にて FS 検討終了		

(3)研究開発の成果と意義

複層鋼の母材となる高強度マルテンサイト鋼、および高強度マルテンサイト鋼を母材として用いオーステナイト系ステンレス鋼を合わせ材として板厚比を変化させた複層鋼板を作製し、強度特性を調べた。

その結果、複層鋼板の引張強度は合わせ材として使用したオーステナイト系ステンレス鋼の合わせ材板厚比に応じて低下する一方で、伸び特性は積層化により大きく向上した。複層鋼板による高強度・高延性化に関しては十分な界面強度を得ることが重要と考えられているが¹⁻⁷⁾、本研究で作製した複層鋼においては引張破断部の層界面近傍での剥離は生じておらず、複層鋼板による高強度・高延性化に関する界面強度の寄与を明確に示した。

また、高強度・高延性化のために必要な界面接合強度の指針を得ることを目的に、FEMによる複層鋼板の変形解析および界面接合の原子レベル解析を行ったところ、相当塑性歪は母材と合わせ材とで連続的に変化しており、試験片中心部で歪みが大きくなる一方で、せん断応力は母材と合わせ材で不連続であり、接合界面の母材側で大きな値になることが明らかとなった。

さらに、複層鋼の母材である高強度マルテンサイト鋼の高ひずみ域での変形挙動について詳細に観察を行った結果、延性亀裂は主に旧 γ 粒界を伝播する傾向が確認され、より高強度・高延性鋼板の開発に対する粒界制御の重要性を示した。

鋼中への水素侵入挙動を解明するため、高炭素マルテンサイトと極低炭素フェライトを複層化した鋼板を使用し、電気化学的水素チャージによる水素透過試験を実施した。その結果、複層材の水素拡散は拡散速度の遅いマルテンサイト鋼に律速されるのではなく、合わせ材の影響を強く受けることが判明した。また、実際の部材として使用される場合は様々な加工や応力場を受けるため、水素の拡散挙動も影響を受けることが予想され、FEMにより複層鋼板の弾塑性-水素拡散連成解析を行い応力場の影響を調査したところ、応力が付与されると接合界面近傍に水素が集積することが示され、接合界面での水素集積を考慮した材料設計の必要性を示した。さらに、実際の材料組織では転位や粒界などのトラップサイトとの相互作用も考慮に入れる必要があり、高強度材で見られる水素による粒界破壊等の現象を理解するには、分子動力学法 (MD) 等による原子レベルでの水素の挙動を解析することが有効であるが、本研究では第一原理計算によって求めた原子間ポテンシャルと MD シミュレーションにより解析を行った。

また、複層鋼の界面強度に対しては、接合部での合金元素の拡散によって整合性の高い界面を形成することの重要性を示し、炭素鋼と高 Ni 合金及びオーステナイトステンレス鋼からなるモデル拡散対を作製して剪断強度の評価を実施し、FEM モデルによって拡散接合モデルの構築を行った。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.5-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	4	0	0	0	0	0	1
H27FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	4	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）

(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）

表Ⅲ-2.1.5-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.1.6[テーマ番号 47] 異相界面腐食解析の基盤技術開発 (FS 研究)

2.1.6.1 テーマの概要

(1)背景と目的

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であり、超高強度鋼材の部材への適用拡大が車両軽量化の重要な手段の一つである。一方、中長期的視点では資源リスクや原料の品質劣化などの不安定要因が懸念されており、省資源、稀少元素代替の革新的技術開発も求められている。鉄鋼各社では、これら欲求に対応した革新的な次世代中高炭素鋼の開発を推進し、当初の目標とした強度や延性などの特性についての実現めどを得た状態である。

今後、実用特性として重要な腐食特性の把握が必要となってくる可能性が高いことから、鉄鋼分科会の協調課題として腐食挙動解析のための基礎技術向上の必要性が指摘された。本事業では特に、革新鋼材に特徴的な異相界面を起点とする腐食の解析技術開発を目的とする。

(2)位置付け、目標値

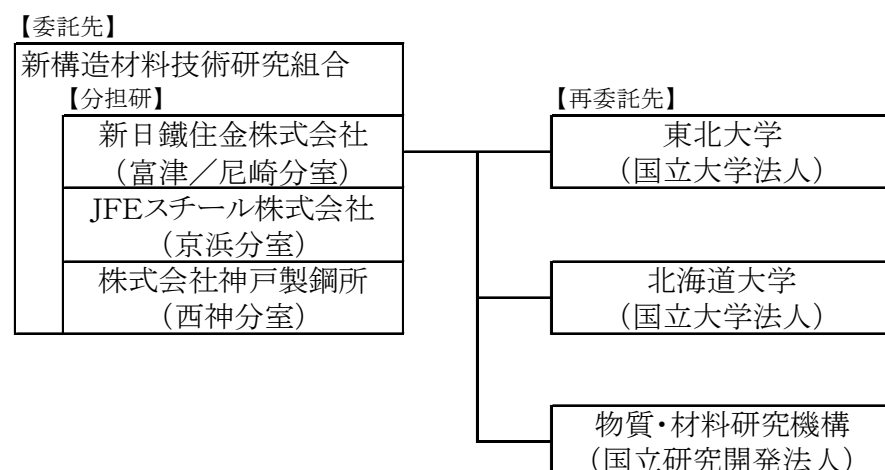
表Ⅲ-2.1.6-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
微小電気化学計測 技術開発	—	μ m レベルの微細 組織の腐食挙動解 析技術確立	サブ μ m レベルの 微細組織の腐食挙 動解析技術確立	革新鋼板の 微細組織サ イズ対応
局所構造解析技術 開発	—	μ m レベルの微細 組織の腐食生成物 解析技術検討	サブ μ m レベルの 微細組織の腐食生 成物解析技術検討	革新鋼板の 微細組織サ イズ対応
局所腐食電位計測 技術開発	—	μ m レベルの微細 組織の腐食電位解 析技術検討	微細組織腐食電位 解析技術のマルチ スケール化技術開 発	革新鋼板の 微細組織サ イズ対応

(3)全体計画

開発される革新鋼材の、構造材料としての実用化を可能とするための基礎技術として、腐食挙動解析技術の高度化に取り組む。

(4)実施体制



(5)運営管理

本研究ではテーマ番号 42 に設置する委員会と密接な連携を取りながら目標達成に向けた研究開発を推進する。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO2 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耐食性評価・向上に適用する。

2.1.6.2 研究開発成果（本テーマは平成 29 年度より開始した）

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.6-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
微小電気化学計測 技術開発	μ m レベルの微細 組織の腐食挙動解 析技術確立	本テーマは平成 29 年度 より開始したため現時 点では成果なし	△	
局所構造解析技術 開発	μ m レベルの微細 組織の腐食生成物 解析技術検討	本テーマは平成 29 年度 より開始したため現時 点では成果なし	△	
局所腐食電位計測 技術開発	μ m レベルの微細 組織の腐食電位解 析技術検討	本テーマは平成 29 年度 より開始したため現時 点では成果なし	△	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.1.6-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
微小電気化学計測 技術開発	数 1 0 μ m レベルの微細組織の腐 食挙動解析が可能	サブ μ m レベルの 微細組織の腐食挙 動解析技術確立	予定通り達成見込み
局所構造解析技術 開発	μ m レベルの微細組織の腐食生成 物解析技術について検討し、技術 導入により実現可能な手ごたえを 得た	サブ μ m レベルの 微細組織の腐食生 成物解析技術検討	予定通り達成見込み
局所腐食電位計測 技術開発	サブ μ m レベルの微細組織の腐食 電位解析が可能。視野の拡大が課 題。技術導入により実現できる見 通しを得つつある	微細組織腐食電位 解析技術のマルチ スケール化技術開 発	予定通り達成見込み

(3)研究開発の成果と意義

各社で進めている革新鋼板の耐食性評価・向上に資する。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.6-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
合計	—	—	—	—	—	—	—	—	—

※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）

(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）

表Ⅲ-2.1.6-5 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
合計	—	—	—

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.1.7[テーマ番号 48] 超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発

2.1.7.1 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、自動車で使用される大気腐食環境において、環境から鋼板中に侵入する水素によって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 TS1500MPa 級鋼を適用するためには、水素割れの危険性を適切に評価、予測可能な技術の構築が必要となる。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、予測は現技術では困難である。そこで革新鋼板の水素割れ危険性の適切な評価、予測を可能とする要素技術の開発を目指し、本研究では、革新鋼板の水素脆化現象の適切な把握および理解に有効な実験法、解析法等の要素技術を見極めることを目的とする。

(2)位置付け、目標値

本研究は革新鋼板の水素割れ感受性を適切に評価、予測するための共通基盤技術の確立を目指した FS 研究であり、鋼板成形時の塑性変形による組織損傷および、応力、ひずみ、水素の分布等の因子を定量的に把握するとともに、それらが水素割れに及ぼす影響を理解し、種々の試験条件が薄鋼板の水素割れ限界評価結果に及ぼす影響を明確化する。

表Ⅲ-2.1.7-1 研究開発目標と根拠

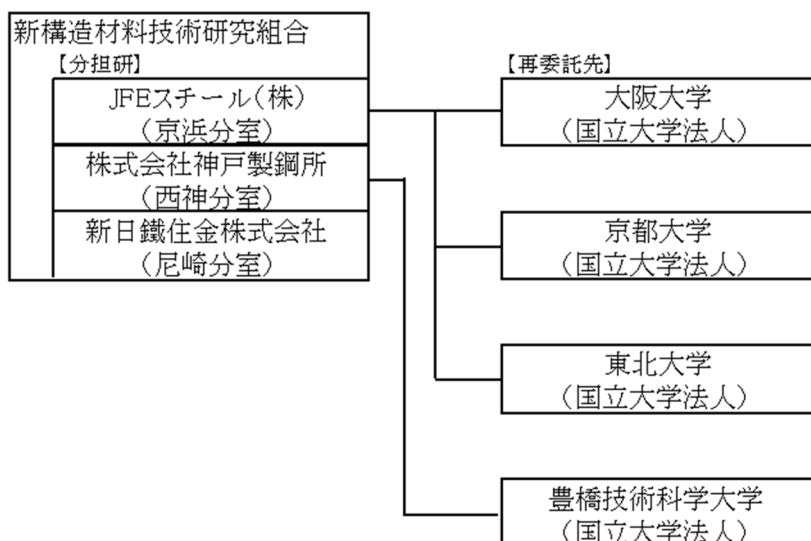
研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発	—	革新鋼板の水素脆化現象の適切な把握および理解に有効な実験法、解析法等の要素技術見極め	革新鋼板の水素割れ危険性の適切な評価、予測を可能とする要素技術の確立	革新鋼板の水素割れ評価予測に適用

(3)全体計画

研究開発項目	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33	H34
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 ▲	本研究 ●				

▲：基本原理確認、 ●：基本技術確立

(4)実施体制



(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する。また、分担研及び再委託先の全体会議を2～3回／年開催する。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO2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。

2.1.7.2 研究開発成果（本テーマは平成29年度より開始した）

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.1.7-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成29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
超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発	革新鋼板の水素脆化現象の適切な把握および理解に有効な実験法、解析法等の要素技術見極め	平成29年度の計画を立案し研究に着手	△	平成29年4月から開始し、計画通りに研究を実施する

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.1.7-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
超高強度薄鋼板の水素脆化に関する研究基盤技術開発	平成 29 年度から FS 研究に着手し、水素割れ評価のための課題の明確化を行う	革新鋼板の水素割れ危険性の適切な評価、予測を可能とする要素技術の確立	平成 30 年度からの本研究実施によって要素技術を確立する見込み

(3)研究開発の成果と意義

分担研 3 機関及び再委託先 4 機関により以下の研究を分担して実施する。

①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的な把握に有用な要素技術の見極め

- ①-1 マクロ塑性ひずみ分布・応力分布特性及び水素割れ計測技術
- ①-2 ミクロ損傷明確化手法検討

②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

- ②-1 U 曲げ試験片を用いた水素割れ評価時の水素分析領域の見極め
- ②-2 腐食環境における水素量レベルの把握
- ②-3 水素下の引張試験における影響因子の把握
- ②-4 打ち抜きブランク端面の遅れ破壊の影響因子の抽出
- ②-5 水素割れ限界におよぼす U 曲げ試験条件の影響の明確化

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.1.7-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
合計	—	—	—	—	—	—	—	—	—

※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）

(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）

表Ⅲ-2.1.7-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT出願 [※]
合計	—	—	—

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.2 「革新的アルミニウム材の開発」

2.2.1 [テーマ番号 13] 高強度・高靱性アルミニウム合金の開発

2.2.1.1 テーマの概要

(1)背景と目的

軽量・高強度・高剛性・高加工性の革新的 7000 系アルミニウム合金を開発し、国内機体メーカー殿が製造する現行機種／将来機種の胴体／主翼構造材等への 継続的な適用を図る。

(2)位置付け、目標値

航空機は燃費向上、航続距離の向上などの点から、航空機用材料に対して高強度化による軽量化の要求が強い。目標値の設定に際しては機体メーカー殿をヒアリングし、軽量化効果が大きく見込まれる値を設定した。なお、最終目標値は現在標準的に使用されている 7075-T73 合金に比べて約 50%の強度向上で、近年実用化された高強度材である 7150-T77 材に比べても約 25%の強度向上となる。

表Ⅲ-2.2.1-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
高強度・高靱性アルミニウム合金の開発	引張強さ $\geq 660\text{MPa}$ 耐力 $\geq 600\text{MPa}$ 伸び $\geq 14\%$ ラボスケール	引張強さ $\geq 750\text{MPa}$ 耐力 $\geq 700\text{MPa}$ 伸び $\geq 12\%$ ラボスケール	引張強さ $\geq 750\text{MPa}$ 耐力 $\geq 700\text{MPa}$ 伸び $\geq 12\%$ を有し、幅 500mm 以上の板材	目標特性値を達成することで Al-Li 合金の比強度を上回り大きな軽量化効果が得られる。

(3)全体計画

平成 29 年度までに基礎的な技術開発を行い、原理の探求あるいは理論の構築を図ります。平成 27 年度後半からは平行して機体メーカー殿などへのサンプル提出を開始し、ユーザーからの意見をフィードバックし実用化に向けた開発を実施中。またさらに本プロジェクトで得られた新プロセスを 5000 系や 6000 系アルミニウム合金に応用し、自動車分野あるいは車両分野のユーザーに対してもサンプル提出・ユーザー評価を検討します。

平成 30 年度からは実用化に向けた大型化の検討に移り、設備改造・設備導入や大型化に向けての問題点の洗出しを行いながら実証試験を開始します。

平成 33 年度には市場動向、収益性などトータルの事業化を検討し、工業的規模での量産設備の導入判断を行います。設備導入・設備立上げが完了後は AA (Aluminum Association)へ新合金の登録を開始します。また量産設備を用いて AMS(Aerospace Material Specification)規格取得に向けた工場試作を開始し、認定取得後、量産化を実施します。

表Ⅲ-2.2.1-2 開発スケジュール

	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33	H34	H35	H36	H37	H38
ラボ（基礎）技術開発	中間目標達成		最終目標達成									
顧客評価		MHI, KHI, FHI へサンプル提出, ユーザー評価										
大型化技術開発 (実証試験、設備検討)				φ6インチ級等の実証試験								
量産設備導入判断							▽					
設備導入								φ10インチ級の生産設備導入				
工場試作									データ採取, データパッケージ作成			
AA認定作業							Aluminum Association 合金登録					
AMS、MMPDS 認定作業									Aerospace Material Specification 取得			
航空機部品適用検討 (素形材センター殿)				▼.....								
量産化											

 本プロジェクト内で実施

(4)実施体制

本テーマは千年分室（株式会社UACJ）が中心となり、名古屋守山分室（産業技術総合研究所）、西神分室（株式会社神戸製鋼所）でテーマを分担し、互いに協力しながら推進している。

(5)運営管理

個別課題に関する打合せは随時必要に応じて実施。

さらに、3ヶ月毎に全体で進捗報告・技術討議を行い全体進捗管理を実施している。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO2削減・省エネルギー等@2030年度）

航空機産業におけるアルミニウム素材産業は約1500億円（2012年）規模と予想される。国内機体メーカー主導で製造される民需・官需用の航空機用アルミニウム材料の合計を約10%と推定し、現状ベースで150億円/年の売上げが見込まれる。民間航空機は年率4%の成長が予想されており、その効果はさらに大きくなることが期待される。さらに例えばB777に使用されるアルミニウム合金の50%を本開発合金に置き換えることで約10%程度の軽量化が達成されることから燃費の向上・CO2削減・省エネルギーの観点からも実施の効果は非常に大きい。

また、海外アルミメーカーではLiを添加したAl-Cu-Li合金の開発が行われているが、専用鑄造設備が必要となりリサイクル性も劣る。このためコストが非常に高く従来合金に比べて2～4倍との情報もある。Al-Cu-Li合金はTiやCFRPに対抗して開発されているニュアンスが強い。

2.2.1.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.2.1-3 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
高強度・高靱性アルミニウム合金の開発	引張強さ $\geq 750\text{MPa}$ 耐力 $\geq 700\text{MPa}$ 伸び $\geq 12\%$ ラボスケール	押出材・板材ともに中間目標値を達成した。新プロセス導入により、最終目標値達成の指針を得た。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.2.1-4 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
高強度・高靱性アルミニウム合金の開発	第二中間目標値である、引張強さ ≥ 750 / 耐力 $\geq 700\text{MPa}$ / 伸び $\geq 12\%$ を達成した。 鋳塊組織の微細化・鍛錬加工技術の新プロセス技術によるさらなる特性向上を検討中。	引張強さ $\geq 750\text{MPa}$ 耐力 $\geq 700\text{MPa}$ 伸び $\geq 12\%$ を有する高強度・高靱性アルミニウム合金を大型化し、実用化に向けた検討を実施する。	大型化に際して生じる本質的な課題や生産技術的な課題があるが、個別に得られた基礎技術を組み合わせることで達成の可能性は大きい。

(3)研究開発の成果と意義

1. 合金開発

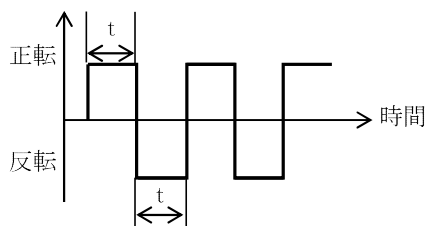
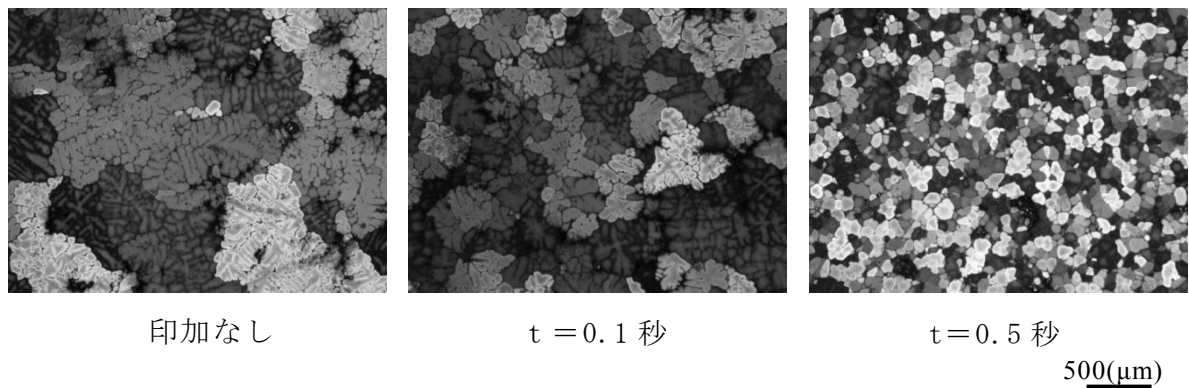
高強度・高靱性アルミニウム合金を達成するためのベース合金として、Al-10Zn-Mg-Cu-Zr 合金を開発した。本開発合金を用いて熱間圧延開始温度を最適化し、かつ溶体化処理温度を高温化したサンプルの板厚中心部で最終目標値の TS : 750MPa, YS : 700MPa を達成した。さらに押出材においても最終目標強度を達成した。

さらなる特性向上を目指して Mn, Cr などの遷移元素の添加量を最適化し、靱性向上を含めた検討を実施中である。

2. 鋳造および脱ガス技術開発

2-1 電磁攪拌による鋳造組織微細化

アルミニウム合金の最終特性は最も上工程である鋳造工程における凝固時の結晶組織に大きく依存する。このため更なる特性向上を目指して、凝固中のアルミニウム溶湯に電磁攪拌を印加し、得られる鋳造組織を微細化する技術を開発した（図Ⅲ-2.2.1-1）。更に、本プロセスを実生産プロセスである連続鋳造プロセスへ組み込むことを検討し、連続鋳造プロセスにおいても鋳造組織微細化が可能であることを確認した（図Ⅲ-2.2.1-2）。



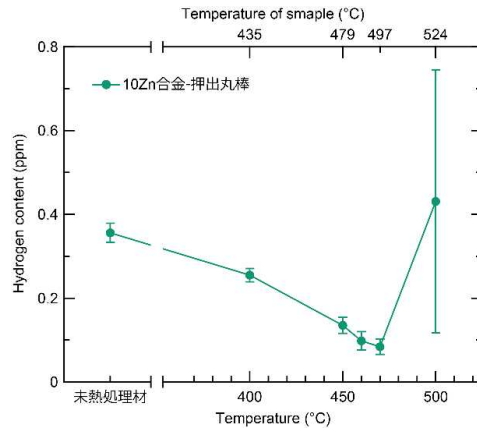
図Ⅲ-2.2.1-1 電磁攪拌による鋳造組織微細化技術の開発



図Ⅲ-2.2.1-2 電磁攪拌を付与して作製した連続鋳造ビレットとその組織

2-2 脱ガス処理による含有水素量の低減

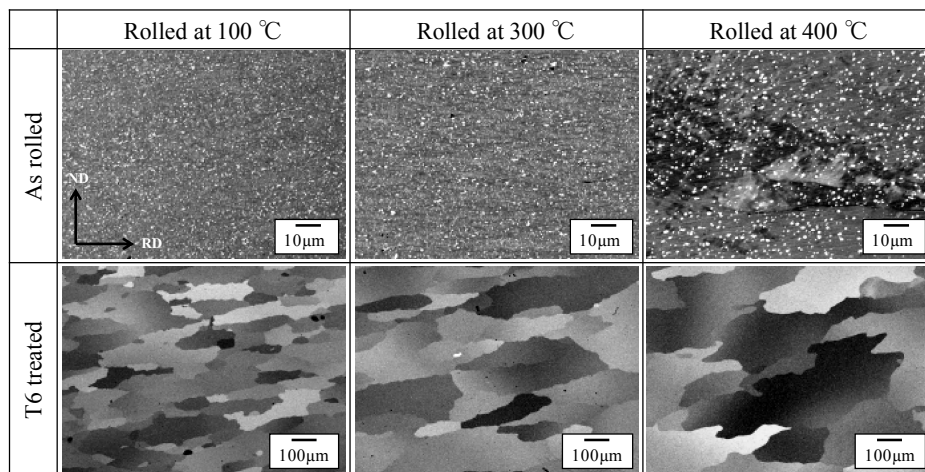
アルミニウム合金の靱性向上のためには、材料中に含まれるガス、特に含有水素を低減することが非常に重要となる。従来のバブリング法では困難であった 0.1ppm 以下にまで水素量を低減する脱ガス技術を開発した（図Ⅲ-2.2.1-3）。



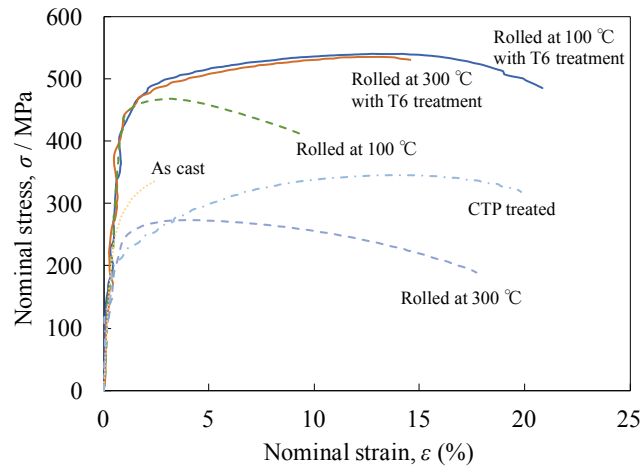
図III-2.2.1-3 含有水素量に及ぼす脱ガス処理温度の影響

3. 鍛錬技術の開発

鋳塊に圧縮ねじり加工を施すことで組織の微細化および金属間化合物の微細分断化に非常に有効であることが確認された。続いて圧縮ねじり加工した素材に圧延・溶体化処理・人工時効処理を施し、微小試験片を用いて特性調査を実施した。図III-2.2.1-4に圧延後およびT6処理後のマイクロ組織を示す。これらの引張試験結果を図III-2.2.1-5に示す。100°Cで圧延・T6処理した材料は300°C圧延・T6処理材に比べて伸びが大きくなっており、ねじり加工後の製造プロセスによって特性が変化することが明らかとなった。これらの知見をもとに最適な製造プロセスの検討を進める。

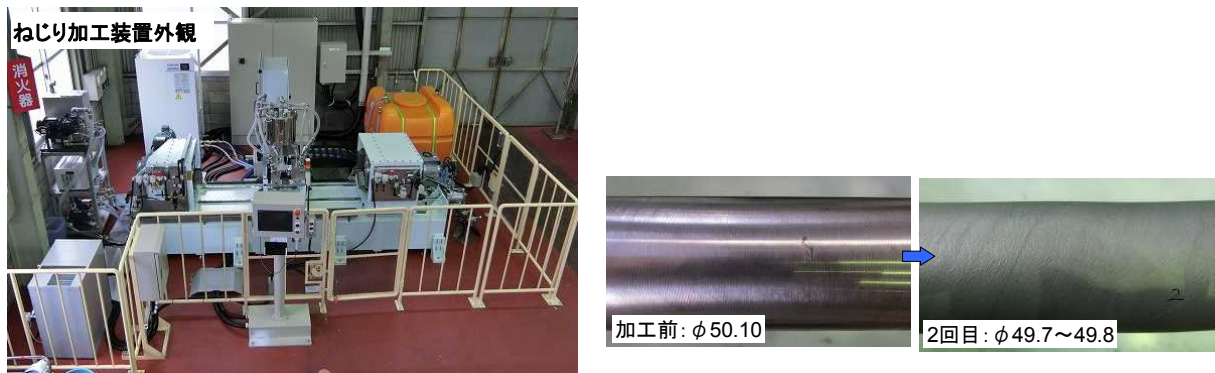


図III-2.2.1-4 ねじり加工後の圧延材，T6材マイクロ組織係

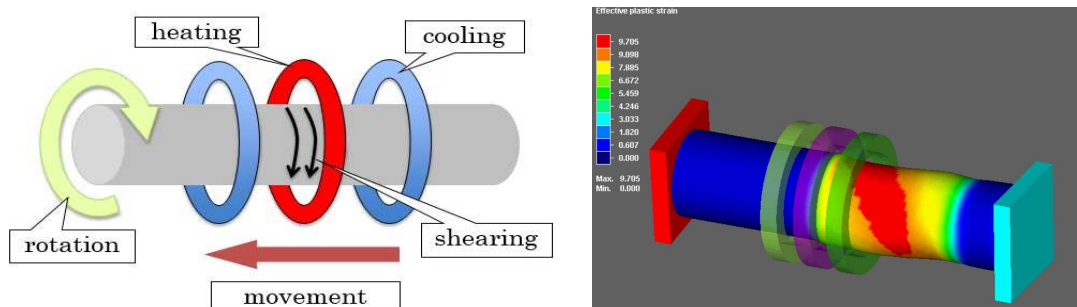


図Ⅲ-2.2.1-5 ねじり加工後の圧延材，T6材のS-Sカーブ

さらに連続ねじり加工装置を導入し、限界加工条件，最適加工条件の検討を開始し、将来の大型化・実用化に向けた基礎データの取得を進めている（図Ⅲ-2.2.1-6）。同時にねじり加工のシミュレーション解析を行い歪み分布についても明らかにするべく検討を行っている（図Ⅲ-2.2.1-7）。



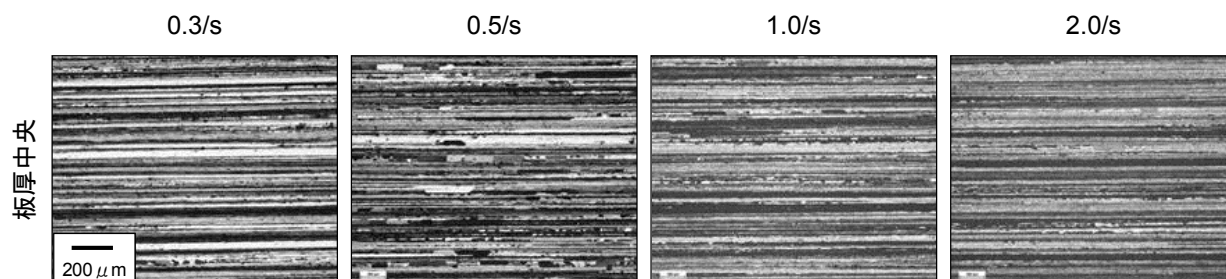
図Ⅲ-2.2.1-6 連続ねじり加工装置外観および条件検討例



図Ⅲ-2.2.1-7 連続ねじり加工シミュレーションモデルおよび解析例

4. 圧延技術開発

熱間圧延時の温度および歪み速度の条件によって最終製品のマイクロ組織（図Ⅲ-2.2.1-8）や機械的特性が変化することが明らかとなっている。熱間圧延における最適な組織を得るため、途中加熱装置（ホットプレス）を導入し引き続き圧延温度を制御した等温熱間圧延条件と機械的特性の関係を明らかにする検討を進めている。



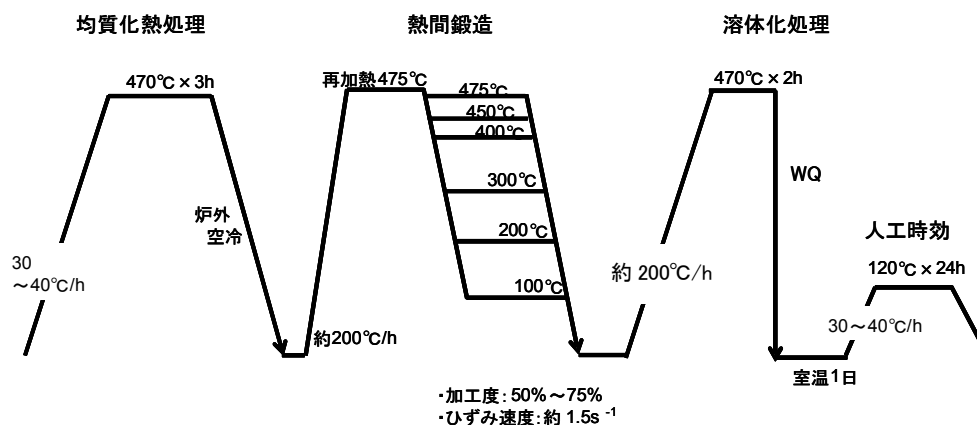
図Ⅲ-2.2.1-8 T6材のマイクロ組織におよぼす熱間圧延時の歪み速度の影響

5. 押出技術開発

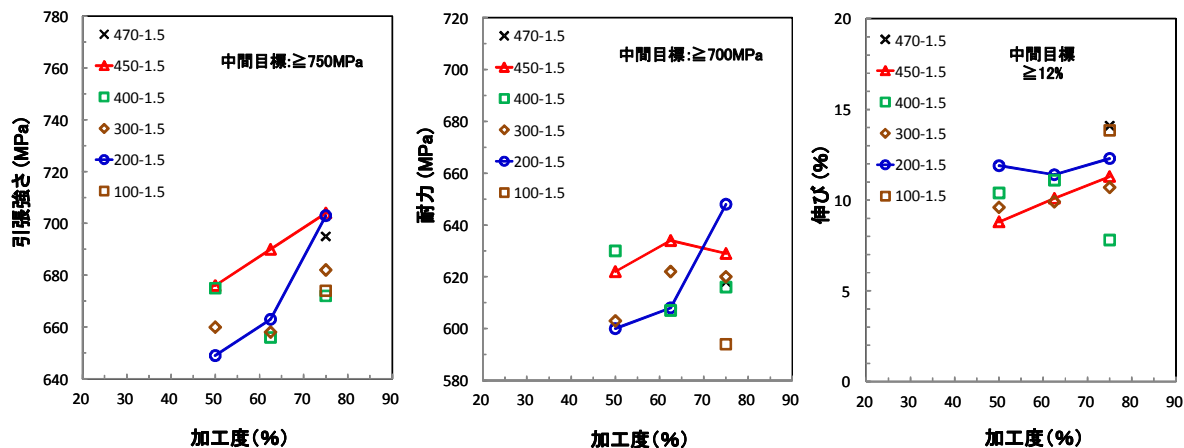
ねじり加工による組織の改善効果が大きい事が明らかとなり、ねじり加工した素材を用いた押出材を作製し、最終特性に及ぼす特性向上効果を確認した。ねじり加工を行わない通常工程材に比べてねじり加工を加えた素材から押出を行ったものでは伸びを損なうことなく、引張強さ、耐力の大幅な向上が認められた。今後、破壊靱性、疲労特性の評価を継続し、特性向上効果を確認する。

6. 鍛造技術の開発

高強度高延性鍛造材を得るための鍛造条件（温度，歪み速度，加工度）と機械的特性について検討（図Ⅲ-2.2.1-9、図Ⅲ-2.2.1-10）し、方向性を見出した。特に200℃の低温での鍛造では加工度に伴う強度の向上が大きいことが分かった。また、200℃鍛造材のマイクロ組織観察からこれらは未再結晶組織であり、さらに集合組織が集積した組織と推察された。一部の金属間化合物の周囲では再結晶を生じ、粒成長した領域も認められており、鍛造時に晶出物周りが強加工部となり再結晶の起点となったものと考えられる。再結晶による強度低下を防止するためには、金属間化合物の微細化が有効と考えられる。



図Ⅲ-2.2.1-9 鍛造条件の検討（供試材製造条件）



図Ⅲ-2.2.1-10 鍛造条件と機械的特性の関係

7. 熱処理技術開発

溶体化処理時の固溶量増大を図り、人工時効時の析出強化の増大を目的として高温溶体化処理の検討を行った。局所溶融を起こさないように昇温速度の制御を行い480℃の溶体化処理を実施した結果、強度の向上が確認された。

8a 解析・評価－水素ポア制御技術開発

7000系アルミニウム合金の変形・破壊時の水素の挙動に関して基礎的な調査を実施。7000系アルミニウム合金にMnを含む合金の変形挙動について、Mn添加無しと比較しながら調査を行った。

水中と油中で放電加工を実施し水素チャージを行った結果、Mn添加材が水素の感受性が低い結果が得られた。ただし、Mnの添加により伸びが低下する現象も同時に起こっており、水素の影響と分離しながら調査を継続する。

8b. 解析・評価－残留応力評価技術開発

厚肉の金属材料において、高温から急速冷却を行う溶体化処理時に表面と内部の温度勾配によって熱応力が発生し、残留応力が残存するため精密加工時にはひずみやねじれが発生し問題となることがある。残留応力を定量的に把握することは非常に重要であり、板厚内部までの残留応力分布ができる装置を導入し既存材料を用いて測定を開始した。結果、外部で測定した結果とほぼ同様の結果が得られ、高い精度で残留応力の測定が可能となった。

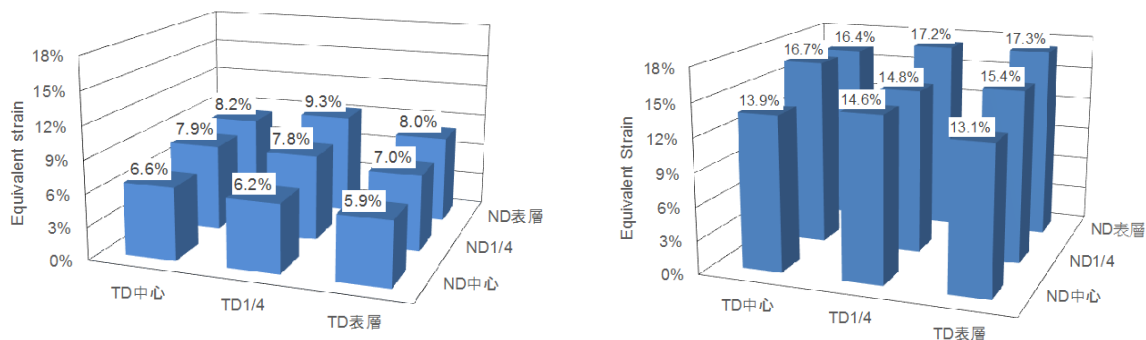
今後、製造プロセスと残留応力分布の相関データを蓄積し、残留応力の少ないプロセスの開発に結び付ける。

8c 解析・評価－組織解析

圧延板の機械的特性予測方法の開発を目指して、圧延板の各場所から微小引張試験片を採取し、ロール温度の影響ならびに圧延率の影響について調査を行った。

図Ⅲ-2.2.1-11に圧延率30および95%における圧延材断面内の全伸び分布を示す。圧

延の進行に伴って伸びが向上することがわかる。板厚中心部と表層とで変形能の差が著しくなっており、これが材料全体の機械的特性ならびに二次成形性に及ぼす影響と加工条件との関係を今後検討する。また今回得られた知見を、すでに得られている組織データベースと統合し、数値解析に応用する。



図III-2.2.1-11 圧延材断面内の全伸び分布 (高温ロール条件)
左：圧延率 30% 右：圧延率 95%

8d 解析・評価－用途開発

開発合金の用途開発を実施しており、重工メーカー殿へチャンネル型およびH型断面の押出材をサンプル提出した。また他分野へも展開を実施中。

(4)成果の普及 (論文、外部発表等)

表III-2.2.1-5 論文、外部発表等の件数 (内訳) 【平成 29 年 3 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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	0	0	0	8	0	0	0
H27FY	1	0	0	1	3	11	0	0	0
H28FY	3	0	0	0	3	8	1	1	0
合計	4	0	0	1	6	27	1	1	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)

(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）

表Ⅲ-2.2.1-6 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT出願 [※]
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	1	0	0
H28FY	3	0	0
合計	4	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.2.2[テーマ番号 14] アルミニウム材新製造プロセス技術開発

2.2.2.1 テーマの概要

(1)背景と目的

日米欧の各地域における燃費規制により、軽量化のため自動車への Al 合金製部材の採用が加速し、今後も Al 材料の需要増大が見込まれている。一方で、膨大な電力を消費する Al 新地金製錬の環境負荷低減と低コスト化、さらに Al スクラップ増大への対応が課題となっている。そこで、本研究開発はエネルギー効率に優れた Al 新地金の革新的な製法「室温電解製錬（イオン液体法）」の実用化、イオン液体法を利用した独自の Al スクラップ再生技術の開発、および高機能 Al 合金を開発するという目標を掲げた。この Al の室温電解製錬プロセスは、ボーキサイトから水酸化アルミニウム ($\text{Al}(\text{OH})_3$) を従来の製法により合成し、その後、 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を経て Al 地金を製造する（図 III 2.2.2-1）。上記プロセスにおいて、 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の脱水反応により AlCl_3 を合成してから Al 地金を製造する方法と、 AlCl_3 を経由しないその他の方法とが考えられる。これらの室温電解製錬のプロセスについて技術開発を行った。また、Al スクラップの不純物を除去し、地金を再生する技術の開発も行った。製造される Al 地金は箔の状態のため、その均一性向上と、生産性と表面品質向上を検討した。さらに、これら基盤技術の取りまとめと、パイロットプラントおよび製造設備の設計と構築に取り組んだ。

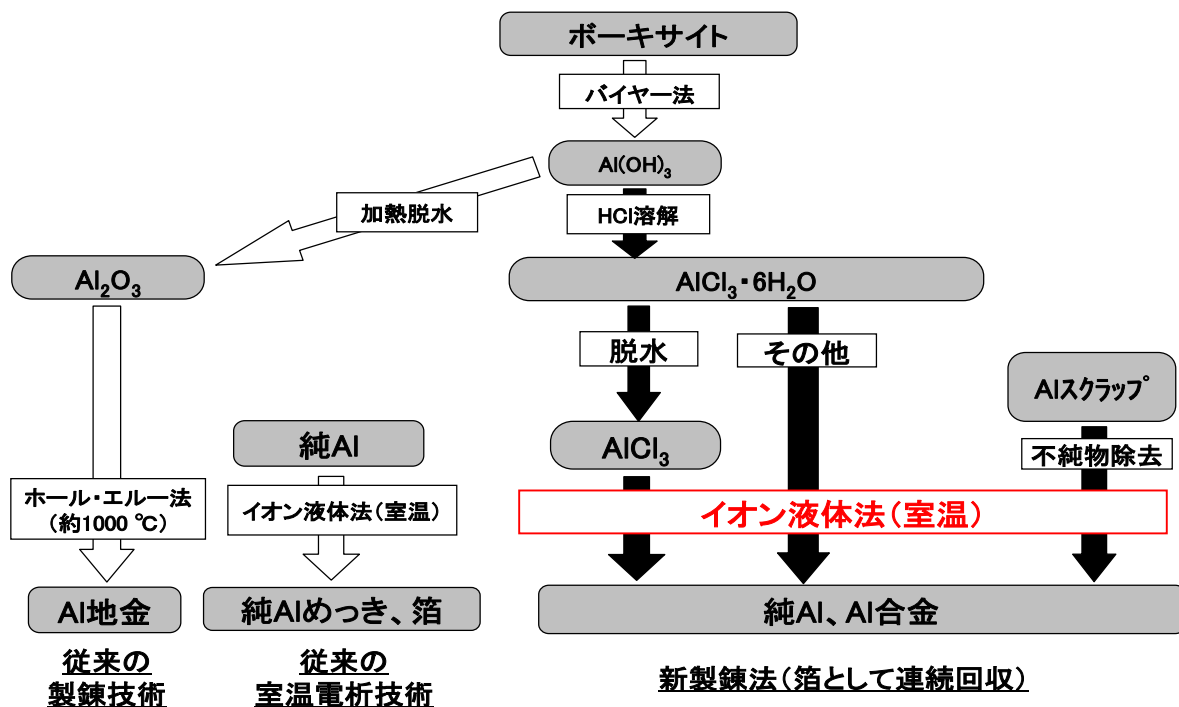


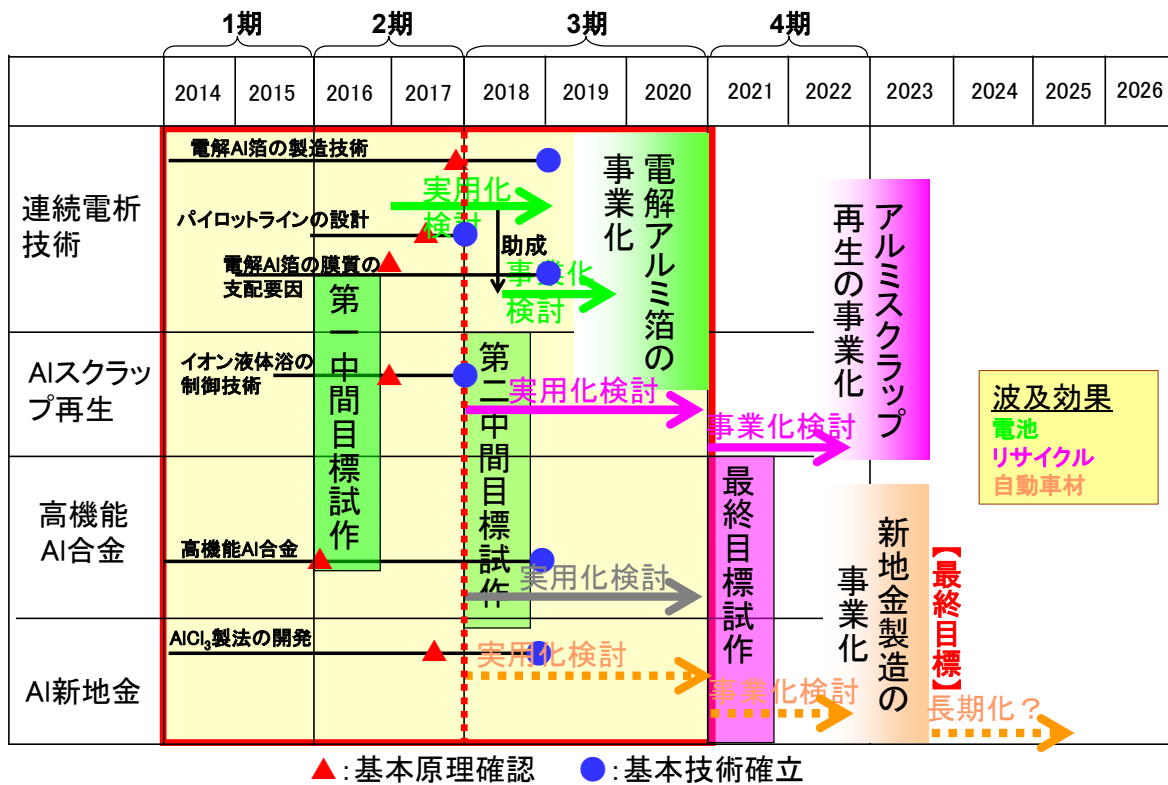
図 III 2.2.2-1 開発プロセスと従来プロセスの比較

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ2.2.2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
連続電析技術	小型パイロットプラントによる幅 20mm 以上×長さ 1,000mm 以上の Al 薄膜または条の作製	量産技術確立のため、パイロットプラントの構築し、実証試験を開始する。	Al の室温電解製錬プロセスの事業化・・・200 円/kg (対日プレミアム除き、従来より 50 円/kg 低減)	量産のため、連続電析技術の確立が必要
表面の平滑化	Al 箔表面の平滑性の支配要因を特定する。	平滑性向上の技術 (添加剤、基板素材、電析条件等) の確立。		箔切れを防ぎ製造効率を向上するため、材料表面の品質向上が必須
無水 AlCl ₃ 新製法	触媒を用いた無水 AlCl ₃ 製法の可否を判定する。	AlCl ₃ 系イオン液体の大量合成法を開発、提案する。		ボーキサイトを出発原料とする製造プロセスを完成させるため必須
共析の制御(1)	不純物除去法を開発する。	再生 Al を利用可能とする。		低品質の Al を出発原料とする製造プロセスを確立するため必須
共析の制御(2)	Al 合金中の含有元素量の支配要因を解明する。強度向上のため Mn を、高融点元素添加の技術確立のため、Nb, Ta 含有 Al 合金を作製する。	連続電析による Al 合金製造法を確立する。		安定した高純度化技術の確立・・・不純物濃度を 10 ppm 以下 高融点金属の高濃度添加技術の確立・・・Nb, Ta を 5mass%以上

(3)全体計画



図Ⅲ 2.2.2-2 全体計画

(4)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

自動車の軽量化への寄与が大きいAIの需要は年々増大している。低コストの新地金製錬の事業化が達成されれば、自動車材用途だけでも経済効果は数百億円/年が見込まれる。さらに実現可能性の高い用途として、リチウムイオン電池の正極用の集電体が考えられる。その市場規模（2014年度）は全世界で約130億円であり、今後も継続的な伸びが期待される。現在の集電体には全てAI圧延箔が用いられており、その価格は約600円/kgである。電池の大容量化に伴い集電体の厚さはより薄くなる傾向にあり、AI圧延箔の製造コストの上昇が懸念されている。今後、1工程で薄箔を製造できる電解AI箔が製造コストの面で有利となる可能性がある。電解AI箔の量産化が実現すれば、EV用リチウムイオン電池の低価格化に貢献でき、その経済効果は数十億円になると期待される。

2.2.2.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ2.2.2-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
連続電析技術	量産技術確立のため、パイロットプラントの構築し、実証試験を開始する。	地金を Al 箔の状態に連続的に製造する試験用設備の仕様を検討し、基本構成を決定した。連続電析時に見られる不均一な電析の原因を、多段階電析実験によって調べた。浴面付近での電析を避けることで、均質な Al 膜を連続的に電析することが可能と考えられる。	×	Al の室温電解製錬プロセスおよび製造技術の開発が遅れており、設備仕様が決まらなかった。平成 28 年度末に解決のめどがなかったので、製造される Al を板厚 = 10 μm ~ 100 μm、板幅 = 約 300 mm と想定して設備仕様を決めて設計を完了させる。
表面の平滑化	平滑性向上の技術確立（添加剤、基板素材、電析条件等）。	パルス電解法により、電解条件が電解 Al 箔の平滑性および成膜速度に及ぼす影響を検討。浴温の上昇によって、電解 Al 箔の膜厚および成膜速度は増加し、特に、電流密度 158 mA cm ⁻² および duty 比 0.5 の時、成膜速度は 1.064 μm min ⁻¹ を示した。	△	
無水 AlCl ₃ 新製法	AlCl ₃ 系イオン液体の大量合成法を開発、提案する。	AlCl ₃ を、ボーキサイト由来の AlCl ₃ ・6H ₂ O から合成する手法を検討したが成功しなかった。一方、疎水性イオン液体を利用した溶媒抽出法により、イオン液体中に Al(III)が導入され、そのイオン液体中において電解したところ、Al を含む電析物が得られた。	×	生成物の確認。一部の化学構造（側鎖）が異なるイオン液体を使用するなどして、Al(III)の抽出効率の向上をはかる。工業的プロセスとして成り立つかどうかを見極める。

共析の制御(1)	再生 Al を利用可能とする。	鋳物級 Al アノードから高純度 Al の回収を試み、Si の除去能を見出した。	△	
共析の制御(2)	連続電析による Al 合金製造法を確立する。	カソード電極上に不純物濃度 10 ppm 以下の Al 析出を確認。高融点金属の (Nb, Ta) を 5mass% 以上含む合金を作製。	○	

※ ◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ2.2.2-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
連続電析技術	地金を Al 箔の状態連続的に製造する試験用設備の仕様を検討し、基本構成を決定した。連続電析時に見られる不均一な電析の原因を、多段階電析実験によって調べた。浴面付近での電析を避けることで、均質な Al 膜を連続的に電析することが可能と考えられる。	Al の室温電解製錬プロセスの事業化 ・・・200 円/kg (対日プレミアム除き、従来より 50 円/kg 低減)	達成見込み
表面の平滑化	パルス電解法により、電解条件が電解 Al 箔の平滑性および成膜速度に及ぼす影響を検討。浴温の上昇によって、電解 Al 箔の膜厚および成膜速度は増加し、特に、電流密度 158 mA cm ⁻² および duty 比 0.5 の時、成膜速度は 1.064 μm min ⁻¹ を示した。		達成見込み
無水 AlCl ₃ 新製法	AlCl ₃ を、ボーキサイト由来の AlCl ₃ ・6H ₂ O から合成する手法を検討したが成功しなかった。一方、疎水性イオン液体を利用した溶媒抽出法により、イオン液体中に Al(III)が導入され、そのイオン液体中において電解したところ、Al を含む電析物が得られた。		第 2 期で判断する予定
共析の制御(1)	鋳物級 Al アノードから高純度 Al の回収を試み、Si の除去能を見出した。		達成見込み
共析の制御(2)	カソード電極上に不純物濃度 10 ppm 以下の Al 析出を確認。高融点金属の (Nb, Ta) を 5mass%以上含む合金を作製。	安定した高純度化技術の確立・・・ 不純物濃度を 10 ppm 以下 高融点金属の高濃度添加技術の確立・・・Nb, Ta を 5mass%以上	達成見込み

(3)研究開発の成果と意義

2. プロセス技術の開発

2.1 新地金製造プロセス

これまで、新地金の原料となる AlCl₃ (塩化アルミニウム) を、ボーキサイト由来の AlCl₃・6H₂O から製造するため、その脱水手法について検討を行ってきた。例えば、塩化チオニル (SOCl₂) と AlCl₃・6H₂O とは、熱力学的には自発的に反応が進むと予想されたが、反応生成物を確認することができなかった。その他にも、超音波、UV 照射、カール

フィッシャー法および共沸による脱水和の促進を試みたが成果が得られなかった。 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を脱水して AlCl_3 を得ることは非常に困難と判断し、今年度は、疎水性イオン液体を用いた $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ の脱水和を試みることにした。疎水性イオン液体に、脱水和した Al イオンのみが溶解すれば、そのイオン液体から直接 Al を電析させることが可能である。実験により、疎水性イオン液体と $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 水溶液 (Al イオン濃度 10000ppm) とを混合、攪拌後、静置させる事で二つの溶液は分離した。密度の大きなイオン液体は下層となり、水溶液層は上層となった。各層をラマン散乱分光測定法および ICP 発光分光分析法により分析した結果、イオン液体中のカチオンと水溶液中の Al(□)の置換が起きていることが示唆された。回収したイオン液体中において直流電解を行うと電析物が得られた。電析物からは、Al にもとづくシグナルが確認され、 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ を出発原料として、イオン液体中に Al イオンを導入、その Al イオンが還元反応に参与している事が示唆された。今後、生成機構 (生成物、反応種、反応式等) の解明および電流密度 (生成速度) を増大する条件の開発を進める予定である。

2.2 地金再生プロセス

イオン液体を電解液、低グレード Al をアノードとすることで、原理上、カソード上での高純度 Al の回収 (精錬) が可能である。実際の製造工程においては、長期間にわたる電解が予想されるため、アノード溶解時に生じた不純物のコンタミネーションが無視できない状況になると考えられる。これを克服するため、昨年度、不純物の混入を防ぐことのできる電解セルを新たに設計し、これまでのセルでは困難であった鉄や亜鉛、銅、マンガンなどの不純物を大幅に削減できるようになった。今年度は、このセルをスケールアップするとともに、鋳物 Al アノード (Al の含有率はおおよそ 83 at%.) から高純度 Al の回収を試みた。その結果、アノード材に含まれていた 11.3 at%もの Si が、回収した Al 材には 1.0 at%以下しか存在しないことが明らかとなった。その他の不純物元素についても、一部の元素を除いて、その含有量は明らかに減少しており、回収した Al の純度は 96 at%程度であった。また、電解浴は簡便な処理によって、再利用可能であることがわかった。

3. 製造技術の開発

3.1 Al 箔の均一性向上

回転するドラム電極上に Al を電析させ、これを剥がして巻き取る方法により、Al 箔を連続的に製造する技術を開発中である。これまでの研究において、ドラム静止時には、性状の良い Al 膜が電析されるものの、ドラム回転後に浴に浸漬された部分には、均一な電析膜が得られ難いことが明らかとなっている。そこで、ドラム電極を用いる連続電析の模擬実験として、電析物の評価が容易な平板チタン基板上を用いて Al 膜の多段階電析を行い、連続電析における問題の原因を探るとともに、その問題を解消する方策について検討した。その結果を踏まえ、小型のドラム電極を用い、連続的な Al 電析実験を行った。その結果、電析を阻害する物質が浴面付近でカソード上に付着すること、および、浴面付近での電気化学的環境の違いが不均一な電析を生じる原因であることが分かった。浴面付近での電析を避けることで、均質な Al 膜を連続的に電析することが可能と考えられた。図 III 2.2.2-3 (x) に検討前に得られた電析膜の状態を示す。ドラ

ム電極の下部には、ドラム静止時に電析された性状の良い Al 膜が観察されるが、上部は、ドラム回転後に浴に浸漬した部分であり、Al が均一に電析されていない。図 III 2.2.2-3 (a)～(d) に示すように、本年度の検討により、ドラムカソードの初期位置に関わらず、電極全体に Al 電析膜が得られるように改善された。

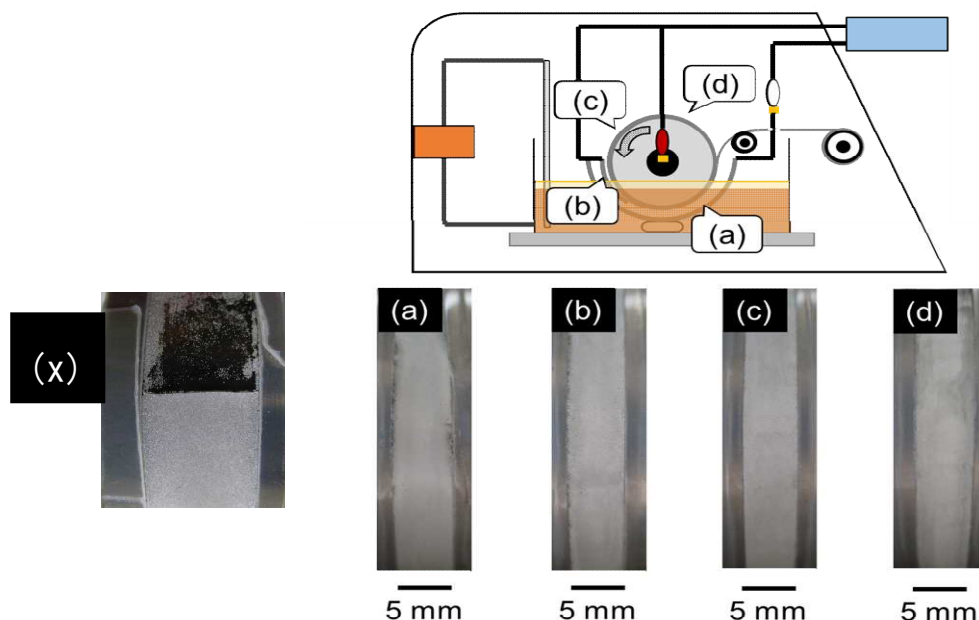


図 III 2.2.2-3 連続電析後のドラム電極上のアルミニウム膜の外観。
装置模式図中の (a)～(d) は、ドラム電極の初期位置を表しており、
外観写真と対応している。

3.2 Al 箔の生産性と表面品質の向上

$\text{AlCl}_3\text{-EMIC}$ 2 元系浴を用いて、パルス電解法により、電解条件が電解 Al 箔の平滑性および成膜速度に及ぼす影響を検討した。周波数を高くすると高電流効率を示したが、電解 Al 箔は密になり、成膜速度は減少した。そこで、周波数 100 Hz にて浴温を 50 °C に上昇させると、電流密度 100 mA cm^{-2} 以上での電解が可能となった。すなわち、浴温の上昇によって、電解 Al 箔の膜厚および成膜速度は増加し、特に、電流密度 158 mA cm^{-2} および duty 比 0.5 の時、成膜速度は 1.064 $\mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ を示した。

3.3 製造設備の設計と構築

地金を Al 箔の状態連続的に製造するための製造条件を調べるための試験用設備（パイロットライン）の仕様を検討した。基本構成は、イオン液体浴、洗浄および乾燥設備と、電極ドラムおよび巻き取りドラムから成る（図 III 2.2.2-4）。製造される Al 箔を、板厚 = 10 μm ～ 100 μm 、板幅 = 約 300 mm とした。電極ドラムは外径 $\phi 300$ mm、表皮はチタンとし、素地はチタンあるいは SUS とした。巻取ドラムも同様である。アノード電極は Al 板またはカーボン板とした。槽の素材は、テフロンコート SUS304、サイズは 500 mm × 500 mm × 300 mm とした。溶剤洗浄装置（スプレー）と乾燥装置を備えるようにした。洗

浄液の選定にあたり、イオン液体が材料にどの程度付着するのか、どのような溶剤で最も効率的に洗浄できるのかを調べた。

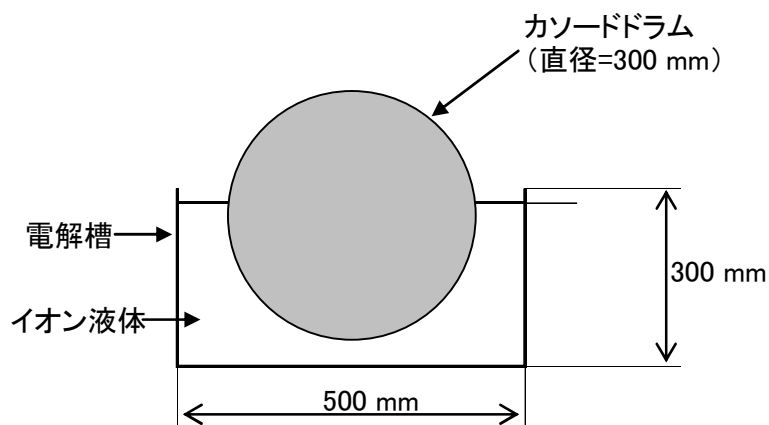


図 III 2.2.2-4 電極ドラムおよび槽の模式図

4. まとめ

今年度は、新規の新地金製造のプロセス開発に取り組み、疎水性イオン液体を用いることにより、ボーキサイトから Al を製造できる可能性を見出した。また、地金再生の作業時間によりイオン液体の劣化が進む原因を突き止め、イオン液体の管理方法の指針を得ることができた。

さらに、Al の生産効率を上げるための技術開発を推進し、知見をもとにパイロットラインの仕様を決めることができた。来年度は、疎水性イオン液体のプロセスの工業化に取り組む。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ2.2.2-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	1	0	0	0	0	0	1
H27FY	1	0	2	0	0	0	0	0	1
H28FY	0	0	6	0	0	0	0	0	1
合計	1	0	9	0	0	0	0	0	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）

(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）

表Ⅲ2.2.2-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	1	0	0
H28FY	4	0	0
合計	5	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.2.3[テーマ番号 21] 複層アルミ合金の開発

2.2.3.1 テーマの概要

(1)背景と目的

地球温暖化抑制のためには CO₂ 排出量削減が重要課題であり、様々な策が講じられてきている。運輸部門では自動車をはじめとする輸送機器の軽量化による燃費向上が最も効果的な対策の一つである。自動車におけるアルミニウム材料の採用は軽量化に直結しており、アルミニウム材料の使用拡大が期待されている。しかし、現状の自動車へのアルミニウムの使用率はまだ低く、エンジン、ホイール、トランスミッションケース等の鋳造品が大半であり、飛躍的な軽量化を図るためには、アルミ化が十分に進展していない車体骨格部品へのアルミ板材の適用を加速する必要がある。しかしながら、軽量化とともに衝突安全性を要求する車体骨格部品へのアルミ化が十分に進展していない理由の一つは、鋼板と比較して延性に劣り、強度も低いという材料課題があるためである。また、既にアルミ板材が適用されている部位においても、部品としての剛性・強度を上げるための幾何学剛性に必要な複雑形状成形技術や厚肉板材の適用などから、軽量化効果も十分に得られていない。今後、アルミニウム板材を自動車ボディに広く適用するためには、強度と延性という、相反する素材特性を両立するとともに、部品の段階ではその構造に適したプレス材料（ブランク材）における板厚分布、強度分布を有する材料の活用が求められている。

そこで、本研究開発では、輸送機器の抜本的軽量化を目的に、強度と延性という、相反する特性を両立するための複層アルミ合金の研究開発と、その製造技術の開発を行う。これらの技術開発を推進することで、輸送機器の燃費向上によるエネルギー消費量と CO₂ 排出量の削減及び我が国の産業の国際競争力強化を目指す。

(2)位置付け、目標値

本テーマの位置付けは、輸送機材の国際競争力強化のための、自動車軽量化、CO₂ 排出量削減につながるアルミニウム合金の創出である。目標に関しては、以下の表の通りである。

表Ⅲ-2.2.3-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
複層合金設計、組織解析・制御技術の開発	小型サンプルでの成形前の伸び(17%以上)、成形・熱処理後の耐力(550MPa以上)を両立する組織コンセプトの提示	ラボサンプルでの成形前の伸び(20%以上)、成形・熱処理後の耐力(600MPa以上)の両立	広幅サンプルでの成形前の伸び、成形・熱処理後の耐力の両立	既存高張力鋼板の特性との比較
複層合金製造技術の開発	板幅 30~50mm 程度の積層アルミ合金板の製造プロセス指針の提示	ラボサンプルでの積層アルミ合金板の製造制御指針の提示	広幅サンプルでの製造プロセス設計指針の提示	鉄鋼材料で用いられる溶接テーラードブランクの代替技術の検証

(3)全体計画

第1期(平成25～27年度)として、各項目毎に、そのコンセプトのラボ検証を行う。これらのコンセプトの検証、レビューを第1期で行う。第2期(平成28～29年度)では、各項目毎に、コンセプトの効果の更なる向上策、プロセスの制御策をラボレベルで行う。第3期(平成30～34年度)では、最終目標に向けて、更なる特性向上、プロセス制御策と実用化に向けた検討を行う。

(4)実施体制

本研究開発は、西神分室((株)神戸製鋼所)が実施し、複層アルミ合金の材料設計指針構築に必要な微細組織評価技術の構築を大学への再委託で行う。

(5)運営管理

西神分室内或いは再委託先との間において、担当者間で定期的な会議を行い、目標に向けた進捗の管理、情報の共有化を行い、効率的なテーマの推進及び再委託先の開発技術の分担研への取り込みを図っている。

(6)実施の効果(費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度)

本技術を適用できると考えられる部位は、自動車車体骨格部である。骨格部材に使用されている鋼材の重量は、部品によって異なるが、主な部品は数～20kg程度であることから、アルミニウムに置き換えることによる軽量化効果を約40%と見積もり、国内の乗用車の生産台数(約450万台/年)の20%の車種に本技術が適用されると想定した場合、約1万t/年のアルミニウムの使用量の増大に繋がる。

また、CO₂排出量抑制効果は、燃費改善効果を0.52L/kg、燃料1kL当たりのCO₂削減量換算を2.6t/kLと仮定すると、約1.3万t/年のCO₂削減効果が将来的に見込まれる。さらに、海外の自動車のアルミ化適用部位にも本技術が適用されれば、本技術によるアルミニウムの使用量及びCO₂削減効果はさらに増大すると予想される。

2.2.3.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.2.3-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
複層合金設計、組織解析・制御技術の開発	ラボサンプルでの成形前の伸び(20%以上)、成形・熱処理後の耐力(600MPa以上)の両立	伸びと強度のバランスを向上させ、第二中間目標達成する目処を得た。	△	
複層合金製造技術の開発	ラボサンプルでの積層アルミ合金板の製造制御指針の提示	開発合金を用いて、板幅 100mm の製造条件を把握した。	△	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.2.3-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
複層合金設計、組織解析・制御技術の開発	最終目標に向けた、強度と延性の両立のための取り組みは継続して推進中。また、広幅化についても検討中。	広幅サンプルでの成形前の伸び、成形・熱処理後の耐力の両立	これまでの各種知見を活用することで、最終目標を目指す。
複層合金製造技術の開発	板幅 100mm での開発合金での製造可能条件を把握。広幅圧延に必要な圧延条件（圧延荷重等）を把握。	広幅サンプルでの製造プロセス設計指針の提示	製造設備のスケールアップにより達成可能と考える。

(3)研究開発の成果と意義

複層合金設計、組織解析・制御技術の開発

第二中間目標で設定している、成形前の伸びと、成形・熱処理後の耐食を確保するために、クラッド構成（合金組成、クラッド層数、組合せ）とプロセス条件（クラッド材の熱処理、人工時効処理）の最適化を図ってきた。その結果、熱処理によって形成される析出物分布が強度を支配していることを、再委託先で開発を進めた評価技術を元に明らかにした。さらに、その形態を制御するためのクラッド構成、プロセス条件の検討を行い、強度と伸びのバランスを向上させるコンセプトの検証ができた。それにより、第二中間目標達成の目処を得た。

複層合金製造技術の開発

製造プロセスの開発として、長手方向にクラッド率を制御するフレキシブル・テーラード圧延技術の開発を行ってきた。開発合金を用いた3層クラッド材において、その圧着条件を見出し、フレキシブル・テーラードブランク材の試作に成功した。さらにその機械的特性は、長手方向に変化することをラボ検証し、第二中間目標の達成の見込みを得るところまで進展した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.2.3-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
H27FY	0	0	5	0	0	1	0	0	1
H28FY	0	0	4	0	0	2	0	1	1
合計	0	0	9	0	0	3	0	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）

(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）

表Ⅲ-2.2.3-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	4	0	0
H27FY	3	0	2
H28FY	1	4	1
合計	8	4	3

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.3 「革新的マグネシウム材の開発」

2.3.1 [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

2.3.1.1 テーマの概要

(1) 背景と目的

マグネシウムは、実用金属の中で最も軽量であり、また優れた比強度を有することから、輸送機器のための新たな構造材料として注目されている。しかし、汎用のマグネシウム合金は発火温度が低く、特に、不燃・難燃特性の確保が必須である鉄道車両部品や航空機部品としての適用は困難とされてきた。近年、マグネシウム合金の発火温度を高める合金開発が進められ、その結果、汎用マグネシウム合金（Mg-Al 系合金等）にカルシウムを添加し、発火温度を飛躍的に高めた「難燃性マグネシウム合金」が開発されている。本合金は、日本鉄道車両機械技術協会の車両材料燃焼試験において「不燃材」の認定も受けていることから、鉄道車両用部材への適用も、小型鋳造部品に関しては進みつつある¹⁾。今後、難燃性マグネシウム合金を用いて輸送機器のさらなる軽量化を目指すためには、合金特性のさらなる高性能化（強度・延性の改善、生産性の改善）を目指すと同時に、型材や板材を組み合わせる「大型構造体」を作り込むための要素技術を開発していく必要がある。

本研究開発では、難燃性マグネシウム合金の材料特性（機械的特性、生産性）をさらに改善するための合金設計技術を開発することを目指す。また、開発した合金の信頼性（疲労特性、発火特性、衝撃変形特性、耐食性）を系統的に明らかにし、データベース化（一部標準化）することを目指す。さらに、開発された合金を用いて高速車両構体を設計するための指針を構築することを目指す。

(2) 位置付け、目標値

現在、高速車両構体に利用されているアルミニウム合金には 2 種類あり、汎用型の A6N01 合金と高強度型の A7N01 合金がある。A6N01 合金は高い生産性（押し出し特性）を有すること、A7N01 合金は高い強度と延性のバランスを有することを特徴とする。本研究開発では、A6N01 合金に匹敵する機械的特性と生産性（押し出し速度）を有する合金（易加工性マグネシウム材）と、A7N01 合金に匹敵する機械的特性を有する合金（高強度マグネシウム材）を開発することを目指す。テーマ 15 では、上記合金の設計指針を導出することを担当する。なお、開発した合金を用いて実際の構体を作製するためには、開発された合金の接合技術および表面処理技術を確立する必要がある。また、母材・接合継手・表面処理被膜の信頼性を評価するための技術を構築する必要がある。そこで、テーマ 15 では、開発された合金の信頼性を系統的に明らかにし、データベース化すること、一部標準化することも担当する。さらに、開発された合金を用いて高速車両構体を設計するための指針を構築することを担当する。

以下、テーマ 15 の研究開発項目および目標を表 III-2.3.1-1 に列記する。

表Ⅲ-2.3.1-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
① 易加工性マグネシウム合金材の開発	引張強度：250MPa 以上、伸び：15% 以上、難燃性：AZX311 以上、押出速度：AZ31 以上の特性を示す押出材を作製するための合金設計技術を構築。	引張強度：270MPa 以上、伸び：20% 以上、難燃性：AZX311 以上、押出速度：A6N01 以上の特性を示す押出材を作製するための合金設計技術を構築。	平成 29 年目標値を実機で実現するための合金設計技術の構築はテーマ 16 で実施。	A6N01 合金に匹敵する機械的特性 →引張り強度：270MPa, 伸び：12% ²⁾
② 高強度マグネシウム材の開発	引張強度：350MPa 以上、伸び：13% 以上、難燃性：AZX311 以上の押出材および圧延材を作製するための合金設計技術を構築。	引張強度：360MPa 以上、伸び：15% 以上、難燃性：AZX311 以上の押出材および圧延材を作製するための合金設計技術を構築。	平成 29 年目標値を実機で実現するための合金設計技術の構築はテーマ 16、17、18 で実施。 (押出材、薄板、中板・厚板共通)	A7N01 合金に匹敵する機械的特性 →引張り強度：370MPa, 伸び：13% ²⁾
③ マグネシウム材の評価手法(難燃性・耐食性)の確立	Mg-Al-Ca-Mn 系合金の発火特性、腐食特性の解明。	Mg-Al-Ca-Mn 系合金の発火特性、腐食特性のデータベース構築・標準化。	第二中間目標と同じ。	高速車両構体を設計する上で腐食特性及び発火特性のデータベース化・標準化は不可欠
④ 難燃性マグネシウム合金の疲労特性及び衝撃変形特性データベースの構築		新たに開発した難燃性マグネシウム合金展伸材の疲労特性及び衝撃変形特性を取得し、データベースを作製する。	新たに開発した難燃性マグネシウム合金展伸材の各種環境下の疲労特性及び衝撃変形特性を取得し、データベースを作製する。	高速車両構体を設計する上で各種環境下の特性を明らかにすることは不可欠
⑤ 新難燃性マグネシウム合金		疲労試験により得た適用可能なマグネシウム合金	疲労試験により得た適用可能なマグネシウム合金	高速車両構体を設計する

部材の設計指針の構築		ウム材料のクライテリアにより、高速車両構体断面を対象とした気密疲労試験構体の基本設計を行う。	ネシウム材料のクライテリアにより、高速車両構体断面を対象とした気密疲労試験構体の詳細設計を行う。また、上記設計に基づき作製したモックアップの評価を行う。	る上で疲労特性を加味した構体設計技術を確立することは不可欠
------------	--	--	--	-------------------------------

(3)全体計画

研究開発項目①「易加工性マグネシウム材の開発」では、Mg-Al-(Zn)-Ca-Mn 系合金をベースとして、A6N01 合金に匹敵する機械的特性と押出し特性（易加工性マグネシウム材：引張強度：270MPa 以上、伸び：20%以上、難燃性：AZX311 以上、押出速度：A6N01 以上の特性）を有する展伸材を開発することを目標とし、そのための合金設計指針を構築する。研究開発項目②「高強度マグネシウム材の開発」では、A7N01 合金に匹敵する機械的特性（引張強度：360MPa 以上、伸び：15%以上、難燃性：AZX311 以上）を有する展伸材を開発することを目標とし、そのための合金設計指針を構築する。

研究開発項目③～④では、平成 27 年度までに開発した合金の信頼性（発火特性、疲労特性、衝撃変形特性、耐食性）に関するデータを系統的に測定し、開発した合金を用いて高速車両構体を設計するために必要なデータベースを構築する。研究開発項目③「マグネシウム材の評価手法の確立」では、開発合金の発火特性や耐食性を評価することを目的として、評価手法を確立する上において不可欠な知見（発火現象に及ぼす環境因子や組織的因子の抽出、マグネシウム合金へのカルシウム添加が腐食現象に及ぼす影響）を明らかにする。研究開発項目④「難燃性マグネシウム合金の疲労特性及び衝撃変形特性データベースの構築」では、開発した合金（母材および継手）の疲労特性及び衝撃変形特性を各種変形モードで系統的に測定し、データベースを構築する。また、開発した合金の上記特性に及ぼす組織因子・構造因子の影響を解明する。

研究開発項目⑤「新難燃性マグネシウム合金部材の設計指針の構築」に関しては、鉄道車両構体を設計するに当たり適用可能なマグネシウム材料のクライテリアを主に、疲労特性から決定する。また、得られたクライテリアにより、高速車両構体断面を対象とした気密疲労試験構体の設計を行う。

(4)実施体制

本研究開発では、マグネシウムに関連する 8 つの分室が共同で難燃性マグネシウム合金展伸材を鉄道車両用部材（高速車両構体）に適用するための基礎技術を構築することを目指す。平成 27 年度までは、新規合金の開発・評価を主眼として、素材の開

発を担当する「材料 WG」、難燃性マグネシウム合金の信頼性を改善・評価するための技術を開発する「接合 WG」、「耐食性 WG」、「発火特性 WG」を形成し、各 WG が連携して課題の解決を目指した。平成 28 年度以降は、平成 27 年度までに開発した合金を対象として、複雑形状部材の加工・製造技術を開発する「素形材加工技術 WG」、信頼性（疲労特性・破壊特性等）を系統的に明らかにする「信頼性評価・標準化 WG」、表面処理技術の構築や耐食性を系統的に明らかにする「表面処理 WG」、接合技術の構築を目指す「接合 WG」を構築し、研究開発を遂行している。

研究開発を推進するにあたっては、エンドユーザー（鉄道会社・車両メーカー）が低コストかつ安全に構体を製造するための技術や、マグネシウム合金を用いて構造体を設計するため技術等を統合的に構築していく必要がある。そのため、本研究開発では、エンドユーザーをオブザーバーとして招聘し、マグネシウム合金を利用して構造体を作製するための仕様について、アドバイスを受けつつ研究開発を推進している。

テーマ 15 に関しては、平成 27 年度までは、名古屋守山分室において易加工性マグネシウム材及び高強度マグネシウム材のための合金設計指針の導出を行った。平成 28 年度以降は、名古屋守山分室と明石分室が共同で、新たに開発された合金の信頼性（疲労特性、衝撃破壊特性、難燃性）を系統的に調査するとともに、発火特性に関しては、標準化作業にデータを提供している。また、明石分室では、新たに開発された合金を用いて高速車両構体を製造するための構体設計指針を構築している。

(5)運営管理

テーマ 15～20 に従事する組合員が全員参加できる分科会を定期的で開催している。平成 25～27 年度は、材料 WG、接合 WG、表面処理 WG の分科会を 3 ヶ月に 1 回開催した（発火特性 WG は不定期開催）。平成 28 年度以降は、素形材製造 WG、信頼性 WG、表面処理 WG、接合 WG の分科会を 3～4 ヶ月に 1 回開催し、各分室および再委託先の研究進捗を報告することにより、開発した合金を用いて高速車両構体を製造するための技術を共同で構築している。

平成 27 年以降は、プロジェクトの推進を加速するための会合（加速 WG）を上記分科会と同日に開催し、難燃性マグネシウム合金を用いて側パネル等のモックアップを作製するための打ち合わせや、信頼性データ（疲労特性、耐食性等）を系統的に取得するための打ち合わせを実施し、プロジェクトの推進を調整する場として機能している。

成果の発信に関しては、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 2 回）に開催し、プロジェクトの成果を発信している（平成 29 年 3 月までに計 6 回開催）。さらに、軽金属学会の会誌「軽金属」に特集号「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」を組み、プロジェクトの成果を論文および解説として公表している。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO2 削減・省エネルギー等@2030 年度）

アルミニウム合金製車両構体（新幹線を想定）をマグネシウム合金製車両構体に代替

した場合の重量削減効果については幾つかの報告があり、ヤング率を基準とした場合、20%程度の車両構体の軽量化を見込むことができるとの報告がある³⁾。また、明石分室では、これまでに、マグネシウム合金製構体の相当曲げ剛性を簡易的に試算しており、窓開口寸法を従来の新幹線よりも小さくすることで、アルミニウム合金製ダブルスキン構体とほぼ同じ相当曲げ剛性が得られることを確認している。さらに、アルミニウム合金製構体質量の実績値と比較して、30%の構体重量削減が見込まれることを確認している。

構体の軽量化は、CO₂ 排出量削減に寄与するばかりで無く、車両の高速化にも大きく寄与することが知られている。過去の事例によると、新幹線の車両重量を 20%軽量化すると、営業最高速度が 10~20km/時アップするとの報告がある⁴⁾。ゆえに、経済的観点からは車両構体の軽量化は大きな効果を見込むことができる。

なお、新幹線車両の年間生産台数は 385 両/年(平成 25 年)であり、四輪車の年間生産台数(約 1,000 万台:平成 25 年)の 0.004%程度である^{5,6)}。また、動力として電気を利用していることを考慮すると、新幹線の重量減に伴う CO₂ 削減効果は、四輪車のそれと比較すると小さいものであると言える。

一方、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、マグネシウム展伸材の大きな需要増加を見込むことができる。例えば、車両構体に利用されるアルミニウム合金は 1 両当たり約 7t である。上記部品を全てマグネシウムに置き換えた場合、1 両当たり約 6t の需要が生まれることになる(Mg 置換により車両重量が約 10%減少する場合)。車両製造が 1 年当たり 400 両と仮定すると(385 両:平成 25 年)⁵⁾、2400t の需要が生まれることになる。なお、国内におけるマグネシウム合金展伸材需要は約 700t/年(平成 26 年)であり⁷⁾、プロジェクトの成果により、仮に、側構体だけでもマグネシウム合金に置き換えることができれば、それだけで、国内の展伸材需要を倍増させることが可能となる。

2.3.1.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.1-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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 易加工性マグネシウム合金材の開発	引張強度：270MPa 以上、伸び：20%以上、難燃性：AZX311 以上、押出速度：A6N01 以上の特性を示す押出材を作製するための合金設計技術を構築。	特定の組成の合金を押出速度 60m/min の高速で押出しすると、押出しまま材、T6 処理材とも目標値を上回る特性を示すことを試験片レベルで説明。	○	

②高強度マグネシウム材の開発	引張強度：360MPa以上、伸び：15%以上、難燃性：AZX311以上の押出材および圧延材を作製するための合金設計技術を構築。	特定の組成の合金を特定の条件で加工すると、上記の特性を満足する押出し材、圧延材を作製できることを試験片レベルで解明。	○	
③マグネシウム材の評価手法(難燃性・耐食性)の確立	Mg-Al-Ca-Mn系合金の発火特性、腐食特性のデータベース構築・標準化。	発火特性に関しては、添加元素の濃度が発火特性に及ぼす影響をデータベース化し、発火試験の標準化作業に提供した。腐食特性についてはCa添加が腐食特性に及ぼすメカニズム（特に熱処理の影響）を明らかにした。	△	発火特性の標準化に関しては、高機能JIS事業と協力して推進中。
④難燃性マグネシウム合金の疲労特性及び衝撃変形特性データベースの構築	新たに開発した難燃性マグネシウム合金展伸材の疲労特性及び衝撃変形特性を取得し、データベースを作製する。	疲労特性については、複数の変形モードを対象として、開発した合金（母材・MIG継手）の疲労特性の調査を実施。衝撃変形特性については、特定の合金を対象として、衝撃変形特性や衝撃靱性の取得を実施。	△	疲労特性についてはMIG以外の接合方法(FSW、TIG)により作製した継手の疲労特性を系統的に採取。また、各種環境下の疲労特性も明らかにする。また、開発合金の衝撃変形特性、衝撃靱性を系統的に採取し、データベースを構築する。
⑤新難燃性マグネシウム合金部材の設計指針の構築	疲労試験により得た適用可能なマグネシウム材料のクライテリアにより、高速車両構体断面を対象とした疲労試験構体の基本設計を行う。	シェル要素による構体輪切り3次元FEMモデルを作成し、気密荷重負荷時の静強度解析と座屈固有値解析を行い、最大荷重（内圧6.4kPa）負荷時に塑性変形や座屈変形が生じないことを確認した。また、上記輪切りモデルを車両長手方向に	△	現在実施中の疲労試験の結果を加味した上で、修正マイナー則による疲労寿命評価する。その上で、構体の設計を実施する。

		つなげた一両モデルにより、構体曲げ剛性を検証し、形状を最適化した。		
--	--	-----------------------------------	--	--

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.3.1-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
① 易加工性マグネシウム合金材の開発	引張強度：270MPa 以上、伸び：20%以上、難燃性：AZX311 以上、押出速度：A6N01 以上の特性を試験片レベルで達成している。	平成 29 年目標値を実機で実現するための合金設計技術の構築はテーマ 16 で実施。	試験片レベルで既に達成済み。
② 高強度マグネシウム材の開発	引張強度：360MPa 以上、伸び：15%以上、難燃性：AZX311 以上の押出材および圧延材を試験片レベルで作製することに成功している。	平成 29 年目標値を実機で実現するための合金設計技術の構築はテーマ 16、17、18 で実施。 (押出材、薄板、中板・厚板共通)	試験片レベルで達成済み。
③ マグネシウム材の評価手法(難燃性・耐食性)の確立	発火特性に関しては、添加元素の濃度が発火特性に及ぼす影響をデータベース化し、発火試験の標準化作業に提供した。腐食特性については Ca 添加が腐食特性に及ぼすメカニズム(特に熱処理の影響)を明らかにした。	Mg-Al-Ca-Mn 系合金の発火特性、腐食特性のデータベース構築・標準化。	発火特性、腐食特性のデータベースは継続して構築中。発火特性の標準化については METI 高機能 JIS 事業と連携して推進中。
④ 難燃性マグネシウム合金の疲労特性及び衝撃変形特性データベースの構築	疲労特性については、複数の変形モードを対象として、開発した合金(母材・MIG 継手)の疲労特性の調査を実施。衝撃変形特性については、特定の合金を対象として、衝撃変形特性や衝撃靱性の取得を実施。	新たに開発した難燃性マグネシウム合金展伸材の各種環境下の疲労特性及び衝撃変形特性を取得し、データベースを作製する。	疲労特性は MIG 以外の接合法により作製した継手の疲労特性を系統的に採取。また、各種環境下の疲労特性も明らかにする。また、開発合金の

			衝撃変形特性、衝撃靱性を系統的に採取し、データベースを構築する。
⑤ 新難燃性マグネシウム合金部材の設計指針の構築	シェル要素による構体輪切り 3 次元 FEM モデルを作成し、静強度解析と座屈固有値解析を行い、最大荷重（内圧 6.4 kPa）負荷時に塑性変形や座屈変形が生じないことを確認した。また、上記輪切りモデルを車両長手方向につなげた一両モデルにより、構体曲げ剛性を検証し、形状を最適化した。	疲労試験により得た適用可能なマグネシウム材料のクライテリアにより、高速車両構体断面を対象とした疲労試験構体の基本設計を行う。また、上記設計に基づき作製したモックアップ構体の評価を行う。	現在実施中の疲労試験の結果を加味した上で、修正マイナー則による疲労寿命評価する。その上で、平成 30 年度中に構体の設計を完成する。また、上記設計に基づいた気密疲労試験用モックアップ構体（平成 31 年度までに作製予定）の特性を平成 32 年度に評価する。

(3)研究開発の成果と意義

以下各研究項目の代表的な成果と意義を列記する。

① 易加工性マグネシウム合金材の開発

Mg-Al-Ca-Mn 系希薄合金の一層の押し出し性の向上を目的として、本系合金の押し出し性に及ぼす押し出し加工前の熱処理条件の影響を調べた。同時に、本系合金押し出し材のマイクロ組織および機械的性質に及ぼす Al 添加量の影響を評価し、良好な機械的性質が得られる Al の最適添加量について検討した。はじめに、当該合金の押し出し性に及ぼす均質化処理方法の影響を調査した。その結果、適切な均質化処理を施すことにより最大荷重が小さくなり、表面割れの程度も軽減することを明らかにした。次に、Al 添加量の最適化を実施し、適度に Al を添加することで高い時効硬化と強い底面集合組織を得られることを明らかにした。上記の知見をベースとして最適な合金を抽出し、抽出した合金が優れた押し出し特性(押し出し速度：60m/min.)と A6N01 アルミニウム合金(T6)材に匹敵する機械的特性（0.2%耐力:280MPa）を兼備することを試験片レベルで確認した。

② 高強度マグネシウム材の開発

押し出し材に関しては、高濃度の Al を添加した難燃性 Mg 合金（Al 添加濃度約 9mass%）を対象として、主要添加元素（Al, Zn, Ca）と微量添加元素（Mn）の濃度が、

押出材の機械的特性に及ぼす影響を調査した。Zn 添加濃度の影響を 0～3%（以下 mass%）の範囲内で調査した結果、Zn 濃度を 1%以上に設定すると延性が劣化することを明らかにした。Al 添加濃度の影響を 6～12%の範囲内で調査した結果、10%までは Al 濃度の増加とともに強度が向上するが、それ以上の添加は強度向上に有効に寄与しないことを明らかにした。Ca 添加濃度の影響を 0～3%の範囲内で調査した結果（他の元素は基準合金と同じ濃度）、Ca 濃度を 2.5%以上にすると、延性が劣化することを明らかにした。Mn 添加濃度の影響を 0～0.6%の範囲で調査した結果（他の元素は基準合金と同じ濃度）、過度な Mn の添加は耐力の低下をもたらすことを明らかにした。以上の結果より、高強度と高延性を同時に達成するための好適な合金組成を抽出し、試験片レベルで引張り強度 367 MPa、伸び 17%が得られることを確認した。圧延材（薄板・厚板）に関しても、平成 29 年度目標値の特性を有する板材を試験片レベルで達成するための合金設計指針を提示することに成功した。

③ マグネシウム材の評価手法(難燃性・耐食性)の確立

③-1 難燃性及び耐食性の評価

発火特性に関しては、AZ91, AM60, AZX912, AMX602 合金を対象として、熱分析装置（DTA）を用いて発火温度を測定し、昇温速度が発火特性に及ぼす影響を明らかにした。また、難燃性 Mg 合金の発火温度を測定するための代表的な条件を抽出し、その条件を用いて、難燃性マグネシウム合金の主要元素濃度が発火温度に及ぼす影響を調査した。さらに、平成 27 年度までに開発された合金（AX41, AX92, AX81G, AX81S 合金）の発火温度を測定し、いずれの合金も AZX311 合金(Ca 濃度 0.5～1%)と同等、もしくはそれよりも高い発火温度を示すことを確認した。なお、上記の発火温度に関するデータは、高機能 JIS 事業「難燃性、不燃性マグネシウム合金の特性評価方法に関する JIS 開発」において、マグネシウム合金の発火特性を評価するためのデータとして利用されている。

耐食性に関しては、難燃性マグネシウム合金の耐食性に及ぼす熱処理の影響を調査し、溶体化処理に伴い AZX612, AZ61 押出材・鋳造材の全ての試料においても耐食性が向上することを確認した。また、組織観察と腐食試験結果を照合した結果、溶体化処理により晶出物や Al 濃化相を母相に固溶させると、孔食サイトが減少し、耐食性が向上することが明らかとなった。応力腐食特性に関しては、0.01 M NaCl 環境下で定歪み速度引張試験を行い、AZX612, AZ61 押出材の応力腐食特性を評価した。その結果、AZX612 押出材は AZ61 押出材よりも低い破断伸びを示した。なお AZX612 押出材に関しては、溶体化処理に伴い延性が改善することが確認され、塩水浸漬試験と同様に、溶体化処理に伴う孔食サイトの減少が延性の劣化を抑制するのに有効であることが示唆された。

③-2 標準化に関する技術動向調査

国内外における難燃性マグネシウム合金等の市場動向・研究動向を調査し、本事業において開発される難燃性マグネシウム合金や評価手法を標準化するための課題や問題点を抽出した。国外に関しては国際会議への参加及び二輪車メーカーや自動車メー

カーの視察を行い、市場動向、開発動向等の最新情報を入手した。国内に関しては、セミナーや学会等により最新の研究開発動向の調査と、鉄道関連企業の視察を実施した。一連の調査結果より、本事業で開発される材料や評価手法を標準化するための課題や対応策として、以下の5つの項目を抽出することができた。(1)開発合金による押出材、板材の規定、(2)溶接用材料の規定、(3)耐食性評価のための促進試験の策定、(4)疲労や破壊に関する試験方法の策定、(5)燃焼性に関する判断標準の策定。また、今回の調査の結果、加工技術や評価手法の標準化に関しては、合金種への対応、メカニズムの解析、データの蓄積・整備などの課題解決が必要な状況であること、また、需要先に存在する規定等への対応も必要になることが分かった。

④ 難燃性マグネシウム合金の疲労特性及び衝撃変形特性データベースの構築

④-1 疲労特性データベースの構築

既存合金(AZX611 (押出材))及び新たに開発した合金(AX41 (押出材)、AX92 (押出材)、AX81(G) (圧延材)、AX81(S) (圧延材))の疲労特性を回転曲げ疲労試験、平面曲げ疲労試験、軸疲労試験により評価した。

回転曲げ疲労試験に関しては、AZX611, AX41, AX92, AX81(G)の母材を対象として、高速車両構体がトンネル内を走行する時に付加される気密疲労条件に近い応力比 $R=-1$ (両振り) で疲労特性 (繰返し数: 10^7 回) を評価した。AZX611 に関しては、押出比の異なる試料の疲労特性を評価した。0°材(試験片長手方向と加工方向が平行)の疲労特性を評価した結果、疲労強度に及ぼす加工比の影響は比較的少ないことが確認された。また、他の合金に関しては 0°材と 90°材(試験片長手方向と加工方向が垂直)の特性を評価した。その結果、開発合金の疲労強度は AZX611 とほぼ同等もしくは高い値を示すことを明かにした。

平面曲げ疲労試験に関しては、各合金について分担を設定し (AX41: 三協立山・長岡技科大、AX92: 産総研、AX81(G): 権田金属、AX81(S)住友電工)、母材及び MIG 継手 (余盛り有り・無し) の疲労特性 (応力比: -1 及び 0) を評価した。名古屋守山分室において AX92 の疲労特性を評価した結果、AX92 母材の疲労強度は AZX611 (押出材) と同等もしくは高い値を示すことを確認した。また、MIG 継手の疲労強度を測定した結果、応力比が -1、0 の条件ともに、母材の結果と比較して約 50~60%の疲労強度が得られることを確認した。

軸疲労試験では応力比 $R=-1$ (両振り) で試験を実施した。それぞれの材料について加工方向、加工方向に対して直角方向の試験片を準備し、試験を実施した。軸疲労試験の結果、Al 濃度の増加に伴い疲労強度 (疲労限 10^7 回) が高くなる傾向が確認された。また、疲労強度の異方性は AX41, AX81 において比較的少ないことが確認された。

④-2 マグネシウム合金母材及び溶接継手の組織因子および構造因子が疲労特性に及ぼす影響調査

疲労特性データベースの構築と並行して、マグネシウム合金母材および溶接継手の組織因子および構造因子が疲労特性に及ぼす影響を調査した。

組織因子に関する調査では、AZX612 押出材を供試材とし、TIG 溶接部および

MIG 溶接部の疲労き裂伝ば挙動を調べ、溶接プロセスと疲労き裂伝ば挙動の関係について検討した。TIG 溶接部および MIG 溶接部のき裂伝ば試験の結果得られた疲労き裂伝ば曲線より、溶接材の方が、母材よりもき裂伝ば抵抗が大きいことが確認された。また、MIG 材の疲労き裂伝ば曲線は、母材と TIG 溶接材の間に位置することが確認された。さらに、下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} と溶接時の入熱との関係を整理した結果、入熱の増加にともない、 ΔK_{th} が高くなる傾向が認められた。次に、母材と TIG 溶接部および MIG 溶接部の疲労き裂伝ば曲線を有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} で整理した。その結果、 ΔK_{eff} で整理することにより、母材、TIG 材および MIG 材の疲労き裂伝ば曲線が一致する傾向が認められた。このことより、母材と溶接部に認められたき裂伝ば抵抗の相違は、主に、き裂開閉口挙動に起因することが示唆された。

構造因子に関する調査では、Mg ダブルスキン構造における最適溶接部形状の探索を行うと共に、破壊力学特性の評価法の提案を行った。前者の調査では、有限要素法を利用してダブルスキン構造体での最適な溶接部形状を決定した。次に、有限要素法により最適化した継手形状を有する構造体 (TIG 継手) を作製し、その疲労試験を実施した。その結果、構造材の疲労限度は 40 MPa であり、アルミ構体の設計強度である 35 MPa を上回ることを確認した。後者の調査では、下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の計測において必要となる漸減率 C の計測方法 (ΔK 漸減法) の検証を行い、難燃性マグネシウム合金に関しても、鋼用に規定された ASTM 規格を適用することができることを確認した。

④-3 衝撃変形データベースの構築

衝撃変形特性評価に関しては、(1) 試験速度を高速化させるための衝撃圧縮試験機の作製、(2) 高速変形応答に対するカルシウム添加効果の確認試験、(3) 新たに開発した合金 (AX41) の衝撃圧縮特性評価を実施した。(1)に関しては、使用する応力棒の設計変更を通じて、試験中に計測される応力波の擾乱が少ない試験機を作製した。その結果、試験中に繰り返し変動を生じないひずみ速度での圧縮試験が可能となり、最高速度 33m/s で試験を実施できる状況となった。(2)に関しては、Mg-0.3 at.% Ca 合金の圧縮試験を行い、純マグネシウムの場合と比較した。試験の結果、カルシウムの固溶により、ひずみ速度に依らず降伏応力値が 2 割程度高くなることを確認した。また、純マグネシウムの加工硬化率は、ひずみ速度の影響を大きく受けて増加するのに対して、カルシウム添加合金では増加割合が低いことを確認した。(3)に関しては、ひずみ速度の影響を評価した結果、ひずみ速度の上昇に伴い加工硬化率及び応力値は増加し、高いひずみ速度依存性を示すことが確認された。比較として 6N01 アルミニウム合金の圧縮特性を評価した結果、6N01 合金の方が相対的にひずみ速度の影響が低いことが分かった。

衝撃靱性評価に関しては、各種合金の靱性評価を行うとともに、衝撃靱性特性に及ぼす温度の影響を調査した。前者の調査では、単一試験片法と複数試験片法によって靱性を評価した。その結果、複数試験片法と単一試験方法で得られる靱性値はほぼ同じ値であり、試験片の板厚が 5 mm 程度であれば、評価法に関係なくマグネシウム合金の靱性を取得できることが分かった。また、AZX611 と AZX612 の靱性値

を測定した結果、AZX612の方が高い値が得られる傾向が確認された。後者の調査では、AX41 押出材を用いて、衝撃靱性特性に及ぼす試験温度の影響を調査した。具体的には、シャルピー衝撃試験から取得される衝撃吸収エネルギーによって評価した。試験の結果、AX41の延性・脆性遷移温度が85°Cであることが確認された。

