

「マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト」  
(事後評価分科会)  
資料5-1

「マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト」

事業原簿  
【公開】

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 電子・材料・ナノテクノロジー部
-----	--

# 目次

## 概要

プログラム基本計画

プロジェクト基本計画

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. NEDO の関与の必要性・制度への適合性 . . . . . I - 1
  - 1. 1 NEDO が関与することの意義 . . . . . I - 1
  - 1. 2 実施の効果（費用対効果） . . . . . I - 2
- 2. 事業の背景・目的・位置づけ . . . . . I - 3
  - 2. 1 事業の背景 . . . . . I - 3
  - 2. 2 事業の目的 . . . . . I - 7
  - 2. 3 事業の位置付け . . . . . I - 9

## 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 - 4
  - 2. 1 事業の目的 . . . . . II - 4
  - 2. 2 研究開発の内容及び全体スケジュールと予算 . . . . . II - 4
  - 2. 3 研究開発の実施体制 . . . . . II - 2 3
  - 2. 4 研究開発の運営管理 . . . . . II - 2 5
- 3. 情勢変化への対応 . . . . . II - 3 3
- 4. 評価に関する事項 . . . . . II - 3 4

## III. 研究開発成果について

- 1. 事業全体の成果
  - 1. 1 事業全体の成果の概要 . . . . . III - 1 - 1
  - 1. 2 各研究開発項目の成果の概要 . . . . . III - 1 - 6
  - 1. 3 成果の意義 . . . . . III - 1 - 1 1
- 2. 研究開発項目毎の成果

### 委託事業

- 2. 1 マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積 . . . . . III - 2. 1 - 1
- 2. 2 マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構との関連性の解明 . . . . . III - 2. 2 - 1
- 2. 3 マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出 . . . . . III - 2. 3 - 1

### 助成事業（非公開）

IV. 実用化・事業化の見通しについて

1. 実用化・事業化の見通し

1. 1 成果の実用化可能性	IV-1-1
1. 2 実用化のシナリオ	IV-1-7
1. 3 波及効果	IV-1-14
1. 4 まとめ	IV-1-18

2. 実用化技術における実用化・事業化の見通し (非公開)

V. 成果資料 (委託事業分)

1. 各種展示会での成果の発表リスト	V-1
2. 論文リスト	V-2
3. 口頭発表リスト	V-9
4. 特許リスト	V-20
5. 受賞リスト	V-21

(添付資料)

事前評価書

パブリックコメント

概要

最終更新日 平成 23 年 11 月 18 日

プログラム（又は施策）名	ナノテク・部材イノベーションプログラム		
プロジェクト名	マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト	プロジェクト番号	P06034
担当推進部/担当者	ナノテクノロジー・材料技術開発部 / 小川純一郎（平成 18 年 4 月～平成 20 年 9 月） ナノテクノロジー・材料技術開発部 / 土井秀之（平成 20 年 10 月～平成 22 年 4 月） 電子・材料・ナノテクノロジー部 / 古館清吾（平成 22 年 5 月～平成 23 年 3 月）		
0. 事業の概要	<p>マグネシウム合金は、構造用金属材料として最軽量で強度も高く、工業的利用の拡大が期待されている。しかし、室温での塑性変形が困難で、従来は主にダイカスト等の鋳造法で成形されてきた。一方、同合金の機械的強度は、結晶粒の大きさ等の微細組織に強く依存することから、高い強度や信頼性を有する部材を製造するためには、高度な組織制御が可能で生産性も高い鍛造法による成形技術の確立が必要とされてきた。</p> <p>本研究開発では、マグネシウム合金について、鍛造素材の組織制御、鍛造による成形プロセス及び微細組織制御過程を適切に組み合わせることで、機械的特性（強度、信頼性）の優れた複雑形状マグネシウム部材を成形できる、工業的に利用可能な鍛造技術の基盤を確立する。また、マグネシウム合金の工業的利用の拡大に不可欠なリサイクル技術についても、課題を抽出し、課題解決のための技術開発を行って、さらにはリサイクルシステムの提案と安全性評価を行う。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p><b>【NEDOが関与する意義】</b> 本プロジェクトは、『情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を可能とすること』を目的とした「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の一環として取り組むものである。極めて広範囲な産業領域に波及する材料・部材領域について、ユーザー製造業等との連携（川上・川下連携）を促進するプロジェクト体制（垂直連携）で実施することで、高度な部材産業群の「すり合わせ力」を一層強化する。</p> <p>このような技術開発は、複数の研究機関及び企業の知見を結集する必要があり、民間の自主的取り組みでは難しい。したがって、NEDOの関与により、市場原理のみでは達成し得ない基盤技術の開発を重点的に実施することが必要である。</p> <p><b>【実施の効果（費用対効果）】</b> 費用：【開発予算】に記載。 効果：マグネシウム合金採用率の高い分野の想定市場（2020年）として、 輸送機器分野 838億円 情報家電分野 400億円</p> <p><b>【事業の背景・目的・位置付け】</b> 我が国において産学官を含む連携の強化（川上川下の垂直連携、材料創成と加工の水平連携など）を図ることで、次世代の部材分野での我が国のイノベーションを促進することが喫緊の課題となっている。</p> <p>マグネシウム合金は、その軽量性とリサイクルに要するエネルギー消費が少ない循環型素材としての可能性から、おもに自動車部品と家電製品において用途が拡大してきており、欧米や中国などの諸外国においてもマグネシウム成形技術開発が進められている。自動車ならびに家電分野は、日本が強みとする産業分野であり他産業への波及効果も大きい。それらの競争力の維持・強化を図るためには、世界をリードする国内のマグネシウム合金に関わる基盤技術、および金型設計、鍛造技術等の我が国ものづくり技術の優位性を活用して本事業を推進する。</p>		
II. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>マグネシウム合金の鍛造特性を解明して、鍛造温度の低温化と鍛造品の高性能化を図ることと、マグネシウム合金のリサイクルについて、カスケードリサイクルから水平リサイクルに移行することを目指す。具体的な最終目標は以下のとおりである。</p> <p>○鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部材特性の関連性を整理し、鍛造部材の評価方法を確立する。</p> <p>○鍛造用素材の組織の結晶粒子と変形機構との関係についてデータベース化を進め、鍛造加工マップとして整備し、鍛造温度低温化技術を開発するとともに、実用化レベルの部材として170MPa(10<sup>7</sup>回)の疲労強度を持つ構造用マグネシウム鍛造部材の最適な鍛造加工手順を導出するための鍛造組織形成技術の基盤技術を構築する。</p>		

	<p>○従来のカスケード型リサイクル(低品位素材へのリサイクル)に代えて、リサイクル材料が新材料と同等の特性を維持する市中スクラップリサイクル基盤技術の開発を行うとともに、総合的なマグネシウムリサイクルについての信頼性評価、データ集積を行う。</p> <p>○大量排出時を想定した市中回収品スクラップの前処理技術(分別、分離、不純物除去など)の課題抽出し、市中スクラップリサイクル基盤技術を提案する。</p> <p>○結晶(等軸状もしくは柱状)の平均粒径が50<math>\mu</math>m以下の凝固組織を持つ耐熱合金ビレットの連続鑄造技術を開発する。</p> <p>○耐熱部材として、締結フランジ部の構造に対し、現状マグネシウム構造部材として実用的な締結力維持を達成する複合鍛造技術を開発する。</p> <p>耐疲労部材として、アルミ鍛造部材レベルの実用部材が供給可能な鍛造技術を開発する。</p> <p>○リブなど複雑な突起物を有し、表面平滑度が高い複雑な形状の高精密大型実用部材の製造が可能な鍛造技術を開発する。</p> <p>○工場内スクラップの連続処理方式における表面付着物除去(含有炭素0.1%以下)を達成する技術開発を行う。併せて、新方式によるリサイクル方式の検証を行う。</p>											
事業の計画内容	<table border="1"> <tr> <th>主な実施事項</th> <th>H18fy</th> <th>H19fy</th> <th>H20fy</th> <th>H21fy</th> <th>H22fy</th> </tr> </table>	主な実施事項	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy
	主な実施事項	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy						
	①マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積											
	②マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構との関連性の解明											
	③マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出											
	④マグネシウム合金の鍛造用ビレット調整技術開発											
	⑤マグネシウム合金の鍛造部材開発(輸送用機器、ロボット)											
	⑥マグネシウム合金の鍛造部材開発(情報家電用機器)											
⑦マグネシウム合金のリサイクルに係る技術開発												
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	H18fy	H19fy	H20fy	H21fy	H22fy	総額					
	一般会計	382	282	256	266	136	1322					
	総予算額	382	282	256	266	136	1322					
開発体制	経済産業省担当原課	製造産業局素材材産業室										
	プロジェクトリーダー	大阪府立大学大学院 教授 東 健司										
	委託先 (* 委託先が管理法人の場合は参加企業数も記載)	<p>【委託】独立行政法人産業技術総合研究所 (再委託 3 大学) 財団法人素材材センター</p> <p>【助成】三協マテリアル株式会社 協業組合菊水フォーミング 宮本工業株式会社 三井金属鉱業株式会社 株式会社カサタニ 株式会社タナベ</p>										

<p>情勢変化への対応</p>	<p><b>【情勢変化への対応】</b>  平成 18 年度には、研究開発項目①マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積、②マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構との関連性の解明、③マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出、及び⑤マグネシウム合金の鍛造部材開発（輸送用機器、ロボット）の 4 テーマに研究加速財源を充て、基盤研究の充実と設備の前倒し導入による研究の加速と成果の向上を図った。さらに、平成 21 年度には助成事業に装置・試作金型導入を行い、実用化研究開発を加速させた。  実用化・事業化に向けたマネジメントとして、平成 21 年度に素材供給者である三協マテリアルが研究開発項目④目標をほぼ達成したことを受け、供給体制を整えマグネシウム鍛造製品実用化を加速するため、同社は平成 21 年度にプロジェクトでの研究開発を早期終了させた。</p>
<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p><b>事業全体(委託事業)</b>  (目標達成度：◎)  ・コスト低減を促進できる小径連続鍛造材（AZ91+1wt%Ca）において、鍛造部材の機械的性質の最終目標値を達成した。（世界初）  ・環境に優しい表面清浄処理を最適化した切削粉を用いた固体リサイクル材において、機械的性質の最終目標値を達成した。</p> <p><b>(委託事業)</b>  <b>研究開発項目①「マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積」</b>  (目標達成度：○)  ・モデル鍛造部品の微細組織及び機械的性質に関するデータベースを構築した。  ・サーボプレスを使用したマグネシウム鍛造プロセスを構築し、最終目標値を達成した（世界初）。  ・モデル鍛造用素材の組織・機械的性質などのデータを収集し、データベース化した。</p> <p><b>研究開発項目②「マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構との関連性の解明」</b> (目標達成度：○)  ・合金元素が素材の鍛造加工性、鍛造組織及び耐熱性に及ぼす効果を原子レベルから明らかにした。（世界初）  ・鍛造用素材のマイクロ組織と機械的性質との関係を定量化した。  ・第二相粒子の寸法、体積率が動的組織変化（動的再結晶、動的析出）及び高温変形特性に及ぼす影響を明らかにした。（世界初）</p> <p><b>研究開発項目③「マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出」</b>  (目標達成度：◎)  ・目標値の表面付着炭素量0.1%以下を達成し、過熱水蒸気を用いた表面清浄化システムを構築した。（世界初）  ・マグネシウムの基礎的な粉塵爆発特性、爆発要因を解明し、安全性確保の指針を得た。（国際標準化に資する）  ・適切なリサイクル前処理、固化成形プロセス条件を明らかにし、固体リサイクル材の塑性加工性に関する最終目標値（断面減少率）を達成した。（世界初）  ・安全処理技術の研究として、爆発災害防止ガイドラインを策定。</p> <p><b>(助成事業)</b>  <b>研究開発項目④マグネシウム合金の鍛造用ビレット調整技術開発</b>  (目標達成度：◎)  ・断熱鋳型連続鍛造方法を考案・確立（世界初の Mg 小径ビレットの連続鍛造法）  ・結晶粒径 50mm 達成、DAS 15mm 以下達成、晶出物の微細・均一分散化実現達成  ・量産化に向けた基本的な鍛造技術確立に目処をつけた</p> <p><b>研究開発項目⑤マグネシウム合金の鍛造部材開発（輸送用機器、ロボット）</b>  (目標達成度：◎)（3 種。詳細は非公開資料のみに記載。）  ・引張強度 349MPa、伸び 24.8%、疲労強度 170MPa を有する実用レベルの Mg 部材を開発  ・現行のアルミ材（A6061）を凌駕する、引張強度 370MPa、疲労強度 170MPa、鍛造制度 ±0.01mm を有する実用レベルの Mg 部材を開発。また鍛造工法の工程簡略化も実現  ・残存トルク 6400N（Al 合金の 80%）を大幅にクリアし、Al 合金並みの残存トルクを有する部材の開発を実現。200℃での引張強さ 180MPa 以上で疲労寿命（疲労限強度ベースで）2 倍の部材を開発。エンジン周辺部材として 3 点を試作。</p>

	<p><b>研究開発項目⑥マグネシウム合金の鍛造部材開発（情報家電用機器）</b>  （目標達成度：○）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・曲げ加工、ボス、リブ加工などの複雑形状を実現。実用部材として携帯電話ケースの試作を実現。</li> <li>・高さ 3.05mm のボス・リブ成型技術、携帯部品サイズで板厚 0.18mm の薄板鍛造技術を開発。平坦度 0.1/40nm 以下を実現。また、高い再現性を有する鍛造シミュレーション解析技術の開発に成功</li> </ul> <p><b>研究開発項目⑦マグネシウム合金のリサイクルに係る技術開発</b>  （目標達成度：○）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・工場内スクラップ（切削屑、切削切粉、端材スクラップ）の連続処理方式において、表面付着物除去（残留炭素 0.1%）を達成。塗装品関しても、容易に剥離が可能な状態を確認。マグネシウムを連続処理できる装置を実現</li> <li>・過熱水蒸気循環によるリサイクル処理システムにおいて、原料比と同等程度まで過熱水蒸気量を低減させ、水使用量の 17%削減、エネルギー効率として 10%向上を確認。品位状態としてもリサイクルに問題ないシステムであることを確認。</li> </ul> <p>投稿論文 「査読付き」論文 43件 学会発表・講演 150件</p> <p>特 許 「出願済」20件</p>	
<p>IV. 実用化、事業化の見通しについて</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・マグネシウム合金の小径連続鍛造ピレットは、鍛造加工用素材として全くの新規素材で、10年後には 1000~2000 t/年程度に達し、素材価格も当初の 1500 円/kg から鍛造業界が望む 800 円/kg 以下の実現が見込まれる。</li> <li>・輸送用機器、ロボット分野については、1) 高機能鍛造用素材の開発、2) 量産鍛造技術の確立、3) プロトタイプ実証、4) 製品事業化の手順で実用化が進め、新規アイテムの探索、コスト競争力の改善とともに、既存のアルミ鍛造部材、アルミ鍛造部材の代替を進めて行くことが期待される。</li> <li>・鍛造用ダイカスト材と鍛造・プレス技術を組み合わせた複合鍛造技術も活用して、小型製品である携帯電話等の機構部品からさらには大型複雑形状外觀製品（ノートパソコン筐体）の事業化を目指す。</li> <li>・マグネシウム市場の成長に伴い、リサイクル処理装置の需要増加も同様に見込まれるため、市場動向に沿った事業化計画の立案と実行を進めてゆく。</li> <li>・リーマンショック以降の経済状況により、コスト要求は厳しく輸送機器への適用には時間がかかる。研究開発は進めながら、容器類・釣り具・カメラ部材などの製品適用を進め、市場を拡大していく。</li> </ul>	
<p>V. 評価に関する事項</p>	<p>事前評価</p>	<p>平成 17 年度実施 担当部 ナノテクノロジー・材料技術開発部</p>
	<p>中間評価以降</p>	<p>平成 20 年度 中間評価実施 平成 23 年度 事後評価実施</p>
<p>VI. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>平成 18 年 3 月 作成</p>
	<p>変更履歴</p>	

# ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画

平成22年4月1日

産業技術環境局

製造産業局

## 1. 目的

「新成長戦略（基本方針）」（2009年12月閣議決定）に記載されている我が国の強みを活かした「課題解決型国家」の実現に向け、世界をリードする「グリーン・イノベーション」、「ライフ・イノベーション」などを迅速に推進し、課題解決とともに新たな成長の実現を目指す。

具体的には、ナノテク・部材イノベーションプログラムにおいては、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な技術革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を可能とすることを目的とする。

## 2. 政策的位置付け

○新成長戦略（基本方針）（2009年12月閣議決定）

- ・「（2）グリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国戦略」「（3）ライフ・イノベーションによる健康大国戦略」「（5）科学・技術立国戦略」に対応

○第3期科学技術基本計画（2006年3月閣議決定）

- ・「ナノテクノロジー・材料分野」は、特に重点的に研究開発を推進すべき分野（重点推進4分野）の一つに指定、優先的に資源配分することとされている。
- ・我が国の材料技術は、基礎研究から応用研究、素材、部材の実用化に至るまでの全ての段階において世界のトップレベルを堅持しており、我が国製造業の国際競争力の源泉となっている。

○「イノベーション25」（2007年6月閣議決定）

- ・「ナノテクノロジー・材料分野」は、中長期的に取り組むべき課題として、「1. 生涯健康な社会形成」、「2. 安全・安心な社会形成」、「4. 世界的課題解決に貢献する社会形成」、及び「5. 世界に開かれた社会形成」の分野に位置付けられている。
- ・所要の措置を講じていくことが必要である事項として以下の点が指摘されている。
  - ・学際領域・融合領域における教育等人材育成、拠点形成
  - ・社会受容を促すための積極的な取り組み
  - ・知的財産確保のための戦略的な取り組み

## 3. 達成目標

- ・世界に先駆けて、ナノテクノロジーを活用した不連続な技術革新を実現する。
- ・我が国部材産業の強みを更に強化することで、他国の追随を許さない競争優位を確保す



るとともに部材産業の付加価値の増大を図る。

- ・ナノテクノロジーや高機能部材の革新を技術先導することで、これら部材を活用した情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの幅広い産業の付加価値の増大を図る。
- ・希少金属などの資源制約の打破、省エネルギー化を目指した低炭素社会の実現など、解決困難な社会的課題の克服を目指す。

#### 4. 研究開発内容

[プロジェクト]

##### I. ナノテクノロジーの加速化領域

ナノテクノロジーを活用した不連続な技術革新を加速・促進する。

###### (1) 異分野異業種ナノテクチャレンジ（運営費交付金）

###### ①概要

革新的なナノテクノロジーの研究開発を促進し、キーデバイスの早期実現を目指すため、大学や研究機関などの川上と企業などの川下の連携、異業種異分野の連携による提案公募によって、ナノテク実用化に向けたチャレンジを支援する。

###### ②技術目標及び達成時期

マテリアル・プロセス研究、加工・計測技術研究、昨今の環境意識向上に対応した研究、社会課題を解決するための基盤技術研究に加え、異分野等の融合研究を推進することにより、2014年度までにナノテクノロジーの産業化のための基盤的技術を確認し、実用化を図る。

###### ③研究開発期間

2005年度～2014年度

##### II. 情報通信領域

ナノテクノロジーや革新的部材開発技術を駆使して既存技術の微細化の壁を突破し、電子デバイス・光デバイスで世界をリードするとともに、高度化された製造技術の開発を行う。

###### (1) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—うち新材料・新構造ナノ電子デバイス（運営費交付金）

###### ①概要

従来の半導体は、性能の向上（高速化、低消費電力化、高集積化）を確保するために微細化が進められてきたが、絶縁性、誘電率等の物理的限界、微細化に伴う製造コストの増大など、集積度向上によるメリットが十分達成されなくなっている。

本研究開発では、シリコンで培った微細化技術やデバイス原理を活用しながら、シリコン材料の物理的限界を突破するための“新材料”および“新（デバイス）構造”の開発を行い、次世代の電子デバイス技術を確立する。

###### ②技術目標及び達成時期

2011年度までに、産業界が10年後を見据えた将来の電子デバイスを開発する際に、産業技術として活用できるかどうかの実現可能性を見極め、また技術シーズを確立

する。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト（運営費交付金）

①概要

将来のエレクトロニクスにおいて中核的な基盤技術となり得るスピントロニクス技術（電子の電荷ではなく、電子の自転＝「スピン」を利用する全く新しいエレクトロニクス技術）を確立するため、強磁性体ナノ構造体におけるスピンの制御・利用基盤技術を開発し、我が国が世界に誇るシーズ技術を核として、産学官の共同研究体制を構築し、将来の中核的エレクトロニクス技術における我が国の優位性の確保を図る。

②技術目標及び達成時期

2010年度までに、超高集積で高速な不揮発性メモリとして期待されるスピンメモリのための基盤技術を確立する。また、新ストレージ・メモリデバイス、不揮発性スピノ光機能素子、スピン能動素子等の新しい動作原理によるスピン新機能素子の実現のための基盤技術を確立する。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

(3) ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—うち窒化物系化合物半導体基板・エピタキシャル成長技術の開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

窒化物系化合物半導体は、パワーデバイス、高周波デバイス、発光デバイス等、重要なデバイスの飛躍的な性能向上と消費電力削減への貢献を期待されている。このため、従来の半導体材料では実現出来ない領域で動作可能なハイパワー・超高効率の電子素子、超高速電子素子等の作成に必要な窒化物系化合物半導体先進技術の国際競争力を強化すべく、高品質かつ大口径単結晶基板、高品質かつ大口径エピタキシャル成長技術等の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

②技術目標及び達成時期

2011年度までに、次世代窒化物系半導体デバイスを実現する以下結晶作製技術を開発する。

1) 基板技術（GaN、AlNバルク結晶作製技術）

・口径2～4インチで高品質エピ成膜を可能とする低コストの単結晶基板作製技術の確立。

2) エピ技術（エピタキシャル成膜及び計測評価技術）

・低欠陥高品質エピ層を実現する成膜技術及び膜成長過程を計測評価する技術の確立。

・高出力かつ高安定動作可能なエピ層の実現

・高耐圧超高速な新しいデバイス構造の開発

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(4) 三次元光デバイス高効率製造技術（運営費交付金）

①概要

波面制御素子による空間光変調技術を確立し、ガラス中に三次元造形を高精度に一括形成できるプロセス技術を開発する。この技術を用いて、具体的な光デバイスを作製し、当該技術の有効性の確認と市場への早期参入のための基盤技術を確立する。

②技術目標及び達成時期

2010年度までに波面制御素子による空間光変調技術を用いたフェムト秒レーザー照射技術等を確立し、高精度の光デバイスを高速に作製できるプロセス技術を開発する。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

(5) 低損失オプティカル新機能部材技術開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

近接場光の原理・効果を応用した低損失オプティカル新機能部材技術を開発し、実用化の目処を得ることを目的とする。動作原理に近接場光を用いるオプティカル新機能部材は、従来の材料特性のみに依存した光学部品では不可能な機能・性能を発揮し、液晶プロジェクター・液晶ディスプレイなど情報家電の省エネルギー、高性能・高信頼化を図る上でのキーデバイスとなることが期待できる。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

②技術目標及び達成時期

2010年度までに、共通基盤技術として、ナノ構造部材の設計・作製・評価技術を開発するとともに、ナノ構造部材に発現する近接場光の機能を動作原理とする低損失オプティカル新機能部材を検討し機能を確認する。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

(6) 半導体機能性材料の高度評価基盤開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

情報通信機器の高機能化や低消費電力化等の要求を満たす半導体集積回路を実現するため、新たな機能性材料開発に貢献する評価基盤技術を開発し、さらに開発した機能性材料を半導体及び半導体集積回路に適用できる統合的なソリューション技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

②技術的目標及び達成時期

2011年度までに、半導体デバイス性能に直結する接合素子の性能性及び信頼性等、半導体製造プロセス全体を俯瞰しつつ、機能性材料開発が可能となる評価基盤技術を開発し、開発した機能性材料を用いた統合的なソリューションが提案できる材料評価基盤を構築する。

③研究開発期間

2009年度～2011年度

### III. ライフサイエンス・健康・医療領域

ナノテクノロジーを駆使して初めて可能となる診断・治療により革新的な医療を実現する。

#### (1) 個別化医療実現のための技術融合バイオ診断技術開発（運営費交付金）（再掲）

##### ①概要

我が国が有する微細加工技術・表面処理技術といったナノテク等の強みを活かし、染色体異常を高感度、高精度かつ迅速、安価で非コード領域までを検出するゲノムアレイや解析基盤技術開発を行うとともに、全自動解析システムの開発を行う。

##### ②技術目標及び達成時期

2010年度までに、BAC（染色体の断片）を用いた非コード領域を含むゲノム全領域を検出できる高精度ゲノムアレイを開発する。さらに、臨床現場において、微量サンプル（数ナノグラム）から、12時間以内に染色体異常（増幅、欠失、コピー数多型等）を、低コストかつ定量性・再現性を確保して検出ができる自動染色体異常解析システムのプロトタイプを開発する。

##### ③研究開発期間

2006年度～2010年度

### IV. エネルギー・資源・環境領域

ナノテクノロジーや革新的部材開発技術を駆使して、エネルギー・資源・環境等の社会的制約を克服すると同時に我が国の強みであるナノテク関連産業・部材産業の競争力を強化する。

#### (i) エネルギー制約の克服

#### (1) サステナブルハイパーコンポジット技術の開発（運営費交付金）（再掲）

##### ①概要

炭素繊維複合材料は、軽量、高強度等の優れた特性を有している。従来の熱硬化性樹脂を用いた炭素繊維複合材料では成形性・加工性に乏しくリサイクルが困難であったため、熱可塑性樹脂を用いた炭素繊維複合材料（CFRTP）の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

##### ②技術目標及び達成時期

2012年度までに、炭素繊維と熱可塑性樹脂との中間基材を開発し、高速成形技術、接合技術及びリサイクル技術を開発する。

##### ③研究開発期間

2008年度～2012年度

#### (2) マルチセラミックス膜新断熱材料の開発（運営費交付金）（再掲）

##### ①概要

住宅やビルなどの冷暖房における大幅な省エネを実現する画期的な断熱性能を持つ壁および窓材料を、セラミックスのナノ多孔体構造やポリマー複合化構造などからなるマルチセラミックス膜アセンブリ技術によって開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

②技術目標及び達成時期

2011年度までに、熱貫流率（熱の伝わりやすさ）が $0.3\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 以下、壁厚さ10mm程度の超断熱壁材料および熱貫流率が $0.4\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ 以下、光（可視光）透過率が65%以上（Low-Eガラス使用）、ヘイズ率が1%以下の超断熱窓材料を実現する。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) カーボンナノチューブキャパシタ開発プロジェクト（運営費交付金）（再掲）

①概要

高純度、高密度に配向した長尺の単層カーボンナノチューブの大量合成技術を開発するとともに、これを用いた従来よりも格段にパワー（電力）と蓄電量が大きなキャパシタを開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

②技術目標及び達成時期

2010年度までに、単層カーボンナノチューブの高度配向技術及び大量生産技術を確立するとともに、キャパシタ製造技術を確立することで、 $20\text{Wh}/\text{Kg}$ の高エネルギー密度と耐久性を有する電気二重層キャパシタを開発する。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 革新的省エネセラミックス製造技術開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

小型炉設備で生産可能な小型セラミック中空ユニットを複数組みあわせることで、これまでその製造が難しかった複雑形状かつ大型セラミックス部材を省エネで製作することができる革新的なセラミック部材製造技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

②技術目標及び達成時期

2013年度までに、高機能化された小さな精密ブロックを立体的に組み上げ、高効率で接合、一体化をし、複雑形状や大型の部材を製造可能とする革新的なプロセス技術の基盤を確立し、高耐性部材、高温断熱部材及び高比剛性部材の試作を行う。

③研究開発期間

2009年度～2013年度

(5) 革新的ガラス溶融プロセス技術開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

プラズマ等による高温を利用し瞬時にガラス原料をガラス化することにより、極めて効率的にガラスを気中で溶融（インフライトメルティング法）し省エネに資する革新的ガラス溶融プロセス技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

②技術目標及び達成時期

2012年度までに、インフライトメルティング法により原料を溶解する技術、カレットをガラス原料として利用するため高効率で加熱する技術、カレット融液とインフライトメルティング法による原料融液とを高速で混合する技術を開発する。

③研究開発期間

2008年度～2012年度

(6) 革新的セメント製造プロセス技術開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

クリンカ（セメントの中間製品）焼成温度の低温化等の効果がある物質（鉍化剤）の開発等を行うことにより、焼成温度の低温化や焼成時間の短縮化等、非従来型の革新的なセメント製造プロセスの基盤技術を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

②技術目標及び達成時期

2014年度までに、単位セメント製造重量当たりのエネルギー消費量8%削減を可能とする基盤技術を確立する。

③研究開発期間

2010年度～2014年度

(7) 高温超電導電力ケーブル実証プロジェクト（運営費交付金）（再掲）

①概要

革新的な高効率送電技術を確立して高温超電導ケーブルの実用化を促進するため、工業生産プロセスで実用化レベルに達している高温超電導線材（D I - B S C C O等）を活用し、首都圏の系統に接続する実証試験及び評価を行う。

なお、本事業は、発電用施設による電気の供給の円滑化を図る観点から行うものである。

②技術目標及び達成時期

2012年度までに、200MVA級の中間接続部を有した三心一括型高温超電導ケーブルを、冷却装置や保護装置などの付帯設備とともに66KV実系統に接続して、12ヶ月以上の長期連系試験を行うことによって総合的な安全性や信頼性を実証する。

③研究開発期間

2007年度～2012年度

(8) 発電プラント用超高純度金属材料の開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

超高純度金属材料を発電設備の蒸気配管等に実用化することを目指し、高純度金属材料の高度化に向けた低コスト・量産化製造技術を開発し、実使用環境における超高純度金属材料の耐久性試験等を行う。

なお、本事業は、発電用施設における電気の供給の円滑化を図る観点から行うもので

ある。

②技術目標及び達成時期

2010年までに、不純物総量100ppm未満、溶解量数100kg以上の低コスト・量産化技術製造技術を開発するとともに、製造された超高純度材料が発電プラントの各種機器に適用でき、本材料の持つ優れた特性を長期に亘って発揮できることを確認する。

③研究開発期間

2005年度～2010年度

(9) 次世代蓄電池材料評価基盤技術開発（運営費交付金）（新規）（再掲）

①概要

新しい蓄電池材料の性能や特性を共通的に評価できる基盤技術を確立する。これにより、各材料メーカーと電池メーカーとの擦り合わせ期間が短縮され、高性能蓄電池・材料開発の効率が抜本的に向上・加速化される。

②技術目標及び達成時期

2014年度までに、蓄電池の新材料について、構成材料間での適合性及び材料－製造工程間の相互影響の解析を踏まえた、共通的な性能特性評価方法（最適な製造工程、充放電様式等）を確立し、それを踏まえ、評価シミュレーション・システム技術の開発を行う。

③研究開発期間

2010年度～2014年度

(10) 低炭素社会を実現する新材料パワー半導体プロジェクト

①概要

次世代自動車のインバータ（電力制御装置）などに用いるパワー半導体について、Si（シリコン）に比べ、電力損失が1/100以下であるなど、優れた物性を有するSiC（シリコンカーバイド）の実用化を目指す。

②技術目標及び達成時期

高品質・低コストな大口径SiCウエハ製造技術及びSiC高耐圧スイッチングデバイス製造技術を確立する。具体的には、2014年度までに直径15cm（現状の1.5倍。面積では約2.3倍）のウエハ製造技術、鉄道等に用いられる5kV級の高耐圧スイッチングデバイス製造技術を開発する。

③研究開発期間

2010年度～2014年度

(ii) 資源制約の克服

(1) 希少金属代替材料開発プロジェクト（運営費交付金）

①概要

ハイテク製品の製造に不可欠であり世界的な需給逼迫が懸念されるレアメタル（タングステン、インジウム、ディスプロシウム）について、ナノテクノロジー等の最先端技

術を活用して、代替材料開発・使用量削減を行う。なお、平成21年度からは、これまでの対象3鉱種に加えて、白金、セリウム、テルビウム等も研究開発の対象とする。

#### ②技術目標及び達成時期

タングステン、インジウム、ディスプロシウムについては2011年度までに、白金、セリウム、テルビウム等については2013年度までに、使用原単位について現状と比較して削減ができる製造技術を開発し、ユーザー企業、大学等の外部機関に対して機能評価のためにラボレベルで提供（試料提供）できる水準に至るまでの技術を確立することを目標とする。また、製品の機能や製造コストは現状と同等であることを少なくとも維持することを前提とする。

〔対象元素〕

- ・超硬工具向けタングステン（W）
- ・透明電極向けインジウム（In）
- ・希土類磁石向けディスプロシウム（Dy）
- ・排ガス浄化向け白金族（Pt）
- ・精密研磨向けセリウム（Ce）
- ・蛍光体向けテルビウム、ユーロピウム（Tb、Eu）

#### ③研究開発期間

2007年度～2013年度

### (iii) 環境制約の克服

#### (1) グリーン・サステイナブルケミカルプロセス基盤技術開発

##### ①概要

化学品等の製造プロセスにおけるシンプル化、クリーン化、原材料・資源の多様化・有効利用、更に、廃棄物の減容化、容易なりサイクル等を実現し、産業競争力強化、国際規制の先取りを図って、将来にわたっても持続的に化学品等を製造するための必要なGSC（グリーン・サステイナブルケミカル）プロセスを開発する。

##### ②技術的目標及び達成時期

2015年度までに、有害な化学物質を削減できる又は使わない革新的な製造プロセス、廃棄物、副生成物を削減できる革新的な製造プロセス、資源生産性を向上できる革新的な製造プロセスの開発を行う。

##### ③研究開発期間

2008年度～2015年度

#### (2) 革新的マイクロ反応場利用部材技術開発（運営費交付金）（再掲）

##### ①概要

マイクロリアクター、ナノ空孔などの精密反応場を利用し、反応分子の自由な運動を活性種レベルで制御した革新的な化学反応プロセスと新機能材料創成技術の確立を目指す。さらに、マイクロリアクターとナノ空孔反応場の組み合わせ、各反応場とマイクロ波等のエネルギー供給手段との組み合わせにより協奏的反応場を構成し、さらなる高効率生産等を可能にする基盤技術を開発する。これらの技術の確立により、反応システム



の小型化、多段プロセスの簡略化等を通じた化学産業の製造工程等の省エネルギー化を図る。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

#### ②技術的目標及び達成時期

2010年度までに、マイクロリアクター技術、ナノ空孔技術を軸とし、これらに更にマイクロ波、超臨界流体等のエネルギー供給手段を組み合わせた協奏的反応場を構成することにより、これまでにない革新的な化学反応プロセスを確立し、新機能材料創成技術を実現する。さらに、これらの技術を用いて高性能・高機能電子材料、医薬中間体などの部材を開発する。

#### ③研究開発期間

2006年度～2010年度

### (3) 循環社会構築型光触媒産業創成プロジェクト（運営費交付金）

#### ①概要

我が国で発見された光触媒技術の新産業分野開拓を目指し、サイエンスにさかのぼることにより、紫外光のみならず、可視光レベルでの性能・機能の飛躍的な向上のための技術基盤を構築する。これにより、従来では困難とされてきた医療関連分野や住宅建材分野、環境関連分野等に光触媒技術を導入し、安心・安全な環境を提供できる技術を開発する。

#### ②技術目標及び達成時期

2011年度までに、材料レベルで紫外光活性2倍、可視光活性10倍の感度向上を達成し、その高感度光触媒を適用した成膜プロセス技術の基盤技術を確立する。

#### ③研究開発期間

2007年度～2011年度

### (4) 高感度環境センサ部材開発

#### ①概要

ダイオキシンをはじめとする極微量有害有機物質を超高感度で安価かつ簡易に計測するために、高感度セラミックセンシング材料を用いた環境センサーを開発する。

#### ②技術目標及び達成時期

2010年度までに、ダイオキシン類、エストラジオール及びビスフェノールAについて、0.001ng・mlの濃度において有意な電気信号として検出し得る小型・携帯型計測器に挿入可能な寸法のセンサ部材の開発を目標とする。

#### ③研究開発期間

2006年度～2010年度

### (5) 次世代高信頼性ガスセンサー技術開発（運営費交付金）（再掲）

#### ①概要

一酸化炭素中毒やガス漏れなどのガス事故を限りなくゼロに近づけるため、センサー素子のナノレベルでのメカニズム解析及び開発設計を行い、コードレスで高信頼性を有

する次世代高信頼性ガスセンサー（COセンサー・メタンセンサー）を開発する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

②技術目標及び達成時期

2011年度までに、最先端のナノテクノロジー及びMEMS技術を導入し、電池駆動で5年以上の長寿命、高信頼性（数百ppm以下の故障率）、低コストなCOとメタンのセンサーを開発する。

③研究開発期間

2008年度～2011年度

(6) 環境調和型水循環技術開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

我が国が強みを持つ、膜技術を始めとする水処理技術を強化し、省水型・環境調和型の水循環システムの開発に資する省エネ・省水型の要素技術を開発する。

②技術目標及び達成時期

2013年度までに、以下の技術を開発する。

・革新的膜分離技術の開発：

従来法に比べ膜透過加圧エネルギー等を50%以上削減。

・省エネ型膜分離活性汚泥法（MBR）技術の開発：

従来法に比べ膜洗浄の曝気（空気気泡）エネルギー等を30%以上削減。

・有用金属・有害物質の分離・回収技術の開発：

従来法に比べ汚泥の削減により汚泥処理・処分エネルギーを80%以上削減。

・高効率難分解性物質分解技術の開発：

従来法に比べ窒素処理に係るエネルギーを50%以上削減。

オゾン酸化法等のエネルギーを50%以上削減。

③研究開発期間

2009年度～2013年度

## V. 材料・部材領域

極めて広範囲な産業領域に波及する材料・部材領域について、ユーザー製造業等との連携（川上・川下連携）を促進し、高度な部材産業群の「すり合わせ力」を一層強化する。

(1) 鉄鋼材料の革新的高強度・高機能化基盤研究開発（運営費交付金）（再掲）

①概要

プラント、構造物や自動車等の革新的な高効率化、省エネルギー化、長寿命化、安全・安心化を図るため、最新の科学的知見を導入し、鉄鋼材料及び鋼構造物を超高機能化する基盤的研究開発を行う。具体的には、高強度鋼、高機能鋼の実用化拡大の基盤となる(1)高級鋼厚板(高強度鋼、極低温用鋼、耐熱鋼)溶接部の信頼性・寿命を大幅に向上する溶接施工技術(高密度・清浄熱源溶接技術)、及び金属組織制御技術を基本とする材料技術(クリーブ破壊及び水素破壊の機構解明等を踏まえた)の開発、(2)部材の軽量化を図るために強度、加工性等の最適機能傾斜を付与する機械部品鍛造技術(駆動部材の信頼性確保のための耐疲労破壊特性の向上を踏まえた)の開発を行う。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

②技術目標及び達成時期

2011年度までに、高級鋼厚板（高強度鋼・極低温用鋼・耐熱鋼）の溶接を予熱・後熱なしに可能とする溶接技術と材料技術を開発するとともに、傾斜機能部材の鍛造技術を開発する。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(2) 超ハイブリッド材料技術開発（運営費交付金）

①概要

従来実現が不可能と考えられていた相反する複数機能（トレードオフ機能）を両立できる材料を、異種素材の組合せ（ハイブリッド化）により実現するための技術を開発する。要素技術として、異種材料間の界面挙動をシミュレーション技術等により解明し、ナノレベルよりもさらに微小な原子・分子レベルでのハイブリッド化構造・配列制御のための合成技術を開発する。従来の単一材料では実現困難であったトレードオフの性能を引き出すことで、自動車用構造材料、パワーデバイス用材料、光学材料等を出口イメージとした、高機能革新部材製造に必要な技術基盤を開発する。

②技術目標及び達成時期

2011年度までに、電気・電子材料、光学材料、その他工業材料について従来材料では実現できなかった相反機能を解消するとともに、市場評価が可能な成果物を供試し、市場（ユーザー）から、客観的な実用化研究開発課題を抽出する。また、単なる相反機能の解消ではなく、相反機能を制御・実現する技術を開発する。

③研究開発期間

2007年度～2011年度

(3) 先端機能発現型新構造繊維部材基盤技術の開発（運営費交付金）

①概要

電界紡糸や熔融紡糸等により創製される極微細な繊維状材料に対してナノオーダーの成形加工や微細な界面加工ならびに複合化することで材料を高機能化した革新的部材を創出する。高機能新材料を求めるユーザーの要望を満たす繊維の極微細加工と高次複合化を解決する基盤技術開発を行う。

②技術的目標及び達成時期

2010年度までに、電界紡糸法による繊維高機能化、大型装置化技術およびナノ熔融分散紡糸法による超極細炭素繊維製造技術を開発し、これら基盤技術を活用して、高性能・高機能電池用部材、高性能・高機能フィルター用部材、高性能・高機能医療衛生用・産業用部材を開発する。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

(4) 次世代光波制御材料・素子化技術（運営費交付金）（再掲）

#### ①概要

ガラス材料に関する精密モールド技術を確立し、機能性の高い光波制御素子を低コストで生産できるプロセス技術を開発することで部材の小型化・高機能化を図りつつ、省エネを実現する。

なお、本事業は、エネルギー需給構造の高度化を図る観点から行うものである。

#### ②技術目標及び達成時期

2010年度までにサブ波長レベルの微細構造をガラス表面にモールド成形する技術を実現し、実装可能な具体的なデバイスを作製する。

#### ③研究開発期間

2006年度～2010年度

### (5) 高機能複合化金属ガラスを用いた革新的部材技術開発（運営費交付金）

#### ①概要

複合化金属ガラス（金属ガラスマトリックス中に第二相として微結晶や微粒子または微小空隙等を分散させたもの）を創製して、次世代高密度記録媒体、超微小モータ用部材および高強度・高導電性電気接点部材を開発する。

#### ②技術目標及び達成時期

2011年度までに、複合化金属ガラス合金を創製し、従来の金属ガラス単層合金の持つ優れた特徴に加えて、塑性加工性、硬磁気特性、高電気伝導性等を付与する。この複合化金属ガラスの新規特性を用いて、従来の金属ガラス単層合金では為しえなかった革新的部材の開発を行い、さらに多様な工業製品に応用することで、我が国産業の優位性を確保する。

#### ③研究開発期間

2007年度～2011年度

### (6) マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト（運営費交付金）

#### ①概要

マグネシウム合金部材について、製品歩留まりが高く、高耐疲労性を付与する鍛造技術の開発を行う。また、循環型素材としてのマグネシウム合金部材の特性を活かし、リサイクル材の鍛造用ビレット化に係る課題抽出を行う。当該技術開発により、マグネシウム鍛造部材製造技術の基盤を構築し、我が国の家電、自動車等の川下産業の競争力の強化に不可欠な高度部材を供給する。

#### ②技術目標及び達成時期

2010年度までに高強度・高耐疲労・加工性に優れたマグネシウム鍛造技術を確立する。

#### ③研究開発期間

2006年度～2010年度

### (7) 低炭素社会を超軽量・高強度融合材料プロジェクト

#### ①概要

日本で発見されたカーボンナノチューブ（CNT）は、電気や熱をよく通す、高強度で高い柔軟性を持つ等、非常に多くの優れた特性を持つ新規ナノ材料である。このCNTと既存材料との融合を通じて、世界をリードする成長産業の創出に貢献する高機能、高性能な新規融合材料の開発を目指す。

②技術目標及び達成時期

2011年度までにCNTの形状、物性等の制御、分離・評価技術、既存材料中に分散する技術など融合基盤研究を、2014年度までにCNTを既存材料と融合させた応用研究開発技術を確立する。

③研究開発期間

2010年度～2014年度

## VI. 共通基盤領域

ナノテクノロジーにおけるリスク不安に対処するため、リスク管理手法を開発し、社会に貢献する産業化のための支援を推進する。

(1) ナノ粒子の特性評価手法開発（運営費交付金）

①概要

ナノ粒子のキャラクタリゼーション、計測技術の確立とともに、生体影響等評価手法、暴露評価手法及びナノテクノロジーによるリスク不安に対処したリスク管理手法を開発する。

②技術目標及び達成時期

2010年度までに、生体影響等評価手法、暴露評価手法及びリスク評価手法を開発し、ナノ粒子のリスク評価及び管理の考え方の提言を行う。

③研究開発期間

2006年度～2010年度

### 5. 政策目標の実現に向けた環境整備（関連施策）

ナノテクノロジーは、情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなどの分野における科学技術の進歩や課題解決に貢献する重要な技術シーズである。そのため、ナノテクノロジーの研究開発と一体となった関連施策を実施することで、その成果を市場に出していくことが重要である。主な関連施策を、以下に示す。

[技術戦略マップ]

- ・NEDO及び経済産業省では、技術戦略マップを策定、毎年改訂し、ナノテクノロジー・部材分野の将来の方向性を見定めながら、合理的かつ効果的な研究開発プロジェクトを推進している。また、技術戦略マップを活用して、多様な連携（川上川下の垂直連携、異業種間の水平連携など）による研究開発を促進、支援し、当該分野の技術革新を促進している。

[サンプル提供・実用化促進]

- ・NEDOでは、実施する研究開発プロジェクト成果のサンプルを対象として、それらを活用した用途の開発、実用化ないし製品化提案を有する企業とのマッチングを図ることで、プロジェクトの事業化を促進する取組みを実施している(サンプルマッチング事業)。

#### [基準・標準化]

- ・経済産業省では、ナノテクノロジー関連の研究開発成果を社会及び市場等に普及するための環境整備として、ナノテクノロジーの標準化活動（ISO/IEC、JIS）を推進している。

#### [広報]

- ・ナノテクノロジーに関する先端技術及び製品等の世界最大の展示会である「nano tech」が毎年日本で開催されている。

#### [社会受容]

- ・ナノテクノロジーの産業化の推進とともに、ナノ粒子のキャラクタリゼーション技術や人の健康や環境に及ぼす影響等の潜在的な課題に関する知見を蓄積する等のナノテクノロジーの社会受容に対する取組みを推進している。
- ・経済産業省では、2006年度から「ナノ粒子の特性評価手法開発」を開始し、工業ナノ粒子のリスク評価管理手法の確立を目標としたプロジェクトを開始し、2009年10月に「ナノ材料リスク評価書」（中間報告書）を公表した。また、政策的対応として、2009年3月に取りまとめた「ナノマテリアル製造事業者等における安全対策のあり方研究会」報告書に基づき、ナノマテリアルの製造事業者等における自主的な安全対策を促進するための情報収集・開示プログラムを実施している。
- ・OECDでは、2006年9月、化学品委員会に工業ナノ材料作業部会（WPMN）が設置され、代表的な14種の工業ナノ材料について、試験計画の合意と試験実施を目的とする「スポンサーシッププログラム」が実施されている。スポンサーシッププログラム対象物質のうち、カーボンナノチューブ（単層、多層）、フラーレンの3物質については日本が中心となって担当し、「ナノ粒子の特性評価手法開発」等の成果で貢献している。

#### [人材育成]

- ・独立行政法人産業技術総合研究所は、「ナノテク製造中核人材の養成プログラム」を実施し、情報家電、燃料電池、ロボット、医療機器、バイオ等の応用分野において、その産業の基盤と創出を支える中堅企業を対象として、「基礎加工技能・技術、特殊な要素技能・技術に習熟し、製造技術の高度化を図る人材」及び「豊富なナノ加工プロセスの知識や先端機器を使いこなすノウハウ等を習熟し、製造現場の技能・技術を統括できる人材」の育成を行っている。
- ・NEDOでは、我が国の産業技術の発展のため、先端分野や融合分野の技術を支える人材の育成と、人的交流の面から産学連携を促進するための「場」の形成を促進する取組みを実施している（NEDO特別講座）。具体的には、優れた成果を生み出しつつあり、大学が技術の中核となっている研究開発プロジェクトをコアプロジェクトとし、そのプロジェクトリーダーの所属大学に拠点を設置し、関連技術の人材育成、人的交流の拡大、周辺研究の実施を行うもの。ナノテクノロジー関連の研究開発プロジェクトも複数実施している。

#### [関係機関との連携]

- ・ナノエレクトロニクス半導体新材料・新構造技術開発—うち新材料・新構造ナノ電子デバイス、希少金属代替材料開発プロジェクトにおいては、文部科学省との合同会議を設

置するなど、連携しつつプロジェクトを推進している。

- ・経済産業省・文部科学省が協力のもと、平成21年6月より産業技術総合研究所、物質・材料研究機構、筑波大学が中核なり、茨城県つくば市において世界的なナノテク研究拠点を形成するための「つくばイノベーションアリーナ(TIA nano)」構想が推進されている。ナノエレクトロニクス、カーボンナノチューブ、ナノ材料安全評価などの研究領域、ナノデバイス実証・評価ファウンドリーなどのインフラを生かし、主要企業・大学との連携網を広げ、産学官に開かれた融合拠点として、ナノテクの産業化と人材育成を一体的に推進することとしている。

## 6. 研究開発の実施に当たっての留意事項

事業の全部又は一部について独立行政法人の運営費交付金により実施されるもの（事業に（運営費交付金）と記載したものは、中期目標、中期計画等に基づき、運営費交付金の総額の範囲内で、当該独立行政法人の裁量によって実施されるものである。

## 7. 改訂履歴

- (1) 平成12年12月28日付け制定。
- (2) 平成14年2月28日付け制定。材料ナノテクノロジープログラム基本計画（平成12・12・27工総第16号）は、廃止。
- (3) 平成15年3月10日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成14・02・25産局第8号）は、廃止。
- (4) 平成16年2月3日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成15・03・07産局第1号）は、廃止。
- (5) 平成17年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成16・02・03産局第7号）は、廃止。
- (6) 平成18年3月31日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成17・03・25産局第4号）は、廃止。
- (7) 平成19年4月2日付け制定。ナノテクノロジープログラム基本計画（平成18・03・31産局第13号）は、廃止。
- (8) 平成14年2月28日付け制定。
- (9) 平成15年3月10日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成14・02・25産局第9号）は、廃止。
- (10) 平成16年3月7日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成15・03・07産局第5号）は、廃止。
- (11) 平成17年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成16・03・07産局第5号）は、廃止。
- (12) 平成18年3月31日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成17・03・25産局第3号）は、廃止。
- (13) 平成19年4月2日付け制定。革新的部材産業創出プログラム基本計画（平成18・03・31産局第14号）は、廃止。
- (14) 平成20年4月1日付け、ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画制定。

ナノテクノロジープログラム基本計画（平成19・03・20産局第1号）および革新的部材プログラム基本計画（平成19・03・19産局第4号）は、本イノベーションプログラム基本計画に統合することとし、廃止。

（15）平成21年4月1日付け制定。ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画（平成20・03・24産局第1号）は、廃止。

（16）平成22年4月1日付け制定。ナノテク・部材イノベーションプログラム基本計画（平成21・03・27産局第2号）は、廃止。



(ナノテク・部材イノベーションプログラム)  
「マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト」基本計画

ナノテクノロジー・材料技術開発部

## 1. 研究開発の目的・目標・内容

### (1) 研究開発の目的

我が国の材料産業は、国際的に高い技術力と競争力を有し、我が国の経済社会の発展を支えているが、川下産業との取引のオープン化に伴いユーザーとの連携の希薄化が進行する一方で、汎用的な材料技術はアジア諸国の技術向上によるキャッチアップが進行している。そのため我が国において産学官を含む連携の強化(川上川下の垂直連携、材料創成と加工の水平連携など)を図ることで、次世代の部材分野での我が国のイノベーションを促進することが喫緊の課題となっている。

そこで本プロジェクトは、『部材分野の技術戦略マップを活用し、将来の部材の基盤技術の方向性を見定めるとともに、材料関係者だけでなく多様な連携(川上川下の垂直連携、材料創成と加工の水平連携等)による基盤技術開発を支援することで、部材分野の技術革新を促進すること』を目的とした「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の中で、特に『川上・川中・川下の各段階における[擦り合わせ]の連鎖こそが我が国高度部材産業の強みとなっていることから、この擦り合わせ力の向上に資するようなプロジェクト体制(垂直連携)で実施することで、川下産業の競争力向上に貢献すること』を目的として実施するものである。

マグネシウム合金は、その軽量性とリサイクルに要するエネルギー消費が少ない循環型素材としての可能性から、おもに自動車部品と家電製品において用途が拡大してきており、欧米や韓国、中国などの諸外国においてもマグネシウム成形技術開発が進められている。

自動車ならびに家電分野は、日本が強みとする産業分野であり他産業への波及効果も大きい。それらの競争力の維持・強化を図るためには、世界をリードする国内のマグネシウム合金に関わる基盤技術、および金型設計、鍛造技術等の我が国ものづくり技術の優位性を活用する本プロジェクトを推進することが必要である。

このため、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(以下、「NEDO技術開発機構」という。)は、産学の科学的知見を結集してマグネシウム合金の高性能鍛造部材製造技術の基盤を構築し、これを産業技術へ繋げていくとともに、社会の共通基盤として情報の整備、提供を通じて、行政、産業界等の間で科学的知見に基づいた正確かつ適切な認識の醸成を図る事業方針に基づき、以下のプロジェクトを実施する。

本プロジェクトでは、部材分野の技術戦略マップで示されている医療・福祉/安全・安心分野、環境・エネルギー分野および情報家電分野におけるマグネシウム合金部材の引張強度や疲労強度の向上など、結果として部材コストの削減を実現するために必要な技術を開発する。

具体的には、マグネシウム合金の高性能鍛造部材製造技術の基盤を構築し、鍛造に関する共通基盤技術として鍛造特性の解明を行う。また、マグネシウム合金のリサイクル技術に係る課題を抽出し、課題解決のための技術開発を行って、さらにはリサイクルシステムの提案と安全性評価を行うことを目的とする。

### (2) 研究開発の目標

## 【共通基盤技術】

### ① マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積

中間目標：鍛造用素材の組織の結晶粒子と変形機構との関係をデータベース化することにより、鍛造部材製造に必要な素材の組成、組織と鍛造条件の設定方法を確立する。

最終目標：鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部材特性の関連性を整理し、鍛造部材の評価方法を確立する。

### ② マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構の関連性の解明

中間目標：鍛造素材組織と鍛造加工性の関係解明において実施した組織微細化技術を適用して、結晶（等軸状もしくは柱状）の平均粒径が  $50\mu\text{m}$  以下の凝固組織を持つ耐熱合金ビレットの連続鍛造技術の開発に貢献する。

最終目標：鍛造用素材の組織の結晶粒子と変形機構との関係についてデータベース化を進め、鍛造加工マップとして整備し、鍛造温度低温化技術を開発するとともに、実用化レベルの部材として  $170\text{MPa}$  ( $10^7$  回) の疲労強度を持つ構造用マグネシウム鍛造部材の最適な鍛造加工手順を導出するための鍛造組織形成技術の基盤技術を構築する。

### ③ マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出

中間目標：

- ・マグネシウムスクラップ取り扱い時の安全性評価方法に必要な主要因を明らかにするとともに、工場内スクラップを対象としたリサイクルシステムを構築する。

- ・固体リサイクル材の鍛造用ビレットへの適用可能性を明らかにする。

最終目標：

- ・従来のカスケード型リサイクル（低品位素材へのリサイクル）に代えて、リサイクル材料が新材料と同等の特性を維持する市中スクラップリサイクル基盤技術の開発を行うとともに、総合的なマグネシウムリサイクルについての信頼性評価、データ集積を行う。

- ・大量排出時を想定した市中回収品スクラップの前処理技術（分別、分離、不純物除去など）の課題抽出し、市中スクラップリサイクル基盤技術を提案する。

## 【実用化技術】

### ④ マグネシウム合金の鍛造用ビレット調整技術開発

最終目標：結晶（等軸状もしくは柱状）の平均粒径が  $50\mu\text{m}$  以下の凝固組織を持つ耐熱合金ビレットの連続鍛造技術を開発する。

### ⑤ マグネシウム合金の鍛造部材開発（輸送用機器、ロボット）

最終目標：

- ・耐熱部材として、締結フランジ部の構造に対し、現状マグネシウム構造部材として実用的な締結力維持を達成する複合鍛造技術を開発する。

- ・耐疲労部材として、アルミ鍛造部材レベルの実用部材が供給可能な鍛造技術を開発する。

⑥ マグネシウム合金の鍛造部材開発（情報家電用機器）

最終目標：リブなど複雑な突起物を有し、表面平滑度が高い複雑な形状の高精密大型実用部材の製造が可能な鍛造技術を開発する。

⑦ マグネシウム合金のリサイクルに係る技術開発

最終目標：工場内スクラップの連続処理方式における表面付着物除去(含有炭素 0.1%以下)を達成する技術開発を行う。併せて、新方式によるリサイクル方式の検証を行う。

(3) 研究開発内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発項目について、別紙の研究開発計画に基づき研究開発を実施する。

【共通基盤技術】

- ① マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積
- ② マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構との関連性の解明
- ③ マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出

【実用化技術】

- ④ マグネシウム合金の鍛造用ビレット調整技術開発
- ⑤ マグネシウム合金の鍛造部材開発（輸送用機器、ロボット）
- ⑥ マグネシウム合金の鍛造部材開発（情報家電用機器）
- ⑦ マグネシウム合金のリサイクルに係る技術開発

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDO技術開発機構が、単独ないし複数の原則、本邦の企業、研究組合、公益法人等の研究機関（原則、国内に研究開発拠点を有していること。ただし、国外企業の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点からの国外企業との連携が必要な場合はこの限りではない。）から公募によって研究開発実施者を選定し実施する。

研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、研究体にはNEDO技術開発機構が委託先決定後に指名する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）公立大学法人 大阪府立大学大学院工学研究科 教授 東 健司を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

本研究開発において、NEDO技術開発機構が主体となって行うべき基礎的・基盤的研究開発であると判断される研究開発内容に示した①②③の事業は委託により実施し、市場化に向けた産業界の具体的な取り組みが示されるべき実用化研究開発であると判断される研究開発内容に示した④⑤⑥⑦の事業は助成（助成率1/2）により実施する。

## (2) 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有する NEDO 技術開発機構は、経済産業省および研究開発責任者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的および目標、並びに、本研究開発の目的およ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、必要に応じて設置される技術検討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、四半期に一回程度プロジェクトリーダー等を通じてプロジェクトの進捗について報告を受けること等を行う。

## 3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成18年度から平成22年度までの5年間とする。

## 4. 評価に関する事項

NEDO技術開発機構は、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義ならびに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成20年度、事後評価を平成23年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、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等に応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

## 5. その他の重要事項

### (1) 研究開発成果の取扱い

#### ・成果の普及

研究開発成果については、NEDO技術開発機構、実施者とも普及に努めるものとする。

#### ・知的基盤整備事業又は標準化等との連携

得られた研究開発の成果については、知的基盤整備または標準化等との連携を図るため、データベースへのデータの提供、標準情報（TR）制度への提案等を積極的に行う。

#### ・知的財産権の帰属

委託研究開発の成果に関わる知的財産権については、「独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第26条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

### (2) 基本計画の変更

NEDO技術開発機構は、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、内外の研究開発動向、政策動向、プログラム基本計画の変更、第三者の視点からの評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

### (3) 根拠法

本プロジェクトは、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1項第2号

及び3号に基づき実施する。

(4) その他

本研究によって得られたあらゆる知的財産、また本研究の過程または成果に基づき開発したプログラム、サンプルもしくは装置などの成果物について、本プロジェクト外（国内外）への供試・開示については、事前にプロジェクトリーダーとNEDO技術開発機構に連絡する。

その際に、NEDO技術開発機構が申請書の提出を求めた場合は、これに応じ速やかに提出する。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 平成18年3月、制定。

(2) 平成18年6月、研究開発責任者（プロジェクトリーダー）決定に伴い改訂。

(3) 平成20年7月、イノベーションプログラム基本計画の制定により、「(1) 研究開発の目的」の記載を改訂。

## (別紙) 研究開発計画

### 研究開発項目①「マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積」

#### 1. 研究開発の必要性

本研究開発では、現状のマグネシウムビレット等を材料として創製したマグネシウム合金の鍛造部材を評価・解析し、その問題点を抽出して技術課題を明らかにし、それを解決するための方法を確立することが必要である。

#### 2. 研究開発の具体的内容

川下産業に要求される鍛造部材に対応するモデル部材を対象に、以下の項目に対して研究を進めることにより、目標を達成する。

(1) モデル鍛造部品の微構造評価・解析を行う。

(2) モデル鍛造部品の特性評価・解析を行う。

(3) モデル鍛造における、素材特性・加工条件・部品特性の関連性整理とデータ集積を行う。

#### 3. 達成目標

##### (1) 中間目標 (平成20年度末)

川下産業に要求される鍛造部材に対応するモデル部材を対象に、鍛造部材製造に必要な素材の組成、組織と鍛造条件の設定を可能とする鍛造用素材の結晶組織と変形機構との関係をデータベース化する。

##### (2) 最終目標 (平成22年度末)

鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部品特性の関連性を整理し、鍛造部材の評価方法を確立する。

## 研究開発項目②「マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構との関連性の 解明」

### 1. 研究開発の必要性

本研究開発では、マグネシウム合金の鍛造加工における微細組織と変形機構との関連性の解明を行う。

鍛造性に優れた素材は、部材に要求される耐クリープ性や耐熱性を発現させるには不利な組織を持つ。加工性と機械特性を同時に満足する組織を形成する加工プロセスの開発が必要であり、鍛造素材の微細組織と鍛造特性との関係を解明することが重要である。

### 2. 研究開発の具体的内容

以下の項目に対して研究を進めることにより、目標を達成する。

(1) 連続鋳造法により作製される鍛造用ビレットの素材組織と鍛造加工性の関係を明らかにする。

このため、併せて次の基盤研究を行う。

- a. 強加工処理法等により種々の鍛造素材組織を形成し、鍛造素材組織と鍛造加工性の関係を解明する。
- b. 鍛造加工された部材の鍛造組織が部材の機械特性向上に及ぼす効果を調べ、鍛造部材の最適組織の解明と鍛造部品の信頼性評価を行う。

(2) 試作鍛造部品の加工性と機械特性の評価結果を突合せ、データ集積することにより、鍛造加工マップを整備する。

### 3. 達成目標

(1) 中間目標（平成20年度末）

鍛造用耐熱合金ビレットに要求される素材組織を明らかにし、耐熱合金ビレットの連続鋳造条件を決定するために必要な結晶粒径や結晶形態等のパラメーターを明らかにする。

鍛造素材組織と鍛造加工性の関係解明において実施した組織微細化技術を適用して、結晶（等軸状もしくは柱状）の平均粒径が50 $\mu$ m以下の凝固組織を持つ耐熱合金ビレットの連続鋳造技術の開発に貢献する。

(2) 最終目標（平成22年度末）

鍛造用素材の組織の結晶粒子と変形機構の関係についてデータベース化を進め、鍛造加工マップとして整備することによって、実用的な鍛造温度低温化技術を開発し、実用化レベルの部材として170MPa（10<sup>7</sup>回）の疲労強度を持つ構造用マグネシウム鍛造部材の最適な鍛造加工手順を導出するための鍛造組織形成技術の基盤技術を構築する。

## 研究開発項目③「マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出」

### 1. 研究開発の必要性

本研究開発では、循環型素材としての特性と、コスト低減の観点からリサイクルに係る課題抽出と課題解決のための技術開発を行う。そのために、固体リサイクル材特性評価、リサイクル前処理技術など実用化までにはリスクの大きな研究開発や、リサイクル時の安全性評価など研究開発全体に関わるテーマについて、共通基盤技術として産官学一体となった研究を行う。

### 2. 研究開発の具体的内容

#### (1) リサイクル前処理技術（分離、精製、安全性評価）

再溶解によるリサイクル技術の前処理技術としての不純物除去技術の開発および単体分離およびハンドリングの安全性評価方法の開発を行う。

#### (2) リサイクル材の特性評価

固体リサイクル材の組織と塑性変形特性の評価、リサイクル材の機械特性に及ぼす混入物の効果解明、および固体リサイクル材の鍛造特性評価を行う。

### 3. 達成目標

#### (1) 中間目標（平成20年度末）

- a. 切削粉等の工場内スクラップにおける含有炭素を0.1%以下にするリサイクルシステムを構築し、マグネシウムハンドリング時の安全性評価方法に必要な主要因を明らかにする。
- b. 固体リサイクル材の鍛造用ビレットへの適用目的として、圧縮率0.64以上の変形性を発現させるために必要な組織および不純物組成の限界を明らかにする。

#### (2) 最終目標（平成22年度末）

- a. 従来のカスケード型リサイクル（低品位素材へのリサイクル）に代えて、リサイクル材料が新材料と同等の特性を維持する市中スクラップリサイクル基盤技術の開発を行うとともに、総合的なマグネシウムリサイクルについての信頼性評価、データ集積を行う。
- b. 大量排出時を想定した市中回収品スクラップの前処理技術（分別、分離、不純物除去など）の課題抽出し、市中スクラップリサイクル基盤技術を提案する。



## 研究開発項目④「マグネシウム合金の鍛造用ビレット調整技術開発」

### 1. 研究開発の必要性

本研究開発では、鍛造部材に要求される形状、特性を達成するために、一連の鍛造プロセスから素材まで遡って、鍛造用ビレットの調整技術開発を行う。

鍛造素材組織の均質化と微細化によって鍛造性は向上するが、鍛造素材製造コストも上昇する。実用的なマグネシウム鍛造部材を製造するための鍛造用ビレットとして、コストを低減するプロセス技術の開発とともに微細化組織を持つビレットの調整技術を開発することが求められる。

### 2. 研究開発の具体的内容

研究開発項目②の成果を活用し、既存のマグネシウム合金において、結晶粒微細化もしくは指向性組織とすることによる粒界すべりの役割の増大等を利用して材料の塑性加工性を高める。

ビレット製造工程における結晶粒微細化プロセスの開発を行い、耐熱合金ビレットの連続鍛造技術の開発を行う。

### 3. 達成目標

平成22年度までに以下の目標を達成する。

結晶（等軸状もしくは柱状）の平均粒径が $50\mu\text{m}$ 以下の凝固組織を持つ耐熱合金ビレットの連続鍛造技術を開発する。

## 研究開発項目⑤「マグネシウム合金の鍛造部材開発（輸送用機器、ロボット）」

### 1. 研究開発の必要性

本研究開発では、マグネシウム合金の軽量性を活かして、強度が求められる高信頼性鍛造部材（自動車部品、ロボット部品等）について実用部材が供給可能な鍛造技術を開発する。

マグネシウム合金は、アルミニウムダイカスト材に代わる部材としての可能性を有するが、機械的特性を向上させることが課題となっている。これを達成するために鍛造技術を用いて強度を向上させることが必要となる。

### 2. 研究開発の具体的内容

研究開発項目①および②の成果を活用し、微細組織を有するビレットからの型鍛造、ダイカスト casting と鍛造加工を組み合わせた複合鍛造等により、必要な強度を確保できる部材の製造技術を開発する。

実用部材に対して、求められる機械的特性を得るために、加工条件の設定および casting、鍛造の連続生産システムの実用化をターゲットに技術開発を行う。

### 3. 達成目標

平成22年度までに以下の目標を達成する。

- (1) 耐熱部材として、締結フランジ部の構造に対し、現状マグネシウム鍛造部材として実用的に要求される残存軸力して 6400N の締結力維持を達成する実用的な部材を製造できる複合鍛造技術を開発する。
- (2) 耐疲労部材として、引張強度 340MPa、伸び 15%以上、疲労強度 170MPa ( $10^7$ 回) を有する実用化レベルの部材として製造可能な鍛造技術を開発し、実用化検証を行う。

## 研究開発項目⑥「マグネシウム合金の鍛造部材開発（情報家電用機器）」

### 1. 研究開発の必要性

本研究開発では、マグネシウム合金の軽量性を活かして、精度が求められる高精度鍛造部材（情報家電用機器）について実用部材が供給可能な鍛造技術を開発する。

情報家電分野においては、小型軽量化の競争がますます厳しくなっていくことが予想され、マグネシウム合金の適用に当たっては、複雑な形状を有する部材についての成形技術が課題となっている。

これを達成するためにダイカスト鑄造やプレス加工では作製できない複雑な形状を持つ部品について、鍛造技術を用いてこれに対応できる成形加工技術の開発が必要となる。

### 2. 研究開発の具体的内容

研究開発項目①および②の成果を活用し、ダイカスト鑄造と鍛造加工、またはプレス加工と鍛造加工を組み合わせることにより、複雑な形状の部材が成形できる製造技術を開発する。

情報家電に要求される複雑な形状を成形するには、プレス加工だけでは成形できない薄板部材の成形技術が必要である。高度鍛造加工技術を開発することにより、軽量化に対応できる鍛造技術の開発を行う。

### 3. 達成目標

平成22年度までに以下の目標を達成する。

リブなど複雑な突起物を有し、表面平滑度が高い複雑な形状を持つ部材を製造できる技術を開発し、A3サイズ大の高精度大型部材として平坦度0.1mm/40mmの実用部材が供給可能な鍛造技術を開発し、実用化検証を行う。

## 研究開発項目⑦「マグネシウム合金のリサイクルに係る技術開発」

### 1. 研究開発の必要性

本研究開発では、リサイクル前処理技術を実用化し、表面付着物が除去できる技術を開発する。また、その技術を現状では利用不可能な不純物を多く含む工場内スクラップのリサイクルに適用し、リサイクルプロセスの確立を行う。

さらに本プロジェクト終了後に予測されるマグネシウム社会における、市中スクラップリサイクルへの市場性を考慮し、環境、経済両面から見たマグネシウム大量使用時の循環型社会創生に貢献する。

### 2. 研究開発の具体的内容

研究開発項目③の成果を活用し、溶解工程前処理技術開発および連続方式における表面付着物除去方法の開発を行う。単一材料処理における安全かつ連続的に酸化物生成を抑制し、表面付着物除去が可能な技術の開発を行い、前処理における問題点の抽出、特に混合材料処理における問題点及び課題の抽出を行い、リサイクル前処理技術の実用化を検討する。

### 3. 達成目標

平成22年度までに以下の目標を達成する。

工場内スクラップの連続処理方式における表面付着物除去(含有炭素0.1%以下)を達成する装置を開発し、リサイクル前処理技術の実用化を行う。

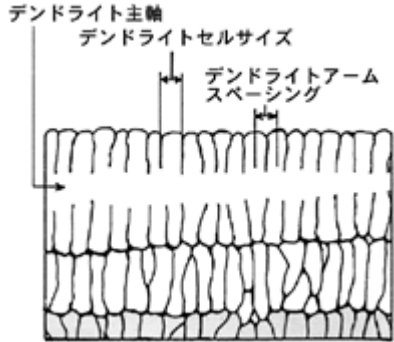
また、工場内スクラップに対する固体リサイクル前処理システムとしてその有用性を検証する。

プロジェクト用語集

【鍛造関係】

用語(日本語)	English	用語の説明
STEM	scanning transmission electron microscope	薄膜試料を透過した電子を検出して、走査像を得る装置。
Z コントラスト	Z contrast	原子番号(Z)コントラスト。STEMの暗視野観察の際、十分大きな散乱角の透過電子のみを取り込んで像を作ると、組成の違いによるコントラストを得ることができる。これをZコントラストと言い、原子番号の2乗に比例する量である。
Zパラメータ	Z parameter	温度とひずみ速度の互換性を表す温度補償ひずみ速度で、 $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$ という式で表される。ここで $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 $Q$ は塑性変形の活性化エネルギー、 $R$ は気体定数、 $T$ は絶対温度で表示した試験温度である。
押出材	Extruded material	中空円筒状コンテナ内に入れた素材ビレットを加圧して、コンテナの一端に設けた所望の孔形状を持つダイを通して材料を流出させ、棒、管などさまざまな断面形状の製品を成形する加工法を押し出しという。そして押し出しによって製造された材料を押し出し材という。
逆極点図	Inverse pole figure	材料中の結晶粒の統計的な方位分布を測定し、測定された試料に固定された測定座標系(例えば圧延方向、法線方向など)に着目し、試料上に指定した方向にどのような方位が出ているかを示す図。
逆極点図マップ	Inverse pole figure map	試料に固定された測定座標系に対する測定点の方位を、方位に対応した色で表示した組織画像。指定した座標軸に対する結晶粒の方位分布が示される。
極点図	Pole figure	材料中の結晶粒の統計的な方位分布を測定し、測定された試料の各測定点での結晶格子に着目して、その結晶の特定方位が試料の測定系に対してどのような配向になっていたかを表示した図。特定の方位に結晶粒が配向した組織を

		集合組織というが、集合組織を解析する手段として広く用いられている。
結晶粒界	Grain boundary	金属材料は通常、多くの小さな単結晶(結晶粒)が集合して構成されており、その結晶粒間の境界を結晶粒界と呼ぶ。
サーボプレス	Servo press machine.	サーボモーターに直結したラム(スライド)によりスライドの動きを自由に制御可能なプレス。任意の位置でスライドの速度を任意に設定可能、加工中にスライドを上下運動・振動・一時停止させることが可能、といった特長を持つ。従来のプレスでは不可能な加工も実現可能であると各方面からの期待が高い。
再結晶	Recrystallization	塑性変形により欠陥を導入された材料を加熱した場合に、欠陥を含まずに熱力学的に安定な結晶粒が新たに形成し、変形を受けて欠陥密度の高い周囲の領域を蚕食しながら成長することによってひずみエネルギーを解消する現象。
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。硬さが増加する原因は、急冷中に材料中に溶け込んでいた原子が、その後の加熱によってもとの材料とは異なる結晶(析出物)をつくるためである。
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。
積層欠陥	Stacking fault	金属原子面の積み重ねに規則性が乱れた領域。積層欠陥単位面積当たりのエネルギー増加を積層欠陥エネルギーと言う。
双晶	Twin	結晶内の1つの原子面を境にして、その両側の原子配列が鏡面对称になっている時、互いに双晶関係にあると言う。そしてその一方が薄い板状をなして、別の方位の母体の中に存在している時、その領域を双晶と言う。
デンドライトアーム間隔	Dendrite Arm Spacing (DAS)	デンドライト組織において、隣接する二次アーム間の中心間距離。下図を参照。

		 <p>（図面の出典は、独立行政法人製品評価技術基盤機構のウェブサイト）</p>
デンドライト組織	Dendrite structure	凝固した金属に見られる、金属結晶が樹木のような形態をとった組織。
動的再結晶	Dynamic recrystallization	材料が加熱状態で変形を受けている最中に生じる再結晶。
動的析出	Dynamic precipitation	材料が加熱状態で変形を受けている最中に生じる析出。
不連続析出	Discontinuous precipitation	結晶粒界の近傍で優先的に析出が起こり、次第に粒内に向かって成長していく現象。
偏析	Segregation	材料中に含まれる不純物あるいは溶質原子が拡散して、結晶粒界や積層欠陥などの格子欠陥に集まる現象。1個の溶質原子あるいは不純物原子が粒内にある時の自由エネルギーと偏析した時の自由エネルギーの差を偏析自由エネルギーと言う。
連続析出	Continuous precipitation	結晶粒内で均一に析出が起こる現象。

【リサイクル関係】

過熱水蒸気	Super heated steam	操作圧力下で沸騰気化した水をさらに加熱して沸点以上の温度とした完全に気体状態の水。過熱水蒸気で満たされた空間は酸素濃度が極めて低く燃焼反応が起こらないため、安全性が高い方法であること、熱効率が良く低ランニングコストであり、装置のコンパクト化が可能。
クランクプレス	Crank press	クランク軸を回転させ、ラムを上下させて加圧する一般的な機械プレス
最小着火エネルギー	Minimum ignition energy	浮遊粉じん雲のごく一部に局所的にエネルギーを与え、粉じん雲を着火・爆発させるに要す

		るエネルギーの最小値。
識別アルゴリズム	Identification algorithm	特定の条件で計算過程を分岐して計算に使用する判別関数やニューラルネットワークを適宜選択する手順。
体積固有抵抗	Volume resistivity	物質内部の単位長さを一辺とする立方体に対して、対向する二つの面間の抵抗。単位は $\Omega \cdot m$ 。
ドライ切削	Dry cutting	切削油を用いない切削加工
ニューラルネットワーク	Neural network	人間の脳の構造を真似て作った情報処理の手法であり、目的変数と説明変数の関数関係をあらかじめ仮定する必要がなく任意の関数関係のモデル化が可能。学習が終了したニューラルネットワークでも学習データを追加して再学習させると、識別性能を向上させることができる。
爆発下限濃度	Minimum explosive concentration	粉じん爆発を発生する粉じん雲濃度の下限値。
爆発指数	Explosion index	爆発内容積が $V [m^3]$ の試験容器を用い、次式から計算した値 ( $(dP/dt)_{max}$ は爆発圧力上昇速度の最大値)。 $Kst = (dP/dt)_{max} V^{1/3}$ この値により粉じん爆発の激しさの評価ができる。
発火温度	Ignition temperature	粉じん（雲）の存在する空間の温度を上昇させて粉じんが発火するに至る温度。
パンチランド	Punch land	鍛造で材料内部に打ち込む金型(パンチ)の先端分で、成形時に材料が健全に流出するように形つくった平行な部分
表面固有抵抗	Surface resistivity	物体の表面の単位長さを一辺とする正方形に対して、対向する二つの辺間の抵抗。単位は、 $\Omega$ 。
粉じん雲濃度	Dust cloud concentration	単位空間に存在する粉じん粒子の浮遊密度。
見掛け密度	Apparent density	物体の重量をレーザー3次元形状計測器で測定した物体の体積（有意の誤差を含む）で除した値。



# I. 事業の位置づけ・必要性について

## 1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

### 1. 1 NEDO が関与することの意義

我が国の材料産業は、国際的に高い技術力と競争力を有し、我が国の経済社会の発展を支えているが、川下産業との取引のオープン化に伴いユーザーとの連携の希薄化が進行する一方で、汎用的な材料技術はアジア諸国の技術向上によるキャッチアップが進行している。そのため我が国において産学官を含む連携の強化（川上川下の垂直連携、材料創成と加工の水平連携など）を図ることで、次世代の部材分野での我が国のイノベーションを促進することが喫緊の課題となっている。

そこで本プロジェクトは、『情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を可能とすること』を目的とした「ナノテク・部材イノベーションプログラム」の一環として取り組むものである。極めて広範囲な産業領域に波及する材料・部材領域について、ユーザー製造業等との連携（川上・川下連携）を促進するプロジェクト体制（垂直連携）で実施することで、高度な部材産業群の「すり合わせ力」を一層強化する。

マグネシウム合金は、その軽量性とリサイクルに要するエネルギー消費が少ない循環型素材としての可能性から、おもに自動車部品と家電製品において用途が拡大してきており、欧米や韓国、中国などの諸外国においてもマグネシウム成形技術開発が進められている。

自動車ならびに家電分野は、日本が強みとする産業分野であり他産業への波及効果も大きい。それらの競争力の維持・強化を図るためには、世界をリードする国内のマグネシウム合金に関わる基盤技術、および金型設計、鍛造技術等の我が国ものづくり技術の優位性を活用する本プロジェクトを推進することが必要である。

このため、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以下、NEDO という。）は、産学の科学的知見を結集してマグネシウム合金の高性能鍛造部材製造技術の基盤を構築し、これを産業技術へ繋げていくと共に、社会の共通基盤として情報の整備、提供を通じて、行政、産業界、地域住民等の間で科学的知見に基づいた正確かつ適切な認識の醸成を図る事業方針に基づき、プロジェクトを実施する。

本プロジェクトでは、部材分野の技術戦略マップで示されている医療・福祉／安全・安心分野、環境・エネルギー分野、及び情報家電分野の耐疲労性の向上など、部材コストの削減を実現する技術を開発する。

以上のような国家的課題は、個々の民間企業の経済的な観点に基づく自主的努力に

単純に任せる分野ではなく、政府が主体的に進める重点分野の一つであり、省エネルギー技術、産業技術の両分野は、従来から NEDO がこれまでに蓄積してきた知識、実績を生かし、推進すべき課題である。

プロジェクト企画・立案、プロジェクト期間中、マグネシウム鍛造部材普及に向けた各段階における NEDO が関与することの意義を図 I.1.1-1 に記す。

### 1. プロジェクト企画・立案段階

- ・プロジェクト実施体制の構築  
⇒基礎を担う「大学」、実用化を担う「民間企業」、両者のかけ橋となる技術を担う「研究機関」が一体となった産学連携体制を構築
- ・知財マネジメントの枠組み構築  
⇒製造プロセス技術はノウハウ化により技術情報を秘匿

### 2. プロジェクト期間中

- ・フレキシブルな予算管理  
⇒周辺環境や進捗状況に対応した加速財源配分
- ・フレキシブルな体制変更  
⇒早期卒業による事業化加速（三協マテリアル）

### 3. マグネシウム鍛造部材普及に向けた広報活動

- ・シンポジウム、展示会においてユーザー企業への広報活動を実施

図 I.1.1-1 NEDO が関与することの意義

## 1. 2 実施の効果（費用対効果）

(1)費用：5年間で約 13.2 億円（平成 18 年度～平成 22 年度）。

(2)効果：マグネシウム合金は軽量化による省エネ効果の期待などから、特に自動車部品や情報家電部品において用途が拡大してきている。本事業の開始時点における市場規模予測から、本プロジェクトの費用対効果を図 I.2-1 に示す。

これより、2020 年度の想定市場として、輸送機器（自動車関連分野）で 838 億円、情報家電分野（携帯電話、ノート PC 筐体）として 400 億円を見込んでいる。

本事業の成果により、高機能部材としてのマグネシウム鍛造部材が低コストで市場に出回ることにより、新たな市場創出が十分期待でき、プロジェクトを開始した。

国費総額(5年間)	13.2億円
想定市場(2020年)	1238億円
(内訳) 輸送機器	838億円(国内100億円)
情報機器	400億円(携帯電話、ノートPC筐体)



図 I. 2-1 費用対効果

## 2. 事業の背景・目的・位置づけ

### 2. 1 事業の背景

#### (1) 社会的背景

我が国の材料・部材産業は、国際的に高い技術力と競争力を有し、我が国の経済社会の発展を支えているが、川下産業との取引のオープン化に伴いユーザーとの連携の希薄化が進行する一方で、汎用的な技術はアジア諸国の技術向上によるキャッチアップが進行している。そのため我が国において産学官を含む連携の強化（川上川下の垂直連携、材料創成と加工の水平連携など）を図ることで、次世代の部材分野での我が国のイノベーションを促進することが喫緊の課題となっている。

このようななか、地球温暖化問題解決のための省エネルギー化の高まりという社会的ニーズと、輸送機器(自動車など)の軽量化による燃費向上、省エネルギー化、情報家電(携帯電話、パソコン等)における小型化、軽量化、高機能化による利便性向上という産業界からのニーズから、部材へのニーズとしては軽量かつ高機能な部材(高強度、高い剛性、電磁波シールド性等)が求められている(図 I. 2. 1-1)。

マグネシウム合金は、その軽量性とリサイクルに要するエネルギー消費が少ない循環型素材としての可能性から、おもに自動車部品と家電製品において用途が拡大してきており(図 I. 2. 1-2, 3, 4)、欧米や中国などの諸外国においてもマグネシウム成形技術開発が進められている。例えば、自動車分野では、軽量化による省エネ効果による観点から官民を挙げた研究開発が進められており、EUでは「MAG FORGE」プロジェクト、北米では「マグネシウムビジョン 2020」として、マグネシウム合金の鍛造技術につい

でも取り上げられている。また最近では中国のマグネシウム利用に関する動きが活発となっている(図 I.2.1-5)。

自動車ならびに家電分野は、日本が強みとする産業分野であり他産業への波及効果も大きい。それらの競争力の維持・強化を図るためには、世界をリードする国内のマグネシウム合金に関わる基盤技術、および金型設計、鍛造技術等の我が国ものづくり技術の優位性を活用して本事業を推進する。

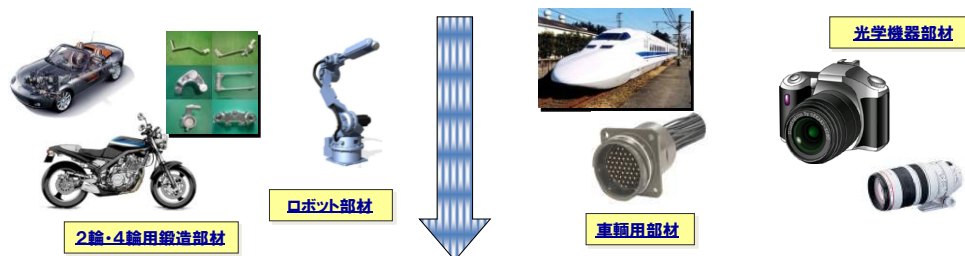
<社会的ニーズ>

地球温暖化問題解決のための省エネルギー化の高まり

<産業界からのニーズ>

輸送機器(自動車など)の軽量化による燃費向上、省エネルギー化

情報家電(携帯電話、パソコン等)における小型化、軽量化、高機能化による利便性向上



<部材へのニーズ>

軽量かつ高機能な部材(高強度、高い剛性、電磁波シールド性等)が求められている。

図 I.2.1-1 背景

## マグネシウム合金の利点

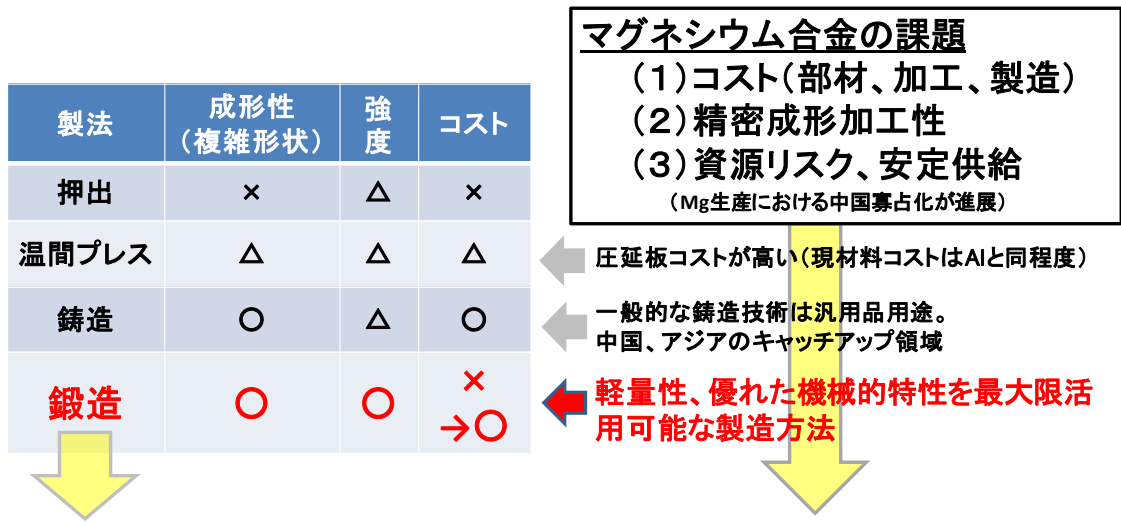
- 金属一の**軽量性能**(アルミニウムの2/3、鉄の1/4)
- アルミニウム、高機能樹脂に比べて**比強度+比剛性**に優れる。
- 機械加工性、耐くぼみ性に優れ、寸法変化(経年、熱変化)が小さい。

材料		密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比強度 (N·m/kg)	比剛性	熱伝導度 (W/m·K)	伸び (%)	引張強度 (MPa)
Mg合金	AZ91	1.82	154	24.7	72	8	280
	AM60	1.79	151	25.1	62	15	270
Al合金	A380	2.70	117	26.3	100	3	315
Ti合金	Ti-6Al-4V	4.42	226	25.6	7.5	15	1000
高機能樹脂	ABS	1.03	34	2.0	0.2	40	35
	PC	1.23	85	5.4	0.2	3	104

※比強度値が大きい=軽くて高強度

※比剛性値が大きい=軽くて変形に対して強い

図 I.2.1-2 軽量部材の性能比較(現状)



軽量性、高機能性を活かしたマグネシウム製品の普及には、  
 (1)～(3)を同時に解決し、工業利用可能な鍛造技術の開発が必要。

図 I . 2 . 1 - 3 マグネシウム製品製造方法比較

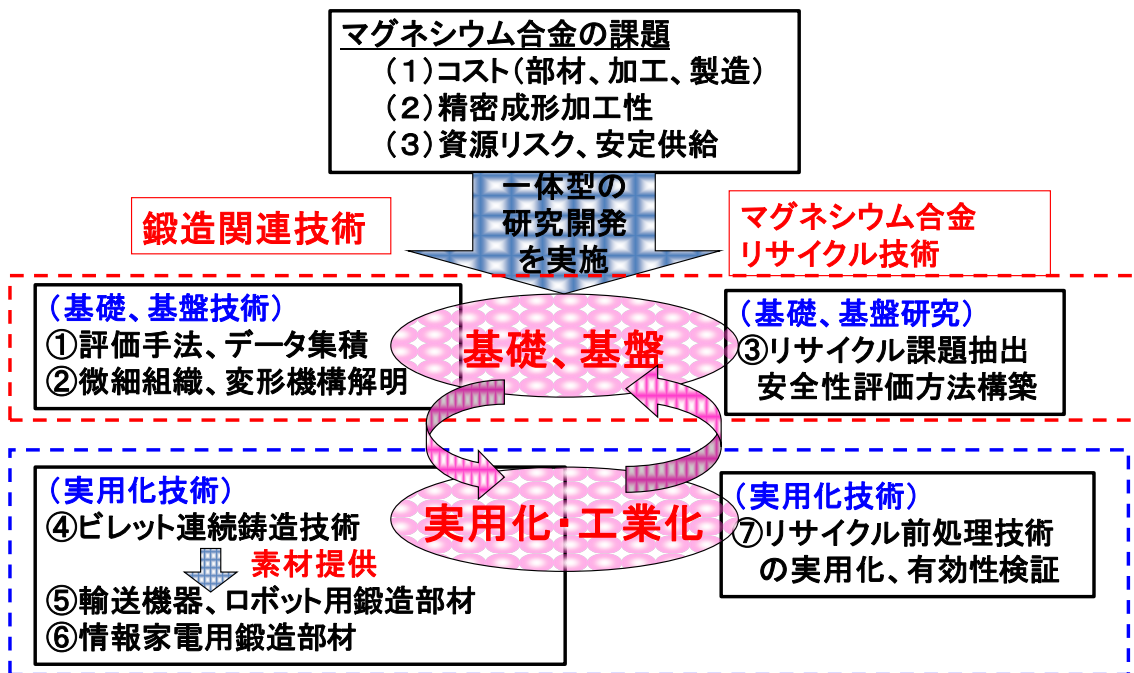


図 I . 2 . 1 - 4 マグネシウム鍛造課題解決への取り組み

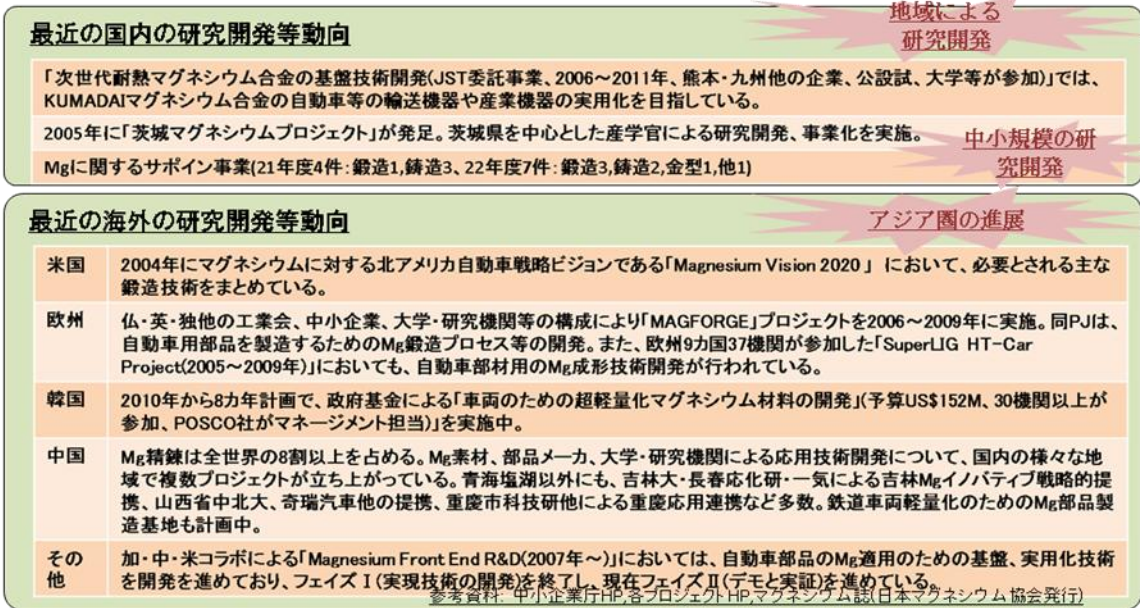
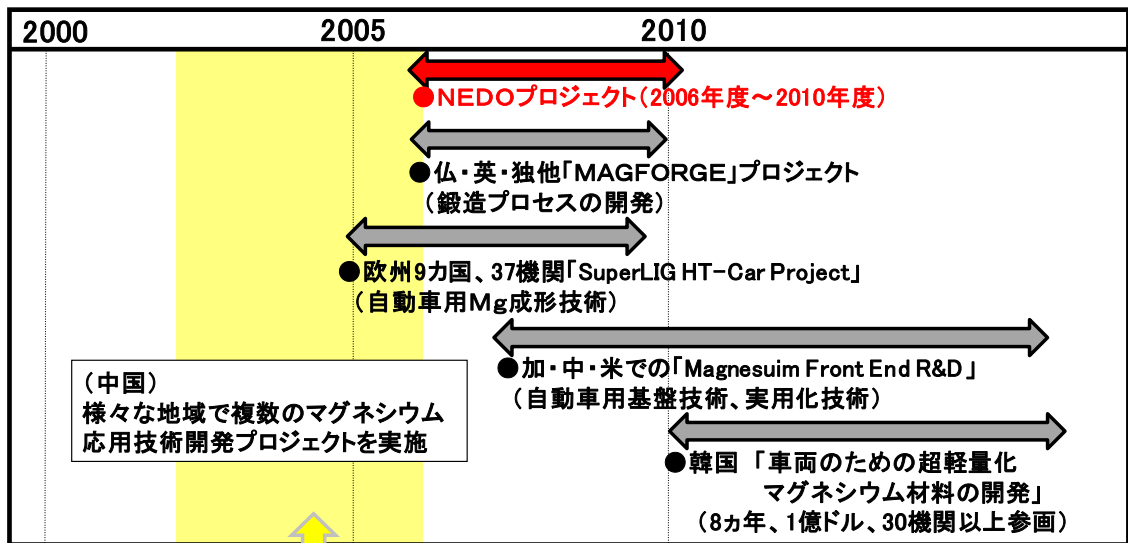


図 I . 2. 1-5 (1) 国内外の研究開発等の動向 (1)

欧米、中国、アジアでもマグネシウム部材開発の開発競争が進む。



日本国内でも鑄造、鍛造について短期的、中小規模の支援プロジェクトを実施

**基礎、基盤から実用化、普及促進までの一体型国家プロジェクトが必要**

図 I . 2. 1-5 (2) 国内外の研究開発等の動向 (2)

## (2) 技術的背景

材料・部材産業の国際競争力を維持・強化するためには、材料創成と成型加工を一体化した技術、および製品のリードタイムを短縮するプロセス革新技術、さらには、部材評価技術等の構築が求められる。特に、日本の素材産業の部材産業への拡大・転換を加速させ、ユーザーへのソリューション提案力（部品化、部材化）を強化することが重要である。

本事業における共通基盤技術としては、図 I.2.1-6 に示すような知見も得られている一方、鍛造技術に関しては我が国のものづくり技術の優位性がある。これら鍛造プロセスを理解するための学術的な裏付けや体系化が必要となってくる。

そのためには、川上・川下の連携や産学官の連携により、こうした企業が保有する技術・技能を活用することが重要かつ必要となってくる。

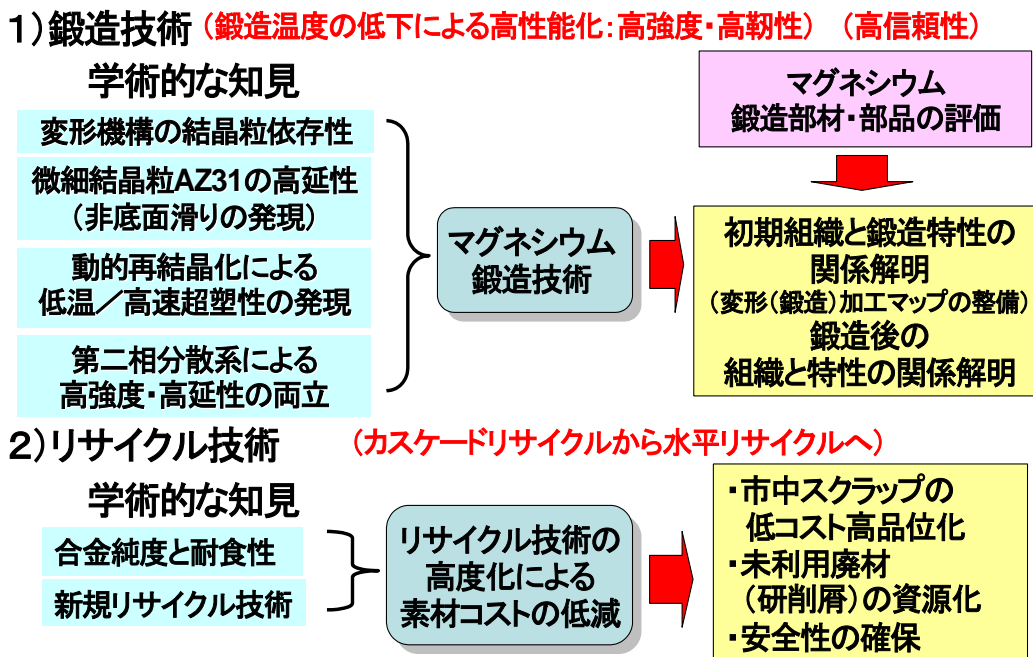


図 I.2.1-6 本事業における共通基盤技術

## 2. 2 事業の目的

以上のような背景と川下産業に要求される性能から、高機能部材としてマグネシウム合金に求められる特性等を図 I.2.2-1 に示す。これより、本事業では、

- ・マグネシウム合金の高性能鍛造部材製造技術の基盤構築
- ・マグネシウム合金のリサイクル技術に係る課題抽出

を目的（委託事業）とし、この成果を活かして各企業（助成事業）がそれぞれターゲット

トとしている製品を目指して実用化することにより、今後市場拡大が予想されるマグネシウム産業の強化を図る(図 I. 2. 2-2)。

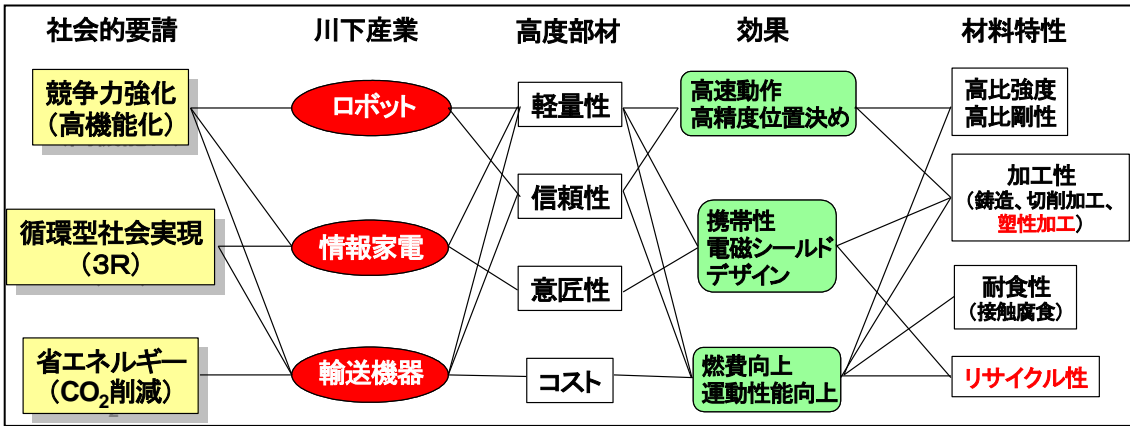
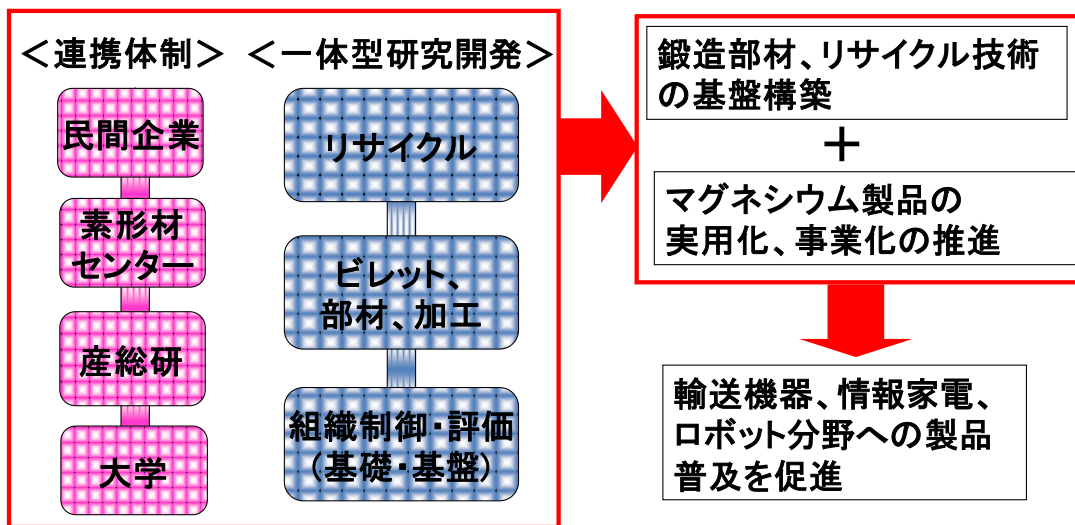


図 I. 2. 2-1 求められる特性



## 我が国のマグネシウム産業の国際競争力強化を目指す

図 I. 2. 2-2 プロジェクトの目的と意義



## 2. 3 事業の位置付け

本プロジェクトは、イノベーションプログラム（図 I.2.3-1）の中で、『情報通信、ライフサイエンス、環境、エネルギーなど、あらゆる分野に対して高度化あるいは不連続な革新（ジャンプアップ）をもたらすナノテクノロジー及び革新的部材技術を確立するとともに、その実用化や市場化を促進することで、我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服等を可能とすること』を目的とした「ナノテク・部材イノベーションプログラム」（図 I.2.3-2）の一環として取り組むものである。極めて広範囲な産業領域に波及する材料・部材領域について、ユーザー製造業等との連携（川上・川下連携）を促進するプロジェクト体制（垂直連携）で実施することで、高度な部材産業群の「すり合わせ力」を一層強化する。