⑤ 新難燃性マグネシウム合金部材の設計指針の構築

マグネシウム合金製車両用構体の設計指針の構築に当たり、その適用対象を高速車両（整備新幹線）とした。構造様式に関しては高い相当曲げ剛性が得られるダブルスキン構造とした。マグネシウム合金製ダブルスキン型材の諸元は、アルミニウム合金製型材の場合の下限とした。また、田口らの人体の固有振動数の計測結果を基に、車体の曲げ固有振動数が人体の固有振動との共振を回避することができるように相当曲げ剛性の目標値を $2.2 \text{ GN} \cdot \text{m}^2$ に設定した。

荷重条件については、トンネル通過時の気密荷重の検討から始めた。気密荷重はトンネルの長さや数、通過速度、すれ違いの有無により変動する様々な値と頻度を有する荷重スペクトルとなる。荷重スペクトルの決定に際しては、JR各社に協力頂き、整備新幹線の平均的な線区条件や運用条件を基に決定した。解析の結果、荷重スペクトルにおける最大荷重は 6.4 kPa （内圧）であった。

次に、荷重スペクトルにおける最大荷重による塑性変形や座屈変形の防止について検討を行った。検討は、構体中央部から1窓分のリング状に切り出した構造を模擬した輪切りモデルを梁要素で構成し、内圧 6.4 kPa を負荷した時の構体の周方向のモーメント分布とせん断力分布を求め、ダブルスキン型材の面板の座屈強度を確保するための内部リブの間隔の最大値を求めた。この値を参考に、構体を構成するダブルスキン型材の内部リブの配置を決めた後、シェル要素による輪切り3次元FEMモデルを作成し静強度解析と座屈固有値解析を行い、内圧 6.4 kPa 負荷時に塑性変形や座屈変形が生じないことを確認した。

次に、構体の相当曲げ剛性であるが、最大気密荷重に対して静強度と座屈強度が確認できた輪切り3次元FEMモデルを車両長手方向につなげた一両モデルによる検証を行った。設計変数として窓開口寸法を選び、窓開口寸法により相当曲げ剛性の値が大きく変化することが判った。そして、窓開口寸法を従来の新幹線よりも小さくすることで設計目標の $2.2 \text{ GN} \cdot \text{m}^2$ 以上を達成することができた。その際の構体質量は、アルミニウム合金製ダブルスキン構体の構体質量の実績値と比較して約30%の軽量化の可能性を示す結果となった。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.1-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	12	0	0	0	0	2	1
H27FY	0	0	26	0	0	0	0	3	1
H28FY	8	1	13	0	0	0	1	1	1
合計	8	1	51	0	0	0	1	6	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）

(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）

表Ⅲ-2.3.1-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	1	0	0
H28FY	1	0	0
合計	2	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.3.2[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

2.3.2.1 テーマの概要

(1)背景と目的

エネルギー消費量削減や CO₂ 排出量削減は国際的な重要課題であり、運輸部門においては自動車に対する燃費規制や高速車両に対する省エネ化・高速化が求められている。なかでも高速車両においてはリサイクル性向上・メンテナンスコスト削減の観点からも実用金属中最も軽量であるマグネシウム（Mg）合金の車両構体への適用が強く期待されている。適用のためには安全性（難燃・不燃）、易加工性（接合・補修が容易）、高耐食性、リサイクル性、低コストであることが求められるが、軽量化が求められる次世代高速車両用部材開発において、Mg 合金にカルシウム（Ca）を添加し発火特性を飛躍的に改善した「難燃性 Mg 合金」の材料特性（機械的特性、生産性）を改善するための合金設計、構造体を作製するための大型展伸材（型材・板材）の製造プロセス技術開発、開発した合金や展伸材の信頼性（難燃性や耐食性）を確保するための評価技術およびデータベース(DB)の構築が重要となる。

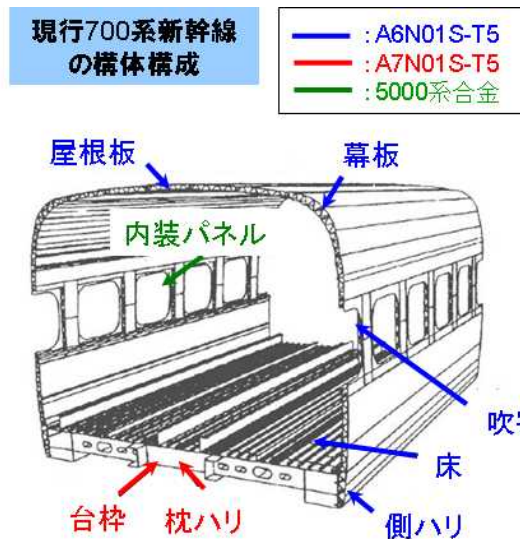
高速車両構体には現在、アルミニウム（Al）合金が使用されている。構体を構成する主要部材（屋根や側面）には Al 合金の中でも比較的中強度で生産性（易加工性）に優れた A6N01 合金が適用され、現行の新幹線等では「ダブルスキン型材」と呼ばれる、複雑な断面形状を有する長さ 25m 程度の大型・長尺の押出型材が使用されている。しかしながら、当該押出型材に匹敵する強度と易加工性を兼備した Mg 合金押出材は未だ存在せず、大型化や長尺化を実現する押出プロセス技術も未構築である。一方、先頭構体や床部材にはより高強度の A7N01 合金押出型材や板材も求められる。板材では板厚 3 mm 以上の厚板を切削加工することで内装品やシングルスキン・インテグラルスキン材の作製が可能となる。さらに、作製板材の信頼性及び標準化の観点からは特性 DB 構築が重要であり、規格試験片適用のためには 3 mm 以上の板厚が望ましい。しかしながら、Mg 合金の板材作製に関してはこれまで薄板材の報告はあるものの、厚板材は皆無であり、塑性加工上では板材作製には圧延加工が向いている。しかしながら、A7N01 合金に匹敵する機械的特性を有する Mg 合金中板・厚板圧延材は未だ存在せず、大型化や長尺化を実現する圧延加工プロセス技術も未構築である。

そこで本テーマでは、難燃性 Mg 合金展伸材の次世代高速車両用構体への実用化を目指し、強度と易加工性を両立する Mg 大型・長尺押出材と、高強度化を実現する Mg 圧延厚板材の工業レベルでの製造プロセス技術を確立することを目的とする。

(2)位置付け、目標値

現在、高速車両構体（700 系新幹線）に使用されている Al 展伸合金には 2 種類あり、汎用型の A6N01 合金と高強度型の A7N01 合金がある。図Ⅲ-2.3.2-1 に示すように、A6N01 合金に関しては屋根板、幕板、側ハリ等に利用され、A7N01 合金に関しては台枠や枕ハリ等に利用されている。本研究開発では、開発材の次世代高速車両構体への実用化に主眼を置き、A6N01 合金に匹敵する機械的特性と生産性（押出速度）を有する難燃性 Mg 合金押出材（易加工性 Mg 押出材）と、A7N01 合金に匹敵する機械的

特性を有する難燃性 Mg 合金展伸材（高強度 Mg 材（押出材、板材（薄板・厚板））を開発することを目指す。また、開発した合金を用いて実際の構体を作製するためには、開発合金をつなぎ合わせるための接合技術や、耐食性を付与するための表面処理技術が必要である。さらには、母材・接合継手・表面処理被膜の信頼性を評価するための技術も構築する必要がある。そこで、開発した合金を接合するための技術、信頼性（疲労特性、発火特性、耐食性等）を評価するための技術についても開発を実施する。



図Ⅲ-2.3.2-1 現行の高速車両構体に使用される材料

表Ⅲ-2.3.2-1 に本テーマを担当する射水分室及び相模原分室における開発目標と根拠を示す。射水分室では A6N01 合金押出材に匹敵する押出加工性と機械的性質を有する易加工性 Mg 押出材を開発すること、相模原分室では A7N01 合金に匹敵する機械的性質を有する高強度 Mg 圧延厚板を得るための製造プロセス技術を開発することを目標として設定している。

これまでの先導研究において、易加工性 Mg 押出材の開発では Mg 合金（Mg-Al-Ca 系合金）の添加元素を希薄化させることにより、6000 系 Al 合金に匹敵する押出速度と機械的性質が得られることをラボレベルおよび工業レベルで実証できている^{1),2)}。また、高強度 Mg 厚板材作製の基礎的検討では、急速凝固に関する先導研究から急冷鋳造材は易加工性を有することを見出し、AMX1001（Mg-10Al-0.2Mn-1Ca mass%）合金材において、熱間多パス圧延による高強度化、加熱及び熱処理による延性向上及び耐熱性を有することをラボレベルにおいて確認している³⁾。本テーマの開発においてはこれら技術シーズを積極的に展開し、ターゲットとした各種車両構体部材に資する押出型材や圧延厚板材の製造プロセス技術を検討する。

表Ⅲ-2.3.2-1 研究開発目標と根拠

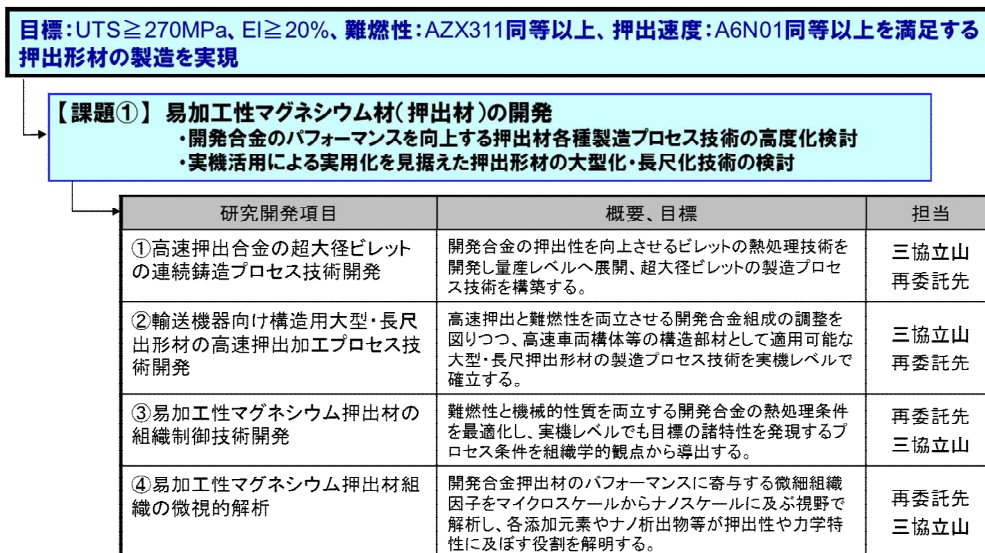
研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
易加工性 Mg 材（押出材）の開発	引張強さ 250MPa 以上、伸び 15% 以上、AZX311 合金同等以上の難燃性、AZ31 同等以上の押出速度を達成する押出材を開発。	引張強さ 270MPa 以上、伸び 20% 以上、AZX311 同等以上の難燃性、A6N01 合金同等以上の押出速度を達成する押出材を開発。	引張強さ 270MPa 以上、伸び 20% 以上、AZX311 同等以上の難燃性、A6N01 同等以上の押出速度、押出材長さ 25m 以上の大型・長尺複雑断面形状を有する押出型材の製造を実現。	現行 A6N01 合金に匹敵する機械的性質を達成。 A6N01-T5(引張強さ 270MPa、伸び 12%)
高強度 Mg 材（厚板）作製の基礎的検討	板厚 3 mm 以上で引張強さ 350 MPa、伸び 13 % 以上、AZX311 合金と同等以上の難燃性を有する中板材を開発。各制御技術の基礎指針を確立し、連成モデルを構築する。	A7N01 合金と同等以上の熱的安定性・機械的特性を有する引張強さ 360 MPa 以上、伸び 15% 以上の厚板材（板厚 6 mm）を作製するための鑄造、圧延手法調査。中板材は高強度高延性を有する幅広材（板幅 300 mm）を作製し、工業化と標準化を加速させる。	引張強さ 360 MPa 以上、伸び 15%、AZX311 合金と同等の難燃性、板厚 6 mm 以上の厚板幅広材を作製するための鑄造、圧延手法調査。開発合金板材の社会実装へ向け、中板材は多用途展開可能とする幅広材の作製及び疲労特性の取得を行い DB 構築に寄与する。	現行 A7N01 合金に匹敵する機械的性質を達成。 A7N01-T5(引張強さ 370 MPa、伸び 13%)

(3)全体計画

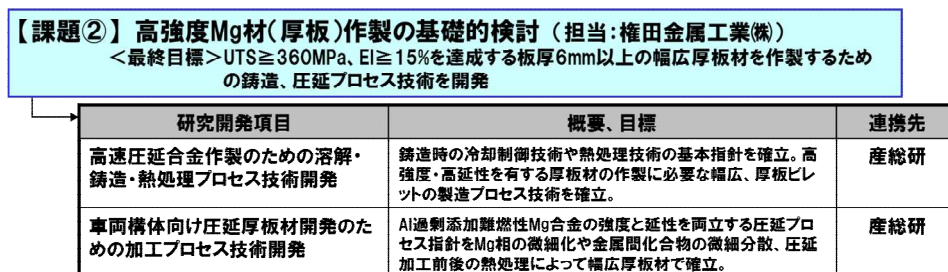
本研究開発においては、開発技術の輸送機器構造部材、特に高速車両構体用構造部材への適用可能性を絶えず評価・検証することにより研究開発を遂行する。

図Ⅲ-2.3.2-2 に射水分室、図Ⅲ-2.3.2-3 に相模原分室における研究開発全体計画をそれぞれ示す。「易加工性マグネシウム押出材の開発」に関しては、再委託先機関と連携し、Mg-Al-Ca (AX) 系合金を対象に、押出用素材となるビレットの量産製造プロセス技術と、A6N01 合金に匹敵する機械的性質と押出特性（引張強さ：270MPa 以上、伸び：20%以上、難燃性：AZX311 以上、押出速度：A6N01 以上の特性）を有する大型・長尺押出型材の製造プロセス技術を工業レベルで構築することを最終目標とする。

「高強度マグネシウム厚板材の開発」に関しては、厚板の作製に必要な圧延用母材の製造プロセス技術と圧延・熱処理プロセス技術の開発において、名古屋守山分室（産業技術総合研究所）と合金開発・圧延基礎データについて連携をとり、開発されるマグネシウム合金の特性と、高速車両構体に既に利用されているアルミニウム合金（A6N01、A7N01 など）との比較・検証を実施しながら最終目標を達成する研究開発を実施する。



図Ⅲ-2.3.2-2 射水分室における技術開発の全体計画



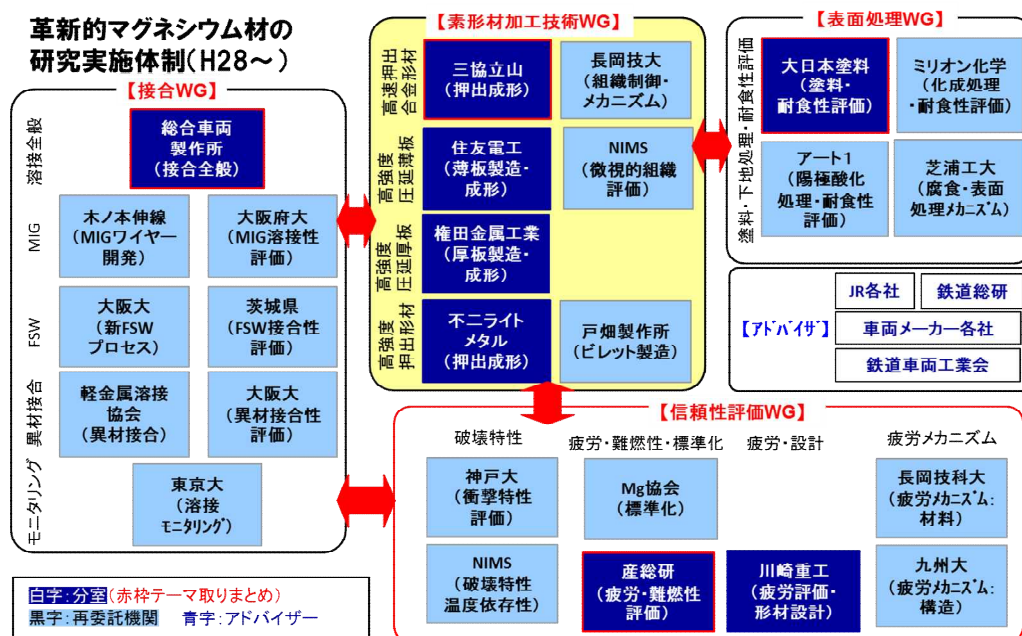
図Ⅲ-2.3.2-3 相模原分室における技術開発の全体計画

(4)実施体制

図Ⅲ-2.3.2-4 に革新的マグネシウム材の開発における研究開発体制を記す。本研究開発体制においては、8分室が共同で難燃性 Mg 合金展伸材を鉄道車両用部材（高速車両構体）に適用するための基礎技術を構築することを目指す。そこでは、素材の開発を担当する「素形材加工技術 WG」、開発材料の接合技術を開発する「接合 WG」、開発材料の耐食性評価技術と表面処理技術を開発する「表面処理 WG」、開発材料の信頼性を改善・評価するための技術を開発する「信頼性評価 WG」を構成し、各 WG が連携して課題の解決を目指す。なお、開発した合金の実用化に際しては、エンドユーザー（鉄道会社・車両メーカー）が低コストかつ安全に開発材を利用するための技術や、開発材を用いて構造体を設計するための技術等を見据えて研究開発を推進する

必要がある。そのため、本研究開発では、エンドユーザーを参画研究機関（日本マグネシウム協会）のアドバイザーとしてプロジェクト内に招聘し、難燃性マグネシウム合金を利用して構造体を作製するための仕様について、アドバイスを受けつつ研究開発を推進している。

本開発テーマを担当する射水分室及び相模原分室は素形材加工技術 WG に属し、「易加工性マグネシウム材（押出材）の開発」を三協立山㈱、「高強度マグネシウム材（厚板）作製の基礎的検討」を権田金属工業㈱が担当する。易加工性マグネシウム材（押出材）の開発では、押出材としての難燃性や機械的特性を維持しつつ、製造コストの大幅な低減を達成する易加工性マグネシウム押出材の特性調査と各種製造プロセス技術を開発する。また、高強度マグネシウム材（厚板）作製の基礎的検討では、高強度厚板材の作製を実現するための凝固、熱処理、圧延加工プロセスについて調査、開発する。



図Ⅲ-2.3.2-4 革新的マグネシウム材の開発実施体制

(5) 運営管理

革新的マグネシウム材の開発に従事する全組合員（アドバイザーを含む）が参加できる分科会を毎月開催し、進捗の共有化と管理を図っている。具体的には、素形材加工技術 WG、信頼性評価 WG、接合 WG、表面処理 WG の分科会を順次開催、平成 27 年度からは全組合員が参画するプロジェクト加速委員会も開催し、各分室および再委託先の研究進捗を報告することにより研究開発を推進している（平成 29 年 3 月末までに合計 63 回の分科会を開催）。また、分科会は研究進捗を報告する場として機能するだけでなく、開発材料の機械的特性以外におさえておくべき特性、高速車両構体に難燃性 Mg 合金を適用する上で予め評価しておくべき項目の洗い出し、接合試験や耐食性試験を行う際に必要となる試験片の手配等を議論する場としても機能しており、テーマ全体の進捗を調整する場としても機能している。

さらには、(一社) 軽金属学会講演大会において、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」を立ち上げ、開発テーマの遂行で得られた成果を集中して公開する場を設定している。平成 29 年 3 月末までに計 5 回のテーマセッションを開催し、プロジェクトに関して合計 70 件の口頭発表を行い、プロジェクトの成果を対外に向けて定期的かつ積極的に配信している。また、平成 28 年 5 月には、「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」と題した学会誌特集号にて、計 10 件の解説及び論文を掲載、成果の公表に努めている。

(6)実施の効果(費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度)

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した場合の重量削減効果について、ヤング率を基準とした場合、20%程度の車両構体の軽量化を見込むことができるとの報告がある⁴⁾。構体の軽量化は、CO₂ 排出量削減に寄与するばかりで無く、車両の高速化にも大きく寄与することが知られている。仮に、新幹線の車両質量を 20%軽量化することができれば、それだけで 10~20km/時の営業速度アップを見込むことができるとの試算がある⁵⁾。ゆえに、経済的観点からは車両構体の軽量化は大きな効果を見込むことができる。

なお、新幹線車両の年間生産台数は 385 台/年(2013 年)であり、四輪車の年間生産台数(約 1,000 万台:2013 年)の 0.004%程度である^{6),7)}。また、動力として電気を利用していることを考慮すると、新幹線の重量減に伴う CO₂ 削減効果は、四輪車のそれと比較すると小さいものであると言える。

一方、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、マグネシウム展伸材の大きな需要増加を見込むことができる。例えば、車両構体(屋根・側構体、妻構体、台枠)に利用されるアルミニウム合金は 1 両当たり約 7t である。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 の需要が生まれることになる(マグネシウム置換により車両重量が 10%減少する場合)。車両製造が 1 年当たり 400 両と仮定すると(385 両:2013 年)⁶⁾、2400t の需要が生まれることになる。なお、国内におけるマグネシウム合金展伸材需要は約 700t/年(平成 26 年)であり⁸⁾、本開発テーマの成果により、仮に側構体だけでもマグネシウム合金に置き換えることができれば、それだけで国内の展伸材需要を倍増させることが可能となる。それゆえ、本開発テーマ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加速させることが実現できれば、マグネシウムの産業構造自体を変革させることも可能である。

また、マグネシウム合金はリサイクル時の再生エネルギーが比較的低い環境配慮型の材料であり、本テーマの遂行においては切屑状で固化成形利用するか廃棄物処理する切削屑を溶解可能とする鋳造法も検討することで、省資源対策と環境負荷低減を推進している。このように、リサイクルに関する技術開発も先導的位置づけとして検討も進めており、本開発テーマを通して無駄なく素材を開発し、エンドユーザー側にはエネルギー効率の向上を通じた環境負荷低減を提案できつつある。

2.3.2.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.2-2 に本開発テーマにおける第二中間目標とその達成度を示す。

「易加工性マグネシウム材（押出材）の開発」では、平成 27 年度までに第一中間目標を達成し、かつ押出加工性や押出材の機械的特性、難燃性、接合性、耐食性（表面処理性）を総合的に考慮して開発した高速押出合金 AX41 合金を開発できた。平成 28 年度は、第二中間目標の達成に向けて、当該合金の更なる高強度化を達成するプロセス技術の高度化を推進した。その結果、ラボレベルではあるが第二中間目標を達成するビレット製造プロセス及び押出材製造プロセス条件を得た。同時に、当該開発材の高速車両構体用部材への実用化を想定した実機レベルの押出材の開発を実施し、開発合金 AX41 による部分側パネル構体に使用するダブルスキン型材の試作に成功している。今後は実機レベルでの最終目標の達成を見据え、開発合金の更なる高強度化プロセス技術を構築するとともに、実大サイズの車両構体（1/1 モックアップモデル構体）を具現化する上で必要な大型・長尺ダブルスキン型材の製造プロセス技術の構築に注力する予定である。

「高強度 Mg 材（厚板）作製の基礎的検討」では、難燃性、接合性などの諸特性に加え、トレードオフの関係にある引張強さと伸びを両立できる合金として AZX811（Mg-8Al-1Zn-1Ca mass%）を開発合金とした。平成 27 年度までに第一中間目標を達成し、平成 28 年度からは板厚 6 mm 以上で引張強さ 360 MPa、伸び 15%以上、AZX311 合金と同等以上の難燃性を有する Mg 厚板材作製に関する技術開発に着手した。厚板材（板厚 6 mm）では平成 28 年度末において引張強さ 360 MPa、伸び 12%を得ることができ、第二中間目標値の達成に目処を立てた。今後は、鋳造時の溶湯清浄化技術、熱処理技術の適用に加え、圧延プロセスのチューニングにより集合組織や金属間化合物の制御を行いながら目標達成を目指す。

中板材（板厚 3 mm）は実機による圧延にて板幅 300 mm において引張強さ 357 MPa、伸び 14%を得た。目標以上の成果としては、板厚 3 mm 材において国内最大級幅の圧延材（板幅 520 mm）開発に着手し、機械的特性は現在高速車両構体に使用されている A6N01 合金相当の機械的特性を得ることができた。開発合金板材の難燃性は AZX311 合金を凌駕したことから、標準化するため JIS 規格化の提案を行った。今後は実用化を見据え幅広材の寸法精度の向上に関する取り組みを行う。

表Ⅲ-2.3.2-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
易加工性 Mg 材（押出材）の開発	引張強さ 270MPa 以上、伸び 20%以上、AZX311 同等以上の難燃性、A6N01 合金同等以上の押出速度を達成	開発合金組成（AX41 合金）にて、左記目標値を達成する押出材製造プロセス技術をラボレベルで実証。	○	

	する押出材を開発。			
高強度 Mg 材 (厚板) 作製の 基礎的検討	A7N01 合金と同等以上の熱的安定性・機械的特性を有する引張強さ 360 MPa 以上、伸び 15%以上の厚板材 (板厚 6 mm) を作製するための鑄造、圧延手法調査。中板材 (板厚 3 mm) は高強度高延性を有する幅広材 (板幅 300 mm) を作製し、工業化と標準化を加速させる。	板厚 6 mm 材は圧延スケジュールのチューニングにより引張強さ 360 MPa、伸び 12%を得て目標達成に目処を立てた。 板厚 3 mm 材では、実機を用いて板幅 300 mm において引張強さ 357 MPa、伸び 14%を得た。板幅を 500 mm までスケールアップし、更なる幅広化に着手した。	○ ◎	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.3.2-3 に本担当テーマにおける最終目標の達成見込みを示す。

「易加工性マグネシウム材 (押出材) の開発」では、最終目標を達成するには大型実働機を使った工業レベルの技術構築が必須であり、極めて難易度の高い目標設定と言える。現状はラボレベルにて目標特性をクリアする実験データが得られているものの、開発材の更なる大幅な特性向上が不可欠である。当該テーマにおいては再委託先機関との連携を強化し、開発合金組成の調整も含めて、押出用ビレットの連続鑄造技術や熱処理技術を高度化するとともに、押出材の組織制御の最適化も考慮した押出ダイスの革新的な設計開発にも注力することにより、最終目標の達成を目指す。

「高強度マグネシウム材 (厚板) 作製の基礎的検討」では、平成 29 年度までに引張強さ 360 MPa、伸び 15%を有する板厚 6 mm 材の作製に見込みが立っており、最終年度までに厚板幅広材を作製可能とする鑄造・圧延手法を調査する。高強度高延性を有する厚板幅広材については、国内のみならず世界を見ても報告例が無く、実現できれば国際的に競争可能な技術を有することとなる。圧延により厚板化を目指す場合、静水圧成分と塑性流動が乏しいために累積ひずみを大きくしても高強度高延性化は困難であることがこれまでの取り組みにより判明している。そのため、鑄造材作製時における溶湯清浄化や熱処理技術の適用、圧延時においては集合組織制御や加工プロセスのチューニングを行いながら指針を構築する。幅広化に関しては、現在、弊社所有の量産圧延機 (幅 600 mm) を用いながら技術構築している段階であり、幅 520 mm の圧延材は国内最大級幅となる。マグネシウム全体のテーマとしてのターゲットである鉄道車両構体への適用を考えた場合、幅広材であるほど接合工程が削減でき、溶接ひずみによるゆがみの低減及び接合作業に掛かるコストを削減することができる。また、断面積の大きさから押出材との競争領域となり、高強度高延性化が可能となれば

優位性が生まれる。

実用化のためには大型化に必要な作製プロセスの構築、板材の寸法精度向上、接合性及び疲労特性に関するデータ、二次加工を可能とする成形性に関する特性取得が必要となる。特に Mg に関する疲労特性についてはデータ数に乏しいため、素材メーカーとして取得し、DB 構築に寄与する。実用化に向け、開発合金板材は平成 28 年度において JIS 規格化を提案した。また、板材の作製においては、接合や表面処理といった各 WG との連携によるフィードバックから、安全性及び信頼性を兼備する高強度 Mg 材（厚板）を開発することで、最終目標の達成をより現実的なものとする。

表Ⅲ-2.3.2-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
易加工性 Mg 材（押出材）の開発	開発合金組成にてラボレベルで最終目標の機械的特性と押出速度を達成する押出材製造プロセス技術を実証（押出速度 50m/min、引張強さ 277MPa、伸び 21.5%）。	引張強さ 270MPa 以上、伸び 20%以上、AZX311 同等以上の難燃性、A6N01 同等以上の押出速度、押出材長さ 25m 以上の大型・長尺複雑断面形状を有する押出形材の製造を実現。	開発材の大型化・複雑断面形状化に伴い、特性維持が極めて困難となるが、再委託先の成果を積極的に活用・展開し、達成を狙う。
高強度 Mg 材（厚板）作製の基礎的検討	板厚 6 mm 材は圧延スケジュールのチューニングにより引張強さ 360 MPa、伸び 12%を得て目標達成に目処を立てた。 実機を用いて板厚 3 mm 材は、板幅 300 mm において引張強さ 357 MPa、伸び 14%を得た。スケールアップに伴う特性の低下を抑止出来たため、実用化を目指して、更なる幅広化に着手した。	引張強さ 360 MPa 以上、伸び 15%、AZX311 合金と同等の難燃性、板厚 6 mm 以上の厚板幅広材を作製するための鋳造、圧延手法調査。開発合金板材の社会実装へ向け、中板材は多用途展開可能とする幅広材の作製及び疲労特性の取得を行い DB 構築に寄与する。	板厚 6 mm 材においては平成 29 年度末に達成見込み。幅広化に関する知見は中板材で構築しており、得られた知見を厚板材へ活用することにより達成を目指す。

(3)研究開発の成果と意義

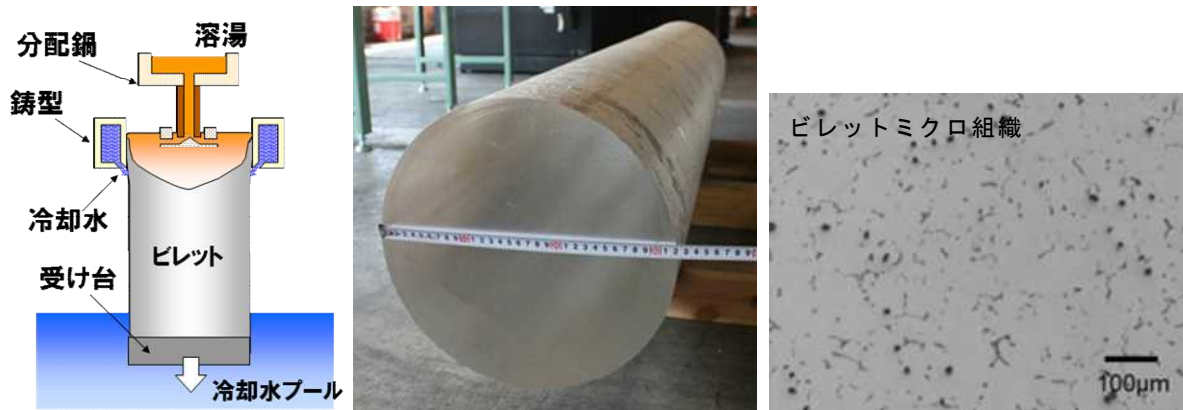
以下に本テーマ開発を担当する射水分室及び相模原分室における各研究開発の成果と意義について示す。

①易加工性マグネシウム材（押出材）の開発【射水分室】

① -1. 高速押出合金の溶解～超大径ピレット連続鋳造プロセス技術開発

平成 27 年度までに開発した、第一中間目標を達成する新規高速押出合金 AX41 に

よる超大径ビレットの連続鑄造技術の構築を推進した。具体的には、当分室にて所有する実働量産設備を活用し、量産レベルでの溶湯を作製、押出加工性に特に多大な影響を及ぼす Ca、Mn といった添加元素の高精度成分制御技術や、酸化物等の不純物を分離・除去する溶湯清浄化処理技術の高度化を実施した。その結果、各添加元素の溶解歩留まりを把握の上、添加量を高精度に制御、フラックス精錬条件や脱ガス処理条件を改良、最適化することによりビレット品質の更なる向上に繋げた。また、各鑄型サイズにおける鑄造条件を見極め、直径 ϕ 320mm では長さ 2300mm、同時 2 面鑄造を実現する DC 鑄造プロセスを確立した（図Ⅲ-2.3.2-5）。

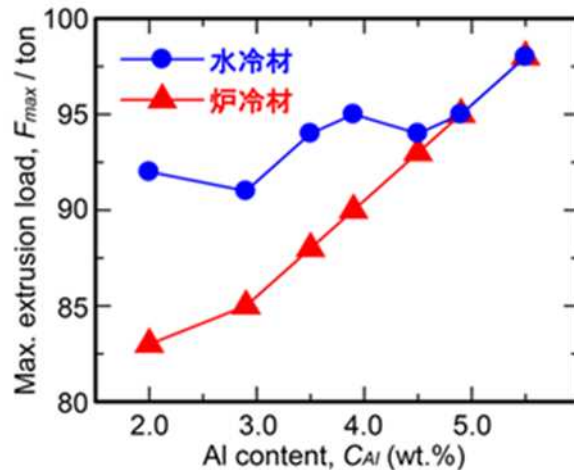


図Ⅲ-2.3.2-5 DC 鑄造法の概略と作製した AX41 合金大径 DC 鑄造ビレット（一例）

①-2. ビレット均質化処理プロセス技術開発

本研究開発では、押出加工性（押出荷重）に直接影響を及ぼすビレット均質化処理条件の最適化について検討した。再委託先機関と連携し、ビレット熱処理後の冷却速度に着目して押出加工性を向上させるメカニズム解明と処理条件の把握を試みた。実験では Ca、Mn 量一定とし、Al 量を変化させた各種 AXM 合金ビレットについて、均質化処理後に水冷もしくは炉冷を行い、押出加工に供した。その結果、Al 量が 3.9 wt.%以下では、均質化処理後の炉冷により押出材の表面状態が改善する一方、4.5 wt.%以上の Al 量では、均質化処理後の冷却条件を変えても押出材の表面状態に変化が認められないことを把握した。

また、Al 量と押出加工時の最大荷重の関係について調査した結果、Al 量が増えるほど最大押出荷重は上昇する傾向があり、Al 量：3.9 wt.%以下の場合、均質化処理後の炉冷により最大押出荷重が顕著に小さくなる傾向が認められるものの、Al 量：4.5 wt.%以上では均質化処理後に炉冷を施しても最大押出荷重に変化が認められないことが分かった（図Ⅲ-2.3.2-6）。均質化処理後の炉冷により押出材の表面状態が改善し、最大押出荷重が低下したのは、炉冷により析出物が粗大化したことで押出時の変形抵抗が小さくなったことが要因として考えられる。



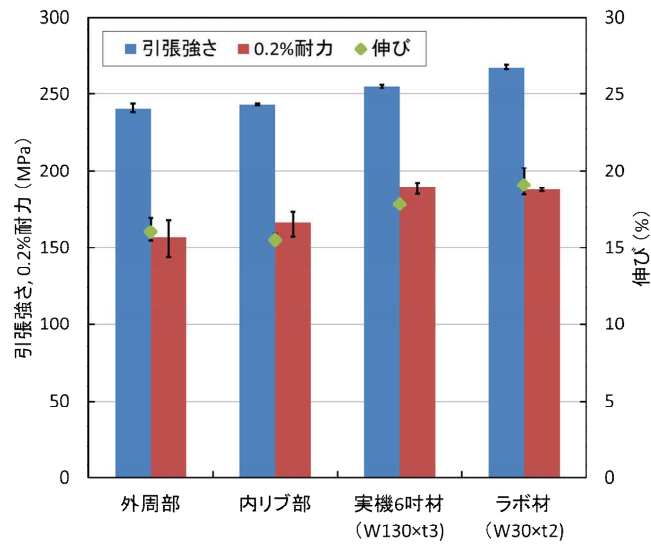
図Ⅲ-2.3.2-6 押出加工時の最大荷重に及ぼす Al 添加量の影響

①-3. 輸送機器向け構造用押出型材の高速押出加工プロセス技術開発

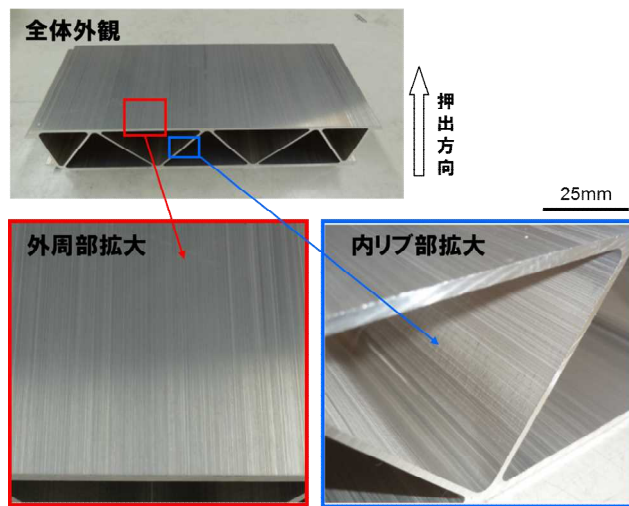
第一期中間目標を達成した開発合金 AX41 合金による、実機レベルでの高速押出加工プロセス技術の構築を推進した。前述のビレット製造プロセスにて作製した AX41 合金 DC 鋳造ビレットを押出用素材として使用し、ラボレベルで得られた押出材との各種特性の比較評価を行った。

当分室で保有する 6 インチ 1500 トン実働押出機を用いて試作した AX41 合金押出材の諸特性を調査した。押出速度は AZ31 合金以上を確保し、得られた押出材の機械的性質もラボ試作材とほぼ同等レベル（第一期中間目標値）を維持することを実証した（図Ⅲ-2.3.2-7）。しかしながら、実機 6 インチ材の機械的性質においては、異方性が認められ、特に押出平行方向と押出垂直方向の 0.2%耐力値に約 70MPa の差異が生じていることが分かった。この要因について、再委託先機関と連携し、押出材集合組織の EBSD による微視的解析を行った。その結果、実機押出材の耐力低下の要因として、実機押出材では結晶粒組織が粗大かつ比較的強い底面集合組織を呈しているため、押出垂直方向においては双晶変形の発生が活発化し、強度が低下したと推察された。

併せて、AX41 合金による車両構体への実用化を想定した複雑断面形状を有する大型中空押出型材の試作開発を推進した。当分室所有の 12 インチ 6000 トン実働押出機を使用し、従来からも検証を進めている幅 251mm、高さ 50mm の大型ダブルスキン形状の押出試作を当該開発合金にも適用した。その結果、AZ31 合金同等以上の押出速度にて外観品質及び JIS 規格を満足する高精度な型材の押出成形を実証できた（図Ⅲ-2.3.2-8）。しかしながら、図Ⅲ-2.3.2-7 でも示す通り、ダブルスキン型材の外周部及び内リブ部の機械的性質はラボ材や実機 6 インチ材に比べて低い値となっている。本要因と対策については再委託先機関と連携し、ミクロスケールでの集合組織解析を実施しながら押出ダイスの設計改良等を継続検討し、特性向上を目指す計画である。なお、ダブルスキン型材の押出成形技術の開発で得られた知見は、本 Mg プロジェクトの参画機関と連携して試作開発を進めている部分側パネル構体向け部材の試作に展開、計画通り所定のダブルスキン型材を試作供給し、開発合金 AX41 による部分側パネル構体の具現化に貢献した。



図Ⅲ-2.3.2-7 AX41 合金における各種押出材の機械的性質



図Ⅲ-2.3.2-8 試作した AX41 合金ダブルスキン材の概要

また、大型・長尺中空型材の製造プロセス技術の確立に向けて、押出型材の真直度向上技術の開発を行った。当分室所有の温間ストレッチ矯正装置を活用し、図Ⅲ-2.3.2-8 で示した大型ダブルスキン材の温間ストレッチ矯正を試行した。その結果、型材長さ 6m での温間ストレッチ矯正条件を把握、型材の曲がり量を JIS で規定される許容量 (2mm/m) の 1/4 (0.5mm/m) 以下に低減、真直度を大幅に向上させることに成功した。

①-4. 開発合金押出材の信頼性データ蓄積

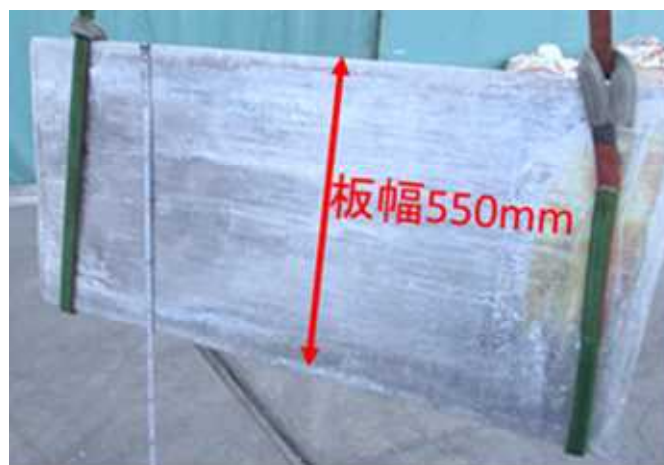
開発した新規高速押出合金による車両構体の試作開発を推進する上で、車両構体の設計時に必要となる開発合金の各種信頼性データ（疲労特性）を取得、蓄積すること

が極めて重要となる。本研究開発では、開発合金 AX41 押出材の疲労データを取得、蓄積することを目的に、押出材の疲労試験を開始、データの取得、蓄積を開始した。疲労試験では名古屋守山分室（産総研）及び明石分室（川崎重工業㈱）と連携し、押出材の平面曲げ疲労試験や回転曲げ疲労試験、軸疲労試験を効率的に行い、データの拡充、共有化を図った。今後も押出材の接合試験体を主体に各種疲労試験を継続し、開発合金による車両構体の設計情報として活用していく計画である。

②高強度マグネシウム材（厚板）作製の基礎的検討【相模原分室】

② -1. 高速圧延合金作製のための溶解・鋳造・熱処理プロセス技術開発

昨年度までに得た溶解・鋳造・熱処理技術の知見を基に、開発合金 Mg-8Al-1Zn-1Ca (mass%、以下 AZX811 合金) の厚板・幅広鋳造材作製に関する技術開発を行った。鋳造材をスケールアップしてもラボスケール同様主要成分の濃度範囲を±0.2%以内、鉄分濃度を 30ppm 未満に制御できる溶解技術を確立した。鋳造時に晶出する金属間化合物は圧延加工時の動的再結晶粒の生成サイトとなり得るため、微細分散していることが望ましい。厚板鋳造材は冷却を付与することで Mg 相の粒径は 280 μm を示し β 相及び Al-Ca 化合物を微細分散できた。一方、幅広鋳造材（図Ⅲ-2.3.2-9）は高温短時間の熱処理を施すことで、β 相及び Al-Ca 化合物を固溶、微細分散させることができ、ラボスケールで導出した熱処理技術は厚板・幅広鋳造材にも有効だった。作製した AZX811 合金は DTA により AZX311 合金以上の難燃性であることが確認できた。



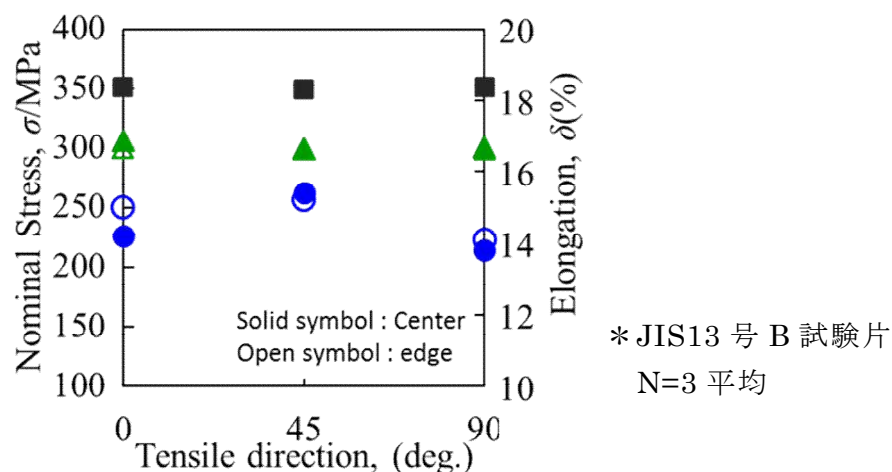
図Ⅲ-2.3.2-9 AZX811 合金幅広鋳造材外観像

② -2. 車両構体向け圧延中板開発のための加工プロセス技術開発

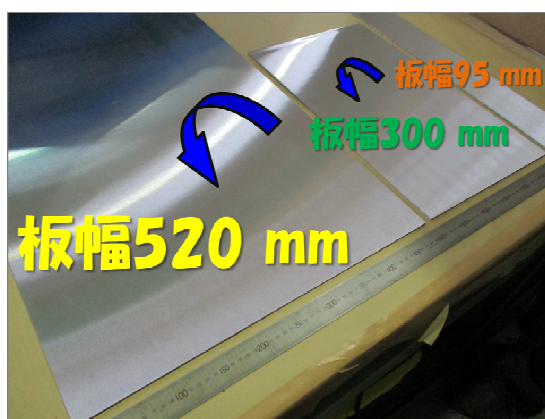
②-2-1. 難燃性 Mg 合金板厚 3 mm 幅広材の機械的特性

板厚 3 mm 材は昨年度までに開発した圧延加工プロセスの基礎的知見を基に、実機を用いた板幅 300 mm 材の加工プロセス技術開発を行った。圧延加工は粗圧延工程と仕上げ圧延工程に分け、高強度高延性化には粗圧延後の熱処理により Mg 相の粒径を 15~30 μm とすることが重要であった。このプロセスを適用することで板幅を 300 mm にスケールアップさせても引張強さは 357 MPa、伸びは 14%を示し、高強度高延

性を有する板幅 300 mm 材が作製できた。機械的特性の面内異方性も軽微であった（図Ⅲ-2.3.2-10）。実機による高強度高延性化を達成できたことから、国内最大級板幅（板幅 520 mm）圧延材の作製に着手した（図Ⅲ-2.3.1-11）。板幅中央および端部での機械的特性差は軽微であり、圧延方向に対し 0° 方向では引張強さは 330 MPa を示し、伸びは 13%であった。



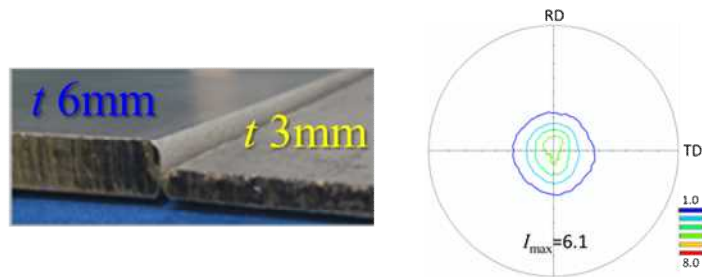
図Ⅲ-2.3.2-10 AZX811 合金板幅 300 mm 圧延板の機械的性質



図Ⅲ-2.3.2-11 AZX811 合金圧延板材の外観像

②-2-2. 難燃性 Mg 合金板厚 6 mm 厚板材の機械的特性

今年度から着手した板厚方向へのスケールアップは、板厚 6 mm 材を対象とし、高強度高延性材開発に着手した。板厚中心部において引張強さは 360 MPa を示し、伸びは 12%が得られた。板厚表面における引張強さは 356 MPa を示し、伸びは 14%であることから、板厚方向に対する強度のバラツキは小さいことがわかった。この板材を XRD および EBSD による(0002)面集合組織の測定を行うと顕著な集合組織形成は見られなかった（図Ⅲ-2.3.2-12）。



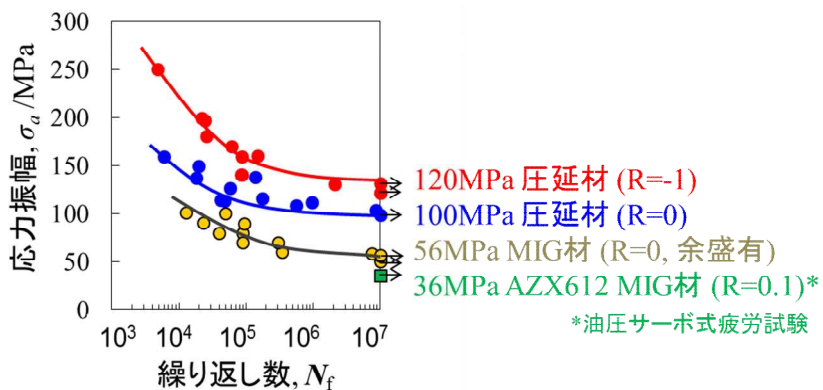
図Ⅲ-2.3.2-12 厚板圧延材の外観像及び板厚 6 mm 材の(0002)面集合組織

②-2-3. 難燃性 Mg 合金板厚 3 mm 幅広材の諸特性及び側柱の作製

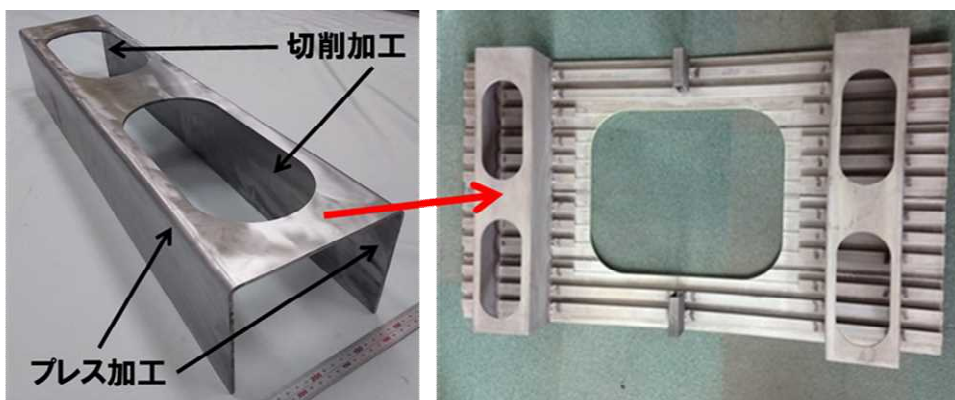
作製した板厚 3 mm 高強度高延性材の平面曲げ疲労強度は、繰返し数 10^7 回において、両振り（応力比 $R=-1$ ）で 140 MPa、片振り（応力比 $R=0$ ）で 85 MPa を示した。MIG 接合材では、余盛りを有していても $R=0$ および $R=-1$ の疲労強度は、汎用難燃性 Mg 合金以上であった（図Ⅲ-2.3.2-13）。

V 曲げ試験を行うと $r/t=1$ において加工温度 200°C から曲げ加工が可能であった。

作製及び成形性に関する知見を活用し、側パネル構体（シングルスキン）に供する側柱を作製し、側パネル構体作製に寄与した（図Ⅲ-2.3.2-14）。



図Ⅲ-2.3.2-13 板厚 3 mm 高強度高延性材の疲労試験（C 方向）



図Ⅲ-2.3.2-14 AZX811 合金側柱及びシングルスキン形材の側パネル構体の外観⁹⁾

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.2-4 に本テーマ開発において得られた論文、外部発表等の成果を示す。先にも示した通り、学会発表を中心に成果の外部発表を継続するとともに、平成 28 年度は早期実用化（鉄道車両以外の用途開発）を想定し、プレス取材等による発表や雑誌掲載等、研究開発成果を積極的かつ戦略的に広くアピールしている。

表Ⅲ-2.3.2-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
H25FY	1	0	1	0	0	0	3	0	0
H26FY	1	0	8	3	0	0	5	3	1
H27FY	2	0	21	2	2	2	5	1	1
H28FY	1	0	18	3	3	8	4	2	1
合計	5	0	48	8	5	10	17	6	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）

(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）

表Ⅲ-2.3.2-5 に本テーマ開発において得られた知的財産成果を示す。

表Ⅲ-2.3.2-5 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	1	0	0
H27FY	1	0	0
H28FY	1	0	0
合計	3	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.3.3[テーマ番号 17]高強度マグネシウム材(薄板)の開発

2.3.3.1 テーマの概要

(1)背景と目的

マグネシウムは、実用金属の中で最も軽量であり、また優れた比強度を有することから、輸送機器のための新たな構造材料として注目されている。しかし、汎用のマグネシウム合金は発火温度が低く、固相線温度よりも高い温度に昇温すると発火する材料として認識されており、特に、不燃・難燃特性の確保が必須である鉄道車両部品や航空機部品としての適用は困難とされてきた。

近年、マグネシウム合金の発火温度を高める合金開発が進められ、その結果、汎用マグネシウム合金（Mg-Al 系合金等）にカルシウムを添加し、発火温度を飛躍的に高めた「難燃性マグネシウム合金」が開発された。本合金は優れた難燃特性を有し、日本鉄道車両機械技術協会の車両材料燃焼試験において「不燃材」の認定も受けていることから、鉄道車両用部材への適用も、小型鋳造部品に関しては進みつつある¹⁾。

今後、型材や板材を組み合わせて「大型構造体」を作り込むための要素技術を開発していく必要がある。

(2)位置付け、目標値

現在、高速車両構体に利用されているアルミニウム合金には2種類あり、汎用型のA6N01合金と高強度型のA7N01合金がある。A6N01合金に関しては屋根板、幕板、側ハリ等に利用され、A7N01合金に関しては台枠や枕ハリ等に利用されている。そこで、本研究開発では、A6N01合金に匹敵する機械的特性と生産性（押し出し速度）を有する難燃性マグネシウム合金押し出し材（易加工性マグネシウム材）と、A7N01合金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展伸材（押し出し材、板材（薄板・厚板））（高強度マグネシウム材）を開発することを目指す。

表Ⅲ-2.3.3-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
高強度難燃性 新合金の開発	<ul style="list-style-type: none">引張強さ$\geq 350\text{MPa}$伸び$\geq 13\%$AZX311 と同等以上の難燃性	<ul style="list-style-type: none">引張強さ$\geq 360\text{MPa}$伸び$\geq 15\%$AZX311 と同等以上の難燃性	平成 29 年度に後半 5 年間の課題と目標 設定を計画	7000 系 Al 合 金以上の比 強度と伸び を実現

(3)全体計画

全体プロジェクトの中では、材料開発と並行して接合技術、表面処理技術開発を進めることで、平成 32 年頃の早期実用化を目指す。

(4)実施体制

高強度マグネシウム合金薄板材の研究開発は大阪分室（住友電気工業株式会社）で

実施している。

(5) 運営管理

マグネシウムの研究に従事する組合員（アドバイザーを含む）が全員参加できる分科会を毎月開催し、具体的には、素形材加工技術 WG、接合 WG、表面処理 WG、信頼性評価 WG の分科会を 4 ヶ月に 1 回開催し、各分室および再委託先の研究進捗を報告することにより、素材開発、接合技術、表面処理、信頼性評価技術の開発を共同で推進している。

(6) 実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

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した場合の重量削減効果について、ヤング率を基準とした場合、20%程度の車両構体の軽量化を見込むことができるとの報告がある²⁾。構体の軽量化は、CO₂排出量削減に寄与するばかりで無く、車両の高速化にも大きく寄与することが知られている。仮に、新幹線の車両質量を 20%軽量化することができれば、それだけで 10~20km/時の営業速度アップを見込むことができるとの試算がある³⁾。ゆえに、経済的観点からは車両構体の軽量化は大きな効果を見込むことができる。

2.3.3.2 研究開発成果

(1) 中間目標の達成度

表 III-2.3.3-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
高強度難燃性 新合金の開発	・引張強さ $\geq 360\text{MPa}$ ・伸び $\geq 15\%$ ・AZX311 と同等以上の難燃性	・双ロール鋳造した AX81S 合金にて圧延プロセス条件(圧延温度、圧下率、熱処理温度など)を適正化することにより圧延まま材で目標値を上回る特性を示すことを試験片レベルで解明。パイロット機での目標達成に目途付け。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.3.3-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
高強度難燃性 新合金の開発	引張強さ $\geq 360\text{MPa}$ 、伸び $\geq 15\%$ 、 難燃性：AZX311 と同等以上の圧 延材を試験片レベルで達成してい る。	平成 29 年度に後半 5 年間の課題と目標 設定を計画	

(3)研究開発の成果と意義

Al 添加量の大きく異なる Mg-Al-Ca-Mn 系合金双ロール鋳造材に圧延加工を施し、圧延加工後の時効硬化特性や機械的性質に及ぼす Al 添加量の影響を調べた。具体的には、Al を 0.7 mass% もしくは 9.0 mass%、Ca および Mn をそれぞれ 0.6 mass% および 0.15 mass% 添加した合金 (以下 0.7Al 合金、9.0Al 合金) を対象とした。検討合金の圧延まま材の機械的特性を調査した結果、0.7Al 合金は、仕上げ圧延温度 300℃ の場合、0.2 %耐力 268MPa の高い強度特性を示すが、仕上げ圧延温度を低く設定すると延性は大きく低下することを確認した。一方、9.0Al 合金の場合、仕上げ圧延温度を低く設定しても、10 %程度の延性を維持しつつ、350 MPa の引張強さと 295 MPa の高い 0.2 %耐力を得られることを明らかにした。さらに、検討合金の溶体化処理材およびピーク時効材の機械的特性を調査した結果、両合金とも溶体化処理を施すことで、20 %以上の延性が得られることを確認した。また、0.7Al 合金の場合、時効処理を施しても、25 %程度の高延性を維持したまま、0.2 %耐力は 80 MPa も向上することを明らかにした。一方、9.0Al 合金の時効処理に伴う 0.2 %耐力の強化量は 60 MPa と、0.7Al 合金よりも低く、さらに、延性は溶体化処理材の 1/2 以下にまで低下することを確認した。また、圧延 1 パスあたりの圧下率を大きくすることで、最終目標である引張強さ 360MPa 以上、伸び 15%以上の高強度、高伸びが得られることが明らかとなった。

以上より、Al を 7~10mass%程度、Ca を 0.5~1.5mass%程度添加した高 Al マグネシウム合金が難燃性高強度マグネシウム材として有望であると判断した。しかしながら、大きな圧下率での圧延は量産時には設備対応が難しいため、量産可能な水準でプロセス条件を検討する必要がある。1 パスあたりの圧下率(板厚減少量/圧延前板厚)及び圧延温度、熱処理温度のプロセス条件を最適化することで、量産可能な製造条件で引張強さ 360MPa、伸び 15.5%と平成 29 年度目標値を達成した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.3-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	1	0	0	0	0	0	1
H27FY	0	0	3	0	0	0	0	0	1
H28FY	0	0	3	0	0	0	0	0	2
合計	0	0	7	0	0	0	0	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）

(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）

表Ⅲ-2.3.3-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	0	0	0
H28FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.3.4[テーマ番号 18]高強度マグネシウム材（押出材）の開発

2.3.4.1 テーマの概要

(1)背景と目的

マグネシウムは、実用金属の中で最も軽量であり、また優れた比強度を有することから、輸送機器のための新たな構造材料として注目されている。しかし、汎用のマグネシウム合金は発火温度が低く、固相線温度よりも高い温度に昇温すると発火する材料として認識されており、特に、不燃・難燃特性の確保が必須である鉄道車両部品や航空機部品としての適用は困難とされてきた。

近年、マグネシウム合金の発火温度を高める合金開発が進められ、その結果、汎用マグネシウム合金（Mg-Al 系合金等）にカルシウムを添加し、発火温度を飛躍的に高めた「難燃性マグネシウム合金」が開発された。本合金は優れた難燃特性を有し、日本鉄道車両機械技術協会の車両材料燃焼試験において「不燃材」の認定も受けていることから、鉄道車両用部材への適用も、小型鋳造部品に関しては進みつつある¹⁾。

今後、難燃性マグネシウム合金を用いて輸送機器のさらなる軽量化を目指すためには、合金特性のさらなる高性能化（強度・延性の改善、生産性の改善）を目指すと同時に、型材や板材を組み合わせて「大型構造体」を作り込むための要素技術を開発していく必要がある。具体的には、大型展伸材（型材・板材）を製造するためのプロセス技術、大型展伸材を組み立てるための接合技術、及び耐食性を確保する技術が必要である。そこで、本研究開発では、難燃性マグネシウム合金展伸材を鉄道車両用部材（高速車両構体）に適用するための基礎技術を構築することを目的とし、難燃性マグネシウム合金の材料特性（機械的特性、生産性）をさらに改善するための合金設計技術開発、開発した合金の信頼性（難燃性、疲労特性、接合特性、耐食性等）を確保するための特性改善技術、評価技術の構築を目指す。

(2)位置付け、目標値

長洲分室では、高速車両構体のうち、梁材、柱材といった、より高い機械的特性を要求される部材への適用を想定した、高強度材の研究開発を行っている。

表Ⅲ-2.3.4-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
高強度マグネシウム材の開発	引張強度：350MPa 以上 伸び：13% 以上 難燃性： AZX311 以上を満足 する合金の開発	引張強度：360MPa 以上 伸び：15%以 上 難燃性： AZX311 以上 を満 足する合金の開発	平成 29 年度目標値 を実機を用いた押 出し材で実現す る。	アルミニウム合金高強度材 A7N01 に匹敵する機械的特性（引張強度：370 MPa 伸び：13% ²⁾

(3)全体計画

本研究開発では、高速車両構体に利用されているアルミニウム合金(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展伸材を開発することを目標としている。

(4)実施体制

本研究開発では、マグネシウムに関連する 8 つの分室が共同で難燃性マグネシウム合金展伸材を鉄道車両用部材（高速車両構体）に適用するための基礎技術を構築することを目指す。平成 27 年度までは、新規合金の開発・評価を主眼として、素材の開発を担当する「材料 WG」、難燃性マグネシウム合金の信頼性を改善・評価するための技術を開発する「接合 WG」、「耐食性 WG」、「発火特性 WG」を形成し、各 WG が連携して課題の解決を目指した。平成 28 年度以降は、平成 27 年度までに開発した合金を対象として、複雑形状部材の加工・製造技術を開発する「素形材加工技術 WG」、信頼性（疲労特性・破壊特性等）を系統的に明らかにする「信頼性評価・標準化 WG」、表面処理技術の構築や耐食性を系統的に明らかにする「表面処理 WG」、接合技術の構築を目指す「接合 WG」を構築し、研究開発を遂行している。

研究開発を推進するにあたっては、エンドユーザー（鉄道会社・車両メーカー）が低コストかつ安全に構体を製造するための技術や、マグネシウム合金を用いて構造体を設計するため技術等を統合的に構築していく必要がある。そのため、本研究開発では、エンドユーザーをオブザーバーとして招聘し、マグネシウム合金を利用して構造体を作製するための仕様について、アドバイスを受けつつ研究開発を推進している。長洲分室では、高強度材の研究開発を担当し、押出し加工工程における研究開発を不二ライトメタル㈱を、溶解・鋳造工程における研究開発を再委託 1 機関が行う。また、ラボサイズの実験を名古屋守山分室（(国研)産業技術総合研究所）が行い、科学的根拠に基づく合金の設計指針、プロセス最適化において連携する。

(5)運営管理

マグネシウムの研究に従事する組合員（アドバイザーを含む）が全員参加できる分科会を毎月開催している。具体的には、材料 WG、接合 WG、表面処理 WG の分科会を 3 ヶ月に 1 回開催し（発火特性 WG は不定期開催）、各分室および再委託先の研究進捗を報告することにより、素材開発、信頼性評価技術の開発を共同で推進している。なお、平成 27 年 3 月末までに、材料 WG、接合 WG、耐食性 WG の分科会を各 5 回ずつ、計 15 回開催している。

分科会は、研究進捗を報告する場として機能するだけでなく、合金組成を選定する上で機械的特性以外に押えておくべき特性の抽出、高速車両構体に難燃性マグネシウム合金を適用する上で予め評価しておくべき項目の洗い出し、接合試験や耐食性試験を行う際に必要となる試験片の手配等を行う場としても機能しており、プロジェクトの進捗を調整する場としても機能している。

また、軽金属学会秋期講演大会（平成 26 年 11 月開催、東京工業大学）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

設立し、プロジェクトで得られた成果を公の場で議論する機会を設定した。テーマセッションではプロジェクトに関する口頭発表が計 17 件報告された。上記テーマセッションを定期的に立ち上げ（年 2 回を予定）、プロジェクトの成果を積極的に配信している。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

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した場合の重量削減効果について、ヤング率を基準とした場合、20%程度の車両構体の軽量化を見込むことができるとの報告がある³⁾。構体の軽量化は、CO₂ 排出量削減に寄与するばかりで無く、車両の高速化にも大きく寄与することが知られている。仮に、新幹線の車両質量を 20%軽量化することができれば、それだけで 10~20km/時の営業速度アップを見込むことができるとの試算がある⁴⁾。ゆえに、経済的観点からは車両構体の軽量化は大きな効果を見込むことができる。

なお、新幹線車両の年間生産台数は 385 台/年（平成 25 年）であり、四輪車の年間生産台数(約 1,000 万台：平成 25 年)の 0.004%程度である^{5,6)}。また、動力として電気を利用していることを考慮すると、新幹線の重量減に伴う CO₂ 削減効果は、四輪車のそれと比較すると小さいものであると言える。

一方、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、マグネシウム展伸材の大きな需要増加を見込むことができる。例えば、車両構体（屋根・側構体、妻構体、台枠）に利用されるアルミニウム合金は 1 両当たり約 7t である。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 の需要が生まれることになる（Mg 置換により車両重量が 20%減少する場合）。車両製造が 1 年当たり 400 両と仮定すると（385 両：平成 25 年）⁵⁾、2,400t の需要が生まれることになる。なお、国内におけるマグネシウム合金展伸材需要は約 700t/年（平成 26 年）であり⁷⁾、プロジェクトの成果により、仮に、側構体だけでもマグネシウム合金に置き換えることができれば、それだけで、国内の展伸材需要を倍増させることが可能となる。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加速させることができれば、マグネシウム合金産業構造自体を変革させることが可能である。

2.3.4.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.4-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
高強度マグネシウム材の開発	引張強度：360MPa 以上 伸び：15%以 上 難燃性： AZX311 以上 を満	引張強度：360 MPa 伸 び 15%以上 難燃性： AZX311 以上 の特性を 発現する合金を開発した	○	

	足する合金の開発			
--	----------	--	--	--

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.3.4-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
高強度マグネシウム材の開発	引張強度：360 MPa 以上 伸び：15%以上 難燃性：AZX311 以上の特性発現をラボスケールで達成	平成 29 年度目標値を実機を用いた押し出し材で実現する。	要素技術の高度化によって達成可能

(3)研究開発の成果と意義

2015 年度までの研究開発によって、好適であると判断した高濃度に Al を添加した高強度難燃性 Mg 合金 AZX912(Mg-9wt%Al-1wt%Zn-2wt%Ca)合金について、ラボスケールにおいて、より詳細にそれぞれの添加元素が特性に及ぼす影響の調査と、熱処理条件の調査を行い、平成 29 年度目標値の特性を超える引張り強度、伸びを達成し、当該開発合金を AX92 とした。

AX92 について、溶解鑄造装置及び押し出し機のそれぞれ生産実機を用いて鑄造材及び押し出し材を作製し、その分析評価を行うことでラボ機と生産実機の違いの把握を試みた。

当該合金の組織はラボスケールにおいては α -Mg 母相と Al-Ca 化合物のみで組織が構成されているが、生産実機スケールにおいては、前述の 2 種に加えて Mg-Al β 相が確認された。Mg-Al β 相は押し出し方向と平行に伸長したような形状を有していた。

得られた押し出し材を引張試験に供し、引張試験片破断面近傍の組織観察を実施した。粗大な Mg-Al β 相及び Al-Ca 化合物が内部割れを起こしており、特に Mg-Al β 相が破壊起点となっていることが分かった。そのため、これを改善する調質条件探査を行い、適正な調質条件を導出した。

また、押し出し機の実機を用いて、種々の押し出し条件にて押し出し試験を実施し、押し出し温度・速度等の押し出し条件と AX92 の押し出し挙動の関係性を調査・把握した。その結果、AX92 は、従来のマグネシウム合金と比較すると適正な押し出し条件範囲が非常に狭く、良好な押し出し材断面を得るためには、押し出し条件の導出及びダイス設計が重要であることが分かった。

昨年度に作製した AZX611 のシングルスキンパネル用のダイスと同じ設計のダイスを用いて、開発合金 AX92 のシングルスキンパネル材の作製を試みた。前述の押し出し条件探査で得られた知見を参考に、最も押し出し成形性が良好であると考えられる条件で押し出しを実施したところ、リブの端部において、ひび割れが発生した。そのため、さらなる押し出し条件の精査を行い、このひび割れを改善した。

また、押し出し成形された材には、リブ側とは逆方向に反りが出ている問題が確

認められなかったこの形状不良について、ダイスの設計変更を検討した結果、反りや割れのない正常な AX92 シングルスキンパネル型材の取得に成功した。また、ダイス設計を変更した結果、押し出し速度も向上し、型材端部の梨地状部分も昨年度作製した AZX611 シングルスキンパネル型材より低減することに成功した。

さらに、導出した適正な各種製造条件にてパイロット及び生産実機で鋳造及び押出材を作製し、その分析・評価を行った。これにより、ラボスケール材の高い機械的特性を発現させるためのプロセス改善の指針を得ることが出来た。



図Ⅲ-2-3.4-1 AX92 合金のシングルスキンパネル型材写真

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.4-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	2	0	0	0	0	0	1
H27FY	0	0	3	0	0	0	0	0	1
H28FY	2	0	2	0	0	0	0	0	1
合計	2	0	7	0	0	0	0	0	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）

(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）

表Ⅲ-2.3.4-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT出願 [※]
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	0	0	0
H28FY	1	0	0
合計	1	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.3.5[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

2.3.5.1 テーマの概要

(1)背景と目的

マグネシウムは、実用金属の中で最も軽量であり、また優れた比強度を有することから、輸送機器のための新たな構造材料として注目されている。しかし、汎用のマグネシウム合金は発火温度が低く、特に、不燃・難燃特性の確保が必須である鉄道車両部品や航空機部品としての適用は困難とされてきた。近年、汎用マグネシウム合金（Mg-Al系合金等）にカルシウムを添加し、発火温度を飛躍的に高めた「難燃性マグネシウム合金」が開発された。本合金は優れた難燃特性を有し、日本鉄道車両機械技術協会の車両材料燃焼試験において「不燃材」の認定も受けていることから、鉄道車両用部材への適用も、小型鋳造部品に関しては進みつつある。

今後、難燃性マグネシウム合金を用いて輸送機器のさらなる軽量化を目指すためには、合金特性のさらなる高性能化（強度・延性の改善、生産性の改善）を目指すと同時に、型材や板材を組み合わせて「大型構造体」を作り込むための要素技術を開発していく必要がある。そこで、本研究開発では、難燃性マグネシウム合金の材料特性（機械的特性、生産性）をさらに改善するための合金設計技術開発、構造体を作製するためのプロセス技術開発、その信頼性（難燃性、疲労特性、耐食性）を確保するための評価技術及びデータベース構築を統合的に実施する。

(2)位置付け、目標値

小牧分室（大日本塗料株式会社+3つの再委託機関）では、難燃性マグネシウム合金の信頼性を確保するための評価技術の構築することを目的として、屋外環境で難燃性マグネシウム合金展伸材を使用する際に耐食性を保証するための評価技術（評価基準）を構築する。具体的には、母材および表面処理材を対象として、実環境を想定した大気暴露試験及び腐食促進試験を実施し、実環境における耐食性、表面処理手法の効果に関するデータを取得する。また、大気暴露試験と腐食促進試験の結果を照合することにより、実用に則した促進試験手法を提案する。さらに、その過程において、難燃性マグネシウム合金大型展伸部材に耐食性を付与するために最適な表面処理方法を構築し提案する。また、難燃性マグネシウム合金表面処理材の腐食・耐食メカニズムを明らかにする。以下に、担当する研究内容について記す。

表Ⅲ-2.3.5-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
暴露試験	大気暴露試験 1 年目と追加試験のデータを取得。データ整理の実施。	大気暴露試験 3 年目のデータ取得とデータ整理の実施。 新たに既存合金のみならず平成 28 年度	データベースの完成。	難燃性マグネシウム合金を屋外利用する基準を構築するために不可

		の新規開発合金も評価開始する。)		欠なデータ。
促進試験の策定と表面処理の適正化	大気暴露試験、促進試験の照合を行い、屋外で得られた結果に相関する結果を再現するための、腐食促進試験法を提案。	策定した腐食促進法を用いて、表面処理膜（下地処理・塗装膜）の最適化を達成する。（母材としては平成28年度の新規開発合金を利用する。）また接合部位の腐食性評価も実施する。	最適化した表面処理法を対象として、大型部材に適用可能な施工技術を開発する。	既存の表面処理膜の性能を評価する上で促進試験法の策定は不可欠。また、表面処理法の最適化も、難燃性マグネシウム合金を屋外利用するためには不可欠。
耐食メカニズムの解明と防食効果の検証	化成処理皮膜の特性評価と防食効果の検証。	最適化した化成処理皮膜の特性評価と防食効果の検証。（母材として開発合金を利用する。）	開発した表面処理膜の特性評価と腐食メカニズムの検証終了。	表面処理膜（特に下地処理）を最適化するためには被膜構造の解明は不可欠。

(3)全体計画

本研究計画では、難燃性マグネシウム合金の信頼性を確保するための評価技術の構築することを目的として、屋外環境で難燃性マグネシウム合金展伸材を使用する際に耐食性を保証するための評価技術（評価基準）を構築する。

目標：難燃性Mg合金の評価手法(腐食性)の確立と腐食メカニズムの解明

- 【課題①】 暴露試験： 開発の難燃性マグネシウム合金は屋外で使用されることが前提となるので、促進試験の指標とする為のデータ取りを実施する。
- 【課題②】 促進試験： 難燃性マグネシウム合金が大型「材」として使用する際に、使用環境を想定した、促進試験で耐食性を保証するための評価技術をする。
平成28年度以降は、開発した促進試験法を利用して表面処理膜の最適化を行う。
- 【課題③】 表面処理メカニズムの解明： 難燃性マグネシウム合金の皮膜特性および耐食性を既存データと比較し、皮膜の耐食性メカニズムを解明する。

研究開発項目		研究概要および目標
①暴露試験	①宮古島(沖縄) ②銚子	腐食性試験の指標とする為のデータを、高温高湿度下の宮古島と塩害地区の銚子にて収集
②促進試験	③屋外との相関性	屋外試験の結果と相関性のある試験法の確立とデータ収集
	④加速促進試験	特定作業条件に於ける合金素材間の耐食性比較を短時間に行う為の設定条件を決める為のデータ収集
③表面処理メカニズム解明	⑤皮膜の耐食性メカニズムの解明	難燃性マグネシウム合金の表面処理材の皮膜特性と耐食性のデータから皮膜の耐食性メカニズムを解明

図Ⅲ-2.3.5-1 小牧分室における技術開発の全体計画

この研究開発項目を達成するために必要な計画を図Ⅲ-2.3.5-1に示した。

研究開発目標①「暴露試験」に関しては、宮古島（沖縄）および銚子において大気環境暴露試験を実施し、腐食性促進試験の指標となる基本データ（宮古島→高温多湿環境、銚子→塩害環境）を収集する。

研究開発目標②「促進試験」に関しては、塩水噴霧試験、塩水浸漬試験、サイクル試験等、各種促進試験を難燃性マグネシウム合金母材および表面処理材に実施し、大気暴露試験と照合を行うことにより、屋外環境を想定した促進試験法を提案する。

また、平成28年度以降は、確立した促進試験法を用いて、大型車両構体に適した表面処理被膜(化成処理+塗料)の最適化を実施している。

研究開発目標③「表面処理メカニズム解明」に関しては、電気化学的手法や表面処理被膜の表面分析を介して、難燃性マグネシウムの腐食メカニズムを究明すると共に表面処理による効果特性を明らかにする。この際には、促進試験のデータ及び暴露に於ける腐食生成物の組成・構造を比較し、腐食メカニズムを解明する。なお、平成27年度までは、対象とする母材は既存難燃性マグネシウム合金（AZX611合金やAZX612合金）とし、平成28年度以降、材料WGにて新たに開発される新規開発難燃性マグネシウム合金を対象とする。

(4)実施体制

本研究開発体制は、これまで6つの分室が共同で難燃性マグネシウム合金展伸材を鉄道車両用部材（高速車両構体）に適用するための基礎技術を構築することを目指してきたが、その発展的見直しから、平成28年度より実施体制を4つのWG体制に変更している。そこでは、素形材の加工開発を担当する「素形材加工技術WG」、開発

材料の信頼性と標準化を目指す「信頼性・標準化 WG」、接合技術を開発する「接合 WG」、耐食性並びに表面処理を担当する「表面処理 WG」にて、各 WG が連携して課題の解決を目指す。

「表面処理 WG」では、小牧分室が主体となり、マグネシウム合金母材および表面処理材の耐食性を評価するための評価基準の策定と共に、及び耐食性の向上を目指す。この研究においては研究開発項目①大気暴露試験の実施を実施しデータ収集を行うと共に、データ解析を踏まえ研究開発項目②大気暴露試験と相関のある腐食促進試験方法の確立を目指す。また、塗装下地処理としての化成処理の最適化・それに合わせた塗料の最適化、陽極酸化皮膜の皮膜特性調査をも実施する。更に暴露結果等を基に研究開発項目③皮膜の特性調査、及び腐食メカニズムの検証を実施する。

一方で、他の WG との関係も重要視しながら開発を進めており、具体的には平成 28 年度に新規開発されたマグネシウム合金の評価の為「素形材加工 WG」と、接合の耐食性評価の為「接合 WG」と、連携を取り評価と開発を進めている。

なお、開発した合金を実用化するにあたっては、エンドユーザー（鉄道会社・車両メーカー）が低コストかつ安全に開発合金を利用するための技術、および開発した材料を用いて構造体を設計するため技術等を見据えて、研究開発を推進する必要がある。そのため、本研究開発では、エンドユーザーを参画研究機関（日本マグネシウム協会）のアドバイザーとしてプロジェクト内に招聘し、難燃性マグネシウム合金を利用して構造体を作製するための仕様について、アドバイスを受けつつ研究開発を推進している。

(5) 運営管理

マグネシウムの研究に従事する組合員（アドバイザーを含む）が全員参加できる分科会を毎月開催してきており、平成 29 年度以降も同様に討議を継続する予定である。具体的には、前述した実施体制の中で、「素形材加工 WG」「表面処理 WG」「接合 WG」「信頼性・標準化 WG」の 4WG が、2G 毎に隔月開催する分科会にて、各分室およびその再委託先の研究進捗を報告すると共に、非担当の WG ではその情報を聴講・質疑応答を重ねてゆく。この様にして、素材開発、信頼性評価技術の開発につき情報共有しながら推進してきている。分科会は、研究進捗を報告する場として機能するだけでなく、合金組成を選定する上で機械的特性以外に押さえておくべき特性の抽出、高速車両構体に難燃性マグネシウム合金を適用する上で予め評価しておくべき項目の洗い出し、接合試験や耐食性試験を行う際に必要となる試験片の手配等を行う場としても機能しており、プロジェクトの進捗を調整する場としても機能している。

また、軽金属学会秋期講演大会等でもテーマセッションを設立し、プロジェクトで得られた成果を公の場で議論する機会を設けてきた。今後も上記テーマセッションを定期的に継続し（年 2 回）、プロジェクトの成果を積極的に発信していく。

(6) 実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

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した場合の重量削減効果について、ヤング率を基準とした場合、20%程度の車両構体の軽量

化を見込むことができるとの報告がある¹⁾。構体の軽量化は、CO₂ 排出量削減に寄与するばかりで無く、車両の高速化にも大きく寄与することが知られている。仮に、新幹線の車両質量を 20%軽量化することができれば、それだけで 10～20km/時の営業速度アップを見込むことができるとの試算がある²⁾。ゆえに、経済的観点からは車両構体の軽量化は大きな効果を見込むことができる。

一方、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、マグネシウム展伸材の大きな需要増加を見込むことができる。例えば、車両構体（屋根・側構体、妻構体、台枠）に利用されるアルミニウム合金は 1 両当たり約 7t である³⁾。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 の需要が生まれることになる（置換により車両重量が 10%減少する場合）。車両製造が 1 年当たり 400 両と仮定すると（385 両：平成 25 年）³⁾、2400t の需要が生まれることになる。なお、国内におけるマグネシウム合金展伸材需要は約 700t/年(平成 26 年)であり⁴⁾、プロジェクトの成果により、仮に、側構体だけでもマグネシウム合金に置き換えることができれば、それだけで、国内の展伸材需要を倍増させることが可能となる。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加速させることができれば、マグネシウム合金産業構造自体を変革させることが可能である。

2.3.5.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.5-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
暴露試験	大気暴露試験 3 年目と追加試験のデータを取得。データ整理の実施。 新たに既存合金のみならず平成 28 年度の新規開発合金も評価開始する。	既存マグネシウム合金の 3 年目の暴露試験板を回収し、評価と共に平成 28 年度には新規開発合金の暴露懸架を開始した。	△	
難燃性マグネシウム合金の塗装処理膜の耐腐食促進試験法の選定 難燃性マグネシウム合金の塗装処理膜の最適化	平成 28 年度の新規開発合金を母材として表面処理膜（化成処理・塗装膜）の最適（CCT20 サイクル、SST 500 時間）を達成する。	腐食促進試験方法の策定は平成 26 年度で終了。平成 27 年度からは策定試験方法ならびに既存難燃性マグネシウム合金上で CCT20 サイクル、SST500 時間の最適	△	

	また、接合部位の腐食性評価も実施する。	化を実施。 平成 29 年度は新規開発マグネシウム合金への適正化、並びに合金接合部（複数の接合手法）での評価を開始する。		
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	開発合金を含めた陽極酸化膜の種々の腐食促進試験とその評価、および暴露試験の 3 年目の評価のまとめ。	既存マグネシウム合金の陽極酸化膜の種々の腐食促進試験において 480 時間までの腐食面積の評価を実施。また、平成 27 年度回収の暴露試験板に於ける腐食減量、浸食深さ等のデータ確認を実施。	△	
難燃性マグネシウム合金表面処理材の耐食メカニズムの解明	陽極酸化および化成処理皮膜の形成および耐食メカニズムの解明。	腐食メカニズムの解明はほぼ終了。屋外大気暴露における、各種促進暴露との挙動の違いや、暴露条件差での腐食挙動についても究明。今後、新開発合金について腐食速度差の究明及び化成処理の組成と耐食性の関係を究明中。	△	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.3.5-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標	達成見通し
暴露試験	平成 26 年度に懸架を開始した既存マグネシウム合金の 3 年目の大気暴露の板は回収し、母材の腐食量並びに塗装品の外観チェック終了。腐食深さ、詳細チェックを継続中。残りの板の暴露試験は継続。 腐食生成物の分析についても継続中。平成 28 年度新規開発合金の評	平成 28 年度新規開発合金の結果も含めて、データベースの完成。	現状の調査を継続できれば達成できる予定。

	価をスタート。		
促進試験の策定と表面処理の適正化	促進試験法の策定は、平成 27 年度に終了。これに基づき平成 28 年度は大型車両塗装に向けての表面処理（化成処理＋塗装）の適正化につき既存マグネシウム合金をもとにレベルアップを実施した。今後は平成 28 年度開発合金並びにその接合部位に対する適正評価を実施する。	最適化した表面処理法を対象として、大型部材に適用可能な施工技術を開発する。	概ね達成見込みであるが、一部の開発合金に対しては腐食性が既存合金に比べ促進試験では劣る傾向を確認。マグネ素材の改良と表面処理のレベルアップにて改善予定。
腐食メカニズムの解明と防食効果の検証	大気暴露並びに各種促進試験の結果（腐食生成物の解析）より腐食メカニズムの解明は終了。併せて、各種腐食試験や暴露状況の違いによる腐食状態の差につきその根拠についても解析した。 その結果に基づき、今後表面処理(化成処理膜)の有効性につき、その根拠の検証を実施する。	開発した表面処理膜の特性評価と腐食メカニズムの検証。	マグネシウム母材の腐食挙動については掌握済みであり、今後適正化した表面処理手法の有効性を解析するステップに移行するため達成見込みありとする。 但し、上記の一部新規開発合金の腐食挙動次第でもあり、その検証にも注力。

(3)研究開発の成果と意義

平成 28 年度は主に表面処理（化成処理＋塗装）につき従来には無かったマグネシウム車両構体への適用に際して、大型車両塗装故の独自の課題・特徴も加味しての適正化（レベルアップ）を実施した。

また平成 25 年度に開始した屋外大気暴露に於けるマグネシウム合金（未塗装）の腐食状態のチェックと共に、回収した暴露試験片の腐食生成物の解析等から腐食機構解明を実施し、平成 29 年度以降の新開発マグネシウム合金の評価につなげた。

① 難燃性マグネシウム合金の表面処理膜（化成処理+塗装）の適正化

① -1.表面処理膜の適正化の背景について

マグネシウム合金塗装の塗装表面処理に関しては様々な実績があるが、いずれも小物部品主体であり、且つ表面処理も複雑な化成処理工程が採用され、塗装も強固な焼付塗装(メラミン塗装)が可能である。対象用途もパソコンや携帯等の室

内用途の部材が多く耐腐食性において実用上問題ない性能であり、その耐食技術もほぼ確立されている。

但し、その化成処理は 5 工程以上の処理が必要で水洗処理を含むと 10 工程以上の複雑な処理となる。更に本処理にあたっては部材のサイズに見合った処理槽等も必要とされる一方で、大型車両構体はこうした複雑な処理や大型処理槽等も確保できない。塗装工程も常温乾燥型塗装（二液ウレタン塗装）を採用せねばならない。そこで車両構体に適する表面処理として、化成処理は、脱脂を含む 3 工程での簡易処理とし、シャワー型もしくは塗布型の開発を目指した。塗装は常温乾燥としこの工程変更に対し適応するべく改良した。

① -2.適正化膜の評価手法と結果について

その検討と評価は、まずは既存難燃性マグネシウム合金（AZX611）を母材として用い、塩水噴霧試験（以下、SST と略す）や複合サイクル腐食試験（以下、CCT と略す）、及び耐湿性試験等にて評価を進めた。今評価に於いては短時間で評価のできる SST 試験を中心に評価選考基準とした。その理由として、腐食に対しては塗装業界では SST が一般的に広く普及した試験方法であり、他の金属部品や先行採用される他のマグネ部品との比較評価もできる事が挙げられる。具体的には、試験時間 500 時間以上を目標に、素地まで傷(クロスカット)を付け SST 試験を実施後、カット部周辺からの錆の進展長さや外観(JIS 規格)上の RATING-NO（ダメージ度の図表比較）にて評価を実施した。

① -3.適正化の成果、及びその改良手法について

既存難燃性マグネシウム合金(AZX611) に対し、既存の複雑な化成処理と焼付塗装を施したものは、耐食性能は SST にて 500 時間以上を満足する。一方で大型車両塗装を前提に簡易な化成処理に変更し、更に常温乾燥塗装を実施すると耐腐食性能の低下が認められた。そこで下記の化成処理及び塗料の組成改良を実施した結果、720 時間まで改善した(図-III-2.3.5-2 図-III-2.3.5-3 参照)。

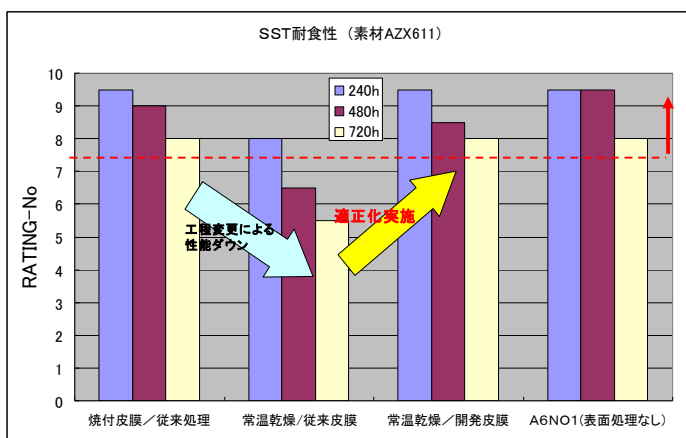


図-III-2.3.5-2 SSTでの適正化結果



図-III-2.3.5-3 SSTでの糸錆改良

併せてプライマー及び化成処理のその組合せでも性能が左右される傾向も見られ、性能を担保する為の相互調整も実施した。

尚、その化成処理、及び塗料の改良ポイントは以下。

① -3-1.化成処理皮膜の組成検討

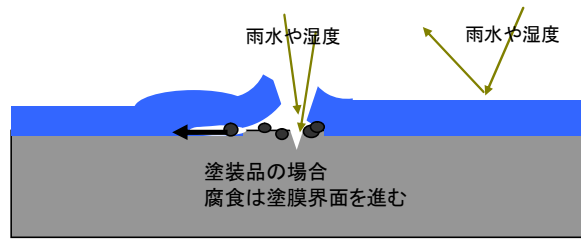
昨年度は簡易な塗布型化成処理を中心に検討したが、耐食性の目標はクリアするものの、実施工時の塗布量や塗布スピードなど条件変動に対しその結果については安定したものが得られにくいことを確認した。そこで実施工を鑑み、簡易シャワー装置を用いた化成処理の最適化検討を実施した。

昨年検討した塗布型化成液に一部添加物を添加することで、シャワー方式においても耐食性面ではアルミ材 A6N01(化成処理無し)に近い性能を得た。しかし塗膜密着性において課題が残る結果となった。その要因を以下のように推察し対策を実施した。

一般的に化成処理皮膜は、素材が何であれ皮膜付着量が多いと密着性が低下し、場合によっては剥離不具合が発生する。そこでシャワー型化成処理での皮膜付着量を低減させることで密着性の改善を検討した。加えて皮膜付着量制御のみでは密着性の改善にも限界がある為、皮膜組成の見直しも行い密着性はもとより耐食性の更なる向上も含め実施した。まずは、処理条件と組成にて皮膜付着量を制御することで一定の改良効果が得られたが、未だ目標値には達しなかった。そこで皮膜付着量の制御だけでなく組成見直しも行った。尚、評価に当たっては後述の改良塗料との組み合わせにて実施している。その結果、新たな添加物を探索し、その結果高い密着性と共に耐食性の向上も図れた。その理由としてエッチング力が上昇すると共に皮膜付着量の抑制などの効果があった為と考えられる。尚、平成 28 年度に実施した側構体パネルの表面処理においては、このシャワー型を採用している。

① -3-2.塗料（プライマー）の組成検討

他の金属に比べ、マグネシウムの耐食性が悪いとされる要因は、金属塩が介在する電解質溶液（すなわち雨水や塩水）に対しマグネシウムは化学反応しやすく、その反応により水溶化したマグネシウムが外部に溶出する事が原因である。溶出を防ぐ為には塗膜で遮断することが最も重要である。成膜塗膜であれば、雨水を遮断する事により 3 年の実暴露では全く問題ないことを確認した。但し、上記カット（素地まで達する傷を想定）を施した場合は、カット部より電解液が塗膜と素材の界面に浸透しながら素材腐食が進む。塗膜の設計としては、電解液の遮断効果を目的とし塗膜の密度を保持する一方で浸透した雨水による腐食進行を防ぐため、素地との密着力を更に強固なものとする必要があると判断した。尚、塗膜の透水性を減ずるだけでは改良効果にはならないばかりか、進入した水分が抜けずに塗膜と素材の界面に滞留し、逆にフクレを発生させることを確認した(図 III-2.3.5-4 参照)。カット部からの腐食の進行を防ぐには、塗膜と素材の密着力のアップが不可欠である。



図Ⅲ-2.3.5-4 カット部からの塗膜下の腐食進行

①-4.適正化の確認（側構体パネル塗装）と評価の現状

尚、この結果を踏まえ平成 28 年度に開発された新規開発合金につき、その接合を施した試作側構体パネルに対し改良化成処理（シャワー式）及び改良プライマーの塗装を施した上に、正規の車両塗装工程に基づく工程（パテ/サーフェーサー/上塗塗装）を適用した。別途この新規開発合金に対する本処理の性能評価については平成 28 年度後半より大気暴露含め実施し評価を進めている。



図Ⅲ-2.3.5-5 試作側構体パネルへの適正化表面処理手法の適応

② 難燃性マグネシウム合金の大気暴露試験

暴露試験は、一般財団法人日本ウエザリングセンター：宮古島及び銚子にて「直接暴露試験」及び「遮へい暴露試験」にて 2 拠点・2 方式の 4 水準にて暴露を実施している。

②-1.既存難燃性マグネシウム合金(AZX612 他)の母材並びに塗装品の回収評価

<3 年目>素材 AZX612(押出材)、AZX912(押出材)、AZ91D(鋳造材)

比較用アルミニウム合金 A6N01（押出材）、他異種金属ビス(SUS)でのネジ止め品(AZX612)等、及びその塗装品（表面処理仕様は改良前の仕様）

結果)

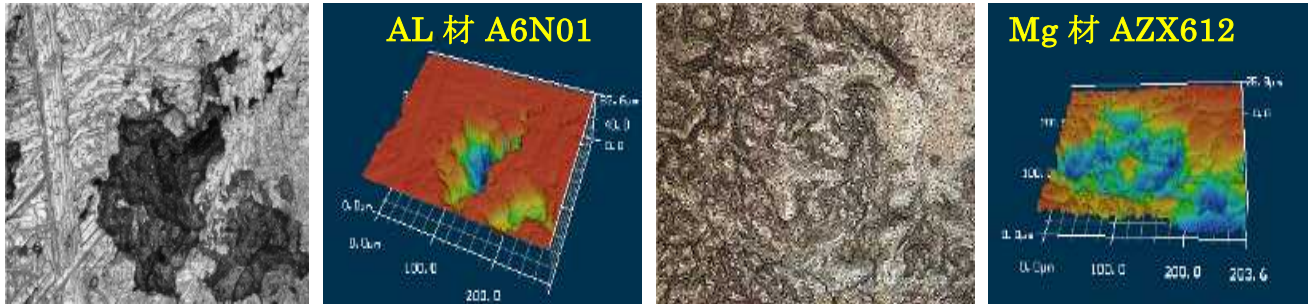
・マグネシウム合金素材の腐食量について

AZX612 材の年間腐食量は、直接暴露試験で経年と共に増加する一方、遮へい暴露においては 1 年あたりの腐食量は減少傾向にある。またアルミニウム材との腐食量の差についても減少傾向にある。このことは、直接暴露条件では雨水に直接接触し化学変化を起こしたマグネシウムの溶出が進むことで経年と共に腐食速度も進むが、遮へい暴露では腐食生成物が雨水で流されず逆に腐食生成物が腐食の進行速度を落としているものと考えられる。

・マグネシウム合金素材の浸食深さについて

AZX612 材の浸食深さについては、直接暴露・遮へい暴露において経年と共に減少傾向であった。深さに関しては遮蔽暴露では同時比較のアルミ材 A6N01 に比べ同等若しくはそれ以下であった。

特に、アルミニウム材は粒界腐食と思われる深い孔状腐食が部分的に観察された（図Ⅲ-2.3.5-6）。



図Ⅲ-2.3.5-6 大気暴露板に見られた孔状腐食

②-2.既存難燃性マグネシウム合金(AZX611 他)の母材並びに塗装品の回収評価
及び、ダブルスキン中空型材（AZX611）の内面評価

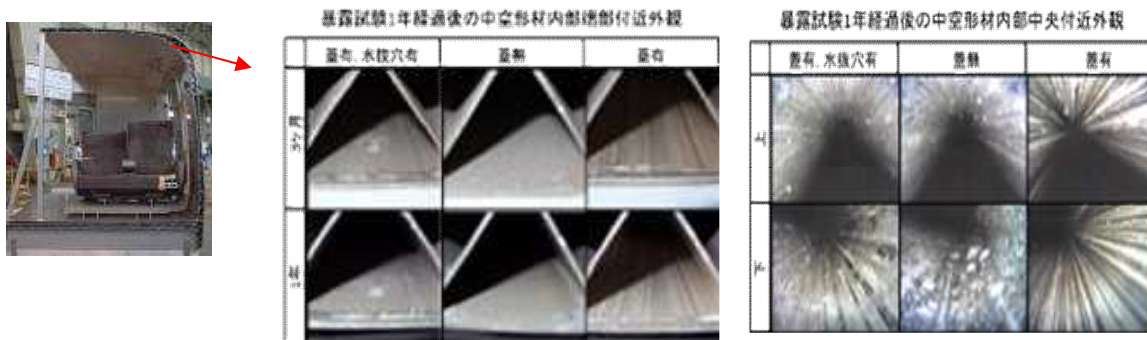
< 1 年目 > ・母材：マグネシウム合金 AZX611(押出材)、マグネシウム合金 AZX611(ダブルスキン中空型材)比較用アルミニウム合金 A6N01 (押出材) 及びその塗装品（表面処理仕様は適正化前の仕様）

結果)

・マグネシウム合金の腐食レベルについて

母材は変色するが前述の 3 年暴露品に比べると外観変化も少なく腐食減量・腐食深さ共に少ない。3 年暴露と同様、直接暴露は腐食生成物が雨水に流され腐食進行するが遮へい暴露は腐食生成物が堆積状態になり腐食減量は抑制される。

更に、ダブルスキン構造の内面腐食（未処理）の程度の評価につき末端部を、閉塞・開放状態・更に水抜き穴を設けたものを、アルミニウム材との比較で評価した（図Ⅲ-2.3.5-7）。結果、1 年目では危惧されたような腐食は見られず、アルミニウム材と同等の腐食レベルにあった。これら回収品については解析評価を継続する。



図Ⅲ-2.3.5-7 ダブルスキン中空型材の内面腐食状態

② -3.平成 28 年度 新規開発難燃性マグネシウム合金の設置

平成 28 年度に各種用途・特性別に開発された新規マグネシウム合金につき、母材・及びその塗装品の暴露を開始した。

③ 難燃性マグネシウム合金の腐食生成物の解析と腐食挙動の調査

上記暴露結果より得られた腐食生成物につき、XRD にて解析を実施した(図 III-2.3.5-8 参照)。

その結果、

- ・直接暴露：結晶性の $Mg(OH)_2$ と Mg-Al 系 LDH と $Mg(CO_3) \cdot 3H_2O$
- ・遮蔽暴露：結晶性の Mg-Al 系 LDH と $Mg_2(CO_3)Cl(OH) \cdot 3H_2O$ と $Mg(CO_3) \cdot 3H_2O$ と Mg-Al 系 LDH

注) LDH：層状複水酸化物 (Layered Double Hydroxide)

これらに加えてアモルファスの MgO も存在することを確認した。

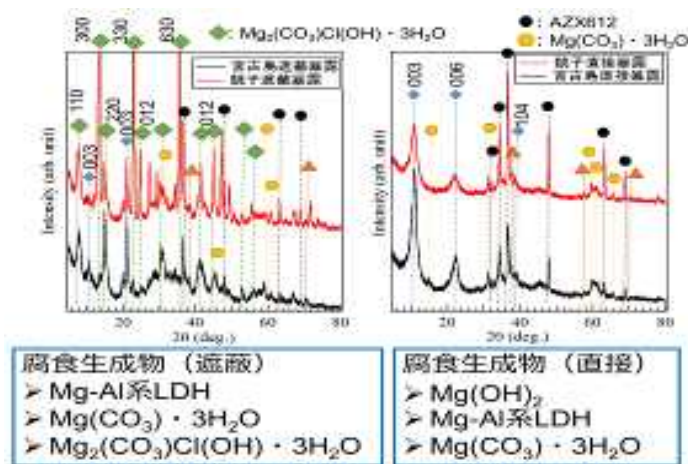
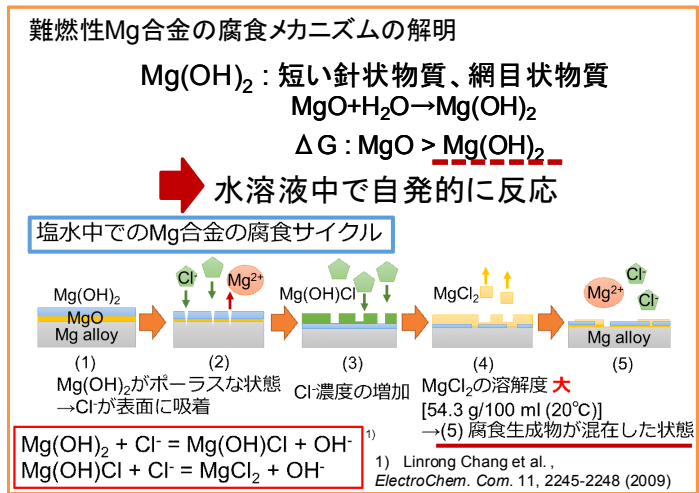


図 III-2.3.5-8 腐食生成物の XRD 解析

結晶性といえ LDH は腐食反応の抑制には効果があるが、壊れやすい物質であり、また他の生成物も水酸化物であることから水親和性が高い物質である。従って大気暴露試験では直接暴露のほうが遮へい暴露に比べこの腐食生成物の雨水による流出が大きい為に腐食減量も増加する。

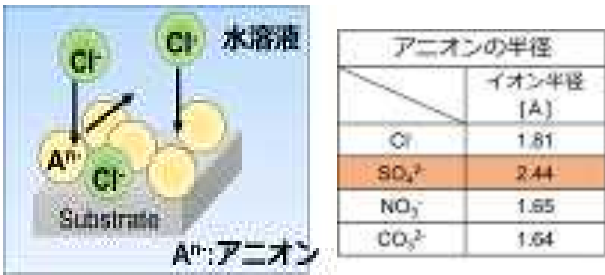
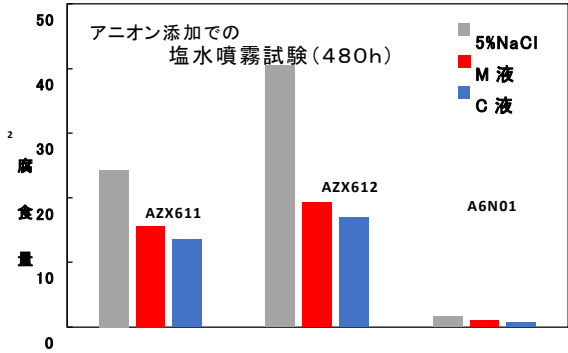
ベンチテストにおいても、電解溶液にさらされる時間の長い塩水浸漬 (SDT)、塩水噴霧 (SST)、サイクルテスト (CCT) の順で腐食劣化の程度も激しい順となっている。これらを踏まえ腐食メカニズムについては以下の機構であると解明した(図 III-2.3.5-9 参照)。



図Ⅲ-2.3.5-9 マグネシウムの腐食メカニズム

加えて宮古島、銚子の実暴露環境において 27 年度に回収した暴露塗板には環境由来と思われる各種のアニオン (SO₄⁻ NO₃⁻ CO₃²⁻) が付着していることを確認した。

それらイオンを含有する溶液を擬似的にM液 (宮古) /C 液 (銚子) として作成し、塩水に添加し噴霧試験で評価を実施した結果、これらイオンの添加によって腐食の抑制効果が得られた(図Ⅲ-2.3.5-10 参照)。



図Ⅲ-2.3.5-11 アニオン半径とブロック効果

図Ⅲ-2.3.5-10 アニオンによる腐食抑制

そこで今回、これら「各種アニオン+Cl⁻含有溶液中での難燃性 Mg 合金の腐食挙動に及ぼす影響」につき、5Wt%の塩水中での腐食挙動 (浸漬試験 SDT) につき検証調査した。結果、塩水中への異種アニオン添加による腐食速度への影響(抑制効果)については、そのXRD解析より SO₄⁻ >NO₃⁻ > CO₃²⁻である事も確認した。その要因につき考察すると、当初の Cl⁻イオンが、マグネシウム金属と接する場合に、これらアニオンがブロック効果を発すると推定され、この効果は個々のイオン半径とも相関性が認められた (図Ⅲ-2.3.5-11 参照)。

尚、この効果に基づき前述の塗料組成 (プライマー改良) の検討に際し、これらアニオンを含む原材料を使用し改良すべく試みたが、十分な耐食性の向上効果

は認められなかった。アニオンブロックによる腐食抑止効果より、塗膜の付着アップ及び透水性の遮断効果の方が防錆性には寄与する結果となった。

更に 5wt%塩水溶液中にて Ca 含有量の異なる AZ61 (AZ61,AZX611,AZX612) 難燃性マグネシウム合金につき、Ca 含有量が腐食に及ぼす影響につき調査を実施した。結果、各種合金において存在する晶出物は、AZ61 の場合、AlMnO Compound, Mg₁₇Al₁₂, AZX611 と 612 の場合、Mg₁₇Al₁₂, Al₂Ca であると推察された。

各合金の分極曲線より、Ca 添加量の増加と共に腐食電流密度が僅かに大きくなり、腐食電位が卑化している。Al₂Ca は AlMnO 系化合物と比較し、より耐食性に影響を及ぼす因子になると考えられ、Al₂Ca / α-Mg 母相で形成される局部電池のサイト数が増加し、耐食性の低下が誘発されたと推測される。

また、昨年度ミリオン化学㈱にて実施された「促進試験に於ける CCT と SST の結果の差異」、「素材の電解液(雨水)の濡れ時間が長い程腐食が進行する」旨の報告、更には「実暴露結果；遮へい暴露では腐食量が少ない」等の報告に関して、その裏付けの為に「異なる腐食試験におけるマグネシウム合金に形成される腐食生成物の分析」を実施した。結果、SST と比較して CCT では、耐食性向上に有効な LDH の生成量が多く、腐食反応の促進が抑制されることが確認され、LDH が破壊溶出せず滞積する際には母材の腐食量も少なくなることが判明した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.5-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
H27FY	0	0	4	0	0	0	0	1	1
H28FY	1	0	6	0	0	0	0	1	1
合計	1	0	10	0	0	0	0	2	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）

(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）

表Ⅲ-2.3.5-5 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願 [※]
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	0	0	0
H28FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.3.6[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

2.3.6.1 テーマの概要

(1)背景と目的

マグネシウムは、実用金属の中で最も軽量であり、また優れた比強度を有することから、輸送機器のための新たな構造材料として注目されている。しかし、汎用のマグネシウム合金は発火温度が低く、固相線温度よりも高い温度に昇温すると発火する材料として認識されており、特に、不燃・難燃特性の確保が必須である鉄道車両部品や航空機部品としての適用は困難とされてきた。

近年、マグネシウム合金の発火温度を高める合金開発が進められ、その結果、汎用マグネシウム合金（Mg-Al 系合金等）にカルシウムを添加し、発火温度を飛躍的に高めた「難燃性マグネシウム合金」が開発された。本合金は優れた難燃特性を有し、日本鉄道車両機械技術協会の車両材料燃焼試験において「不燃材」の認定も受けていることから、鉄道車両用部材への適用も、小型鋳造部品に関しては進みつつある¹⁾。今後、難燃性マグネシウム合金を用いて輸送機器のさらなる軽量化を目指すためには、合金特性のさらなる高性能化（強度・延性の改善、生産性の改善）を目指すと同時に、型材や板材を組み合わせて「大型構造体」を作り込むための要素技術を開発していく必要がある。具体的には、大型展伸材（型材・板材）を製造するためのプロセス技術、大型展伸材を組み立てるための接合技術および耐食性を確保する技術が必要である。そこで、本研究開発では、難燃性マグネシウム合金展伸材を鉄道車両用部材（高速車両構体）に適用するための基礎技術を構築することを目的とし、難燃性マグネシウム合金の材料特性（機械的特性、生産性）をさらに改善するための合金設計技術開発、開発した合金の信頼性（難燃性、疲労特性、接合特性、耐食性等）を確保するための特性改善技術、評価技術の構築を目指す。

(2)位置付け、目標値

現在、高速車両構体に利用されているアルミニウム合金には 2 種類あり、汎用型の A6N01 合金と高強度型の A7N01 合金がある。A6N01 合金に関しては天井外板、妻外板、側外板等に利用され、A7N01 合金に関しては台枠やまくらばり等に利用されている。そこで、本研究開発では、A6N01 合金に匹敵する機械的特性と生産性（押し出し速度）を有する難燃性マグネシウム合金押し出し材（易加工性マグネシウム材）と、A7N01 合金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展伸材（押し出し材、板材（薄板・厚板））（高強度マグネシウム材）を開発することを目指す。

なお、開発した合金を用いて実際の構体を作製するためには、開発合金をつなぎ合わせるための接合技術や、耐食性を付与するための表面処理技術が必要である。さらには、母材・接合継手・表面処理被膜の信頼性を評価するための技術を構築する必要がある。そこで、開発した合金を接合するための技術、信頼性（疲労特性、発火特性、耐食性等）を評価するための技術についても開発を実施する。

横浜金沢分室では、上記研究開発要素の内、難燃性マグネシウム合金の接合技術の手法を開発する。構造部材の疲労特性・破壊靱性特性が最も低い部位は溶接継手部分であるため、新たに開発された合金の溶接継手に高い信頼性を付与するための接合技

術（TIG 溶接法、MIG 溶接法、FSW 法）、接合モニタリング技術を開発する。

以下、横浜金沢分室の研究開発項目および目標を表Ⅲ-2.3.6-1 に列記する。平成 29 年度までは、開発された 4 種類の難燃性マグネシウム合金（AX41 合金、AX92 合金、AX81G 合金および AX81S 合金）を対象として溶接技術を開発する。さらに、平成 29 年度末までに開発合金を用いて、モックアップ構体を作製するための基礎技術を構築することを目指す。平成 29 年度までに開発した基礎技術を実用化技術に仕立て上げることを平成 34 年度までの目標とする。

表Ⅲ-2.3.6-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
① TIG 溶接技術の確立	<ul style="list-style-type: none"> 最適な施工方法の把握と基礎接合技術の確立、継手効率 70%以上。 既存難燃性マグネシウム合金を用いて部材を作製するための接合技術の構築。 	<ul style="list-style-type: none"> 開発合金を用いて継手効率 70%以上を達成する接合技術の構築。 開発合金を用いて部材を作製するための接合技術の構築。 	<ul style="list-style-type: none"> 各種接合法の長所短所を把握して継手形状などの適材適所の接合法への適用を明確にする。 そのうえで、平成 29 年度までに開発した技術の実用化技術を開発する。 	<p>アルミニウム合金製鉄道車両構体では補修溶接を行う時の必須技術。</p> <p>アルミニウム合金製車両構体での継手効率と同等の 70%以上とした²⁾。</p>
②MIG 溶接技術の確立	<ul style="list-style-type: none"> 最適な施工方法の把握と基礎接合技術の確立、継手効率 70%以上。 既存難燃性マグネシウム合金を用いて部材を作製するための接合技術の構築。 	<ul style="list-style-type: none"> 開発合金を用いて継手効率 70%以上を達成する接合技術の構築。 開発合金を用いて部材を作製するための接合技術の構築。 	<ul style="list-style-type: none"> 各種接合法の長所短所を把握して継手形状などの適材適所の接合法への適用を明確にする。 そのうえで、平成 29 年度までに開発した技術の実用化技術を開発する。 	<p>アルミニウム合金製鉄道車両構体では連続接合を行う時の必須技術。</p> <p>アルミニウム合金製車両構体での継手効率と同等の 70%以上とした²⁾。</p>
③摩擦攪拌接合 (FSW) 法の開発	<ul style="list-style-type: none"> 最適な施工方法の把握と接合技術の確立、継手効率 70%以上。 既存難燃性マグネシウム合金を用いて部材を作製するための接合技術 	<ul style="list-style-type: none"> 開発合金を用いて継手効率 70%以上を達成する接合技術の構築。 開発合金を用いて部材を作製するための接合技術の構築。 	<ul style="list-style-type: none"> 各種接合法の長所短所を把握して継手形状などの適材適所の接合法への適用を明確にする。 そのうえで、平成 29 年度までに開発した技術の実用化技術 	<p>アルミニウム合金製鉄道車両構体では高品質な継手を得る連続接合を行う時の必須技術。</p> <p>アルミニウム合金製車両構体で</p>

	の構築。		を開発する。	の継手効率と同等の 70%以上とした ²⁾ 。
④非破壊評価技術の開発	TIG 溶接の接合品質モニタリング確立、長尺接合への対応。	各種接合法（MIG、FSW）の接合品質モニタリングの確立と生産への適用における可能性の明確化。	・実構造物生産ラインへの適用可能性の明確化。	高速車両構体を製造する上における生産工程内の品質管理手法。
⑤アルミ／マグネ合金の異材接合技術（FS）	平成 28 年度～平成 29 年度に実施。	アルミニウム合金製車両構体での継手効率と同等の 70%以上の継手が得られる可能性を検証する ²⁾ 。	平成 29 年度末までの FS で、実現の可能性が高い場合は実用化への反映を検討する。	実用化を加速できる可能性が極めて大きいために可能性を検証する。

(3)全体計画

本研究開発を行うに当たっては、開発技術の輸送機器構造部材への適用可能性を絶えず評価・検証することにより研究開発を遂行する。ここでは、開発技術の適用箇所の一例として高速車両（新幹線）構体を設定し、開発されるマグネシウム合金の特性と、高速車両構体に既に利用されている実用金属（アルミ合金等）との比較・検証を実施しながら研究開発を実施する。

本研究テーマでは、溶接継手に高い信頼性を付与するための接合技術（TIG 溶接法、MIG 溶接法、FSW 法）、接合モニタリング技術を開発する。各々の接合法で、アルミニウム合金の接合法を基本として、接合条件範囲の調査をおこない接合特性を明確にする。使用する溶加材、溶接機などのプロセスの最適化をおこなうことにより最適な接合条件範囲の把握をおこなう。継手強度は継手効率が母材強度の 70%以上が得られることを目標とする。さらに、実用化の可能性を確認するために一般的に困難であると考えられているアルミニウム合金との異材接合についてのフィジビリティスタディを行う。また、接合法の品質保証技術として、AE モニタリング法の開発を同時におこない、AE 計測装置、非破壊手法を用いて接合品質モニタリングを可能にする手法を開発する。

上記手法の開発を遂行するに当たり、平成 27、28 年度には鉄道車両側構体の部分パネルを平成 29 年度には実物大の簡易モックアップを試作することにより、開発した接合手法などを実証しながら進めていく。これらの試作品を作製する過程にある次のような要素技術の課題の抽出、その解決方法にも取り組んでいく。押出型材の製作精度、接合・加工などの作業性、表面処理性、シーリング性などの多くの実証項目を他の分室と連携して進めていく。平成 31 年度以降には難燃性マグネシウム合金製構体構造の実用化研究・実用化検討を行う。特に、合金特性を考慮した設計仕様等を含

めて検討を進めることにより平成 35 年度までには実用化検討をおこない、平成 42 年度までには事業化検討を完了する。

(4)実施体制

本研究開発体制においては、マグネシウムに関連する 8 つの分室が共同で難燃性マグネシウム合金展伸材を鉄道車両用部材（高速車両構体）に適用するための基礎技術を構築することを目指す。

平成 27 年度までは、新規合金の開発・評価を主眼として、素材の開発を担当する「材料 WG」、難燃性マグネシウム合金の信頼性を改善・評価するための技術を開発する「接合 WG」、「耐食性 WG」、「発火特性 WG」を形成し、各 WG が連携して課題の解決を目指した。平成 28 年度以降は、平成 27 年度までに開発した合金を対象として、複雑形状部材の加工・製造技術を開発する「素形材加工技術 WG」、信頼性（疲労特性・破壊特性等）を系統的に明らかにする「信頼性評価・標準化 WG」、表面処理技術の構築や耐食性を系統的に明らかにする「表面処理 WG」、接合技術の構築を目指す「接合 WG」を構築し、研究開発を遂行している。

研究開発を推進するにあたっては、エンドユーザー（鉄道会社・車両メーカー）が低コストかつ安全に構体を製造するための技術や、マグネシウム合金を用いて構造体を設計するため技術等を統合的に構築していく必要がある。そのため、本研究開発では、エンドユーザーをオブザーバーとして招聘し、マグネシウム合金を利用して構造体を作製するための仕様について、アドバイスを受けつつ研究開発を推進している。

テーマ 20 の横浜金沢分室（㈱総合車両製作所）では、7 つの再委託研究機関とともに MIG 溶接法の開発、FSW 法の実行を行う。

横浜金沢分室で社 TIG 溶接法および FSW 法の基礎技術開発から実生産に近い技術開発、側構体部分パネル、実物大のモックアップ作製まで行う。接合継手の品質管理のために AE モニタリング法を利用した非破壊検査技術の開発を行い、アルミニウム合金との異材接合におけるフィジビリティスタディも行う。

(5)運営管理

テーマ 15～20 に従事する組合員が全員参加できる分科会を定期的で開催している。平成 25～平成 27 年度は、材料 WG、接合 WG、表面処理 WG の分科会を 3 ヶ月に 1 回開催した（発火特性 WG は不定期開催）。平成 28 年度以降は、素形材製造 WG、信頼性 WG、表面処理 WG、接合 WG の分科会を 3～4 ヶ月に 1 回開催し、各分室および再委託先の研究進捗を報告することにより、開発した合金を用いて高速車両構体を製造するための技術を共同で構築している。

平成 27 年以降は、プロジェクトの推進を加速するための会合（加速 WG）を上記分科会と同日に開催し、難燃性マグネシウム合金を用いて側パネル等のモックアップを作製するための打ち合わせや、信頼性データ（疲労特性、耐食性等）を系統的に取得するための打ち合わせを実施し、プロジェクトの推進を調整する場として機能している。

成果の発信に関しては、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 2 回）に開催し、プロジェクトの成果を発信している（平成 29 年 3 月までに計 6 回開催）。さらに、軽金属学会の会誌「軽金属」に特集号「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」を組み、プロジェクトの成果を論文および解説として公表している。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

アルミニウム合金製車両構体（新幹線を想定）をマグネシウム合金製車両構体に代替した場合の重量削減効果については幾つかの報告があり、ヤング率を基準とした場合、20%程度の車両構体の軽量化を見込むことができるとの報告がある³⁾。また、平成 27、28 年度には、パネルの構造は同じであり面外曲げ剛性が等しくなるように作製した側構体部分パネルで、アルミニウム合金製パネルより 9～10%の軽量化ができたことを確認した。さらに、明石分室ではこれまでに、マグネシウム合金製構体の相当曲げ剛性を簡易的に試算しており、窓開口寸法を従来の新幹線よりも小さくすることで、アルミニウム合金製ダブルスキン構体とほぼ同じ相当曲げ剛性が得られることを確認している。アルミニウム合金製構体質量の実績値と比較して、30%の構体重量削減が見込まれることを確認している。

構体の軽量化は、CO₂ 排出量削減に寄与するばかりで無く、車両の高速化にも大きく寄与することが知られている。過去の事例によると、新幹線の車両質量を 20%軽量化すると、営業最高速度が 10～20km/時アップするとの報告がある⁴⁾。ゆえに、経済的観点からは車両構体の軽量化は大きな効果を見込むことができる。

なお、新幹線車両の年間生産台数は 385 両/年（平成 25 年）であり、四輪車の年間生産台数(約 1,000 万台：平成 25 年)の 0.004%程度である^{5,6)}。また、動力として電気を利用していることを考慮すると、新幹線の重量減に伴う CO₂ 削減効果は、四輪車のそれと比較すると小さいものであるといえる。

一方、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、マグネシウム展伸材の大きな需要増加を見込むことができる。例えば、車両構体に利用されるアルミニウム合金は 1 両当たり約 7t である⁷⁾。上記部品を全てマグネシウムに置き換えた場合、1 両当たり約 6t の需要が生まれることになる（Mg 置換により車両重量が 10%減少する場合）。車両製造が 1 年当たり 400 両と仮定すると（385 両：平成 25 年）⁵⁾、2400t の需要が生まれることになる。なお、国内におけるマグネシウム合金展伸材需要は約 700t/年(平成 26 年)であり⁷⁾、プロジェクトの成果により、仮に、側構体だけでもマグネシウム合金に置き換えることができれば、それだけで、国内の展伸材需要を倍増させることが可能となる。

2.3.6.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

次に中間目標の達成度を表 III-2.3.6-2 にまとめて示す。

表Ⅲ-2.3.6-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
①TIG 溶接技術 の確立	開発合金を用いて継手 効率 70%を以上を達成 する接合技術の構築。 開発合金を用いて部材 を作製するための接合 技術の構築。	アルミニウム合金の 施工法との比較によ り、大まかな接合条 件範囲を明らかにし た。平板突合せ継手 では、継手効率 70% 以上を達成した。	○	
②MIG 溶接技術 の確立	開発合金を用いて継手 効率 70%を以上を達成 する接合技術の構築。 開発合金を用いて部材 を作製するための接合 技術の構築。	板材突合せ溶接にお ける接合条件範囲や 課題を明らかにし た。平板突合せ継手 では、継手効率 70% 以上を達成した。	○	
③摩擦攪拌接合 (FSW) 法の開 発	開発合金を用いて継手 効率 70%を以上を達成 する接合技術の構築。 開発合金を用いて部材 を作製するための接合 技術の構築。	アルミニウム合金の 施工法との比較によ り、大まかな接合条 件範囲や課題を明ら かにした。平板突合 せ継手では、継手効 率 70%以上を達成し た。	○	
④非破壊評価技 術の開発	各種接合法 (MIG, FSW) の接合品質モニ タリングの確立と生産 への適用における可能 性の明確化。	FSW 法および TIG 溶 接の接合品質モニタ リングが可能とな り、接合長が伸びた 場合の計測法を開発 した。	○	
⑤アルミ/マグ ネ合金の異材接 合技術 (FS)	アルミニウム合金製車 両構体での継手効率と 同等の 70%以上の継手 が得られる可能性を検 証する ²⁾	MIG, TIG, FSW な どの各種接合法で接 合トライを行った結 果、継手効率が上が らず、その原因が高 い入熱による金属間 化合物であることが わかった。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

次に最終目標の達成可能性を表Ⅲ-2.3.6-3 にまとめて示す。

表Ⅲ-2.3.6-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
①TIG 溶接技術の確立	4 種類の開発合金を用いて継手の機械的特性を確認するレベルに到達している。 継手特性を向上する方法を検討していく。	各種接合法の長所短所を把握して継手形状などの適材適所の接合法への適用を明確にする。	各接合法で明らかとなった課題を解決する必要があるが、使い分けを行うことで実製品への適用は可能と考えられる。
②MIG 溶接技術の確立	4 種類の開発合金を用いて継手の機械的特性および疲労特性を確認するレベルに到達している。 継手特性を向上する方法を検討していく。	母材および各種接合法で作製される継手を実構造物へ適用するため、破壊力学に基づいた評価・設計手法を構築する。	合金開発との連携により、各種データを取得・整理することにより手法構築は可能である。
③摩擦攪拌接合 (FSW) 法の開発	4 種類の開発合金を用いて継手の機械的特性を確認するレベルに到達している。 継手特性を向上する方法を検討していく。	母材および各種接合法で実構造物へ適用できる破壊靱性特性評価手法を構築する。	合金開発との連携により、各種のデータ取得を整理することにより手法構築は可能である。
④非破壊評価技術の開発	FSW 法および TIG 溶接の接合品質モニタリングが可能となり、接合長が伸びた場合の計測法を開発した。	実構造物生産ラインへの適用可能性の明確化。	実生産で高速車両構体を製造する工程内の状況によるが実用的である。
⑤アルミ／マグネ合金の異材接合技術 (FS)	アルミニウム合金製車両構体での継手効率と同等の 70%以上の継手を得るには入熱を下げた施工方法の検討が必要である。	平成 29 年度末までの FS で、実現の可能性が高い場合は実用化への反映を検討する。	実用化を加速できる可能性を引き続き検証していく。

(3)研究開発の成果と意義

① マグネシウム合金部材の TIG 溶接技術および FSW 接合技術の確立 (総合車両製作所)

難燃性マグネシウム合金を用いて輸送機器のさらなる軽量化を目指すために、合金特性のさらなる高性能化 (強度・延性の改善、生産性の改善) を目指すと同時に、型材や板材を組み合わせる「大型構造体」を作り込むための要素技術を開発していく必要がある。具体的には、大型展伸材 (型材・板材) を製造するためのプロセス技術、大型展伸材を組み立てるための接合技術、及び耐食性を確保する技術が必要である。本

研究開発では、難燃性マグネシウム合金の材料特性（機械的特性、生産性）をさらに改善するための合金設計技術開発、構造体を作製するためのプロセス技術開発、その信頼性（難燃性、疲労特性、耐食性）を確保するための評価技術構築及びデータベース構築を統合的に実施する。研究開発を行うに当たっては、開発技術の適用箇所の一例として高速車両（新幹線）構体を設定し、開発されるマグネシウム合金の特性と、高速車両構体に既に利用されている実用金属（アルミ合金等）との比較・検証を実施しながら研究開発を実施している。

本分担研では、溶接継手に高い信頼性を付与するための接合技術（TIG溶接法、MIG溶接法、FSW法）、接合モニタリング技術を開発している。接合技術そのものが確立されていない、開発された4種の新たな難燃性マグネシウム合金AX41、AX92、AX81GおよびAX81SのTIG溶接法およびFSW法について、アルミニウム合金の接合法を基本として、継手の特性に及ぼす施工条件の影響を調査した結果、プロセスのパラメータが継手のマクロ組織や機械的特性に及ぼす影響を確認できた。TIG溶接法とFSW法とで難燃性マグネシウム合金展伸材を接合する基礎技術を確立、さらに、接合特性をモニタリングするための基礎技術を確立した。

② マグネシウム合金部材の MIG 溶接技術の確立（再委託研究機関 1）

平成 28 年度は、平成 27 年度までに得た木ノ本伸線および大阪府立大学の MIG 溶接用ワイヤの最適加工プロセスに関する知見を元に、開発された 4 種類の新難燃性マグネシウム合金 AX41、AX92、AX81G、AX81S それぞれについて、直径 $\phi 26$ mm の合金ビレットを出発材料として、極細径、高精度そして長尺の新難燃性マグネシウム合金 MIG 溶接用ワイヤを創製した。また、創製した 4 種類の新難燃性マグネシウム合金 MIG 溶接用ワイヤを用いて、同一組成の板厚 t3mm の押出板材または圧延板材の突合せ MIG 溶接を行い、それぞれの適正溶接条件範囲を見出すとともに、溶接継ぎ手の静的機械強度や疲労特性等の評価を大学と連携して実施し、MIG 溶接継ぎ手の信頼性を最適化するための技術開発も進めた。また、新難燃性マグネシウム合金を用いた小型モデル構体作製のために MIG 溶接条件を明らかにするとともに、下向、横向、立向、上向の各種溶接姿勢の可能性および溶接施工耐久性を明らかにした。

③ マグネシウム合金の MIG 溶接のプロセス因子が継手の特性に及ぼす影響の解明（再委託研究機関 2）

高速押出マグネシウム合金 AXM030305、AX41、高強度マグネシウム合金 AX92、AX81G、AX81S の MIG 溶接を行った。MIG 溶接のプロセス因子が継手の微細組織と機械的性質に及ぼす影響について検討した結果、昨年度までの AZX612、AZX611 における結果と同様に、優れた溶接継手強度は低入熱量域にて得られることが明らかになった。高速押出合金については、溶加材として Al 含有量の多い合金を用いることにより継手効率は大きくなり、90%を越える非常に大きな継手効率が得られた。すなわち、Al の固溶強化による継手効率の向上が有効であることがわかった。一方、高強度合金においては Al 含有量の増加による継手効率の向上はみられなかった。これは、高強度合金はいずれも固溶限に近い Al が固溶した合金であるためであ

る。そこで、新たな固溶強化元素として Ga を提案し、Ga 添加 AX92 合金を溶加材とした溶接を行った。その結果、いずれの高強度合金においても継手効率は向上し、75%以上の継手効率が得られた。また、Ga 添加 AX92 合金を溶加材とした溶接体は、共材を溶加材とした溶接体と比較して疲労強度も向上することが明らかになった。これらの結果と昨年度までの結果から、Al 含有量が 6%以下の合金に対しては、Al 含有量の多い溶加材を用いることにより、Al の固溶強化による継手効率の向上が有効であること、Al の含有量が 8%以上の合金に対しては、Ga を添加した溶加材を用いることにより、Ga の固溶強化による継手効率の向上が有効であることが明らかになった。

④ マグネシウム合金のブローホール形成に及ぼす接合プロセスおよびプロセス条件の影響の解明（再委託研究機関 3）

マグネシウムは高い蒸気圧を有するとともに、マグネシウム中への水素の溶解度およびその温度依存性が他の合金と比較して大きいため、溶接中にブローホールが発生しやすい材料である。本研究開発では、平成 27 年度までに検討した非対称なツールレイアウトを有する両面摩擦攪拌接合において、良好な引張特性を得るための接合条件の最適化指針を明確にした。種々のツール回転速度にて厚さ 3mm の難燃性マグネシウム合金（AZX612）板に対して両面摩擦攪拌接合を施し、得られた継手の引張試験を系統的に行うことで継手強度、伸び及び破断位置の評価を行った。非対称 DFSW は、異なる二種類のツールを接合体の両面に同時に押し当てることにより実施した。上部ツールはプローブ付ツールで、ショルダー径、プローブ径はそれぞれ 15mm、2.8mm であり、プローブはネジ山を有している。下部ツールはショルダー直径が 15mm であるフラットツールで、プローブは有していない。また、上部ツールのみ 3°の前進角を設定した。上下のツール回転速度に適度な差を設けることで、継手の引張特性が向上することが明らかとなった。具体的には、上側ツールの回転速度を 600rpm、下側ツールの回転速度を 500rpm とすることで、高い引張強度と延性を両立する難燃性マグネシウム合金（AZX612）継手の作製に成功した。小型試験片を用いて TD 又は WD を引張軸とした場合の攪拌部の引張特性を調査すると、母材(BM)の場合は WD と TD はほぼ同じ引張強さを示しているが、非対称 DFSW では WD で引張強さが大幅に向上し、伸びも従来 FSW 継手より増加した。特に、下側ツールの回転速度を 500rpm の場合には TD と WD の両方で最も良好な延性を示した。

⑤ 摩擦攪拌接合（FSW）による難燃性マグネシウム合金の接合条件の最適化（再委託研究機関 4）

難燃性 Mg 合金で試作した押出型材（中空型材）への摩擦攪拌接合の適用を試みた。押出板材で得られた摩擦攪拌接合条件で接合評価を試みたが、押出板材での接合条件では健全な接合継手が得られないことが確認された。接合部には入熱不足で観察される溝欠陥が発生した。また、接合ツール回転数を大きくし入熱量を増加させたが、内部欠陥が確認された。そこで、押出板材と押出型材との形状的な違いによる温度分布

を検討した。また、接合部（突合せ部）の密着性（嵌め合い）が内部欠陥発生に与える影響についても検討した。

押出型材の断面形状は押出板材と比べ断面積が広く熱容量が大きく、中空構造であり接合部が中空に浮いている（バックプレートへ直接接触していない）ため、接合時に発生する摩擦熱の温度分布状態が異なることが予測される。そこで、中空型材の接合時における摩擦熱の温度分布を熱伝導解析により評価した。

押出型材では摩擦攪拌部の温度分布状態が押出板材と比較し温度上昇が小さいことが確認された。これは、入熱不足による溝欠陥が発生したことと一致する。また、押出型材は押出板材と比べバックプレートへの熱移動が少ないため、押出型材全体の温度上昇が押出板材より大きく、接合距離が長くなる長尺押出型材を接合する場合、接合時に発生する摩擦熱による熱歪が増大する可能性が懸念される。

押出板材の嵌め合い精度を、突合せ面に数ミリの隙間を故意的に設定し摩擦攪拌接合することで、接合ツール形状と隙間が欠陥（表面，内部）発生に与える影響を検討した。接合ツールのショルダー径が大きくなると、約 **2mm** の隙間を設けても欠陥の発生が減少することが確認された。しかし、嵌め合い精度が低下すると、特に内部欠陥の発生が増加する傾向があるため、押出型材の嵌め合い精度を高めることが接合特性の信頼性向上には重要である。

⑥ マグネシウム合金接合部の非破壊評価技術の開発（再委託研究機関 5）

難燃性 Mg 合金の摩擦攪拌接合（FSW）中の微小欠陥の生成と進展をアコースティック・エミッション（AE）法を用いてモニタリングする技術の開発を進めた。従来は AE センサを試料上に固定し、波形をセンサ→アンプ→計測装置と有線で接続していたが、本年度は昨年度に引き続き、接合ツールを固定する治具と一体化して試料上を滑りながら移動できるセンサの開発を進め、従来と同程度の感度を実現することができた。また、本年度は IoT（Internet of Things, モノのインターネット）技術の急速な進歩を受け、新たにスマートフォン用の小型モバイルバッテリーで駆動する連続波形記録装置を開発し、既存の連続波形解析装置との伝送を無線化した。これらの計測装置の開発により、長尺材の接合モニタリングも実用的に行える技術が確立できたと言える。また、位置標定においても昨年度開発した波の立ち上がりを複数検出し、これらとモードとの対応付けを自動化する方法において、誤りの自動検出と訂正が可能な処理方法を開発した。これにより、FSW 中の AE 事象の位置標定の成功率と標定精度がさらに高められた。

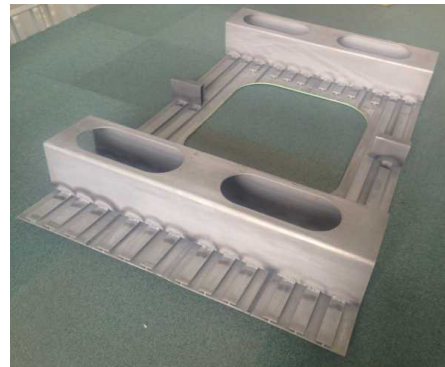
⑦ 難燃性 Mg 合金製部材によるモックアップ部分構体作製技術の開発（総合車両製作所）

これまでの接合技術を含めた要素技術を適用して、鉄道車両構体の側面にある窓穴周りを模擬した側構体：部分パネルを作製した。このパネルは、AX41 および AX92 材料の押出型材、AX81G および AX81S 材料の圧延板材、その塑性加工材、その切削・研削加工材を適用し、最後に表面処理、塗装を行って作製した。図Ⅲ2.3.6-1 にその部分パネルを示す。これらのパネルはダブルスキン構造では AX41 合金を使用し、

シングルスキン構造では AX92 合金、AX81G 合金および AX81S 合金の 3 種類の開発合金を使用した。同時に、アルミニウム合金製で実物同等サイズ、等価剛性で設計・作製を行い、完成したパネルの重量を比較したところ、9～10%の軽量化をすることができた。これら一連の作業を通じて、燃性マグネシウム合金を用いて構体を組み立てる際の問題点を総合的に洗い出した。これまでに接合に関する課題点、特徴等を明確にしてそれらを解決するために、試験片レベルの接合から始まり、部分パネルの製作、新合金を用いて実物大簡易モックアップ構体への作製と段階を踏んで計画通りに進捗し実用化へ進んでいる。



a)ダブルスキン構造の裏面



b)シングルスキン構造の裏面



c)新幹線窓周りの部分パネル 表面

図Ⅲ-2.3.6-1 開発合金製の鉄道車両側構体部分パネル

⑧ Mg/Al 異材接合材の組織と機械的特性の関係調査（再委託先研究機関 6）

Mg 合金と Al 合金の異材溶接の可能性を調査するために、熔融溶接である TIG および MIG アーク溶接、ならびにレーザ溶接、さらに固相接合である摩擦攪拌接合 FSW による溶接・接合実験を実施した。まず、熔融溶接では、Mg と Al の共晶反応により大量の金属間化合物が形成されて溶接金属が脆化し、溶接直後に溶接部に割れが発生する現象を明らかにすると共に、この割れ発生防止の為に溶接条件範囲（溶接電流あるいはレーザ出力と溶接速度との関係）を確定した。続いて、割れ発生を防止できた溶接条件において、Mg 合金と Al 合金の溶融量を変化させて溶接金属組成を変化させるために、溶接狙い位置、すなわちオフセット量を変化させた実験を行い、得

られた溶接継手の継手強度とオフセット量との関係を明らかにした。オフセット量には最適範囲が存在し、いずれの溶接プロセスでも Al 合金側に溶接狙い位置を適量変化させることにより、最も高い継手強度が得られた。しかし、その値は、高々25-30MPa であり、接合界面にはアーク溶接では 80 μ m 厚さ、溶接速度の速いレーザ溶接でも 20 μ m 厚さの金属間化合物層が形成されていた。一方、FSW では共晶温度以下の接合により割れのない継手の形成が可能であり、継手強度は 130MPa 程度の強度が得られたが、接合界面での金属間化合物層厚さは数 μ m 程度にまで減少した。これらのデータに基づき、金属間化合物層厚さと継手強度との関係図を作成し、より高い強度を得るためには金属間化合物層厚さをサブ μ m にまで低減する必要があることを示した。次に、金属間化合物層の形成そのものを抑制する為に、溶加材組成の影響を検討した。状態図より、Al と反応するが Mg とは反応しない Ti と、Al とは化合物を作らず、また Mg となじみの良い Zn をそれぞれ溶加材候補として選定し、Ti 箔と Zn シート材を溶加材として接合部に予めインサートした継手に対して、オフセット量を変えてレーザ溶接を実施した。いずれも最適なオフセット量が存在し、ほぼ予測どおり形成組織が得られた場合には、Ti 箔材では 77MPa、Zn シート材では 135MPa の継手強度が得られ、今後の溶加材開発に向けた重要な指針を明らかにした。

⑨ Mg/Al 異材接合のプロセス因子が継手の特性に及ぼす影響の解明（再委託先研究機関 7）

難燃性マグネシウム合金（AZX611 及び AX41）と 6000 系アルミニウム合金

（A6061 及び A6N01）の板厚 6mm 及び 3mm の材料について MIG 溶接並びに CMT 溶接を用いた異材溶接の可能性を検討した。その結果、MIG 溶接では溶接注の高温割れを防止する溶接条件は見いだせたが、継手の強度に影響を与える金属間化合物相の厚さを 1 μ m 以下に抑制する溶接条件は、溶接速度を 3m 以上にすることが要求されることが結論された。そのためにはロボットを用いた高速溶接が必要と考えられるので、ロボットメーカーとの協業が必要であろう。また、低入熱溶接法として自動車産業でも使用されている CMT 溶接法を検討したが、細径ワイヤを安定して高速供給できるワイヤ供給装置が望まれる。溶接方法としては、溶射膜厚と溶接条件が継手の品質に及ぼす影響を一層詳細に検討する必要があると考えられる。

上記材料について、同じく摩擦攪拌接合による異材突合せ接合を検討した結果、板厚 6mm の場合には 1 パスでの接合は困難であることが確認された。一方、板厚 3mm の場合には、ツールをオフセットすることなく接合できる条件が確認され、継手の強度も最高値で 168Mpa が得られ、継手効率は 67% が得られた。この時 IMC 層の厚さは 1 μ m 程度に相当する。今後、接合条件と IMC 層の厚さ及び強度の関係をさらに詳細に検討する。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.6-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	9	2	0	0	0	0	1
H27FY	0	0	3	0	0	0	0	0	1
H28FY	0	0	22	7	0	0	4	1	1
合計	0	0	34	9	0	0	4	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）

(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）

表Ⅲ-2.3.6-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	0	0	0
H28FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.3.7[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）

2.3.7.1 テーマの概要

(1)背景と目的

テーマ番号 15～20 では、難燃性マグネシウム合金展伸材を高速車両構体に適用するための研究開発を実施しており、難燃性マグネシウム合金展伸材の材料特性（機械的特性、生産性）を改善するための合金設計技術開発、構造体を作製するためのプロセス技術開発、その信頼性（難燃性、疲労特性、耐食性）を確保するための評価技術及びデータベース構築を統合的に実施している。これまでに、鉄道車両構体に利用するための新たな合金として、易加工性難燃性マグネシウム合金（AX41 合金）押出材、高強度難燃性マグネシウム合金押出材および圧延材（AX92 合金, AX81G 合金, AX81S 合金）を開発することに成功している。現在、上記合金を用いて高速車両構体を製造するための部材化技術（複雑形状押し出し技術、プレス成形技術、接合技術、表面処理技術）を確立するための実用化研究を推進中である。

今後、開発したマグネシウム合金展伸材を用いて高速車両構体の軽量化を実現するためには、繰り返し荷重下での疲労特性や湿潤環境化での腐食特性、衝突時に起きうる衝撃変形挙動など、材料の信頼性を保証するためのデータを系統的に明らかにし、構体の設計指針に取り込む必要がある。なお、難燃性マグネシウム合金も含めたマグネシウム合金展伸材の信頼性にまつわるデータは、他の実用金属と比較して圧倒的に少なく、性能評価の長期化が懸念されており、いかに効率化するかが、今後の研究開発の鍵となっている。

一方、内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」の課題の一つ、革新的構造材料の中では、構造材料の組織と性能を、理論や経験則、数値モデリング、データベース、機械学習などを融合して予測可能とする手法、「マテリアルズインテグレーション（MI）システム」、の構築が産官学連携で進められている。MI システムでは、入力情報（材料製造・加工条件・使用環境条件）から、複雑系の材料の組織・性能の予測を行うとともに、予測された組織から、これまで長期を要した構造体の疲労・クリープ・遅れ破壊等の長期性能を出力することを目的としている。すでに、鉄鋼材料やアルミ合金を対象として上記の長期性能を予測するための MI システム（ α 版）が開発されており、材料の組織や長期性能を予測し、材料の開発期間の短縮を図るためのツールとして利用されようとしている。また、今後、各種金属への適用にとどまらず、樹脂や CFRP への適用も検討されている。

本 FS 研究は、難燃性マグネシウム合金展伸材も含めたマグネシウム合金全般の長期性能を評価するための手段の一つとして、MI システム適用の可能性を検討することを目的とする。そこでは、マグネシウム合金の信頼性データの採取に際して、上記システムの技術的妥当性を評価し、マグネシウム合金により作製した構造物の性能・寿命を予測するに際しての技術的課題を抽出する。

(2)位置付け、目標値

本 FS 研究では、マグネシウム合金の構造物への適用に際して必要となる信頼性

データ（疲労特性、衝撃変形特性等）を効率的に入手することを目的として、SIP プロジェクトで開発中である MI システムの利用可能性を検討する。具体的には、マグネシウム合金の組織や性能を予測するために必要となる開発アイテム（理論や経験則、数値モデリング、データベース、機械学習）を絞り込むとともに、鉄鋼材料（BCC 金属）・アルミ合金（FCC 金属）用に作製された各種モジュールのマグネシウム合金（HCP 金属）への適用可能性を検討する。また、上記の作業と並行して、エンドユーザ及び素材メカへのヒヤリングを行い、信頼性データの取得に際して MI システムの適用が望まれる性能・部材に関する情報を抽出する。加えて、国内外のマグネシウムにまつわる計算科学にかかわる最新研究動向を調査し、MI システムに加えて、導入すべき計算ツールの有無を検証する。以下に、研究開発項目と目標を記す。

表 III-2.3.7-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
(1) MI システム適用に必要な技術データベース及び予測モジュールの具体的内容の検討		鉄鋼材料（BCC 金属）やアルミ合金（FCC 金属）用に作製された各種モジュールの新難燃性マグネシウム合金（HCP 金属）への適用可能性を明らかにする。	MI システム及びその他システムで開発された各種モジュールのマグネシウム合金（HCP 金属）への適用可能性を明らかにする。	研究テーマとしての妥当性を検討する項目
(2) マグネシウム合金への MI システム適用時の対象性能・対象部材の絞り込み		難燃性マグネシウム合金の信頼性データの取得に際して MI システムの適用が望まれる性能・部材に関する情報を抽出する。	各種マグネシウム合金の信頼性データの取得に際して MI システムの適用が望まれる性能・部材に関する情報を抽出する。	研究テーマとしての妥当性を検討する項目
(3) マグネシウムに関する計算科学手法の研究開発状況の調査		文献調査等により、国内外のマテリアルズインテグレーション及び計算科学を利用したマグネシウム研究開発動向を明らかにする。	（平成 29 年度末で終了予定。）	研究テーマとしての妥当性を検討する項目

(3)全体計画

以下、具体的な研究計画を以下に記す。

① MI システム適用に必要な技術データベース及び予測モジュールの具体的内容の検討

MI システムの開発に従事している研究者へのヒヤリングを実施し、鉄鋼材料(BCC 金属)及びアルミ合金(FCC 金属)のための各種予測モジュールの詳細を調査する。調査結果を基に各種モジュールのマグネシウム合金(HCP 金属)への適用可能性を検討し、適用可能なモジュール群を抽出する。また、MI システムを稼働するために必要となる材料データベースの種類・規模を抽出する。

② マグネシウム合金への MI システム適用時の対象性能・対象部材の絞り込み

エンドユーザ・素材メーカーへのヒヤリングを実施し、マグネシウム合金への MI システムの適用が望まれる材料性能および部材候補を抽出する。また、課題①から抽出される、予測モジュール、技術データベースの仕様と照合した上で、対象性能及び対象部材の絞り込みを行う。

③ マグネシウムに関する計算科学手法の研究開発状況の調査

文献調査、国際会議参加、研究機関訪問等により、国内外の MI 及び計算科学を利用したマグネシウム研究開発に関する研究動向を調査する。

(4)実施体制

本研究ではテーマ番号 42 に設置する委員会およびテーマ番号 15~20 と密接な連携を取りながら目標達成に向けた研究開発を推進する。そこでは、マグネシウム合金の信頼性（疲労特性、耐食性、衝撃特性等）に精通するテーマ番号 15~20 の組合員を専門技術員として、テーマ 50 内に設置する委員会に招へいし、課題を共同で解決する。

(5)運営管理

専門技術員とテーマ 42 の FS 準備委員会メンバーを中心とする委員会を約 2 ヶ月毎に設置する。そこでは、マテリアルズインテグレーションに関する専門家に講演を依頼し、鉄鋼材料やアルミニウム合金への MI システム適用状況及び課題に関する情報収集を行う。情報収集と並行して、マグネシウム合金の信頼性データの採取に際して、MI システムの技術的妥当性を評価し、マグネシウム合金により作製した構造物の性能・寿命を予測するに際しての適用可能性を議論する。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

難燃性マグネシウム合金も含めたマグネシウム合金展伸材の信頼性にまつわるデータは、他の実用金属と比較して圧倒的に少なく、性能評価の長期化が懸念されており、いかに効率化するかが、今後の研究開発の鍵となっている。仮に、MI システムを導入することにより、少ない実験データにより部材の寿命を含めた長期性能を把握する

ことができれば、性能評価に要する時間を大幅に削減することができ、結果として、部品の設計・開発時間・コストを飛躍的に削減することが期待できる。

2.3.7.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.3.7-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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) MI システム適用に必要となる技術データベース及び予測モジュールの具体的内容の検討	鉄鋼材料（BCC 金属）やアルミ合金（FCC 金属）用に作製された各種モジュールの新難燃性マグネシウム合金（HCP 金属）への適用可能性を明らかにする。	平成 29 年度開始の FS 研究であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行する予定である。	△	
(2) マグネシウム合金への MI システム適用時の対象性能・対象部材の絞り込み	難燃性マグネシウム合金の信頼性データの取得に際して MI システムの適用が望まれる性能・部材に関する情報を抽出する。	平成 29 年度開始の FS 研究であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行する予定である。	△	
(3) マグネシウムに関する計算科学手法の研究開発状況の調査	文献調査等により、国内外のマテリアルズインテグレーション及び計算科学を利用したマグネシウム研究開発動向を明らかにする。	平成 29 年度開始の FS 研究であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行する予定である。	△	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.3.7-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
(1) MI システム適用に必要な技術データベース及び予測モジュールの具体的内容の検討	平成 29 年度開始の FS 調査であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行する予定である。	MI システム及びその他システムで開発された各種モジュールのマグネシウム合金（HCP 金属）への適用可能性を明らかにする。	“現状”の欄に記載の通り。
(2) マグネシウム合金への MI システム適用時の対象性能・対象部材の絞り込み	平成 29 年度開始の FS 調査であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行する予定である。	各種マグネシウム合金の信頼性データの取得に際して MI システムの適用が望まれる性能・部材に関する情報を抽出する。	“現状”の欄に記載の通り。
(3) マグネシウムに関する計算科学手法の研究開発状況の調査	平成 29 年度開始の FS 調査であり、全体計画に記載の計画に沿って、調査を遂行する予定である。	(平成 29 年度末で終了予定。)	“現状”の欄に記載の通り。

(3)研究開発の成果と意義

平成 29 年度の FS 研究を開始するに当たっては、平成 28 年度に 4 回の勉強会を開催し、専門家に講演を依頼することにより、マグネシウムの信頼性評価に関する最新研究動向と、MI システムの開発状況について情報収集を行い、得られた情報より本 FS 研究の研究課題項目を抽出した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.3.7-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H27FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H28FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	0	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）

(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）

表Ⅲ-2.3.7-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	0	0	0
H28FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.4 「革新的チタン材の開発」

2.4.1[テーマ番号 10] チタン材一貫製造プロセス技術開発

2.4.1.1 テーマの概要

(1)背景と目的

世界的に需要拡大が確実視される、航空機等輸送機器、並びにインフラ・エネルギー分野に向け、部材の軽量化と抜本的低コスト化によるチタン材の適用拡大を狙い、スクラップ等の低廉チタン原料を活用可能とする溶解脱酸技術と、チタン材一貫製造プロセス技術開発、および強度と加工性に優れたチタン材の開発を目的とする。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.4.1-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
1. チタン低廉原料の溶解脱酸技術の開発	溶解脱酸手法の抽出(酸素濃度：300ppm 以下)	左記を実現する実機プロセスの技術課題明確化。	脱酸後の酸素濃度 300ppm 以下、処理速度 500kg/時間以上を実現する量産設備仕様・制御条件の提示。	原料費コスト 25%削減効果に相当。
2.一貫製造プロセス技術の開発と強度・加工性に優れたチタン材の開発	一貫製造プロセスと、現行材比で強度 20%向上させる材料コンセプトのラボレベルでの抽出。	一貫製造プロセスと、現行材比で強度 20%向上させる材料を量産実現するための課題抽出。	量産相当プロセスにて、以下性能を検証する。 ・引張強度：現行材より 20%向上 ・疲労強度：現行材より 15%向上 ・成形速度：現行より 10 倍向上	製造コスト低減と、ユーザーニーズに応える性能差別化。

(3)全体計画

第 1 期 (平成 25 年度～平成 27 年度)

一貫製造プロセス開発に必要な技術課題に対して、ラボレベルの検討にて解決コンセプトを抽出する。

第 2 期 (平成 28 年度～平成 29 年度)

ラボ実験による実機化への課題抽出。

第 3～4 期 (平成 30 年度～平成 34 年度)

実機想定プロセスでの検証。

(4)実施体制

神戸製鋼所に 8 研究室の再委託先を加えた体制で研究を推進している。

(5)運営管理

数か月に 1 度の頻度で再委託先と打ち合わせを行い、研究の方向性の共有化に努めることで、効果的な研究推進を図っている。

(6)実施の効果 (費用対効果、費用・売上・CO2 削減・省エネルギー等@2030 年度)

一貫製造プロセス開発により、国際競争力に優れた低コストで高性能なチタン材を

製造でき、引き続き拡大が確実視されるチタン需要を取り込み、日本のプレゼンスを拡大できる。

2.4.1.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.4.1-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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.チタン低廉原料の溶解脱酸技術の開発	脱酸溶解を実現する実機プロセスの技術課題明確化。 (酸素濃度： 300ppm 以下)	低廉原料の模擬した初期酸素濃度の原料を目標値（300ppmw）以下に脱酸できる技術を活用したプロセスフローを考案し、ここの技術をラボ実験で検証した。	○	
2.一貫製造プロセス技術の開発と強度・加工性に優れたチタン材の開発	一貫製造プロセスと、現行材比で強度 20%向上させる材料を量産実現するための課題抽出。	一貫製造プロセスのコンセプトを実現するプロセスフローを抽出した。現行材比で強度 20%向上させる材料をラボ実験で検証した。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.4.1-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
1. チタン低廉原料の溶解脱酸技術の開発	第 1 期に見出した溶解脱酸技術を活用するプロセスフローを考案し、各プロセスの実現性をラボ実験で検証した。今後、スケールアップ検証と共に目標処理速度を実現する量産設備仕様・制御条件の検討を推進する。	脱酸後の酸素濃度 300ppm 以下、処理速度 500kg/時間以上を実現する量産設備仕様・制御条件の提示。	有り。
2.一貫製造プロセス技術の開発と強度・加工性に優れたチタン材の開発	一貫製造プロセスについて、ラボ実験と第 1 期に高度化した解析技術を併用し、実現可能なプロセスフローを示した。高強度高加工性チタン材の開発に関しては、ラボ実験により、強度 20%向上を検証し、スケールアップ検証に進展した。 今後、量産プロセス仕様を検討しスケールアップ検証すると共に、量産相当プロセスにて特性の検証を行う。	量産相当プロセスにて、以下性能を検証する。 ・引張強度：現行材より 20%向上 ・疲労強度：現行材より 15%向上 ・成形速度：現行より 10 倍向上	有り。

(3)研究開発の成果と意義

第1期（平成25年度～平成27年度）にて抽出した、一貫製造プロセス開発に必要な技術コンセプトを実装化するプロセスフローを考案し、周辺の技術課題をラボ実験にて検証し、第2期の中間目標を達成できた（一部達成見込みである）。本プロジェクトで目指している一貫製造プロセスの実現にて大きな国際競争力を獲得できると確信しており、今後、量産化に向けた検討を継続する意義が大きいと考えている。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.4.1-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	1	0	0	0	0	0	1
H27FY	1	0	13	1	0	0	0	0	1
H28FY	2	0	5	0	0	0	0	0	1
合計	3	0	19	1	0	0	0	0	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）

(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）

表Ⅲ-2.4.1-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	2	0	0
H27FY	6	0	3
H28FY	5	0	0
合計	13	0	3

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.4.2[テーマ番号 11] チタン薄板の革新的低コスト化技術開発

(2.4.3[テーマ番号 12]高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術開発は、テーマ番号 11 に統合されたため明瞭にする観点よりテーマ番号 11 に含めて記載)

2.4.2.1 テーマの概要

(1)背景と目的

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、輸送機器の軽量化が重要な取り組み課題の一つである。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ている。しかしながら、チタン材は、鋼材に比べて複雑で非常に多くの工程によって製造されているために高価であることから、航空機分野では多用されているものの、自動車等の陸上輸送機器への適用は限定的である。

チタン材の利用を促進するためには、チタン製錬やチタン展伸材製造プロセスの生産性向上が必要となる。これら課題に対処する技術として、チタン鉱石から得られる最初の金属チタンであるスポンジチタンから薄板を製造する工程を革新的に短縮を図る「A.高効率チタン薄板製造技術開発」および、チタン鉱石を現行クロール法とは異なる新しい製錬技術により金属チタン化する「B.チタン新製錬技術開発」および、現行のクロール法における不純物元素の汚染を低減する「C.高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発」を行う。これらの技術開発により、チタン薄板を低コストで製造できる製造工程の確立を目指す。

(2)位置付け、目標値

A. 高効率チタン薄板製造技術開発

チタン薄板のコストを低減するために、現行プロセスにある溶解工程を省略することで革新的に工程短縮を図る。得られるチタン薄板は、低コストだけでなく現行材と同等以上の特性を有することも求められる。このため、チタン薄板の気孔率や引張特性に関する目標を設定した。

B. チタン新製錬技術開発

現行のクロール法以外の新たな製錬方法を開発する。開発初期 3 年間は、チタン製錬法ないし新製錬法の実用化を促進する可能性のある基盤シーズを探索する。得られた結果を、チタン製錬メーカーを含めたアドバイザリーボードにて評価を行い、工業化のための技術課題明確化、技術シーズの絞り込み、組み合わせ等を検討する。

将来の工業化を検討するに足る目標値として、得られたチタンの不純物とコストダウンを目標に設定した。

C.高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発

スポンジチタンの生産性および品質低下をまねく不純物汚染を低減する技術を開発する。不純物汚染低減は、A.高効率チタン薄板製造技術開発に必要な要素である。加えて、生産性向上と不純物汚染低減に伴う歩留り向上に寄与する技術を開発しスポン

ジチタンでのコストダウンも実現する。そのための目標を設定した。

開発されたスポンジチタンは、A.高効率チタン薄板製造技術開発で開発された技術と組み合わせることで、チタン材の革新的なコストを実現でき、チタン材の新市場開拓が期待できる。また、当該スポンジチタンは低コストかつ高品質であるため、単体でも、既存の一般スポンジチタン市場や、高品質スポンジチタン市場での国際競争力の向上を期待できる。

【第1期目標（平成27年度末）】

「高効率チタン薄板製造技術開発」では、実験室規模の試験を行い、基本設計指針の確認および検証を行う。その際、第2期で実施する工業化に必要な要素技術の検討に向け、小型の試験材を用いて効率的に課題を抽出する。この検討の成果として、実験室規模で冷間圧延までに行い作製した冷間圧延板の気孔率1%以下を目標とする。

「チタン新製錬技術開発」では、本研究開発は、チタン製錬法ないし新製錬法の実用化を促進する可能性のある基盤シーズ探索として、4課題の研究を、共同研究先として各々4機関と実施する。その結果を、チタン製錬メーカーを含めたアドバイザーボードにて評価を行い、工業化のための技術課題明確化、技術シーズの絞り込み、組み合わせ等を検討し、平成28年度以降の進め方を決定する。

将来の工業化を検討するに足る目標値として、鉄含有値：2000ppm以下、酸素含有値：1000ppm以下を、ラボスケールで検証することを目標とする。

「高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発」では、スポンジチタンの不純物であるFe、O、Cl濃度を低減できる要素技術を開発する。具体的には下記の値を目標とする。

Fe：ばらつき範囲 50-500ppm、平均値 200ppm以下

O：ばらつき範囲 100-200ppm、平均値 150ppm以下

Cl：300ppm以下

【第2期目標（平成29年度末）】

「高効率チタン薄板製造技術開発」では、実験室規模の試験にて、試験材の成分を検討して、冷間圧延までに行い、高機能化チタン薄板を試作する。この検討の成果として、薄板の引張強度・延性のバランスを現行材より20%向上させることを目標とする。さらに、平成27年度までに実験室規模での試験で得られた成果をもとに、工業化に必要な要素技術の検討を行う。この検討の成果として、工業的に薄板を製造するプロセスを提案することを目標とする。

「チタン新製錬技術開発」では、平成27年度までの結果を受けてチタン製錬メーカーを含めたアドバイザーボード等の議論を経て決定される方針に従い、工業化の可能性があると判断された技術シーズないし要素技術の組み合わせ技術の研究開発を、再度大学と共同研究する。有望なシーズ技術のひとつである「2価チタンイオンを含む塩からのチタンの電析」に関しては大型ラボ設備を導入し、大型化時の技術検証、課題抽出及びその対策検討を行う。これらの取組みにより製錬プロセス設計指針を提案することを目標とする。

「高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発」では、平成 27 年度までに開発された要素技術を実機スケールで検証し、工業化するための問題点を抽出することを目標とする。

【最終目標（平成 34 年度末）】

「高効率チタン薄板製造技術開発」では、最終的には実操業規模での大型薄板コイルを試作し、実用化に向けた検討を行う。実機試験による検証を行いながら、低コスト製造技術確立のために最適な設備設計を行う。これらの検討の成果として、薄板の気孔率 0.2%以下、現行プロセスに比べて薄板製造のリードタイムを減少させることを目標とする。

また、本プロセスの特徴を活かした高機能チタン薄板を提案する。この検討の成果として、薄板の引張強度・延性のバランスを現行材より 30%向上させることを目標とする。

「チタン新製錬技術開発」では、平成 29 年度までの結果を受けてチタン製錬メーカーを中心に産業界側で、工業化にむけた基盤技術検討（課題抽出と解決策の検討）、実機化検討（含 エンジニアリング検討）、パイロットライン（PL）による検証（含設備設計、コスト検討）を実施する。

これらの検討の結果として、工業化が可能と判断される下記の最終目標を設定する。

- ・鉄含有値：2000ppm 以下
- ・酸素含有値：1000ppm 以下
- ・コスト：現行クロール法より 20%削減

「高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発」では、工業化に向かって抽出された問題点を解析し、各要素技術を量産化技術として確立することを目標とする。この量産化技術により下記のようなスポンジチタンの品質及び生産性が達成される。

- ・Fe 濃度：ばらつき範囲 50～500ppm、平均値 200ppm 以下
- ・酸素濃度：ばらつき範囲 100～200ppm、平均値 150ppm 以下
- ・塩素濃度：300ppm 以下
- ・リードタイム：30%減
- ・A 級歩留まり：85%(現状)→92%

上記の最終目標を達成するために、本技術開発においては、各要素技術の開発を進め、最終目標に向け以下の研究開発を実施する。

研究開発目標とその根拠を表Ⅲ-2.4.2-1 に示す。

表Ⅲ-2.4.2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
A.高効率チタン薄板製造技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実験室規模で試作した冷間圧延板の気孔率 1 % 以下 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 高機能化チタン薄板を試作し、引張強度・延性バランスを現行材より 20% 向上 ・ 工業的に薄板を製造するプロセスの提案 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 実機規模の試作試験を行い、冷間圧延薄板の気孔率 0.2% 以下、現行プロセスに比べて薄板製造のリードタイムを減少 ・ 高機能チタン薄板として、引張強度・延性バランスを現行材より 30% 向上。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 引張特性に悪影響しない気孔率 ・ 海外顧客への納品輸送期間に相当する工期が短縮でき、対海外メーカー競争力を確保できる ・ JIS2 種(高強度)材で JIS1 種材なみの成形加工が可能で、高強度要求製品を従来の成形加工方法で成形できる
B.チタン新製錬技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・ アドバイザリーボードにて評価を行い、工業化のための技術課題の明確化、施術シーズの絞り込み、組合せ等を検討 ・ 実験室規模で、鉄含有率 2000ppm 以下、酸素含有率 1000ppm 以下 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 有望シーズ技術の実用化にむけた課題検討を行い、製錬プロセス設計指針を提案 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 工業化に向けた基盤技術検討、実機化検討、パイロットラインによる検証を行う ・ 鉄含有率 2000ppm 以下、酸素含有率 1000ppm 以下で、コストが現行クロール法より 20% 削減 	<ul style="list-style-type: none"> ・ チタン薄板を製造可能な鉄、酸素含有率 ・ 為替レートによらず、海外メーカーとのコスト競争に勝てるコスト安定性が確保できる

C.高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発 ・ Fe 濃度低減	ばらつき範囲 50-500ppm、平均値 200ppm 以下を達成するための要素技術を開発	平成 27 年度までに開発された要素技術を実機スケールで検証し、工業化のための問題点を抽出	ばらつき範囲 50-500ppm、平均値 200ppm 以下を達成する量産化技術を開発	・ A の開発成功に必要な要素であるため ・ 高品質化による国際競争力強化のため ・ 歩留まり向上に寄与するため
・ O 濃度低減	ばらつき範囲 100-200ppm、平均値 150ppm 以下を達成するための要素技術を開発		ばらつき範囲 100-200ppm、平均値 150ppm 以下を達成する量産化技術を開発	
・ Cl 濃度低減	300ppm 以下を達成するための要素技術を開発		300ppm 以下を達成する量産化技術を開発	
・ リードタイム短縮	—		30%減を達成する量産化技術を開発	コストダウンによる国際競争力強化のため
・ 歩留まり向上	—		構造材用チタン歩留 92%を達成する量産化技術を開発	

(3)全体計画

複雑で高コスト要因となっているチタン薄板製造工程を革新的に改良し、チタンの利用促進に寄与する、チタン精練～チタン材製造プロセスの生産性向上技術ならびに、さらなるチタン材の高機能化を達成する技術を開発する。

A. 高効率チタン薄板製造技術開発

「高効率チタン薄板製造技術開発」では、溶解工程を省略し、スポンジチタン（高空隙率のチタン塊）を直接展伸してチタン薄板を製造する技術開発を行う。

初期の 3 年間（平成 25～27 年度）は、現行スポンジチタンを用いて実験室規模の試験を行い、本開発プロセスの基本設計指針の確認およびラボ検証を行う。この実験室規模の試験を通して得られた知見より、その後の 2 年間（平成 28～29 年度）は、工業化に必要な要素技術の課題の抽出を行う。後半の 6 年目（平成 30 年度）以降では、大型薄板コイルの製造から実用化に向けた検討を行う。実機試験による検証、最適設備設計による低コスト製品特性付与技術の確立、実機製品の試作とコスト実証を実施する。

また、平成 28 年度からは、本プロセスの特徴を活かした高機能材の開発も実験室規模で推進し、引張強度・延性バランスを向上させた高機能チタン板を提案する。

B. チタン新製錬技術開発

「チタン新製錬技術開発」では、国内最先端のチタン製錬研究者を中心に、新製錬法ないし新製錬法の実用化を促進する可能性のある基盤シーズ探索を、まず3年間（平成25～27年度）実施する。これらの結果をチタン製錬メーカーを含めたアドバイザリーボードにて評価を行い、工業化のための技術課題の明確化、技術シーズの絞り込み、組み合わせ等を検討し、平成28年度以降の進め方を決定する。

平成28年度以降は、基盤シーズ探索の成果をもとに可能性があると判断された有望技術を、再度大学と共同研究を行い、さらに基盤強化の研究開発を実施するとともに、チタン製錬メーカーに大型ラボ設備を導入して工業化に必要な要素技術の検討を行う。平成30年度以降は、工業化に向けた基盤技術・実用化に向けた課題検討を実施する。

C. 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発

「高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発」では、平成27年度までに、各目標を達成するための要素技術開発を、主にラボスケール試験や数値シミュレーション等によって凡そ完成させ、平成27年度以降、完成した各要素技術の、実機スケール試験を行ない、その効果の実証と最適化を行なう。これにより、平成31年度までに、各目標を実機スケールで達成できる量産化技術を確立する。

(4)実施体制

新構造材料技術研究組合（ISMA）の富津分室である新日鐵住金株式会社と、茅ヶ崎分室である東邦チタニウム株式会社が共同で実施する。

(5)運営管理

主たる研究実施場所である新構造材料技術研究組合（ISMA）の富津分室および茅ヶ崎分室に、業務管理者および経理責任者を配置して、研究開発業務を適切に運営している。運営に必要な事務作業に関しては、ISMA 事業管理部の管理下にあり、事業管理部の指示のもと着実に作業を行なっている。

技術面に関しては、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）や ISMA 技術企画部に対して所定の報告会を実施している。

再委託先とは少なくとも半年に1回、研究進捗打合せを行う。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO2削減・省エネルギー等@2030年度）

「高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発」により、スポンジチタン製造コスト全体の約10%コストダウンを見込む。これにより世界最高水準の高品質と低コストを同時達成できることとなり、既存のスポンジチタン市場で高い国際競争力を得ることが出来る。また、省エネルギー化と言う観点では、約9%の電力削減効果を見込む。これにより、その他の汎用金属に比べて製造時の消費電力が多いチタンの省エネルギー化に貢献する。

また、溶解工程を省略する「高効率チタン薄板製造技術開発」、チタン鉱石を現行

クロール法とは異なる新しい製錬技術により金属チタン化する「チタン新製錬技術開発」と合わせて、チタン薄板を低コストで製造できるようになる。さらに、本プロセスの特徴を活かして引張強度・延性バランスを向上させる等、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海外製チタン薄板に対し、十分競争力のある、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。

本研究開発の対象市場は、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）である。また、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。

2.4.2.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

実験室規模の試験や実機規模の試験を行っており、順調に開発を進めている。第二中間目標に対しても、今後の試験により今年度末には達成できる見込みである。

表Ⅲ-2.4.2-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
高効率チタン薄板 製造技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 高機能化チタン薄板を試作し、引張強度・延性バランスを現行材より 20% 向上 工業的に薄板を製造するプロセスの提案 	<ul style="list-style-type: none"> 実験室規模の試験により、基本プロセスの妥当性を確認し、欠陥の目標(気孔率 0.2%以下)を達成。高機能化のための材料選定を行い、薄板の試作評価を実施中。 スポンジチタンからチタン梱包体(熱間圧延用の素材)を製造する方法を提案。 	<ul style="list-style-type: none"> △ ○ 	<ul style="list-style-type: none"> 適正な材料組合せの選択により、引張強度-延性バランスの改善は達成できる見通し。
チタン新製錬技術 開発	有望シーズ技術の実用化にむけた課題検討を行い、製錬プロセス設計指針を提案	<ul style="list-style-type: none"> 2 価チタンイオンを含む塩からのチタン電析技術において、電極表面にチタン膜を平滑に析出させ、さらに、チタン膜を電極から剥離して回収できる条件を把握。 チタン箔製造プロセスの要素技術を実験室規模で確立。 	○	

高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発	平成 27 年度までに開発された要素技術を実機スケールで検証し、工業化のための問題点を抽出	Fe 汚染低減、O 汚染低減、Cl 汚染低減、分離工程短縮等、各種要素技術の実機スケール試験を行ない、効果と問題点を検証した。	△	還元工程短縮に関しては試験機を H29 年度内に導入後、実機スケール試験を実施予定。
--------------------------	---	---	---	--

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

実験室規模の試験や実機規模の試験にて、各技術の最適化を行なうことにより、いずれの最終目標についても平成 34 年度までに達成できる見込みである。

表Ⅲ-2.4.2-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
高効率チタン薄板製造技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・実験室規模の試験により、基本プロセスの妥当性を確認し、欠陥の目標(気孔率 0.2%以下)を達成。高機能化のための材料選定を行い、薄板の試作評価を実施中。 ・スポンジチタンチタン梱包体(熱間圧延用の素材)を製造する方法を提案。 	<ul style="list-style-type: none"> ・薄板の気孔率 0.2%以下。 ・現行に比べて、薄板の製造リードタイムを減少。 ・高機能チタン薄板として引張強度・延性バランスを現行より 30%向上。 	<ul style="list-style-type: none"> ・気孔率 0.2%以下は達成済み。 ・大型ラボ試験により、最適な設備設計を行い、リードタイム減少は達成できる見通し。 ・適正な材料組合せの選択により、引張強度-延性バランスの改善は達成できる見通し。
チタン新製錬技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ・実験室規模の試験で得られた電析チタンの酸素含有率 70ppm、鉄含有率 50ppm 未満と目標を達成。 ・実験室規模での要素技術確立と平行して、茅ヶ崎分室に大型ラボ設備を導入し、大型化時の課題抽出と基盤技術検討に着手。 	<ul style="list-style-type: none"> ・工業化に向けた基盤技術検討、実機化検討、パイロットラインによる検証を行う ・鉄含有率 2000ppm 以下、酸素含有率 1000ppm 以下で、コストが現行クロール法より 20%削減 	<ul style="list-style-type: none"> ・電解製錬による高純度化と箔製造プロセス簡素化により、最終目標を達成できる見通し。

<p>高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発</p>	<p>高品質化の技術は、各要素技術の効果を実機スケールで実証できた。</p> <p>リードタイム短縮技術は、実機スケール試験のための試験機の仕様を凡そ決定した。</p>	<p>品質・リードタイムの各目標を実現する量産化技術を開発</p>	<p>高品質化の技術は、現在効果を実証済みの技術を改良することで達成できる。</p> <p>リードタイム短縮技術は、今年度導入する試験機を用いた実機スケール試験にて目標を達成できる。</p>
---------------------------------	--	-----------------------------------	---

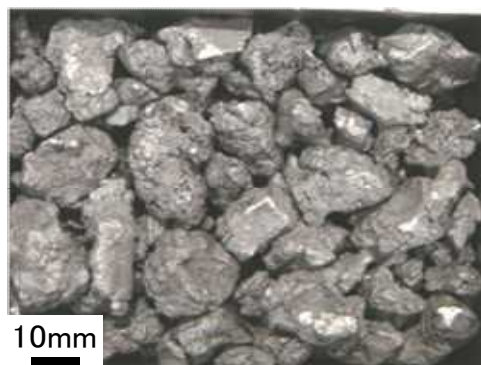
(3)研究開発の成果と意義

A. 高効率チタン薄板製造技術開発

「高効率チタン薄板製造技術開発」は、現行のスポンジチタン（図Ⅲ-2.4.2-1）を出発原料として、実験室規模の大きさの試験材（チタン梱包体）を溶解工程を省略して試作し、一連の薄板製造工程にて薄板を作製し評価を行った。

チタン梱包体は、取り扱いやすさを考慮して、厚さ 75～120mm、重量 3～10kg の大きさとした。チタン梱包体は、加熱後速やかに熱間圧延を行い、厚さ 5.5mm の薄板とし、さらに冷間圧延を行い、厚さ 1.0mm の薄板（開発試験材）を得た。得られた薄板は、断面のミクロ組織観察および引張試験を行った。比較として、現行製造工程同様、溶解工程を経て試作した試験材（現行試験材）も合わせて調査した。

開発当初は、チタン梱包体が熱間圧延時に大きく割れるという課題があった。実験室規模の試験やチタン梱包体の三次元変形解析から得られた結果をもとに、チタン梱包体の組み立て方法を工夫することにより、熱間圧延時にチタン梱包体の破断や割れが発生することなく、良好な薄板が得ることができた（図Ⅲ-2.4.2-2）。



図Ⅲ-2.4.2-1 現行のスポンジチタン



図Ⅲ-2.4.2-2 実機規模の試験で得られた熱間圧延後の薄板

得られた薄板の断面マイクロ組織を観察した結果、現行試験材には認められない気孔が、いずれの開発試験材にも見つかった。しかし、熱間圧延条件を適正にすることにより、その量は0.2%以下とわずかとなり、最終目標（気孔率0.2%以下）を達成することができた。

薄板を引張試験した結果、開発試験材の0.2%耐力、引張強度および伸びのいずれも、現行試験材と同等の値であった。また、開発試験材の試作条件の影響も認められなかった。ただし、試作条件や上記の気孔率とは無関係に、一部で伸びがやや低い開発試験材があった。この原因を調査した結果、原料のスポンジチタン粒の一部に不純物の多いスポンジチタン粒が存在していたためであることがわかった。

以上のように、今年度の実験室規模の試験から、目標を達成するマイクロ組織が得られ、引張特性も現行工程材と同等であることがわかり、本開発プロセスの妥当性を確認できた。一方で、本開発で使用するスポンジチタンは、不純物の少ない高品質のスポンジチタンが必要であることが明らかになった。

B. チタン新製錬技術開発

「チタン新製錬技術開発」では、工業展開可能な低コスト新製錬技術の開発のため、3つの基盤シーズ探索を3機関の共同研究先と実施した。

「2価チタンイオンを含む塩からのチタンの電析技術の研究開発」では、熔融塩中におけるチタンの平滑電析に着目して、チタンの箔や板材の効率的な新生産プロセスの検討を行った。その概要は、(i)四塩化チタンから二塩化チタンを作製し、(ii)二塩化チタンを含む熔融塩中での電解によってカソード基板上にチタンを平滑に析出させ、(iii)電析チタンを基板から剥離することにより、チタンを箔や板材の形状で回収するプロセスである。本年度までに、700°CのNaCl-KCl共晶塩あるいは500°CのMgCl₂-NaCl-KCl共晶塩中で電析を行い、平滑電析に必要な条件を把握した。さらに、電極基板からチタンを剥離して回収できることを確認した（図Ⅲ-2.4.2-3）。また、電析で

得られたチタン中の不純物濃度は、鉄含有率 2000ppm 以下、酸素含有率 1000ppm 以下であることを確認した。



図III-2.4.2-3 電析によって得られたチタン

「酸化物還元原料 CaTiO_3 から Ti を製造する技術の研究開発」では、イルメナイト鉱石から中間原料 CaTiO_3 を製造する方法の検討と、 CaTiO_3 を還元して金属チタンを製造する条件の検討を行った。前者は Fe の選択除去により 2000ppm 以下まで低減可能なプロセスを見出した。後者は、 CaCl_2 - CaO 電解浴を用いて、熔融塩浴中の CaO 濃度、原料粉末の凝集状況、電解時雰囲気圧力による影響による酸素濃度への影響等を調査した。これらの条件を最適化することにより、金属 Ti 中の酸素濃度は従来より低下した。理論的に過不足なく還元する為に必要な理論電気量に対する電気量が 200~300%の時の酸素濃度は 1.5%程度であり、一部の塊状試料の酸素濃度は 0.2%程度であった。また、 TiO_2 を出発原料とした場合も同様の結果が得られた。さらに TiO_2 や高 O 含有金属 Ti に適した条件を探索することにより、低酸素濃度化が見込まれる。

「高温熔融塩を用いた液体 Ti 電解製造技術の研究開発」では、Ti 化合物を含む高温熔融塩中での電解による液体 Ti 金属の直接製造プロセスの検討を行った。 CaF_2 - CaO - TiO_2 浴を用い、 1500°C および Ti 融点(1668°C)以上の 1720°C で電解を行い、電解電位と電析物組成の関係を調べるとともに、Ti 金属の電解を試みた。その結果、限定された電位条件において Ti 金属は得られたが、坩堝との反応により TiN が形成され、液体の Ti 金属を得るには至らなかった。液体 Ti 金属を得るためには、BN 以外の坩堝等を用いて、さらに電解条件を精査する必要がある。

上記の各基盤技術シーズについて工業化の観点から検討を行い、そのひとつである「2価チタンイオンを含む塩からのチタンの電析技術の研究開発」の工業化に必要な要素技術の検討を行うため、大型試験設備および適正条件探索用小型試験設備を茅ヶ崎分室（当方チタニウム）に導入し、電析試験に着手した。今後それら設備を活用し大型化時の課題抽出及びその対策検討などを行う。

C.高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発

「高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発」では、①～⑤のサブテーマについて、それぞれ下記の成果が得られた。

①Fe 汚染防止技術の開発

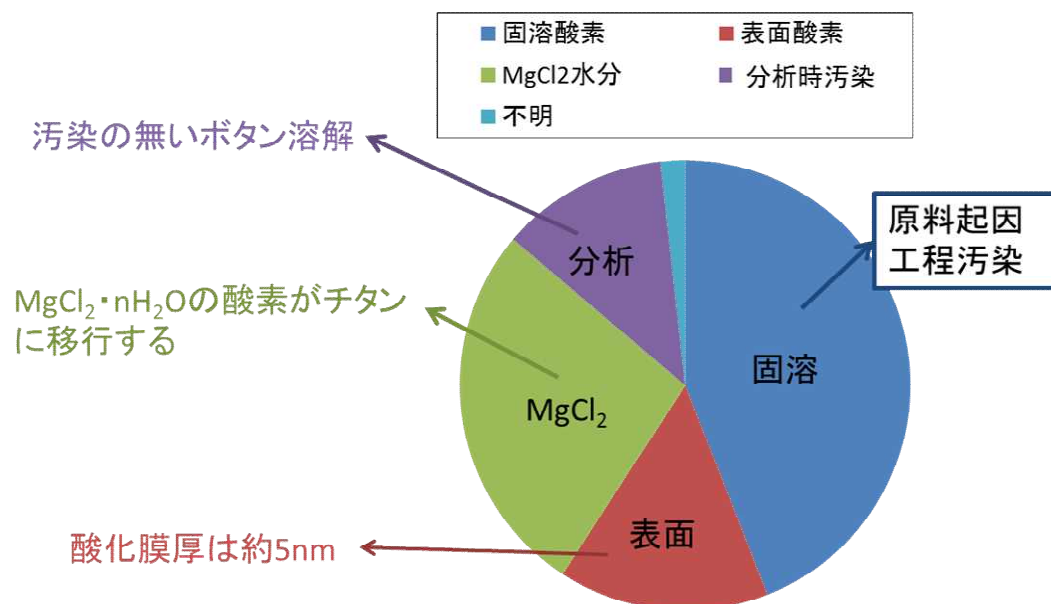
スポンジチタン塊中の Fe 濃度分布、Fe 汚染経路を調査するとともに、種々基礎実験を行なうことで汚染機構を明らかにした。その上で、主要な汚染経路である以下の三つについて、汚染を低減するための要素技術をラボスケールで確立した。

- ・ 注入時点でマグネシウム浴に溶解している Fe
- ・ 反応途中で、反応容器からマグネシウム浴に溶出する Fe
- ・ 反応容器に接触したチタンに直接、固相拡散する Fe

開発した要素技術の実機スケールでの実証試験を行なった。試験の結果、チタン構造材用スポンジチタンの Fe 濃度は 70ppm に半減、ばらつき範囲は 30～120ppm に大幅縮小され、目標として掲げた、ばらつき範囲 50-500ppm、平均値 200ppm 以下を達成するだけの Fe 汚染低減効果があることを実証できた。

②O 汚染防止技術開発

約 300ppm の酸素を有する一般的なスポンジチタンを対象に、酸素の存在形態を調査し、形態別に定量化した(図Ⅲ-2.4.2-4)。各形態の酸素について、汚染低減のための要素技術を開発し、実機スケールでの実証試験を行なったところ、スポンジチタンの酸素濃度は 110～130ppm となり、目標として掲げた、ばらつき範囲 100-200ppm、平均値 150ppm 以下を達成するだけの O 汚染低減効果があることを実証できた。

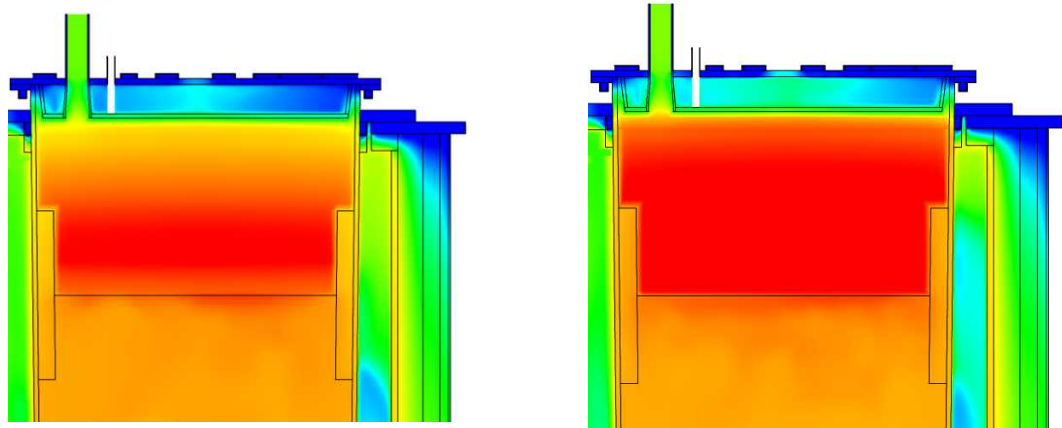


図Ⅲ-2.4.2-4 通常のスポンジチタン中の酸素存在形態と割合

③還元工程高速化技術開発

徹底的な実機データの採取と解析を行なうことで、これまで不明確であった還元反応機構を、反応の序盤、中盤、終盤、それぞれについて定量的に解明した。律速因子

を明らかにした。解明した反応機構を基に、還元反応の数値シミュレーションモデルを開発し、シミュレーション上で理論実験を行なうことで、反応高速化を実現するために必要な設備仕様を検討した。図Ⅲ-2.4.2-5にはその一例を示す。

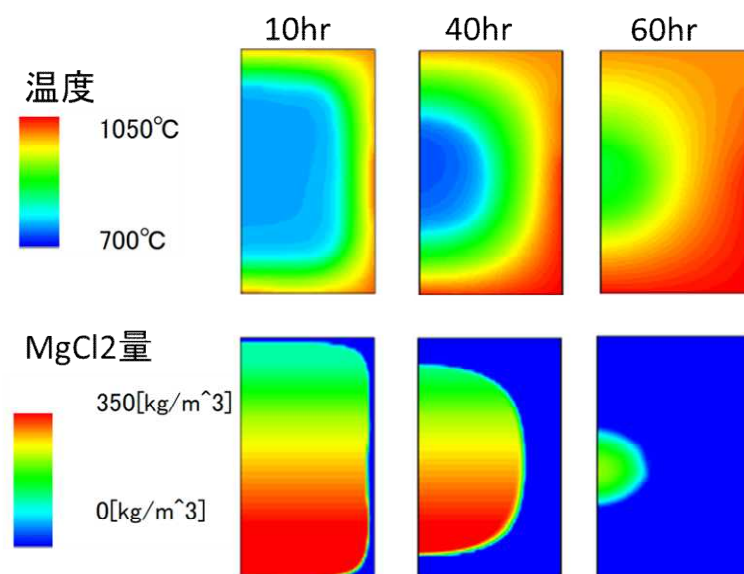


図Ⅲ-2.4.2-5 還元反応シミュレーションの例
(左)標準反応条件、(右)高速反応条件

④分離工程高速化及び塩素汚染防止技術開発

4-1)分離工程高速化

徹底的な実機データの採取と解析を行なうことで、これまで十分解明されていなかった $MgCl_2$ 及びマグネシウムの揮発分離機構について定量的に解明し、律速因子を明らかにした。解明した揮発分離機構を基に、揮発分離の数値シミュレーションモデルを開発し、シミュレーション上で理論実験を行なうことで、分離高速化を実現するために必要な条件を検討した。図Ⅲ-2.4.2-6にはその一例を示す。



図Ⅲ-2.4.2-6 分離シミュレーションの例

4-2)CI 汚染機構解明と対策

CI 濃度は「A.高効率チタン薄板」の成否を左右する重要な要素である。スポンジチタン塊中の CI 濃度分布及びその存在形態を調査することで、CI の汚染機構を明らかにした。解明した汚染機構を基に、実機スケールにて、CI 汚染が生じにくい製造条件で、低 CI スポンジチタンを試作したところ、200ppm 程度の低 CI スポンジチタンをトンオーダーで製造することに成功し、目標として掲げた、300ppm 以下を達成できることを実証した。また、CI 濃度 70ppm 未満の超低 CI スポンジチタンの試作にも成功し、これらのスポンジチタンは、実験用サンプルとして「A.高効率チタン薄板」に提供した。

⑤実機規模での効果検証

前記①～④で開発した技術を効率的に実施するため、必要となる各種試験機の設計、製作および実証試験を行なった。具体的には、下記の三種類の試験機が対象である。

- ・還元高速化用 試験機
→還元反応シミュレーションを活用して装置を設計中
- ・分離高速化用 試験機
→試験機の実証試験を行ない、実用に耐える性能があることを確認した。
- ・還元高速化及び塩素低減用 試験機
→試験機を設計、製作中

以上、A.高効率チタン薄板製造技術開発、B.チタン新製錬技術開発および、C.高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発の各項で記載したとおり、チタン鉱石から得られる最初の金属チタンであるスポンジチタンを溶解して鋳塊とした後、鍛造、圧延してチタン薄板を製造する複雑な現行プロセスに対して、新しい製錬方法で金属チタンを得ることや、溶解工程を省略することにより、チタン薄板を低コストで製造することができる。さらに、本プロセスの特徴である素材の組合せを適正化することにより、強度・延性バランスの向上等、高機能なチタン薄板も製造することができる。

本開発によって得られるこれらの成果により、これまで高コストがゆえに採用されていなかった自動車等の輸送機器等への適用が拡大し、チタン材の特徴である軽量や高耐食性を活かした燃費改善や長寿命化を図ることができる。

さらに、近年、品質特性を向上しつつある海外製チタン薄板に対し、十分競争力のある、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り、国際競争力の強化に資する。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

下記の表には、平成 28 年度よりテーマ番号 11 に統合された [テーマ番号 12] 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発に関する件数も合わせて記載している。

表Ⅲ-2.4.2-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	1	0	9	0	0	0	0	0	2
H27FY	0	2	16	1	0	0	0	0	2
H28FY	5	0	8	3	0	0	0	0	1
合計	6	2	33	3	0	0	0	0	5

※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）

(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）

本開発に関して知的財産権を確保するために、国内はもとより海外にも積極的に特許出願を進めている。

なお、下記の表には、平成 28 年度よりテーマ番号 11 に統合された [テーマ番号 12] 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術の開発に関する件数も合わせて記載している。

表Ⅲ-2.4.2-5 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	1	0	0
H27FY	11	0	1
H28FY	10	0	7
合計	22	0	8

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.4.3[テーマ番号 12] 高品質スポンジチタン高効率製造プロセス技術開発

テーマ番号 12 は平成 28 年度よりテーマ番号 11 に統合された。本来は平成 27 年度以前の成果資料はテーマ番号 12 として記載すべきであるが、簡潔明瞭な記載とするため全年度の成果資料をテーマ番号 11 にまとめて記載する。

2.5 「革新炭素繊維基盤技術開発」

2.5.1 [テーマ番号 51] 革新炭素繊維基盤技術開発

2.5.1.1 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 CO₂ 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する。

(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 CO₂ 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 CO₂ 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。

表Ⅲ-2.5.1-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 32 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	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。	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	革新炭素繊維の高い生産性を生かし、ラージトウ製造を行うことにより、製造エネルギーならびに CO ₂ 排出量の大幅な低減が見込まれることが、LCA 評価により示されている。

	1.5%とする。			
(2)炭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。	マイクロ波により太繊維度前駆体繊維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。	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	同上
(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。	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。	革新炭素繊維と熱可塑性樹脂との複合材料について、標準的な力学的試験法を確立し、標準化を提案する。	革新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、その力学特性を一定基準の下、評価することが求められ、試験法の標準化が重要となる。

(3)全体計画

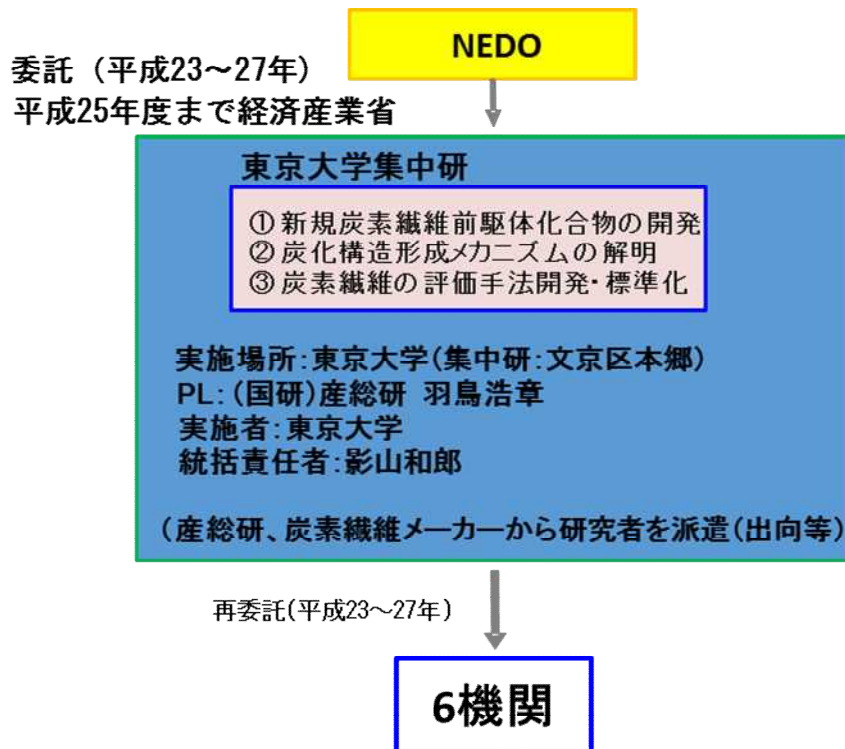
研究開発の全体計画について示す(図Ⅲ-2.5.1-1)。

項目	H23-24	H25-27 (第一期)	H28-29 (第二期)	H30-32 (第三期)	H32-34 (第四期)
①新規炭素繊維前駆体化合物の開発	候補前駆体の合成・絞り込み・合成方法検討	前駆体合成／紡糸基盤技術	異形状炭素繊維の開発(革新炭素繊維の高・多機能化)	革新炭素前駆体繊維製造プロセス技術の基盤確立	革新炭素繊維製造プロセス技術実証
②炭化構造形成メカニズムの解明	マイクロ波炭素化技術の検討、炭化メカニズムの解明、繊維構造と機械特性との相関解明	太繊維前駆体繊維のマイクロ波炭素化技術	マイクロ波炭素化ラージトウ製造プロセス技術の基盤確立	革新炭素繊維製造プロセス技術実証	
	表面処理技術、界面特性の検討	(プラズマ表面処理実証研究)			
③炭素繊維の評価手法開発・標準化	単繊維評価手法の基礎検討・評価手法(改良)	革新炭素繊維/樹脂複合界面の評価			
	界面接着性評価手法	標準化検討			

図Ⅲ-2.5.1-1 革新炭素基盤技術開発 全体計画

(4)実施体制

第1期(平成27年度末)までの実施体制は図Ⅲ-2.5.1-2の通り。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6機関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。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てきた。



図Ⅲ-2.5.1-2 実施体制（平成 23～27 年度）

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、一機関と再委託契約を締結している。平成27年度までと同様に、集中研に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取っている。

(5) 運営管理

① 研究開発目標の達成

製造エネルギーとCO₂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する。

② 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(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23年度～28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

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する。

発明委員会 6回実施

知財 WG 25回実施

④ 出口を明確にした研究開発

NEDO 革新的新構造材料等研究開発「熱可塑性 CFRP の開発」テーマの成果との相乗効果を狙う。

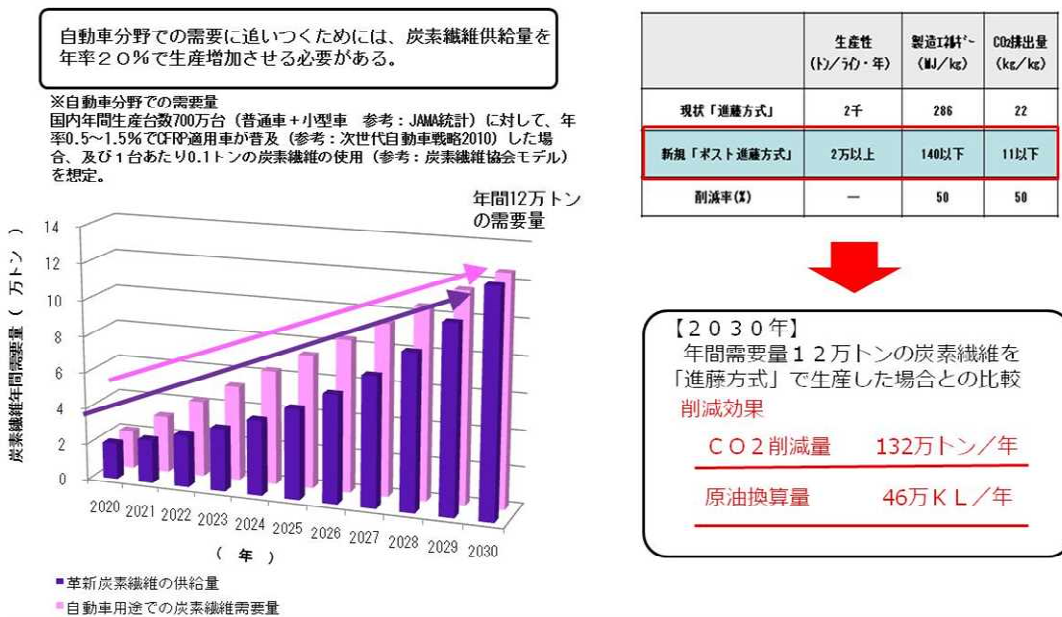
CFRP 連携委員会 3回実施

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂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 CO₂ 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