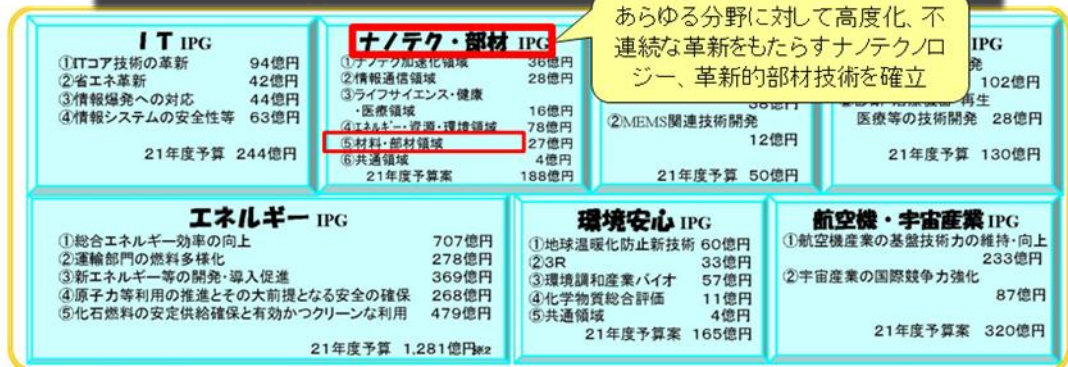
マグネシウム合金は、その軽量性とリサイクルに要するエネルギー消費が少ない循環型素材としての可能性から、おもに自動車部品と家電製品において用途が拡大しており、欧米や中国などの諸外国においてもマグネシウム成形技術開発が進められている。

自動車ならびに家電分野は、日本が強みとする産業分野であり他産業への波及効果も大きい。それらの競争力の維持・強化を図るためには、世界をリードする国内のマグネシウム合金に関わる基盤技術、および金型設計、鍛造技術等の我が国ものづくり技術の優位性を活用した本事業を推進することが必要である。

部材分野の技術戦略マップでは、医療・福祉／安全・安心分野、環境・エネルギー分野、ならびに情報家電分野において、耐疲労性の向上、部材コストの削減とともに、軽量化による省エネルギー効果の観点からもマグネシウム部材の可能性・重要性が指摘されている。そして、これらの分野は経済産業省の新産業創造戦略において世界を勝ち抜く先端産業群に位置付けられている。

## イノベーションプログラムについて

1. 「イノベーションプログラム」の中での体系的推進 (Inside Management & Accountability)
  - 経済産業省の全ての研究開発プロジェクトは、政策目標毎に7つの「イノベーションプログラム」の下で体系的に推進。
  - 各プログラムの中で、政策目標に向けたプロジェクトの位置付けと目標の明確化、市場化に必要な関連施策(規制改革、標準化等)との一体化を図り、イノベーション実現に向け各プロジェクトを効果的に推進。
2. 「技術戦略マップ」に基づく戦略的企画立案 (Outside Communication & Networking)
  - 先端産業技術動向を把握し、国が取り組むべき技術課題とイノベーションの道筋を明確化するため、産学官で協働するロードマッピング手法を導入(『技術戦略マップ 2005/2006/2007/2008』)。
  - 研究開発プロジェクトの選定に当たっては、イノベーションプログラムにおける政策目標を基に技術戦略マップに位置付けられた重要技術課題を抽出し戦略的に企画立案。



あらゆる分野に対して高度化、不連続な革新をもたらすナノテクノロジー、革新的部材技術を確立

図 I.2.3-1 イノベーションプログラム

## ナノテク・部材イノベーションプログラム

- あらゆる分野に対して高度化・不連続な革新をもたらすナノテクノロジー・革新的部材技術を確立！
- 我が国産業の国際競争力の維持・強化や解決困難な社会的課題の克服！

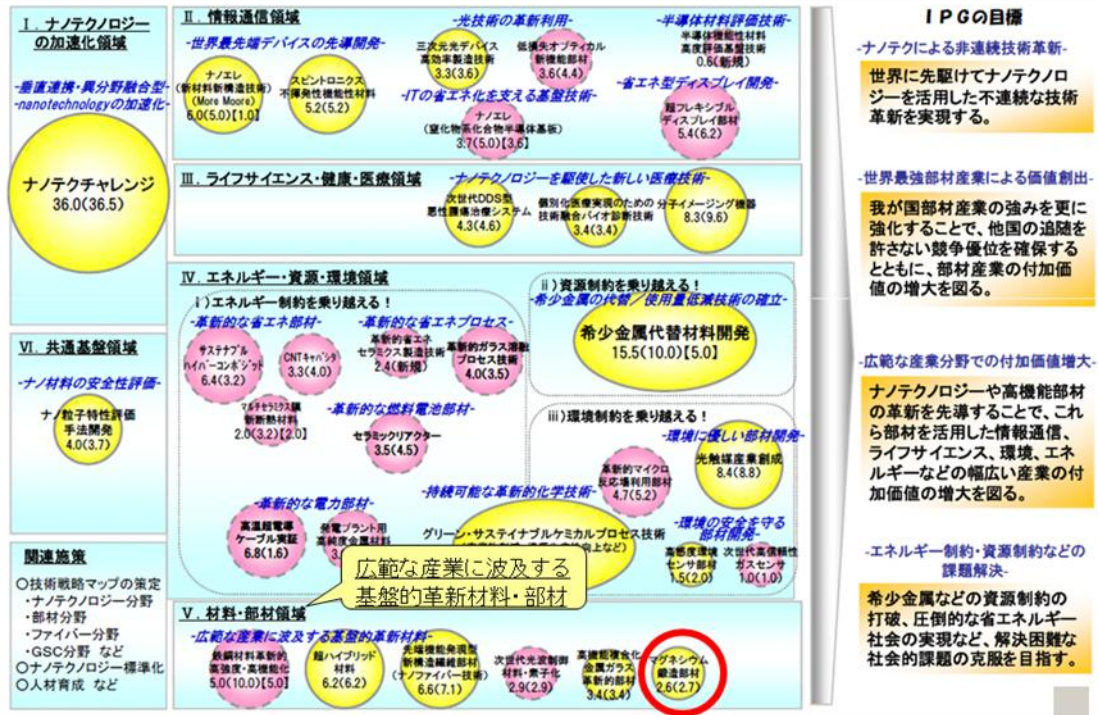


図 I.2.3-2 ナノテク・部材イノベーションプログラムにおける本プロジェクトの位置付け

## II. 研究開発マネジメントについて

### 1. 事業の目標

マグネシウム合金はその軽量性を最大の利点として、加えてリサイクル性や制振性など機械的特性が優れていることから、特性を活かした用途拡大が期待されている。

しかし、マグネシウム合金の用途拡大を加速するためには、マグネシウムの特性に適した加工技術の高度化が不可欠になっている。鍛造は鋳造等に比べて主に強度や精度の面で優位であるが、市場競争力のある鍛造技術は確立されていない。マグネシウム合金鍛造部材が、その市場拡大を実現するためには、他の金属素材や金属加工法に対して、部材特性の面でもコスト面でも優位性を持つことが必須である。このため、図 II.1-1 に示すように、素材コストの低減とともに、高信頼性部材や高精密部材を加工できる鍛造技術の確立が重要である。また、マグネシウム合金の普及を見込んで、その循環型素材の特性を活かしたリサイクル技術を確立することが社会的に求められる。

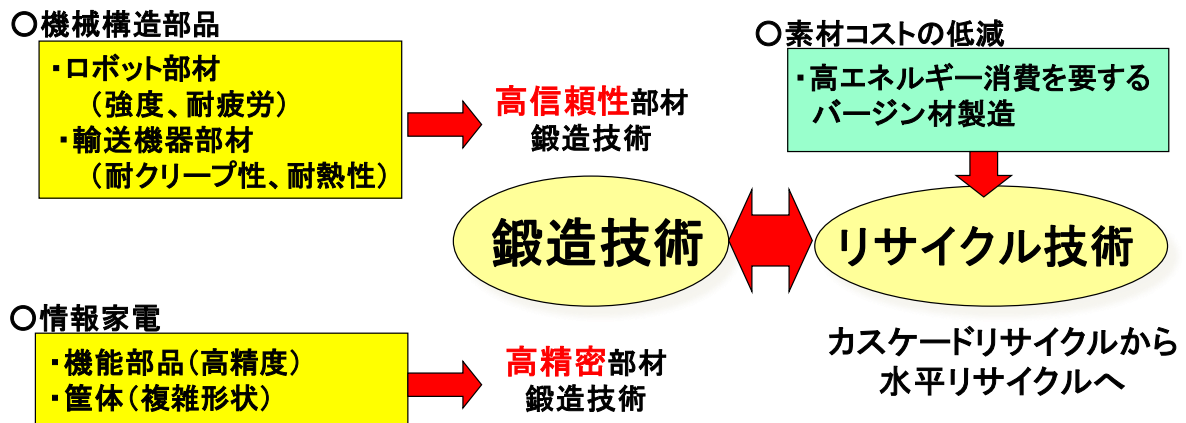


図 II.1-1 マグネシウム合金鍛造部材市場拡大の要件

そこで、本プロジェクトではマグネシウム合金の鍛造特性を解明することによって、マグネシウム合金鍛造において鍛造温度の低温化と鍛造品の高性能化を図ることをめざす。さらに、マグネシウム合金製品の普及に伴って対応が必要になるリサイクルについて、カスケードリサイクルから水平リサイクルに移行することを目指す。

研究開発テーマごとの中間目標と最終目標及び目標設定の根拠は以下のとおりである。

#### 【共通基盤技術】

##### ① マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積

中間目標：川下産業に要求される鍛造部材に対応するモデル部材を対象に、鍛造部材製造に必要な素材の組成、組織と鍛造条件の設定を可能とする鍛造用素材の結晶組織と変形機構との関係をデータベース化する。

最終目標：鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部材特性の関連性を整理

し、鍛造部材の評価方法を確立する。

設定根拠：高強度、高精度なマグネシウム合金部材を鍛造によって製造するには、鍛造素材の低コスト化とともに、鍛造温度の低温化などが課題であった。マグネシウム合金鍛造の実績が少なく、データの蓄積がなかったため、素材の組織や、加工条件と鍛造部材特性等の関係については解析が進んでおらず、素材の変形機構から鍛造性を評価し、最適な鍛造条件の設定が困難な状況にあった。

そこで、マグネシウム鍛造における現状の課題を明確化し、鍛造工程を理解するために、鍛造素材と鍛造後の鍛造部材特性の関係を明らかにする必要がある。さらに、マグネシウム合金鍛造部材の評価解析に資するため、種々の素材を使用して鍛造試作を行い、その部材の特性を計測してデータベース化し、評価することは必須であると考えられた。

## ② マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構の関連性の解明

中間目標：鍛造用耐熱合金ビレットに要求される素材組織を明らかにし、耐熱合金ビレットの連続鑄造条件を決定するために必要な結晶粒径や結晶形態等のパラメータを明らかにする。

鍛造素材組織と鍛造加工性の関係解明において実施した組織微細化技術を適用して、結晶（等軸状もしくは柱状）の平均粒径が $50\mu\text{m}$ 以下の凝固組織を持つ耐熱合金ビレットの連続鑄造技術の開発に貢献する。

最終目標：鍛造用素材の組織の結晶粒子と変形機構との関係についてデータベース化を進め、鍛造加工マップとして整備し、鍛造温度低温化技術を開発するとともに、実用化レベルの部材として $170\text{MPa}$ ( $10^7$ 回)の疲労強度を持つ構造用マグネシウム鍛造部材の最適な鍛造加工手順を導出するための鍛造組織形成技術の基盤技術を構築する。

設定根拠：マグネシウム合金の高性能鍛造部材の利用が拡大するためには、押出材より安価で、同等以上の強度がある連続鑄造材を供給できるようにすることが必要である。そこで、マグネシウム関連の先行PJで目標とした $100\mu\text{m}$ より微細で、かつ実現可能性のある粒度として $50\mu\text{m}$ を、市販押出材と同等の粒度であることも考慮して、微細化の目安とした。

非底面滑りや、動的再結晶化による超塑性の発現に関する先行研究の成果を受けて、微細組織と変形機構の関係を解明し、高強度を発現するマグネシウム合金鍛造の最適化に資することを目標とした。

## ③ マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出

中間目標：a.切削粉等の工場内スクラップにおける含有炭素を $0.1\%$ 以下にするリサイクルシステムを構築し、マグネシウムハンドリング時の安全性評価方法に必要な主要因を明らかにする。

- b. 固体リサイクル材の鍛造用ビレットへの適用目的として、圧縮率0.64以上の変形性を発現させるために必要な組織および不純物組成の限界を明らかにする。

最終目標： a. 従来のカスケード型リサイクル(低品位素材へのリサイクル)に代えて、リサイクル材料が新材料と同等の特性を維持する市中スクラップリサイクル基盤技術の開発を行うとともに、総合的なマグネシウムリサイクルについての信頼性評価、データ集積を行う。

- b. 大量排出時を想定した市中回収品スクラップの前処理技術(分別、分離、不純物除去など)の課題抽出し、市中スクラップリサイクル基盤技術を提案する。

設定根拠： マグネシウム合金製品の普及が進み、マグネシウム合金が循環型素材としてのメリットを発揮するためには、リサイクルに関する課題を明らかにする必要がある。リサイクルシステムの構築が必須であるが、再溶解時の不純物除去の値として、他金属のリサイクルにおける要求仕様と同等の含有炭素0.1%以下と設定した。

また、マグネシウムは爆発の危険性が指摘されており、安全対策が必要である。加えて、固体リサイクル化技術の開発が、再溶解しないプロセスとしてエネルギーコストの低減の観点から、さらに、リサイクル材の高付加価値化の観点から有望と考えられた。これらについて基盤技術開発を行い、データ集積を図ることが必要と考えられた

### 【実用化技術】

実用化技術に関しては、ユーザー（川下産業）からのスペックに基づき、以下の最終目標を設定した。

#### ④ マグネシウム合金の鍛造用ビレット調整技術開発

最終目標： 結晶(等軸状もしくは柱状)の平均粒径が $50\mu\text{m}$ 以下の凝固組織を持つ耐熱合金ビレットの連続鍛造技術を開発する。

#### ⑤ マグネシウム合金の鍛造部材開発(輸送用機器、ロボット)

最終目標： ・耐熱部材として、締結フランジ部の構造に対し、現状マグネシウム構造部材として実用的な締結力維持を達成する複合鍛造技術を開発する。

・耐疲労部材として、アルミ鍛造部材レベルの実用部材が供給可能な鍛造技術を開発する。

#### ⑥ マグネシウム合金の鍛造部材開発(情報家電用機器)

最終目標： リブなど複雑な突起物を有し、表面平滑度が高い複雑な形状の高精密大型実用部材の製造が可能な鍛造技術を開発する。

#### ⑦ マグネシウム合金のリサイクルに係る技術開発

最終目標： 工場内スクラップの連続処理方式における表面付着物除去(含有炭素

0.1%以下)を達成する技術開発を行う。併せて、新方式によるリサイクル方式の検証を行う。

## 2. 事業の計画内容

### 2. 1 事業の目的

マグネシウム合金の高性能鍛造部材製造技術の基盤を構築し、鍛造に関する共通基盤技術として鍛造特性の解明を行う。また、マグネシウム合金のリサイクル技術に係る課題を抽出し、課題解決のための技術開発を行って、さらにはリサイクルシステムの提案と安全性評価を行うことを目的とする。

高性能鍛造部材製造技術基盤の構築に関しては、

- ・ マグネシウム合金素材の鍛造試作を通じた、実鍛造プロセスにおける試作品評価と課題抽出・解析によって実用化研究を支援するとともに、それらのデータ集積によって、鍛造技術開発の共通技術基盤を構築する。
- ・ 適切な材料選択から、素材の組織制御、鍛造、熱処理までの一連のプロセスを検討することで、求められる部材の特性を発現させる適切プロセスを探索する。
- ・ 色々な微細組織を有するマグネシウム合金モデル素材の製造プロセスを開発するための、鍛造技術の共通技術基盤を構築する。
- ・ 連続鋳造法により作製される鍛造用ビレットの結晶粒径や結晶形態等の素材組織と鍛造加工性の関係を明らかにする。

リサイクル技術に係る課題抽出、課題解決のための技術開発に関しては、

- ・ 未利用の工場内スクラップの実用化技術開発に資する基盤研究を行い、データ蓄積をするとともに、実用化研究からフィードバックした問題点解決に必要な基礎データの提供を行う。
- ・ マグネシウムスクラップを扱う際の安全性を保証できる手法の提案や省エネルギー型固体リサイクル技術開発などマグネシウムリサイクルシステム構築に必要な共通基盤を確立する。
- ・ マグネシウムを含む市中スクラップについて従来のカスケード型リサイクルに代わる水平型、アップグレードリサイクルを最終目標とした場合の課題抽出とリサイクル基盤技術を提案しマグネシウムリサイクルシステム構築に貢献する。

## 2. 2 研究開発の内容及び全体スケジュールと予算

### 2. 2. 1 プロジェクト全体の研究開発内容

前述の目標を達成するために、以下の共通基盤技術研究開発と実用化技術研究開発を実施した。2.2で後述するが、前者は集中研における委託事業であり、後者は企業における助成事業として、委託事業の成果を活かして実用化のための研究開発を実施したものである。

### 【共通基盤技術】

- ① マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積
- ② マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構との関連性の解明
- ③ マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出

### 【実用化技術】

- ④ マグネシウム合金の鍛造用ビレット調整技術開発
- ⑤ マグネシウム合金の鍛造部材開発(輸送用機器、ロボット)
- ⑥ マグネシウム合金の鍛造部材開発(情報家電用機器)
- ⑦ マグネシウム合金のリサイクルに係る技術開発

共通基盤技術開発としては、現状のマグネシウム合金などを素材として試作したモデル鍛造部品を対象に、鍛造温度、加工速度、金型温度などの鍛造条件と、鍛造用素材及び作製された鍛造部品の結晶組織、強度、耐クリープ性などの特性との関係を解析する。そして、鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部品特性の関係を整理し、データベース化することで、マグネシウム合金鍛造における技術的な課題を明らかにするとともに、課題を解決するための方法を導出する。これにより、実用化テーマにプロセス最適化のための指針を提示する。

鍛造性に優れたマグネシウム合金は、鍛造部材に要求される耐クリープ性や耐熱性を発現させるためには不利な組織を持つ。そこで、種々の組織を持つ鍛造素材を作製し、鍛造素材組織と鍛造加工特性の関係を調べる。また、鍛造加工性、高温強度・耐熱性を普遍的に記述するアトミックスケールからの構成方程式を構築するための基礎となる、マグネシウム合金の高温変形特性に及ぼす添加元素の影響についての基礎検討を行う。

さらに、鍛造素材の加工性と鍛造部材の機械的特性等のデータを整理・解析することで、鍛造素材の微細組織と鍛造特性の関係を解明し、鍛造加工マップを整備する。それにより、易加工性と優れた部品特性を同時に満足する組織を形成させる加工プロセス開発の指針を提示し、実用化テーマの推進を支援する。

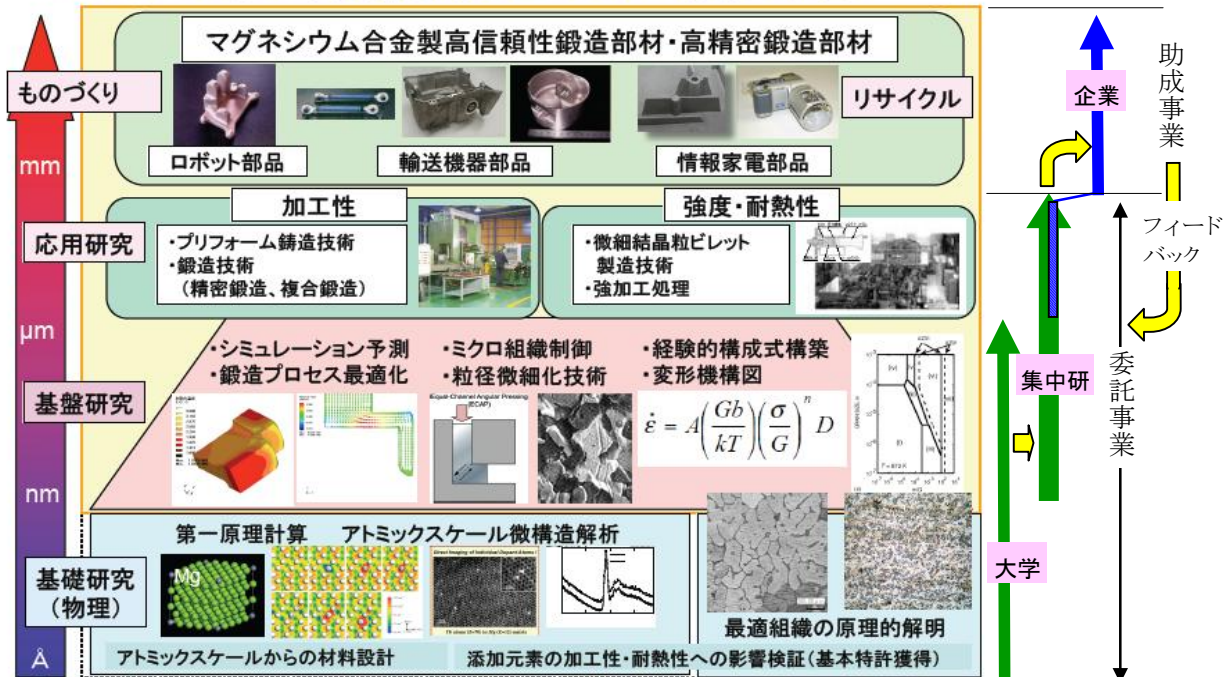
また、マグネシウムスクラップの発生量などの性状調査とその内容を基にした未利用の工場内スクラップ実用化技術開発支援データ取得を行う。また、その共通基盤研究としてのマグネシウムの発火特性評価や固体リサイクル技術開発を行う。

市中スクラップに関しては、水平型、アップグレードリサイクルを含めた総合的な再生方法の提案に資する基盤技術開発を行う。

これらの基盤技術開発の成果も踏まえ、実用化技術開発では、鍛造用マグネシウム合金素材、高強度・高信頼性部材及び精密鍛造部材の開発を実施した。これにあたっては一部、鋳造や金属プレスと鍛造との複合鍛造も取り入れた。さらに、リサ

イクルの前処理技術の実用化技術開発を行った。

本プロジェクトは、図Ⅱ.2.2-1に示すように、基礎研究からものづくり技術開発までを包含する階層的な研究開発を統合するものである。



図Ⅱ.2.2-1 マグネシウム鍛造部材プロジェクトの階層的認識

このうち、基礎研究、基盤研究そして応用研究までの共通基盤技術研究開発を担うのが委託事業であり、応用研究とものづくり技術開発の実用化技術開発を担うのが助成事業である。

すなわち、動的再結晶や第二相粒子をキーワードとして、アトミックスケール微構造解析や第一原理計算による組成最適化、マイクロ組織制御に係る基礎研究及び基盤研究を踏まえて、鍛造用素材及び鍛造プロセスの最適化を諮る応用研究の成果を、ものづくり技術開発に活用する。

助成事業で実用化を進める企業は、研究員は素形材センターに出向して集中研に参加しており、既存の鍛造プロセスに関する情報提供と鍛造試作、試作品の評価などを行っている。したがって、集中研が大学における基礎・基盤研究を土台とする応用研究により提案する鍛造用マグネシウム合金素材及びマグネシウム鍛造プロセスを、各企業がそれぞれ実用化研究開発に活用し、実証することが効率的に行われるというように委託事業と助成事業を円滑に連携させて研究開発を行った。



## 2. 2. 2 全体スケジュールと予算の推移

委託事業及び助成事業における全体スケジュールと、予算額を表Ⅱ.2.2-1に示す。

表Ⅱ.2.2-1 事業のスケジュールと予算の推移

		(うち加速資金)					単位:百万円
研究開発項目		H18FY	H19FY	H20FY	H21FY	H22FY	合計
委託事業	①マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積	94(13)	32	23	17	16	182
	②マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構の関連性の解明	176(57)	62	31	23	23	315
	③マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出	57(3)	27	29	26	23	162
	委託事業 合計	327	121	83	66	62	659
助成事業	④マグネシウム合金の鍛造用ビレット調整技術開発		15	10	8		33
	⑤マグネシウム合金の鍛造部材開発(輸送用機器、ロボット)	55(15)	76	118	62(18)	38	349
	⑥マグネシウム合金の鍛造部材開発(情報家電用機器)		50	37	117	33	237
	⑦マグネシウム合金のリサイクルに係る技術開発		20	8	13	3	44
	助成事業 合計(国費分、助成率1/2)	55	161	173	200	74	663

## 2. 2. 3 研究開発項目ごとの具体的研究開発内容

### (概要) (委託事業)

現状のマグネシウム合金などを素材として試作したモデル鍛造部品を対象に、鍛造温度、加工速度、金型温度などの鍛造条件と、鍛造用素材及び作製された鍛造部品の結晶組織、強度、耐クリープ性などの特性との関係を解析する。そして、鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部品特性の関係を整理し、データベース化することで、マグネシウム合金鍛造における技術的な課題を明らかにするとともに、課題を解決するための方法を導出する。これにより、実用化テーマにプロセス最適化のための指針を提示する。

鍛造性に優れたマグネシウム合金は、鍛造部材に要求される耐クリープ性や耐熱性を発現させるためには不利な組織を持つ。そこで、種々の組織を持つ鍛造素材を作製し、鍛造素材組織と鍛造加工特性の関係を調べる。また、鍛造加工性、高温強度・耐熱性を普遍的に記述するアトミックスケールからの構成方程式を構築するための基礎となる、マグネシウム合金の高温変形特性に及ぼす添加元素の影響についての基礎検討を行う。

さらに、鍛造素材の加工性と鍛造部材の機械的特性等のデータを整理・解析することで、鍛造素材の微細組織と鍛造特性の関係を解明し、鍛造加工マップを整備する。それにより、易加工性と優れた部品特性を同時に満足する組織を形成させる加工プロセス開発の指針を提示し、実用化テーマの推進を支援する。

マグネシウムスクラップの発生量などの性状調査とその内容を基にした未利用の工場内スクラップ実用化技術開発支援データ取得を行う。また、その共通基盤研究としてのマグネシウムの発火特性評価や固体リサイクル技術開発を行う。

市中スクラップに関しては、水平型、アップグレードリサイクルを含めた総合的な再生方法の提案に資する基盤技術開発を行う。

### (具体的研究開発内容)

#### ①「マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積」

現状のマグネシウム合金などを素材として各企業で試作したモデル鍛造部品を対象に、鍛造温度、加工速度、金型温度などの鍛造条件と、鍛造用素材及び作製された鍛造部品の結晶組織・機械的特性との関係を整理し、データベース化する。このデータベースは、マグネシウム合金鍛造における技術的な課題を明らかにするものであり、鍛造において生じる課題を解決するための方法を考察するために使用できるようにする。また、サーボプレスを使用して試作鍛造を行ない、この鍛造プロセスについての基本的なデータを収集する。具体的には、以下のサブテーマを設定し研究を実施する。また、プロジェクト内のビレット製造メーカーからビレットサンプルを入手し試作等に供することによって、望ましい素材特性を明らかにし、ビレッ

ト製造メーカーへフィードバックする。

#### ①-1) マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積

マグネシウム合金鍛造における技術的な課題を明らかにするとともに、課題の解決方法を導出するために、現状のマグネシウム合金や試作したモデル材等を素材としたモデル鍛造部品を対象に、(1)モデル鍛造部品の結晶粒組織の解析・評価、(2)モデル鍛造部品の機械的特性等の評価、(3)モデル鍛造における素材組織及び特性、加工条件、部品組織及び特性のデータ集積及び解析、を行う。

##### a. モデル鍛造部品の設計及び試作

平成18年度は、二輪車部品、ロボット部品（以上、菊水フォーシング）、電子機器部品、自動車部品等（以上、宮本工業）で候補にあげた部品から、研究要素となる部分を抽出したモデル鍛造部品の設計を検討し、金型を外注により製作する。この金型や既存設備を用いて温度や加工率、ひずみ速度など鍛造条件を変化させて、現行素材を鍛造する試作を外注により行い、素材の変形能や変形抵抗などから鍛造性を評価し、製品化に向けての技術的課題を抽出する。（以上、菊水フォーシング、宮本工業）

さらに、種々の製品形状に対応して合理的に鍛造設計を行うために、単純形状品の金型製作と試作をともに外注により実施し、各種マグネシウム合金の鍛造性のデータを調査し、集積する。（以上、宮本工業）

また、マグネシウム合金のネットシェープ鍛造においては寸法精度を出すために、鍛造工数を増やすほか、環境問題のある油性黒鉛系潤滑剤を使用している。この潤滑剤は環境問題だけでなく、後処理に手間がかかりコスト高の要因になる。このため、環境対応型で精密鍛造可能な新規潤滑剤・潤滑方法を検討する。（以上、宮本工業）

##### b. モデル鍛造部品用素材の組織及び特性評価

平成18年度は、結晶粒組織を制御しない鍛造素材について、結晶粒組織・機械的特性など鍛造性評価の基本となるデータ収集を行う。平成19年度は、各企業がモデル鍛造に使用する結晶粒組織を制御した鍛造素材（連铸ビレットなど）について、結晶粒組織解析（結晶粒径、第二相粒子の量、形態等）および鍛造性評価の基本となる高温圧縮試験を行ない、データを収集する。平成20年度は、情報機器家電用機器製造のためのプレスフォーシングに使用される鍛造素材（板材）について、結晶粒組織解析（結晶粒径、第二相粒子の量、形態等）および鍛造性評価の基本となる高温圧縮試験を行ない、データを収集する。

##### c. モデル鍛造部品の組織及び特性評価

平成19年度はまず、平成18年度に各企業がモデル鍛造を行なった部品の結晶粒組

織解析（結晶粒径、第二相粒子の量、形態等）および機械的特性評価（硬度試験、引張試験を想定）を行なう。さらに、平成19年度に各企業がモデル鍛造を行なった部品についても同様の実験を行なう。なお、モデル鍛造部品の組織解析・特性評価に当たっては、各企業と打合せを行い、観察部位および特性試験方法を決定する。

#### d. モデル鍛造における、素材特性・加工条件・部品特性の関連性整理とデータ集積

平成19年度に、①-1)b、cで収集したモデル鍛造用素材およびモデル鍛造部品のマイクロ組織と機械的特性データについて、長岡技術科学大学でモデル鍛造部品の結晶粒径、結晶配向、第二相粒子の量、形態等のマイクロ組織因子と機械的性質との関連を定量的に評価する方法を提案する。その提案をふまえて、産業技術総合研究所においてモデル鍛造用素材およびモデル鍛造部品のデータ整理方法を決定し、データ整理を行なう。

平成20年度は、企業が行う鍛造に使用可能なデータベース構築を行う。データベースは、鍛造行程（素材準備、潤滑、鍛造、熱処理等）に即したデータに基づいて構築し、さらに行程等の単語から必要な情報を検索できるようなシステムとする。データベースには、集中研で得られたデータとともに、プロジェクト参加企業で得られたデータも使用する。また、データベースの仕様は、各企業と打合せを行い決定する。

平成21年度は、前年度に引き続き鍛造データベースの充実化を図る。当該年度においては、集中研で平成19年度以降に行なった試作鍛造結果（①-1）e）、高温圧縮試験結果（②-2）、②-4）のデータベース化を進める。データベースは試作鍛造条件、高温圧縮試験条件に基づいて構築し、必要な情報を効率よく検索できるようなシステムとする。マグネシウム合金鍛造データベースは、平成20年度に作成した試作鍛造素材データベース、平成21年度作成予定の試作鍛造結果データベース、圧縮試験結果データベースから構成される。データベースの内容、運用方法などについては、当該年度内にメンバーで鍛造データベース検討会を実施し、その結果を踏まえて鍛造データベースを修整する。

平成22年度は、21年度に引き続き試作鍛造結果などを加えて、鍛造データベースの拡充を進める。データベースの内容、運用方法などについては、平成21年度に引き続き鍛造データベース検討会を実施して議論を行い、その結果を踏まえて鍛造データベースを精緻化する。

#### e. サーボプレスを使用する鍛造プロセスの検討

平成19年度に、平成18年度に導入したサーボプレス装置及び19年度に外注で作製する金型等一式を使用して、サーボプレスを使用した鍛造プロセスについての基本的なデータを収集する。鍛造用素材としては、AZ系マグネシウム合金を対象とする。試作に関しては、プロジェクトに参加する鍛造企業からも助言をいただき、鍛造中

の材料の流動・ひずみ分布などが解析しやすいような試作鍛造部品を選定し、金型を作製する。そして、サーボプレス装置でビレット温度、金型温度、鍛造速度などを制御して試作鍛造を行い、試作部品の評価（欠肉、寸法精度など）および試作部品の組織解析・特性評価を行なう。これらのデータ整理にあたっては、①-1)dでの知見を参考にするとともに、本実験で得られた結果を①-1)dで作成したメカプレスによるデータベースと比較する。

平成20年度には、複数の潤滑剤および表面処理を施した金型を用いて試作鍛造を行い、試作部品の評価、試作部品の組織解析・特性評価のほか、内視鏡装置を用いた鍛造前後の金型表面状態の調査などを行なう。そしてそれにより、マグネシウム鍛造に適する潤滑および金型表面処理を検討する。また、試作鍛造品の組織や機械的特性に対する、金型温度やビレット温度など鍛造条件の影響を明らかにする。これらの試作鍛造品の評価結果は、①-1)dでのデータベース作成に使用する。

平成21年度には、鍛造部品の形状精度と高機能化の観点から平成20年度試作鍛造品よりも複雑形状の部品の試作鍛造を行い、試作部品の形状評価、試作部品の組織解析・特性評価を行い、試作鍛造品の組織や機械的特性に対する、金型温度やビレット温度など鍛造条件の影響を明らかにする。これらの試作鍛造品の評価結果は、①-1)dにおけるデータベース作成に使用する。

平成22年度は、プロジェクト参加企業と協力して、実用化を想定した部品の試作鍛造を行ない、試作鍛造品の特性等の評価を行なう。

#### ①-2) マグネシウム技術開発動向に関する調査研究

マグネシウム技術開発の現状とユーザーニーズ動向を的確に把握し、成果の着実な実用化・事業化に向けて、プロジェクトの最適化と効率的運営を図るために、マグネシウム鍛造関連企業等に対する現地ヒアリング調査のほか、広くインターネット、関連学業界紙誌、外部有識者等からの情報収集により国内外のマグネシウム鍛造技術開発動向を調査する。すなわち、マグネシウム素材の特性、成形メカニズムや、鍛造性に関する情報等のほか、マグネシウム鍛造の実用化に不可欠の潤滑剤、金型技術等の関連要素技術についても調査を実施する。この一環として、マグネシウムの鍛造技術等に関する海外の最新技術動向について、現地調査を行う。これらにより、プロジェクトメンバーに、実用化に向け必要な情報を提供する。なお、マグネシウム鍛造技術に関する情報収集については、一部を鍛造技術に詳しい機関に外注する。

平成18年度は、マグネシウム鍛造技術開発動向の現状に関する情報を把握するために、まず鍛造用マグネシウム素材の市販品の購入ルートを調査する。調査項目は、素材の組成、形状、製造方法、基本特性などとする。また、マグネシウム合金の鍛造技術及びこれに競合する成形加工技術の研究開発動向、自動車・電気産業等の川下産業が期待するマグネシウム製品の特性について調査を行う。

平成19年度は、マグネシウム合金の鍛造技術及び周辺技術、例えば金型、潤滑剤

等の関連技術の動向を調査する。さらに、海外で実施されている各種マグネシウム研究開発プロジェクトの概況及び海外企業の動向を把握する。さらに、中国のマグネシウム合金の材料技術、成形技術に関する現地調査を行う。

平成20年度は、鍛造用素材製造に関する新技術やデジタル制御が可能な新鍛造技術に関する調査を行う。具体的には小径鍛造用素材の製造を目的とした連続鍛造技術や半凝固鍛造技術、小ロット素材の製造を目的とした鋳塊製造技術の開発状況を調査する。また、高速押出が可能で、異方性が少ないと言われている静水圧押出技術の開発動向も合わせて調査する。新鍛造技術では、パルスモーションや振り子モーション等の多種モーションが可能で、加工速度等の制御機構を備えた成形機による鍛造技術の開発状況の調査を行う。

平成21年度は、自動車企業等の川下産業に、これまでに本プロジェクトで得られた成果として、鍛造用素材の微細組織と変形機構、サーボプレスを使用する新たな加工プロセスの可能性などを提示して説明し、川下産業におけるマグネシウム鍛造の導入可能性を確認する。これにより、ターゲットとすべき製品を把握するなど、マグネシウム合金鍛造の実用化に向けての課題を調査する。

平成22年度は、川下産業の見解・要望等も踏まえた上で実用化が期待されるマグネシウム鍛造部品を選定する。アルミニウムや炭素繊維強化プラスチック等、競合材との性能・コストの比較を行い、マグネシウム鍛造品の市場を予測する。また本プロジェクト成果のアピールおよび広報を行う。

## ②「マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構との関連性の解明」

マグネシウム合金の鍛造加工性向上（鍛造温度の低温化、室温から250℃を目指す）および鍛造部材の高機能化（高強度・高耐熱性）を達成するため、基盤的なプロセス技術開発を行う。具体的には上記の目的に対して金属材料学的な観点から、1) 合金元素の効果のアトミックスケールからの解明、2) 動的再結晶による結晶粒微細化の利用、3) 第二相粒子の利用、の三つのアプローチを行なう。そして、これらのアトミックスケールでの原理的解析とでのナノスケールでの組織制御とを連動させ、マグネシウム鍛造部材の鍛造特性のマルチスケール組織学的体系化を促進し、目標を達成するために必要な最適合金組成・組織についての設計指針およびプロセス条件を提示する。それにより、高信頼性部材鍛造技術（実用化研究⑤）における強度、伸びなどの目標達成に寄与する。また、これらの研究で得られたデータから、鍛造用素材組織（結晶粒径・第二相粒子サイズなど）と変形機構・鍛造温度などの関係を整理し、鍛造加工マップとして整備する。具体的には、以下のサブテーマを設定して、研究開発を行う。

### ②-1) 鍛造素材組織と鍛造加工性の関係解明

易加工性と高強度などの優れた部品特性を同時に満足させる組織を形成できる加工プロセス開発の指針を提示するために、以下の項目を行う。

平成18年度は、実用化研究で実施する複雑形状の鍛造において、目的とする鍛造が可能なマグネシウム合金板材の開発のため、現在市場で入手可能な既存のマグネシウム合金板材（AZ31、61等）について、成形性を評価するために金型を製作してプレス及び鍛造を行って組織・機械的特性評価を行い、鍛造特性と組織・機械的特性の関係を解明する。そして、目的とする鍛造に最適な組織を明確にする（カサタニ）。さらに、現在市場で入手可能な既存の耐熱マグネシウム合金（WE43等）を対象とし、強加工法等の結晶粒組織制御技術などを用いて、種々の組織を持つ鍛造素材を作製する。鍛造素材の結晶粒組織及び機械的特性評価を行うことにより、将来必要となる耐熱マグネシウム合金の加工データ整備を進める（産業技術総合研究所）。また、本プロジェクトの実用化研究の各テーマで使用する可能性がある耐熱マグネシウム合金（ACM522）のダイカスト素材を外注により作成し、これについて組織・機械的特性などの基本的データを収集する。さらに、エンジン部品締結部評価用試験片を、三次元プリフォーム作製用金型（外注）を用いてダイカストで外注試作し、基礎的なデータ取得を行う（三井金属）。微小（7～15mm）試験片を使用した引張試験を行なうが、その試験片の径や平行部長さを測定するため、形状を1 $\mu$ m程度の精度で測定できる計測顕微鏡を購入する（産業技術総合研究所）。

#### ②-2) 鍛造部材のマイクロ組織解析と機械的性質との関係解明

マグネシウム合金の鍛造加工性向上および鍛造部材の高機能化を達成するため動的再結晶による結晶粒微細化の利用を検討する。

平成18年度は、長岡技術科学大学に再委託して、種々の組織を有する展伸用マグネシウム合金（AZ系およびAX系の塑性加工用マグネシウム合金）を用いて、加工度とマイクロ組織、特に結晶粒径とその分布及びマイクロおよびマクロな結晶配向性を調べ、機械的性質（引張特性、耐熱性）との関係を定量的に評価する。そのため、長岡技科大にある油圧サーボプレス機およびX線回折装置に、それぞれ新たにプレス速度制御機構および集合組織解析プログラムを導入することで、油圧サーボプレス機を低速側まで使用可能とし、また、X線回折装置による結晶配向解析を可能とする。それにより、0.1～40mm/sの広範囲なひずみ速度に渡って変形挙動解析を実施するとともに、EBSP(後方散乱電子回折像)法およびX線回折装置による結晶配向解析を含むマイクロ・マクロ組織変化を解析して、それに伴う機械的性質との関連を定量的に把握する。

平成19年度は、動的再結晶による結晶粒微細化を利用した鍛造温度の低温化について検討する。具体的には、まず実際の鍛造における動的再結晶発現を、平成18年度に各企業がモデル鍛造を行なった部品（AZ系、AM系など）を対象として調べる。そして、試作鍛造条件（ピレット温度、鍛造速度など）と動的再結晶発現の関係を考察する。次に、その結果を検証するため、動的再結晶が発現した条件（温度、ひずみ速度）で高温圧縮試験を行ない、単純化された条件でも動的再結晶が発現するか否かを検証する。以上の結果を踏まえて、動的再結晶により結晶粒を微細化した

素材を作製し、高温圧縮試験を行なって変形特性を評価する。この場合、250℃で加工率50%以上の変形が可能か否かを変形特性向上の目安とする。さらに、動的再結晶により結晶粒を微細化した素材の試作鍛造を行い（サーボプレスの使用を想定）、動的再結晶による結晶粒微細化を利用した鍛造温度の低温化を検証する。

平成20年度は、サーボプレスを使用した試作鍛造品の異方性について調べる。具体的には、試作鍛造用素材について高温圧縮試験を行ない、X線などを使用して圧縮後の試料の異方性を集合組織解析から調べるとともに、圧縮後の試料から圧縮試験片・引張試験片を切り出し、室温圧縮試験および引張試験を行うことで、力学的な異方性を評価する。さらに、サーボプレスを使用した試作鍛造品についても同様に、異方性を集合組織解析から調べる。それにより、マグネシウムの鍛造条件と試作鍛造品の異方性の関係を明らかにする。

また、複雑形状の部品を実際に鍛造する際には圧縮や引張、せん断等、さまざまな様式で応力がかかることから、動的再結晶挙動そのものの異方性を検討する必要がある。そのため、平成20年度は、各素材の高温引張試験を行ない、高温圧縮試験の場合の動的再結晶挙動と比較する。

平成21年度は、当該年度に導入予定の鍛造部材特性評価装置を使用して、引き続きマグネシウム合金の熱間鍛造を模した高温圧縮前後の試料の引張 - 圧縮異方性をより詳細に明らかにする。特にマグネシウム合金に特有であり、機械特性の異方性を生じさせる原因と考えられている双晶変形に着目し、EBSD解析などを駆使して変形後試料における双晶の種類と同定を行うとともに、鍛造条件～粒径・再結晶率・集合組織～異方性の関係を精査する。さらにこれらの結果に基づき、鍛造条件と鍛造部材の組織・特性の異方性を低減させるための指針を導出する。また、当該年度後半から、②-3)、②-4)での研究成果に基づき、鍛造加工マップの検討を開始する。さらに、鍛造部材のマイクロ組織解析と機械的性質との関係解明に関する情報収集のため、ドイツのワイマールで行なわれる国際マグネシウム会議に参加する。

平成22年度は、マグネシウム合金との競合材料であるアルミニウム合金にも熱間鍛造を模した高温圧縮試験を行い、高温圧縮後の試料の室温機械特性（引張、圧縮）をMg合金圧縮材と比較することで、比強度（＝強度／密度）向上と異方性低減の観点からマグネシウム合金鍛造に適した鍛造条件（温度、ひずみ速度）を明らかにする。また、前年度での検討結果を踏まえて、鍛造加工マップを作成する。

### ②-3) 鍛造素材の組成及び微細組織と鍛造加工性との関係解明

マグネシウム合金の鍛造加工性向上および鍛造部材の高機能化を達成するため、大阪府立大学に再委託し、マグネシウム合金の耐熱性・鍛造加工性に対する合金元素の効果を、アトミックスケールから解明する。

平成18年度は、過去に学会等で報告された論文調査等から、各種マグネシウム合金の高温変形データを収集・解析し、添加元素の鍛造加工性及び耐熱性に及ぼす効果を系統的に理解可能な整理方法の提案を行う。また、実用化に際し、鍛造加工性



及び耐熱性に影響する最も重要な鍛造素材の組成選択の本質的な根拠となりうる、アトミックスケールからの添加元素の影響理解のための第一原理計算に着手する。既存の第一原理計算環境に対し、第一原理計算用ノードの追加によるネットワークの高速化を行い、マグネシウム合金に対する擬ポテンシャルなどの第一原理計算条件の最適化を行う。さらに、鍛造素材ナノ・アトミックスケール分析装置一式（高分解能原子識別装置、局所領域組成分析装置）を導入、大阪府立大が所有する透過型電子顕微鏡(TEM)に装着し、実用化における部材の特性保証につながる添加元素のアトミックスケールからの高温変形特性に及ぼす影響の実証を行うために、添加元素の存在形態解析技術確立のための基礎検討を行う。

平成19年度は、動的再結晶を利用した鍛造用素材調整技術確立の基礎となる、固溶元素による動的再結晶挙動の変化についての検討を行う。まず、固溶元素種、固溶量の異なる3種類以上の単相固溶合金について高温圧縮試験を行い、動的再結晶挙動を調査する。得られたデータは②-2)で行う動的再結晶が発生する条件のまとめに提供する。さらに、AZ91連続鍛造材の動的再結晶挙動に及ぼす偏析元素の影響に関する検討にも着手する。連続鍛造材の熱処理による偏析状態の変化について局所領域組成分析装置を用いて分析する。また、モデル材料であるMg-Al 2元系単相合金について、熱処理により溶質元素の濃度ゆらぎを変化させ、高温変形により動的再結晶を調査する。顕著な動的再結晶挙動の変化が見られた試料に対し、走査型電子顕微鏡を用いた広領域組成分析および透過型電子顕微鏡を用いた局所領域組成分析を行い、溶質元素の濃度ゆらぎと動的再結晶挙動との関係を検討する。

また、鍛造プロセスの違いによる添加元素の存在形態の変化が耐熱性（高温変形）に及ぼす影響について基礎的な検討を行う。具体的にはまず、異なる温度における長時間熱処理プロセスにより元素の偏析状態を変化させ、元素の偏析状態が材料の耐熱性に及ぼす影響を調べる。次に転位の上昇運動が支配的な転位クリープが生じる変形領域において、その合金の高温変形特性に関する系統的な実験を行い、熱処理により単相固溶合金の耐熱性が変化する条件を見いだす。そして、耐熱性に大きな変化が見られた2種類以上の試料に対し、透過型電子顕微鏡観察による積層欠陥エネルギーの算出、平成18年度に導入した鍛造素材ナノ・アトミックスケール分析装置一式（高分解能原子識別装置、局所領域組成分析装置）を用いた分析を行い、耐熱性変化の要因となる添加元素の存在形態変化を明らかにする。さらに、平成18年度に導入された計算機システムおよび決定した計算条件を用い、マグネシウム合金の積層欠陥エネルギーを算出するためのパラメータである偏析エネルギーのデータベースを構築する。最終的には、①単相固溶合金の可能な10元素（Yなど）について偏析エネルギーを算出し、固溶量と偏析エネルギーのデータベース作成、②偏析エネルギー、合金濃度を入力することにより任意の合金の積層欠陥エネルギーが算出可能なモデル式の提供、③添加元素存在形態変化の高温変形に及ぼす影響に関する基礎検討結果および第一原理計算による積層欠陥エネルギー算出結果を併せて、プロセスによる偏析状態変化を反映した単相マグネシウム合金の高温変形構成方程

式の構築、を行う。

大阪府立大でのアトミックスケールでの原理解析（②-3）と産業技術総合研究所および長岡技科大でのナノスケールでの組織制御（②-2）、4）とを連動させ、マグネシウム鍛造部材の鍛造特性のマルチスケール組織学的体系化を促進し、目標を達成するために必要な最適合金組成・組織の設計指針を提示する。

平成20年度は、動的再結晶により均一微細組織を得るための最適添加元素選定の根拠となる、第一原理計算による微量固溶型合金も含めた新たな20元素について積層欠陥エネルギー算出のための偏析エネルギーのデータベースを引き続き構築する。また、モデル材料である単相マグネシウム合金について、押出、熱処理などの様々なプロセスにより添加元素の存在形態（溶質元素濃度ゆらぎ）を変化させ、溶質元素の濃度ゆらぎに起因する動的再結晶挙動の変化を解析する。これらの結果から、均一微細組織を得るための固溶元素選定、プロセスについての提言を行う。さらに、連続鍛造材の動的再結晶挙動に及ぼす溶質元素およびその濃度ゆらぎの寄与について、長岡技科大でのマイクロ組織の影響についての研究結果と併せ検討する。その結果から、長岡技科大と共同で微細で均一な動的再結晶粒を得るための素材組成・組織設計指針（溶質元素、第2相粒子、析出物など）を導出する。

平成21年度は、積層欠陥エネルギー算出のための第一原理計算による偏析エネルギーの算出を、微量固溶型合金も含めた新たな20元素について行いデータベースを完成する。得られた偏析エネルギーを用い、加工度、濃度ゆらぎによる積層欠陥エネルギーの変化を表すモデル式を構築するとともに、実験による検証を行う。また、平成20年度に構築した動的再結晶粒径と加工温度、加工速度、積層欠陥エネルギーとの関係について、新たな2元系単相マグネシウム合金において検証を行う。

平成22年度は溶質元素種、濃度ゆらぎが再結晶組織の均一性に及ぼす影響についての解析を行う。具体的には、溶質元素種、濃度ゆらぎの異なる2元系マグネシウム合金の各ひずみ量での結晶粒径分布を算出、定量化し、その関連性を明らかにする。また、溶質元素種、濃度ゆらぎの変化による高温変形特性の変化について実験により明らかにする。これらの結果と平成21年度までに得られた溶質元素種、濃度ゆらぎが動的再結晶粒径に及ぼす影響についての解析結果、第一原理計算結果から求めた積層欠陥エネルギーの値を総合し、耐熱性に優れかつ鍛造による結晶粒微細化が見込まれる固溶合金の設計指針を提案する。

#### ②-4) 鍛造素材及び鍛造部材の第二相粒子による高機能化の検討

マグネシウム合金の鍛造加工性向上および鍛造部材の高機能化を達成するため、第二相粒子の利用を検討する。なお、本研究項目は一部を長岡技術科学大学に再委託する。

第二相粒子としては、凝固中に晶出する化合物（晶出化合物）と熱間加工中に動的に析出する化合物（動的析出物）の2種類が想定される。さらにマトリックスとの整合性の有無によってもその効果は変化することが予想される。そこで、産業技

術総合研究所では平成18年度で取り上げた動的析出を伴う既存実用合金材料（主にZK60）を対象に、長岡技術科学大学では動的析出を伴う高アルミニウム含有高純度合金（AZ91およびAZX911）および化合物分散型のMg-Al-Ca系高純度合金（希土類元素含有合金も含む）を対象に、鑄造時の冷却速度および熱間加工前の熱処理条件を変化させ、凝固組織の微細度（結晶粒径、デンドライトアーム間隔等）、第二相の形態およびマトリックス中の溶質元素濃度の揺らぎを変化させた供試材を作製し、それらの合金の高温圧縮変形に伴う動的再結晶挙動、マイクロ組織変化、高温変形挙動に及ぼす温度およびひずみ速度の影響をマイクロ組織学的観点から考察し、化合物の種類の影響を明確化する。特に19年度では、動的再結晶の核生成および成長に及ぼすマトリックス中の溶質元素の濃度揺らぎ、それに起因して動的析出する平衡・準安定相および晶出粒子等の第二相の影響を評価するために、均質化条件を変化させた素材を作製し、温度およびひずみ速度を変化させて圧縮加工、高温引張試験を行う。その際、粒内の濃度揺らぎに起因する動的な連続再結晶については大阪府立大が、第二相に起因する動的な不連続再結晶については本学が中心となって解析し、動的再結晶粒径に及ぼす温度およびひずみ速度の影響を定量的に評価するために、Zパラメータ等を用いて整理する。また動的再結晶を生じさせ得る条件で圧縮変形させた試料の機械的性質を評価し、結晶粒径、結晶配向、化合物の種類、量のマイクロ組織因子の影響を定量化し、鍛造性および機械的性質に与える影響を考察するとともに、鍛造性および機械的性質に優れる素材の創り込みに必要な条件および新規合金系の提案を行う。平成20年度は、素材ビレットの前処理（均質化処理および時効処理）と高温圧縮変形に伴うマイクロ組織変化、特に再結晶率、再結晶粒径、動的析出物の大きさおよび量、ならびに集合組織、さらには圧縮材の機械的性質との関係を明らかにするとともに、高温圧縮材全体に均一微細な再結晶粒が得られる前処理条件および圧縮条件（圧縮温度、ひずみ速度）を見出す。さらに、圧縮後の時効特性と前述の前処理および圧縮条件の関係を明らかにする。また、上述の結果から、第二相粒子、例えばMg-Al系合金におけるMg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相のような析出相が再結晶挙動、機械的性質へ顕著に影響することが解明された場合、その量を変化させるための合金元素量のチューニングを行ない、それらの合金の最適熱間加工条件、時効条件等を探索する。

平成21年度は前年度の結果に基づき、未再結晶領域の少ない、均一な再結晶粒組織獲得のための鍛造条件の確立と熱処理条件の最適化によるマグネシウム合金鍛造材の高性能化を目指す。すなわち、高温・高ひずみ速度の圧縮条件にて、できる限り均一な再結晶粒が得られる条件を抽出し、その後の時効のみ（T5処理）で高強度化を図るプロセス条件を探索する。

平成22年度はAZ91合金をベース合金として、十分な時効硬化を発現可能なCa添加量を抽出し、その合金の動的再結晶挙動および動的析出挙動を解析するとともに、これまでに得られた均一微細な再結晶粒組織を得るための加工条件を適用し、高性能なマグネシウム合金鍛造材を得るための製造条件を確立する。

産業技術総合研究所では長岡技術科学大学での研究成果を参考にしつつ、鍛造加工マップを構築する。なお、助成事業の成果として得られた第二相を含むマグネシウム合金で、鍛造素材としての適用可能性がある合金については、本研究の対象とする可能性がある。

### ③「マグネシウム合金のリサイクルに係わる課題抽出」

#### ③-1) マグネシウム廃棄物発生の実態調査

マグネシウムリサイクルの最適化に必須な基礎情報を把握することを目的に、マグネシウム廃棄物の発生状況及び処理状況について現状調査を行う。平成18年度は、工場内スクラップに的を絞りマグネシウム廃棄物の発生工程と発生量、形状や不純物付着状況等の性状、処理実態をマグネシウム成形工場等や、金属再生業者等を対象とするヒアリング現地調査を実施し、発生工法、性状、発生状況等で分類し、その特性を把握する。

平成19年度は、平成18年度に行った調査を市中スクラップにまで拡張する。さらに、マグネシウムスクラップのリサイクル市場構築の費用対効果と環境影響評価を見極めるための調査を実施する。具体的には今後のマグネシウム合金の市場予測について情報収集を実施し、これを踏まえ、将来のマグネシウム廃棄物の発生量を推測し、リサイクルシステムが社会的に成り立つ要件を調査する。

#### ③-2) リサイクル前処理技術（分離、精製）

再溶解によるリサイクル技術の前処理技術としての不純物除去技術の開発を行う。切削屑など、不純物を多く含むため未利用となっている工場内スクラップを対象としたリサイクル技術開発として、バッチ処理での過熱水蒸気を用いた脱有機物処理に関して、実験室規模での装置を用いた基礎的検討を行う。実験では、最終的な溶解リサイクル時に必要とされる不純物混入量となるスクラップ性状による有機物除去の運転条件を決定し、実用化技術開発の基盤として活用する。市中スクラップリサイクル技術開発として、リサイクルシステムを想定した単体分離、成分分離、不純物除去技術開発を行う。そのために単体分離、成分分離、不純物除去については、上記脱有機物処理方法の他に選鉱、製錬で用いられてきた技術を改良してマグネシウムリサイクル用にシステム化するための問題点を抽出する。最終的には、精錬による溶解リサイクル、固体リサイクルによる水平型リサイクルが可能な回収マグネシウム素材とするための課題抽出を行い、マグネシウムリサイクル社会創生に資するデータを蓄積する。

平成18年度は、工場内スクラップの有機、無機不純物除去技術について、除去剤を使用するバッチ式小規模実験(既存設備に18年度購入の加熱容器および蒸気循環装置を組み改造)を使用して実験し、実用化のために必要なデータを蓄積する。その評価はるつぼ炉(18年度購入)を用い、サンプルを溶解し、その物性評価により、

適切な不純物除去条件を明らかにする。またレーザー体積計測装置(18年度購入)を使用する分離システムの概念設計、試作を行い、マグネシウムスクラップの安全で効率的な分離方法のための予備実験を行う。さらに、各種のスクラップサンプルを粉碎処理する振動試料粉碎装置(18年度購入)を使用して、形状等が不揃いな市中スクラップの前処理の基礎的検討を行う。

平成19年度は、工場内スクラップ（未利用の切削粉のみならず工場スクラップ全体）不純物除去実用化研究開発での問題点から、残留酸素測定器及び排ガス分析計一式（19年度購入）も使用し、その解決方法を基礎的に検討する。また、市中スクラップを対象とした不純物除去、分離実験を行ない、リサイクルシステム構築に必要な実験データを蓄積する。特に分離実験では、機器制御プログラムの作成とアルミ、真鍮、銅などの金属塊データベースの拡充を行う。

平成20年度は、残留酸素測定器及び排ガス分析計一式(19年度購入)の改良を行い、不純物除去実用化研究開発と連携し、実用的な操業条件を検討する。市中スクラップの物理選別では、現状よりさらに実用に近い条件下での分離実験を実施し、識別アルゴリズムを高度化することで分離精度の更なる向上を図る。市中スクラップの無機不純物除去については、実用的な不純物除去技術開発に資するデータ蓄積を行う。

平成21年度は、過熱熱水蒸気処理技術の市中スクラップへの展開として、多形状端材の洗浄及び塗装の分離除去への適用、また工場内スクラップを対象とした研究の延長として蒸気循環式での基礎的有用性を検証する。市中スクラップの物理選別では、破砕片のサンプリング方法を変更した場合の識別精度への影響と選別システムの高速化について検討する。無機不純物除去では、ニッケル等の不純物除去技術開発に資するデータを蓄積するとともに、溶解速度の高い条件の探索を中心に実験的研究を実施する。

平成22年度は、過熱水蒸気処理による多形状スクラップを対象にした洗浄技術を検討し、実用化研究（助成事業）へ成果を反映させる研究を行うとともに、最終年として工場内および市中スクラップの成果・課題まとめを行い今後の研究開発への展開を行っていく。また、スクラップの物理選別システムの汎用性を総合的に評価し基盤技術として提案し、無機不純物除去について前処理技術のデータをまとめ課題抽出を行う。

### ③-3) 単体分離及びハンドリングの安全性評価

リサイクルプラントにおける粉塵爆発と自然発火事故を防止する観点から、マグネシウム粉末の発火性に及ぼす影響因子について基礎特性を詳細に検討し、安全な取り扱い条件を明らかにする。また、その結果に基づき、マグネシウムスクラップの粉碎、選別、輸送、貯蔵などの単位操作における安全面から見た課題を抽出し、発火防止など安全なハンドリング方法を提案する。これらにより、市中から回収されるマグネシウムスクラップのリサイクルを促進するための基盤を構築する。

平成18年度は、マグネシウムの粉塵爆発に関する基礎特性の解明として、放電電極を用いた着火による試験方法により、爆発下限濃度、最小着火エネルギー、最小着火温度等に対するマグネシウム粉の組成、粒度、濃度の影響を実験的に明らかにする。マグネシウム粉の着火性に関する基礎的な検討結果をカナダのハリファックスで開催される国際会議6thISHPMでの発表を行うとともに粉塵爆発に関する最新の情報収集を行う。

平成19年度は、上記に加え共存物質（固体粒子）の組成、粒度、濃度の影響を調べるとともに、上記の試験方法では評価できない浮遊粉塵の流動状態の影響について検討する。また、市中スクラップ処理プロセスでの安全性評価モニタリング法の予備的な検討を開始する。

平成20年度は、リサイクルプロセス内でのマグネシウム発火実験を行うとともに、カルシウム添加マグネシウムに関する安全性評価研究を開始する。

平成21年度は、リサイクルプロセス内での粉塵爆発特性として、粉塵の強制的流動下での着火性に関する実験を行うとともに、着火性火花の特性について電磁気学的な観点から調査・検討する。

平成22年度は、電磁波測定による着火性火花の基礎的検知方法について検討し、基盤技術として提案するとともに、最終年としてマグネシウム粉塵爆発災害防止対策について総合的に検討し課題を抽出する。

#### ③-4) 固体リサイクル材の鍛造素材化技術の開発

加工で生じた切削粉をリサイクルするために、熱間押し出しによる固化成形を行ってバルク材を作製し、その鍛造加工性を調べることにより、鍛造素材化のための条件を見出す。そのために、工場から排出される切削粉（プロジェクトメンバーの鍛造関連企業よりサンプルを入手、実験には1回あたり100g程度必要で数十回の実験を予定）について、熱間押し出しによる固化成形の条件及び切削の形状、清浄度等の条件を調べるとともに後方押し出しなどの鍛造加工を行い、鍛造加工データの構築を行う。以下の実施内容において、素形材センターは切削粉の脱脂および鍛造加工のデータ収集を担当し、固化成形条件の検討と成形品の特性評価を産総研が担当する。

平成18年度は、工場より回収して脱脂した切削粉に熱間押し出しによる固化成形を行い、素材を作製するための押し出し温度、押し出し比、切削粉の形状、不純物の影響を調べ、鍛造素材化のための問題点を明らかにする。また、温度を変えて後方押し出しによる加工を行うために申請の加熱装置を加工機にとりつけるとともに申請消耗品によるダイの設計・製作を行う。得られた試料について、鍛造加工時の変形挙動を調べ、鍛造加工のためのデータを収集する。

平成19年度は、2段高温押し出し金型を導入し固化成形の条件と加工性の相関性を調べることにより、加工性を向上させる素材の作製条件を調べる。また、鍛造加工を行い、鍛造加工後の変形データを評価するとともに加工後の素材の組織を調べ、

鍛造加工データの蓄積を行う。切削粉の固化成形に関して得られた成果については北京で開催される国際会議MP3で発表を行う。

平成20年度は、工場内スクラップ材として検討していたAZ31系マグネシウム合金に併せて、Ca添加マグネシウム合金スクラップ材の固化成形を行い、固化成形条件がバルク材の特性や鍛造加工性に及ぼす影響を評価し、併せて加工特性や組織等の鍛造加工データの蓄積を図る。また、Ca添加マグネシウム合金スクラップ材および固化成形体の安全性を評価するため、評価装置を購入し、それらの安全性を評価する。

平成21年度は、マグネシウム切削粉の大量処理に向け、各種マグネシウム合金が混在した切削粉の成分調整を検討する。成分調整を行った切削粉について、簡易、低コストな方法で固化成形し、室温から熱間までの機械的特性を評価する。併せて鍛造加工を行い、鍛造加工条件を検討する。さらに、それぞれのプロセスにおけるスクラップ材の安全生を評価する。また、得られた成果はドイツで開催される国際会議（Thermec2009およびMagnesium2009）で発表する。

平成22年度は、市中スクラップ材に対して鍛造素材化を検討し、リサイクルにおける課題を抽出する。得られた成果をシンガポールで開催される国際学会（6th World Congress on Biomechanics）で発表する。

### ③-5) 固体リサイクル材の諸特性に及ぼす混入物の影響評価

固体リサイクルされたマグネシウム合金の諸特性に及ぼす混入物の影響を調べることを目的に、各種試験を実施しリサイクル材の力学特性を測定するとともに、組織観察を行い混入物の状態を観察する。

具体的には、③-4)で作成した固体リサイクルマグネシウム合金の力学特性を、硬さ試験及び引張り試験等によって調べ、鍛造性の基礎となる諸特性（硬度、最大強度、降伏強度、破断伸び等）に関する知見を得る。さらに、固体リサイクル材とリサイクル材と同様の加工熱処理履歴を付与したバージン材の特性を比較することにより、リサイクル材の力学特性に及ぼす混入物の影響を明らかにする。また、光学顕微鏡観察、走査型電子顕微鏡観察等による組織観察を実施し、混入物の大きさ、分布状態等を調べ、これら組織的因子と力学特性の関係を究明し、固体リサイクル材の力学特性に及ぼす混入物の影響を明らかにする。

これまでの研究結果から、混入物がクラックの生成を助長するため、固体リサイクル材の延性、加工性が低下する傾向にあることがわかった。そこで、平成20年度は、マグネシウム合金の力学異方性に着目し、固体リサイクルマグネシウム合金の集合組織を制御し、リサイクル材の延性、加工性の向上を図る。すなわち、固体リサイクルプロセスとして、スクラップの固相固化と集合組織制御が同時達成できる“ねじり押し出し法”の適応を検討する。具体的には、切削粉に熱間ねじり押し出しを付与し、強加工効果により混入物の均一微細分散化を促進させるとともに、(002)底面が押し出し方向に対し傾斜するよう集合組織を制御する。次に、引張り試

験（温度：室温～400℃）を実施し、ねじり押し出しにより再生した固体リサイクル材と通常押し出しにより再生した固体リサイクル材の力学特性を比較する。さらに、X線回折測定や電子顕微鏡観察等により集合組織や不純物の分散状態を解析し、力学特性と微視組織の関係を究明する。以上の結果を基に、固体リサイクル材の延性、加工性向上のための指針を提示する。

平成20年度までの成果から、固体リサイクルは工場内スクラップから優れた鍛造性を示す再生材にリサイクルできるプロセスであることが実証できた。しかし、固体リサイクルマグネシウム合金が商業化されるには、鍛造性以外の各種特性を調べておく必要がある。そこで、平成21年度では固体リサイクルマグネシウム合金の腐食特性を、平成22年度では疲労特性を評価し、それぞれの特性と混入物の影響について明らかにする。

研究開発項目④「マグネシウム合金の鍛造用ビレット調整技術開発」

研究開発項目⑤「マグネシウム合金の鍛造部材開発(輸送用機器、ロボット)」

研究開発項目⑥「マグネシウム合金の鍛造部材開発(情報家電用機器)」

研究開発項目⑦「マグネシウム合金のリサイクルに係る技術開発」

については、企業による助成事業のため、研究開発成果の項(非公開)に記す。

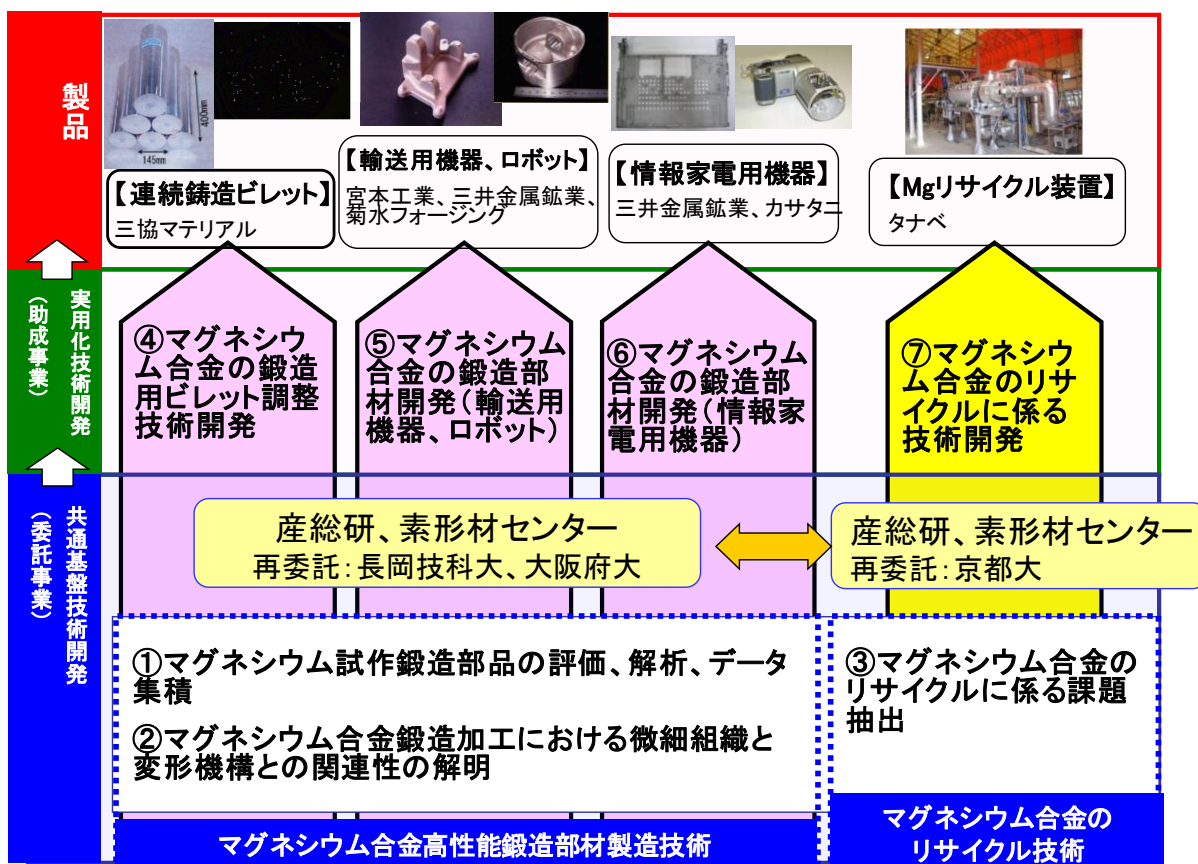


## 2. 3 研究開発の実施体制

本プロジェクトは、図Ⅱ.2.3-1に示すように、委託事業により共通基盤技術開発を行い、その成果を活かして助成事業により実用化技術開発を行う。なお、委託事業では、鍛造技術に関しては産総研中部センター、リサイクル技術に関しては産総研つくばセンターにおいて集中研方式により研究開発を実施している。

実施体制を図Ⅱ.2.3-2に示す。本体制の特徴として、基盤技術研究＋実用化研究のハイブリッド型となっており、委託事業と助成事業が並行して進められている。

委託事業は、独立行政法人産業技術総合研究所と財団法人素形材センターが共同研究契約の下に実施している。産総研の中部センターに鍛造技術関連の集中研を、つくばセンターにリサイクル関連の集中研を設置し、企業メンバー6社の研究員が素形材センターに出向して、それぞれ中部集中研とつくば集中研で委託事業に参画している。その成果を活用し、各企業が実用化を目指したマグネシウム鍛造技術に係る実用化技術開発を実施している。



図Ⅱ.2.3-1研究開発項目①～⑦の位置付け

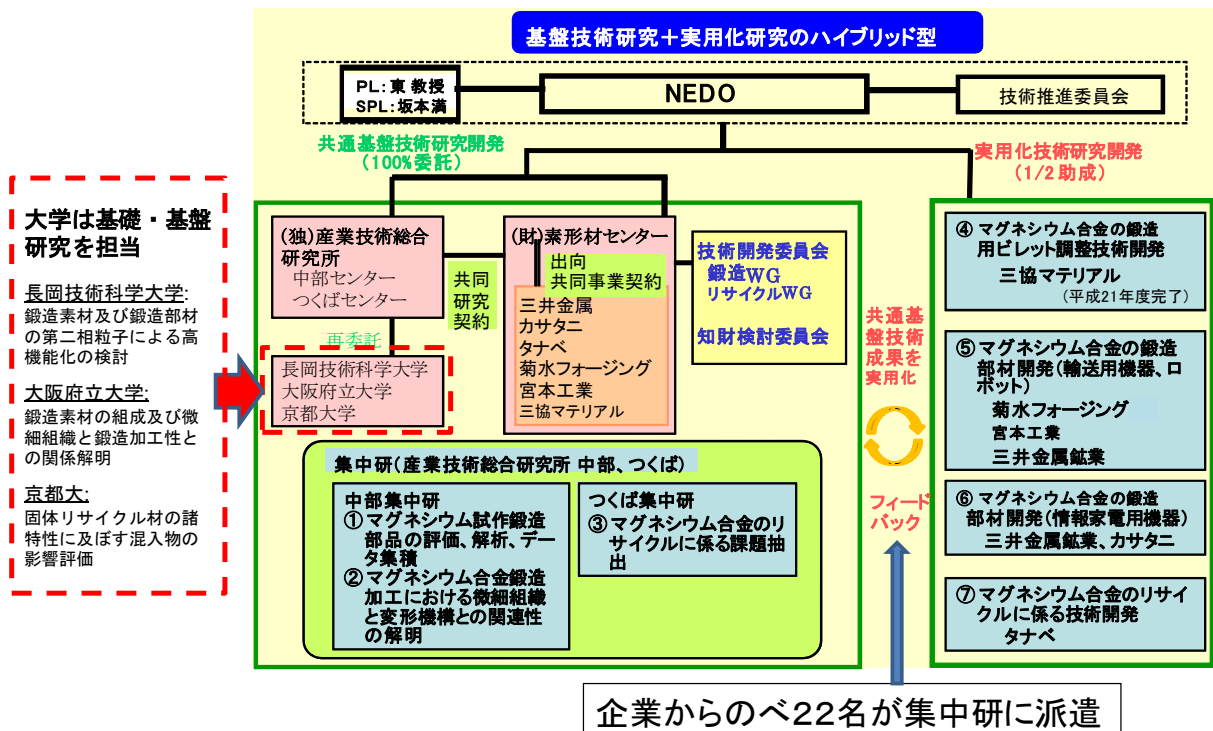


図 II.2.3-2 本プロジェクトの実施体制

なお、本プロジェクトは、基盤研究開発を行う委託事業が、実用化研究開発に先行する形で実施された。すなわち、企業メンバーが実施する助成事業は、1年目から助成事業を行った企業メンバー1社を除き、他の5企業メンバーは、2年目から実用化研究開発に係る助成事業を開始した。基盤研究開発の進捗により、3年度目以降はさらに委託事業の成果を踏まえた助成事業を展開した。基盤研究開発と実用化研究開発の連携の具体例を図 II.2.3-3 に示す。

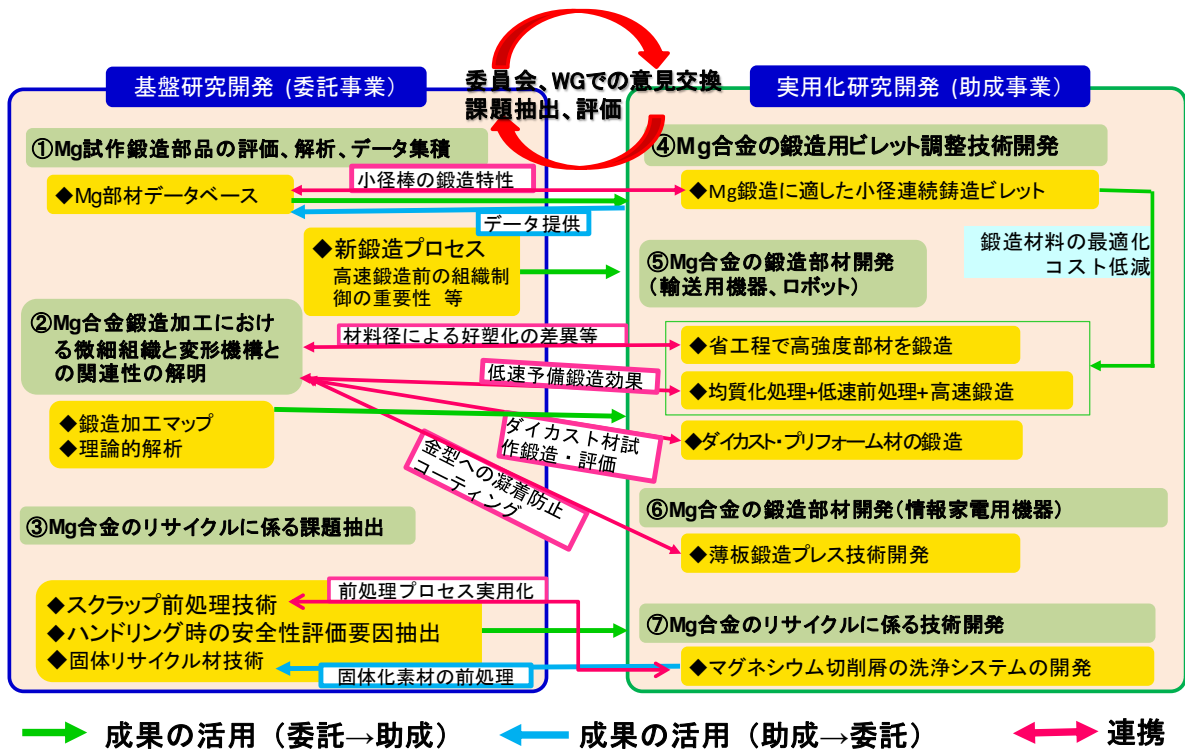


図 II .2.3-3 基盤研究開発と実用化研究開発の連携

## 2. 4 研究開発の運営管理

### 2. 4. 1 実用化・事業化に向けた研究開発マネジメント

NEDO は当該プロジェクトを効率的且つ効果的に推進するために、プロジェクトリーダー (PL) として当該プロジェクトに高い技術的知見を有する大阪府立大学大学院 東 健司 教授に PL を委嘱した。PL・委託先・助成先・NEDO での有機的な連携の下でプロジェクトの推進を図った(図 II .2.4-1)。PL の主な役割として、プロジェクトの技術目標達成のための研究者の選任、予算の配分、年度毎の概算要求案の策定、研究計画の変更に対する助言、指導などがあり、研究進捗管理としての研究経過の報告や、研究成果の取扱いに関する知的財産や論文発表の管理がある。また、各種関係会議への対応や事業計画の策定および実施に関しても助言、指導を行う。



**東PLの強力なリーダーシップのもと、**

- ①研究開発テーマと体制の詳細設定
- ②産学官研究者間の信頼関係構築
- ③PL主導で勉強会を開催し、研究者のスキル向上に寄与
- ④基盤技術から実用化技術への円滑な成果移管

**産学官による垂直連携体制、  
研究者の人材育成、スキル向上に大きく貢献**

図Ⅱ.2.4-1 PLによるプロジェクトマネジメント

本プロジェクトは、前述したように委託事業は独立行政法人産業技術総合研究所におかれた集中研拠点で、助成事業は各企業で研究開発が行われている。

委託事業として行われる共通基盤技術開発について、研究開発の進捗状況と成果について、メンバー相互の情報共有化を図りつつ、研究開発の目的及び目標の達成に向けてプロジェクトの最適化と効率的な運営、実用化開発事業への円滑な移行を推進することを目的として、以下の委員会等を設置した。

(1) 外部有識者による技術推進委員会

プロジェクトの目標達成度を把握するとともに、プロジェクトの資源配分の判断に資することを目的に、外部の専門家、有識者等によって構成される技術推進委員会を設置。

[委員名簿]

立場	氏名	所属・部署	役職
委員長	佐久間健人	高知工科大学	学長
委員	浅井 滋生	独立行政法人科学技術振興機構 JST イノベーションプラザ東海	館長
〃	小豆島 明	横浜国立大学大学院工学研究院	教授
〃	茂木 徹一	千葉工業大学 工学部	工学部長

[開催実績]

開催日	委員会名
平成 19 年 2 月 13 日	第 1 回技術推進委員会
平成 20 年 4 月 21 日	第 2 回技術推進委員会

「実験数の増加、実用に向けた研究開発課題の明確化」等の指摘をいただき、PL が主導し再検討、研究開発計画へ反映を行った。また、下記の委員会の活用などにより更なる連携強化を図った。

## (2) プロジェクト内の委員会等

### ●技術開発委員会

参加者：委員、オブザーバ(経産省素形材産業室、NEDO、プロジェクトメンバー関係者)

担 当：プロジェクトの年間計画の確認、成果の確認、研究開発の方向性、プロジェクト内ルールの検討

### ○研究部会

参加者：外部委員を除く委員、オブザーバ(経産省素形材産業室、NEDO、プロジェクトメンバー関係者)

担 当：個々の研究テーマの進捗状況報告・進捗管理、研究テーマ間の連携・調整に関する議論など

### ○研究連絡会議(ワーキンググループ)

参加者：外部委員を除く委員、プロジェクトメンバー関係者

担 当：研究部会を補完。具体的な進捗管理

### ○知的財産権部会：案件発生ごと随時開催。メール及び電話連絡で代替

参加者：常任メンバーはPL、SL及び素形材センター。案件毎に該当する(外部委員を除く)委員、プロジェクトメンバー関係者

担 当：プロジェクトで発案された知的財産権に係る権利者、持分、幹事等の了解など

### ●外部有識者との情報交換：情報交換会は年 1 回程度。その他随時、技術的指導を受ける。

参加者：委員、有識者、オブザーバ

目 的：マグネシウムの鍛造技術に係る研究、開発等について情報交換

[構成メンバー名簿(オブザーバを除く)]

構成メンバー	氏名	所属・部署	役職	備考
プロジェクトリーダー	東 健司	大阪府立大学大学院工学研究科物質系専攻材料工学分野	教授	

サブリーダー	中村 守	独立行政法人産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門	部門長	(~2008.11)
"	坂本 満	独立行政法人産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門	副部門長	(2007.7~、 但し SL は 2008.12~)
外部委員	岩田 健二	鍛造技術開発協同組合	専務理事	
"	小原 久	日本マグネシウム協会	専務理事	
委員	神谷 晶	独立行政法人産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門	副部門長	(~2007.6)
"				
"	斎藤 尚文	独立行政法人産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門	金属材料組織制御 研究グループ長	
"	渡津 章	独立行政法人産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門	金属材料組織制御 研究グループ	
"	袴田 昌高	独立行政法人産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門	金属材料組織制御 研究グループ	(2007.4 ~ 2009.3)
"	小林 幹男	独立行政法人産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門	副部門長	(~2009.3)
"	大矢 仁史	独立行政法人産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門	リサイクルシステム 評価研究グループ 長	(~2008.3)
"	古屋仲茂樹	独立行政法人産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門リサイクル リサイクル基盤技術研究グループ	主任研究員	
"	松崎 邦男	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門	難加工成形研究グ ループ長	
"	村越 庸一	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門難加工 成形研究グループ	主任研究員	(2007.4~)
"	間渕 博	大阪府立大学大学院工学研究科 物質系専攻材料工学分野	教授	
"	瀧川 順庸	大阪府立大学大学院工学研究科 物質系専攻材料工学分野	准教授	
"	鎌土 重晴	長岡技術科学大学機械系	教授	
"	本間 智之	長岡技術科学大学機械系	助教	
"	馬渕 守	京都大学エネルギー科学研究科 エネルギー応用科学専攻	教授	
"	荻布真十郎	財団法人素形材センター	専務理事	(~2007.7)
"	板谷 憲次	財団法人素形材センター	専務理事	(2007.7~)
"	笹谷 純子	財団法人素形材センター	金属材料技術部 部長	
"	田邊 秀一	財団法人素形材センター	金属材料技術部 主幹研究員	
"	岩崎 源	財団法人素形材センター	嘱託研究員	
"	岡野 忍	財団法人素形材センター	金属材料技術部 主幹研究員	
"	篠崎吉太郎	財団法人素形材センター	嘱託研究員	
"	森脇 孝	協業組合菊水フォーミング	理事長	
"	福井 毅	協業組合菊水フォーミング	理事技監	(2008.6~)
"	宮本 尚明	宮本工業株式会社	代表取締役社長	
"	関口 常久	宮本工業株式会社	技術顧問	
"	久保田耕平	三井金属鉱業株式会社マグネ プロジェクトチーム	マネージャー	(~2009.3)
"	二宮 隆二	三井金属鉱業株式会社 部品事業本部ダイカスト事業部	部長	(2009.4~)

〃	野坂 洋一	三井金属鉱業株式会社マグネプロジェクトチーム	サブマネージャー	(~2009.3)
〃	神田 耕吉	株式会社カサタニ製造本部 新規事業グループ	副本部長	(~2009.3)
	森 譲	株式会社カサタニ	常務取締役	(2009.4~)
〃	桂 重弘	株式会社カサタニ技術部開発技術課		
〃	吉俣 容一	株式会社カサタニ技術部開発技術課		
〃	山下 友一	三協マテリアル株式会社 マグネシウム統括部	執行役員	
〃	宮本 進	三協立山アルミ株式会社経営企画 本部マグネシウム事業推進室		(~2007.4)
〃	御後 達夫	三協立山アルミ株式会社技術開発 本部マテリアル技術室	主事	(~2008.5)
〃	清水 和紀	三協マテリアル株式会社 マグネシウム統括部用途開発課	副参事	(2008.6~)
〃	田辺 郁雄	株式会社タナベ	常務取締役	
〃	木村 正人	株式会社タナベ東京本部事業企画室	課長代理	

[主な委員会等開催実績]

年度	開発月	委員会等名	場所	内容
18年度	9月	第1回技術開発委員会	機械振興会館 (東京都港区)	詳細実施計画検討
	10月	第1回リサイクルWG	(財)素形材センター (東京都港区)	リサイクル調査検討
	10月	第1回鍛造WG	(財)素形材センター (東京都港区)	実施計画と進捗状況検討
	10月	第2回鍛造WG	産総研中部センター (名古屋市)	Mg鍛造部材試作計画検討
	10月	第3回鍛造WG	(財)素形材センター (東京都港区)	鑄造材の鍛造試作検討
	11月	第4回鍛造WG	産総研中部センター (名古屋市)	研究開発進捗報告
	12月	第5回鍛造WG	三井金属鉱業(株) (菫崎市)	研究開発進捗報告
	1月	第6回鍛造WG	産総研中部センター (名古屋市)	研究開発進捗報告と次年度計画検討
	1月	第2回技術開発委員会	機械振興会館 (東京都港区)	研究開発成果報告
19年度	4月	第1回鍛造WG	産総研中部センター (名古屋市)	研究開発進捗報告
	4月	メンバー間打ち合わせ (PL、集中研、三協立山アルミ)	大阪府立大学 東研究室(堺市)	今後の研究開発の進め方検討
	5月	第2回鍛造WG	アレックスビル 会議室(名古屋市)	研究開発進捗報告
	5月	メンバー間打ち合わせ (集中研、三協立山アルミ)	ホテルマリオットア ソシア会議室(名古屋 市)	研究開発進捗報告
	6月	メンバー間打ち合わせ (集中研、三井金属)	産総研中部センター (名古屋市)	今後の研究開発の進め方検討
	6月	PLとの打ち合わせ会	素形材センター (東京都港区)	今後の研究開発の進め方検討
	7月	PLとの打ち合わせ会	素形材センター (東京都港区)	今後の研究開発の進め方検討

	8月	第3回鍛造WG	機械振興会館 (東京都港区)	研究開発進捗報告
	9月	第1回研究部会	機械振興会館 (東京都港区)	研究開発進捗報告と今後の進め方検討
	10月	メンバー間打ち合わせ (集中研、三井金属)	産総研中部センター (名古屋市)	今後の研究開発の進め方検討
	10月	第1回リサイクルWG	素形材センター (東京都港区)	今後の研究開発の進め方検討
	11月	第2回リサイクルWG	素形材センター (東京都港区)	今後の研究開発の進め方検討
	12月	第4回鍛造WG	産総研中部センター (名古屋市)	研究開発進捗報告
	12月	第3回リサイクルWG	素形材センター (東京都港区)	今後の研究開発の進め方検討
	1月	第4回リサイクルWG	素形材センター (東京都港区)	今後の研究開発の進め方検討
	2月	メンバー間打ち合わせ (集中研、カサタニ)	カサタニ (大阪市淀川区)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	2月	メンバー間打ち合わせ (集中研、菊水フォーミング)	菊水フォーミング (鳥取県米子市)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	2月	メンバー間打ち合わせ (集中研、三協立山アルミ)	三協立山アルミ (富山県射水市)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	2月	メンバー間打ち合わせ (集中研、宮本工業)	宮本工業 (栃木県塩谷郡塩谷町)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
20年度	3月	メンバー間打ち合わせ (PL、集中研、素形材センター、大阪府大)	大阪府立大学 東研究室(堺市)	プロジェクトの推進に向けて意見交換
	4月	メンバー間打ち合わせ (集中研、素形材センター、NEDO)	産総研つくばセンター(茨城県つくば市)	リサイクル分野における進捗・成果に関する検討
	5月	メンバー間打ち合わせ (集中研、三協立山アルミ)	三協立山アルミ (富山県射水市)	研究開発進捗報告
	5月	メンバー間打ち合わせ (集中研、宮本工業)	宮本工業 (栃木県塩谷郡塩谷町)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	6月	メンバー間打ち合わせ (集中研、菊水フォーミング)	菊水フォーミング (鳥取県米子市)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	6月	メンバー間打ち合わせ (集中研、長岡技科大)	長岡技術科学大学 (新潟県長岡市)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	6月	メンバー間打ち合わせ (PL、産総研、素形材センター)	大阪府立大学 東研究室(堺市)	中間まとめに関する検討
	12月	メンバー間打ち合わせ (PL、集中研)	ANA クラウンプラザホテル(大阪市北区)	プロジェクトの推進に向けて意見交換
	12月	メンバー間打ち合わせ (PL、素形材センター)	素形材センター会議室(東京都港区)	プロジェクトの推進に向けて意見交換
	1月	メンバー間打ち合わせ (集中研、菊水フォーミング)	菊水フォーミング (鳥取県米子市)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	1月	メンバー間打ち合わせ (集中研、カサタニ)	カサタニ (大阪市淀川区)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	1月	メンバー間打ち合わせ (集中研、三協マテリアル)	三協マテリアル (富山県射水市)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討



	1月	メンバー間打ち合わせ (集中研、素形材センター)	産総研中部センター (名古屋市)	鍛造データベース、今後の実施計画試作鍛造に関する検討
	2月	メンバー間打ち合わせ (集中研、三井金属鉱業)	産総研中部センター (名古屋市)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	2月	メンバー間打ち合わせ (集中研、宮本工業)	宮本工業 (栃木県塩谷郡塩谷町)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	2月	メンバー間打ち合わせ (集中研、長岡技科大)	長岡技術科学大学 (新潟県長岡市)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	2月	第1回技術開発委員会	機械振興会館 (東京都港区)	研究進捗報告と今後の研究開発計画の検討
21年度	4月	メンバー間打ち合わせ (PL、産総研、素形材センター)	大阪府立大学 東研 研究室(堺市)	今後のプロジェクト推進に関する検討
	6月	メンバー間打ち合わせ (集中研、菊水フォーゼン)	菊水フォーゼン (鳥取県米子市)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	6月	メンバー間打ち合わせ (集中研、素形材センター)	産総研中部センター (名古屋市)	鍛造データベース、今後の試作鍛造に関する検討
	10月	メンバー間打ち合わせ (集中研、素形材センター、宮本工業)	素形材センター (東京都港区)	試作鍛造結果および鍛造データベースの検討
	12月	メンバー間打ち合わせ (集中研、菊水フォーゼン)	産総研中部センター (名古屋市)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	1月	メンバー間打ち合わせ (集中研、三協マテリアル)	産総研中部センター (名古屋市)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	2月	第1回技術開発委員会	産総研中部センター (名古屋市)	21年度成果と22年度計画の検討
22年度	4月	メンバー間打ち合わせ (集中研、カサタニ)	カサタニ (大阪市淀川区)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	4月	メンバー間打ち合わせ (集中研、宮本工業)	宮本工業 (栃木県塩谷郡塩谷町)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	4月	メンバー間打ち合わせ (集中研、菊水)	菊水フォーゼン (鳥取県米子市)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	4月	メンバー間打ち合わせ (集中研、三協マテリアル)	三協マテリアル (富山県射水市)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	4月	メンバー間打ち合わせ (集中研、三井金属鉱業)	三井金属鉱業 (山梨県韮崎市)	進捗報告と今後の研究開発の進め方検討
	6月	第1回技術開発委員会	タナベ (新潟県糸魚川市)	研究開発進捗報告と検討、シンポジウムに関する検討
	8月	第2回技術開発委員会	宮本工業 (栃木県塩谷郡塩谷町)	鍛造データベースに関する検討、プロジェクト成果の取りまとめ方法等に関する検討
	11月	第3回技術開発委員会	三井金属鉱業 (山梨県韮崎市)	研究開発進捗報告と検討、プロジェクト成果の事業化に関する検討
	1月	第4回技術開発委員会	カサタニ (大阪市淀川区)	研究開発成果に関する検討

## 2. 4. 2 実用化・事業化に向けたマネジメントと知財マネジメント

実用化・事業化に向け、下記のようなマネジメントを行った。

### (1) 開発状況に対応したフレキシブルな研究開発体制の変更

素材実用化研究開発についてプロジェクト4年目で最終目標を達成。早期にプロジェクトの研究開発を終了し、素材・鍛造部材双方の早期実用化の体制を整えた。

### (2) 市場動向に応じた実用化ターゲットの拡張

自動車、情報家電以外の実用化ターゲット拡大を検討し、平成23年度以降、助成企業において順次実用化の道筋をつくった。

### (3) 成果の普及に向けた広報活動

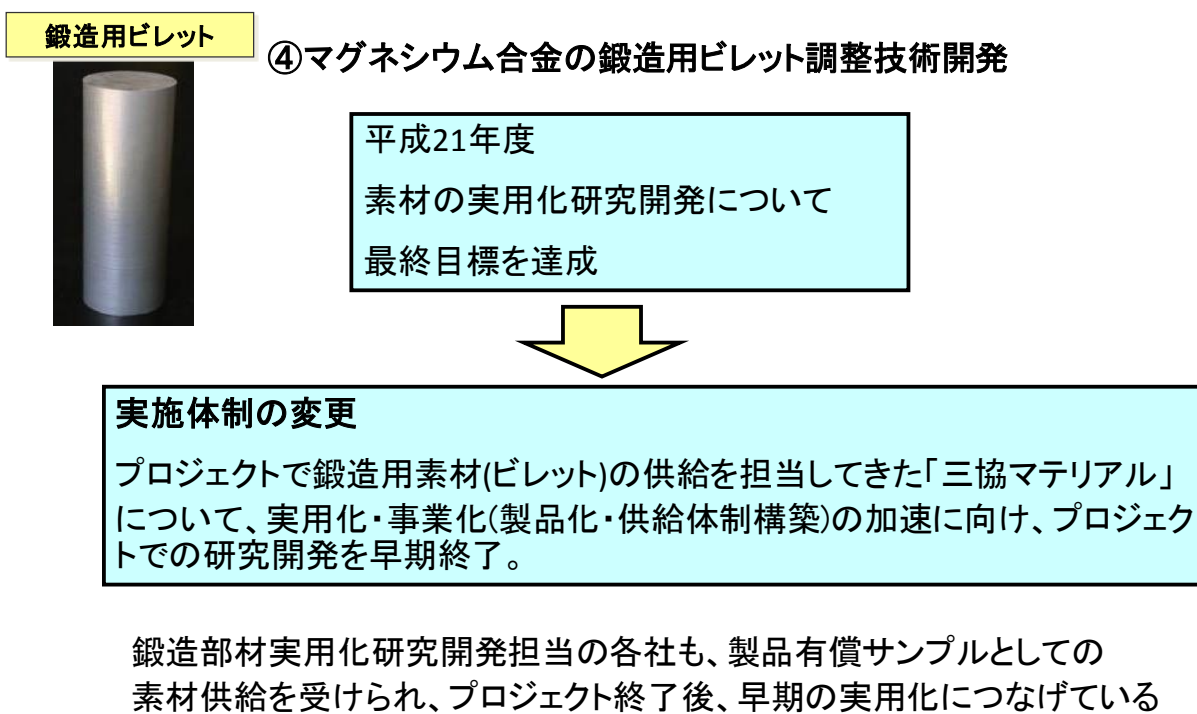
プロジェクト実施者・NEDO 共催のシンポジウムを開催し（平成22年度）、ユーザ企業の開発者約100名の参加者を集めた。マグネシウム鍛造部材を実用化する意欲のある活発な質疑応答や、後日の製品開発相談につなげている。

知財については下記の方針で実施した。

- ・企業の意向もふまえながら、材料など、特許取得が事業化に有効である場合には積極的に特許取得を行う。（企業が中心）
- ・助成事業では各社でノウハウ化したものは秘匿。集中研での成果は加工データベースとして助成企業実施者がアクセスできるようにし実用化を加速させる。
- ・プロジェクト終了後の成果の普及は、産総研を中心として、共同研究・共同開発等を通じて知財・日本の技術を守りながら進める。

### 3. 情勢変化への対応

プロジェクト4年目の平成21年度に、素材の実用化研究開発について最終目標をほぼ達成した。この機をとらえ、プロジェクトで鍛造用素材(ビレット)の供給を担当してきた三協マテリアルについて、実用化・事業化(製品化・供給体制構築)の加速に向け、平成21年度末にプロジェクトでの研究開発を早期終了させ、供給体制を整えマグネシウム鍛造製品実用化を加速する体制を整えた。鍛造部材実用化研究開発担当の各社は、製品有償サンプルとしての素材供給を受け、プロジェクト終了後、早期の実用化につなげている(図Ⅱ.3-1)。



図Ⅱ.3-1 情勢変化への対応 体制変更

また、図Ⅱ.3-2にこれまでに充当した研究加速財源の投入状況を示す。

年度	研究開発項目	金額 (百万円)	加速理由
平成18年度	①マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積	13	欧州(2006年)での第一原理計算によるアルミニウムの解析やマグネシウム合金の構造材料設計へ展開する動きをキャッチ。また、米国(2006年1月)でもマグネシウム合金の耐熱性や加工性に関して、計算による解析と電子顕微鏡による実験的実証が進んでいる情報を得た。  → 国際競争上の優位性を確保する目的で鍛造素材ナノ・アトミックスケールの分析装置導入(分解能原子識別装置、局所領域組成分析装置)、X線CT検査装置導入を行い対応。
	②マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構の関連性の解明	57	
	③マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出	3	
	④マグネシウム合金の鍛造部材開発(輸送用機器、ロボット)	15	
	⑤マグネシウム合金の鍛造部材開発(輸送用機器、ロボット)	15	
平成21年度	⑤マグネシウム合金の鍛造部材開発(輸送用機器、ロボット)	18	研究開発成果をユーザ企業に示す中で、ユーザ企業(装置メーカー)より装置部品のニーズと仕様をキャッチ。  → 連続プロセス化に必要となる迅速・高温加熱装置を導入するため、加速資金を投入。

→ 基盤技術  
確立

→ 製品化に  
つながる

図Ⅱ.3-2 情勢変化への対応 加速資金

平成18年度に、研究開発項目①マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積、②マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構との関連性の解明、③マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出に加速財源を充当し、基盤技術の確立につながった。

さらに、平成21年度には助成事業に装置・試作金型導入を行い、PJ終了直後の製品化につながる結果を得た。

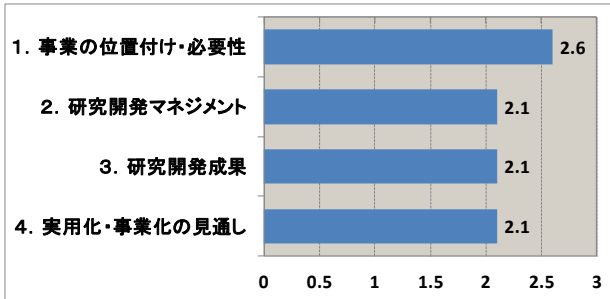
#### 4. 評価に関する事項

NEDOは、国の定める技術評価に係わる指針及びNEDOが定める技術評価実施要領に基づき、技術的及び実用化の観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成20年度、事後評価を平成23年度に実施する。なお、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。

中間評価における結果概要と見直しについて図Ⅱ.4-1に示す。詳細は「マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト」中間評価報告書にまとめられている。

平成20年度に有識者による中間評価を実施(NEDO評価部主催委員会)

< 中間評価結果 >



A=3、B=2、C=1、D=0として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

研究開発成果+実用化・事業化の見通し:  
3以上が「合格」、4以上が「優良」  
→本プロジェクトは 2.1+2.1=4.2 で「優良」評価

中間目標を達成しており、評価内容を反映させながら研究開発を継続

< 評価と対応方針 >

**評価**  
マグネシウムは最軽量の実用軽金属で、地球環境の温暖化対策、省エネ対策として今後普及の望まれる素形材である。まだほとんどがダイカストで製造されており、鍛造加工の市場規模は小さく、この市場拡大のための本事業は高く評価できる。  
一方、多くの技術課題を解決するには、研究機関、素材メーカー、加工メーカーの連携が必要で、本事業は共通基盤技術研究開発と実用化技術研究開発に分けて実施しており高く評価できるが、今後これらの**連携強化**をより一層図る必要がある【1】。また、共通基盤技術の目標値と実用化技術の目標値に関連をもたせ【2】、リサイクル技術開発の位置づけなどを明確にすること【3】、さらに、期待の大きいマグネシウム鍛造部材に関するデータベースを構築することが重要である【4】。

**対応方針**  
【1】【2】研究機関、素材メーカー、加工メーカー相互のワーキンググループ活動を通算で30回実施してきたが、さらに上記の3者のテーマ内容の相互連携を強化するため、**サブプロジェクトリーダーを研究開発現場により近い位置にある者に変更**し、より指導力の発揮できる体制にする。  
【3】リサイクル技術に関しては、操作性、安全性、低コスト化等の観点について位置づけを明確にし実施する。  
【4】マグネシウム鍛造のモデル部材を中心にデータベースを構築した。今後、必要に応じて一層の内容の充実と利便性の向上に取り組む。

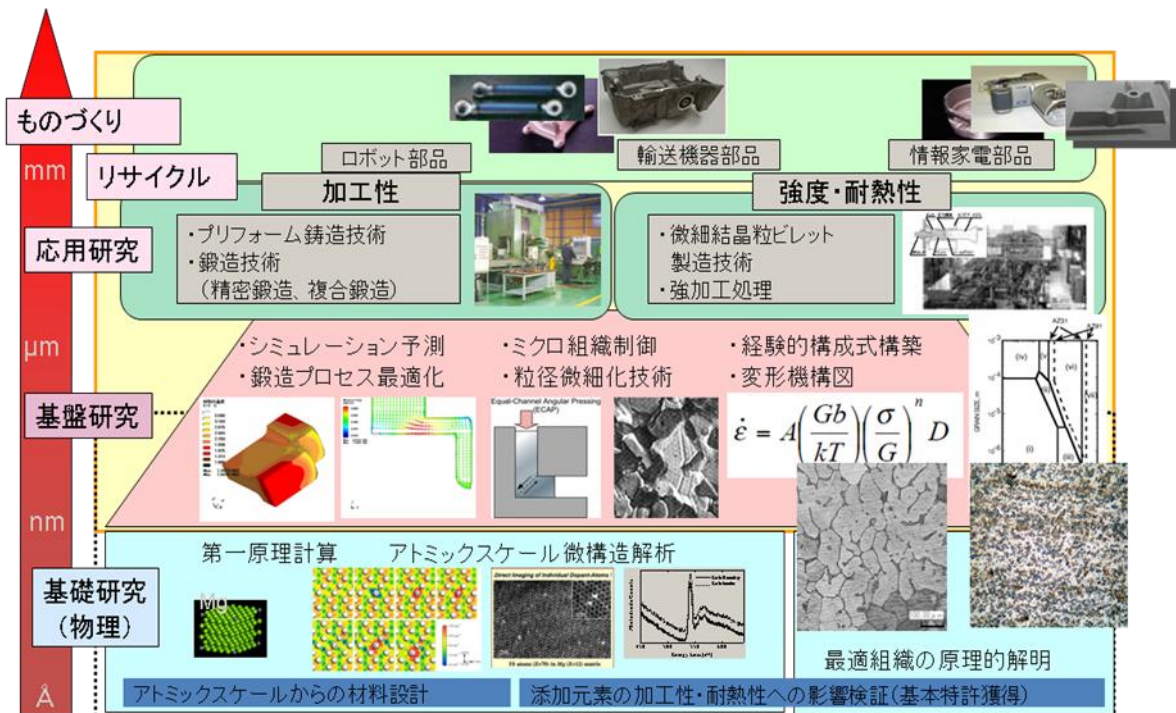
図 II. 4-1 中間評価の実施と対応

### Ⅲ. 研究開発成果について

#### 1. 事業全体の成果

##### 1. 1 事業全体の成果の概要

本プロジェクトは、図Ⅲ.1.1-1に示すように、基礎研究から始まって基盤研究、応用研究までを委託事業として実施し、これらの成果をものづくり研究開発の助成事業につなげる階層的体系になっている(図Ⅲ.1.1-2も参照)。