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Ⅲ-2.5.1-3 実施の効果

2.5.1.2 研究開発成果

(1) 中間目標の達成度

ここでは中間目標に対する達成度について示す。中間目標達成度表記について、大きく上回って達成しているものは「◎」(2017年3月時点)、計画通り進行しているものには「○」(2017年度末達成見込み)、目標に達しないものには「×」(2017年度末に未達成の見込み)で表わす。

表Ⅲ-2.5.1-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成29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	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。	中空繊維や太径単糸など、新規前駆体化合物の特徴を生かした各種異形状炭素繊維の作製に成功した。異形でありながら、伸びが1.7%に達するものなど、特徴ある繊維が得られている。	○	
(2)炭化構造形成メカニズムの解明	マイクロ波により太繊維前駆体繊維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。	PAN系前駆体繊維を用いたマイクロ波加熱によるラージトウの炭素化実験において、引張弾性率250GPaを示す炭素繊維の製造に成功している。この技術を確立する過程で、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。	○	
(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	繊維単体からコンポジットまで、各種特性を精度良く評価するための試験法を新	○	

	り、標準的な力学的試験法を確立する。	規に開発し、標準化・規格化を提案した。革新炭素繊維に樹脂を含浸させて一方向 CFRP を作製した。		
--	--------------------	---	--	--

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2) 最終目標の達成可能性

下記の表Ⅲ-2.5.1-3 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のもとに、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Ⅲ-2.5.1-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 32 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、第一期までに、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、第一中間目標値をクリアする結果を得た。第二期においては、中空繊維や太径単糸など、新規前駆体化合物の特徴を生かした各種異形状炭素繊維の作製に成功している。異形でありながら、伸びが 1.7%に達するものなど、特徴ある繊維が得られている。	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	達成可能と考える。
(2)炭化構造形成メカニズムの解明	第一期までに、PAN 系前駆体を用いた耐炭化糸を使用したマイクロ波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ている。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	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	達成可能と考える。

	移行している。第二期においては、装置構造や運転条件の改良により、ラージトウの炭素繊維の製造に成功し、標準弾性タイプの工業製品並の引張弾性率 250GPa の発現や品質の向上が得られた。		
(3)炭素繊維の評価手法開発、標準化	繊維単体からコンポジットまで、炭素繊維の各種特性を精度良く評価するための試験法を新規に提案し、標準化・規格化を進めてきた。新規前駆体からの革新炭素繊維の成形性・界面接着性・繊維力学特性が、複合化された際の基本特性(強度・耐久性など)に及ぼす影響を明らかにするべく力学特性を評価した。	革新炭素繊維と熱可塑性樹脂との複合材料について、標準的な力学的試験法を確立し、標準化を提案する。	達成可能と考える。

(3) 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

①-1 「新規前駆体化合物 A の開発」

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を実施した結果、太径単糸の製造が容易である溶媒可溶性芳香族ポリマーから Y 型断面を有し、市販炭素繊維(6~7 μm)と比べて 3-4 倍の断面積をもつ太単糸直径の異形状 CF が容易に製造できることを示した。弾性率は市販 PAN 繊維と同等の制御(230-250 GPa) が可能であった。

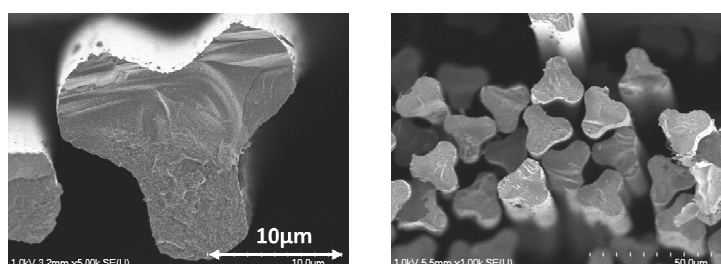
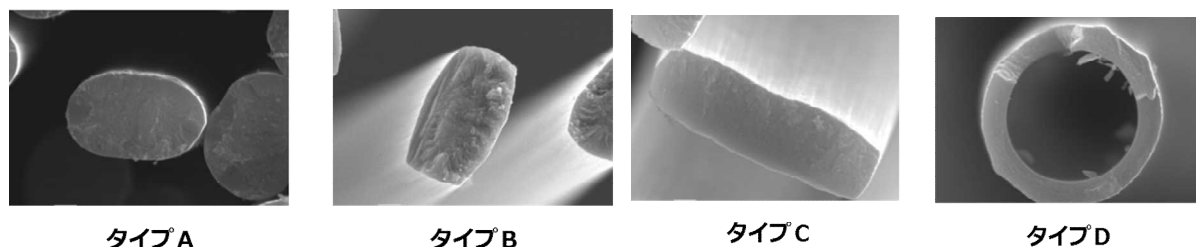


図 III-2.5.1-4 溶媒可溶性芳香族ポリマーからの異形状太径炭素繊維

①-2 「新規前駆体化合物 B の開発」

PAN を原料とし高度な液相反応を施すことで得られる溶媒可溶性耐炎ポリマーでは、既に、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

が得られている。この新規前駆体によって、製造が可能になる異形状の高多機能炭素繊維の作製を実施し、矩形や中空など特徴ある繊維が得られている。特に、矩形繊維(タイプ B)においては、異形でありながら、伸びが 1.7%に達するものなど、炭素繊維自体の高性能化も実現している。



タイプA

タイプB

タイプC

タイプD

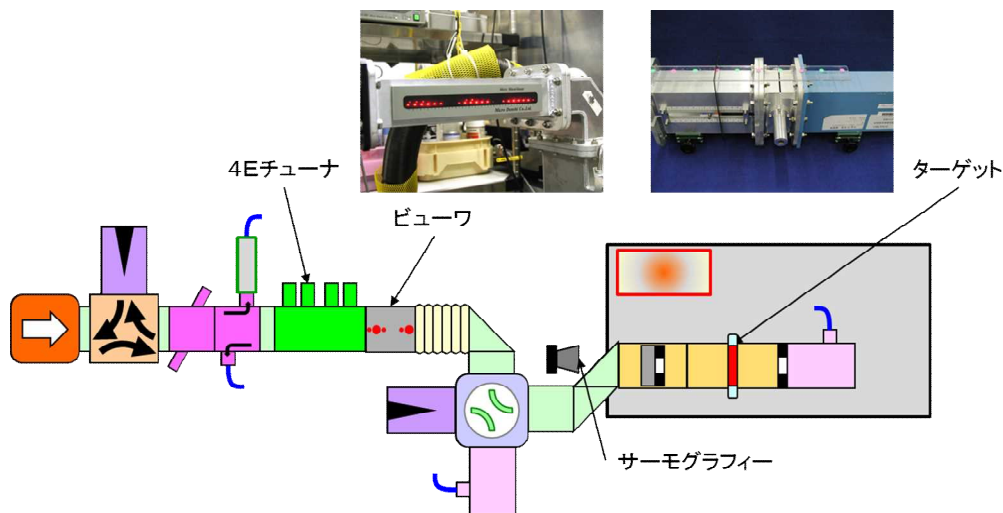
図Ⅲ-2.5.1-5 溶媒可溶性耐炎ポリマーから得られる異形状炭素繊維

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」

マイクロ波による太繊維前駆体繊維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。固体発振器を用いたマイクロ波照射が原料繊維に対し、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PAN系原料繊維束の加熱では、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。原料繊維を搬送させながら照射した場合では、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事が出来た。

高温化および太繊維化を検討するため、24K相当のPAN系原料繊維に対して照射検討を行ったところ、発光を伴う加熱が行われたと共に、石英ガイド管が熔融する高温に至った。太繊維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。

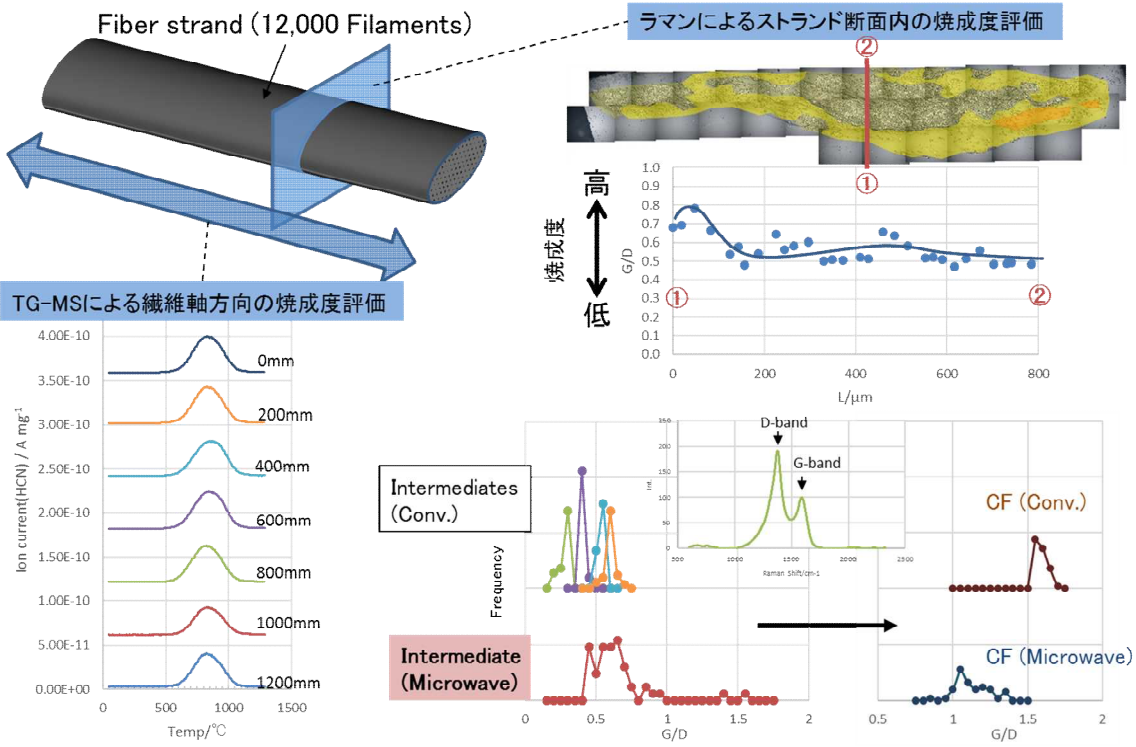


図Ⅲ-2.5.1-6 装置構成

②-2 「マイクロ波等による炭素化技術の確立」

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ている。PAN系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、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る。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。この技術を確立する過程で、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。

前駆体繊維の太繊維化・異形状化に向けて、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。48Kまでの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ている。更に、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ている。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、前駆体繊維の太繊維化や異形状化に対応した工程1の炉体構造の開発が進行中である。



図Ⅲ-2.5.1-7 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

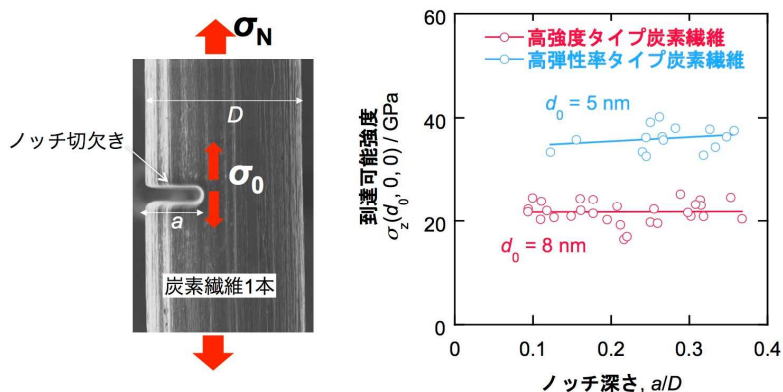
③炭素繊維の評価手法開発、標準化

炭素繊維の力学特性評価手法として、繊維にノッチ切欠きを導入して単繊維引張を行う「ノッチ導入引張試験法」を開発した。これにより、繊維の表面欠陥に依らない、構造に由来する“到達可能強度”を検出することに成功した(図Ⅲ-2.5.1-8)。

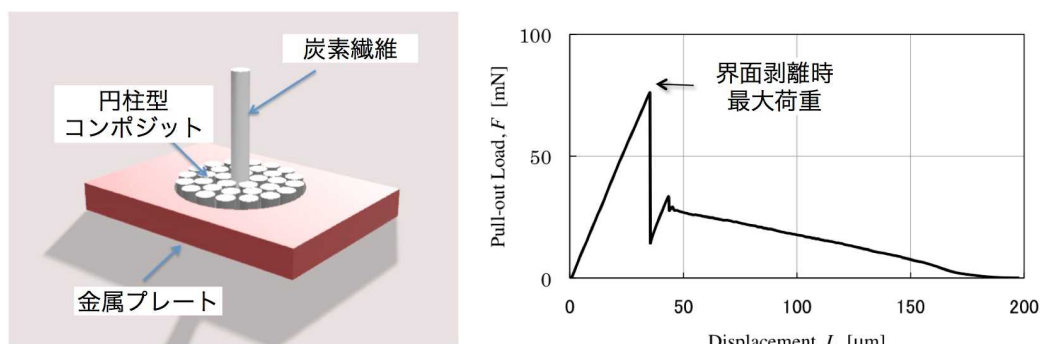
また、炭素繊維と熱可塑性樹脂との界面接着性については、従来法と比較して汎用性が高く計測精度の高い手法として、新たにピンホール引抜き法を開発し、簡便に評価可能な計測装置を試作した。本手法を応用して、複数繊維束における界面接着強度の評価も可能であることが明らかになり、より実用性の高い手法であることが示された(図Ⅲ-2.5.1-9)。

さらに、新規開発された炭素繊維(異形状含む)のコンポジットとしての力学特性を正確に把握するため、熱可塑性樹脂を対象とした樹脂含浸プリプレグ製造装置を導入して、高品質かつ安定的にプリプレグが製造できる条件を見出した。これを基に、新規開発炭素繊維についてもコンポジットの作製を開始して、その基本特性の評価を進めている。

上記、繊維単体からコンポジットまで、各種特性を精度良く評価するための試験法を新規提案し、標準化・規格化を検討中である。



図Ⅲ-2.5.1-8 ノッチ導入炭素繊維と到達可能強度の評価結果



図Ⅲ-2.5.1-9 円柱形コンポジット引抜き試験と荷重変位曲線の一例

(4)成果の普及(論文、外部発表等)

表Ⅲ-2.5.1-4 論文、外部発表等の件数(内訳)【平成29年3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			
H25FY	0	0	12	0	0	0	0	0	0
H26FY	4	0	15	1	0	0	0	1	2
H27FY	3	0	14	2	23	0	1	0	1
H28FY	2	1	14	5	0	0	1	0	1
合計	9	1	55	8	23	0	2	1	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)

(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)

表Ⅲ-2.5.1-5 特許の件数(内訳)【平成29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
H28FY	0	13	0
合計	12	20	8

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

(6)論文賞受賞について

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。

表Ⅲ-2.5.1-6 論文受賞 【平成29年3月末現在】

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
------------------	--	------------------	----------

2.6 「熱可塑性 CFRP の開発」

2.6.1

[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

2.6.1.1 テーマの概要

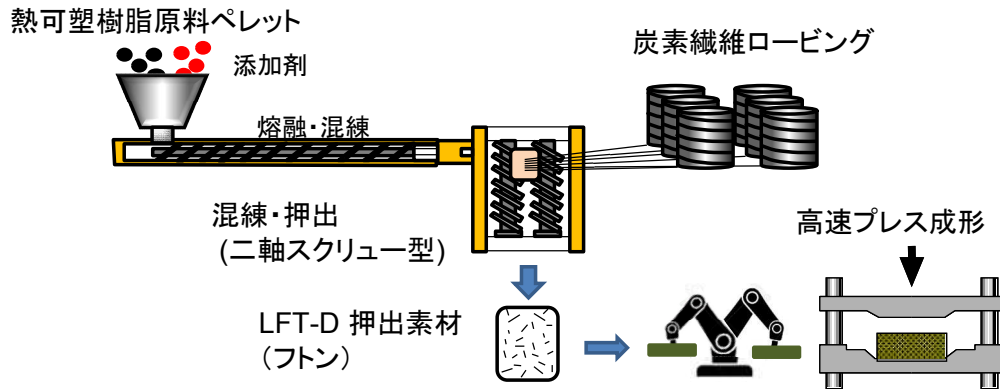
(1) 背景と目的

① 背景

- ・ 世界的な環境規制の拡大を背景に、CO₂ 削減および燃費向上ニーズが増大しつつある中、EV 化および知能化に伴う重量増要因への対応のため、自動車構造への軽量化ニーズ、そのための CFRP 適用の動きが一挙に加速しつつある。
- ・ すでに欧州では量産車への CFRP 適用が開始されているが、主構造には高コストの連続繊維複合材、非構造用には GF/PP が主体である。BMW i3 では All CFRP であったが、最新モデルではマルチマテリアル化の動きがみられる。
- ・ 一方、国内では一部の高級スポーツ車など、限定的な適用にとどまっている。
- ・ 低コスト複合材の有力技術である LFT-D (Long Fiber Thermoplastic - Direct) 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・低コストな部材が得られる技術であるが、現在は、非構造用 GF/PP が主流であり、CF/PA はまだ研究段階にある。
- ・ このような中、当プロジェクトでは、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、NEDO/ISMA の委託を受け、産官学連携で研究開発に取り組んでいる。

② 目的

- ・ LFT-D 工法は、炭素繊維と樹脂原料をインラインでコンパウンドし高速プレス成形することで軽量・低コストな構造部材を得る技術で、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、熱可塑樹脂の持つ、再成形性、リサイクル性、融着接合性の特長を有する。(図Ⅲ-2.6.1-1)
- ・ 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及び設計手法の開発が課題である。
- ・ 本プロジェクトでは、LFT-D 材の物性を見極め、最適なプロセス条件を確立するとともに、企業ニーズを踏まえた LFT-D 実用化の技術基盤確立を目指している。

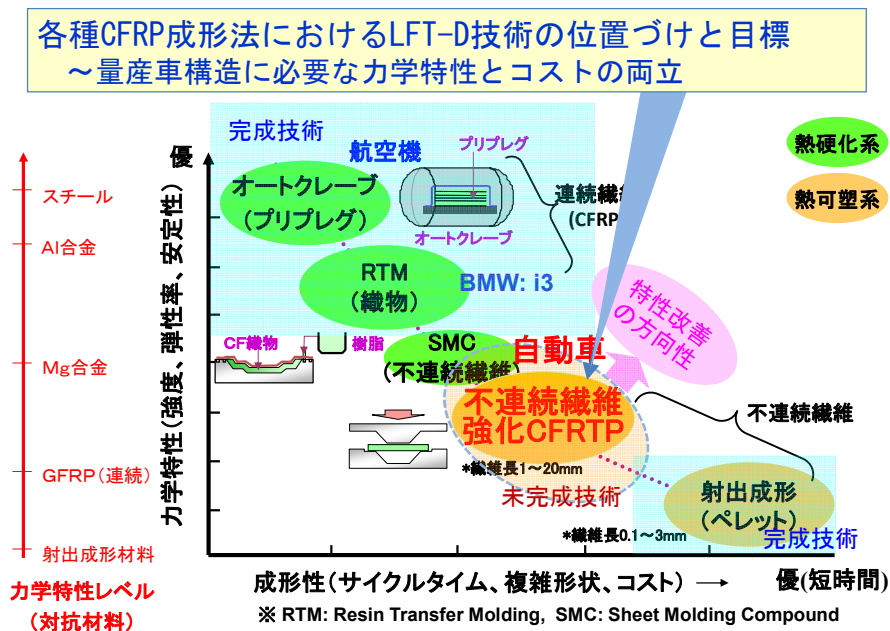


図Ⅲ-2.6.1-1 LFT-D 成形プロセス概要

(2)位置付け、目標値

① 位置付け

CFRP の成形法は多く存在するが、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付けられる。(図Ⅲ-2.6.1-2)



図Ⅲ-2.6.1-2 CFRP 成形法の位置づけ

② 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な車体構造
- ・ 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、 $\Delta 30\sim 40\%$ の軽減を達成しており、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、最終年度に行う 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する。（図Ⅲ-2.6.1-3）

将来的には、炭素繊維の需要急拡大による量産化効果、及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が期待できる。

表Ⅲ-2.6.1-1 に研究項目ごとの研究開発目標とその根拠を示す。

実証目標：ロータスエリーゼ実車シャーシ構造を対象モデルとしてLFT-D構造を試作、強度試験により技術実証

Elise現状構造：

アルミ押し出し部材＋アルミパネル部材の複数部品を接着＋リベット／ボルト締結。



実証構造：

LFT-Dの特長を活かした構造設計、補強材を効果的に組合せたハイブリッド構造、成形性を考慮した金型設計、高速接合による実証構造の組立製作



図Ⅲ-2.6.1-3 構造実証の計画概要

表Ⅲ-2.6.1-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
(e)LFT-D 成形の要素技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 混練プロセスを完成し、LFT-D 中間基材と成形部材の材料特性 DB の一部を構築。 試験法標準化の道付けを実施。 成形プロセスも扱う力学モデルの高度化を行い、CAE 解析ソフトに組込む。 	<ul style="list-style-type: none"> 混練プロセスの最適条件を確立する。 CAE 解析モデルの高度化及び精度向上を図り、実用レベルの予測精度を確立する。 使用繊維、樹脂の多様化を図ると共に、LFT-D 材料、設計、設備・成形プロセスのデータベースを構築する。 CFRTP 試験法標準化の研究を進める。 	外部動向／企業ニーズ
(f)大物高速成形技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 初歩的なボディ部材のプレス成形技術を確立。 部材剛性確保のための LFT-D 使用構造の部分補強を試行。 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 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詳細まで含めて確立する。 高速マテハン技術の要素技術を確立する 非破壊検査技術の要素技術を開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> 設計要件を満足するフルパック成形の最適化技術を確立する。 部品の設計要件を満足するハイブリッド構造設計技術を開発する。 構造解析 CAE 最適設計プログラムを開発する。 	外部動向／企業ニーズ
(g) 大物高速接合技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> 熱可塑性 CFRP 使用部材同士の高速接合技術を確立する。 	<ul style="list-style-type: none"> 溶着接合が可能な構造設計、製造及び高速融着接合技術を開発する。 融着接合部位の高速 NDI 技術を開発する 	外部動向／企業ニーズ
(h) 意匠性外板製造技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	<ul style="list-style-type: none"> LFT-D 成形板の光学特性を解明し、高意匠性外板製造に関する基礎を構築する。 	<ul style="list-style-type: none"> 高意匠性ハイブリッド外板製造技術を開発する。 	H29 実施計画

(3)全体計画

研究開発の項目、内容について表 2.6.1-2 に示す。

表Ⅲ-2.6.1-2 研究開発項目

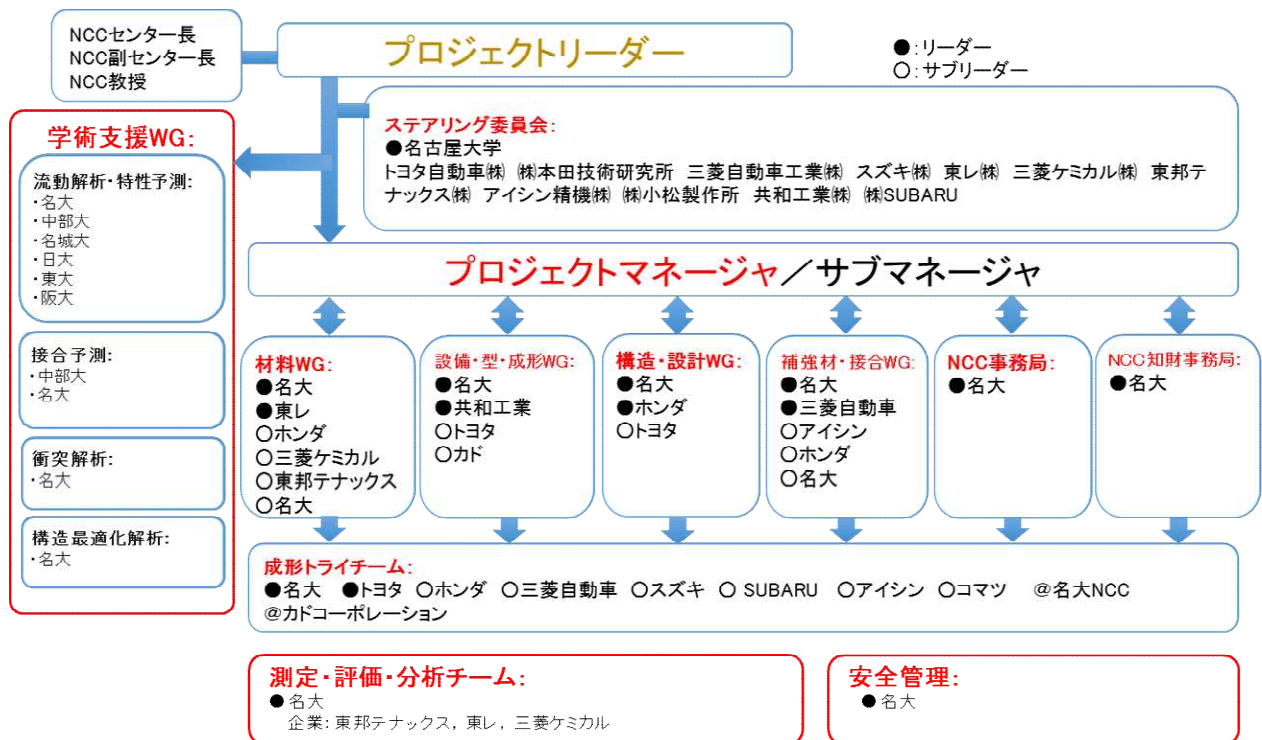
研究開発項目	研究開発の内容
(e)LFT-D成形の要素技術の開発	e1: LFT-D成形法に最適な成形プロセスの開発 e2: LFT-D成形品の特性評価技術の検討 e3: LFT-D成形品のデータベースの一部の構築 e4: LFT-D成形CAE解析技術の開発
(f)大物高速成形技術の開発	f1: ハイスサイクル プレス成形技術の開発 f2: マテリアルハンドリング技術の開発 f3: LFT-D構造設計技術の開発 f4: 補強材ハイブリッド成形技術の開発 f5: 高速NDI技術の開発
(g)大物高速接合技術の開発	g1: 高速接合要素技術の開発 g2: 接合部位の高速非破壊検査技術の開発
(h)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	i1: 実車模擬LFT-D構造の試作・試験による技術実証

(4)実施体制

集中研 11 社および分担研 2 機関、再委託先 7 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ている。(図Ⅲ-2.6.1-4)

- ・ ステアリング委員会 (月次): 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、設備・型・成形、構造・設計、補強材・接合の 4 つの 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。
- ・ 成形トライチーム: NCC 及び再委託先での成形試験を実行指揮。
- ・ 測定・分析・評価チーム: 物性測定、結果の分析、評価実施。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、名大を中心とする学術支援 WG を設置し、LFT-D 物性事象の学術的な同定、理論的裏付けの研究を実施し、プロジェクトへフィードバックしていく。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。(表Ⅲ-2.6.1-3)



図Ⅲ-2.6.1-4 研究開発実施体制

表Ⅲ-2.6.1-3 分担研及び再委託先の体制

分担研、再委託先	作業項目	所属WG
(国研)産業技術総合研究所	繊維長分布、繊維配向等の測定・評価	測定・分析・評価WT
(株)カドコーポレーション	マテハン設備、融着接合技術(電磁誘導)	補強材・接合WG 設備・型・成形WG 成形トライT
再委託先7社	部分補強用UDテープ	補強材・接合WG 設備・型・成形WG
	融着接合技術(レーザー融着)	材料WG 補強材・接合WG
	NDI技術	構造・設計WG
	成形CAE解析技術	材料WG 設備・型・成形WG
	LFT-D成形基礎試験、ハイブリッド補強材成形基礎試験	補強材・接合WG 設備・型・成形WG 成形トライT
	構造設計・解析	構造・設計WG
	金属接合技術	補強材・接合WG

(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を回している。またマスタープランに基づき、各WG活動計画が策定され、具体的な実行に落

し込んでいる。

- ・ 再委託先については、実施内容および担当 WG を決め、基本的に各 WG で管理している。
- ・ ワーキンググループ（材料 WG、設備・型・成形 WG、構造・設計 WG、補強材・接合 WG）：それぞれ月 1～2 回程度の頻度で開催。NCC、集中研企業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。
- ・ 合同 WG：月次開催。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 での成形試験は隔週ペースで実施。再委託先での成形試験は関連 WG の計画に基づき実施。
- ・ 測定・分析・評価チーム：月 2 回程度実施。材料 WG の集中研企業および NCC を中心に測定、評価手法について検討し、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・CO₂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車による国内販売、輸出及び海外生
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 年以降 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 導入設備費：15 億円
- ・ プロジェクト費用（2013 年～2022 年）：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@2030 年（世界全体の販売台数
@2030 年の 13%に相当）
- ・ LFT-D 適用部品重量 100kg と想定（平均車体重量 1500kg と想定しその
の中の構造重量 390Kg の 25%）（40kg 軽量化）
- ・ LFT-D 部品売上総額(2026 年～2030 年)：約 2 兆 3000 億円（総付加価値：
約 5800 億円）
- ・ 燃費削減：0.3km/L→ガソリン削減総量@2030 年：約 262,000kl
- ・ CO₂ 排出削減総量@2030 年：約 6 億 t

2.6.1.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.6.1-4 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
(e)LFT-D 成形の要素技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 混練プロセスを完成し、LFT-D 中間基材と成形部材の材料特性 DB の一部を構築。 試験法標準化の道付けを実施。 成形プロセスも扱う力学モデルの高度化を行い、CAE 解析ソフトに組み込む。 	<ul style="list-style-type: none"> 物性の支配因子である繊維長と分散の分析評価法について課題を明確化した。 独自の繊維長（分布）及び配向測定法を確立した。 LFT-D 材の圧縮特性の基礎データを取得した。 成形流動及び反り変形の 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。 	○	
(f)大物高速成形技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 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詳細まで含めて確立する。 高速マテハン技術の要素技術を確立する 非破壊検査技術の要素技術を開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 精度向上のためのマテハンの改造を行った。 安定的なフルパック成形条件を確立した。 LFT-D 最適設計法の概念を構築し、Hat 材での試行を行った。 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	<ul style="list-style-type: none"> 熱可塑性 CFRP 使用部材同士の高速接合技術を確立する。 	<ul style="list-style-type: none"> 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	<ul style="list-style-type: none"> LFT-D 成形板の光学特性を解明し、高意匠性外板製造に関する基礎を構築する。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.6.1-5 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
(e)LFT-D 成形の要素技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・材料物性向上の研究推進。 ・混練プロセス解明のための実験実施、混練パラメータと物性の相関評価実施、傾向把握。 ・測定法の基本技術確立（GPC、繊維長分布、繊維配向他） ・CAE 解析基本技術を開発 ・反り解析の精度向上。 	<ul style="list-style-type: none"> ・混練プロセスの最適条件を確立する。 ・CAE 解析モデルの高度化及び精度向上を図り、実用レベルの予測精度を確立する。 ・LFT-D 材料、設計、設備・成形プロセスのデータベースを構築する。 ・CFRTP 試験法標準化の研究を進める。 	見通しあり（コアテーマである LFT-D 混練プロセスについて、これまでの研究で判明した物性支配パラメータの条件振りを中心とした研究により達成可能）
(f)大物高速成形技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・フルパック成形条件を確立 ・マテハン改造仕様設定。本改修を除き、LFT-D 成形設備は完成。 ・LFT-D 構造の衝突解析法は目途。基準を満たす設計解を検討。 ・補強材ハイブリッド成形基礎技術は目途。 ・メタル/LFT-D ハイブリッド成形板試作評価。 	<ul style="list-style-type: none"> ・設計要件を満足するフルパック成形の最適化技術を確立する。 ・部品の設計要件を満足するハイブリッド構造設計技術を開発する。 ・構造解析 CAE 最適設計プログラムを開発する。 	見通しあり（これまでの研究成果で得られた基本技術・知見（流動性向上の緒策、最適設計法）を深掘りしていくことで達成可能）
(g)大物高速接合技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・超音波溶着法による単純平板接合の基礎技術は確立。 ・接合強度データ取得 	<ul style="list-style-type: none"> ・溶着接合が可能な構造設計、製造及び高速融着接合技術を開発する。 ・融着接合部位の高速NDI 技術を開発する 	見通しあり（これまでの研究成果で得られた基本技術・知見を深掘りしていくことで達成可能）
(h)意匠性外板製造技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・成形プロセスによるクラス A 意匠性付与は困難性確認。 ・基礎解明のため表面粗さ生成モデル基礎技術の研究着手。 	<ul style="list-style-type: none"> ・高意匠性ハイブリッド外板製造技術を開発する。 	見通しあり（モデルの精度向上と検証試験により達成可能）

(3)研究開発の成果と意義

(ア) 研究開発の成果

- ・ 第2期が終了する平成29年度での目標達成と技術実証を見据えた具体的な活動計画を策定し、各研究課題に取り組んだ。
- ・ 初年度に構築したプロジェクト推進体制とマネジメントのPDCAを回す仕組みに基づき、プロジェクトを運営するとともに、知財成果の権利化に関するルールを整備、運用した。また名古屋大学を中心とする学術支援研究を推進し、技術課題の解明に資する知的成果を得た。
- ・ 表Ⅲ-2.6.1-4に示す技術成果を得た。

(イ) 研究開発の意義

上記成果の意義としては下記が挙げられる。

- ・ 中期目標であるLFT-D要素技術確立の目処を得ると共に、プロジェクト最終目標達成への取組の方向性が定まった。
- ・ 集中研企業との実効的な連携体制が構築できたと共に、研究成果に対する評価を得、求心力を保つことができた。
- ・ 産官学ドリームチームによる相乗的成果の創出とその有効性が示され、今後のコンソーシアム雛型になりうる。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.6.1-6 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29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	0	0	0	0	0	25	1	0	7	1	0	4
H26FY	0	0	0	2	0	16	12	0	2	2	0	5
H27FY	2	0	1	1	0	13	2	0	0	4	0	5
H28FY	4	0	1	4	0	20	4	1	2	3	1	6
合計	6	0	2	7	0	74	19	1	11	10	1	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）

(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）

表Ⅲ-2.6.1-7 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	2	0	1
H28FY	4	0	1
合計	6	0	2

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.6.2[テーマ番号 28] 熱可塑性 CFRP の開発及び構造設計・加工基盤の開発

2.6.2.1 テーマの概要

(1)背景と目的

エネルギー消費量削減、CO₂ 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)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.6.2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
① 熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発	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 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	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 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	各工程間を連続的に行うことが可能な実用性を兼ね備えた、全体プロセス最適化のための生産・組立技術の開発 ライン速度 1 台/分を実現する接合工程の実証 誤差±10%で接合部の長期耐久性（長期曝露後の残存強度）を予測可能な確率論的評価法の確立	量産プロセスに適用することを目的として、熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術、及び接合部の耐久性等評価解析技術に関する開発項目と目標値を設定した

	試体による検証		実ライン速度で直径5mmの円形欠陥を検出可能な非破壊検技術の確立	
②(a)熱可塑性CFRPの中間基材の開発	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	制振性、静音性、意匠性等の付加価値を向上させた中間基材の製造に係る要素技術の確立 クラスA外観の実現	自動車部材の多様なニーズ（加工性、強度、剛性、耐衝撃性、耐熱性、意匠性、振動吸収性など）を満たすことを目的とし、構造設計・成形加工・性能評価からのフィードバックを重視した開発とした
②(b)熱可塑性CFRPの性能評価技術の開発	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	開発材料の特性評価法の国際標準化施策の立案	材料特性発現メカニズムの解明は開発技術の発展に不可欠であり、また高精度な性能評価試験方法とCAEのためのデータベース構築は実用化を加速させるために極めて重要と考えて開発項目と目標値を設定した
②(c)熱可塑性CFRPを用いた構造設計技術の開発	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	材料、成形、接合の各性能バラツキと、使用環境が車両性能に与える影響を解明し、車体構造にフィードバックさせることでスチールと同等以上となる量産品質保証技術の確立	熱可塑性CFRPにおけるCAE解析による予測技術をスチール並とし、部材一体化設計や最適トポロジー技術を適用することで、部品点数大幅削減と大幅軽量化を実現する最適構造設計技術を開発することが不可欠と考えて開発項目と目標値を設定した
②(d)熱可塑性CFRPの成形加工技術の開発	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	成形プロセスの最適化により不良率を1%以内とする手法、および非破壊検査等による品質検査手法の確立	②(c)で提案される部材・構造に対応可能な成形シミュレーション技術を開発し、成形加工プロセスの最適化技術を確立することが不可欠と考えて開発項目と目標値を設定した

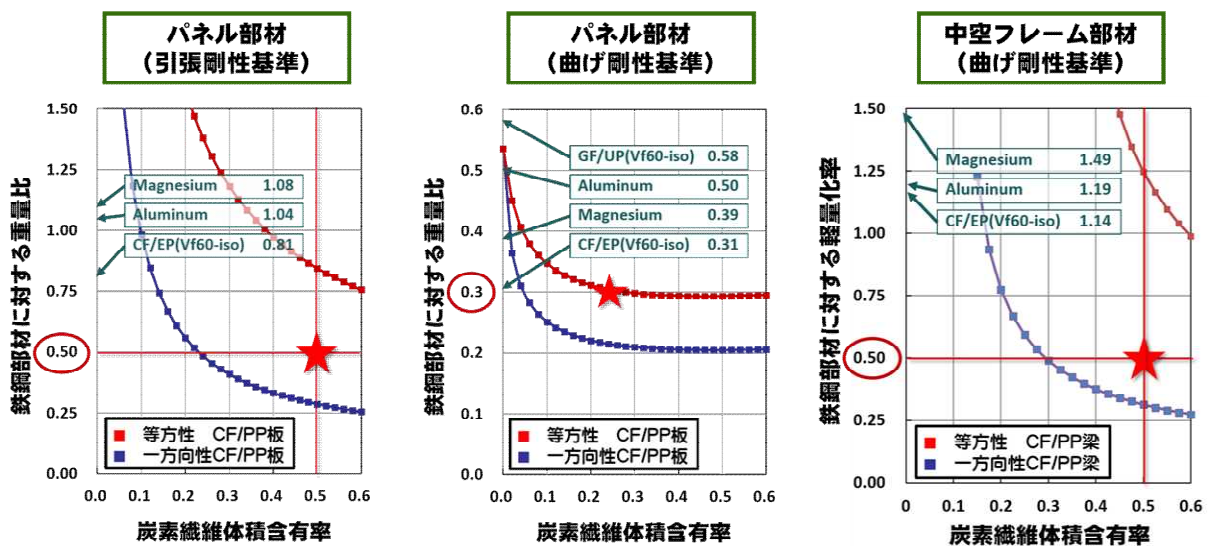
(3)全体計画

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

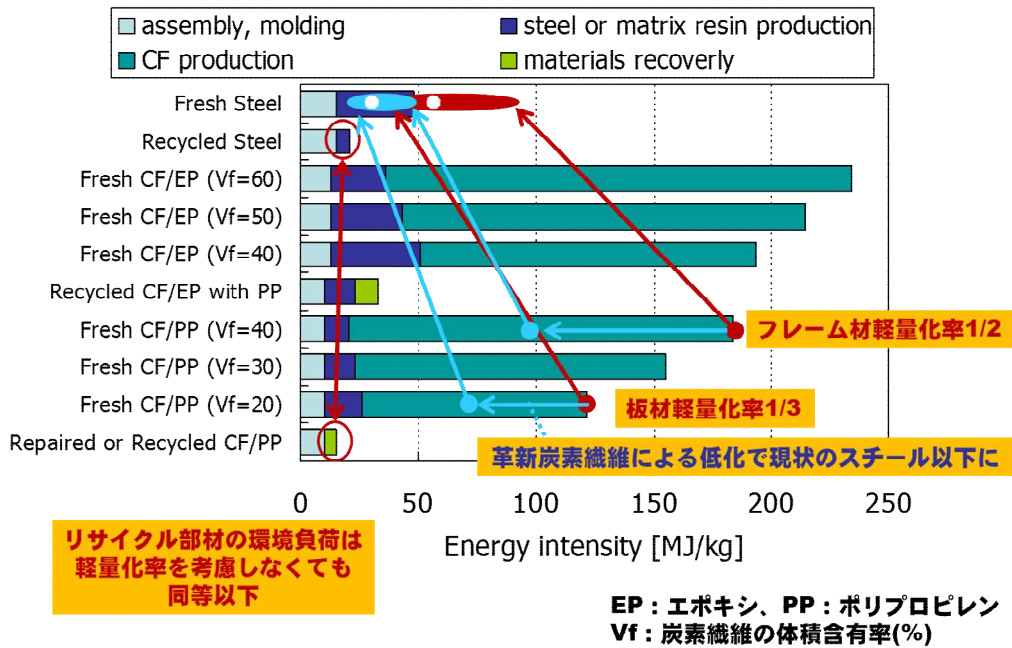
「熱可塑性CFRPの開発及び構造設計・加工技術の開発」について以下の各研究開発内容を実施する。

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Ⅲ-2.6.2-1 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Ⅲ-2.6.2-2 に示されるようにライフサイクルアセスメント的に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する。また、接合部の耐久性等の評価解析技術を確認する。



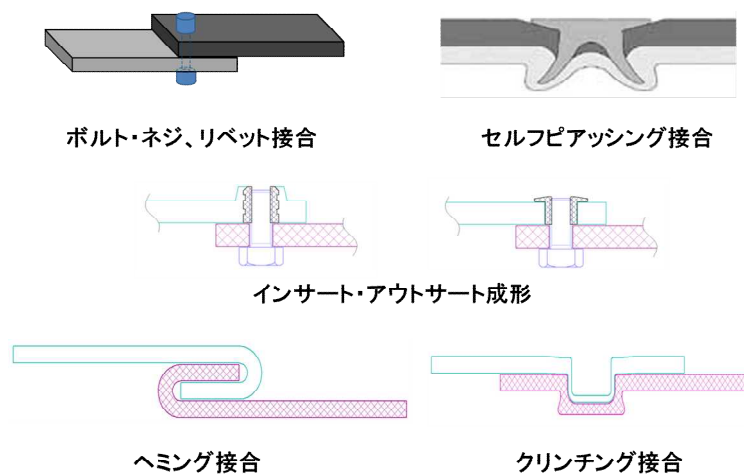
図Ⅲ-2.6.2-1 熱可塑性 CFRP の軽量性



図Ⅲ-2.6.2-2 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Ⅲ-2.6.1-3 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する。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する。



図Ⅲ-2.6.2-3 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する。また、接合部に生じる接着剤の熱歪み・熱応力（図 III-2.6.2-4）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する。

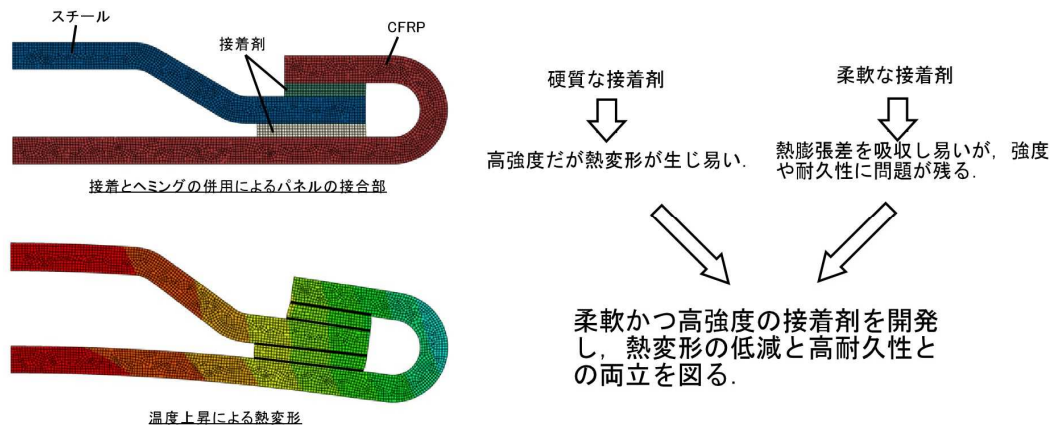
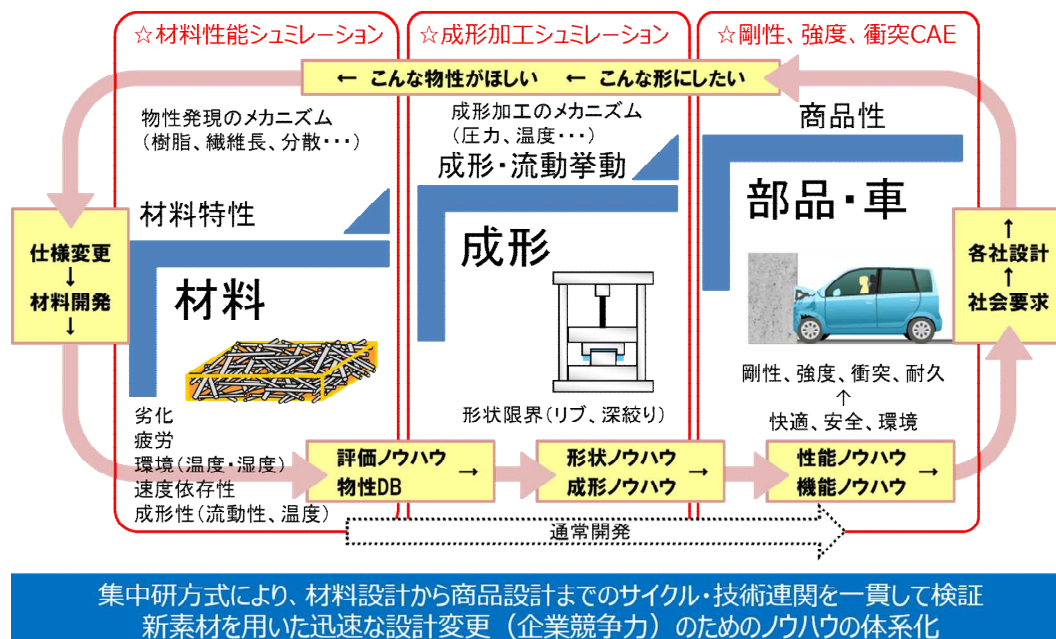


図 III-2.6.2-4 接着接合部に生じる熱歪み・熱応力と接着剤の特性による緩和

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する。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 III-2.6.2-5 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

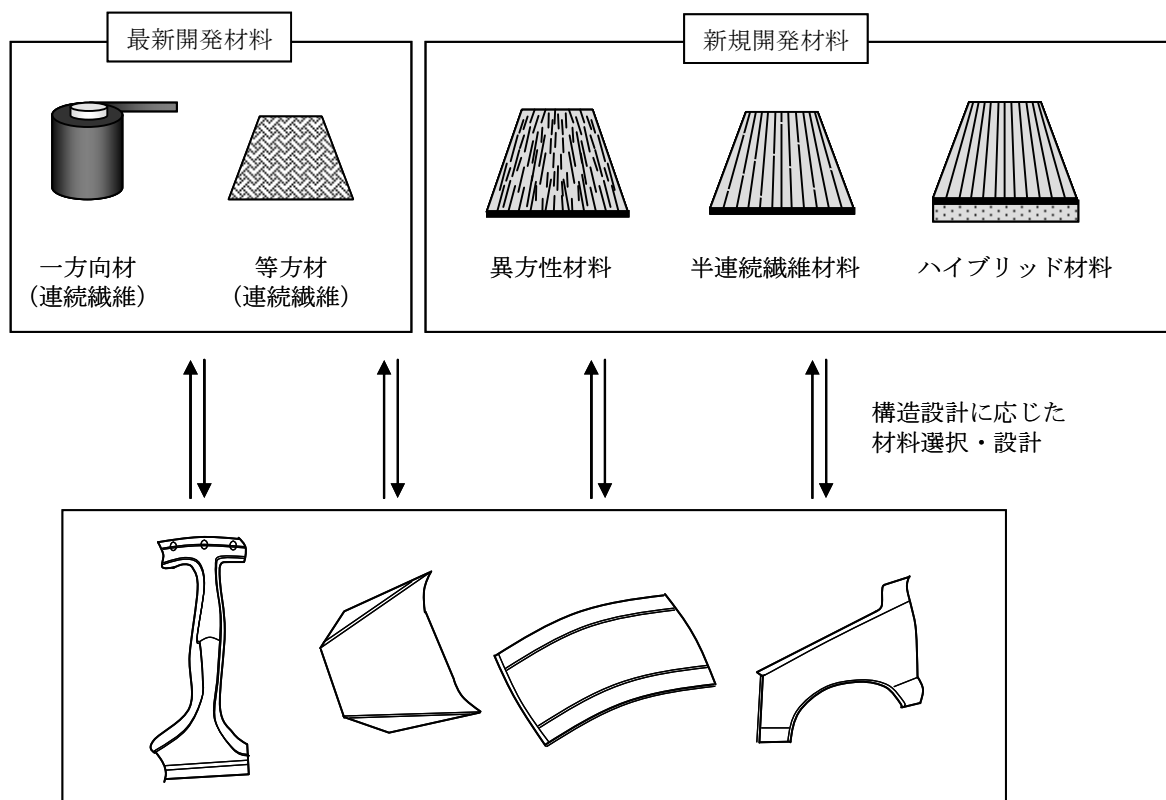
図 III-2.6.2-5 集中研方式による技術連関の体系化

(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する。具体的には、図Ⅲ-2.6.2-6 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する。

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する。

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する。



図Ⅲ-2.6.2-6 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

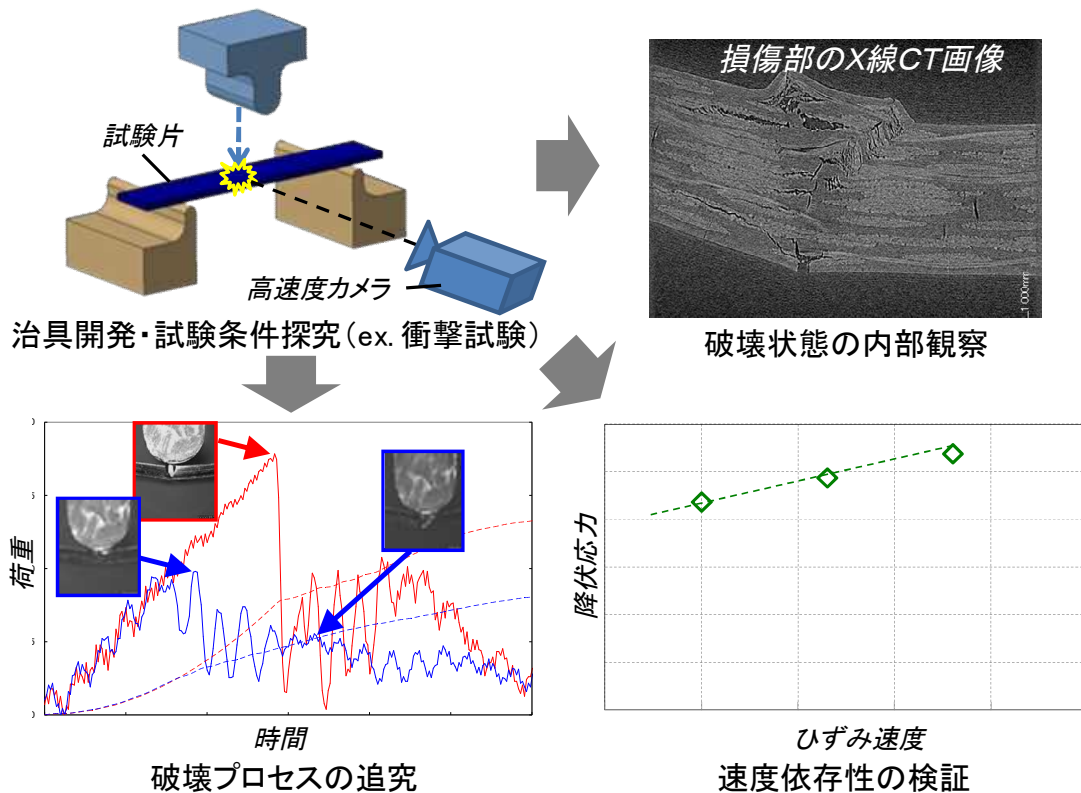
熱可塑性不連続 CFRP の材料性能評価技術は、圧縮特性、衝撃特性、長期耐久性などのメカニズムの解明にまでは至っていないため、本研究開発項目において、まず、図Ⅲ-2.6.2-7 に示すように、熱可塑性 CFRP (連続繊維、不連続繊維、等方性、異方

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。

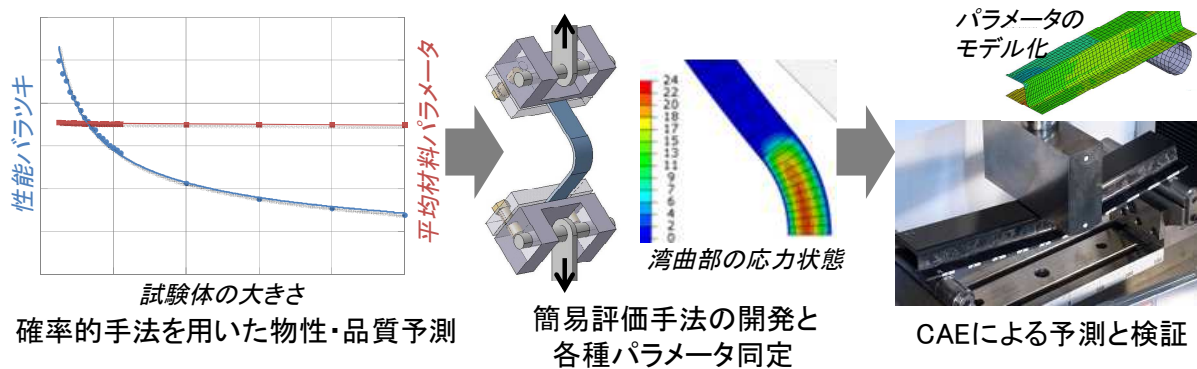
次に、開発する材料・構造設計手法・成形加工方法を実際に量産車開発に使用する際に不可欠となるコンピューター支援エンジニアリング (Computer Aided Engineering、以下「CAE」という。)への入力パラメータを効率的に整備する手段として、金属材料や樹脂材料並みの手間で材料特性を評価する簡易評価手法を開発する。具体的には、異方性を有する中間基材やそのハイブリッド材料群を活用していくため、CAEに入力すべきパラメータが増えることから、より効率的な評価手法のみならずデータの内挿・外挿理論などを開発する必要がある。そこで、確率論・統計学の手法を駆使して、基材形態と評価パラメータごとに合理的な試験条件・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III-2.6.2-8 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する。



図III-2.6.2-7 材料特性発現メカニズムの解明

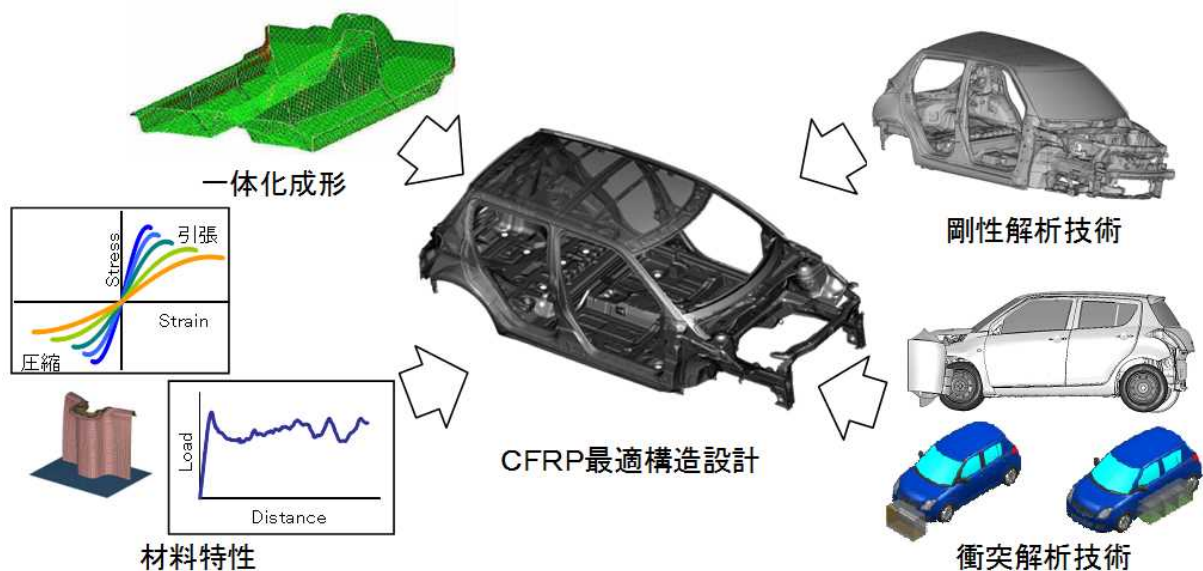


図Ⅲ-2.6.2-8 CAE パラメータの整備と予測及び設計技術への適用性検討

(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Ⅲ-2.6.2-9 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する。



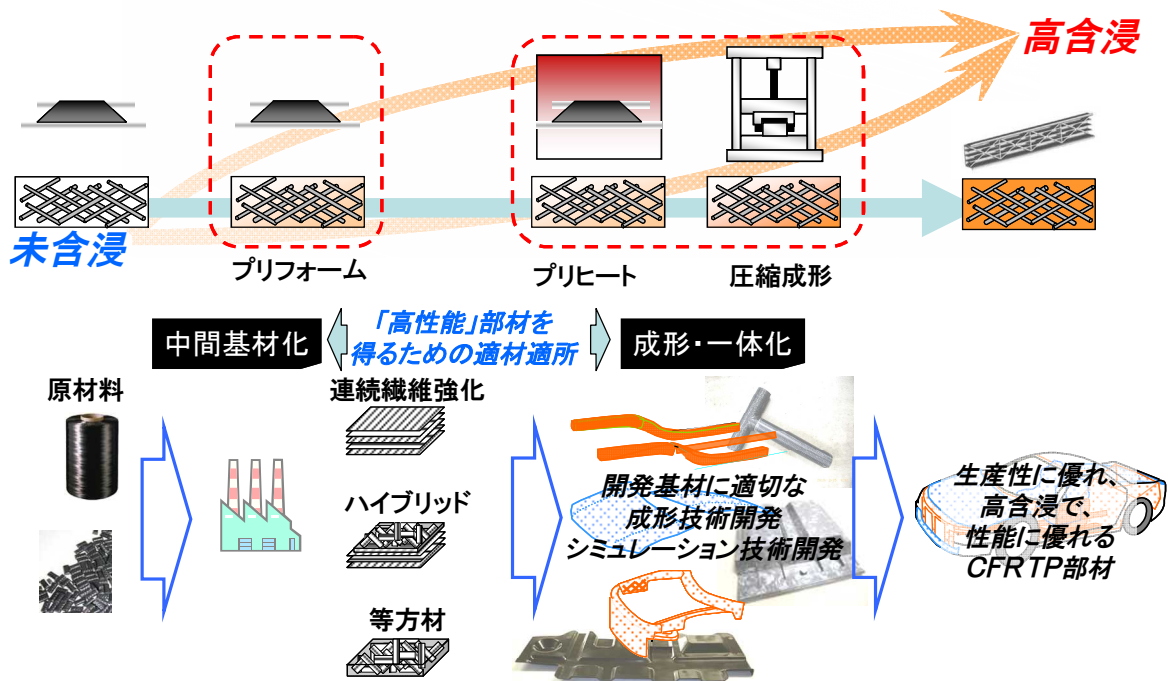
図Ⅲ-2.6.2-9 構造設計技術開発

(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Ⅲ-2.6.2-10 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する。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する。

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する。

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する。



図Ⅲ-2.6.2-10 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

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 を組織して実施している。

【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	○	○	
三菱レイヨン株式会社	(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)			○		
福井ファイバーテック株式会社	(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)					○

(5)運営管理

共同研究契約における各種規定に基づき、22 機関（82 名）が共同研究を行っている。

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）行っている。

- 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）

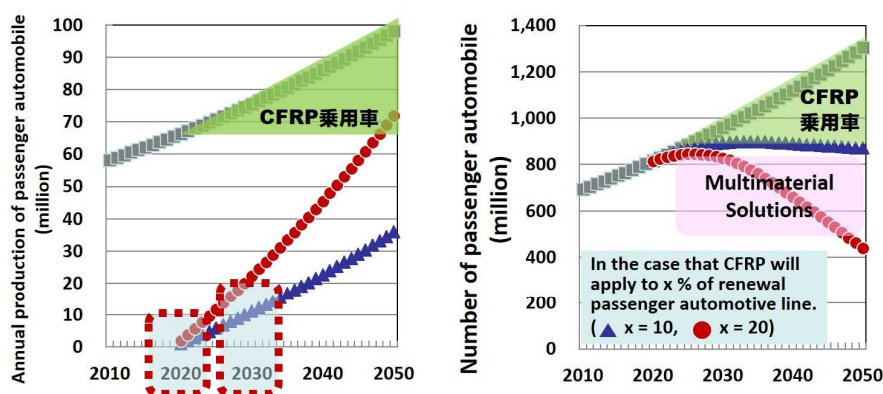
(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO2 削減・省エネルギー等@2030 年度）

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 CO₂ 排出量（2.32t-CO₂/年）がそれぞれ 37.5%（一台あたり石油 375L/年、0.87t-CO₂/年）削減される。なお、図Ⅲ-2.6.1-2 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Ⅲ-2.6.2-11 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、CO₂ 削減量は 870 万 t-CO₂/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、CO₂ 削減量は 4,350 万 t-CO₂/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Ⅲ-2.6.2-11 革新炭素繊維プロジェクトと共有している開発目標

2.6.2.2 研究開発成果

(1) 中間目標の達成度

表Ⅲ-2.6.2-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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>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</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</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>合技術の確立を見出した 実装／高信頼性な高速プロセスに焦点を絞った</p>		<p>加味すること 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</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</p> <p>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</p>	○	
②(d)熱可塑性 CFRP の成形加工技術の開発	<p>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</p>	<p>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 以下成形技術開発を取り組んでいる</p>	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.6.2-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
①熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発	<p>設備導入計画の変更により、全体プロセス最適化のための生産・組立技術の開発は困難</p> <p>同理由によりライン速度 1 台/分を実現する接合工程の実証は困難</p> <p>実装／高信頼性な高速プロセスの最適化検討および誤差±10%で接合部の長期耐久性（長期曝露後の残存強度）を予測可能な確率論的評価法の確立に焦点を絞る</p>	<p>各工程間を連続的に 行うことが可能な実 用性を兼ね備えた、 全体プロセス最適化 のための生産・組立 技術の開発</p> <p>ライン速度 1 台/分を 実現する接合工程の 実証</p> <p>誤差±10%で接合部の 長期耐久性（長期曝 露後の残存強度）を 予測可能な確率論的 評価法の確立</p> <p>実ライン速度で直径 5mm の円形欠陥を検 出可能な非破壊検技 術の確立</p>	<p>湿度環境下での試験 および動的粘弾性特 性等の温度・周波数 （時間）の関係を検 討することにより左 記目標は達成でき ると考えている</p>
②(a)熱可塑性 CFRP の中間基材の開発	<p>多様な中間基材の要素技術は構築完了。CAE 向けデータの取得も進んでいる</p> <p>SHC 材を用いた設計・実証試験を繰り返すことにより、目標達成に向けた技術課題を明確にして材料設計に必要な知見を得た。これらの結果を活用して材料開発を継続していく</p>	<p>制振性、静音性、意匠性等の付加価値を向上させた中間基材の製造に係る要素技術の確立</p> <p>クラス A 外観の実現</p>	<p>部材として達成すべき物性目標であり、ターゲットの設定、構造設計との連成が必須</p> <p>②(b)、②(c)で構築した CAE 技術を用いて目標達成に向けた FS を実施すると共に母体企業が有する樹脂設計技術を加味することにより目標達成の見込み</p>
②(b)熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発	<p>開発した動的試験法や面外せん断試験法、また、検証中の特性発現メカニズムやそれを基にした CAE 用材料モデルが、強化形態の異なる 3 種類以上の開発材料に一律適用可能であるかを探求中</p> <p>SHC 材を用いた設計・実証試験を繰り返すことにより、目標達成に向けた技術課題を明確にすると共に、構造 CAE 解析精度の向上を検討している</p>	<p>開発材料の特性評価法の国際標準化施策の立案</p>	<p>現運営体制が継続され、かつ、経済産業省の標準化委員会の基本特性分科会と積極的に開発試験法について議論出来れば見通しあり</p>
②(c)熱可塑性 CFRP を用いた構造設計技術の開発	<p>開発材料の性能の統計的性質は既に明らかにし、成形時の基材流動シミュレーション手法を開発するなど、再現性と予測可能性の向上に注力している</p>	<p>材料、成形、接合の各性能バラツキと、使用環境が車両性能に与える影響を解明し、車体構造にフィードバックさせることでスチールと同等以上となる量産品質保証技術の確立</p>	<p>十分に可能</p>

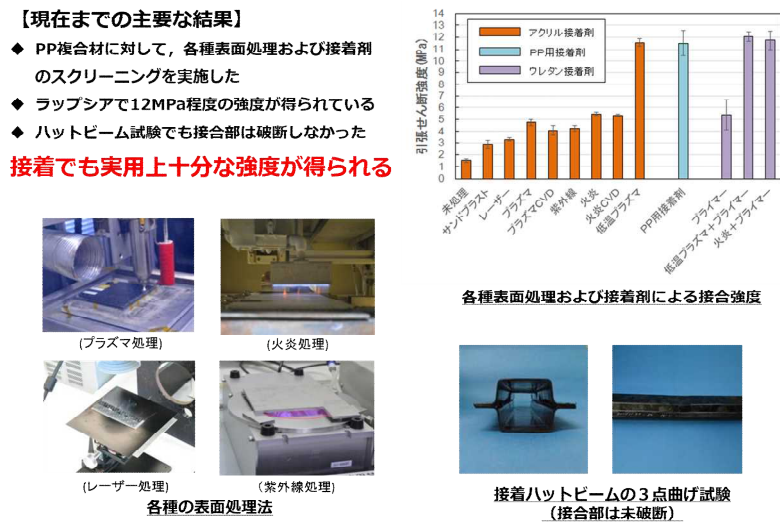
②(d)熱可塑性 CFRP の成形加工技術の開発	平成 27 年度加速予算にて導入した 800 トンプレス機及びロボット周辺機器の構築が完了し、10MPa 以下での成形加工技術開発を行う	成形プロセスの最適化により不良率を 1% 以内とする手法、および非破壊検査等による品質検査手法の確立	技術的には可能と考えているが、予算的に厳しい
--------------------------	--	--	------------------------

(3)研究開発の成果と意義

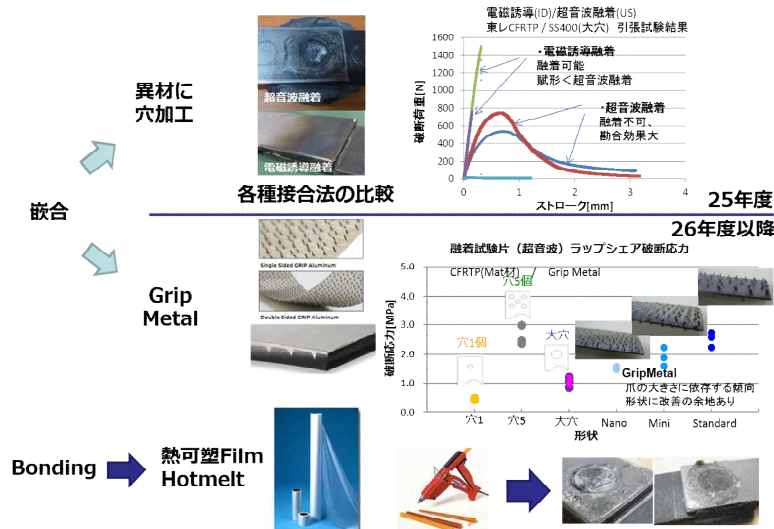
①熱可塑性 CFRP と金属材料との接合技術開発

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Ⅲ-2.6.2-12 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ます。

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ている。図Ⅲ-2.6.1-13 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ている。



図Ⅲ-2.6.2-12 接合技術 (接着接合)



図Ⅲ-2.6.2-13 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ている。

マット材（CMT: Carbon fiber Mat reinforced Thermoplastics）

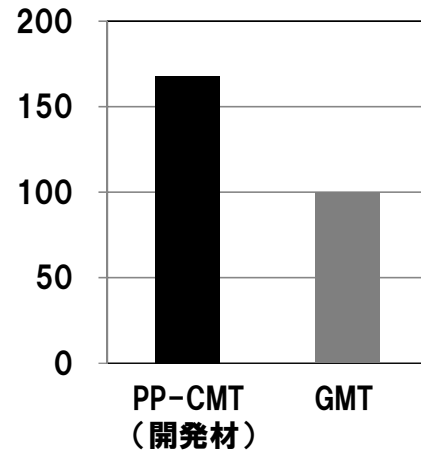
CMT は、繊維長が制御された炭素繊維を、単繊維レベルで等方・均質に分散させたマットに、熱可塑性樹脂を含浸させた中間基材である。連続繊維強化に匹敵する強度利用率を特徴とし、この性質は強度理論でも証明されている。本研究期間では、① CMT のエネルギー吸収能力の実証、②長期耐久性シミュレーション、③マルチマテリアルへの展開に向けた予備検討を進めた。

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。



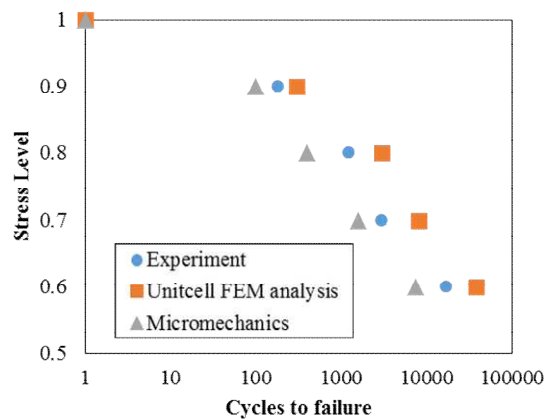
図Ⅲ-2.6.2-14 CMT 製クラッシュボックス

重量あたりの
エネルギー吸収量



図Ⅲ-2.6.2-15 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Ⅲ-2.6.2-16 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Ⅲ-2.6.2-17 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Ⅲ-2.6.2-18 CMT を用いたサンドイッチ成形体

連続・半連続中間基材

図Ⅲ-2.6.2-19 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ている。

テーマ	H26-28の進捗
中間基材	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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。
構造設計 CAE	<ul style="list-style-type: none"> 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。 軸圧縮など衝撃破壊試験を精度よく再現。 衝撃解析精度向上、疲労予測に着手。
成形加工 CFD	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。

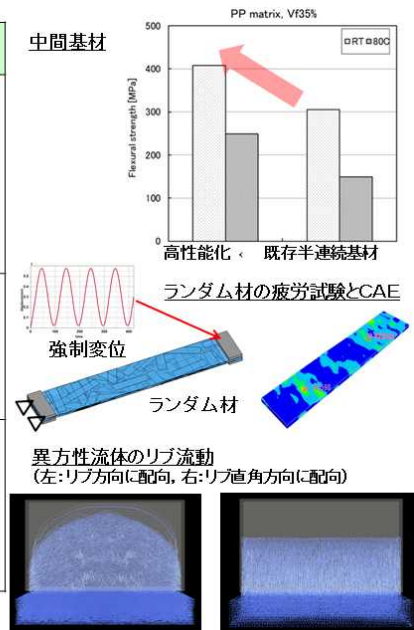


図 III-2.6.2-19 中間基材 (連続・半連続系)

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ている。

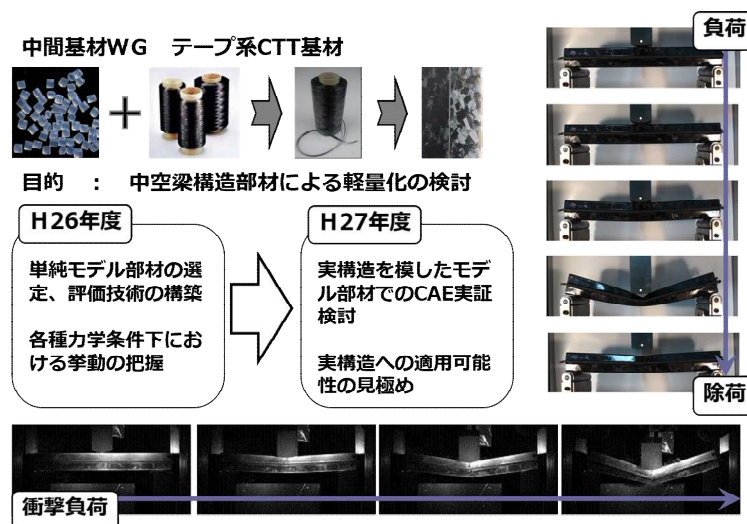
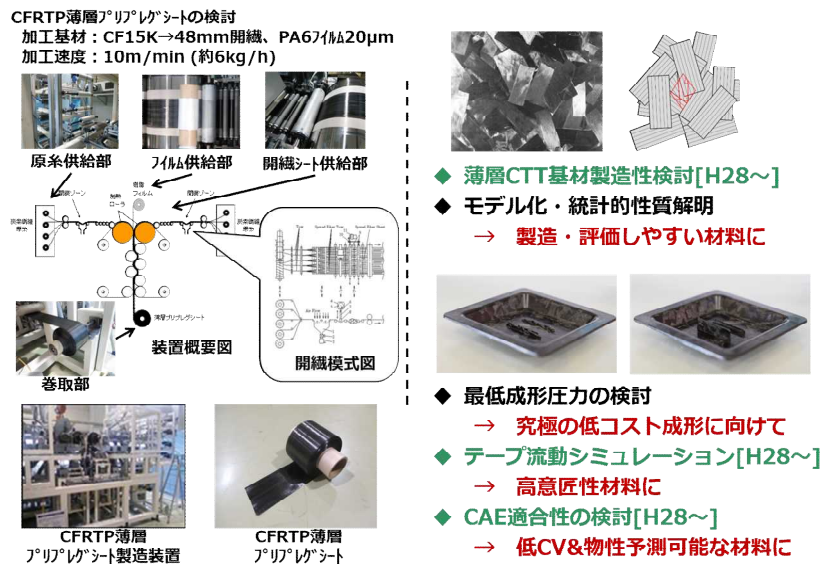


図 III-2.6.2-20 中間基材 (テープ系)

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ている。図 III-2.6.2-21 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Ⅲ-2.6.2-21 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ている。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Ⅲ-2.6.2-22 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ている。

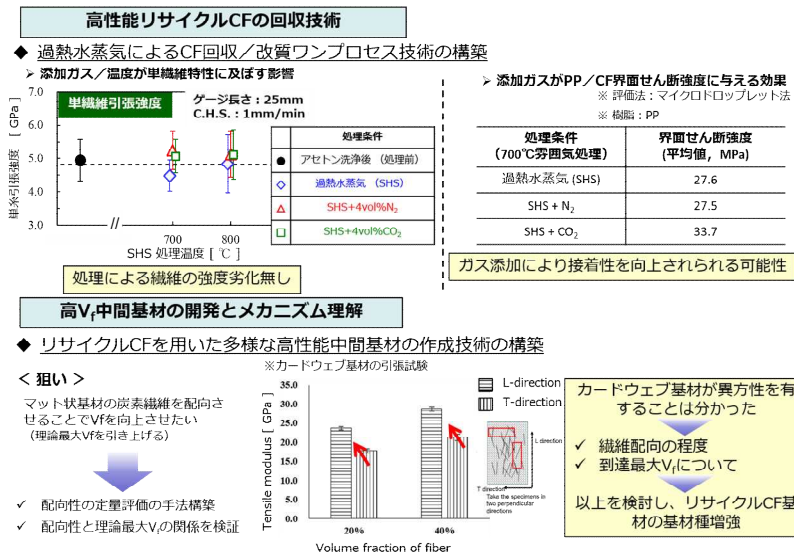


図 III-2.6.2-22 中間基材 (リサイクル材系)

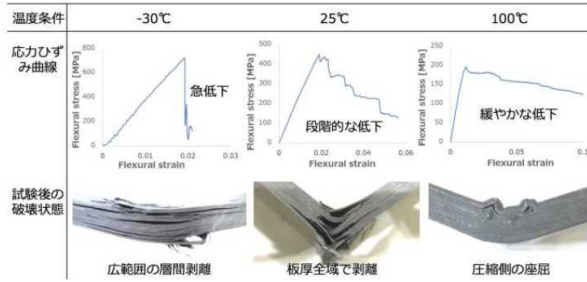
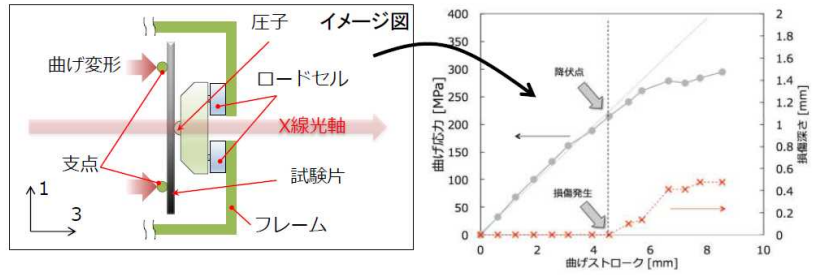
②(b)熱可塑性 CFRP の性能評価技術の開発

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。

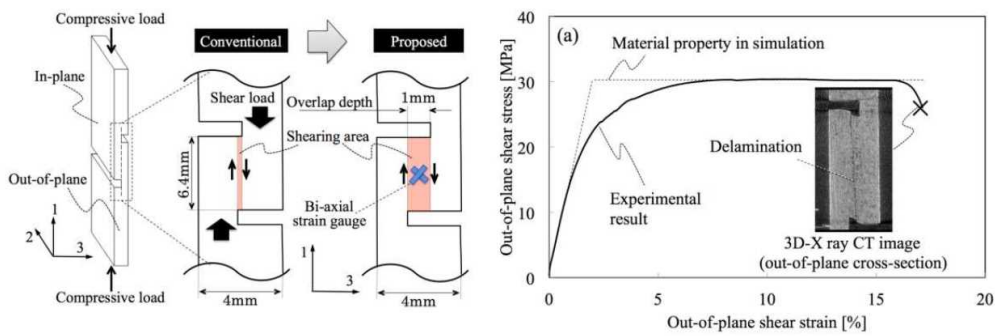
図 III-2.6.2-23 は、曲げ負荷中に試験片の内部を X 線 CT により可視化できる新しい分析システムであり、曲げ非線形挙動と損傷深さの関係性を明らかにすることができた。また、温度・速度の違いによって曲げ損傷の様子が異なることが明確化され、材料モデルの定式化に貢献している。

図 III-2.6.2-24 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。

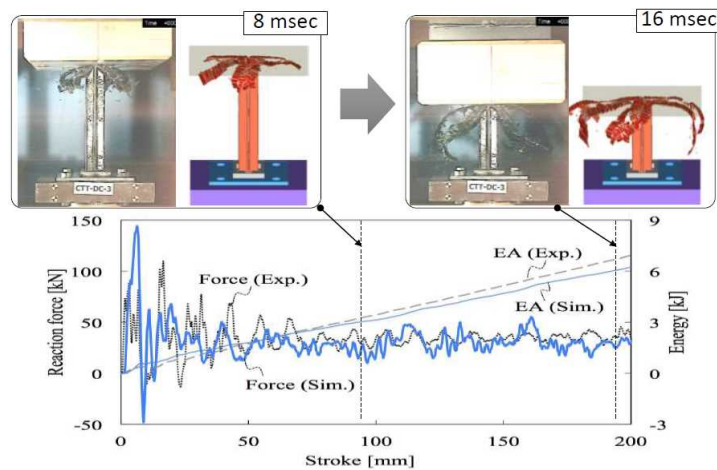
図 III-2.6.2-25 は、新たに取得した面外せん断非線形特性も活用し、中空クラッシュボックスの落錘軸圧潰挙動の数値解析モデルによる再現性を実験結果と比較したものである。プログレッシブ破壊進展の様子を再現できただけでなく、衝撃エネルギー吸収性能も実験とほぼ一致させることができた。ここで培った解析モデルの構築ノウハウは、具体的な衝撃部材の設計・実用化に貢献することが期待できる。



図Ⅲ-2.6.2-23 性能評価技術(開発中の曲げ試験法と損傷メカニズム)



図Ⅲ-2.6.2-24 性能評価技術(開発中の面外せん断試験法)



図Ⅲ-2.6.2-25 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する。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。

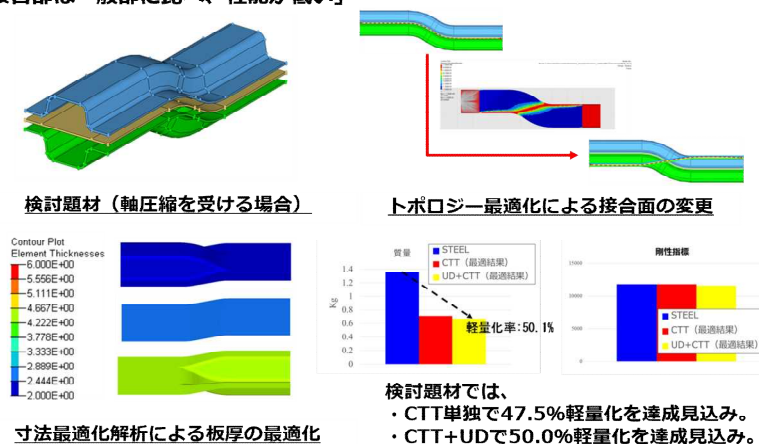
そこで、図 III-2.6.2-26 に示されるように、金属材料用に開発されている構造最適化ソフトを異方性が使えるように改造したが、上述のように複合材料には性能の大きく異なる基材があり、また実際にハイサイクル成形できる形で無ければならないので、それらも含めた最適化を考える必要がある。現在の所、最も軽量化が困難とされている中空ビーム部材において、構造最適化により 50%以上の軽量化デザインができるようになっている。

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る、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 III-2.6.2-27 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ている。

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。

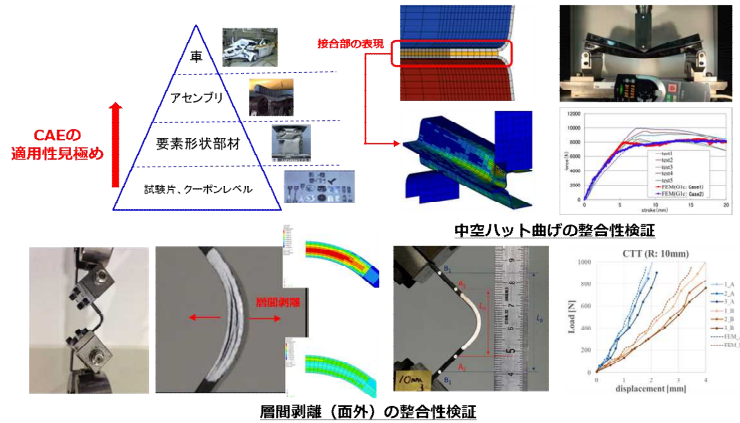
※複合材の特徴：「繊維の向きをコントロールすることで特性が変わる」、
「接合部は一般部に比べ、性能が低い」



◆ 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 III-2.6.2-26 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Ⅲ-2.6.2-27 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Ⅲ-2.6.2-28 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ているが、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Ⅲ-2.6.2-29 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ている。この検討は平成26年度末に装置の一部の導入が完了し、また最適形状や接合検討のための装置も平成27年度のNEDO加速予算での導入が予定されている。

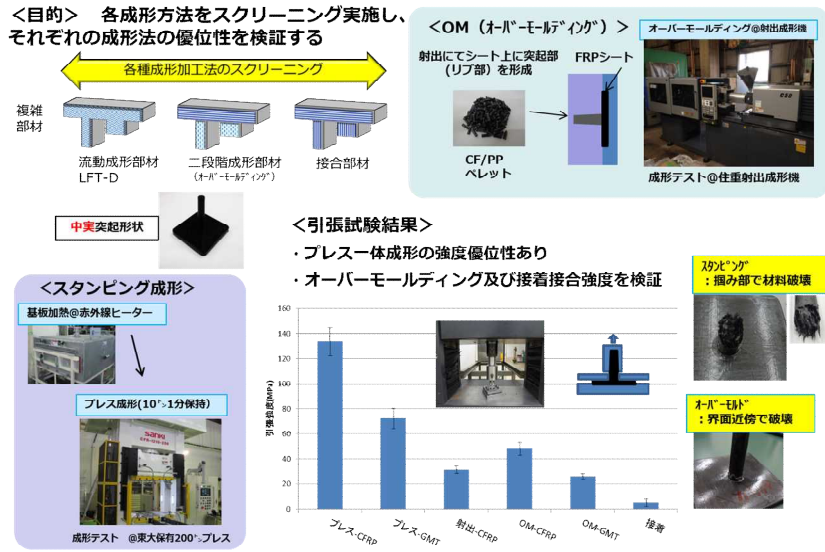


図 III-2.6.2-28 成形加工技術(1)

- ◆ 成形プロセス検討に必要な装置の一部が導入完了し、検討を開始。
- ◆ 構造設計WGの提案形状、接合WGの提案接合をNEDO加速予算で本年度導入予定。

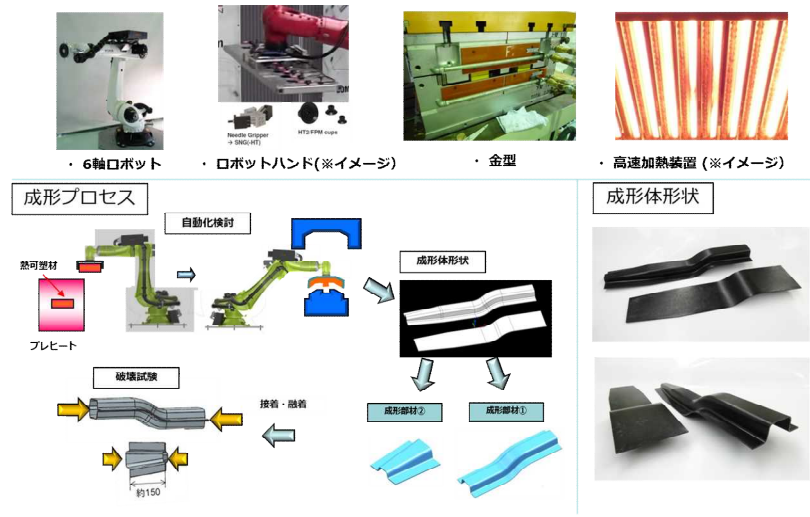


図 III-2.6.2-29 成形加工技術(2)

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.6.2-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	7	0	47	5	0	0	0	1	0
H26FY	8	0	27	8	0	0	3	1	1
H27FY	2	2	37	4	1	0	2	0	0
H28FY	16	2	32	1	1	0	1	0	1
合計	33	4	143	18	2	0	6	2	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）

(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）

表Ⅲ-2.6.2-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	1	0	0
H28FY	0	0	0
合計	1	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7「接合技術開発」

2.7.1[テーマ番号 01] アルミニウム／CFRP 接合技術の開発

2.7.1.1 テーマの概要

(1)背景と目的

軽量構造材料のアルミニウム（Al）と、軽量・強度・剛性に優れる CFRP との組み合わせは、今後の輸送機器用途では非常に重要な設計技術となるが、従来接合方法では接合サイクル、コスト面、設備大型化・精密化が必要となる場合や、熱源や高価な設備が必要なものもあり、更なる改善が期待されている。本事業では、より簡便に実施でき、接合特性に優れ、大型部材にも適用可能な革新的接合技術、具体的には、新規接合技術として、摩擦エネルギーを利用した簡便な摩擦（攪拌）重ね接合（Friction lap joining、以下 FLJ）技術の研究開発を進める。

(2)位置付け、目標値

【第一中間目標（平成 27 年度末）】

接合強度：アルミニウム／CFRP（熱可塑性樹脂ベース）の試験片の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140）の引張せん断荷重平均値以上、またはそれに準ずる接合試験片（例えばシングルラップ接合試験（ISO4587））の引張せん断試験で母材破断となるレベルを達成する。ここで母材破断とは、CFRP 破壊の場合は①CFRP 全体が接合部周辺で破断した場合、②接合部においてアルミニウム側に CFRP 材料表面がとられて破断した場合であり、アルミニウム／CFRP の界面剥離となっていない状態のことを示す。また、実用化に向けては、接合部外観などの接合強度以外にも着目し、具体的な対象アイテム絞り込みに関する FLJ のポテンシャル見極めを最優先とする。

【第二中間目標（平成 29 年度末）】

接合強度：アルミニウム／CFRP（熱硬化性樹脂ベース）の試験片の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140）の引張せん断荷重平均値以上、またはそれに準ずる接合試験片（例えばシングルラップ接合試験（ISO4587））の引張せん断試験で母材破断となるレベルを達成する。ここで母材破断とは、CFRP 破壊の場合は①CFRP 全体が接合部周辺で破断した場合、②接合部においてアルミニウム側に CFRP 材料表面がとられて破断した場合であり、アルミニウム／CFRP の界面剥離となっていない状態のことを示す。

【最終目標（平成 34 年度末）】

接合強度：各種実用部品の接合で、JIS-A 級（JIS Z3140）の引張せん断荷重最小値以上または母材破断となるレベルを達成する。ここで母材破断とは、CFRP 破壊の場合は①CFRP 全体が接合部周辺で破断した場合、②接合部においてアルミニウム側に CFRP 材料表面がとられて破断した場合であり、アルミニウム／CFRP の界面剥離となっていない状態のことを示す。

接合時間：スポット接合の場合、1 点あたり 5 秒以内の接合を達成する。また、接合を実用的に活用するため、電食による接合部腐食の電気化学的評価手法の確立、およびアルミニウム／CFRP 間の熱膨張差による熱歪みの評価解析手法確立も並行して推進する。

表Ⅲ-2.7.1-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
プロセス開発	Al/熱可塑性 CFRP の FLJ で CFRP 母材破壊レベル (樹脂は PP、PA、PPS)	Al/熱硬化 CFRP の FLJ で CFRP 母材破壊レベル	<ul style="list-style-type: none"> 各実用部品の FLJ で CFRP 母材破壊レベル スポット接合の場合は 5 秒以内 設備実用化 ※最終目標については平成 29 年度の状態を確認して再設定が必要な場合があります。	接合部での剥離は実用性懸念あり (母材破壊必須)
CFRP 設計	Al/熱可塑性 CFRP の FLJ で CFRP 母材破壊レベルとなる CFRP 設計 (樹脂は PP、PA、PPS)	Al/熱硬化 CFRP の FLJ で CFRP 母材破壊レベルとなる CFRP 設計	各実用部品の FLJ で CFRP 母材破壊レベルとなる CFRP 設計	接合部での剥離は実用性懸念あり (母材破壊必須)
接合データベース構築	Al/熱可塑性 CFRP (樹脂は PP、PA、PPS) の DB 構築	Al/熱硬化 CFRP の DB 構築	実用部品形状での DB 構築および接合状態予測への活用	実用化に向けた机上検討に DB 必要
接合部解析	—	—	電食評価法確立 熱歪み評価法確立	接合実用化には必要
実用部品検証	—	—	実用部品への適用確立	製品レベルの実績必要

(3)全体計画

表Ⅲ-2.7.1-2 に全体計画を示す。第一に FLJ のポテンシャル見極めが優先となり、まずは Al/熱可塑性 CFRP での検証を平成 27 年度末までに実施する (第一中間目標)。この時点で FLJ を接合技術としての適用可否判断をおこない、有効と判断できる場合には、Al/熱硬化 CFRP での検証に移り、平成 29 年度末までに熱硬化 CFRP での検証を完了させる (第二中間目標)。

実用化に向けては、ロボット設備化が必須と考えており、接合プロセス検証と並行して設備実用化についても検討を進める。

接合データベースは、平成 29 年度まではモデル試験片での構築を進め、それ以降は接合状態の比較検証なども含めて実用部品での検証も進める。対象とする実用部品および適用部材については、本プロジェクト組織も活用して、実際の輸送部品でのア

アイテム探索や要求特性の具体化を進めながら検証をおこなうことを想定している。

表Ⅲ-2.7.1-2 全体計画

	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33	H34	H35~
全体			★	★	★				★		→ 実用化 検討
		第一中間目標達成 熱可塑性CFRP			第二中間目標達成 熱硬化性CFRP			最終目標達成			
	要素技術検証					実用化技術推進					
プロセス開発 (FLJ)				接合法ベンチマーク							→ 実用化 検討
	FLJ技術開発 ・メカニズム解析				接合装置改良(簡素化・自動化) ロボット設備化(プロセス)						
CFRP設計 指針策定				FLJ適用可否判断							
	CFRP材料設計 ・熱可塑性系 ・熱硬化系 ・接合基材				電食・熱歪み解析、金属種展開						
接合DB構築 接合部解析	基礎データベース構築(試験片)				基礎データベース構築(実成形品)						
実用部品検証				適用部材ヒアリング		実用アイテム探索・展開 ・部品成形、接合特性把握					→ 実用化 検討

(4)実施体制

プロセス開発は基礎検討設備を保有する再委託先の大学主体で要素技術開発と接合データベース構築の基礎部分を実施し、実用化の際には外部の設備メーカーとの協力が必要となる。CFRP設計は東レが実施する。表Ⅲ-2.7.1-3 に実施体制のまとめを示す。実施割合が大きい担当を◎印としている。

表Ⅲ-2.7.1-3 実施体制

研究開発項目	研究内容	担当		
		東レ(株)	再委託先	外部
プロセス開発	①FLJポテンシャル把握	○	◎	
	②接合メカニズム解析	○	◎	
	③設備実用化	○	○	◎
CFRP設計	④指針確立(熱可塑)	◎		
	⑤指針確立(熱硬化)	◎		
	⑥接合基材設計	◎		
接合DB構築	⑦適正接合条件設定	○	◎	
	⑧接合法ベンチマーク	○	◎	
接合部解析	⑨電食評価法確立	○	○	
	⑩熱歪み評価法確立	○	○	
実用部品検証	⑪モデル成形・試作	◎		○

(5)運営管理

東レ(株)と再委託先の間で定期ミーティング(電話会議なども含めて少なくとも2ヶ月に1度)を開催し、進捗確認および今後の検討方針や開発軌道修正について協議し、スケジュールに沿った研究開発運営を実施する。

(6)実施の効果(費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度)

軽量構造材料のアルミニウム(比重2.7)と、強度・剛性に優れてさらに比重が小さいCFRP(比重1.0~1.6)との組み合わせは、輸送機器用途では効果的な軽量設計技術となる。FLJの適用で接合サイクル、接合ポテンシャル、コストや設備面でのメリットが見出せればAl/CFRPを接合した部材の輸送機器への適用拡大に繋がると期待できる。

現時点ではポテンシャル把握に注力しているため、具体的用途については未定となっているが、Al/CFRPの複合化により、エネルギー吸収がそれぞれ単体よりも2倍以上に大きくなる結果もあり、例えば自動車のバンパー部材などへの適用も期待できる。輸送機器用途への適用以外でも、開発期間の比較的短い家電製品などの産業用途アイテムでは特性がマッチすれば早期事業化の可能性もあると考える。

2.7.1.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.1-4 に第二中間目標の達成度を示す。

表Ⅲ-2.7.1-4 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
プロセス開発	Al/熱硬化 CFRP の FLJ で CFRP 母 材破壊レベル	① 接合ポテンシャル把握 ・ Al/熱硬化 CFRP では 熱硬化 CFRP 表面に熱 可塑接着層を形成さ せ、接合基材をアルミ /CFRP 間に挿入して 接合することで母材破 壊レベルを確認。 ②接着層、接合基材の設 計が重要である。	△	
CFRP 設計	Al/熱硬化 CFRP の FLJ で CFRP 母 材破壊レベルとな る CFRP 設計	③指針確立（熱硬化） 熱硬化 CFRP 表面への 熱可塑接着層形成およ び、アルミ/CFRP 間 への接合基材挿入が必 要であることを確認。	△	
接合データベース 構築	Al/熱硬化 CFRP の DB 構築	④適正接合条件設定 Al/熱硬化 CFRP で接 合条件マップ作成開始 ⑤接合法ベンチマーク 接合分科会で評価開始	△	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