図Ⅲ.1.1-1 事業の階層的全体像

成果については、研究項目毎に成果をⅢ.2で詳述するが、各課題とも最終目標を達成できたものとする。ここではこれまでの成果の概略を述べる。

委託研究では、マグネシウム特有の室温特性、高温特性を活かし、原子レベルからのマルチスケールによる鍛造素材の添加元素選択、組織制御を最適化し、鍛造素材組織、鍛造部材特性及び鍛造加工性との関係を明らかにした。また、鍛造素材の初期組織及び鍛造工程の最適化により実用化に必要な材料特性を達成した。その実施例として、低コスト鍛造用素材として有望な小径連続鍛造材(AZ91+Ca)を対象とし、速度制御可能なサーボプレス機を用いて、低温度(300℃以下)で試作鍛造を行い、動的再結晶発現下における結晶粒微細化を具現化して、鍛造の利点である加工鍛錬による部品の機械的性質の向上を実現した。さらに、リサイクル技術においても、固体リサイクル実現のための研究要素を最適化し、安全で環境に優しいリサイクルシステムとリサイクル材の高性能化の同時達成を実現した。この結果、中間目標(最終目標と独立した目標)と最終目標及びそれを達成するための自主目標を達成した。

また、助成事業では、委託事業で得られた基礎・基盤技術をベースに、各社の既存

設備および技術を活用しつつ、実用・事業化のための開発を行い、各社の最終目標およびそれを達成するための自主目標を達成した。

委託事業に係る各研究開発項目の成果概要は次のとおりである。

①低コスト素材である小径連続鍛造材を対象とし、サーボプレス機を使用して、低い鍛造温度（300℃）で試作鍛造を行い、動的再結晶発現条件下における結晶粒微細化を具現化して、鍛造のメリットである加工鍛錬による部品の機械的特性向上を実現した。また、鍛造工程の選択をより普遍化するためのデータベースを構築し、公開した。

②鍛造工程での結晶粒微細化（動的再結晶）及びその結果としての高強度化（ホールペッチ則）に及ぼす積層欠陥エネルギー（第一原理計算）、初期粒径、第二相粒子の役割を明らかにした。その結果、鍛造素材の添加元素選択、組織制御を最適化することができた。また、それらの素材を用いて、鍛造後の機械的性質の目標値を達成した。

③過熱水蒸気を用いて、切削粉の表面付着炭素量 0.1%以下を達成できる工業的プロセスを構築し、その各工程及び材料因子（混入物寸法、結晶粒径）を最適化した結果、室温において押出し材と同等以上の特性を有する固体リサイクル材を作製できた。また、放電電極を用いた着火式試験により、爆発下限濃度、最小着火エネルギー、最低発火温度等にたいするマグネシウム粉の粒度、濃度の影響を明らかにした。マグネシウム取り扱いに関する安全性を確保した。

また、委託研究、実用化研究における最終目標の達成度を、表Ⅲ.1.1-1、表Ⅲ.1.1-2 にまとめるとともに、成果指標を表Ⅲ.1.1-3 にまとめる。

表Ⅲ.1.1-1 委託研究における最終目標の達成度

項目	達成度	判定基準・判定根拠など
事業全体	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>・コスト低減を促進できる小径連続鍛造材(AZ91+1wt%Ca)において、鍛造部材の機械的性質の最終目標値を達成できた。(世界初)</li> <li>・環境に優しい表面清浄処理を最適化した切削粉を用いた固体リサイクル材において、機械的性質の最終目標値を達成した。</li> </ul>
①マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モデル鍛造部品の微細組織及び機械的性質に関するデータベースを構築した。</li> <li>・世界で初めてサーボプレスを使用したマグネシウム鍛造プロセスを構築し、最終目標値を達成した(世界初)。</li> <li>・モデル鍛造用素材の組織・機械的性質などのデータを収集し、データベース化した。</li> </ul>
②マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構との関連性の解明	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・合金元素が素材の鍛造加工性、鍛造組織及び耐熱性に及ぼす効果を世界で初めて原子レベルから明らかにした。(世界初)</li> <li>・鍛造用素材のミクロ組織と機械的性質との関係を定量化した。</li> <li>・世界で初めて第二相粒子の寸法、体積率が動的組織変化(動的再結晶、動的析出)及び高温変形特性に及ぼす影響を明らかにした。(世界初)</li> </ul>
③マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>・中間目標値の表面付着炭素量0.1%以下を達成し、過熱水蒸気を用いた表面清浄化システムを世界で初めて構築した。(世界初)</li> <li>・マグネシウムの基礎的な粉塵爆発特性、爆発要因を解明し、安全性確保の指針を得た。(国際標準化に資する)</li> <li>・固体リサイクル材の塑性加工性に関する最終目標値(断面減少率)を達成し、鍛造加工に必要な断面率での健全な成形を世界で初めて実現した。(世界初)</li> <li>・安全処理技術の研究として、爆発災害防止ガイドラインを策定。</li> </ul>

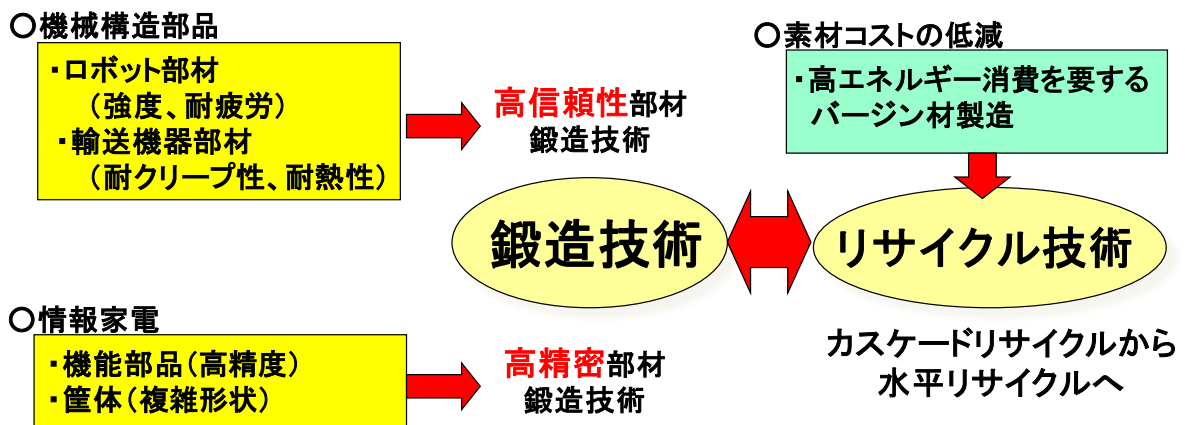
◎:最終目標を超えている ○:最終目標達成 ×:最終目標未達成

表Ⅲ. 1. 1-2 実用化研究における最終目標の達成度

項目	達成度	判定基準・判定根拠など
④マグネシウム合金の鍛造用ピレット調整技術開発	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>・断熱鑄型連続鑄造方法を考案・確立(世界初のMg小径ピレットの連続鑄造法)</li> <li>・結晶粒径 50μm達成, DAS 15μm以下達成、晶出物の微細・均一分散化実現達成</li> <li>・量産化に向けた基本的な鑄造技術確立に目処をつけた(三協マテリアル)</li> </ul>
⑤マグネシウム合金の鍛造部材開発(輸送用機器、ロボット)	◎	<ul style="list-style-type: none"> <li>・引張強度349MPa、伸び24.8%、疲労強度170MPaを有する実用レベルのMg部材を開発(菊水フォーシング)</li> <li>・現行のアルミ材(A6061)を凌駕する、引張強度370MPa、疲労強度170MPa、鍛造制度±0.01mmを有する実用レベルのMg部材を開発。また鍛造工法の工程簡略化も実現(宮本工業)</li> <li>・残存トルク6400N(AI合金の80%)を大幅にクリアし、AI合金並みの残存トルクを有する部材の開発を実現。200℃での引張強さ180MPa以上で疲労寿命(疲労限度強度ベース)2倍の部材を開発。エンジン周辺部材として3点を試作。(三井金属)</li> </ul>
⑥マグネシウム合金の鍛造部材開発(情報家電用機器)	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・曲げ加工、ボス、リブ加工などの複雑形状を実現。実用部材として携帯電話ケースの試作を実現。(三井金属)</li> <li>・高さ3.05mmのボス・リブ成型技術、携帯部品サイズで板厚0.18mmの薄板鍛造技術を開発。平坦度0.1/40nm以下を実現。また、高い再現性を有する鍛造シミュレーション解析技術の開発に成功(カサタニ)</li> </ul>
⑦マグネシウム合金のリサイクルに係る技術開発	○	<ul style="list-style-type: none"> <li>・工場内スクラップ(切削屑、切削切粉、端材スクラップ)の連続処理方式において、表面付着物除去(残留炭素0.1%)を達成。塗装品関しても、容易に剥離が可能な状態を確認。マグネシウムを連続処理できる装置を実現。</li> <li>・過熱水蒸気循環によるリサイクル処理システムにおいて、原料比と同等程度まで過熱水蒸気量を低減させ、水使用量の17%削減、エネルギー効率として10%向上を確認。品位状態としてもリサイクルに問題ないシステムであることを確認。(タナベ)</li> </ul>

◎:最終目標を超えている ○:最終目標達成 ×:最終目標未達成





## 共通基盤技術

### 1) 鍛造技術 (鍛造温度の低下による高性能化: 高強度・高靱性) (高信頼性)

#### 学術的な知見

- 変形機構の結晶粒依存性
- 微細結晶粒AZ31の高延性 (非底面滑りの発現)
- 動的再結晶化による 低温/高速超塑性の発現
- 第二相分散系による 高強度・高延性の両立

マグネシウム 鍛造技術

マグネシウム 鍛造部材・部品の評価

初期組織と鍛造特性の 関係解明 (変形(鍛造)加工マップの整備) 鍛造後の 組織と特性の関係解明

### 2) リサイクル技術 (カスケードリサイクルから水平リサイクルへ)

#### 学術的な知見

- 合金純度と耐食性
- 新規リサイクル技術

リサイクル技術の 高度化による 素材コストの低減

- ・市中スクラップの 低コスト高品位化
- ・未利用廃材 (研削屑)の資源化
- ・安全性の確保

図Ⅲ.1.1-2 市場ニーズと開発技術、および共通基盤技術の概要

表Ⅲ. 1. 1-3 成果の普及(成果指標まとめ)

	H18	H19	H20	H21	H22	計
特許出願	5	3	9	2	1	20件
論文(査読付き)	5	9	3	10	16	43件
研究発表・講演	7	18	30	41	54	150件
受賞実績	0	1	0	3	8	12件
展示会への出展	0	2	4	13	15	34件

## 1. 2 各研究開発項目の成果の概要

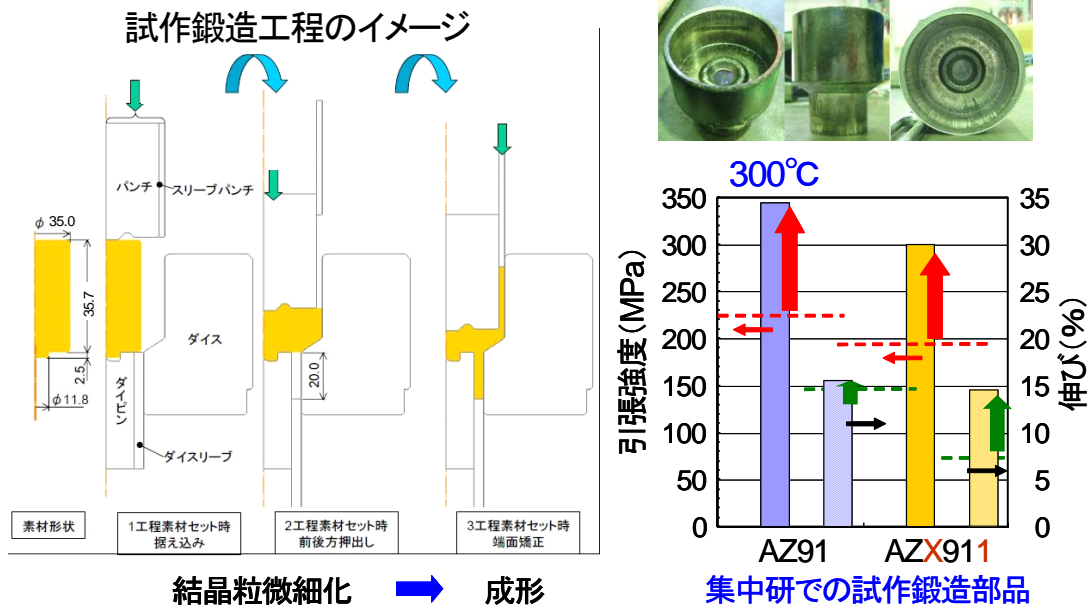
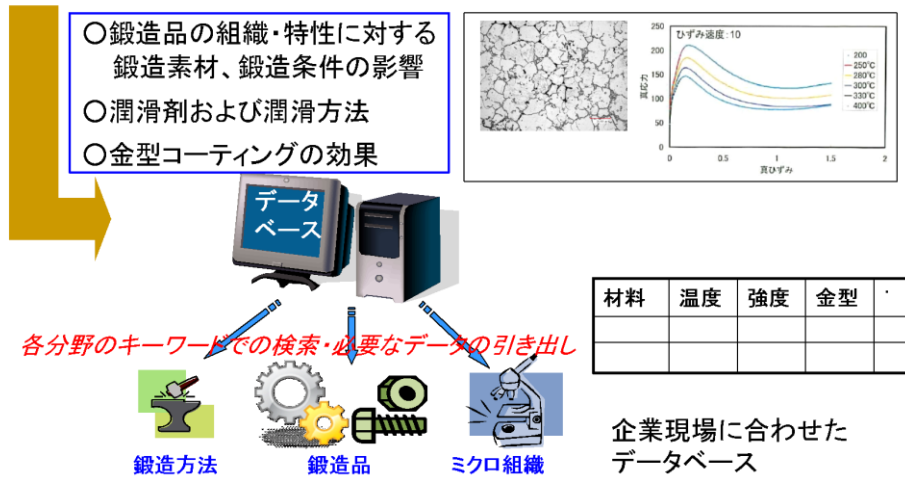
各研究開発項目の成果概要を図Ⅲ. 1. 2-1～7 に示す。詳細は次章に譲る。

### ①マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積

委託事業

集中研での研究成果を企業で実施する助成事業で活用するために、データベースを構築する。

鍛造素材、鍛造部材の組織・機械的特性などを、鍛造条件・熱処理条件などと関連付けて整理する。

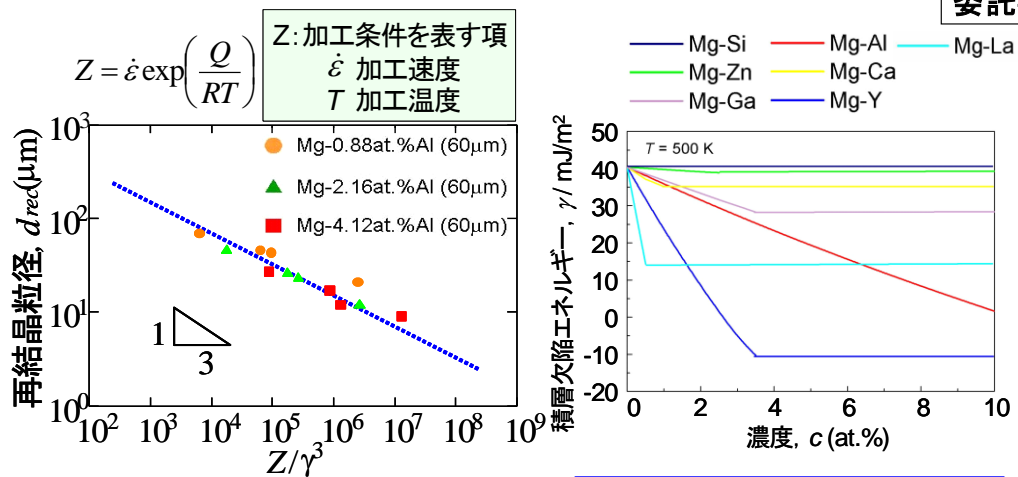


低コストの素材である連続鍛造材を対象とし、サーボプレスを使用して試作鍛造を行い、鍛造のメリットである成形による部品の機械的特性向上を実現した。

図Ⅲ. 1. 2-1 研究開発項目①の主な研究開発成果

②マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構との関連性の解明

委託事業



積層欠陥エネルギーの低下により結晶粒微細化の可能性がある

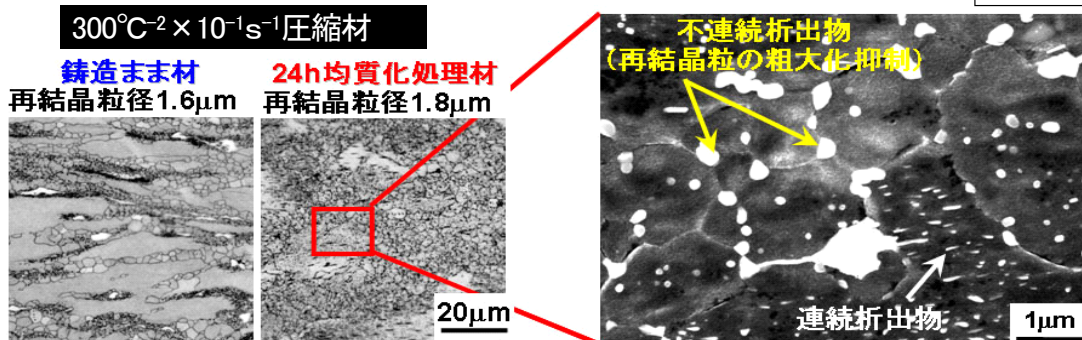
希土類元素の微量添加、Al添加量の増加により積層欠陥エネルギー低下  
→ 合金組成提言への基礎的知見

積層欠陥エネルギーと再結晶粒径との関係を世界で初めて明らかにした。

積層欠陥エネルギーに対する合金元素の効果を世界で初めて系統的に明らかにした。

AZ91

委託事業



AZ91合金均質化処理材を動的析出が生じるような低温で変形すると、結晶粒界に動的析出した微細な析出物が結晶粒の粗大化を抑制し、結晶粒は微細化する。

→ 動的析出物の制御が結晶粒微細化のポイントである。

第二相粒子の寸法、体積率が動的組織変化(動的再結晶、動的析出)及び高温変形特性に及ぼす影響を明らかにしたのは世界初の成果。

図Ⅲ. 1. 2-2 研究開発項目②の主な研究開発成果

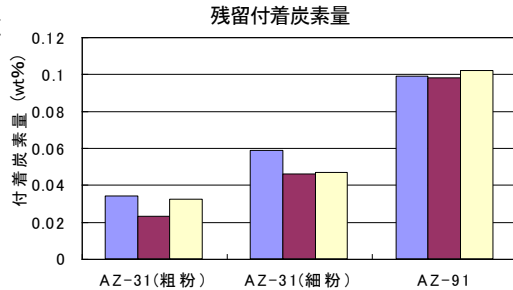
### ③マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出

委託事業

#### 1) 過熱水蒸気を利用したマグネシウム表面付着物除去技術開発

切削油剤などを多く含むため現在未利用となっている、マグネシウム切削粉の再資源化を可能とする、安全かつ低コスト型不純物除去技術の開発に成功

過熱水蒸気利用表面付着物除去装置



再溶解時における発煙などの作業環境の悪化や歩留まり低下の問題解決に貢献

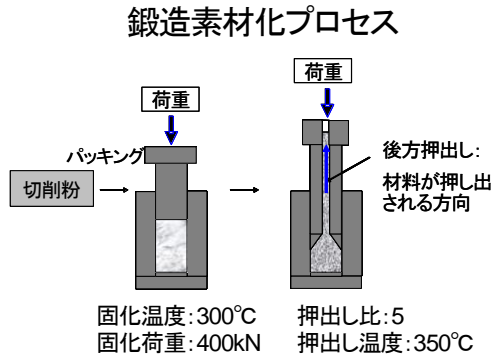
残留付着炭素量0.1wt%以下を実現

↓  
固体リサイクル原料として活用可能

#### 2) 固体リサイクルによるマグネシウム切削粉(AZ31)の鍛造素材化

再溶解を必要とせず、切削粉から直接鍛造素材を作製可能な、省エネルギー型固体リサイクル技術の開発に成功

室温圧縮試験結果



	破壊強度 $\sigma_F$ /MPa	破壊ひずみ
AZ31押し出し材	272	0.35
過熱水蒸気処理スクラップ材から製造した素材	282	0.33
ドライ切削粉から製造した素材	300	0.43

低コスト、高性能鍛造素材の供給に貢献

リサイクル材の特性は押し出し材と同等以上

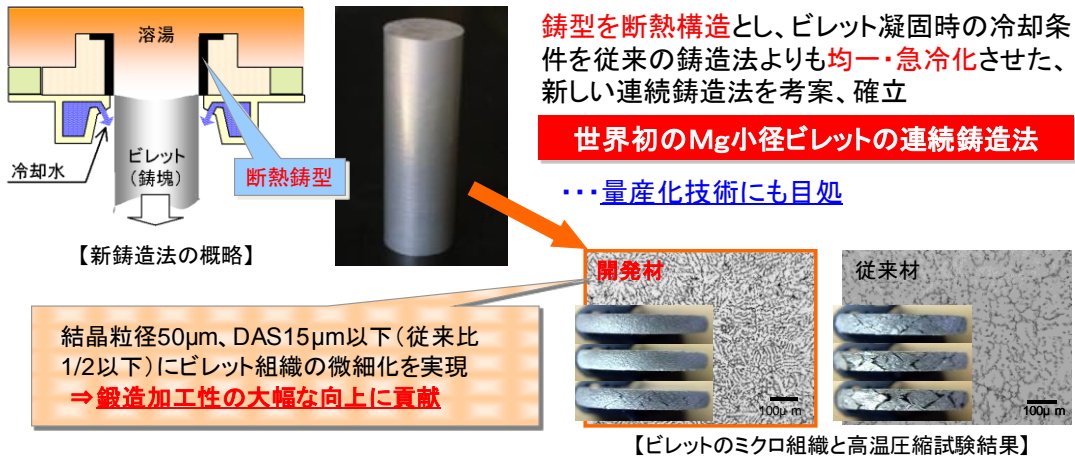
さらに、安全性の目安として『爆発災害防止対策ガイドライン』を策定

図Ⅲ.1.2-3 研究開発項目③の主な研究開発成果

#### ④マグネシウム合金の鍛造用ビレット調整技術開発

助成事業

直接鍛造に供し得るマグネシウム鍛造用小径ビレットの実用化技術を開発



### 高品質、押出レスによる低コストなMg合金鍛造用素材の供給体制を構築

図Ⅲ.1.2-4 研究開発項目④の主な研究開発成果

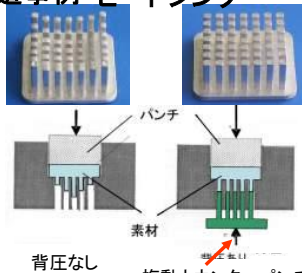
#### ⑤マグネシウム合金の鍛造部材開発(輸送用機器、ロボット)

助成事業

サーボプレスによる新鍛造法の開発:

一工程内で動的再結晶による結晶粒微細化と複動鍛造による複雑形状品の省工程鍛造工法を開発(業界初:材料改質と複動鍛造による省工程鍛造)

鍛造事例 ヒートシンク



特徴:フィン高さが均一  
加工が不要,低コスト

鉄道車両用コネクター



特徴:従来3工程→一工程鍛造  
低コスト、高機能

「サーボプレスで動的再結晶+複動鍛造で一工程鍛造」のメリット

	従来法	開発工法
特徴	フィン高さ不均一	フィン高さ均一
工程	1工程	1工程
精度	±2mm	±0.05mm

	従来法	開発工法
特徴	不良率高い	製品歩留まり良好
工程	3工程	1工程
精度	±0.7mm	±0.02mm

### ユーザーズに沿った高機能・低コスト鍛造部材の供給が実現(事業化達成2部品)

図Ⅲ.1.2-5 研究開発項目⑤の主な研究開発成果

⑥マグネシウム合金の鍛造部材開発 (情報家電用機器)

助成事業

**板材から鍛造・プレス加工技術の確立**

**ダイカスト材から鍛造・プレス加工技術の確立**

ダイカスト材(加工前)

ダイカスト材(加工後)

携帯電話内装部品 (加工後)

ボス 径φ 3.5mm  
高さ 2.5mm  
テーパ 1°

リブ 幅 0.8mm  
高さ 2.4mm  
テーパ 3°

ノートパソコン筐体部品 (加工後)

独自の潤滑剤開発

プレスでは作れないボス・リブ形状の加工技術を確立

メリット(成果)

- ・ボス・リブ成形性向上
- ・材料費削減
- ・金型寿命UP
- ・材料歩留まりUP
- ・材料調達自由度UP
- ・設備費の削減

ダイカスト材から、板材からともに、プレスでは作れないボス・リブ形状の加工技術を確立

図 III. 1. 2-6 研究開発項目⑥の主な研究開発成果

⑦マグネシウム合金のリサイクルに係る技術開発

助成事業

＜基盤技術研究装置＞
＜助成事業研究開発装置＞

**切粉処理装置**

委託事業ラボ機

助成事業 切粉処理装置

工場内スクラップ(切削屑、切削切粉、端材スクラップ)の連続処理方式において、表面付着物除去(残留炭素0.1%)を達成。

**端材処理装置**

従来簡易試験機

助成事業 端材処理装置

・過熱水蒸気循環によるリサイクル処理システムにおいて、原料比と同等程度まで過熱水蒸気量を低減。品位状態としてもリサイクルに問題ないシステムであることを確認。

共通基盤技術研究の成果を活用し、独自改良を加えることで小プラント構築技術完成

図 III. 1. 2-7 研究開発項目⑦の主な研究開発成果

### 1. 3 成果の意義

安価な小径連続鍛造材を出発材とし、マグネシウムの本性である動的な再結晶と析出挙動を最適化することで、高度な鍛造技術を世界に先駆けて開発した。

また、リサイクル材を用いた固体リサイクル技術の可能性を明示し、その具現化のための過熱水蒸気による表面前処理技術を構築した。さらに、マグネシウムに関する取り扱い安全性の標準化に目処を立てることができた。

最後に、鍛造マップをデータベース化し、マグネシウム鍛造に取り組み易い環境を構築した。

これらにより、

- ・マグネシウム鍛造の基本的構成技術を開発し、その礎を構築できた
  - ・今後、マグネシウム鍛造品を実用化、あるいは事業化に大いに貢献できる
- といえる。



## 2. 研究開発項目毎の成果

### 2. 1 研究開発項目①「マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積」

本研究開発項目の目的は、現状のマグネシウムビレット等を材料として創製したマグネシウム合金の鍛造部材を評価・解析し、その問題点を抽出して技術課題を明らかにし、それを解決するための方法を確立することである。図2. 1-1に、研究開発の全体概要を示す。

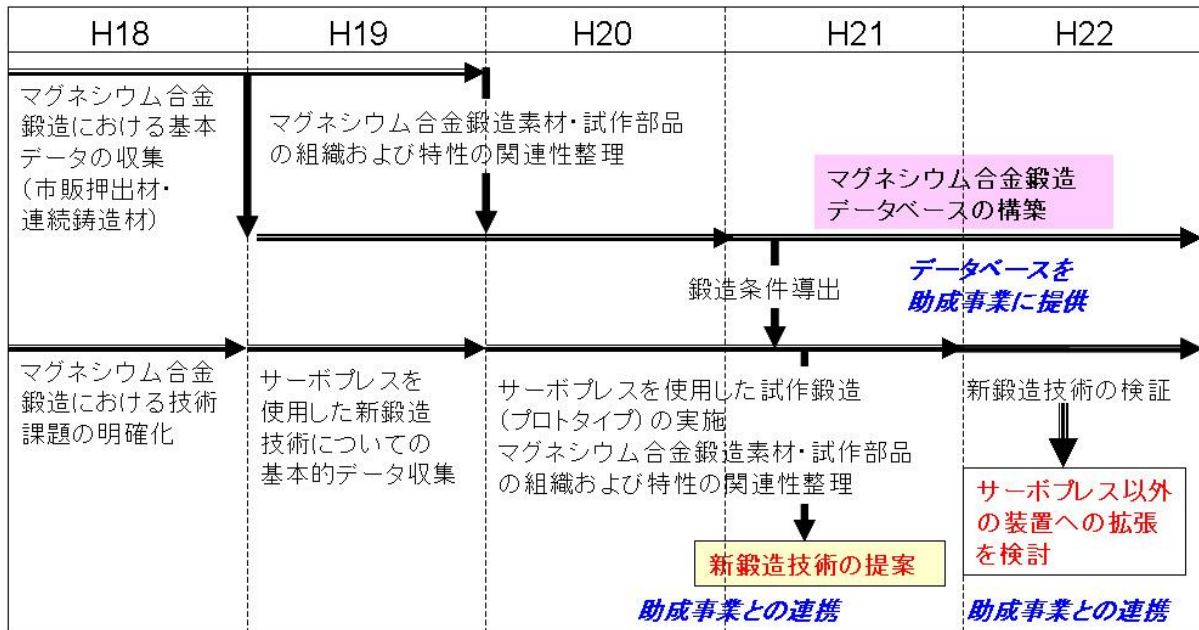


図2. 1-1 研究開発の全体概要

「最終目標」は、「鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部品特性の関連性を整理し、鍛造部材の評価方法を確立する」と設定している。目標達成のため、次の課題について研究開発を行なった。

- ① - (1) モデル鍛造部品の微構造評価・解析
- ① - (2) モデル鍛造部品の特性評価・解析
- ① - (3) マグネシウム合金連続鍛造材を対象とした鍛造技術の構築
- ① - (4) マグネシウム合金鍛造部材の評価方法の確立
- ① - (5) 鍛造データベースの構築
- ① - (6) マグネシウム合金の素材、鍛造技術、周辺技術に関する基本情報

#### 2. 1. 1 モデル鍛造部品の微構造評価・解析 (研究開発項目① - (1))

本研究課題では、平成18年度および19年度に試作したモデル鍛造部品に関して、鍛造性評価の基本となる微構造(微細組織)に関するデータ収集を行ない、マグネシウム合金鍛造技術の技術課題の現状を検討した。

対象とした材料は、現在展伸材として市場で流通しているマグネシウム合金素材、AZ61押出材、AZ80押出材、ZK60押出材それに新しく開発されたACM522ダイカスト材である。

それらモデル鍛造に使用した素材の化学組成を表 2. 1. 1-1 に示す。図 2. 1. 1-1 はモデル鍛造部品の外観写真である。写真上左からロボット用ヨーク、自転車用クラウン、スピンドルハブ、下がスプールである。これらのモデル鍛造部品に関して、割れや欠肉など部品の健全性を調べるための外観観察、鍛造時の材料の塑性流動を調べるための鍛流線観察、結晶粒径や第二相粒子の状態を調べるための微細組織観察を行なった。表 2. 1. 1-2 はモデル鍛造部品の外観観察結果のまとめである。この中から代表的な結果を次に示す。図 2. 1. 1-2 は AZ80 押出材を素材とし、250℃で鍛造を行なったクラウンの外観写真である。写真で赤の印をつけた部分に割れなどの欠陥が見られた。それに対して図 2. 1. 1-3 は AZ80 押出材を素材とし、400℃で鍛造を行なったクラウンの外観写真である。250℃で鍛造を行なった場合と比べて、部材表面の欠陥は少なくなっていた。

表 2. 1. 1-1 モデル鍛造に使用した素材の化学組成 (mass%)

	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Zr	Ca	RE
<b>AZ61</b>	6.09	0.79	0.25	0.005	0.010	0.0012	0.0008			
<b>AZ80</b>	8.28	0.52	0.27	0.005	0.014	0.0008	0.0008			
<b>ZK60</b>	<0.001	4.75	0.008	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002	0.633		
<b>ACM 522</b>	5.3		0.17			<0.001	<0.001		2.0	2.6
<b>AZ91</b>	8.7	0.81	0.21	0.004	0.005	<0.002	0.002		0.002	
<b>AZX 911</b>	8.9	0.84	0.18	0.003	0.007	<0.002	<0.002		0.86	



図 2. 1. 1-1 モデル鍛造品の外観

表 2. 1. 1-2 モデル鍛造品の外観観察のまとめ

材料	メーカー	試作品	鍛造温度					
			金型温度	250℃	300℃	350℃	400℃	420℃
AZ61	菊水	クラウン	150℃	×	×	○	○	
			300℃	×	○	○	○	
	奥村	ヨーク(ロボット 部品)	150℃	□小	□小	□小	○	
			300℃	□小	□小	○	○	
宮本	スプール及びスピンドルハブ	150℃(実測)			△		○	
AZ80	菊水	クラウン	150℃	×	×	△	△	
			300℃	×	△	○	○	
	奥村	ヨーク(ロボット 部品)	150℃	□中	□小	□小	□微小	
			300℃	□小	□小	□小		
宮本	スプール及びスピンドルハブ	150℃(実測)					○	
ZK60A	菊水	クラウン	150℃	○	○	○	○	
			300℃	○	○	○	○	
	奥村	ヨーク(ロボット 部品)	150℃	□小	□小	□微小		
			300℃	□小	□小	□微小		
宮本	スプール及びスピンドルハブ	150℃(実測)					○	
ACM522	菊水	クラウン	150℃	×	×	△	△	
			300℃	×	△	△	△	
	奥村	ヨーク(ロボット 部品)	150℃	□大	□中	□中	□小	
			300℃	□大	□中	□中		
宮本	スプール及びスピンドルハブ	150℃(実測)					□	
AM50	菊水	クラウン	150℃	×	×	△	△	
			300℃	×	△	△	△	
	奥村	ヨーク(ロボット 部品)	150℃		□中			
			300℃		□中			

×:割れ(中)  
 △:割れ(小)  
 ○:割れなし  
 □:欠肉-程度記載



図 2. 1. 1-2 クラウンの外観写真 (素材:AZ80, 材料温度:250℃, 型温度:150℃)



図2. 1. 1-3 クラウンの外観写真（素材:AZ61, 材料温度:400℃, 型温度:150℃）

図2. 1. 1-4は、AZ80 押出材を素材とし、250℃で鍛造を行なったクラウンの鍛流線を観察した結果である。鍛造温度が低いために、部材内部に材料が流動していない領域やクラックが観察された。一方、図2. 1. 1-5は AZ80 押出材を素材とし、400℃で鍛造を行なったクラウンの鍛流線を観察した結果である。鍛造温度が 250℃の場合に比べて比較的均一に材料が流動していることが分かる。この結果から、鍛造温度が 400℃の場合は比較的均一に材料が塑性流動するため、鍛造部材に欠陥が余り生じないと考えられる。

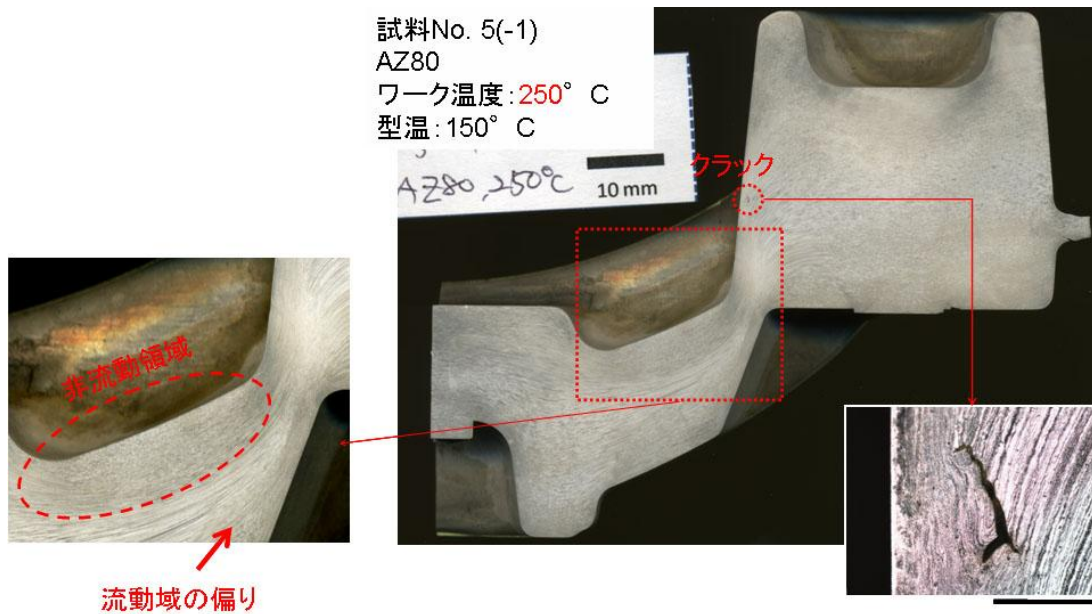
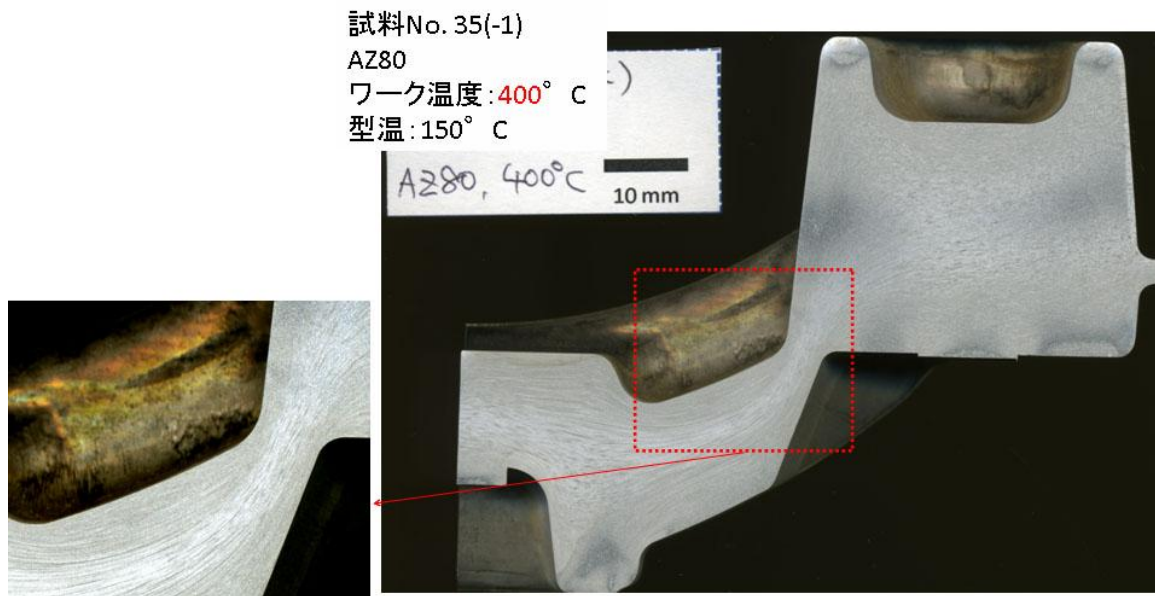


図2. 1. 1-4 クラウンの鍛流線観察結果（素材:AZ80, 材料温度:250℃, 型温度:150℃）



比較的均一な流動域

図2. 1. 1-5 クラウンの鍛流線観察結果(素材:AZ80, 材料温度:400°C, 型温度:150°C)

図2. 1. 1-6は、AZ80 押出材を素材として鍛造を行なったクラウンの微細組織観察結果である。鍛造温度は 250°C、300°Cおよび 400°Cである。組織観察場所としては、最も強く変形を受けたと考えられる部分を選択した。鍛造温度 250°Cの場合は、動的再結晶が生じて結晶粒径は数 $\mu$ mまで微細化していた。しかし鍛造温度が上昇すると結晶粒径も粗大化する傾向がある。このような傾向は、スプールでも見られた(図2. 1. 1-7)。また、高温圧縮試験後の試料で観察された未再結晶領域はモデル鍛造品では観察されなかった。このような鍛造部品の組織と特性の関係については、2. 1. 2 モデル鍛造部品の特性評価・解析で検討する。

以上の結果は、AZ80 押出材を素材として鍛造したクラウンの場合であるが、他の素材やモデル鍛造品の場合も、ほぼ同様の結果が得られた。

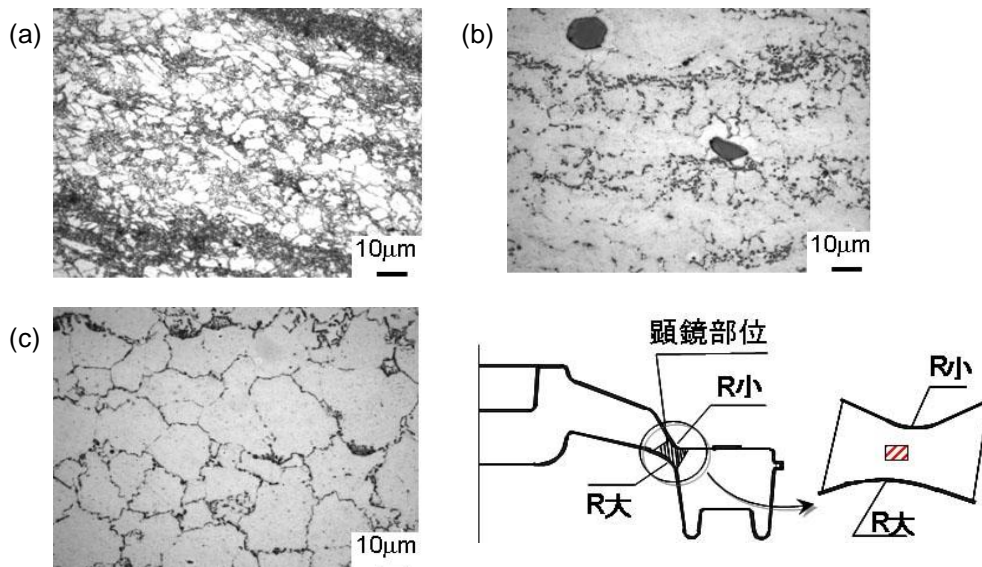


図2. 1. 1-6 クラウンの微細組織観察結果(素材:AZ80) (a)材料温度 250°C、(b)材料温度 300°C、(c)材料温度 400°C、型温度はすべて 150°C

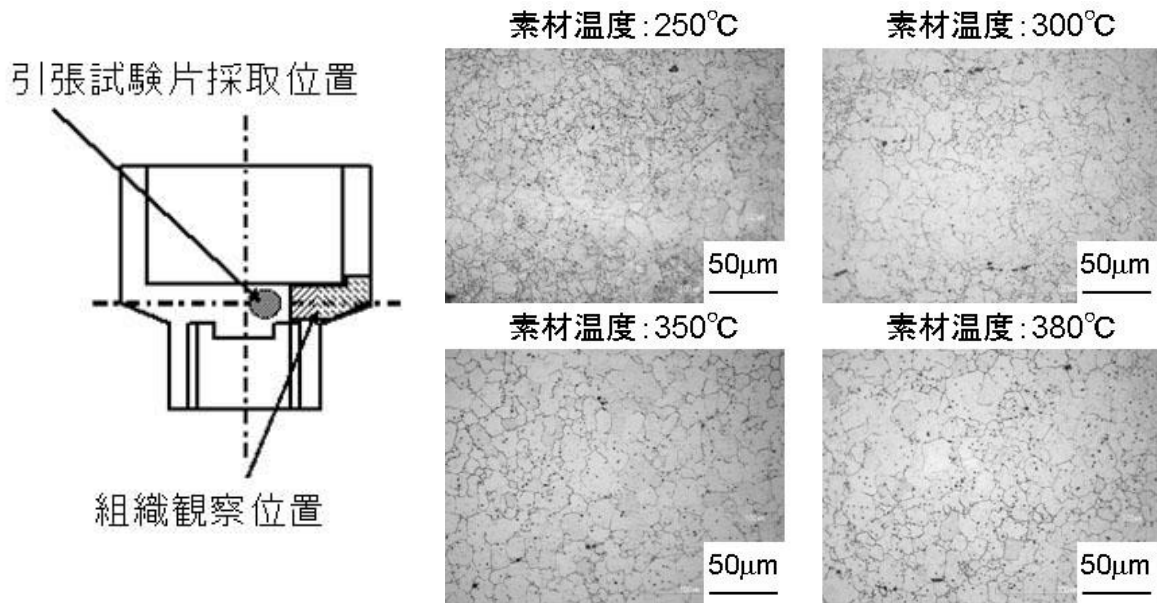


図 2. 1. 1-7 スプールの微細組織観察結果（素材:AZ80）。(a)材料温度 250°C、(b)材料温度 300°C、(c)材料温度 350°C、(d)材料温度 380°C、型温度はすべて 150°C

### 2. 1. 2 モデル鍛造部品の特性評価・解析（研究開発項目①-（2））

本研究課題では、平成 18 年度および 19 年度に試作したモデル鍛造部品に関して、鍛造性評価の基本となる機械的特性に関するデータ収集を行なった。

図 2. 1. 2-1 は AZ80 を素材として、250°C から 400°C で鍛造を行なったクラウンの室温引張試験片採取位置、図 2. 1. 2-2 は引張試験の結果である。図中の破線は素材の強度を示している。鍛造温度が 250°C の場合、部材の室温引張強度は 371MPa と素材の強度よりも向上した。しかし、鍛造温度が増加すると部材の強度も低下し、鍛造温度 400°C では部材強度が 326MPa と素材の強度と余り違いがなくなった。図 2. 1. 2-3 から図 2. 1. 2-5 に、AZ61 押出材、ZK60 押出材 ACM522 ダイカスト材を素材として、250°C から 400°C で鍛造を行なったクラウンの室温引張試験結果を示す。ある程度のばらつきはあるものの、室温引張特性と鍛造温度の関係は AZ80 押出材の場合とほぼ同様の傾向を示した。また他のモデル鍛造部品についても同様の特性評価・解析を行い、データを収集した。その結果を表 2. 1. 2-1 および表 2. 1. 2-2 に示す。引張強度についてはほぼ同様の傾向が得られたが、伸びについては、材料によるばらつきが大きい。これらの結果から、マグネシウム鍛造合金の鍛造に関する技術課題を抽出し、その解決法を検討した。それについては後述する。



図 2. 1. 2-1 引張試験片採取位置

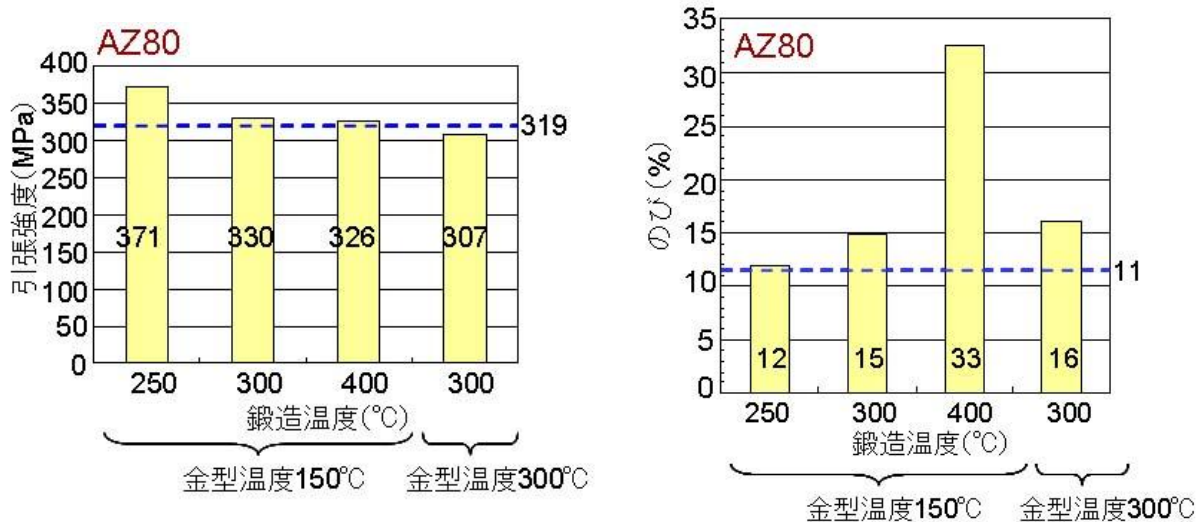


図 2. 1. 2-2 クラウンの室温引張試験結果 (AZ80)

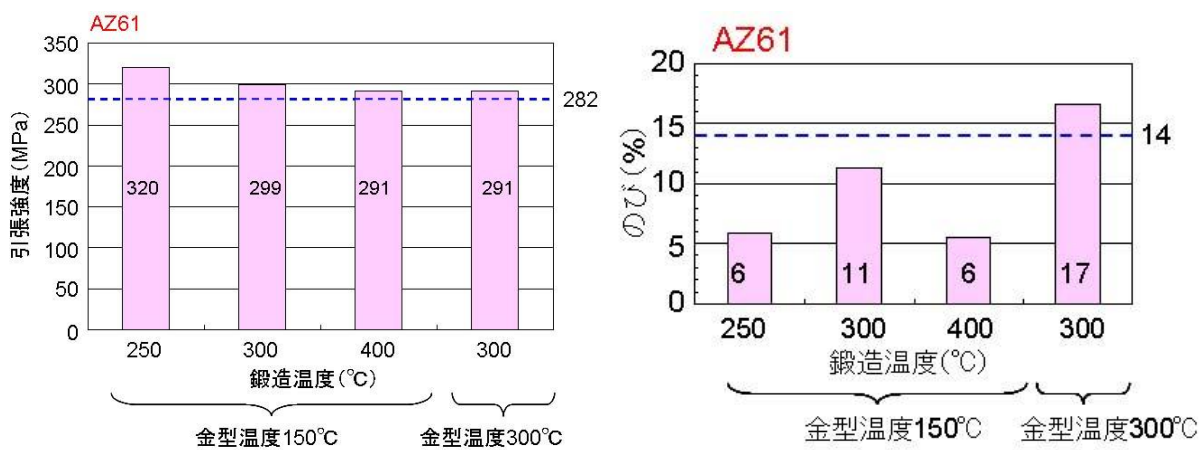


図 2. 1. 2-3 クラウンの室温引張試験結果 (AZ61)

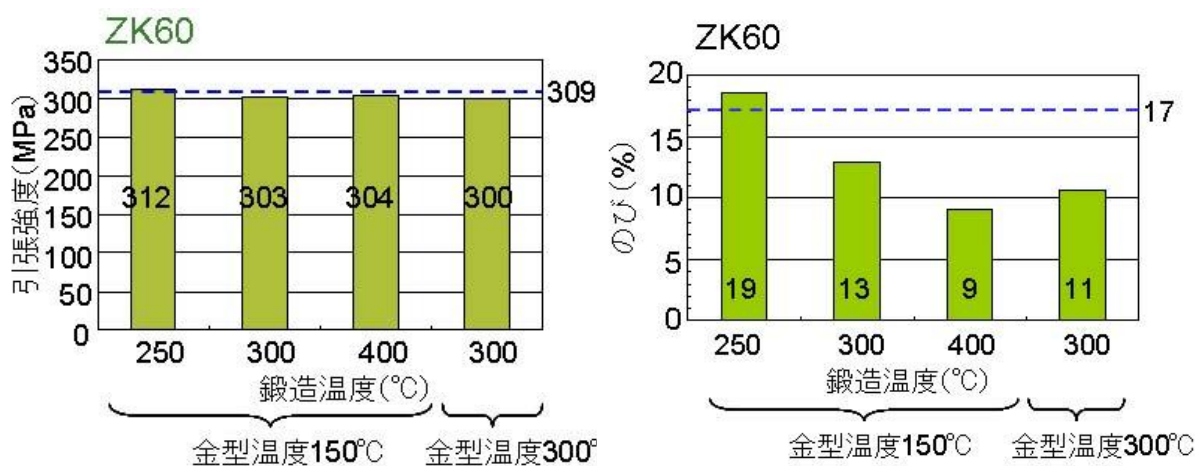


図 2. 1. 2-4 クラウンの室温引張試験結果 (ZK60)

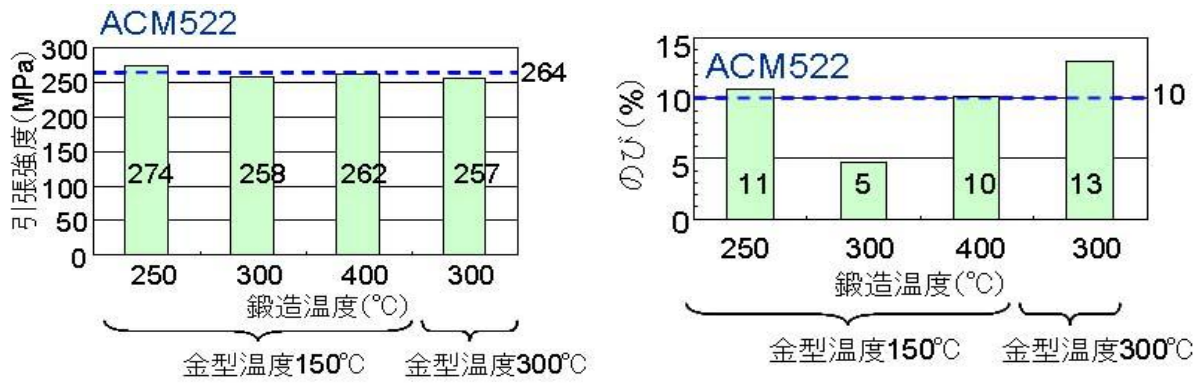


図 2. 1. 2-5 クラウンの室温引張試験結果 (ACM522)

表 2. 1. 2-1 スプールの室温引張試験結果

	スプール		素材の特性	
	素材温度 (°C)	金型温度 (°C)	強度 (MPa)	伸び (%)
AZ61	250	150	301	21
	300	150	293	21
	350	150	294	22.5
	380	150	290	23
	420	150	286	21.5
AZ80	250	150	308	8.5
	300	150	320	16.8
	350	150	312	20.3
	380	150	304	16.9
	420	150	312	22.1
ZK60	250	150	291	20.1
	300	150	283	22
	350	150	279	31
	380	150	281	27.2
	420	150	277	28.5
ACM522	350	150	146	0.45

表 2. 1. 2-2 ヨークの室温引張試験結果

	ヨーク		素材の特性	
	素材温度 (°C)	金型温度 (°C)	強度 (MPa)	伸び (%)
AZ61	250	280	275	17.6
	300	280	256	20.8
	350	280	257	21.6
	400	280	253	22.7
AZ80	250	280	303	15.5
	300	280	288	16.4
	350	280	286	17.9
	400	280	292	18.5
ZK60	250	280	254	15.1
	300	280	225	14
	350	280	249	14.9
	400	280	263	13.8



2. 1. 3 マグネシウム合金連続鋳造材を対象とした鍛造技術の構築  
(研究開発項目①- (3))



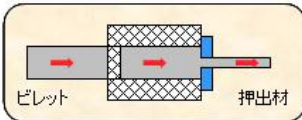

平成 18 年度および 19 年度に試作したモデル鍛造部品の評価結果をまとめると次のようになる。

マグネシウム合金を 400℃で鍛造すると欠陥のない部品が成形できる。しかし、部品の強度は素材のものとほぼ同じ、あるいは素材よりも低くなる。これは鍛造部品の結晶粒粗大化が原因であると考えられる。

鍛造温度が 250℃では、部品の強度は素材のものよりも高くなる場合もあった。これは鍛造部品の結晶粒微細化が原因であると考えられる。しかし鍛造温度が低いいためマグネシウム合金は塑性変形しにくく、鍛造部品には割れが生じる。

一方、モデル鍛造に用いたマグネシウム合金押出材は、強度や伸びなどの機械的性質の信頼性に優れた素材であるがコストが高い。またモデル鍛造部品の評価結果からは、鍛造による部品の機械的性質向上が余り見られないことが分かった。そのため、低コストの素材を鍛造に使用し、かつ鍛造のメリットである成形による部品の機械的特性向上を実現する鍛造技術開発が期待されている。そこで本研究課題では、表 2. 1. 3-1 に示すように押出材に比べて低コストであるマグネシウム合金連続鋳造材を対象とし、この素材をサーボプレスによる工程において改質し機械的特性向上を狙うことを試みた。すなわち、サーボプレスは鍛造プロセスと材料創製相互のフィードバックを実現する有力な手段となるものであり、この試みは素材と加工の水平連携の好例と位置付けられる。

表 2. 1. 3-1 押出材と連続鋳造材の比較

	現状 通常押出材製造工程	本研究開発 連続鋳造材製造工程
	 <p>押出装置</p>	 <p>連続鋳造装置</p>
	 <p>押出の模式図</p>	 <p>連続鋳造ビレットの例</p>
工程	(連続) 鋳造 ⇒ 均質化焼鈍 ⇒ 押出 ⇒ 鍛造	(連続) 鋳造 ⇒ 鍛造
コスト	現状で3000~5000円/kg	1000円/kgが目標
利点	既存設備の利用可能 サイズ、形状の自由度大 大量製造可能	・低コスト化可能(大量生産)
問題点	複雑な組織制御プロセス 高コスト(現状) 低降伏強度(低疲労限)	・ビレット径&合金系に制限あり(未トライ) ・粗大結晶粒径 ・低降伏強度(低疲労限)

プロジェクト基本計画にあるようにマグネシウム鍛造部材、例えばロボット用部品など

には室温での高強度、高疲労特性、高靱性などの特性が要求される。金属材料は Hall-Petch の関係<sup>1)</sup>で示されるように、一般的に結晶粒径が細かいほど室温での機械的特性は向上する。すなわち結晶粒微細化は、図 2. 1. 3-1 に示すようにマグネシウム合金鍛造部材の高強度化のための基本的な手法である<sup>2)</sup>。また一般的に金属材料は、図 2. 1. 3-2 に示すように結晶粒径が細かいほど室温でののびは増加し<sup>3) 4)</sup>、成形性も向上する。ただし図 2. 1. 3-3 に示すように強度とのびはトレードオフの関係にある<sup>2)</sup>ので、強度とのびのバランスの良い組織を作り込むことが重要である。一方、微細結晶粒材料を高温で変形させた場合に、低応力下で大きなのびを示すことがある。この現象を超塑性<sup>5)</sup>と呼ぶ。超塑性が発現すると、高温での材料の成形性は向上する。したがって、高信頼性マグネシウム合金鍛造部材作製のためのキーポイントは、鍛造素材の結晶粒微細化および鍛造部材の結晶粒微細化である。本研究では、鍛造素材および鍛造部材の結晶粒微細化を実現する鍛造プロセスを検討した。

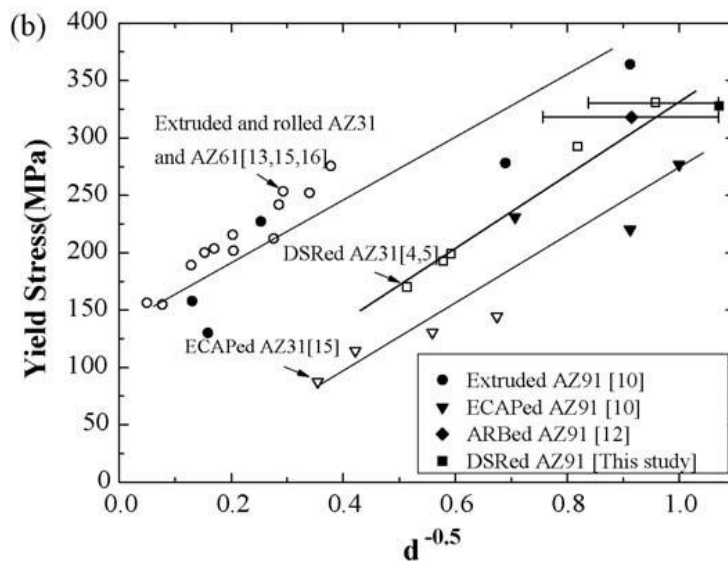


図 2. 1. 3-1 マグネシウム合金における強度と結晶粒径の関係<sup>2)</sup>

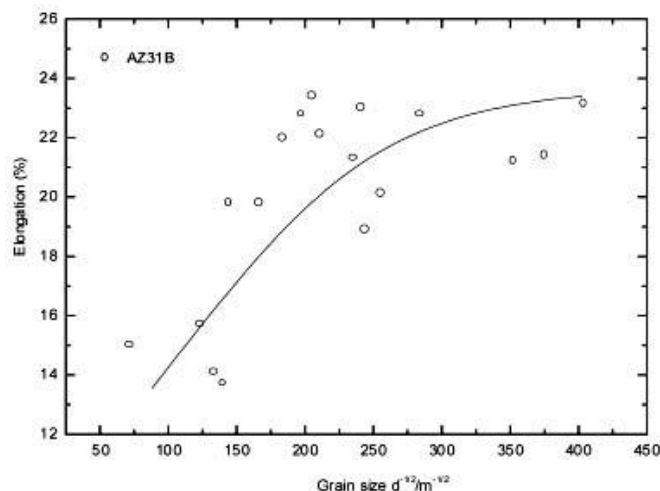


図 2. 1. 3-2 マグネシウム合金における結晶粒径と破断伸びの関係<sup>4)</sup>

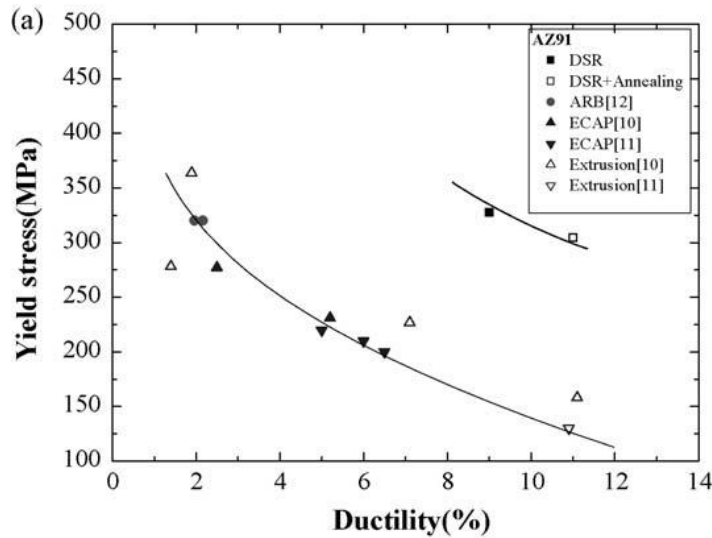


図2. 1. 3-3 マグネシウム合金における強度と伸びの関係<sup>2)</sup>

図2. 1. 3-4は、マグネシウム合金連続铸造材から高信頼性鍛造部材を作製するためのアプローチを示したものである。ここではまず鍛造素材に予備鍛造を施し動的再結晶<sup>6)</sup>を利用して素材の結晶粒を数 $\mu\text{m}$ まで微細化する。この結晶粒微細化素材は、結晶粒径が数 $\mu\text{m}$ と微細であるために粒界すべりが生じ、超塑性特性が発現する<sup>7)</sup>など加工性の向上や鍛造温度の低温化が期待される。この特性を引き出すための鍛造条件を明らかにするためには、素材の組織、高温圧縮特性、圧縮試験後の機械的特性などの基礎的知見が必要不可欠である。そのようなデータ取得のための研究開発は、研究開発項目②で実施しているが、図2. 1. 3-5に示すように、マグネシウム合金の動的再結晶粒径は温度や加工速度などに大きく依存する。したがって、本研究開発で検討している動的再結晶を最大限に活用した鍛造プロセスでは、鍛造条件の精密な制御が重要となる。そこで本研究開発では従来のメカプレスではなく、任意の位置でスライドの速度を任意に設定できるといった特徴を持つサーボプレスによる新規鍛造技術の開発を行なった。具体的には、鍛造プロセスにおける材料創製と成形の水平連携という観点から、前述した結晶粒微細化のための前鍛造・後鍛造（成形）を、サーボプレスにより一工程内で実施することを検討した。

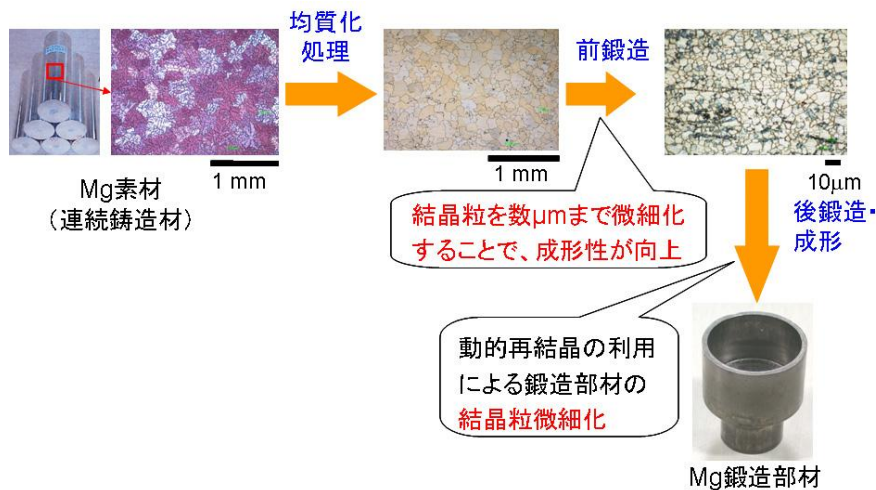


図2. 1. 3-4 新規鍛造方案の検討

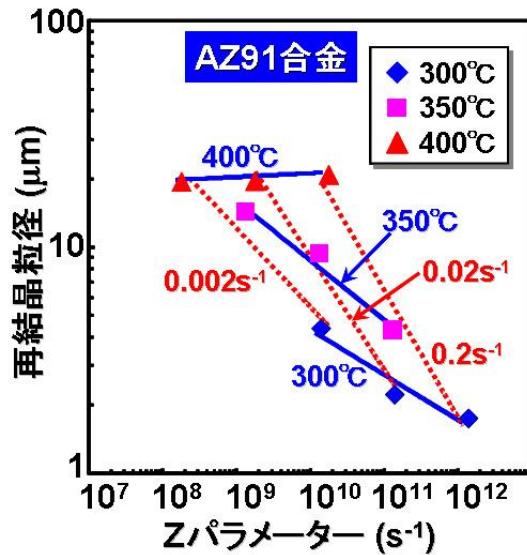


図2. 1. 3-5 高温圧縮試験後のAZ91マグネシウム合金（均質化処理材）の動的再結晶粒径のZパラメーター依存性（長岡技術科学大学の鎌土らによる）

図2. 1. 3-6はサーボプレスを使用した試作鍛造工程のイメージである。本工程では加熱した金型内で素材を据え込み加工することで結晶粒微細化を行い、その後に同じ金型内で前後方押出成形を行なう。この場合、結晶粒微細化と成形は同じ温度で行なわれる。また結晶粒微細化と成形を異なる加工速度で行なうことも可能である。

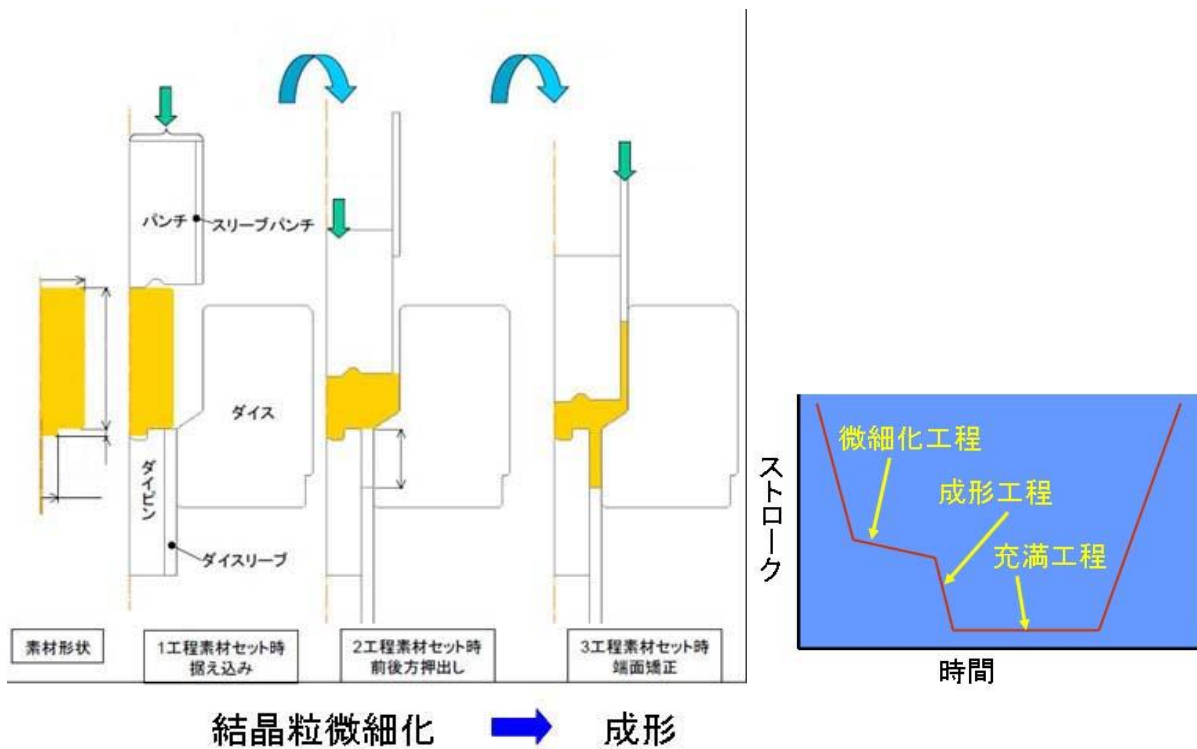


図2. 1. 3-6 サーボプレスを使用した試作鍛造のイメージ

図2. 1. 3-7に本研究開発で最初に試作した鍛造部材の外観を示す。本鍛造部材は

前後方押出加工および鍛造加工を含んだ、モデル鍛造部材（プロトタイプ）である。試作鍛造条件は、金型温度が 300°C、材料温度が 300°Cである。図 2. 1. 3-8 に、ブランク、結晶粒微細化材、鍛造部材の形状および寸法を示した。本研究では、結晶粒微細化と成形を同じ鍛造速度で行なった。



図 2. 1. 3-7 サーボプレスを使用したモデル鍛造部材の外観（鍛造温度 300°C）

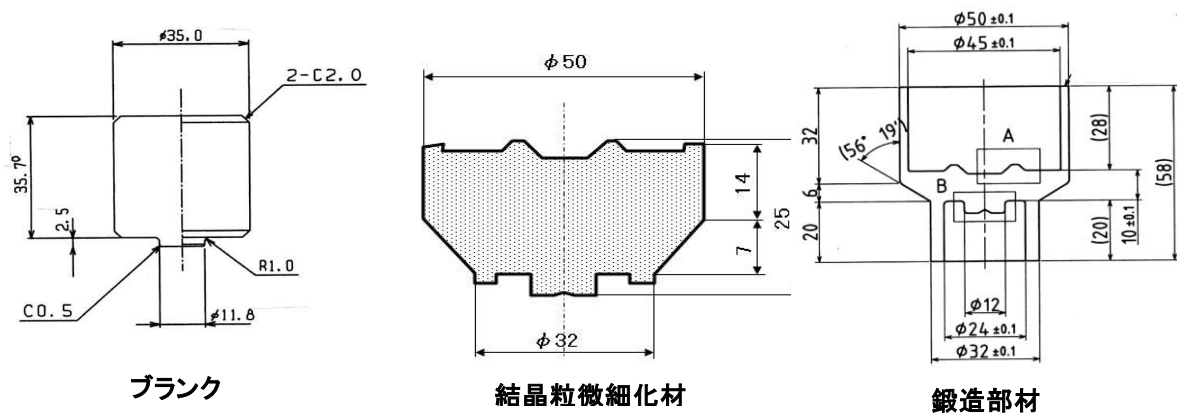


図 2. 1. 3-8 ブランク、結晶粒微細化材、鍛造部材の形状および寸法

図 2. 1. 3-9 は結晶粒微細化前後の、AZX911 連続鋳造材のマイクロ組織である。加工温度は 300°Cである。前鍛造によって鋳造組織が破壊されるとともに、動的再結晶によって結晶粒は 10 $\mu$ m 程度まで微細化した。図 2. 1. 3-10 は AZX911 モデル鍛造部材のマイクロ組織である。場所により加工度の違いに起因する組織の違いはあるが、概ね平均結晶粒径は 10 $\mu$ m であった。このように本鍛造プロセスでは鍛造素材および鍛造部材の結晶粒微細化を実現することが出来た。

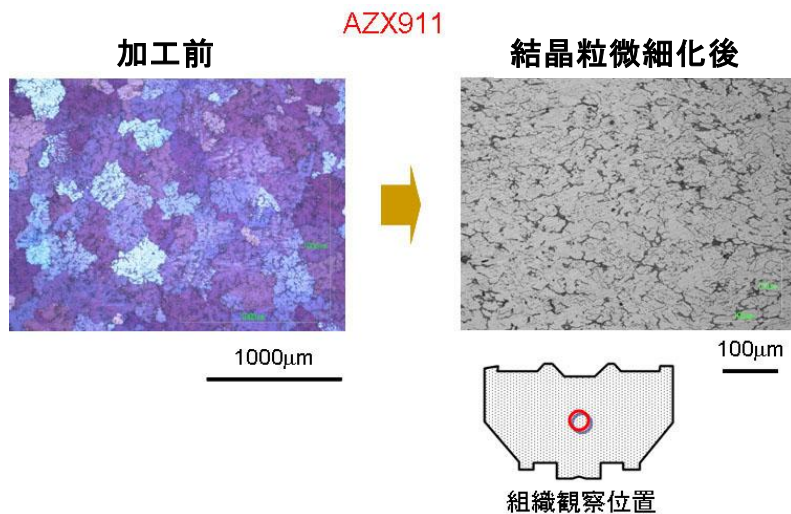


図 2. 1. 3-9 結晶粒微細化前後の AZX911 連続鋳造材のマイクロ組織

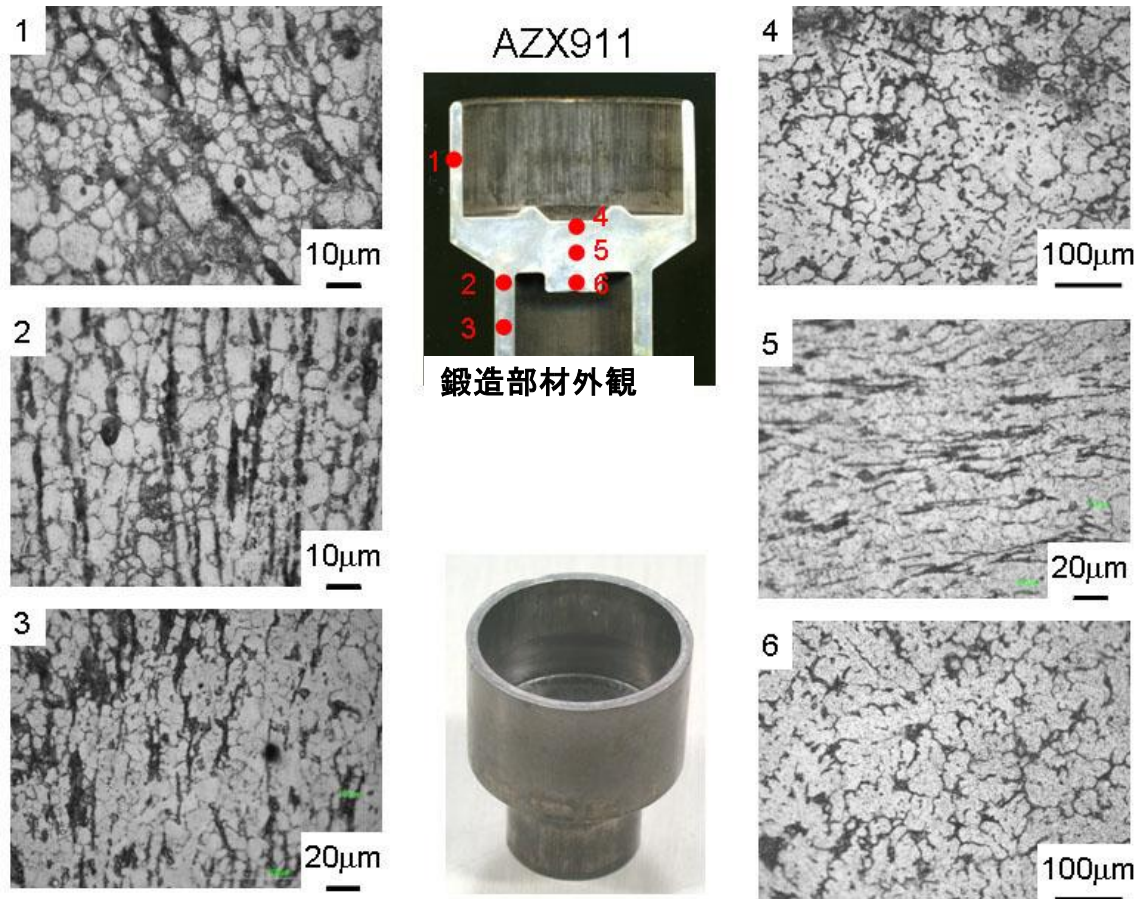


図2. 1. 3-10 AZX911 モデル鍛造部材のマイクロ組織

図2. 1. 3-11(a)(b)は、モデル鍛造部材の室温引張特性である。鍛造速度を変えた場合のモデル鍛造部材について試験を行なったが、強度の鍛造速度依存性は観察されなかった。また注目すべきなのは、鍛造部材の強度（300MPa）が素材の強度（195MPa）よりもほぼ 1.5 倍に向上していることである。すなわち本研究開発で提案した鍛造プロセスでは、低コストの素材であるマグネシウム合金連続铸造材に対して、鍛造のメリットである成形による部材の機械的特性向上を実現した。これは、従来のマグネシウム鍛造部材では達成できなかった画期的な成果である。同様の結果は、AZ91 連続铸造材についても得られ（図2. 1. 3-11(b)）、素材の強度 226 MPa に対して鍛造部材の強度 344MPa、のび 16% が得られた。マグネシウム鍛造部材には、例えば基本計画の研究開発項目⑤に示されているように室温での引張強度 340MPa、伸び 15%以上、疲労強度 170MPa（ $10^7$ 回）が要求される。本研究開発ではこのうち、引張強度 340MPa、伸び 15%以上を達成した。サーボプレスを使用した鍛造プロセスの開発は世界初の成果である。

これらの結果を 18 年度に実施したモデル鍛造部材の引張試験結果と比較したものが図2. 1. 3-9である。18 年度モデル鍛造部材に関しては AZ80 を素材として 300℃で鍛造された部品の結果を示した。また 19 年度モデル鍛造部材に関しては強度が最大になった部品の結果を示した。ここで重要なことは、19 年度の試作鍛造において低コストの素材である連続铸造材を対象としてサーボプレスを使用した試作鍛造を行い、鍛造のメリットである成形による部材の機械的特性向上を実現したという点である。

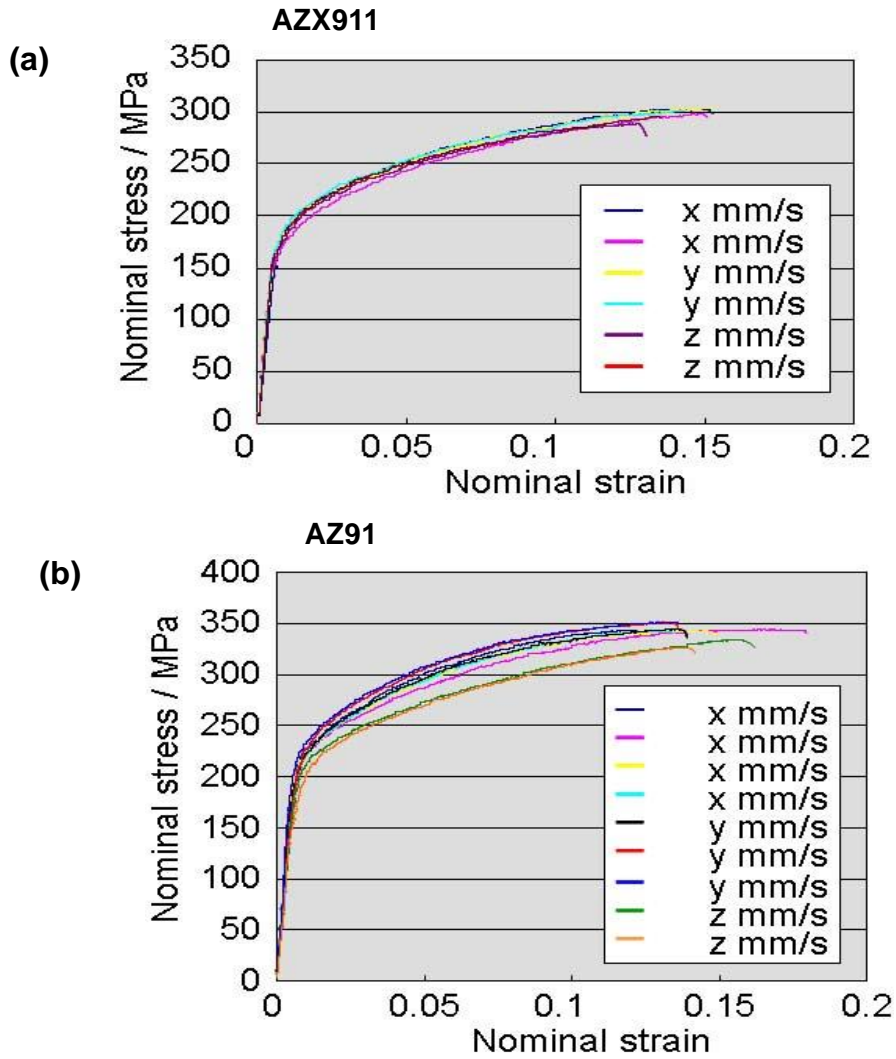


図2. 1. 3-1.1 モデル鍛造部材の室温引張試験結果、(a)AZX911、(b)AZ91

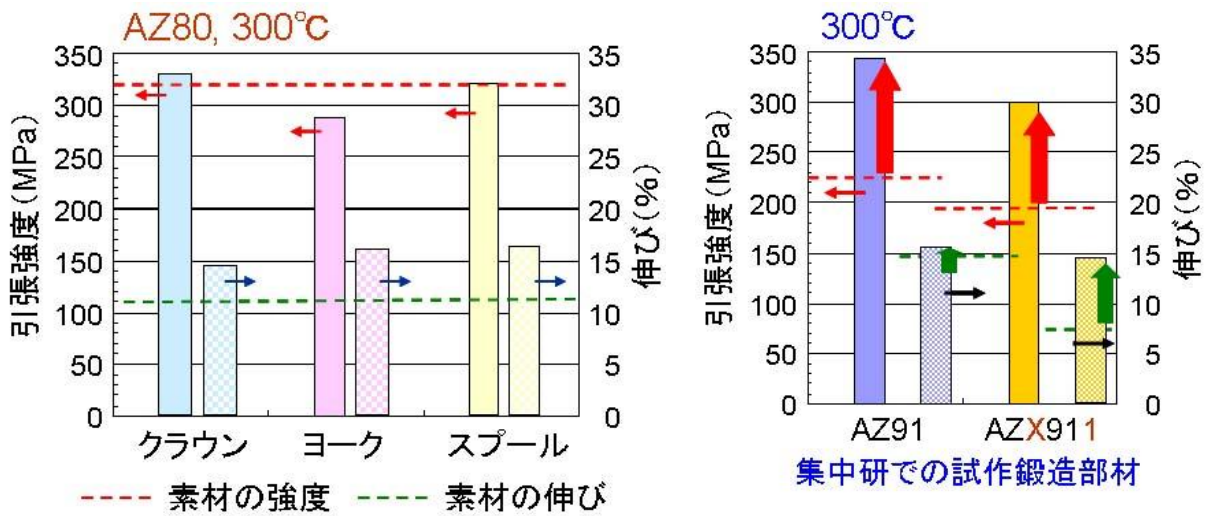


図2. 1. 3-1.2 企業モデル鍛造部材と集中研モデル鍛造部材の室温引張試験結果

次に、AZ91 マグネシウム合金連続铸造材を対象とした試作鍛造部材の組織観察結果と室温引張特性を示す。表2. 1. 3-2は、供試材の化学組成である。図2. 1. 3-13に供試材の組織写真を示す。使用した材料は三協マテリアル製のAZ91マグネシウム合金連続铸造材である。铸造ビレットの外径は155mmであり、410°C-24時間の均質化处理を施した後に鍛造に用いられた。铸造まま材の結晶粒径は290 $\mu\text{m}$ であり、デンドライト組織を示している。均質化处理を行うとデンドライト組織は消滅し、結晶粒径が150 $\mu\text{m}$ の等軸結晶粒組織を示した。

表2. 1. 3-2 供試材の化学組成 (mass%)

	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Ca
AZ91	9.2	0.90	0.01	<0.002	0.006	<0.002	<0.002	0.003

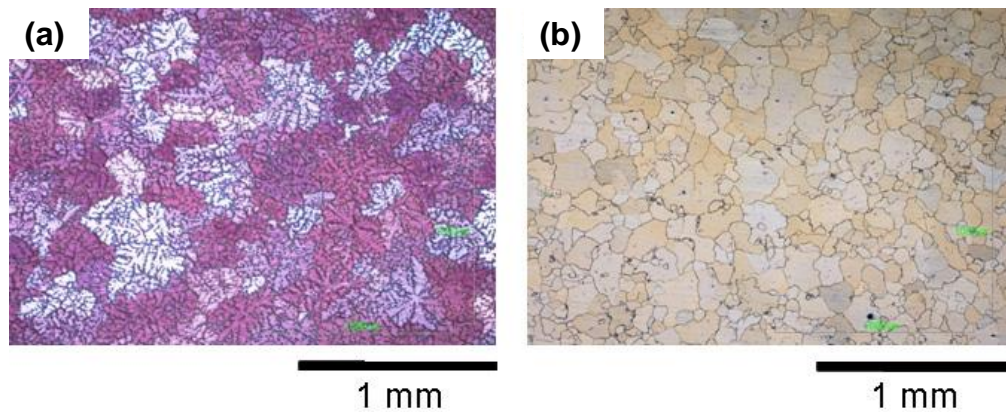


図2. 1. 3-13 供試材の組織。(a)铸造まま材、(b)均質化处理材

均質化处理を行ったAZ91マグネシウム合金連続铸造材に対して、産総研中部センターにおいて以下の条件(図2. 1. 3-14)で試作鍛造を実施した。試作鍛造品の形状および寸法は図2. 1. 3-5に示したものと同一である。また、材料および金型の潤滑には二硫化モリブデンを使用した。鍛造に用いたサーボプレス機は、放電精密(株)製直動式デジタルサーボプレス(ZENFormer: 容量300t)である。金型の材質はSKD61であり、内面にはCrNコーティングを施した。

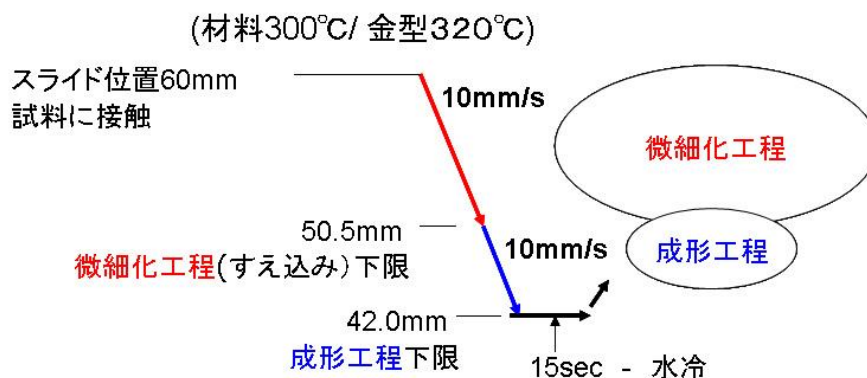


図2. 1. 3-14 試作鍛造の条件



図2. 1. 3-15は、結晶粒微細化後の組織である。試料中心部の結晶粒径は約6 $\mu\text{m}$ まで微細化していた。図2. 1. 3-16に示すように、試作鍛造品の三箇所において組織観察を行った。

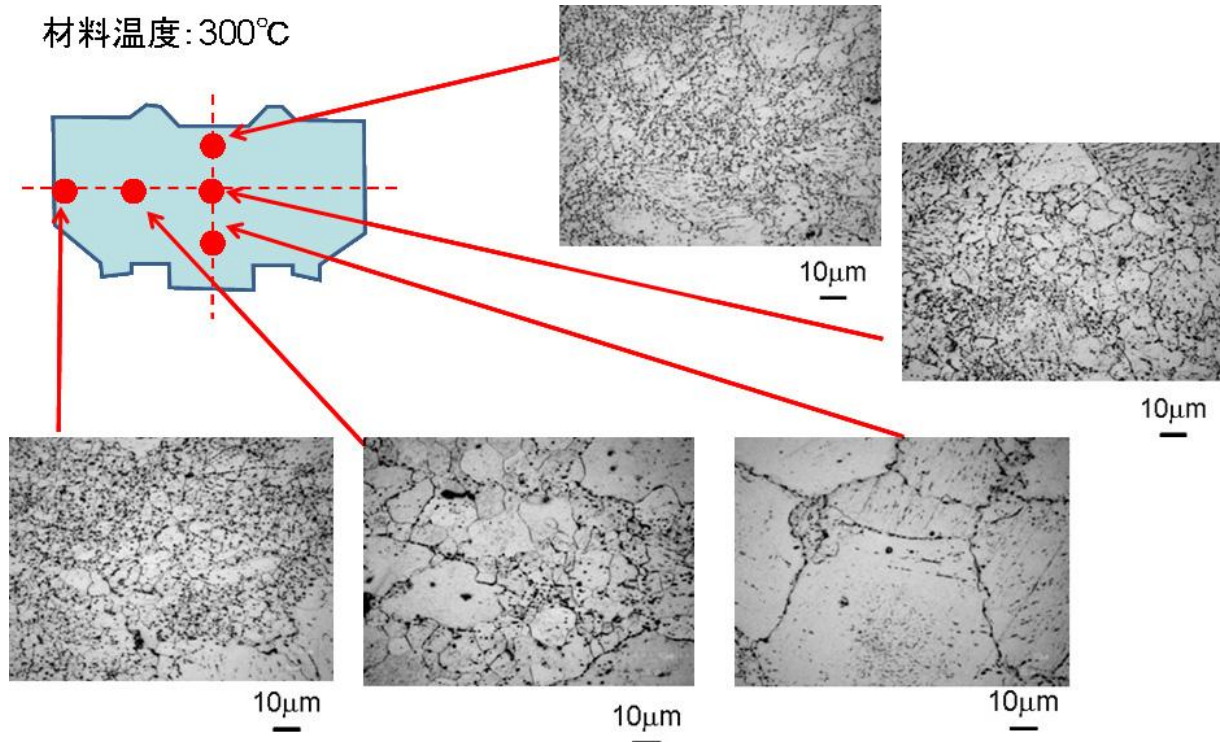


図2. 1. 3-15 結晶粒微細化後の組織

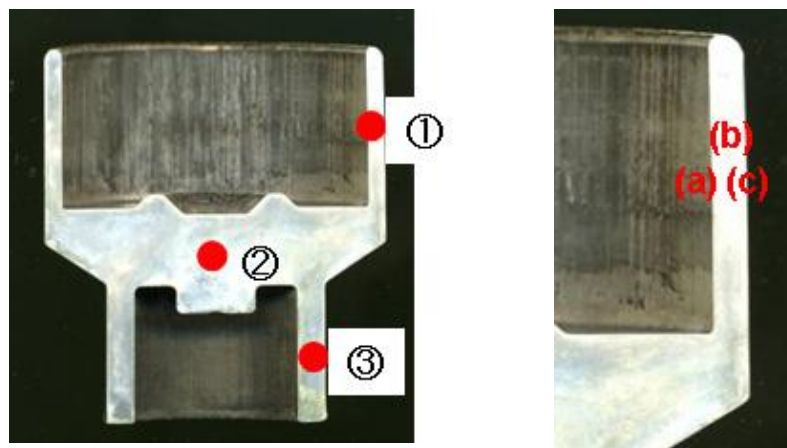


図2. 1. 3-16 試作鍛造部材の組織観察位置

図2. 1. 3-17に各位置での組織観察結果を示す。いずれの場所でも、結晶粒径は10 $\mu\text{m}$ 以下に微細化している。図2. 1. 3-18は、位置②でのマイクロ組織である。ここでは平均結晶粒径は7.5 $\mu\text{m}$ 、再結晶率は95%と均一微細な組織が得られた。位置①でも図2. 1. 3-19に示すように、平均結晶粒径は5~6 $\mu\text{m}$ 程度と非常に微細化していた。ただ再結晶率は壁の内側から外側に行くにつれて低下している。これは鍛造時に受けるひずみ量が場所によって異なるためと考えられる。

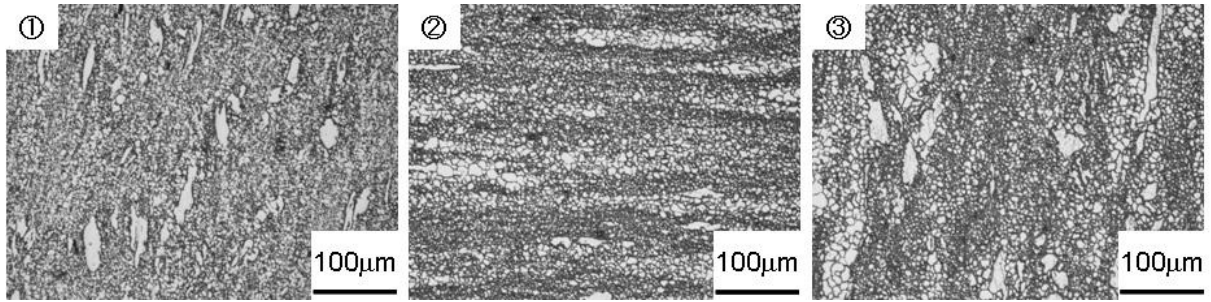


図 2. 1. 3 - 1 7 試作鍛造部材の各位置での組織観察結果

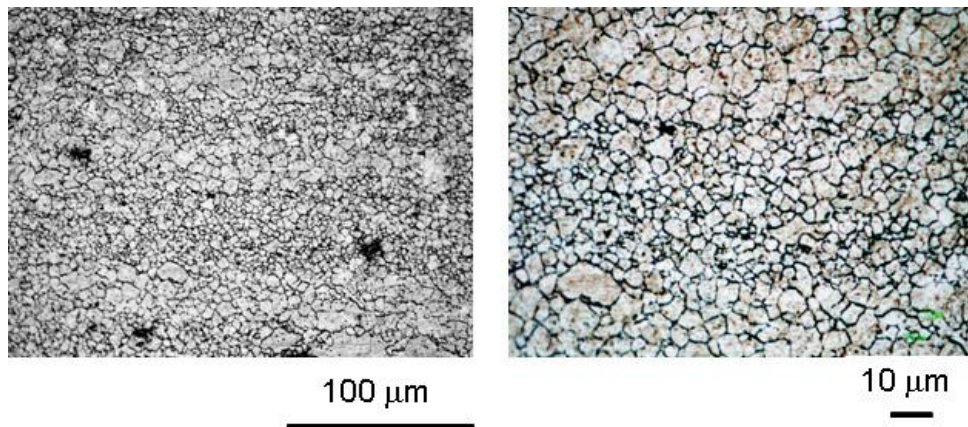


図 2. 1. 3 - 1 8 試作鍛造部材の位置②での組織観察結果

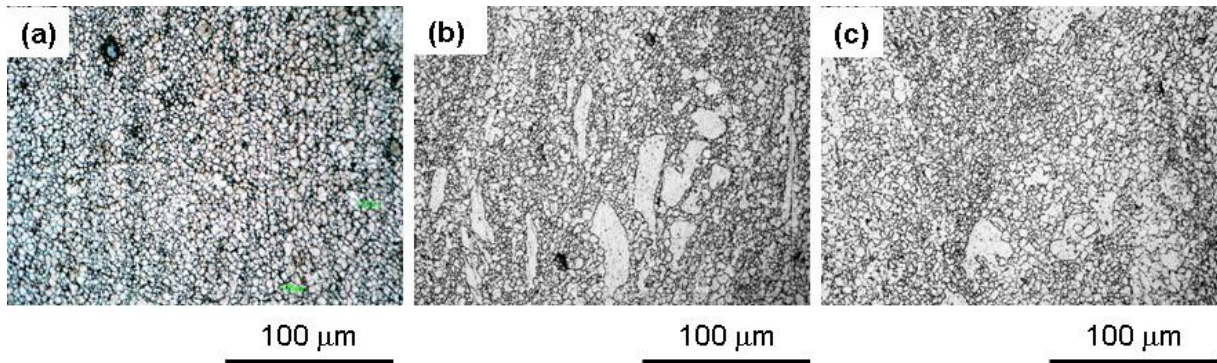


図 2. 1. 3 - 1 9 試作鍛造部材の位置①での組織観察結果

試作鍛造部材の位置①および②から図 2. 1. 3 - 2 0 に示すような引張試験片を作成し、図に示した条件で引張試験を行なった。その結果を表 2. 1. 3 - 3 に示す。いずれの位置でも優れた室温引張特性を示した。また位置により引張特性が異なるが、これは位置①では②と異なり内面から外面へと動的再結晶率の低下があり、一様な微細化が得られていないことが原因と考えられる。

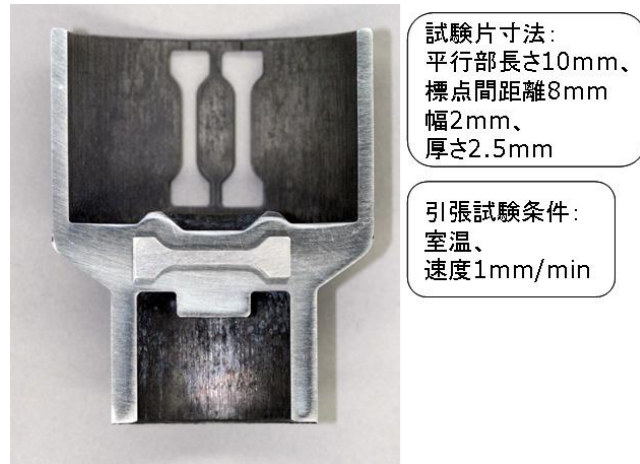


図 2. 1. 3 - 2 0 引張試験片採取位置、寸法および試験条件

表 2. 1. 3 - 3 試作鍛造部材の室温引張特性

	0.2 % 耐力	引張強度	伸び
位置①(底部)	240 MPa	359 MPa	19 %
位置②(後方押出部)	197 MPa	347 MPa	21 %

以上のように本研究開発では、AZ91 連続鋳造ビレットを素材とした熱間前後方押出鍛造において機械的特性に優れた鍛造部材を製作することができた。しかし、場所により粗大粒も残存するので均一微細な組織となる鍛造技術の構築が必要である。

さらに詳細は省略するが、図 2. 1. 3 - 2 1 に示すような、やや複雑形状の試作鍛造部材も AZ91 合金連続鋳造材を素材として同様の工程で作ることができた。

本研究課題では、世界で初めてマグネシウム合金連続鋳造材から一工程での鍛造に成功した。そして、新規鍛造プロセスとして、サーボプレスを使用した鍛造プロセスについての基本的なデータを収集した。



図 2. 1. 3 - 2 1 集中研試作鍛造品の例

サーボプレスを使用した新規鍛造プロセスに関して、企業からはより速い速度（100mm/s 程度）で鍛造を行ないたいという要望が出された。そこで本研究課題では次に、サーボプレスによる鍛造を 10mm/s よりも速い速度で行なうプロセスを助成事業に参加した企業と

連携して検討を行なった。供試材は、表 2. 1. 3-2 および図 2. 1. 3-10 に示した AZ91 マグネシウム合金連続鋳造材である。均質化処理を行った AZ91 マグネシウム合金連続鋳造材に対して、宮本工業株式会社において以下の条件（表 2. 1. 3-4）で試作鍛造（据え込み圧縮）を実施した。図 2. 1. 3-22 は試作鍛造における圧縮率・速度経路図である。まずは速度 100mm/s で圧下率 80%まで据え込み圧縮鍛造を行なった。なお試作鍛造は、助成事業との連携として、宮本工業において産業技術総合研究所と素形材センターの研究者が立会いのもとで実施した。

表 2. 1. 3-4 試作鍛造の条件

使用装置	コマツ製 630ton サーボプレス (HIC630)
試験片寸法	直径 40mm×高さ 48mm (円柱状)
試験片の潤滑	化成処理皮膜+黒鉛
圧縮板の潤滑	黒鉛
試験片の温度	300℃
圧縮板の温度	300℃
最終圧縮率	80%

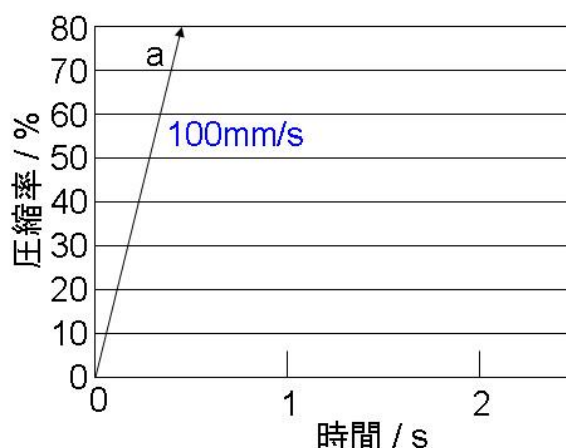


図 2. 1. 3-22 試作鍛造の圧縮率・経路図

図 2. 1. 3-23 に鍛造後の試験片の外観写真を示す。鍛造後の試料の側面に多数の亀裂が観察された。そこで次に試験片の表面近傍を観察した。その結果を図 2. 1. 3-24 に示す。クラックは表面から直線的に内部に進展している。また試料の内部組織を観察すると（図 2. 1. 3-25）、100mm/s で最終圧下率である 80%まで据え込みを行なった試料では、結晶粒径は 10 $\mu$ m 以下まで微細化しているが、内部に空洞が存在していた。そしてクラックは表面から結晶粒界に沿って、空洞を連結する形で内部に進展している。この結果は、変形の初期に多数の応力集中箇所が形成され、空洞が生じたことを示唆している。したがって AZ91 マグネシウム合金連続鋳造材を高速で鍛造する場合は、変形初期に応力集中箇所を少なくして空洞の発生を抑制する必要があると考えられる。

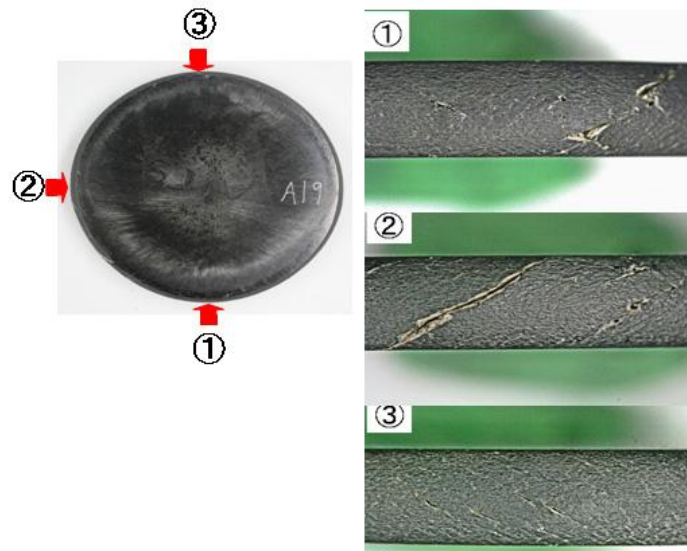


図 2. 1. 3 - 2 3 試作鍛造後の外観写真

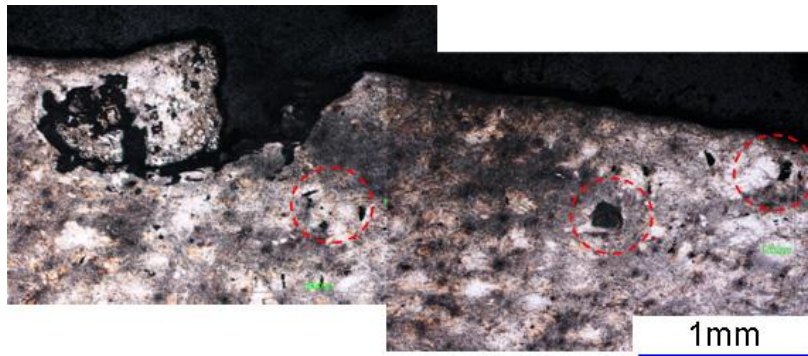


図 2. 1. 3 - 2 4 試作鍛造後の試料の表面近傍

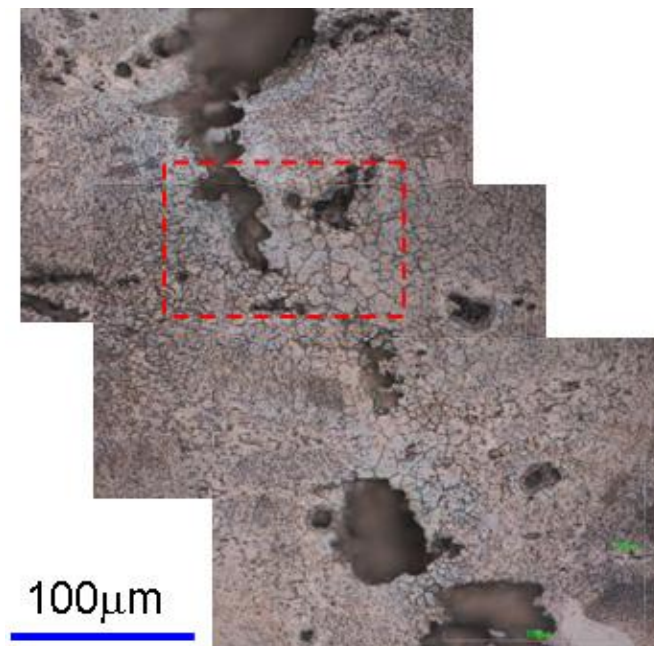


図 2. 1. 3 - 2 5 試作鍛造後の試料の内部組織

そこで次に、図2. 1. 3-26に示すように、9mm/sの低速で30%まで据え込んだのちに100mm/sで最終圧下率である80%まで据え込みを行なった。速度9mm/s、圧縮率30%という条件は、図2. 1. 3-3に示したプロジェクト集中研のサーボプレスでの試作鍛造における結晶粒微細化の条件とほぼ一緒である。

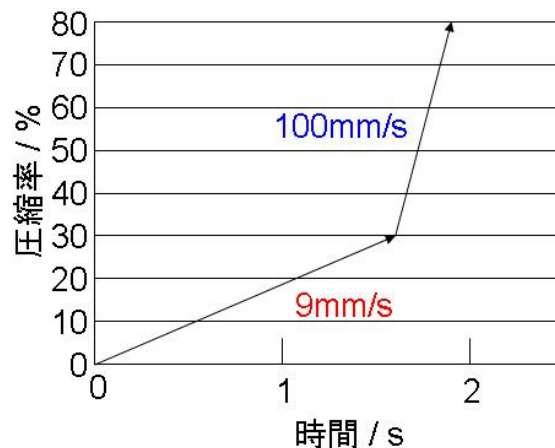


図2. 1. 3-26 試作鍛造の圧縮率・経路図

図2. 1. 3-27に鍛造後の試験片の外観写真を示す。図2. 1. 3-19と比べると、最終的な圧縮率は同じであるが、鍛造後の試料の側面に亀裂は観察されない。すなわち、低速での加工（据え込み圧縮）を最初に行なうことで、鍛造時の割れ発生は抑制された。これは、本プロジェクトにおいて世界で初めて明らかにされた知見である。また試験片の表面近傍を観察した結果、図2. 1. 3-28に示すように、表面に微細な割れは生じたものの、表面からクラックの伝播が進んでいないことがわかる。

試料の内部組織を観察すると、図2. 1. 3-29に示すように、100mm/sで最終圧下率である80%まで据え込みを行なった試料とは異なり、9mm/sの低速で30%まで据え込んだのちに100mm/sで最終圧下率である80%まで据え込みを行なった試料では、内部に空洞はほとんど観察されない。この結果は、変形初期に低速で鍛造を行なった場合は、高速での変形に比べて応力集中箇所が少なく、空洞の形成も抑制されることを示唆している。

このようにマグネシウム合金連続鋳造材を鍛造する場合には、最初に欠陥のない微細結晶粒組織を形成させることがキーポイントとなる。すなわち、マグネシウム合金連続鋳造材の鍛造では、最適な温度、加工速度、加工率を考慮した最適鍛造経路を選択することが非常に重要であることが明らかになった。これは、世界初の知見である。

また、本事業原簿で詳細は触れないが、本プロジェクトで開発したマグネシウム合金連続鋳造材を対象とする、動的再結晶による結晶粒微細化を活用した新規鍛造プロセスは、サーボプレスのみではなく汎用のメカプレスへも適用可能である見通しを得た。これについては、プロジェクト終了後も企業と共同研究を実施中である。

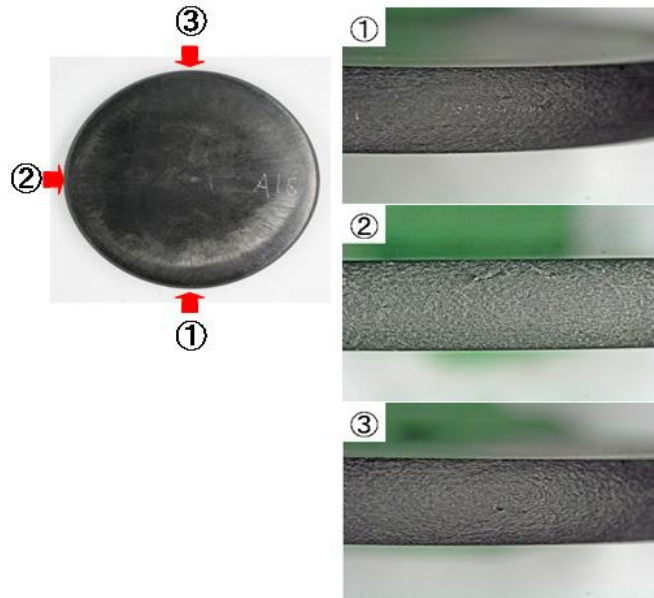


図 2. 1. 3 - 2 7 試作鍛造後の外観写真

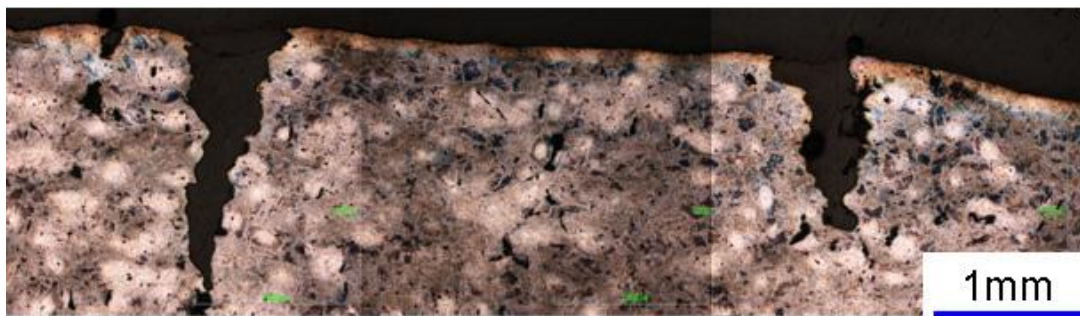


図 2. 1. 3 - 2 8 試作鍛造後の試料の表面近傍

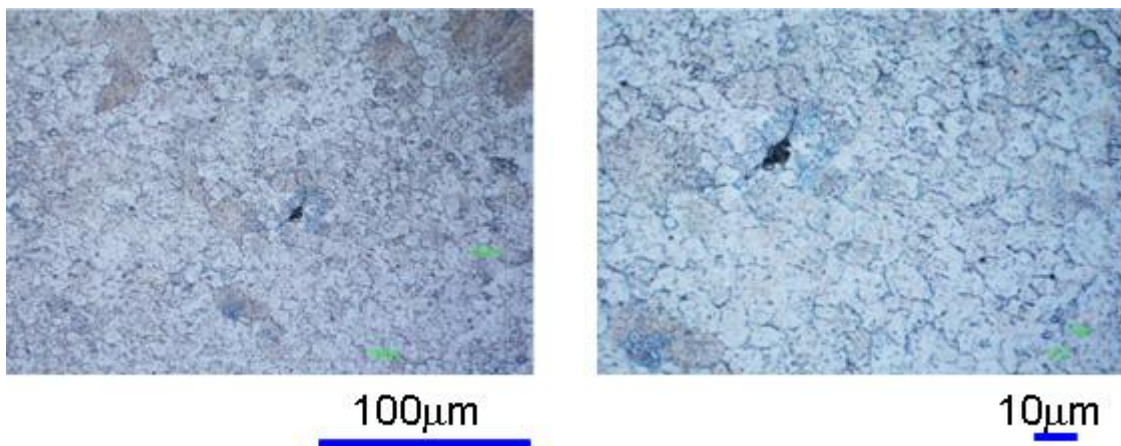


図 2. 1. 3 - 2 9 試作鍛造後の内部組織

#### 2. 1. 4 マグネシウム合金鍛造部材の評価方法の確立（研究開発項目①-（4））

本研究開発では、プロジェクト集中研および企業で試作鍛造された部材について、次のような評価を行なった。

表 2. 1. 4-1 試作鍛造部材の評価項目

評価手法	評価内容	評価の目的・ポイント
1)ミクロ組織観察	① 結晶粒径	結晶粒微細化の定量的把握
	② 再結晶率	組織均質性の定量的把握
2)室温引張試験	① 引張強度	鍛造部材の機械的特性の把握
	② 0.2%耐力	
	③ 破断伸び	
3)結晶方位解析	① 集合組織	鍛造部材の組織異方性の把握
	② 結晶方位マップ	

これらの評価手法は従来から行なわれているものであるが、本研究開発では鍛造部材の評価を行なう場合に留意すべきポイントを明確にした。

マグネシウム合金鍛造部材の評価として最初に行なうべきなのは、組織観察である。組織観察においては、「結晶粒径」と「再結晶率」を測定する。結晶粒径は動的再結晶による結晶粒微細化が起こっているかを確認するために必要であるとともに、鍛造部材の機械的特性を推測する指針となる。また再結晶率は、鍛造部材の組織の均質性の指針となる。図 2. 1. 4-1 に試作鍛造部材の組織観察結果の例を示す。同一鍛造部材でも部位によって組織が異なることが分かる。表 2. 1. 4-2 に、平均結晶粒径と再結晶率の測定結果を示す。

マグネシウム合金は異方性が強いため、鍛造部材は場所によって組織が異なる可能性が大きい。そこで組織観察においては、試料の採取場所に留意するとともに、目的に応じて異なる場所での組織観察を行い、結果を比較する必要がある。

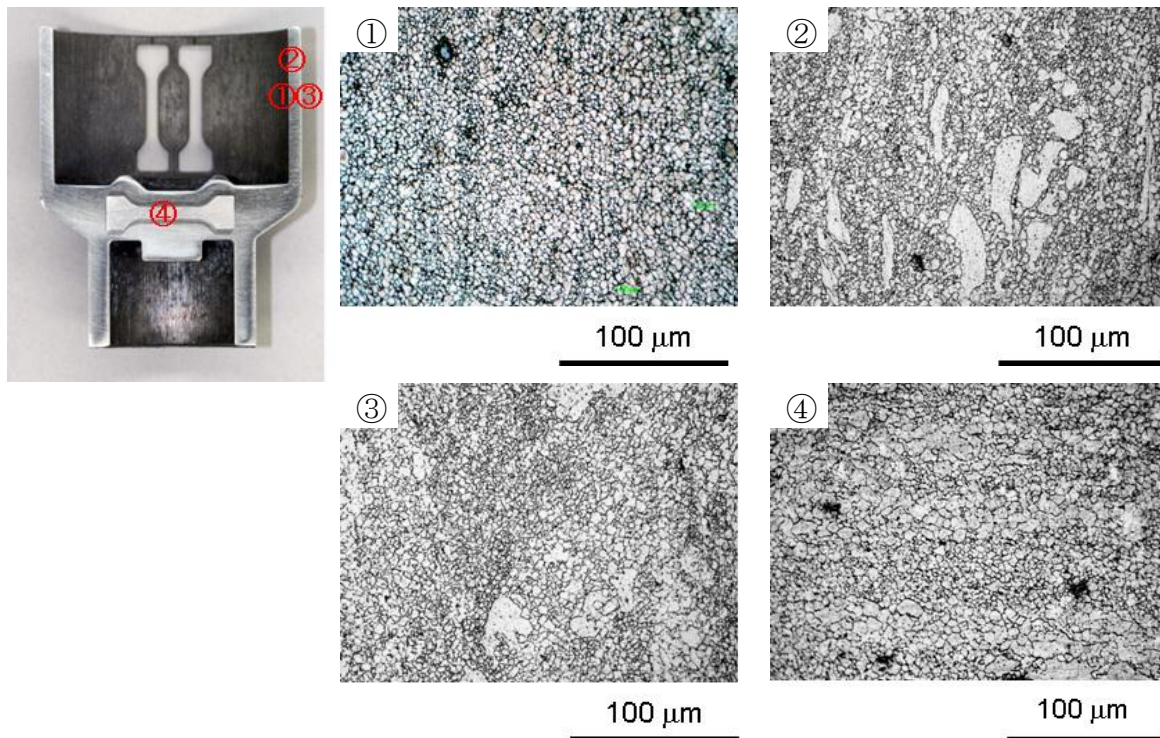


図 2. 1. 4-1 AZ91 マグネシウム合金連続铸造材を素材とする試作鍛造品の組織の場所による違い



表 2. 1. 4-2 平均結晶粒径と再結晶率の測定結果

観察位置	①	②	③	④
平均結晶粒径	6.0 $\mu\text{m}$	5.5 $\mu\text{m}$	5.5 $\mu\text{m}$	7.5 $\mu\text{m}$
再結晶率	95%	89%	89%	95%

マグネシウム合金鍛造部材の評価として次に行なうべきなのは、引張試験である。本研究では試作鍛造品の引張試験結果を鍛造データベースに集約した。図 2. 1. 4-2 に試作鍛造部材の室温引張試験結果の例を示す。同一鍛造部材でも部位によって引張特性が異なることが分かる。表 2. 1. 4-3 に、室温での引張強度、0.2%耐力、破断伸びの測定結果を示す。マグネシウム合金は異方性が強いため、鍛造部材の組織と同様に引張特性も場所によって組織が異なる可能性が大きい。そこで引張試験においては、試料の採取場所に留意するとともに、目的に応じて異なる場所での試験を行い、結果を比較する必要がある。

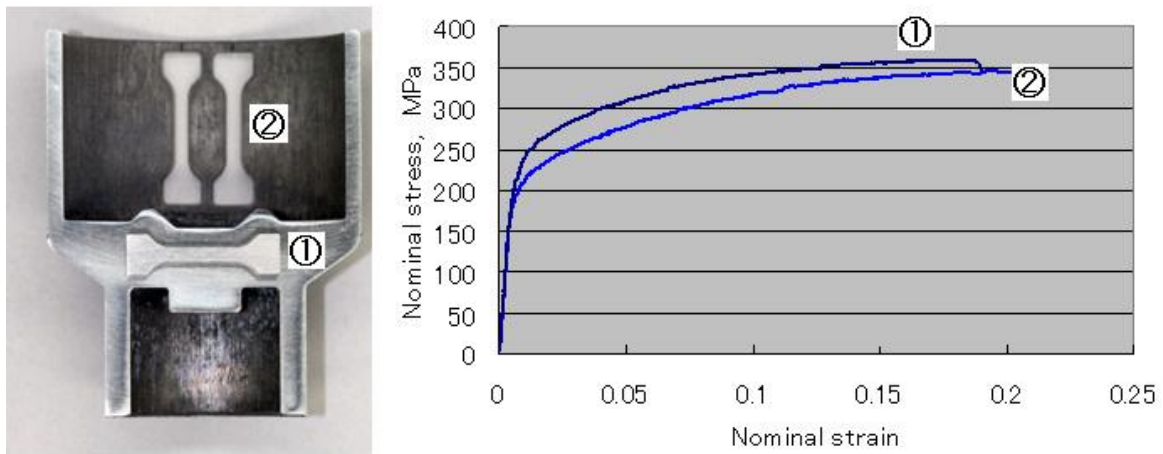


図 2. 1. 4-2 AZ91 マグネシウム合金連続鋳造材を素材とする試作鍛造品の室温引張特性の場所による違い

表 2. 1. 4-3 室温引張特性の測定結果

試験片採取位置	引張強度	0.2%耐力	破断伸び
①	359MPa	240MPa	19%
②	347MPa	197MPa	21%

鍛造部材の異方性は機械的特性に影響を与える重要な因子であり、結晶方位解析を行なうことが望ましい。そこで、図 2. 1. 4-3 に示した①および②の位置で EBSD(Electron Backscattered Diffraction)法によって結晶方位解析を行なった。図 2. 1. 4-4 は、位置①での結果である。この図から、ほとんどの結晶粒は、鍛造方向に対して (0001) 面の法線が向いている。このことは、図 2. 1. 4-5 に示した極点図からも明らかであり、この位置では鍛造方向に対して、(0001)面が揃った集合組織が形成されていることがわかる。

それに対して位置②では、図2. 1. 4-6に示すように押出方向に対して特定の方位が揃ったような組織にはなっていない。極点図を図2. 1. 4-7に示すが、この位置ではRD方向（鍛造方向）に対して、(0001)面が約45度傾いた集合組織が形成されていることがわかる。このような組織は、AZ31マグネシウム合金をECAP(Equal Channel Angular Pressing)加工した場合<sup>1)</sup>に報告された組織と似ている。ECAP加工では材料はせん断変形を受けるが、今回の鍛造の場合も位置②では図2. 1. 4-8に示すように、せん断変形を受けている。そのため、このような組織が形成されたと考えられる。引張試験においては、位置②から採取した試験片は位置①から採取した試験片に比べて耐力は低く、伸びが大きかったが、この原因は結晶方位の差にあると考えられる。

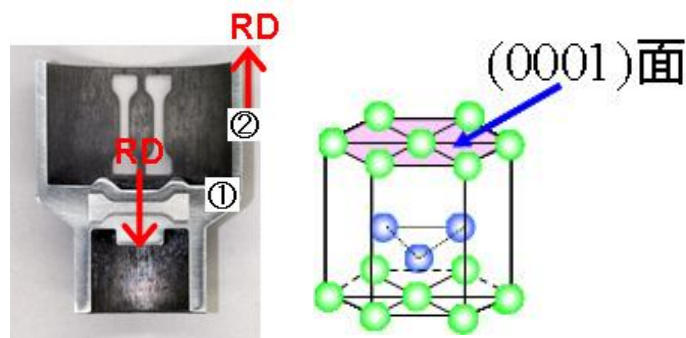


図2. 1. 4-3 試料採取位置と鍛造方向、およびマグネシウムの結晶格子

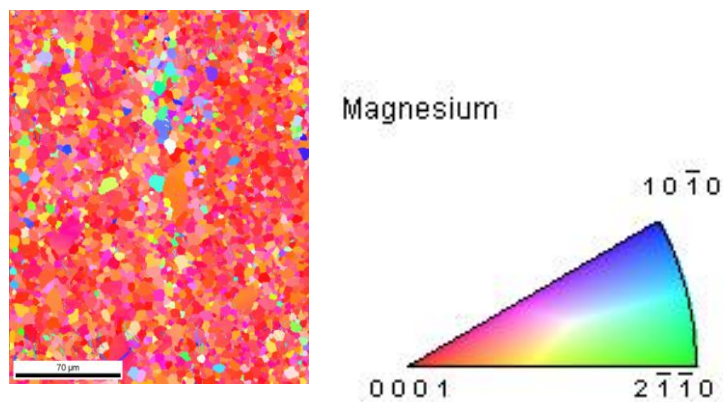


図2. 1. 4-4 試作鍛造品の位置①での結晶方位解析結果

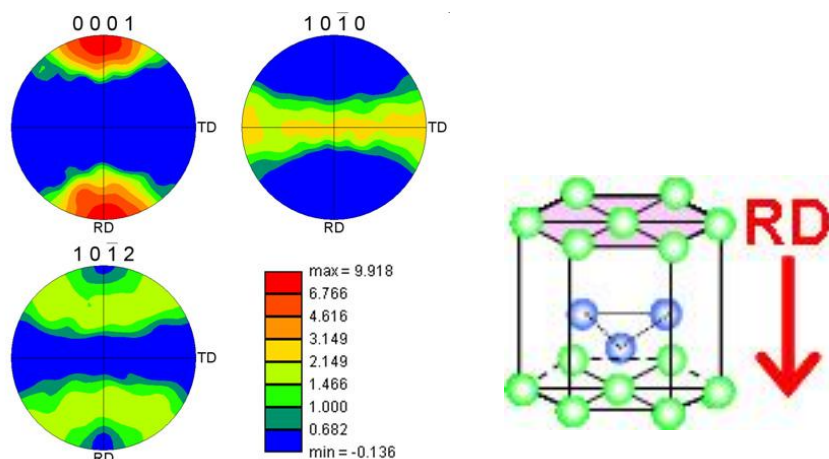


図2. 1. 4-5 試作鍛造品の位置①での極点図

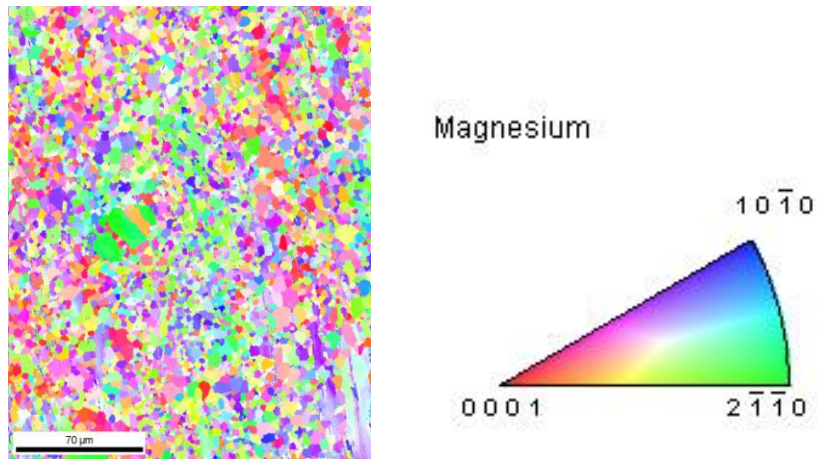


図 2. 1. 4 - 6 試作鍛造品の位置②での結晶方位解析結果

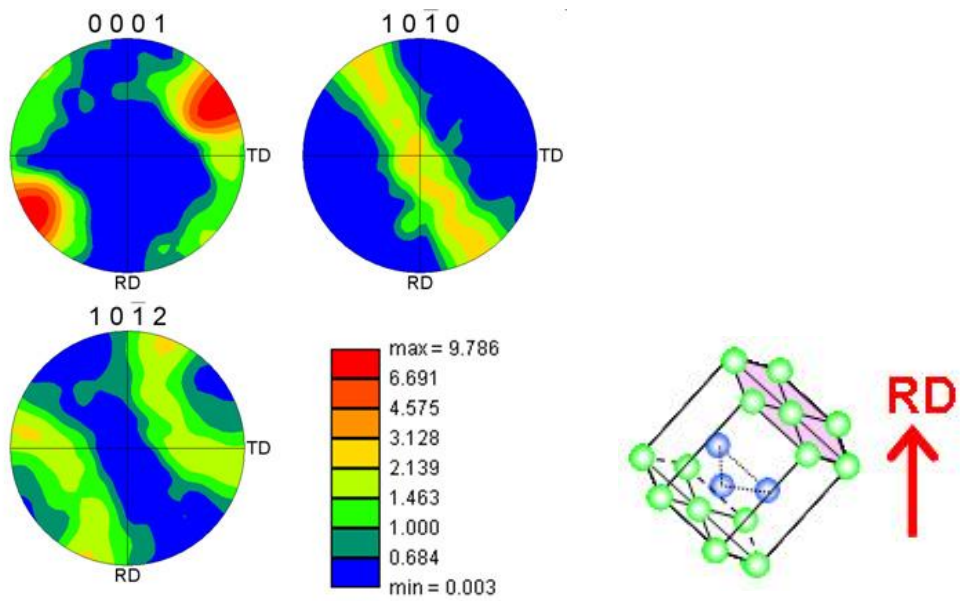


図 2. 1. 4 - 7 試作鍛造品の位置②での極点図

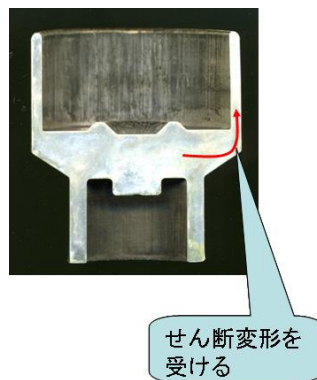


図 2. 1. 4 - 8 試作鍛造品の位置②への材料の流れ

結晶方位解析でも、試料の採取場所に留意するとともに、目的に応じて異なる場所での解析を行い、結果を比較する必要がある。

## 2. 1. 5 鍛造データベースの構築（研究開発項目①－（5））

現状のマグネシウムビレット等を材料として創製したマグネシウム合金の鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部品特性の関連性を整理し、その結果に基づいて世界で初めて鍛造データベースを構築した。鍛造データベースはプロジェクト集中研で得られた基盤研究の成果を助成事業に活用するためのツールであり、図2. 1. 5-1に示すように鍛造現場で次のような情報が得られるべく設計された。すなわち、

- ① ある素材をある条件で鍛造した場合の、鍛造部材の組織や機械的特性。
- ② ある素材をある条件で鍛造した場合の、鍛造時に必要な荷重。
- ③ ある組織や機械的特性を持つ鍛造部材を得るための加工条件。

が、検索できるようなシステムとした。

図2. 1. 5-2は鍛造データベースの構成を示したものである。データベースは「鍛造素材データベース」、「圧縮試験データベース」、「試作鍛造データベース」、「鍛造事例集データベース」の4つから構成される。各データベースの内容は表2. 1. 5-1に示したとおりである。

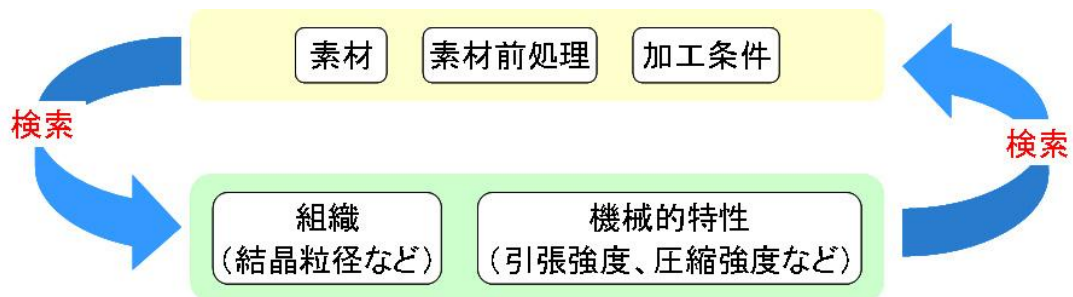


図2. 1. 5-1 鍛造データベースの意義

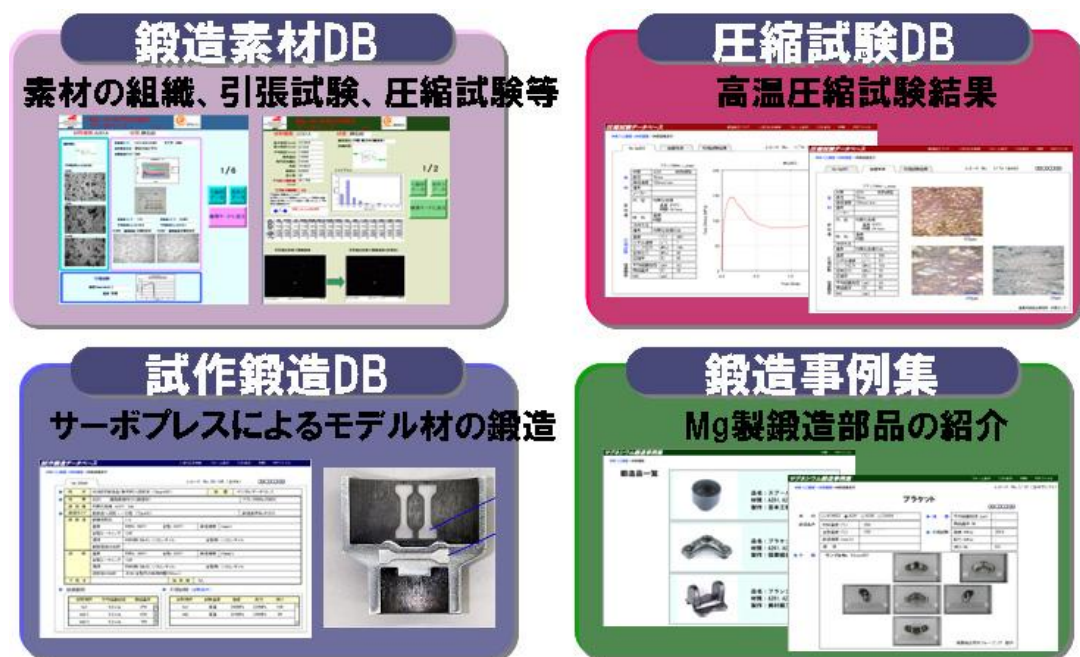


図2. 1. 5-2 鍛造データベースの構成

「鍛造素材データベース」は、鍛造に用いられる各種素材の特性をデータベース化したものであり、データとしては組織観察結果、引張試験結果、圧縮試験結果が含まれる。

「圧縮試験データベース」は高温圧縮試験結果をデータベース化したもので、この中には長岡技術科学大学から提供されたデータ（研究項目②）も含まれている。データとしては、圧縮試験の応力-ひずみ線図、変形抵抗、組織観察結果、引張試験結果が含まれる。また、変形抵抗や結晶粒径と加工条件（Zパラメータ）の関係がプロットできるような機能を付加している。

「試作鍛造データベース」は、サーボプレス等によって試作鍛造を行なった部材の評価結果をデータベース化したものである。この中には、企業（宮本工業㈱、協業組合菊水フォージング）で集中研が行なった実験結果も含まれている。データとしては、組織観察結果と引張試験結果が含まれる。

「鍛造事例集データベース」は、平成18年度に企業で実施された試作鍛造結果をまとめたもので、製品あるいは製品に近い試作品の事例集である。データとしては、外観写真、組織観察結果、引張試験結果が含まれる。鍛造データベースのデータ数は図2. 1. 5-3に示した。

構築した鍛造データベースは、条件入力による検索機能を持つ。図2. 1. 5-4に試作鍛造データベースの検索画面、図2. 1. 5-5に検索結果の例を示す。検索結果からさらに引張試験結果や組織観察結果のような詳細画面が開く。

鍛造データベースには、マグネシウム合金連続鋳造材の高温圧縮試験結果がまとめられている（図2. 1. 5-6）。したがって、鍛造データベースのデータを活用することで、鍛造シミュレーションの精度向上が期待される。

今後は、AZ系以外の合金のデータを追加するなど、更なるデータベースの充実化が課題である。

表2. 1. 5-1 鍛造データベースを構成するデータベースの内容

データベース名	概要	素材種類	主なデータ内容
鍛造素材DB	鍛造に用いられる各種素材の特性データベース	AZ61 押出材 AZ80 押出材 ZK60A 押出材 ACM722 ダイキャスト材 ACM522 ダイキャスト材	組織観察、引張試験、圧縮試験
圧縮試験DB	高温圧縮試験結果のデータベース  *長岡技術科学大学より提供された87データを含む	AZ91 鋳造材 AZX911 鋳造材 ACM522 ダイキャスト材 AZ61 押出材 AZ80 押出材 ZK60 押出材	圧縮試験、組織写真、引張試験 (鍛造加工マップ)
試作鍛造DB	サーボプレス等により作製された試作鍛造品に関するデータベース  *宮本工業、菊水フォージングにおいて実施された実験結果を含む	AZ91 鋳造材 AZX911 鋳造材	組織写真、引張試験
鍛造事例集DB	製品あるいは製品に近い試作品の事例集 *宮本工業、奥村鍛工、菊水フォージングより提供されたデータ	AZ61 AZ80 ZK60 ACM522	外観写真、組織写真、引張試験

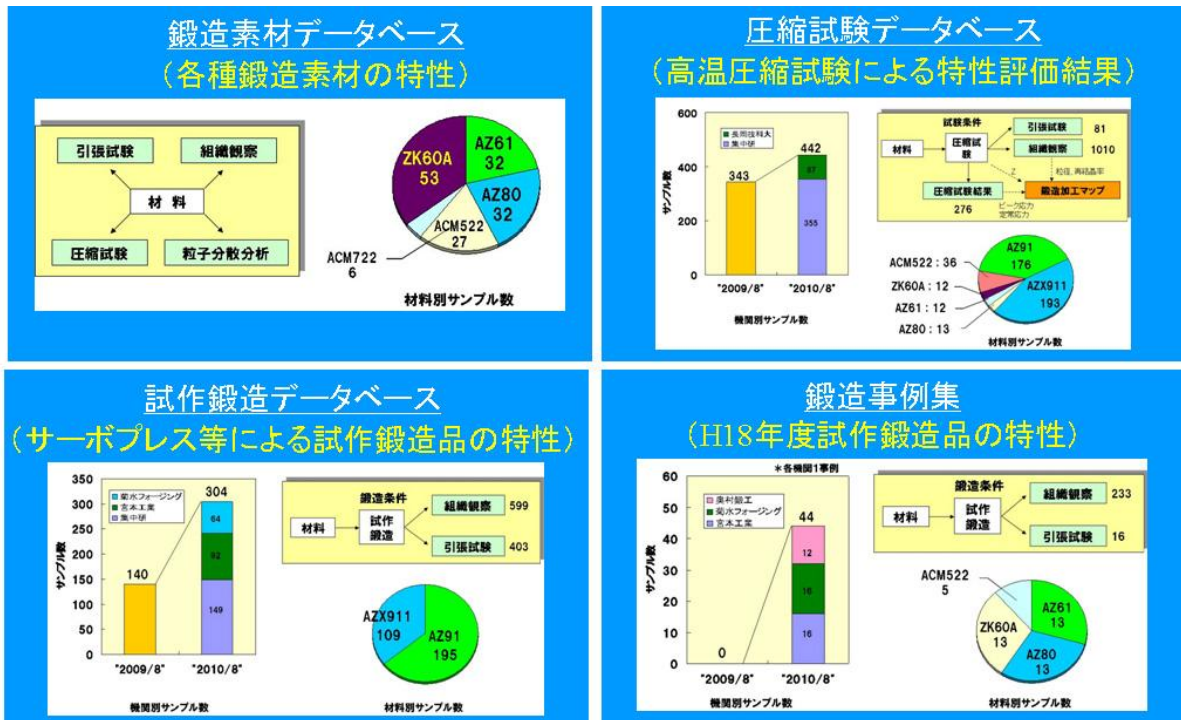


図 2. 1. 5 - 3 鍛造データベースのデータ数

**試作鍛造データベース** 検索条件の追加 フォーム表示 リスト表示 印刷 PDFファイル

検索入力画面 > 検索画面

試作品No.  検索条件 No. 1/1

形状  H19試作鍛造品:前鍛造のみ(集中研)  H19試作鍛造品:成形済(集中研)  H21試作鍛造品(集中研・宮本工業)

素材 材質  AZ91  AZX911 前処理  HOMO  なし

鍛造条件 鍛造のタイプ  Type01 前鍛造のみ  Type02 前鍛造+成形:一工程  Type03 前鍛造+成形:二工程 鍛造条件No.

前鍛造 鍛造成形比  材料温度(℃)  金型温度(℃)  鍛造速度(mm/s)  金型コーティング  CrN  TiAlN  TiAlSiCN  TiC  TiN  なし 潤滑(材料)  MoS2, シリコンオイル  MoS2のみ  化成処理+グラファイト水溶液(10倍希釈) 潤滑(金型)  MoS2のみ  シリコンオイル  なし  油性グラファイト 前鍛造後の冷却  水冷

成形 材料温度(℃)  金型温度(℃)  鍛造速度(mm/s)  金型コーティング  CrN  TiAlN  TiAlSiCN  TiC  TiN  なし 潤滑(材料)  MoS2, シリコンオイル  MoS2のみ  化成処理+グラファイト水溶液(10倍希釈) 潤滑(金型)  MoS2のみ  シリコンオイル  なし  油性グラファイト 成形後の冷却速度  金型内に15sec保持後に水冷  金型内に15sec保持後に水冷  金型内に15sec保持後に徐冷  水冷

後処理  T5  T6  なし

引張試験 強度(MPa)  耐力(MPa)  伸び(%)  試験温度(℃)  室温

組織観察 平均結晶粒径(μm)  再結晶率(%)

**検索**

図 2. 1. 5 - 4 鍛造データベースの検索画面の例

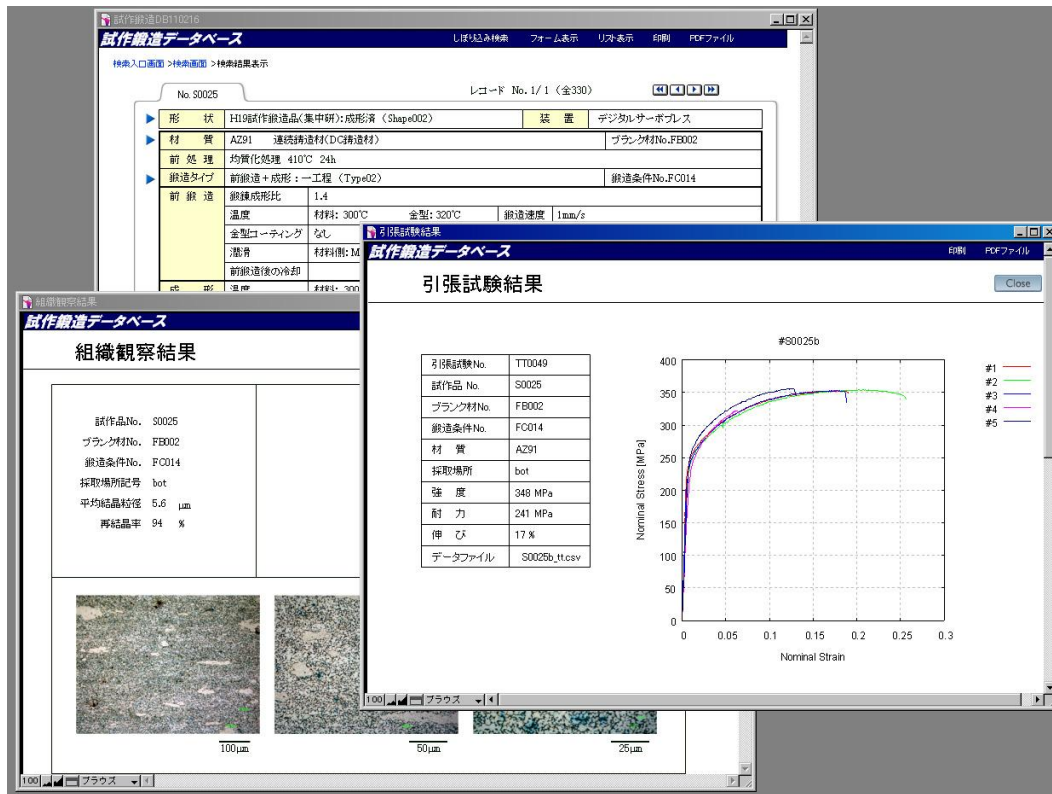


図 2. 1. 5 - 5 鍛造データベースの検索結果画面の例

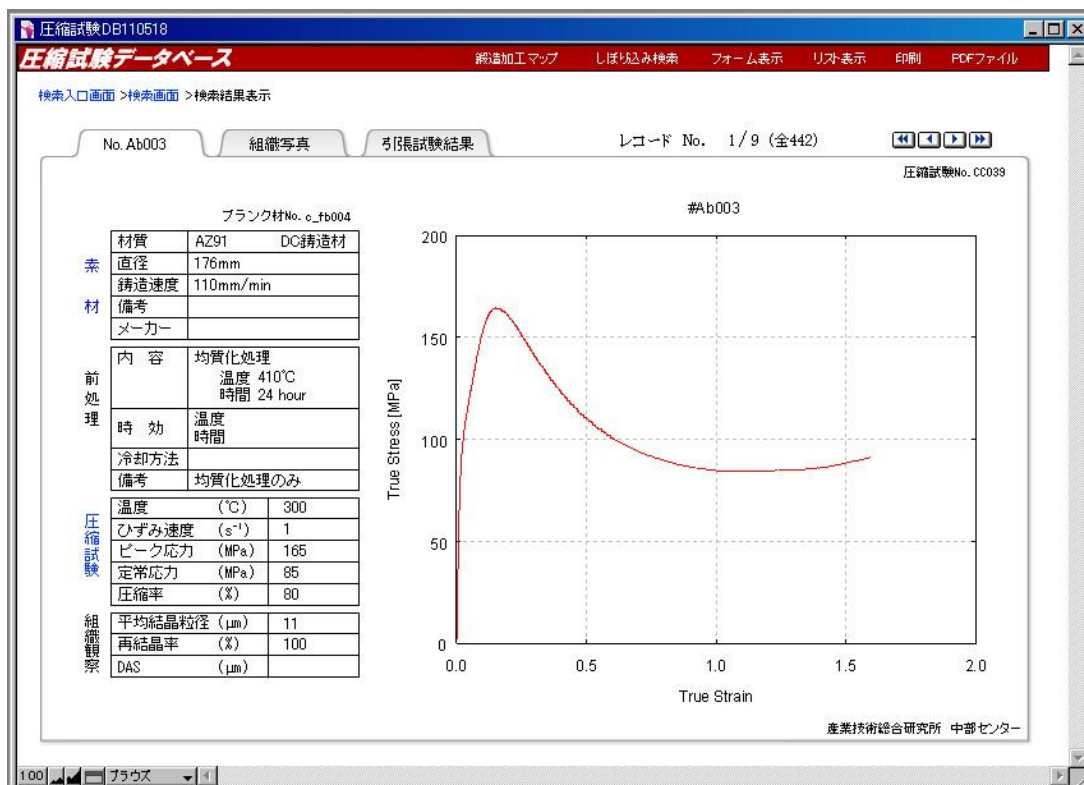


図 2. 1. 5 - 6 圧縮試験データベースの検索結果画面の例

## 2. 1. 6 マグネシウム合金の素材、鍛造技術、周辺技術に関する基本情報 (研究開発項目①－(6))

### (a)鍛造用素材の現状

マグネシウム鍛造プロジェクトで対象とする素材は鋳造ビレット、押出し丸棒、圧延薄板である。これらの素材について現在市場で入手可能な合金種、形状、納期等について調査した。

2007年のマグネシウム地金生産量は全世界で793,000トンであり、そのうち627,300トンが中国で生産されている。日本の総需要47,400トンのうち90%以上が中国からの輸入である。需要の内訳はアルミ合金添加(20,200トン)、ダイカスト(9,600トン)、鉄鋼脱硫(9,000トン)、ノジュラー鋳鉄(2,500トン)、粉末・防食等(2,300トン)、チクソ(1,000トン)であり、鍛造用素材等は1,100トン(2.3%)と少ない<sup>1)</sup>。

#### 【鋳造ビレット】

DC鋳造ビレットは押出材用として生産されることが多いが、DC鋳造ビレット(φ300mm)をそのまま鍛造してレーシングカー用ホールを製造している例もある。マグネシウム合金のDC鋳造を行っている企業は日本では少ないが、中国では多数の企業が実施している。その例を次に示す。

- ・合金種；AZ31、AZ40、AZ61、AZ80、AZ91、ME21、ZK61等々20種  
RE、Ca含有合金も注文により製造可能
- ・鋳片寸法；φ100～600mm×max. 5,500mmL(DC鋳造、電磁攪拌を実施)
- ・出荷；鋳片表面を5mm位ピーリングし、成分、組織、超音波検査後出荷
- ・用途及び需要家；鍛造用または押出し用で、出荷先は国内、輸出半々

#### 【押出棒】

国内では数社が押出を行っており、米国、カナダ、中国等からの輸入品も入手可能である。商社からの情報をまとめて次に示す。

- ・合金種；AZ31B、AZ61、AZ80、AZ91、ZK60、WE43、WE54等々  
RE、Ca含有合金も注文により製造可能
- ・寸法；φ8～300mm
- ・納期；2ヶ月(大量生産品種)～4ヶ月(生産量の少ない特殊品種)

#### 【薄板】

マグネシウム薄板の圧延は国内でも数社が行っており、輸入品の入手も可能である。

- ・合金種；AZ31、AZ61、AZ91系が主体。この他Ca、Zr、Li、RE入り合金も製造可能。
- ・寸法；最小厚みは0.04mm(スピーカーの共鳴板用)、通常は0.5～0.8mmが多い。  
幅は150～600mmまで各種があり、1,800～2,000mmの広幅材(輸入)も入手可能。コイル物も製造されている。
- ・納期；輸入品でも2ヶ月程度(特殊合金は半年はかかる)。通常は溶解鋳造で1ヶ月、圧延で1ヶ月。



(b) 素材製造プロセス

現在行われている鍛造用素材の主な製造プロセス(開発中も含む)を図2. 1. 6-1に示す。

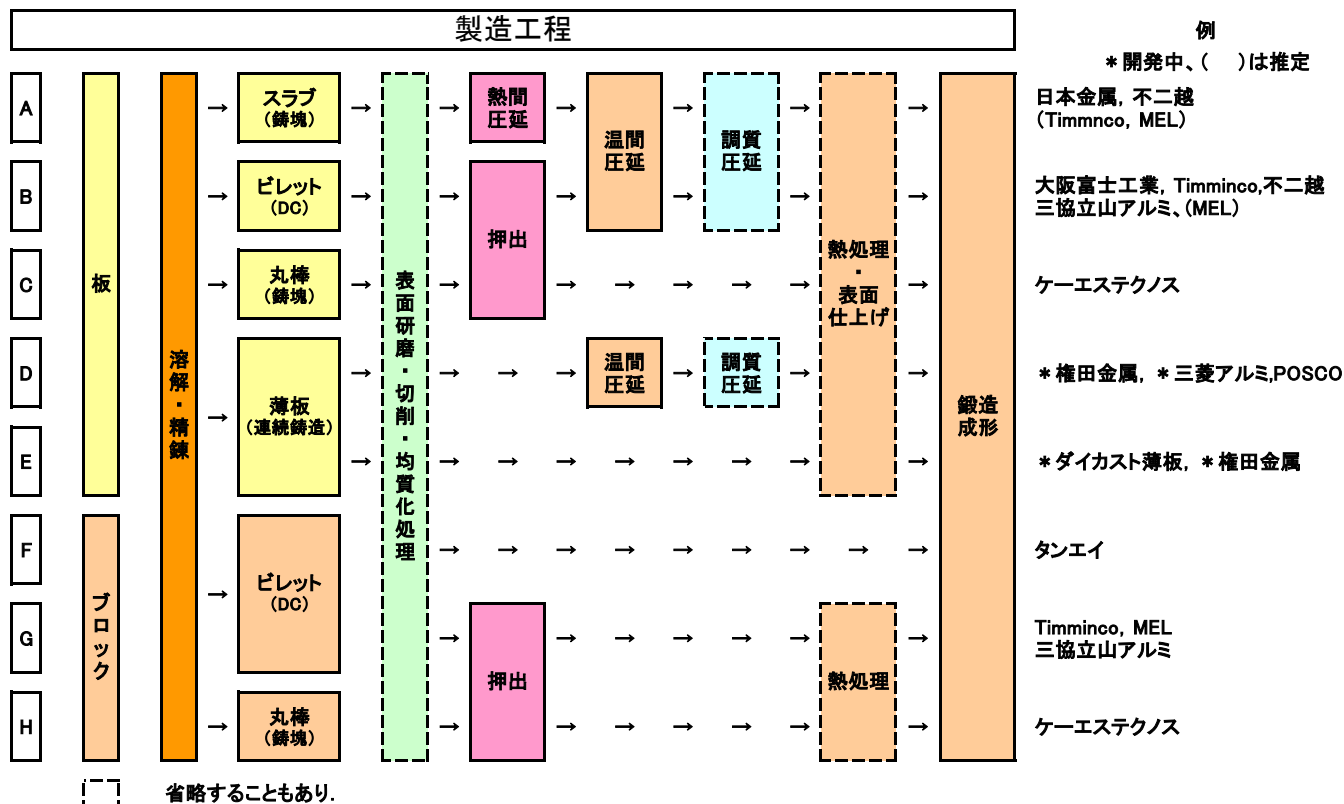


図2. 1. 6-1 鍛造用素材製造プロセス

【板材製造プロセス】

板材は、铸造したスラブ表面の凹凸や酸化層を研削・切削等で除去した後、数 mm 厚みに熱間圧延し、温間(300℃前後)で最終厚に圧延している。その後冷間での調質圧延を行い熱処理および研削等の表面仕上げを行って出荷される。

A プロセスは最も一般的な板材の製造法である。温間圧延では1パス当たりの圧下率が大きく取れないので多数回のパスが必要となる。そのため、コイルによる圧延技術が開発され、コイラー・圧延ロールの加熱が一般的に行われている。

B プロセスは熱間圧延の代わりに押し出しを行う方法であり、その後の工程は A と同じである。

C プロセスは押し出しで直接薄板を製造するものであり、数社がこの方式で生産している。押し出し機的能力および铸造ビレット径の制約等から、現在製造されている最大板幅は 300 mm である。板厚は最小 0.4 mm(幅 180 mm)のものまで造られている。

D、E プロセスは溶湯から直接数 mm 厚の母板を铸造し、D では温間圧延を経て製品とし、E は铸造母板をそのまま鍛造用素材として使用するものである。これらの技術はいずれ製造工程を短縮することができ、素材製造コストを低減できるので、国内外とも活発な開発が進められている。

### 【丸棒製造プロセス】

鑄造ビレットを表面研削してそのまま鍛造するプロセス F、DC 鑄造した丸ビレット又は丸鑄塊を所定の径に押し出すプロセス G および H がある。プロセス F はホイールの鍛造で実際に行われており、他の鍛造品にも拡大することが出来れば素材製造コストの大幅な低減が可能となる。

### (c) 素材製造プロセスの課題

#### 【溶解・精錬】

この工程では溶湯の酸化・発火防止、溶湯酸化物や合金元素添加時の生成物等の混入防止が重要である。溶湯の酸化防止には不活性ガス使用、減圧溶解および溶湯への Ca 添加等の技術が開発されている<sup>2)</sup>。また異物汚染としてフラックスを使用する例が多いが、Ca 含有合金ではフラックス使用では異物除去が十分ではなく、減圧下でのガスバブリング処理が行われている。また、鑄湯時の酸化物の巻き込みを防止するため減圧溶解+ガスバブリング+サイホン式の鑄湯技術も開発されている<sup>3)</sup>。

#### 【鑄造】

通常は鑄片表面を切削し、鍛造・押出・圧延に向けられているが、アルミニウム合金では表面切削なしで鍛造可能な鑄片の製造技術が開発されている<sup>4)</sup>。マグネシウム合金でも表面の美しい鑄片の製造に成功したと報じられている<sup>5)</sup>、工業生産はされていない。

図 2. 1. 6-2 は AZ80 合金鑄片の据込み試験結果であり<sup>6)</sup>、結晶粒が微細なほど成形性が向上することを示している。

鑄造組織を微細にするため C 添加による接種<sup>7)</sup> や図 2. 1. 6-3 に示す溶湯の電磁攪拌等が行われている<sup>8)</sup>。中国のビレット鑄造工場では鑄造時の電磁攪拌が一般的に行われており、鑄片の凝固組織微細化ならびに鑄片中心部のポロシティ防止に効果がある。中国の東北大学(瀋陽市)で鑄造した  $\phi 170 \text{ mm}$  ビレットを図 2. 1. 6-4 に示す。電磁鑄造をすることにより AZ90 の  $\phi 500 \text{ mm}$  鑄片での結晶粒径が  $150 \mu\text{m}$ 、 $\phi 300 \text{ mm}$  では  $100 \mu\text{m}$  位になるとしている。前述したように中国では  $\phi 100 \sim 500 \text{ m}$  の DC 鑄造材を製造しているが、 $\phi 40 \sim 120 \text{ mm}$  の小径鑄片は水平連続鑄造法で製造する研究が行われている。

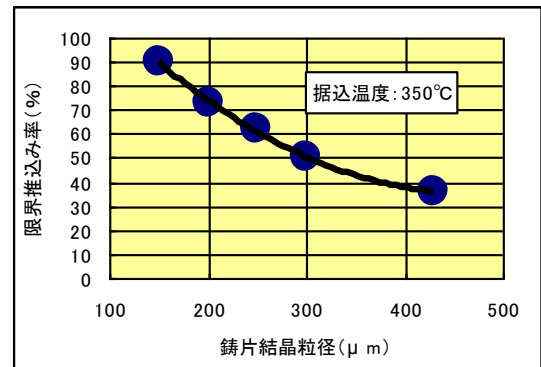


図 2. 1. 6-2 AZ80 鑄片の結晶粒径と限界鑄込み率

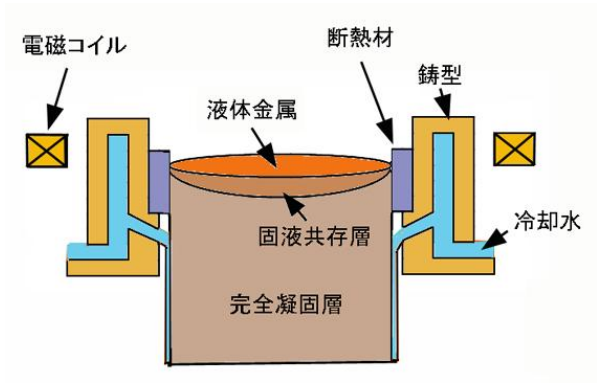


図2. 1. 6-3 鋳型内電磁攪拌法



図2. 1. 6-4 鋳型内電磁攪拌鋳造した鋳片

【圧延】

温間圧延の工程では、1回の圧下量が大きく取れないためパス回数が多くなり、コストアップの要因となっている。パス回数を減らすため、高速度大圧下圧延(例えば、圧延速度 1,000m/min、1パスの圧下率 60%)の研究が行われている<sup>9)</sup>。

溝型ロールを使用して素材に歪みを与え、微細結晶粒の角材を造る研究が行われている<sup>10)</sup>。図2. 1. 6-5に穴型ロール圧延、押し出し及びECAE(ECAP)を行った AZ31 材の降伏強度と結晶粒の逆数(ホール・ピッチ)との関係を示す。結晶粒径が同じであっても、穴型圧延材は他の加工法に比べ降伏強度が高くなっている。この研究は微細結晶粒鋼を製造する研究の延長線上で行われているもので、鍛造用素材製造法の1つとして今後の展開が期待される。

【押し出し】

マグネシウム合金は表面割れや表面酸化が生じやすく、押し出し速度はアルミニウム合金の数分の1と生産性が低い。また、室温での矯正が困難である等の問題もあり、押し出し方向と直角方向の機械的特性に差が大きい。一般的には押し出し比を大きくすることにより異方性は軽減するが、例えば AZ31 では、押し出し比 400 でも、0.2%耐力は押し出し方向が 200MPa であるのに対し、直角方向では 150MPa とかなりの差がある<sup>11)</sup>。これらの課題を解決するため押し出し条件や型設計の見直しが行われているが、まだ問題は残っている。

一方、低温・高速押し出しが可能な静水圧押し出しの研究が行われている。溶体化処理(350°C×12 hr)をした AZ31 を 120°C、200°C で静水圧押し出しを行った結果、結晶粒径 200 μm のものが 10 μm 以下となり、抗張力 320MPa の物が得られている<sup>12)</sup>。この方法は製造コストが高いと言われているが、低温・高速押し出しが可能な点に魅力がある。

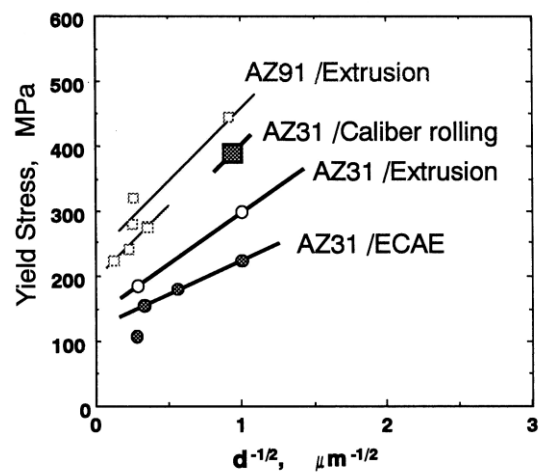


図2. 1. 6-5 各種成形した AZ31 合金のホール・ピッチ式

【薄板鋳造+圧延】

溶湯から数 mm 厚の薄肉の鋳片を連続鋳造し、それを圧延して薄板を鋳造する開発が各社で行われている。その一例を図 2. 1. 6-6 に示す<sup>13)</sup>。合金種は AZ31 が多いが AZ60 や AM60 などの開発も行われている。板幅は 600 mm 以下が多いが、Thyssenkrupp Stahl AG 社では 0.55mm 厚で幅 2000mm まで造られている<sup>14)</sup>。表面性状、寸法精度、機械的性質等も優れた板が製造可能とされており、鋳造時の冷却速度が速いため析出物が微細に分散し、従来のスラブ圧延板より耐食性が優れると報告されている<sup>15)</sup>。POSCO 社は双ロール鋳造法+圧延法によるマグネシウム薄板専用工場を立ち上げており<sup>16)</sup>、薄板の製造コストを大幅に下げ得るとしている。中国の企業でも同様方式の薄板専用工場を立ち上げており、良品質で低価格な薄板の供給が期待される。

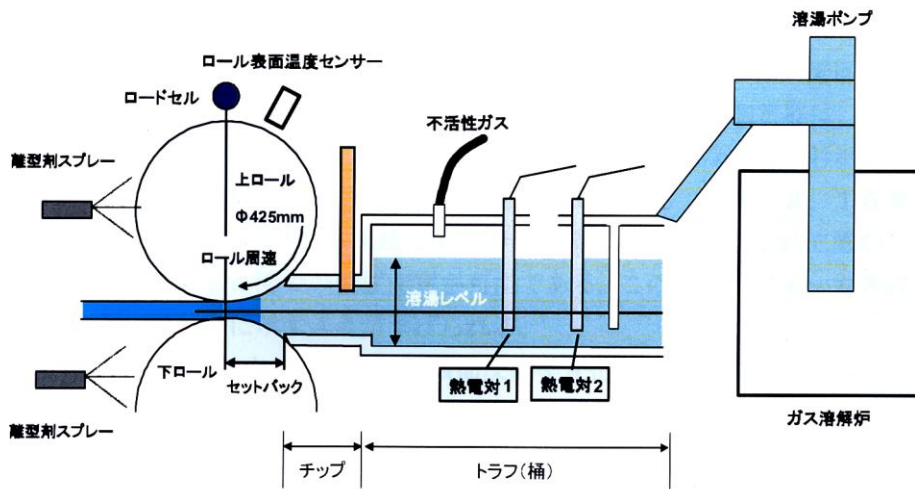


図 2. 1. 6-6 マグネシウム薄板鋳造法

(d)マグネシウムに関する研究開発の動向

マグネシウム合金は軽量性、循環型素材としての可能性から様々な部材への用途拡大が期待されており、国内をはじめ、欧米やアジア等においてもマグネシウム成形に係る研究開発が活発に進められている。最近の国内外の研究開発動向<sup>17) - 19)</sup>を表 2. 1. 6-1 および表 2. 1. 6-2 に整理した。

表 2. 1. 6-1 最近の国内の研究開発動向

「次世代耐熱マグネシウム合金の基盤技術開発(JST 委託事業、2006～2011 年、熊本・九州他の企業、公設試、大学等が参加)」では、KUMADAI マグネシウム合金の自動車等の輸送機器や産業機器の実用化を目指している。
2005 年に「茨城マグネシウムプロジェクト」が発足。茨城県を中心とした産学官による研究開発、事業化を実施。
Mg に関するサポイン事業(21 年度 4 件：鍛造 1, 鋳造 3、22 年度 7 件：鍛造 3, 鋳造 2, 金型 1, 他 1)

表2. 1. 6-2 最近の海外の研究開発動向

米国	2004年にマグネシウムに対する北アメリカ自動車戦略ビジョンである「Magnesium Vision 2020」において、必要とされる主な鍛造技術をまとめている。
欧州	仏・英・独他の工業会、中小企業、大学・研究機関等の構成により「MAGFORGE」プロジェクトを2006～2009年に実施。同PJは、自動車用部品を製造するためのMg鍛造プロセス等の開発。また、欧州9カ国37機関が参加した「SuperLIG HT-Car Project(2005～2009年)」においても、自動車部材用のMg成形技術開発が行われている。
韓国	2010年から8カ年計画で、政府基金による「車両のための超軽量化マグネシウム材料の開発」(予算US\$152M、30機関以上が参加、POSCO社がマネジメント担当)を実施中。
中国	Mg精錬は全世界の8割以上を占める。Mg素材、部品メーカー、大学・研究機関による応用技術開発について、国内の様々な地域で複数プロジェクトが立ち上がっている。青海塩湖以外にも、吉林大・長春応化研・一汽による吉林Mgイノバティブ戦略的提携、山西省中北大、奇瑞汽車他の提携、重慶市科技研他による重慶応用連携など多数。鉄道車両軽量化のためのMg部品製造基地も計画中。
その他	加・中・米コラボによる「Magnesium Front End R&D(2007年～)」においては、自動車部品のMg適用のための基盤、実用化技術の開発を進めており、フェイズI(実現技術の開発)を終了し、現在フェイズII(デモと実証)を進めている。

また、最近の東アジアにおけるマグネシウム合金に関する研究動向を知るために2007年10月に開催されたASMA2(2nd Asian Symposium on Magnesium Alloys)の研究発表内容について解析した。日・韓・中・台の4ヶ国から175件の発表あった。

研究対象の集計結果を図2. 1. 6-7に示した。 casting、 extrusion、 rolling、 forming、 and corrosionに関する研究が多く、鍛造に関するものは全体の4%であり、日本も含め非常に少ない。日本軽金属学会や日本塑性加工学会の講演会でもマグネシウムの鍛造に関する報告数は僅かであり、本プロジェクトの重要性が再認識される。

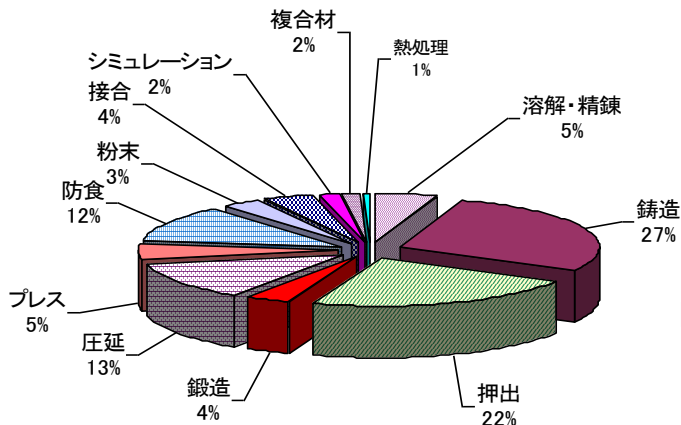


図2. 1. 6-7 日・韓・中・台におけるマグネシウム関係の研究分野

研究対象の合金は AZ31 が最も多く、AZ91、Y 含有合金が続いている。研究対象合金への添加元素は図 2. 1. 6-8 に示したように Ca または CaO(Ca 添加用)が最も多く、Zn、Y、Sr、Al、Zr、ミッシュメタル等が続いている。本プロジェクトでも研究対象合金の 1 つにしている Ca 添加合金への関心が各国とも高いことが解る。

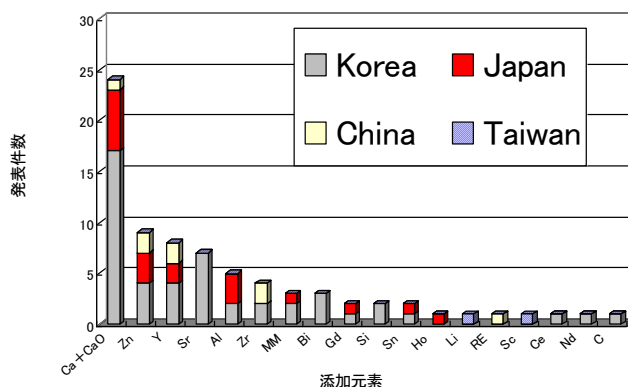


図 2. 1. 6-8 日・韓・中・台におけるマグネシウム合金研究対象元素分野込み率

#### (e)鍛造技術

##### 【水平連続鋳造】

鍛造用素材としては、F1 用ホイールの  $\phi 300\text{mm}$  から、小形部品用の  $\phi 50\text{mm}$  以下のものまで、各種径のビレットが必要になる。このうち、小径ビレットを鋳造する方法に水平連続鋳造法がある。

水平連続鋳造は中国の大学および研究所等で開発が進められているが、実用化には至っていない。マグネシウムの場合にはアルミニウムに比べ、酸化されやすく、酸化物が鋳片表面や内部に捕捉されやすいため、その対処策が課題になっているようである。

##### 【サーボプレス】

サーボプレスは成形中のスライド位置および速度を高精度で制御可能なため、ハイテンやステンレス鋼等の難加工性材料の成形に威力を発揮している<sup>20)</sup>。本プロジェクトでは、成形中の動的再結晶を利用して素材の結晶粒を微細にすることで、成形と同時に材質の作り込みが可能であることを実証した。

サーボプレスによる板成形（プレス、複合成形）に関する研究報告・特許出願は多数あるが、鍛造分野での報告は少ない。しかし、鍛造成形時のスライドモーションに関連した研究開発は各所で進められているものとみられ、今後、研究報告・特許出願は急増するものと思われる。サーボプレスを用いた成形技術はその利用技術（ソフト）が死命を制すると言われており<sup>21)</sup>、その権利化が重要となろう。

#### (f)鍛造周辺技術

##### 【潤滑剤】

マグネシウム鍛造用として市販されている潤滑剤は無いが、通常は  $\text{MoS}_2$ 、h-BN および

グラファイト等の固体潤滑剤が使われている。AZ31B を 300~400°C で後方押出試験やリング圧縮試験を行った例では MoS<sub>2</sub> が潤滑性に最も優れ、h-BN、グラファイトの順になっている<sup>2.2) - 2.3)</sup>。固体潤滑剤は高温度に耐えるが、鍛造後の製品表面に残ると腐食源となるので、無切削で使用される場合には注意を要する。

一方、鍛造温度の低温化に伴い、潤滑油系の研究も行われている。表 2. 1. 6-3 に示した潤滑剤の使用結果を図 2. 1. 6-9 に示す。ZK60 合金を対象に WC の金型を用いた 300°C でのリング圧縮試験では、鉱物油系の潤滑剤でも良好な潤滑性が得られている<sup>2.2)</sup>。

表 2. 1. 6-3 低温鍛造用に用いた潤滑剤の組成

Lubricant	Constituent
Mineral oil	Mineral oil: 100wt%
Alcohol	Mineral oil: 70wt%, Alcohol: 30wt%
Ester	Mineral oil: 70wt%, Ester: 30wt%
Phosphor EP	Mineral oil: 97wt%, Phosphor extreme pressure additive: 3wt%
Sulfur EP	Mineral oil: 95wt%, Sulfur extreme pressure additive: 5wt%
MoS <sub>2</sub>	MoS <sub>2</sub> : 1wt%, Grease: 99wt%

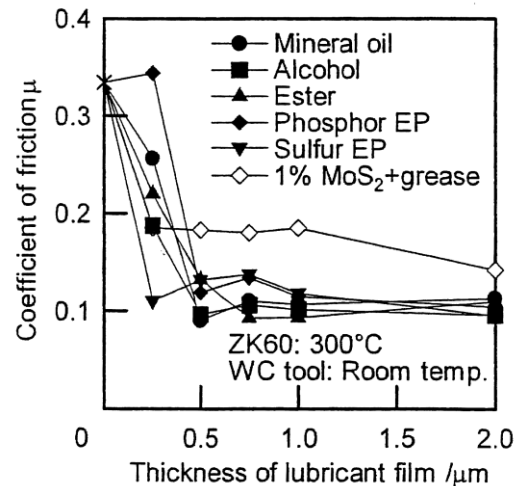


図 2. 1. 6-9 低温鍛造時の摩擦係数

### 【接合】

マグネシウムの接合には、マグネシウム同士の接合と Al 合金等の異種金属との接合する場合があります。同種合金の接合では TIG、MIG、レーザ、FSW 溶接が適用可能である。Al 合金と Mg 合金の接合では溶融法は金属間化合物が生成するため接合強度が低下する問題があり、FSW が有望である<sup>2.4) - 2.5)</sup>。

ノートパソコンの筐体用にマグネシウム板プレス成形し、裏側にマグネシウム製ネジをスポット溶接する方法も行われている。この場合、溶接した反対側の面(パソコンの表面側)に、溶接の痕跡が残るのが問題となる。溶接装置、スタッド形状、溶接条件の改良により、僅かに痕跡が残る程度にまで改良されており、今後の動向が注目される。

### (g) アルミニウム鍛工品の需要推移

マグネシウム鍛工品の特長は「軽量・高強度」であり、輸送機器等の軽量化に使用されることが多いと予想される。したがって、軽量化要請に対応してアルミニウム鍛工品が辿った経緯は、マグネシウム鍛工品の需要拡大推進に際しての指針の一つになる。

四輪乗用車一台当りのアルミニウム鍛工品使用量の推移を図 2. 1. 6-10 に示す<sup>2.6)、2.7)</sup>。1985 年頃ほぼゼロからスタートした使用量は増加し続け、1995 年に入って一次停滞したものの、2005 年には 4.0kg/台に到達し、現在に至っている。図にはアルミニウム鍛工品の単価を併記したが、鍛工品の需要拡大は単価低減と強い相関関係にあることが解る。アルミニウム鍛工品の需要拡大が進んだ理由として、①鍛造工程削減と材料歩留り向上、

②一貫生産によるコスト削減、③高強度合金の開発等が挙げられている<sup>28)</sup>。特に、アルミニウム鍛工品コストの50%が材料費であったため、表面および内部品質に優れた連続鋳造ビレットが開発され、従来の押出棒の代わりに鋳造ビレットを鍛造用素材として使用可能になったことが、鍛工品コスト低減に大きく寄与したとされている<sup>28)</sup>。

本プロジェクトにより、高強度のマグネシウム鍛工品を安価に製造するための基盤技術が確立されたので、今後各分野において、マグネシウム鍛工部材の需要拡大が期待できよう。

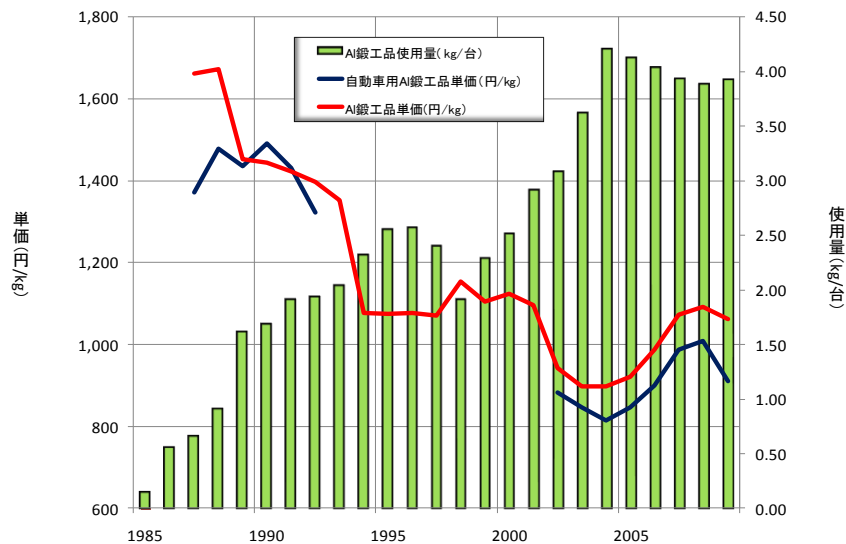


図2. 1. 6-10 乗用車1台当たりのアルミニウム鍛工品使用量と単価の推移  
(乗用車＝普通乗用車＋小型乗用車)

#### (h)マグネシウム鍛工品需要分野の動向

マグネシウム鍛工品の需要拡大が見込める分野としては、①現時点でアルミニウム鍛工品を使用しているか、②マグネシウム鍛工品を試用したことがある分野が有望である。これらの中から輸送機器（四輪自動車、二輪自動車、自転車）、レジャー（光学機器、釣り用リール）および今後の成長が期待されているロボット分野を選び、生産・輸出・輸入・販売等の動向を調査した。

##### 【四輪自動車】

我が国の四輪自動車生産台数<sup>29)</sup>は、15年以上に渡り1,000～1,200万台の生産を続けてきた。この間、乗用車は800万台から1,000万台へと伸び、トラックは200万台から100万台へと減少した（図2. 1. 6-11）。生産の主力である乗用車は、小型四輪車（排気量2,000CC以下）が減少し、普通乗用車および軽四輪車が増加していた（図2. 1. 6-12）。しかしながら、2009年は、リーマン・ショックの影響で、普通乗用車の輸出が450万台から250台へと激減し、生産台数の低下を招いた。2010年はいくぶん持ち直したものの数年前のレベルに留まっている。

一方、乗用車の輸入<sup>30)</sup>は年間約25万台で推移していたが、国内自動車メーカーは小型乗用車の国内生産を減らし、国内需要は海外工場からの輸入車で充足する動きをしており、今後は輸入車が増加するものとみられる（図2. 1. 6-13）。



四輪自動車の排ガス規制から、自動車各社はハイブリッド車（HEV）、プラグイン・ハイブリッド車（PHEV）及び電気自動車（BEV）の開発に力を注いでいる。ガソリン乗用車の燃費（km/L）は車両重量が大きく影響し（図2. 1. 6-14）<sup>31)</sup>、車両重量1%の低減で燃費が1%向上する（車重1,500kgの場合）。一方、ハイブリッド車の燃費は通常車の2倍以上と良好であるが、車体重量増加による燃費悪化は従来車と同様であり、車体軽減化の重要性は変わらない。

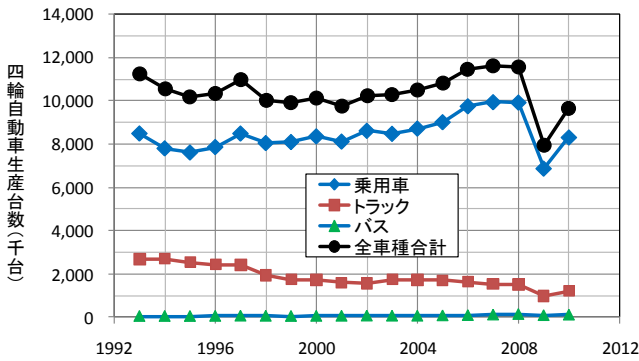


図2. 1. 6-11 四輪自動車生産台数の推移

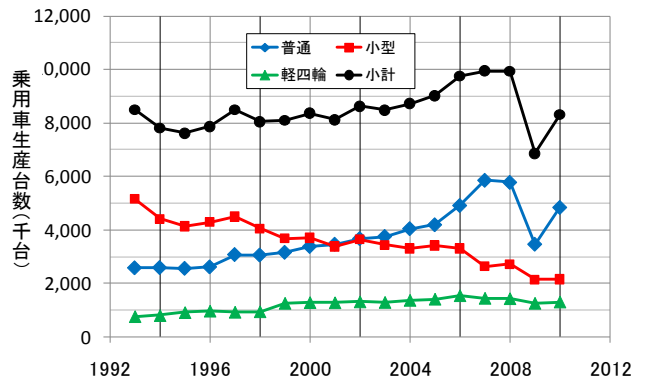


図2. 1. 6-12 四輪乗用車生産台数の推移

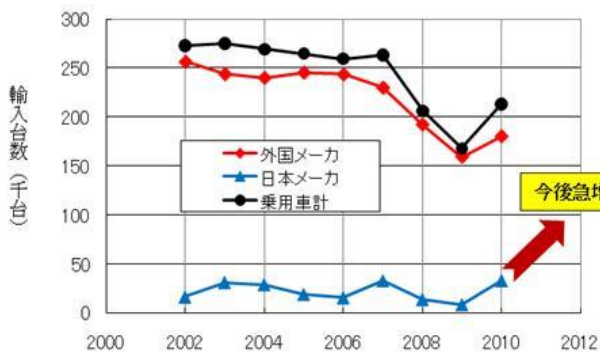


図2. 1. 6-13 輸入新車乗用車の販売台数推移

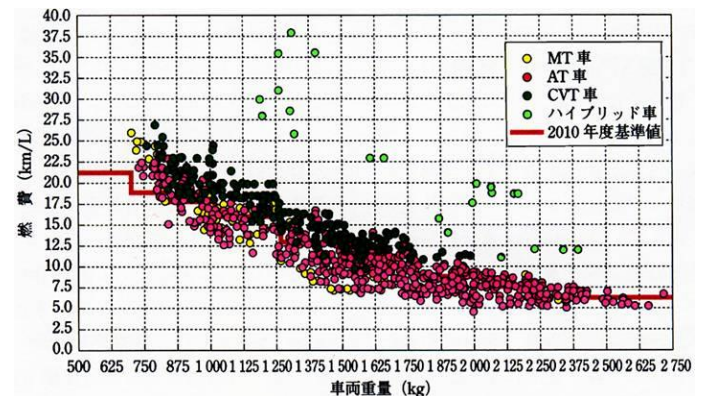


図2. 1. 6-14 ガソリン乗用車車両重量別燃費状況<sup>33)</sup>

各種駆動系の乗用車について、10年間で12万マイル走行時の燃費及び初期費用（自動車生産にかかる費用）の試算例を図2. 1. 6-15に示す<sup>32)</sup>。PHEV・BEV車はガソリン車・HEV車に較べると、車体重量軽減による燃費向上は少ないが、電池容量の減少・モータの小型化等による初期費用の軽減効果が非常に大きく、次世代自動車においても従来車以上に車体の軽量化が要求され

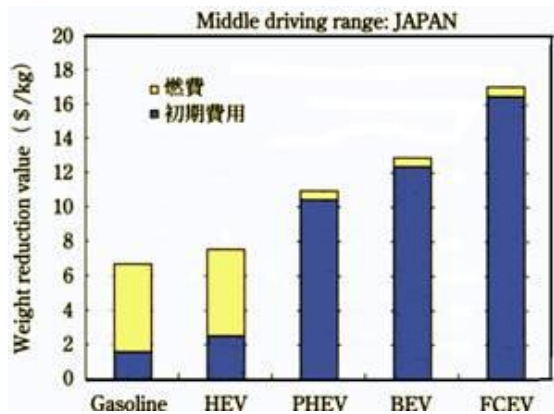


図2. 1. 6-15 各駆動系自動車の軽量化効果<sup>34)</sup>

るものと見られる。

自動車各社は「需要のあるところで生産」、「低価格の車は人件費の安い国で生産」をモットーに小型乗用車の国内生産を減らしており、今後の国内生産は HEV・PHEV・BEV 等の高性能車と軽四輪車等の小型軽量車への二極化が進むとみられる。図 2. 1. 6 - 1 6 に国内四輪自動車生産台数の実績および今後の予測例を示す<sup>3 3)</sup>。四輪自動車生産台数は 2010 年以降 900 万台で推移し、2020 年でも 1,000 万台程度と見ている。HEV 車の生産台数は年々増加し、2020 年には 420 万台（HEV 車比率 42%）に達するが、BEV 車は 20 万台強（BEV 車比率 2%）程度と見ている。2010 年 4 月に経済産業省から発表された「次世代自動車産業戦略 2010」での HEV・PHEV・BEV・CD（クリーンディーゼル）および燃料電池車の生産比率を図 2. 1. 6. 1 7 に示す。2020 年時点での HEV 車の比率は 20~30%、BEV 車は 15~20% としており、HEV 車の比率は前述の資料よりいくぶん低め、BEV 車の比率はかなり大きな値となっている。BEV 車の最大の課題は電池（性能・コスト）であり、電池の開発状況によって BEV 車の普及率は左右されるだろう。

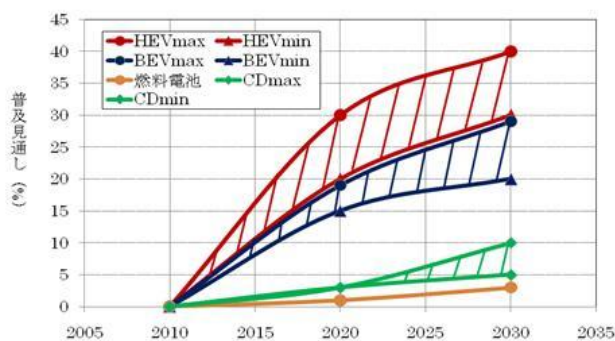
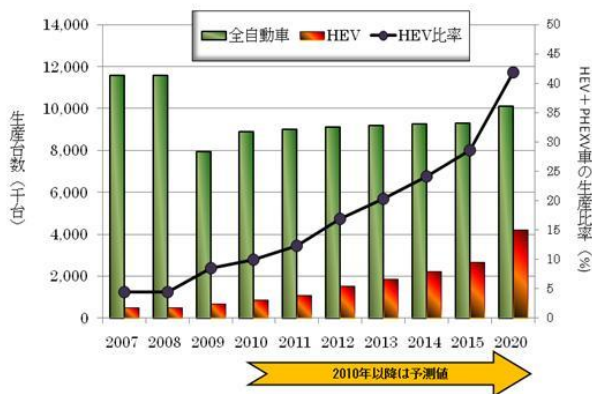


図 2. 1. 6 - 1 6 国内四輪自動車および HEV 車の生産実績と予測

図 2. 1. 6 - 1 7 HEV および BEV 車生産比率の予測（政府目標）

### 【二輪自動車】

二輪自動車の生産台数推移を図 2. 1. 6 - 1 8<sup>2 9)</sup> に示す。原付第一種（排気量 50cc 以下）、原付二種（50cc 越え～125cc 以下）および軽二輪（125cc 越え～250cc 以下）の生産台数は減少の一途をたどり、唯一増加基調にあった小型二輪車（250cc 越え）も 2006 年をピークに減少に転じた。リーマン・ショック後の回復は鈍いものの 35 万台の生産が続いている。二輪自動車の輸出比率（輸出台数／生産台数）は車種により差があり、50cc 以下は 20% 以下、250cc 越えは 90% となっている（図 2. 1. 6 - 1 9）<sup>2 9)</sup>。一方、輸入は、2002 年頃から 50cc 以下の車種で急増し、2007 年以降いくぶん減少したものの、依然高水準が続いている（図 2. 1. 6 - 2 0）<sup>3 4)</sup>。50cc 越え～250cc 以下の車種でも類似の傾向を示している。250cc 越えの車種は輸入が少なく、変動もあまりない。

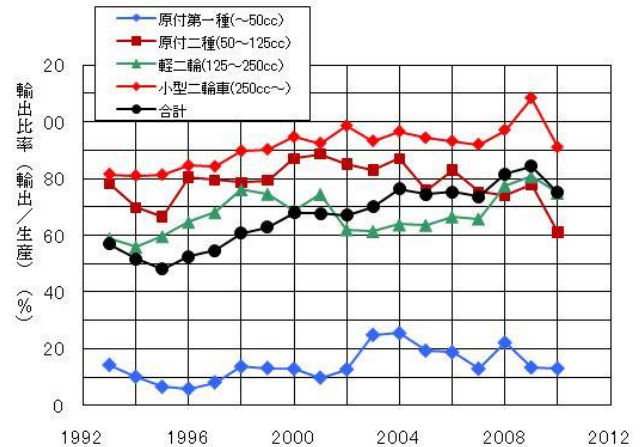
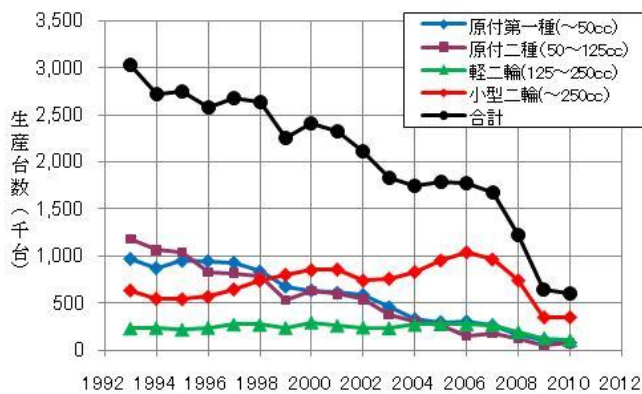


図2. 1. 6-18 二輪自動車の生産台数推移 (2010年は1~11月分)

図2. 1. 6-19 二輪自動車の輸出比率

二輪自動車は小排気量車種を海外で生産し、国内需要分は輸入している。国内生産は大排気量の車種にシフトしており、しかもその70~90%が輸出に回っている。最近では250cc越の車種でも、国内生産を海外生産に移す動きがでてきている。

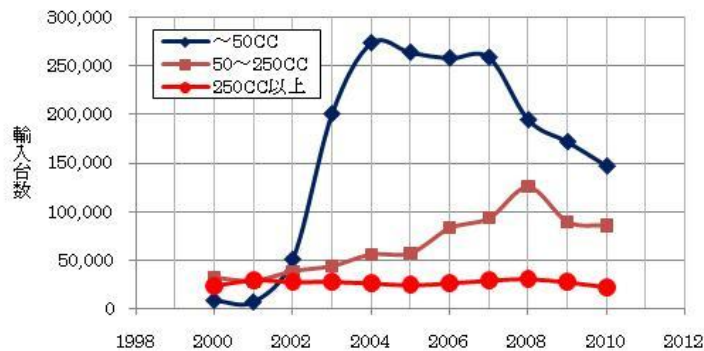


図2. 1. 6-20 二輪自動車の輸入台数の推移

### 【自転車】

完成車の生産・輸出・輸入推移<sup>26)、34)、35)</sup>を図2. 1. 6-21に示す。生産台数は年々減少し続けたのに対し、輸入（輸入先：中国が96%）は増加し、国内市場（＝生産＋輸入）の大部分は輸入品が占める事となった。一方、輸出は増加しているが、この大部分は中古自転車で、東南アジアやアフリカ向けである。

完成車の車種別生産台数の推移<sup>26)、34)、35)</sup>を図2. 1. 6-22に示す。生産台数が多かった軽快車・ミニサイクル・子供および幼児車の減少が続き、自転車全体では減少傾向が続いている。特殊車（スポーツ車が含まれる）は横ばいが続き、生産台数が少ないMTBは変動が大きい。唯一、電動アシスト車のみが年々生産台数を伸ばしており、最近では軽快車の生産台数に近づきつつある。

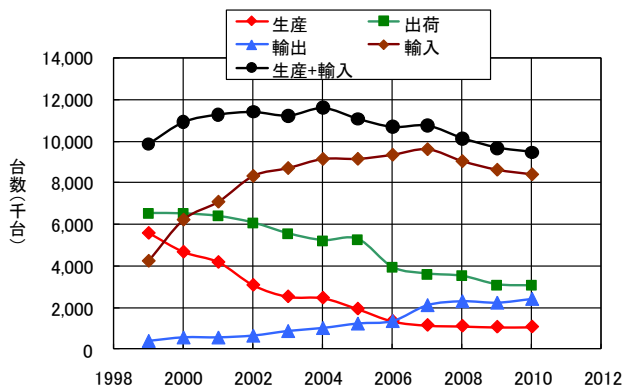


図2. 1. 6-21 自転車の生産・出荷・輸出・輸入台数の推移

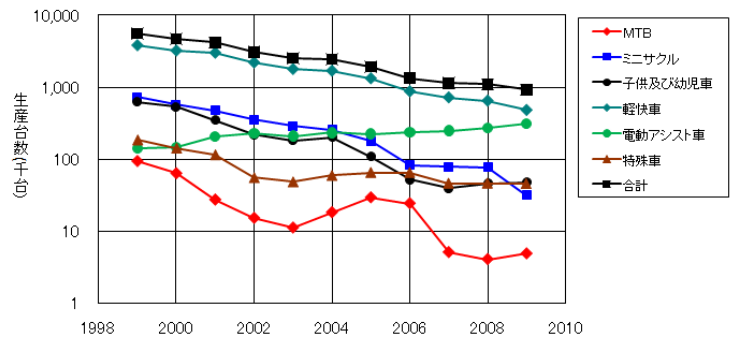


図2. 1. 6-22 自転車の種類別生産台数の推移

自転車業界の市場規模の推移<sup>26)</sup>、<sup>34)</sup>、<sup>35)</sup>を図2. 1. 6-23に示す。2010年では、完成車の生産が約400億円であるのに対し、部品関係は2倍の800億円に達している。この傾向はここ10年近く続いており、部品の輸出が大きな柱となっていることが解る。2010年の輸出部品名にはディレーラー(変速装置)、ブレーキ・部品に次いで、マグネシウム鍛造部品の採用例があるギアクランク等も含まれている(図2. 1. 6-24)。主な輸出先は台湾・ドイツ・オランダ・アメリカ等の先進国となっている。

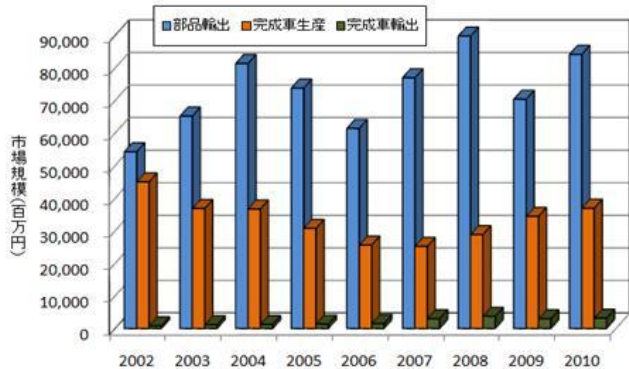


図2. 1. 6-23 自動車の部品および完成車の市場規模

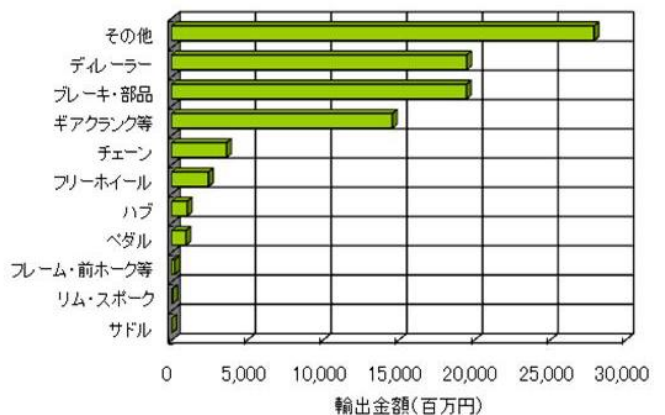


図2. 1. 6-24 輸出部品の明細

### 【ロボット】

ロボットは産業用ロボットと民生用ロボットに大別できるが、現時点で市場が形成されているのは産業用ロボットのみである。産業用ロボットの種類別出荷台数を図2. 1. 6-25<sup>36)</sup>に示す。2005年から約9万台で推移していた生産台数は、2009年には3.5万台にまで激減したが、2010年には従来のレベルに回復した。

産業用ロボットは組立、溶接、CR(クリーンルーム)内作業、マテハン(材料搬送)等に使用されているが、それらの輸出比率(輸出金額/出荷金額)の推移を図2. 1. 6-26<sup>38)</sup>に示す。各用途とも輸出比率が上昇傾向にあり、2010年では平均で75%に達している。

世界の産業用ロボットの稼働台数を見ると、日本での稼働台数は飽和に達したが、世界での稼働台数は増加を続けている。特に中国は一部で導入が始まったばかりであり、ロボットメーカーは今後の市場拡大が期待できるとみている（図2. 1. 6-27）<sup>36)</sup>。

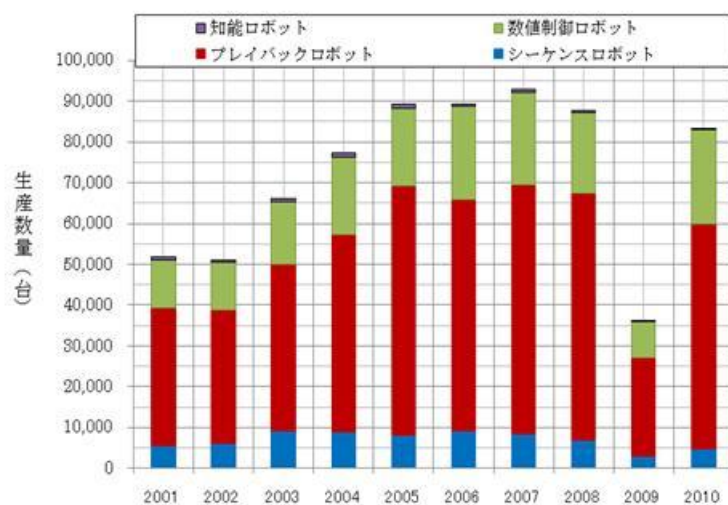


図2. 1. 6-25 産業用ロボットの生産台数の推移

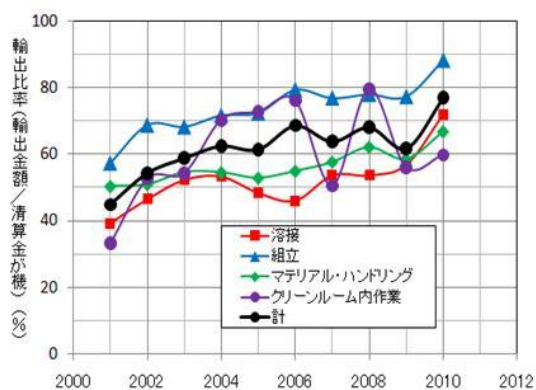


図2. 1. 6-26 各種ロボットの輸出比率の推移

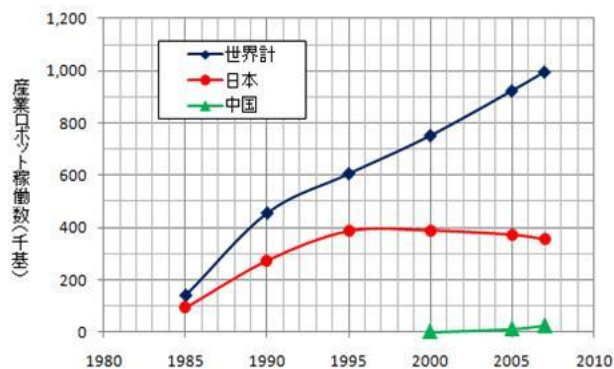


図2. 1. 6-27 日本・中国・世界の産業用ロボット稼働数

### 【光学機器】

光学機器は携帯性が重視されるため、カメラ筐体はマグネシウムのダイキャスト品が、また一部の望遠レンズにはマグネシウム鍛造品が使用されている。

一眼レフタイプ（レンズ交換式）デジタルカメラの生産数量および単価の推移を図2. 1. 6-28<sup>26)、37)</sup>に示す。国内生産は年々伸び続け、2009年には550万台に達した。また海外（国内企業の海外工場）生産も国内以上の伸びを示していたが、2009年は420万台に留まった。

一眼レフ用交換レンズの生産は、国内が400万本前後で推移していたのに対し、海外生産は急増し、2009年には1,200万本を超えた（図2. 1. 6-29）<sup>26)、37)</sup>。

望遠鏡には双眼鏡、隻眼鏡、天体観測用機器等があるが、生産数量が最も多い双眼鏡に

ついて見ると、2009年の生産・輸出・輸入の数量はそれぞれ12万個、12万個、198万個となっており、国内生産品はほぼ輸出に廻り、国内市場は輸入品に独占されている。

デジタルカメラ・一眼レフ用交換レンズ・双眼鏡は、程度の差はあるものの、大量生産の低価格品は海外工場で生産し、日本へも含めて全世界へ輸出されている。一方、国内生産は少量生産の高価格品のみが残っていると見られる。

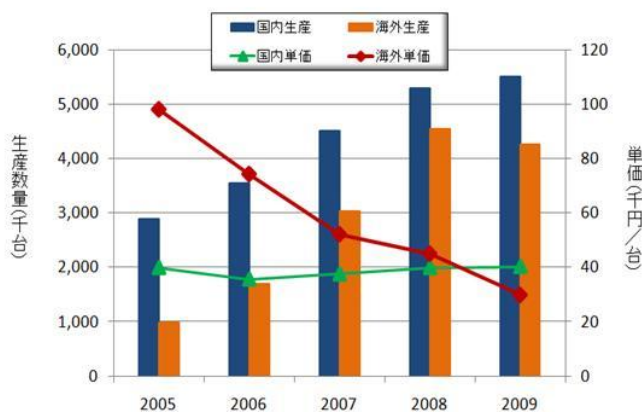


図2.1.6-28 一眼レフタイプデジタルカメラ生産数の推移

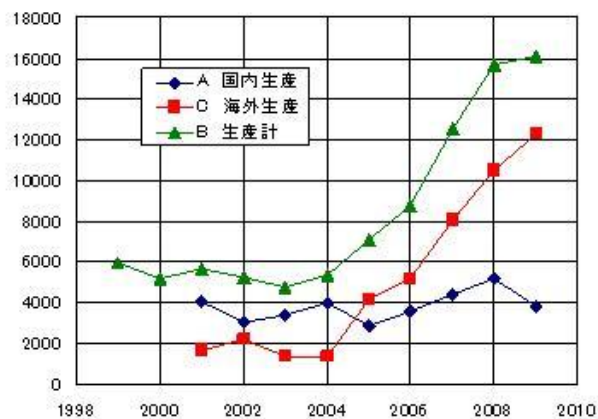


図2.1.6-29 一眼レフ用交換レンズの生産本数推移

### 【釣用リール】

釣り用リールの輸出・輸入数量の推移を図2.1.6-32<sup>38)</sup>に示す。2005年1,500万個あった輸出は年々減少し、最近では500万個程度で推移している。一方、輸入はほぼ500万個のレベルが続いている。生産数量の実数は不明だが、少なくとも500万個はあるものとみられる。

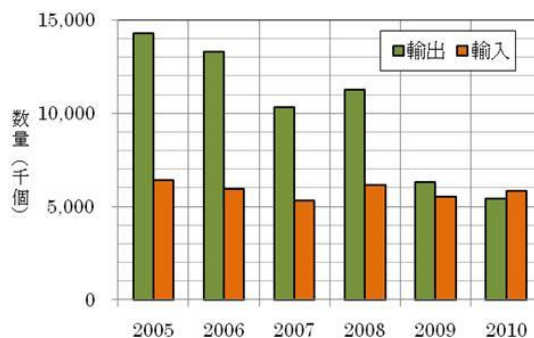


図2.1.6-30 釣り用リールの輸入・輸出数量の推移

これら、マグネシウム鍛造部材の需要が期待される各分野の生産動向をまとめて図2.1.6-31に示した。

## Mg鍛造部材の需要が期待される業界の生産動向

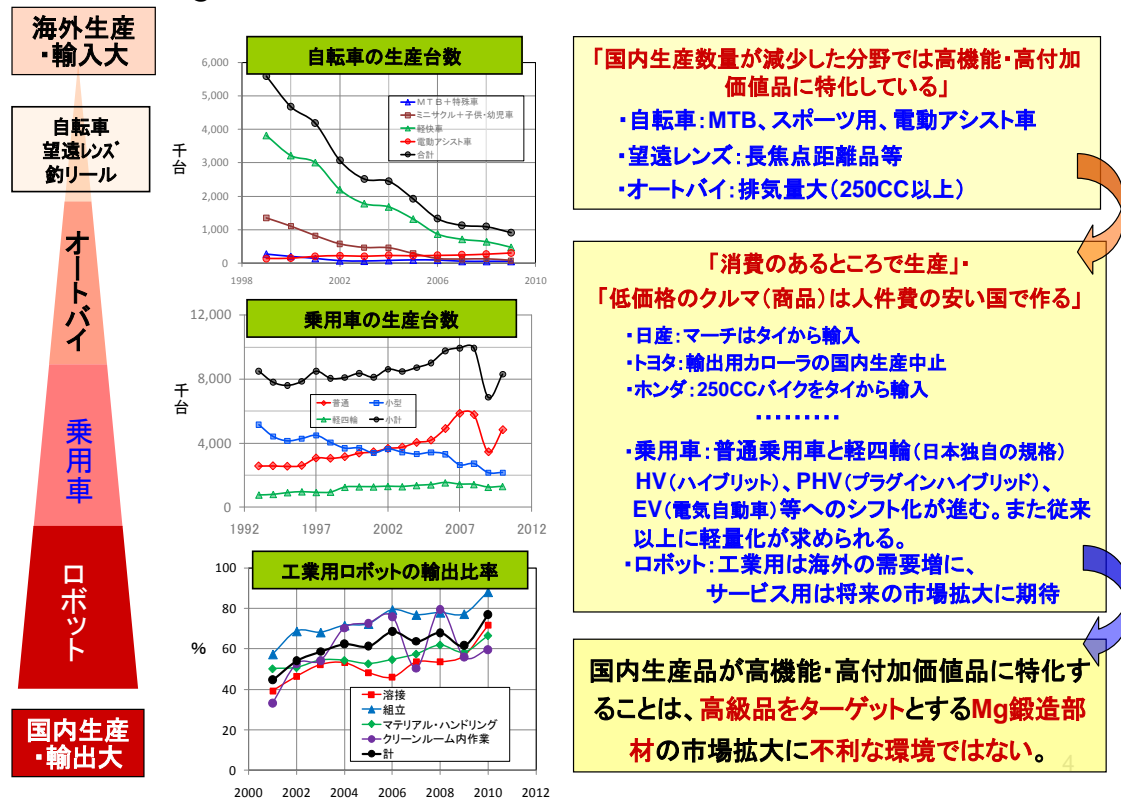


図2. 1. 6-3.1 マグネシウム鍛造部材の需要が期待される業界の生産動向

### (i) マグネシウム鍛造部材の需要予測

前記の各分野についてマグネシウム鍛造部材の需要を以下の手順で予測した。まず、各分野の対象製品について国内生産数量を定め、次いで、その製品に組み込まれているアルミニウム部品の数量・単重等々からアルミニウム鍛工品の重量を求め、この値にマグネシウム鍛造部材の占有率(=マグネシウム鍛造材/アルミニウム鍛造部材)を乗じてマグネシウム鍛造部材の需要量を算出した。

四輪乗用車の販売台数・価格<sup>2)9)</sup>、アルミニウムホイール中の鍛造ホイールの比率<sup>4)0)</sup>、厚生労働省の国民生活意識調査、国税庁の所得金額と所帯数等の統計等々を基に、マグネシウム鍛造部材を採用した製品のユーザ層は次の3つに分けられるとし、それぞれの占有率を定めた。