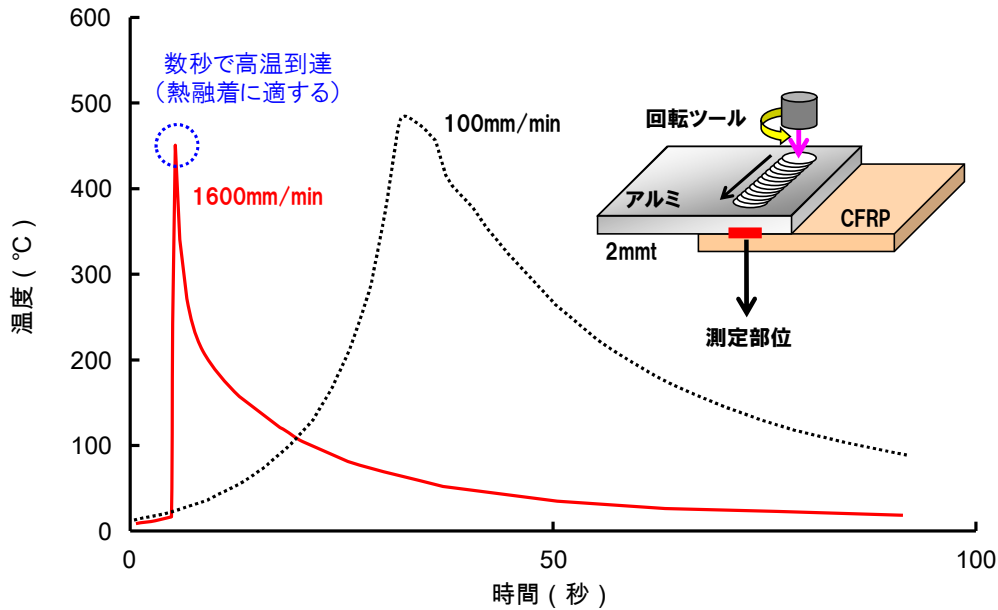
現行接合手法とのベンチマークも必要であるが、Al/熱硬化性 CFRP の FLJ ポテンシャル確認に注力しており、接合強度や接合状態は相対的にポジティブな結果を示していることから、最終目標である実用部品での接合強度も良好になるものと推定する。一方で、平成 29 年度で FLJ の要素技術検証が完了することから、接合分科会にて FLJ の位置付けをベンチマーク評価等で明確にしたのち、必要に応じて最終目標の再設定等を進める。

表Ⅲ-2.7.1-5 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
プロセス開発	<ul style="list-style-type: none"> ・熱可塑 CFRP 試験片にて FLJ ポテンシャル確認済み。CF 射出成形品は母材破壊。 ・FLJ プロセスの昇温は短時間(数秒)で可能。 ・熱硬化 CFRP 試験片にて FLJ ポテンシャル確認中。熱硬化 CFRP 表面に熱可塑接着層を形成させ、接合基材をアルミ/CFRP 間に挿入して接合することで母材破壊レベルを確認。 	<ul style="list-style-type: none"> ・各実用部品の FLJ で CFRP 母材破壊レベル ・スポット接合の場合は 5 秒以内 ・設備実用化 	熱可塑、熱硬化 CFRP ともに FLJ での接合ポテンシャルを有する結果が出てきており、見通しあり。
CFRP 設計	<ul style="list-style-type: none"> ・熱可塑 CFRP 試験片にて FLJ ポテンシャル確認済み。CFRP 射出成形品で母材破壊。 ・熱硬化 CFRP 表面への熱可塑接着層形成および接合基材を介在させることで母材破壊レベル。 	<ul style="list-style-type: none"> ・各実用部品の FLJ で CFRP 母材破壊レベルとなる CFRP 設計 	熱可塑、熱硬化 CFRP ともに FLJ での接合ポテンシャルを有する結果が出てきており、見通しあり。
接合データベース構築	<ul style="list-style-type: none"> ・AI/CF 射出成形品 (PA6) で適正条件範囲を確認済み。 ・AI/熱硬化 CFRP で母材破壊レベルの接合条件を確認した。詳細は平成 29 年度に検証する。 	実用部品形状での DB 構築および接合状態予測への活用	データベース構築は可能。可否判断は自動車メーカーとの連動必要。
接合部解析	<ul style="list-style-type: none"> ・未着手 FLJ ポテンシャル確認を優先 	電食評価法確立 熱歪み評価法確立	電気化学的手法、熱収縮挙動などの応用で可能と推定
実用部品検証	<ul style="list-style-type: none"> ・未着手 FLJ ポテンシャル確認を優先 	実用部品への適用確立	自動車メーカーとの目標共有化、具体的アイテム検証を進めることで実用化に近づく

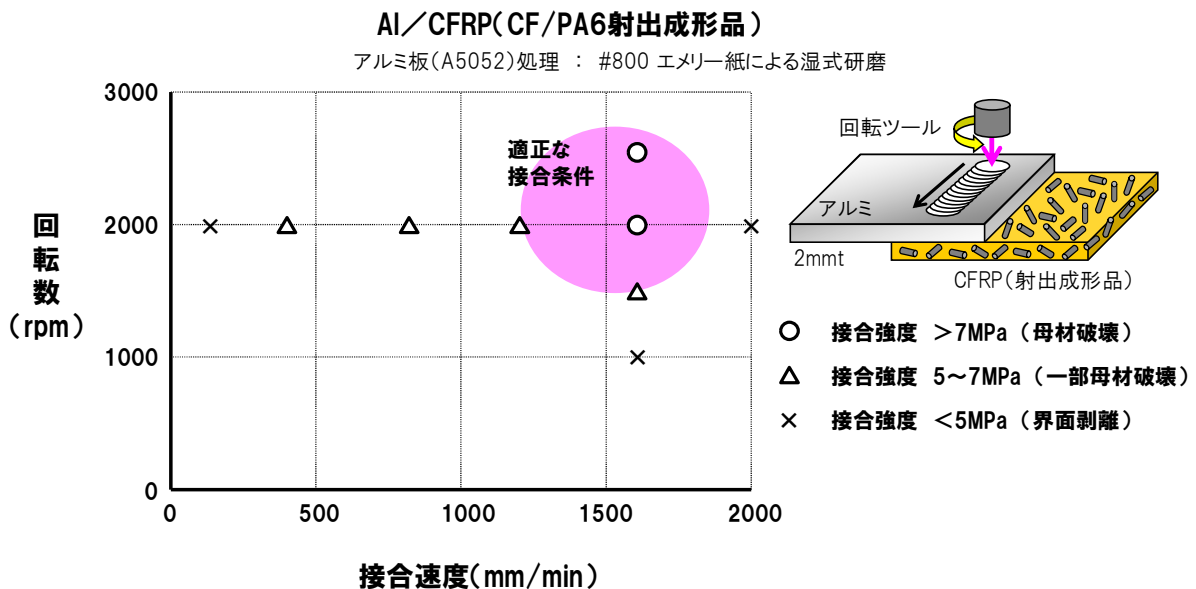
(3)研究開発の成果と意義

プロセス開発では、FLJ プロセスにおける接合部の温度プロファイルを評価し、数秒程度の短時間で 400℃ を超える温度まで接合部の温度が上昇可能であり、熱融着に適するポテンシャルを有することが確認できた (図Ⅲ-2.7.1-1)。



図Ⅲ-2.7.1-1 FLJプロセス接合部の温度履歴

また、Al/CFRP (CF/PA6 射出成形品) の FLJ 条件検討において、図Ⅲ-2.7.1-2 に示すように適切な接合条件範囲が存在することが確認できた。回転ツールの回転数が 2000rpm 付近で、接合速度が 1600mm/min 付近のときに CFRP 母材破壊レベルとなる良好な接合が可能である。



図Ⅲ-2.7.1-2 FLJ条件と接合強度

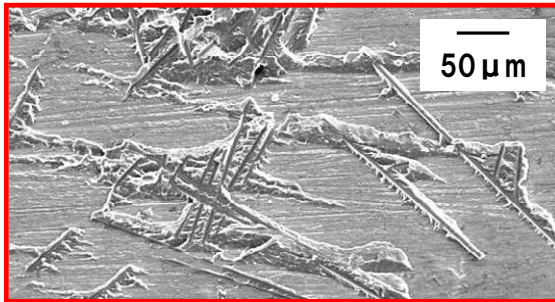
接合強度評価後の接合部 Al 側表面の観察写真を図Ⅲ-2.7.1-3 に示す。適切な条件とすることで、左側写真のように Al 表面に CFRP 母材破壊による母材付着が確認され

るが、接合条件が適切でなければ右側写真のように母材付着は確認できず、界面で薄剥離している。

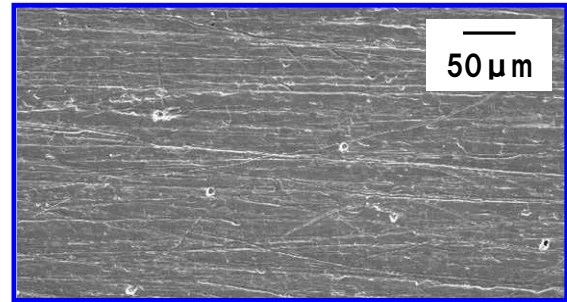
接合条件

接合速度 : 1600mm/min
 ツール回転数 : 2000rpm
 ツール押込深さ : 0.9mm

接合速度 : 2000mm/min
 ツール回転数 : 2000rpm
 ツール押込深さ : 0.9mm



CFRTP母材内破断



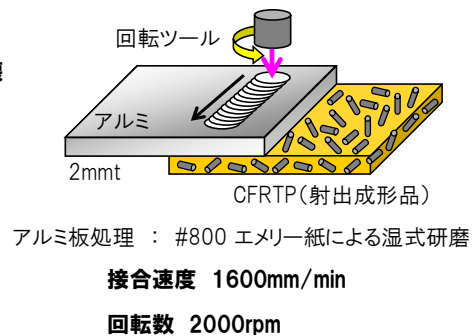
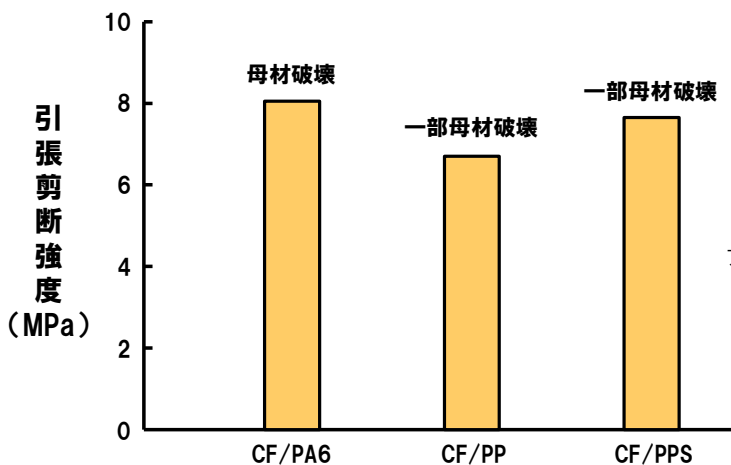
接合界面破断

図Ⅲ-2.7.1-3 FLJ 条件と接合強度

PA6 の他の熱可塑性樹脂として、ポリプロピレン (PP) およびポリフェニレンスルフィド (PPS) を用いた CF 強化射出成形品を検討した。PP は安価で軽量であり、PPS は高い耐熱性を有するため、輸送機器向けにはいずれも重要な樹脂と考えている。

PA6 で良好な接合が得られた接合速度 1600mm/min、回転数 2000rpm の接合条件で FLJ を実施したところ、PP、PPS ともに一部母材破壊となる良好な接合が得られた (図Ⅲ-2.7.1-4)。

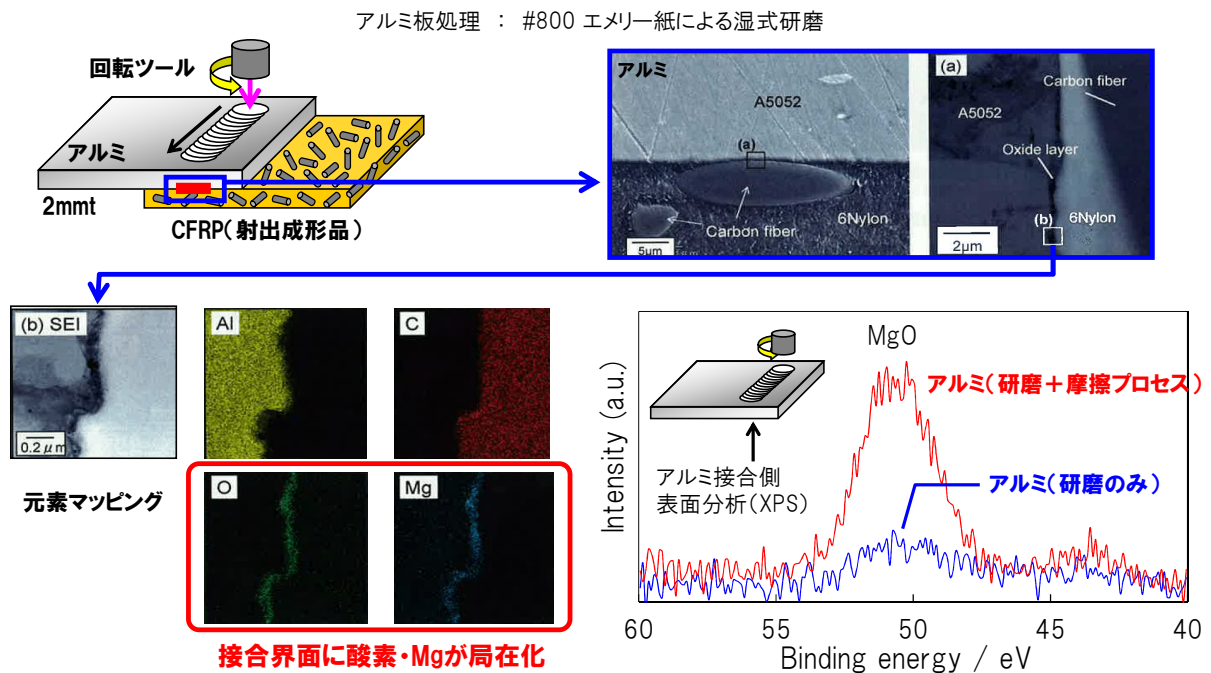
Al/CFRP(CF強化射出成形品)



図Ⅲ-2.7.1-4 各種樹脂系での接合強度

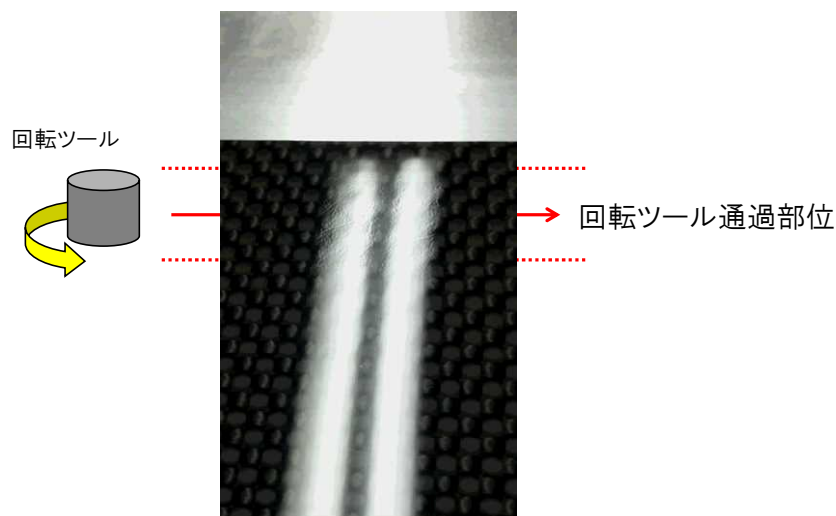
接合メカニズム解析について、Al/CFRP (CF/PA6 射出成形品) 接合部の元素マッピングを実施した結果、Al/CFRP 界面に酸素、Mg が局在化していることが判明した。また、Al のみを FLJ プロセスに通し、Al 接合側 (回転ツールを当てた反対面) の表面分析を実施した結果、プロセス前後で酸素、Mg の局在が示唆されたこと

から、FLJによりAl側の表面極性が変化し、CFRPとの熱融着時に相互作用が有利に働いているものと推定する（図III-2.7.1-5）。



図III-2.7.1-5 接合部元素分析

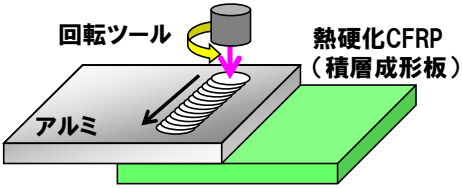
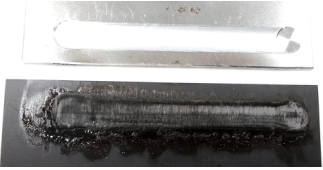
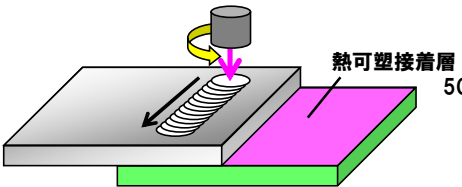
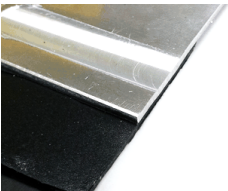
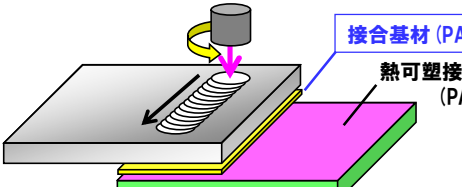
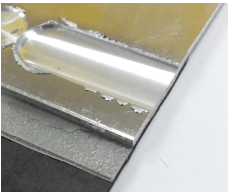
FLJ 接合のポテンシャル確認の一環として、接合部外観について検証を進めている。表面にクリア塗装（意匠面）を施したCFRP（1mm）の意匠面とは反対面をAlと重ねてFLJ（回転数2000rpm、接合速度1600mm/min）を実施した。意匠面への影響を目視で確認したところ、CFRPのクリア塗装面に歪みが生じていることが確認できた（図III-2.7.1-6）。FLJの熱履歴によりクリア塗装外観に歪みを生じたものと推定する。FLJ条件の調整で緩和する可能性はあるが、高意匠外観の部材にはFLJ適用は難しいと考える。外観には影響のない内部部品などを対象とすることが好ましい。



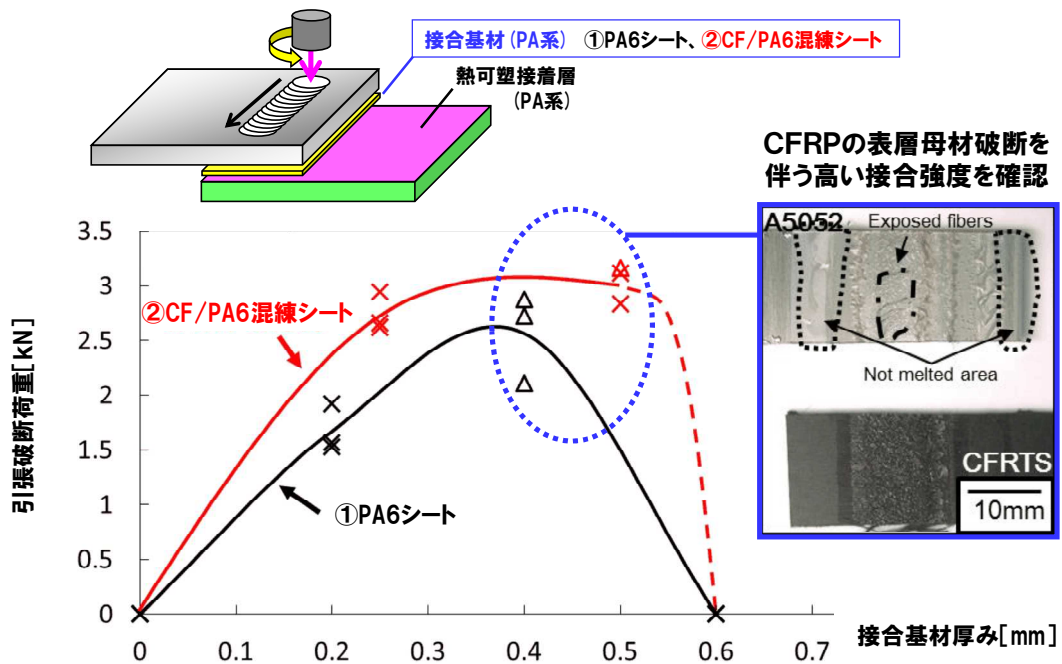
図III-2.7.1-6 FLJの外観への影響（モデル評価）

平成 28 年度はアルミニウムと熱硬化 CFRP との接合検討を進めており、アルミニウムと通常の熱硬化 CFRP とを単純に FLJ による接合を試みても、熱硬化 CFRP は溶着しないが、熱硬化 CFRP の表層に熱可塑接着層（例えばポリアミド（PA）系）を形成してやることで、該接着層を介して溶着が可能となる。さらにアルミニウムと熱硬化 CFRP との間に接合基材（例えば PA 系）を挿入して FLJ を実施することで、より強固な接合を達成可能であることが分かった。（表Ⅲ-2.7.1-6）

表Ⅲ-2.7.1-6 アルミニウム／熱硬化 CFRP の FLJ 接合

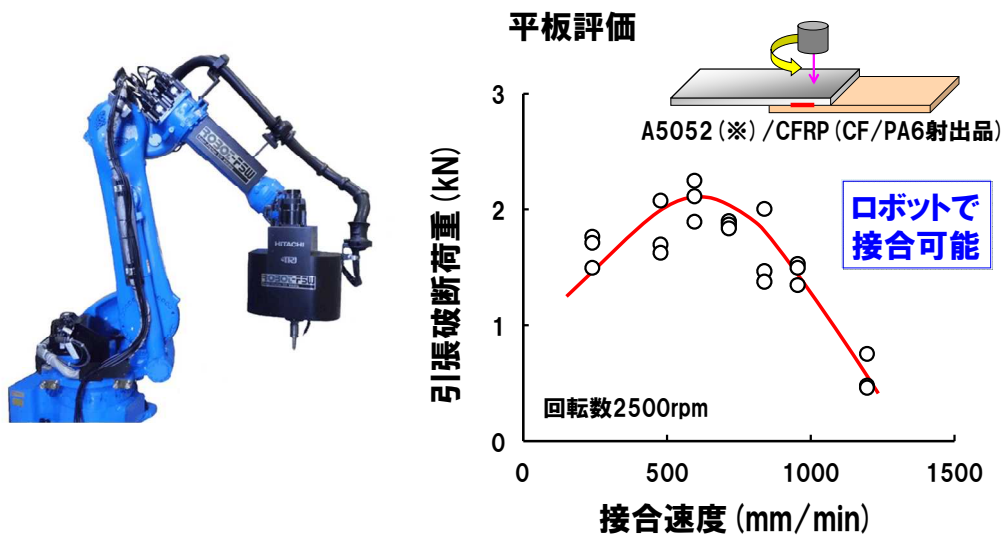
構成・ 接合条件	接合速度:1600mm/min 回転数:2000rpm	接合状況
 <p>回転ツール 熱硬化CFRP (積層成形板) アルミ</p>		 <p>溶着せず</p>
 <p>熱可塑接着層 (PA系) 50μm</p>		 <p>溶着するが 接合強度が弱い (手で剥がせる)</p>
 <p>接合基材 (PA系) 熱可塑接着層 (PA系)</p>		 <p>溶着する 接合強度は強い (手では剥がせない)</p>

また、使用する接合基材の厚みも接合強度に影響しており、0.5mm 程度の厚みの接合基材を用いることで、熱硬化 CFRP の表層部が一部母材破壊レベルとなる強固な接合が可能であることも分かった。接合基材は樹脂のみの基材ではなく、CF 補強とすることで接合強度をより高めることも可能である（図Ⅲ-2.7.1-7）。



図Ⅲ-2.7.1-7 接合基材厚みの接着強度への影響

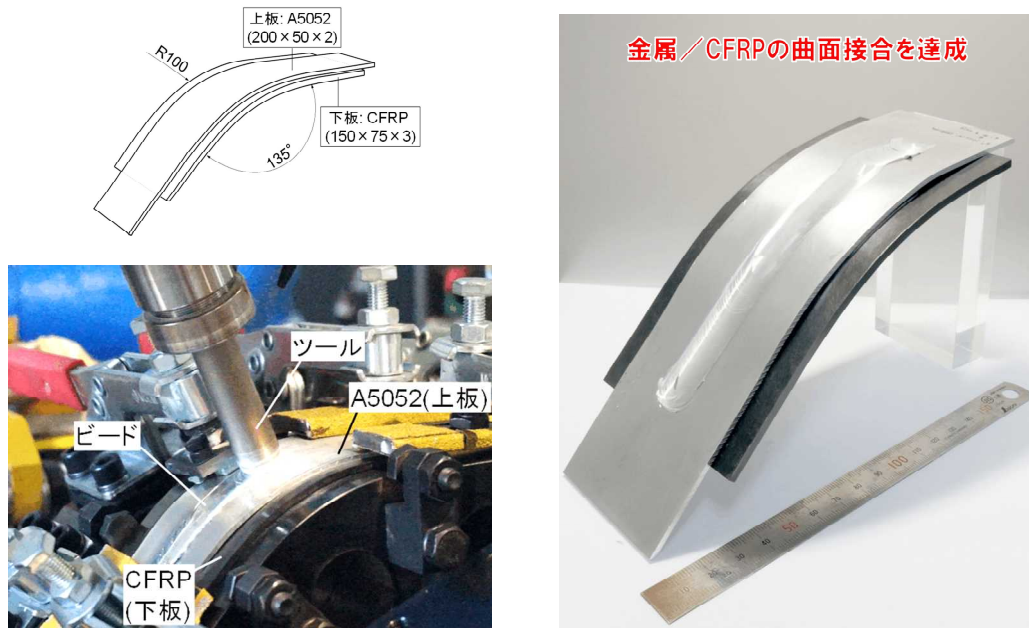
さらに FLJ の自動化について、ロボット設備を用いた検証を開始した。まずはアルミニウムと熱可塑 CFRP の平板を用いたモデル検討を進め、基礎検討時の知見同様に接合強度は接合速度に依存する傾向が確認でき、ロボット設備を用いた FLJ による接合はポテンシャル的に十分可能であることを確認した。(図Ⅲ-2.7.1-8)。



図Ⅲ-2.7.1-8 ロボット設備を用いた FLJ モデル検討

さらに、FLJ 接合の適用形状に関する検証も開始しており、平板形状だけでなく、R100mm 程度の曲面形状でも接合が可能であることを確認した。(図Ⅲ-2.7.1-

9)。具体的な接合条件と接合強度との関係や、接合部の状態確認などの検証を平成 29 年度継続する。



図III-2.7.1-9 FLJプロセスによる曲面形状接合

軽量構造材料のアルミニウムと、軽量・強度・剛性に優れる CFRP との組み合わせは、今後の輸送機器用途では非常に重要な設計技術となる。金属は力学特性以外にも高い電導性や熱伝導性などの優れた性能を有し、CFRP は軽量性に優れた素材であり、その複合体は輸送機器以外にも様々な用途に展開可能と考える。

本研究開発において、より簡便に実施でき、接合特性に優れ、大型部材にも適用可能な革新的接合技術として FLJ の可能性を見極めることで、AI に限らず金属/CFRP 複合体の適用部材が大きく拡大する可能性を有する。現時点では熱可塑性 CFRP（射出成形品）および熱硬化 CFRP に対して母材破壊レベルの接合強度を有することが確認出来つつあり、接合ポテンシャルは高いものと期待する。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.1-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	1	0	3	0	0	0	0	1	1
H27FY	1	1	5	0	0	0	0	1	0
H28FY	0	0	3	1	0	1	0	1	1
合計	2	1	11	1	0	1	0	3	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）

(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）

表Ⅲ-2.7.1-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	0	0	0
H28FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.2[テーマ番号 02] 残留 γ 相制御中高炭素鋼板の接合技術の開発

2.7.2.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車の軽量化のために高強度鋼板の適用が拡大している。更なる軽量化のためにより複雑な部品に高強度鋼板を適用するために高強度・高延性鋼板に対するニーズが高まっており、本プロジェクトでも中高炭素鋼を用いた革新鋼板の開発を進めているが、この鋼材は接合が難しくなることが想定される。そこで本テーマでは中高炭素革新鋼板の接合継手強度を向上させられる接合技術を構築することを目的とした。

自動車用鋼板の接合としては、最も多用されているのは抵抗スポット溶接である。この手法は接合する 2 枚の鋼板を重ね、電極で挟みこんで通電することで、抵抗発熱を活用して鋼板同士の接触部を熔融接合させる接合方法である。抵抗スポット溶接の特長としては、装置コストが低く、生産性が良い等の種々のメリットがある。一方で短所がいくつかあり、その一つに熔融接合のため、接合部の品質が鋼材の組成に強く依存し、鋼板の強度延性バランス向上のために炭素量を増加すると溶接継手強度が低下する。他の代替技術の開発も重要ではあるが、メリットの多い抵抗スポット溶接に関して、中高炭素鋼板でも接合強度向上可能な技術が求められる。

また、自動車車体の剛性確保のために、抵抗スポット溶接のような点接合だけでなく連続接合のニーズも高まっている。連続接合の方法として、レーザ溶接がまずあげられる。レーザ溶接は抵抗スポット溶接同様に熔融接合のため、溶接部の材質確保が難しい。凝集させたビーム照射により熔融部を作り込むため、溶接面積が狭く継手強度を確保するのが困難となるため、その対策技術開発が必要となる。

一方、難接合材の接合において、FSW の有効性が報告されている。FSW は回転させたツールを鋼板に押し当てることで摩擦熱により加熱、接合することができる技術である。ツールの回転数の制御などで接合部の熱履歴の制御が可能のため、このような技術を用いて冷却挙動の解明を進める。

(2)位置付け、目標値

本テーマで開発する接合技術は別テーマで開発する革新鋼板を接合するための技術である。

表Ⅲ-2.7.2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
抵抗スポット溶接	1.2GPa 中高炭素鋼板で JIS-A 級の 70%の継手強度	電流・通電時間・加圧力以外の条件因子制御	1.5GPa 中高炭素鋼板で JIS-A 級 70%の継手強度	構造体として十分な継手強度として設定
線接合	1.2GPa 中高炭素鋼板で継手効率 70%以上	多数パズレーザ、レーザ・FSW ハイブリッド等の継手強度向上接合技術開発	1.5GPa 中高炭素鋼板で継手効率 70%以上	構造体として十分な継手特性として設定

(3)全体計画

本テーマについては、テーマ 22 の残留 γ 高度制御革新鋼板のテーマと連動しており、革新鋼板の開発に伴い、母材の開発が進んだら、その開発鋼の特性に合わせて各接合技術による継手特性向上を図っていく。

平成 27 年度までに、強度 1.2GPa 伸び 15%以上の鋼材を対象に各種技術での特性確保を狙う。また、平成 29 年度には最終目標を前倒しして、強度 1.5GPa の革新鋼板を用いて継手強度が得られる接合技術を構築する。平成 30 年以降は革新鋼板と革新アルミの異材接合技術の提案を検討している。

(4)実施体制

抵抗スポット溶接ならびに線接合のうちレーザ溶接については神戸製鋼所にて実施する。

FSW については神戸製鋼所にてテーマ 22 で開発した革新鋼板の継手特性向上について取り組むと共に、要素技術的な支援を受けるために 2 大学にそれぞれ FSW 技術開発について再委託を行った。

(5)運営管理

年 2 回程度の再委託先との進捗会議を実施し、再委託先での研究進捗の確認とそこで得られた知見を分担研の研究内容にフィードバックさせる方法を取ることで、研究開発が促進できるような運営を行った。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

接合技術については単体での経済効果・CO₂削減効果は見込めず、革新鋼板開発の適用を本接合技術で実用化を促進させることで、各種効果を実現する。本接合技術を

構築することで初めて革新鋼板の実用化が可能となり、最終目標である強度 1.5GPa、伸び 20%の革新鋼板も実現できれば、現在最高強度 1.2GPa 級の車体骨格部品全体（重量 200～400kg）で、使用鋼板の高強度化による板厚減を実現できるとすると、約 20%の軽量化（約 40kg～80kg）が期待される。

売上については、革新鋼板については、国内の全汎用車を対象とすると約 1000 億円/年のマーケット創出が期待できる。接合技術のうち、抵抗スポット溶接、レーザ溶接については、設備投資の初期費用が掛かるものの従来技術の延長であるため、初期コスト、ランニングコストとも増加量を最小化しながら、CO₂削減効果が得られることが期待できる。FSW についてはツールのコストが重要となるため、本プロジェクトの他テーマで実施されているツール開発と連携が必要となる。

2.7.2.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.2-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
抵抗スポット溶接	1.2GPa 中高炭素鋼板で JIS-A 級の 70%の継手強度	新スポット溶接でナゲット拡大により、せん断継手強度目標を達成した。	○	
線接合	1.2GPa 中高炭素鋼板で継手効率 70% 以上	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザーについては実質接合範囲の拡大と溶接金属部の組織改善により継手の目標強度を達成した。 ・FSW については低入熱溶接により接合強度改善が見込まれており、その知見の適用で目標特性達成を図る。 	○ △	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.2-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
抵抗スポット溶接	革新鋼板開発で強度 1.5GPa 伸び 15%の材料にて目標のせん断引張強度を達成済み。	1.5GPa 中高炭素鋼板で JIS-A 級 70%の継手強度	1.5GPa EL 20%の革新鋼板に知見を展開することで目標達成可能と想定。
連続接合	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザー溶接については、強度 1.5GPa 伸び 15%の材料での接合実験を開始したところであり、継手組織制御により特性達成が可能になる予定。 ・FSW については低温接合を行うことで接合組織の微細化を図り、接合部の組織改質により特性確保が可能になる予定。 	1.5GPa 中高炭素鋼板で継手効率 70% 以上	1.5GPa EL 20%の革新鋼板に知見を展開することで目標達成可能と想定。

(3)研究開発の成果と意義

- ・抵抗スポット溶接については、既存の設備を最大限活用しながら、一部の装置の改造を行うことで現在の量産設備に適用できるものであり、現実的でありながら画期的な技術適用が期待される。
- ・レーザ溶接については、生産性の良いレーザ溶接を最大限活用し、生産性良く継手特性を確保できる技術として活用できることが期待される。
- ・FSWについては、実用化に向けた課題がいくつか残されているが接合部の品質向上を第一義に検討する必要があるときに有効な技術となる。

上記のように特徴が異なる接合技術構築が進んでおり、革新鋼板の種類、ユーザーの設備保有状況、適用部品の制約を考慮しながら接合技術提案できる体制が構築できつつある。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.2-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
H27FY	0	0	1	0	0	0	0	0	1
H28FY	1	0	0	0	0	0	0	0	1
合計	1	0	1	0	0	0	0	0	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）

(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）

表Ⅲ-2.7.2-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT出願*
H25FY	0	0	0
H26FY	1	0	0
H27FY	0	0	0
H28FY	0	0	0
合計	1	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.3[テーマ番号 03] 中高炭素鋼の革新的接合技術の開発

2.7.3.1 テーマの概要

1) 背景と目的

自動車分野では、CO₂排出量規制を背景とした軽量化による燃費改善と衝突安全性確保を目的としたボディの高剛性化の両面が求められ、自動車ボディに用いられる高強度鋼板の強度レベルやその使用割合は、ますます増加する傾向がある。

これらの要求に答えるため、近年、高強度鋼板の開発動向では、多量のレアメタル添加による高合金化が図られているが、資源の高騰等の課題が指摘され、安価な高強度化元素として炭素（C）の活用が期待されている。例えば、C系低合金鋼（C > 0.5%）では、ベイナイト、マルテンサイト、残留オーステナイトなどの組織制御により、引張強さ $\geq 1500\text{MPa}$ 、伸び $\geq 20\%$ 以上の優れた特性を得ることが可能であるが、薄鋼板として製造することが難しいことや溶接性に課題があり、自動車用鋼板・鋼材として用いられていない。特に、0.5%以上の炭素鋼の溶接継手では、溶接金属部や溶接熱影響部の局所的な軟化、靱性低下、水素脆化、疲労特性低下などにより、本来、鋼が持つ特性を溶接構造部材として十分に発現することができなかった。そこで、本テーマでは、自動車等の移動体の生産に用いることを前提に、高性能な中高炭素鋼の性能を損なわない革新的な接合技術の開発を目指す。

2) 位置付け、目標値

本テーマでは、中高炭素鋼と中高炭素鋼の革新的接合技術の確立を目的に、具体的な開発計画を提案する。

研究開発の内容

中高炭素鋼の革新的接合技術を確立するため、以下の点をブレークスルーポイントとして掲げ、重点的な研究開発を行う。

- ① 中高炭素鋼の溶接性明確化
- ② 継手特性の改善
- ③ 小型部材モデルによる継手・部材性能検討
- ④ 開発高炭素鋼の接合技術
- ⑤ 小型部材モデルでの検証

以下に、本開発の具体的な実施内容を示す。

①中高炭素鋼の溶接性明確化

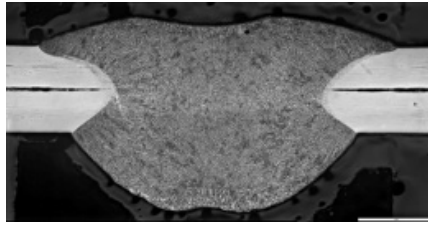
試供材を選定、作製し、溶融接合法、非溶融接合法の接合性検討を行う。

●溶融接合法（アークスポット）

溶融接合法では、アークスポットに注力。

最適溶材混合による溶接金属の靱性改善 + 余盛による負荷応力の最適化

による継手強度確保を図る。



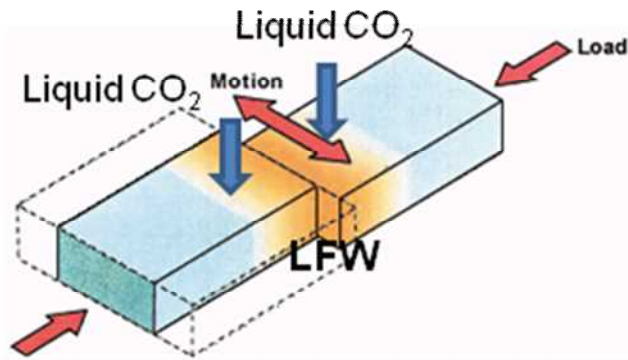
図Ⅲ-2.7.3-1 アークスポットによる貫通継手の例

- 非溶融接合法（摩擦攪拌リニア接合、複動式フラットFSW）

→28年度から、No.46へ移行

- ・摩擦攪拌リニア接合（FSLW）

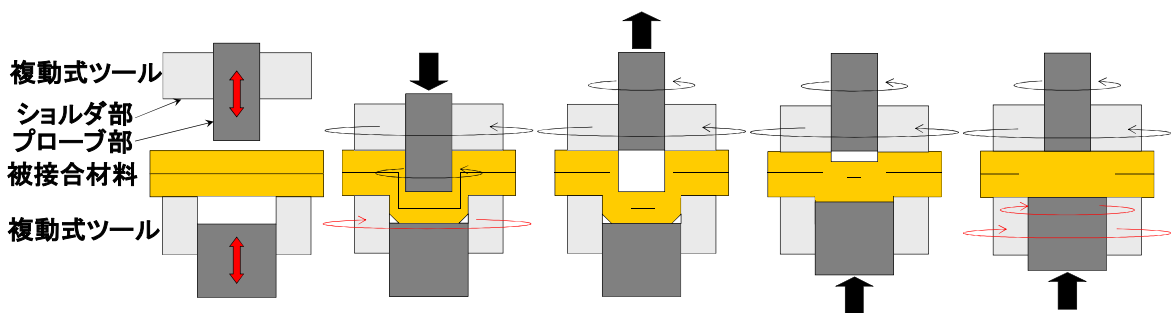
高効率冷却技術と摩擦攪拌技術を組み合わせることにより、微細な接合界面組織を実現し、継手強度の向上を狙う。



図Ⅲ-2.7.3-2 摩擦攪拌リニア接合（FSLW：大阪大学 藤井教授）

- ・複動式フラットFSW →28年度から、No.46へ移行

低温接合（Ac1以下）と上下ツールによる大きな塑性流動を用いて、継手強度の向上を狙う。



図Ⅲ-2.7.3-3 複動式フラットFSW（大阪大学 藤井教授）

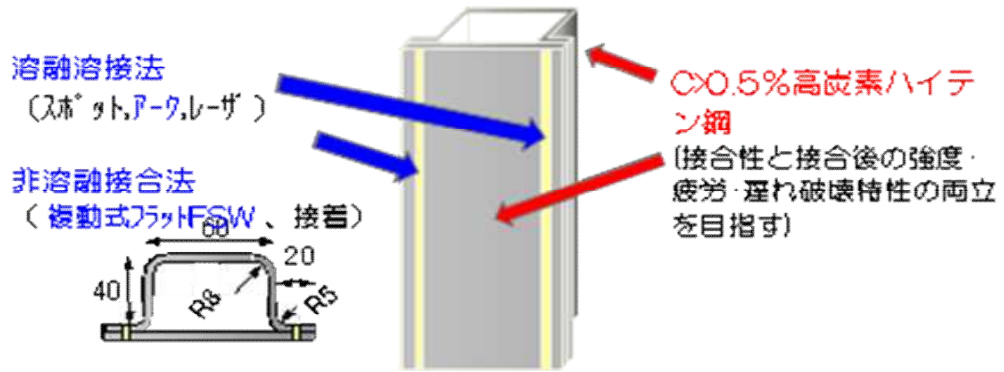
②継手特性の改善

- ・予熱後熱処理/溶接条件パラメータ等の最適化
- ・継手特性（強度、疲労、遅れ破壊）の向上及びそのメカニズム検討

③小型部材モデルによる継手・部材性能検討

- ・小型モデル部品の作製

- ・部材特性（圧潰、曲げ）評価
- ・形状/継手構造の最適化による部材特性向上検討



図Ⅲ-2.7.3-4 小型部材モデルの例

④開発高炭素鋼の接合技術

- ・開発材の溶接部組織と継ぎ手特性との関連性調査
- ・溶接性観点からの素材開発へのフィードバック

⑤小型部材モデルでの検証

- ・試作小型モデル部材の特性評価検証

以下に、本開発の開発目標を示す。

表Ⅲ-2.7.3-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
研究テーマ目標	中高炭素鋼の継手特性の明確化とその改善プロセスの方向性提示。1.2GPa の中高炭素鋼（板厚 1.4mm）で、引張せん断試験における破断荷重の平均値が、JIS-Z3140-A 級（約 14.4kN）の	中高炭素鋼板の性能を活かし得る溶接プロセス指針明確化。	1.5GPa 級中高炭素鋼の性能を活かし得る溶接プロセス指針の確立と小型部材モデルでの性能検証。 強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼（板厚 1.4mm）で、引張せん断試験における破	継手強度の評価基準として、JIS 規格を採用

	70%以上		断荷重の平均値が、JIS-Z3140-A級（約14.4kN）以上	
1-1)アークスポット溶接部の静的継ぎ手特性改善（新日鐵住金）	中高炭素鋼溶接部の評価、小型部材モデルの評価	成分・強度の異なる鋼での継手特性の評価・改善および、部材モデルでの性能確認	1.5GPa 発中高炭素鋼の継手、部材特性明確化	中高炭素鋼の継手特性を確保するための技術開発
1-2)継手疲労特性の解明（名古屋大学 26Fy まで再委託）	中高炭素鋼のアークスポット溶接部の疲労強度特性評価	—	1.5GPa 級中高炭素鋼の疲労特性明確化	継手の信頼性確保
1-3)溶接残留応力の影響明解明（大阪府立大学）	残留応力解析技術の構築	溶接部の残留応力による継手、部材特性への影響明確化	1.5GPa 級中高炭素鋼の継手特性に及ぼす残留応力の影響把握	継手の信頼性確保
1-4)アークスポットプロセスの解析（新日鐵住金）	アーク挙動とワイヤ成分、溶接姿勢の影響調査	アークスポット安定溶接技術の開発	1.5GPa 級中高炭素鋼の実施工性確保	実施工性の向上
1-5)溶接部形状の数値解析技術（大阪大学）	シミュレーション手法の構築	溶接ビード形成メカニズムの明確化	1.5GPa 級中高炭素鋼での検証	プロセスメカニズムの解明
2-1)摩擦接合による継手性能評価（新日鐵住金）	C量、強度レベルの異なる中高炭素鋼の適正接合条件の明確化	摩擦接合の継手特性、性能の明確化	—	開発プロセスとの差異検討
2-2)摩擦接合プロセスの開発（大阪大学）	FSLW 接合プロセスの開発とその継手特性評価	FSLW 接合プロセスの開発とその継手特性評価	新接合プロセスの開発とその継手特性評価	新摩擦接合プロセスの開発
2-3)溶接部特性への金属組織の影響解明（秋田大学）	中高炭素鋼の摩擦接合界面組織の解析と継手特性への影響把握	接合条件による継手特性、接合部組織への影響明確化	新接合プロセスによる接合部組織の特性明確化	摩擦接合の基礎特性把握
2-4)摩擦攪拌接合の数値解析技術の開発（大阪大学）	シミュレーション手法の構築	摩擦接合プロセスのメカニズム推定	新接合プロセスのシミュレーション手法構築	接合メカニズム解明

(3)全体計画

上記のように、溶融溶接としてアークスポット溶接を取り上げ、中高炭素鋼の継ぎ手諸特性のデータ蓄積や継ぎ手強度支配因子の解明を図るとともに、実施工を踏まえたプロセス最適化や溶接組み立て部材性能の検証を行う。なお、摩擦接合については平成28年度以降、連携領域として、別テーマ(No.46)にて検討する。

(4)実施体制

1) 溶融溶接技術の開発（担当機関：新日鐵住金（株））

中炭素鋼を用いて、溶融（アークスポット等）、非溶融（FSW）等による各種溶接継手を作製し、継手特性を把握する。

各種溶接による継手を作製し、各種継手強度試験（せん断、十字）を実施して継手強度レベルを把握するとともに、断面マクロ試験片を作製し、溶接ビード形状、溶接部組織・硬度などを把握する。また、ハット型断面の小型モデル部材を作製し、落錐試験を用いて、部材の動的破壊特性を調査する。

2) 継手疲労特性の解明（担当機関：新日鐵住金(株)、再委託先）

中高炭素鋼の各種溶接法による溶接継手の疲労強度特性評価とその強度特性発現機構の解明に取り組む。なお本再委託は、平成26年度の成果を以って中止とし、平成27年度は富津分担研にて実施し、完了を目指す。

3) 溶接残留応力による継手強度特性への影響解明（担当機関：新日鐵住金（株）、再委託先）

中高炭素鋼の各種溶接法による継手の溶接部の残留応力に着目し、継手強度特性への影響を解明する。

4) 溶接部靱性への金属組織の影響解明（担当機関：新日鐵住金（株）、再委託先）

中高炭素鋼の溶接継手の溶接部金属組織に着目し、継手強度特性への影響を解明する。なお本秋田大学への再委託は、平成28年度以降、連携テーマとしてNo.46にて実施する。

5) アーク溶接、摩擦撈拌接合の数値解析技術開発（担当機関：新日鐵住金（株）、再委託先）

アーク溶接、摩擦撈拌接合における接合現象の解明のため、数値解析によるモデリング技術を開発する。なお本再委託は、平成28年度以降、連携テーマとしてNo.46にて実施する。

6) 摩擦接合プロセスの開発（担当機関：新日鐵住金（株）、再委託先）

摩擦撈拌リニア接合プロセスの開発及び開発接合方法による継手特性の評価と接合メカニズム検討を行う。なお本再委託は、平成28年度以降、連携テーマとしてNo.46にて実施する。

【委託先】

新構造材料技術研究組合

【分担研】

新日鐵住金株式会社
(富津分室・尼崎分室)

(5)運営管理

本テーマは、中高炭素鋼の溶融、非溶融の革新的接合技術開発に向けて、継手特性に及ぼす組織、疲労、残留応力、接合メカニズム解析のためのシミュレーション技術構築、革新的な摩擦接合プロセスの開発などを大学に再委託し、個別に、定期的な進捗確認、試験結果報告、情報共有等を行うとともに、年2回程度、全体会議を催し、本研究を推進する。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

CO₂ 排出量の削減と衝突安全性能向上の観点から、自動車車体の軽量化が求められ、高張力鋼の車体骨格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、車体骨格部品への適用が期待され、2020 年頃には、ホワイトボディに使用される鋼板の 20%以上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、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。

2.7.3.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.3-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (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
1-1)アークスポット溶接部の静的継ぎ手特性改善 (新日鐵住金)	成分・強度の異なる鋼での継手特性の評価・改善および、部材モデルでの性能確認	モデル部材を作製し、スポット溶接に比べて部材特性が改善することを確認	○	
1-2)継手疲労特性の解明(名古屋大学)	1.5GPa級中高炭素鋼の疲労特性明確化	せん断、剥離モードでの疲労特性を把握。	○	
1-3)溶接残留応力の影響明解明(大阪府立大学)	溶接部の残留応力による継手、部材特性への影響明確化	溶接部残留応力の数値解析技術の構築	○	
1-4)アークスポットプロセスの解析 (新日鐵住金)	アークスポット安定溶接技術の開発	中高炭素鋼の中でも炭素量の高い鋼種でも、良好な溶接部が形成できる条件を提示した。	○	
1-5)溶接部形状の数値解析技術(大阪大学)	溶接ビード形成メカニズムの明確化	No.46へ移行	—	
2-1)摩擦接合による継手性能評価 (新日鐵住金)	摩擦接合の継手特性、性能の明確化	No.46へ移行	—	
2-2)摩擦接合プロセスの開発(大阪大学)	FSLW接合プロセスの開発とその継手特性評価	No.46へ移行	—	
2-3)溶接部特性への金属組織の影響解明(秋田大学)	接合条件による継手特性、接合部組織への影響明確化	No.46へ移行	—	
2-4)摩擦攪拌接合の数値解析技術の化初(大阪大学)	摩擦接合プロセスのメカニズム推定	No.46へ移行	—	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.3-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
1-1)アークスポット溶接部の静的継ぎ手特性改善 (新日鐵住金)	0.45C 中高炭素鋼のアーク継手は、抵抗スポット継手と比べ TSS,CTS とともに高く、余盛り形状による影響が大きいと考えられた。また小型モデル部材で、スポット溶接に比べて高い部材特性が得られた。	中高炭素鋼の性能を活かし得る溶接プロセス指針の確立と小型部材モデルでの性能検証。	29 年度末までに達成見込み
1-2)継手疲労特性の解明 (名古屋大学)	アークスポット継手の疲労基礎データ (せん断、剥離モード) を取得。継手疲労強度に対する支配因子を明確化	強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼 (板厚 1.4mm) で、引張せん断試験における破断荷重の平均値が、JIS-Z3140-A 級 (約 14.4kN) 以上	達成済み
1-3)溶接残留応力の影響明解明 (大阪府立大学)	溶接部残留応力の数値解析技術の構築		29 年度末までに達成見込み
1-4)アークスポットプロセスの解析 (新日鐵住金)	アーク点火時のスパッタ発生状況観察、その改善条件を提示した。また炭素量の高い鋼板へ適用可能であることを確認した。		29 年度末までに達成見込み
1-5)溶接部形状の数値解析技術 (大阪大学)	No.46 へ移行		—
2-1)摩擦接合による継手性能評価 (新日鐵住金)	No.46 へ移行	—	—
2-2)摩擦接合プロセスの開発 (大阪大学)	No.46 へ移行	—	—
2-3)溶接部特性への金属組織の影響解明 (秋田大学)	No.46 へ移行	—	—
2-4)摩擦攪拌接合の数値解析技術の化初 (大阪大学)	No.46 へ移行	—	—

(3)研究開発の成果と意義

(3).1. 研究開発の内容及び成果等

自動車等の輸送機器の軽量化推進するには部材の薄肉化が必要であり、その材料として強度・延性に優れる中高炭素鋼の開発・実用化が期待されている。しかし、鋼板強度が増加すると、自動車等の製造で多用される抵抗スポット溶接では継手強度が低下することが知られており、中高炭素鋼の接合技術として新たな接合法の開発が求められている。

本研究では革新的接合技術として、アークスポット溶接（熔融接合）の開発を行っている。これまで中高炭素鋼の継手強度の明確化に取り組み、スポット溶接に比べて特に CTS で顕著に向上することを確認した。またモデル部材を作製し、アークスポット溶接ではスポット溶接に比べて、部材の衝撃吸収特性が向上することを確認した。以下に開発成果を述べる。

(3).2. ISMA 支給材の継手強度調査

①供試鋼板

支給された共通鋼板 1.2GPa 級 TRIP 鋼板の化学成分を表 2.7.3-4 に示す。板厚 1.4mm の材料を用いた。

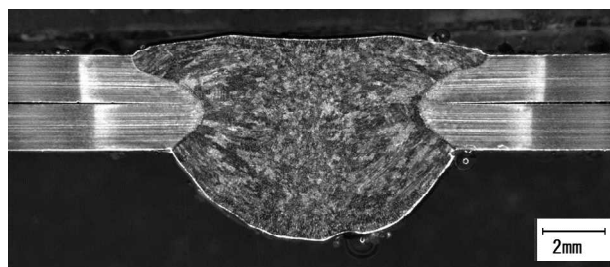
表Ⅲ-2.7.3-4 1.2GPa 級 TRIP 鋼の化学成分 (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Al	N	O
1.2 TRIP 鋼	0.40	1.50	2.00	0.010	0.002	0.04	0.0040	-

②溶接条件

・アークスポット溶接

ワイヤには YM-28/1.2mmΦ を使用した。シールドガスには Ar+20%CO₂ を使用した。アークタイムは 2.5s とした。溶接金属の硬さは、溶接ワイヤによる希釈によりスポット溶接の溶接金属よりも低い約 330Hv となった。またキーエンス製形状測定機 VJ-7020 により測定した表裏面のふくらみは表約 0.74mm、裏約 3.3mm で安定していた。

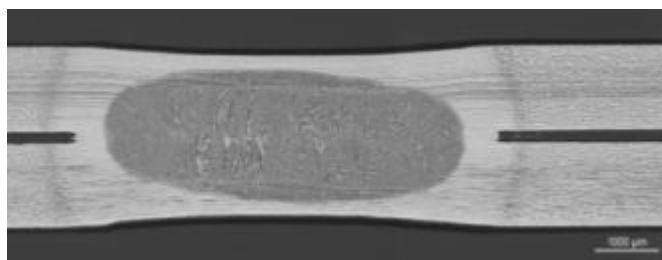


図Ⅲ-2.7.3-5 アークスポット溶接部の断面観察結果

・スポット溶接

スポット溶接電極には DR 型 Φ6R40 を使用した。加圧力 350kgf、通電時間 20cyc@60Hz（以降、すべて 60Hz での記載とする）、溶接電流 7.0kA でナゲット径 $5\sqrt{t}$ となる

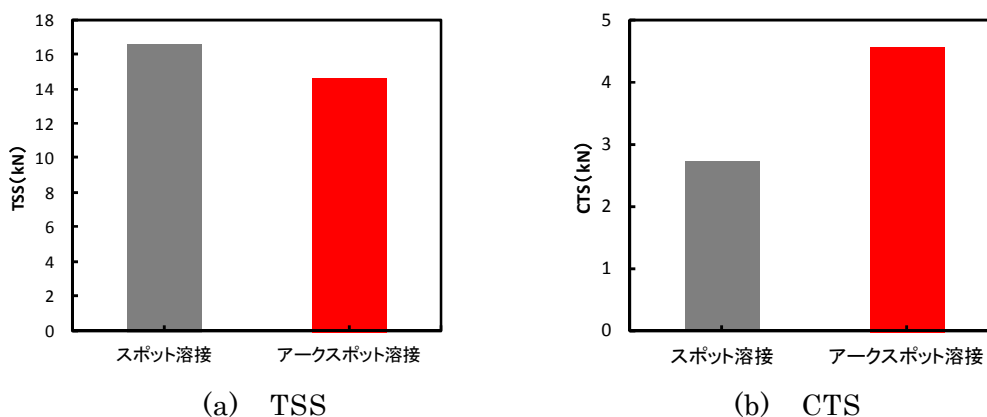
ことを確認した。溶接金属部の硬さは約 720Hv となっていた。



図Ⅲ-2.7.3-6 スポット溶接部の断面観察結果

③継手強度

図Ⅲ-2.7.3-7 にスポット溶接継手、およびアークスポット溶接継手の TSS、CTS を示す。TSS は溶接金属の硬さ低下に伴い若干低下した。一方、アークスポット溶接の CTS はスポット溶接に比べて向上した。溶接金属の硬さが低く、靱性が回復したためと考えられる。



図Ⅲ-2.7.3-7 1.2GPa 鋼の継手強度

(3).3.継手強度に及ぼす炭素量の影響

① 供試材料

市販の S35C、S45C、S55C 鋼板 板厚 1.6mm を焼入れ、焼き戻し処理により母材硬さを約 400Hv に調整した材料を用いた。

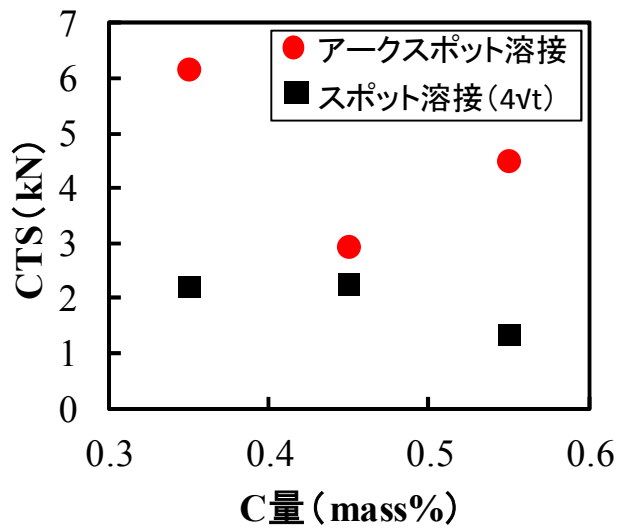
②溶接条件

アークスポット溶接は、溶接ワイヤ YM-24T/1.2mmΦ を使用した。シールドガスには Ar+20%CO₂ を使用した。アークタイムは 2.5s とした。スポット溶接はナゲット径が $4\sqrt{t}$ となる条件を採用した。

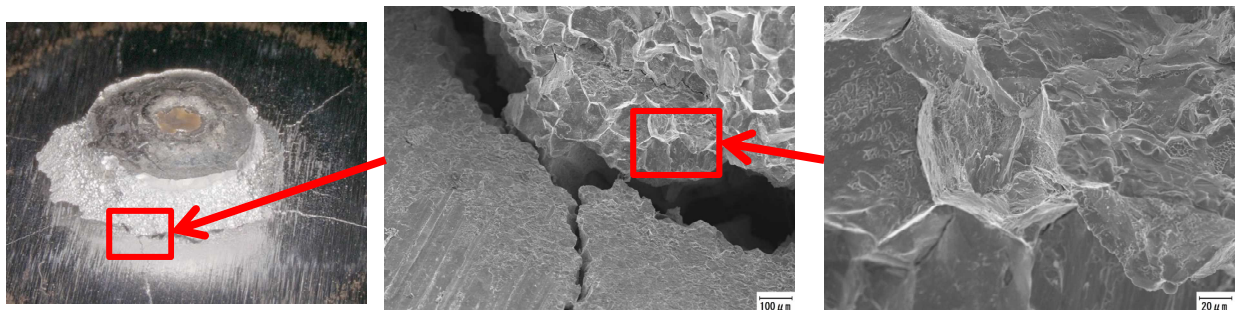
③CTS に及ぼす炭素量の影響

図Ⅲ-2.7.3-8 アークスポット溶接継手とナゲット径 $4\sqrt{t}$ としたスポット溶接継手

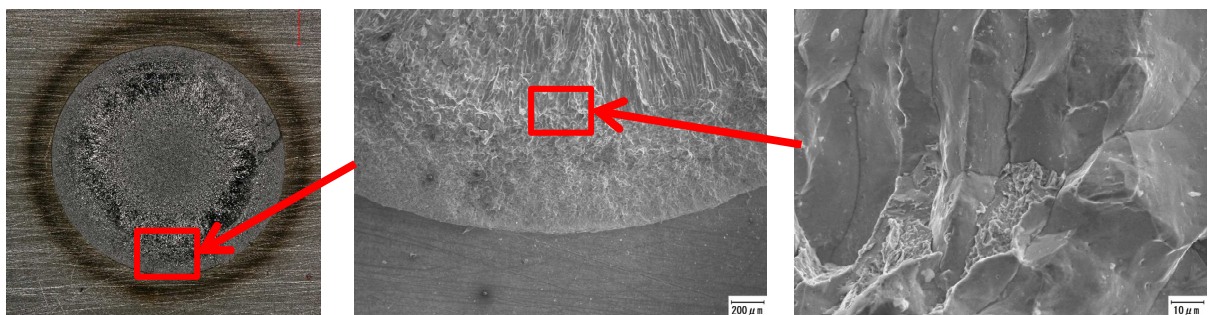
の CTS に及ぼす炭素量の影響を示す。向上程度に差は見られるものの、すべての炭素量で CTS が高い値を示すことを確認した。図Ⅲ-2.7.3-9 に最も炭素量の高い S55C 鋼板溶接部の破断位置の観察結果を示す。スポット溶接継手では、溶接部の界面で破断しており、主に粒界破面が観察された。一方、アークスポット溶接では、界面ではなく亀裂が板厚方向に進展したプラグ破断となった。この破断形態の改善により継手強度が向上したと考えられた。



図Ⅲ-2.7.3-8 溶接継手強度に及ぼす炭素量の影響



(a) アークスポット溶接継手 (S55C)



(b) スポット溶接継手 (S55C)

図Ⅲ-2.7.3-9 溶接継手の破面観察結果

(3).4.ハット部材衝撃吸収特性評価

①はじめに

今年度も、昨年度に引き続き 0.45mass%C 鋼 (S45C) の薄鋼板を供試鋼とした。短冊状の供試鋼をオーステナイト単相の温度に加熱したのち、金型で急速冷却して焼入れた。焼入れ時の部材形状は短冊状ままとするか、あるいは同時に成形してハット型とした。その後、引張強さが 1200MPa 級(Hv400 程度)となるように熱処理を施した。これらの部材を組合せてアーク溶接により接合し、自動車部品を模擬したモデル部材に仕上げた。部材に対し、溶接部基礎評価 (溶接部断面観察) を行った。また衝撃三点曲げ試験も実施し、部材の圧潰特性を評価した。部材評価に先立ち、継手の引張試験も実施した。比較のため、スポット溶接部材や継手も作製し、同様な評価を実施した。

②継手引張試験

部材の衝撃三点曲げ試験に先立ち、溶接部の基礎評価として、引張せん断強さ(TSS)と十字引張強さ(CTS)を評価した。なお鋼板の熱処理条件は後述する部材作製時の条件と同様とした。アークスポット溶接継手の TSS はスポット溶接のその 3 倍程度となり、今季の目標値 (JIS A 級の 70%) を達成した。TSS も同様にアークスポットがスポットよりも 3 倍程度高くなった。

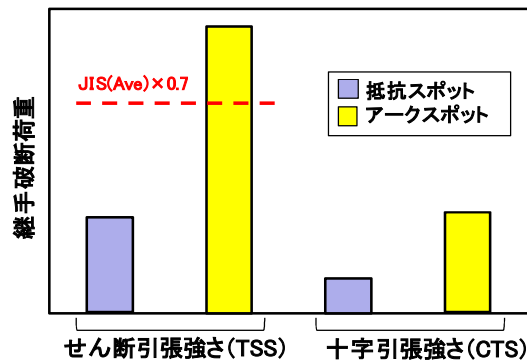


図 III-2.7.3-10 継手の引張強度比

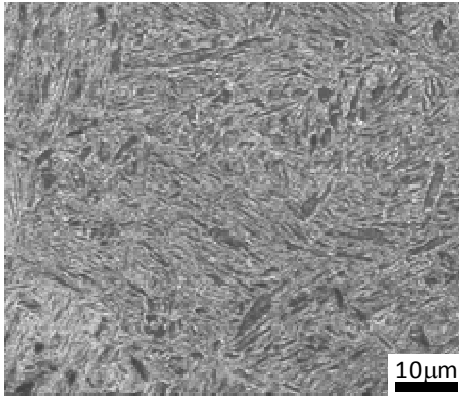
③モデル部材の特性評価試験

③-1 モデル部材の作製

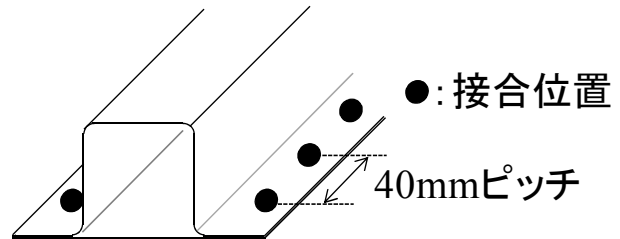
供試鋼は板厚が 1.4mm の S45C 材である。その化学成分を表 2.7.3-5 に示すように、C 量は 0.44%であった。供試鋼を 920°C で 5 分間加熱し、金型で挟み込んで急冷・焼入れすると同時に、図 2.7.3-12 の部材概略図に示す長さ 800mm のハット型部材に成形した。その後、鋼板の引張強さが約 1200MPa(ビッカース硬さ Hv400 程度)となるよう、部材に対し 360°C×3.5 時間の焼戻し熱処理を施した。このハット型部材と向かい合わせ溶接する短冊形の鋼板に対しても同条件の加熱焼入れと焼戻し熱処理を行った。焼戻し熱処理後の組織を図 2.7.3-11 に示す。こうして準備したハット型部材と短冊型鋼板を重ね合わせ、そのフランジ部をスポット溶接あるいはアークスポット溶接した。図 2.7.3-12 に示すように、フランジにおける基準の溶接点間隔は 40mm とした。スポット溶接の場合、鋼板重ね面における溶接金属(ナゲット)の直径は $5\sqrt{t}$ (t=鋼板板厚 1.4mm)とした。溶接点間隔は 40mm を基準とした。アークスポット溶接の場合、溶接材料として $\phi 1.2\text{mm}$ のソリッドワイヤ(JIS 規格 YGW16)を用いた。鋼板重ね面における溶接金属直径は $5.8\sqrt{t}$ であった。アークスポット溶接の溶接点間隔は 40mm と 20mm の 2 水準とし、溶接点間隔の影響も評価した。アークスポット溶接では、溶接に先立ち $\phi 4\text{mm}$ の穴あけ加工を施した。ワイヤの狙い位置は穴の中心とした。

表Ⅲ-2.7.3-5 モデル部材に用いた供試材料の成分(mass)

C	Si	Mn	P	S
0.44	0.21	0.78	0.01	0.005



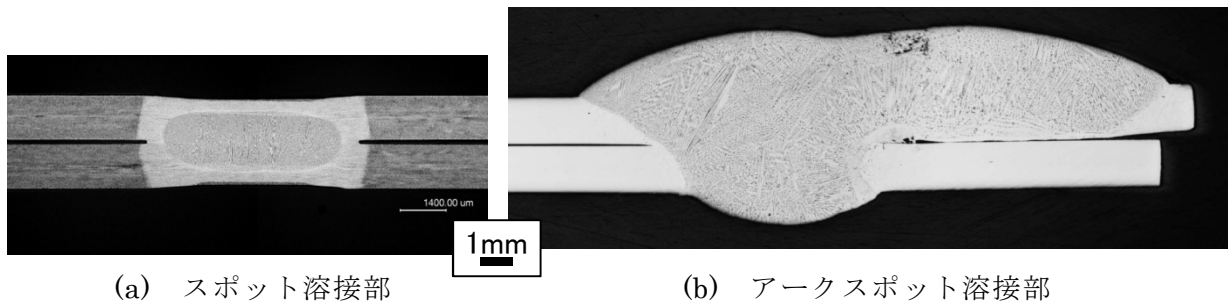
図Ⅲ-2.7.3-11 供試鋼の母材組織



図Ⅲ-2.7.3-12 モデル部材形状の模式図

③-2 溶接部断面形状

スポット溶接部断面およびアークスポット溶接部断面を図 2.7.3-13 に比較する。スポット溶接部では、電極の圧下を受けて表裏面が凹んだ形状となった。一方、アークスポット溶接部は表裏面ともに凸形状の溶接金属が形成された(鋼板表面よりも外側に出た部分が余盛)。また上板では右側の溶接金属量が左側よりも増加したことが判る。これは、写真右側が部材のフランジ端部であって溶接中の熱伝導が進まなかったためと考えられる。つまり、右側の溶接中の温度レベルと溶鋼の流動性が左側のそれらより高いため、溶鋼の多くが右側に流れたものと推測される。両溶接部のビッカース硬さも測定したが、溶接金属硬さはアーク溶接部がスポット溶接部を下回った。これは、スポット溶接の溶接金属にはマルテンサイトが生成したのに対し、アーク溶接の溶接金属ではより軟質なベイナイトが生成したことが理由である。この組織の相違は、アーク溶接部の溶接金属では溶接ワイヤと母材が混合し、その成分が母材成分から変化するために生じる。



(a) スポット溶接部

(b) アークスポット溶接部

図Ⅲ-2.7.3-13 溶接部断面

③-3 衝撃三点曲げ試験条件

衝撃三点曲げ試験の模式図を図 2.7.3-14 に示す。インパクトを部材の平板側から衝突させ、試験中の荷重と錘の変位を計測した。一定変位までの荷重の積分値を吸収エネルギーとし、それを部材特性の評価指標とした。

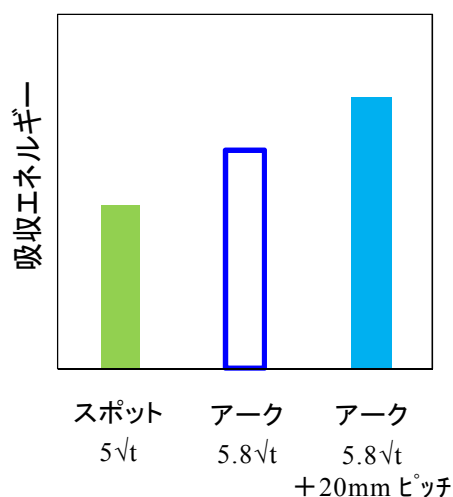


図Ⅲ-2.7.3-14 衝撃三点曲げ試験の模式図

③-4 部材特性の評価

各接合法で作製したモデル部材の吸収エネルギーを図 2.7.3-15 に示す。スポット溶接部材の吸収エネルギーに対して、アーク $5.8\sqrt{t}$ 条件の部材で 34% 向上し、さらに溶接点間隔を 20mm にすると 67% 向上した。

アーク溶接部材では、スポット溶接部材と同等以上の吸収エネルギー性能が得られており、さらに改善条件部材では、スポット溶接部材に対して吸収エネルギーが 30% 以上向上した。



図Ⅲ-2.7.3-15

吸収エネルギーに及ぼす接合法の影響

③-5 試験後部材の外観

図Ⅲ-2.7.3-16 に衝撃三点曲げ試験後のモデル部材外観を比較する。スポット溶接部材では溶接部の破断が発生したが、アークスポット溶接部材の溶接部破断が抑制された。アーク溶接部の方が強度・じん性に優れること、また余盛により溶接部の応力が緩和されることが破断抑制の理由と推定される。この破断防止を通じ、アークスポット溶接部材の吸収エネルギー向上が達成されたと考えられる。



(a) スポット溶接



(b) アークスポット $5.8\sqrt{t}$



(c) アークスポット $5.8\sqrt{t}+20\text{mm}$ ピッチ

図Ⅲ-2.7.3-16 衝撃三点曲げ試験後のモデル部

③-6 まとめ

引張強さが 1200MPa となるように熱処理を施した 0.45mass%C 鋼のアークスポット溶接継手の特性、および自動車部品を模擬したモデル部材の特性を評価した結果、以下の知見が得られた。

- 0.45mass%C 鋼のアークスポット溶接継手の引張せん断試験において、開発目標である JIS-A 級平均値の 70%を超えることを確認した。
- アークスポットにより部材の衝撃特性がスポット溶接に比較し向上することを確認した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.3-6 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	1	0	0	0	0	0	0
H26FY	1	0	6	0	0	0	0	0	1
H27FY	0	0	2	0	0	0	0	0	1
H28FY	0	0	1	1	0	0	0	0	1
合計	1	0	10	1	0	0	0	0	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）

(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）

表Ⅲ-2.7.3-7 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	1	0	0
H27FY	0	0	0
H28FY	0	0	0
合計	1	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.4[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

2.7.4.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車や輸送機器の軽量化を目的とした高張力鋼板の適用拡大には、強度だけではなく加工性（伸び）も抜本的に向上させてゆく必要がある。これを達成するための具体的なアプローチとして、中高炭素鋼を用いて、加工により変態して延性を高める残留オーステナイト相の最適活用による伸びの向上について研究が進められている。

しかしながら、中高炭素鋼は、従来の溶接技術では溶接部に割れが生じたり脆化したりする。そこで、本プロジェクトでは、工業化のために必要な難溶接鋼板の連続摩擦攪拌接合（FSW）技術の開発を目的に、中高炭素鋼板の PHM（Pre/Post Heating Method）による実用 FSW 技術の開発を目指す。予熱・後熱処理プロセスを利用することにより接合部の熱履歴制御を可能とし、接合部金属組織の最適化、継手の高強度化および接合施工性向上を達成することで、革新的 FSW 技術の実用化技術を構築する。

(2)位置付け、目標値

【位置付け】

1) 平成 27 年度

導入する鉄鋼用 FSW 装置、および既存接合ツールを用いた検討により、鉄鋼の FSW 基礎プロセスを確立する。接合ツールは種々の材質、形状に関して検討することで、接合施工性と継手健全性の観点から適正プロセス条件範囲を明確化し、得られた適正条件範囲において設定する接合強度目標値を達成する。上記の結果と共に、塑性流動基礎解析を行うことで、開発鋼の接合で想定される課題の明確化を図る。

さらに、導入する予熱・後熱プロセスを有する FSW 法（PHM-FSW 法）の装置を用いて接合性の検証を行う。

2) 平成 29 年度

予熱・後熱プロセスを有する FSW 法（PHM-FSW 法）を開発する。従来の FSW 法では接合ツールと鋼材との間で発生する摩擦熱のみを熱源としているため必要な熱量を十分確保できないという課題に対し、鋼材を十分に軟化させるために予熱プロセスを付加することで接合施工性を向上する。また、後熱プロセスを付加することで、接合部の熱履歴制御を可能とし継手強度を向上する。得られた接合継手の強度に関して上記の目標値を実験室レベルで実現する。

さらに、予熱・後熱プロセスを有する FSW 法（PHM-FSW 法）の装置に対して、上下面から加熱が可能な機能を追加し、設備の改良を行い、接合施工性を更に向上する。

3) 平成 34 年度

強度 1.5GPa 以上の開発鋼に対して PHM-FSW 法の適用技術を構築し、従来超ハイテンと同等の施工性を確保し、継手強度の目標を達成する。さらに、開発鋼を想定した PHM-FSW 法の実用化検討として、施工能率の更なる向上を達成するため健全な継手が得られる接合速度の上限を拡大する施工条件を明確化する。

【研究開発の目標】

1) 平成 27 年度

既存 FSW 法において、厚さ 2mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼板に対して接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%以上を実現する。

2) 平成 29 年度

予熱・後熱プロセスを有する FSW 法（PHM-FSW 法）を開発し、厚さ 1.4~2mm、強度 1.2GPa 以上の中炭素鋼板への適用性を実験室レベルで確認する。接合強度は強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼に対して接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%以上を実現し、かつ従来法による継手引張せん断強さを超える強度を実現する。

3) 平成 34 年度

予熱・後熱プロセスを有する FSW 法（PHM-FSW 法）を開発し、厚さ 1.4~2mm、強度 1.5GPa 以上の中炭素鋼板への実用化技術を構築する。健全な継手が得られる接合速度の上限を既存 FSW 法と比較して 5 倍以上を達成し、接合強度は厚さ 1.4~2mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼に対して接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%以上を実現する。

表Ⅲ-2.7.4-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
FSW 法の開発	予熱・後熱プロセスを有する FSW 法（PHM-FSW 法）の接合性の検証	予熱・後熱プロセスを有する FSW 法（PHM-FSW 法）による接合プロセス適正条件の明確化	PHM-FSW 法の実用化技術の構築として、健全な継手が得られる接合速度の上限を既存 FSW 法と比較して 5 倍以上を達成する。	FSW の実用化には接合部金属組織の最適化、継手の高強度化および接合施工性向上を達成する技術の開発が必須
継手性能	既存 FSW 法において、厚さ 2mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼に対して接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%を実現	PHM-FSW 法において、厚さ 1.4~2mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼に対して接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%を実現し、かつ従来法による継手引張せん断強さを超え	PHM-FSW 法において、厚さ 1.4~2mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼に対して接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%以上を実現	引張せん断強さが母材強度の 70%以上は、JIS Z3140 A 級相当であり、自動車車体の接合部強度の基準を

		る強度を達成		満たす。
--	--	--------	--	------

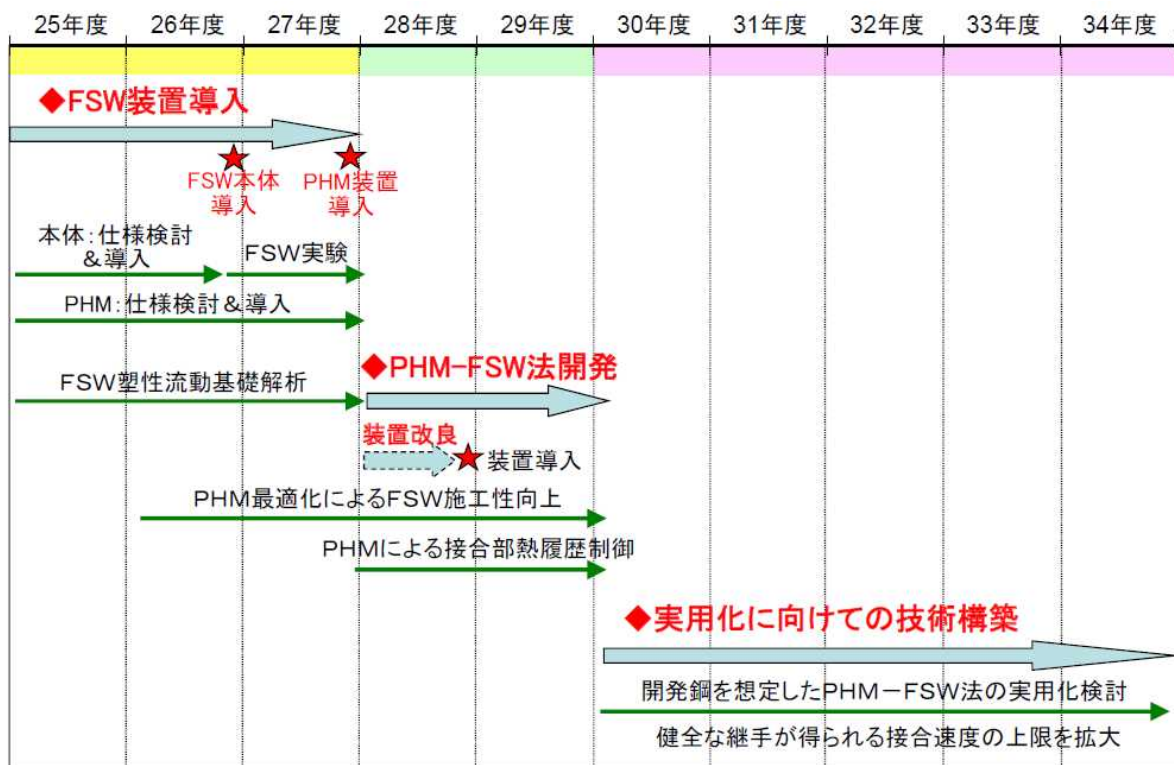
(3)全体計画

平成 25、26、27 年度は、FSW 装置本体、PHM 装置から構成される PHM-FSW 装置を構築する。導入装置が設計・仕様に従った性能を有することを確認する。既存 FSW 法により、2mm 厚、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼を接合対象として、接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%以上を達成する接合技術を開発する。また、研究再委託先の大阪大学にて中炭素鋼板の FSW における塑性流動基礎現象を検討する。

平成 28、29 年度は、PHM 条件の最適化による FSW 施工性向上と接合部熱履歴制御による継手特性向上を確立し、PHM-FSW 法の開発を達成する。また、PHM-FSW 装置の改良を行い、両面摩擦加熱が可能な機構を追加する。開発 PHM-FSW 法により、接合対象：1.4~2mm 厚、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼を接合対象として、接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%以上かつ、従来を超える接合技術を開発する。

平成 30~34 年度は、実用化に向けての技術構築を行う。開発鋼を想定した PHM-FSW 法の実用化検討を行い、健全な継手が得られる接合速度の上限を既存 FSW 法と比較して 5 倍以上を達成する。

表Ⅲ-2.7.4-2 全体計画



(4)実施体制

中高炭素鋼板の PHM による実用 FSW 技術の開発は、千葉分室（JFE スチール（株））が実施する。

(5)運営管理

テーマ(4)登録研究員による実務者進捗会議を1ヶ月に1回開催。加えて、スチール研究副所長出席による運営会議を3ヶ月毎に開催。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

開発する新接合技術および中高炭素鋼が自動車製造に適用されることにより、自動車の燃費向上によるエネルギー消費量と CO₂ 排出量が大幅に削減され、燃費改善目標（国立環境研究所 AIM PJ チーム試算）の 10~20%相当の CO₂ 削減で地球温暖化ガスの低減に寄与する。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。

また、開発する新接合技術は中高炭素鋼のみならず、異材接合技術としても非常に有用であるものと想定している。

2.7.4.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

1) FSW 法の開発

予熱・後熱プロセスを有する FSW 法（PHM-FSW 法）による接合プロセス適正条件の明確化において、開発材を想定した高炭素鋼を用いた検討において、高周波予熱を使用した PHM-FSW 法により従来 FSW と比較し、3 倍以上の接合速度を達成。

2) 継手性能

PHM-FSW 法において、厚さ 1.4~2mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼に対して接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%以上を実現し、かつ従来法による継手引張せん断強さを超える強度を達成することを目的とし、厚さ 1.4mm、強度 1.2GPa の開発鋼を用いて継手を作製し、接合継手の引張強さ母材強度の 70%以上を達成見込み。

表Ⅲ-2.7.4-3 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
FSW 法の開発	予熱・後熱プロセスを有する FSW 法（PHM-FSW 法）による接合プロセス適正条件の明確化	開発材を想定した高炭素鋼を用いた検討において、高周波予熱を使用した PHM-FSW 法により従来 FSW と比較し、3 倍以上の接合速度を達成。	◎	
継手性能	PHM-FSW 法において、厚さ 1.4~2mm、強度 1.2GPa 以上の中高炭素鋼に対して接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70%以上を実現し、かつ従来法による継手引張せん断強さを超える強度を達成	PHM-FSW 法において、厚さ 1.4mm、強度 1.2GPa の開発鋼を用いて継手を作製し、接合継手の引張強さ母材強度の 70%以上を達成見込み。	△	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

1) FSW 法の開発

現状は、開発材を想定した高炭素鋼を用いた検討において、高周波予熱を使用した PHM-FSW 法により従来 FSW と比較し、3 倍以上の接合速度を達成した。さらに、導入済みの FSW 装置に裏面回転ユニットを増設し両面 FSW 機能を付加し、裏面の加

熱領域を拡大することで塑性流動性を促進し、健全な継手が得られる接合速度の上限をさらに拡大する予定で、予備検討においては施工速度が従来 FSW と比較して 5 倍以上となる可能性を示唆する結果が得られた。

さらに、導入した裏面回転ユニットを使用した両面 FSW 装置と PHM（予後熱）装置の同期化を完了し、予熱プロセスと両面 FSW プロセスによるハイブリッド FSW プロセス装置を完成した。

今後、PHM-FSW 法の実用化技術の構築において、予熱プロセスと両面 FSW プロセスによるハイブリッド FSW プロセスにより健全な継手が得られる接合速度の上限を既存 FSW 法と比較して 5 倍以上を実現し、最終目標達成の見込み。

2) 継手性能

現状は、既存 FSW 法において、厚さ 2mm、強度 1.2GPa の中高炭素鋼を用いて継手を作製。接合継手の引張せん断強さ母材強度の平均 80%以上を実現している。

さらに PHM-FSW 法において、厚さ 1.4mm、強度 1.2GPa の開発鋼を用いて継手を作製し、接合継手の引張強さ母材強度の 70%以上を達成見込み。

今後、PHM-FSW 法において、厚さ 1.4~2mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼に対して接合継手の引張せん断強さ母材強度の 70%を実現し、達成の見込み。

表Ⅲ-2.7.4-4 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
FSW 法の開発	開発材を想定した高炭素鋼を用いた検討において、高周波予熱を使用することで従来 FSW と比較し、3 倍以上の接合速度を達成。 両面 FSW 予備検討において、顕著な高速化の可能性を確認。 さらに、予熱プロセスと両面 FSW プロセスによるハイブリッド FSW プロセス装置を完成した。	PHM-FSW 法の実用化技術の構築として、健全な継手が得られる接合速度の上限を既存 FSW 法と比較して 5 倍以上を達成する。	達成の見込み
継手性能	既存 FSW 法において、厚さ 2mm、強度 1.2GPa の中高炭素鋼を用いて継手を作製。接合継手の引張せん断強さ母材強度の平均 80% 以上を実現。 PHM-FSW 法において、厚さ 1.4mm、強度 1.2GPa の開発鋼を用いて継手を作製し、接合継手の引張強さ母材強度の 70%以上を達成	PHM-FSW 法において、厚さ 1.4~2mm mm、強度 1.5GPa 以上の中高炭素鋼に対して接合継手の引張せん断強さが母材強度の 70% 以上を実現	達成の見込み

	見込み。		
--	------	--	--

(3)研究開発の成果と意義

【研究開発の成果】

1) PHM-FSW法における施工性検討

高周波加熱を用いた PHM-FSW 法の検討を行った。FSW 時に高周波加熱を用いて予熱することで接合部の塑性流動を促進し、接合速度を増大させた場合においても健全な継手を達成する検討を行った。結果として、従来の FSW と比較し接合速度を 3 倍することに目途を得た。

a. 実験条件

C: 0.57%、板厚 2.3mm の鋼板サンプルを架台にクランプし、全体をステージ上で長手方向に移動させた。接合ツールは WC 製で、ショルダー径 12mmφ、プローブ径 4mmφ、プローブ長 1.8mm のものを用いた。周波数 80kHz の高周波加熱装置を用いて、サンプル上方に固定した加熱コイルを通じて加熱を行うとともに、コイル後方に配置した接合ツールにて FSW を行った。高周波加熱条件として、出力を 100kW、コイル鋼板間距離を 10mm とした。FSW 条件として、ツール角度を 3°、ツール回転数は 400, 600rpm、接合速度は 0.4~2.2m/min の範囲とした。

b. 実験結果

高周波予熱 FSW 試験時の加熱状態に関して、赤熱の様子からツール前方および後方では 600°C 程度になっていたと考えられる。接合継手表面の外観に関して、表面欠陥が生じる際にはプローブ径の前進側の端部の位置に沿って線状の欠陥が認められた。接合条件による表面欠陥の発生状況に関しては、高周波による予熱なしの場合は、接合速度 0.6m/min までは表面欠陥のない継手が得られたのに対し、接合速度 0.8m/min 以上では表面欠陥が発生した。一方、高周波による予熱を付与した場合は、接合速度 2.0m/min までは表面欠陥のない継手が得られたのに対し、接合速度 2.2m/min 以上では表面欠陥が発生した。予熱 FSW 接合部の断面マクロ組織に関して、高周波による予熱なしで回転数 400rpm、接合速度 0.6m/min で接合した場合は、表面欠陥は認められなかったもののプローブ径の前進側の端部の位置に内部欠陥が認められた。一方、高周波による予熱を付与し、回転数 400rpm、接合速度 2.0m/min で接合した場合においても、表面欠陥は認められなかったもののプローブ径の前進側の端部の位置に内部欠陥が認められた。予熱付与した FSW においては、回転数を 600rpm に増加することで、接合速度 2.0m/min で内部欠陥が顕著に縮小することが確認できた。

2) 予熱プロセス(PHM)と両面 FSW のハイブリッド化設備導入

裏面の加熱領域を拡大することで塑性流動性を促進し、接合速度をさらに増大させた場合においても健全な継手を達成することを目的に、導入済みの FSW 装置に裏面回転ユニットを増設し両面 FSW 機能を付加した。予備検討を行い、施工速度が従

来 FSW と比較して 5 倍以上となる可能性を示唆する結果が得られた。

さらに、導入した裏面回転ユニットを使用した両面 FSW 装置と PHM (予後熱) 装置の同期化を完了し、予熱プロセスと両面 FSW プロセスによるハイブリッド FSW プロセス装置を完成した。

【研究開発の意義】

自動車車体の材料構成は、軽合金や樹脂などが増加しているとは言え、鉄系材料がその大半を占める状況である。したがって、ハイテン材を適用して薄肉化を図ることが車体軽量化には極めて有効であり、その使用量の大幅な増加が予想されている。自動車向け鋼板生産量におけるハイテン材の比率は 1990 年には 20%であったものが 2005 年には 50%まで上昇しており、その生産量は年間で約 1500 千 t から 3600 千 t まで増加している。一方で、使用される鋼板の強度は、従来では引張強度が 590MPa までで構成されていたものが、近年では 980MPa 級以上の超高強度鋼板の自動車車体部品への適用が検討されている。従来の引張強度が 980MPa 以上の高強度鋼板は補強部材などの軽加工で製造可能な部品への適用に限定されていた。これには、中炭素鋼の溶接が難しいという事情が大きく影響している。上記の自動車車体を取り巻く情勢から、このような高強度鋼板の接合技術の溶接性の改善は益々必要とされると期待される。

一方、鋼板の摩擦攪拌接合技術については、これまでも軟鋼板から 980MPa 級鋼板までの実用鋼板を対象とした摩擦攪拌点接合および摩擦攪拌接合技術が検討されており、その基礎的現象は明らかになっている。また、予熱を活用した摩擦攪拌接合の施工性向上技術についての基礎的検討もなされてきた。

そこで、本プロジェクトにおいては、これらの従来の知見を活用するとともに、さらに予熱・後熱をインプロセスで実施する技術を開発することにより実用的摩擦攪拌接合技術を確立し、自動車車体の骨格部品に適用可能な極めて高強度の鋼板の接合が高効率で可能となること見込んでいる。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.4-5 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
H26FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
H27FY	1	0	3	0	0	0	0	0	1
H28FY	0	0	1	0	0	0	0	0	1
合計	1	0	4	0	0	0	0	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）

(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）

表Ⅲ-2.7.4-6 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	2	0	0
H28FY	2	0	2
合計	4	0	2

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.5[テーマ番号 05] アルミニウム／異種材料の点接合技術

2.7.5.1 テーマの概要

(1)背景と目的

航空機や自動車等の輸送機器には地球温暖化対策としての CO₂ 削減と省エネルギー化が求められており、軽量化はその有効な手段である。自動車においてはとくに車両重量の 40%を占める車体の抜本的な軽量化が必要であり、従来の鋼板製車体のような単一材料ではなく、各種構造材料の特長を生かした適材適所の材料適用（マルチマテリアル車体）の研究が主流となっている。

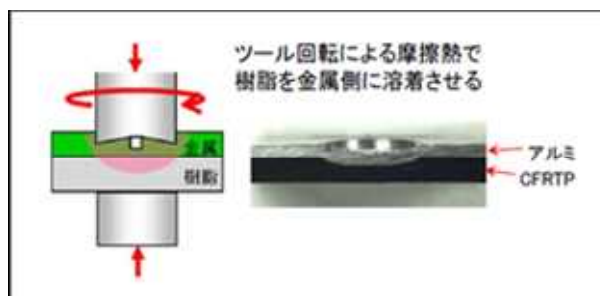
そのマルチマテリアル車体の実現には、部素材の高性能/低コスト化のための研究開発とともに、異種材料からなる複数の部素材を組み付けるための接合技術が不可欠であるが、現状ではリベットなどの機械的接合や接着に限られ、多関節ロボットによる抵抗スポット溶接を前提とした車体組立ラインには容易に展開できない。

そこで本研究開発では、マルチマテリアル車体を既存の車体組立ラインで製造するため、その主要構成材料であるアルミニウムや鋼板、CFRP などの異種材料の直接接合が可能で、且つ、組立ラインへの適合性の高い異材点接合技術を開発する。併せてそれら異材接合部の信頼性を確保するため、素材間の熱膨張差による熱歪みの解析技術や腐食電位差による電食（ガルバニック腐食）の電気化学的評価手法を確立する。

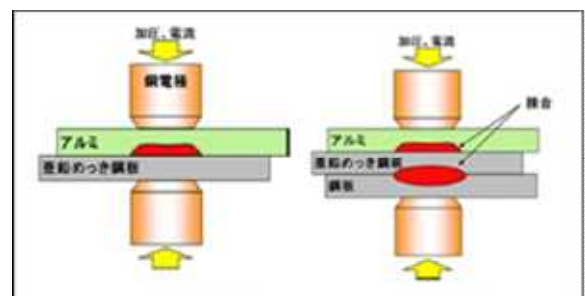
また、車体の軽量化に伴って悪化する振動騒音性能を補完するための要素技術として、高遮音アルミニウムパネル材とウェルドボンド用高減衰接着剤の仕様についても検討する。

(2)位置付け、目標値

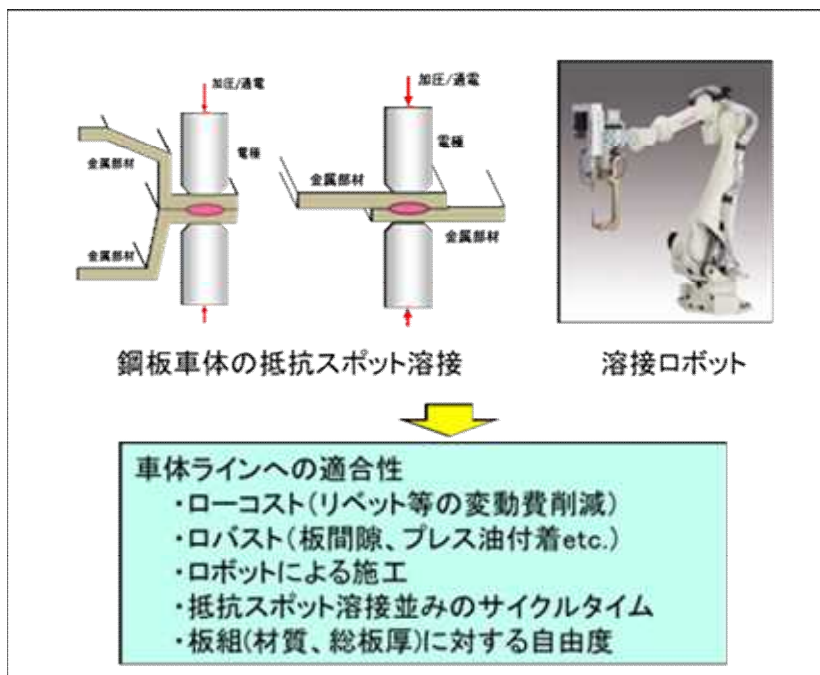
車体組立ラインで多用されている抵抗スポット溶接に置き換え可能な点接合技術を開発対象としており、一部に使用されているリベット接合よりも低コストで多様な板組（材質、総板厚）に対応できる利点もあり、マルチマテリアル車体の接合技術として他の接合手法に比べ優位にある（図Ⅲ-2.7.5-1~2.7.5-3 参照）。



図Ⅲ-2.7.5-1 アルミニウム/CFRP の点接合



図Ⅲ-2.7.5-2 アルミニウム/鋼板の点接合



図Ⅲ-2.7.5-3 異材点接合の要件

本研究開発の目標値を表Ⅲ-2.7.5-1に示す。アルミニウム/CFRPとアルミニウム/鋼板の点接合技術を車体の強度部材に適用するため、接合強度の目標値をJIS Z3140（スポット溶接部の検査方法）に記載のA級（特に強さを要する溶接部）以上と設定した。また、アルミニウム/CFRPの点接合については、生産性の観点から1点あたりの接合時間を抵抗スポット溶接に近い5秒以内を最終目標としている。

表Ⅲ-2.7.5-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成27年度末)	第二中間目標 (平成29年度末)	最終目標 (平成34年度末)	根拠
アルミニウム／CFRPの点接合技術	・試験片の接合強度でJIS Z3140-A級の引張せん断荷重平均値以上または母材破断を実現	・車体部材適用時の部材性能／品質／コスト／主要量産課題の明確化 ・アルミニウム／CFRP点接合に特化した摩擦攪拌点接合ロボットの仕様決定	・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 ・1点あたりの接合時間は5秒以内 ・多関節ロボットによる施工技術と品質保証手法の確立	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
アルミニウム／鋼板の点接合技術	・試験片の接合強度でJIS Z3140-A級	・車体部材適用時の部材性能／品質／コ	・車体部材の接合強度でJIS -A級の	車体の強度部材に適用

	の引張せん断荷重 平均値以上または 母材破断を実現	スト／主要量産課題 の明確化	引張せん断荷重最 小値以上または母 材破断を実現	可能な接合 強度の確保
異材接合部の評価 解析	・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／ 鋼板、アルミニウ ム／CFRP の熱膨張 差による熱歪みの 評価解析手法の確 立	・電食に対する防錆 技術の確立 ・熱歪み解析手法の 運用		マルチマテ リアル車体 の品質確保
高遮音アルミパネ ルと高減衰接着剤 の仕様決定	・高遮音アルミパ ネルと高減衰接着 剤の基本仕様決定	・車体部材適用時の 部材性能／品質／コ ストの明確化 ・量産仕様の決定		車体軽量化 により悪化 する性能の 補完
異材点接合の適用 研究(H28年度か らテーマ化)		・自動車用ドアを想 定した CFRP 複合成 形の技術課題抽出 ・マルチマテリアル ドアの構想設計（重 量とコストの概算）	・マルチマテリア ルドアの材料/工法 の決定	CFRP の部材 性能と低コ スト化の両 立には複合 成形技術が 必須

(3)全体計画

研究開発が 10 年間の長期に及ぶことから、当初の目標を確実に達成するため、研究期間を技術構想の実証（平成 25~27 年度）、実部品での性能/効果の検証（平成 28~29 年度）、実用化の主要課題解決（平成 30~34 年度）の三つのステージに分け、各ステージでの研究内容やゴールを明確に設定した。