Case A (占有率1%) : 価格にはこだわらないマニアックなユーザ層

Case B (占有率5%) : 価格よりも性能・機能を重視するユーザ層

Case C (占有率10%) : 機能・性能に対する価格アップを容認するユーザ層

占有率がどの程度なるかは、対象部品の技術的な難易度、製造コスト並びに想定時期によって異なるが、ここでは今後10年程度を目処にCase C(占有率10%)を選んだ。

表2. 1. 6-4に、各分野の対象製品・部品名・対象部品の年間生産量および鍛造用マグネシウムビレット需要予測の算出結果を示した。なお、マグネシウム鍛造部品と素

材ビレット間の歩留まりは80%とした。四輪自動車がホイール・アーム類・ピストン・エンジンマウントブラケットで2,280トン、二輪自動車はホイール・アーム類・ピストンで490トン、自転車はステム・ギアクランクで90トン、光学機器の望遠レンズ筐体で390トン、レジャー分野では釣り用リールで20トン、合計3,270トンとなった。なおロボットについては、現在の工業用ロボットは、鍛造品が全く使われていないことからここでは0とした。

表2. 1. 6-4 マグネシウム鍛造部材の需要

分野	対象	部品例	対象製品数量	ビレット重量(トン)	備考
四輪自動車	スポーツ車、中大型セダン、SUV等	ホイール、エンジンマウントブラケット、アーム類、ピストン	3.7万台(ホイール) 279万台(アーム類) 75万台(ピストン) 465万台(エンジンマウントブラケット)	(170) (1,640) (100) (370) 2,280	AI鍛造部品装着車
二輪自動車	小型2輪車(250CC以上)	アッパーブラケット、ローアブラケット、ピストン	30万台	490	AI鍛造部品装着車
自転車	スポーツ車、MTB、輸出部品	ステム ギアクランク	26万台 150万組	90	完成車生産台数と輸出品を含む。
ロボット*	工業用	上腕アーム部品等	9万台	-	現在は鋳鉄またはAIの鋳造品を使用。鍛造品は使用していない。
光学機器	一眼レフ用交換レンズ	鏡筒	80万本	390	重量800g以上の望遠レンズ
レジャー	釣り用リール	リール	100万個	20	輸出用のAI鍛造品装着
計	【対象製品数量の10%がMg鍛造部材使用製品とした】			3,270	

\*半導体用等では高速化・位置決め精度向上が課題となっている。Mgの比強度大、制振性等の効果が確認されれば、Mg鍛造部材の使用拡大につながる可能性大。

## 2. 1. 7 成果の意義

本研究開発成果の意義は、次のようになる。

### ① 新しい技術領域の開拓

動的再結晶による組織制御と成形を同時に行なう鍛造技術という、組織制御技術と塑性加工技術を融合した新しいものづくり技術を開発した。

### ② 成果の水準

サーボプレスを利用して、マグネシウム合金連続鍛造材から一工程で鍛造部品を作製した例はまだなく、本委託事業の成果は世界初である。また、マグネシウム合金連続鍛造材の鍛造データベース構築は世界初の成果である。

### ③ 成果の優位性

結晶粒微細化を行ないつつ成形を行なうことで、従来技術による鍛造部材よりも優れた特性を有する部材を作製することが可能である。またサーボプレスを使用することで、従来のメカプレスによる鍛造よりも省工程化、部材の高精度化が可能である。以上の点で、本研究成果は従来技術よりも優位性を持つ。

### ④ 成果の汎用性



組織制御と成形を同時に行なう鍛造技術は、汎用のメカプレス機への拡張が可能であるとの見通しを得た。すなわち、本研究で開発された新規鍛造プロセスは汎用性を有すると期待される。

### 2. 1. 8 最終目標の達成度

本研究課題の最終目標は表2. 1. 8-1の通りである。

#### 【最終目標】

鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部品特性の関連性を整理し、鍛造部材の評価方法を確立する。

表2. 1. 8-1 最終目標の達成状況

	達成度	根拠	今後の課題
鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部品特性の関連性を整理	○	鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部品特性の関連性を整理し、鍛造データベースを構築した。	データの追加によるデータベースの充実化。
鍛造部材の評価方法を確立する	○	マグネシウム合金鍛造部材の評価を行なう場合に留意すべき点を明らかにした。	

◎:最終目標を超えている ○:最終目標を達成 ×:最終目標未達成

### 2. 1. 9 参考文献

#### (2. 1. 3 マグネシウム合金連続鍛造材を対象とした鍛造技術の構築)

- 1) N.J.Petch, Phil. Mag., **3**(1958), 1089
- 2) W.J. Kim, J.D. Park and W.Y. Kim, J. Alloys and Compounds, **460**(2008), 289-293
- 3) 辛島誠一：金属・合金の強度、日本金属学会（1972）、110
- 4) 佐藤雅彦、加治屋強、八代利之、軽金属, **11**（2004）、465
- 5) 例えば、丸山公一編著、中島英次著：高温強度の材料科学、内田老鶴圃（1997）、22
- 6) F.J.Humphreys and M.Harherly, “Recrystallization and Related Annealing Phenomena”, Elsevier(1995), 373
- 7) M. Mabuchi, H. Iwasaki, K. Yanase and K. Higashi, Scripta Mater., **36**(1997), 681-686

#### (2. 1. 4 マグネシウム合金鍛造部材の評価方法の確立)

- 1) T.Mukai et al., Scripta Materialia., **45**(2001), 89

## (2. 1. 6 マグネシウム合金の素材、鍛造技術、周辺技術に関する基本情報)

- 1) 日本マグネシウム協会資料から
- 2) 特開 2000-104129
- 3) 清水ら：軽金属学会第 108 回春期大会講演概集,(2005),1
- 4) 三協立山アルミ(株)カタログより
- 5) 柳本茂：軽金属,35(197799),605
- 6) 特開平 05-305380
- 7) B.S.You, Y.M.Kim, C.D.Yim, S.S.Park, B.S.You : ASMA2(2nd Asian Symposium on Magnesium Alloys),(2007),96
- 8) W.J.Kim et al. : ASMA2,(2007),366
- 9) 宇都宮裕ほか：第 56 回塑性加工連合講演会講演論文集,(2005),9
- 10) 向井敏司ほか：第 58 回塑性加工連合講演会講演論文集,(2007),257
- 11) 村井勉：第 251 回塑性加工シンポジウム,(2006),15
- 12) D.J.Yoon, E.Z.Kim, S.J.Lim : ASMA2,(2007)、370
- 13) 杉本文、中浦祐典、渡部晶：軽金属学会第 111 回秋期大会講演概要,(2006),203
- 14) Magnesium : 35(2006),1
- 15) 杉本文、中浦祐典、渡部晶：軽金属学会第 113 回秋期大会講演概要,(2007),143
- 16) W.J.Park, I.H.Jung, W.Bang, I.J.Kim, H.J.Sung, D.Choo, S.Ahn, W/J.Park : ASMA2,(2007),104
- 17) 中小企業庁 HP
- 18) 各プロジェクト HP
- 19) マグネシウム誌(日本マグネシウム協会発行)
- 20) 菅沼俊治：素形材,49 (2008)10,12
- 21) 西村尚：第 269 回塑性加工シンポジウム,(2008),\*\*\*
- 22) 高野ほか：新潟県工業技術研究書報告,30(2001),21
- 23) 土肥ほか：富山県工業技術センター研究報告書,13(1999),20
- 24) Yuji Sakai et al. : ASMA2,(2007),256
- 25) Taiki : Morishige et al. : ASMA2,(2007),254
- 26) 経済産業省：機械統計
- 27) 経済産業省：鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計
- 28) 櫻井久之：第 252 回塑性加工シンポジウム,(2006),1
- 29) (社)日本自動車工業会データベース
- 30) 日本自動車輸入組合データベース
- 31) 国土交通省：自動車燃費一覧、平成 22 年 3 月
- 32) 栗山幸平ら：自動車技術,4(2011)11,10
- 33) 新自動車部品マーケティング便覧、富士キメラ総研(2010,5)
- 34) 財務省：貿易統計
- 35) (財)自転車産業振興協会資料
- 36) (社)ロボット工業会データベース
- 37) (社)カメラ映像機器工業会データベース

- 38) ジャフト・ニュース：(社)日本釣用品工業会、第 50,52,54 号
- 39) <http://kurumart.jp/ranking/back/total2009.html>
- 40) (社)日本アルミウニム協会 ホイール委員会資料

## 2. 2 研究開発項目②「マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構との関連性の解明」

本研究開発項目の目的は、現状のマグネシウムビレット等を材料として高信頼性マグネシウム合金鍛造部材を創製するために必要な基盤技術を開発することである。図2. 2-1に、研究開発の全体概要を示す。

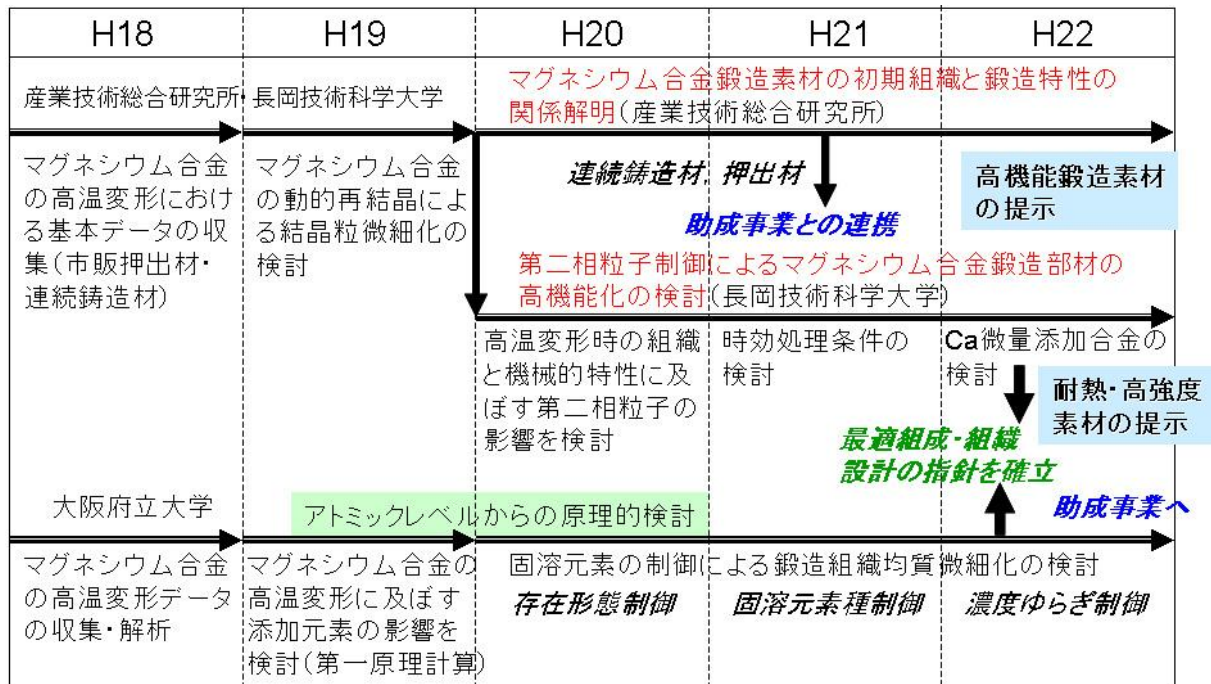


図2. 2-1 研究開発の全体概要

「最終目標」は、「鍛造用素材の組織の結晶粒子と変形機構との関係についてデータベース化を進め、鍛造加工マップとして整備し、鍛造温度低温化技術を開発するとともに、実用化レベルの部材として170MPa (10<sup>7</sup>回)の疲労強度を持つ構造用マグネシウム鍛造部材の最適な鍛造加工手順を導出するための鍛造組織形成技術の基盤技術を構築する」と設定した。目標達成のため、次の課題について研究開発を行なった。

- ②- (1) 鍛造温度低温化技術の開発
- ②- (2) 高疲労強度マグネシウム鍛造部材創生のための基盤技術開発
- ②- (3) 鍛造加工マップの構築

### 2. 2. 1 鍛造温度低温化技術の開発(研究開発項目②- (1))

アルミニウム合金などでは冷間鍛造が行なわれているが、マグネシウム合金の場合は冷間成形性が劣るため、一般には熱間鍛造が行なわれる。マグネシウム合金の通常の鍛造温度は400℃位であるが、研究開発項目①で示したように本プロジェクトにおいては、300℃でマグネシウム合金連続鍛造材を鍛造する技術を開発した。しかし、鍛造温度をさらに下げることが出来れば、金型寿命の向上、液体潤滑剤の使用が可能になるなど、マグネシウム合金鍛造の可能性がさらに広がると期待される。そこで本研究開発では、マグネシウ

ム合金連続鋳造材の 250℃以下での鍛造について検討した。

マグネシウム合金の鍛造温度低温化のためには、鍛造素材の結晶粒微細化が重要となる。そこで本プロジェクトでは、マグネシウム合金の高温変形時の結晶粒微細化に寄与する動的再結晶挙動に関する基礎的研究を大学に再委託した。再委託内容は次の通りである。

研究項目	再委託先	研究テーマ	研究内容
②-(1)a(ア)	大阪府立大学	鍛造素材の組成及び微細組織と鍛造加工性の関係解明	マグネシウム合金の動的再結晶に及ぼす合金元素の効果を整理。
②-(1)b(ア)	長岡技術科学大学	鍛造素材及び鍛造部材の第二相粒子による高機能化の検討	AZ 系マグネシウム合金の高温変形時の動的再結晶挙動の解析。

大学への再委託研究の結果を参照して、プロジェクト集中研（産業技術総合研究所、素形材センター）において、マグネシウム合金連続鋳造材の 250℃以下での鍛造について検討した。図 2. 2. 1-1 に、各研究テーマの関連をまとめた。

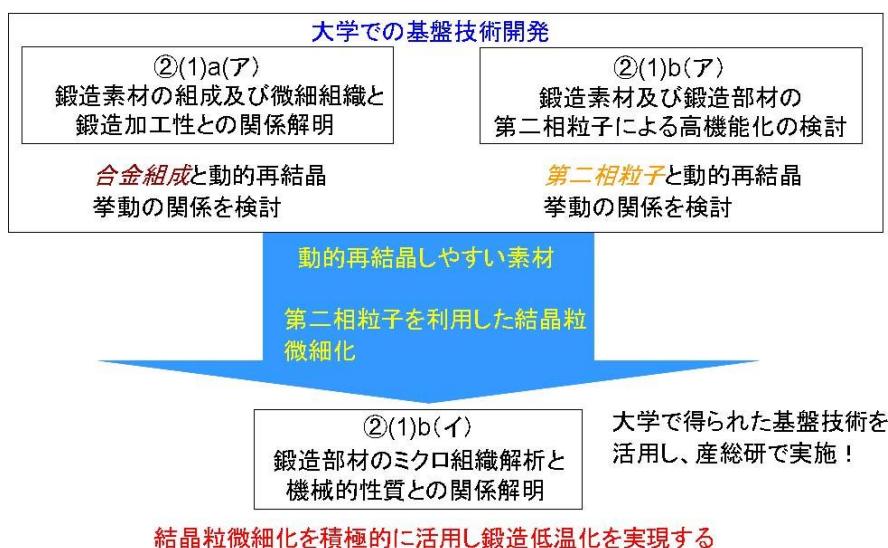


図 2. 2. 1-1 各研究テーマの関連

### 2. 2. 1. 1 鍛造素材の組成及び微細組織と鍛造加工性の関係解明

#### (研究開発項目②-(1)a(ア))

マグネシウム合金の動的再結晶挙動は Z パラメータ<sup>1)</sup>により整理可能なことが報告されている<sup>2)-6)</sup>。Z パラメータ (Zener-Hollomon パラメータ) とは、温度とひずみ速度の互換性を表す温度補償ひずみ速度で、 $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$  という式で表される。ここで  $\dot{\epsilon}$  はひずみ速度、 $Q$  は塑性変形の活性化エネルギー、 $R$  は気体定数、 $T$  は絶対温度で表示した試験温度である。

高温圧縮試験により動的再結晶を起こさせた試料について、動的再結晶粒径を決定した。試験条件は温度 300℃、ひずみ速度  $1 \times 10^{-4}$  で、ひずみ 1.0 まで変形した。結晶粒径は後方

散乱電子線回折法より求めた結晶分布より決定した。すなわち、結晶粒径分布に明確なピークがある場合、そのピークを示す粒径を動的再結晶粒径と定義した。一方、明確なピークがみられない場合には、分布領域両側の接線の交点位置の粒径を動的再結晶粒径と定義した。図 2. 2. 1. 1-1 に、各合金における動的再結晶粒径  $d_{rec}$  と  $Z$  パラメータの関係を示す。

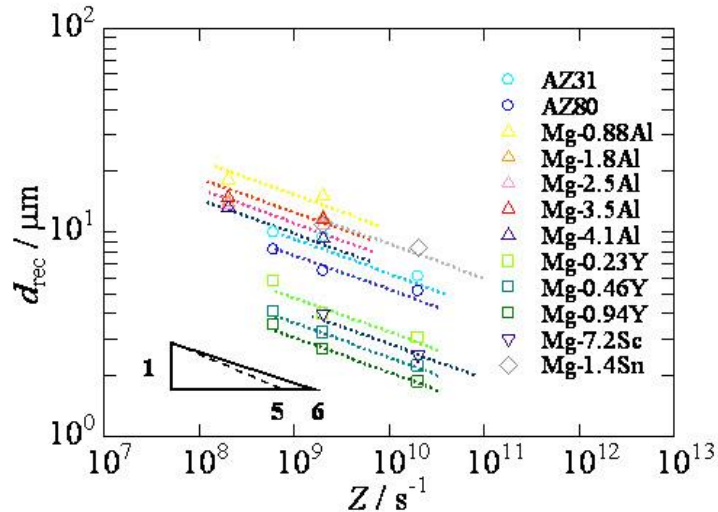


図 2. 2. 1. 1-1 マグネシウム合金の動的再結晶粒径と  $Z$  パラメータの関係

いずれの合金においても  $d_{rec}$  は  $Z$  の値が大きくなるほど小さくなることから、そこで  $Z$  と再結晶粒との間には、次式の関係が成り立つと考えられる。

$$Zd_{rec}^m = A \quad 2. 2. 1. 1-1$$

また、図 2. 2. 1. 1-1 より、いずれの合金においても、 $m$  は 5~6 の値を示すことが分かる。

これまでの研究において、動的再結晶粒径と積層欠陥エネルギーの間には相関があることがわかっている。そこで、同一  $Z$  に対する動的再結晶粒径の積層欠陥エネルギー依存性を調べた。図 2. 2. 1. 1-2 にその結果を示す。

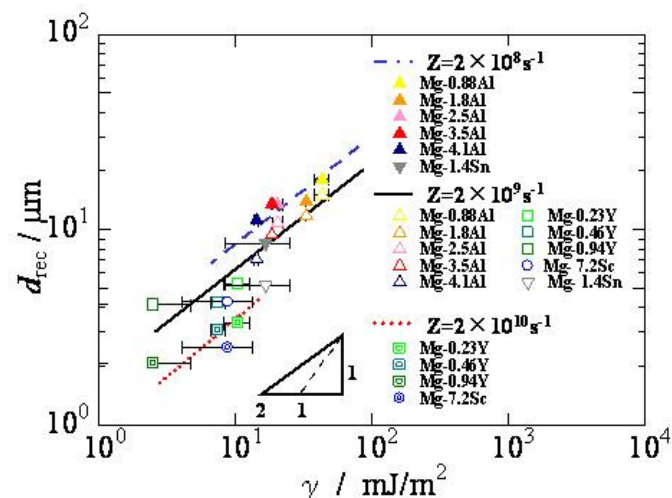


図 2. 2. 1. 1-2 同一  $Z$  に対する動的再結晶粒径の積層欠陥エネルギー依存性

いずれの  $Z$  値においても積層欠陥エネルギーの増加にともない  $d_{rec}$  が大きくなることが分かり、 $Z$  と  $d_{rec}$  との間には、次式の関係が成り立つと考えられる。

$$d_{rec}^n / \lambda = A' \quad 2.2.1.1-2$$

図 2.2.1.1-2 より、いずれの  $Z$  値においても  $n$  は 1~2 の値を示すことが分かる。すなわち、動的再結晶粒径は積層欠陥エネルギーに依存することが明らかになった。

2.2.1.1-1 式、2.2.1.1-2 式より、動的再結晶粒径は以下の式により記述できる。

$$d_{rec} = AZ^{-\frac{1}{m}} \gamma^{\frac{1}{n}} \quad 2.2.1.1-3$$

さらに、図 2.2.1-1 より  $m=5$ 、図 2.2.1-2 より  $n=5/3$  とすると、2.2.1.1-3) 式は以下のように表される。

$$d_{rec} = A \left( \frac{Z}{\gamma^3} \right)^{\frac{1}{5}} \quad 2.2.1.1-4$$

このような規格化を行った結果を図 2.2.1.1-3 に示す。規格化の結果、いずれの合金においてもほぼ単一の直線で表されることがわかった。

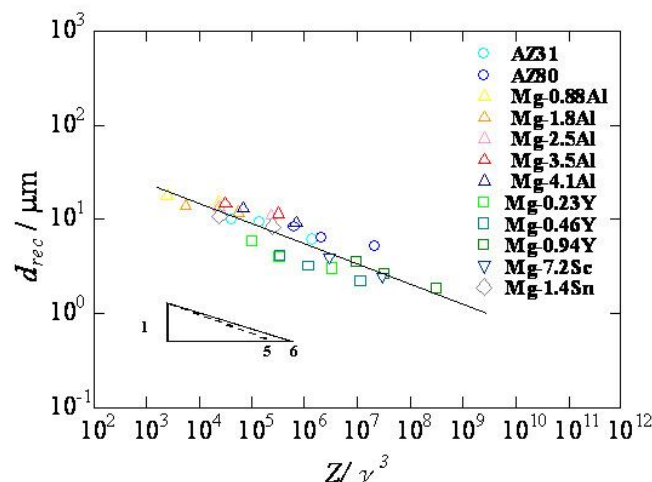


図 2.2.1.1-3 積層欠陥エネルギーを用いた規格化プロット

以上の結果から、固溶状態で積層欠陥エネルギーを低下させる元素をマグネシウムに添加すると、動的再結晶粒径は微細化することが示された。そこで、第一原理計算によって代表的な元素に対する積層欠陥エネルギーの濃度依存性を求めた。その結果を図 2.2.1.1-4 に示す。これにより、溶質元素種により積層欠陥エネルギーの濃度依存性は大きく異なることがわかる。例えば、La は積層欠陥エネルギーを最も急激に低下させるが、固溶量が非常に少ないため、最少の積層欠陥エネルギーでは他の元素に及ばない。一方、Al は積層欠陥エネルギーの低下は非常に緩やかであるが、その固溶量が非常に大きいため、多量の添加により積層欠陥エネルギーを大幅に低下することが可能となる。しかし、積層欠陥エネルギーを低下させる元素の多くは毒性のある (Tl, Pb, Bi) あるいは非常に高価な元素 (Sc, In, Y) であり、添加が有望な元素としては Al と Sn であると思われる。これまでに記述した結果は、世界で初めて本プロジェクトで得られたものである。

また、本研究の試作鍛造で用いた AZ91(Mg-9%Al-1%Zn) は、通常鍛造素材に用いられる AZ31(Mg-3%Al-1%Zn)や AZ61(Mg-6%Al-1%Zn)よりも結晶粒微細化という点では有利であると考えられ、材料選択の妥当性が裏付けられた。

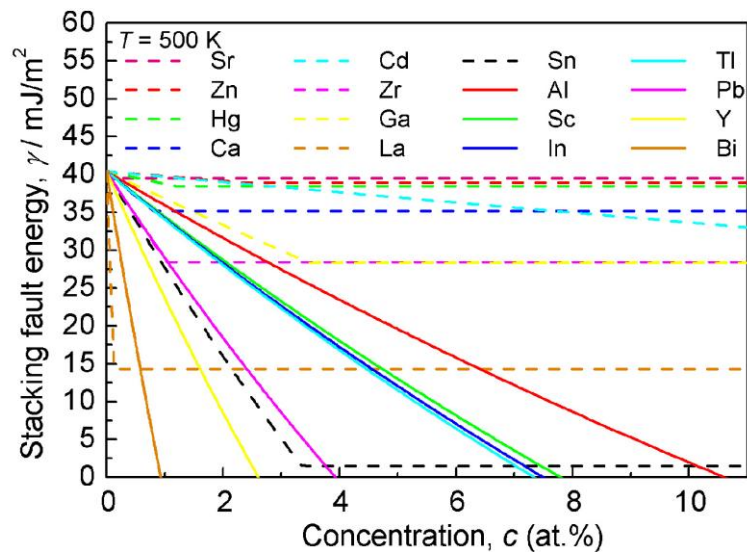


図 2. 2. 1. 1-4 第一原理計算による積層欠陥エネルギー算出結果

また、Mg-0.94at.%Y合金の積層欠陥を直接観察することを試みた。図 2. 2. 1. 1-5 に Z コントラスト STEM 像を示す。Mg と比較して原子番号の大きい Y は白く光るため、Y の存在位置を知ることができる。図より、積層欠陥が白く光っており、Y が積層欠陥に偏析していることがわかる。純マグネシウムの積層欠陥エネルギーは約 40 mJ/m<sup>2</sup> であり、そこから予測される拡張転位幅は最大で 2 nm と見積もられる。一方、図より、Y 添加により拡張転位幅は 100 nm オーダーまで広がっており、Y の偏析により積層欠陥エネルギーが 1 桁以上小さくなっていることがわかる。この結果は過去の Mg-Y 合金の電子顕微鏡観察により算出された積層欠陥エネルギーの値と良い一致を示している<sup>7)</sup>。図 2. 2. 1. 1-6 は原子レベルでの Z コントラスト STEM 像である。Y が積層欠陥に偏析していることが原子レベルで確認された。このように、溶質元素は積層欠陥に偏析して積層欠陥エネルギーを低下させる、すなわち転位幅を大きくすることが確認された。これは世界初の成果である。

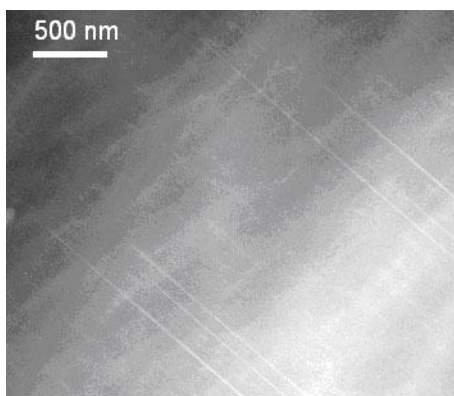


図 2. 2. 1. 1-5 Mg-0.94Y 合金  
押出まま材の Z コントラスト STEM 像  
(低倍率)

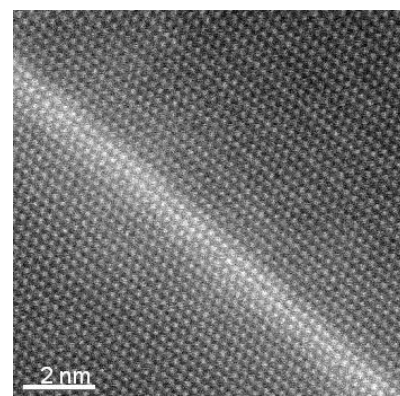


図 2. 2. 1. 1-6 Mg-0.94Y 合金  
押出まま材の Z コントラスト STEM 像  
(高倍率)



さらに、溶質元素種、濃度ゆらぎが再結晶組織の均一性に及ぼす影響についての解析を行った。具体的には、Al、Sc、Sn および Y 添加合金について各ひずみ量での結晶粒径分布を算出、定量化し、その関連性を調べた。図 2. 2. 1. 1 - 7 に Mg-4.1Al の圧縮試験時の組織変化を示す。ひずみ 0.3 では結晶粒径が微細化し、動的再結晶がほぼ完了していることがわかる。

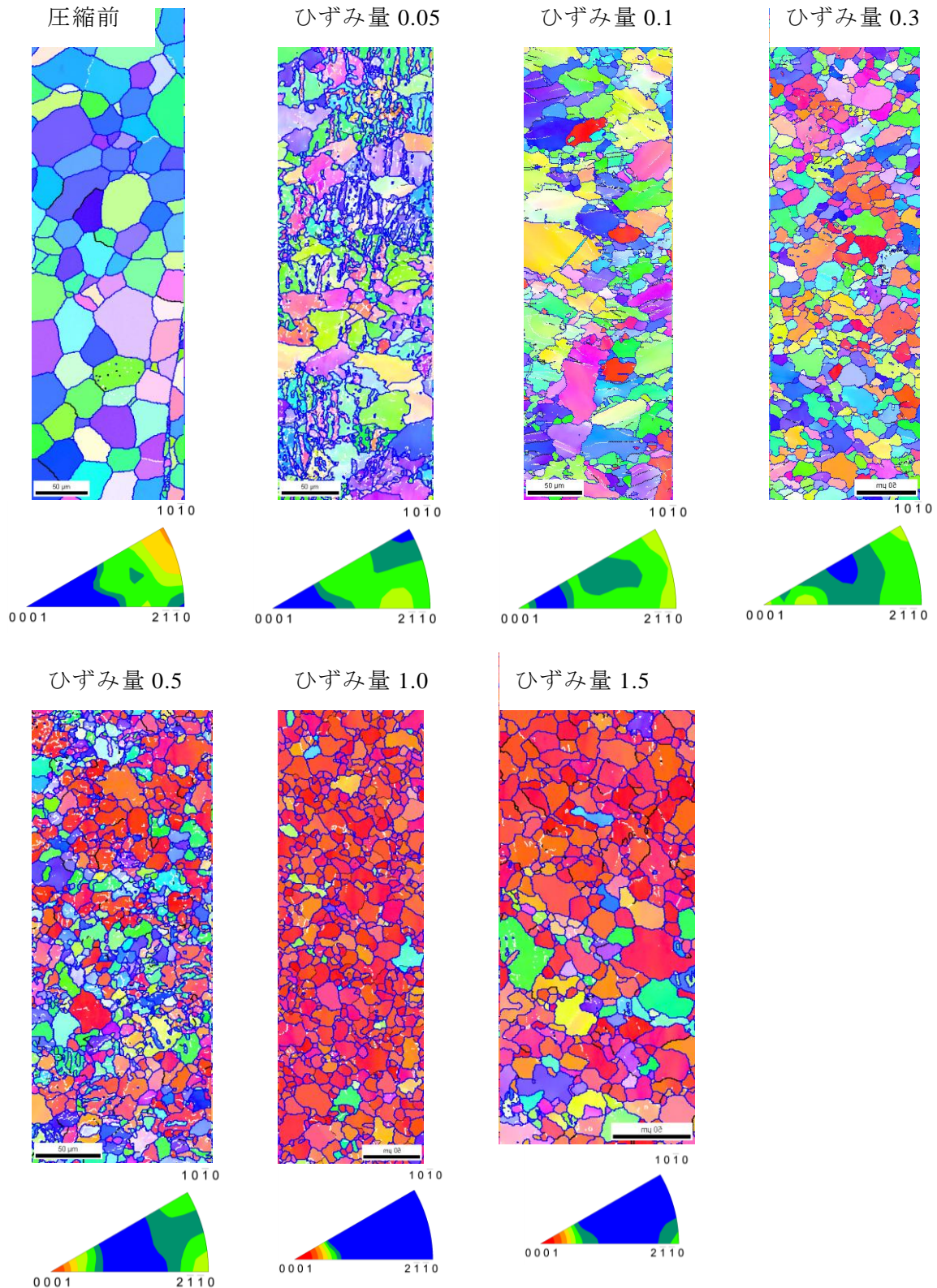


図 2. 2. 1. 1 - 7 573K、 $1 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$  で圧縮した Mg-4.1Al 合金の結晶方位像と逆極点図

図 2. 2. 1. 1-8 に Mg-0.46Y の圧縮試験時の組織変化を示す。ひずみ量の増加とともに粒内に小角粒界が多数形成され、粒界近傍で動的再結晶が生じ非常に微細な結晶粒が多数形成されているのがわかる。しかしながら、ほとんどの結晶粒は再結晶が生じておらず、不均一な組織が得られている。

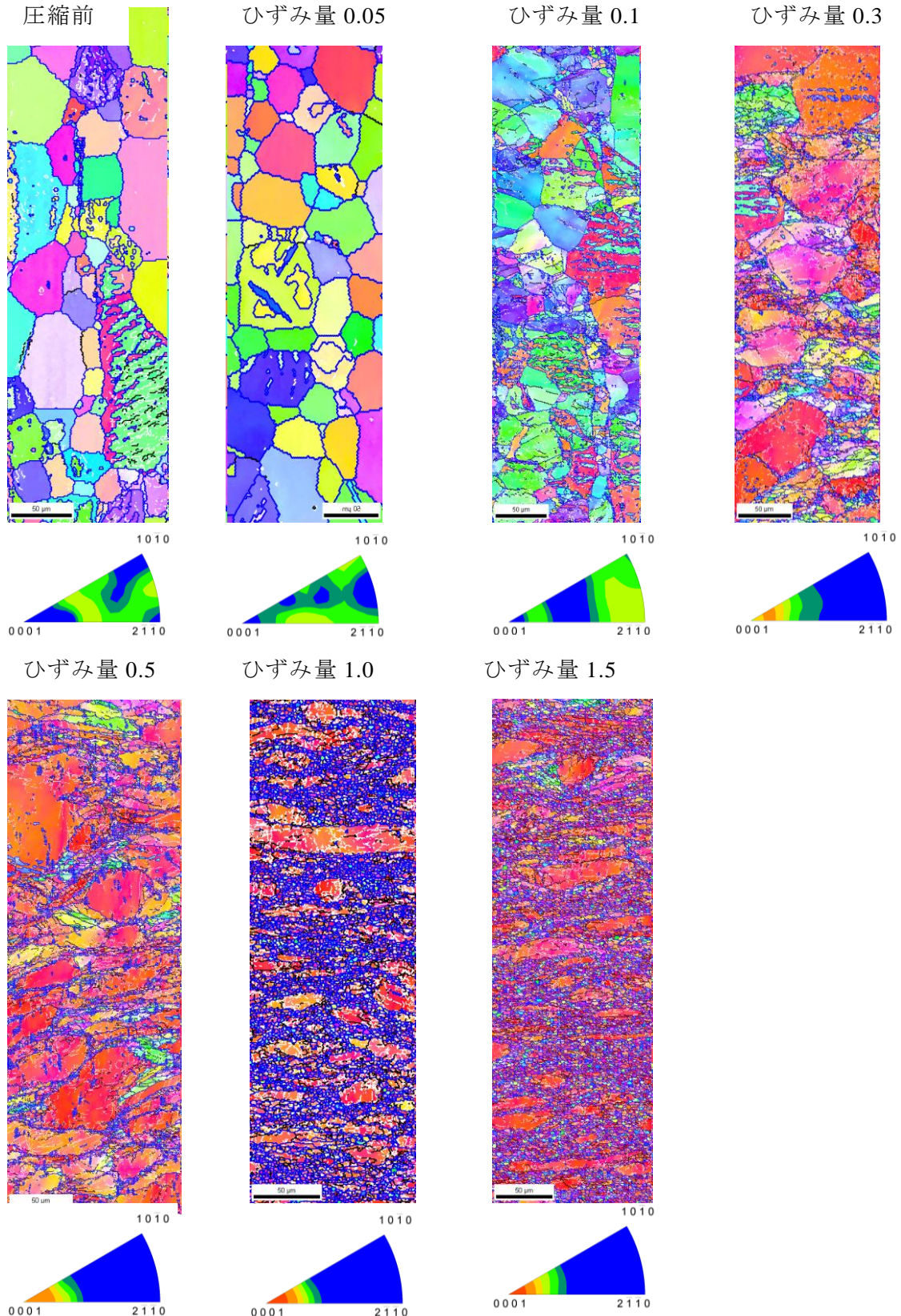


図 2. 2. 1. 1-8 573K、 $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  で圧縮した Mg-0.46Y 合金の結晶方位像と逆極点図  
III-2. 2-7

図 2. 2. 1. 1 - 9 にそれぞれの添加元素による微細組織形成の違いを示す。図の中で白い線は  $2.5^\circ$ 、黒い線は  $5\sim 15^\circ$ 、青い線は  $15^\circ$  以上の粒界を示している。また結晶方位像と逆極点図は圧縮方向 (C.D.: Compression Direction) から見たものである。結晶方位像から、均一な再結晶が生じている Al および Sn 添加に比べ、Sc および Y 添加では不均一な組織の中に多数の小角粒界(亜粒界)が観察されることがわかる。このような組織の違いにおいて小角粒界 (亜結晶粒界) の存在に着目し、解析を行った。

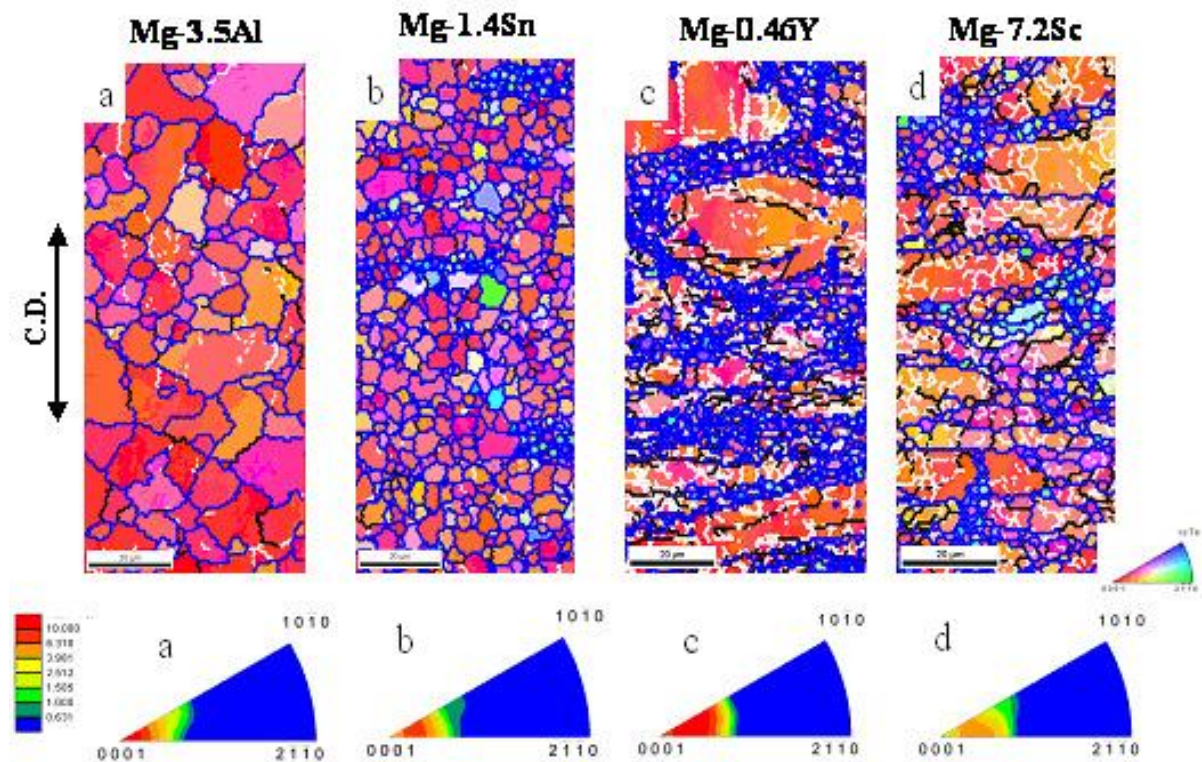


図 2. 2. 1. 1 - 9 圧縮後の微細組織変化

図 2. 2. 1. 1 - 10 に Mg-4.1Al および Mg-3.5Sn の各ひずみ量における亜粒界長さを示す。Al 添加合金では最大応力に達するまでは亜結晶粒界が増加し不均一な組織を示すが、再結晶が急激に進行し、応力低下とともに均一な結晶粒が得られることがわかった。一方、Sn 添加合金では初期の亜結晶粒界の増加挙動は Al 添加合金と同様であるものの、Al 添加合金において応力低下が生じるひずみ量以降も亜結晶粒界は緩やかに増加し続けて不均一な組織が得られることがわかった。このような傾向は熱処理条件においても大きな変化は見られず、元素に依存した傾向であることが明らかになった。図 2. 2. 1. 1 - 11 に全ての合金における各ひずみ量における亜粒界長さを示す。Sc および Y 添加ではひずみ量にともなう亜結晶粒界の増加はさらに顕著で、Sn 合金の 2 倍程度まで増加している。このような亜結晶粒界の単調増加、すなわち大角粒界の形成による再結晶が生じないことが不均一性の一つの要因であることが明らかになった。このような亜結晶粒界長さは動的再結晶粒径とも密接に関係している。図 2. 2. 1. 1 - 12 は動的再結晶粒径と亜粒界長さとの関係を示したものである。亜結晶粒界長さの増加とともに、再結晶粒径が微細化することが明らかになった。前述の通り、積層欠陥エネルギーが低下するほど動的

再結晶粒径が微細化する。これらの結果から、積層欠陥エネルギーの低い合金ほど動的再結晶粒は微細になるものの、亜結晶粒界が多くなり均一組織になりにくいことも明らかになった。以上の結果から、Y、Sc、Sn、Alが耐熱性に優れかつ鍛造による結晶粒微細化が見込まれる固溶合金であることが示されたが、組織の均一性の観点からは Al、Sn が優れた元素であると結論づけられる。これは本プロジェクトにおいて世界で初めて得られた成果である。

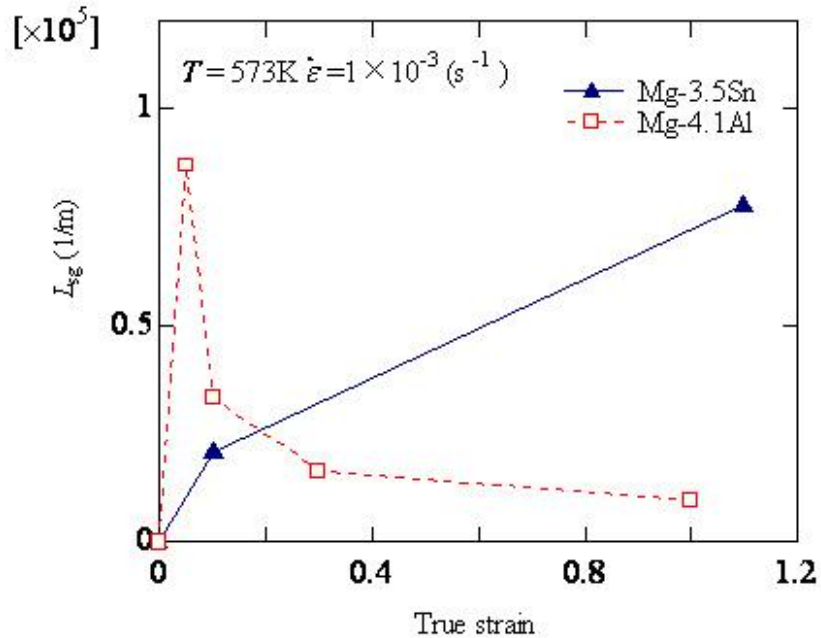


図 2. 2. 1. 1 - 1 0 Mg-4.1Al および Mg-3.5Sn の各ひずみ量における亜粒界長さ

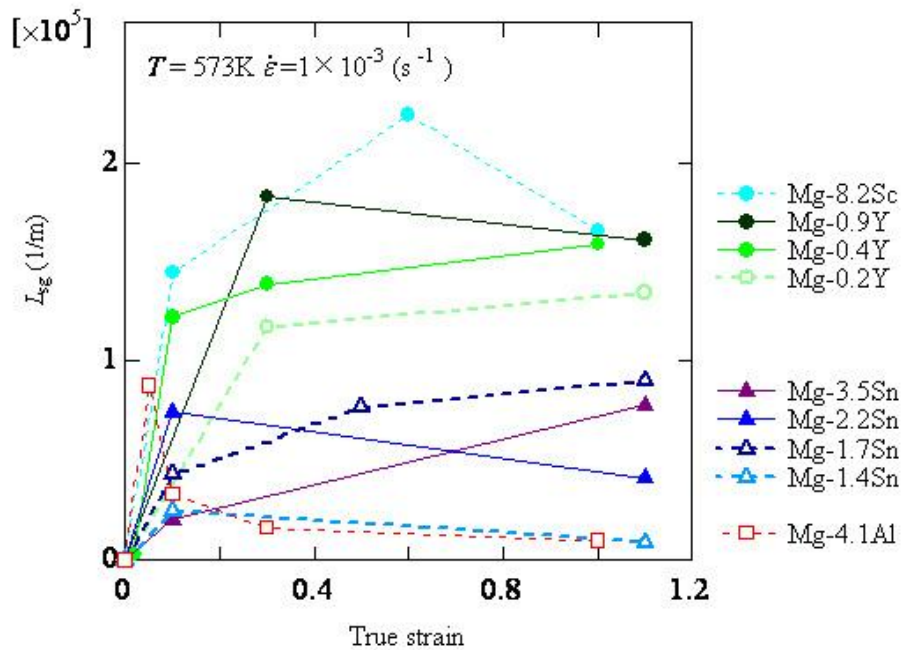


図 2. 2. 1. 1 - 1 1 全ての合金についての各ひずみ量における亜粒界長さ

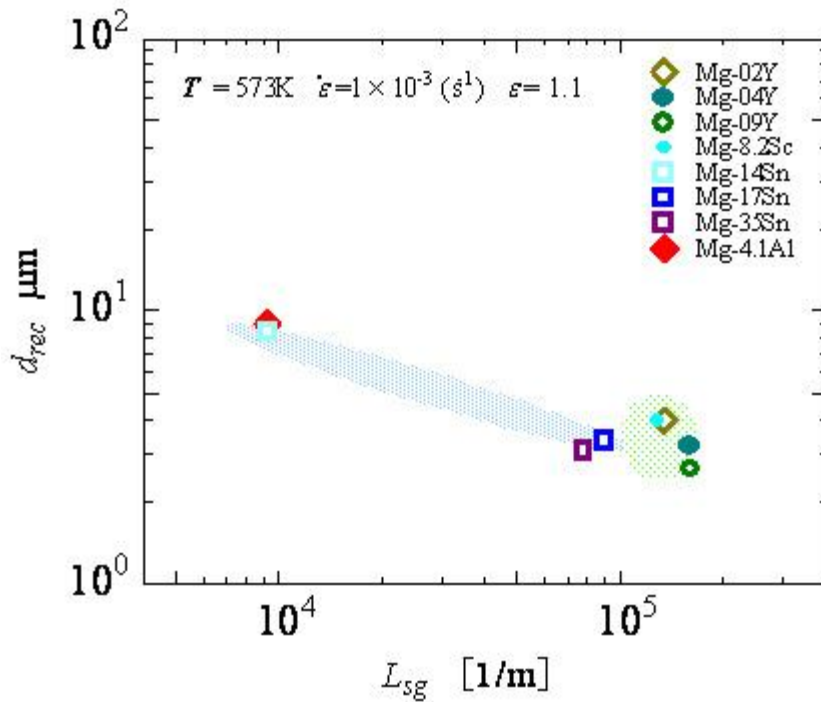


図 2. 2. 1. 1 – 1 2 動的再結晶粒径と亜粒界長さとの関係

2. 2. 1. 2 鍛造素材及び鍛造部材の第二相粒子による高機能化の検討  
(研究開発項目②- (1) bア)

本研究課題では、鍛造素材の動的再結晶挙動に対する第二相の影響を明らかにする。対象とした素材は、AZ91連続鋳造材およびAZX911連続鋳造材である。表 2. 2. 1. 2 – 1 にそれらの材料の組成分析結果を示す。AZ91およびAZX911鋳造まま材、均質化処理材において結晶粒が比較的均一な領域から試験片を切り出し、高温圧縮試験および室温引張試験を行なった。また圧縮材の室温引張特性も調べた。実験条件は図 2. 2. 1. 2 – 1 に示した。

表 2. 2. 1. 2 – 1 AZ91 連続鋳造材、AZX911 連続鋳造材の化学組成

合金名	Al	Zn	Mn	Ca	Mg
AZ91	8.7	0.81	0.21	-	bal.
AZX911	8.8	0.84	0.17	1.00	bal.

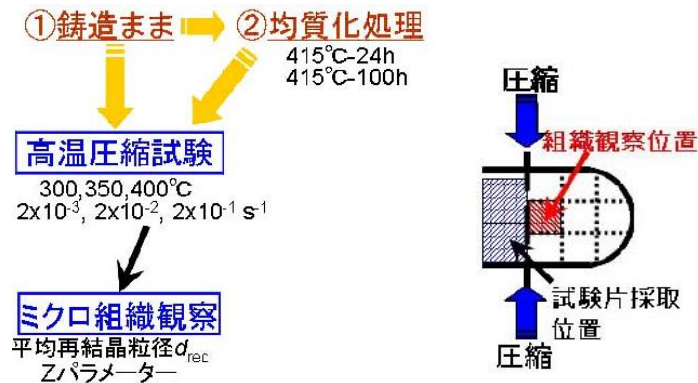


図 2. 2. 1. 2 – 1 実験条件

図 2. 2. 1. 2-2 は、AZ91合金の加工前処理によるマイクロ組織の変化を調べた結果である。鋳造まま材では、粒内に粗大な $\beta$ 相および高Al濃度領域が存在し、不均質な組織になっている。それに対して均質化処理材では粗大な $\beta$ 相や高Al濃度領域は観察されず、均質な組織になっていた。

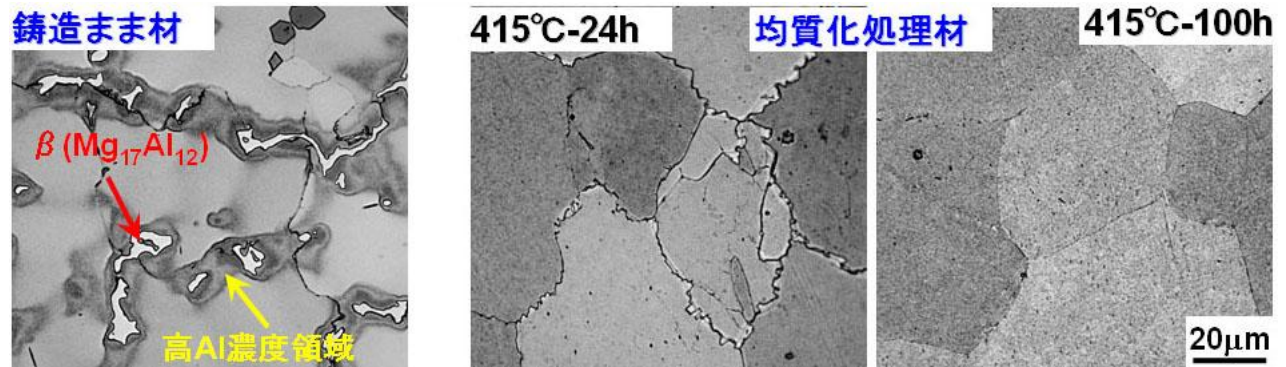


図 2. 2. 1. 2-2 AZ91 連続鋳造材の加工前処理によるマイクロ組織の変化

図 2. 2. 1. 2-3 は、AZ911合金の加工前処理によるマイクロ組織の変化を調べた結果である。鋳造まま材では、粒内には $\beta$ 相、粒界近傍には高Al濃度領域に加えてMg-Al-Ca系化合物が存在し、不均質な組織になっている。それに対して均質化処理材では粗大な $\beta$ 相や高Al濃度領域は観察されないが、粒界にはMg-Al-Ca系化合物は残留している。

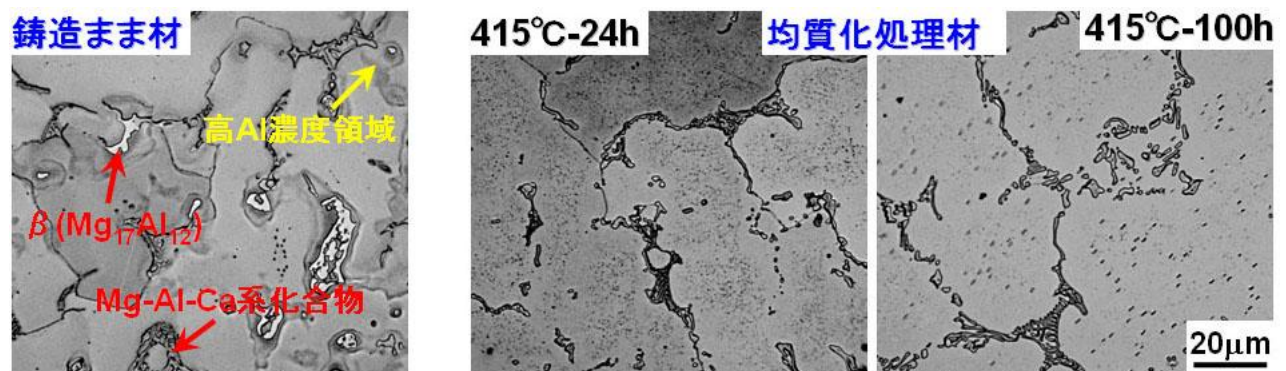


図 2. 2. 1. 2-3 AZ911 連続鋳造材の加工前処理によるマイクロ組織の変化

図 2. 2. 1. 2-4 は、AZ91を $300^{\circ}\text{C}$ でひずみ速度 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ および $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ で圧縮変形した後の逆極点図マップおよび極点図である。この図からわかるように、 $300^{\circ}\text{C}$ 、 $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ という低温・高速で圧縮を行なうと、結晶粒内に引張双晶、圧縮双晶および圧縮双晶内に更に引張双晶が生じる二重双晶が生じ、その内部および近傍でそれらの双晶形成に伴う結晶粒の分割によるその場再結晶が生じる。またここで注目すべきなのは、ひずみ速度が小さいと動的再結晶率は大きくなる、すなわち組織の均質性は増すことを明らかにしたことである。これはひずみ速度が遅いほど、加工中の時間が長くなり、その間に、ひずみ速度が速い逆極点図マップの右上に見られるような領域の内部でも動的再結晶が生じるためであると考えられる。極点図については、基本的にはせん断力が作用する方向に底面が集積するので、その傾向が未再結晶粒に顕著に見られる。一方、上述の二重双晶の形成に

よる結晶粒の分割を伴ったその場再結晶により形成した再結晶粒はマトリックスと30度から40度傾斜した位置に集積する<sup>1)</sup>。

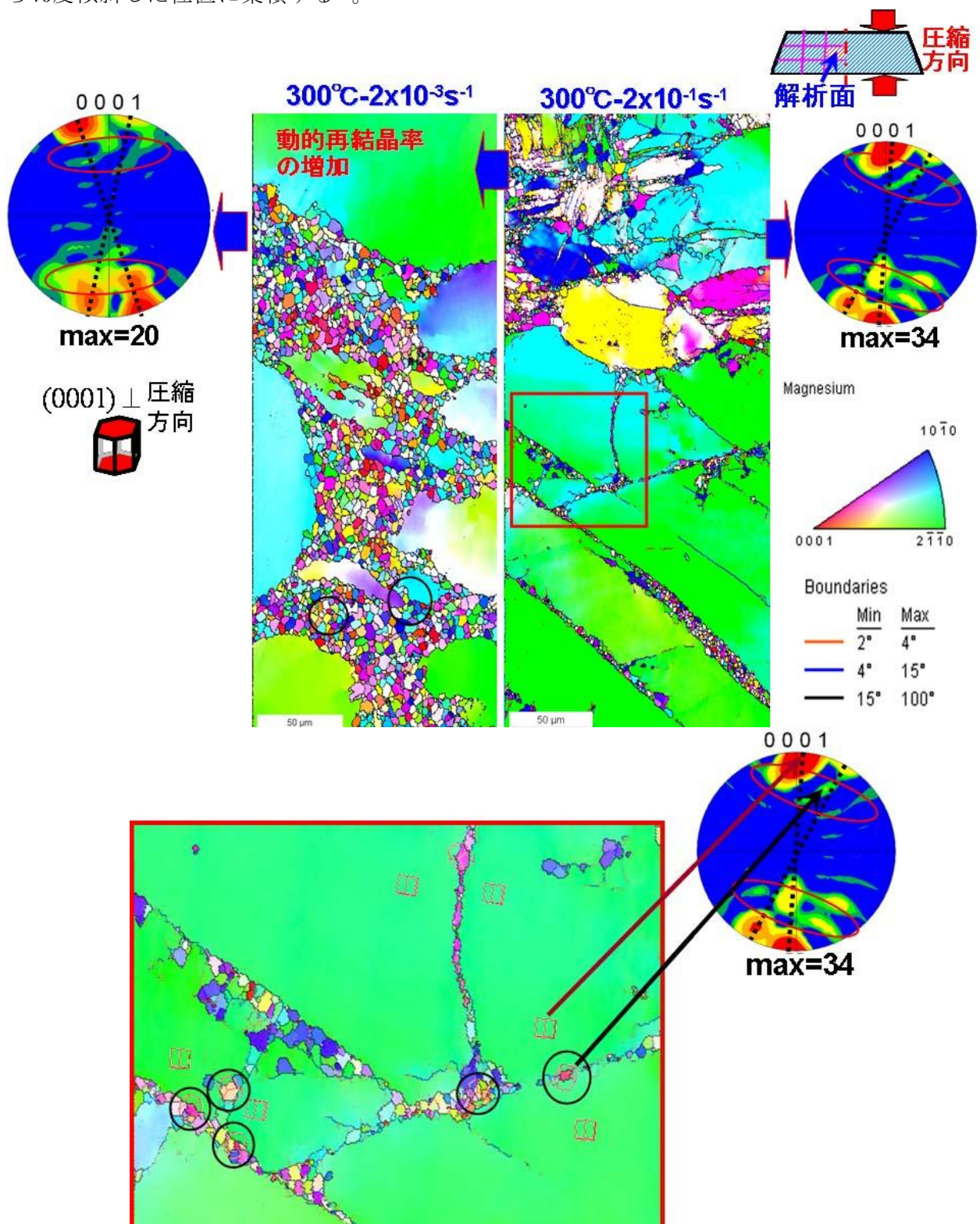


図 2. 2. 1. 2 - 4 AZ91 を  $300^{\circ}\text{C}$  でひずみ速度  $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$  および  $2 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$  で圧縮変形した後の逆極点図マップおよび極点図

図 2. 2. 1. 2 - 5 に、AZ91 および AZX911 - 均質化処理材 ( $415^{\circ}\text{C} \times 24$  時間) の再結晶粒径の Z パラメータ依存性を示す。この図からわかるように、AZ91 および AZX911 連続鋳

造材の動的再結晶挙動は温度の影響が大きい。AZ91 合金の均質化処理材を圧縮変形させると、300℃ および350℃の全てのひずみ速度で、図 2. 2. 1. 2-6 に示すように動的析出を伴った動的再結晶が生じている。一方、それ以外の条件では、動的析出がほとんど生じず、再結晶粒径は粗大化する。400℃については、ひずみ速度が変化しても再結晶粒径に変化は見られない。これは、AZ91 合金均質化処理材における再結晶が、動的な連続再結晶機構により形成され、しかも400℃では、均質化処理温度とほぼ同等な温度であるため、動的析出が生じにくく、後述するβ相の動的析出による再結晶粒の成長速度抑制効果（ピン止め効果）が発現しなかったものと考えられる。300℃および350℃では、動的析出物が、再結晶粒の粒界にみられることから、動的再結晶粒径の成長をピン止める役割を担うことは明らかである。一般的には、マグネシウム合金でも素材の結晶粒径が同じ場合、その再結晶粒はZパラメータで一義的に整理できると言われている<sup>2)</sup>。本結果では、図に示すように、ひずみ速度よりも温度に対する依存性が強い。これは、動的析出物による結晶粒の成長が顕著に抑制されるためと考えられる。一方、AZX911 合金均質化処理材を圧縮変形させると、300℃とそれ以外の温度で再結晶挙動が異なる。300℃では、均質化後も残留しているAl-Ca 系化合物とβ相の動的析出を伴った動的再結晶が生じ、析出物によるピン止め効果により、再結晶粒の粗大化を抑制している。一方、350、400℃では温度が高く、CaとAlが反応することで、母相内のAl溶質の固溶量が減少し、動的析出が生じにくくなることから、ピン止め効果が発現せず、再結晶粒径が粗大化するものと考えられる。Zパラメータで整理した場合、AZ91合金と同様に析出物のピン止め効果により温度の影響が強く現れるが、Ca添加により動的析出物が少なくなるため、その影響度はAZ91合金より小さい。

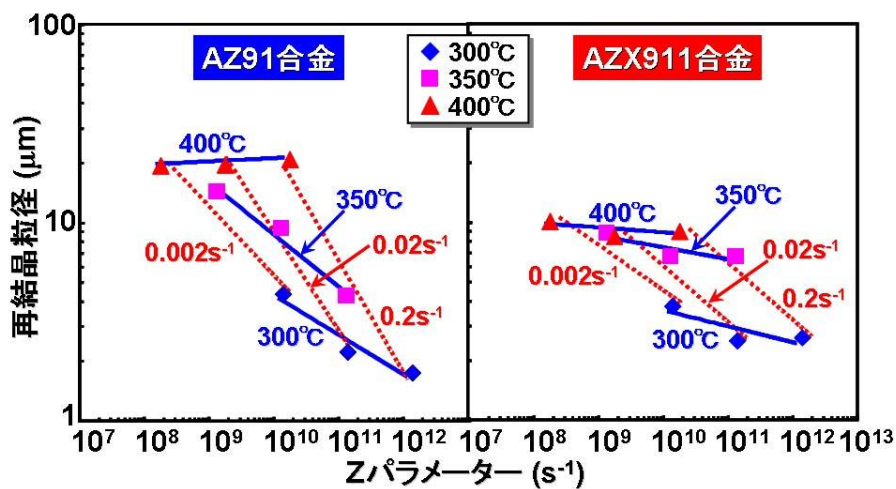


図 2. 2. 1. 2-5 AZ91、AZX911 均質化処理材の高温圧縮試験後の再結晶粒径と Zパラメータの関係

図 2. 2. 1. 2-6 は、300℃でひずみ速度 $2 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ で圧縮したAZ91の組織である。この図から、均質化処理材では結晶粒界に不連続析出物が存在している。また結晶粒界に存在する析出物は、AZ91の方がAZX911よりも多く見られた。これらの結果から、低温・高速で圧縮すると微細な析出物が結晶粒界に動的析出し、動的再結晶粒の粗大化を抑制するため、動的再結晶粒は2 μmまで微細化すると考えられる。また結晶粒界に存在する動的析出物の量はAZ91の方がAZX911よりも多くなるため、同じ圧縮条件で比較するとAZ91



の方がAZX911よりも動的再結晶粒は微細になると考えられる。

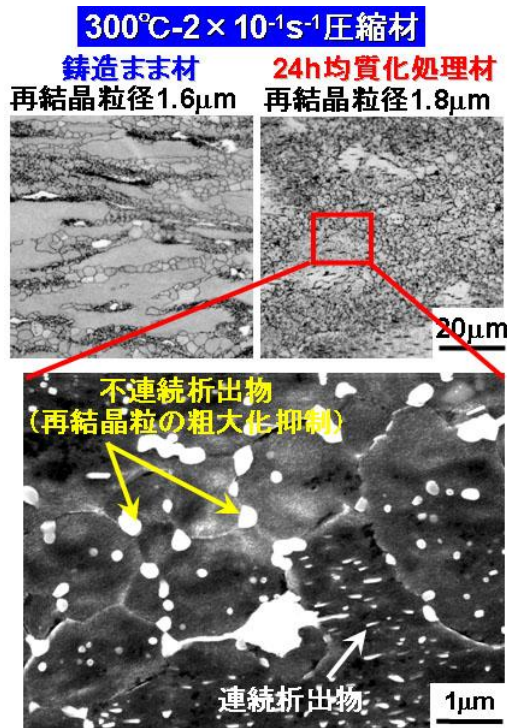
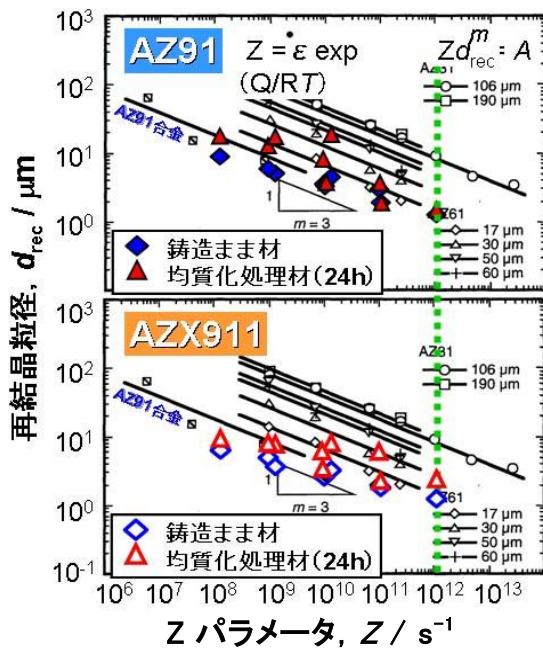


図 2. 2. 1. 2-6 AZ91 を  $300^{\circ}\text{C}$ 、 $2 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$  で 50% 圧縮した後のマイクロ組織

図 2. 2. 1. 2-7 は、AZ91 および AZX911 を高温で 50% 圧縮した場合の再結晶粒径の  $Z$  パラメータ依存性を調べた結果である。本研究で得られた結果を、Watanabe<sup>3)</sup> の結果とともにプロットした。この図から  $Z$  パラメータが大きい条件、すなわち低温・高速で圧縮すると動的再結晶粒はより微細化することが分かる。また前述のように、 $Z$  パラメータが同じ条件で比較すると、AZ91 の方が AZX911 よりも動的再結晶粒は微細になる。



H. Watanabe et al. : *Mater. Trans.*, 42(2001),

図 2. 2. 1. 2-7 AZ91 および AZX911 を高温で 50% 圧縮した場合の再結晶粒径と  $Z$  パラメータの関係

AZ91マグネシウム合金連続铸造材の動的再結晶に対する第二相粒子の役割について、更に検討を行なった。表2. 2. 1. 2-2に、供試材の化学組成を示す。高温圧縮試験片は圧縮方向とDC 铸造方向が平行になるように採取した。高温圧縮試験は、油圧サーボプレス機（川崎油工製 1000kN 型プレス機）を用いた。図2. 2. 1. 2-8に高温圧縮試験片の形状、図2. 2. 1. 2-9に高温圧縮試験の過程を示す。固体潤滑材である二硫化モリブデン（ $\text{MoS}_2$ ）は、試験片と金型の接触面に塗布した。高温圧縮試験後、試験片は5秒以内に水冷した。

表2. 2. 1. 2-2 供試材の化学組成(mass%)

合金	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Mg
AZ91	9.1	0.88	0.17	0.010	0.003	<0.002	Bal.

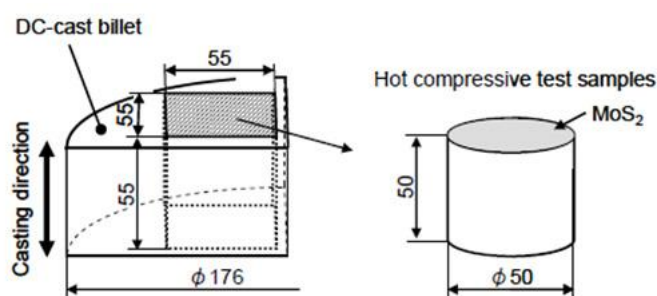


図2. 2. 1. 2-8 高温圧縮試験片の形状

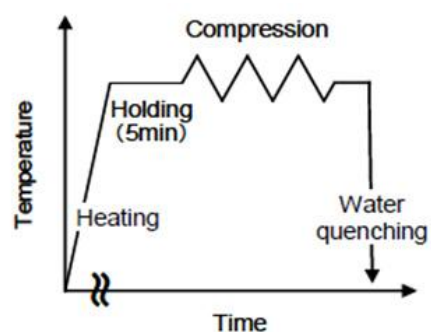


図2. 2. 1. 2-9 高温圧縮試験の過程

図2. 2. 1. 2-10に供試材の铸造方向に対し平行な断面のマイクロ組織を示す。AZ91の铸造まま材では粒界に $\beta$  ( $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ ) 晶出相が見られる。EPMAの結果（図2. 2. 1. 2-11）から、晶出 $\beta$ 相とそれらの周りのAl濃度が高いことがわかる。それに対して、 $415^\circ\text{C}$ -24hの均質化処理を行うと粒界の $\beta$ 晶出相はほぼ消失する。しかしEPMAの結果は、粒界近傍では溶質濃度が高いことを示している。平均結晶粒径は、铸造まま材で $183\mu\text{m}$ 、 $415^\circ\text{C}$ -24hの均質化処理材では $173\mu\text{m}$ であった。すなわち、均質化処理前後で、供試材の平均結晶粒径の大きな変化は認められない。

図2. 2. 1. 2-12に圧縮ひずみの増加に伴う $415^\circ\text{C}$ -24h均質化処理材のマイクロ組織変化を示す。 $300^\circ\text{C}$ ,  $2 \times 10^{-1}\text{s}^{-1}$ の条件で圧縮した場合、圧縮初期に粗大な初期結晶粒に多くの変形双晶が形成され、圧縮ひずみの増加に伴い変形双晶の量が増加する。微細な動的再結晶粒は、図2. 2. 1. 2-13に示すように、双晶同士が交差する箇所や双晶内部およびその近傍に形成する。ただし、铸造材と比べて24h均質化処理材では、粒内の溶質濃度が高くなるため、圧縮加工中に $\beta$ 相の動的析出が双晶再結晶粒界で生じ、双晶再結晶粒の粗大化が顕著に抑制される。その結果、 $300^\circ\text{C}$ ,  $2 \times 10^{-1}\text{s}^{-1}$ の条件で圧縮した場合、铸造材より24h均質化処理材を用いて圧縮した試料の方が晶再結晶粒径は小さくなる。

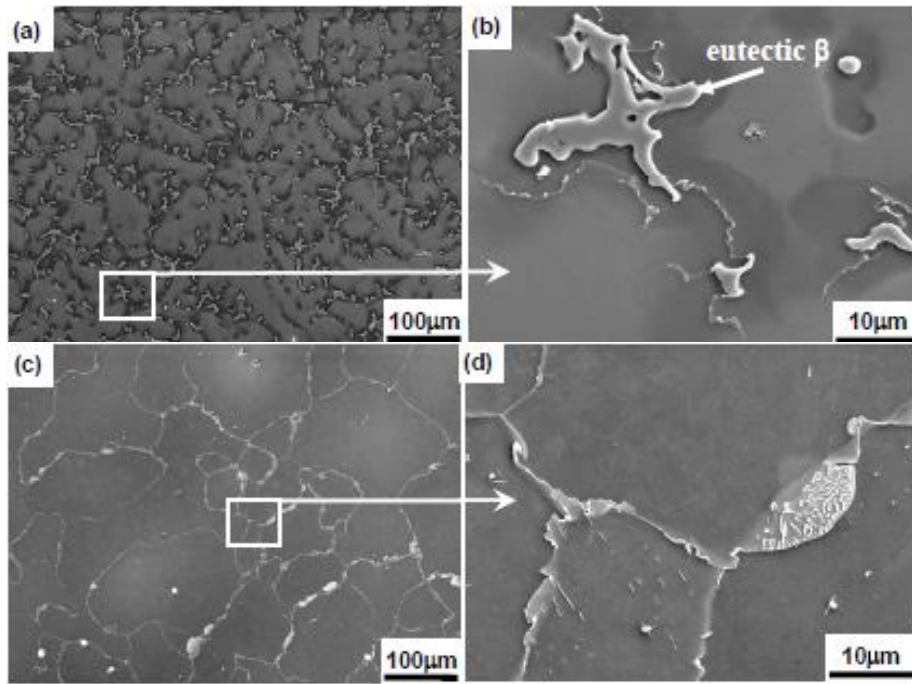


図 2. 2. 1. 2 - 1 0 供試材の鋳造方向に対し平行な断面のマイクロ組織  
 a), b) 鋳造まま材、c), d) 415°C - 24 時間均質化処理材

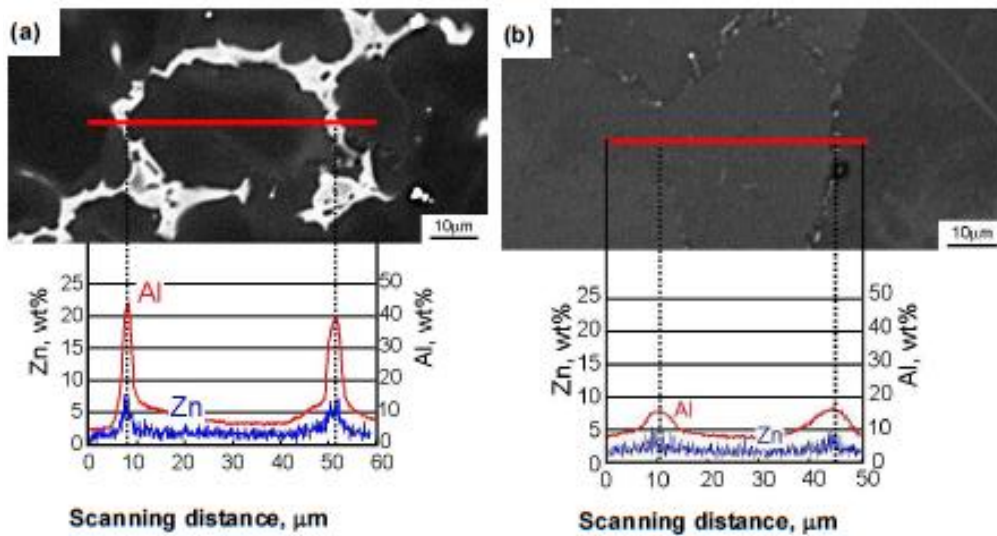


図 2. 2. 1. 2 - 1 1 EPMA 測定結果、a) 鋳造まま材、b) 415°C - 24 時間均質化処理材

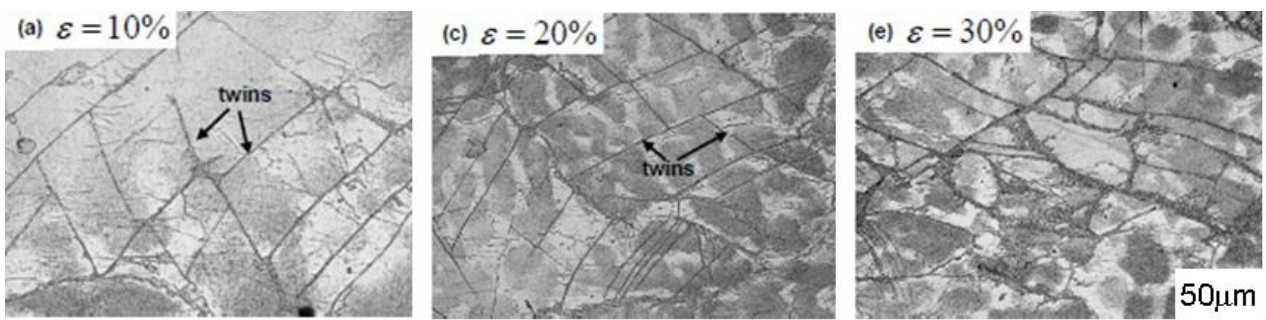


図 2. 2. 1. 2 - 1 2 圧縮ひずみの増加に伴う 415°C - 24h 均質化処理材のマイクロ組織変化

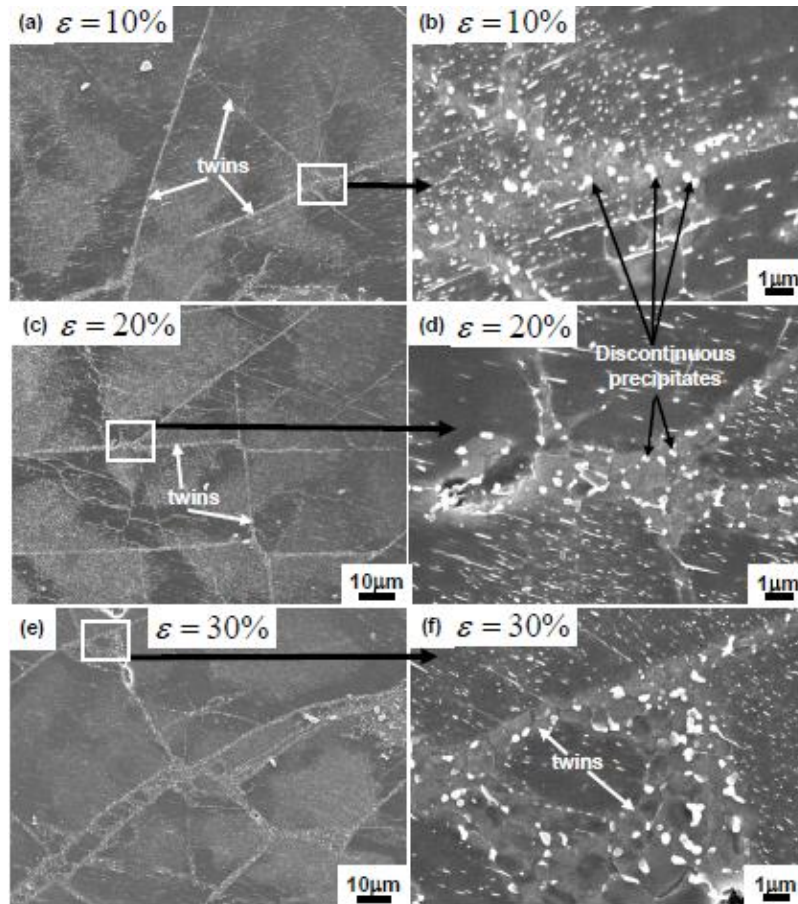


図 2. 2. 1. 2 - 1 3 圧縮ひずみの増加に伴う 415℃ - 24h 均質化処理材のミクロ組織変化 (走査電子顕微鏡写真)

図 2. 2. 1. 2 - 1 4 に均質化処理材を 300℃,  $2 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$  の条件で圧縮した場合の圧縮ひずみの増加に伴う元粒界近傍の  $\beta$  析出相領域における組織変化を示す。10% の圧縮変形では再結晶は生じない。ひずみ 20% まで圧縮した場合、 $\beta$  析出相は分断され始め、ひずみ 30% まで圧縮した場合、 $\beta$  析出物がさらに分断され、動的再結晶粒の粒界に分散する。これらの球状  $\beta$  相は、AZ61 合金や AZ91 合金の ECAP (Equal Channel Angular Pressing) まま材でも報告されている<sup>4)5)</sup>。中でも  $1\mu\text{m}$  以下の析出物 (第二相粒子) は再結晶粒成長の抑制効果 (ピン止め効果) があり、再結晶粒径  $D$  は、第二相粒子の半径を  $r$ 、第二相の体積率を  $f_v$  とすると、下記の Zener-Smith の関係式で与えられる<sup>6)</sup>。

$$D = \frac{4}{3} \cdot \frac{r}{f_v}$$

2. 2. 1. 2 - 1

ピン止め効果は、第二相粒子の半径が小さく、体積率が大きいほど有効なことがわかる。一方、第二相粒子の粒径が大きい場合、加工ひずみが第二相粒子の周辺に集中し、結晶粒の形成を促進する粒子誘起核生成 (Particle Stimulated Nucleation : PSN) が発現することが報告されている<sup>7)</sup>。以上のことから、均質化処理材を 300℃ で圧縮変形させた場合に動的析出する球状  $\beta$  相は、再結晶粒のピン止め効果または PSN による再結晶粒の核生成を担う可

能性がある。

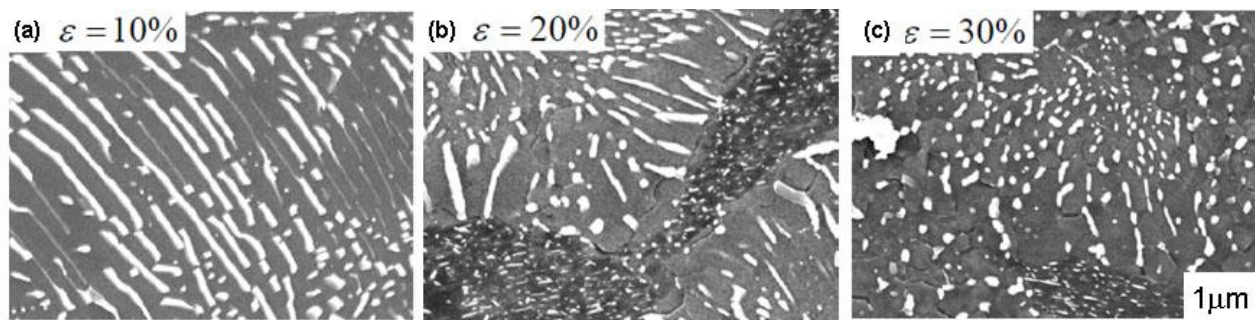


図2. 2. 1. 2-14 圧縮ひずみの増加に伴う 415°C-24h 均質化処理材の元粒界近傍のβ析出相領域におけるマイクロ組織変化

以上の結果から、AZ91 マグネシウム合金の高温変形時の結晶粒微細化には均質化処理が有効であること、再結晶粒界に動的析出した球状β相が重要な役割を果たすことがわかった。これは本プロジェクトで得られた世界初の知見である。

さらに、β相の時効析出による高強度化を目的として、AZ91合金圧縮まま材の時効特性を評価した。図2. 2. 1. 2-15に、180°Cにおける時効硬化曲線を示す。圧縮まま材の硬さは300°Cで圧縮した場合に最も高く、圧縮温度の上昇に伴い硬さは低下する。圧縮温度が低い場合、ピーク時効硬さはひずみ速度の減少に伴い低くなる。しかし、圧縮温度の上昇に伴い、ひずみ速度のピーク時効硬さ依存性は小さくなる。

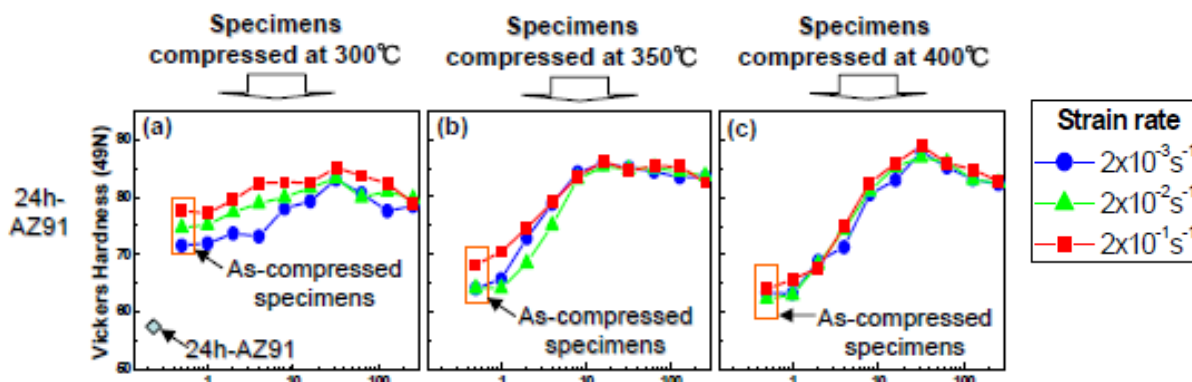


図2. 2. 1. 2-15 415°C-24h 均質化処理した AZ91 合金圧縮まま材の時効硬化曲線、圧縮試験温度 a)300°C, b)350°C, c)400°C、時効温度 180°C

図2. 2. 1. 2-16に、AZ91合金の均質化処理材を高温圧縮後、T5処理を施した試料のSEM像を示す。T5処理により各試料とも粒内に連続析出物と粒界に不連続析出物が多量に析出し、高い時効硬化能が得られる。高温で圧縮した試料ほど、T5処理時に微細な析出物が多量に析出するため、ピーク時効硬さは高くなる。

図2. 2. 1. 2-17、図2. 2. 1. 2-18に圧縮まま材およびT5処理材の引張特性を示す。圧縮まま材では圧縮温度を低温にすることにより引張強さおよび0.2%耐力は上昇するが、伸びは低下する。特に0.2%耐力の向上は、圧縮温度の低下に伴う多量のβ相の動的析出、再結晶粒微細化および集合組織による強化が考えられる。一方、T5処理材

は圧縮温度が高くなるほど、時効中に微細なβ相が多量に析出するため、引張強さおよび0.2%耐力とも顕著に向上する。AZ91の24h均質化処理材を用いて圧縮温度400°C、ひずみ速度 $2 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$ の条件で圧縮後、T5処理材した試料は引張強さ364MPa、0.2%耐力248MPa、伸び7.7%と、既存の6061アルミニウム合金T6処理材とほぼ同等の引張特性を示す。

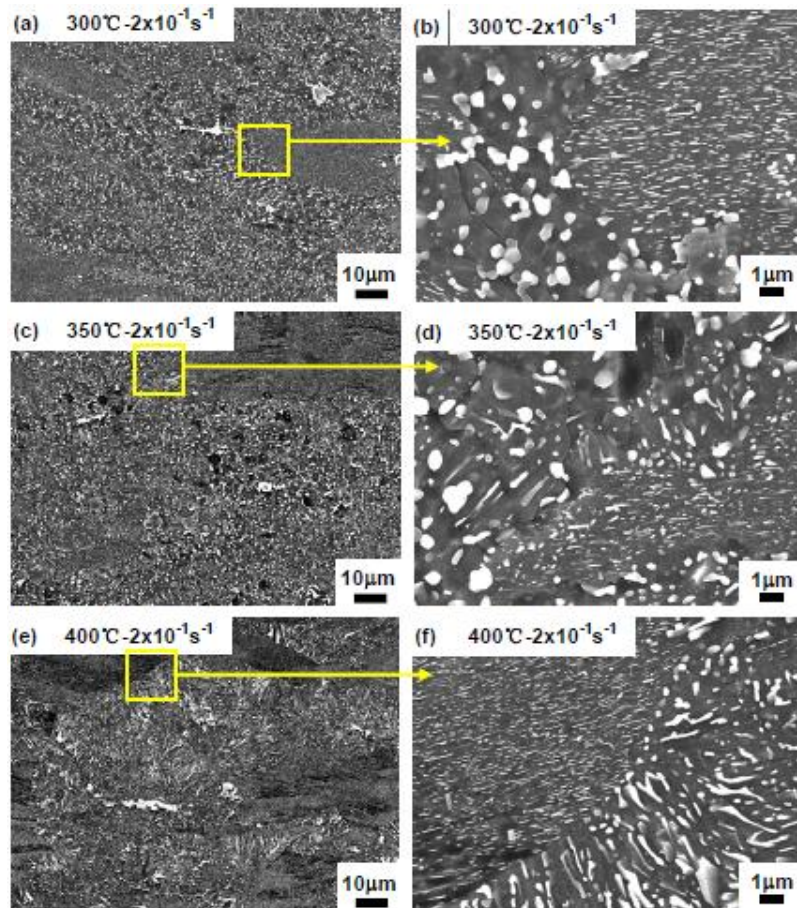


図2. 2. 1. 2-16 415°C-24h均質化処理したAZ91合金圧縮まま材を180°Cでピーク時効処理した試料のSEM像、圧縮条件はa)b)300°C- $2 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$ , c)d)350°C- $2 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$ , e)f)400°C- $2 \times 10^{-1} \text{s}^{-1}$

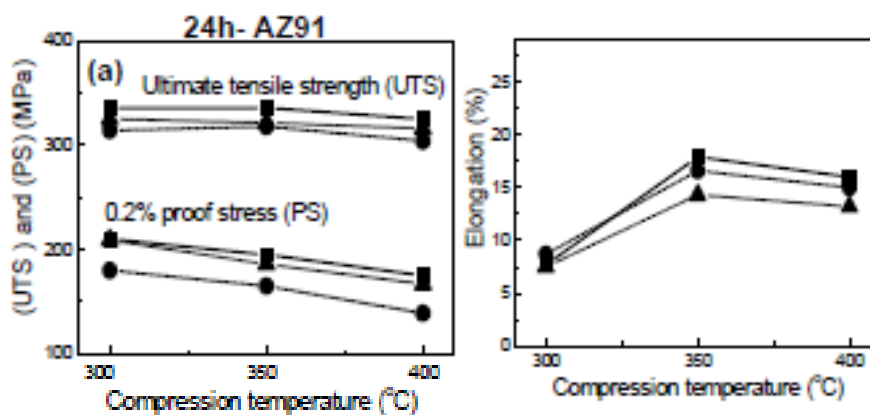


図2. 2. 1. 2-17 415°C-24h均質化処理したAZ91合金圧縮まま材の引張特性

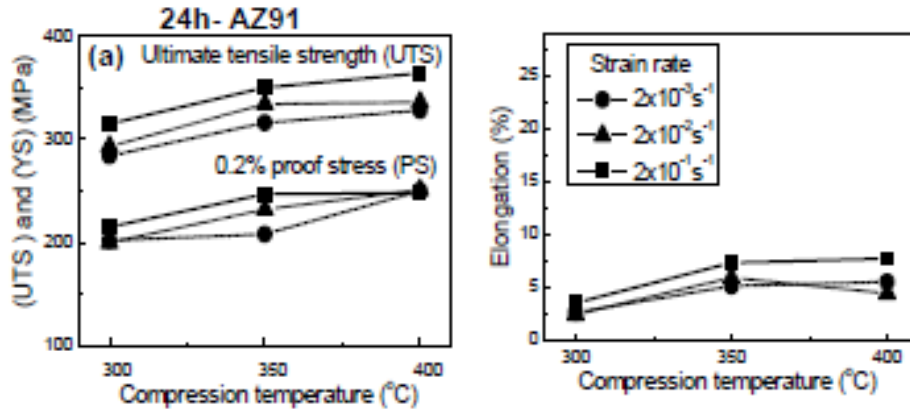


図 2. 2. 1. 2 - 1 8 415°C - 24h 均質化処理した AZ91 合金圧縮まま材を 180°C でピーク時効処理した試料の引張特性

これまでに、1mass%のCa をAZ91 合金 (AZX911) に添加することで、防燃特性は飛躍的に改善することが明らかとなっており、これによりマグネシウム合金の铸造性が改善される。またAZX911 合金は、Ca を添加することで不燃性が向上することも明らかとなっている。しかし、Ca を添加したAZX911合金ではAZ91合金で得られた時効硬化能ほど高い時効のレスポンスは得られず、Ca 添加によりT5 処理の効果が低下する。したがって防燃性や不燃性を低下させずにAl とCa の添加量を最適化させる必要がある。そこで、時効硬化型合金であるAZ91 合金へ難燃効果を発現するCa 量を0.15, 0.3, 0.6, 1.0mass%添加し、圧縮材の機械的性質を評価した。表 2. 2. 1. 2 - 3 に、各合金の化学組成を示す。これらの合金は三協マテリアルにおいて連続铸造された。0.15%Ca 添加でも防燃効果を発現し、Ca 添加量の増加に伴い連続铸造材の表面は滑らかになった。

時効硬化による高強度化を目指し、高温圧縮試験は、圧縮温度400°C、初期ひずみ速度  $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、圧縮率50%の条件で行った。固体潤滑材である二硫化モリブデン ( $\text{MoS}_2$ ) は、試験片と金型の接触面に塗布した。加熱は大気中、左右二面加熱式電気炉 (いすゞ製作所製SSRT-310R) 内で行った。電気炉および金型加熱用カートリッジヒーターの設定温度は、試験温度 +15°C とした。試験片表面にはK 熱電対を接触させ、データロガーにて加熱曲線を記録した。その後、表面温度が試験温度の -3°C に達してから5min 間保持し、高温圧縮試験を行った。試験後、試験片は5s 以内に水冷した。

表 2. 2. 1. 2 - 3 合金の化学組成

Alloys	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Ca	Mg
0Ca (AZ91)	9.2	0.82	0.21	0.013	0.004	<0.002	<0.002	0	bal.
0.15Ca	9.4	0.72	0.27	0.012	0.012	<0.002	<0.002	0.14	bal.
0.3Ca	9.2	0.77	0.23	0.008	0.008	<0.002	<0.002	0.26	bal.
0.6Ca	9.0	0.86	0.24	0.007	0.02	<0.002	<0.002	0.56	bal.
1.0Ca	8.8	0.67	0.21	0.005	0.01	<0.002	<0.002	0.95	bal.

図 2. 2. 1. 2 - 1 9 に各連続铸造材における铸造方向に対し平行断面中央部のミクロ組織を示す。全ての合金において、微細なデンドライト状の組織を呈する。またDAS (Dendrite Arm Spacing) は各合金ともおよそ11 $\mu\text{m}$  とCa 添加量の影響は認められない。

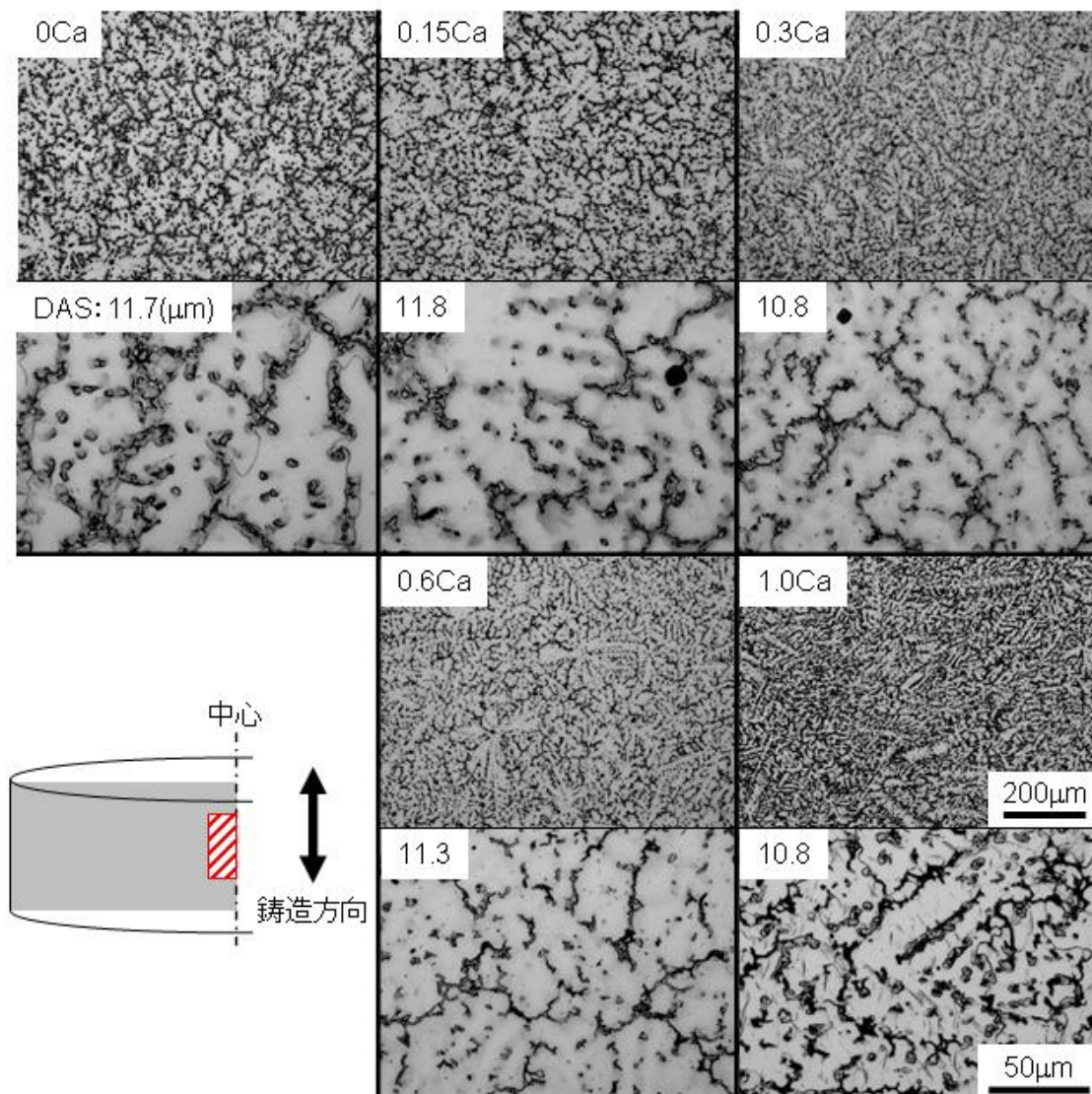


図 2. 2. 1. 2-19 各合金の鋳造まま材におけるビレット中心部のマイクロ組織

図 2. 2. 1. 2-20 に 415°C-24 時間の均質化処理を施した各合金の、鋳造方向に対し平行断面のマイクロ組織を示す。均質化処理を施すことにより 0Ca では晶出化合物がほとんど消失しているのに対し、Ca を添加した合金は晶出化合物の一部が残留しており、その残留量は Ca 添加量が増加することにより増加している。

図 2. 2. 1. 2-21 (a) および (b) に鋳造まま材、均質化処理材の引張特性を示す。鋳造まま材、均質化処理材共に、0.2% 耐力、破断伸びともに 0Ca が最も良い値を示し、Ca を添加するごとにこれらの値は低下する。

図 2. 2. 1. 2-22 に圧縮温度 400°C、歪み速度  $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$  で圧縮加工を施した各合金の中心部におけるマイクロ組織、図 2. 2. 1. 2-23 に平均再結晶粒径と再結晶率に及ぼす Ca 濃度依存性を示す。Ca 添加量が多くなるにつれて動的再結晶粒は微細化されるが、再結晶領域の面積は減少し、未再結晶領域の体積率が増加する。これは Ca 添加量の増加に伴い、粒界に残留する Al-Ca 系化合物量が増加し、これが動的再結晶粒の粗大化を抑制するものの再結晶の起点となる双晶の導入を抑制するためと考えられる。



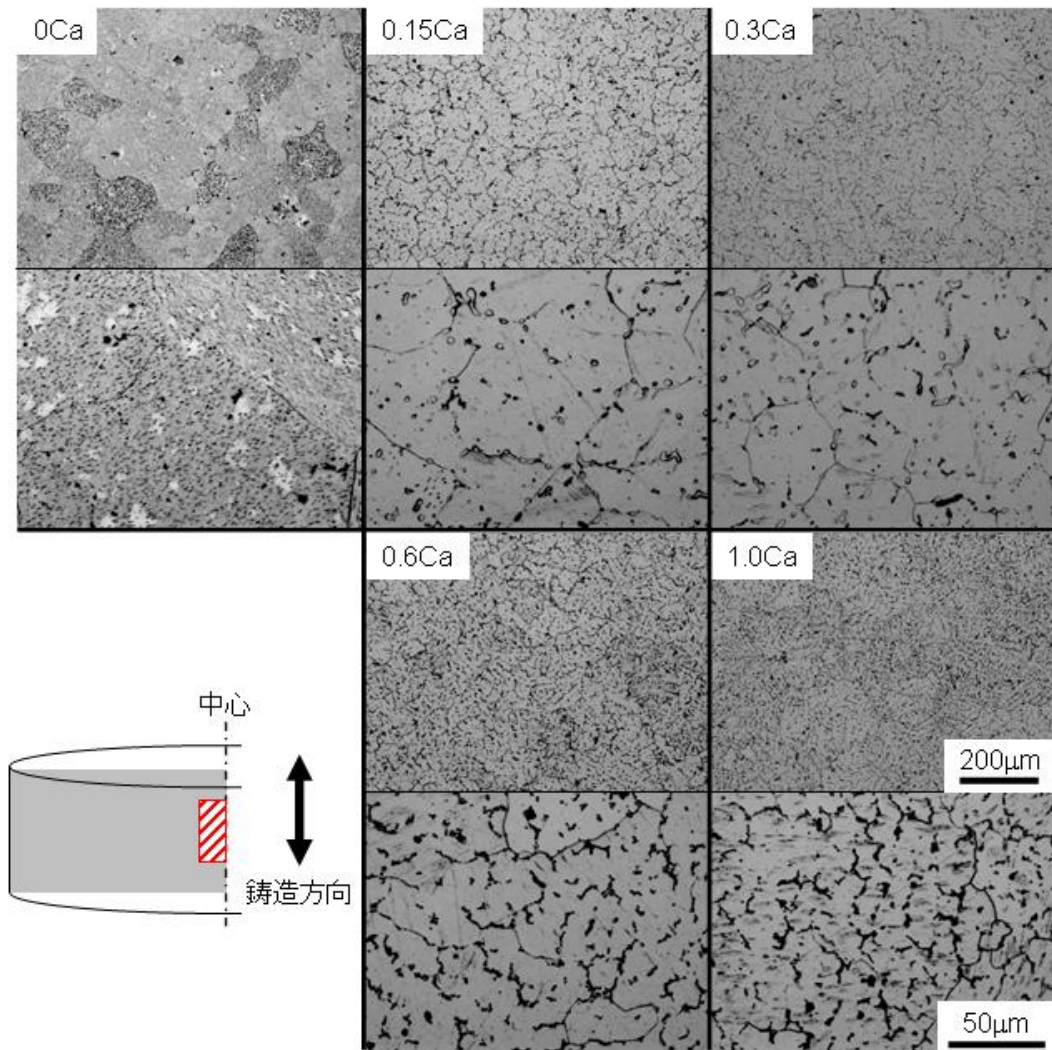


図 2. 2. 1. 2-20 各合金の 415°C-24 時間均質化処理材におけるビレット中心部のマイクロ組織

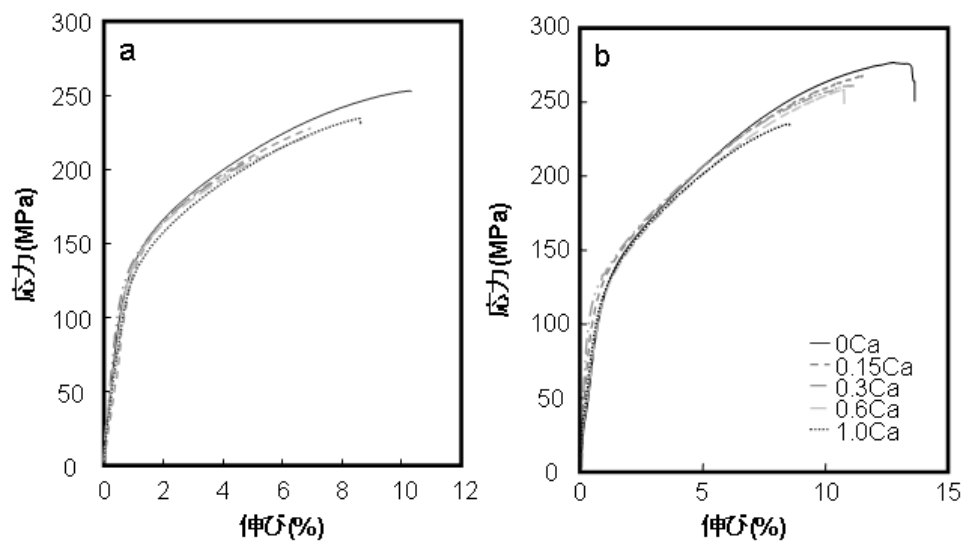


図 2. 2. 1. 2-21 铸造まま材(a)および均質化処理材(b)の室温引張特性

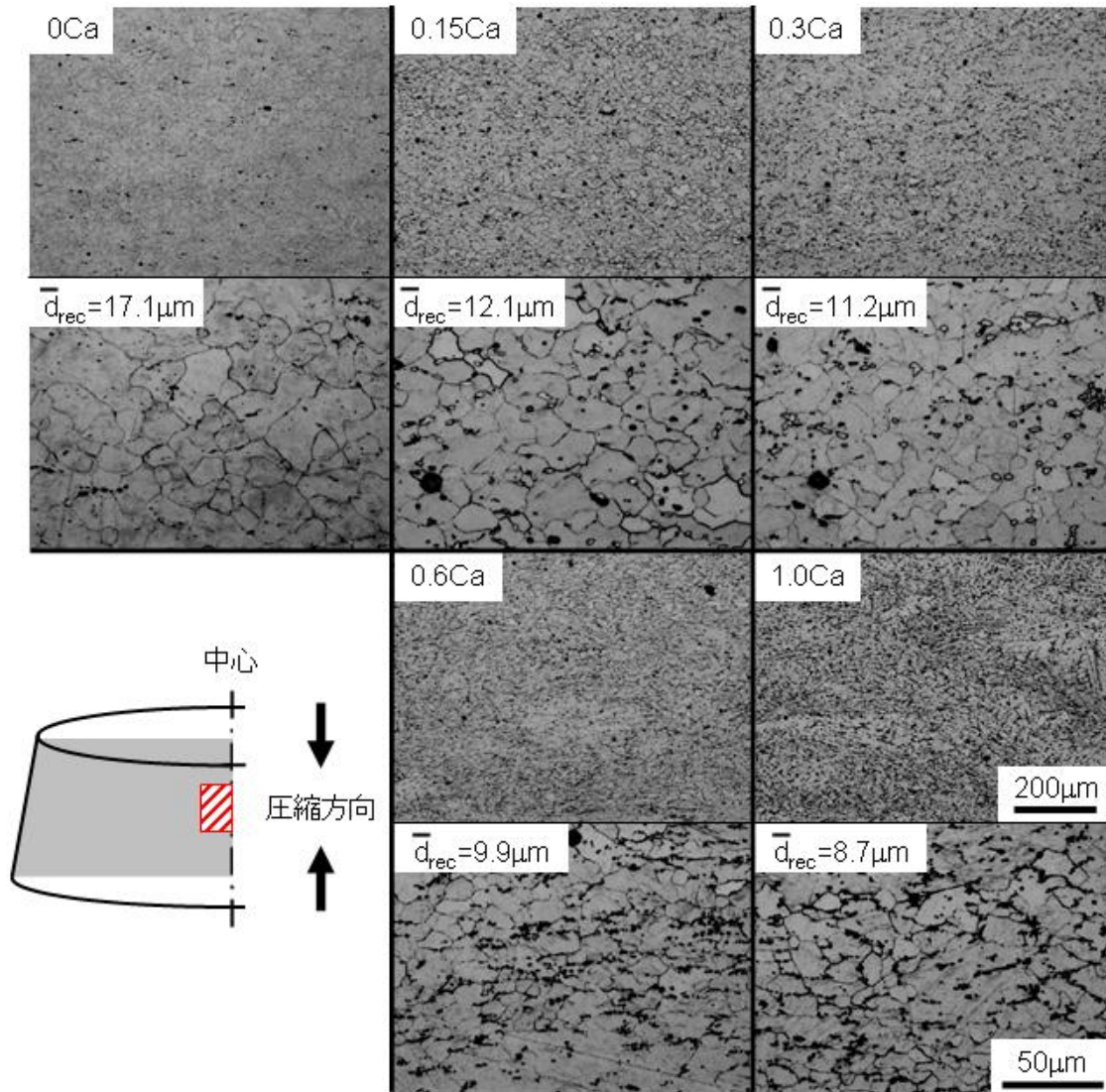


図 2. 2. 1. 2-22 高温圧縮材のマイクロ組織

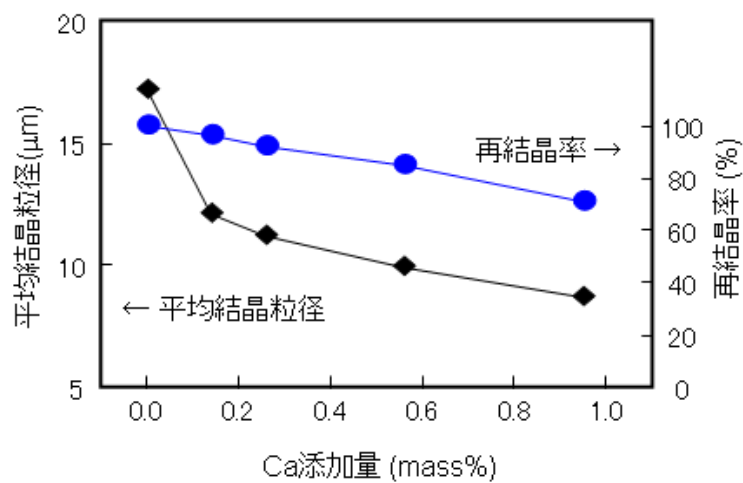


図 2. 2. 1. 2-23 高温圧縮材の Ca 添加量による平均再結晶粒径と再結晶率の変化

図 2. 2. 1. 2-24 に圧縮温度 $400^{\circ}\text{C}$ 、歪み速度 $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ で圧縮加工を施した各合金の中心部におけるSEM 像を示す。0Ca では粒界の化合物は存在しないが、Ca 添加合金で白色の粒状あるいは棒状化合物が観察され、その量はCa 添加量と共に増加する。この化合物は、Al、Caを含むAl-Ca系化合物であることがEDX分析から明らかになった。

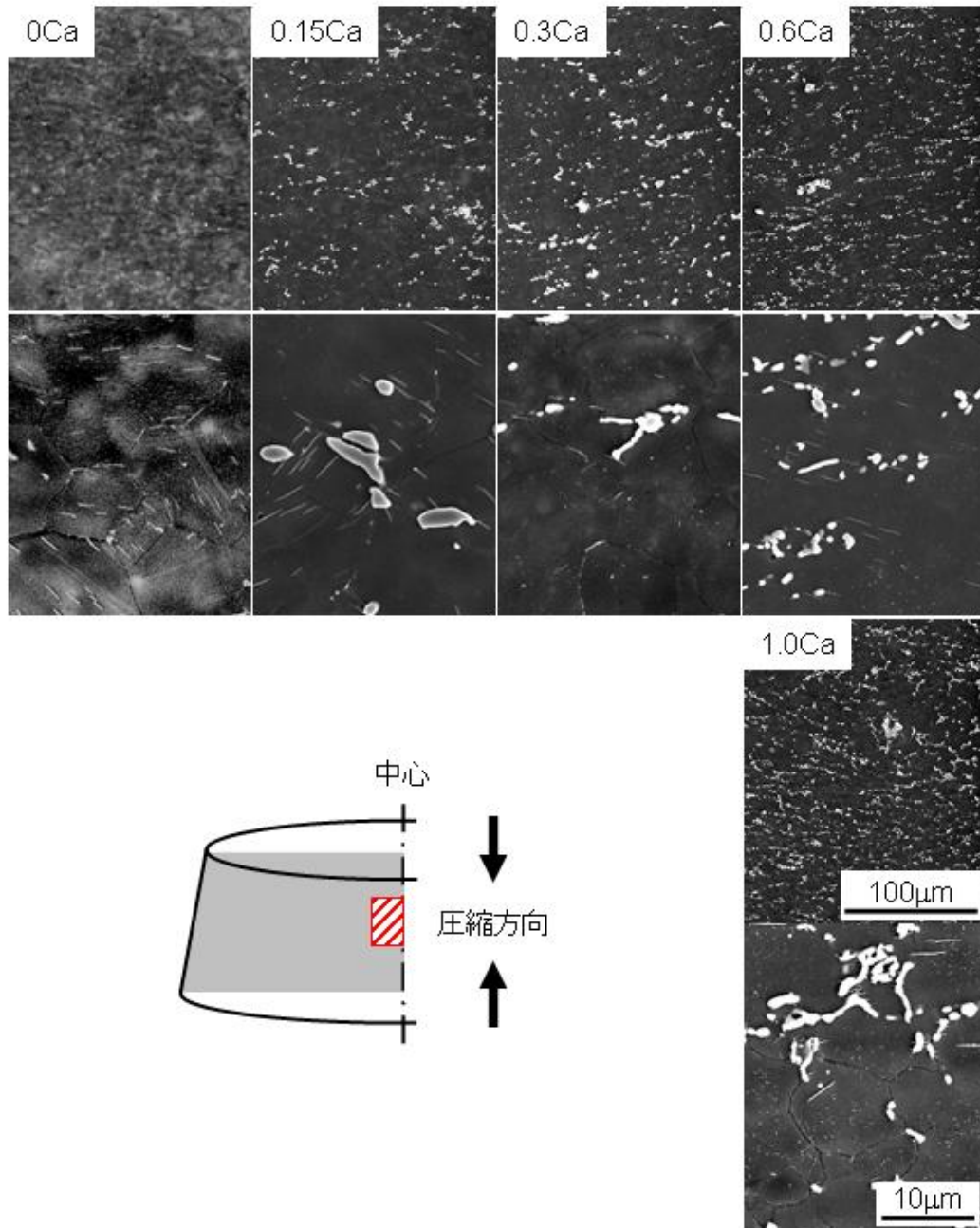


図 2. 2. 1. 2-24 高温圧縮材のマイクロ組織 (SEM 像)

図 2. 2. 1. 2-25 に圧縮温度 $400^{\circ}\text{C}$ 、歪み速度 $2 \times 10^{-3} \text{s}^{-1}$ で圧縮加工を施した各合金の (a) 引張特性および (b) 圧縮特性を示す。また図 2. 2. 1. 2-26 に、Ca 添加量の違いによる (a) 引張特性および (b) 圧縮特性の変化を示す。Ca 添加量が増加するにつれて引張・圧縮特性ともに低下する。これは、Ca 添加量の増加とともに脆い粒界化合物が多くなり、これを破壊の起点として破壊が起こるためと推測される。

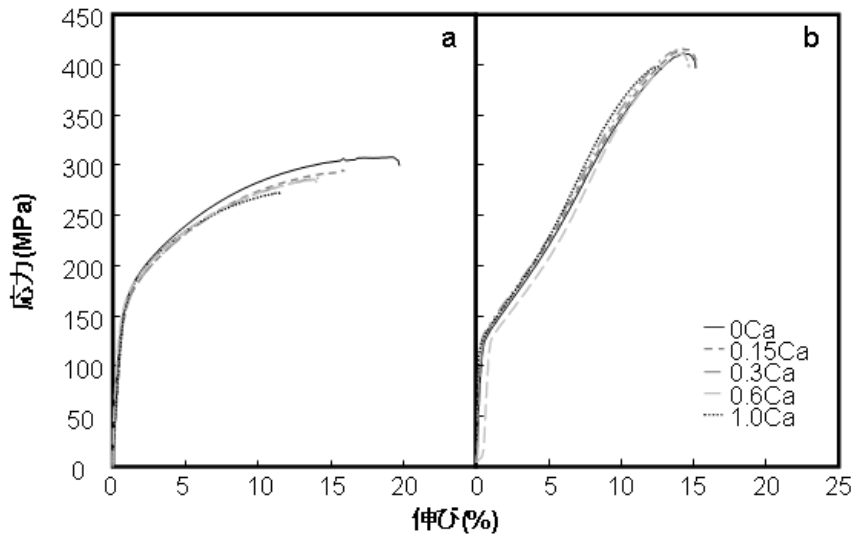


図 2. 2. 1. 2-25 高温圧縮材の室温における(a)引張特性および(b)圧縮特性

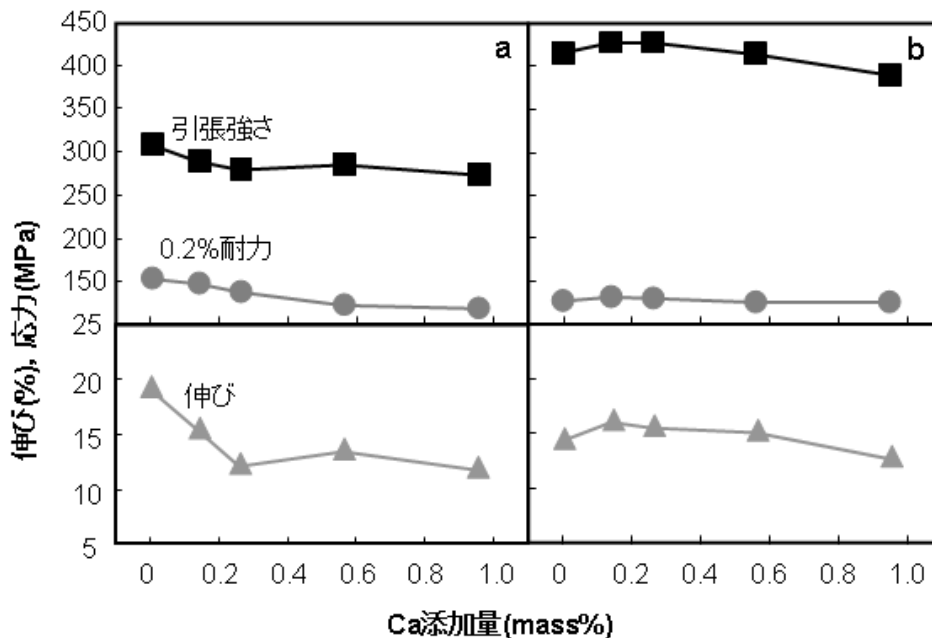


図 2. 2. 1. 2-26 高温圧縮材の室温における(a)引張特性および(b)圧縮特性におよぼす Ca 添加量の効果

$\beta$  相の時効析出による高強度化を目的として、高温圧縮材の時効特性を評価した。図 2. 2. 1. 2-27 に  $180^{\circ}\text{C}$  における各合金の時効硬化曲線を示す。0Ca ではピーク硬さが 32h で得られるのに対し、0.15Ca、0.3Ca では 64h、さらに 0.6Ca、1.0Ca では 256h と、Ca 濃度が増加するにつれてピーク時効時間は長時間側へシフトする。高温圧縮材の硬さとの比較から求められる時効による硬化量は 0Ca では 20HV 増加するものの、Ca 濃度増加に伴い硬さの増加量は小さくなり、1.0Ca では 12HV にとどまる。これは 0Ca 中の Al は粒内へ多量に固溶されているが、Ca 添加合金では粒界に Al-Ca 系化合物として存在するため、母相中の Al 濃度が減少し、その結果、時効によって析出する  $\beta$  相の析出量が減少するためと考えられる。

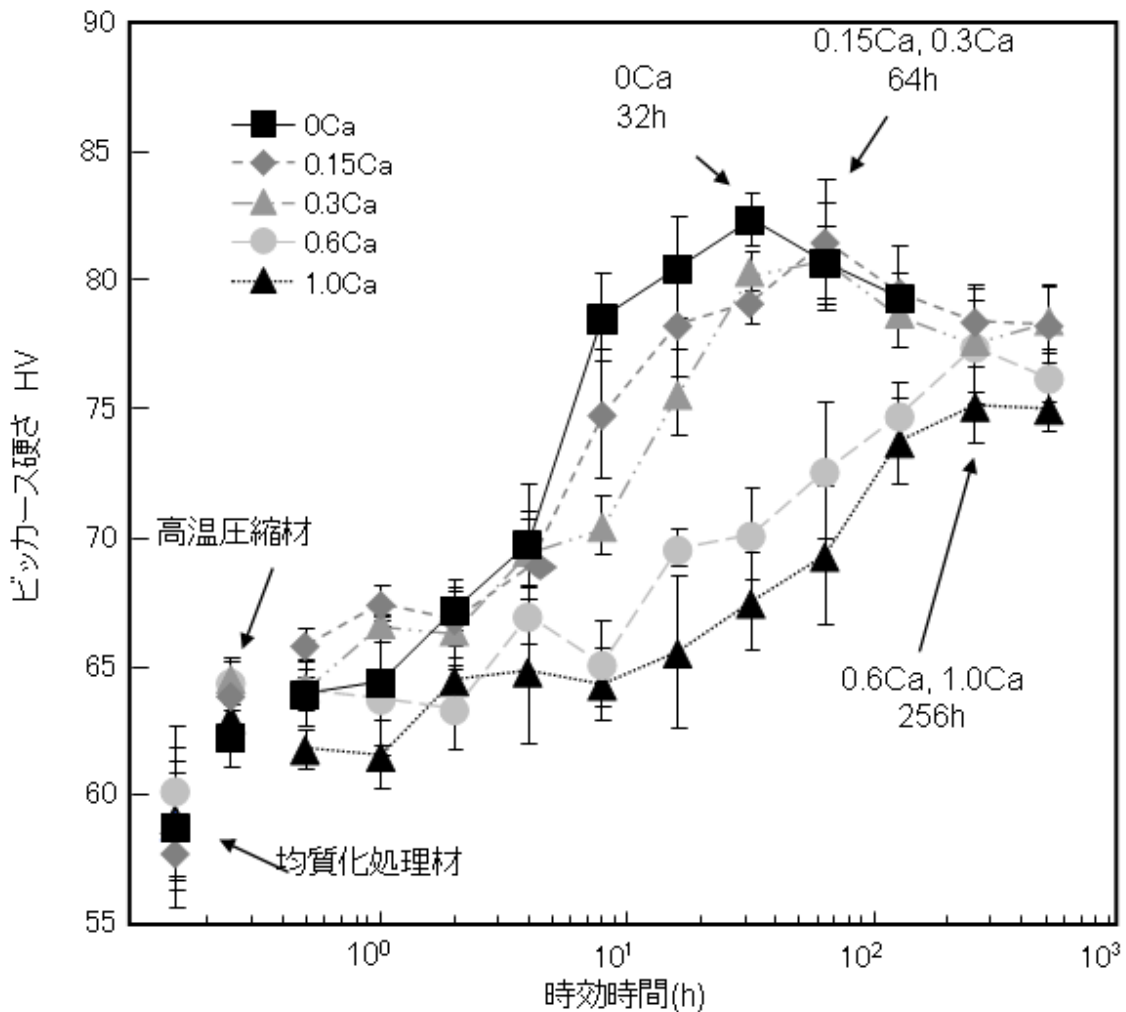


図 2. 2. 1. 2-27 180°Cにおける各合金の時効硬化曲線

図 2. 2. 1. 2-28 に180°Cでピーク硬さまで時効処理を施した時効処理材のミクロ組織を示す。粒界に不連続析出した析出物および粒内に連続析出した微細な析出物が多量に観察される。また、Ca濃度が増加すると、高強度化に寄与すると言われる不連続析出物の体積率が減少する。

図 2. 2. 1. 2-29 に180°C の時効温度でピーク硬さまで時効処理を施した時効処理材の (a) 引張特性および (b) 圧縮特性を示す。また、図 2. 2. 1. 2-30 に (a) 引張特性と、(b) 圧縮特性に及ぼすCa 濃度の影響を示す。T5 処理を施すことにより引張強さ、0.2%耐力は向上するものの、伸びは低下する。また図 2. 2. 1. 2-26 と比べると分かるように、時効処理によって特に0.2%耐力の向上が著しく、高温圧縮まま材よりも50MPa 以上も耐力が増加する。このように、圧縮材に180°Cの時効処理を施すことで、0.3%Ca 添加合金でもAZ91 合金に匹敵する強度・延性を示すことを明らかにした。

また高温圧縮材と同様に時効処理材においても、Ca 濃度が増加するにつれて、引張特性は低下する。これは、Ca 濃度の増加とともに脆い粒界化合物が多くなり、これを破壊の起点として破壊が起こるためと推測される。さらに、T5 処理材では、高強度化に寄与する不連続析出物の体積率が、Ca 添加量の増加とともに減少するため引張強さ、耐力とも低下すると考えられる。

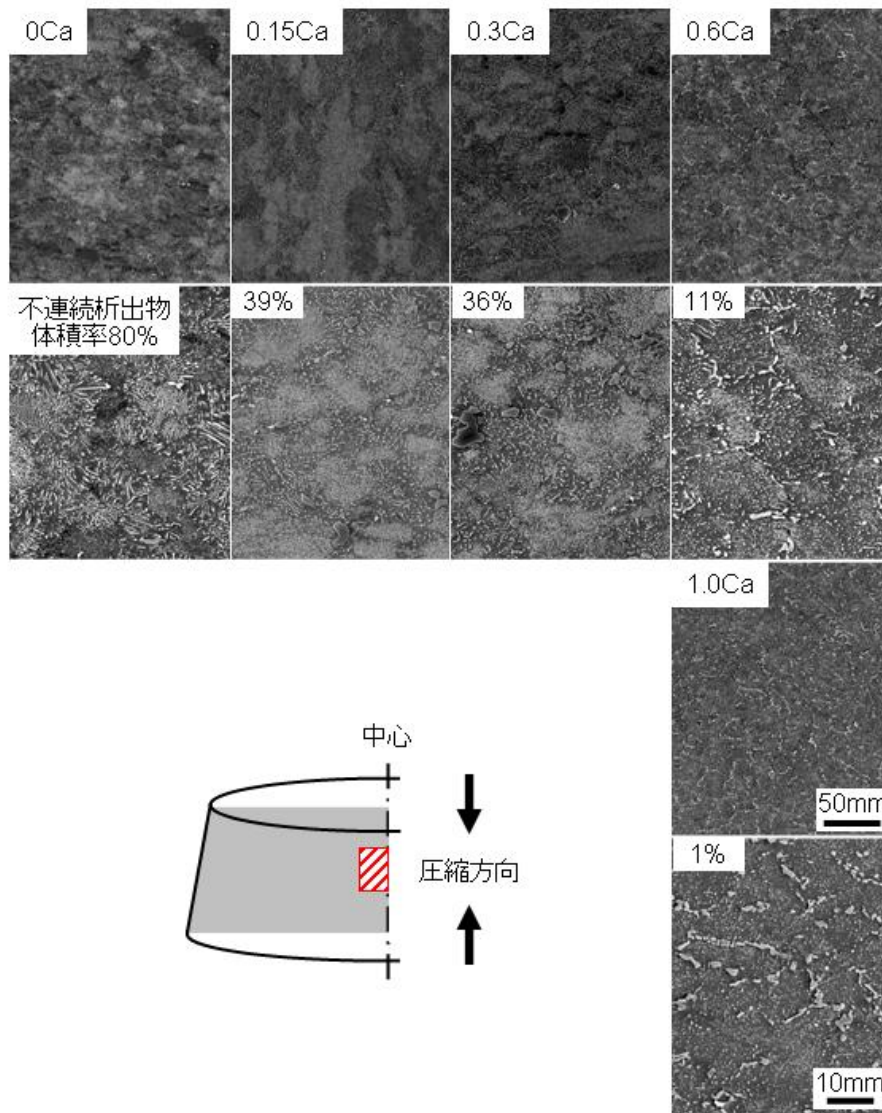


図 2. 2. 1. 2-28 180°Cでピーク時効した各合金のマイクロ組織

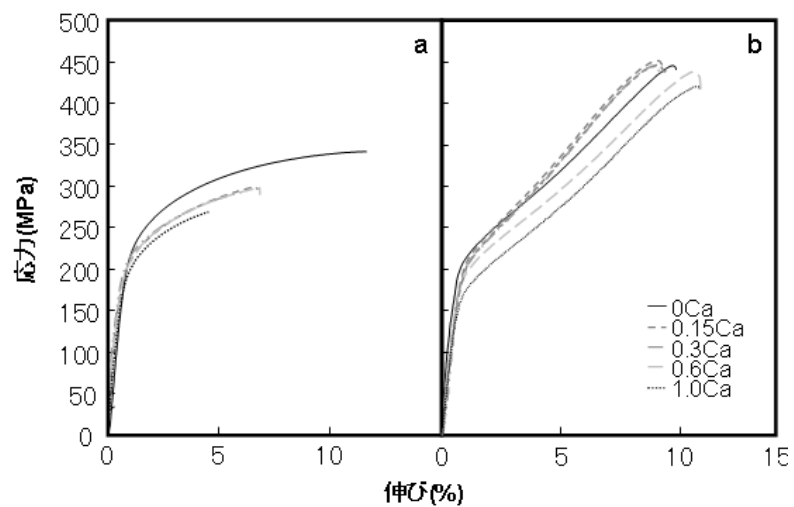


図 2. 2. 1. 2-29 180°Cでピーク時効した各合金の室温における(a)引張特性および(b)圧縮特性

## 2. 2. 1. 3 鍛造部材のマイクロ組織解析と機械的性質の関係説明

### (研究開発項目②- (1) b ア)

大学への再委託研究で得られた知見に基づき、マグネシウム合金連続鍛造材の鍛造温度の低温化を検討した。鍛造用素材は、AZ91 マグネシウム合金連続鍛造材（三協マテリアル㈱製、直径 56mm）である。表 2. 2. 1. 3-1 に供試材の化学組成を示す。

表 2. 2. 1. 3-1 供試材の化学組成(mass%)

合金	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
AZ91	9.2	0.76	0.27	0.009	0.007	<0.002	<0.002	Bal.

鍛造には、放電精密(株)製直動式デジタルサーボプレス(ZENFormer、300t)を使用した。また素材には鍛造前に、410℃/24 時間の均質化処理を施している。図 2. 2. 1. 3-1 に均質化処理材の組織を示す。平均結晶粒径は 69μm である。また均質化処理材の引張強度は 275MPa、0.2%耐力は 120MPa、破断伸びは 20.0%であった。鍛造は次のような手順で行なった。

最初に長さ 160mm に切り出したブランク材の両端面に水溶性黒鉛を、上下圧板に油性黒鉛を塗布し、材料、圧板ともに温度 300℃に加熱し、プレス速度 25mm/s で圧縮率 77%のすえ込み加工を行った。すえ込み加工後の代表的マイクロ組織を図 2. 2. 1. 3-2 に示す。平均結晶粒径は 25 μm である。

さらにすえ込み後の直径約 116mm、高さ 37mm の円盤から、前後方押出加工用ブランク、直径 35mm、高さ 35.8mm を採取した。この後の鍛造工程は図 2. 2. 1. 3-3 に示すようにダイ内壁に充満するまでの第 1 工程と前後方押出変形の第 2 工程について、温度を変えて別工程で行った。第 1 工程ではパンチとダイに油性黒鉛を、ブランクに水性黒鉛を塗布し、いずれも温度 300℃でパンチ速度 1mm/s とした。第 2 工程では金型、ブランク双方にシリコン油を塗布し、温度はいずれも 150、175、200、225 および 250℃とした。なおパンチ、ダイおよびダイピンは SKD61 製でいずれも DLC コーティングを施したものを用いた。

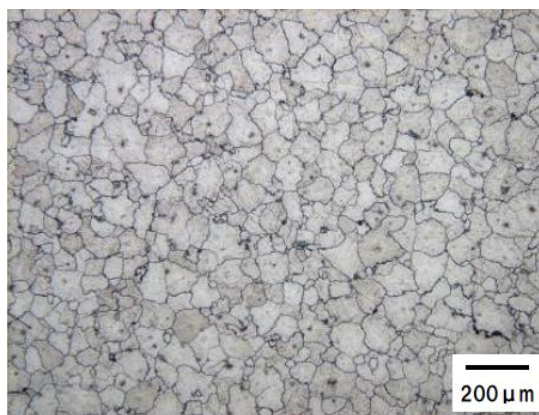


図 2. 2. 1. 3-1 AZ91 均質化処理材の組織

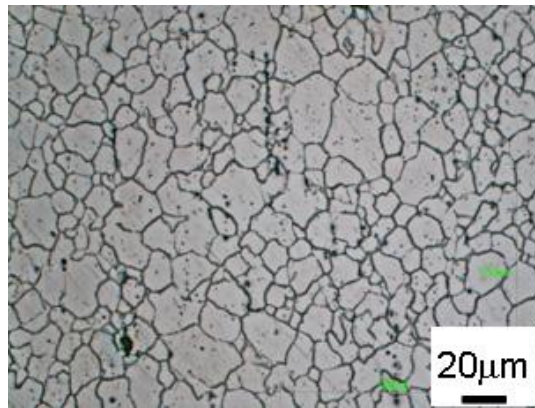


図 2. 2. 1. 3-2 AZ91 均質化处理材の据え込み後の組織

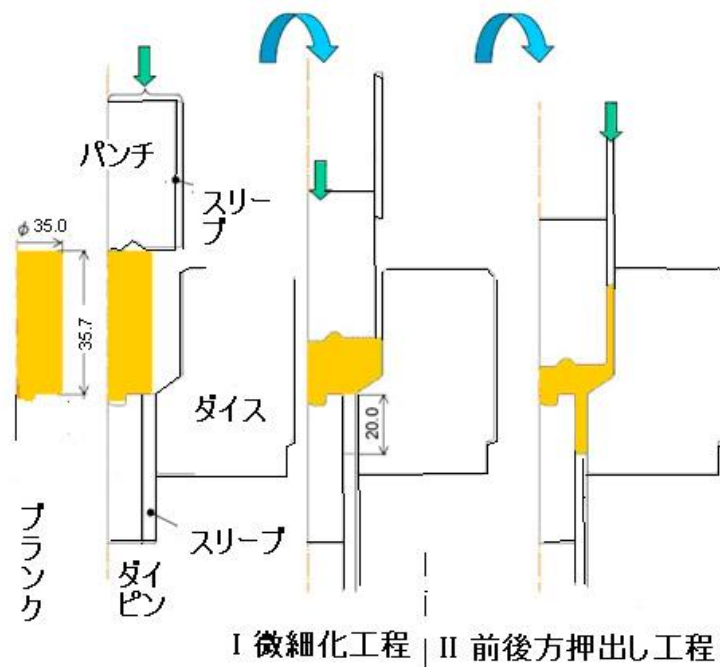


図 2. 2. 1. 3-3 鍛造工程図

図 2. 2. 1. 3-4 に第 2 工程における鍛造荷重・ストローク曲線を各鍛造温度について示す。荷重変化には a 部、b 部および c 部 3 ヲ所にピークがみられる。a 部から前方と後方への流動が始まり変形とともに荷重は低下し前方押し出しが完了するところで最低値となる。その後は後方押し出しのみの変形となり加工度が増すため荷重は最低値を経て再び増加に転じ b 部のピークに至る。この時点からほぼ定常的な流動となる。c 部のピークはスリーブによる後方押し出部上端面の圧縮によるもので、変形量が減少する 200℃以下では現れていない。パンチストローク 8 mm における荷重 P と鍛造温度 T(K) の関係を見ると図 2. 2. 1. 3-5 に示すように  $\log P = A/T + B$  (A, B は定数) の関係があることがわかる。これにより二点の荷重と温度の関係から他の温度における荷重が推定できることがわかる。



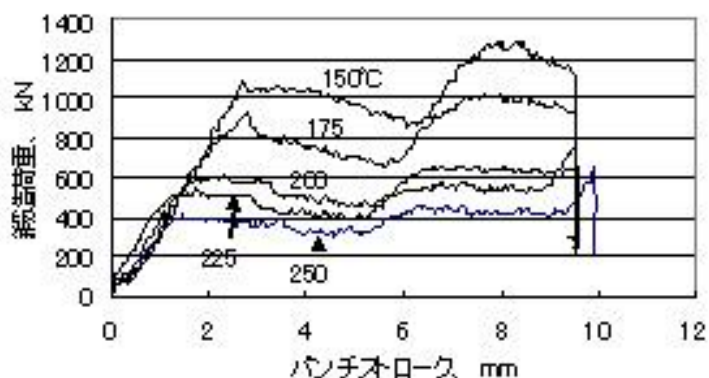


図 2. 2. 1. 3-4 第 2 工程の鍛造荷重・ストローク曲線

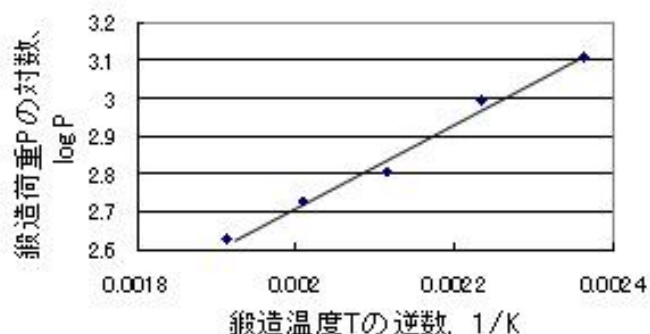


図 2. 2. 1. 3-5 ストローク 8 mm における荷重と鍛造温度の関係

図 2. 2. 1. 3-6 に、底部の組織観察結果を示す。この図より鍛造温度により組織の様相が異なることがわかる。温度 250°C では全体に均一でしかも極めて微細な結晶粒組織であるが、温度が低くなるに伴って微細組織のなかに粗い結晶粒が混在するようになり、粗大粒の数も大きさも増してくる。結晶粒径は 5 $\mu\text{m}$  以下まで微細化している。また粒界が明瞭ではないが、鍛造温度が下がると結晶粒径は微細化するようである。ただ、鍛造温度が 175°C 以下になると、結晶粒が微細化していない領域が目立つなど、組織が不均質になる。後方押出部の組織観察結果を図 2. 2. 1. 3-7 に示すが、底部と同様に温度 250°C では全体に均一でしかも極めて微細な結晶粒組織であるが、温度が低くなるに伴って微細組織のなかに粗い結晶粒が混在するようになり、粗大粒の数も大きさも増してくる。この結果は、第 2 工程でも鍛造温度 250°C で動的再結晶に伴う微細化が進行するが、200°C 以下では次第に進行しなくなることを示している。

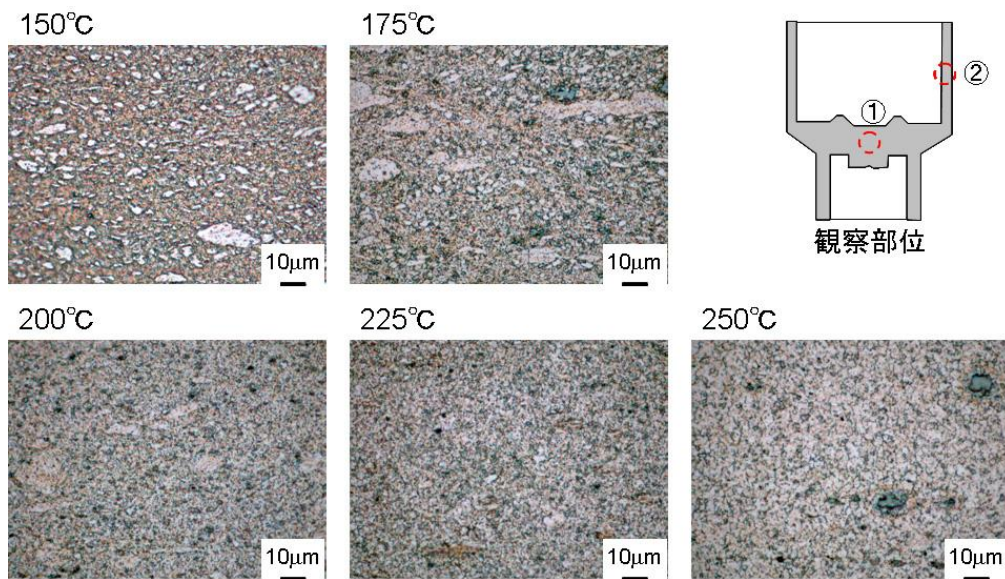


図 2. 2. 1. 3-6 試作鍛造品底部のマイクロ組織

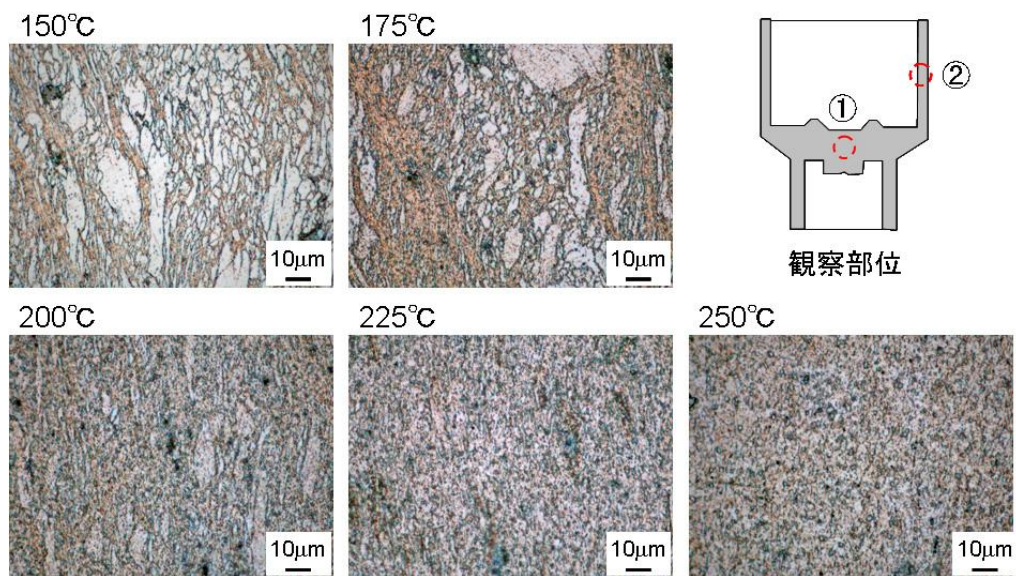


図 2. 2. 1. 3-7 試作鍛造品後方押出部のマイクロ組織

次に室温での引張試験を行なった。図 2. 2. 1. 3-8 に試作鍛造品の外観および引張試験片採取位置、および試験片寸法を示す。

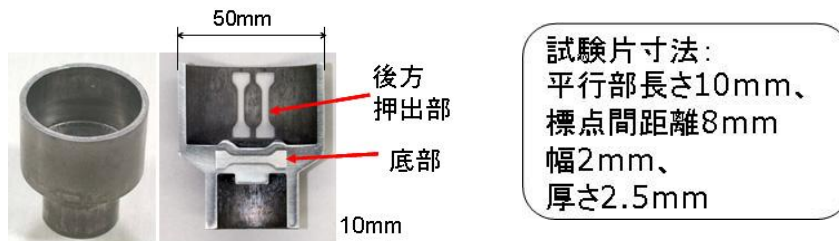


図 2. 2. 1. 3-8 試作鍛造品の外観と引張試験片採取位置および形状

図 2. 2. 1. 3-9 に後方押出部の室温引張試験結果を示す。この図からわかるよう

に鍛造温度が低下するに伴って耐力は増大する。一方、伸びは減少する。引張強さはいずれの温度でもほぼ同じ 330 MPa 程度である。図 2. 2. 1. 3-10 は底部 B における室温引張試験結果を示す。鍛造温度が低下するにともない耐力は増し、伸びは減少することは図 2. 2. 1. 3-9 と同じであるが 150℃において 10%もの伸びが得られ、かつ引張強さ 385MPa が得られることがわかる。

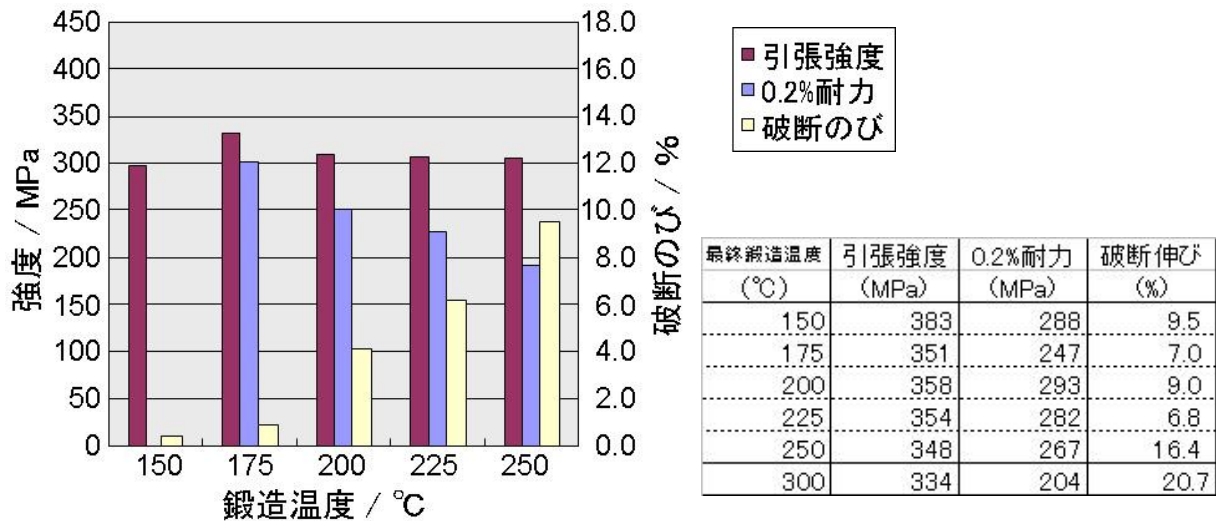


図 2. 2. 1. 3-9 試作鍛造品後方押出部の室温引張特性

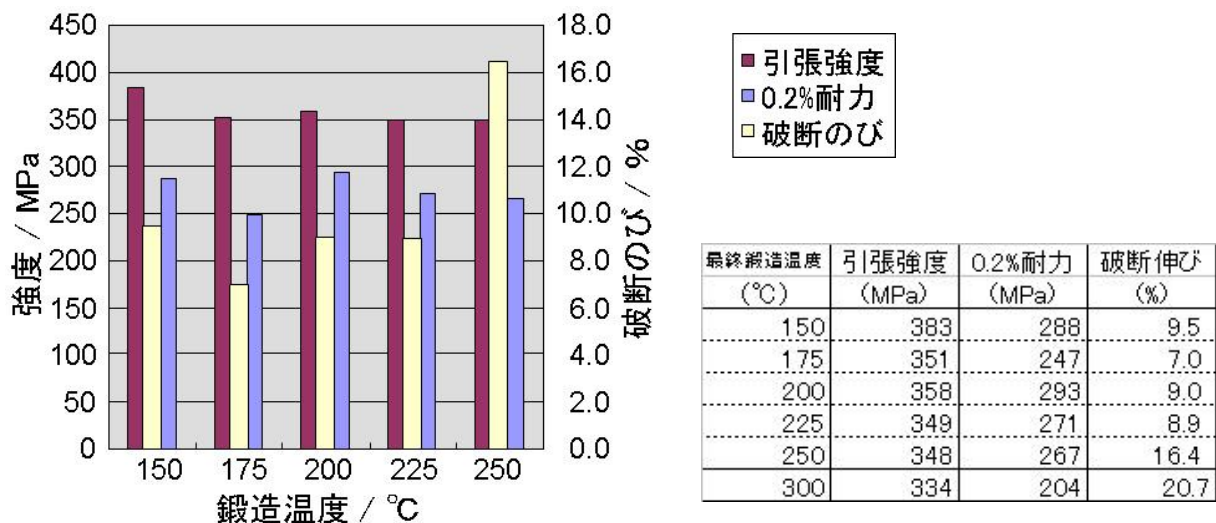


図 2. 2. 1. 3-10 試作鍛造品底部の室温引張特性

以上のように、マグネシウム合金の鍛造において、適切な素材を選択し、適切な熱処理を行い、動的再結晶による結晶粒微細化を十分に発現させておき、適切なコーティングを施した金型を用いることで、鍛造温度 150℃までの低温化を実現した。これは世界初の成果である。しかし、鍛造温度が 175℃以下になると、組織が不均質になり伸びが低下する。この結果は、AZ91 合金連続鍛造材において、組織と機械的特性のバランスがとれた鍛造条件が存在することを示唆している。

2. 2. 2 高疲労強度マグネシウム鍛造部材創生のための基盤技術開発  
 (研究開発項目②- (2))

AZ91 マグネシウム合金連続鋳造材(均質化处理材)を、250℃から 300℃で鍛造速度 1mm/s で鍛造したあと鍛造品から試験片を採取し、室温で疲労試験を行なった。疲労試験は引張-引張で行ない、R=0.1 である。鍛造品の形状は図 2. 2. 2-1 のとおりである。試験片の採取位置および試験片の寸法は、引張試験と同じにした。図 2. 2. 2-2 に疲労試験の結果を示す。鍛造温度 250℃での試作鍛造品の底部から採取した試験片で、数値目標である 170MPa (10<sup>7</sup>回) を達成した。疲労強度 170MPa は、AZ 系マグネシウム合金としては世界最高水準である。室温引張試験結果でも、鍛造温度 250℃で鍛造した試作鍛造品の底部は強度と伸びのバランスが優れており、疲労試験の結果と対応している。

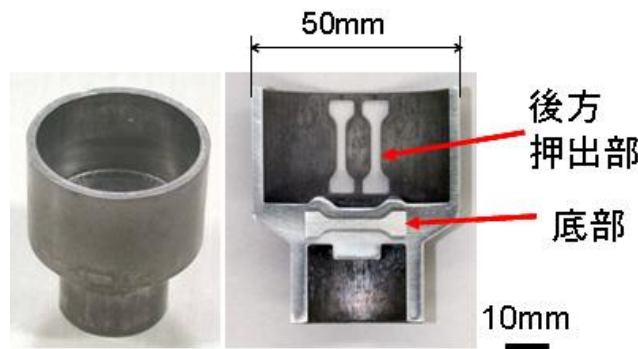


図 2. 2. 2-1 試作鍛造品の外観と疲労試験片採取位置および形状

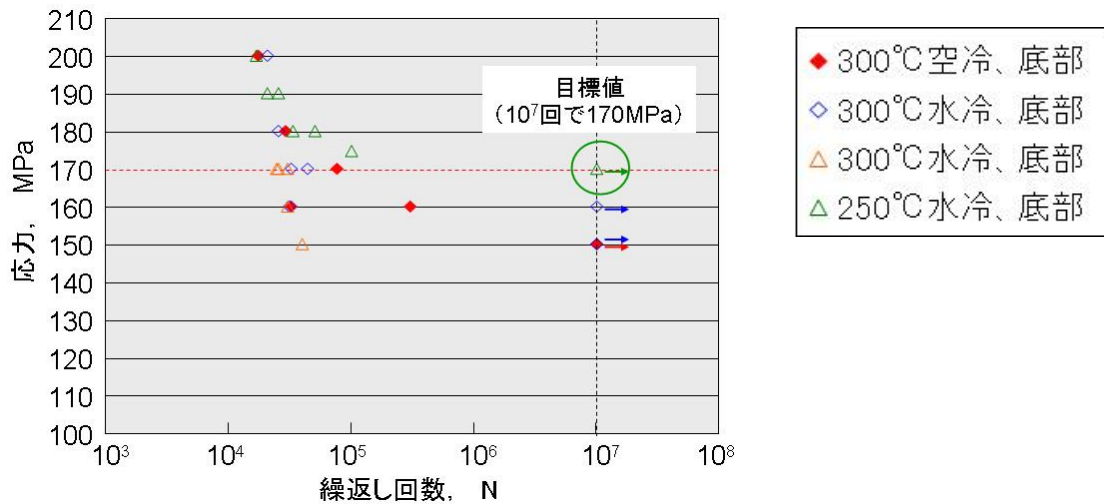


図 2. 2. 2-2 試作鍛造品の疲労試験結果

2. 2. 3 鍛造加工マップの構築 (研究開発項目②- (3))

鍛造加工マップとは、鍛造加工条件と鍛造加工性(変形抵抗)の関係を示したものである。このマップを参照することで、ある材料を任意の条件(鍛造温度とひずみ速度)で加工した場合の鍛造加工性(変形抵抗)を導出することが出来るようにする。鍛造加工マップと鍛造データベースは図 2. 2. 3-1 のような関係にある。



図 2. 2. 3-1 鍛造加工マップと鍛造データベースの関係

本研究開発ではまず、次のような手順で鍛造加工マップを試作した。

(第一ステップ)

研究開発項目①で構築した鍛造データベースから、素材の鍛造条件（Z パラメータ）と鍛造加工性（変形抵抗）の関係をグラフ化する。その例を図 2. 2. 3-2 に示す。変形抵抗（ $\sigma$ ）と Z パラメータはほぼ直線関係にあることが分かる<sup>1)</sup>。

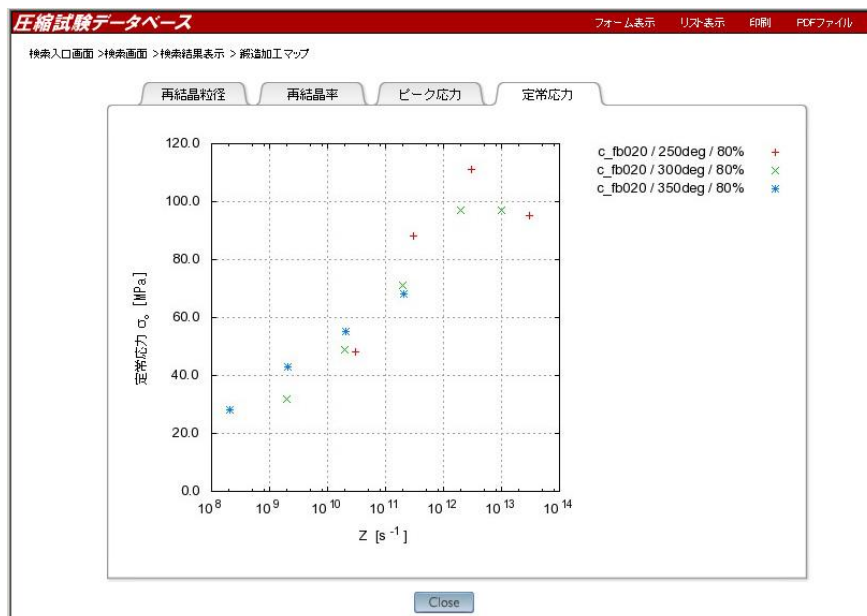


図 2. 2. 3-2 変形抵抗と Z パラメータの関係の例（AZ91 連続鍛造材）

(第二ステップ)

変形抵抗と Z パラメータの関係を直線で近似する。その例を図 2. 2. 3-3 に示す。これは AZ91 マグネシウム合金連続鍛造材（均質化処理材）の高温圧縮試験を整理したものである。

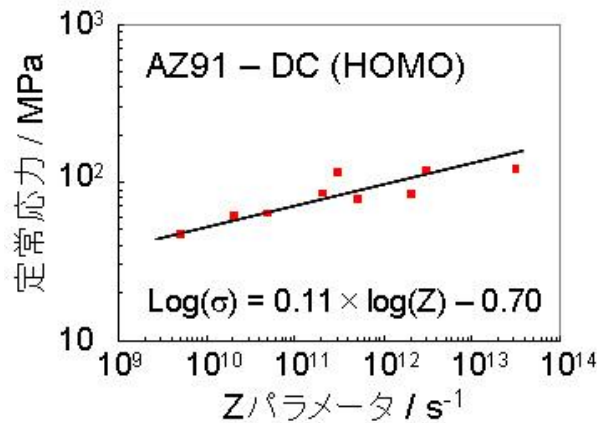


図 2. 2. 3-3 変形抵抗と Z パラメータの関係を直線で近似した例

(第三ステップ)

第二ステップで求めた関係式を使い、変形抵抗 ( $\sigma$ ) が 50MPa から 300MPa の範囲で Z パラメータを求める。表 2. 2. 3-1 に AZ91 マグネシウム合金連続鋳造材 (均質化処理材) についての結果を示す。

(第四ステップ)

ひずみ速度が  $0.01 \text{ s}^{-1}$  から  $10 \text{ s}^{-1}$  の範囲で、第二ステップで求めた Z パラメータから温度を求める。表 2. 2. 3-2 に AZ91 マグネシウム合金連続鋳造材 (均質化処理材) についての結果を示す。表の中の数字が温度 (単位は K) である。これによって、ひずみ速度と加工温度を分離して、変形抵抗との関係を求めることができる。鍛造現場での利用を想定し、表 2. 2. 3-2 における温度を  $^{\circ}\text{C}$  に直したものが表 2. 2. 3-3 である。

表 2. 2. 3-1 Z パラメータの  
計算結果例

$\sigma_p$ (MPa)	Z( $\text{S}^{-1}$ )	log (Z)
50	2.69E+09	9.429601
60	1.49E+10	10.17428
70	6.37E+10	10.8039
80	2.24E+11	11.3493
90	6.77E+11	11.83038
100	1.82E+12	12.26072
110	4.47E+12	12.65001
120	1.01E+13	13.0054
130	2.15E+13	13.33233
140	4.32E+13	13.63502
150	8.26E+13	13.91682
160	1.52E+14	14.18042
170	2.68E+14	14.42804
180	4.59E+14	14.6615
190	7.63E+14	14.88233
200	1.24E+15	15.09184
210	1.95E+15	15.29112
220	3.03E+15	15.48113
230	4.6E+15	15.66269
240	6.86E+15	15.83652
250	1.01E+16	16.00325
260	1.46E+16	16.16345
270	2.08E+16	16.3176
280	2.93E+16	16.46614
290	4.07E+16	16.60947
300	5.6E+16	16.74794

表 2. 2. 3-2 温度の計算結果例

Z ( $\text{S}^{-1}$ )	ひずみ速度( $\text{s}^{-1}$ )			
	0.01	0.1	1	10
2.69E+09	617	676	748	837
1.49E+10	580	631	693	769
6.37E+10	551	598	653	720
2.24E+11	529	571	622	682
6.77E+11	510	550	596	651
1.82E+12	495	532	575	627
4.47E+12	482	517	558	606
1.01E+13	470	504	542	588
2.15E+13	460	492	529	572
4.32E+13	451	482	517	558
8.26E+13	443	473	507	546
1.52E+14	436	465	498	535
2.68E+14	429	457	489	525
4.59E+14	423	450	481	516
7.63E+14	418	444	474	508
1.24E+15	413	438	467	501
1.95E+15	408	433	461	494
3.03E+15	404	428	456	487
4.6E+15	399	423	450	481
6.86E+15	396	419	446	476
1.01E+16	392	415	441	470
1.46E+16	388	411	436	465
2.08E+16	385	407	432	461
2.93E+16	382	404	428	456
4.07E+16	379	401	425	452
5.6E+16	376	398	421	448

図 2. 2. 3-4 に試作した鍛造加工マップの例を示す。この図は、表 2. 2. 3-2 の結果を各ひずみ速度ごとにプロットしたものである。ただし、鍛造現場での使用を想定して温度の単位は℃とした。また試作鍛造の結果から、温度範囲 150℃~400℃のデータを有効とした。この図は AZ91 マグネシウム合金連続铸造材 (均質化处理材) の例であるが、任意の温度とひずみ速度で加工した場合の変形抵抗を見積もることが出来る。ただマップ作成の基になった圧縮試験において、温度とひずみ速度が限られているため、その範囲外については推測値となる。この点は今後、検討する必要がある。この鍛造加工マップは、プロジェクト集中研で得られた基盤研究の成果を助成事業に活用するためのツールであり、基礎基盤研究の成果を汎用性のあるものに再構築したものである。

表 2. 2. 3-3 鍛造加工マップのデータ

$\sigma_p$ (MPa)	ひずみ速度( $s^{-1}$ )					
	0.01	0.1	1	10	100	1000
	鍛造温度 (°C)	鍛造温度 (°C)	鍛造温度 (°C)	鍛造温度 (°C)	鍛造温度 (°C)	鍛造温度 (°C)
50	344	403				
60	307	358				
70	278	325	380			
80	256	298	349	409		
90	237	277	323	378		
100	222	259	302	354		
110	209	244	285	333	389	
120	197	231	269	315	368	
130	187	219	256	299	350	410
140	178	209	244	285	333	390
150	170	200	234	273	319	373
160	163	192	225	262	306	358
170	156	184	216	252	295	344
180	150	177	208	243	284	332
190		171	201	235	275	321
200		165	194	228	266	310
210		160	188	221	258	301
220		155	183	214	250	292
230		150	177	208	243	284
240			173	203	237	277
250			168	197	231	270
260			163	192	225	263
270			159	188	220	257
280			155	183	215	251
290			152	179	210	245
300				175	205	240

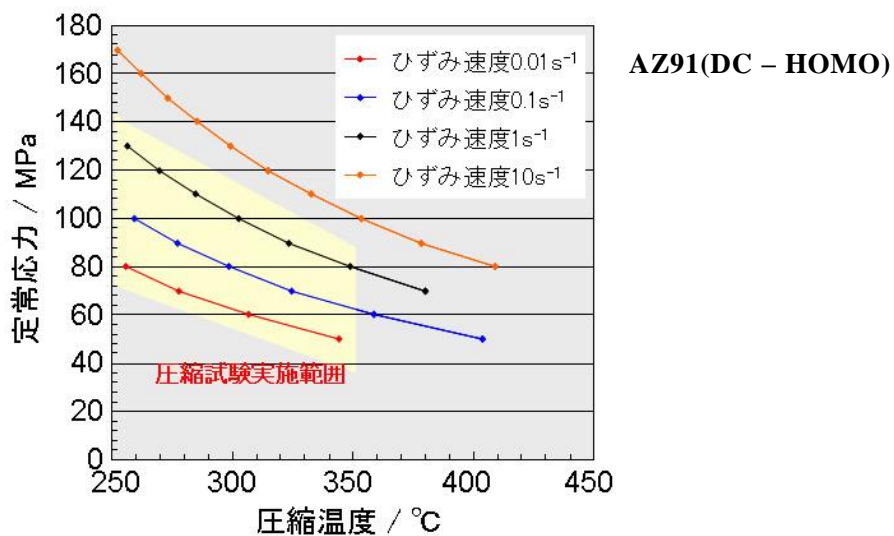


図 2. 2. 3-4 試作した鍛造加工マップの例 (AZ91 マグネシウム合金連続铸造材)

## 2. 2. 4 成果の意義

本研究開発成果の意義は、次のようになる。

### ① 新しい技術領域の開拓

組織制御技術と塑性加工技術を融合した新しいものづくりのための基盤技術を開発した。

### ② 成果の水準

本研究は、マグネシウム合金の鍛造時の組織制御を、計算機支援技術、原子オーダーからミクロレベルまでの組織解析技術を駆使して明らかにするものであり、世界初の成果も得られているなど、非常に高い水準にある。

### ③ 成果の優位性

マグネシウム合金の組織制御に関する理論的な裏づけのもとに、最適鍛造条件を企業に提案することが出来る点で、本事業の成果が従来の研究よりも優位性を持つ。

### ④ 成果の汎用性

本研究の成果のひとつである鍛造加工マップは、任意の鍛造条件（鍛造温度とひずみ速度）と変形抵抗の関係を示すものであり、鍛造現場で最適鍛造条件を導出するためのツールとして汎用性を持つ。

## 2. 2. 5 最終目標の達成度

本研究課題の最終目標は次の通りである。

### 【最終目標】

鍛造用素材の組織の結晶粒子と変形機構との関係についてデータベース化を進め、鍛造加工マップとして整備し、鍛造温度低温化技術を開発するとともに、実用化レベルの部材として170MPa(10<sup>7</sup>回)の疲労強度を持つ構造用マグネシウム鍛造部材の最適な鍛造加工手順を導出するための鍛造組織形成技術の基盤技術を構築する。

最終目標	達成度	根拠
鍛造用素材の組織の結晶粒子と変形機構との関係についてデータベース化を進め、鍛造加工マップとして整備	○	鍛造加工マップを整備した
鍛造温度低温化技術を開発する	○	150℃での鍛造技術を開発した
170MPa(10 <sup>7</sup> 回)の疲労強度を持つ構造用マグネシウム鍛造部材の最適な鍛造加工手順を導出するための鍛造組織形成技術の基盤技術を構築する	○	マグネシウム合金鍛造部材で170MPa(10 <sup>7</sup> 回)の疲労強度を達成した。

◎:最終目標を超えている ○:最終目標を達成 ×:最終目標未達成



## 2. 2. 6 参考文献

### 2. 2. 1. 1 鍛造素材の組成及び微細組織と鍛造加工性の関係解明

- 1) C. Zener and J. H. Hollomon: J. Appl. Phys. 15 (1944) 22
- 2) H. Watanabe, H. Tsutsui, T. Mukai, H. Ishikawa, Y. Okanda, M. Kohzu, K. Higashi: Mater. Trans. 42 (2001) 1200
- 3) A. Takara, Y. Nishikawa, H. Watanabe, H. Somekawa, T. Mukai and K. Higashi: Mater. Trans. 45 (2004) 2531
- 4) K. Hirai, H. Somekawa, Y. Takigawa and K. Higashi: Scripta Mater. 56 (2007) 237.
- 5) R.O. Kaibyshev, A. M. Galiev and B. K. Sokolov: Phys. Met. Metall. 78 (1994) 209.
- 6) M. Mabuchi, K. Kubota and K. Higashi: Mater. Trans., JIM 36 (1995) 1249
- 7) M. Suzuki, T. Kimura, J. Koike and K. Maruyama: Mater. Sci. Eng. A387-389 (2004) 706

### 2. 2. 1. 2 鍛造素材及び鍛造部材の第二相粒子による高機能化の検討

- 1) D. Duly, J.P. Simon, Y. Brechet, Acta Metall. Mater., 43(1995), 101
- 2) M. R. Barnett, Z. Keshavarz, A. G. Beer and X. Ma: Acta Materialia, 56(2008), 5
- 3) H.Watanabe, H.Tsutsui, T.Mukai, K.Ishikawa, Y.Okanda, M.Kohzu and K.Higashi, Mater. Trans., 42(2001), 1200
- 4) 吉田雄：組織制御によるマグネシウム合金の高強度・高延性化および加工性の改善，長岡技術科学大学，博士論文，(2005).
- 5) K. Matsubara, Y. Miyahara, Z. Horita, T. G. Langdon: Acta Mater., (2003), 3073.
- 6) W. A. Backofen (戸澤康寿訳)：金属塑性と加工，コロナ社，東京，(1980).
- 7) F. J. Humphreys and M. Hatherly: Recrystallization and Related Annealing Phenomena, Elsevier, Oxford, (2004).

## 2. 2. 7 鍛造加工マップの構築

- 1) H.Iwasaki, N.Saito, M.Hakamada, M.Sakamoto and K.Higash: Steel Research International, 81(2010), 1271

## 2.3 研究開発項目③「マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出」

マグネシウム合金の構造材としての需要拡大を図るには、他の軽量化材料に比較して価格優位性のあるマグネシウム地金が安定的に供給されること、循環型素材としてのメリットを発揮することが必要不可欠であり、そのためには、国内で発生・蓄積しているマグネシウムスクラップのリサイクルを可能な限り推進することが求められる。

日本のマグネシウム二次精錬では、フラックスを用いて酸化物、金属間化合物などの介在物を吸収させ、溶湯鎮静によりスラッジとしてルツボ底に沈殿分離する方法が採用されており、酸化物や金属間化合物など比較的少量に含有するスクラップを精錬可能である<sup>1)</sup>。しかしながら、油や塗料などが付着したスクラップをそのまま溶解すると、有毒ガスの発生や歩留まりの低下に繋がるため、このような不純物は溶解前に完全に除去する必要がある。また、マグネシウム合金の腐食に著しい悪影響を及ぼす Cu、Ni、Si 等によって溶湯が汚染された場合、通常の溶解作業では分離精製が困難と言われており<sup>2)</sup>、これらの混入源となる異材・不純物を事前に除去する必要がある。

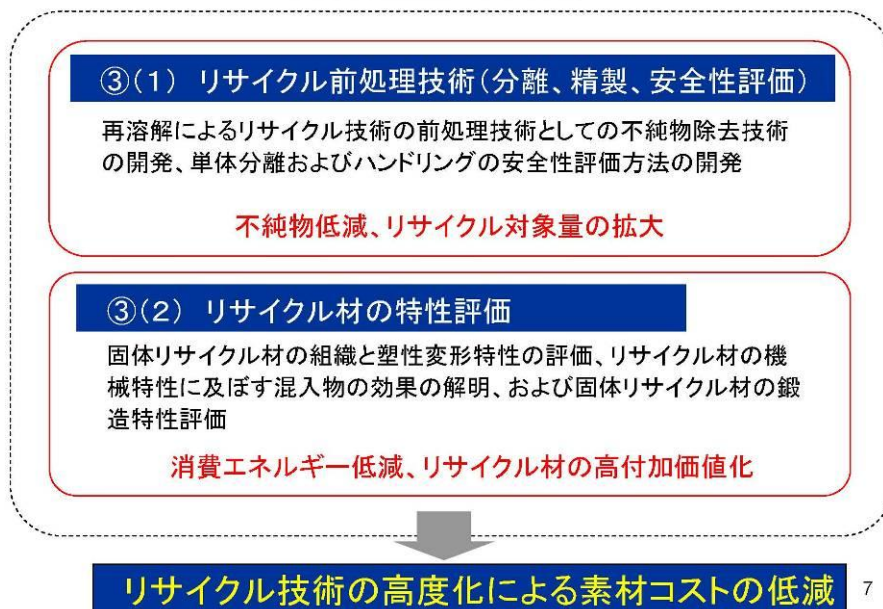
一方、清浄度が比較的高いスクラップについても、素材コストのさらなる低減を図るために効果的なリサイクル法の開発が必要である。ダイカストやチクソ製品の製造工程では、湯道や方案部などから大量の工程屑が発生する。現状ではこれらの多くが再溶解によるリサイクルが行われているが、こうしたスクラップを再溶解することなく直接再生材を作製できれば、エネルギーコストの大幅な低減が可能となる。その過程で材料の組織を制御（結晶粒微細化等）してリサイクル材を高機能化（高強度、高加工性等）することができれば、低コスト・高機能鍛造用素材としての活用が期待できる。

また、マグネシウムスクラップのリサイクルを推進する上で、安全対策は避けて通ることのできない課題である。リサイクルプラントでは粉塵爆発災害が多く発生しており、操業にあたっては大きな注意を払わなければならない。特に、マグネシウム粉塵は爆発性が大であるので、その爆発特性を十分に検討し評価しておく必要がある。

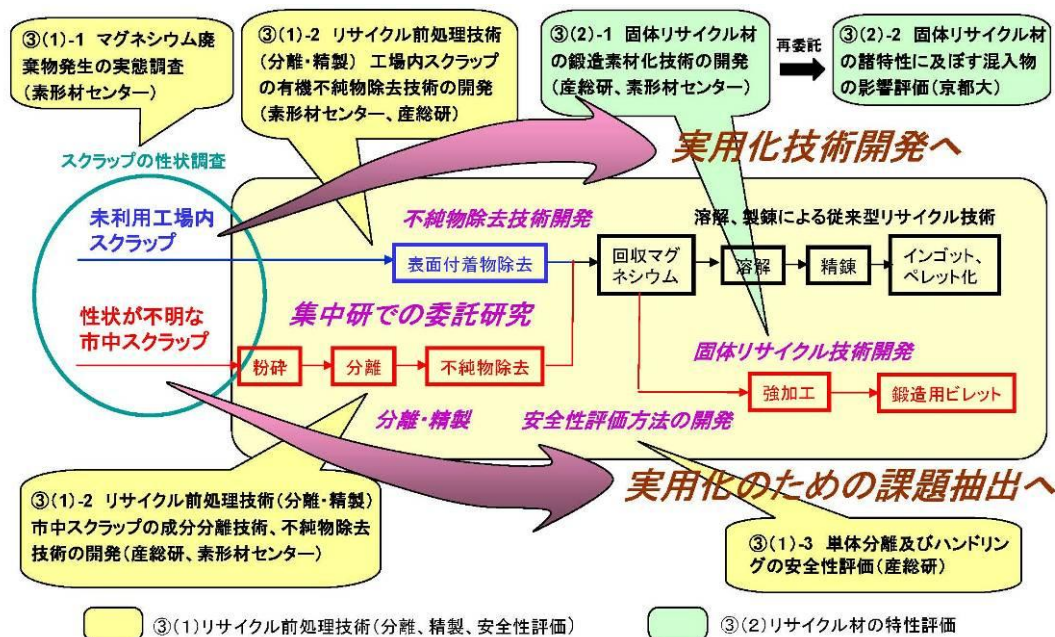
以上の観点から、研究開発項目③では、再溶解によるリサイクル技術の前処理技術として、切削粉などの工場内スクラップに含まれる有機不純物除去技術の開発、ならびに市中回収品にも対応できる前処理技術として成分分離技術と無機不純物処理技術の開発を行った。また、再溶解を経ずにそのまま直接熱間加工に供することでスクラップから高強度マグネシウム合金再生材を作製する省エネルギー型固体リサイクル技術開発として、固体リサイクル材の鍛造素材化技術の開発を行い、固体リサイクル材の諸特性に及ぼす混入物の影響について詳細に評価した。さらに、研究開発全体に関わるテーマとして、マグネシウム廃棄物発生の実態調査を行い、研究開発の方向性を検討するとともに、マグネシウム粉粒体の発火条件について基礎的検討を行い、処理プロセス内での安全なハンドリング方法を明らかにするとともに、爆発災害防止ガイドラインを策定した。

図Ⅲ.2.3-1 および図Ⅲ.2.3-2 に本研究開発項目の研究開発内容と検討項目を示す。これら検討項目を通じて、比較的清浄な未利用工場内スクラップを対象とする研究開発については実用化技術開発に向けた成果を、性状が不明な市中スクラップを対象とする研究開発

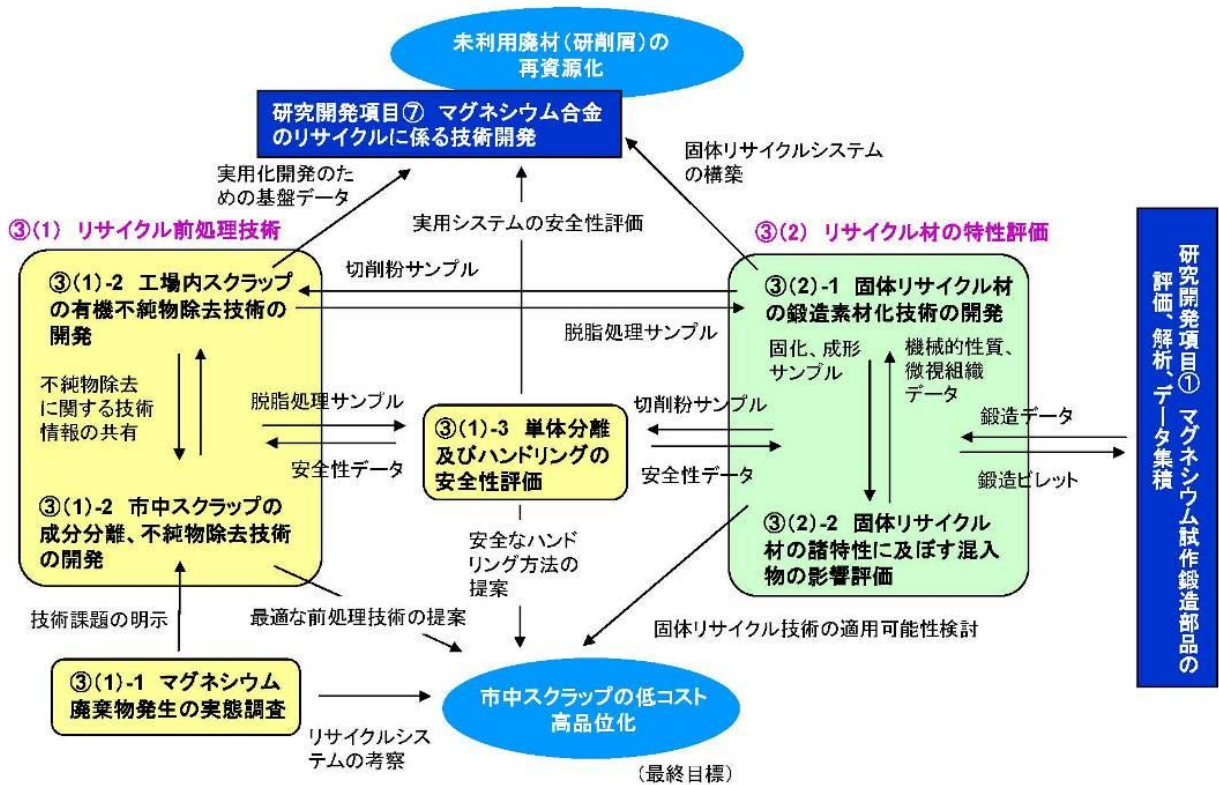
については実用化のための課題抽出に繋がる成果を目指した。図Ⅲ.2.3-3には各検討項目間の関係を示す。このように連携を図りながら、産学官の実施者が一体となって出口を見据えた研究開発を推進した。



図Ⅲ.2.3-1 研究開発項目③における研究内容



図Ⅲ.2.3-2 研究開発項目③における検討項目



図Ⅲ.2.3-3 研究開発項目③における検討項目間の関係

その達成目標として、中間達成目標では、リサイクル前処理技術及び安全性評価研究に対して「マグネシウムスクラップ取り扱い時の安全性評価方法に必要な主要因を明らかにするとともに、工場内スクラップを対象としたリサイクルシステムを構築する」として、実用化技術開発（研究開発項目⑦）の基盤となるデータを収集した。同時に、固体リサイクル技術開発に対して「固体リサイクル材の鍛造用ビレットへの適用可能性を明らかにする」として、固体リサイクル材の鍛造素材化に向けた基盤となるデータを収集した。また、最終達成目標では、「従来のカスケード型リサイクル（低品位素材へのリサイクル）に代えて、リサイクル材料が新材料と同等の特性を維持する市中スクラップリサイクル基盤技術の開発を行うとともに、総合的なマグネシウムリサイクルについての信頼性評価、データ集積を行う」ならびに「大量排出時を想定した市中回収品スクラップの前処理技術（分別、分離、不純物除去など）の課題抽出し、市中スクラップリサイクル基盤技術を提案する」を設定し、マグネシウム合金素材コスト低減に貢献するリサイクルシステムの基盤構築を目指した。

## 2.3.1 研究開発項目③(1)「リサイクル前処理技術（分離、精製、安全性評価）」

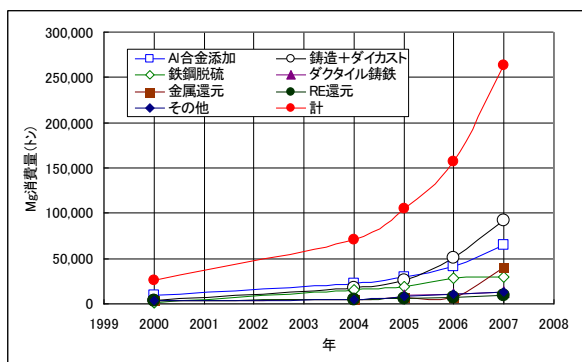
### ③(1)-1 マグネシウム廃棄物発生の実態調査

マグネシウム合金は主に自動車部品やノートパソコンおよび携帯電話の筐体等に使用されている。これら部品の製造過程で発生する屑を「工場内スクラップ」、製品寿命を全うしたものを「市中スクラップ」と呼ぶことにし、マグネシウムの生産・需要・価格の推移、工場内スクラップおよび市中スクラップのリサイクルの現状並びに課題について述べる。

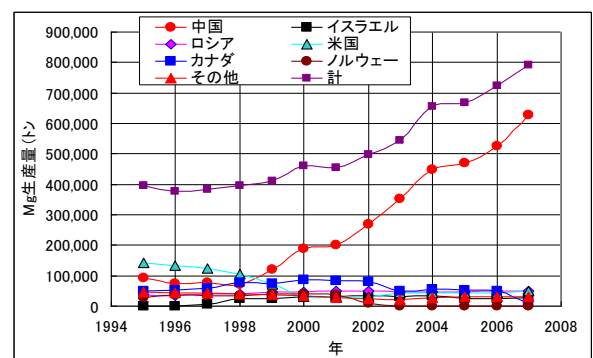
#### 1) マグネシウムの生産・需要・価格の推移<sup>1)</sup>

世界のマグネシウム生産量の推移を図Ⅲ.2.3-4に示す。1998年40万トンであった生産量が2007年には79万トンと倍増している。これは中国の生産拡大によるものであり、2007年は65万トン(82%)が中国で生産されている。一方米国、ノルウェー、カナダ等では工場の閉鎖が続き、生産量は減少の一途をたどっている。

図Ⅲ.2.3-5に中国のマグネシウム需要の推移を示す。中国は生産量の増大と共に需要も急速に拡大しており、2007年には26万トンに達している。用途別ではダイカスト・鋳物が9万トン、アルミニウム合金の添加が6万トン、金属還元(Ti、Ca等)が4万トン、鉄鋼脱硫が3万トン等となっている。ダイカスト・鋳物分野の需要は日本の10倍近くもあり、その伸びも著しい。



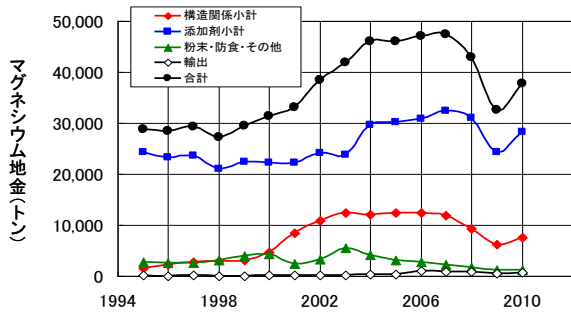
図Ⅲ.2.3-4 世界のマグネシウム生産量推移



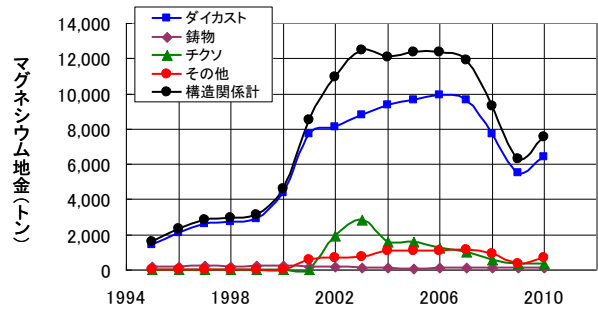
図Ⅲ.2.3-5 中国のマグネシウム需要推移

日本のマグネシウム地金の需要推移を図Ⅲ.2.3-6に示す。2000年頃から伸び始め、2007年の総需要量は46,000トンとなっている。そのうちアルミニウム合金への添加や、鉄鋼脱硫等の添加剤(材)関係が32,000トンあり、ダイカストや鋳物等の構造材関係は12,000トンとなっている。

図Ⅲ.2.3-7に構造材関係の地金需要推移を示す。構造材関係で最も多いダイカストは、1999年から2001年にかけて急増し、その後も増加し続けて2007年には10,000トンに達している。2009年半減したが、これは主に輸出用普通乗用車の生産台数が激減したためと思われる。現在は回復基調にある。2002年、2003年とチクソ(金属射出成形)用が増加したが、2007年では1,000トンに減少し、その他用(鋳造ビレット、押し出し材、圧延板用等)とほぼ同量となっている。



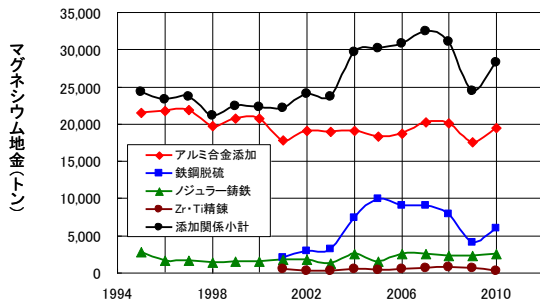
図Ⅲ.2.3-6 日本のマグネシウム需要推移



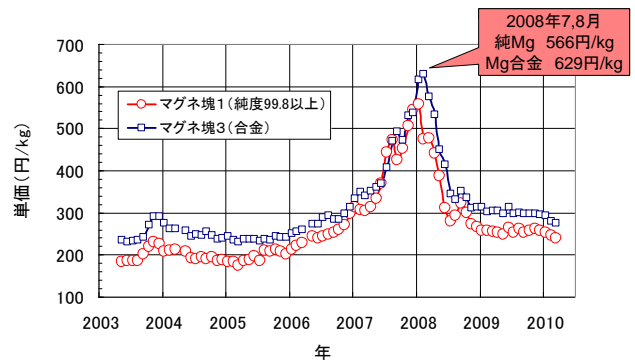
図Ⅲ.2.3-7 構造材関係のマグネシウム需要推移

マグネシウムのリサイクルは、主に構造材関係が対象となるが、カスケードリサイクルとしては添加材もある。添加材としてのマグネシウム使用量を図Ⅲ.2.3-8に示す。アルミニウムへの添加はここ10年来毎年20,000トン程度使用されている。また、2004年頃からは鉄鋼脱硫用にマグネシウムが使用され始め、現在は年間5,000トン以上が消費されている。

表Ⅲ.2.3-1に示すように、日本のマグネシウム供給元は中国であり、2006年では地金の93.3%、合金地金の92.9%、チップ・粉末では99.7%が中国からの輸入となっている。図Ⅲ.2.3-9に純マグネシウム地金およびマグネシウム合金地金の通関価格の推移を示す。最近の金属素材高騰の例にもれず、2005年頃200円/kgであった純マグネシウムの価格は2008年7、8月では566円/kgに上昇している。



図Ⅲ.2.3-8 添加剤関係のマグネシウム需要推移



図Ⅲ.2.3-9 マグネシウムの通関価格推移

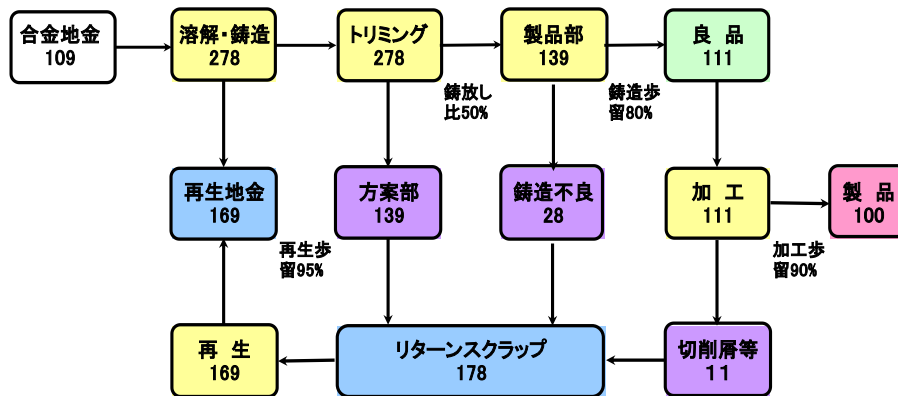
表Ⅲ.2.3-1 マグネシウム地金輸入先推移

	2004年	2005年	2006年	2007年	2008年
中国	39,459	33,395	36,625	37,713	35,564
イスラエル	6	2	86	30	59
ノルウェー	892	796	861	0	0
イギリス	66	57	58	58	56
ロシア	29	0	40	20	1,023
カナダ	1,611	1,226	1,535	546	94
アメリカ	35	16	12	0	11
その他	32	35	23	470	50
合計	42,130	35,527	39,240	38,837	36,857
中国比率 (%)	93.7	94.0	93.3	97.1	96.5

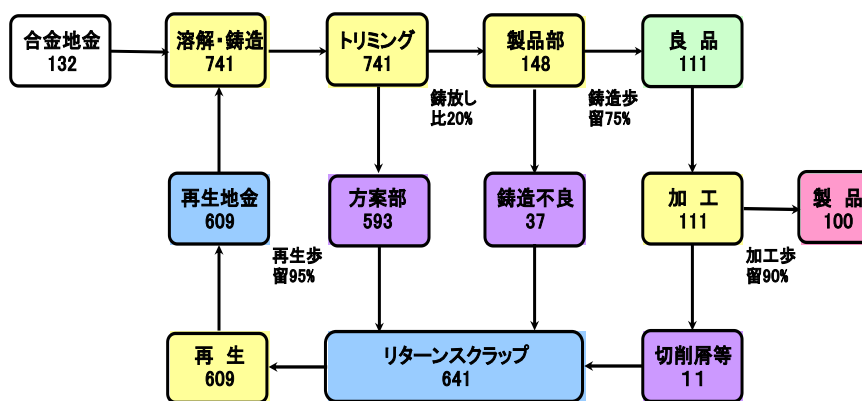
## 2) 工場内リサイクルの現状と課題

マグネシウム部品にはダイカスト、チクソキャスト、砂型鑄造等のいわゆる「鑄造品」と、鑄造ビレットからの「押出品」、鑄造ビレット・押出材・板材からの「鍛造品」、板材からの「プレス品」とがある。これらのうち、押出品、鍛造品およびプレス品は今後の市場拡大が期待されるものの、現時点では少量であり、当面のリサイクルは鑄造品が対象となる。将来、押出品・鍛造品・プレス品が増えた場合においても、これらの製品は鑄造や切削工程を経て製作されるので、ダイカスト品・チクソ品で代表されると考え、以下ダイカスト品・チクソ品のリサイクルについて述べる(砂型鑄造、精密鑄造等で航空機部品等が年間100トン程度製造されているが、少量なので除外した)。

ダイカストによるノートパソコンおよび携帯電話の筐体製造プロセスとマテリアルバランスを図Ⅲ.2.3-10 および図Ⅲ.2.3-11 に示す。これらの図はマグネシウムリサイクル調査委員会報告書<sup>2)</sup>を基に作成したものである。



図Ⅲ.2.3-10 ノートパソコン筐体製造プロセスとマテリアルバランス



図Ⅲ.2.3-11 携帯電話筐体製造プロセスとマテリアルバランス

ノートパソコンおよび携帯電話とも、合金地金(新)と再生地金を炉に装入し、溶解・鑄造後に湯道等の鑄造方案部をトリミングし、製品検査により不良品を選別し、良品は機械加工した後、必要に応じて化成処理・陽極酸化・塗装等の表面処理をした後製品として出荷される。一方、方案部、鑄造不良品並びに切削屑等はリターンスクラップとして集めら

れ、再溶解・成分調整後インゴットに鑄造され、再生地金として再び溶解・鑄造工程に戻される。リターンスクラップの再生は専門の再生業者が行っているが、一部のダイカスト工場では、自社内で処理している。

図Ⅲ.2.3-7 に示したダイカスト用並びにチクソ(射出成形)用マグネシウム地金の需要量と図Ⅲ.2.3-10、図Ⅲ.2.3-11 のマテリアルバランスを用いることで製造工程におけるスクラップの発生量、リサイクル量の推定が可能となる。

この場合、ノートパソコンと携帯電話製造の場合ではマテリアルバランスが大きく異なっており、製品の製造割合が必要となる。ノートパソコンと携帯電話でのマテリアルバランスの違いは、製造品の大きさの違いによると考え、ダイカスト用新地金から製造される全製品(自動車用部品も含め)とチクソ成形用地金の 30%(ノートパソコン)は図Ⅲ.2.3-10(ノートパソコン)のマテリアルバランスと同じとし、チクソ成形用地金の 70%は図Ⅲ.2.3-11(携帯電話)のマテリアルバランスに従うとした。

マグネシウムの製品別需要量の統計は無いが、前述の資料<sup>2)</sup>では 2001 年のダイカスト製品の 80%前後が自動車用と推定されることから、2006 年ではダイカスト用新地金の 85%が自動車、5%がノートパソコン、その他用 10%とし、チクソ用新地金は携帯電話 40%、ノートパソコン 30%、その他 30%として 2006 年のマグネシウム新地金の製品別推定使用量および製造各工程での素材重量、スクラップ発生量を計算した。その結果を表Ⅲ.2.3-2 および表Ⅲ.2.3-3 に示す。ダイカスト用新地金 9,930 トン、チクソ用新地金 1,270 トンを使用し、湯道等の鑄造屑 20,000 トンと切削紛等の加工屑 1,100 トンが発生し、これらのリターン屑 21,000 トンを処理して 20,000 トンの再生地金が生産されたと推定される。

表Ⅲ.2.3-2 2006 年の製品別のマグネシウム地金使用量

分野	需要割合 (%)	重量 (トン)		
ダイカスト	100	9,930		* 印計(トン) 10,310
自動車	85	8,440	*	
携帯電話	0	0		
ノートパソコン	5	500	*	
その他	10	990	*	
チクソ	100	1,260		○ 印計(トン) 880
自動車	0	0	*	
携帯電話	40	500	○	
ノートパソコン	30	380	*	
その他	30	380	○	
ダイカスト+チクソ	—	11,190		11,190
鑄物	100	100		
その他(構造用)	100	1,100		
Al合金添加	100	19,000		

\*印：中～大型部品、○：小物部品

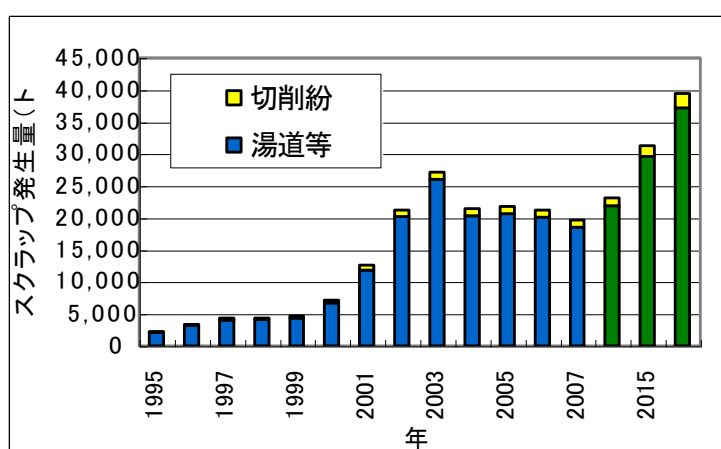
表Ⅲ.2.3-3 2006 年の製造工程別の素材重量ならびにスクラップ発生量

工程	成形法	重量(t)
新地金	ダイカスト	9,930
	チクソ	1,260
	計	11,190
鑄造屑(湯道等)	ダイカスト	15,210
	チクソ	4,810
	計	20,020
加工屑(切削片等)	ダイカスト	1,000
	チクソ	110
	計	1,110
リターン屑	ダイカスト	16,220
	チクソ	4,920
	計	21,140
再生地金	ダイカスト	15,400
	チクソ	4,670
	計	20,070



図Ⅲ.2.3-12 に工場内スクラップ発生量の推移を示す。図Ⅲ.2.3-7 では 2000 年頃からダイカスト用地金が急増していたが、これは自動車用への使用割合が増加したためと解釈し、2000 年以前はダイカスト用地金のうちの自動車用に使用される割合を 80%、ノートパソコン用 5%、その他 15%とし、2001 年以降は表Ⅲ.2.3-1 と同じとした。また、図Ⅲ.2.3-7 に於いてチクソ用地金の使用量が 2002 年、2003 年と急増し、その後 1,300 トン/年に落ちたが、この 2 年の増加分はすべて携帯電話の製造に使用されたと見なした。

工場内スクラップは 2003 年には 25,000 程度発生し、その後は 20,000 トン前後で推移しているとみられる。なお、図Ⅲ.2.3-12 は 2010 年、2015 年及び 2020 年の発生量も予測しているが、これらは、構造用マグネシウム地金の使用量が 1,000 トン/年の割合で伸びると仮定して算出したものである。この根拠については次節で述べる。



図Ⅲ.2.3-12 工場内スクラップ発生量の推移

工場内スクラップは年間 20,000 トン前後発生していると推定されるが、処理の実態を調査するためマグネシウム再生業者を訪問した。主要再生業者 7 社のうち 5 社を訪問した。各社ともフル稼働とのことで、訪問企業の合計処理量は年間 9,900 トンになる。マグネシウム再生業者の処理能力は年間 21,000 トンとされており<sup>3)</sup>、未訪問企業および自社内でリサイクルしている企業もあることを考慮すると、工場内スクラップのほぼ全量が再生されていると見られる。

現在使用されているマグネシウム合金は、大部分が AZ91 および AM60 である。スクラップは 1 トン程度の鉄るつば炉を用いて溶解し、フラックスとガスバブリング処理での精錬を行っている。溶解は大気中であり、ある程度の酸化ロスは避けられない。将来は Ca 含有合金や希土類元素含有合金が増加すると見られるが、何れの業者もこれらの元素を含む合金の再生処理を経験している。Ca 含有合金は、Ca の酸化ロスはあるものの、再生が可能である。しかし、希土類元素含有合金ではこれら元素の酸化による溶湯汚染等の問題があるようだ。中国では、この問題のため、希土類元素含有合金の固体リサイクルの研究を行っている。

再生業者に搬入される工場内スクラップのうち、切削紛についてはいくつかの課題が残っている。再生業者に搬入される切削紛の例を図Ⅲ.2.3-13、図Ⅲ.2.3-14 に示す。切削

油が付着した状態や廃油に浸かった状態で搬入されており、図Ⅲ.2.3-14 の様に廃グリースと混じったものもある。廃油等が付着したスクラップは溶解炉に装入すると発煙、発炎、排ガス等の環境問題が生じるため、付着油を簡便に分離除去する技術の開発が待ち望まれている。



図Ⅲ.2.3-13 再生工場に搬入されたマグネシウム切削粉の性状1(廃油漬け)



図Ⅲ.2.3-14 再生工場に搬入されたマグネシウム切削粉の性状2(グリース混入)

図Ⅲ.2.3-15 に工場内スクラップとして搬入された塗装品の例を示す。塗装品を溶解炉に装入すると付着油と同じく環境問題が生じるので、除去処理が必要となる。電子機器筐体の塗料除去は一部で実施されていたが、コスト高などの理由で現在は行われていないようであり、簡便で低コストの塗料除去技術の開発が必要である。この技術は、後述する市中スクラップのリサイクルにおいても必須の技術である。

マグネシウム成形工場では、これまで述べた鋳造法案屑や切削粉以外に、溶解時にドロスが発生するが、再生工場ではこれら进行处理して、金属マグネシウムを回収している。



図Ⅲ.2.3-15 再生工場に搬入された塗装品の性状  
(ノートパソコン;未破碎で搬入される)

### 3) 市中スクラップの現状と課題

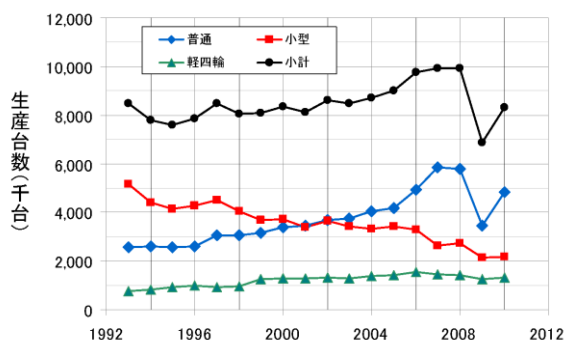
マグネシウム再生業者やマグネシウム関係者にヒアリングした結果、自動車、ノートパソコンおよび携帯電話に使われたマグネシウム部品の再生は行われていないことが明らかになった。しかし、市中スクラップは発生しているはずなのでその量がどの程度なのかを推定してみた。

市中スクラップ量推定のためには、生産時のマグネシウム使用量、生産品の国内出荷量と輸入量、製品寿命、廃棄品の回収量、回収品からのマグネシウム回収量等々のデータが必要となる。これらについて、乗用車、ノートパソコン、携帯電話について調査した。

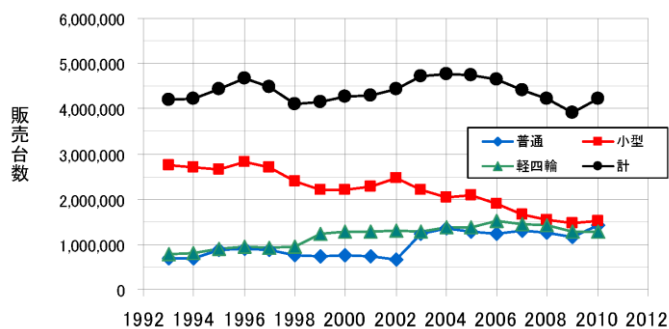
### (a) 自動車の生産・需要・廃車・耐用年数

自動車に使用されるマグネシウム部品は、乗用車(小型+普通)のみに使用されていると  
し、その生産・出荷・輸出・登録・保有・廃車台数について調査した。

図Ⅲ.2.3-16 に示す通り、乗用車の生産台数は 700～800 万台を推移してきたが 2006 年、  
2007 年は 900 万台を突破している<sup>4)</sup>。一方、図Ⅲ.2.3-17 に示した国内出荷台数は 400～  
500 万台の範囲を推移しており<sup>4)</sup>、2009 年は 390 万台まで落ち込んだが、2010 年は 420  
万台に回復した。

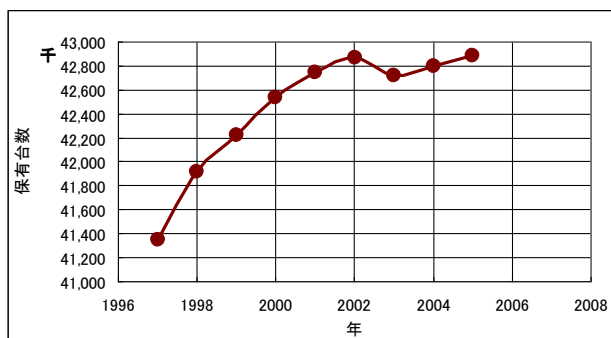


図Ⅲ.2.3-16 乗用車の生産台数の推移

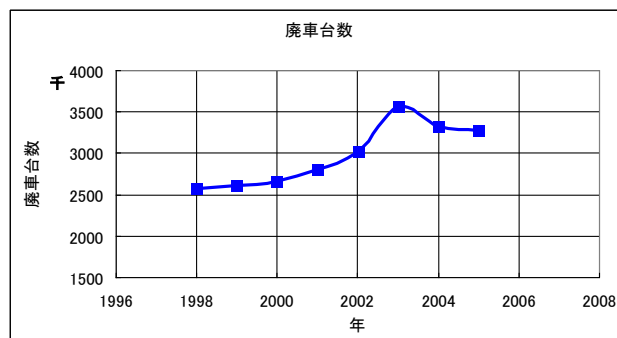


図Ⅲ.2.3-17 乗用車の需要台数の推移

乗用車の保有台数ならびに廃車台数の推移を図Ⅲ.2.3-18 に示す<sup>5)</sup>。保有台数は約  
4,300 万台で飽和したと見られ、図Ⅲ.2.3-19 に示すように廃車台数(=前年末の保有台数  
－今年末の保有台数＋国内出荷台数＋輸入台数)もここ数年は 300 万台で推移している。  
廃車の平均使用年数は、従来 10 年と言われていたが、最近では長くなる傾向にあり、2007  
年に廃車された平均使用年数は 12.9 年となっている<sup>6)</sup>。



図Ⅲ.2.3-18 乗用車の保有台数の推移



図Ⅲ.2.3-19 乗用車の廃車台数の推移

### (b) ノートパソコンの生産・需要・耐用年数

ノートパソコンの国内出荷台数、輸出台数の推移を図Ⅲ.2.3-20 に示す<sup>7)</sup>。2000 年以降  
の生産台数は 600～800 万台の間を推移しており、そのうち約 100 万台が輸出されている。  
図Ⅲ.2.3-21 に示すように、一方国内出荷と輸入との合計は約 1,000 万台を前後しており、  
2007 年では 400 万台(40%)が輸入品となっている。また、ノートパソコンの耐用年数は  
5～10 年とされている<sup>8)</sup>。

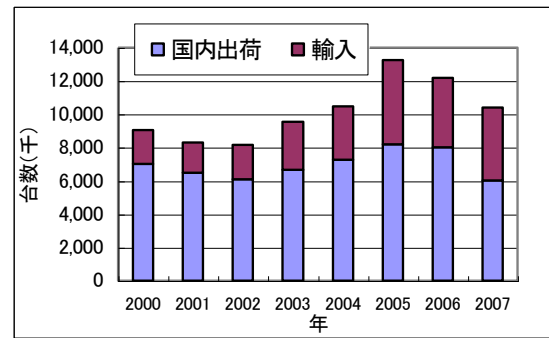
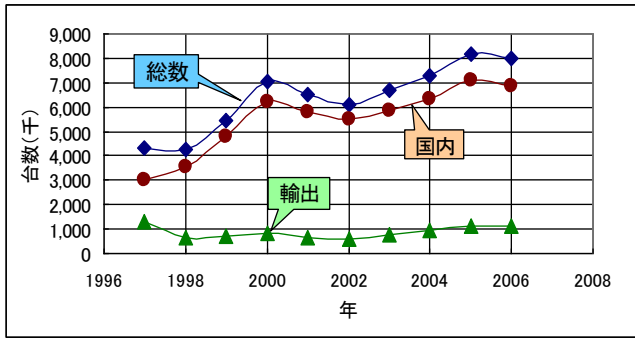


図 III.2.3-20 ノートパソコンの生産・国内出荷・輸出台数の推移

図 III.2.3-21 ノートパソコンの需要台数の推移

(c) 携帯電話の生産・需要・耐用年数

携帯電話の生産、輸出、輸入の推移を図 III.2.3-22 に示す<sup>7)</sup>。生産台数は近年減少傾向にあり、輸入台数は増加傾向にある。2007 年では生産 4,000 万台強、輸入 1,000 万台弱となっており、需要台数(=生産台数+輸入台数-輸出台数)は 5,000 万台となっている。また、携帯電話の耐用年数は 3 年とされている<sup>8)</sup>。

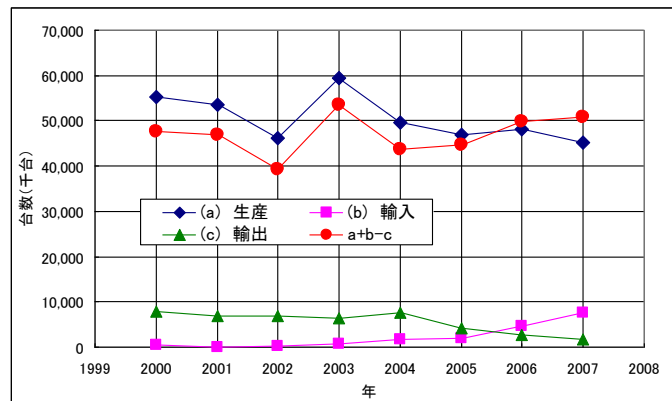


図 III.2.3-22 携帯電話の生産・輸出・輸入台数の推移

(d) 一台当りのマグネシウム使用量

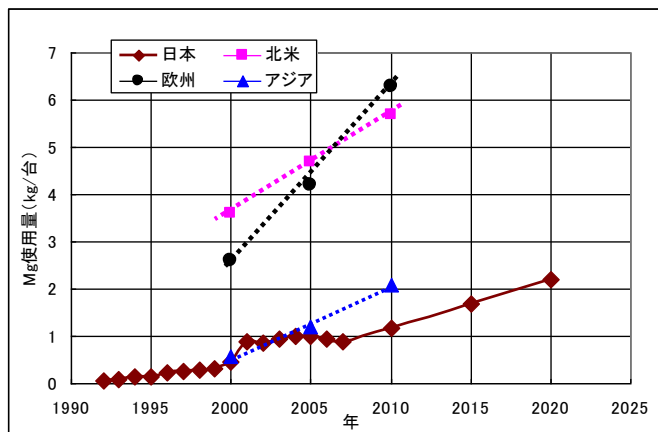
これらの調査結果を基に、自動車、ノートパソコン並びに携帯電話の一台あたりの使用量を推定した。2010 年以降の値は表 III.2.3-4 に示す条件で算出した。

表 III.2.3-4 2010 年以降の乗用車・ノートパソコン・携帯電話の生産・供給・廃棄・回収および耐用年数

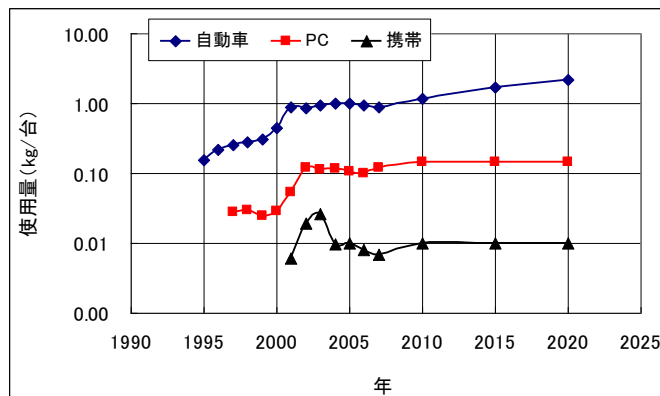
製品名	台数(万台/年)				耐用年数
	生産	供給	廃棄	回収	
自動車(小型+普通乗用車)	750	300	300	200	13
ノートPC	600	1,000	—	25	5~10 (7)
携帯電話	4,000	5,000	—	700	3
家電/電動工具/その他	—	—	—	—	5~10