なお、第二ステージでは新たに自動車用ドアを想定した異材点接合の適用研究に着手した。

(4)実施体制

本研究テーマは、異材点接合技術と接合部の評価解析技術および NVH 性能（振動騒音）を改善するための材料開発で構成される。アルミニウム/CFRP の点接合技術と高遮音アルミニウムパネルは、アルミニウム素材メーカーである UACJ との共同開発とし、大学や公的研究機関に接合部の基礎評価や接合時間短縮を再委託している。ウェルドボンド用高減衰接着剤については接着剤メーカーや大学等に再委託し、接着剤の基本組成の検討や減衰メカニズムの解明を進めている。また、自動車用ドアを想定した適用研究を開始するため、自動車部品メーカーを新たに再委託先として追加した。

(5)運営管理

業務管理責任者のもと部門横断の実施体制とし、サブテーマ毎にテーマリーダーを設定した。また、研究活動のPDCAサイクルを徹底するため、業務管理責任者と部門長をレビューボードとしたマンスリーの進捗会議を開催している。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

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。

2.7.5.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.5-2 に第二中間目標と達成度を示す。各サブテーマとも中間目標（平成 29 年度末）を達成できる見込みである。第二期（平成 28~29 年度）ではアルミニウム/CFRP 点接合技術の確立（接合装置開発含む）と自動車部材への適用開発に重点的に取り組んでいる。低融点のポリプロピレン樹脂だけでなく、ポリフェニレンサルファイド（PPS）などの耐熱性樹脂をマトリックスとした CFRP についても 5 秒以内で接合できる見通しが得られた。一部の研究成果については平成 29 年度溶接学会春季大会等で報告する。

表Ⅲ-2.7.5-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
アルミニウム/ CFRP の点接合技 術	<ul style="list-style-type: none"> 車体部材適用時の部材性能/品質/コスト/主要量産課題の明確化 アルミニウム/CFRP 点接合に特化した摩擦攪拌点接合ロボットの仕様決定 	<ul style="list-style-type: none"> GFRP 製リフトゲートを用いた接合実験で量産時に想定される外乱（板間隙、治具精度、スプリングバック等）に対する余裕度を確認した。 研究成果を織り込んだ接合装置の構想設計を完了した。 	△	
アルミニウム/鋼 板の点接合技術	<ul style="list-style-type: none"> 車体部材適用時の部材性能/品質/コスト/主要量産課題の明確化 	<ul style="list-style-type: none"> 1000MPa 級超ハイテンとの接合でも接合強度の目標を達成できた。 	△	
異材接合部の評価 解析	<ul style="list-style-type: none"> 電食に対する防錆技術の確立 熱歪み解析手法の運用 	<ul style="list-style-type: none"> シーラー類の防錆効果の評価方法を決定した。 接着剤、CFRP などをモデル化し、熱歪みを定性的に予測可能にした。 	△	
高遮音アルミパネ ルと高減衰接着剤 の仕様決定	<ul style="list-style-type: none"> 車体部材適用時の部材性能/品質/コストの明確化 	<ul style="list-style-type: none"> 遮音効果最大化のための音響 CAE を完了。 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。 	△	
異材点接合の適用 研究(H28 年度か らテーマ化)	<ul style="list-style-type: none"> マルチマテリアルドアの構想設計（構造検討、重量 	<ul style="list-style-type: none"> マルチマテリアルドアの基本構造、材料等を決定した。 	△	

	とコストの概算) ・CFRP複合成形の 技術課題抽出	・CFRP(芳香族ポリ アミドベース)のCAE用 材料データを取得した。		
--	----------------------------------	--	--	--

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.5-3に現状と最終目標の達成見通しを示す。アルミニウム/CFRPの点接合については、ロバスト性確保のための技術開発を進め、車体実部材を想定した試作検証のステージに移行する。また、アルミニウム/鋼板の点接合についても第二期中に基本技術を確立し、実部材を用いた技術検証に着手する。

表Ⅲ-2.7.5-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成34年度末)	達成見通し
アルミニウム/ CFRPの点接合技術	<ul style="list-style-type: none"> ・GFRP製リフトゲートを用いた接合実験で量産時に想定される外乱(板間隙、治具精度、スプリングバック等)の影響度合いや管理ポイントが明らかになった。 ・研究成果を織り込んだ接合装置の構想設計を完了した。 	<ul style="list-style-type: none"> ・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 ・1点あたりの接合時間は5秒以内 ・多関節ロボットによる施工技術と品質保証手法の確立 	高融点樹脂も含め、主要な熱可塑性CFRPで目標達成の見通しあり。
アルミニウム/鋼 板の点接合技術	<ul style="list-style-type: none"> ・アルミニウムと超ハイテンの板組においてもJIS-A級を超える引張せん断荷重が得られている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・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 	試験片レベルでは既に目標を達成している。実部材でも見通しあり。
異材接合部の評価 解析	<ul style="list-style-type: none"> ・異材の組合せによる熱歪みは定性的ではあるが予測可能になった。 ・電食についても防錆仕様の検討に移行した。 	<ul style="list-style-type: none"> ・車体の設計開発での実運用 	
高遮音アルミパネ ルと高減衰接着剤 の仕様決定	第二期の目標を達成し、研究を完了し、商品開発に移行する予定。		

異材点接合の適用研究(H28年度からテーマ化)	マルチマテリアルドアの基本構造と材料を仮決定し、重量を試算した。構造解析に必要な材料データを取得した。	<ul style="list-style-type: none"> ・マルチマテリアルドアの材料/工法の決定 ・複合成形技術の確立 	コンセプト実現の鍵を握る複合成形の技術検証に注力する計画であり、達成見通しあり。
-------------------------	---	--	--

(3)研究開発の成果と意義

①アルミニウム/CFRP 点接合技術

これまでにマトリックス樹脂の官能基とアルミニウム表面の酸化膜分子との物理的相互作用（クーロン力）による結合であることを明らかにした。その接合メカニズムに基づき、本来は官能基を含まず接合性に劣るポリプロピレン樹脂についても、カルボキシル基の添加やアルミニウム側への表面処理により接合強度が大幅に向上することを見出し、第1期目標（JIS Z3140-A 級の引張せん断荷重平均値以上または母材破断）を前倒しで達成した（UACJ と共同）。また、本技術の接合品質と生産性（接合時間目標 5 秒以内/点）を両立するため、品質工学の直交表を用いた実験を行い、ポリプロピレン樹脂マトリックスの CFRP では接合時間を 2 秒程度まで短縮できることも分かった。

第二期では主にアルミニウム/CFRP の点接合に特化した実用接合装置の構想設計と、実部品による技術検証を実施している。このうち接合装置の構想設計においては、その基本仕様を決定するため、予備実験として接合強度に及ぼすプロセスパラメータの影響を体系的に調査した。具体的にはツール径や回転数、挿入速度、保持時間と接合強度の関係を実験的に求め、接合部に投入される摩擦熱を指標として整理した（図Ⅲ-2.7.5-4）。

その結果、引張せん断荷重は接合面積にほぼ比例し、その接合面積は接合時に投入される総摩擦熱量と相関があることが分かった（図Ⅲ-2.7.5-5, 図Ⅲ-2.7.5-6）。パラメータのなかでも挿入速度と保持時間の総摩擦熱量に及ぼす影響が大きく、挿入速度が速い（接合時間が短い）ほど、引張せん断荷重が低下する（図Ⅲ-2.7.5-7）。これに対し、所定の挿入深さに到達後もツール回転を一定時間保持することで高速挿入域の引張せん断荷重が大幅に改善されることも分かった（図Ⅲ-2.7.5-8）。要求強度レベルやマトリックス樹脂の熱的性質に応じて、これらのパラメータを適切に設定することが重要である。

予備実験の知見をもとに、ポリフェニレンサルファイドや芳香族ポリアミドなど、ポリプロピレンに比べて融点の高い耐熱性樹脂への展開性も考慮したうえで、必要な摩擦熱量を得るための装置能力やパラメータの設定範囲を決定し、接合装置の構想設計に織り込んだ。今回の研究成果の一部は、溶接学会平成 29 年度春季全国大会のフォーラム「輸送機器の軽量化を目指したマルチマテリアル接合技術の最前線」で報告する。

一方、実部品による技術検証として GFRP 製リフトゲートインナとアルミニウム製補強材を対象にした接合実験を行い、実部品で想定される外乱（板間隙変

動、固定治具精度、プレス油付着、スプリングバック等) に対する感受性を調査した。その結果、最も大きな外乱因子はクランプ力であり、十分にクランプ力が作用する部位では健全な接合が可能で樹脂の母材破壊又は凝集破壊を示すが、クランプが不十分な場合には補強繊維のスプリングバックにより生じる樹脂空隙層が優先的に破断するため、接合強度としては低下することが分かった。引き続き、圧力測定フィルム等を用いてクランプ力を可視化し、その許容範囲を明らかにする。

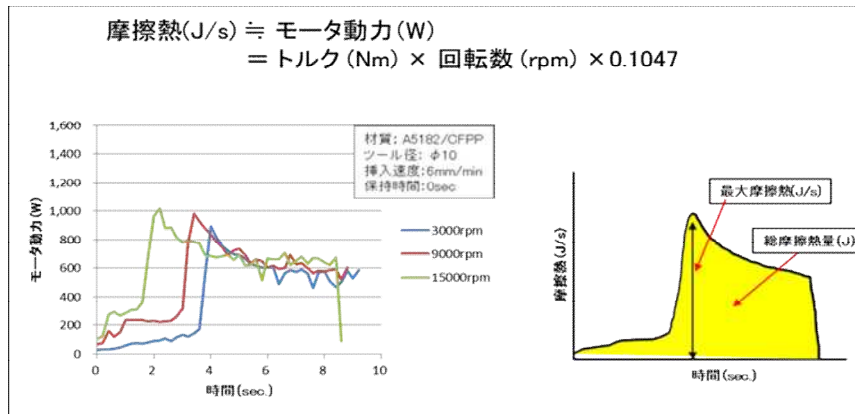


図 III-2.7.5-4 摩擦熱の指標

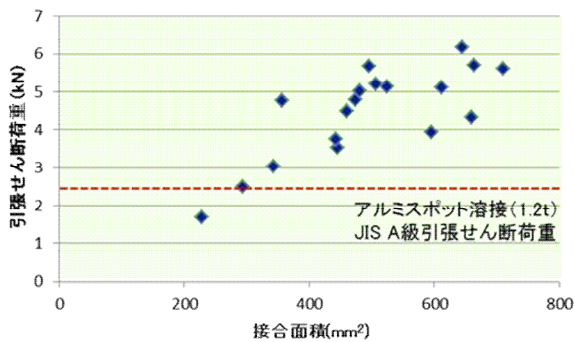


図 III-2.7.5-5 引張せん断荷重と接合面積

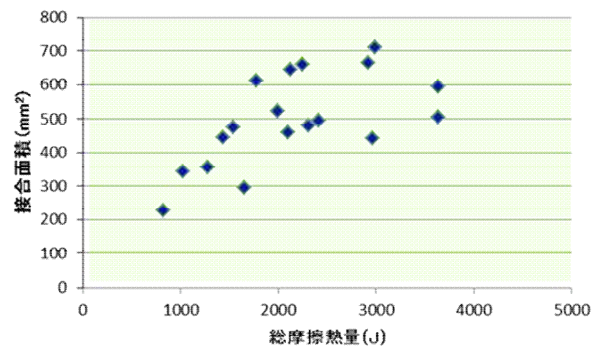


図 III-2.7.5-6 総摩擦熱量と接合面積

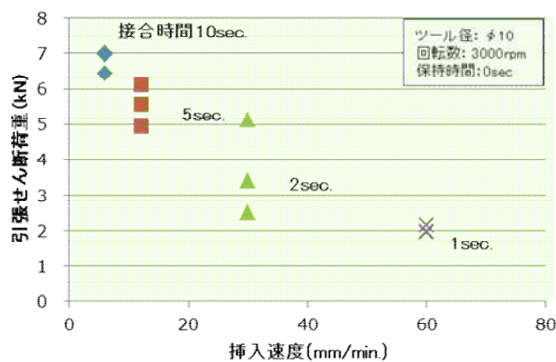


図 III-2.7.5-7 挿入速度の影響

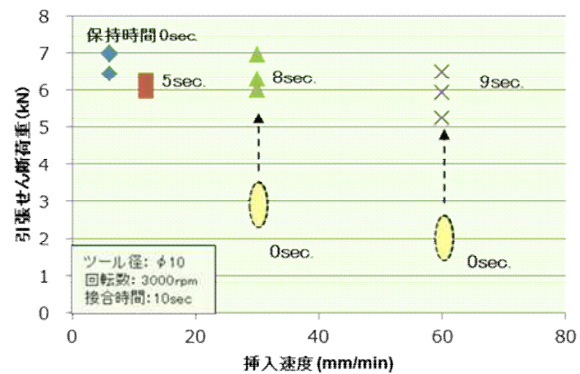


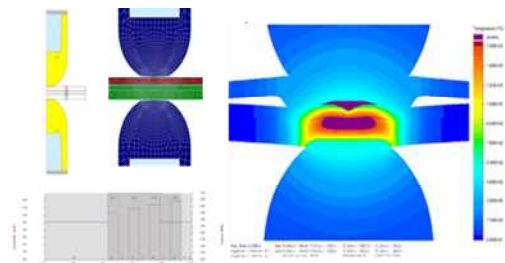
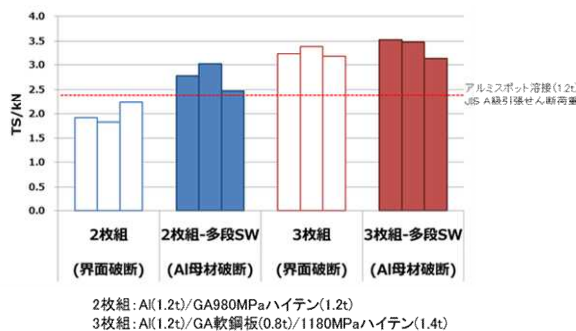
図 III-2.7.5-8 保持時間の影響

②アルミニウム/鋼板点接合技術

これまでに鋼板側に薄目付けの亜鉛メッキを施すことで接合強度を大幅に改善し、第一期目標（JIS Z3140-A 級の引張せん断荷重平均値以上または母材破断）を達成した。また、防錆鋼板として国内では主流の厚目付 GA 鋼板（合金化溶融亜鉛メッキ）についても、通電を複数回に分けてステップ状に電流値を増加させる「多段通電プロセス」を用いることで、チリの抑制と接合ナゲット径の拡大が両立でき、実用レベルの剥離強度（アルミニウム同士の抵抗スポット溶接以上）が得られた。

第二期では、本技術の適用範囲を明らかにするため、超ハイテンを含む板組みでの接合性を評価した。軟鋼板の場合と同様、亜鉛メッキと多段通電の組合せにより、目標を超える引張せん断荷重が得られ、破断形態もアルミニウムの母材破断を示すことを確認した（図Ⅲ-2.7.5-9）。材料の塑性変形を前提とするセルフピアッシングリベットは硬質材料への適用が難しいことを考慮すると、超ハイテンを含む異材が接合できることは本技術の大きな利点と言える。

また、種々の板組に対する通電条件や電極仕様などの最適化ツールとして、市販の溶接シミュレーションの活用を検討した。アルミニウムと鋼板の異材組合せにおいても、断面観察により確認できるナゲット形成状態をほぼ再現できることが分かった（図Ⅲ-2.7.5-10）。引き続き、異材抵抗スポット溶接の技術育成に本シミュレーションを活用する。



図Ⅲ-2.7.5-9 超ハイテンの接合強度

図Ⅲ-2.7.5-10 シミュレーション結果

③異材接合部の評価解析

異種材料（アルミニウム/CFRP/鋼板など）の電気化学特性や熱的特性の違いに起因したガルバニック腐食や熱歪みへの対応は、マルチマテリアル車体を実現する上での大きな課題である。これまでに電気化学的評価手法を用いてガルバニック腐食を評価し、腐食速度に及ぼす炭素繊維量や電極面積比の影響を明らかにした。

アルミニウムと CFRP の接合部が被水環境に曝される場合には、防水もしくは絶縁等の防錆対策が不可欠であり、実際に CFRP を採用している欧州車ではシーラーや接着剤などの防錆副資材が用いられている。

第二期では実際の締結構造をモデルに、電気化学的評価手法による腐食の定量

化と防錆仕様の検討に取り組んでいる。シーラーや接着剤を用いる場合には、防水性や絶縁性の長期品質保証が不可欠である。そこで、これら防錆副資材の施工不良や経年劣化を模擬した試験片と電気化学的手法を組み合わせた新たな評価方法を考案した。引き続き、その評価方法の妥当性を検証し、実部材や実環境を想定した防錆仕様を決定する。

一方、熱歪みの CAE 解析技術については、アルミニウム/鋼板およびアルミニウム/CFRP 接合体フレーム試験片を用い、実際に起こっている熱歪み現象を可視化した。その結果をもとに接着剤の CAE モデルを検討し、異材間に接着剤を塗布した接合体の変形現象を半定量的に評価できることを確認した（図 III-2.7.5-11）。

車体外板や構造体に CFRP やアルミニウムを使う場合、鋼板との線膨張率の差に起因した面歪みや応力集中、接着剤のはく離など、商品性や耐久信頼性に関わる品質問題が予想される。今後、熱歪み CAE の解析精度の向上と具体的な熱歪み緩和締結構造の検討に取り組む。

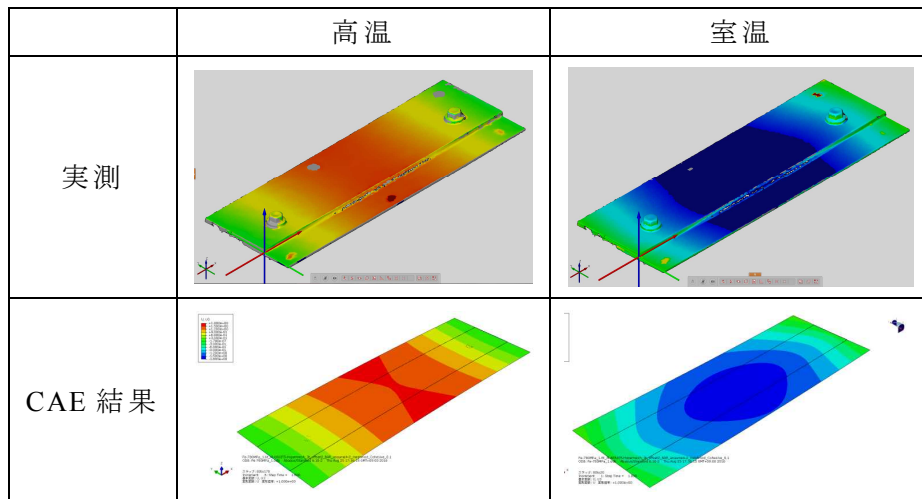


図 III-2.7.5-11 異材間に接着剤を塗布した接合体の熱歪み

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

第一期ではアルミニウム/鋼板点接合技術に関する研究成果や異材接合部の基礎評価結果を学会等で発表した。今後はアルミニウム/CFRP 点接合技術についても随時、外部発表する。

表Ⅲ-2.7.5-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
H25FY									
H26FY				1					1
H27FY	1	1	4	2					1
H28FY		1	9						1
合計	1	2	13	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）

(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）

アルミニウム/異種材料の点接合技術に関わる主要特許は本事業の開始前に出願していることもあり、第一期では周辺特許を中心に出願した。引き続き、接合メカニズムに基づいた強度向上や接合時間短縮ためのキーとなる発明の体系的な知的財産取得に注力する。また、外国出願も含め、実際の車体部材に適用する上で不可欠な周辺特許についてもタイムリーに出願するため、登録研究員と知財部メンバによる知財ミーティング（1回/週）を推進する。

表Ⅲ-2.7.5-5 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY			
H26FY	7		
H27FY	5		
H28FY	5		
合計	17		

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.6 【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

2.7.6.1 テーマの概要

(1)背景と目的

近年、地球温暖化や安全意識の高まりから、自動車には優れた燃費性能と高い安全性能の両立が強く求められており、自動車ボディの骨格部には高強度鋼板が多用されている。高強度鋼板は一般的にレアメタルの添加によって強度向上が図られているが、経済性や供給性という観点から、それらを含まない中高炭素鋼が次世代鋼として開発されている。しかしながら、鉄鋼材料は炭素量が多くなるほど急冷時に硬化組織が出現し、溶接継手の剥離強度が確保できないということが課題となっている。また、溶接部における割れなどの欠陥が生じやすくなる。

フリクションスポット接合法（**Friction Spot Joining**：以下、FSJと略す）は摩擦発熱を用いた固相接合法であり、回転工具の摩擦発熱で生じた材料軟化とその流動を利用したスポット接合方法である。FSJは固相接合であるため抵抗スポット溶接よりも投入熱量が小さく接合部の硬化を抑制できる可能性がある。そのため、炭素量の高い中高炭素鋼においても従来の抵抗スポット溶接よりも優れた継手性能が得られると期待できる。

本テーマはFSJの中高炭素鋼への適用技術の確立とその実用化を目的に、その要素技術（接合ツール、以下単にツールという、接合プロセス、鋼板）について、重点的な研究開発を行う。

(2)位置付け、目標値

本テーマは、中高炭素鋼板の実用化およびその接合機器市場（溶接ロボット、ツール）で確固たるシェアを獲得することを目標に、FSJを次世代の中高炭素鋼板の接合におけるキー技術として世界に先駆けて実用化することを目指している。そのため中高炭素鋼の適用ターゲットである自動車分野において、生産性や品質要求の厳しい自動車の生産ラインでも適用できる実用ロボットシステムや、引張強度が1.2 GPaを超える高強度な中高炭素鋼板の接合に耐えうるツール素材やコーティング膜の開発、品質保証に必要な接合メカニズムの解明、自動車部材への適用を意識した継手性能の評価など実用化を見据えた研究開発を実施する。

表Ⅲ-2.7.6-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
(1-1) ツール素材の開発	1.2 GPa 級中高炭素鋼の接合に対して、破損せずに確実に接合できるツール素材を開発	耐熱衝撃性などを考慮したツール素材の最適化を図る。	1.5 GPa 級鋼板に適したツール素材の改良を実施する。	1.5 GPa 級の鋼板でも破損せずに接合できるツール開発

	する。			が必要。
(1-2) コーティングの開発	種々のコーティング物質や層構造について検討し、摩擦係数などの基礎データを蓄積する。	耐酸化性や摩擦係数、膜厚の最適化を図る。	1.5 GPa 級鋼板に適したコーティングの改良を実施する。	ツールの耐磨耗性の向上に必要。
(1-3) ツール形状の開発	1.2 GPa 級中高炭素鋼 (1.5mmt) において JIS-A 級強度 (14.4kN) の 70% を越える継手強度を達成する。	1.2 GPa 級鋼板 (1.4mmt) の接合継手の引張せん断試験で JIS-A 級強度 (13.02kN) の 100% 以上。	1.5 GPa 級鋼板 (1.4mmt) の接合継手の JIS-A 級強度 (13.02 kN) の 100 % 以上。	継手強度評価基準として一般的な JIS 規格値を採用。
(2-1) ツール性能の評価	ツールの自動評価システムを構築する。	—	—	開発加速のためにツール性能の効率的評価が必要。
(2-2) 接合装置開発	接合条件開発用の接合ガンおよび高ツール加圧力に対応した小型軽量ガンを試作する。	1.2 GPa 級鋼板用に最適化された接合プロセスに適するようガンを改良する。	1.5 GPa 級鋼板用に最適化された接合プロセスに適した小型軽量ガンの試作および設計方針を決定する。また、プロセスモニタリング機能を開発する。	適用に向けた確実な接合性能と、実生産ラインとの親和性を両立する。
(2-3) 接合プロセス開発	接合条件と形成組織の関係や、ツール形状と継手強度の関係などの基礎的知見を得るとともに、高炭素鋼に適した基本プロセスを開発する。	1.2 GPa 級鋼板に最適な接合プロセスおよび制御プログラムを開発し、継手の特性を向上させる。	1.5 GPa 級鋼板の接合プロセスの最適化を図り、目標強度を達成する。	従来の枠を超えた高炭素鋼では専用の制御プロセス開発が必要
(3-1) 接合部の評価	1.2GPa 級鋼の継手特性把握、部材の動的・静的特性調査の実施。	共通鋼材の継手基礎データの蓄積。実部材特性を模擬した部材の試作評価、特性把握。	1.5GPa 級のテーマ共通鋼板継手の試作と特性評価。	接合部に要求される各種性能の把握と向上が必要。
(3-2) 材料特性	1.2GPa 級鋼の継手	中高炭素鋼の継手強	1.5GPa 級までの中	継手の要求

の影響解明	強度発現メカニズムの解明。接合性向上指針の導出。	度発現メカニズム解明の推進。特性改善指針の明確化。	高炭素鋼における継手特性改善指針の導出。	性能実現および向上のため必要。
(4-1) 組織観察	1.2 GPa 級鋼板の接合部（FSJ、抵抗スポット）について金属組織の詳細観察や硬さ分布から熱履歴と組織形成の関係を調査する。	1.2 GPa 級鋼板の接合部の金属組織の詳細観察。	1.5 GPa 級鋼板の接合部の金属組織の詳細観察。	高炭素鋼特有の接合プロセス制御に不可欠な知見を得る。
(4-2) 接合メカニズムの解明	接合界面トレース方法の検証と接合界面近傍の組織について詳細に観察する。	接合界面トレース法による 1.2 GPa 級鋼板の接合挙動の把握。	接合界面トレース法による 1.5 GPa 級鋼板の接合挙動の把握。	接合原理の把握と品質保証への応用。

(3)全体計画

表Ⅲ-2.7.6-2 に、本テーマの開発全体スケジュールを示す。なお、状況に応じて平成 29 年度末を目安に 1.2 GPa および 1.5 GPa 級中高炭素鋼の基本技術を前倒して確立し、早期に実用化ステージへ移行する考えである。

表Ⅲ-2.7.6-2 全体スケジュール

研究開発項目	25年度	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度	31年度	32年度	33年度	34年度
マイルストーン				▽JIS-Aの70%達成 (1.2G級)		▽JIS-A達				▽JIS-A達
1.長寿命ツールの開発 (住友電気工業)										
1.1 ツール素材の開発	試作(1.2G級)	組成改良		組成最適化		試作(1.5G級)	組成改良		組成最適化	
1.2 コーティングの開発	試作(1.2G級)	膜質改良		膜質最適化		試作(1.5G級)	膜質改良		膜質最適化	
1.3 ツール形状の開発	試作(1.2G級)	形状改良		形状最適化		試作(1.5G級)	形状改良		形状最適化	
2.施工技術開発 (川崎重工業)										
2.1 ツール性能の評価	自動評価装置	試作		ツール性能評価(1.1~1.3項のツール)						
2.2 接合装置の開発	接合ガン	試作(#1)	接合ガン 試作(#2)	改良		ガン小型・軽量化(実部材品への展)				
2.3 接合プロセスの開発	継手試作(1.2G級)	プロセス改良		プロセス最適		継手試作(1.5G)	プロセス改良		プロセス最適	
3.材料評価・開発 (新日鐵住金)										
3.1 接合部の評価	評価(1.2G級)		評価(2.3の試作継手)			1次評価(1.5G級)		評価(2.3の試作継手)		
3.2 材料成分開発	試作(1.2G級)	改良		最適化		1次試作(1.5G級)		改良		
4.接合メカニズム解明 (東北大学)										
4.1 組織解析			解析(1.2G級)				解析(1.5G級)			
4.2 接合メカニズム解明			解析(1.2G級)				解析(1.5G級)			

(4)実施体制

表Ⅲ-2.7.6-3 に本テーマの実施体制を示す。伊丹分室（住友電気工業株式会社）が長寿命接合ツールの開発を、神戸東川崎分室（川崎重工業株式会社）が施工技術の開発を、富津分室・尼崎分室（新日鐵住金株式会社）で材料評価・開発を実施している。

表Ⅲ-2.7.6-3 実施体制図

新構造材料技術研究組合	
分担研	伊丹分室 (住友電気工業株式会社)
	神戸東川崎分室 (川崎重工業株式会社)
	富津分室・尼崎分室 (新日鐵住金株式会社)

(5)運営管理

当テーマは各社が分室を設け、選任された業務管理者が研究開発の進捗を管理・遂行している。三分室で定期的な連絡会議を開き、進捗確認、試験結果報告、情報共有等を行って連携を深めている。さらに、必要に応じて各分室の担当者が試験立会を行うなど、協調した研究開発が進められるよう留意している。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

今後の世界の自動車生産台数は新興国での需要も加わり大きく増加すると予測され、それに伴って抵抗スポット溶接ロボットも増加する。また、引張強さが1.0GPaを超える超高張力鋼板の自動車ボディへの適用量が増加しており、将来的なFSJの適用数の増加が見込まれる。

2.7.6.2 研究開発成果

(1) 中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.6-4 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
(1-1) ツール素材の開発	耐熱衝撃性などを考慮したツール素材の最適化を図る。	炭窒化物添加量の最適化により、耐摩耗性と耐欠損性を両立。	◎	
(1-2) コーティングの開発	耐酸化性や摩擦係数、膜厚の最適化を図る。	窒化物膜の組成改良により、耐摩耗性、耐酸化性、耐凝着性を改善。酸化物膜の面粗さ、酸化バリア性、高温硬度を改善。	◎	
(1-3) ツール形状の開発	1.2GPa 級鋼板 (1.4mm) の接合継手の引張せん断試験で JIS-A 級強度 (13.02kN) の 100%以上。	ツール形状の改良により、1.2GPa 級鋼板、1.5GPa 級鋼板において JIS-A 級強度の 100%の継手強度を達成。	◎	
(2-1) ツール性能の評価	—	(試作ツールについて評価実施中)	○	
(2-2) 接合装置開発	1.2GPa 級鋼板用に最適化された接合プロセスに適するようガンを改良する。	1.2GPa 級鋼板を接合可能な小型軽量ガンを試作・改良した。	○	
(2-3) 接合プロセス開発	1.2GPa 級鋼板に最適な接合プロセスおよび制御プログラムを開発し、継手の特性を向上させる。	1.2GPa 級鋼板の継手強度を向上させるため接合温度制御プログラムを開発し、剥離強度を大幅に改善できることを確認した。	◎	
(3-1) 接合部の評価	共通鋼材の継手基礎データの蓄積。実部材特性を模擬した部材の試作評価、特性把握。	1.2GPa 級 0.45C 鋼の FSJ 継手において TSS が開発目標を超える事を確認。部材の衝撃曲げ試験において競合接合法である従	○	

		来抵抗スポット溶接に対する優位性を確認。		
(3-2) 材料特性の影響解明	中高炭鋼の継手強度発現メカニズム解明の推進。特性改善指針の明確化。	継手の破断経路と接合部マイクロ組織から、強度向上のための継手内硬さ分布・組織制御指針を導出。	○	
(4-1) 組織観察	1.2GPa 級鋼板の接合部の金属組織の詳細観察。	接合継手の金属組織解析、結晶粒解析、熱履歴推定を行い、接合プロセス中の変態挙動を解明。	○	
(4-2) 接合メカニズムの解明	接合界面トレース法による 1.2GPa 級鋼板の接合挙動の把握。	1.2GPa 級鋼板について金属箔トレーサにより接合中の界面の挙動を把握。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.6-5 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
(1-1) ツール素材の開発	炭窒化物添加量の最適化により、耐摩耗性と耐欠損性を両立。 1.5GPa 鋼板用にツール素材を改良中。	1.5GPa 級鋼板に適したツール素材の改良を実施する。	平成 29 年度末には達成見込み。
(1-2) コーティングの開発	窒化物膜の組成改良により、耐摩耗性、耐酸化性、耐凝着性を改善。酸化物膜の面粗さ、酸化バリア性、高温硬度を改善。改良したコーティングについて 1.5 GPa 鋼板接合における工具損傷を評価すべくツールを作製中。	1.5GPa 級鋼板に適したコーティングの改良を実施する。	平成 29 年度末には達成見込み。
(1-3) ツール形状の開発	ツール形状の改良により、1.5GPa 級鋼板において JIS-A 級強度の 100%の継手強度を達成。	1.5GPa 級鋼板 (1.4mmt) の接合継手の JIS-A 級強度 (13.02kN) の 100%以上。	達成済。
(2-1) ツール性能の評価	(試作ツールについて評価実施)		

	中)		
(2-2) 接合装置開発	1.5GPa 級鋼板を接合可能な小型軽量ガンを試作し、現在、評価・改良中。また、接合温度管理によるプロセスモニタリング機能は完成。	1.5GPa 級鋼板用に最適化された接合プロセスに適した小型軽量ガンの試作および設計方針を決定する。また、プロセスモニタリング機能を開発する。	H29 年度末には達成の見込み。
(2-3) 接合プロセス開発	接合温度を制御するプログラムを開発。	1.5GPa 級鋼板の接合プロセスの最適化を図り、目標強度を達成する。	達成済。
(3-1) 接合部の評価	各種共通鋼継手の静的引張特性について把握。競合接合法による継手とも比較し、優位性や課題の明確化、特性向上に取り組む中。部材評価、継手の動的強度特性の調査にも取り組む中。	1.5GPa 級のテーマ共通鋼板継手の試作と特性評価。	H29 年度末に達成見込み。
(3-2) 材料特性の影響解明	強度向上のための継手内硬さ分布・組織制御指針を導出。接合部組織形成機構の解明を進め、素材ごとの接合設計指針導出に取り組む中。	中高炭素鋼における継手特性改善指針の導出。	H29 年度末に達成見込み。
(4-1) 組織観察	1.5GPa 級共通鋼板の接合継手の組織解析の一部を完了。	1.5GPa 級鋼板の接合部の金属組織の詳細観察。	引続き 1.5 GPa 級鋼および温度制御接合された継手の組織解析を進める。
(4-2) 接合メカニズムの解明	1.2GPa で手法確立済み。1.5GPa 級鋼板の接合継手観察を完了しており、1.2GPa と同様の挙動が予測されるため。	接合界面トレース法による 1.5GPa 級鋼板の接合挙動の把握。	1.2GPa 級鋼板と同様の挙動が予測されるため実施を省略。

(3)研究開発の成果と意義

(3)-1 接合ツールの開発 (担当 伊丹分室 (住友電気工業 (株)))

引張強度が 1.2GPa 級の鋼板 (TRIP 鋼、炭素量 0.40wt.%、板厚 1.4mm) をフリクションスポット接合の被接合材として使用し、ツール形状の開発を実施した。

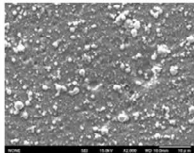
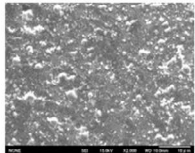
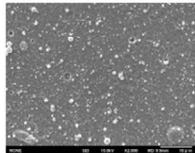
(3)-1.1 ツール素材の開発

高温での耐塑性変形性に優れる合金を開発すべく、超硬合金の金属バインダーに改良を加えた。改良バインダー合金は、同バインダー量の超硬合金に比べて高硬度となり、高温においても超硬合金より高硬度となった。また、1000°C で 15kN の荷重を 5 時間保持させたときの圧縮歪量は、同バインダー量の超硬合金に比べ、約 4 分の 1 倍歪みにくい結果となった。しかし、靱性と抗折力は同バインダー量の超硬合金に比べ低い結果であった。今後は、圧縮歪量が同等になるようにバインダー量を調整した合金同士で硬度、靱性、抗折力の比較を行う。

(3)-1.2 酸化物被膜の開発

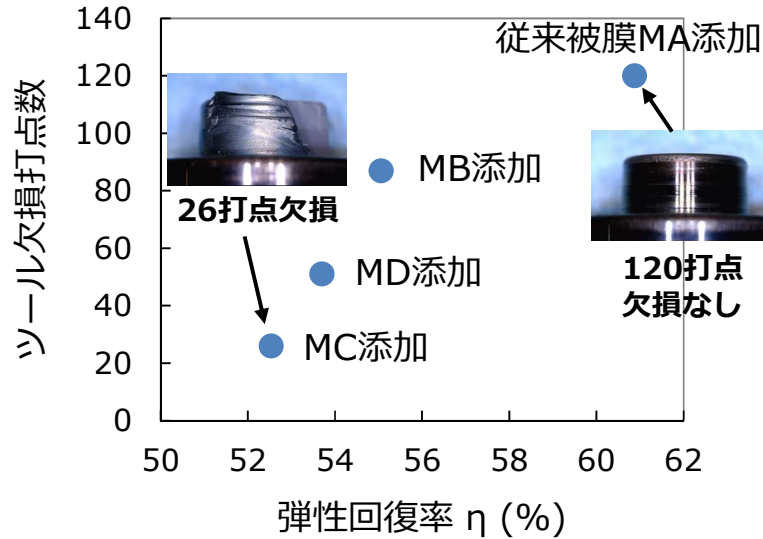
昨年度作製した酸化物被膜は、窒化物被膜と比較して酸化バリア性は高いが、異常成長粒が多く面粗度が大きいことが課題であった。そこで面粗度の改善に取り組んだ結果、表Ⅲ-2.7.6-6 に示すとおり異常成長粒を低減し、面粗度を大幅に改善することができた。また被膜の緻密度も合わせて改善できたため、昨年度作製した酸化物被膜に対して酸化バリア性をより向上することができた。

表Ⅲ-2.7.6-6 酸化物被膜の特性

	昨年度酸化物膜	今年度酸化物膜	
		改良1	改良2
表面形態			
面粗度	大	大	小
緻密度	低	高	高
酸化バリア性	中	高	高

(3)-1.3 窒化物被膜の開発

昨年度に選定した新組成の窒化物膜を被覆したツールを用いて摩擦攪拌ツールの接合試験を行った。980MPa ハイテン鋼 (板厚 1.2mm) におけるツールの耐久性を評価した結果を図Ⅲ-2.7.6-1 に示す。従来被膜 (MA 添加) は 120 打点の接合を行ってもピンが欠損しなかったが、新組成被膜 (MB 添加、MC 添加、MD 添加) は 26~85 打点でピン欠損した。欠損の原因を調査した結果、被膜の弾性回復率 η と欠損までの接合打点には相関があることが判明した。



図Ⅲ-2.7.6-1 ツール耐久性評価結果

そこで弾性回復率の高い従来被膜との複合化による欠損抑制を図った。2層積層構造、および積層周期約 20nm の超多層構造の被膜を施したツールの耐久性評価結果を表Ⅲ-2.7.6-7に示す。2層積層構造、超多層構造ともに 120 打点接合後も欠損が生じず、複合化により欠損が抑制されることを確認できた。

表Ⅲ-2.7.6-7 複合膜のツール耐久性評価結果

	MA添加/MC添加複合化	
	2層積層	超多層積層周期20nm
60打点		
120打点		

(3)-1.4 ツール形状の開発

寸法の異なる 3 種類ツールを試作し、本プロジェクトの共通鋼板（1.2 GPa 級高伸び：TRIP 鋼、1.5GPa 級：0.45C、いずれも板厚 1.4mm）を用いて継手強度を評価した。その結果を表Ⅲ-2.7.6-8に示す。平成 34 年度末目標であった抵抗スポット溶接の JIS 要求強度の 100%値を上回る強度を達成した。

表Ⅲ-2.7.6-8 接合継手の最大強度

鋼種	引張せん断強度	備考
1.2TRIP 鋼	18.7 kN	JIS 要求値*13.0 kN
1.5QT 鋼	14.2 kN	JIS 要求値*13.0 kN

* 抵抗スポット溶接における JIS (Z3140) A 級要求強度 (平均値)

(3)-2.1 施工技術の開発 (担当 明石分室 (川崎重工業 (株)))

平成 28 年度は、主に中高炭素鋼板に適した接合プロセスの開発および接合部の金属組織の解明について実施した。

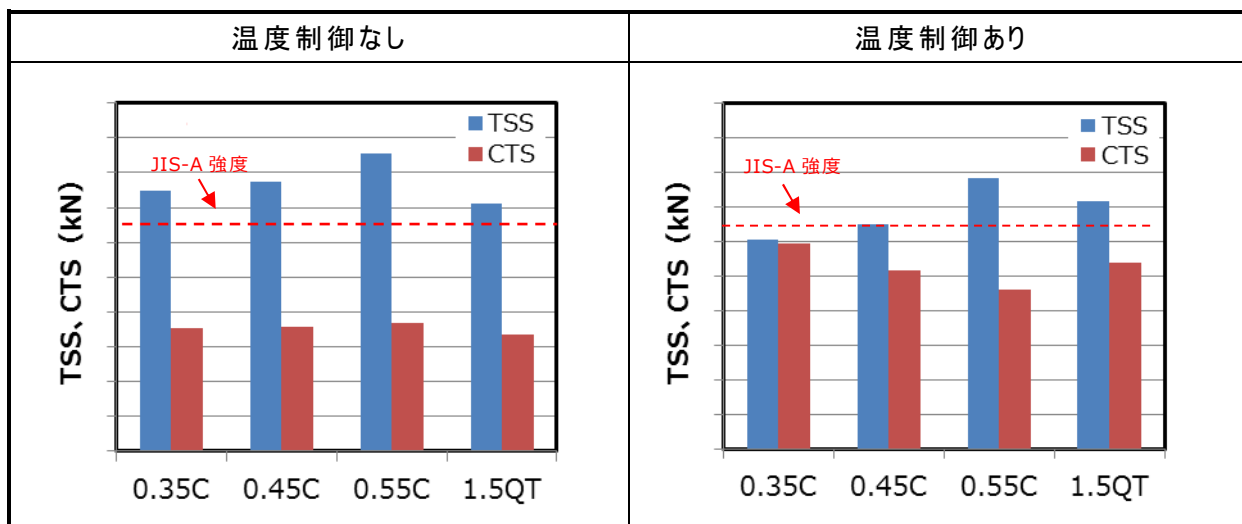
本研究開発では、各テーマ共通の試験鋼板として ISMA 共通鋼板を用いた。表Ⅲ-2.7.6-9 に ISMA 共通鋼板の仕様を示す。試験片の板厚は 1.4mm とし、評価試験片の寸法は抵抗スポット溶接の JIS 規格 Z3140 に準じて、せん断試験片は幅 40mm×長さ 125mm、十字引張試験片は幅 50mm×長さ 150mm とした。

表Ⅲ-2.7.6-9 ISMA 共通鋼板の化学成分

鋼種	炭素量	強度	伸び
0.35C	0.35wt.%	1.2~1.3GPa	—
0.45C	0.45wt.%	1.2~1.3GPa	—
0.55C	0.55wt.%	1.2~1.3GPa	—
1.5QT	0.45wt.%	1.5GPa 以上	5%以上
1.2TRIP	0.40wt.%	1.2GPa 以上	20%以上

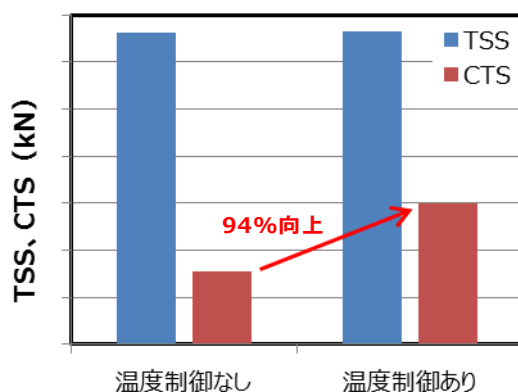
(3)-2.2 接合プロセスの開発

中高炭素鋼のフリクションスポット接合継手における剥離強度を改善するため、接合温度を制御することで接合部の硬化を防止する温度制御接合プロセスを開発し、ISMA 共通鋼板を用いたフリクションスポット継手の強度評価を実施した。まず、炭素量 0.35C、0.45C、0.55C の 1.2GPa 級鋼板を用いて温度制御なしの場合 (接合温度約 1000°C) と温度制御ありの場合 (接合温度約 780°C) で FSJ を行った。図Ⅲ-2.7.6-2 に得られた継手の引張せん断破断強度 (TSS) および十字引張破断強度 (CTS) を示す。温度制御ありの場合、温度制御なしの場合に比べて TSS は減少したが、CTS は最大で 69%改善された。また、1.5GPa 級鋼板では、温度制御ありの場合でも抵抗スポット溶接の JIS (Z3140) における A 級平均強度の 100%以上が得られており、本テーマの最終目標を達成できた。



図Ⅲ-2.7.6-2 各炭素鋼の引張せん断破断強度（TSS）と十字引張破断強度（CTS）

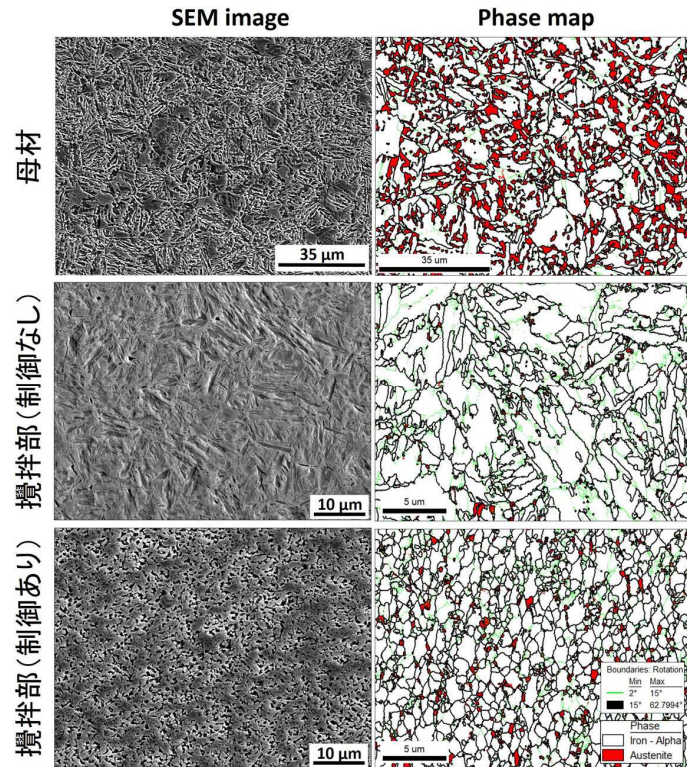
次に、強度と伸びを両立した 1.2GPa 級 TRIP 鋼を用いて温度制御あり、なしで接合試験を行った。図Ⅲ-2.7.6-3 に試作した継手の引張試験結果を示す。温度制御により低い温度で接合した結果、十字引張強度を 94%向上させることができた。



図Ⅲ-2.7.6-3 1.2TRIP 鋼継手の引張試験の結果（温度制御なし、あり）

(3)-2.3 1.2 TRIP 鋼（ISMA 共通鋼板）接合部の組織分析（担当 東北大学（再委託））

母材と攪拌部（温度制御なし、あり）について SEM 観察および EBSD 分析を実施した。図Ⅲ-2.7.6-4 に SEM 写真ならびに EBSD 相マップを示す。母材ではフェライト、マルテンサイト、残留オーステナイトの 3 相が共存し、それぞれの相分率はフェライト：マルテンサイト：残留オーステナイト=62：14：24 と見積もられた。一方、攪拌部においては、残留オーステナイトが著しく減少しており、温度制御なしでは粗大なマルテンサイト組織が観察されたが、温度制御ありでは微細かつ等軸的なフェライト＋マルテンサイト組織が観察された。攪拌部における硬さの違いはマルテンサイト量によって説明できることが示唆された。



図Ⅲ-2.7.6-4 TRIP 鋼母材と FSJ 攪拌部の SEM 写真と EBSD 相マップ

(3)-3 鋼板・継手性能の評価 (担当 富津・尼崎分室 (新日鐵住金 (株)))

摩擦攪拌点接合部のマイクロ組織形成機構を調査するため、熱サイクル試験および加工熱サイクル試験を実施し、本接合法の特徴である接合中の加工歪み導入が冷却後のマイクロ組織に及ぼす影響について調査した。

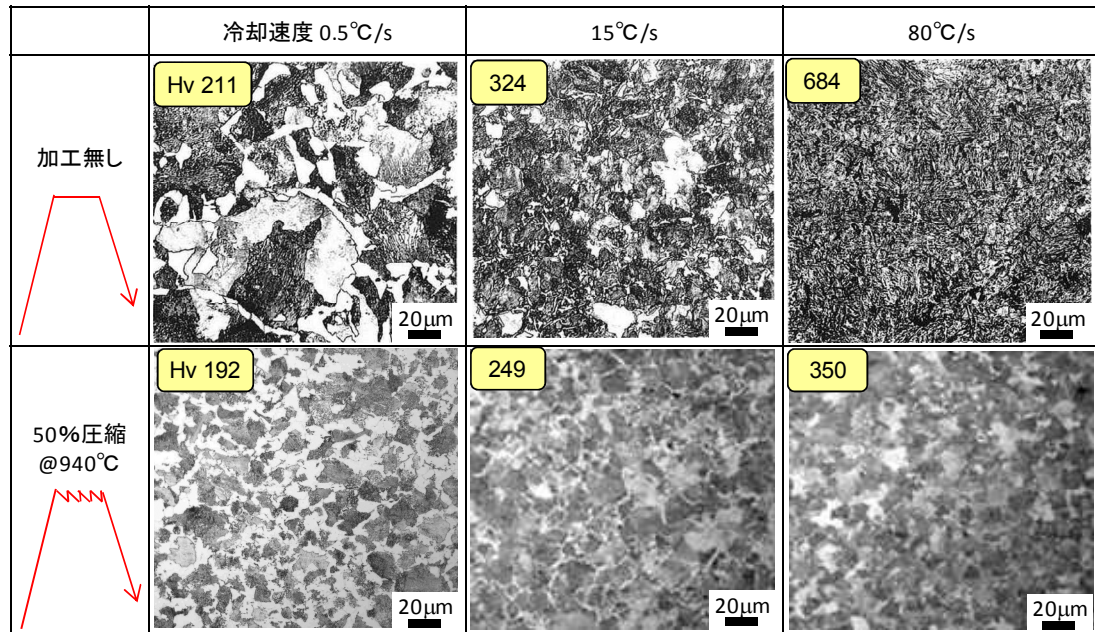
(3)-3.1 供試鋼の無加工 / 加工熱サイクル試験

供試材には、焼入焼戻しによりビッカース硬さを約 400 に調整した S45C 鋼 (0.43%C) を用いた。50°C/s で 940°C まで加熱後、940°C での保持中に 50% の圧縮加工を行い、種々の冷却速度で室温に冷却した。また、同一熱サイクルで加工を行わないサンプルも作製し、加工有り/加工無しそれぞれのサンプルの冷却後のマイクロ組織と硬さを比較調査した。

無加工熱サイクル試験および加工熱サイクル試験後のマイクロ組織とビッカース硬さ測定結果の一例を図Ⅲ-2.7.6-5 に示す。冷却速度 0.5°C/s においては、いずれも冷却後にフェライト-パーライト組織が得られ、ビッカース硬さは共に 200 程度となった。但し、50% の圧縮加工を加えたサンプルに置いて、より微細な組織が観察された。冷却速度 15°C/s では、いずれもフェライト、パーライト、ベイナイトの混合組織が観察されたが、加工材の方がベイナイトの分率が低く、軟質であった。80°C/s 冷却材では、無加工材ではほぼ全面にマルテンサイトまたはベイナイトと考えられる低温変態組織が観察されたのに対し、50%加工材ではフェライトとパーライト、ベイナイトまたはマルテンサイトの混合組織が観察された。

以上のように、本検討の加工条件・冷却条件の範囲においては、到達温度で加工歪

みを導入した場合の方が、冷却後組織におけるフェライト、パーライトの分率が高く、冷却後の平均硬さがやや低くなる傾向が認められた。摩擦攪拌点接合部のマイクロ組織・硬さを制御するに当たっては、材料の組成、熱サイクルの他に加工歪みの導入状況も考慮して接合設計を行う必要があることが示唆された。

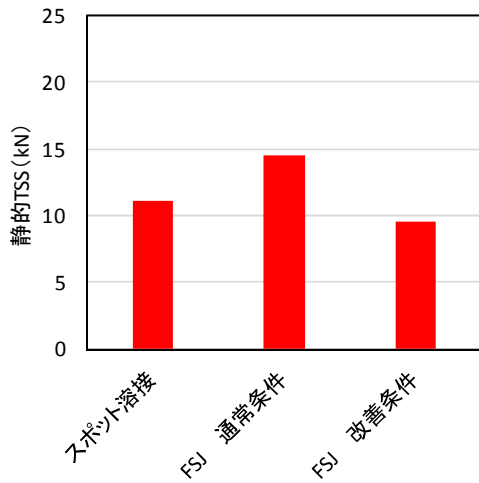


図Ⅲ-2.7.6-5 無加工（上段）/加工（下段）熱サイクル試験後のマイクロ組織硬さ

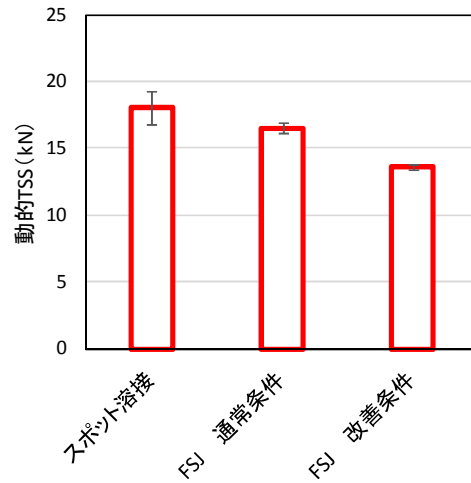
(3)-3.2 FSJ 継手の高速引張試験

供試材料には、市販の S45C 鋼板 板厚 1.6mm の表裏面を研削し板厚 1.4mm にした後、焼入れ・焼き戻しにより母材強度 1.2 GPa 相当に調整した。熱処理時に付着した酸化スケールは酸洗処理により除去した。スポット溶接電極には DR 型 Φ6R40 を使用した。加圧力 350kgf、通電時間 20cyc@60Hz（以降、すべて 60Hz での記載とする）、溶接電流 7.0kA でナゲット径 $5\sqrt{t}$ となることを確認した条件で継手を作製した。フリクションスポット接合（FSJ）では温度制御なし（通常条件と表記）と温度制御あり（改善条件と表記）で継手を作製した。引張試験は TSS 継手、および CTS 継手で実施した。引張速度は、静的で 0.166mm/s、動的で 2000mm/s とした。

図Ⅲ-2.7.6-6 に TSS の静的・高速引張試験を、図Ⅲ-2.7.6-7 に CTS の静的・高速引張試験結果を示す。静的な TSS を比較すると、スポット溶接に比べて FSJ 改善条件は僅かに低位であった。高速の TSS でもその傾向に変化は無かったが、静的よりも TSS が向上していることを確認した。静的の CTS を比較すると、FSJ 改善条件はスポット溶接や FSJ 通常条件に比べて向上した。また高速においても FSJ 改善条件の CTS は最も高い結果となった。図Ⅲ-2.7.6-8 に高速での CTS におけるスポット溶接および FSJ 改善条件の破面観察結果を示す。スポット溶接では粒界破面が主体となっているが、FSJ 改善条件ではディンプル破面が主体であり、接合部の靱性が改善されたことで CTS が向上したと考えられた。

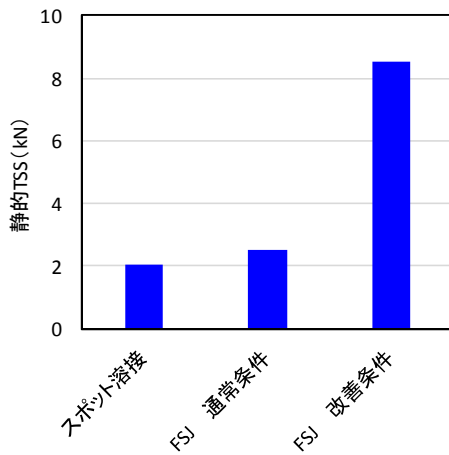


(a) 静的引張せん断試験

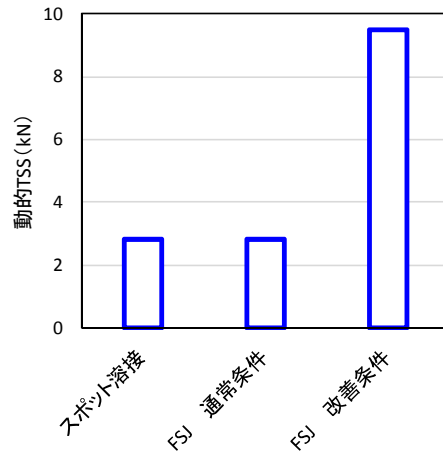


(b) 高速引張せん断試験

図Ⅲ-2.7.6-6 静的および高速引張試験における TSS

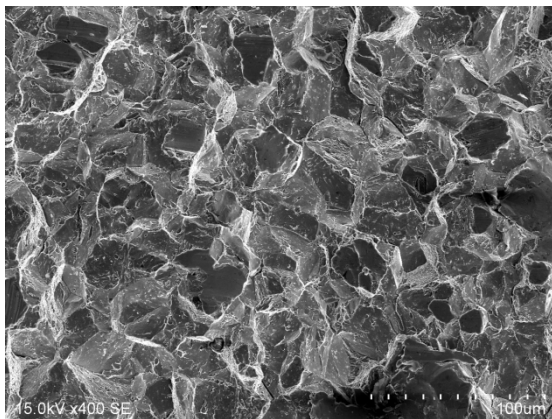


(a) 静的十字引張試験

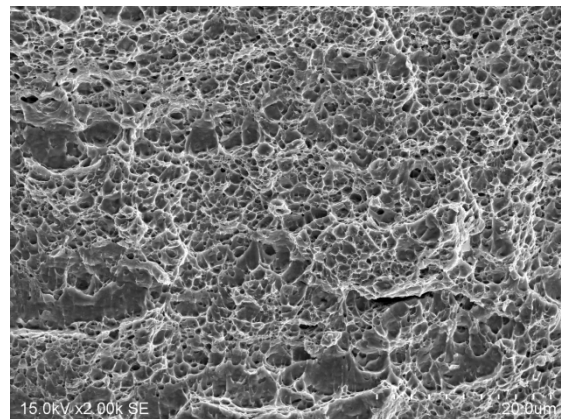


(b) 高速十字引張試験

図Ⅲ-2.7.6-7 静的および高速引張試験における CTS



(a) スポット溶接



(b) FSJ 改善条件

図Ⅲ-2.7.6-8 高速 CTS の破面観察結果

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.6-10 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H27FY	0	0	1	0	0	0	0	0	1
H28FY	0	0	4	1	0	0	1	0	1
合計	0	0	5	1	0	0	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）

(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）

表Ⅲ-2.7.6-11 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	2	0	0
H28FY	5	0	2
合計	7	0	2

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.7[テーマ番号 07] 鋼材／CFRP 等樹脂材料の接合技術開発

2.7.7.1 テーマの概要

(1)背景と目的

商船上部構造の構成材料として、炭素繊維強化樹脂材料（CFRP）に代表される繊維強化樹脂材料をマルチマテリアル化して利用することで構造体が軽量化でき、燃費向上、環境負荷低減が実現できる。そのために必要な CFRP 等樹脂材料と各種鋼材との異種材料接合技術、およびこれらを用いるための構造設計技術、継手健全性評価技術等を開発する。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.7.7-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
鋼材／CFRP 等樹脂材料の接合技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 設計に必要な材料データベースの構築 重ね継手せん断引張：母材破断 	<ul style="list-style-type: none"> 継手要素の接合において、界面剥離強度\geq母材層間剥離強度 電食による接合部腐食の評価手法の確立 構造要素の接合において、所要性能を発現し得る最適部材配置設計手法の確立 	大型模擬構造体を試作し製造プロセスの成立性を検証すると共に、以下の目標値を達成する。 <ul style="list-style-type: none"> 部材の終局限界耐力$>$応力換算500MPa強度相当 設計強度\geq現行の鋼構造パネル強度 疲労強度：200万回疲労強度20%向上 部材重量20%低減（従来の鋼構造標準設計に対して） 	実構造物に本接合技術を適用するに当たり、構造要素（重ね継手）から構造部材、大型構造部材へと段階的に解析、設計、性能評価技術を確立して行く必要があるため。

(3)全体計画

異種材料継手の接合技術と特性評価技術の開発として、所要性能発現のための材料検討、接合手法および施工技術の開発、接合部の強度・加工特性・耐久性・耐候性把握、接合部検査手法の開発を実施する。また、異種材料継手における耐食性把握と最適配置を検討した上で、複合構造部材の設計と評価技術の確立を目指す。

(4)実施体制

テーマ番号07	【委託先】
	新構造材料技術研究組合
	【分担研】
	株式会社IHI (横浜磯子分室)

(5) 運営管理

横浜磯子分室としては研究の初期段階においては研究開発項目 07 に関わる分室および再委託先との間で定期的に会合を開き、進捗管理を行った。基本的には再委託先との個別打ち合わせが中心である。研究の進捗に伴いメールベースによる進捗管理を行うとともに再委託先毎に研究進捗会議を開催した。

(6) 実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

コンテナ船の上部構造重量は現状、約 1000t。複合構造化により、20%程度の重量低減を見込むと、低重心化や振動の低減が可能となり、走行性能が向上する。合わせて燃費も 10%程度の低減が見込まれる。

例えば、8000TEU コンテナ船の場合、25 ノット走行で燃料消費量が 57,000t/年、10%の低減により、CO₂ 排出量の削減は
 $5,700t \times 41.9GJ/kL \times 0.0195tC/GJ \times 44/12 = 17,076t$ の削減

燃料費は 500 ドル/t として

$500 \text{ ドル/t} \times 5,700\text{ton} = 3.53 \text{ 億円/年の節約}$

となる。20 年使用すれば、約 70 億円の節約となり、CFRP 利用による製造コストアップはある程度回収可能と考えられる。

2.7.7.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

構造体を構築する最も基本的な要素技術である重ね継手接合技術、電食による接合部腐食の評価技術の開発、構造要素の接合において、所要性能を発現し得る最適部材配置設計技術の開発を実施し表Ⅲ-2.7.7-2 に示す成果を得た。

表Ⅲ-2.7.7-2 第一中間目標と達成度

研究開発項目	第一中間目標 (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
鋼材／CFRP 等樹脂材料の接合技術開発	・ 継手要素の接合において、界面剥離強度 \geq 母材層間剥離強度	・ 継手要素試験、桁構造体、それぞれにおいて終局時の破壊形態は補材層間剥離であり、界面剥離強度の方が優れる事を示した	○	
	・ 電食による接合部腐食の評価手法の確立	・ 電解質を介し単極自然電位測定して腐食の可能性を評価する手法を確立した	○	
	・ 構造要素の接合において、所要性能を発現し得る最適部材配置設計手法の確立	・ 鋼と CFRP を最適に部材配置した複合 I 桁構造と複合柱構造を開発した。複合柱構造の中間部の単位長重量は同じ耐荷力の鋼柱構造の 3/4 であった	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.7-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
鋼材／CFRP 等樹脂材料の接合技術開発	継手接合技術の基盤研究として摩擦重ね圧接法 (FLJ)、レーザ溶着、接着を継続して実施している。施工条件が継手性能に及ぼす影響、接合に関する工学的知見などを蓄積している。継手技術と同時に構造化技術開発として複合桁構造や複合柱構造の設計施工技術化技術も開発している。複合桁構造は課題を残しているが改良の用途はたっている。複合柱構造はほぼ同じ耐荷力の鋼構造より軽量の構造部材を実現した。	大型模擬構造体を試作し製造プロセスの成り立ちを検証すると共に、以下の目標値を達成する。 ・ 部材の終局限界耐力 $>$ 応力換算 500 MPa 強度相当 ・ 設計強度 \geq 現行の鋼構造パネル強度 ・ 疲労強度：200 万回疲労強度 20% 向上 ・ 部材重量 20% 低減 (従来の鋼構造標準設計に対して)	終局限界状態における応力度は 500MPa には至っていない。しかし、原因は解明済で構造改良は可能である。桁構造体の開発はほぼ完了しているため、これに皮板を組み合わせるパネル構造の設計製作は可能である。疲労強度は部材レベルの供試体により検証する。複合柱構造体の一般部の単位長さ重量は鋼柱構造より 25% 低減の低減を達成している

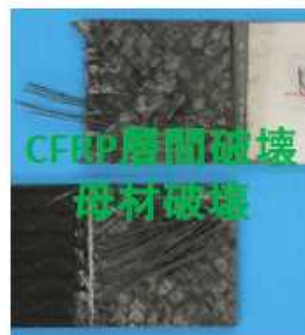
(3)研究開発の成果と意義

鋼材／CFRP 等樹脂材料の接合技術開発においては、構造体を構築する最も基本的な要素技術である重ね継手接合技術、電食による接合部腐食の評価技術の開発、構造要素の接合において、所要性能を発現し得る最適部材配置設計技術の開発に特に注力した。

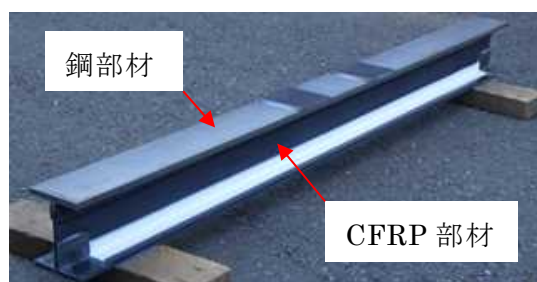
重ね継手接合技術開発では、接着、摩擦重ね接合法（FLJ）、レーザ溶着、などを検討し、それぞれにおいて施工条件の接合強度への影響などの知見を蓄積した。重ね継手の引張試験状況を図Ⅲ-2.7.7-1 に例示する。また試験結果の一例を図Ⅲ-2.7.7-2 に示す。これは熱硬化 CFRP（VE）と SUS304 の接着継手であり、接着面は予めアセトン洗浄とサンドブラスト処理を行い、かつ電食防止のためのガラスクロスを付与している。引張試験における破断形態は CFRP の層間破壊である。すなわち、界面剥離強度 \geq 母材層間剥離強度である事は明らかである。こうした知見をもとに鋼 FRP で構成する複合 I 桁構造体を試作した。外観を図Ⅲ-2.7.7-3 に示す。複合 I 桁構造体は圧縮応力が生じる部分を鋼材、引張応力が生じる部分を FRP で構成し、重ね継手によって接合している。曲げ荷重による載荷試験状況を図Ⅲ-2.7.7-4 に示す。この試験では構造体が破壊するまで荷重を増加している。破壊した構造体を図Ⅲ-2.7.7-5 に示す。重ね継手の添接板は脱落し、接合部の母材部分はプリプレグの層間剥離を確認した。さらに撮影した動画を踏まえると、添接板の脱落と同時にフリーエッジとなった FRP のウェブが座屈したことが推察できた。このように部材レベルにおいても終局時の継手特性は界面剥離強度 \geq 母材層間剥離強度である事が明らかとなった。



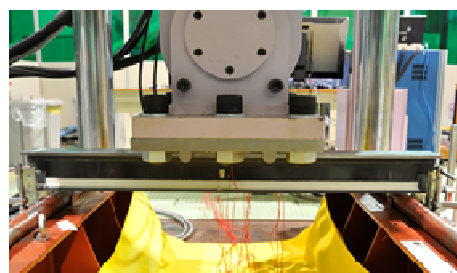
図Ⅲ-2.7.7-1 重ね継手引張試験状況



図Ⅲ-2.7.7-2 接着継手引張試験後外観



図Ⅲ-2.7.7-3 複合 I 桁構造



図Ⅲ-2.7.7-4 構造載荷試験状況



図Ⅲ-2.7.7-5 試験後の構造破壊状況

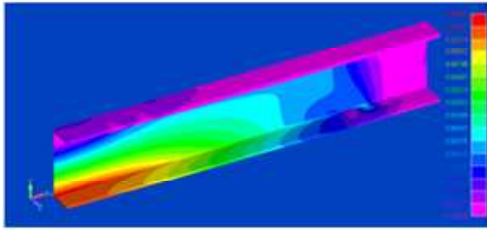
電食による接合部腐食の評価技術の開発では、金属と CFRP の重ね継手の耐食性の評価手法を検討した。電解質を介して接合もしくは接触した場合、金属側に異常腐食の可能性を単極自然電位を測定することで評価する。

各種単極自然電位に有意差が認められ、高電位側より CFRP > SUS304 > SS400 である事を確認した。従って SS400 または SUS304 と CFRP が接触した場合、両系ともガルバニック腐食（異種金属接触腐食）を起こすと判定した。このとき CFRP より低電位側になる SUS304 もしくは SS400 がアノード（陽極）になるため腐食される。特に CFRP との電位差が大きかった SS400 は、影響が大きい。そこで前述のように重ね継手にガラスクロスを付与して腐食を防止する。これによって強度低下が生じない事は引張試験によって確認している。

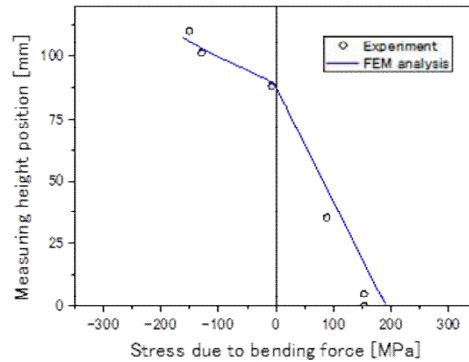
構造要素の接合において、所要性能を発現し得る最適部材配置設計技術の開発では前述した複合 I 桁構造の開発と複合柱構造の開発をおこなった。

桁構造とは曲げ荷重に対応するための構造である。荷重によって圧縮応力が生じる部分に縦弾性係数が高い鋼材を、引張応力が生じる部分に引張強度に優れる FRP を配置している。複合 I 桁構造の解析例を図Ⅲ-2.7.7-6 に、曲げ載荷試験より得た応力分布と解析値との比較を図Ⅲ-2.7.7-7 に示す。試験値と解析値は概ね一致し、解析手法や解析に用いた物性値が妥当である事が分かる。また、部材断面の上側に配置した鋼材では圧縮の応力 ($-\sigma$) が、下側に配置した FRP では引張の応力 ($+\sigma$) が分布している事も見て取れる。これは前述の設計思想が具現化されている事を示している。

CFRP の縦弾性係数は鋼材と比較すると低いため、外力によるひずみと同じであるときは発生する応力は小さくなる。本部材のように鋼材と CFRP をひずみ分布に対応して断面中立軸の両側に分けて配置する事は CFRP 強度の効率的な利用という点で有効である。



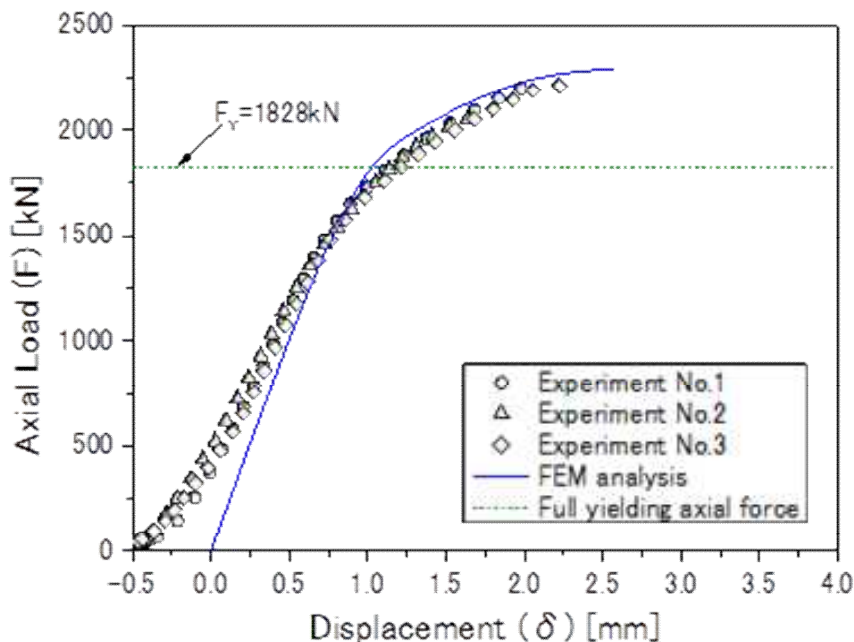
図III-2.7.7-6 複合 I 桁構造解析例



図III-2.7.7-7 複合 I 桁構造中央断面応力分布

柱構造とは圧縮荷重を受ける構造部材であり、その断面においては圧縮応力が卓越する。FRPは鋼材と比較すると軽量である反面、縦弾性係数が低いため局部座屈強度は低くなる。そこで、矩形断面の角部に鋼材を配置し、スキンプレートは鋼 CFRP 複層と CFRP 単層となる構造を検討した。

図III-2.7.7-8に試作した複合柱構造の圧縮載荷試験で得た荷重変位曲線と解析で得たそれとの比較を示す。両者はよく一致する。



図III-2.7.7-8 実験値解析値比較（荷重変位）

鋼板／CFRP等樹脂材料接合における接合プロセス、特性評価に関する基盤研究は、摩擦重ね圧接法（FLJ）、レーザ溶着、接着を継続して実施している。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.7-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	1	0	6	0	0	0	0	0	1
H27FY	0	0	6	2	0	0	0	0	1
H28FY	4	2	8	2	0	0	1	1	1
合計	5	2	20	4	0	0	1	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）

(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）

複合構造の設計・製作に関する特許を開発の進捗に合わせて出願している。具体的には平成 26 年度に継手レベルの重ね継手に関する特許を、平成 27 年度には桁構造部材を出願した。続く平成 28 年度では桁構造部材の改良技術と柱構造部材に関する技術を出願している。今後も構造要素的観点から系統的な特許出願を進めてく。

表Ⅲ-2.7.7-5 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	1	0	0
H27FY	1	0	0
H28FY	2	0	0
合計	4	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.8[テーマ番号 08] 難接合性材料の線接合技術の開発

2.7.8.1 テーマの概要

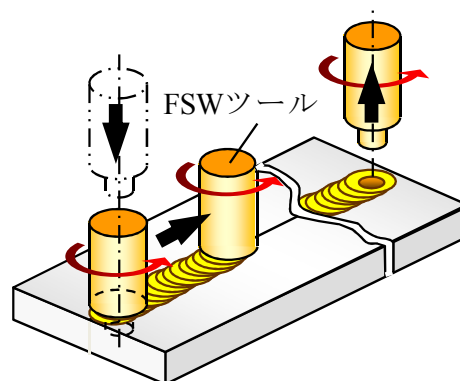
(1)背景と目的

自動車、鉄道車両、航空機などの輸送機器は CO₂ 削減、省エネルギーの観点から、軽量化への努力が継続的に行われている。軽量化の一手段として、比強度の高い材料の使用が挙げられる。比強度の高い材料として、高強度鋼（ハイテン鋼）、高強度チタン合金、高強度アルニウム合金などの金属材料に加え、近年、精力的に開発されている炭素繊維強化プラスチック（CFRP）などがある。これら、高機能性材料の共通点として、接合が難しい点が挙げられる。

接合技術の一種に摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding、以下、FSW）と呼ばれている技術がある（図Ⅲ-2.7.8-1）。FSW は材料を溶かさずに線接合できる特異な技術である。表Ⅲ-2.7.8-1 にチタン合金に対して試算した、FSW と TIG 溶接（アーク溶接法的一种）の比較を示す。TIG 溶接は 1 回に溶接できる深さが限られているため、板厚が大きくなると、複数回溶接する必要がある。これに対し、FSW は板厚に依らず 1 パス接合となるため、厚板接合で特に有効と考えられる。これ以外に、FSW は最高温度が低いため、酸化防止対策が容易になるという長所がある。

FSW は回転するツールと接合材料の摩擦熱で局所的に材料を軟化させ、軟化した材料がツールの回転で攪拌されることで接合されるが、材料が軟化する温度は概ね材料の融点に比例して高くなる。チタン合金や鉄鋼材料は融点が 1500℃ 以上であり、材料が軟化する温度は赤熱状態である。また、ツールを接合材料に押し付ける力も高融点の材料になる程、大きくなる。このため、FSW の技術的観点において、ツールの高温耐久性と FSW 装置（耐荷重、剛性）が課題となる。更に、自動車等への適用では形状多様性、生産性（大量生産）が要求されることになる。

このような背景の中、本研究開発ではハイテン鋼やチタン合金等の溶融溶接が難しい材料に対して、FSW 技術を実用化水準に引き上げることを目的とする。



図Ⅲ-2.7.8-1 FSW 概念図

表Ⅲ-2.7.8-1 FSW と TIG 溶接の比較

	FSW	TIG
接合部温度	約 900°C	融点 (1668°C) 以上
~5mm	1	1
接合パス数 5~10mm	1	2
10~13mm	1	3

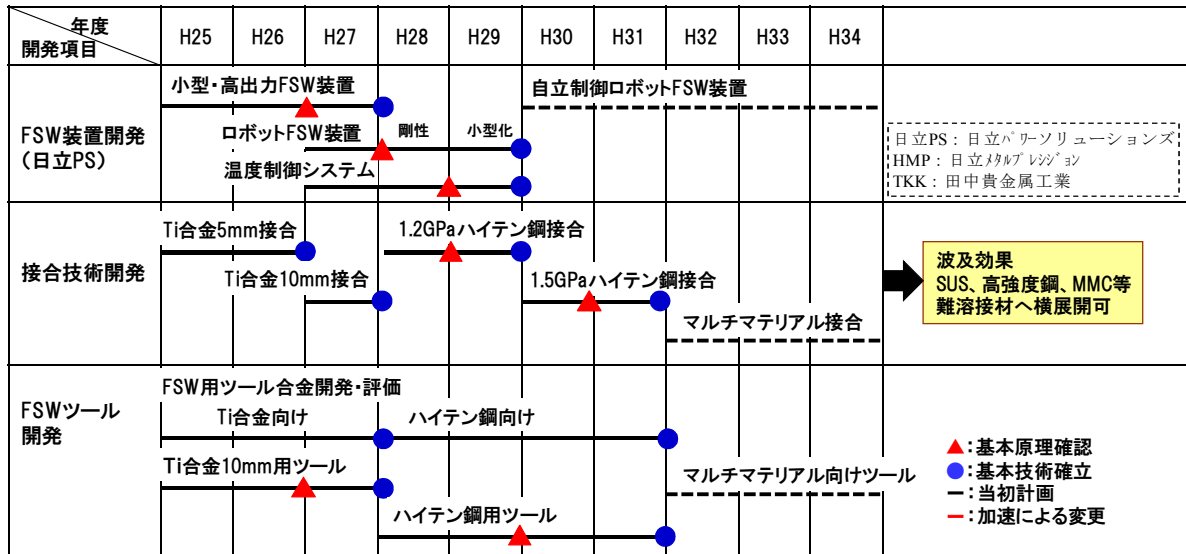
(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.7.8-2 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
FSW 装置開発	設計技術の確立	①Ti 材接合装置：接合深さ 10mm 以上可能な実証機製作 ②厚み 2mm、強度 1.2GPa 以上の炭素鋼を線接合可能なロボット FSW 装置の開発	ツール・接合材温度制御および複雑形状対応特殊機構開発	事業化に必要な機能
接合技術開発	接合強度：母材強度の 90%以上 (チタン合金接合深さ 5mm 以上)	①Ti 材接合強度：母材強度の 90%以上 ②厚み 2mm、強度 1.2GPa 以上の炭素鋼の線接合材の引張強度が母材強度の 70%以上	超ハイテン鋼等の高機能材料の接合強度：母材強度の 90%以上	熔融溶接同等以上の接合部強度。接合深さは接合で大半を占める厚さ
FSW ツール開発	チタン合金接合深さ：5mm 以上の実証	①Ti 材接合深さ：10mm 以上の実証	接合長 4m 以上の耐久性実証（接合深さ 5mm 以上）	大型構造部材での適用可否目安

(3)全体計画

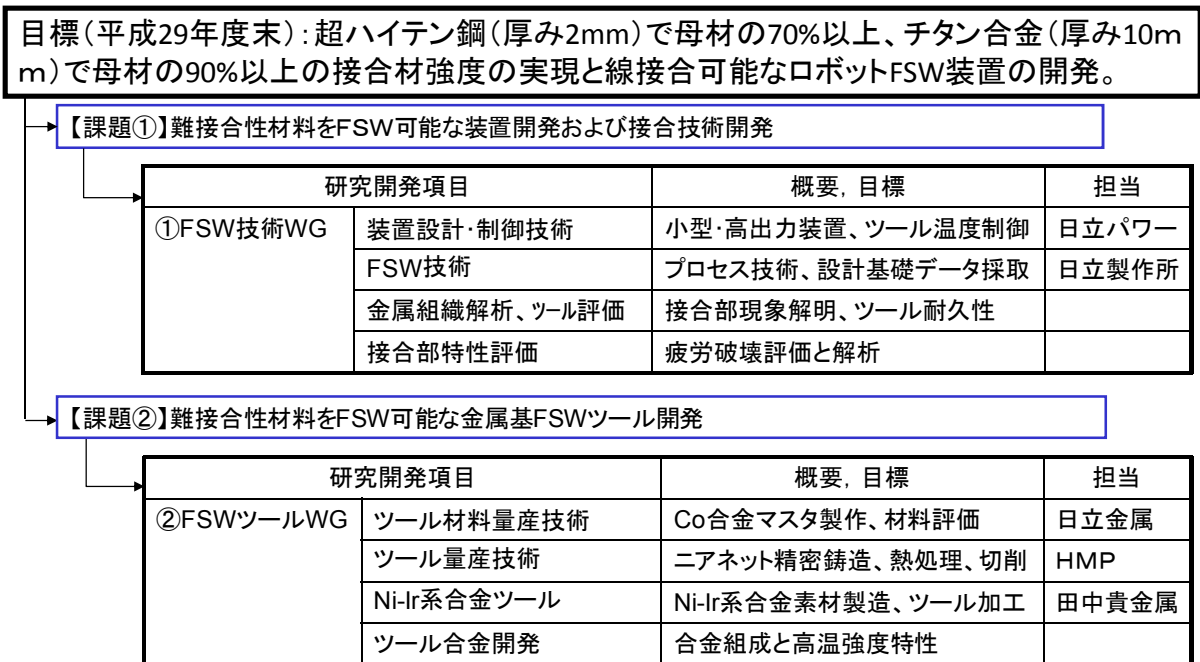
平成 25 年度から平成 27 年度にかけて、チタン合金の FSW 技術を主体に開発してきた。厚み 10mm（接合深さ 10mm）を超える接合技術を前倒し達成した。これより、平成 28 年度からは超ハイテン鋼の接合技術を主体に開発を進めている。平成 30 年度以降はマルチマテリアル化に備えて、接合技術開発を拡張する計画である。



図Ⅲ-2.7.8-2 全体計画

(4)実施体制

図Ⅲ-2.7.8-3に示す実施体制により、三つの研究開発項目を二つのワーキンググループ体制で開発推進している。



注) HMP: 日立メタルプレシジョン

図Ⅲ-2.7.8-3 実施体制

(5)運営管理

本研究開発テーマは5つの分担拠点と2つの再委託先、計7部署で推進している。開発項目は表Ⅲ-2.7.8-3に示したように、FSW装置開発、接合技術開発、FSWツール開発の三つに大別される。FSWツール開発で試作したツールを使用して接合技術開発

を進めると同時にツールの性能評価をして、FSW ツール開発にフィードバックする。同時に接合技術開発で得られた装置負荷データを FSW 装置開発の設計データに利用する。このように、それぞれの部署の成果を相互に享受することで、PDCA サイクルを形成している。着実な情報共有を図るため、おおよそ 3 ヶ月毎に全部署が集まる全体会議と称する会議を開催している。開催場所は各拠点持ち回り制とし、各拠点の研究設備や実験等を見学することで、他部署の開発内容の理解を深めている。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度）

厚み 6mm 程度の純チタンを接合する場合の消費電力の試算結果を表Ⅲ-2.7.8-3 に示す。現在の FSW の技術レベルでも従来の TIG アーク溶接法と比較して、22%の消費エネルギー効果がある。今後の開発で、FSW の接合速度を 2~4 倍に上げることで、61~80%の消費エネルギー効果となる。

表Ⅲ-2.7.8-3 FSW と TIG の消費電力試算結果

接合法	接合長 1m 当たりの消費電力 [kWh/m] () 内数値は対比	備 考
FSW	0.47 (0.78)	速度：30mm/min－1 パス
TIG	0.60 (1.00)	速度：200mm/min－2 パス, 12V-300A

2.7.8.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.8-4 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
FSW 装置開発	①Ti 材接合装置： 接合深さ 10mm 以上可能な実証機製作 ②厚み 2mm、強度 1.2GPa 以上の炭素鋼を線接合可能なロボット FSW 装置の開発	①実証機で Ti 材 (Ti-6Al-4V 合金) を接合深さ 10mm 以上接合可能なことを確認。 ②厚み 2mm の炭素鋼において、ロボット FSW 装置により線接合可能なことを確認。	○	
接合技術開発	①Ti 材接合強度： 母材強度の 90%以上 ②厚み 2mm、強度 1.2GPa 以上の炭素鋼の線接合材の引張強度が母材強度の 70%以上	①Ti 材 (Ti-6Al-4V 合金) において、母材強度の 97%の引張強度を有する接合材が得られることを確認。 ②母材強度 1.2GPa の TRIP 鋼において、母材強度と同じ (100%) の引張強度を有する接合材が得られることを確認。但し、素材厚みは ISMA 共通鋼で統一した 1.4mm。	◎	
FSW ツール開発	①Ti 材接合深さ： 10mm 以上の実証	Ti 材 (Ti-6Al-4V 合金) において、接合深さ 10mm を無欠陥接合可能なことを確認。	◎	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.8-5 最終目標の達成可能性

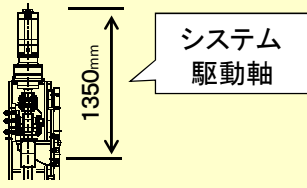
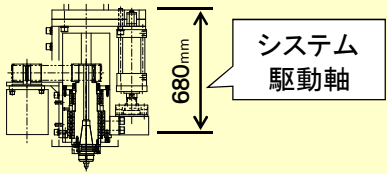
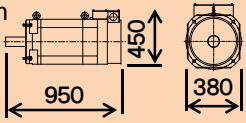
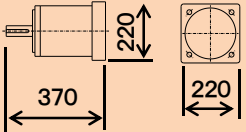
研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
FSW 装置開発	ツール温度、接合材温度をモニタリングし、接合条件にフィードバックする基礎を開発済み。	ツール・接合材温度制御および複雑形状対応特殊機構開発	接合技術開発により、達成できる見通し。
接合技術開発	母材強度 1.2GPa の TRIP 鋼において、母材強度と同じ (100%) の引張強度を有する接合材が得られることを確認し、最終目標を達成。	超ハイテン鋼等の高機能材料の接合強度：母材強度の 90%以上	達成済み
FSW ツール開発	ツールを内部水冷することで、	接合長 4m 以上の耐久性実証 (接合深さ 5mm 以上)	達成済み

(3)研究開発の成果と意義

①チタン合金の接合技術開発

FSW 装置開発に関しては、Co 合金及び Ni-Ir 合金製の FSW ツールを用いて実施したチタン合金 (Ti-6Al-4V) の FSW 接合で採取した接合中のモータ負荷、ツール軸方向荷重等 (接合荷重) のデータを基に FSW 装置を設計・製作した。小型、高出力、高剛性を実現するため、ツールの回転を油圧駆動方式とした。

FSW 装置の主仕様を図Ⅲ-2.7.8-4 に示す。従来のヘッドと比較して大きさ約 1/2、主軸駆動モータ重量約 1/10 と小型化した。

項目	現行装置	試作装置(ヘッド)
ヘッド部概略図		<p>長さ: 現行装置の約半分</p> 
主軸モータ	<p>ACサーボモータ(45kW) サイズ: 右図 重量 : 460kg トルク: 373.6N・m</p> 	<p>油圧サーボCYL サイズ: 右図(電動モータの約半分) 重量 : 42kg トルク: 910N・m</p> 
効果	—	小型化で寸法制約緩和、内面接合可

図Ⅲ-2.7.8-4 FSW ヘッドの主仕様比較

製作した FSW 装置の外観写真を図Ⅲ-2.7.8-5 に示す。この装置により、予備試験で実施した接合材と同等の接合材が得られることを確認した。



図Ⅲ-2.7.8-5 FSW 装置外観写真

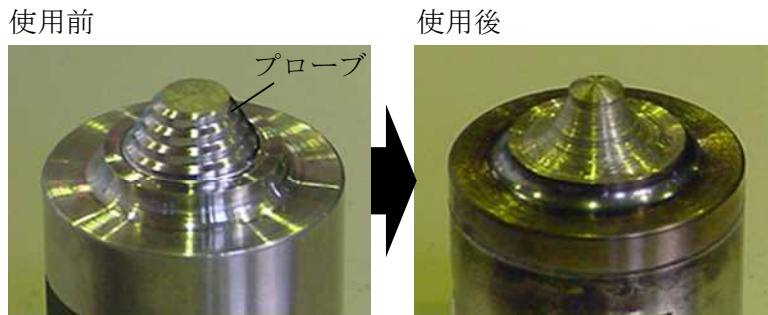
FSW ツール開発に関しては、ツール材料として Co 合金および Ni-Ir 合金の開発を進めた。室温における 0.2%耐力は Co 合金が約 800~1200MPa、Ni-Ir 合金が約 1000MPa であった。0.2%耐力の温度依存性を調査した結果、Co 合金、Ni-Ir 合金ともに 800~900°C まで、室温に近い耐力を維持していた。Co 合金は 800~900°C 以上で耐力の低下が顕著であるのに対し、Ni-Ir 合金は相対的に耐力の低下が緩やかであった。

開発した Co 合金に対して、マスターインゴットを製作し、このマスターインゴットを原料に精密鋳造でツールを試作した。試作した FSW ツールの外観写真を図Ⅲ-2.7.8-6 に示す。ツール先端形状は接合実験での耐久性（折損、摩耗）を評価した結果を反映し、その後、形状に改良を加えた。

図Ⅲ-2.7.8-7 に使用前後の FSW ツール外観を示す。開発した FSW ツールの耐久性を評価した結果、プローブと呼ばれる突起部が摩耗で小径化し、最終的に折損することが明らかになった。前述したように、開発合金は 800~900°C 以上の温度で耐力が低下することから、接合中のツールの温度上昇が摩耗を助長する要因として考えられる。そこで、ツール内部を冷却する構造のツールを開発し、冷却有無によるツール摩耗量を調査した。

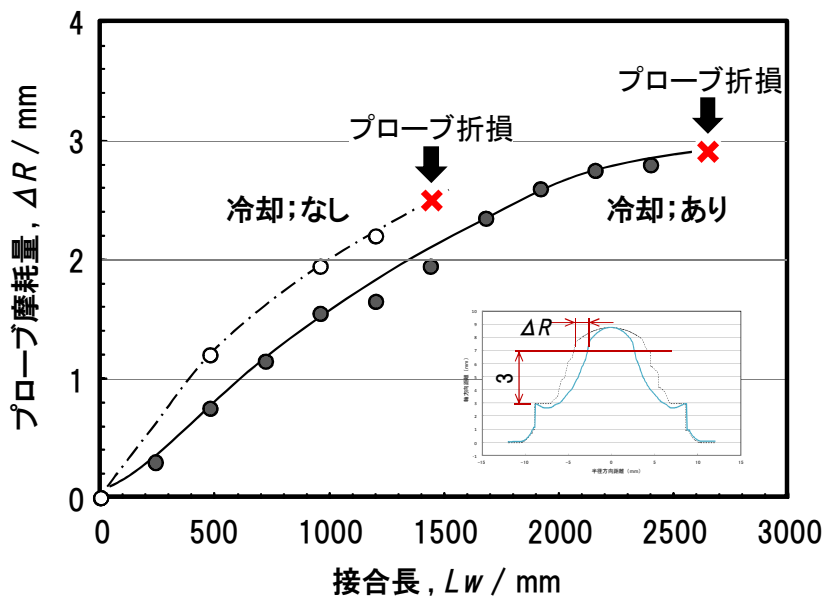


図Ⅲ-2.7.8-6 試作した FSW ツール外観写真



図Ⅲ-2.7.8-7 使用前後の FSW ツール外観写真

図Ⅲ-2.7.8-8 に Co 合金ツールにおける摩耗量と接合長の関係を示す。接合材料は Ti-6Al-4V 合金で、接合深さは約 6mm である。ツールを冷却した場合、プローブ折損までの接合長が冷却しない場合の約 1.8 倍になることを確認した。同様の試験を Ni-Ir 合金製ツールで実施した結果、水冷なしで 2.5m、水冷ありで 4.7m の耐久性を示した。尚、接合長 4.7m は接合時間約 5.3 時間であり、接合時間の観点では長時間に及ぶといえる。以上のように、チタン合金 (Ti-6Al-4V) に対して接合深さ 10mm 以上を安定して接合でき、第二中間目標を達成した。



図Ⅲ-2.7.8-8 ツール摩耗量と接合長の関係

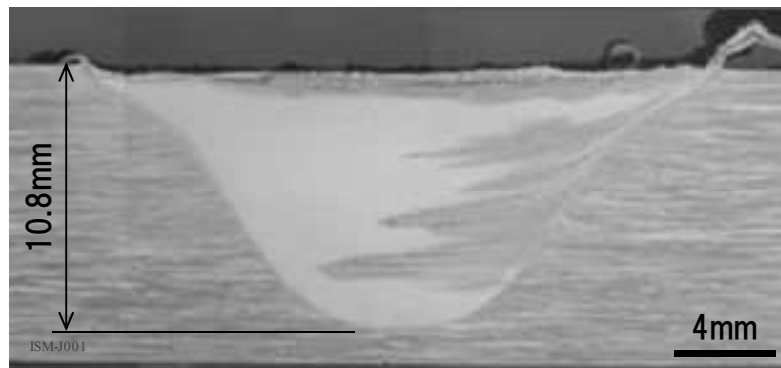
図Ⅲ-2.7.8-9 に接合材外観写真および接合部断面写真を示す。適正な接合条件で接合することで、接合深さ 10mm 超で内部欠陥のない接合が可能であることを確認した。接合材に対して接合材幅方向に引張試験した結果を表Ⅲ-2.7.8-6 に示す。数値は同一材料から 3 個の試験片を採取して試験した平均値である。FSW 材は母材比で、引張強さが約 100%であり、第二中間目標の 90%以上を達成した。



(a)接合材の外観写真（接合深さ 6mm 超）



(b) 接合部断面写真（接合深さ 6mm 超）



(c) 接合部断面写真（接合深さ 10mm 超）

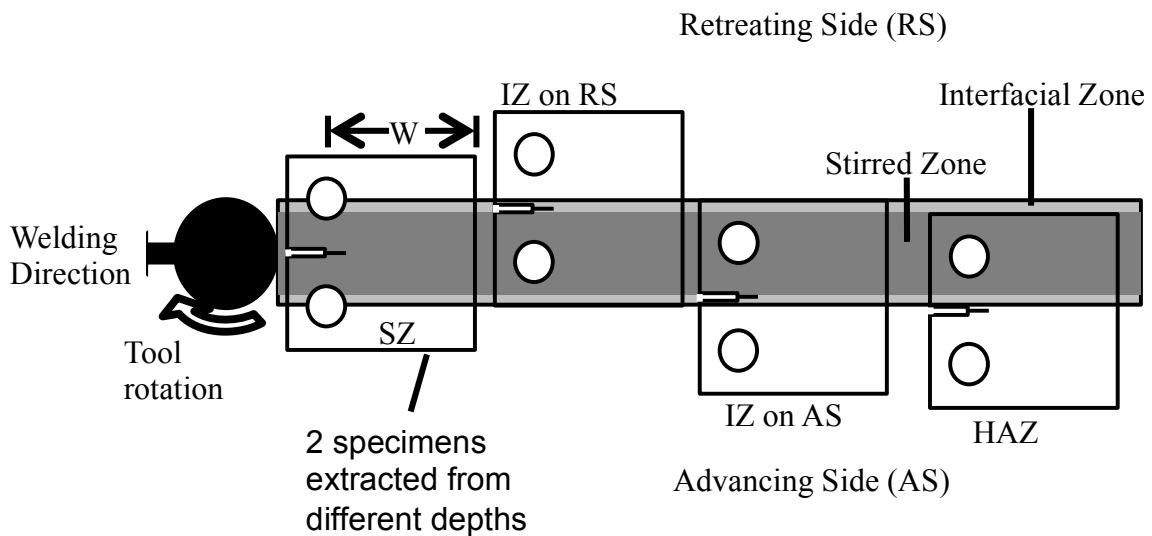
図Ⅲ-2.7.8-9 FSW したチタン合金 (Ti6Al-4V) の外観および断面写真

表Ⅲ-2.7.8-6 チタン合金接合材の引張特性

	0.2%耐力 [MPa]	引張強さ [MPa]	伸び [%]
FSW材	926	981	9.2
母材	951	982	14.9

チタン合金は低温用構造材料としても有望視されていることから、破壊じん性をシャルピー衝撃試験で評価した。FSW 材のシャルピー衝撃強さは室温で約 $40\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ で母材よりも約 $10\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 小さかった。また、破面遷移温度（ぜい性破面率が 50%となる温度）は母材が -200°C 程度、FSW 材が -50°C 程度であり、FSW 材は 150°C 高温側に遷移していた。