2000年時点で予測した北米、欧州、アジアの自動車一台当りのマグネシウム使用量を図Ⅲ.2.3-23に示す<sup>3)</sup>。2007年では自動車一台当り北米、欧州が5kgであるのに対し、アジアでは2kg未満となっている。図Ⅲ.2.3-23中の日本の値は、ダイカスト用新地金の使用実績から推定したものである。2008年以降はマグネシウム新地金の需要が2010年までは年500トン、それ以降は1,000トン増加するとして算出した。日本は1900年代の0.3kg/台から2001年には0.9kg/台に急増したもののその後の使用量は1kg/台前後で停滞している。今後は、自動車用マグネシウム部材として鍛造品の使用も期待されており、まだまだ増加する余地はあると見られる。また、ロボット分野に使用されるマグネシウム部品は、2015頃から年間1,000トンずつ増加するとの試算もあり、新地金の需要増1,000トン/年の見積りは過大なものではないと考えられる。

図Ⅲ.2.3-24に自動車、ノートパソコンおよび携帯電話1台当りのマグネシウム使用量の推移を示す。2007年は自動車が0.88kg、ノートパソコン0.12kg、携帯電話0.0069kgとなっている。なお、ここではノートパソコンならびに携帯電話の使用量はそれぞれ0.15kg、0.010kgで飽和するものとした。図Ⅲ.2.3-23で2003年の携帯電話の値が0.027kg/台まで急増しているが、これはチクソ用地金需要の急増に対応したものである。しかしながら、携帯電話の生産量はこれに見合ったほどは増加しておらず、この時期については前記した計算の前提条件が崩れているものと見られる。



図Ⅲ.2.3-23 世界各地域および日本における乗用車のマグネシウム使用量

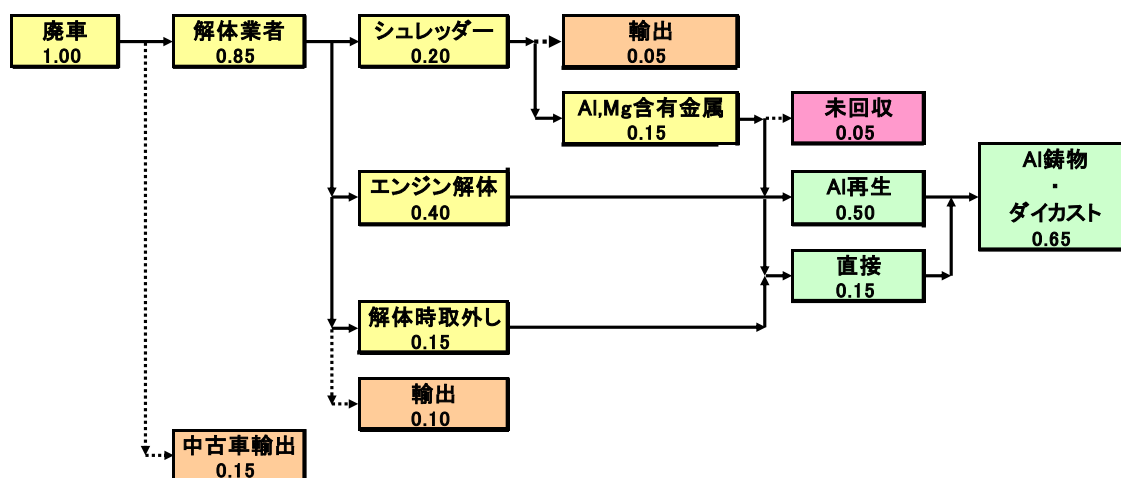


図Ⅲ.2.3-24 乗用車・ノートパソコン・携帯電話の1台当りのマグネシウム使用量の推移

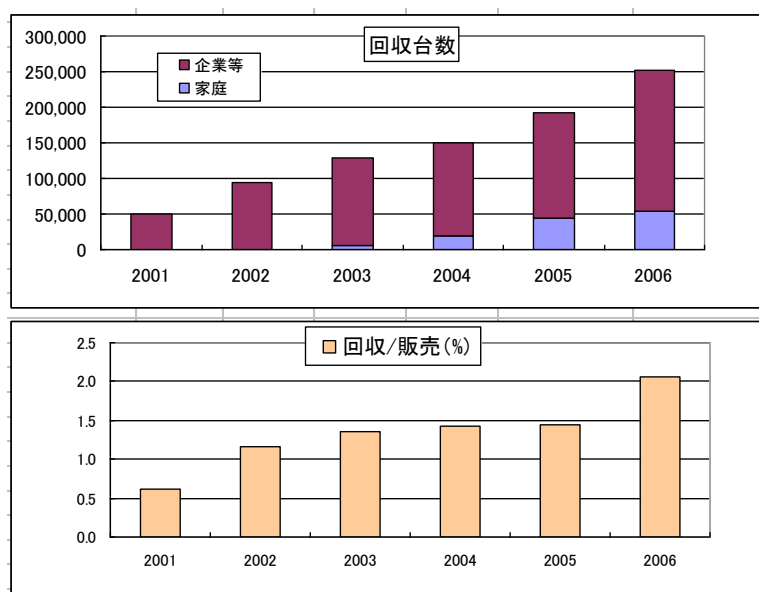
### (e) 市中スクラップの回収率

図Ⅲ.2.3-25 に廃車処理のフローとマテリアルバランスを示す。この図はマグネシウムのリサイクルに関する調査報告書(2001年)<sup>2)</sup>とアルミニウムのリサイクルに関する調査報告書(2002年)<sup>9)</sup>を基に作成したものである。廃車のうち30%が輸出されており、アルミニウム等の金属が回収されているのは廃車重量の65%程度と見られる。

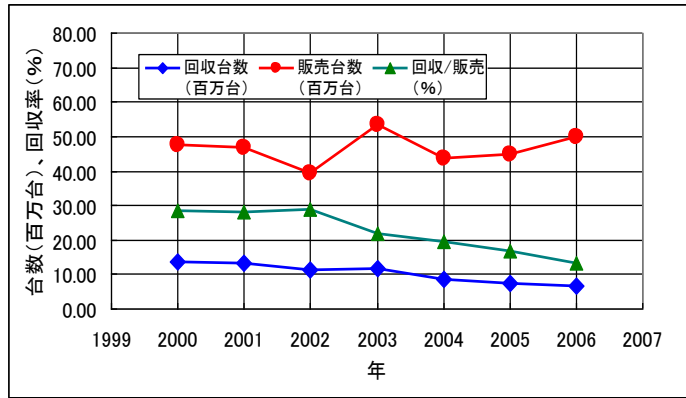
ノートパソコンの回収台数の推移<sup>10)</sup>を図Ⅲ.2.3-26、携帯電話の回収台数<sup>11)</sup>を図Ⅲ.2.3-27に示す。パソコンは指定再資源化製品であり、販売台数に対する回収台数の割合は年々増加してはいるものの2006年でも2%強であり、かなり低い値となっている。携帯電話の販売数に対する回収台数はここ数年減少しており、2006年は10%強と低調である。



図Ⅲ.2.3-25 廃車処理フローとマテリアルバランス



図Ⅲ.2.3-26 ノートパソコンの回収台数



図Ⅲ.2.3-27 携帯電話の回収台数

(f) 市中スクラップの回収量・発生量

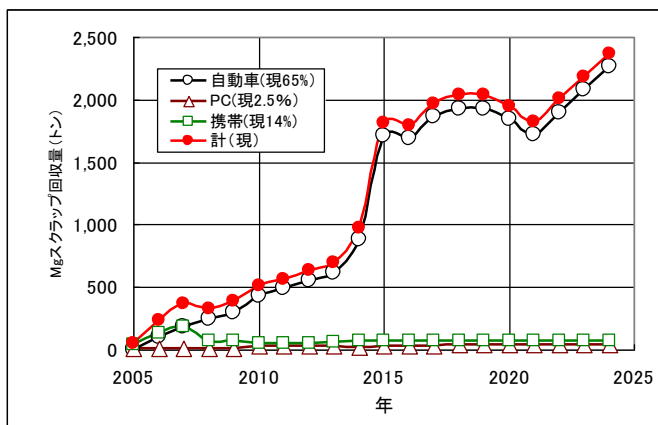
これらの調査結果を基に、表Ⅲ.2.3-3 に示した条件でマグネシウム市中スクラップ発生量を推定した。その結果を表Ⅲ.2.3-5 に示す。

表Ⅲ.2.3-5 2007年の市場スクラップ回収量

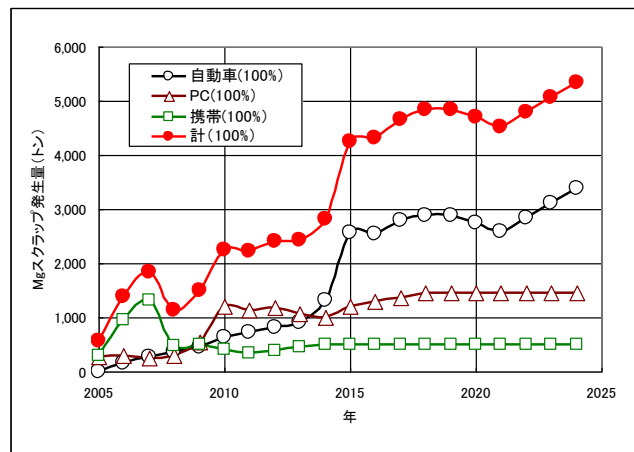
品名	製造年	kg/台	回収量 (トン)	使用量 (トン)	回収/使用 (%)
自動車	1993	0.090	180	670	27
ノートPC	1999	0.0240	10	130	8
携帯電話	2003	0.0266	180	1,580	11
計			370	2,380	16

2007年の市中スクラップの回収は自動車、ノートパソコン、携帯電話でそれぞれ180、10、180トン程度と予想される。このうち携帯電話の180トンは前述のような問題があり、実際はこれよりも少ないと思われる。これらのマグネシウムスクラップは、非鉄金属には分別されてはいるが、マグネシウム再生業者には入荷していないので、回収したアルミニウムスクラップに混入したまま、ダイカスト用アルミニウム合金再生に回されているものと思われる。

図Ⅲ.2.3-28 にマグネシウム市中スクラップの回収量の推移を示す。現状の回収率が続くとしており、2007年の回収量300トンが、2015年頃には1,800トンに増加し、2020年頃までは毎年2,000トン程度の回収が続くものと予想される。図Ⅲ.2.3-29 は発生量(全量回収した場合)であり、2010年で2,000トン強、2015年頃には年4,000～5,000トンの発生量が見込まれる。

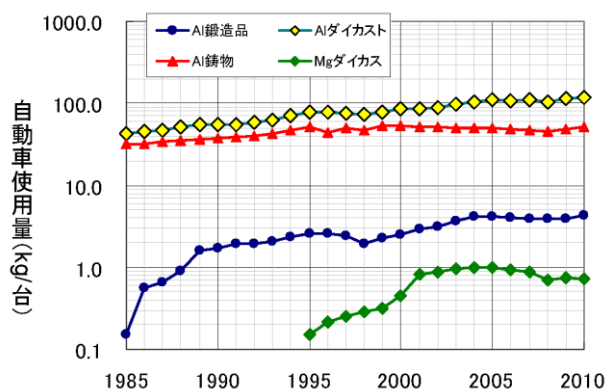


図Ⅲ.2.3-28 市場スクラップ回収量の予測  
(現状の回収率)



図Ⅲ.2.3-29 市場スクラップ発生量の予測

自動車一台当たりで使用されたアルミニウムダイカスト品と鍛工品、マグネシウムダイカスト品の重量を図Ⅲ.2.3-30に示す<sup>12)</sup>。マグネシウムの使用量が乗用車1台当たり1kgなのに対し、アルミニウムは鍛工品が4kg、ダイカスト品では110kg使用されている。



図Ⅲ.2.2-30 自動車一台当たりのアルミニウムおよびマグネシウム使用量の推移

マグネシウムとアルミニウムでは使用量が圧倒的に違うので、自動車のマグネシウムリサイクルシステムはアルミニウムリサイクルの一環として処理され、最終段階またはそれに近いところでアルミニウムと分離・回収されることになるだろう。アルミニウムとの分離・回収をしないと、平均的には鋳造用アルミ再生材地金(ADC12)のマグネシウム含有量が規格値を超え(ADC12は0.3%以下)、アルミニウムのリサイクルにも影響を及ぼすことになる。一方、アルミニウム展伸材(3000系、5000系、6000系)への添加は不純物の問題(ADC12とAD91の混合物が添加される)が生じる恐れがあるため、使用が限定されるであろう。将来、マグネシウムスクラップの回収量が増加した場合には、アルミニウムとマグネシウムの分離・回収は必至の技術となる。アルミニウムとマグネシウムの分離・回収には、新たな工程を追加すること無く実施することが望ましいが、新たな工程を組み入れるにしても、その処理コストは安価なものでなければならない。



ノートパソコンや携帯電話は寿命年数が過ぎた後も家庭内や企業内に退蔵されており、一部は輸出されているとも見られる。これらについては、先ず、回収台数を増やす施策が必要であるが、技術的には「安価な塗料除去技術の開発」が課題として残されている。現在、電子機器基板からの希少金属回収に関心と呼んでいるが、これと合わせて電子機器筐体からのマグネシウム回収も同時に行うシステムを構築すべきであろう。

#### 4) まとめ

工場内スクラップはほぼ 100km 圏内のものが再生業者に集められ、鑄造用二次合金として再生されている。スクラップ処理量は年 20,000 トン前後で、1 トン程度のるつぼ炉を用い方式が主流であるが、将来処理量が 2 倍程度に増加しても、成形工場内の自社処理ならびに作業効率の向上で対処可能と推定される。処理コストも現状と同程度で可能と思われる。

工場内スクラップで問題となっているのは切削屑に付着している油の処理と塗装品の塗料である。これらは炉に装入すると環境問題が発生するため、簡便で安価な処理方法の開発が必要である。これらの技術は市中スクラップの再生に際しても必要な技術であり、特に後者の塗料除去技術は市中スクラップのリサイクルでは必須となる技術である。

市中スクラップのうち、ノートパソコンおよび携帯電話については、販売台数に対する回収台数の割合がそれぞれ 2%と 10%と低レベルにあり、回収台数を増やす施策が必要となる。

現時点での市中スクラップからのマグネシウム回収量は 200～400 トン程度と推定される。これらはアルミニウムのスクラップに混在した状態で、アルミニウム二次合金に再生されていると見られる。マグネシウムの市中スクラップは、2015 年頃には 4,000～5,000 トン発生するものと予想され、この時期にはアルミニウムとマグネシウムとの分離・回収技術が必要となる。

マグネシウムの市中スクラップリサイクルシステムは、先行しているアルミニウムリサイクルシステムと類似のものとなるが、アルミニウムとマグネシウムの分離・回収工程の付加と、破砕時に発生するマグネシウム粉末の安全性に対する対応が必要となる。

### ③(1)-2 リサイクル前処理技術（分離、精製）

#### 1) 過熱水蒸気を用いた有機不純物除去

マグネシウム製品の製造時に発生する切削粉は合金種などの性状が既知であるにもかかわらず、切削油などの混入が二次製錬の際の障害となるため、その多くがリサイクルされず産廃処分されているのが現状である。その発生量は2006年では約1,100トンと見積られているが、これは日本のマグネシウム構造材向け需要の10%弱に相当する量であり、加工現場における再資源化への期待は大きい。有機溶剤等を使用した液体洗浄が可能ではあるが、処理コストや環境負荷の面で問題がある。本研究項目では、新規技術開発として過熱水蒸気を用いた熱処理による有機不純物除去（脱脂）技術について検討した。

過熱水蒸気とは、操作圧力下で沸騰気化した水（飽和水蒸気）をさらに加熱して沸点以上の温度とした完全に気体状態の水を意味する。過熱水蒸気を用いた熱処理の利点としては、過熱水蒸気で満たされた空間は酸素濃度が極めて低く燃焼反応が起こらないため、マグネシウムを取り扱うときに問題となる発火性の観点で安全性が高い方法であること、従来の熱風乾燥機と比較して熱効率が良く低ランニングコストであり、装置のコンパクト化が可能なが挙げられる。

##### (a) 過熱水蒸気処理によるMg切削粉の脱脂効果

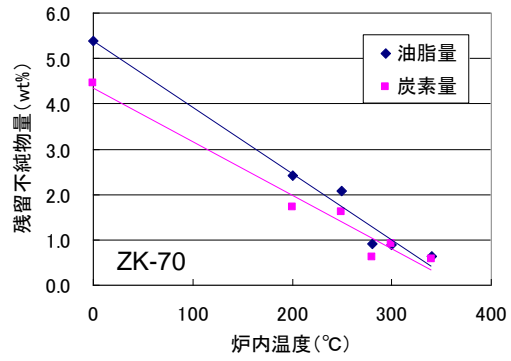
本実験では切削粉を対象とすることから、図Ⅲ.2.3-31に示すような連続式の不純物除去装置を試作した。本装置は過熱水蒸気と粉末の接触性向上の目的から、有機物除去反応器をロータリーキルンタイプとした。過熱水蒸気は200～500℃まで加温できる。キルンの傾斜角度は3°で、0～10rpmの範囲での回転が可能である。実際の切削工程から排出されたマグネシウム切削粉を試料とした。マグネシウム切削粉には数%の切削油が付着しているが、リサイクルの後工程として溶解炉に投入することから考えて残留炭素量で0.1wt%以下の油分量まで脱脂することを目標とした。

図Ⅲ.2.3-32に、本装置を用いてマグネシウム切削粉を脱脂する際の炉内温度（過熱水蒸気温度）と残留不純物量との関係を示す。図中の油脂量はヘキサンをを用いたソックスレイ方式にて表面油分を抽出し測定した結果を、カーボン量（残留炭素量）は表面カーボンを燃焼させ赤外線量を検出する燃焼赤外線吸収方式で測定した結果を示している。本図から、過熱水蒸気処理によって、処理前に5wt%以上あった油分が0.5wt%以下まで炉内温度の上昇に対してほぼ直線的に低下し、300～400℃に最適な処理温度が存在することが分かる。油分中に含まれるカーボン量で評価した場合についても同様の傾向が確認できる。

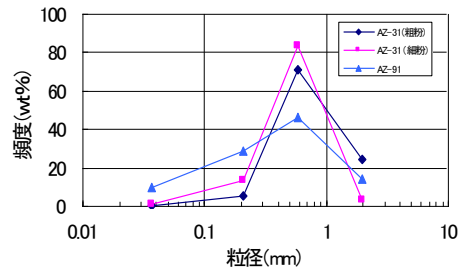
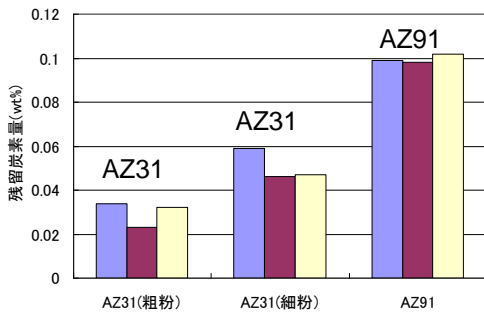
図Ⅲ.2.3-33には、炉内温度300℃以上での脱脂実験結果（左図）を示す。ここではサンプルとしてAZ31合金（粗粉）、AZ31合金（細粉）、AZ91合金（細粉）の3種類の切削粉を用いた。これらの粒度分布を右図に示す。切削粉の大きさは素材の延性などの物性にも依存するが、切削方法による違いが大きく影響する。用いた切削粉はその大きさがほぼ1mm以下で、平均粒径が0.7～0.9mmであった。各サンプルとも3回の脱脂実験において、残留炭素量について高い再現性を示し、いずれの場合にも目標値とした0.1wt%以下の値となることを確認した。



図Ⅲ.2.3-31 切削粉脱脂装置

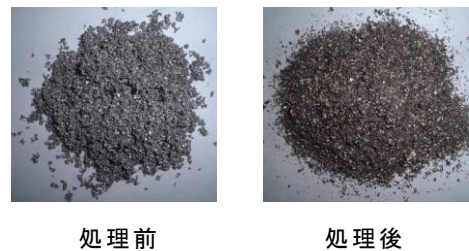
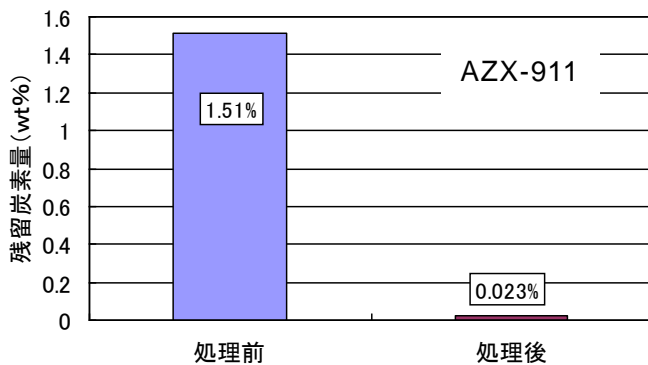


図Ⅲ.2.3-32 炉内温度と残留不純物量との関係



図Ⅲ.2.3-33 最適処理条件下での残留付着炭素量 (左)と切削粉の粒度分布 (右)

今後普及が期待されるCa添加マグネシウム合金AZX911 (AZ91+1wt%Ca) 切削粉への適用性についてさらに検討した結果の一例を図Ⅲ.2.3-34に示す。ここで過熱水蒸気温度、過熱水蒸気量、処理時間等の操作条件は、先の検討で見出した最適条件と同じ値とした。切削油に由来する残留炭素量 (燃焼赤外線吸収法による定量値) は処理前には1.51wt%であったが、処理後には0.023wt%にまで低減されることが分かる。右に示したのでは本装置によるCa添加マグネシウム合金切削粉の脱脂前、脱脂後の写真である。処理前には黒っぽく、ぼそぼそとした切削粉が脱脂され、粒子間の付着力が低下することでさらさらとした切削粉になっているのがわかる。このことから本開発技術がCa添加マグネシウム合金の前処理にも十分な効果を発揮することが確認された。



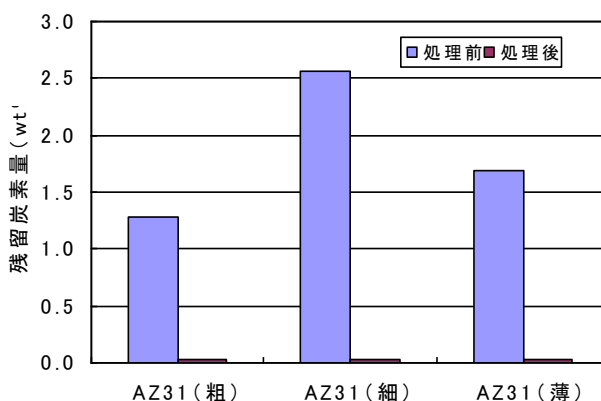
図Ⅲ.2.3-34 Ca 添加 Mg 合金 (AZX911) 切削粉に対する脱脂効果

## (b) 蒸気循環方式の検証

本開発技術のような過熱水蒸気を用いた処理プロセスの欠点として、装置の運転に要するエネルギーコストの問題が指摘されており、プロセスの省エネルギー化を図ることは実用性を高める上で大変重要である。そこで処理装置内から一旦排出された過熱水蒸気を循環して再利用する方式について検討した。図Ⅲ.2.3-35に蒸気循環方式に改造後の処理装置の外観を示す。図Ⅲ.2.3-36には蒸気循環方式の採用後に行ったAZ31(粗粉)、AZ31(微細粉)、AZ31(薄片)の脱脂試験結果の一例を示した。グラフより蒸気循環方式を用いても、従来方式(循環なし)の場合と同様に高い脱脂効果を示すことが分かる。切削粉サイズ、形状による脱脂効果にほぼ変化がないことから、少量の蒸気を循環することによって処理物に対して大量に接触させることが可能と判断できる。また、油分の変動による処理装置内の圧力雰囲気も安定していることを確認した。これらの結果は直ちに実用化開発(研究開発項目⑦)へ反映することとした。



図Ⅲ.2.3-35  
蒸気循環方式に改造後の処理装置



図Ⅲ.2.3-36 蒸気循環方式での脱脂効果

## (c) 過熱水蒸気処理の経済性

本プロジェクトで開発した過熱水蒸気を用いた脱脂技術の経済性を試算した。マグネシウム切削粉(AZ31切削粉、かさ比重0.3t/m<sup>3</sup>、付着油分2.5wt%)を300kg/hで処理するケースを考えると、ユーティリティコストは表Ⅲ.2.3-6に示す値となる。ここで、方式Aとは本研究開発当初の方式であり、蒸気の循環がなく電気式ボイラと高周波誘導加熱式過熱水蒸気発生装置を使用する場合を意味し、方式Bとは本研究開発の成果として得られた方式であり、蒸気循環方式を採用し廃熱ボイラ一体型過熱水蒸気発生装置を使用する場合を意味する。これらのモデルフローを図Ⅲ.2.3-37に示す。方式Bでは、脱脂に伴い発生する油気化ガスを熱源として回収する際に追加の燃料代が発生するが、電気・水使用量の大幅な低減によってトータルコストは約15%低下し、単位重量あたりのコストは方式Aでは5.0円/kg、方式Bでは4.3円/kgとなる。他方、従来から用いられる界面活性剤を使用した水洗方式と比較すると、水洗方式では処理量の増大と共に薬剤や廃水処理等のコストが上昇し、同規模の処理では45~60円/kgのコストが発生する。このように、まとまった量の切削粉の処理する場合、本開発技術のコスト競争力は非常に強い

ものと考えられる。

**表Ⅲ.2.3-6 切削粉処理のユーティリティコスト**

(方式 A) 蒸気循環なし  
電気式ボイラ+高周波式過熱水蒸気発生装置

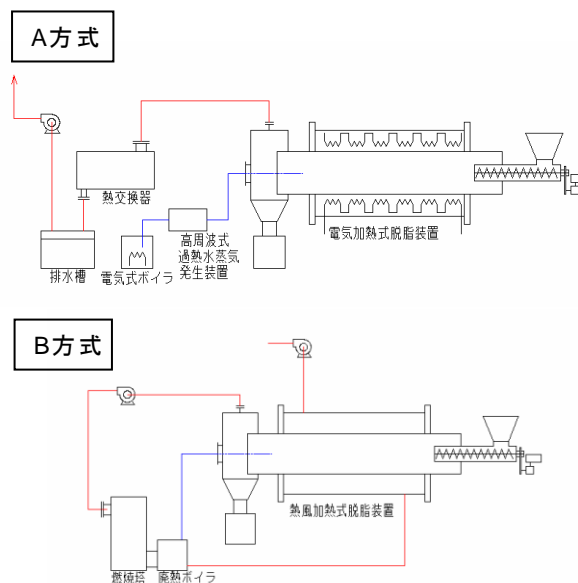
	使用量	単価	コスト
電気	116.2kw	12 円/kw	1,394.4 円
燃料	0	60 円/m <sup>3</sup>	0 円
水	500kg	0.2 円/kg	100 円

計 1,494.4 円

(方式 B) 蒸気循環あり  
廃熱ボイラ一体型過熱水蒸気発生装置

	使用量	単価	コスト
電気	15.7kw	12 円/kw	188.4 円
燃料	18m <sup>3</sup>	60 円/m <sup>3</sup>	1,080 円
水	40kg	0.2 円/kg	8 円



計 1,276.4 円



**図Ⅲ.2.3-37 コスト試算のためのモデルフロー**

**(d) 塗装付着物除去への応用**

市中回収スクラップへの応用として、電子機器筐体の塗料付着物の除去技術としての有効性について検討した。材質、塗装仕様の明確な模擬試料片 (AZ91D、6.5 g、17×45×4mm、チクソモールド成型品、ANC 化成処理) を 7 種類作成し、蒸気温度 400℃付近で 40 分間程度過熱水蒸気処理を行い、処理前後の表面状態を比較した。その結果の一例を図Ⅲ.2.3-38 に示す。過熱水蒸気処理によって塗膜が膨張・剥離し、簡単な摩擦処理で下地から容易に分離される。XRF による表面分析の結果から、処理前には塗装成分の組成が検出されるが、処理後には AZ91D に近づいた組成が検出されている。他の 6 種のサンプルについても同様に塗装の除去が可能であった。実際の携帯電話から取り外した数個のマグネシウム製筐体についても、模擬試料と同様に適用可能であることを確認した。このことから、過熱水蒸気を用いた塗装付着物の除去は、技術的には十分に可能であると考えられる。塗装分離後の試料は固体リサイクル鍛造素材化試験用の試料とした。

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">処理前</div> 	<p>XRF 検出元素</p> <p>Ti 59.73%</p> <p>Zn 27.82%</p> <p>Mn 5.50%</p> <p>Al 3.38%</p> <p>Si 2.80%</p> <p>P 0.46%</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">処理後</div> 	<p>XRF 検出元素</p> <p>Mg 83.86%</p> <p>Al 13.82%</p> <p>Zn 1.73%</p> <p>Mn 0.55%</p> <p>S 0.039%</p>
---	--	--	---

下塗り：なし  
上塗り：ポリウレタン系樹脂塗料 (T 社) 膜厚：25～35μm, 塗色：白、用途：携帯電話等

**図Ⅲ.2.3-38 過熱水蒸気処理による塗装付着物の除去**

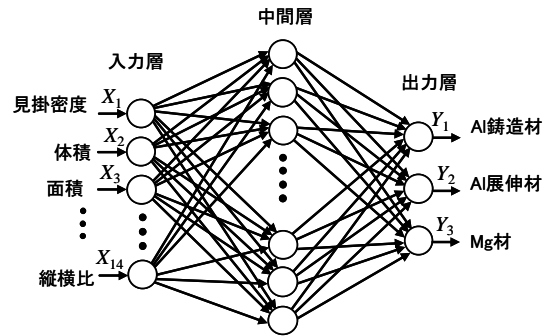
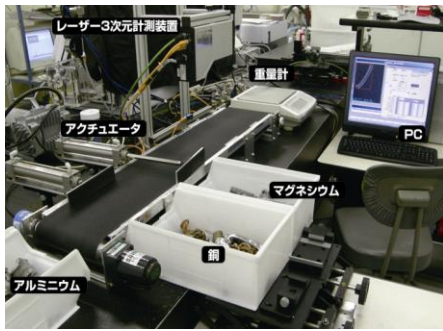
## 2) 市中回収スクラップの成分分離・無機不純物除去

マグネシウム合金の市中回収スクラップのリサイクルを考える上で最も重要な製品は自動車であろう。廃車の破碎・選別処理施設では、アルミ、銅、真鍮、亜鉛等の非鉄金属をミックスメタルとしてまとめて回収し、さらに金属種別ごとに分離するのが一般的である。軽金属スクラップとその他の金属スクラップとの分離については、微量に混入する成分を除くと、概ね既存の選別技術で対応できる。現在、マグネシウムはアルミスクラップに混入して回収され、そのすべてが鋳造用アルミ合金として再生されている。スクラップ量が少ないときはこうしたカスケード型のリサイクルが有効であるが、将来の大量排出時においてマグネシウムとして再生するには、アルミニウム合金との分離が必要になる。また、マグネシウムの二次合金特性の悪化要因となる銅、ニッケルについては、バルク状のものは既存の処理フローで除去可能であるが、表面に付着した微粉、塗料などが微量に混入する可能性は十分に考えられる。本検討項目では、将来の大量排出時を想定した市中回収品スクラップの前処理技術として、マグネシウム含む軽金属スクラップの選別プロセスと、選別後のマグネシウムスクラップに微量に混入する可能性のある銅などの不純物元素の湿式法による除去技術について検討した。

### (a) 廃車から回収される軽金属スクラップの成分分離

現在、廃車の破碎・選別処理施設で回収されている「アルミスクラップ」は、展伸アルミ、鋳造アルミ、マグネシウムの混合物であり、これらは一括して不純物許容量の大きな鋳造用アルミ合金として再生されている。今後自動車の外板パネル等に展伸アルミの使用が増加すると予想されており、展伸アルミスクラップを展伸材用アルミ合金として再生するリサイクルシステムの構築が求められている<sup>13,14)</sup>。比重の違いを用いてマグネシウムのみを分離することは可能であるが、マグネシウムの混入割合が圧倒的に少ない現状では単にマグネシウムのみを分離するニーズは高くない。こうしたことから、上記の軽金属スクラップ 3 種を分離する技術が必要とされている。しかし、既存の選別技術では、密度、色、導電性など物性が類似したこれらのスクラップの正確な分離は困難である。表 III.2.3-7 にスクラップの性状を示す。これまでに 1) 透過エックス線法、2) 蛍光エックス線法、3) レーザー誘起プラズマ分光法が有力な選別技術として提案されているが、表面に付着したコンタミや破碎金属片の不定形な形状の影響により識別精度が不安定となる場合があり、また放射線安全管理が必要であることや機器自体が非常に高価でもあるため現場への導入は殆ど進んでいない。そこで本検討項目では、このような問題を解決するために、新しい軽金属スクラップ選別技術を検討した。

図 III.2.3-39 に開発したスクラップ選別装置の写真を示す。試料を搬送するベルトコンベア、重量計、レーザー 3 次元計測器、分別機構を備えこれらの動作を PC で制御する。重量と立体形状に関する数値をパラメータとする独自のアルゴリズムによって破碎片の種類を判定を行う。判定を終えた破碎片はその結果に基づいてアクチュエータによって選別される。本装置で計測すると 3 種の破碎片には 3 次元形状値に統計的な違いが見られる。その特徴を判別分析とニューラルネットワーク (図 III.2.3-40) を用いて抽出する。



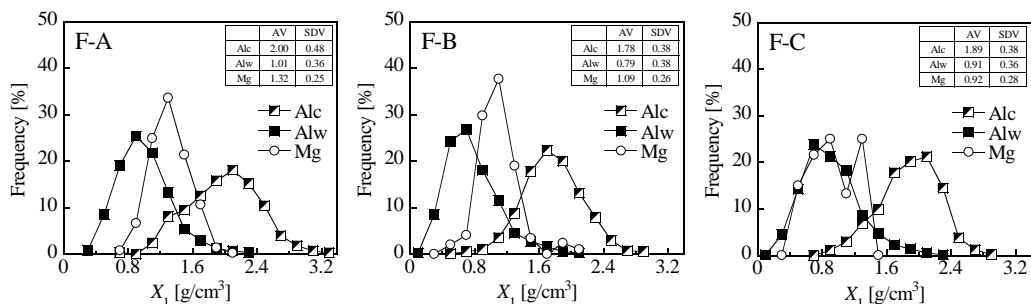
図Ⅲ.2.3-39 スクラップ選別装置(新開発) 図Ⅲ.2.3-40 素材識別用ニューラルネットワーク

表Ⅲ.2.3-7 廃車処理で発生する軽金属スクラップの性状

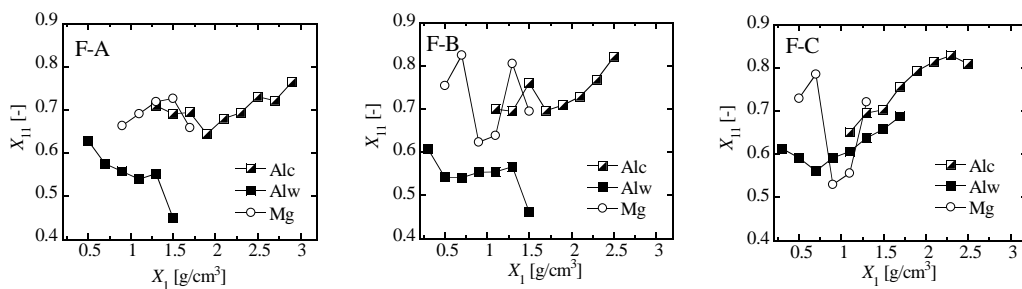
	鑄造アルミ	展伸アルミ	マグネシウム
色調			
真密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	2.65~2.85	2.65~2.85	1.76~1.81
電気 伝導度 [% IACS]	27~40	30~60	10~20

本装置による3次元形状計測結果の一例として、国内3箇所の廃車破碎選別処理施設(F-A、F-B、F-C)から入手した軽金属スクラップ1756個について、見掛け密度(重量値/体積値)( $X_1$ )の頻度分布を比較した結果を図Ⅲ.2.3-41に示す。ここに、Alc:鑄造アルミ、Alw:展伸アルミ、Mg:マグネシウムを表す。展伸アルミは破碎時の薄板の変形によって内部に空隙を持つ破砕片が発生するのに対して、鑄造アルミやマグネシウムではブロック状の破砕片が多く発生する。本装置では破砕片の表面をレーザー光で走査する方式のため破砕片内部の空隙は検知できず、体積値に誤差が生じてこのような見掛け密度分布となる。こうした素材ごとの見掛け密度分布の違いは、サンプル数が少なかった施設Cのマグネシウムを除いて、3施設共通の傾向として確認できる。図Ⅲ.2.3-42には破砕片の重心点高/最大高( $X_{11}$ )と見掛け密度( $X_1$ )との関係をプロットしたものである。展伸アルミの破砕片は概ね0.5-1.5 g/cm<sup>3</sup>の見掛け密度となり、同じような見掛け密度値を示すマグネシウムや鑄造アルミと比較すると、重心点高/最大高が小さくなる傾向が3箇所の施設で共通して見られる。これと同様に各素材を特徴付ける傾向が見られる他の変数が複数存在することが確認された。従って、ある狭い見掛け密度区間に限定するとそこに存在する各破砕片の立体形状には統計的な違いがあり、その特徴を上手く抽出することでこれらの材質を識別できる。本選別法では、破砕片の見掛け密度の大きさに応じたデータベースを複数作成し、それぞれについて判別分析とニューラルネット

ワークを順次適用して、素材を識別するアルゴリズムとしている。

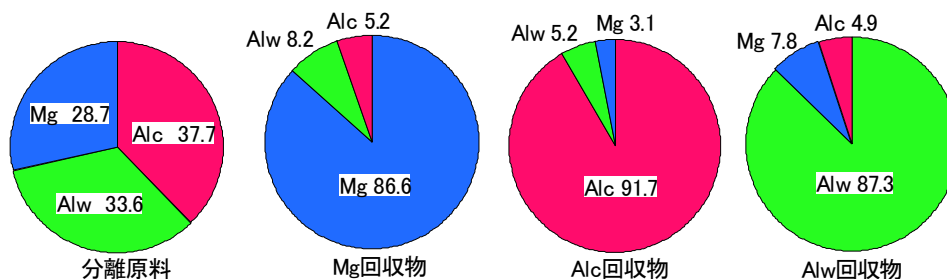


図Ⅲ.2.3-41 軽金属スクラップ3種の見掛け密度頻度分布



図Ⅲ.2.3-42 軽金属スクラップ3種の3次元形状パラメータと見掛け密度の関係例

開発したスクラップ選別装置を用いて3種の軽金属を選別する実験を行った結果、個数基準で平均90%以上の識別的中率とすることが可能であることを確認した。このとき分離原料と各金属回収物（Alc:鋳造アルミ、Alw:展伸アルミ、Mg:マグネシウム）の組成は図Ⅲ.2.3-43のようである。識別に失敗したデータを追加してニューラルネットワークを更新することにより、さらに高い選別成績を得ることが可能である。各スクラップの二次製錬における再溶解時に多少の成分調整が可能であるので、本実験結果はその前処理における物理選別としては十分な値であると考えられる。本選別法の特長として、1) 簡易・安価・安全であること、2) 破碎片表面の塗装や汚れの影響を受けないこと、3) 高速処理が可能（ベルトスピード約2m/s）なことがあげられる。他方、過去に蓄積した測定データと特長が大きく異なる破碎片に対しては識別精度が低下するため、データベースと識別用アルゴリズムの更新が必要となる。



図Ⅲ.2.3-43 スクラップ選別試験結果の一例(単位wt%)



次に、本選別法のマグネシウム合金種別分離への応用について検討した。上述の 3 施設でサンプリングしたマグネシウムスクラップ 50 個（図Ⅲ.2.3-44）の元素含有量を蛍光エックス線分析装置を用いて測定した結果を表Ⅲ.2.3-8 に示す。本表では、全破砕片 50 個の平均成分値、AM 系と判断できる破砕片 24 個の平均成分値、AZ 系と判断できる破砕片 26 個の平均成分値、ハンドル芯金と思われる棒状破砕片 8 個の平均成分値を示している。また、参考として現在の主流合金となっている AZ91 と AM60 の成分値を示している。本表から、アルミ合金等の他種金属スクラップとの分離が完全であれば、回収されるマグネシウムスクラップへの Si、Cu、Ni の混入は非常に少ないことが分かる。また、全破砕片を混合すると Al と Fe の含有量が問題となり、AM 系と AZ 系に選別したとしても Fe の含有量が問題となり、共に AZ91、AM60 の規格を満足しないことが分かる。他方、ハンドル芯金に由来と思われる棒状破砕片だけを選別すれば、AM60 規格を満たす可能性があることが分かる。開発したスクラップ選別技術では、破砕片の 3 次元形状による選別が可能であることから、約 300 個のマグネシウム破砕片を対象として棒状破砕片の選別を試みた結果、90%以上の精度で分離できることを確認した。本結果によれば成分調整のための再溶解工程を省略したりリサイクルプロセスを構築できるものと考えられる。しかしながら、この結果は限定したサンプル数に対するものであり、廃車の破砕処理で発生するすべてのマグネシウムスクラップに適用できるとは限らず、実用性を評価するにはさらに検討を要すると考えられる。



図Ⅲ.2.3-44 蛍光エックス線分析の対象としたMg合金スクラップ

表Ⅲ.2.3-8 蛍光エックス線分析で得られた Mg スクラップの成分値(単位 wt%)

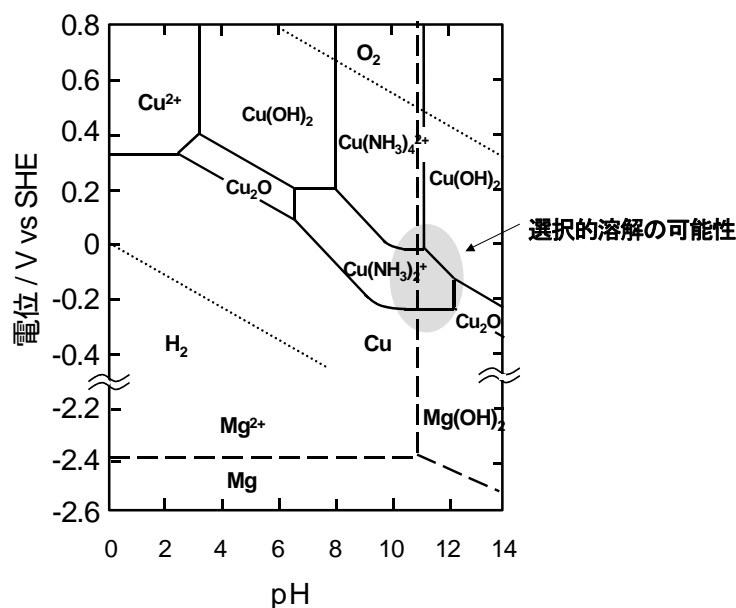
	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe
全破砕片の平均 (50 個)	8.07	0.423	0.241	< 0.001	0.004	< 0.001	0.008
AM 系破砕片の平均 (24 個)	6.44	0.017	0.326	< 0.001	0.002	< 0.001	0.007
AZ 系破砕片の平均 (26 個)	9.65	0.816	0.159	< 0.001	0.006	< 0.001	0.009
ハンドル芯金 棒状破砕片の平均 (8 個)	6.11	0.023	0.329	< 0.001	0.001	< 0.001	0.005
AZ91 (ASTM 規格)	8.3-9.7	0.35-1.00	0.15-0.50	< 0.1	< 0.03	< 0.001	< 0.005
AM60 (ASTM 規格)	5.5-6.5	< 0.2	0.24-0.60	< 0.1	< 0.01	< 0.001	< 0.005

## (b) 湿式法による無機不純物除去

### ・銅の除去

湿式法によるリサイクル前処理技術として、不純物となる銅の除去技術に関し、1.熱力学関係図による考察、ならびに、2.小型溶解槽ならびに除去剤としてアンモニアならびに2価銅イオンを利用した銅ならびにマグネシウム合金(AZ31) (樹脂埋めした板状試料: 2 cm×2 cm) 溶解実験を行った。

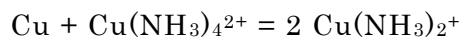
不純物である銅のみを除去するには、銅を溶解する一方、マグネシウムに対しては溶解しない溶液系が必要である。溶液中に特定の金属イオンに配位する錯化剤が存在しない場合、マグネシウムを溶解させずに銅を溶解させることは困難である。一方、錯化剤としてアンモニアを含む溶液における安定な化学種を示す電位-pH 図を図Ⅲ.2.3-45 に示す。銅は中性からアルカリ性の範囲においては、2価銅アンミン錯体( $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ )ならびに1価銅アンミン錯体( $\text{Cu}(\text{NH}_3)_2^+$ )が安定である。一方、マグネシウムは水酸化マグネシウム( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ )が安定な成分であることからアルカリ性において不溶であることが予想される。以上のことから、マグネシウムのデータをマグネシウム合金に代用した場合、両者の関係より、銅のみの除去が可能な条件は pH が 11 から 12 の範囲であることがわかる。



図Ⅲ.2.3-45 銅-アンモニア-水系ならびにマグネシウム-アンモニア-水系の電位-pH 図 ( $C(\text{Cu})=0.5\text{kmol m}^{-3}$ ,  $C(\text{Mg})=1.0\text{kmol m}^{-3}$ )

アンモニア濃度  $5\text{kmol m}^{-3}$ 、硫酸アンモニウム濃度  $1\text{kmol m}^{-3}$  の水溶液を用いた場合、銅はわずかながら溶解し、溶液は薄い水色を呈した。これに対し、マグネシウム合金中のマグネシウムは検出できなかった。従って、このような溶液では銅のみを選択的に除去可能であることがわかる。なお、銅を溶解するためには酸化剤の存在が必要であり、上述の実験では溶存酸素が酸化剤の働きをしたと考えられる。表Ⅲ.2.3-9 には AZ31、AZ91 および銅に対して酸化剤として2価銅イオンを添加した場合のマグネシウムおよび銅の浸出率を示したものである。この結果からこの溶液ではいずれの合金からもマグネシウムの溶解は見られず銅のみが浸出する、つまり銅の選択除去が可能であることがわ

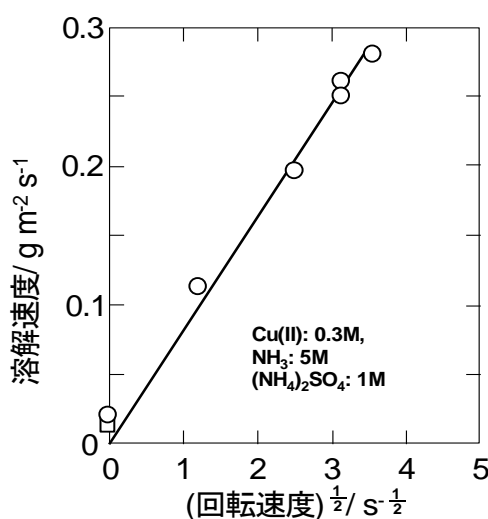
かる。図Ⅲ.2.3-46 は銅の溶解速度と攪拌翼の回転数との関係を表す。図より浸出速度は攪拌翼の回転数の 1/2 乗に比例して増加することがわかる。このことから溶解反応の律速段階が液境膜内の物質移動であることを示している。なお、反応は次式で表されると考えられる。



表Ⅲ.2.3-9 湿式法による銅の浸出率

マグネシウム合金	2価銅濃度(M)	Mg浸出率(%)	Cu浸出率(%)
AZ31	0.1	<0.1	90
AZ31	0.5	<0.1	100
AZ91	0.1	<0.1	93
AZ91	0.5	<0.1	100

マグネシウム合金 (10mm x 10mm x 2mm) : 10g  
銅片 (5mm x 2mm x 0.1mm) : 1g



図Ⅲ.2.3-46 銅の溶解速度におよぼす回転速度の影響  
( $C(\text{NH}_3)=5 \text{ kmol m}^{-3}$ ,  $C((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)=1.0 \text{ kmol m}^{-3}$ )

また、アンモニウム塩として塩化アンモニウムを用いた場合には、銅は硫酸アンモニウムの場合と同様に溶解するとともに、マグネシウム合金も溶解した。従って、同じ pH においても共存するイオン種によって溶解挙動に大きく差が見られることがわかった。

#### ・ ニッケルの除去

ニッケルは酸性水溶液中では溶解することが知られている。しかしながらマグネシウム合金も酸性水溶液では溶解するため、酸性水溶液では選択的に溶解させることができない

い。そこで、チオシアン酸イオンを含むアンモニアアルカリ水溶液の適用を検討した。ニッケルはチオシアン酸イオンならびにアンモニアと錯体を形成することから溶液中に安定に存在する可能性がある。またこの溶液を pH が 9 から 11 程度の弱アルカリ性溶液にした場合にはマグネシウム合金の溶解は大きくないと考えられる。図 III.2.3-47 はチオシアン酸アンモニウム濃度  $1\text{ kmol m}^{-3}$ 、硫酸アンモニウム濃度  $1\text{ kmol m}^{-3}$ 、酸化剤である銅イオン(II)濃度を変化させた場合の溶解速度を示したものである。実験は  $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$  のニッケル板を用い、空気雰囲気で行った。図より銅濃度が高い場合にまた pH が 9 付近で溶解速度が大きいことがわかる。また、銅が含まれていない場合にもわずかではあるが、溶解することがわかった。図 III.2.3-48 は銅イオンが含まれていない溶液と銅濃度が  $0.05\text{ kmol m}^{-3}$  の溶液（温度は  $60^\circ\text{C}$ ）に AZ31 を 1 時間浸した後の写真である。銅が含まれる場合にはマグネシウム合金表面に大きな変化は見られないが、銅イオンを含む場合には腐食が観察された。なお、酸性水溶液を用いた場合のように激しい溶解ではなかった。このとき容器内に金属銅が見られたこと、銅イオンが酸化剤であるため合金成分が酸化し表面が荒れたような状態になったと考えられる。以上のことから銅イオン(II)を含む場合には、ニッケルの溶解と同時に合金の溶解にも注意を払う必要がある。

表 III.2.3-10 は銅、ニッケルおよびニッケルを含む素材としてステンレス (SUS304) に対してそれぞれの溶液の溶解特性をまとめたものである。表にはマグネシウム合金に対する結果もあわせて示した。このことから、銅は銅イオンを含むアンモニア水溶液により溶解させることが可能である。しかしながら、水溶液を用いた反応であることから、めっきや薄い板状の銅に対しては可能性が考えられるものの、塊に対しては速度が遅いため効果的とは考えられない。また、ニッケルに対しては金属ニッケルの場合にはチオシアン酸イオンを含む溶液を用いることで非常に遅いものの溶解させることは可能である。しかしながら、ステンレスの場合には困難であることがわかった。

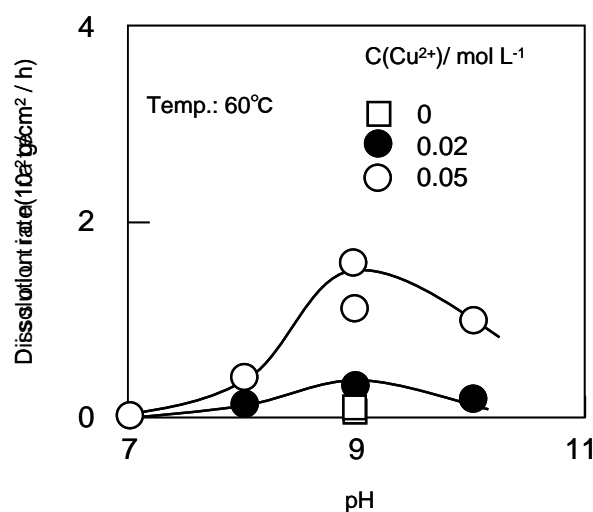
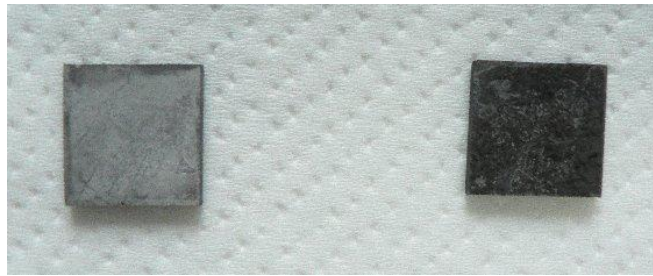


図 III.2.3-47 ニッケルの溶解速度におよぼす pH の影響  
 $C(\text{NH}_4\text{SCN})=1\text{ kmol m}^{-3}$ ,  $C((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)=1\text{ kmol m}^{-3}$



図Ⅲ.2.3-48 浸漬後の写真  
 (左:  $C(\text{Cu}^{2+})=0 \text{ kmol m}^{-3}$ , 右  $C(\text{Cu}^{2+})=0.05 \text{ kmol m}^{-3}$ ,  
 他の条件  $C(\text{NH}_4\text{SCN})=1 \text{ kmol m}^{-3}$ ,  $C((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)=1 \text{ kmol m}^{-3}$ ,  $\text{Temp.}=60^\circ\text{C}$ ,  $\text{pH}=9$ )

表Ⅲ.2.3-10 溶液に対する特性

	銅	ニッケル	ステンレス (SUS304)	マグネシウム合金
弱酸の領域(塩酸、硫酸等使用)	非常に遅い	変化なし	変化なし	pH、酸により溶解
アンモニア+空気	溶解	変化なし	変化なし	ほとんど変化なし
アンモニア+ Cu(II)	比較的速い	変化なし	変化なし	ほとんど変化なし
チオシアン酸アンモニウム+空気	遅い	遅い	変化なし	ほとんど変化なし
チオシアン酸アンモニウム+Cu(II)+空気	溶解	溶解	変化なし	腐食等

### 3) まとめ

過熱水蒸気を用いたマグネシウムスクラップの脱有機物処理について、実験室規模の装置を用いて基礎的に検討し、以下の成果を得た。

1. マグネシウム切削粉に残留する切削油剤等の除去技術を確認した。各種マグネシウム合金の切削粉スクラップに対して処理後の付着炭素量 0.1%以下（中間目標）を達成した。
2. 蒸気循環方式についてその有用性を検証し、実用化開発に反映した。
3. 切削粉洗浄技術のランニングコストを試算した結果、大量処理（処理量 300kg/h）を行う場合に本開発技術のコスト競争力は非常に強いと考えられた。
4. 電子機器筐体スクラップの塗装分離除去技術としての有用性を確認し、市中回収スクラップの前処理技術として提案した。
5. 本技術は再溶解のみならず固体リサイクルの前処理としても有効であると考えられる。

本技術は、性状が明らかであるにもかかわらず、これまで未利用であったマグネシウム切

削屑の再資源化を達成することでマグネシウム二次合金市場の拡大に貢献できる。有機溶剤や界面活性剤による洗浄等の競合技術と比較して低コストであり、各種廃棄物の脱脂技術、炭化処理技術、塗装除去技術としての展開も期待できる。

廃車の破砕・選別処理施設で発生する軽金属スクラップ（マグネシウム、展伸アルミ、鋳造アルミ）の選別技術ならびにマグネシウムのリサイクルの際に障害となる Cu、Ni の無機不純物の湿式除去技術について検討し、以下の成果を得た。

1. 市中回収スクラップの前処理技術として、レーザー3次元計測器と重量計を併用した物理選別法を開発し、マグネシウム-アルミ展伸材-アルミ鋳造材の分離が可能であることを明らかにした。
2. 本スクラップ選別技術の特長として、簡易・安価・安全であること、破砕片表面の塗装や汚れの影響を受けないこと、高速処理が可能なが考えられる。
3. 国内 3 箇所の廃車選別処理施設から入手したスクラップ 1756 個について、本スクラップ選別法の有効性（選別精度 90%以上）を確認し大量処理の可能性を明らかにした。
4. マグネシウムスクラップのみを分離回収した場合、混入するハンドル芯に由来する棒状スクラップのみを選別すると AM60 規格を満たす可能性があることを明らかにした。
5. アンモニア水溶液を用いた湿式処理によって、マグネシウムを溶解させずに銅のみを浸出させる銅の選択除去の可能性が示唆された。ニッケルに対してはチオシアン酸イオンを含む溶液により金属ニッケルの溶解が確認された。ステンレスに対しては選択的な溶解は困難であった。

レーザー3次元計測を応用した Mg、Al 展伸材、Al 鋳造材スクラップの選別や、Mg スクラップの合金種の選別は世界初の技術である。エックス線分析法等の競合技術と比較して、簡易、安価、安全な選別法であり、市中回収スクラップのリサイクル基盤技術として今後の発展が期待できる。市中回収品スクラップを対象とする場合、使用済み製品の効果的な回収システムの構築が必要であり、製品の解体、選別などの中間処理が伴うため、工場内で発生するスクラップと比較してリサイクルにおける採算性のハードルは高い。現在のマグネシウム製品を取り巻く経済的環境を考えると、開発技術がリサイクルの現場で直ちに用いられることは難しいように思われるが、将来の大量排出時において素材価格の安定化に貢献する基盤技術として十分に意義があると考えられる。

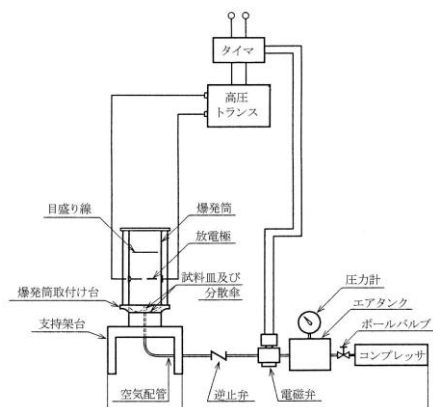
### ③(1)-3 単体分離及びハンドリングの安全性評価

マグネシウム材の研磨、集塵、破砕（単体分離）、粉末製造等の工程においては、衝撃火花や静電火花等により粉塵爆発が発生する危険性がある。本検討項目ではリサイクルプラントにおける粉塵爆発と自然発火事故を防止する観点から、マグネシウム粉末の発火性に及ぼす影響因子について基礎特性を詳細に検討し、安全な取り扱い条件を明らかにする。また、マグネシウムスクラップの粉砕、選別、輸送、貯蔵などの単位操作における安全面から見た課題を抽出し、発火防止など安全なハンドリング方法を提案する。これらにより、市中から回収されるマグネシウムスクラップのリサイクルを促進するための基盤を構築することを目標とした。

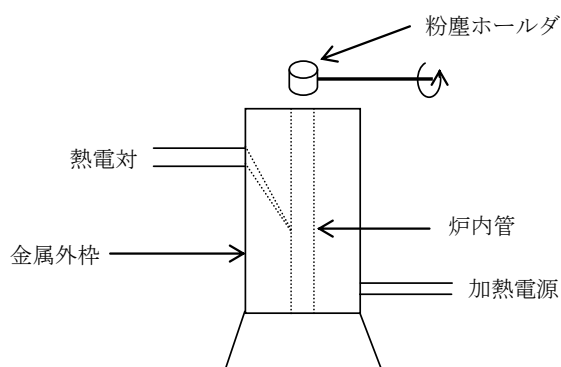
## 1) マグネシウム粉塵の爆発特性の解明

### (a) 粉塵爆発に関する基礎特性

粉塵爆発に関する基礎特性の解明として、放電電極を用いた着火による試験方法により、爆発下限濃度、最小着火エネルギー、最低発火温度等に対するマグネシウム粉の粒度、濃度の影響を実験的に検討した。爆発下限濃度と最小着火エネルギーは JIS Z 8818 に規定する試験方法と装置（図Ⅲ.2.3-49）を使用した。本方法は浮遊粉塵雲を一定空間に形成し、放電火花により着火試験を行い、粉塵の爆発し易さを調べるのに利用される。粉体試料は試料皿上にセットし、圧縮空気をエアタンクから供給して浮遊粉塵雲を形成する。均一な浮遊粉塵雲が形成されたら、放電電極で放電火花を発生し、浮遊粉塵雲の爆発発生を調べる。浮遊粉塵濃度は試料皿にセットした粉体の質量を爆発筒の容積で除して求める。爆発下限濃度は、粉塵濃度を減少して爆発が発生する最小の濃度とする。最小着火エネルギーは、爆発するに十分な濃度をもつ浮遊粉塵雲を形成し、放電により着火爆発を起こす最小の放電エネルギーを測定して求める。放電エネルギーは、高圧コンデンサーに蓄積した電荷を設定時間放出する単発の矩形波を発生し、その放電電圧、放電電流、放電持続時間をオシロスコープで観察して求める。可燃性浮遊粉塵雲は、存在する空間の温度を上昇させていくと、発火に至る。このときの最低温度を最低発火温度、あるいは発火温度という。実験に用いた測定装置を図Ⅲ.2.3-50 に示す。試料は粉塵ホルダに入れ、一定温度に加熱した炉内へ粉塵を投入し、炉下端からの火炎の有無によって発火性を判定する。

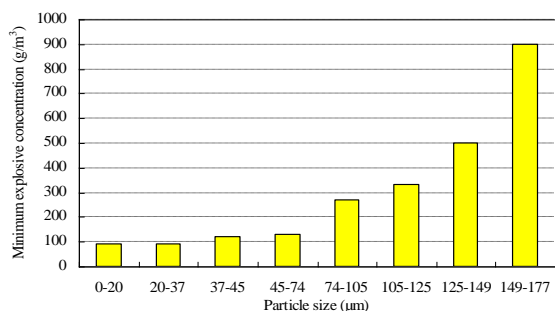


図Ⅲ.2.3-49 吹上式粉塵爆発試験装置

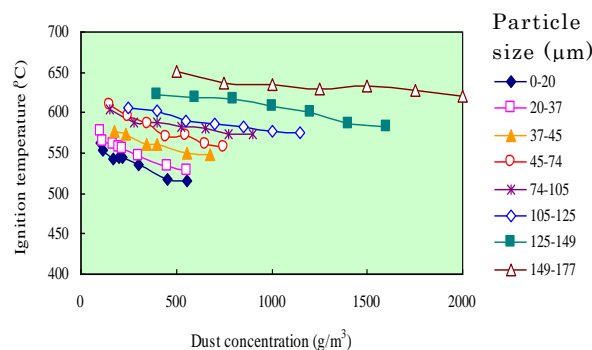


図Ⅲ.2.3-50 浮遊粉塵雲の発火温度測定装置

図Ⅲ.2.3-51 に、マグネシウム粉塵（純度 99.5%）の粒度別の爆発下限濃度を調べた結果を示す。この図より純粋なマグネシウム粉塵の爆発下限濃度は約 90g/m<sup>3</sup> で、粒径が約 74μm より大きくなると爆発下限濃度は約 270 g/m<sup>3</sup>、粒径が約 125μm 以上になると爆発下限濃度は約 500 g/m<sup>3</sup> となり、粒径が約 74μm 以上になると爆発性がかなり小さくなることがわかる。粉塵爆発は個々の粒子の燃焼に起因するので、粒子が燃焼しやすいか否かに爆発が影響される。粒子の燃焼は表面反応であるため比表面積の大きいものほど爆発しやすいこととなる。従って、粉塵は粒度が小さくなるほど、粉塵の爆発に関与する面積が大となり、粒子の燃焼、爆発が起こりやすくなって、爆発下限濃度が小さくなると考えられる。図Ⅲ.2.3-52 に、マグネシウム粉塵の発火温度、粉塵濃度及び粒度が発火温度に及ぼす影響を示す。マグネシウム粉塵雲の発火温度は粒径約 20μm 以下のものが約 520℃、粒径約 150μm 以上のものが約 630℃であった。また、粉塵粒度が大きくなるにつれ、マグネシウム粉塵雲の発火温度は高くなり、爆発性が小さくなることが示された。粉塵雲濃度の増加により、粉塵雲の発火温度は低くなり、爆発性が大きくなることがわかった。

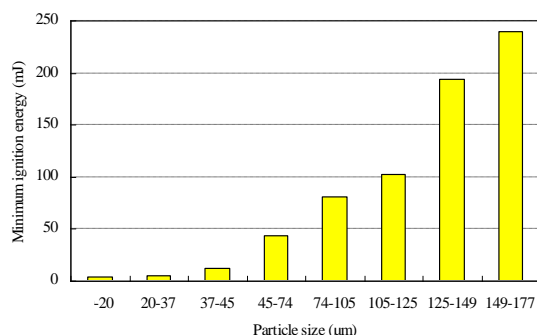


図Ⅲ.2.3-51 Mg 粉塵の爆発下限濃度



図Ⅲ.2.3-52 Mg 粉塵の発火温度

物質の燃焼・爆発のためには着火源が必要であり、その大きさは一定の値以上なければならない。粉塵雲のごく一部に局部的にエネルギーを与え、粉塵雲を着火・爆発させるに要するエネルギーの最小値を最小着火エネルギーというが、最小着火エネルギーは粉塵の種類、粒度、粉塵濃度等によって変化する。図Ⅲ.2.3-53 に、マグネシウム粉塵雲の着火エネルギーを粒度別に調べた結果を示す。このとき粉塵雲の濃度は爆発下限濃度の 2 倍に設定して試験を行った。図より、粒径が 20μm 以下のときのマグネシウムの最小着火エネルギーは約 4 mJ となる。これはかなり着火性が大きい粉体と言え、摩擦火花、衝突火花、静電気放電火花等により容易に着火・爆発に至るものと考えられる。



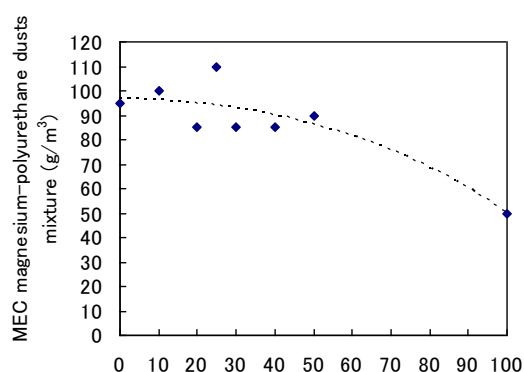
図Ⅲ.2.3-53 Mg 粉塵の最小着火エネルギー



## (b) 共存物質がマグネシウム粉塵の爆発性に及ぼす影響

廃家電等のリサイクル現場において頻繁に処理されている可燃性物質であるポリウレタン (PUR) 粉塵と、マグネシウム粉塵が共存した場合の爆発性について検討した。まず、各々の物質が単独で存在する場合の粉塵濃度と爆発確率の関係 (爆発曲線) を調べたところ、マグネシウム (粒径  $45\mu\text{m}$  以下) と PUR (粒径  $75\mu\text{m}$  以下) の爆発下限濃度はそれぞれ約  $90\text{g}/\text{m}^3$ 、約  $50\text{g}/\text{m}^3$  であり、マグネシウムの方が大きな値となるが、着火初期の爆発展開率 (単位粉塵濃度あたりの爆発確率の上昇量) を比較すると、マグネシウムが約 4.8、PUR が約 0.75 であり、マグネシウムの方が格段に大きいことがわかった。PUR の場合、燃焼反応の伝播性が低いと言え、たとえ着火したとしても爆発へ至る危険性はマグネシウムよりも小さい。このことから、マグネシウム粉塵と PUR 粉塵が共存しても、マグネシウム粉塵の爆発性はさほど影響を受けないものと考えられる。マグネシウム粉塵にポリウレタン粉塵を混合した混合粉塵の爆発下限濃度を調べた結果 (混合粉塵の爆発下限濃度と PUR 混合比率の関係) を図 III.2.3-54 に示す。PUR の混合率が大きくなるに従い、混合粉塵の爆発下限濃度は漸減傾向であるが、さほど変化せず、PUR が共存しないときの爆発下限濃度を概ね維持していることが分かる。

逆に、可燃性粉塵と不燃性粉塵が共存すると、可燃性粒子の燃焼から発生する熱エネルギーが不燃性粒子に吸収され、可燃性粒子の燃焼継続とその伝播が抑制されることになり、粉塵爆発抑制につながると考えられる。このような効果を検証するため、マグネシウム粉塵に  $\text{CaO}$  と  $\text{CaCO}_3$  が各々共存する場合の爆発性を調べた結果を図 III.2.3-55 に示す。この図では、 $\text{CaO}$  と  $\text{CaCO}_3$  をマグネシウム粉塵と混合しない場合の爆発下限濃度は約  $100\text{g}/\text{m}^3$  であるが、約 30 % 程度の混合率になるまでは爆発性がさほど変化しないことを示しており、爆発性が大きいマグネシウムの爆発性に引きずられていることがわかる。マグネシウム粉塵の爆発抑制の観点から、不燃物を混合するには、多量 (混合率が約 40 ~ 50 % 以上にもなるように) 混合する必要があるとあり、マグネシウムの再利用を考慮すると現実的でないと考えられる。



Mixing ratio of polyurethane in the magnesium-polyurethane dusts mixture (wt %)

図 III. 2.3-54 Mg-PUR 混合粉塵の爆発下限濃度

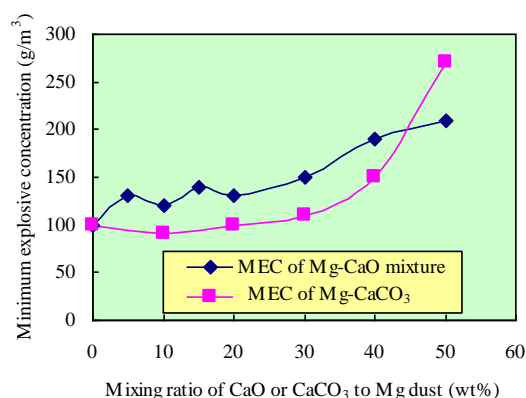
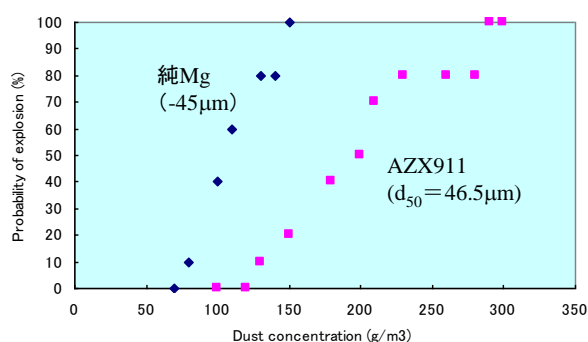


図 III. 2.3-55 Mg-CaO、Mg-CaCO<sub>3</sub> 混合粉塵の爆発下限濃度

### (c) Ca 添加マグネシウム合金 (AZX911) 粉塵の爆発抑制効果

マグネシウム材料の加工・取り扱い上の安全性を確保するには、マグネシウム材料そのものに爆発性がないことが効果的である。そのため、マグネシウム材料に不燃性物質を含有させることは有効である。しかしながら、マグネシウム材料の機械的強度の維持など、配慮すべき点があるので、この方法によりマグネシウム材料の取り扱いに伴う安全の確保には限度がある。これらを検討するため、マグネシウム材料に不燃性物質 (Ca) を添加した素材 AZX911 (AZ91+1wt%Ca) の爆発性 (爆発確率と粉塵濃度の関係) を調べた結果が図Ⅲ.2.3-56 である。これは、純マグネシウムと、これに Ca を添加した材料の双方を粉砕した試料の爆発性を試験したもので、その結果によると、Ca 添加によりマグネシウム材料の爆発性は幾分減少 (爆発下限濃度の上昇、爆発展開の低下) することが分かる。



図Ⅲ. 2.3-56 Ca 添加 Mg 合金 (AZX911) 粉塵の爆発抑制効果

### (d) 浮遊粉塵の流動状態が爆発性に及ぼす影響

次に、リサイクルプロセスで頻繁に用いられる粉砕や分級工程での粉塵爆発性を評価することを試みた。上述の吹上式粉塵爆発試験装置では、所定速度の流動気流に浮遊粉塵雲を発生させ、この粉塵雲の最小着火エネルギーを求めて評価することができないため、新たに専用の実験装置を開発した。爆発筒の詳細と写真を図Ⅲ.2.3-57 に示す。ブロワー吸引により爆発筒 (直径 40 mm) 内に発生する気流の速度を 2 個のバルブ開閉により調整し、風速計で測定する。着火のタイミングは、試料飛散用電磁バルブを開いたあとリレー・タイマーを用いて調整し、着火エネルギー供給装置を駆動して粉塵雲の着火を試験する。粉塵雲濃度は、約 300g/m<sup>3</sup> となるように試料をダストカップにセットした。

浮遊粉塵の流動下における爆発性の検討においては、粉塵の流動状態における着火性を調べるのが重要となる。浮遊粉塵雲が流動していると、爆発発生に必要な熱源の供給状況が粉塵雲の流速に応じた変化をする。浮遊粉塵雲の流動が無視できる状態下で発生する (供給する) 火源の大きさ、発生熱量、輻射熱の影響範囲等は、粉塵雲が流動することにより変化し、粉塵雲との熱授受、接触領域 (範囲) 等に影響を及ぼす。火源の大きさ、輻射熱の影響範囲は流速の増加に伴い小となる。さらに、流動に伴う放熱の発生、熱源の冷却効果 (放電電極の冷却効果) などが生じ、これらは流速の増加に従い大となる。よって、粉塵雲が流動することにより着火性 (爆発性) は小さくなる。

これらを考慮して爆発試験した結果を図Ⅲ.2.3-58 に示す。純マグネシウム (粒径

46 $\mu\text{m}$  以下) の粉塵雲の流動を無視できる状態の最小着火エネルギーは約 9 mJ であるが、流動速度が約 3 m/s になると、これが約 300 mJ となり、流動速度が約 4 m/s になると着火源供給装置の発生限界付近のエネルギー量約 9 J では粉塵雲への着火が起らなかった。粉塵雲の流動速度が約 5 m/s の場合も、同様に約 8 J の発生エネルギーで粉塵雲への着火が生じなかった。これらの結果から、流動速度がある程度大きい(約 4 m/s 以上) 粉塵雲は着火性が小さいので、発塵空間に気流が発生するようにすれば、粉塵爆発災害の抑制につながる事が示された。

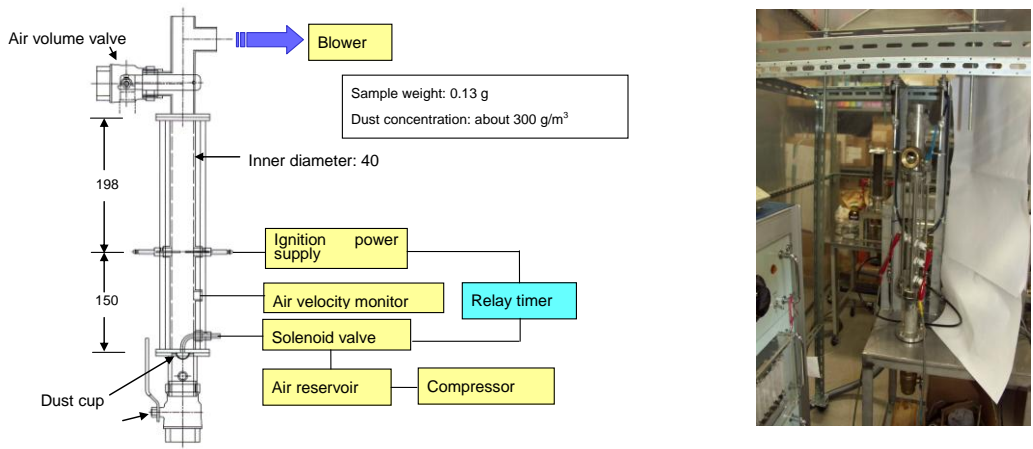


図 III. 2.3-57 粉塵雲流動下での爆発性試験装置

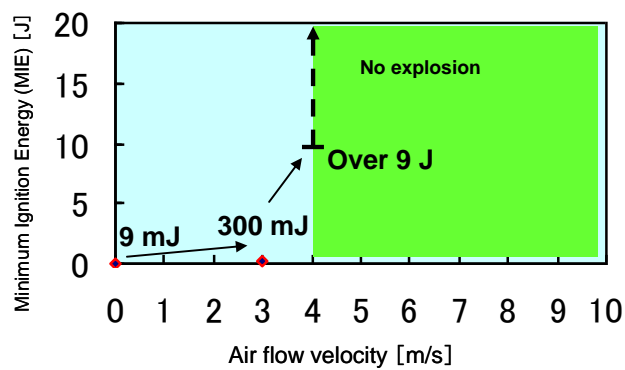


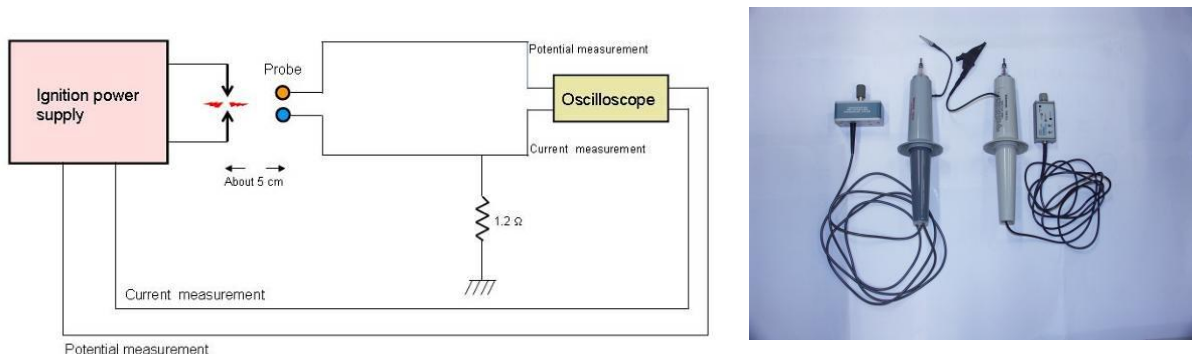
図 III. 2.3-58 粉塵雲の流動速度が爆発性に及ぼす影響

## 2) 電磁波測定による着火性火花の基礎的検知方法の検討

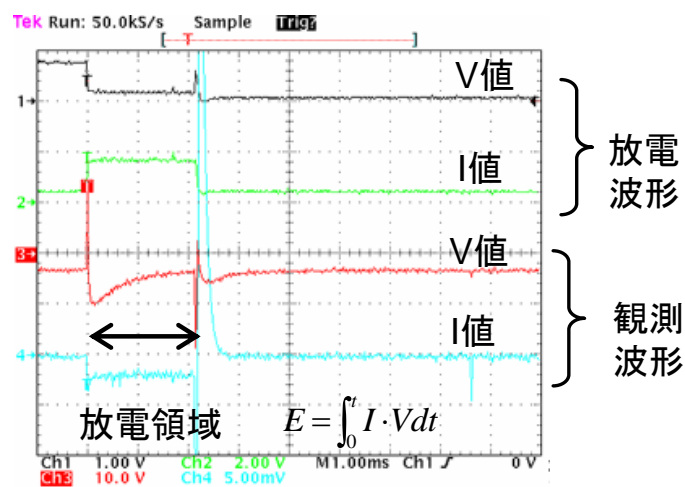
リサイクルプロセスでの安全確保(マグネシウム粉塵爆発災害の防止)においては、発塵抑制、微細粒子の発生抑制、危険雰囲気形成防止、着火源形成防止などが重要である。しかしながら、市中スクラップ処理現場での経済的操業や現場状況等のため、これらの対策を有効にとれないことも多いので、爆発防止のためには操業条件の変更や爆発抑制装置の起動などが必要となる。災害防止のためには、爆発発生条件を把握しこれを操業に

フィードバックするとともに、爆発を早期に検知することが重要である。これらのことから、着火源の形成防止に着目し、その検知・評価をすることとした。市中スクラップ処理現場で着火源となる主要なものは、破碎・粉碎に伴う摩擦火花や衝突火花・帯電、粉塵流動に伴う輸送管路や集じん機等における帯電などであるので、これによる電磁波の発生などのモニターを行う手法を検討することとした。

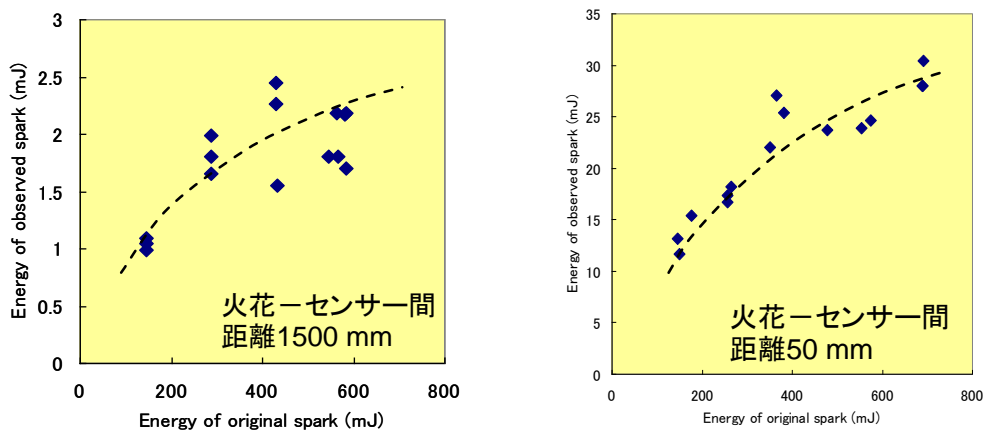
電磁波測定による着火性火花の基礎的検知方法は、図Ⅲ.2.3-59 に示す放電火花観察回路とセンサー（減衰比 1000:1、入力抵抗 100 MΩ、入力容量 3 pF、周波数帯域：DC to 74 MHz 程度の仕様を有する高電圧プローブ）を用いて行った。これまでの研究により、粉塵雲の着火のための基礎的火源特性が把握されているので、そのような特性を有する火源の検知を行うシステムを検討した。このシステムによる観測波形を図Ⅲ.2.3-60 に示す。図に示されているように、観測波形にはノイズも少なく、放電元波形を概ね良好に再現していると考えられる。放電元に形成されたエネルギー量（ $E$ ）と観測されたエネルギー量との関係を示すと、図Ⅲ.2.3-61 のようになり、放電源からの距離によりエネルギー量が減衰していること、観測されたエネルギーと放電元のエネルギーには一定の相関が見られることが分かる。



図Ⅲ. 2.3-59 放電火花観察回路と高電圧プローブセンサー(右)

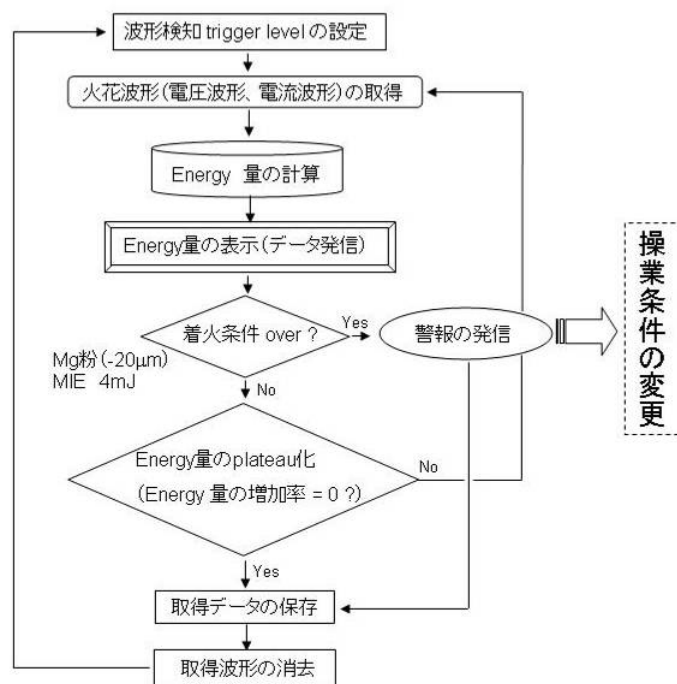


図Ⅲ. 2.3-60 放電火花の観測波形



図Ⅲ. 2.3-61 放電源発生エネルギー量と観測波形のエネルギー量の関係

産業現場では、衝突火花、静電気放電など、産業災害につながるような火源が発生することがしばしばあり、その検知ができること災害防止上有効である。上に述べたような検知システムもこれに対し有効な手段となり得る。その例として考案したのが図Ⅲ.2.3-62に示すものである。この基本的考え方は、まず、波形の取得、エネルギー計算、着火に必要な条件に達しているかの判断、着火条件に達している場合は警報の発信、データの保存等を行うことである。

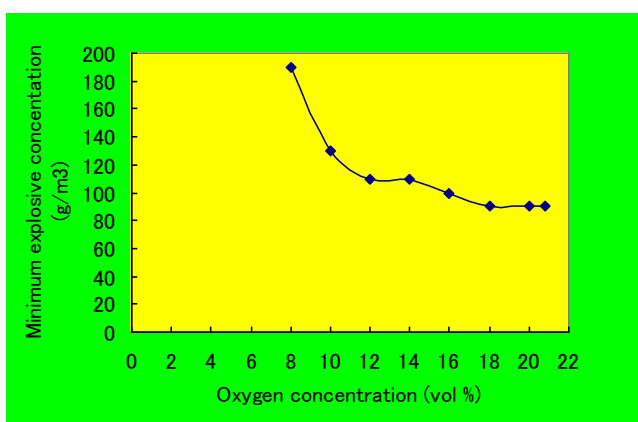


図Ⅲ. 2.3-62 着火性火花形成検知システムの概念図

### 3) マグネシウム粉塵爆発災害防止対策の総合的検討

#### (a) 雰囲気酸素濃度制御

粉塵爆発災害を防止するには、これまで述べたような危険雰囲気形成の抑制を行うことが重要であるが産業活動上これが困難なことが多い。それを考慮すると、爆発関与要因を制御することは効果的であり、その一つとして爆発域の酸素濃度を抑制すると粉塵爆発災害の防止につながる。爆発筒内の酸素濃度を調整し、雰囲気酸素濃度を变化した場合の爆発下限濃度を図Ⅲ.2.3-63に示す。通常雰囲気（酸素濃度 21 %弱）でのマグネシウム粉塵の爆発下限濃度は約 90 g/m<sup>3</sup>であるが、酸素濃度を低下するにつれ、爆発下限濃度が大きくなり、爆発性が小さくなることが示されている。雰囲気酸素濃度が約 7 % になると爆発が生じず、災害対策上有用な情報となる。



図Ⅲ. 2.3-63 雰囲気酸素が粉塵爆発性に及ぼす影響

#### (b) マグネシウム粉塵の爆発強度

粉塵爆発にはこれまで述べたように種々の要因が関与しており、粉塵爆発災害の防止にはこれらの要因を抑制することが効果的である。しかしながら、産業現場では作業上の制約からこれが困難であることも多い。また、安全をさらに確保するため基本的な粉塵爆発抑制だけでなく、災害の軽減の観点からも追加的な災害対策が必要となる。そのためには、通常行われている爆発圧力の放散が効果的である。そのための基礎資料として、20L球型粉塵爆発試験装置（ASTM E1226）を用いて爆発強度を測定した結果は次のとおりであった。

最大爆発圧力 = 10.3 [ $\times 10^2$  kPa, Gauge]

最大爆発圧力上昇速度 ( $(dP/dt)_{\max}$ ) = 1,033 [ $\times 10^2$  kPa/s]

爆発指数 = 321 [ $\times 10^2$  kPa · m/s]

爆発クラス = St 3 (激しい)

これらのデータを爆発圧力放散設備技術指針（改定版）（(独) 産業安全研究所、NIIS-TR-No.38(2005)）に反映して、圧力放散口をマグネシウム取り扱い装置に設置すると災害の軽減につながると考えられる。

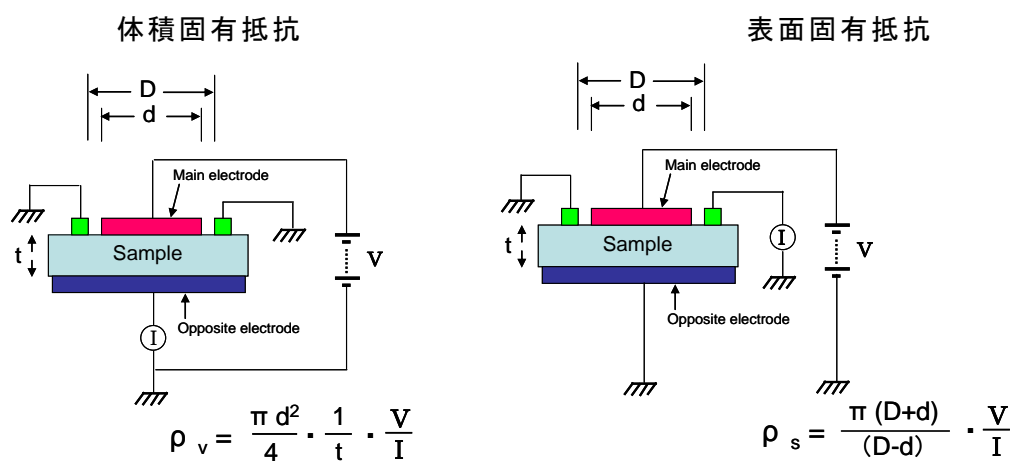
### (c) 静電気発生対策

物体を移動、輸送、破碎、剥離などすると静電気発生し、電荷がその物体や周囲物体に蓄積し、放電が発生すると爆発などの災害に至る危険がある。物体の帯電性を評価する要因の一つに電気抵抗があるが、試薬として購入したマグネシウム粉末の電気抵抗を図Ⅲ.2.3-64に示す装置を用いて測定したところ次の値であった。

$$\text{体積固有抵抗} = 6.5 \times 10^9 \quad [\Omega \cdot \text{m}]$$

$$\text{表面固有抵抗} = 8.3 \times 10^{11} \quad [\Omega]$$

試料は試薬瓶に密閉して保存してあったが、長期間の保存や爆発性試験や測定などに使用したため、表面酸化が進行していたものと思われる。測定値から、マグネシウム粉塵の電気抵抗は中程度のものであるが、接地物体との接触により比較的容易に電荷が漏洩しやすいものと考えられる。したがって、マグネシウム材料を取り扱う工程ではその機材や周囲物体を接地すれば、静電気による爆発危険性は低減できる。静電気の発生や電荷の蓄積しやすいところは曲管部、流路（輸送路）径の変化するところ、集じん装置、貯蔵タンクなどであるので、これらを接地し、発生する電荷を漏洩し、静電気を除去することは重要である。



図Ⅲ.2.3-64 電気抵抗率の測定方法

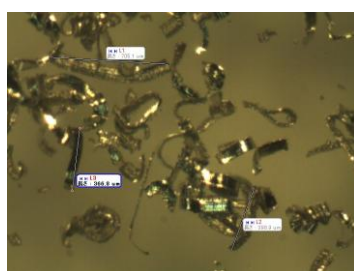
### (d) マグネシウム切削粉の爆発性（研究開発項目⑦との連携）

本研究においては、産業現場における保安の確保に資することを目的としているため、実際の作業現場で発生するマグネシウム粉塵の爆発性を検討することも重要である。図Ⅲ.2.3-65は本プロジェクト助成事業（研究開発項目⑦）において対象としているマグネシウム切削現場で採取した粉塵の写真である。写真①のフレーク状細片粒子（AZ31、1mm~数mm）の粉塵爆発試験を行ったが、粒子の飛散性が小さく粉塵爆発に至らなかった。

た。換言すれば、この程度の大きさの粉塵発生に抑制すればマグネシウムの安全なハンドリングが行えるものと考えられる。写真②は細片状切削粉（AZ91）で粉塵の飛散性が不良で爆発下限濃度は大（約 290 g/m<sup>3</sup>）となり爆発性は小さかった。写真③も切削粉（AZX911）でこれも繊維状で飛散性は不良であった。粉塵が飛散すると細片があるため、爆発性は示したが（爆発下限濃度は約 140 g/m<sup>3</sup>）爆発の発生は困難であった。



写真①



写真②



写真③

図Ⅲ. 2.3-65 マグネシウム切削現場で採取した粉塵

#### (e) 粉塵爆発災害防止対策ガイドライン

これまで述べたマグネシウム粉塵の爆発特性、具体的な爆発災害防止対策など考慮し、作業現場で活用しやすいガイドラインを策定した。その骨子を図Ⅲ.2.3-66 に示す。

爆発性雰囲気形成を防止するために、①微細粉塵の発生防止、②高濃度粉塵濃度雲の形成防止、③発塵空間の温度上昇の防止、④着火源の形成防止といった点に努める必要がある。

破砕・粉砕・集塵工程等においてモニターすべき項目としては、①発生粉塵の粒度（約 100 μm 以上であるか）、濃度（約 90 g/m<sup>3</sup> 以上であるか）、形状（フレーク状、糸状であるか）、②粉塵の飛散状況（濃度むらの有無）、③粉塵流動速度（4m/s 以上であるか）、④工程内の酸素濃度（酸素濃度約 7 %以下であるか）、⑤工程の雰囲気温度（約 500℃以下であるか）、⑥着火性火花の発生（発生火花のエネルギーが 4mJ 以下であるか）、⑦発生粉塵の爆発強度、⑧発生粉塵の電気抵抗率等が挙げられる。

工程で粉塵爆発の危険が予知されたら、その要因除去のために作業条件を変えることが重要である。しかし、それでも十分な対応とはならないこともあるので、災害軽減対策として、①爆発抑制装置の設置、②装置不活性化（不燃性ガス封入）・不活性ガスの噴射、③着火性火花形成検知システムの導入、④爆発圧力放散設備の設置、⑤各種装置・設備の接地などの災害軽減対策を行うことが必要である。



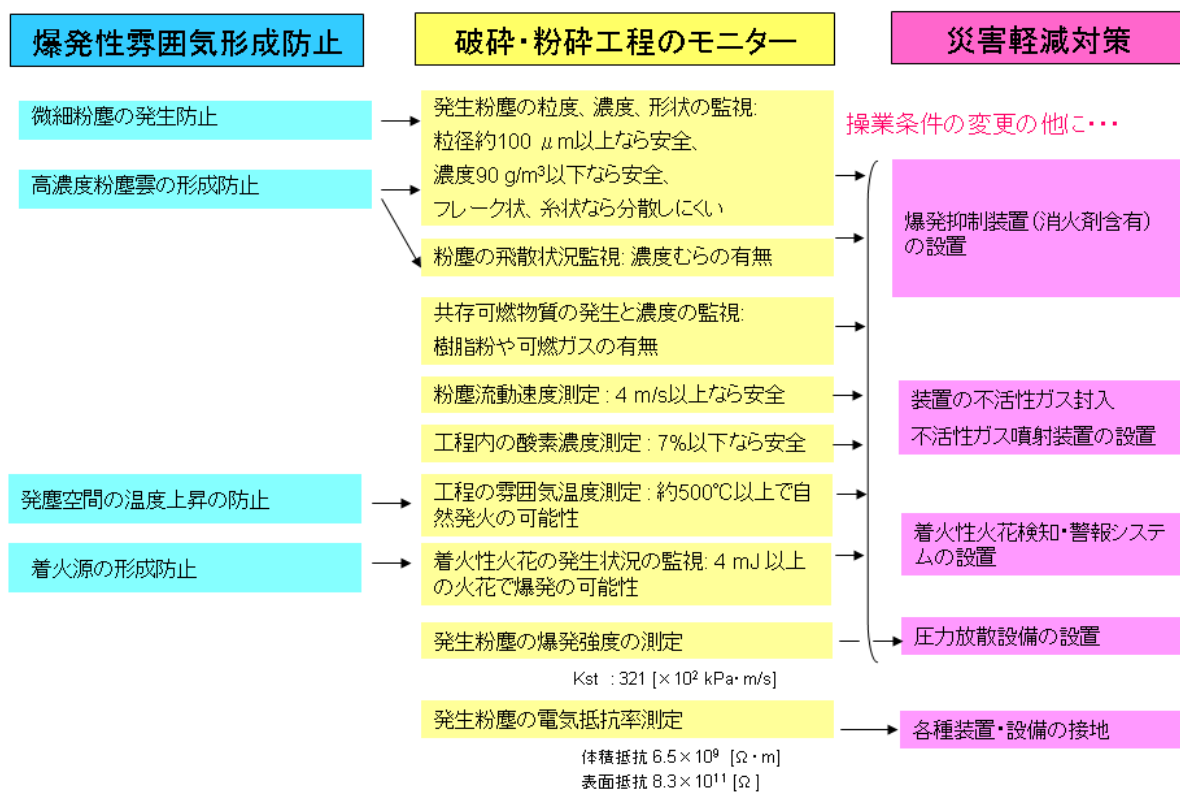


図 III. 2.3-66 爆発災害防止ガイドラインの骨子

### 3) まとめ

本研究開発項目で得られた成果を以下に列記する。

1. マグネシウム粉塵雲が発生する空間で、粉塵爆発が発生しないようにするには、粒度の小さい粉塵の発生を防ぎ（できれば粒径 125μm 程度以上）、粉塵雲の濃度は粒度の小さい粉塵（約 20μm 以下程度）の場合でも濃度を小さく（約 90 g/m<sup>3</sup> 程度以下）することが必要である。しかしながら、現実のマグネシウムリサイクル工程では、このような条件は作業上の制約となることが考えられるため、他の爆発抑制対策等を検討する必要がある。
2. リサイクル工程では、廃棄物の破碎・粉砕において、摩擦熱、衝突火花等が頻発するので、粉塵爆発の着火源となりうるものが多発する。マグネシウム粉塵雲の最低発火温度は約 520℃であり、最小着火エネルギーは約 4 mJ であるので、リサイクル工程ではマグネシウム粉塵雲爆発災害が発生する可能性が大である。
3. マグネシウム粉塵と他の物質、たとえば、プラスチック粉塵などが共存する場合、その爆発性は他物質の爆発の展開性の影響を受ける。しかし、マグネシウム粉塵に比べて爆発展開率が小さい他の可燃性粉塵が混入しても、全体の爆発性はあまり変化しない。
4. 可燃性粉塵と不燃性粉塵の混合粉塵は爆発性が幾らかでも抑制されるが、マグネシウ

ム粉塵の場合、この効果を発現するには、混合率が約 40～50% 以上にもなるように大量に混合する必要がある。このことから、マグネシウム材料が他の不燃性材料と同時に取り扱われることによる安全上の利点は生じないものといえる。

5. マグネシウム材料そのものを不燃化できれば有意義である。マグネシウムに Ca を添加した合金の爆発性は幾分減少（爆発下限濃度の上昇、爆発展開の低下）する。しかし、1 %程度の添加ではマグネシウム合金の爆発性を完全に抑制することは困難である。
6. 粉塵雲が流動することにより、粉塵雲の着火性は小さくなり、マグネシウム材料取り扱い現場で強い空気流があると爆発の発生が困難となる。粉塵流動速度が約 4 m/s 以上になると、本実験に用いた着火源供給装置のエネルギー発生限界の約 8～9 J でも爆発が発生しなかった。
7. マグネシウム切削工程で発生する粉塵が概ね 1 mm～数 mm 前後のフレーク状細片となる場合、粉塵の飛散性が小さく粉塵爆発は容易に発生しなかった。この程度の大きさの粉塵発生に抑制すれば、マグネシウムの安全なハンドリングが行えるものと考えられる。
8. 市中スクラップ処理現場では、破碎・粉碎にともなう摩擦火花や衝突火花、粉塵流動に伴う輸送管路や集じん機等における帯電と放電などが粉塵雲の着火源となる危険がある。減衰比 1000:1、入力抵抗 100 MΩ、入力容量 3 pF、周波数帯域：DC to 74 MHz 程度の仕様をもつセンサーを利用して電磁波を検出すると、着火危険性のあるエネルギーを有する火花をモニターできる。これをもとにして、着火性火花形成検知システムを構築可能であると考えられる。
9. 雰囲気酸素濃度を变化した場合、通常の雰囲気（酸素濃度 21 %弱）でのマグネシウム粉塵の爆発下限濃度は約 90 g/m<sup>3</sup>であるが、酸素濃度を低下するにつれ、爆発下限濃度が大きくなり、爆発性が小さくなった。雰囲気酸素濃度が約 7 % になると爆発が生じず、災害対策上有用な知見となった。
10. マグネシウム粉塵の爆発強度を測定した結果は、最大爆発圧力 = 10.3 [ $\times 10^2$  kPa, Gauge]、最大爆発圧力上昇速度 ( $(dP/dt)_{\max}$ ) = 1,033 [ $\times 10^2$  kPa/s]、爆発指数 = 321 [ $\times 10^2$  kPa・m/s]で、爆発クラスは St 3（激しい）であった。
11. マグネシウム粉は中程度の電気抵抗率を有しており、接地物体との接触により比較的容易に電荷が漏洩しやすいものと考えられる。マグネシウム材料を取り扱う工程ではその機材や周囲物体を接地すれば、静電気による爆発危険性は低減できる。

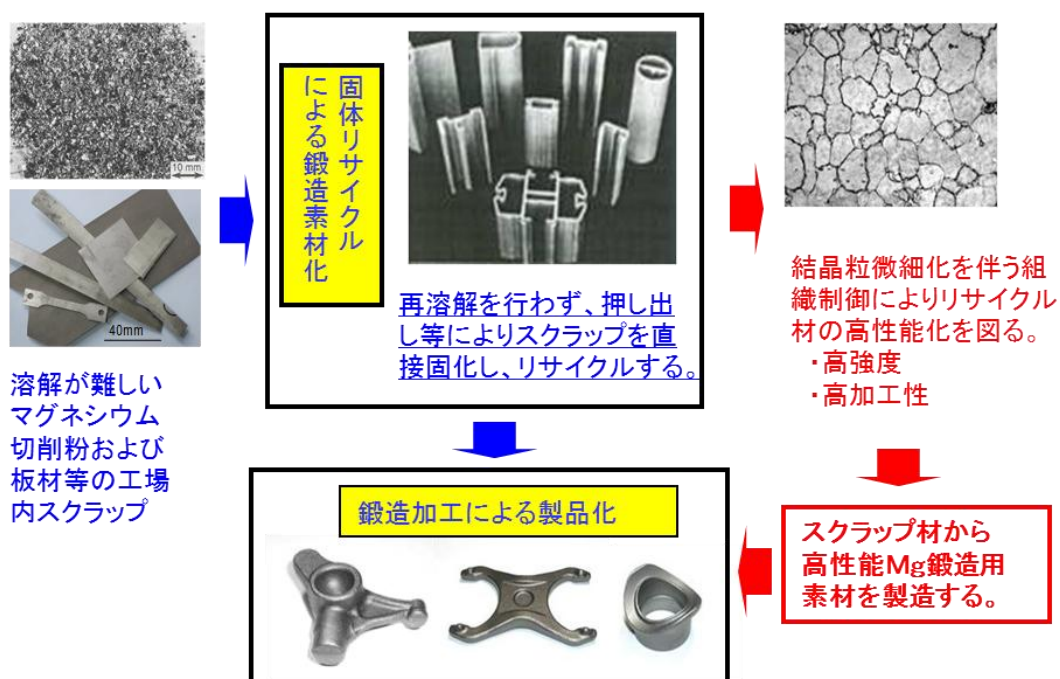
以上のように本研究では、マグネシウムの粉塵爆発の基礎特性に関する詳細データに加えて、雰囲気流動下でのマグネシウム粉塵の爆発特性等、従来にないデータを取得した。また、着火性火花の遠方監視システムや安全ガイドラインの提案を通じて、ハンドリング時の危険性を低減することにより、マグネシウムのユーザの拡大に貢献するものと考えられる。

## 2.3.2 研究開発項目③(2)「リサイクル材の特性評価」

### ③(2)-1 固体リサイクル材の鍛造素材化技術の開発

本研究は、マグネシウムスクラップ材に対する安全かつ省エネルギー型の固体リサイクル技術を開発し、従来のカスケード型リサイクル（低品位素材へのリサイクル）に代えて、新材料と同等の特性を有するリサイクル材を提供するリサイクルシステムの構築に貢献することを目的としている。

マグネシウム切削粉等は安全に溶解することが困難で、アルミニウムのリサイクルに比べて高コストになる。そこで、図Ⅲ.2.3-67に示す再溶解を行わない固体リサイクル方法が提案され、リサイクル材の高性能化が図れると共に鍛造用素材を製造することが可能となる。