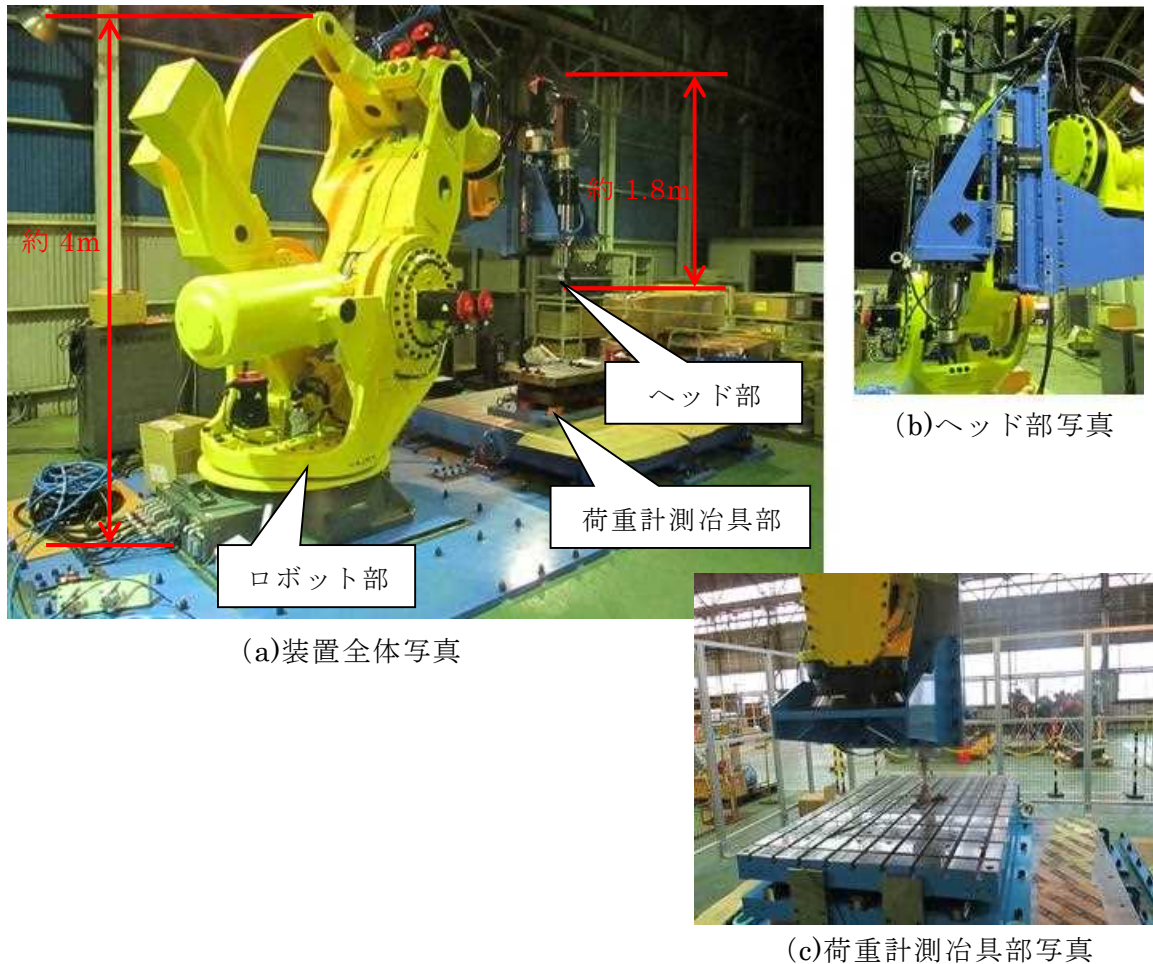
図Ⅲ-2.7.8-10 に示す位置から小型試験片を直接採取し、FSW 材の局所的な疲労強度特性を評価した。得られた結果を疲労き裂伝ば速度と応力拡大係数範囲の関係で整理した結果、FSW 材は母材と同等または母材以上の疲労き裂伝ば抵抗を有することを確認した。



図Ⅲ-2.7.8-10 局所破壊抵抗を評価するための小型試験片採取位置

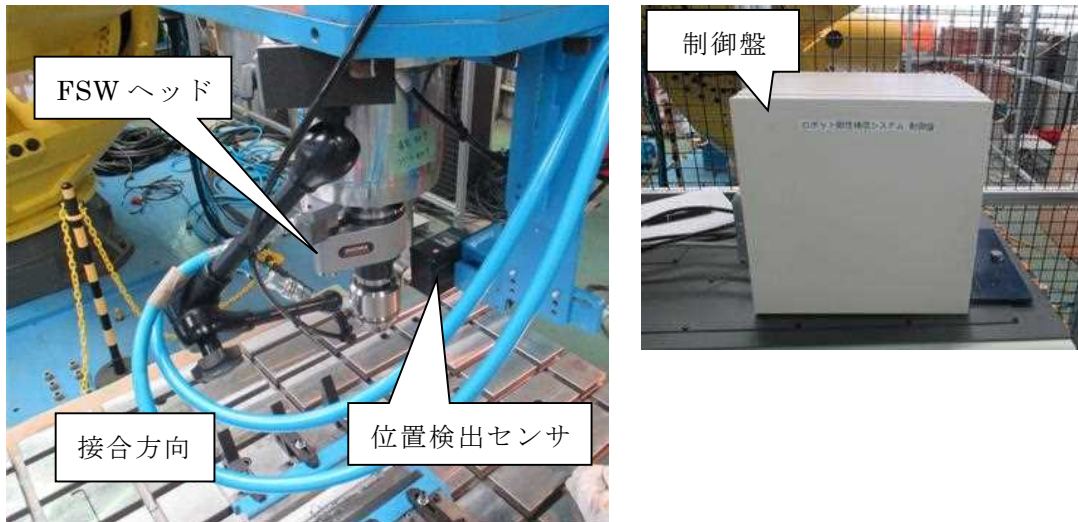
②ハイテン鋼の接合技術開発

自動車分野への応用を想定し、複雑形状に対応可能なロボット FSW 装置の開発を行った。図Ⅲ-2.7.8-11 に開発したロボット FSW 装置の外観写真を示す。ハイテン鋼（板厚 2mm 程度）も接合対象とし、接合中の大荷重にも耐えられるよう可搬質量の大きなロボットを採用した。

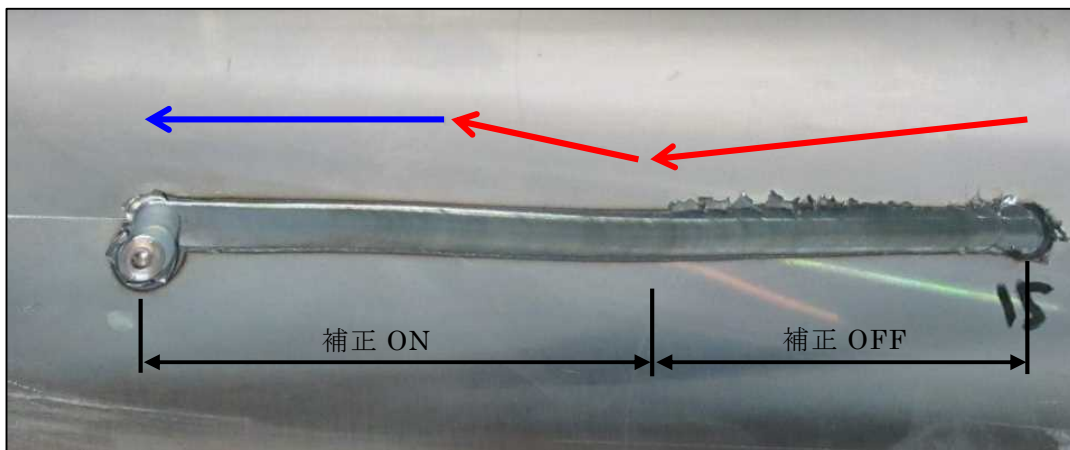


図Ⅲ-2.7.8-11 ロボット FSW 装置外観写真

この装置は剛性不足に起因して、接合線が左右に蛇行する現象が確認されたため、ロボット剛性補償システムを追加した。システムの外観写真を図Ⅲ-2.7.8-12 に示す。ヘッド前方に非接触位置検出センサを設置し、接合線に対する位置ずれをリアルタイムで計測し、フィードバック制御でヘッドを正規の接合線位置へ自動補正するシステムとした。このシステムを使用して、機能確認試験で得られた接合材の外観写真を図Ⅲ-2.7.8-13 に示す。制御を OFF（無効）にした状態では接合線が正規の接合線から離れて行くが、制御を ON（有効）にした時点から接合位置が補正され、最終的には位置ずれ量 0.5mm 以内で位置制御することができた。

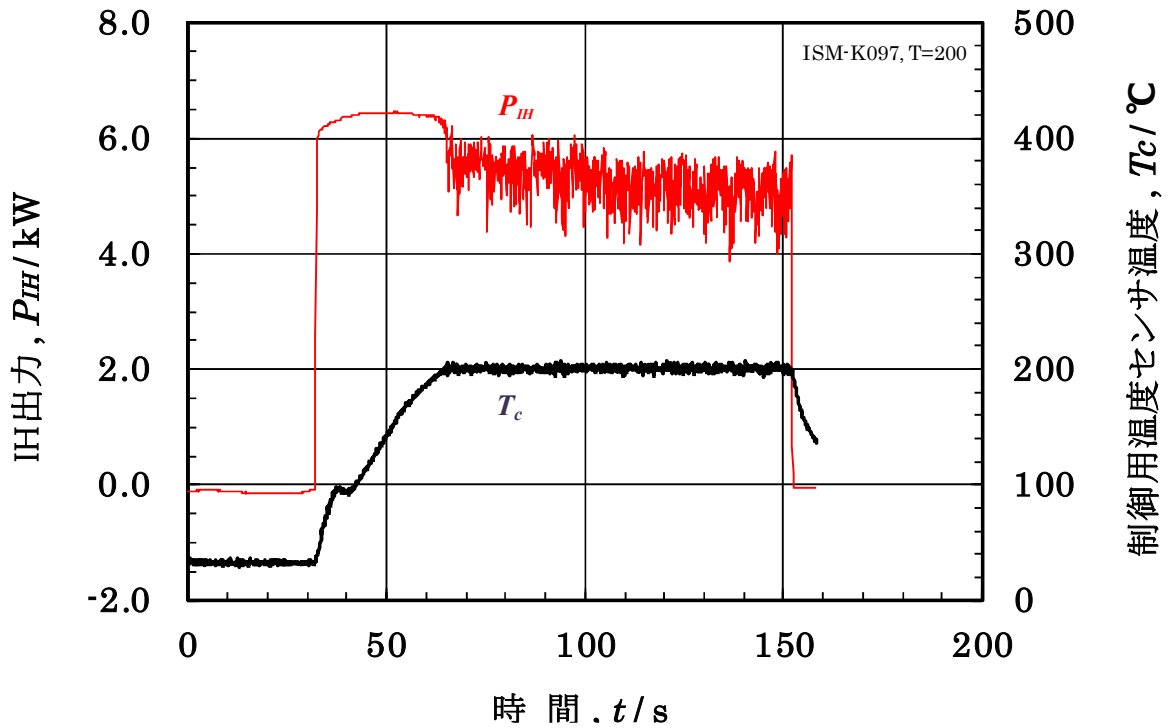


図Ⅲ-2.7.8-12 ロボット剛性補償システム外観写真



図Ⅲ-2.7.8-13 ロボット剛性補償システム機能確認試験での接合材外観写真

ハイテン鋼の場合、接合時の温度履歴により、接合材の機械的性質が変化することが予想される。そこで、接合部の冷却速度を制御するため、材料温度制御システムを開発した。図Ⅲ-2.7.8-14 に機能確認のために、TRIP 鋼板（引張強度 1.2GPa）を設定温度 200°C で試験した結果を示す。制御用温度センサの温度が 200°C 一定に維持されており、制御システムが正常に機能していることが確認できる。



図Ⅲ-2.7.8-14 材料温度制御システム機能確認結果

ハイテン鋼の FSW 接合評価に供する FSW ツール用 Co 合金として、ベース合金、改良合金 2、改良合金 3 の 3 種類のマスターインゴットを真空誘導溶解によって溶解、鋳造した。作製した約 11kg のマスターインゴットの外観例を図Ⅲ-2.7.8-15 に示す。良好なマスターインゴットであることを確認し、精密鋳造用のマスターインゴットに供した。

(a)ベース合金



(b)改良合金 2

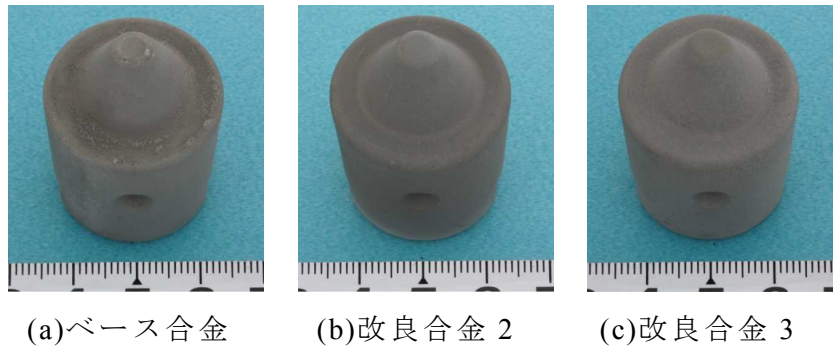


(c)改良合金 3

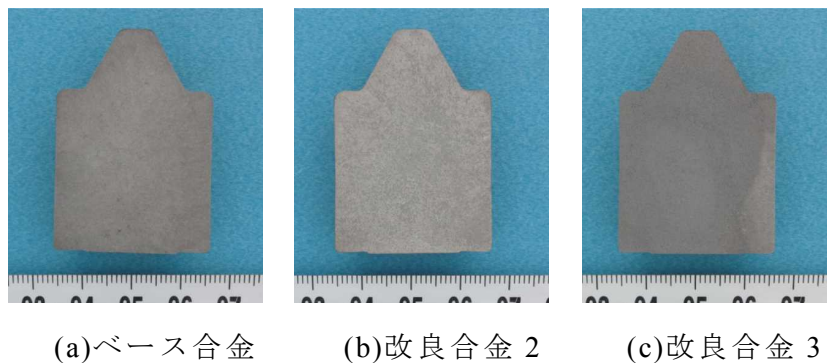


図Ⅲ-2.7.8-15 マスターインゴットの外観

上記のマスターインゴットを用いて精密鑄造によって製造されたツール素材を用いて、種々のツール材料特性評価を行った。材料特性評価に用いた熱処理後のツール素材の外観の一例を図Ⅲ-2.7.8-16 に示す。これらのツール素材の縦断面マクロ組織を図Ⅲ-2.7.8-17 に示すが、いずれも特に目立った引け巣等の鑄造欠陥は見られず、良好な精密鑄造品が得られていることを確認した。

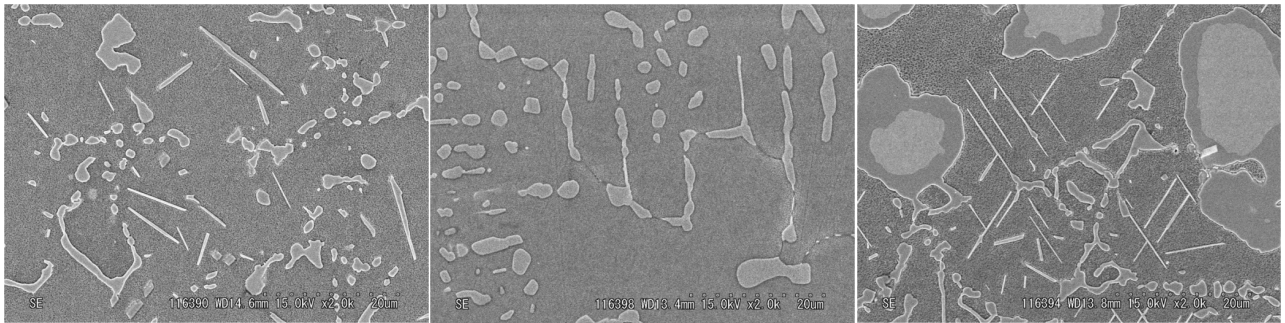


図Ⅲ-2.7.8-16 熱処理後のツール素材の外観写真



図Ⅲ-2.7.8-17 熱処理後のツール素材の縦断面マクロ組織

各ツール素材の縦断面 SEM 組織を図Ⅲ-2.7.8-18 に示すが、いずれもオーステナイト母相中と晶出した粗大硬質相からなる組織となっている。ベース合金では、塊状の硬質相と板状の析出相が観察され、改良合金 2 では、塊状の硬質相のみが観察され、改良合金 3 では、粗大な塊状の硬質相、やや小さい塊状の硬質相、および板状の析出相が観察される。また、SEM 写真では見えないが、オーステナイト母相中には数 10nm レベルの微細析出相が析出することが知られている。したがって、各ツール素材は、これらの晶出硬質相、板状析出相、微細析出相によって強化されている。



(a)ベース合金

(b)改良合金 2

(c)改良合金 3

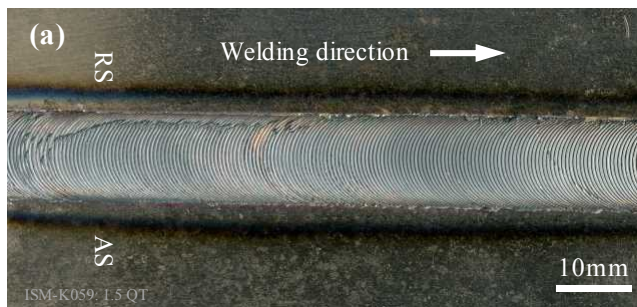
図Ⅲ-2.7.8-18 熱処理後のツール素材の縦断面 SEM 組織

ハイテン鋼向けに製作したツールを使用して、ハイテン鋼の接合を実施した。接合材料は ISMA 共通試験鋼板と称する、試作材料を使用した。表Ⅲ-2.7.8-7 に接合材の化学組成を示す。これらの材料は熱処理により引張強度を 1.2GPa または 1.5GPa に調質したものである。厚み 1.4mm の素材を幅 50mm、長さ 250mm に加工し、2 枚の材料を突合せて接合した。

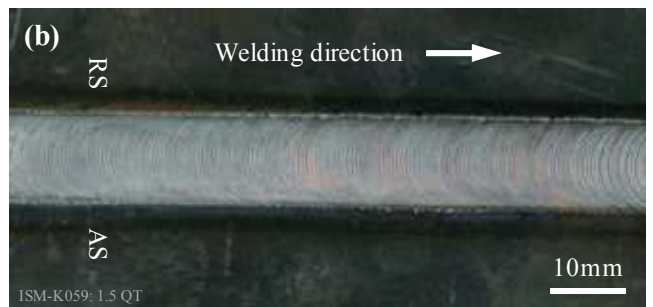
表Ⅲ-2.7.8-7 接合材の化学組成 (mass%)

呼 称	C	Si	Mn	P	S	Al	N	O
S35C-QT 鋼	0.370	0.21	0.81	0.011	0.0019	0.036	0.0032	0.0052
S45C-QT 鋼	0.444	0.21	0.83	0.010	0.0012	0.036	0.0040	0.0011
S55C-QT 鋼	0.547	0.20	0.82	0.010	0.0011	0.036	0.0039	0.0045
1.2-TRIP 鋼	0.410	1.50	2.02	0.010	0.0025	0.039	0.0039	0.0009
1.5-QT 鋼	0.456	0.20	0.81	0.010	0.0012	0.035	0.0039	0.0007

接合条件は接合速度 (V) 100~250mm/min、ツール回転速度 (N) 150~400rpm とし、接合中はツール内部を水冷した。図Ⅲ-2.7.8-19 に接合材の外観写真を示す。(a)は V=150mm/min、N=300rpm で接合した 1.2-TRIP 鋼、(b)は V=150mm/min、N=250rpm で接合した 1.5-QT 鋼である。表面欠陥のない接合部が得られていることが確認できる。S35C-QT 鋼、S45C-QT 鋼、S55C-QT 鋼に関しても、同様の接合部が得られている。



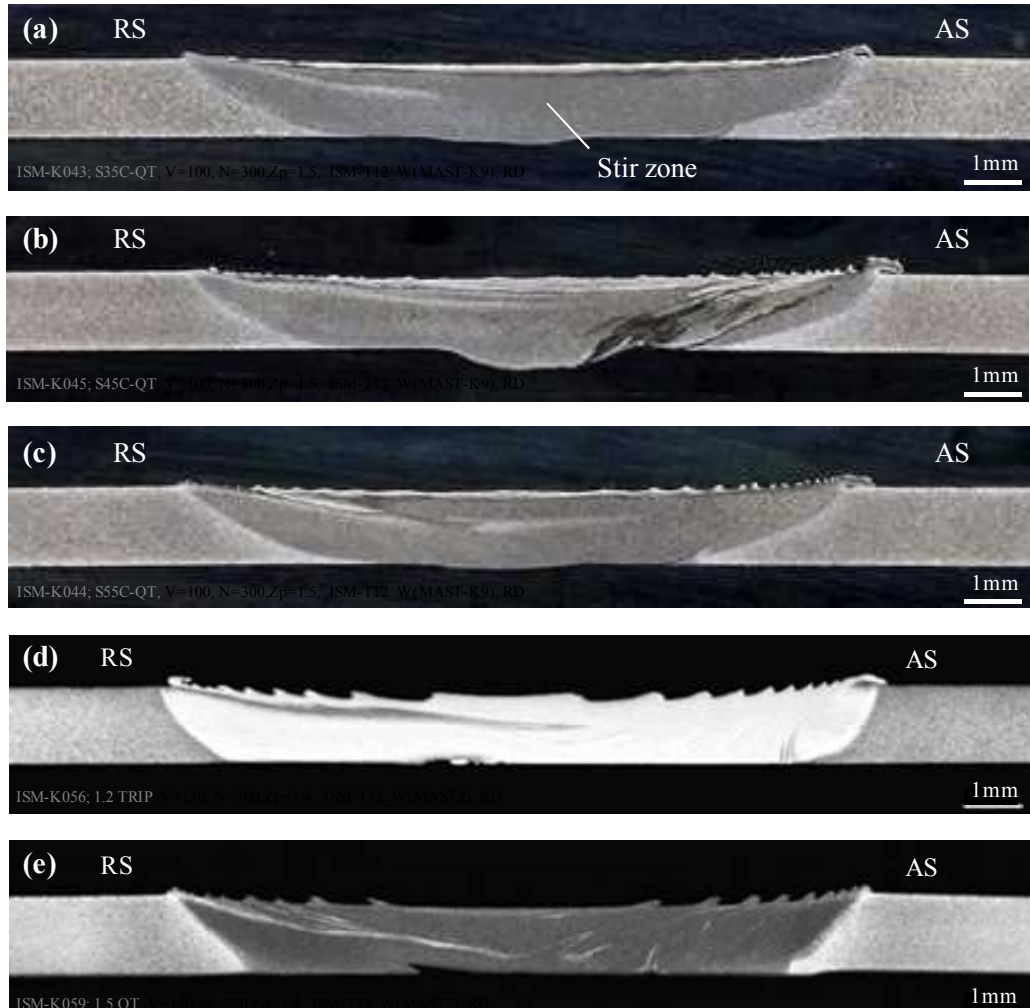
(a) 1.2-TRIP 鋼



(b) 1.5-QT 鋼

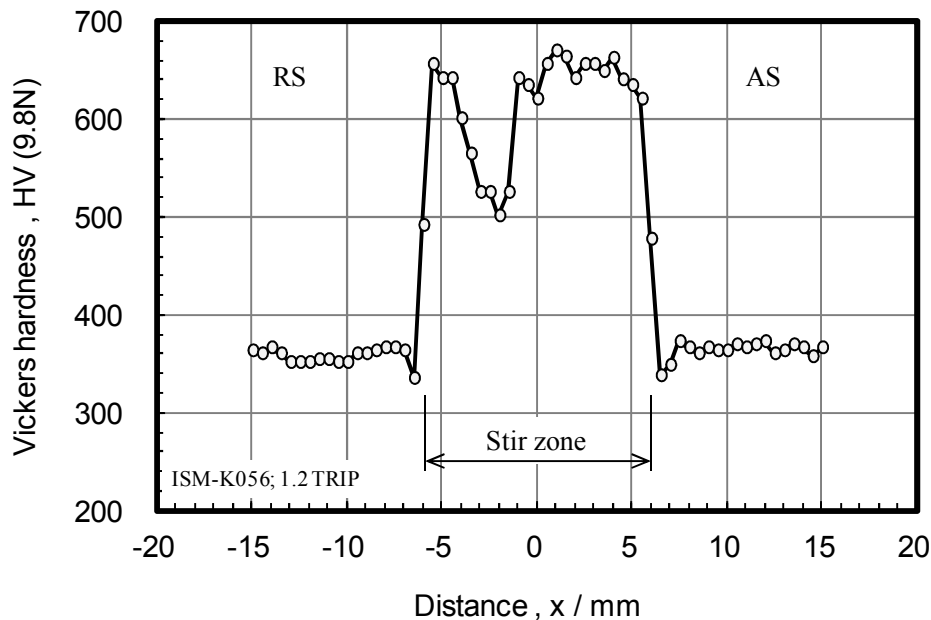
図Ⅲ-2.7.8-19 接合材の外観写真

図Ⅲ-2.7.8-20 に接合部の断面マクロ写真を示す。写真中央部の逆台形状をした、色の異なる部分が接合部であり、FSW では攪拌部（Stir zone）と呼ばれる。断面観察の結果、内部欠陥のない接合部が得られていることが確認できた。



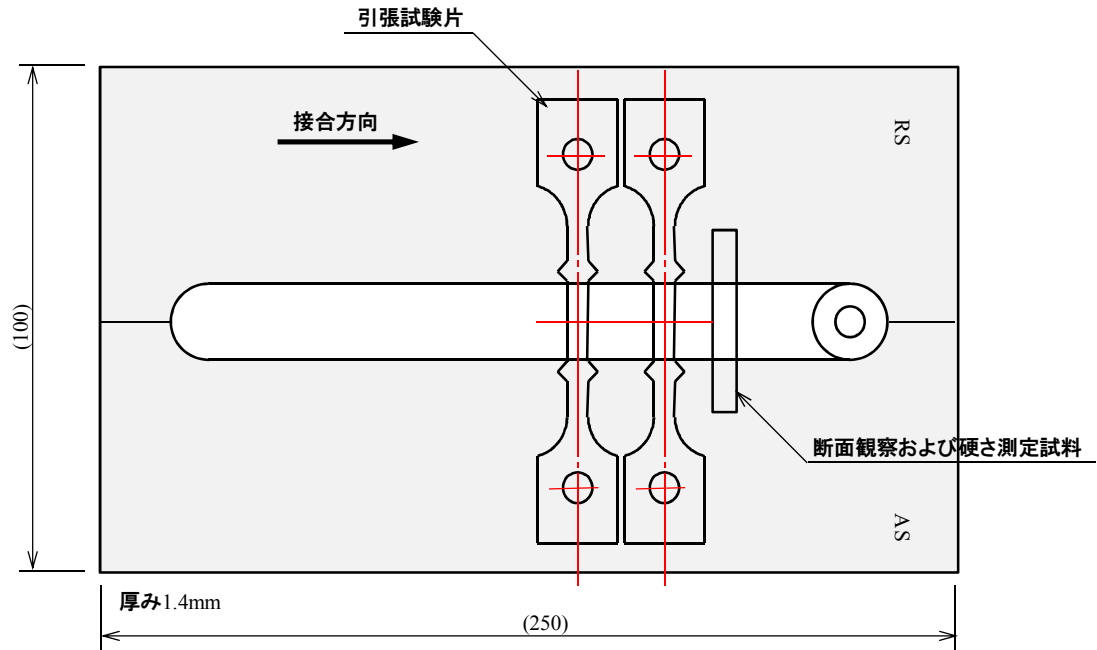
図Ⅲ-2.7.8-20 接合材の断面マクロ写真 (a)S35C-QT 鋼、(b)S45C-QT 鋼、
(c)S55C-QT 鋼、(d)1.2-TRIP 鋼、(e)1.5-QT 鋼

図Ⅲ-2.7.8-21に1.2-TRIP鋼接合材のビッカース硬さ分布を示す。測定は接合部表面から0.5mmの深さに対し、幅方向に0.5mmピッチで測定した。1.2-TRIP鋼は攪拌部（Stir zone）全域で硬さが上昇していた。また、僅かではあるが攪拌部の端部に母材よりも軟化している領域が認められた。



図Ⅲ-2.7.8-21 1.2TRIP鋼接合材の硬さ分布

この材料から図Ⅲ-2.7.8-22に示すように引張試験片を採取し、引張試験を実施した。試験片は2個採取し、接合部表面の加工は実施せず、接合ままとした。試験結果を表Ⅲ-2.7.8-8に示す。表中の値は伸びを除き、それぞれ2個の試験片での平均値である。伸びは母材の半分以下であったが、引張強度は母材と同等であった。今回の試験片は継手試験片であるため、平行部の硬さが不均一になっている。このため、平行部が均一に伸びず、局部伸びになっている可能性が高い。このことが、伸びが小さくなった要因として考えられる。これに関しては、接合方向に平行に試験片を採取し、確認する予定である。



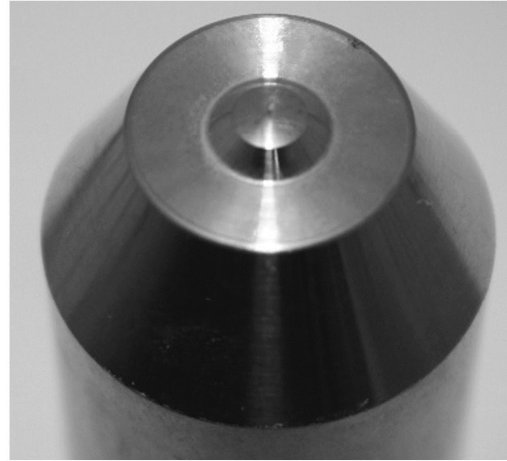
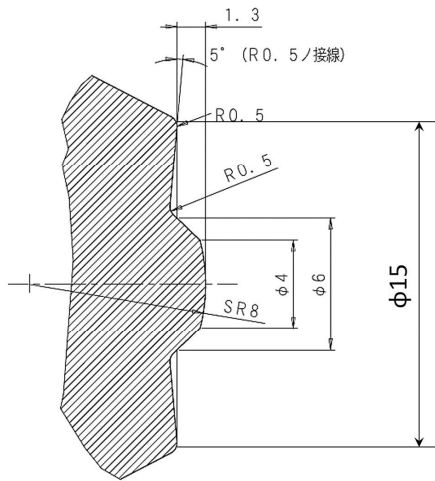
図Ⅲ-2.7.8-22 試験片採取位置

表Ⅲ-2.7.8-8 引張試験結果

材 質		引張強度 [MPa]	伸び [%]	備 考
1.2-TRIP	母 材	1199	22	
	接合材	1209	8(*)	AS HAZ/AS 母材破断

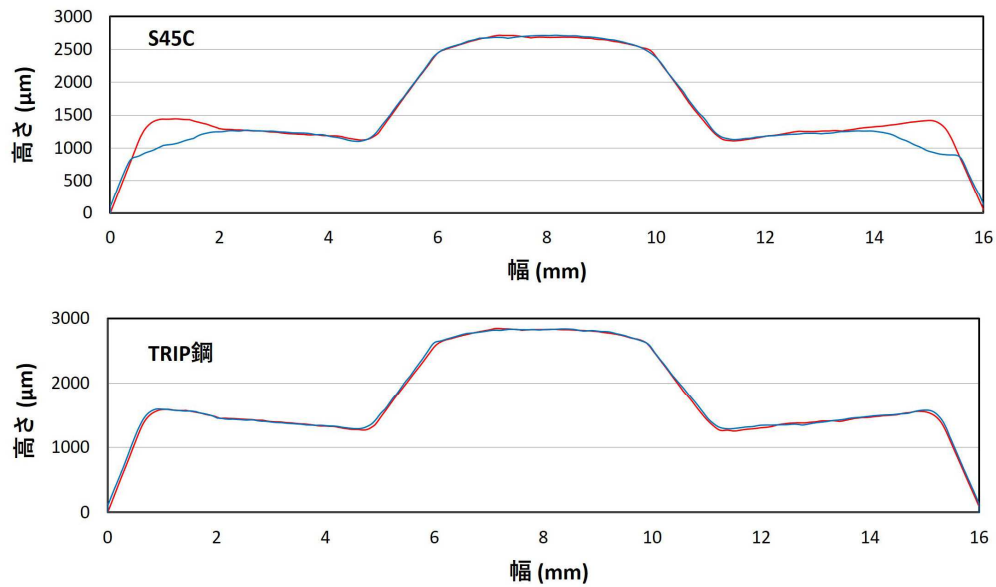
* : AS 母材破断の値 (AS HAZ 破断の伸びは 2%)

鋼の FSW 時におけるツール損傷は、室温状態にある接合材へツールを挿入するときに生じるツール変形と温度上昇後に生じるツール摩耗に大別できると考えられる。そこで、ハイテン鋼の FSW 過程における挿入時のツール変形と温度上昇後のツール摩耗に分けて調べた。試験に用いた Co 合金製ツールの形状と外観写真を図Ⅲ-2.7.8-23 に示す。試験条件はツール回転速度 150rpm、接合速度 60mm/min とした。



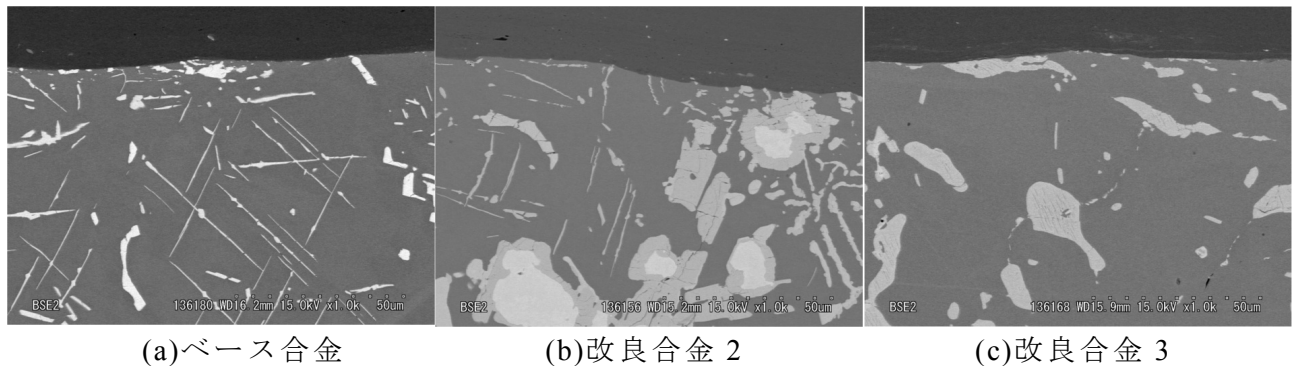
図Ⅲ-2.7.8-23 試験に用いた Co 合金製ツールの形状と外観写真

組成の異なる種々の Co 合金製ツールを試験した結果、Ti-6Al-4V 合金で優れた耐久性を示した合金とは異なるものが最良であることが分かった。TRIP 鋼の FSW 時におけるツール摩耗はほとんど生じないことが示された (図Ⅲ-2.7.8-24)。



図Ⅲ-2.7.8-24 S45C と TRIP 鋼を FSW したときに生じるツール摩耗挙動 (赤線が初期形状、青線が FSW 後の形状)

接合後のプローブ先端（ツール先端）の SEM 観察の結果を、図Ⅲ-2.7.8-25 に示す。プローブ先端部の組織に変化は見られなかった。以上より、ツールそのものは損傷を受けていないことが確認された。



図Ⅲ-2.7.8-25 鋼板接合試験後のツールのプローブ先端部の断面 SEM 組織

SEM 観察ならびに EBSD 解析の結果、TRIP 鋼母材にはフェライト、硬質相（マルテンサイトもしくはベイナイト）、残留オーステナイトの 3 相が共存していることが明らかとなった。TRIP 鋼接合部の攪拌部においては、硬質相の割合が増加し、その一方でフェライトと残留オーステナイトの減少が見られた。この組織は、FSW 時に TRIP 鋼の A3 点以上もしくはその近傍に加熱された後に冷却されたことで形成されたものと推察された。攪拌部における硬質相の増加が硬さ上昇に起因していると考えられた。攪拌部の外側で硬さが低下した領域においては、硬質相はほとんど見られず、また残留オーステナイトの著しい減少が確認された。TRIP 鋼においては、A1 点以下でフェライトと炭化物が平衡相であり、マルテンサイトやベイナイト等の硬質相、オーステナイトは準安定であることから、この領域は FSW 時に A1 点直下に加熱されたことで、硬質相と残留オーステナイトがフェライトと炭化物に変態した領域に対応するものと推察された。硬質相と残留オーステナイトの減少がこの領域の硬さ低下に起因しているものと考えられる。

炭素鋼接合部においても、TRIP 鋼と同様、攪拌部における硬さの上昇とその外側での硬さ低下が見られた。攪拌部における硬さ上昇は、FSW 時の最高到達温度が A3 点以上もしくはそれ付近であったことに起因して、マルテンサイトやベイナイト等の硬質相の量が増加したことに起因しており、一方攪拌部の外側における硬さ低下は、A1 点直下に加熱された結果、母材に存在する焼戻しマルテンサイトの更なる焼戻しが生じたためと推察された。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.8-9 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	2	0	5	0	0	0	0	0	1
H27FY	0	0	5	0	0	1	1	0	1
H28FY	4	0	6	1	0	0	3	0	1
合計	6	0	16	1	0	1	4	0	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）

(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）

表Ⅲ-2.7.8-10 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	0	0	0
H28FY	2	0	0
合計	2	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.9[テーマ番号 09] 水和物低温接合技術の開発

2.7.9.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車分野では、軽量化による燃費改善と衝突安全性向上の両面から高強度軽量素材の適用が多く検討されてきており、「強さと粘さ」のような、相反する物性を両立したハイブリッド材料を提供することが強く求められている。具体的には、高強度素材の典型である高強度鋼板と軽量素材である非鉄材料（アルミ、チタン、CFRP）の組み合わせが不可欠である。しかし、製造方法の全く異なるこれらの材料を一括形成することは困難なため、ハイブリッド化にはアセンブリ、すなわち異種材料接合技術が必要である。現行の異材接合技術としては、SPR、TOX、リベット等の機械接合技術、接着技術、スポット溶接技術、およびそれらを組合せた技術、そして、ブレイジング、摩擦圧接、摩擦攪拌接合、摩擦点接合など多種存在するが、コスト、信頼性、そして鉄と他素材の熱膨張係数差に起因する熱変形を抑制する技術に課題があり、適切な接合方法が見当たらないのが現状である。

一方、異種材料を水和物架橋で接合する技術が、（国）物質・材料研究機構ハイブリッド材料ユニット（重藤、香川ら）により提案され、半導体積層やセンサー実装等を念頭にした応用検討が行われている。同技術は、初期表面の汚染物質分子層などを除去した後の表面を、水蒸気を有する雰囲気に出しその結果生成する水和物皮膜を介して接触させ、低温で加熱し脱水縮合反応を促進することにより安定な結合を得る技術である。鉄、アルミ、チタンなどの水和物を形成し得る金属材料や、CFRP などの一部のポリマーにおいても、架橋皮膜形成条件の明確化がなされれば、異材接合技術を達成可能と考えられる。同技術は高価な接合材料を用いることなく毒性のない水などの常在物質で架橋でき、150°C 程度の比較的低温で接合できる可能性があることから、量産時の低コスト化（安価接合材料+低消費電力化）と併せ、熱膨張係数差起因の熱変形抑制の双方が期待され、日本発の世界初の新接合技術として展開する可能性がある。本テーマでは、「水和物架橋接合技術」の実用化目処を得ることを目的に、平成 27 年度までのフィジビリティスタディを行う。

(2)位置付け、目標値

鉄とアルミ、チタン、CFRP 等の異材接合技術を確立するため、以下の点をブレークスルーポイントとして掲げ、重点的な研究開発を短期間で行う。

①鉄/非鉄材料(アルミ、チタン、CFRP) 異材の水和物架橋低温接合技術開発

②界面メカニクス理論を活用した水和物架橋低温接合継手特性の評価

【第 1 期目標（平成 27 年度末）】

- ・鉄とアルミ、鉄とチタン、鉄と CFRP の水和物架橋低温接合による接合界面組織、継手特性の明確化（FSJ による継手特性との比較）
- ・鉄/CFRP 継手特性を改善するための指針明確化

【第 2 期目標（平成 29 年度末）】

平成 27 年度までの FS 研究の結果に基づき、目標を設定する。

【最終目標（平成 34 年度末）】

平成 27 年度までの FS 研究の結果に基づき、目標を設定する。

表Ⅲ-2.7.9-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
1-1)接合用表面素材の作製	表面凹凸状態を変えた水和物架橋接合用素材の作製（本接合に適した表面状態の把握）	平成 27 年度までの FS 研究の結果に基づき、目標を設定する。		高い継手強度が得られる表面状態の把握
1-2)接合前表面処理技術の検討	表面汚染物分子層や酸化物を減少させる表面処理技術の開発	平成 27 年度までの FS 研究の結果に基づき、目標を設定する。		継手強度確保のための前処理条件最適化
1-3)大気圧下での水和物架橋低温接合技術の検討	水蒸気などを含む大気圧雰囲気において脱水縮合反応を可能とする条件を把握	平成 27 年度までの FS 研究の結果に基づき、目標を設定する。		継手強度を発揮する接合条件の把握
1-4)水和物架橋低温接合界面の解析	得られた接合界面層の解析及び接合界面の強度試験における破壊経路の解析	平成 27 年度までの FS 研究の結果に基づき、目標を設定する。		接合メカニズム、強度確保メカニズムの解析
2-1)静的継手強度特性の評価	得られた継手の静的強度の評価及び従来技術による継手との比較	平成 27 年度までの FS 研究の結果に基づき、目標を設定する。		継手特性の把握
2-2)継手破壊様式の界面メカニクス解析	接合界面の破壊様式に配慮した界面メカニクス解析手法の提案	平成 27 年度までの FS 研究の結果に基づき、目標を設定する。		異材接合界面の評価手法検討

(3)全体計画

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
①異材の水和物架橋低温接合技術の開発 ・水和物架橋低温接合用素材の作製 ・表面前処理技術の検討（NIMS 再委託） ・大気圧水和物架橋低温接合技術の検討（NIMS 再委託） ・水和物架橋低温接合界面の解析	鉄/アルミ、鉄/チタン素材試作		鉄/CFRP 素材試作					
	前処理技術検討		前処理技術検討					
	水和物架橋技術検討		水和物架橋技術検討					
	界面解析		界面解析					
②界面メカニクス理論を活用した水和物架橋低温接合継手特性の評価 ・継手形状の探索 ・静的継手強度特性評価 ・継手破壊様式の界面メカニクス解析（東京大再委託）	継手形状探索		継手強度評価		継手形状探索		継手強度評価	
	界面メカニクス解析		界面メカニクス解析					
							FS 総括・見極め	
③鉄/異材・水和物架橋低温接合技術の総括・見極め								

(補足)

【平成28年度】

鋼/アルミの水和物架橋低温接合に取り組み、平成26年度12月の技術推進委員会にて、主として、表面前処理技術（Ar-FAB法、V-UVU法）、低温接合技術とその接合界面組織・継手強度について報告し、接合強度の向上よりも、接合界面組織に着目し、

メカニズム検討を進めるよう御指導を頂いた。

本御指導を踏まえ、平成 27 年度は、鋼/Ti、鋼/CFRP を加えた異種材料接合に取り組み、実験結果から、『水和物架橋のための M-OOH が形成され、水和物の脱水縮合反応により、界面には、アモルファス状の酸化物層が形成された』と推定されることを報告し、得られた知見を御評価を頂いた。

しかし、FS 継続の指標として設けた継手強度レベルを得られておらず、本テーマにおける新日鐵住金による委託研究開発は平成 27 年度を持って中断とする。

(4)実施体制

共同実施体制スキーム

<p>【委託先】 新構造材料技術研究組合 (新日鐵住金 (株)) テーマ名 水和物架橋低温接合技術の開発</p>
--

(5)運営管理

上記、分担にて各々の検討項目について研究開発を進めるとともに、定期的な連絡会議を開き、進捗確認、試験結果報告、情報共有等を行う。さらに、必要に応じて各分室の担当者が試験立会を行うなど、協調した研究開発が進められるように進める。

(6)実施の効果 (費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030 年度)

高価な接合材料を用いることなく毒性のない水などの常在物質の架橋、脱水縮合反応を用いた低温(150°C 程度)接合の可能性を検討したが、平成 28 年度に、FS 継続の指標として設けた継手強度レベルを得られておらず、本テーマにおける新日鐵住金による委託研究開発は平成 27 年度を持って中断とした。ただし、本検討において得られた水和物架橋接合の新しい知見は、今後の異種金属接合の研究に役立つものと考えられる。

2.7.9.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.9-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
1-1)接合用表面素材の作製	表面凹凸状態を変えた水和物架橋接合用素材の作製 (本接合に適した表面状態の把握)	アルミ試験体(4種)を作成し、表面処理技術検討に提供。接合性に有利な表面状態を把握	○	
1-3)大気圧下での水和物架橋低温接合技術の検討	水蒸気などを含む大気圧雰囲気において脱水縮合反応を可能とする条件を把握	鋼/アルミ接合において水蒸気を含む N2 雰囲気中で、水和物架橋接合を確認。本プロセスの実現性を示唆	○	
1-4)水和物架橋低温接合界面の解析	得られた接合界面層の解析及び接合界面の強度試験における破壊経路の解析	接合界面にはボイドが存在するが、Fe、Al のアモルファス状の架橋層(酸化物)を介した接合がなされていることを確認	○	
2-1)静的継手強度特性の評価	得られた継手の静的強度の評価及び従来技術による継手との比較	鋼/アルミ、鋼/Ti、鋼/CFRP の水和物の接合強度を	○	
2-2)継手破壊様式の界面メカニクス解析	接合界面の破壊様式に配慮した界面メカニクス解析手法の提案	界面接合強度(ひすみE開放率)の測定手法提案、鋼/Al 接合体での評価	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.9-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
革新的新構造材料 等研究開発	鋼／アルミ、／チタン、／CFRP の 水和物架橋接合を実施し、接合 面、界面の詳細評価により、水和 物架橋反応による接合と推測され た。但し、得られた各異種接合継 手強度は、FS 検討の継続判断指標 とした FSJ 継手と同等には至ら ず、27 年度までの検討を以って開 発中断とした。	FS 継続なし。 27 年度までの検討 を以って開発中断	

(3)研究開発の成果と意義

(3.1) 背景・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。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と異種材料接合が必須となり、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に関する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、不燃性等の機能が確保された軽量構造材の開発が必要である。

自動車を中心とした輸送機器の抜本的な軽量化に向けて、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 (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、輸送機器の燃費向上によるエネルギー消費量と CO₂ 排出量の削減及び我が国の産業の国際競争力強化を目指す。このためには、上述したような材料を接合する技術の創出が必須である。現行の異種材料接合技術には、a) SPR、TOX、リベット等の機械的接合技術、b) 溶接などの熔融を用いる手法、ならびに c) ブレージング、摩擦圧接、摩擦攪拌、摩擦点接合などの高温での拡散現象・新生面創製に基づく方法が存在する。しかしいずれの手法においても鉄との熱膨張係数差に起因する熱変形を抑制する技術に課題を残しており、接合プロセスの低温化が強く求められていた。そこで、本研究では低温での接合技術を探索することとし、水和物（ならびに親水性官能基）架橋形成による Fe、Al、Ti、CFRP の異種材料低温接合技術の確立を目的とし検討した。

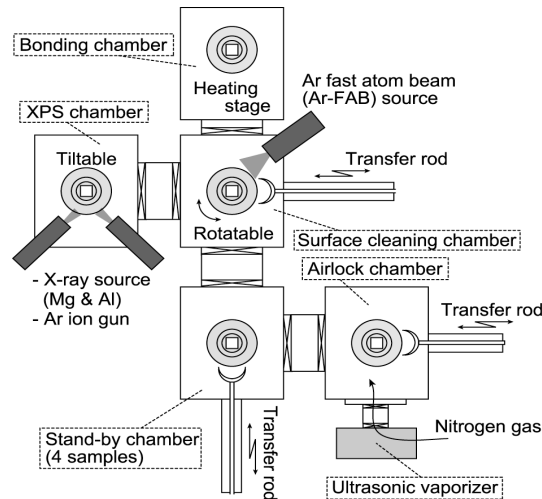
(3.2) 接合手法と各実験方法の概要

本接合実験に用いる装置の概略は以下の通りである（図Ⅲ-2.7.9-1）。接合装置は、試料導入、試料待機、Ar 高速原子ビーム (Ar-FAB) 照射、X 線光電子分光計（以下

XPS)、接合・加熱のための各チャンバが連結され、試料が自由に行き来できる構造をしている。

試料導入チャンバには、真空紫外光照射ユニット（VUV）と、純水を霧化して体積湿度を制御しながら窒素ガスキャリアで導入するための霧化ユニットが設置されている。また、XPS チャンバは、Ar イオンビームによる深さ方向分析ならびに非破壊の角度分解法のための試料ステージを有する。

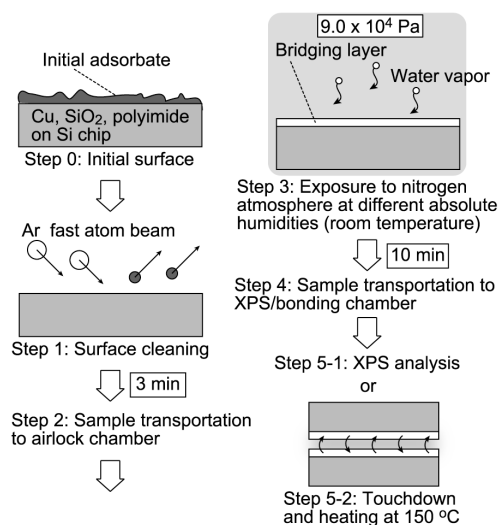
接合チャンバの圧接軸は 1000N まで荷重印加可能なほか、ステージ下部に設置したヒーターを用いて、接触・加圧中の試料を最大 400°C まで加熱できる。



図Ⅲ-2.7.9-1 接合に用いる装置の概略図

本装置を用いた接合実験のフローは以下の通りである（図Ⅲ-2.7.9-2）

- 1) Ar-FAB（もしくは VUV）による初期表面上の吸着分子除去、
- 2) 霧化純水を含む大気圧窒素雰囲気への露出、
- 3) 試料間の接触後、ただちに 150°C での加熱保持。



図Ⅲ-2.7.9-2 接合実験フロー

(3).3 接合前処理条件の検討

以下に、接合前処理条件の検討結果を示す。ここでは、事前検討の結果から、Fe、Al、Ti の検討試料として、10x10mm² (厚さ 1mm) の板を機械的鏡面研磨したものをを用いた。

各試料とも 1x1μm² 程度の領域内での平均面粗さ (Ra) は約 8nm で、目視で確認可能な面内のうねりが存在していた。

(3).3.1 Ar-FAB による接合前処理条件の検討

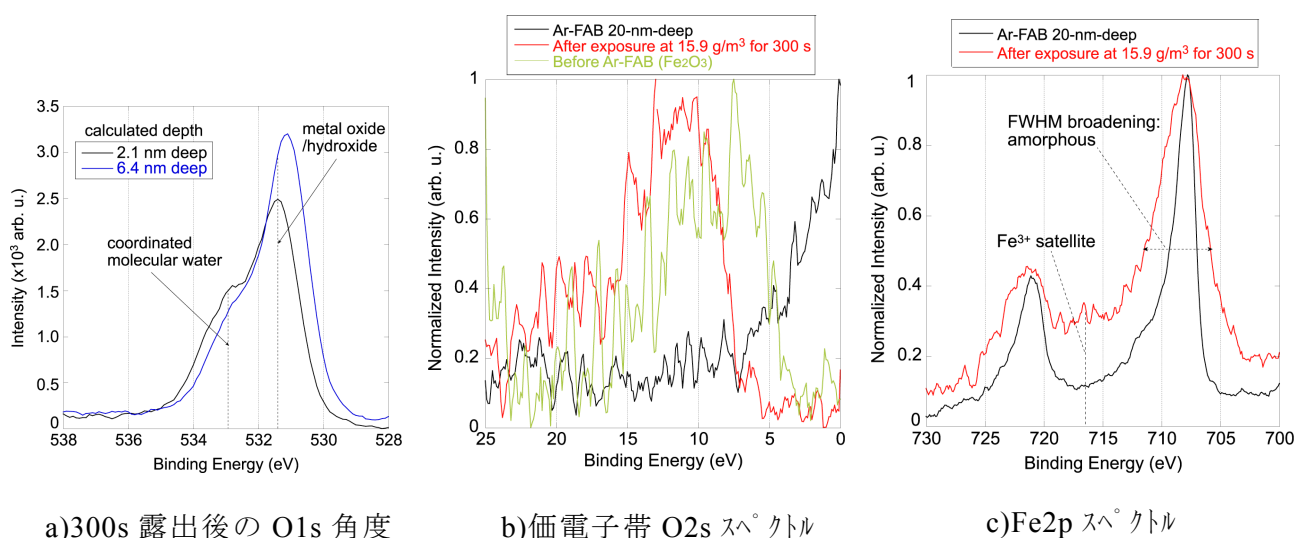
上記接合手法において、まず適切な表面改質条件を最適化する。ステップ 1 では、Ar-FAB 照射によりエッチングされる深さをパラメータにとり、初期表面上の汚染物質分子層を除去するのに最低限必要な条件を抽出する。これは、Ar-FAB 照射が表面洗浄に有効である反面、過剰な照射が表面粗さを増大させることが既実証されているためである。ステップ 2 では、改質後の表面を一定の体積湿度 (g/m³) の大気圧窒素雰囲気中に露出し、金属水和物層の形成の有無を確認する。

STEP1 : Ar-FAB 照射条件の決定

Ar-FAB 照射は、Fe、Al 各試料初期表面上の吸着汚染物分子を除去し、表面全体で均一かつ水分子の吸着に有効な結合状態を確保するために行う。Fe に関しては、有機汚染物分子層ならびに金属酸化物がほぼ消滅する時点の Ar-FAB 照射エッチング深さを最適条件とする。Al に関しては、Ar-FAB の照射エネルギーと本装置のバックグラウンド真空圧では完全な酸化物除去が困難であることと、Al 酸化物への水分子吸着が可能であることが過去に実証されているので、有機汚染物分子層が除去され、均一な組成の酸化物が表出した時点を最適条件とみなす。Ar-FAB エッチング深さは、各試料とも照射後に触診式段差計で測定した。Fe 表面を順次 2~20nm まで XPS 測定したところ、2nm エッチング時で Fe ピークが顕著に現れ、O ピーク強度が減少したことから、この時点で有機汚染物分子が除去され、Fe 酸化物の層が露出したと判定できる。深さ 12nm 以上では、2p 1/2 - 3/2 スペクトルのエネルギー差 (13.1eV) が Fe の文献値と一致することが確認された。したがって、Fe 表面に対する Ar-FAB 照射により、Fe (および少量の黒鉛状 C) が露出して金属水和物 (およびカルボニルなどの親水基) が形成可能な表面が形成され、初期表面の汚染物分子除去を含めた必要エッチング深さがおよそ 12nm 以上であることが分かった。同様の評価を Al に対しても行ったところ、Al 表面に対する Ar-FAB 照射により、Al₂O₃ が露出して金属水和物が形成可能な表面が形成され、初期表面の汚染物分子除去を含めた必要エッチング深さがおよそ 10nm 以上であることが分かった。

STEP2；架橋分子層形成の確認

Fe、Al について、3 項の検討に基づき、深さ 20nm まで Ar-FAB 照射を行った直後の表面を 15.9g/m³ の水蒸気を含む 0.9atm の高純度窒素雰囲気中に 300s 露出し、架橋分子層形成の有無を確認した。先述の通り、本来は体積湿度を変化させて架橋性皮膜形成速度を算出するべきであるが、装置構成の都合上、本年度は架橋層形成の確認のみを行った。

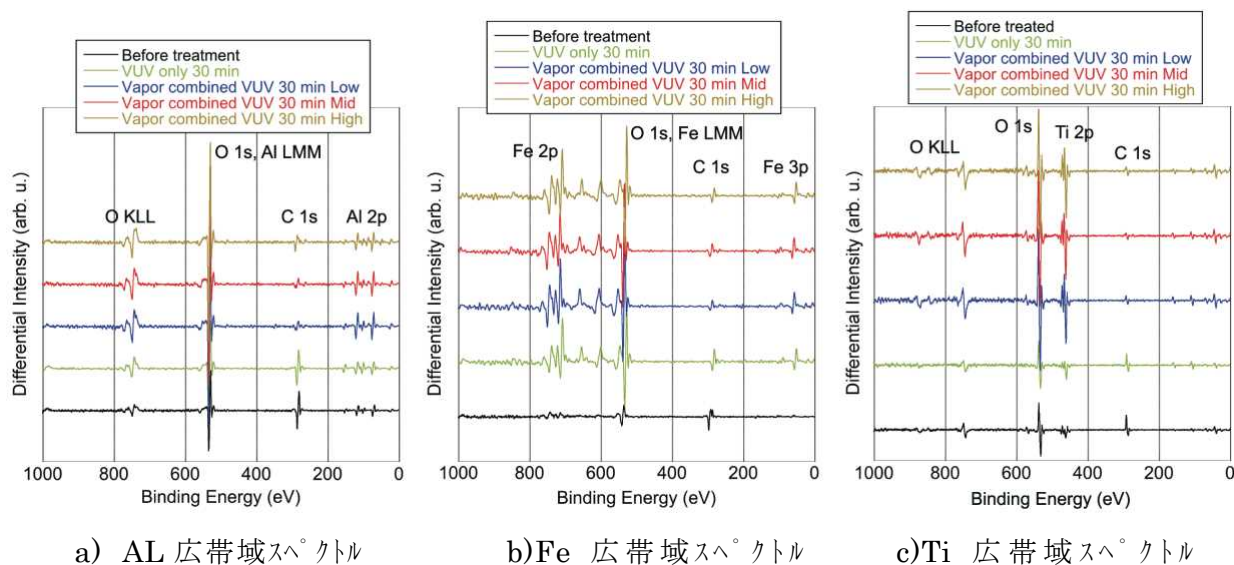


図Ⅲ-2.7.9-3 加湿窒素雰囲気(15.9g/m³)に露出された Fe 表面の化学結合状態の変化

図Ⅲ-2.7.9-3(a~c) は露出に伴う Fe 表面の結合状態変化を示す O1s、価電子帯-O2s、ならびに Fe2p スペクトルである (スキャンステップ 0.1 eV)。図Ⅲ-2.7.9-3(a)の O1s スペクトルは、水蒸気露出後の表面に対して検出角 15°と 45°で角度分解法観察を行い、金属酸化物由来のピーク強度変化から算出した深さ (膜厚) で示されている。図Ⅲ-2.7.9-3(a~c)のスペクトルは Ar-FAB 照射後と水蒸気露出後のピーク形状を比較したもので、結合状態変化を明確に示すため最大強度で平均化されている。まず、(a) の O 1s スペクトルでは、明確に分子水に対応するピークが出現している。このピークは計算値 6.4nm の深さまで存在することから、分子水を有する層は 6nm 程度の厚さを有することが確認された。(b)の価電子帯-O2s のスペクトルでは、水蒸気露出に伴いピークが高エネルギー側にシフトし、初期表面上で観察された Fe₂O₃ より高い値を示した。形成された皮膜が Fe₂O₃ より高いバンドギャップを有する構造を有すること、また、(c)の Fe2p スペクトルにおいて、アモルファス構造の混在に起因すると考えられる半値幅の広がり、Fe³⁺に対応するサテライトピークの出現が観察されたことを併せると、Fe 表面の水蒸気への露出により、当初の想定通り水分子が配位された FeOOH 皮膜が形成されたと考えられる。同様に、Al (Al₂O₃) 表面においても調査した結果、水蒸気露出により架橋能を有する AlOOH 皮膜が形成されることが判明した。

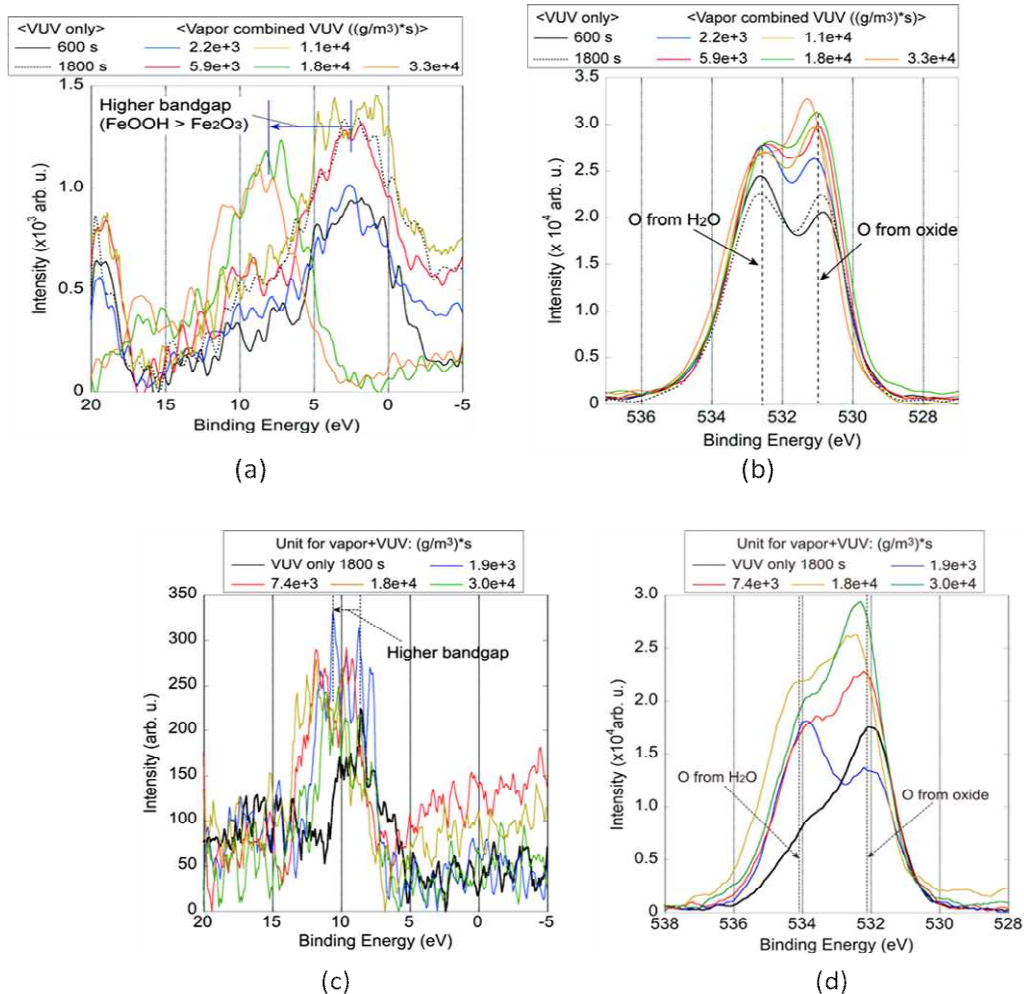
(3).3.2 VUVによる接合前処理条件の検討

VUVによる表面改質手法が各材料の表面化学結合状態に及ぼす影響を、X線光電子分光計（以下XPS）を用いて評価した。Al、Fe、Tiについて、VUV照射時間を30minに固定した場合の体積湿度の影響を示す広帯域スペクトルを図Ⅲ-2.7.9-4(a)-(c)に示す。元素ピークの位置と強度を強調する目的で、スペクトルは実測値を微分した状態で示した。凡例の湿度標記 low、mid、high はそれぞれ、 3.7g/m^3 、 9.9g/m^3 、 18.2g/m^3 に対応している。また、比較のため、表面改質前ならびにVUV照射のみのスペクトルも併記した。



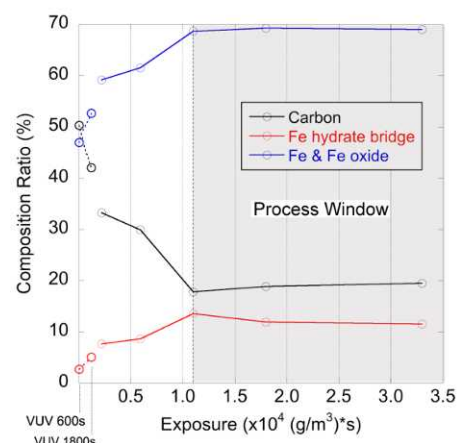
図Ⅲ-2.7.9-4 Vapor combined VUVにおける表面結合状態の変化
(X線光電子分光スペクトル)

図Ⅲ-2.7.9-4から、各材料で、vapor combined VUV手法で処理された表面では、C1sで示される有機汚染物質分子層が除去されていることがわかる（Feは炭素含有鋼なので一定量の強度が残存する）。また、VUV照射のみの試料と比較して金属の組成比が増加しており、ある程度の表面活性化効果が得られていることが確認された。さらに、O1sのスペクトルに内包される水和物の存在可能性も増加している様子が見られる。これらの効果は特にFeとTi表面において顕著であることから、表面改質条件の最適化はFe、Ti側に依存すると考えられる。この状態を詳細に分析するために、Fe、Tiそれぞれのvalence bandとO1sの狭帯域スペクトルを図Ⅲ-2.7.9-5(a)-(d)に示す。狭帯域分析では、体積湿度 (g/m^3) と照射時間 (s) の積を露出量と定義し、これをパラメータに評価を行った。



図Ⅲ-2.7.9-5 Vapor combined VUV 照射量に対応した表面結合状態の変化
 (a) Fe valence band、(b) Fe O1s、(c) Ti valence band、(d) Ti O1s

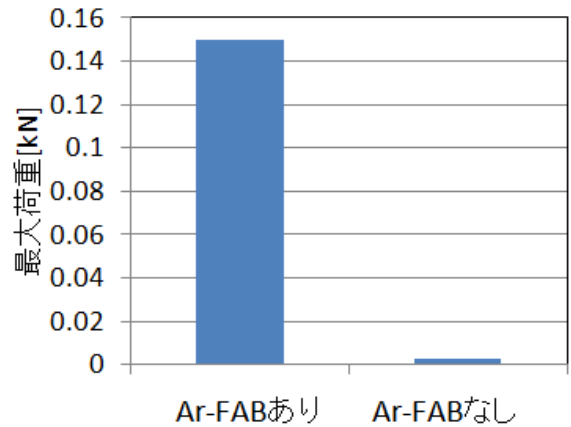
図Ⅲ-2.7.9-5(a)の、vapor combined VUV手法を適用した表面においては、自然酸化物に被覆されているVUV照射のみの表面と比較してバンドギャップの高い状態へ遷移している様子が観察されており、FeOOHが生成していると推測される。また、(b)において、酸化物由来のものより約1.5eV高い位置にピークが出現し、その強度は露出量が一定に達するまで増加する傾向が観察された。このピークはH₂Oに起因することから、水分子が配位されていることが確認された。露出量の変化にともなうFe表面の組成の変化を示した図Ⅲ-2.7.9-6から、Fe最表面の有機汚染物質分子層を除去し、金属組成比を増加させ、かつ一定量の水和物架橋皮膜を形成するために必要な露出量が、 $1.0 \times 10^4 (\text{g/m}^3) \cdot \text{s}$ 程度であることが判明した。なお、同様の挙動はTi表面でも確認された。



図Ⅲ-2.7.9-6 露出量と Fe 表面組成比の関係

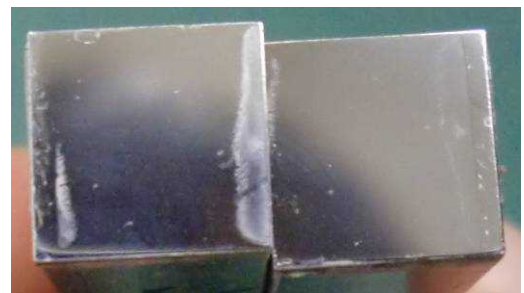
(3).4 接合強度評価、破面観察

前項までに示した条件を用いて接合実験を行った。Ar-FABによる前処理をしたものの、そうでないサンプルに対して、強度評価を試みた。強度評価方法は、Alの角棒(10x10x150mm)に市販の構造用接着材によって、サンプルを固定し、接合界面に鉛直方向の荷重を負荷し、その破断荷重を測定した。その結果を図Ⅲ-2.7.9-7に示すが、現状、Al側の母材で破断するような高い継手強度は得られていない。



図Ⅲ-2.7.9-7 接合強度評価結果

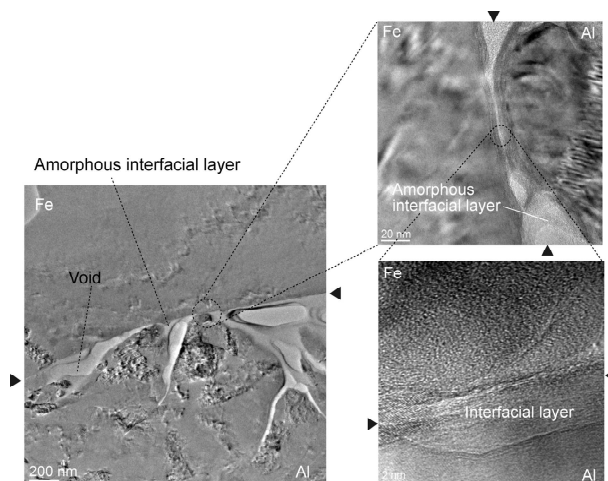
これは、図Ⅲ-2.7.9-8に示しように、表面間の接触面積が小さいことに起因しており、接合強度の確保には、プロセス的な条件工夫が必要と考えられる。



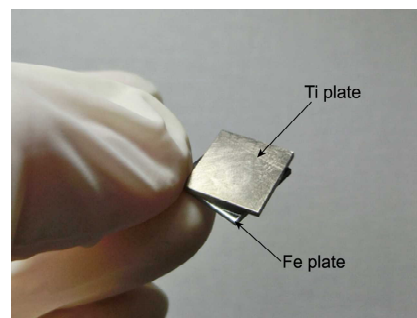
図Ⅲ-2.7.9-8 破面の一例

このような接合強度の課題が残存するが、接合が達成された部位においては良好な密着が達成されていることが確認されている。

図Ⅲ-2.7.9-9に照射量 1.3×10^4 (g/m^3) \cdot s で接合した試料界面の透過電子顕微鏡像を示す。試験片作成を良好に行うことが可能な強度を維持するため、本試料については 200°C で接合実験を行った。(a)から、界面にはボイドが散見されるものの、接合達成部はアモルファス状の架橋層を介して密着が進行している様子が確認された。また、(b)に全体像を示したように、Fe-Tiの組合せについても一定の接合強度が得られている。



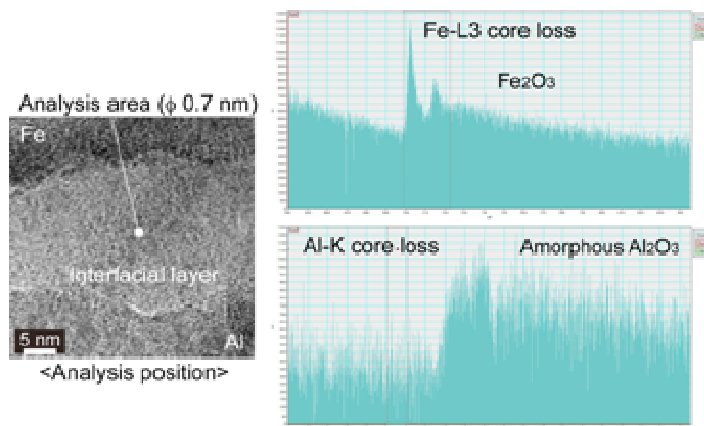
(a) 照射量 1.3×10^4 (g/m^3) \cdot s で接合された Fe-Al 試料界面の TEM 像



(b) Fe/Ti の接合体

図Ⅲ-2.7.9-9 各試料の接合事例

図Ⅲ-2.7.9-10にFe-Al界面でのアモルファス状架橋層中央部における電子エネルギー損失分光測定（EELS）スペクトルを表す。観察部位は、左図の白丸部であり、架橋層中心部分（径 0.7nm）とした。架橋層内部からはFe、Alが検出され、その結合状態は、The EELS Databaseと照合した結果、それぞれの酸化物であることが判明した。これは、当初想定していた通りに、水和物架橋の脱水縮合が進行し、界面の構造が安定化したことを示唆する。以上のことから、vapor combined VUV手法により異種金属材料接合が達成可能であることが示された。



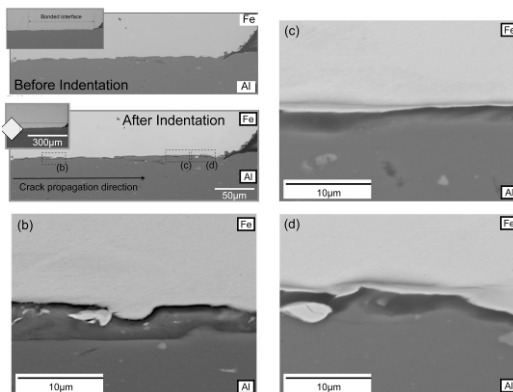
図Ⅲ-2.7.9-10 接合試料の界面架橋皮膜層の化学的構造を示す電子エネルギー損失分光スペクトル

(3).5 接合界面のメカニクス評価

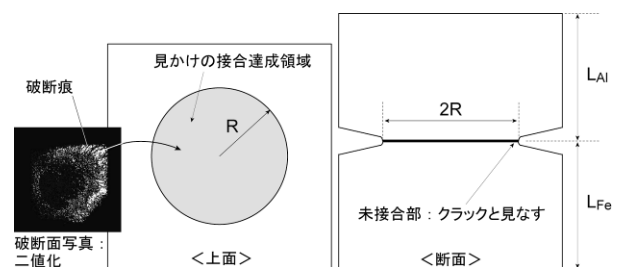
実試料の接合界面には表面の凹凸に起因した非接触領域が含まれるため、実際に接合が達成された部分の強度を評価する方法を考案した。図Ⅲ-2.7.9-11は、Al-Fe接合界面上にナノインデントを1kgfで圧下し、界面の剥離挙動を観察した結果である。インデント圧下後は接合界面に沿って、主にAl側で破断が進展した様子が確認された。この状態を念頭に置き、接合状態の簡単なモデル構造を図Ⅲ-2.7.9-12に示す。破断面の光学顕微鏡写真に画像処理（2値化）を施し、破断痕跡部分を見かけの接合達成領域として、面積を抽出する。同面積の円状の接合達成領域が試料中央に存在し、未接合部を既存クラックとした構造を仮定し、引張試験においてその両端から破断が進展するものとする。クラック先端における塑性変形領域の拡大を無視し、破断に要したエネルギーが全て破断面の創製に用いられたとして、この見かけの接合領域の半径をR、Fe、Al試料片厚さをそれぞれ L_{Fe} と L_{Al} 、破断荷重をPとするとき、 σ は荷重Pを見かけの接合達成領域面積Sで割った値と定義する。この条件下で、接合部と未接合部を含む見かけの接合界面のひずみエネルギー開放率 Γ_i を考える。このような仮定のもとで、接合部と未接合部を含む見かけの接合界面のひずみエネルギー開放率 Γ_i は以下のように表現できる。

$$\Gamma_i \approx \frac{\sigma^2}{4} \left(\frac{L_{Al}}{E_{Al}} + \frac{L_{Fe}}{E_{Fe}} \right)$$

実験結果にこの式を適用して求められる Γ_i は接合部の値 Γ_{real} とある定数 Ω を用いて $\Gamma_i = \Omega \cdot \Gamma_{real}$ と表現される。ここで、 $0 < \Omega < 1$ である。また、 E_{Al} と E_{Fe} はAlとFeのヤング率で、それぞれ $7 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ ならびに $1.5 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ である。Vapor combined VUV手法により接合された試料については試料数がまだ少ないため、計算には便宜的に高速原子ビーム衝撃を利用した試料の引張試験結果($P=60\text{N}$)を引用した。見かけの接合面積は材料表面のうねりなどに起因して初期接触状態が異なるため均一ではないが、概ね板材試料表面の5%程度を占めることがわかっているため、 $S=5\text{mm}^2$ とした。引張試験は、板状試料をおよそ50mm長のAl角棒に接着して行われているため、 L_{Fe} と L_{Al} の解釈についてばらつきが生じるが、試料厚さが変化しても界面の破断エネルギーに顕著な違いが生じていないことを考慮し、試料と角棒を一体と見なして $L=50\text{mm}$ とすると、 Γ_i の値は約40N/mで、実際の破断面の値は0.1程度であることから、 Γ_{real} の値はおよそ400N/mと見積られる。この値は、親水化アルミ酸化物（酸化水酸化物）もしくはアルミの固体表面エネルギーと同じオーダーである。したがって、これらの単一相材料を剥離し、二つの表面を創製するための凝集仕事と同等と推測できる。なお、実験より求めた不安定剥離挙動が開始したときの荷重を利用しているために、剥離エネルギー開放率を過小評価している可能性がある。図III-2.7.9-11に示したように、界面クラックの進展は主にAl側であることから、求められた破壊エネルギーは妥当で、接合部では十分な強度が得られていると考えられる。この実験以外にも同様の接合手法を用いてTiとFe系の材料の接合を試みたところAlとFeの場合と同じような良好な接合が得られることが確認された。この場合の接合はAlとFe同様に水酸化物が支配していると考えられる。しかし、この事実を証明するためにはAlとFe系同様に剥離のエネルギー開放率を求めて評価することが必要である。



図III-2.7.9-11 ナノインデンタを圧下した Al-Fe 接合界面近傍の拡大像



図III-2.7.9-12 接合達成領域の簡易モデル

(3).6 まとめ

異種金属接合プロセスの全工程を低温大気圧雰囲気で行うために、水分子含有雰囲気での真空紫外光照射を利用する手法を提案し、接合可能性を示した。解離した水分子の作用により、大気圧雰囲気での一定の表面活性化と水和物架橋形成が可能であることが明らかになり、材料表面の化学的結合状態の観察結果から、最適プロ

セス条件が照射量およそ 1.0×10^4 (g/m³)・sであることが明らかになった。この条件を用いてAl、Fe、Tiの接合実験を試みたところ、接合ができることは確認され、Al-Fe界面においては、水和物が脱水縮合して生成したアモルファス状の酸化物中間層を介して密着が進行していることが判明した。接合界面全域で接合が達成されておらずマクロ的には、十分な強度は得られていないものの、部分的には本接合での接合が達成されている。その部位の接合強度を考察する方法を考案し、Fe-Al試料の実測値に対し適用したところ、破断エネルギーがAl架橋もしくはAlの離断に要するエネルギーと同等であり、実際に接合できている部位では十分な強度が達成されていることがわかった。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.9-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
H27FY	0	0	1	0	0	0	0	0	1
H28FY	0	0	0	0	1	0	0	0	0
合計	0	0	1	0	1	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）

(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）

表Ⅲ-2.7.9-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	0	0	0
H28FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.10[テーマ番号 46] 中高炭素鋼／中高炭素鋼の摩擦接合共通基盤研究

2.7.10.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車の次世代構造材として期待される $C > 0.3\%$ 以上の中高炭素鋼は、冷却時に変態を伴って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とされる。

代表的な非溶融接合の一つである摩擦攪拌接合においても、オーステナイト温度域で接合した際には、同様に変態に伴う材料の脆化が生じる。加えて、鉄鋼材料等の融点の高い材料に対しては、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。このような難接合材の総合的な摩擦接合技術の確立を各機関一体となって実施するため、第2期より大阪大学接合科学研究所に新拠点を設けて研究開発を開始した。

(2)位置付け、目標値

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、中高炭素鋼に適用できる革新的な固相摩擦接合技術を開発する。第2期より、大阪大学接合科学研究所に新拠点を設けて研究開発を開始した。

鉄鋼三社や他の再委託先等との連携を深め、線形摩擦接合、線形摩擦攪拌接合、摩擦攪拌接合、両面複動式摩擦攪拌接合等の技術を開発、高度化することにより、これまで接合が困難であった、 $C > 0.3\%$ 以上の中高炭素鋼の接合を可能にする技術を確立する。以下に、第2期目標および最終目標を示す。

【第2期目標（平成29年度末）】

(a) 重ね摩擦接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.5mm、強度 1.2GPa 級中高炭素鋼で、引張せん断試験で継手効率 70%以上

(b) 突合せ摩擦接合技術開発

- ・接合強度：厚み 2mm、強度 1.2GPa 級中高炭素鋼で、母材強度の 70%以上

【最終目標（平成34年度末）】

(a) 重ね摩擦接合技術開発

- ・接合強度：厚み 1.5mm、強度 1.5GPa 級中高炭素鋼で、引張せん断試験で継手効率 70%以上

(b) 突合せ摩擦接合技術開発

- ・接合強度：厚み 2mm、強度 1.5GPa 級中高炭素鋼で、母材強度の 70%以上

【研究開発概要】

上記目標を達成するための研究開発概要を以下に示す。

(a) 重ね摩擦接合技術開発

- ・ 両面複動式（フラット）摩擦攪拌接合法の開発

鉄鋼材料の摩擦攪拌接合では、ツールの耐久性を向上させるため、プローブ部に応力の集中を伴うネジをつけないのが一般的である。プローブ部にネジを付与しなくても、重ね接合において、上下の流れを発生させることのできる両面複動式摩擦攪拌接合法を開発する。

- ・ 共通材料の重ね摩擦攪拌接合法の開発・最適化

厚さ 1.5mm 程度の S35C、S45C、S55C などの共通中高炭素鋼試料に重ね摩擦攪拌接合を実施し、平成 29 年度までに、強度 1.2GPa 級中高炭素鋼で、引張せん断試験で継手効率 70%以上を達成する。

(b) 突合せ摩擦接合技術開発

- ・ 線形摩擦攪拌接合法の開発

線形摩擦接合法の原理を活用し、界面近傍に大きなひずみを導入できる線形摩擦攪拌接合法を開発する。これまでの摩擦による軟化・バリの排出に伴う新生面の形成に伴う接合ではなく、強ひずみ加工に伴う再結晶温度の低下によって、低温で接合できる技術を開発する。

- ・ 共通材料の突合せ摩擦攪拌接合法の開発・最適化

厚さ 2mm 程度の S35C、S45C、S55C などの共通中高炭素鋼試料に、突合せ摩擦攪拌接合を実施し、平成 29 年度までに、強度 1.2GPa 級中高炭素鋼で、母材強度の 70%以上を達成する。

【研究開発項目】

上記に示した研究開発概要について具体的な研究開発項目を表Ⅲ-2.7.10-1 に示す。

表Ⅲ-2.7.10-1 研究開発項目

研究開発項目	実施内容	担当	目標との対応
①両面複動式（フラット）摩擦攪拌接合法の開発	プローブ部にネジを付与しなくても、重ね接合において上下の流れを発生させることのできる両面複動式摩擦攪拌接合装置の設計をする。	ISMA、新日鐵住金 ／阪大	(a)
②線形摩擦攪拌接合法の開発	導入した線形摩擦接合法の装置を用いて、界面近傍に大きなひずみを導入できる線形摩擦攪拌接合法を開発する。	ISMA、新日鐵住金 ／阪大	(b)
③X線透過装置を用いた摩擦攪拌接合の塑性	X線透過観察装置を用いて、摩擦攪拌接合における塑性流	JEF スチール ／阪大	(a) (b)

流動基礎解析	動解析を行う。		
④継手特性に及ぼす金属組織の影響解明	共通中高炭素鋼試料を用いて摩擦攪拌接合を実施し、接合部の組織を調査する。	新日鐵住金、JFE スチール、神戸製鋼所／阪大、再委託先	(a) (b)
⑤ツール設計によるFSW 特性向上技術の基礎検討	従来のアルミ合金用の摩擦攪拌接合用ツールや刃物等の形状を参考にしながら、ツール形状の最適化に取り組む。	神戸製鋼所／再委託先	(a) (b)
⑥溶接残留応力の影響解明	中高炭素鋼試料を用いた摩擦攪拌接合の実継手と、数値シミュレーションで得られた結果の整合性を検証する。	新日鐵住金／再委託先	(a) (b)
⑦摩擦攪拌接合の数値解析技術の開発	中高炭素鋼試料を用いて摩擦攪拌接合を実施するとともに、粒子法を用いた解析モデル検討し、提案する。	新日鐵住金／再委託先	(a) (b)

以下に本開発の開発目標を示す。

表Ⅲ-2.7.10-2 研究開発目標と根拠

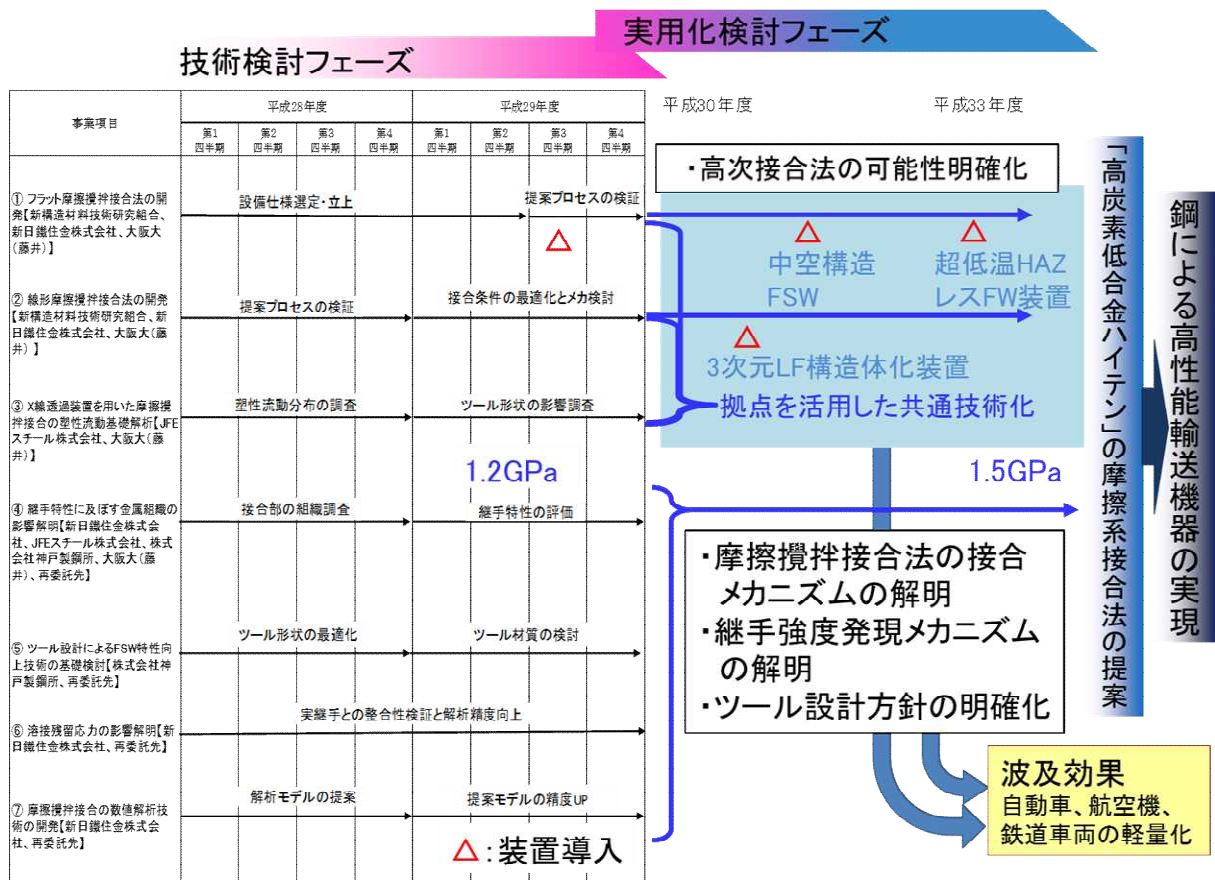
研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
研究テーマ目標	—	(a) 重ね摩擦接合技術開発 接合強度：厚み 1.5mm、強度 1.2GPa 級中高炭素鋼で、引張せん断試験で継手効率 70%以上 (b) 突合せ摩擦接合技術開発 接合強度：厚み 2mm、強度 1.2GPa 級中高炭素鋼で、母	(a) 重ね摩擦接合技術開発 接合強度：厚み 1.5mm、強度 1.5GPa 級中高炭素鋼で、引張せん断試験で継手効率 70%以上 (b) 突合せ摩擦接合技術開発 接合強度：厚み 2mm、強度 1.5GPa 級中高炭素鋼で、母	継手強度の評価基準として、JIS 規格相当を採用。

		材強度の 70%以上	材強度の 70%以上	
①両面複動式（フラット）摩擦攪拌接合法の開発 （ISMA、新日鐵住金、阪大）	—	装置を導入し、強度 1.2GPa 級中高炭素鋼で、引張せん断継手効率 70%以上の手法確立。	強度 1.5GPa 級中高炭素鋼で、引張せん断継手効率 70%以上を得る手法を確立。	継手強度の評価基準として、JIS 規格相当を採用。
②線形摩擦攪拌接合法の開発 （ISMA、新日鐵住金、阪大）	—	厚さ 5mm 以下の強度 1.2GPa 級中高炭素鋼で、母材強度の 70%以上を得る。	厚さ 2mm の強度 1.5GPa 級中高炭素鋼で、母材強度の 70%以上を得る手法を確立。	継手強度の評価基準として、JIS 規格相当を採用。
③X 線透過装置を用いた摩擦攪拌接合の塑性流動基礎解析（JFE スチール、阪大）	—	攪拌部の塑性流動に関する基礎データを採取するとともに、ツール形状の影響を調査する。	高次摩擦接合プロセスにおける塑性流動解析。	塑性流動解析による現象解明。
④継手特性に及ぼす金属組織の影響解明（新日鐵住金、JFE スチール、神戸製鋼所、阪大、再委託先）	—	S35C、S45C、S55C などの共通中高炭素鋼試料を用いて摩擦攪拌接合を実施し、継手特性の評価を行い、組織等との関連を調査する。	1.5GPa 級中高炭素鋼の継手特性に及ぼす金属組織の影響の把握。	摩擦接合の基礎特性把握。
⑤ツール設計による FSW 特性向上技術の基礎検討 （神戸製鋼所、再委託先）	—	ツール形状を最適化し、最適なツール材質を検討する。	ツール設計方針の明確化。	継手特性向上。
⑥溶接残留応力の影響解明（新日鐵住金、再委託先）	—	摩擦攪拌接合の実継手との整合性を検証し、CAE 解析精度の向上を図る。	1.5GPa 級中高炭素鋼の継手特性に及ぼす残留応力の影響を把握。	継手の信頼性の確保。
⑦摩擦攪拌接合の数値解析技術の開発（新日鐵住金、再委託先）	—	摩擦攪拌接合を実施するとともに、粒子法を用いた提案モデルの精度を向上させ、塑性流動を予測する。	新接合プロセスのシミュレーション手法の構築。	プロセスメカニズムの解明。

(3)全体計画

平成 29 年度末までを技術検討フェーズとして、高次接合法（線形摩擦攪拌接合法、フラット摩擦攪拌接合法）装置を導入するとともに、大阪大学接合科学研究所に新拠点を設けた。平成 30 年度以降、引き続き、新規接合法を開発するとともに、実用化検討フェーズとして、新接合法プロセスの開発および高次接合法の可能性明確化を行ない、接合ソリューション技術を充実させるとともに、拠点を活用した共通技術化を行なう。また、摩擦攪拌接合法の接合メカニズム、継手強度発現メカニズム解明、ツール設計方針の明確化を行なう。以下に表Ⅲ-2.7.10-3 に全体計画を示す。

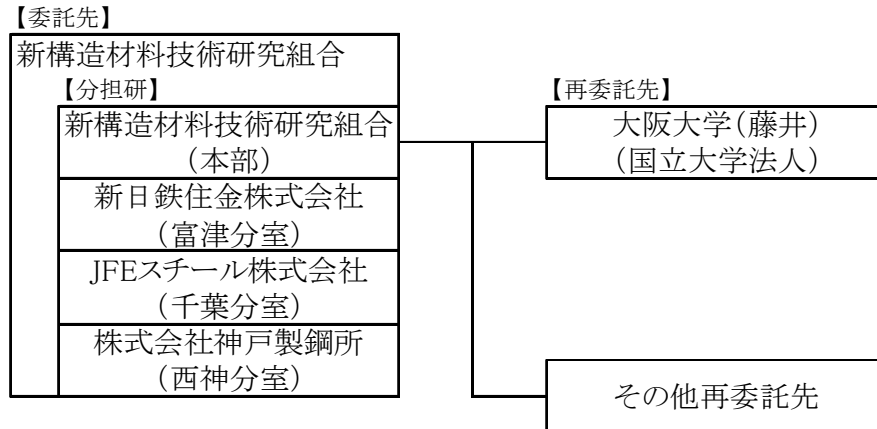
表Ⅲ-2.7.10-3 全体計画



(4)実施体制

第2期より大阪大学接合科学研究所に新拠点を設け、鉄鋼三社、ISMA（本部）及び他の再委託先の4大学との連携を深め、中高炭素鋼に適用できる革新的な固相摩擦接合技術の研究開発を開始した。表Ⅲ-2.7.10-4に実施体制のまとめを示す。

表Ⅲ-2.7.10-4 実施体制



(5)運営管理

委託先、再委託先が一同に介し、研究推進合同会議を開催(年4回)し、本会議にて、最新の技術進捗、実験計画の細目確認を連携しながら運営を実施する。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

CO₂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、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。また、本技術の中高炭素鋼への適用により、これまでに使用されているハイテン鋼（低炭素鋼合金ハイテン鋼）を『高炭素低合金ハイテン鋼』に置き換えることができ、製鉄業におけるCO₂排出量を大幅に低減させることができる。

2.7.10.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.10-5 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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両面複動式（フラット）摩擦攪拌接合法の開発 （ISMA、新日鐵住金、阪大）	装置を導入し、強度 1.2GPa 級中高炭素鋼で、引張せん断継手効率 70%以上の手法確立。	両面複動式摩擦攪拌接合法の設計した。	△	
②線形摩擦攪拌接合法の開発 （ISMA、新日鐵住金、阪大）	厚さ 5mm 以下の強度 1.2GPa 級の中高炭素鋼で、母材強度の 70%以上を得る。	界面近傍に大きなひずみを導入できる線形摩擦攪拌接合法を開発するとともに、厚さ 3mm 以下の継手作製に成功し、第 2 期の目標を達成した。	◎	
③X 線透過装置を用いた摩擦攪拌接合の塑性流動基礎解析（JFE スチール、阪大）	攪拌部の塑性流動に関する基礎データを採取するとともに、ツール形状の影響を調査する。	塑性流動分布について調査し、流動層ではツール近傍と攪拌部の端を除いて殆どひずみを受けないことを明らかとした。	○	
④継手特性に及ぼす金属組織の影響解明（新日鐵住金、JFE スチール、神戸製鋼所、阪大、再委託先）	S35C、S45C、S55C などの共通中高炭素鋼試料を用いて摩擦攪拌接合を実施し、継手特性の評価を行い、組織等との関連を調査する。	共通中高炭素鋼試料の摩擦攪拌接合を実施し継手の評価を行い、組織との関連を調査した。	○	
⑤ツール設計による FSW 特性向上技術の基礎検討（神戸製鋼所、再委託先）	ツール形状を最適化し、最適なツール材質を検討する。	ツール形状の僅かな変更でも攪拌能力向上への効果が大きいことを明らかにした。	○	
⑥溶接残留応力の影響解明（新日鐵住金、再委託先）	摩擦攪拌接合の実継手との整合性を検証し、CAE 解析	摩擦攪拌接合の残留応力・組織分布解析技術を確立した。	○	

	精度の向上を図る。			
⑦摩擦攪拌接合の数値解析技術の開発（新日鐵住金、再委託先）	摩擦攪拌接合を実施するとともに、粒子法を用いた提案モデルの精度を向上させ、塑性流動を予測する。	ツールの挿入プロセスにおけるツール形状および挿入角度の影響のモデル化を行った。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.10-6 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
①両面複動式（フラット）摩擦攪拌接合法の開発（ISMA、新日鐵住金、阪大）	両面複動式摩擦攪拌接合装置の設計し、装置導入を開始した。	強度 1.5GPa 級中高炭素鋼で、引張せん断継手効率 70%以上を得る手法を確立。	達成見込み
②線形摩擦攪拌接合法の開発（ISMA、新日鐵住金、阪大）	界面近傍に大きなひずみを導入できる線形摩擦攪拌接合法を開発した。厚さ 5mm での継手強度評価し、第 2 期の目標を達成した。	厚さ 2mm の強度 1.5GPa 級中高炭素鋼で、母材強度の 70%以上を得る手法を確立。	達成見込み
③X 線透過装置を用いた摩擦攪拌接合の塑性流動基礎解析（JFE スチール、阪大）	塑性流動分布について調査し流動層では殆どひずみを受けないことを明らかとした。	高次摩擦接合プロセスにおける塑性流動解析。	達成見込み
④継手特性に及ぼす金属組織の影響解明（新日鐵住金、JFE スチール、神戸製鋼所、阪大、再委託先）	共通中高炭素鋼試料の摩擦攪拌接合を実施し継手の評価を行い、組織との関連を調査した。	1.5GPa 級中高炭素鋼の継手特性に及ぼす金属組織の影響の把握。	達成見込み
⑤ツール設計による FSW 特性向上技	ツール形状の僅かな変更でも攪拌能力向上への効果が大きいことを	ツール設計方針の明確化。	達成見込み

術の基礎検討（神戸製鋼所、再委託先）	明らかにした。		
⑥溶接残留応力の影響解明（新日鐵住金、再委託先）	摩擦攪拌接合の残留応力・組織分布解析技術を確立した。	1.5GPa 級中高炭素鋼の継手特性に及ぼす残留応力の影響を把握。	達成見込み
⑦摩擦攪拌接合の数値解析技術の開発（新日鐵住金、再委託先）	ツールの挿入プロセスにおけるツール形状および挿入角度の影響のモデル化を行った。	新接合プロセスのシミュレーション手法の構築。	達成見込み

(3)研究開発の成果と意義

①両面複動式（フラット）摩擦攪拌接合法の開発

FSW ツールの耐久性を向上させるため、プローブ部にネジを付与しなくても、重ね接合において上下の流れを発生させることのできる両面複動式摩擦攪拌接合装置を設計した。

②線形摩擦攪拌接合法の開発

導入した線形摩擦接合装置を用い、供試材として厚さ 5mm の中炭素鋼 S45C の板材を接合した。その結果、摺動周波数を低下させるか、印加圧力を高めると、最高到達温度が低下することが分かった。従来の線形摩擦接合法では、接合部に脆化の原因となるマルテンサイトが生成していたが、本研究により、 A_1 点以下の低温度域になる接合条件を選定することで、接合部に微細フェライトおよび球状化セメンタイトの組織から成る継手を作製できることを明らかにした。得られた接合部における組織の平均結晶粒径は約 $1\mu\text{m}$ であり、母材の結晶粒と比べて非常に微細化され、マルテンサイト変態を伴わない低温域で接合可能な線形摩擦接合法の開発に成功した。

③X 線透過装置を用いた摩擦攪拌接合の塑性流動解析

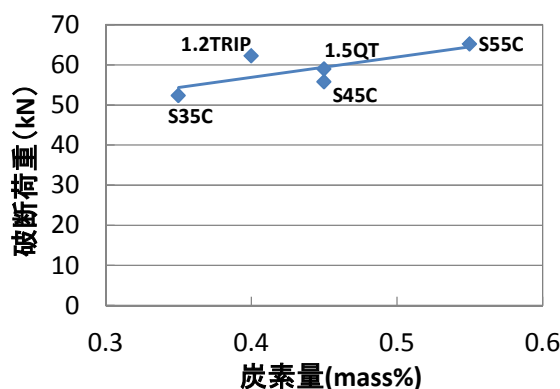
X 線透過観察装置を用いて、摩擦攪拌接合中の塑性流動解析を行い、速度分布および角速度分布を調べた。供試材には板厚 2mm の異なる 2 種類の鋼板（S55C および JSH440）を用いた。解析結果から、S55C の角速度は低炭素鋼の約 1/7 程度の値であること、S55C の材料流動がツールの回転に追従できていないことが分かった。これに対し、JSH440 の角速度はツール回転速度の増加に伴って低下するが 60~70% と高い値を示した。これらは、プロセス温度における鋼の変形抵抗に起因していると考えられる。

④継手特性に及ぼす金属組織の影響解明

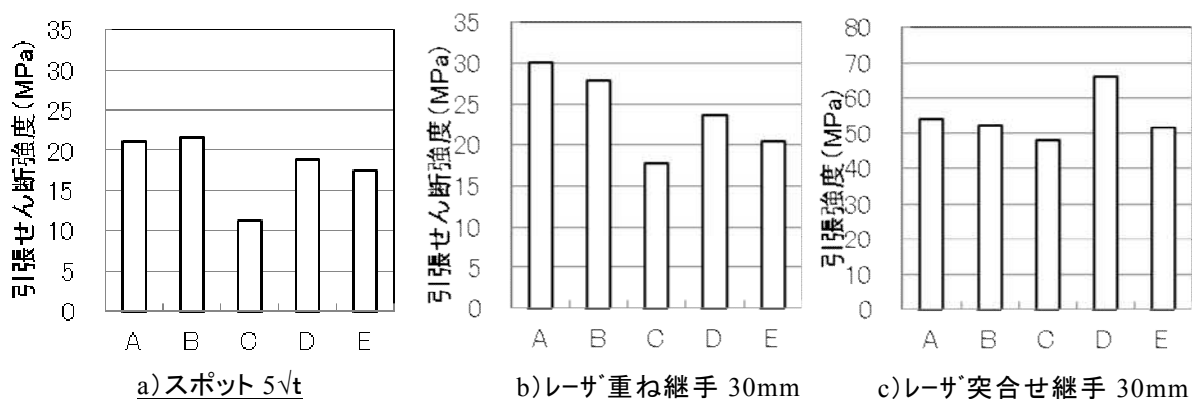
ISMA 共通鋼板は炭素量と圧延熱処理により、引張強度を調整している。表 III-

表Ⅲ-2.7.10-7 ISMA 共通鋼板の炭素量と引張強度・伸び

	炭素量(mass%)	引張強度(GPa)	伸び(%)
S35C鋼	0.37	1.26	8.0
S45C鋼	0.44	1.26	8.5
S55C鋼	0.55	1.25	9.4
1.2 TRIP鋼	0.41	1.22	26.1
1.5 QT鋼	0.46	1.59	5.9



図Ⅲ-2.7.10-1 引張せん断試験結果
(300 rpm-150 mm/min)



(A : 0.35C-1.2G、B : 0.45C-1.2G、C : 0.55C-1.2G、D : QT-1.5G、E : TRIP-1.2G)

図Ⅲ-2.7.10-2 ISMA 共通鋼板の継手強度評価結果

2.7.10-7 に示す S35C 鋼、S45C 鋼、S55C 鋼、1.2-TRIP 鋼、1.5-QT 鋼の 5 種の鋼板(板厚 1.4mm)を供試材料とした。

摩擦攪拌接合による突合せ継手の断面マクロ組織観察と継手引張試験を行った。ツールは WC 製でプローブ長 1.2mm、ショルダ径 12mm である。既存の 1.2GPa 級鋼板(C:0.13%)では健全な継手が得られると報告されている条件である回転数 200rpm、接合速度 200mm/min により突合せ接合を行った。

外観観察においては全鋼種の継手に欠陥は認められなかったものの、断面マクロ観察では S45C、S55C、1.2-TRIP において前進側の SZ と TMAZ の境界に明瞭な未接合欠陥が見られた。継手引張試験においては、全鋼種で継手効率が 6~28% となり、いずれも未接合欠陥から破断した。今後、中高炭素鋼での適正な接合条件を検討する。

摩擦攪拌接合による重ね継手を評価した。接合条件は荷重制御で、回転速度 600rpm、加圧力 35kN、接合速度 300mm/min を基準とし、回転速度 3 水準、接合速度

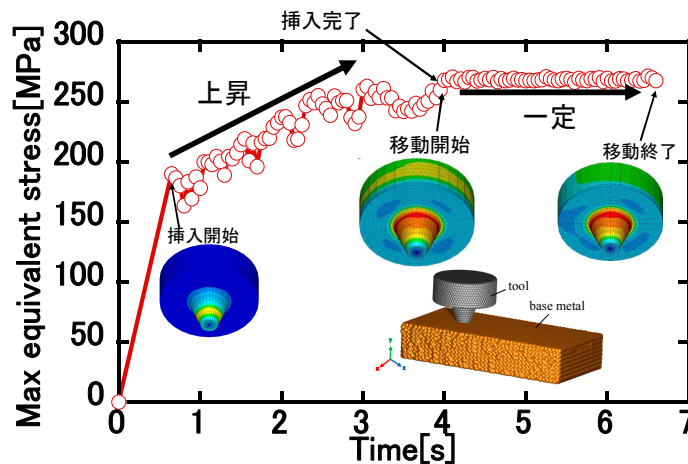
3 水準に変え接合実験を行った。その結果、欠陥が認められた条件もあったが、すべての材料で外観上欠陥のない継手が得られる条件を選定することができた。図Ⅲ-2.7.10-1 に引張せん断試験の結果を示す。それぞれの鋼種での破断荷重は、S35C : 52 kN、S45C : 55 kN、S55C : 65 kN、1.2-TRIP : 62 kN、1.5-QT : 59 kN となった。

抵抗スポット溶接、レーザ溶接を行い、その引張せん断強度と引張強度を評価した。供試鋼板から、30mm×150mm の板材を切り出し、スポット溶接ではナゲット径を $5\sqrt{t}$ (t :板厚)となるように溶接電流を調整した。レーザ溶接では、重ね溶接と突合せ溶接のいずれも溶接速度 4.0m/min で貫通溶接が得られるようにレーザ出力を調整した(ビード長 30mm、幅 1.0mm)。得られた試験結果を図Ⅲ-2.7.10-2 に示す。

S55C 鋼板の摩擦攪拌接合継手を作製し継手特性と金属組織を調べた。回転速度と接合速度をそれぞれ 100rpm-100mm/min、200rpm-100 mm/min、400rpm-100mm/min、400rpm-400mm/min に変化させ、入熱量の異なる継手を作製した。回転ツール材質は WC、ショルダ径は 12mm、プローブ径は 4mm として突合せ接合を行った。引張試験結果と EBSD で得られた攪拌部組織の相分布から、すべての条件で母材よりも引張強度が向上した。また、400rpm-100mm/min の条件で得られた継手では、引張強度が母材の 2 倍以上に向上し、伸びも比較的良好な傾向を示した。接合部組織の相解析の結果から残留 γ の形成が促進される傾向が示された。これらの結果は、中炭素鋼材でも、残留 γ の形成を効果的に利用することで強度・延性に優れた継手作製の可能性があることを示唆している。

⑤ ツール形状が摩擦攪拌効果に及ぼす影響

中高炭素鋼向けツール形状の指針を得るため、ツール形状としてプローブの先端形状とショルダ角度を変化させ、攪拌効果を調べた。攪拌領域の面積計測結果から、プローブ先端エッジ部がツールの攪拌能力に大きな影響を及ぼしていることが示唆された。また、ショルダ角度が小さい場合には攪拌領域面積が大きく、ショルダ角度の増大による過度な材料滞留、圧縮効果は攪拌作用を抑制すると考えられる。攪拌領域の硬さ分布から、プローブエッジ部がある場合に比較的低温で、プローブエッジ部がない場合に比較的高温であると考えられる。以上から、プローブ先端エッジ部の小曲率化およびショルダ角度の低角度化が有効であると考えられる。



図Ⅲ-2.7.10-3 ツール表面応力の時間的变化
(60mm/min、500rpm)

⑥溶接残留応力の影響解明

粒子法の一つである MPS 法と FEM を連成解析することで摩擦攪拌接合の力学シミュレーション手法を構築し、ツールに生じる応力について検討を行った。解析対象材料は A1100 材である。本手法では、まず MPS 解析により温度場および速度場を算出し、それらの値を基に FEM 節点上の変位量を算出した上で FEM 解析により応力を算出した。ツールの表面応力の時間的変化を図Ⅲ-2.7.10-3 に示す。本手法を用いることで、同図に示す様な過渡応力分布および過渡応力の履歴を得られることが分かった。この過渡応力分布は、ツールの破壊挙動と直結していると考えられ、この応力を低減する施工条件を解析により求めることで、ツール寿命向上に繋がると考えることができる。

⑦摩擦攪拌接合の数値解析技術の開発

アルミニウム合金を対象にツール形状および各種接合パラメータが塑性流動に及ぼす影響を検討した。その結果、ツール形状の影響が大きいことを確認した。また、ツールの回転速度は、母材の温度分布に大きな影響を与えることを計算から確認されたが、塑性流動域に関しては、大きな変化が認められなかった。これは、母材温度の上昇とともに粘性が大きく低下するため、ツール周辺で材料が空回りするような状況になっていると考えられる。このことから塑性流動域のサイズは、ツール形状に大きく依存することが考えられる。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.7.10-8 論文、外部発表等の件数（内訳）【平成29年3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			
H25FY	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H26FY	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H27FY	—	—	—	—	—	—	—	—	—
H28FY	1	2	13	2	0	1	0	4	1
合計	1	2	13	2	0	1	0	4	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）

(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）

表Ⅲ-2.7.10-9 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	—	—	—
H26FY	—	—	—
H27FY	—	—	—
H28FY	3	0	0
合計	3	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.7.11[テーマ番号 53] 構造材料用接着技術の開発

2.7.11.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車や航空機などの輸送機器の軽量化には、適材適所に異種材料を配置したマルチマテリアル構造が有望である。これを実現するには、プロセス温度が比較的低温で、変形が少なく、剛性を確保できる接着接合が適している。しかし、接着接合では接合強度や耐久性、生産性の観点で解決すべき問題が多い。本事業では、これらの課題を解決することにより、構造体接合法として実装できる信頼性の高い接着技術を確立することを目的とする。

(2)位置付け、目標値

「構造用接着技術に関する Feasibility Study」の結果に基づいて、接着メカニズムの解明と、接着剤、強度・耐久性評価法、表面処理法、接合部検査手法を一体で開発することとした。主に自動車車体の構造材料用の接着技術の実用化を想定して、十分な強度・耐久性と信頼性が担保された接着技術を開発する。

表Ⅲ-2.7.11-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
接着性能	—	引張せん断強度 10MPa 以上	引張せん断強度： 15MPa 以上もしくは は母材破壊。	難接着材料 も被着対象 に含まれる ため。
接合部検査手法			高感度化 2 倍以 上	接着強度に ほぼ影響を 与えない欠 陥が検出可 能。

(3)全体計画

電子顕微鏡を用いて接合特性に関与する界面層を特定し、界面層に含まれる階層構造を明らかにする。また、表面・界面に敏感な分光法とイメージング技術などの分光学的手法を組み合わせ、界面の分子結合状態および化学構造変化を同定する手法を開発するとともに、接着界面に関する分子シミュレーションを実施し、接着メカニズムの解明を図る。構造体接合に実装できる接着技術を実現するため、各種構造材料の接合を対象とする接着剤の技術開発と基礎研究を実施する。耐疲労性や、強度、のびなど諸物性を用途ごとに制御した接着剤の開発を行う。接着接合の強度・耐久性の評価法は十分に確立されていないことから、接着接合部の強度評価法および耐久性予測法と接合部の設計手法を確立する。これらの結果を総合して、接合部の強度予測法並び

に耐久性予測法を構築する。金属および樹脂材料の表面処理技術に関する基礎的検討を実施し、有望な系の洗い出しを行なう。接着接合を実装するためには、接合部の性能を評価できる検査手法の確立が必須である。本研究開発項目では、接着前後での検査手法を開発する。

(4)実施体制

国立研究開発法人産業技術総合研究所（組合員）と7機関と共同で研究開発を実施する。なおユーザー企業や大学等の専門家からなる技術委員会（アドバイザリーボード）を開催し、内容や進捗について議論しながら研究を進める。

(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・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

特記事項無し。

2.7.11.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.7.11-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
接着性能	引張せん断強度 10MPa 以上	未実施	△	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.7.11-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
接着性能	未実施	引張せん断強度： 15MPa 以上もしくは は母材破壊。	△
接合部検査手法	未実施	高感度化 2 倍以上	△

(3)研究開発の成果と意義

特記事項無し。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

Hyou3-2.7.11-4

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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H27FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H28FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
合計	0	0	0	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）

(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）

表Ⅲ-2.7.11-5 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
H27FY	0	0	0
H28FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8 戦略・基盤研究

2.8.1 [テーマ番号 29] 新構造材料の技術・研究戦略

2.8.1.1 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)位置付け、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Ⅲ-2.8.1-1 に開発目標と根拠を示す。

表Ⅲ-2.8.1-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
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。	同左	同左	プロジェクトにおいては、必要に応じて材料分野個別毎・分野横断の双方での研究課題・体制の見直しが不可欠であり、定常的な調査、およびそれに基づく研究戦略の策定が肝要である。

(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セ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

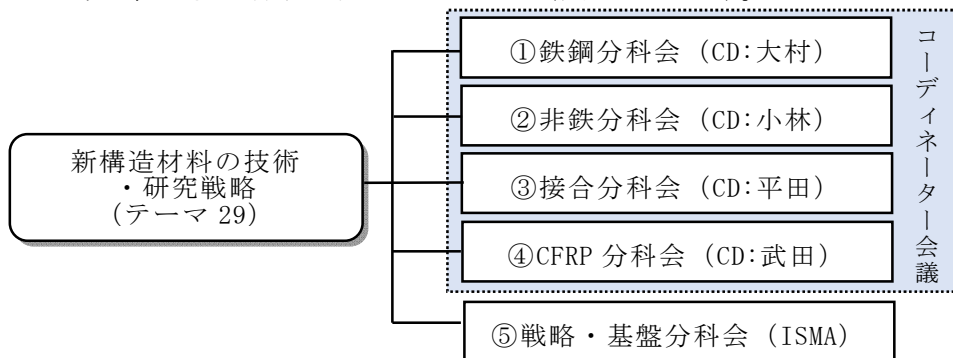
構造材料用接着技術および中性子線適用化技術について、各研究課題関係者や外部有識者からなる技術調査委員会を開催し、FS 研究の円滑な立上げに繋げる。

表Ⅲ-2.8.1-2 開発スケジュール

事業内容	平成 25 年度	平成 26 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ている（図Ⅲ-2.8.1-1）。



図Ⅲ-2.8.1-1 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ている。

表Ⅲ-2.8.1-3 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	大学院工学研究員 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、平成 27 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、25、26 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Ⅲ-2.8.1-4、表Ⅲ-2.8.1-5 に平成 27 年度各ステアリング委員会委員リストを示す。

表Ⅲ-2.8.1-4 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Ⅲ-2.8.1-5 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（平成 27 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、平成 27 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、28 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。

2.8.1.2 研究開発成果（本テーマは平成 26 年度で終了し、平成 27 年度よりテーマ番号 41 から 45 に再編して実施している）

(1) 中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.1-6 に中間目標の達成度を示す。

表Ⅲ-2.8.1-6 第一中間目標と達成度

研究開発項目	第一中間目標 (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。	・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。 ・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。	○	
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、平成 27 年度より FS 研究としてスタートした。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

本テーマは、平成 26 年度で終了し、平成 27 年度よりテーマ番号 41 から 45 に再編して実施した。

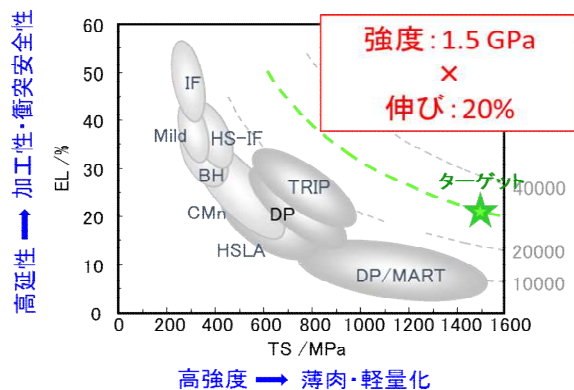
(3)研究開発の成果と意義

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、平成 27 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。

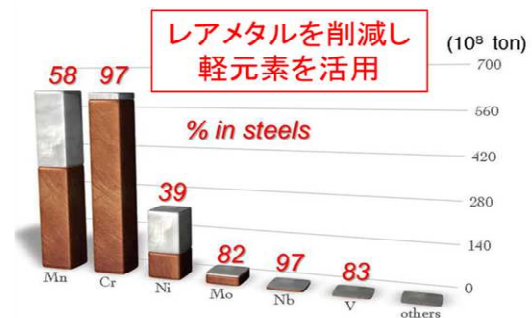
自動車用薄鋼板等の強度・靱性バランス向上



(1) 組織制御技術開発

- ・軽元素の有効利用による粒界強化
- ・ γ - α' 複相形態制御による複相化
- ・残留 γ 中炭素量の高度制御による強靱化

競争課題



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)

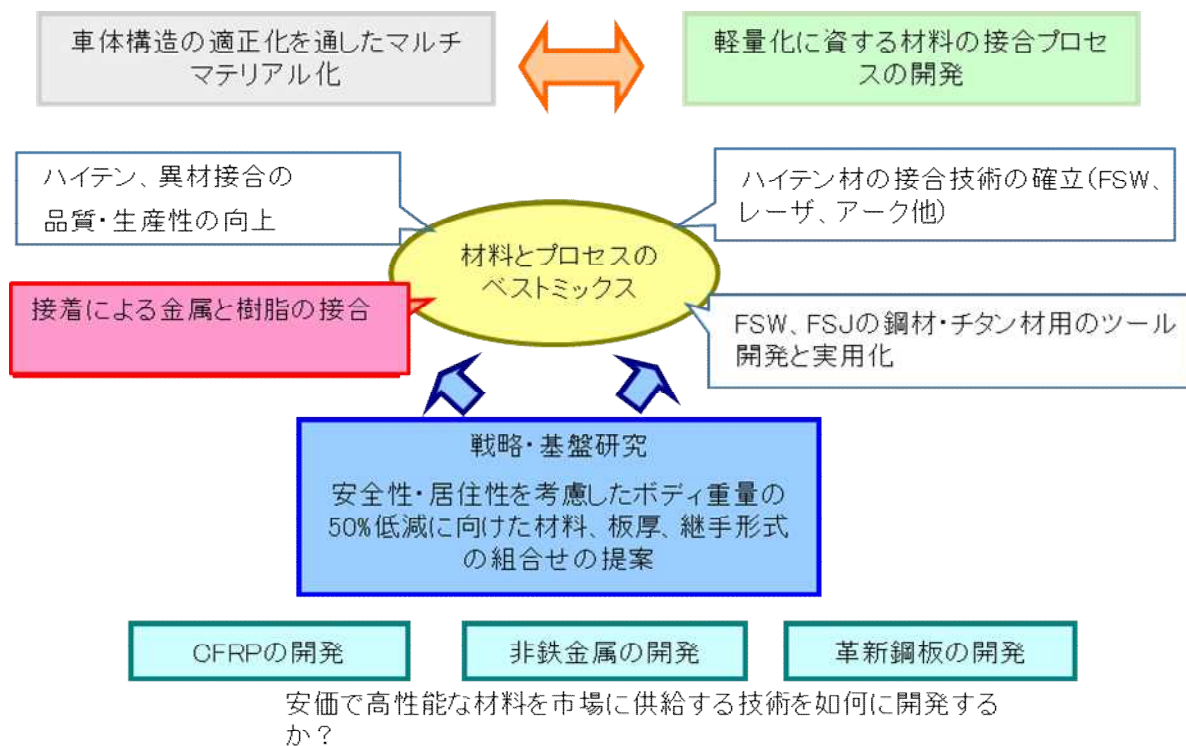
(2) 機構解明技術開発

- ・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

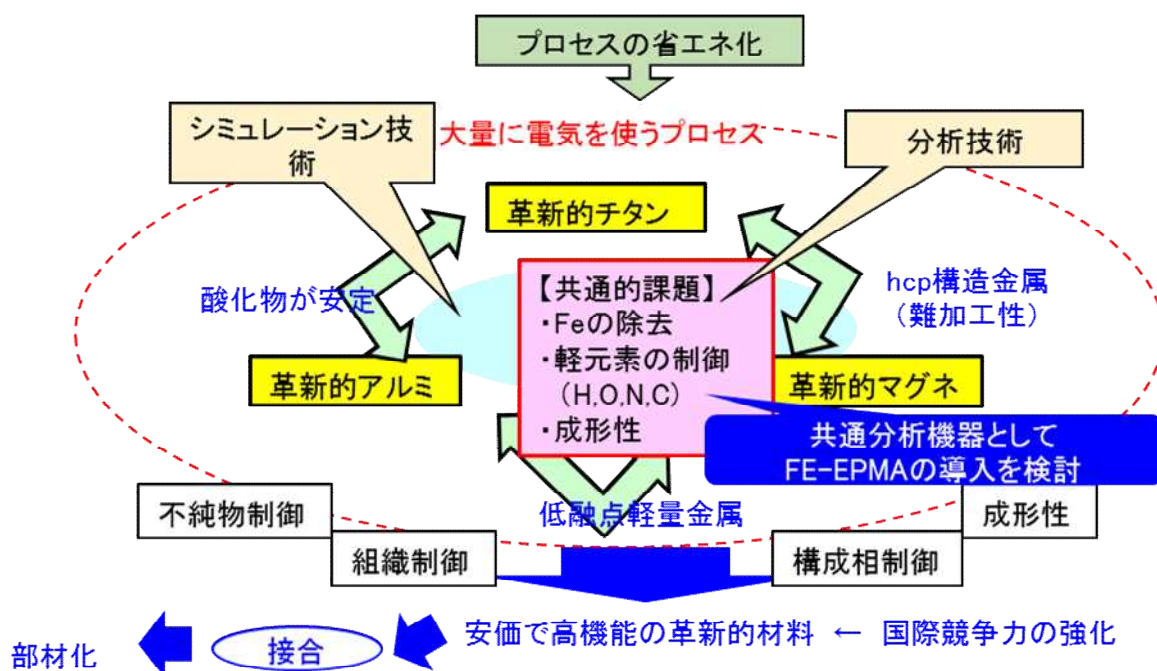
協調課題

図 III-2.8.1-2 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Ⅲ-2.8.1-3 協調課題の抽出（接合分科会）



図Ⅲ-2.8.1-4 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

組む手段として先ずは、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らながら進めた。

表Ⅲ-2.8.1-7 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Ⅲ-2.8.1-5、図Ⅲ-2.8.1-6、図Ⅲ-2.8.1-7 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.ICarbon)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Ⅲ-2.8.1-5 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としており、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Ⅲ-2.8.1-6 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)

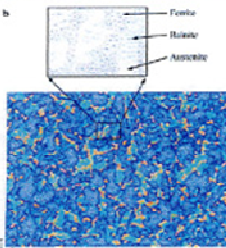
- Insufficient strength in conventional automotive alloys
- Limited room temperature formability in conventional automotive alloys
- Difficult to join/integrate to incumbent steel structures



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) 2592-2604

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Ⅲ-2.8.1-7 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、平成 27 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Ⅲ-2.8.1-8、図Ⅲ-2.8.1-9 に示す。

中高温域での材料組織制御技術の確立が重要なポイント

（間接的確認）→ 直接的確認



組織解析結果（常温） → 実製造プロセス（高温）

↑ 定性 → 定量

製造プロセスシミュレーション

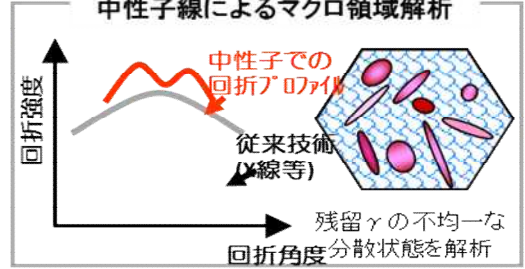
局所とマクロ組織の高温特性に関する定量データの取得が材料開発のキーポイント

中高温域での新たな材料組織挙動の解明に資する材料工学的な定量計測データを取得できる体制の構築

- 中炭素鋼の中高温域組織変化のその場観察装置の開発
- ミクロ局所とマクロ平均計測値の融合とマルチスケール科学

中性子線によるマクロ領域解析

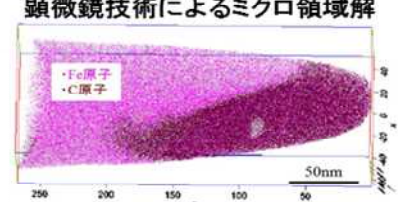


中性子での回折プロファイル

従来技術（X線等）

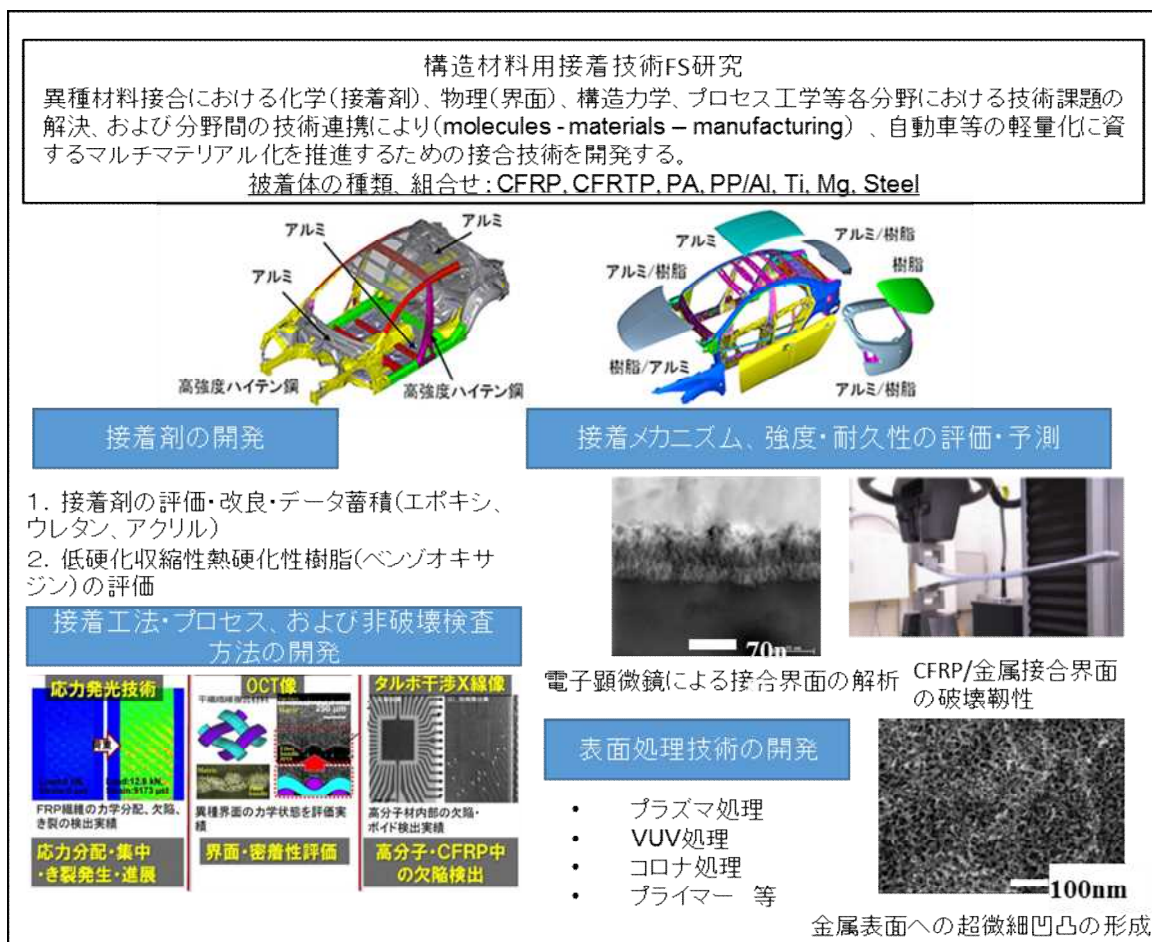
残留γの不均一な回折角度分散状態を解析

顕微鏡技術によるミクロ領域解



個々の組織における組織を解析

図Ⅲ-2.8.1-8 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Ⅲ-2.8.1-9 構造材料用接着技術

これら FS 研究は、平成 27 年度に研究課題を絞り込み、28 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。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.1-8 論文、外部発表等の件数（内訳）

【平成 27 年 3 月末現在】

区分	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			
年度									
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	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）

(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）

表Ⅲ-2.8.1-9 特許の件数（内訳） 【平成27年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.2[テーマ番号 30] 技術動向調査分析

2.8.2.1 テーマの概要

(1)背景と目的

【平成 25、26 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する。

【平成 27 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する。

(2)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.8.2-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
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	(本事業後期 5 カ年計画の技術開発戦略策定への提言)	(次期プロジェクトとロードマップ策定への提言)	

(3)全体計画

平成 25 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)

平成 26 年度は、上記 A、B、C の 3 分野について、平成 25 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、平成 25 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。

平成 27 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、平成 26 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する。

(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・CO₂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。

2.8.2.2 研究開発成果（本テーマは平成 26 年度で終了し、平成 27 年度よりテーマ番号 41 から 45 に再編して実施した）

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.2-2 第一中間目標と達成度

研究開発項目	第一中間目標 (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
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)	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。 (平成 25,26 年度)	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

本テーマは、平成 26 年度で終了し、平成 27 年度よりテーマ番号 41 から 45 に再編して実施した。

(3)研究開発の成果と意義

①技術調査対象分野と調査方法

技術動向調査は平成 25 年度と 26 年度は、表Ⅲ-2.8.2-3 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Ⅲ-2.8.2-4 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Ⅲ-2.8.2-3 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Ⅲ-2.8.2-4 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件が平成27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Ⅲ-2.8.2-1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

平成 27 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。

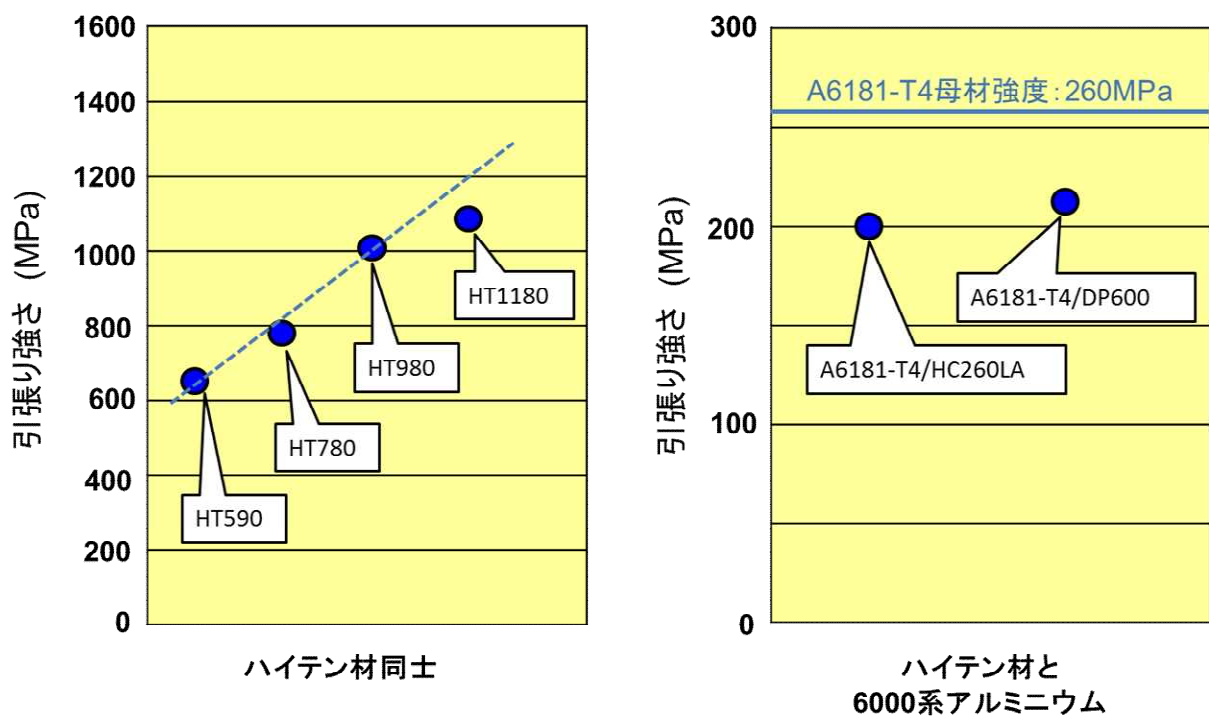


図 III-2.8.2-1 ハイテン材同士およびハイテン/Al 合金の FSW 継手の引張強さ

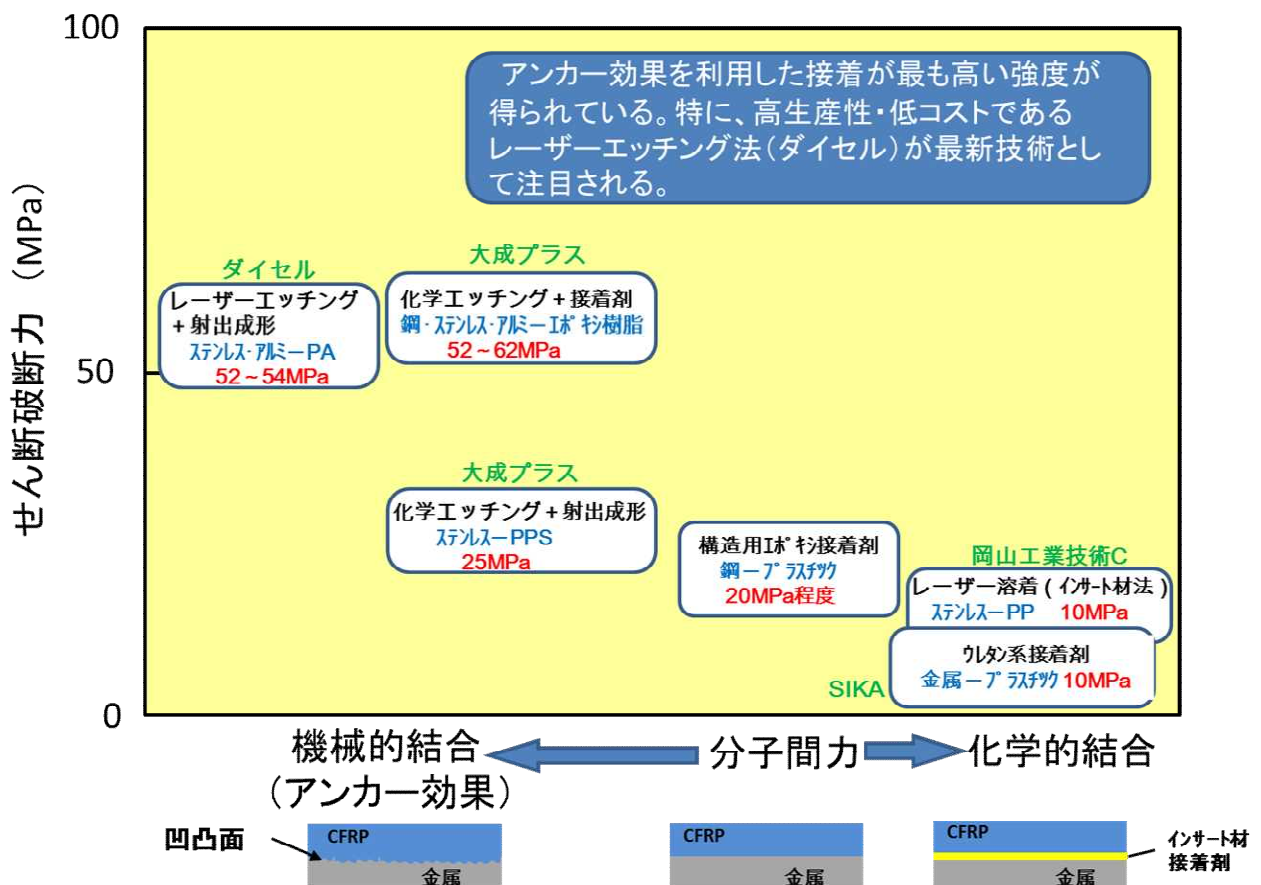
③金属/CFRP 材料の接合技術

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 III-2.8.2-2 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Ⅲ-2.8.2-2 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

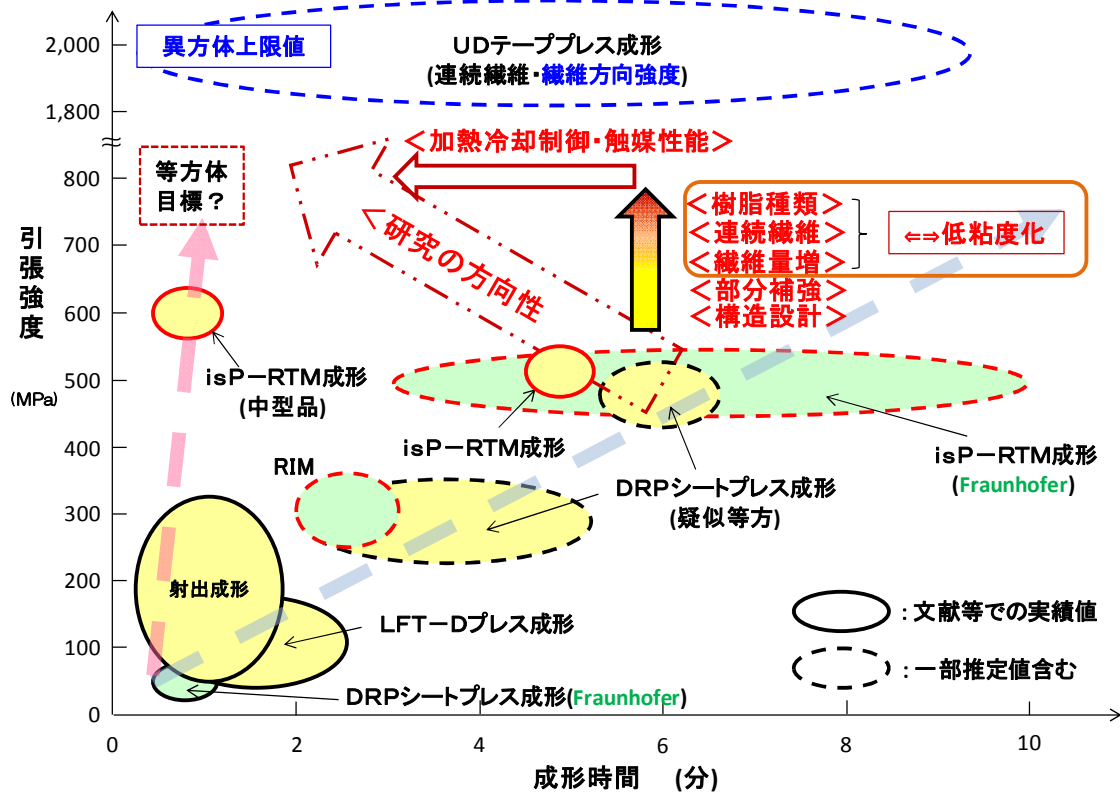
④CFRP 材料(熱可塑性、自動車用途)

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Ⅲ-2.8.2-3 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と考えられる。



図III-2.8.2-3 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。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.2-5 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 27 年 3 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			
H25FY	0	0	0	0	0	1	0	0	0
H26FY	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）

(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）

表Ⅲ-2.8.2-6 特許の件数（内訳） 【平成 27 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.3 [テーマ番号 31] 高分子複合材料技術開発動向調査

2.8.3.1 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)位置付け、目標値

表Ⅲ-2.8.3-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
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（委託期間 平成 25 年~27 年）

平成 25 年度 CFRP の構造評価技術およびバイオフィラーの調査

平成 26 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

平成 27 年度 CFRTP の異種接合技術調査、低コスト化に関する技術調査

(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する。

(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・CO₂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。

2.8.3.2 研究開発成果（本テーマは平成 26 年度で終了し、平成 27 年度よりテーマ番号 41 から 45 に再編して実施した）

(1) 中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.3-2 第一中間目標と達成度

研究開発項目	第一中間目標 (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
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	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	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	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、△達成見込み、×未達

(2)第二中間目標の達成可能性

表Ⅲ-2.8.3-3 第二中間目標の達成可能性

研究開発項目	現状	第二中間目標 (平成 29 年度末)	達成見通し
熱可塑性樹脂複合材料に関する調査	平成 26 年度に樹脂に関する中間報告書を作成	—	新たな開発情報を追記し、平成 27 年度において最終報告として完成する。
炭素繊維および新規フィラーに関する調査	平成 26 年度にフィラーに関する中間報告書を作成	—	炭素繊維の低コスト化技術動向を追記し、平成 27 年度において最終報告として完成する
異種材料接合に関する調査	平成 26 年度に接合技術の予備調査を実施	—	接合技術に関する詳細情報を調査し、平成 27 年度において最終報告として完成する

本テーマは平成 26 年度で終了し、平成 27 年度よりテーマ 41 から 45 に再編して実施した。

(3)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ことで、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、平成 26 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必要ない。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

(UniDerection) 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。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.3-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 27 年 3 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			
H25FY	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H26FY	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）

(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）

表Ⅲ-2.8.3-5 特許の件数（内訳） 【平成 27 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.4 [テーマ番号 32] 共通基盤技術の研究調査

2.8.4.1 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)位置付け、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Ⅲ-2.8.4-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
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。	同左	同左	プロジェクトにおいては、必要に応じて材料分野個別毎・分野横断的双方での研究課題・体制の見直しが不可欠であり、定常的な調査、およびそれに基づく研究戦略の策定が肝要である。

(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。

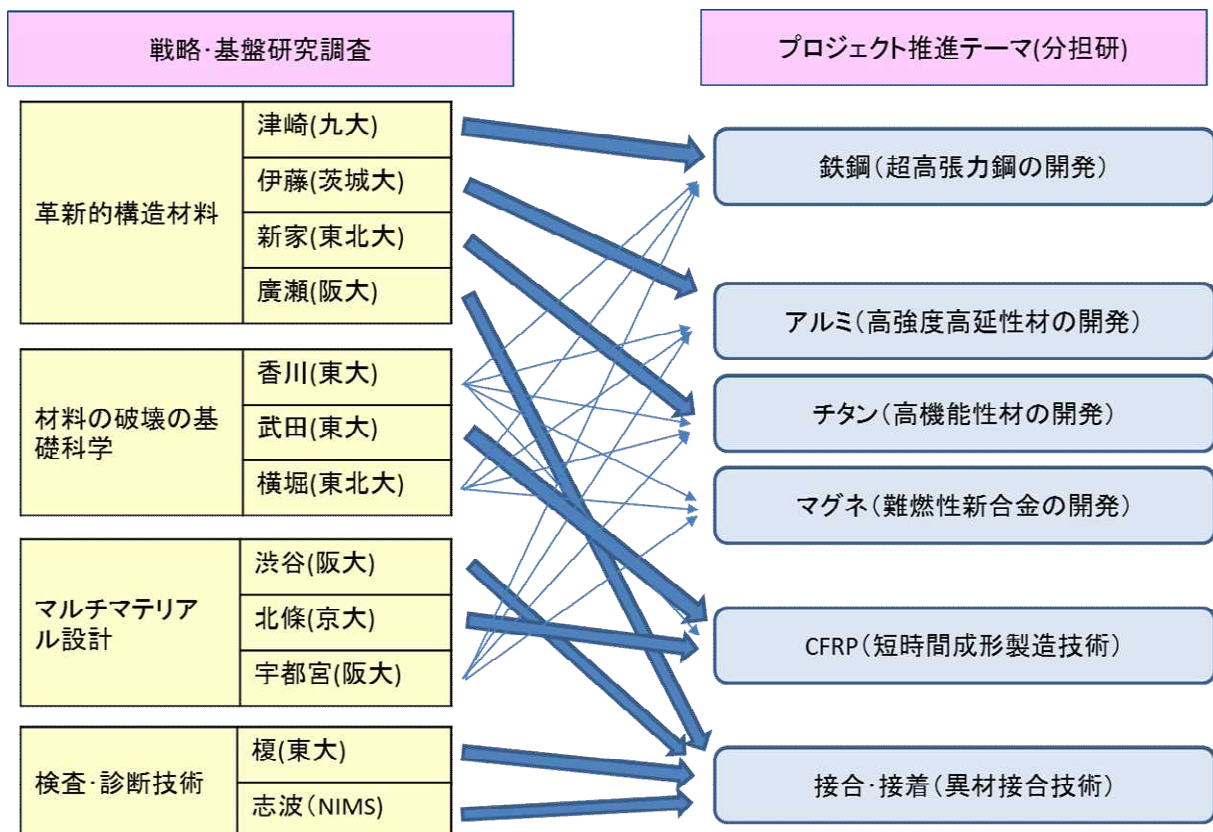
(4)実施体制

表Ⅲ-2.8.4-2 および図Ⅲ-2.8.4-1 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Ⅲ-2.8.4-1 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Ⅲ-2.8.4-2 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)

*平成 26.9 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Ⅲ-2.8.4-1 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。

2.8.4.2 研究開発成果（本テーマは平成 26 年度で終了し、平成 27 年度よりテーマ番号 41 から 45 に再編して実施した）

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.4-3 第一中間目標と達成度

研究開発項目	第一中間目標 (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
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。	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、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

本テーマは、平成 26 年度で終了し、平成 27 年度よりテーマ番号 41 から 45 に再編して実施した。

(3)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 III-2.8.4-2 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

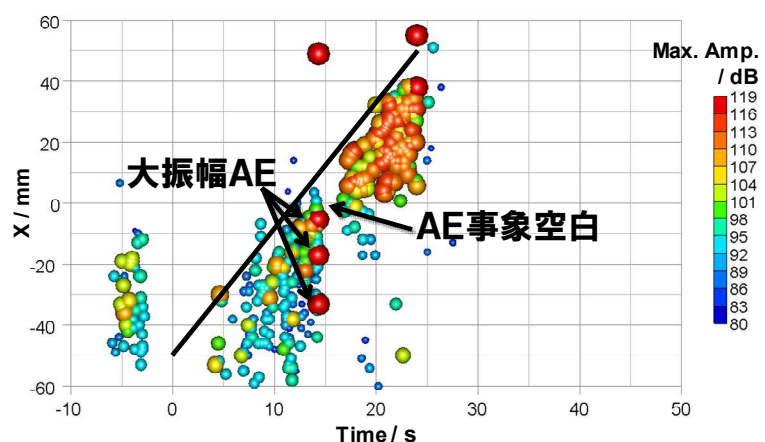


図 III-2.8.4-2 鋼材の FSW における AE 事象

推定された。AE 法を用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

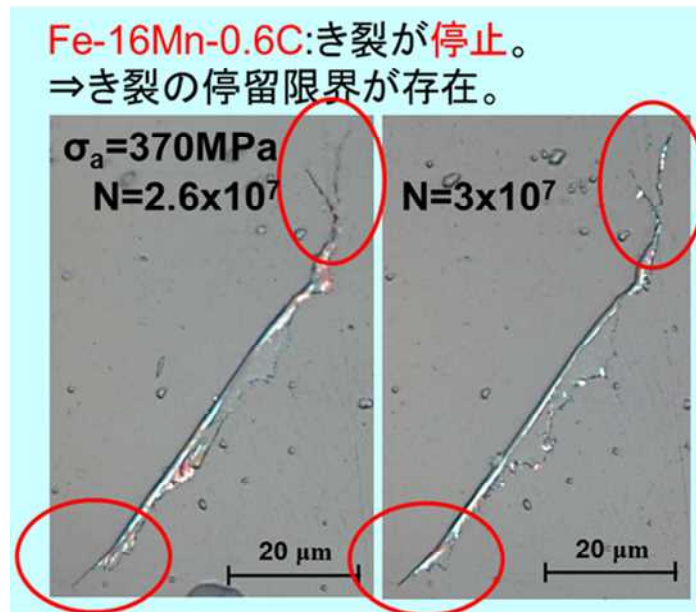
津崎兼彰/疲労強度と延性・韌性に優れた高強度 TWIP 鋼の開発

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、疲労強度と破壊韌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 III-2.8.4-3)。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Ⅲ-2.8.4-3 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 プロジェクトでのマイ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¹⁾が使用されている²⁾。

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³⁾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⁴⁾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 ΔK ($=14.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$) 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こと分かる。

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 III-2.8.4-4 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

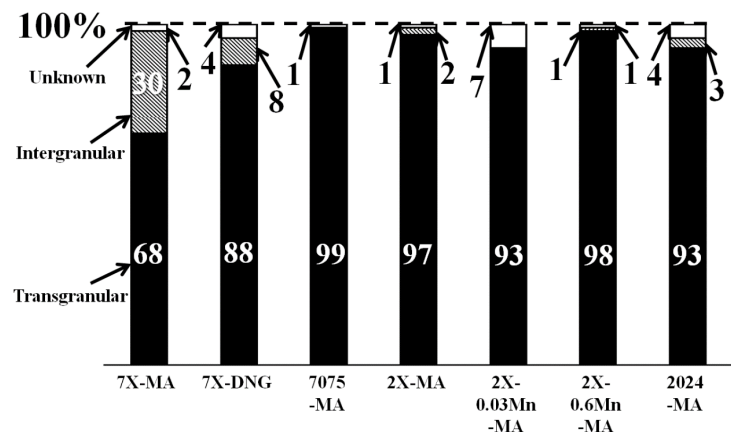


図 III-2.8.4-4 各試料、各環境でのき裂進展

速いことが確認され、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逃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 β 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 μm および約 6%であり、構成相は、 β 相、非熱的 ω 相および炭化チタンであった。非熱的 ω 相の体積率は、マンガン含有量の増加に伴う β 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 ω 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 ω 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 ω 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 ω 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。

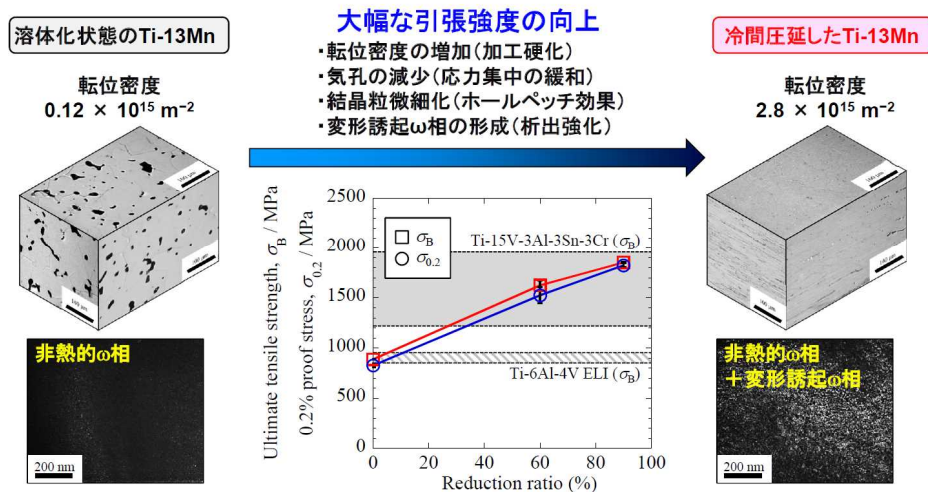


図 III-2.8.4-5 金属粉末射出成型法を用いて作製した Ti-13Mn 合金の冷間圧延前後の微細組織および引張特性

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し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 III-2.8.4-6 に示すように、A6061/SUS304 継手では、反応層厚さが 0.2 μm から 0.6 μm 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

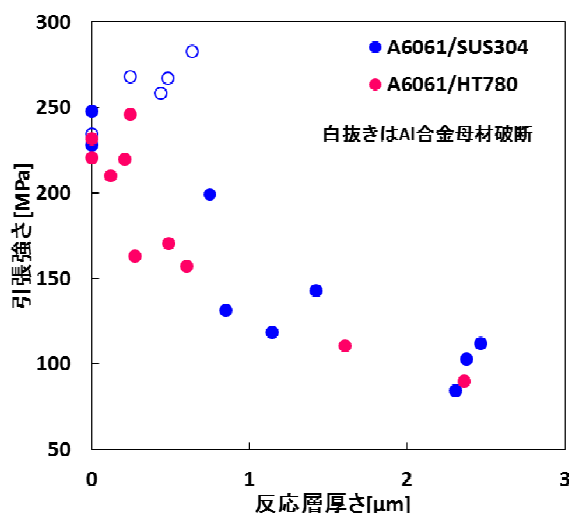


図 III-2.8.4-6 FSW 重ね異材継手における接合強度に及ぼす反応層厚さの影響

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 合金の異材レーザブレイジングを行い、レーザ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 μm 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

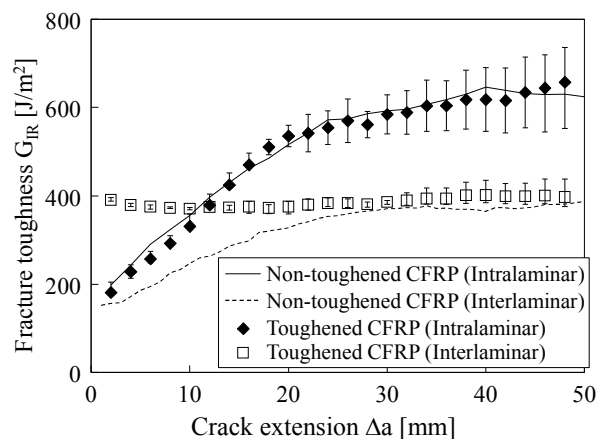
脂過多な領域が認められないこと、すなわち、新たに開発した「層内フィルム挿入法」により、正常に初期欠陥が配置され、安定に試験ができることを確認した。

図Ⅲ-2.8.4-7 に、層間高靱化材の破壊靱性値とき裂進展量 Δa 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 Δa 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 Δa 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、 Δa 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ている。



図Ⅲ-2.8.4-7 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する。

iii 成果の概要

本検討は平成 26 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、溶融溶接では根本的な解決策は無い。溶融しない 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。溶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溶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溶融、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、冶金的な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、ろう付け、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 CO₂ 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、

$$\text{平均応力 } \sigma_{av} = (P/a^2\pi) \quad (1)$$

$$\text{真ひずみ } \bar{\epsilon} = 2\ln(a_0/a) \quad (2)$$

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¹⁾より、

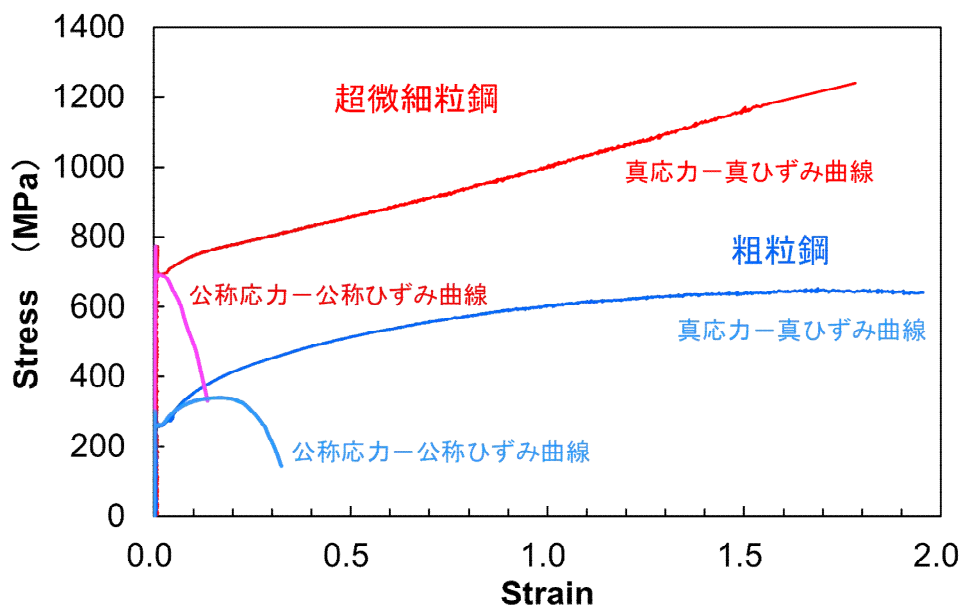
$$\text{真応力 } \bar{\sigma} = \sigma_{av} / \{(1 + 2R/a) \ln(1 + a/2R)\} \quad (3)$$

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Ⅲ-2.8.4-8 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 と大きいですが、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Ⅲ-2.8.4-8 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

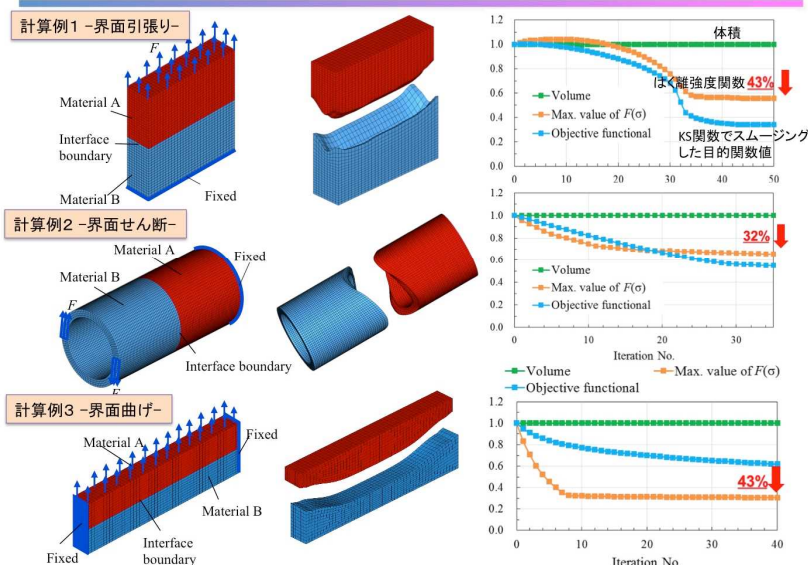
Body-In-White (BIW) のマルチマテリアル化される部材に対して、接着を含めた接合構造の最適化を探索するため、被接合材料の最適界面境界形状を求める設計手法の開発を行う。まずは、ハイテン鋼、アルミニウム合金やマグネシウム合金などの異種材料からなるソリッド体の界面強度問題を対象に、界面に沿って垂直方向のはく離応力と界面に沿ったせん断応力の複合応力状態を対象にした界面強度最適化手法を確立する。そして、その手法を応用して、応力が多軸に作用した状態での接合強度評価手法を提案し、解析と実験による検討を行う。

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Ⅲ-2.8.4-9 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

$E_A:E_B=1:10$
 $Z^A=Z^B=400\text{MPa}, Z=200\text{MPa}, Z=800\text{MPa}$



図Ⅲ-2.8.4-9 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。

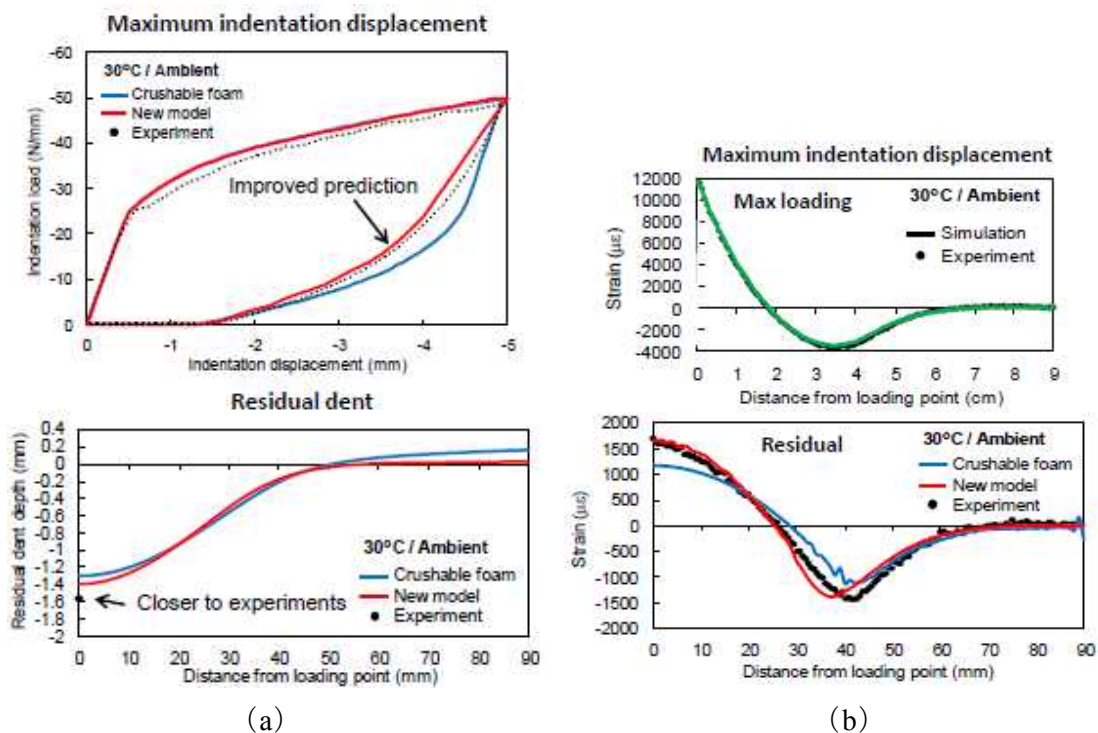
次に、CFRP 表皮フォームコアサンドイッチ梁の押し込み負荷・除荷応答（負荷-変位線図）を様々な温度・湿度環境下で実験的に求めた（図Ⅲ-2.8.4-10 (a)）。また、負荷中・除荷後の表皮の押し込み深さを計測した。

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Ⅲ-2.8.4-10 (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Ⅲ-2.8.4-10 (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Ⅲ-2.8.4-10 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て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、剥離先端分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_p/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($L_{Al} \times w_{Al} \times t_{Al}$)とし、GFRP の寸法は $25 \times 6 \times 1$ mm($L_{GF} \times w_{GF} \times t_{GF}$)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(σ_y)及びせん断降伏応力(τ_y)は ~ 20 MPa 及び ~ 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 μm 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き裂が長くなり、 $a_0 + \Delta a \sim 10$ 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 Γ は大きくなる R 曲線挙動が見られた(図 III-2.8.4-11 (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 Γ_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 J/m^2 、 30 J/m^2 及び 36 J/m^2 であった(図 III 2.8.4-11 (B))。定常状態のひずみエネルギー開放率 Γ_{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 J/m^2 及び 120 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 Γ_0 、 Γ_{ss} はともに大きくなることが明らかになった(図 III-2.8.4-11 (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。

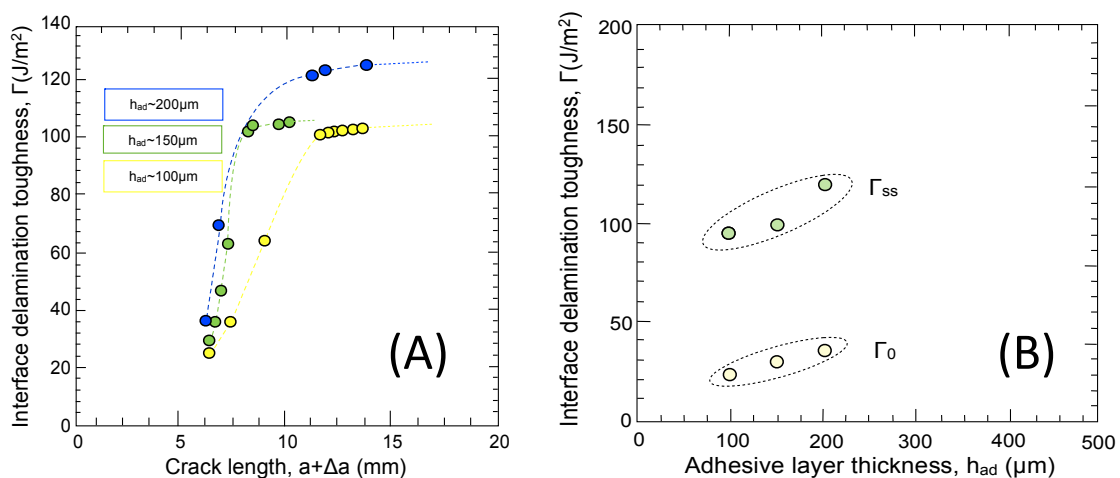


図 III-2.8.4-11 界面剥離抵抗 Γ に及ぼす接着剤層の厚さの影響(A), 剥離開始抵抗 Γ_0 及び定常状態剥離抵抗 Γ_{ss} に及ぼす接着剤層厚さの影響(B)

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

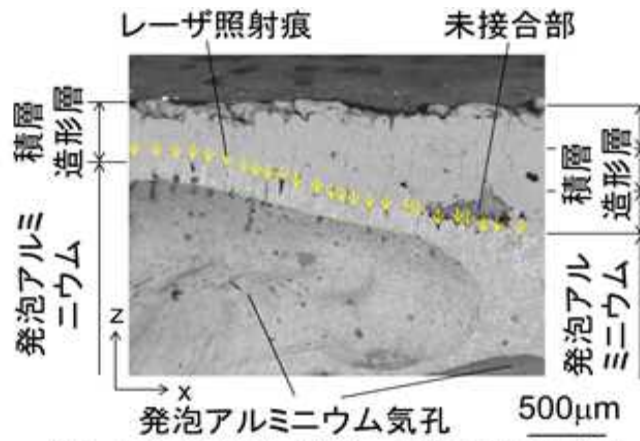
宇都宮裕/塑性加工プロセスによるポーラス金属表面への緻密層形成による特性改善の研究

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。平成 25 年度は「摩擦攪拌インクリメンタル加工」により、平成 26 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Ⅲ-2.8.4-12 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

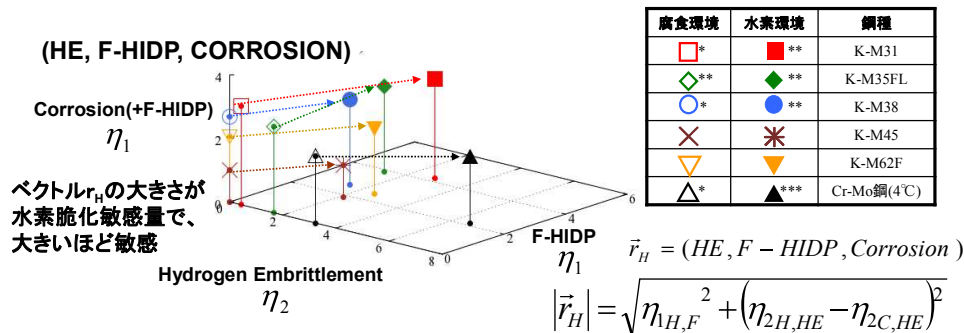
- 1)自動車用部品として使用される種々の電磁ステンレス鋼の水素脆化敏感性を定量的に評価するパラメータを実験により導出し、横堀の提案する水素拡散解析と組み合わせることにより、耐水素脆化材料開発指針の基礎基盤を構築する。
- 2)自動車溶接部の非破壊損傷計測による余寿命評価法の確立を想定したモデル研究として、マイクロスラリーエロージョン法(MSE)を用いた高温クリープ損傷評価と余寿命予測法の構築を行う。

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 の大きさが水素脆化敏感度で、大きいほど敏感

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	◎ 91×10^{-2}	◎ 46×10^{-2}
K-M62F	○ 2.06	○ 0	2.58	3.07	4.01	○ 43×10^{-2}	○ 19×10^{-2}
K-M38	2.68	○ 0	2.66	○ 1.45	○ 3.03	○ 37×10^{-2}	○ 5.1×10^{-2}
K-M35FL	2.70	1.66	3.86	◎ 1.34	3.87	○ 13×10^{-2}	○ 0.68×10^{-2}
2.25Cr-1Mo	2.09	3.23	○ 2.15	6.57	3.97	○ 29×10^{-2}	○ 15×10^{-2}
K-M31	3.11	0.44	4.22	2.84	4.85	○ 4.0×10^{-2}	○ 0.91×10^{-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Ⅲ-2.8.4-13 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。

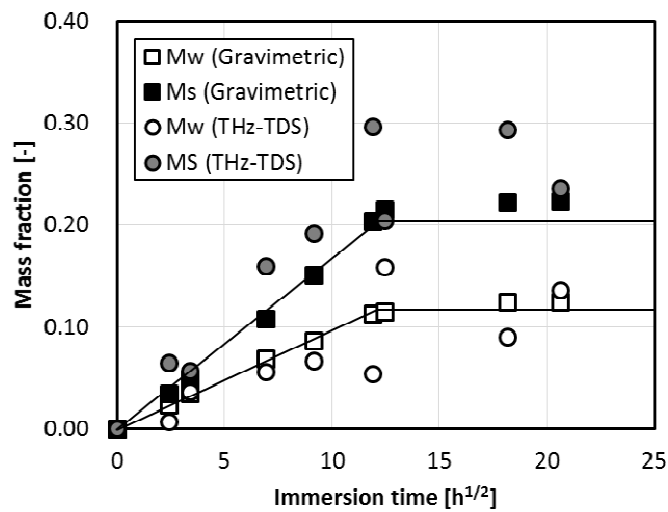


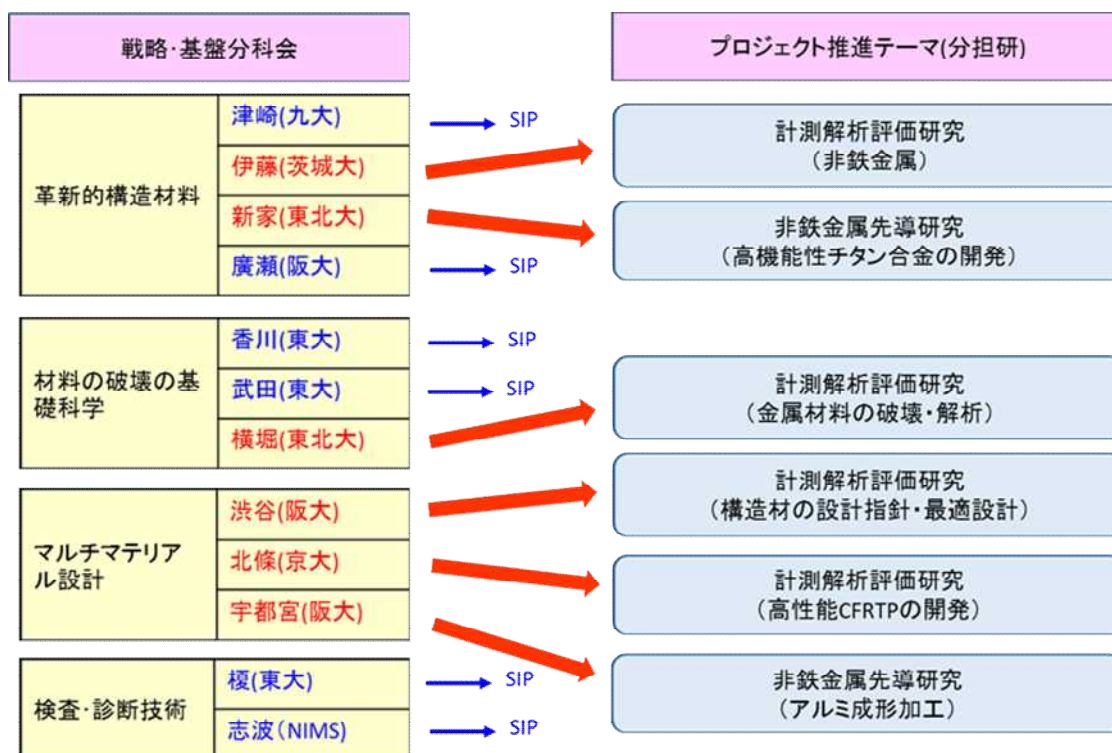
図 III -2.8.4-14 水と硫酸の質量分率 M_{Water}、M_{Sulfate} の質量測定 (“Gravimetric”) 及びテラヘルツ (“THz-TDS”) で求めた値の比較

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。

平成 27 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Ⅲ-2.8.4-15 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Ⅲ-2.8.4-15 研究調査と推進テーマとの関連性（平成 27 年度より体制変更）

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.4-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成27年3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			
H25FY	1	0	12	0	0	0	0	0	0
H26FY	9	0	32	0	0	0	0	0	1
合計	10	0	44	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）

(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）

表Ⅲ2.8.4-5 特許の件数（内訳） 【平成27年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H25FY	0	0	0
H26FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.5[テーマ番号 41] 非鉄金属先導研究

2.8.5.1 テーマの概要

(1)背景と目的

戦略・基盤の再編に伴い、平成 27 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、平成 28 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する。

(2)位置付け、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Ⅲ-2.8.5-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
チタン合金の製造技術開発	Ti-Mn-Mo 合金の創製	—	—	双晶機構を利用した強度延性バランスを検討。
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	—	—	任意形状付与技術から固める。

(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・CO2 削減・省エネルギー等@2030 年度）

特記事項無し。

2.8.5.2 研究開発成果（本テーマは平成 27 年度で終了した）

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.5-2 第一中間目標と達成度

研究開発項目	第一中間目標 (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
チタン合金の製造 技術開発	Ti-Mn-Mo 合金の創製	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	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、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.8.5-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
チタン合金の製造 技術開発	本テーマは平成 27 年度で終了した		
発泡アルミニウムの加工技術の研究 開発	本テーマは平成 27 年度で終了した		

(3)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。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.5-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H27FY	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）

(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）

表Ⅲ-2.8.5-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H27FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.6[テーマ番号 42] 材料・接合等技術動向調査研究

2.8.6.1 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)位置付け、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Ⅲ-2.8.6-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
新たな研究分野の設定	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	世界の技術動向に合わせた改革を常態化
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	世界の技術動向を常時組合員に提供

(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。また、テーマの再編・融合に関しても組合員および外部有識者へのヒアリングを実施し、今後の方向性を議論し組合員に対して提言する。

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指導のもと、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。

また、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（研究課題の優先順位付け等）の検討に反映する。

④ FS 課題ステアリング委員会の開催

接着技術や中性子線を用いた構造材料解析技術および施設整備に関する調査委員会では、FS 以降の本研究に向けた研究指針の策定のため、各研究課題関係者や外部有識者からなる技術検討委員会を開催し、FS 研究の円滑な推進に繋げる。

(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する。

(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・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

特記事項無し。

2.8.6.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.6-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
新たな研究分野の 設定	FS 課題の策定	総計 5 課題（中性子、接 着技術、腐食、マグネ MI、マルチマテリアル設 計）提案	○	
	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	国内外のユーザー、国外 の研究機関と WS 開催	△	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

特記事項無し。

(3)研究開発の成果と意義

特記事項無し。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.6-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
H27FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
H28FY	0	0	0	0	0	0	0	0	1
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）

(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）

表Ⅲ-2.8.6-4 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H27FY	0	0	0
H28FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.7[テーマ番号 43] 計測解析評価研究

2.8.7.1 テーマの概要

(1)背景と目的

戦略・基盤の再編に伴い、平成 27 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をの要因解析）および、より精度の高い分析技術に注目し、平成 28 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)位置付け、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Ⅲ-2.8.7-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
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	(本テーマは平成 28 年度から実施した)	熱可塑成形プロセスシミュレーション技術の構築		

(3)全体計画

平成 26 年度の研究から絞られた下記の 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。

(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 6 大学に再委託して実施している。

(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。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO2 削減・省エネルギー等@2030 年度）

特記事項無し。

2.8.7.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.7-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
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	破壊制御理論の基盤を構築することができた。	△	
軽量金属材料の研究	疲労および水素脆化の解明	疲労き裂進展と水素脆化の関連性を基礎的に解明することができた。	△	
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	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	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	インハウス中性子源の加速器部増強計画の 67% の製作を完了。	△	
熱可塑性 CFRP 製造プロセス最適化の研究	熱可塑性成形プロセスシミュレーション技術の構築	ミクروسケール熱可塑性成形シミュレーションの試算を実施した。	△	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

平成 30 年度以降のテーマについては平成 29 年度に決定する。

(3)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。

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

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、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調査した。その結果、湿潤環境で試験した 7000 系合金が最もき裂が進展しやすい結果となった。7000 系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

CF/PA6 材におけるトランスバースクラック発生エネルギー解放率の臨界値は 310 J/m^2 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。本試験結果により、高精度な材料特性値を得ることができ、且つ、この特性値を本研究で提案した接着強度則の計算に利用することで、より高精度で信頼性のある予測技術の向上が期待できる。

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

S バンドクライストロン 1 式の追加およびそれをドライブする高圧パルス電源部 2 式の製作を行い、調達済みのクライストロン 1 式、キャパシタ充電電源 4 式と合わせて、2 式の高圧電源部を完成させた。また、低エネルギー加速器部および制御部の製作も行った。これにより、調達済品とあわせて、増強計画で製作予定の全ブロック中、67%の製作を終了した。

⑥ 熱可塑性 CFRP 製造プロセス最適化の研究

熱可塑性樹脂の温度、結晶化度依存材料特性のモデル化を実施し、動作確認用 CFRTP 三次元モデルを用いて、ミクロスケール熱可塑性成形シミュレーションの試計算を実施した。計算結果から、温度分布および結晶化度分布ともに滑らかに時間依存性があることが確認できた。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.7-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H27FY	2	4	4	0	0	0	0	0	0
H28FY	0	0	13	3	0	0	0	3	0
合計	2	4	17	3	0	0	0	3	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）

(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）

表Ⅲ-2.8.7-4 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H27FY	0	0	0
H28FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.8 [テーマ番号 44] 中性子線による構造材料解析技術の Feasibility Study

2.8.8.1 テーマの概要

(1)背景と目的

透過力が高い中性子は、構造材料内部の様々な組織を直接観察できる強力なプローブであり、多様な構造材料開発のための共通基盤解析技術の核と成り得る。新構造材料技術研究組合（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ため、本 FS 研究において、中性子構造材料解析装置の活用や次世代解析装置の在り方について課題を明確化する。

(2)位置付け、目標値

小型中性子線源、大型中性子線源の鉄鋼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、中性子装置の利活用方法や現在不足している機能や装置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、実行可能な戦略を立案する。

表Ⅲ-2.8.8-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 28 年度末)	根拠
小型中性子線源を用いた計測精度の明確化	共通試料を用いた計測評価を実施し優位性を検証する。	—	中性子回折、小角散乱などの測定を行い計測データの妥当性を検証する。	中性子回折・小角散乱などの手法の構造材料解析における有効性を評価するため。
小型装置開発のための設計検討	設計を提案	—	運転時の放射線発生量などのシミュレーションを実施し、開発プランを策定する。	実際に産業利用に資する小型中性子分析装置の仕様を明確化するため。

(3)全体計画

小型中性子線源装置（小型の加速器ベースの装置）、大型中性子線源装置（J-PARC 大強度陽子加速器装置）の鉄鋼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、中性子装置の利活用方法や現在不足している機能や装置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、実行可能な戦略を立案する。

鉄鋼材料などの共通試料を用いた計測評価によって、各構成相の体積率や集合組織、第 2 相の形態や組成、添加元素の定量などの測定精度を小型線源と大型線源で比較す

る。また、電子線、X線などの従来プローブによる観察との比較検証も行い、計測精度の手法依存性を明らかにして中性子線利用の利点と弱点を明確にする。ハードウェア開発の指針については、多様な専門家の視点で現状技術を精査して必要なスペックを提示し、計算機シミュレーションによる検証で妥当性を判断する。他手法との併用化など、装置の継続的な維持について検討する。

鉄鋼材料開発への応用に加えて、非鉄金属材料開発、高分子材料開発、接着材料開発、自動車業界に代表される輸送機器開発等への波及効果、中性子以外の量子ビーム発生による構造材料解析の可能性について調査し、小型装置の多角的利用方法を提案する。

(4)実施体制

本テーマは共同実施機関（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）、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）、富津分室（新日鐵住金株式会社））ならびに3再委託先において取り組んだ。

(5)運営管理

計8回（平成27年6回、平成28年2回）の委員会を開催し進捗を報告した。委員会委員には共同実施機関、再委託先、加速器技術や中性子線技術に関する有識者から選任した。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂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の確立およびそのための研究開発プロジェクトの計画を策定することで、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CO₂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。

2.8.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

本テーマは平成27年度から平成28年度まで実施し、その成果は、平成29年度より公募により開始した[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に引き継いだ。

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.8.8-2 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 28 年度末)	達成見通し
小型中性子線源を用いた計測精度の明確化	中性子回折、小角散乱などの測定を行い計測データの妥当性を検証した。	中性子回折、小角散乱などの測定を行い計測データの妥当性を検証する。	達成した
小型装置開発のための設計検討	運転時の放射線発生量などのシミュレーションを実施し、開発プランを策定した。	運転時の放射線発生量などのシミュレーションを実施し、開発プランを策定する。	達成した

(3)研究開発の成果と意義

中性子ナノ組織解析に関しては、J-PARC（大強度陽子加速器施設）を利用して、小型中性子源での計測用に作製した標準的試料の中性子回折等の静的測定を行い、小型中性子源の計測データの妥当性を検証した。平成 27 年度に作製した評価サンプルについて、測定・解析を継続し、小型の加速器ベース中性子源の実力を検証した。また、小型線源で得られた結果と、ラボ X 線解析や放射光、大型線源で得られた結果の比較を行った。

小型中性子源を利用した材料評価に関しては、電子加速器ベースの中性子源と陽子加速器ベースの中性子源を活用して、構造材料の組織解析に必要な中性子実験を実施し、その実験結果を元に、将来要求される小型加速器中性子源の性能仕様を検討した。

小型中性子分析装置開発のための設計検討に関しては、平成 27 年度の設計検討で得られた小型電子加速器の設計指針を元に、電力や冷却水、運転時の放射線発生量などのシミュレーションを実施し、定量的な設計をすすめた。中性子計測のニーズの深掘り調査を行い、その結果を中性子発生のためのターゲットとモデレーター、ビームライン、検出器の設計に反映させた開発プランを策定した。小型装置実現の技術課題を明確化して、各種装置・コンポーネントの仕様の最適化をすすめた。

実際に装置を製作する上で、放射線安全とサイズ等の課題を解決するために、放射線遮蔽材の最適化を行った。対象となる放射線は中性子線とガンマ線である。これらは物質透過能力が高いゆえに、量子プローブとして用いた場合非常に有効であるが、一方でその遮蔽が難しい問題がある。安価で物質量を稼ぐことができるコンクリートをベースに複数の材料を適材適所に用いることで、効率的に放射線を遮蔽し、安全の確保と小型化を実現し、なおかつ価格も抑えることができることが分った。

また本研究の成果を議論・吟味して学術論文にまとめつつある。

本テーマは平成 27 年度から平成 28 年度まで実施し、その成果は、平成 29 年度よ

り公募により開始した[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に引き継いだ。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.8-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
H27FY	0	0	2	0	0	0	0	1	0
H28FY	0	0	5	0	0	0	0	1	0
合計	0	0	7	0	0	0	0	2	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）

(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）

表Ⅲ-2.8.8-4 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
H27FY	0	0	0
H28FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.9 [テーマ番号 45] 構造用接着技術に関する Feasibility Study

2.8.9.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車や航空機などの移動体の軽量化には、適材適所に異種材料を配置したマルチマテリアル構造が有望である。これを実現するには、異種材を接着接合することが適している。しかし、接着接合には生産性や耐久性の観点で解決すべき問題が多い。本事業は、異種材の接着接合技術に関する研究・開発プロジェクトの本格的な開始を目指し、有望なテーマに関して Feasibility Study を実施し、研究テーマとしての妥当性を検証することを目的とする

(2)位置付け、目標値

移動体の軽量化に向けた異種材接着接合技術並びに分析、評価および設計技術等を開発するために重要である技術課題に対して、平成 29 年度より、本格的な研究開発をすみやかに開始できるように、当該研究では研究開発項目に対して FS 研究を実施し、その妥当性を海外の研究開発動向調査の結果との比較等から検証する。

表Ⅲ-2.8.9-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
接着機構解明に向けた界面の分析手法・研究方法論の検討	接着接合機構解明のための手法を検証する			研究テーマとしての妥当性を検討する項目
検査手法の検討	その適用可能性を検証			研究テーマとしての妥当性を検討する項目

(3)全体計画

構造用接着技術に関する研究・開発プロジェクトの実施を踏まえ、重要度が高く、かつ実現可能性の高いテーマの抽出、並びにその優先順位付けを行う。平成 26 年度に ISMA で実施した構造用接着技術調査委員会の答申に基づき、5 つの課題、具体的には「新規接着剤開発のための方法論構築」、「機械的特性評価法・接合部の設計論の確立」、「表面処理法の確立」、「接合部検査手法の確立」および「接着機構解明に向けた界面の分析手法・研究方法論の確立」に対して各種の研究を実施すると共に、海外の研究開発動向調査を実施し、各研究開発項目の予想される成果とその必要性から、研究項目の優先順位を決定する。

(4)実施体制

本テーマは、つくば中央東分室（産業技術総合研究所）が7機関に必要な研究開発を再委託して実施する。

(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・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）

特記事項無し。

2.8.9.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

FS テーマのため平成 27~28 年度で実施、平成 28 年度末終了

表Ⅲ-2.8.9-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
接着機構解明に向けた界面の分析手法・研究方法論の検討	接着接合機構解明のための手法を検証する	電子顕微鏡観察や、分光法、計算機化学的な手法が有効であることが確かめられた。	○	
検査手法の検討	その適用可能性を検証	実プロセスに適応可能な検査技術の絞り込みを行った。	○	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

平成 27 年度終了予定であったが、一年延長になったため、平成 28 年度最終目標として達成度を記載

表Ⅲ-2.8.9-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 28 年度末)	達成見通し
接着機構解明に向けた界面の分析手法・研究方法論の検討	電子顕微鏡観察や、分光法、計算機化学的な手法が有効であることが確かめられた。	接着接合機構解明のための手法を検証する	達成
検査手法の検討	実プロセスに適応可能な検査技術の絞り込みを行った。	その適用可能性を検証	達成

(3)研究開発の成果と意義

新規接着剤開発のための方法論の検討では、新規型耐熱性接着剤を評価した。室温で硬化可能なPP用の接着では、ボラン系接着剤の代替の可能性を検証したが、代替可能性は低いと判断した。機械的特性評価法・接合部の設計論の検討では、エポキシ系の高強度接着剤の設計とバルク状態での疲労亀裂伝ば抑制に成功した。加熱加圧水蒸気下での接着強度の超加速劣化試験法を検討した。接着強度の低下はみられたものの、低下速度は十分とはいえない。表面処理法の検討では、ポリプロピレンのプラズマ処理が有効であることが示された。接合部検査手法の検討、接着前検査では、接着強度に影響を与える濃度の汚染物質の検出が可能であることを実証した。接着後の検査では接着接合部の剥離欠陥の検出に成功している。また、接着接合部（内部）の動的なひずみ分布を検出可能であることが実証された。接着機構解明に向けた界面の分析手法・研究方法論の検討では、接着界面の観察の結果、ナノレベルのアンカーリング効果が発現している可能が示唆された。またポリプロピレンの表面処理の効果は、処理法によってその接着メカニズム異なることが示された。分光法からは、極性官能基に形成はみられなかった。またナノレベルの孔に埋め込まれた接着剤（樹脂）の剥離過程における状態を計算化学的にシミュレーションする手法を検討した。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.9-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成29年3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			
H27FY	0	0	39	2	0	0	0	3	1
H28FY	4	0	50	5	0	0	0	1	2
合計	4	0	89	7	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）

(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）

表Ⅲ-2.8.9-5 特許の件数（内訳） 【平成29年3月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT出願※
H27FY	0	0	0
H28FY	0	0	0
合計	0	0	0

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.10 [テーマ番号 49] マルチマテリアル設計技術開発(FS 研究)

2.8.10.1 テーマの概要

(1)背景と目的

自動車や航空機等移動体の軽量化には、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課題である。ただし、その設計手法は、いまだ確立されておらず現状では、単なる材料置換に留まっており、異材接合のモデル化も含めてマルチマテリアル構造最適化の設計手法の確立が急務となっている。

マルチマテリアル化による車体構造の軽量化実現のためにマルチマテリアル設計技術の新規研究課題のテーマアップを予定している。本技術の根幹となるトポロジー最適化技術に基づくマルチマテリアル構造設計ツールの開発に関して Feasibility Study を実施して、その妥当性を検証することを目的とする。

(2)位置付け、目標値

本 FS 研究では、マルチマテリアル設計技術としてレベルセット法によるトポロジー最適化手法の適用可能性の検証、および本格的な研究での検討課題の抽出、設計ツール構築までのシナリオ設定を行う。

表Ⅲ-2.8.10-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
マルチマテリアル設計技術		レベルセット法によるトポロジー最適化技術を適用するための解析システム構成、ソルバー（計算を実行するソフトウェア）との連携、設計解析モデルの実現性等につき検証を行う。	FS 研究での検証結果に基づき、トポロジー最適化手法を適用した解析システムを構築し、マルチマテリアル化による車体剛性システム設計、動的システム設計を行い、最終的に本プロジェクト開発材料適用による詳細設計を行い、マルチマテリアル化設計案を提示する。	

(3)全体計画

本プロジェクトにて開発中の各種構造材料および接合技術の有効性や構造最適化も含めた構造体としての軽量化効果を明確にするために設計ツールの開発を行う。

本 FS 研究では、マルチマテリアル設計技術としてレベルセット法によるトポロ

ジー最適化手法の適用可能性の検証、および本格的な研究での検討課題の抽出、設計ツール構築までのシナリオ設定を行う。

本研究では、FS 研究にて整備・検証した解析システムをベースに剛性システム設計、動的システム設計を実施し、最終的に ISMA 開発材料による詳細設計を実施し、車体構造軽量化に向けたマルチマテリアル設計案を提示する。

(4)実施体制

トポロジー最適化技術の第一人者である京都大学西脇教授に再委託し、且つ自動車技術会構造形成技術部門委員会マルチマテリアルボデー検討ワーキンググループと連携し、実施する。

(5)運営管理

テーマ番号 42 に設置する委員会と密接な連携を取りながら目標達成に向けた研究開発を推進する。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂削減・省エネルギー等@2030年度）
特記事項無し。

2.8.10.2 研究開発成果

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.10-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
マルチマテリアル 設計技術	レベルセット法によるトポロジー最適化技術を適用するための解析システム構成、ソルバー（計算を実行するソフトウェア）との連携、設計解析モデルの実現性等につき検証を行う。		△	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

特記事項無し。

(3)研究開発の成果と意義

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.10-3 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
合計	—	—	—	—	—	—	—	—	—

※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）

(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）

表Ⅲ-2.8.10-4 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
合計	—	—	—

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約

2.8.11[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

2.8.11.1 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・CO₂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などの競争力強化を目指すことを目的とする。

(2)位置付け、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、高強度化など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。本事業に先立つ調査研究では、中性子による構造材料等の解析の有効性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。そこで本事業では、以下 3 つの研究開発内容を遂行し、それぞれ目標を達成することで、その問題点を解決し、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。

表Ⅲ-2.8.11-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	第一中間目標 (平成 27 年度末)	第二中間目標 (平成 29 年度末)	最終目標 (平成 34 年度末)	根拠
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	—	鉄鋼試料等の作製と小角散乱、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う。	鉄鋼材料や接合部などの中性子を用いた解析手法を確立する。	産業利用に即した様々な中性子分析手法を確立することで、構造材料の高度化が期待できるため。
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	—	新規小型中性子装置のための設置場所を整備し、主要な構成機器を導入するとともに、次年度以降に導入する機器の詳細仕様を決定する。	ブラッグエッジイメージング測定が可能な小型装置を開発し、構造材料のイメージング等の解析装置として確立する。	ブラッグエッジイメージングが測定できる小型装置の開発により、構造材料の高度化を加速できるため。
中性子構造材料解析ネットワークの構築	—	平成 31 年度より実施する。	小型中性子解析ネットワークを構築する。	より多くの企業ユーザーの利用・参入が期待できるため。

(3)全体計画

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開発し、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中性子解析技術を確立する。

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解析装置を新規に開発する。本装置は、ブラッグエッジイメージング法に重点化させ、さらに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する。また小型装置における構造材料計測法やデータ解析手法、他の量子ビーム等によるハイブリッド分析技術も確立する。

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、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解析装置の解析ネットワークを構築する。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関

値を下げ、多くのユーザーに本事業で開発する分析手法・装置を活用いただけるようにする。

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ことで、革新的構造材料の開発を促進させる。

(4)実施体制

本テーマは以下の実施機関（分室）において取り組んでいる。

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（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）、夏島分室（株式会社日産アーク）

(5)運営管理

研究開発責任者を中心に、各分室と綿密に情報交換を進めていくことで、各目標を達成する。

(6)実施の効果（費用対効果、費用・売上・CO₂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CO₂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。

2.8.11.2 研究開発成果（本テーマは平成 29 年度より開始した）

(1)中間目標の達成度

表Ⅲ-2.8.11-2 第二中間目標と達成度

研究開発項目	第二中間目標 (平成 29 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
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	鉄鋼試料等の作製と小角散乱、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う。	試料作製ならびに各分析の測定準備を開始した。	△	
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	新規小型中性子装置のための設置場所を整備し、主要な構成機器を導入するとともに、次年度以降に導入する機器の詳細仕様を決定する。	平成 29 年度に導入する機器の多くの仕様を決定するとともに、設置場所の整備計画の策定を行った。また次年度導入の機器の仕様決定に着手した。	△	

※◎大きく上回って達成、○達成、△達成見込み、×未達

(2)最終目標の達成可能性

表Ⅲ-2.8.11-3 最終目標の達成可能性

研究開発項目	現状	最終目標 (平成 34 年度末)	達成見通し
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	試料の準備ならびに各分析の測定準備を開始するとともに、最終目標達成に向けた詳細な開発計画の策定を進めている。	鉄鋼材料や接合部などの中性子を用いた解析手法を確立する。	達成見込み
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	新小型装置に導入する機器の仕様の決定を進めるとともに、設置場所の整備計画の策定を行った。また新装置等で計測を行う試料の決定に向けた関係機関との協議を開始した。	ブラッグエッジイメージング測定が可能な小型装置を開発し、構造材料のイメージング等の解析装置として確立する。	達成見込み
中性子構造材料解析ネットワークの構築	平成 31 年度より開始する。	小型中性子解析ネットワークを構築する。	—

(3)研究開発の成果と意義

研究開発項目 I に関しては、共通試料等の作製準備ならびに各分析の測定準備を進めている。

研究開発項目 II に関しては、新小型中性子解析装置の各構成機器の仕様決定を進めるとともに、装置設置場所の整備計画の策定を行った。また新装置等で計測を行う試料の決定に向けた関係機関との協議を開始した。

また本研究の計画立案に向けて基盤とすべく、調査研究(テーマ 44)での成果の一部を議論・吟味して学術論文にまとめている。

(4)成果の普及（論文、外部発表等）

表Ⅲ-2.8.11-4 論文、外部発表等の件数（内訳） 【平成 29 年 3 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			
合計	—	—	—	—	—	—	—	—	—

※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）

(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）

表Ⅲ-2.8.11-5 特許の件数（内訳） 【平成 29 年 3 月末現在】

区分 年度	特許出願		
	国内	外国	PCT 出願※
合計	—	—	—

※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約