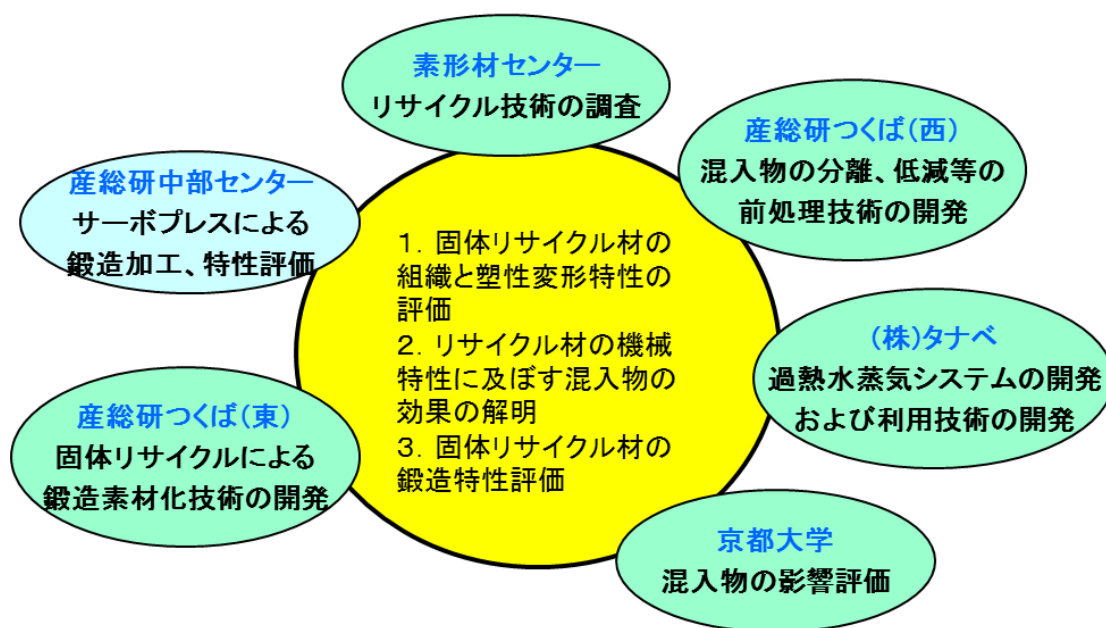


図Ⅲ.2.3-67 固体リサイクル材の概要

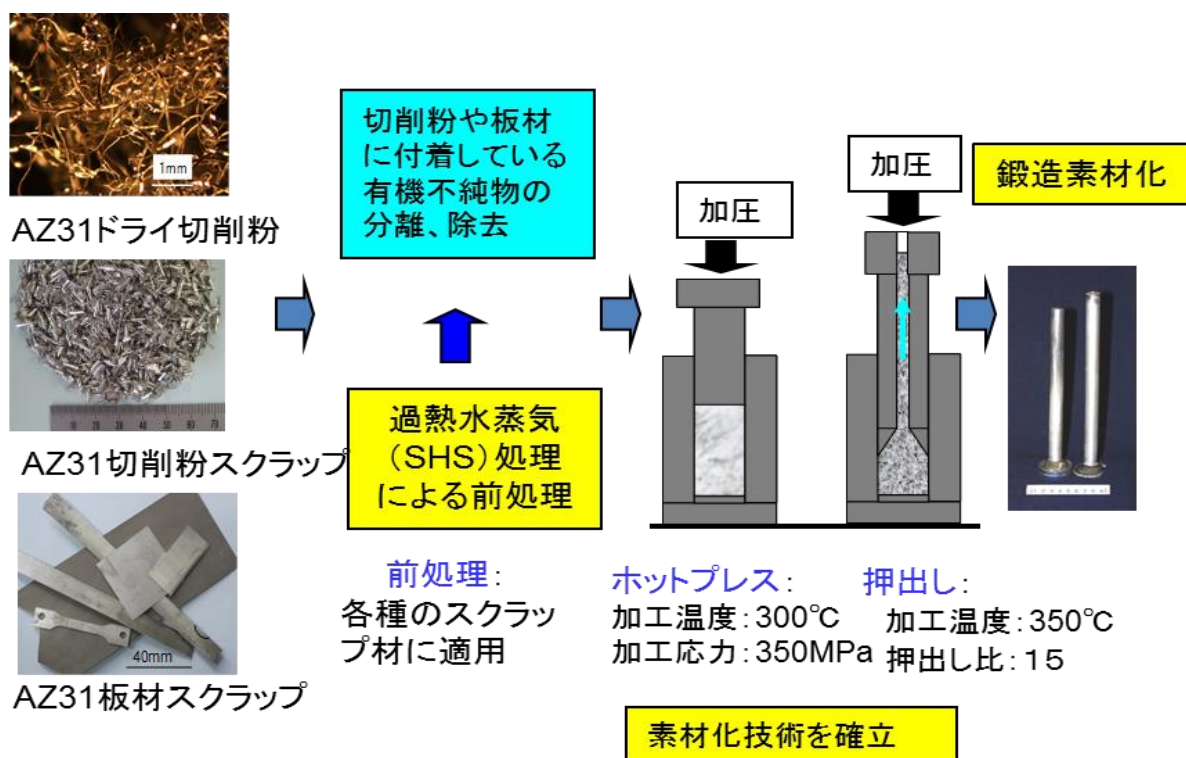
研究は、図Ⅲ.2.3-68に示す素形材センター、産総研中部センターそして産総研つくばセンター（東、西）が連携して行われた。産総研中部センターから提供されたマグネシウムスクラップ材は産総研つくばセンターにおいて固体リサイクルされ、鍛造素材に加工された。その後、組織、機械的特性とともに鍛造成形性の評価を行い、鍛造条件を把握するとともに、鍛造用素材として有効性を調べた。また、鍛造素材に及ぼす混入物の影響が京都大学で評価され、評価結果は固体リサイクルの前処理、鍛造素材化、鍛造加工等にフィードバックされ、より高性能な鍛造素材の製造に利用される。さらに、実用化技術を研究している（株）タナベが開発した前処理技術、過熱水蒸気による有機物の分解、脱脂技術、により工場内未利用スクラップ材から不純物を除去し、産総研つくばセンターにおいて固体リサイクルにより素材に加工し、鍛造性の評価を行うことで、鍛造用素材を得るための課題を抽出しデータの集積を行った。

その他に、リサイクル技術の現状および将来予測が素形材センターにおいて行われた。

## 固体リサイクルにおける連携



図Ⅲ.2.3-68 固体リサイクル技術を軸とした鍛造技術開発との連携



図Ⅲ.2.3-69 固体リサイクルプロセスの概要

研究は、はじめにドライ切削粉による鍛造素材化を行い、切削粉の固化成形、素材特性の評価、鍛造加工性評価の一連のプロセスを行い、鍛造素材を製造するための基礎的データを抽出した。次に、ドライ切削粉を用いた固体リサイクルプロセスを基盤技術とし、工場内より排出される切削粉について過熱水蒸気脱脂処理を施し、固化成形、素材特性評価を行い、鍛造素材化を行った。最終的には市中スクラップ材についても固体リサイクルを適応し鍛造素材化を行った。

## 1) AZ31 切削粉の鍛造素材化

固体リサイクルによる鍛造素材化は、図Ⅲ.2.3-69 に示すように AZ31 ドライ切削粉と切削粉スクラップについて行った。切削粉スクラップに関しては切削油が付着しているため、共同研究を行っている株式会社タナベにおいて開発した過熱水蒸気による脱脂を施した後、鍛造素材化を行った。切削粉は 300℃、350MPa でホットプレスにより、円柱状のプリフォームを作製後、350℃、押出し比 5~15 で高温押し出しにより棒材を作製した。ホットプレス、高温押し出しの雰囲気は大気中であった。得られた素材は相対密度 99%を有しており、ち密な組織を有していた。大きな押し出し比で作製した試料ほど、圧縮試験での成形は良好であった。

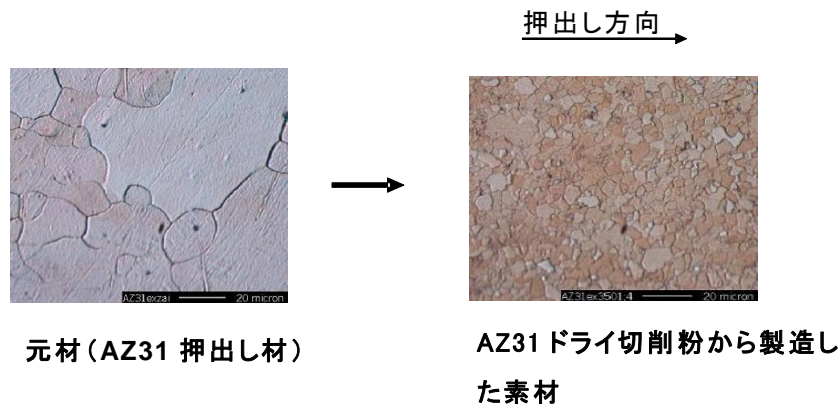
### (a) 鍛造素材の特性

鍛造素材の機械的特性は、圧縮試験により評価した。圧縮試験では、摩擦の影響を除去するためテフロンシート（厚さ 0.05mm）を試料（直径 16mm×高さ 16mm）と圧板の間に置き、応力-ひずみの関係を求めた。表Ⅲ. 2.3-11 は圧縮試験より得られた機械的特性をまとめたものである。

表Ⅲ.2.3-11 固体リサイクルした AZ31 切削粉および切削粉スクラップの圧縮特性

	試験温度 /°C	圧縮強さ $\sigma_B$ /MPa	耐力 $\sigma_{0.2}$ /MPa	破壊ひずみ $\epsilon$
AZ31押し出し棒材 $\rho : 1.78\text{g/cm}^3$	RT	272	86	0.35
AZ31ドライ切削粉 $\rho : 1.78\text{g/cm}^3$	RT	304	180	0.47
	150	135	110	>>1
	250	58	40	>>1
AZ31 切削粉スクラップ (SHS処理材)	RT	271	128	0.5

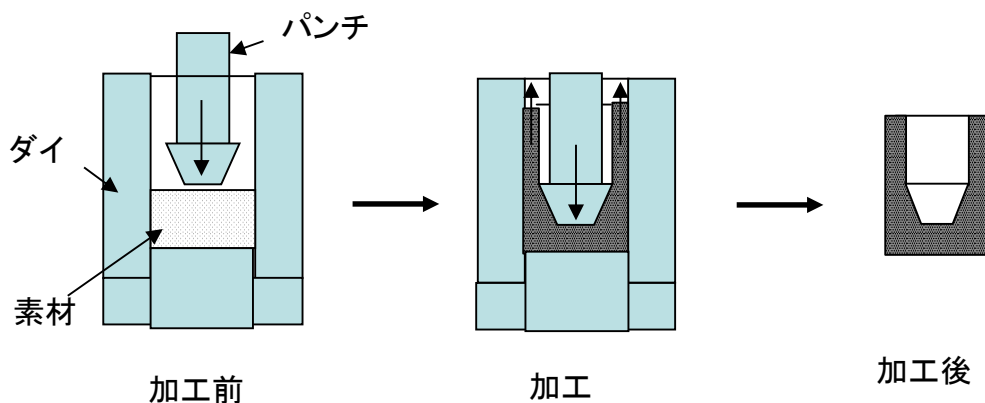
比較のために、元の素材である押し材の特性も示した。室温での圧縮強度および耐力は固体リサイクルした AZ31 ドライ切削粉で 304MPa および 180MPa であり、AZ31 押し材に比べて大きな値を示した。また、破断歪もリサイクル材において高い値を示した。また、過熱脱脂した AZ31 切削粉スクラップのリサイクル材においても強度や破断歪みは押し材に比べて高い値を示していることが分かり、固体リサイクルにより機械的特性が向上することがわかった。これは、図Ⅲ.2.3-70 に示すように微細組織の形成に起因している。また、固体リサイクルした AZ31 切削粉の素材では、圧縮温度の上昇に伴い強度は減少するが、歪は増大し 150℃以上で 1 以上となっており、これは固体リサイクル材においても 150℃以上では十分な成形性を有することを示している。



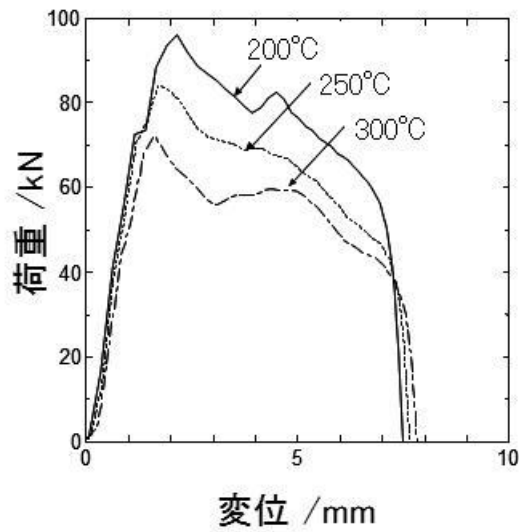
図Ⅲ.2.3-70 AZ31 押し材および固体リサイクルした AZ31 切削粉の光学顕微鏡組織

### (b) 鍛造加工

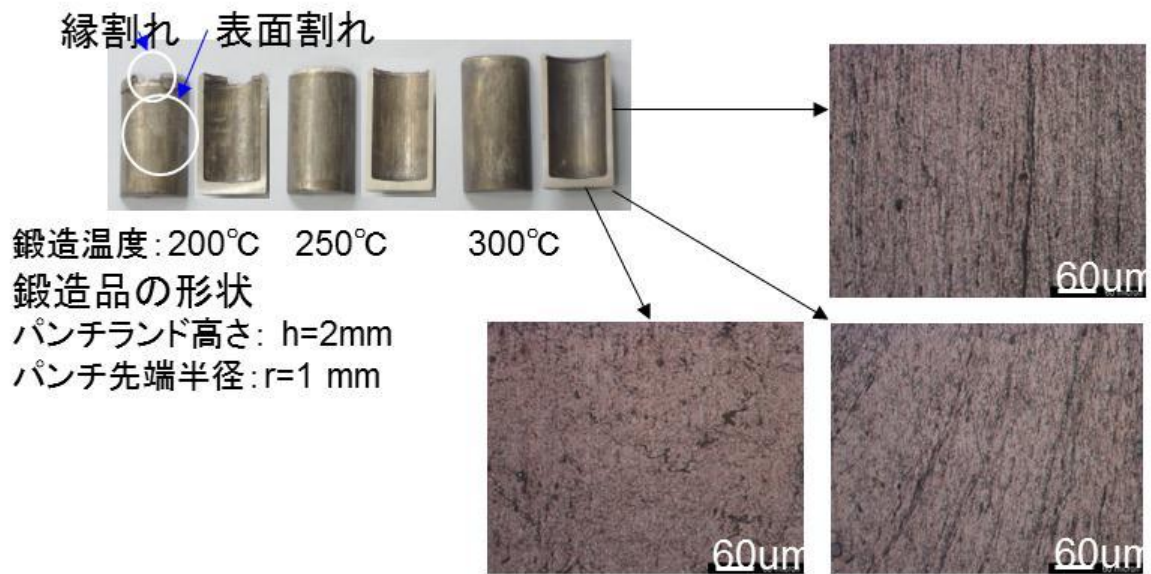
固体リサイクルにより得られた鍛造素材は、クランクプレスに後方押し鍛造金型を設置し、カップ形状に加工して鍛造性の評価を行った。クランクプレスの能力は 100tf であり、毎分のストローク数は 80 であった。鍛造金型は、内径 16mm のダイであり、パンチの外径 13.4mm であった。二硫化モリブデンペーストを試料表面とパンチ表面に塗布して行った。試料は加熱して所定の温度に達した後、パンチにより後方押しを行い、カッ



図Ⅲ.2.3-71 鍛造性試験(後方押し試験)の概略



図Ⅲ.2.3-72 固体リサイクル AZ31 切削粉の各温度での後方押し試験における荷重—変位曲線



図Ⅲ.2.3-73 各温度で後方押し試験後の外観と光学顕微鏡組織

プ形状への成形を行った。カップ形状への成形時の断面減少率は 70%であり、相当歪 2.5~3.0 程度に対応する 2)。

図Ⅲ.2.3-72 は各温度で後方押し試験を行った場合の成形荷重とパンチの変位の関係を示しており、試験温度の上昇に伴い、成形荷重の減少が見られる。図 3.2.3-73 は各温度で成形した AZ31 切削粉スクラップ固体リサイクル試料の外観と光学顕微鏡組織を示している。200°Cで成形した試料では、表面に割れが見られるが、250°C以上では、ほぼ割れない健全な成形が達成されており、切削粉を固体リサイクルした素材においても十分な

鍛造性を有していると言える。また、光学顕微鏡組織からは成形に伴う鍛流線の形成が見られ、 $10\mu\text{m}$ 以下の微細な組織が得られており、強度の向上が期待できる。図Ⅲ.2.3-74は同様にAZ31ドライ切削粉について後方押し試験を行った結果であり、 $300^\circ\text{C}$ ではほぼ健全な成形が達成されており、ドライ切削粉および過熱水蒸気脱脂した切削粉スクラップを固体リサイクルした場合に鍛造加工が可能であることを示している。



図Ⅲ.2.3-74 各固体リサイクル材の $300^\circ\text{C}$ での後方押し試験後の外観

## 2) AZ91, AZX911 切削粉の鍛造素材化

ドライ切削により得られたAZ91およびAZX911切削粉についてもAZ31切削粉と同様な方法により、 $350^\circ\text{C}$ 、押し出し比1.5で固体リサイクルにより、鍛造素材化を行った。表Ⅲ.2.3-12は固体リサイクルした試料の室温での圧縮特性をまとめたものである。AZ91ドライ切削粉の圧縮強さ、耐力および破壊歪はそれぞれ $334\text{MPa}$ 、 $208\text{MPa}$ および $0.47$

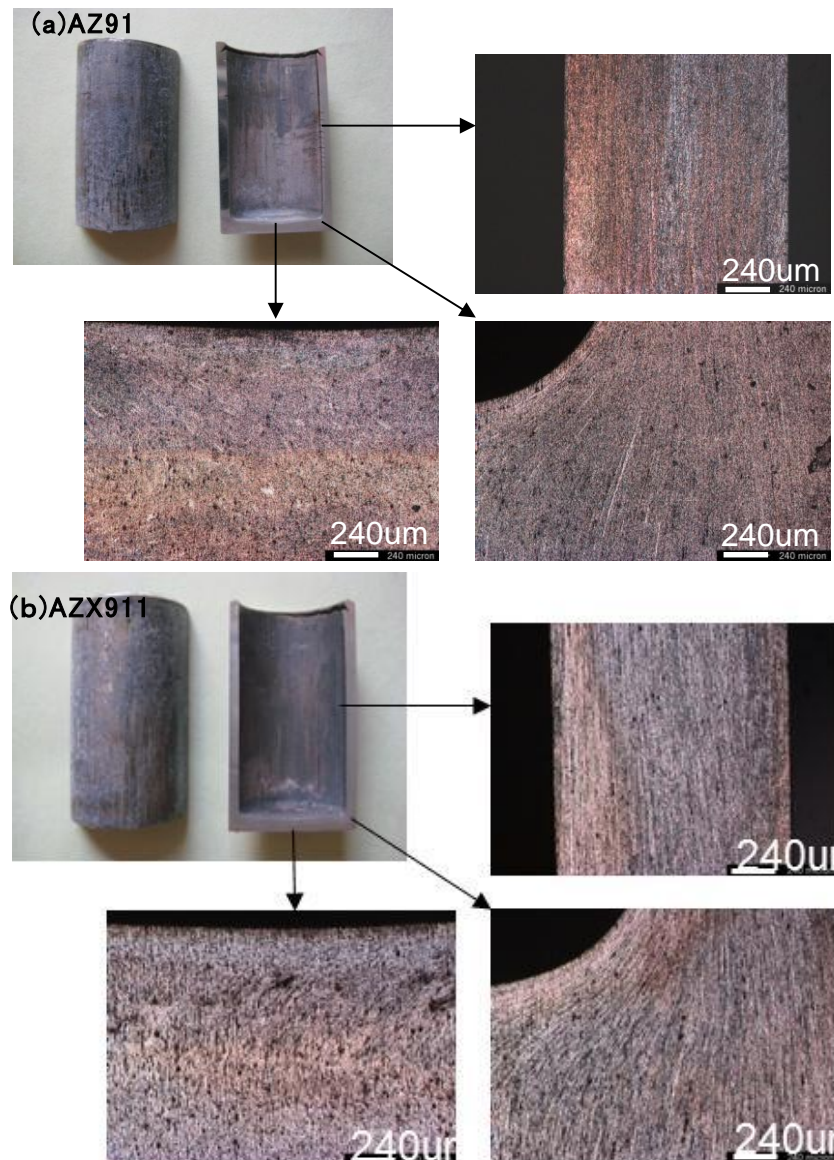
表Ⅲ.2.3-12 固体リサイクルAZ91およびAZX911材の圧縮特性

		圧縮強さ $\sigma_F/\text{MPa}$	耐力 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	破壊ひずみ $\epsilon$
AZ91 $\rho : 1.81\text{g}/\text{cm}^3$	HOMO材	301	140	0.13
	ドライ切削粉による鍛造素材	334	208	0.47
AZX911 $\rho : 1.82\text{g}/\text{cm}^3$	HOMO材	308	150	0.15
	ドライ切削粉による鍛造素材	327	210	0.38



であり、均一化处理した HOMO 材に比べて高い強度と延性を有している。AZX911 においても同様にリサイクル材では HOMO 材に比べて高い値が得られており、AZ91 および AZX911 合金においても固体リサイクルにより機械的特性が向上することが分かった。

図Ⅲ.2.3-75 は固体リサイクルした AZ91 および AZX911 切削粉の後方押し試験により鍛造性を評価した試料の外観を示している。いずれのリサイクル材においても 320℃ではほぼ健全な成形が達成されているのが見られ、鍛造加工用素材として十分な成形性を有していると言える。



鍛造温度: 320℃  
パンチランド高さ:  $h=2\text{mm}$   
パンチ先端半径:  $r=1\text{mm}$

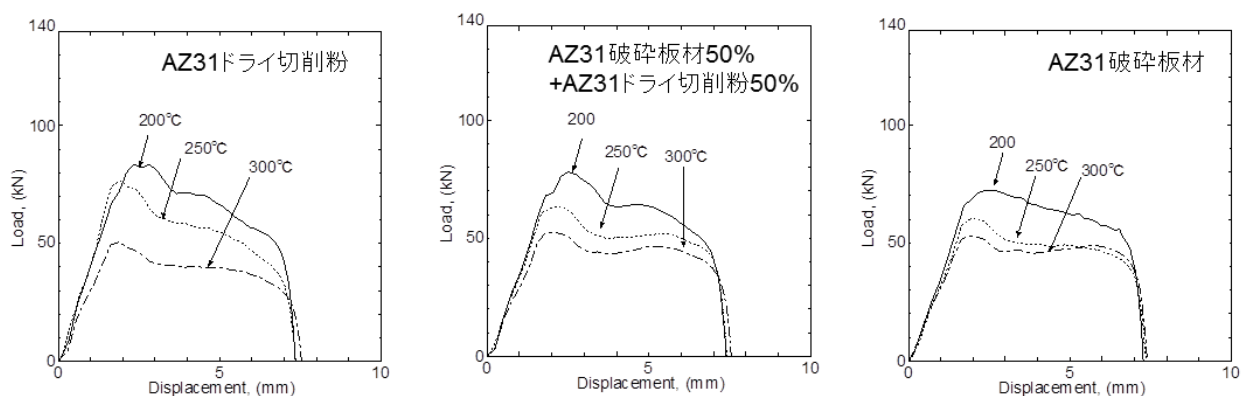
図Ⅲ.2.3-75 後方押し試験した AZ91 および AZX911 固体リサイクル材の外観と光学顕微鏡組織

### 3) ドライ切削粉と板材の混合材の鍛造素材化

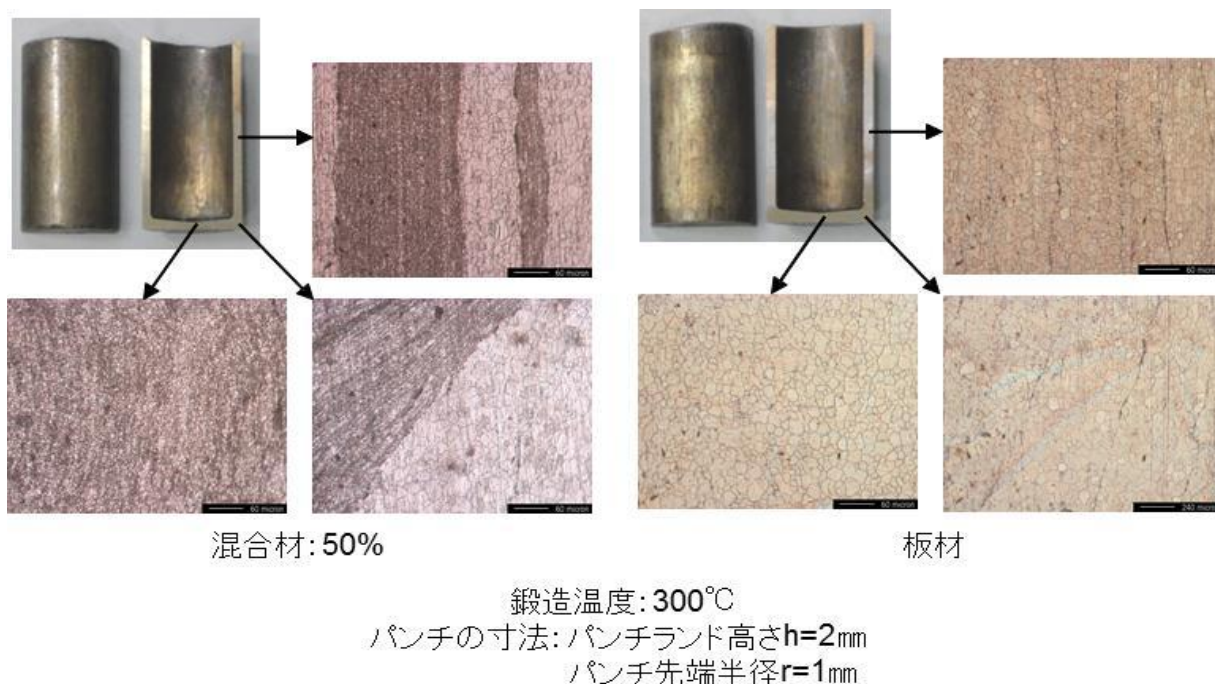
AZ31 合金においては、板としての用途が一般であり、それに伴い破砕した板材が廃材として発生する。そこで、破砕板材について固体リサイクルを行うことで鍛造素材化を試みた。まず、破砕板材に切削粉を均一に混合した後、高温プレスおよび 350°Cでの押し出しを行って、鍛造素材を作製した。表Ⅲ.2.3-13 は破砕板材に 0~50%切削粉を混合して固体リサイクルした試料の室温での圧縮特性を示している。破砕板材のみのリサイクルの圧縮強さおよび降伏強度はそれぞれ 202MPa および 71MPa であり、破壊ひずみは 0.7 であった。切削粉の混合割合が増加するに伴い強度は増大するが、破壊ひずみは減少することが分かる。また、図Ⅲ. 2.3-76 は固体リサイクルしたドライ切削粉、切削粉と破砕板材の混合材及び破砕板材の各温度で圧縮試験した場合の荷重—変位曲線である。いずれの試料においても圧縮温度の増加に伴い、変形に要する荷重は減少しているが、切削粉の割合が増加するに伴い、荷重は増加している。これは、混合する切削粉が多いほど、強度は増大するが、鍛造成形に要する荷重が増大するところを示唆している。

表Ⅲ.2.3-13 AZ31 破砕板材と切削粉の混合材を固体リサイクルした試料の圧縮特性

破砕板材の割合 /%	圧縮強さ $\sigma_B$ /MPa	降伏強さ $\sigma_{0.2}$ /MPa	破壊ひずみ $\epsilon$
100	202	71	0.7
90	229	92	0.49
70	240	110	0.5
50	282	146	0.45



図Ⅲ. 2.3-76 AZ31 破砕板材と切削粉の混合材を固体リサイクルした試料の各温度での圧縮時の荷重—変位曲線



図Ⅲ. 2.3-77 切削粉と破碎板材の混合材および破碎板材を固体リサイクルした試料の 300°Cでの後方押し試験後の外観と光学顕微鏡組織

図Ⅲ. 2.3-77 は破碎板材と破碎板材に切削粉を 50%混合して固体リサイクルした試料の 300°Cで後方押し試験後の外観と光学顕微鏡組織を示している。いずれの試料においても 300°Cでは割れの発生は見られず、健全な成形が達成されており、十分な鍛造性を有していると言える。破碎板材では平均粒径  $40\mu\text{m}$  のやや大きな結晶粒から構成されている。一方で、50%切削粉を混合した試料では  $10\mu\text{m}$ 以下の微細な組織と  $40\mu\text{m}$ の粗大粒の混相組織となっており、それぞれ切削粉と破碎板材の部分に対応する。このような混相組織であるにも関わらず十分な鍛造成形性を有している。

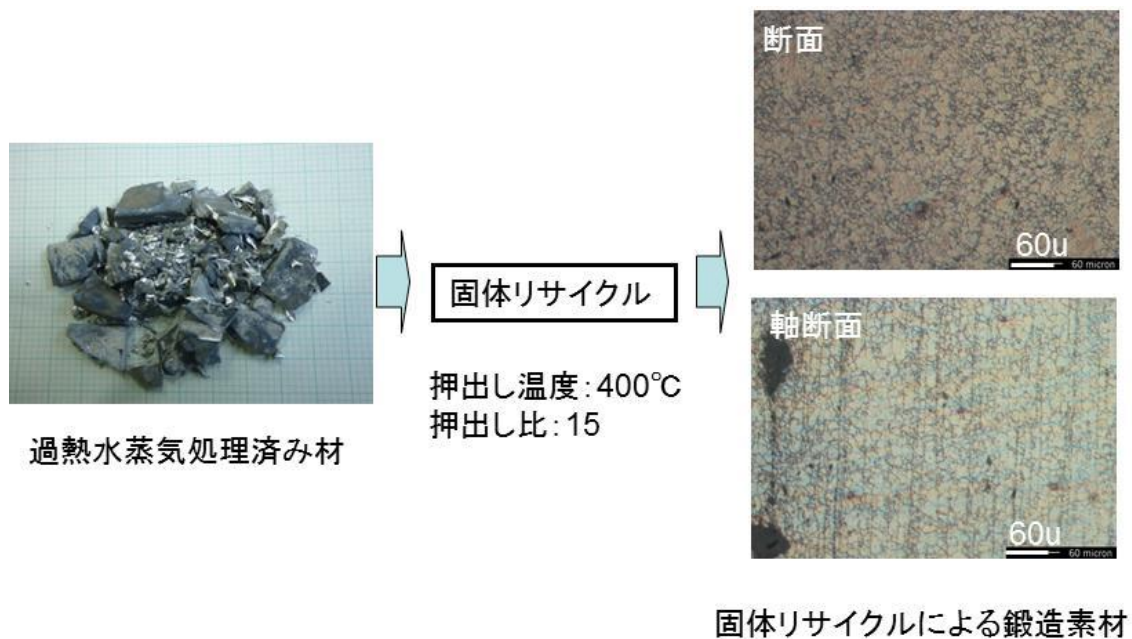
以上のことから、AZ31 の破碎板材においても固体リサイクルにより鍛造素材として使用できることが期待される。

#### 4) AZ91D 塗装材の鍛造素材化

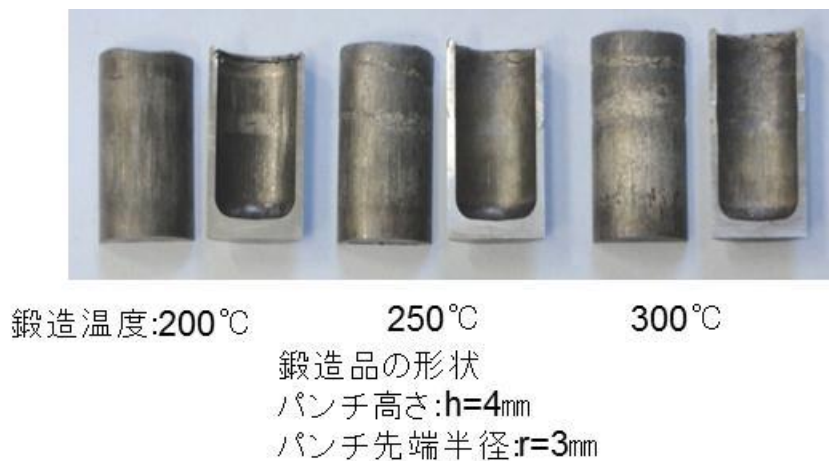
マグネシウム合金が使用される場合には一般に耐食性等の改善のために塗装して用いられる。そのため、マグネシウム合金市中スクラップ材に対してはリサイクルする場合に塗装を除去することが必要となる。そこで、廃材となった AZ91 合金塗装材について過熱水蒸気処理 (SHS) により塗装を除去後、固体リサイクルにより鍛造素材化を行った。

図Ⅲ. 2.3-78 は固体リサイクル前の過熱水蒸気処理した AZ91 破材の外観と固体リサイクルした試料の光学顕微鏡組織である。過熱水蒸気処理により塗装が除去されており、また、固体リサイクル材では  $20\mu\text{m}$ の結晶粒からなり、均一な組織を示していた。

図Ⅲ. 2.3-79 は固体リサイクル材を各温度で後方押し試験した試料の外観であり、200°C以上ではほぼ健全な成形が達成されている。また、リサイクル材では、パンチ形状を適切に選ぶことで、低い温度での鍛造成形が可能となった。



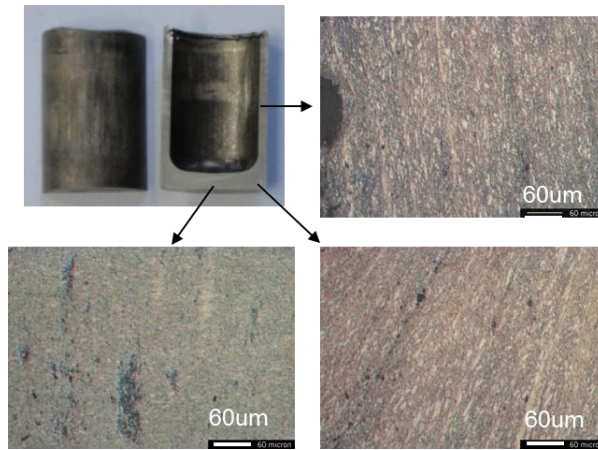
図Ⅲ.2.3-78 過熱水蒸気処理した AZ91 塗装材の固体リサイクルした試料の光学顕微鏡組織



図Ⅲ.2.3-79 固体リサイクルした AZ91 塗装材の各温度での後方押し試験後の外観

図Ⅲ. 2.3-80 は 200°Cで後方押し試験した試料の光学顕微鏡組織であり、鍛流線の形成と  $10\mu\text{m}$  以下の微細な組織から構成されているのが見られる。結晶粒は固体リサイクル素材より微細な組織を示しており、低温での鍛造成形により微細化が生じたものと考えられ、機械的特性の向上が期待できる。

以上のことから、市中スクラップである AZ91 塗装材に対しても過熱水蒸気処理により塗装の除去後、固体リサイクルを行うことで鍛造素材化が可能と言える。



図Ⅲ.2.3-80 200℃で後方押し出し試験した固体リサイクル AZ91 塗装材の光学顕微鏡組織

## 5) まとめ

1. AZ31 押し出し棒材から製造したドライ切削粉と過熱水蒸気処理を行った AZ31 切削スクラップ材について固体リサイクルにより鍛造素材を作製後、圧縮試験特性、後方押し出しによる鍛造加工試験、鍛造品の形状や組織等の結果から最適な鍛造素材を得る固体リサイクルプロセスを明らかにした。
2. 同様に、AZ91HOMO 材および AZX911HOMO 材から製造したドライ切削粉による鍛造素材について鍛造加工まで行い、圧縮試験特性、鍛造品の形状や組織等の結果から最適な鍛造素材を得る固体リサイクルプロセスおよび条件を明らかにした。
3. 形態の異なる AZ31 のドライ切削粉および板材を混合した鍛造素材について鍛造加工まで行い、圧縮試験特性、鍛造品の形状や組織等の結果から最適な鍛造素材を得る固体リサイクルプロセスの条件を明らかにした。
4. 市中スクラップ材である AZ91 塗装材について、過熱水蒸気処理により塗装を除去後、固体リサイクルを行うことで、鍛造用素材としてのリサイクルが可能であることを明らかにした。

本研究により、スクラップから鍛造性に優れたリサイクル材をえるための基盤技術が開発された。このような画期的なリサイクル技術は、鉄鋼材料やアルミニウム合金でも開発されていない。LCA によりマグネシウム合金による二酸化炭素の削減にはリサイクルが不可欠であることが示されており、リサイクルと高性能化を同時達成する本技術は、マグネシウム合金による二酸化炭素の削減に大きく貢献する技術であり、今後の進展が大いに期待できる。

### ③(2)-2 固体リサイクル材の諸特性に及ぼす混入物の影響評価

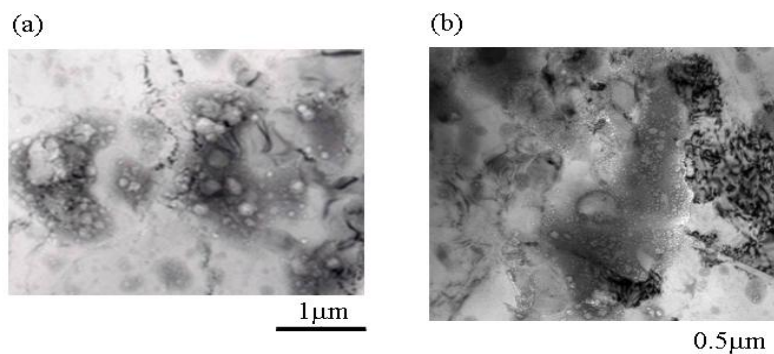
固体リサイクルは、従来のリサイクルとは異なり、スクラップを再溶解することなくそのまま直接熱間強加工に供することによりリサイクルする方法である。本法の特徴として、①再溶解を省くことができたため省エネプロセスであること、②リサイクルと同時に組織制御を行うことができるためリサイクル材の高性能化が達成できることが挙げられる。したがって、固体リサイクルにより、スクラップから成形性に優れた鍛造用マグネシウムビレットを低コストで製造することが可能である。

しかし、本法はスクラップ表面に付着している不純物がリサイクル時に内部に混入してしまうという欠点を有している。特にマグネシウム合金の場合、スクラップ表面には強固で厚い酸化膜があり、この酸化膜が不純物としてリサイクル内部に混入し、材料特性に悪影響を及ぼすことが懸念される。したがって、鍛造用ビレットへの適応に必要な変形能を確保するためには、混入酸化物の影響を評価することはきわめて重要である。本研究では、表面酸化膜量が多い切削粉から再生した固体リサイクル材の機械的性質と微視組織(混入物サイズ等)を調べ、混入酸化物の影響を調べた(①混入酸化物影響評価)。次に、混入酸化物の均一分散化と集合組織の制御を同時に達成できるねじり押し出しを固体リサイクルに適応し、材料特性の向上を図った(②ねじり押し出しの適応)。また、実用化の上で重要な腐食特性と疲労特性について調べた(③各種特性調査)。

#### 1) 混入酸化物影響評価

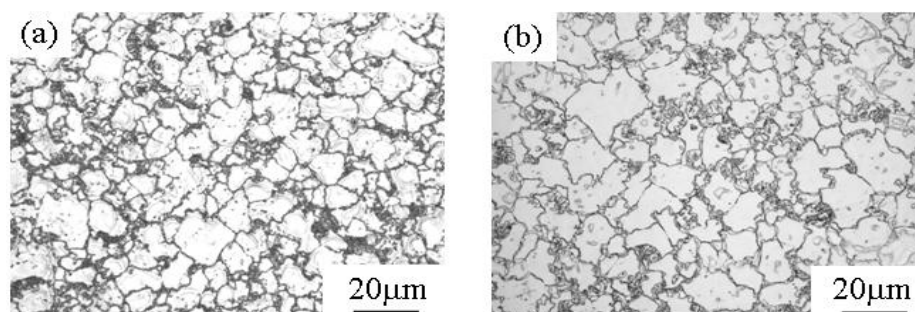
AZ91 合金切削粉(切削油付着なし、長さ約 3mm、幅約 1mm、厚さ約 0.1mm)を、押し出し温度 673K、押し出し比 45:1 の条件で大気中で熱間押し出しを行い、固体リサイクル材を作製した。また、AZ91 合金インゴットを同じ条件で熱間押し出しし比較材とした。引張り試験により得られたサンプルの機械的性質を調べた。また、TEM 等により微視組織観察を行なった。

図Ⅲ.2.3-81 に固体リサイクル材の透過型電子顕微鏡写真を示す。直径  $0.3\sim 2\mu\text{m}$  の粒子が観察された。このような粒子は、インゴットから作製された比較材には見られなかった。元素分析の結果、これらの粒子は混入酸化物であることがわかった。混入酸化物は粒内にも一部見られたが、その多くは粒界に見られた。



図Ⅲ. 2.3-81 固体リサイクル材の透過型電子顕微鏡写真、(a)粒内に見られた混入酸化物、(b)粒界に見られた混入酸化物

図Ⅲ.2.3-82 は固体リサイクル材と比較材の光学顕微鏡観察写真である。固体リサイクル材の結晶粒径は  $14.1\mu\text{m}$ 、比較材の結晶粒径は  $13.5\mu\text{m}$  であった。熱間押し出し中に動的再結晶が生じ、結晶粒が微細化したと考えられる。本研究の結果、固体リサイクル材と比較材の結晶粒径はほぼ同じであった。このことから、固体リサイクル材の混入した酸化粒子は、押し出し中の再結晶挙動および粒成長挙動にあまり影響を及ぼさないことがわかる。



図Ⅲ. 2.3-82 固体リサイクル材と比較材の光学顕微鏡観察写真、(a) 固体リサイクル材、(b)比較材

表Ⅲ.2.3-14 に固体リサイクル材と比較材の室温引張試験の結果を示す。固体リサイクル材は引張強度  $348\text{MPa}$ 、 $0.2\%$ 耐力  $255\text{MPa}$ 、破断伸び  $12\%$ とスクラップから再生されたにも関わらず、高い強度と大きな伸びを示した。これらの値は、インゴットを熱間押し出しし作製した比較材とほぼ同じ値である。一般に、リサイクル材では混入物が原因で延性が低下する。しかし、固体リサイクル材では、混入物による延性低下が見られなかった。このことから、固体リサイクル法は高性能な再生材を創製できるリサイクルプロセスであると言える。

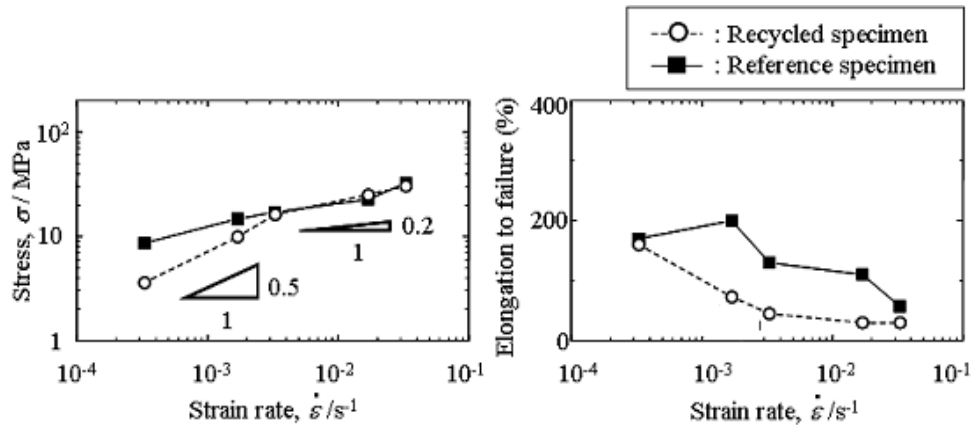
表Ⅲ.2.3-14 固体リサイクル材と比較材の室温引張試験の結果

Alloy	Ultimate tensile strength (MPa)	0.2% Proof stress (MPa)	Elongation to failure (%)	Grain size ( $\mu\text{m}$ )
Recycled specimen	348	255	12.0	14.1
Reference specimen	344	259	11.6	13.5

(拡散が関与しない)室温におけるボイド核生成のメカニズムとして、応力起因 (stress criterion) とエネルギー起因 (energy criterion) がある<sup>(1)</sup>。本実験結果を詳細に検討した結果、混入酸化物のボイド核生成の機構は応力起因に関係していることがわかった<sup>(2)</sup>。この結果は、混入物の無害化を考える場合応力起因メカニズムが有効であることを示唆している。

図Ⅲ.2.3-83 は高温 ( $753\text{K}$ ) における固体リサイクル材と比較材の最大応力(左図)、破断伸び(右図)とひずみ速度の関係である。固体リサイクル材の伸びは比較材より低い、ひずみ速度が遅くなるとともに伸びが増加し、 $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  では  $200\%$  近い大きな伸びを示

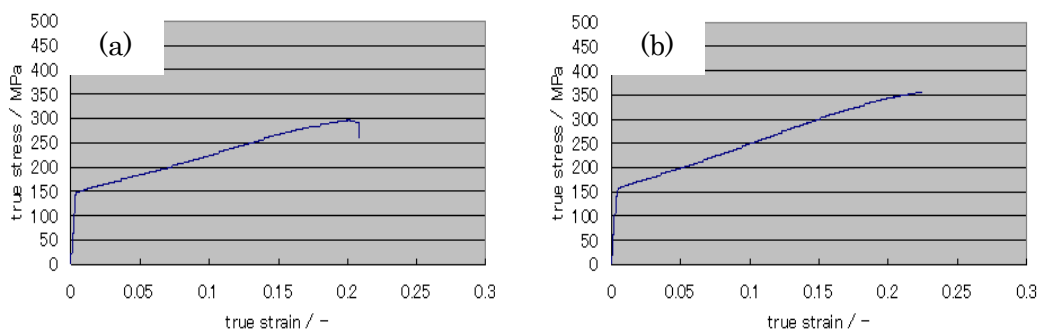
した。比較材の  $3.3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  のひずみ速度感受性指数は約 0.3 であり、比較材の変形は転位グループが支配的であった。一方、固体リサイクル材のひずみ速度感受性指数は約 0.5 と高かった。このことから、固体リサイクル材の変形は粒界すべり（超塑性）が支配的であり<sup>(3)</sup>、そのため 200%近い大きな伸びが得られたと考えられる。



図Ⅲ. 2.3-83 753K における固体リサイクル材と比較材の最大応力(左図)、破断伸び(右図)とひずみ速度の関係

切削粉を固体リサイクルする場合、切削粉に付着した切削油についても検討する必要がある。切削油処理の有効なプロセスとして、過熱水蒸気処理が本プロジェクトで行われている。そこで、産業技術総合研究所から提供を受けた 2 種類の AZ31M g 合金固体リサイクル材、一つは過熱水蒸気処理を施した M g 切削粉から再生された固体リサイクル材（以下、“前処理材”）、もう一つは過熱水蒸気処理されていない M g 切削粉から再生された固体リサイクル材（以下、“非前処理材”）の機械的性質を圧縮試験により調べた。なお、ここで使用された切削粉は実際に操業されている工場から排出されたものであり、切削油の付着が著しいものであった。

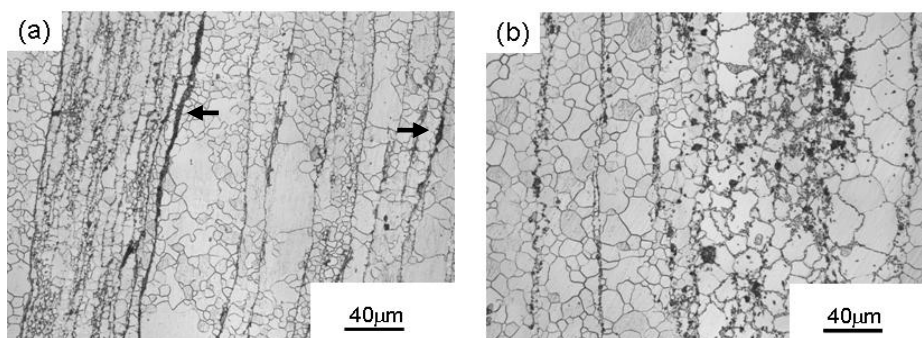
図Ⅲ.2.3-84 に室温圧縮試験による真応力—真ひずみ曲線を示す。前処理材の最大強度および 0.2%耐力、破断ひずみはそれぞれ 357MPa、153MPa、22.4%であった。一方、非前処理材の最大強度および 0.2%耐力、破断ひずみはそれぞれ 295MPa、144MPa、20.9%であった。このように、前処理材は非前処理材に比べ強度、破断ひずみともに高い値を示し、過熱水蒸気処理は切削油除去の対策として有効であることが実証された。



図Ⅲ. 2.3-84 室温圧縮試験による AZ31 合金固体リサイクル材の真応力—真ひずみ曲線、(a)非前処理材、(b)前処理材



図Ⅲ.2.3-85 は前処理材および非前処理材の試験前の光学顕微鏡観察写真である。非前処理材の黒い筋を詳細に観察すると、矢印で示したように、切削粉が十分に接合されておらずクラックが形成されているように見える箇所が観察された。一方、前処理材においても黒い筋は観察されたが、非前処理材に見られた切削粉の不十分な接合に起因するクラックの生成はほとんど観察されなかった。以上のことから、過熱水蒸気処理によって切削油が除去され、十分な接合が達成できることがわかる。



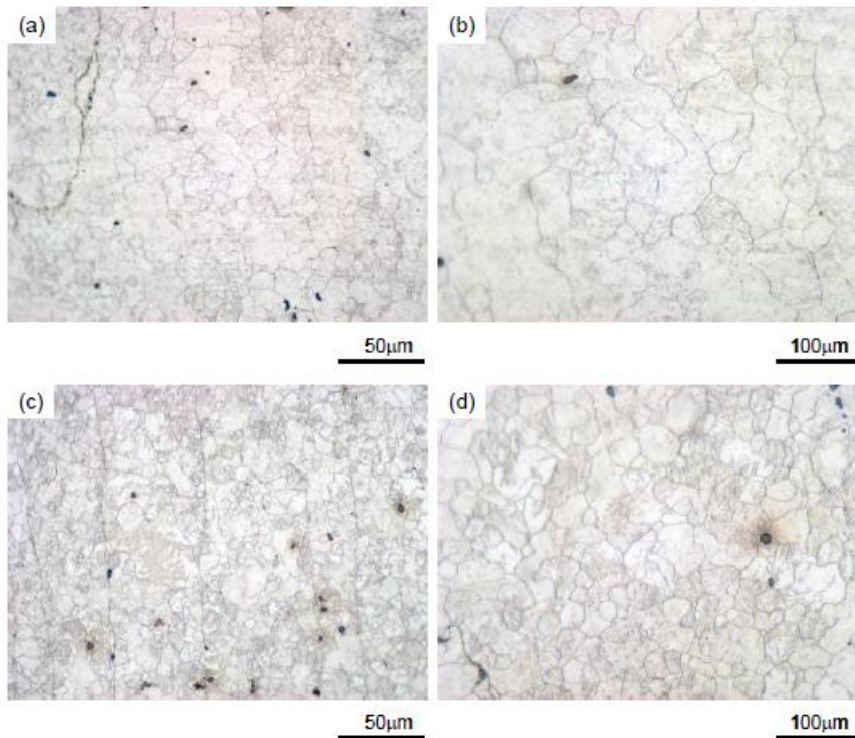
図Ⅲ. 2.3－85 (a)非前処理材および(b)前処理材の光学顕微鏡写真

## 2) ねじり押し出しの適応

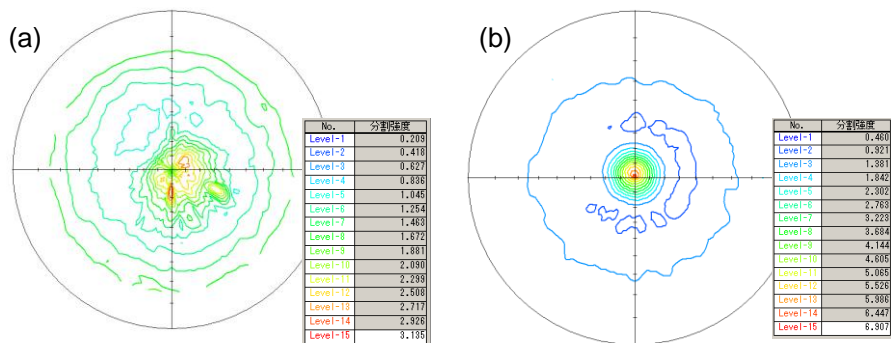
AZ31 合金切削粉を使って、ねじり押し出しにより固体リサイクルを行った。ねじり押し出しとは試料を回転させながら押し出す方法であり、試料には強いせん断ひずみが付加されるため、底面集合組織の弱化が期待される。ねじり押し出しの条件は、押し出し温度 673K、押し出し比 45、押し出し速度（押し出し棒の速度）0.5mm/min、回転速度 6 回転/min とした。また、比較のため、通常押し出しによる固体リサイクルも行った。通常押し出しの条件は、押し出し温度 673K、押し出し比 45、押し出し速度 0.5mm/min で、ねじり押し出しと同じ条件である。

図Ⅲ.2.3-86 に固体リサイクル材の光学顕微鏡写真を示す。ここで、(a)(b)はねじり押し出しリサイクル材の押し出し方向に平行な面と垂直な面、(c)(d)は通常押し出しリサイクル材の押し出し方向に平行な面と垂直な面である。通常押し出しリサイクル材では、押し出し方向に平行に黒い線が観察された。この黒い線は、混入酸化物によるものである。一方、ねじり押し出しリサイクル材では、黒い線は観察されるものの、その線は大きく湾曲しており、また数も少なかった。このことから、ねじり押し出しによって、酸化膜に複雑な応力が加わり、混入酸化物が微細に分断されたことが示唆される。

図Ⅲ.2.3-87 に柱面集合組織測定の結果を示す。通常押し出しリサイクル材では、柱面が押し出し方向と垂直に強く配向していた（ピーク強度=6.9）。一方、ねじり押し出しリサイクル材では、柱面は押し出し方向の垂直方向とは少しずれて配向しており、ピーク強度は 3.1 と通常押し出しリサイクル材に比べ小さかった。以上のことから、通常押し出しリサイクル材では底面が押し出し方向に平行に強く配向するが、ねじり押し出しリサイクル材では配向方向が少しずれ、また集合組織も弱まることがわかる。



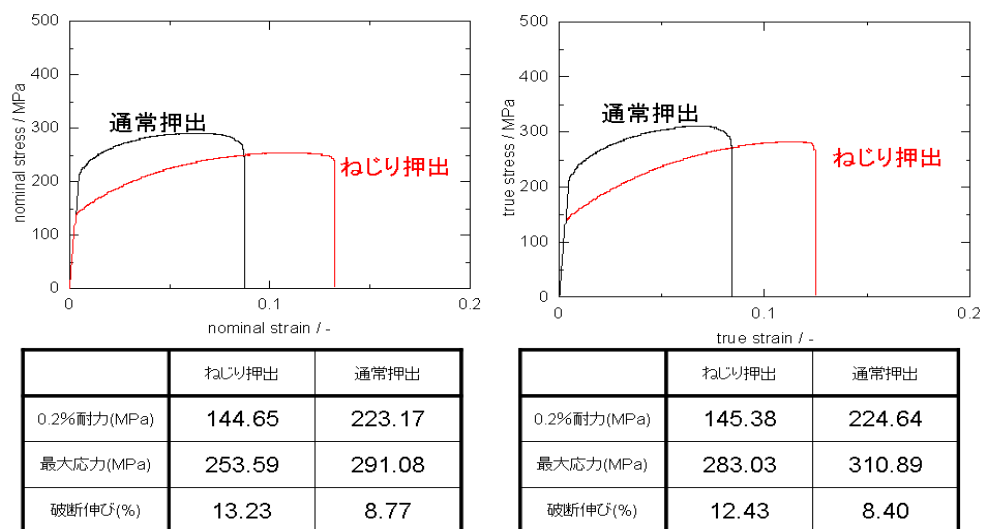
図Ⅲ. 2.3-86 固体リサイクル材の光学顕微鏡写真 (a) (b)はねじり押し出しリサイクル材、(c) (d)は通常押し出しリサイクル材



図Ⅲ. 2.3-87 柱面集合組織測定結果、(a)ねじり押し出しリサイクル材、(b)通常押し出しリサイクル材

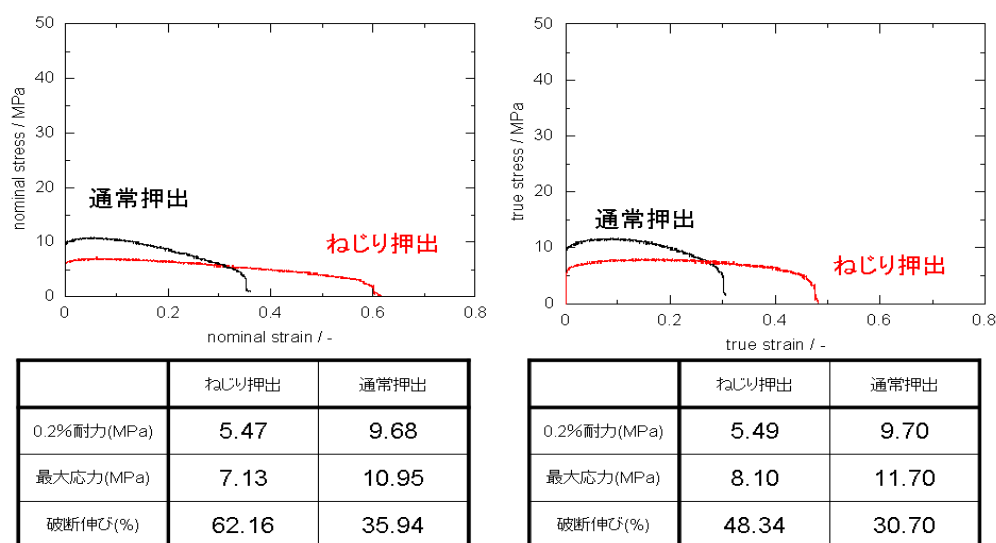
室温における引張り試験結果を図Ⅲ.2.3-88 に示す。左図は公称応力—公称ひずみ曲線、右図は真応力—真ひずみ曲線である。なお、真応力、真ひずみは試験片が均一伸びをしたと仮定して求めた値である。図Ⅲ.2.3-88 からわかるように、室温においてねじり押し出しリサイクル材は通常押し出しリサイクル材に比べ伸びは 50%向上した一方で、0.2%耐力、引張り強度（最大応力）ともに低下した。ねじり押し出しリサイクル材では底面が押し出し方向、すなわち引張り方向に対し少しずれており、また集合組織形成の度合いが通常押し出しリサイクル材より弱い。そのため、ねじり押し出しリサイクル材は通常押し出

しりサイクル材より、伸びが大きく一方で強度が低かったと考えられる。



図Ⅲ. 2.3-88 室温引張り試験結果

673Kにおける引張り試験結果を図Ⅲ.2.3-89に示す。試験温度673Kではねじり押し出しりサイクル材は62%の大きな伸びを示し、室温と同様通常押し出しりサイクル材より大きな伸びを示した。試験後の組織観察の結果、両者の結晶粒径に大きな違いは認められなかった。試験前には結晶粒径に違いが見られたものの、673Kという高温では粒成長がdominantとなり、結果として結晶粒径に大きな違いがなかったと考えられる。673Kでは結晶粒径に差がないため、粒界すべりの寄与は両者で同じである。したがって、室温試験の時にみられた集合組織の影響が現れ、ねじり押し出しりサイクル材のほうが通常押し出しりサイクル材より大きな伸びを示したと考えられる。

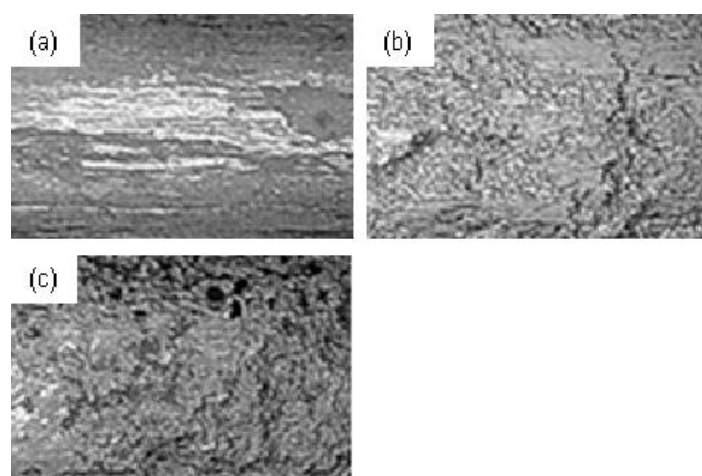


図Ⅲ. 2.3-89 673K引張り試験結果

### 3) 各種特性調査

固体リサイクル材を実用化する上で、各種特性を調べることは重要である。特に固体リサイクル材では多量の酸化物が内部に混入するため、腐食特性および疲労特性の劣化が懸念される。そこで、固体リサイクル材の腐食特性と疲労特性について調査し、特性が劣化しないための指針について検討した。

腐食特性調査に関しては、以下の実験を行った。マグネシウムスクラップとして、AZ31 合金切削粉を用い、熱間押し出しにより固体リサイクル材を作製した。熱間押し出しの条件は、押し出し温度 673K、押し出し比 45 である。比較材として、二種類の AZ31 マグネシウム合金バージン材（インゴットバージン材と押し出しバージン材）を準備した。ここで、押し出しバージン材はインゴットバージン材を固体リサイクル材と同じ押し出し条件で熱間押し出し作製したものである。また、リサイクルの回数の影響を調べるため、最大 5 回まで固体リサイクルを行った。腐食性を調べるため、塩水浸漬試験と塩水噴霧試験を行った。塩水浸漬試験では、5%NaCl 溶液に三日間浸漬し、浸漬試験前後の重量変化から腐食速度を算出した。塩水噴霧試験では、5%NaCl 溶液噴霧 2 時間（35℃、湿度 98%、pH7.2）、乾燥 4 時間（60℃、湿度 25%）、湿潤 2 時間（50℃、湿度 99%）を 1 サイクルとし、9 サイクル（合計 72 時間）を行い試験前後の重量変化から腐食速度を算出した。



図Ⅲ.2.3-90 浸漬腐食試験（三日間）後の試験片の表面、(a)固体リサイクル、(b)インゴットバージン材、(c)押し出しバージン材

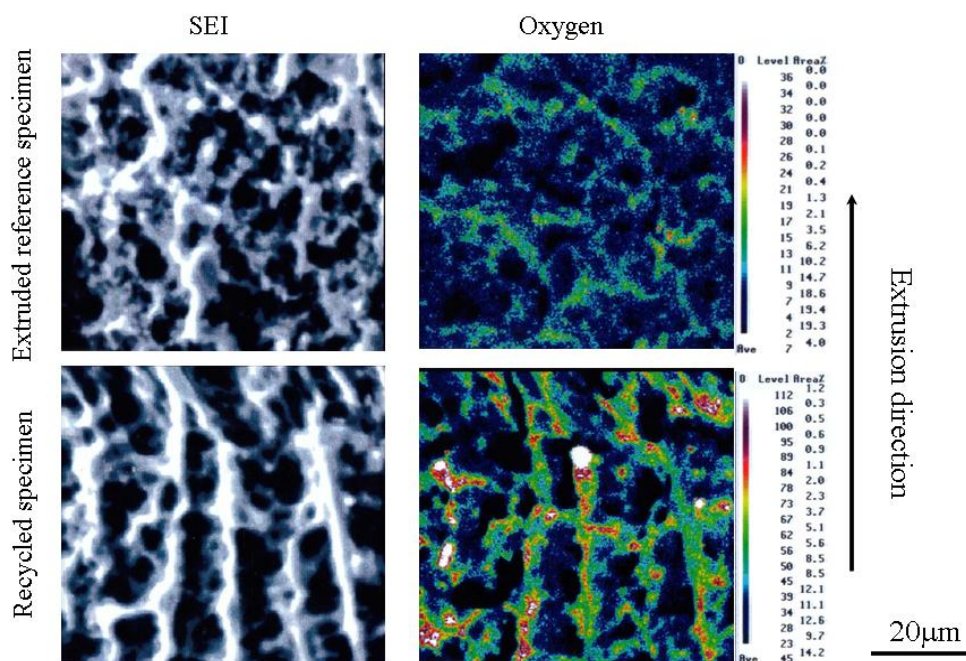
図Ⅲ.2.3-90 は浸漬腐食試験（三日間）後の試験片の表面を観察したものである、ここで(a)は固体リサイクル材および(b)はインゴットバージン材、(c)は押し出しバージン材である。図Ⅲ.2.3-90 から、固体リサイクル材の損傷が最も小さいことがわかる。浸漬試験前後の重量測定から、固体リサイクル材、インゴットバージン材、押し出しバージン材の腐食速度は、それぞれ 4.1mm/year および 8.4mm/year、7.1mm/year であった。この結果からも、固体リサイクル材はバージン材より優れた腐食性を示すことがわかる。再溶解リサイクルの場合リサイクル時に不純物が混入するため、リサイクル材はバージン材に比

べ腐食性が劣化するのが普通である。しかし、固体リサイクル材は、リサイクル時に酸化物が不純物として混入していたにもかかわらず、バージン材より優れた腐食性を示したことは特筆される。

固体リサイクル材と押し出しバージン材の元素定量分析結果を表Ⅲ.2.3-15 に示す。表Ⅲ.2.3-15 には、参考のため AZ31 の JIS 規格成分も記載してある。Fe, Ni, Cu, Co は微量の混入であっても、マグネシウムの腐食性を大きく劣化させることが知られている。表Ⅲ.2.3-15 からわかるように、固体リサイクル材は押し出しバージン材より Fe 量が多い。このことから、リサイクル時に Fe が混入した可能性がある。しかし、固体リサイクル材の Fe 量は JIS 規格以下であり、混入量は極微量であり腐食性に悪影響を及ぼすほどではない。再溶解リサイクルの場合には溶解時に Fe が大量に混入するが、固体リサイクルでは再溶解を必要としないことから Fe の混入は極微量に限られる。このことは、固体リサイクルの利点の一つにして挙げられる。

表Ⅲ.2.3-15 固体リサイクル材と押し出しバージン材の元素定量分析結果

Unit: mass%								
Alloy	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	O
AZ31 (JIS H 4204)	2.4-3.6	0.5-1.5	0.15 ≤	≤ 0.10	≤ 0.05	≤ 0.005	≤ 0.005	—
Recycled specimen	2.89	0.88	0.37	0.0045	0.0017	0.0001	0.0026	878 (ppm)
Extruded reference specimen	2.89	0.87	0.39	0.0075	0.0026	0.0004	0.0009	7.1 (ppm)



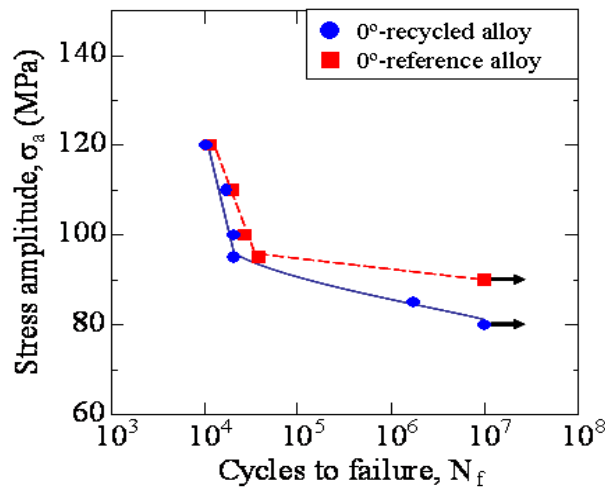
図Ⅲ. 2.3-91 EPMA による浸漬腐食試験後の固体リサイクル材および押し出しバージン材の試験片表面の SEI および酸素マッピング分析結果

図Ⅲ.2.3-91はEPMAによる浸漬腐食試験後の固体リサイクル材および押し出しバージン材の試験片表面のSEIおよび酸素マッピングの分析結果である。SEI像で白く見える部分は腐食の進行が抑制されたところである。押し出しバージン材では、白い部分と酸素濃度が高い部分とが必ずしも一致していない。このことから、押し出しバージン材の表面に存在する酸化層は、腐食性向上に特に有効に作用しないことがわかる。マグネシウムの表面に存在する酸化層は、ポーラス構造であることが知られている。このため押し出しバージン材の表面に存在する酸化層は腐食性向上に有効に作用しなかったと考えられる。一方、固体リサイクル材の場合、SEI像の白い部分、すなわち腐食の進行が抑制された部分と酸素濃度が高い部分とがよく一致している。固体リサイクル材の場合、リサイクル時に酸化物が大量に混入する。この混入酸化物が、固体リサイクル材の優れた腐食性をもたらしたと考えられる。固体リサイクルでは、熱間押し出しの過程で表面に存在していた酸化膜がマグネシウム内部に混入する。この際、大きな圧縮荷重が酸化膜に負荷され、ポーラス構造が緻密化することが考えられる。このため、固体リサイクル材の混入酸化物は、腐食性向上に有効に作用すると考えられる。なお、これまでの研究からマグネシウム合金の腐食性は、析出状態や結晶粒径に依存することが報告されている<sup>(4)</sup>。しかし、本研究の場合、固体リサイクル材と押し出しバージン材は同じ熱間押し出し条件で作製されており、析出状態はほぼ同じであった。また、固体リサイクル材と押し出しバージン材の結晶粒径は異なったもののその差はわずかであった。

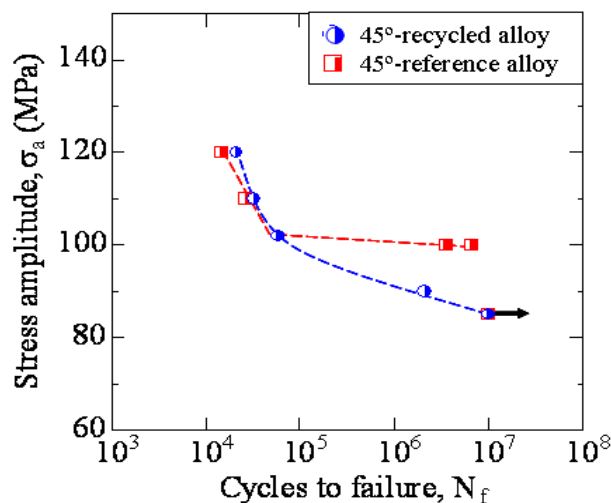
次に、固体リサイクル材の腐食性に及ぼすリサイクルの回数の影響について調べた。浸漬腐食試験の結果、リサイクル1回の固体リサイクル材の腐食速度は4.1mm/year、リサイクル3回の腐食速度は9.8 mm/year、リサイクル5回の腐食速度は12.7 mm/yearとなり、リサイクル回数が増えると耐食性は悪くなった。押し出しバージン材の腐食速度が7.1mm/yearであったことから、リサイクル回数が1回の場合は固体リサイクルにより腐食性は向上するが、少なくとも3回以上リサイクルすると耐食性は悪くなることがわかる。また、塩水噴霧試験の結果、リサイクル1回の固体リサイクル材の腐食速度は0.31mm/year、リサイクル2回の腐食速度は0.29 mm/year、リサイクル3回の腐食速度は0.49mm/yearとなり、浸漬試験と同様、リサイクル回数が増えると耐食性は悪くなった。以上のことから、酸化物が多すぎると逆に耐食性が劣化してしまうことがわかる。したがって、混入酸化物がマグネシウム合金の耐食性を向上させるものの、混入酸化物が大量に混入すると耐食性が低下することから、混入物が大量にならないように注意する必要があると言える。

次に、疲労特性について調べた。マグネシウムスクラップとして、AZ31合金切削粉を用いた。熱間押し出しにより切削粉を50mm×5mmの形状に固化した。熱間押し出しの条件は、押し出し温度673K、押し出し比6とした。さらに、アニーリング(702K、2時間)を行った後、温度673K、圧下率80%の条件で圧延を行い薄板を作製した。圧延では、673Kに加熱後すばやく18%の圧下率で圧延する作業を8回繰り返し、最終的に板厚1mmになるまで圧延した。なお、圧延方向は押し出し方向と垂直とした。比較のため、インゴットから同様の条件で薄板を作製した。以下、リサイクル合金を固体リサイクル材

(recycled alloy)、インゴットから作製した合金を比較材 (reference alloy) と呼ぶ。得られた固体リサイクル材と比較材について、島津製作所 (株) 製サーボパルサーにより、それぞれの疲労特性を室温で調べた。疲労試験では、負荷方向が圧延方向に対し  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  になる角度で実施し、疲労特性の異方性について調べた。さらに、強加工による混入酸化物の均一分散化を目的に、固体リサイクル材にさらにもう一度圧延 (2 回圧延) を行った。2 回目の圧延条件は、1 回目と同じである (温度  $673\text{K}$ 、圧下率  $80\%$ )。ただし、1 回目の場合ロール温度は室温であったが、2 回目はロールを  $573\text{K}$  に加熱した。ここで、2 回圧延したリサイクル材を、2 回圧延固体リサイクル材 (double-rolled recycled alloy) と呼ぶ。固体リサイクル材および 2 回圧延固体リサイクル材に対して、負荷方向が圧延方向に対し  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  になる角度で疲労試験を行い、強加工による異方性低減の効果を検証した。



図Ⅲ. 2.3-92 負荷方向が圧延方向に対し $0^\circ$ での固体リサイクル材と比較材の疲労試験結果 (S-N曲線)

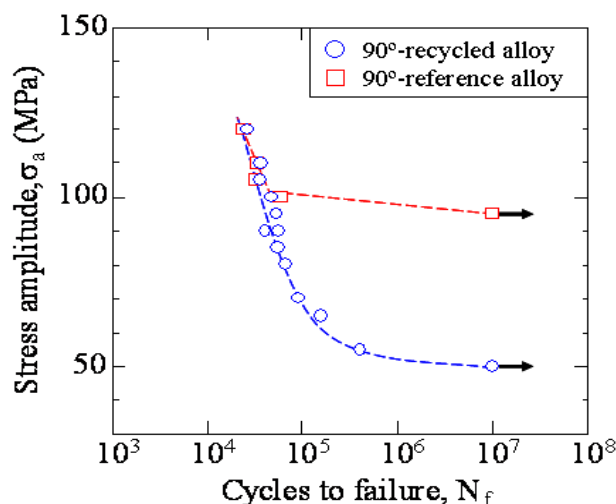


図Ⅲ. 2.3-93 負荷方向が圧延方向に対し $45^\circ$ での固体リサイクル材と比較材の疲労試験結果 (S-N曲線)

図Ⅲ.2.3-92に負荷方向が圧延方向に対し0°での固体リサイクル材と比較材の疲労試験結果（S-N曲線）を示す。一般に軟質材料は明瞭な疲労限を示さないことが知られている。マグネシウム合金の場合も明確な疲労限は見られなかった。そこで、軟質材料の疲労限としてよく用いられる $10^7$ 回を疲労限とした。比較材の疲労限は120MPaであったのに対し、固体リサイクル材の疲労限は95MPaと低下した。このように、固体リサイクル材の疲労特性は比較材に比べ悪かった。

図Ⅲ.2.3-93に負荷方向が圧延方向に対し45°での固体リサイクル材と比較材の疲労試験結果（S-N曲線）を示す。高応力域では固体リサイクル材と比較材では疲労特性に差はなかったものの、低応力域では固体リサイクルの疲労特性は比較材に比べ大きく低下した。

図Ⅲ.2.3-94に負荷方向が圧延方向に対し90°での固体リサイクル材と比較材の疲労試験結果（S-N曲線）を示す。45°における結果と同様、高応力域では固体リサイクル材と比較材では疲労特性に差はなかったものの、低応力域では固体リサイクルの疲労特性は比較材に比べ大きく低下した。



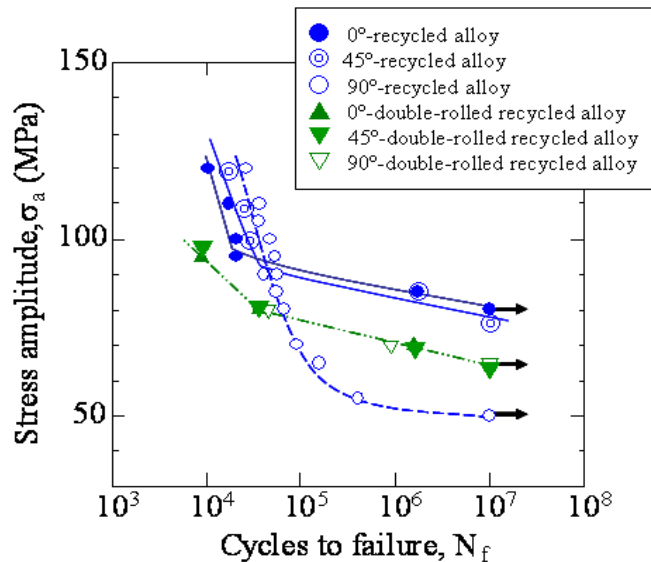
図Ⅲ. 2.3-94 負荷方向が圧延方向に対し90°での固体リサイクル材と比較材の疲労試験結果（S-N曲線）

図Ⅲ.2.3-92～図Ⅲ.2.3-94の結果から、比較材では疲労特性の異方性は小さく、0°方向と90°方向で疲労特性に大きな違いはなかった。一方、固体リサイクル材では、疲労特性の異方性は大きく、90°方向の疲労限は0°方向の疲労限の半分程度まで大きく低下した。予備実験として行った引張試験の結果では、固体リサイクル材の0°方向と90°の引張り強度は、それぞれ295MPaおよび335MPaであった。また、比較材の0°方向と90°の引張り強度は、それぞれ301MPaおよび351MPaであった。このように引張り強度にも異方性はあったものの、固体リサイクル材の疲労限の異方性は、引張り強度のそれより著しく大きいものであった。

図Ⅲ.2.3-95に負荷方向が圧延方向に対し0°および45°、90°での固体リサイクル材と2

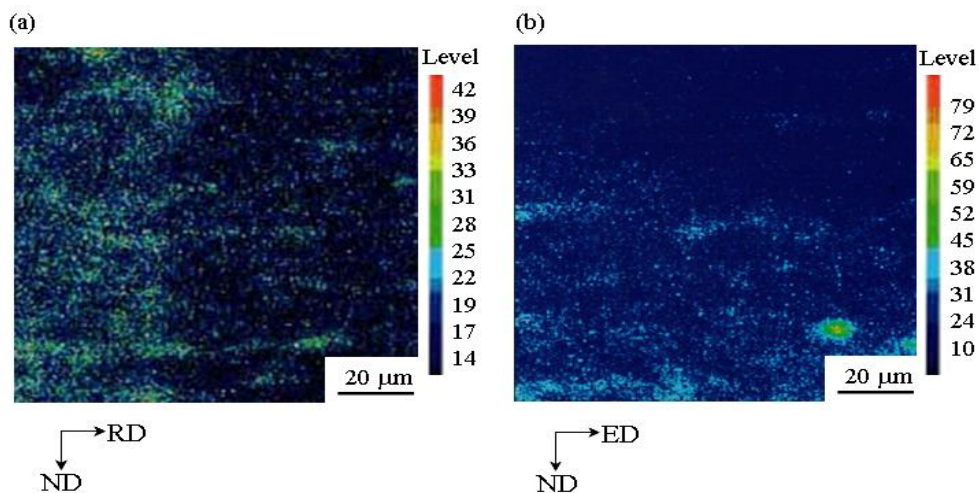


回圧延固体リサイクル材の疲労試験結果（S-N曲線）を示す。固体リサイクル材は大きな異方性を示したが、2回圧延固体リサイクル材では0°および45°、90°いずれの方向の疲労特性もほぼ同じであり、異方性はほとんど見られなかった。このことから、強加工（2回圧延）により疲労特性の異方性が改善されることがわかる。



図Ⅲ. 2.3-95 負荷方向が圧延方向に対し0° および45°、90°での固体リサイクル材と2回圧延固体リサイクル材の疲労試験結果（S-N曲線）

図Ⅲ.2.3-96に2回圧延固体リサイクル材のRD-ND面とTD-ND面における酸素分析結果を示す。ここで、RD-ND面は90°方向に負荷した場合の破面に平行な面であり、TD-ND面は0°方向に負荷した場合の破面に平行な面である。1回圧延を行った固体リサイクル材に比べ、2回圧延固体リサイクル材のほうが酸化物が均一に分散していた。このような酸化物の均一分散により、疲労特性の異方性が改善されたと考えられる。



図Ⅲ. 2.3-96 2回圧延固体リサイクル材の(a)RD-ND面と(b)TD-ND面における酸素分析結果

以上のことから、固体リサイクル材では酸化物が混入し疲労特性が劣化する。特に、低応力域で酸化物による悪化の影響が顕著になる。また、酸化物が不均一に分散しており、疲労特性に異方性が発現する。しかし、強加工を施し酸化物を均一に分散させることにより、疲労特性の異方性を低減できることがわかった。

#### 4) まとめ

固体リサイクルの諸特性に及ぼす混入物の影響を調べることを目的に、(1) 混入酸化物影響評価、(2) ねじり押し出しの適応、(3) 各種特性調査を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 切削粉から再生された固体リサイクル材の微視組織を調べた結果、混入酸化物のサイズは  $0.3\sim 2\mu\text{m}$  であった。また、リサイクル材の結晶粒径は  $14.1\mu\text{m}$  と微細であった。
- 2) 室温引張試験の結果、固体リサイクル材は比較材とほぼ同じ高い強度と伸びを示した。一般にリサイクルにより不純物が混入し延性が低下するが、固体リサイクル材では延性低下は見られなかった。一方、高温になると固体リサイクル材の伸びは比較材より低くなった。しかし、ひずみ速度が遅くなるとともに伸びが回復し、 $3.3\times 10^{-4}\text{ s}^{-1}$  では200%近い大きな伸びを示した。これは超塑性的な変形が生じたためであった。以上のことから、超塑性的変形を利用すれば、固体リサイクル材でも十分な鍛造性が得られることがわかった。
- 3) 過熱水蒸気処理を行った固体リサイクル材は、室温において非前処理材に比べ高い強度、破断ひずみを示した。過熱水蒸気処理は固体リサイクル材の機械的性質の向上に有効であることが実証できた。
- 4) ねじり押し出しにより、混入酸化物が均一に分散するとともに、底面集合組織が弱くなった。その結果、室温、高温ともに伸びが向上した。
- 5) 腐食試験の結果、固体リサイクル材はインゴットバージン材、押し出しバージン材のいずれより優れた腐食性を示した。リサイクル材がバージン材より優れた腐食性を示したことは特筆される。
- 6) 固体リサイクル材では、腐食の進行が抑制された部分と酸素濃度が高い部分とがよく一致した。このことから、混入酸化物が固体リサイクル材の優れた腐食性をもたらしたと考えられる。
- 7) 固体リサイクル材の疲労特性は比較材に比べ悪かった。特に、低応力域でその傾向は顕著になった。また、比較材の疲労特性には異方性はほとんどなかったが、固体リサイクルでは負荷方向と圧延方向の角度が大きくなるほど異方性が強くなり、 $90^\circ$ 方向の疲労限は $0^\circ$ 方向の疲労限の半分程度まで大きく低下した。
- 8) 一方、強加工(2回圧延)を施し酸化物を均一に分散させることにより、疲労特性の異方性を大幅に低減させることができた。

固体リサイクル材に優れた特性を持たすためには、過熱水蒸気処理などによりできるだけ不純物の混入を避けることが有効である。しかし、真空下での加工熱処理など特別なプロセスを用いない限り、酸化物の混入は避けることができない。したがって、混入酸化物の無害化が固体リサイクルの実用化の重要なポイントである。本研究結果から、リサイクル中に混入した酸化物は高温延性および疲労特性に特に悪影響を及ぼすことがわかった。しかし、混入酸化物による材料特性劣化も、ねじり押し出しや二回圧延等により酸化物を均一微細に分散させれば、かなりの程度まで回復させることができた。本研究で得られたこれらの成果は、市中スクラップの固体リサイクルのみならず、通常の再溶解リサイクルの指針にもなるものであり、マグネシウム合金リサイクルの進展に貢献する重要な知見であると考えられる。

### 2.3.3 実用化の可能性

研究開発項目③において検討したマグネシウムリサイクル技術について、今後の実用化の可能性ならびに成果の活用法について以下にまとめる。

#### 1) 過熱水蒸気を用いた有機不純物除去技術

工場内で発生するマグネシウム切削粉スクラップの脱脂技術として確立した。本プロジェクト助成事業において実用化技術開発を実施した結果、十分な量の切削粉が集まれば実用プロセスとして成立することが証明された。現状はマグネシウム切削粉の発生量が少ないため、鉄、銅、アルミ等の切削粉の脱脂処理等に活用されている。塗装付着物の除去についても今後さらにデータを蓄積して技術の確立を図る。

#### 2) 市中スクラップの成分分離・無機不純物除去技術

レーザー3次元計測によるスクラップの識別・分離技術について、企業との共同研究を継続して技術の確立を図る。今後、マグネシウムの市中スクラップを対象に本技術が実用化されるかどうかはマグネシウム部材の普及によるところが大きい。当面は廃車処理等で発生するアルミの展伸材と鋳造材のスクラップを選別する技術として実用化を目指しており、その可能性は十分にあると考えられる。

#### 3) 安全性評価技術

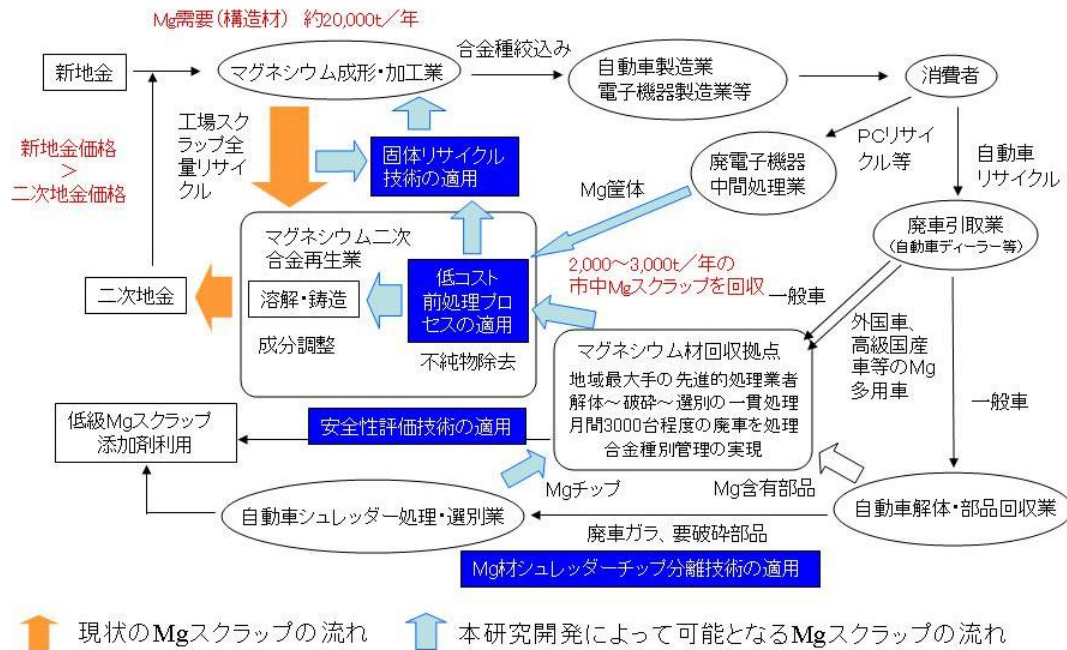
本研究開発において最終的に策定した「爆発災害防止対策ガイドライン」について、セミナー、展示会、出版物等を通じて広報に努め、マグネシウムハンドリング時の危険性を回避可能であることを社会的に周知させる。こうした活動はマグネシウム鍛造部材の導入を側面から支援するものであり、今後の普及を加速するものと考えられる。

#### 4) 固体リサイクル技術

固体リサイクルプロセスにより工場内で発生する切削粉のみならず、市中スクラップ材に対してもリサイクル化が可能であり、またリサイクル材は十分な機械的特性と鍛造性を有していることから鍛造用素材としての応用が期待できる。それにより、素材コストの低減につながり、鍛造部材の低コスト化に寄与するものと考えられる。また、切削粉のリサイクル化は廃棄物の削減にも貢献でき、コストの低減をもたらすマグネシウム鍛造部材の普及をさらに促すと考えられる。

本研究で開発したマグネシウムリサイクル技術について、社会における位置付けと実用化のイメージを明確化するために、2020年頃を想定してマグネシウム構造材のリサイクルルートを検討した。その結果を図III.2.3-97に示す。この時期には、構造材としてのマグネシウム需要は年間2万t程度に拡大するものと予想され、工場内で発生するスクラップの全量をリサイクルし、市中からは少なくとも年間2~3千t程度のスクラップを回収してリサイクルすることが期待される。今後マグネシウム部材の普及に伴ってスク

ラップの回収量も増加し、本研究で開発した技術がリサイクルルートの要所で活用されることとなる。その結果、現状よりも二次合金市場が拡大することにより素材コストが低減され、マグネシウム部材の普及を一層促進するものと期待される。



図Ⅲ. 2.3-97 将来期待されるマグネシウム構造材のリサイクルルート（2020年頃を想定）

## 2.3.4 達成度

個別項目	中間目標	中間目標達成のための自主目標	到達度	最終目標	到達度	達成度
③(1)-2 リサイクル前処理技術（分離・精製）	切削粉等の工場内スクラップの含有炭素を0.1%以下にするリサイクルシステムを構築し、マグネシウムハンドリング時の安全性評価方法に必要な主要因を明らかにする	工場内スクラップの有機、無機不純物除去技術について加熱容器などを組み合わせたバッチ式小規模実験により検討し、実用化のために必要なデータを蓄積する。	○	大量排出時を想定した市中回収品スクラップの前処理技術（分別、分離、不純物除去など）の課題摘出し、市中スクラップリサイクル基盤技術を提案する。	◎	市中回収品スクラップの前処理技術として、過熱水蒸気による塗装附着物の除去技術、レーザー計測を応用したスクラップ分離技術、着火性火花の遠方監視システムなどのリサイクル基盤技術を開発・提案するとともに、スクラップハンドリング時の爆発災害防止対策ガイドラインを作成した。
③(1)-3 単体分離及びハンドリングの安全性評価		マグネシウムの粉塵爆発に関する基礎特性の解明として、従来の試験方法により、爆発下限濃度、最小着火エネルギー、最小着火温度等に対するマグネシウム粉の組成、粒度、濃度の影響を実験的に明らかにする。	○			
③(2)-1 固体リサイクル材の鍛造素材化技術の開発	固体リサイクル材の鍛造用ビレットへの適用目的として、圧縮率0.64以上の変形性を発現させるために必要な組織および不純物組成の限界を明らかにする。	マグネシウム粉を固化成形を行い、押出し温度、押出し比などの影響を調べ、鍛造素材化のための問題点を明らかにする。	○	従来のカスケード型リサイクル（低品位素材へのリサイクル）に代えて、リサイクル材が新材料と同等の特性を維持する市中スクラップリサイクル技術の基盤開発を行い、総合的なマグネシウムリサイクルの信頼性評価、データ集積を行う。	◎	後方押し出しやねじり押し出し等の強加工プロセスを用いた固体リサイクル技術を開発し、結晶粒微細化と混入不純物均一微細分散化を同時達成することにより、新材料と同等の特性と鍛造性を示す高品位リサイクル材の創製に成功し、市中スクラップのリサイクルに適応できる基盤技術を確立した。また、疲労や腐食性など信頼性評価を実施し、高性能化の指針を示した。
③(2)-2 固体リサイクル材の諸特性に及ぼす混入物の影響評価		リサイクル材の力学特性を測定するとともに、組織観察を行い混入物の状態を観察する。	○			

## 2.3.5 参考文献

### 2.3 マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出

- 1) 伊藤茂：特集非鉄金属業界マグネシウムのリサイクル、自動車技術、56（2002）  
p.71-76
- 2) 鎌土重晴他：マグネシウム合金の成形加工技術の最前線、シーエムシー出版（2005）  
p.235

#### 2.3.1 研究開発項目③(1)「リサイクル前処理技術（分離、精製、安全性評価）」

- 1) マグネシウムの生産・需要・価格等は日本マグネシウム協会の資料から作成
- 2) 自動車・IT 機器・家電製品用マグネシウム製品の動向とリサイクルに関する調査報告書、平成 15 年(2003 年)3 月、経済産業省製造産業局非鉄金属課
- 3) マグネシウム産業の現状と課題、経済産業省製造産業局非鉄金属課資料から作成
- 4) (社)日本自動車工業会(JAMA)の統計速報から作成
- 5) (財)自動車検車登録情報協会の資料から作成
- 6) (財)自動車リサイクル促進センターの資料から作成
- 7) (社)電子情報技術産業協会(JEITA)の資料から作成
- 8) 鉱物資源マテリアルフロー マグネシウム(Mg)、金属資源情報センター(JOGMEC)  
平成 18 年度調査レポート
- 9) アルミニウムの不純物無害化・マテリアルリサイクル技術開発事後報告書、NEDO 研究評価委員会、平成 18 年(2006 年)2 月
- 10) パソコン 3R 回収センター資料より作成
- 11) (社)電気通信事業者協会資料より作成
- 12) 素形材年鑑、(財)素形材センターの資料等から作成
- 13) 工業所有権情報・研修館、特許流通支援チャート、アルミニウムのリサイクル技術（2002）
- 14) (社)日本アルミニウム協会、平成 18 年度経済産業省委託調査「3R システム化可能性調査事業－アルミニウム展伸財スクラップから展伸財へのリサイクルの可能性調査事業」調査研究報告書(2007)

#### 2.3.2 研究開発項目③(2)「リサイクル材の特性評価」

##### ③(2)-1 固体リサイクル材の鍛造素材化技術の開発

- 1) 馬淵 守（京都大学）提供.
- 2) 工藤英明、東京大学航空研究所集報、Vol1(1959)P212.

##### ③(2)-2 固体リサイクル材の諸特性に及ぼす混入物の影響評価

- 1) K.Tanaka, T.Mori and T.Nakamura, Philos. Mag. 21(1970)267.
- 2) Y.Chino and M.Mabuchi, Mater. Trans. 49(2008)1093.
- 3) J.Pilling and N.Ridley, Superplasticity in Crystalline Solids, The institute of Metals, (1989).
- 4) G.Song, A.L.Bowles and D.H.StJohn, Mater. Sci. Eng. A 366 (2004).

#### IV. 実用化・事業化の見通しについて

##### 1. 実用化・事業化の見通し

###### 1. 1 成果の実用化可能性

###### 1. 1. 1 実用化・出口のイメージ

プロジェクトの実用化イメージは「基盤技術研究開発成果が助成事業の実用化・事業化に活かされ、波及効果も含めて、競争力のある産業となって製品展開されている」というものである。変研究開発を通じ、実用化への道筋をつけることができたと考えられる(図1. 1. 1-1)。



図1. 1. 1-1 マグネシウム鍛造部材 PJ における成果の実用化見通し

本プロジェクトの開始から終了までの5年間におけるマグネシウムの市場は、マグネシウムの加工方法として先行しているダイカストを含め、使用実績は当初予想したほどには伸長を遂げてはいない。むしろ、2008年のリーマンショックを契機とする経済不況で、成長が減速した。

鍛造についても、プロジェクト発足時前後にあった自動車産業等ユーザーにおけるマグネシウム鍛造に関する期待感は薄れたかに思われる。しかし、経済の立ち直りと、グローバル生産構造の変化の中で、ユーザーのマグネシウムに対する期待感は回復兆候を示している。

製造業の調達、生産、販売のグローバル化が進む中であって、生産の主力は海外に移行し、国内の生産は高機能・高付加価値製品に特化する傾向がある。このような中で、マグネシウムはハイグレード製品に適した素材と位置付けられている。すなわち、現在、製品において、軽量性と高級感の両方が要求される乗用車や、二輪車、カメラ



等の嗜好性の高い製品のハイグレード製品においてマグネシウムはステータスのある材料として使用されている傾向がある。今後も当面は、マグネシウム鍛造はハイグレード製品向けに適用されると考えられる。

本プロジェクトは、輸送機械や情報電気製品等の機械産業に、マグネシウムの特性を活かした利用に資する、優れた機械的特性とコストパフォーマンスを有する、高品質マグネシウム鍛造部材を提供できるようにすることを目指して、実施された。

マグネシウム鍛造部材の実用化・事業化を阻んでいた壁は、素材コスト、加工の困難性、生産性の低さ、及びこれらを主な要因としてのトータルコストが高いとことにあった。また、信頼性に関する指標としての耐食性、機械特性、安全性のハードルも高かった。

本プロジェクトによって、図1. 1. 1-2に示すように難加工性のマグネシウム合金の鍛造に適した素材、鍛造プロセスが開発され、これまでの最大の課題は解決された。

機械特性の目標としては、静的引張り強度で現状の250MPa→350MPa(伸び15%以上)、疲労強度( $10^7$ 回)で現状の120MPa→170MPaという、一般的なアルミ合金と同等以上の挑戦的な目標を掲げたが、概ね達成の見通しが得られた。

また、本プロジェクトでは、特殊成分を利用することなく、一般的な組成の素材から塑性加工により組織制御を行なうことで、上記の目標を達成することを志向し、結果としてマグネシウムの部材コストの大幅な削減による利用拡大を目指した。

前述のように経済不況のあおりで、マグネシウム市場は未だ十分には発達しておらず、その影響で、コストパフォーマンスの観点からは、今後の課題として残されている面はあるが、プロジェクトの成果が、マグネシウム市場の活性化を促し、コスト面でも改善されることが大いに期待される。

本プロジェクトでは、図1. 1. 1-2に示すように、マグネシウムに係る学術的知見の深化と応用によって、マグネシウムの特性を活かした鍛造技術の高度化に係る基盤技術研究開発を行い、この成果をマグネシウム鍛造部材の実用化技術研究開発に反映してきた。その結果、素材における組織制御、プロセスにおける組織制御により、高品質マグネシウム鍛造部材の生産性向上に資する材料と鍛造プロセスを開発し、さらにマグネシウムの市場拡大を見据えたりサイクル技術を開発することにより、マグネシウム鍛造の事業化の可能性を大きく高めた。

言い換えれば、研究機関、材料メーカー、鍛造メーカーの緊密な連携により、材料からプロセス、さらにはリサイクルまで一貫した開発を可能にし、事業化を実現しつつあると言える。以下に、主な成果と事業化可能性を概観する。

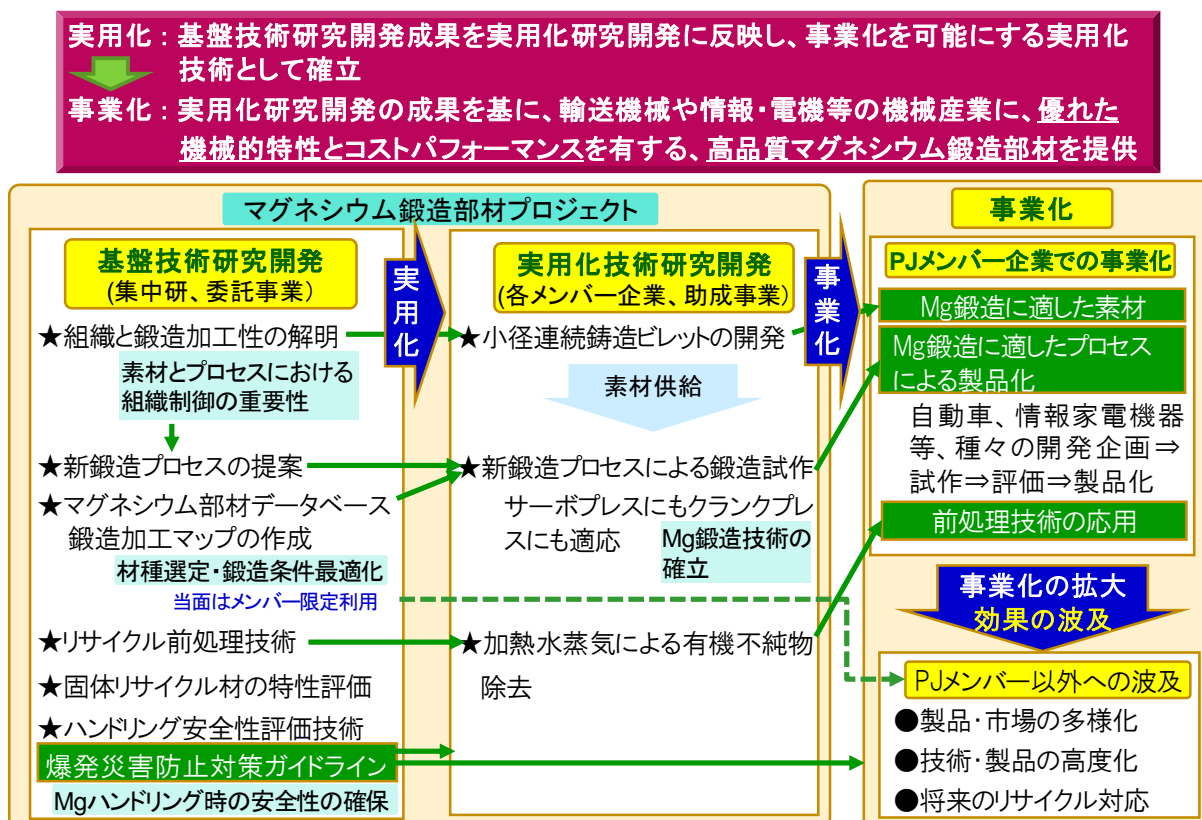


図1. 1. 1-2 マグネシウム鍛造部材 PJにおける成果の実用化見通し

### (1) 素材の最適化とコスト — マグネシウム鍛造に適する連続鍛造ビレットの開発 —

マグネシウム鍛造部材の量産、高歩留りを可能にする、鍛造加工性とコストパフォーマンスに優れた微細結晶粒径の小径連続鍛造ビレットを開発した。

世界初の断熱鑄型連続鍛造法によるビレットの製造技術は、鑄型を断熱構造とし、鑄型内では溶湯の凝固を極力抑制する一方、ビレットを冷却水で急冷して凝固組織の微細化を図るものである。このビレットは、結晶粒径は  $100\mu\text{m}$  以下、デンドライトアーム間隔 (DAS) は十数  $\mu\text{m}$  と、凝固組織が微細で均一な等軸晶である。

開発した連続鍛造材は、従来、鍛造材として一般的であった押出材と比較すると、製造コストが小さいことから、材料コスト低減が可能である。また、微細組織でかつ異方性がないため、鍛造加工性が優れる。加えて、このビレットは平滑な鑄肌、マクロ偏析層が極薄なため、鍛造材として品質が優れ、ピーリングレスが可能である。

このように、開発した連続鍛造ビレットは、鍛造加工性に優れるばかりでなく、マグネシウム鍛造普及の大きな障害要因である“高い素材コスト”を解決できる可能性が大きく、高品質マグネシウム鍛造部材の事業化にとって大きな役割を果たす。

### (2) 加工性と生産性 — 高信頼性マグネシウム合金部材の精密鍛造プロセスの開発 —

マグネシウム合金の鍛造加工性向上及び鍛造部材の高信頼性化を達成するため、微細組織と変形機構の関連性を解明し、基盤的なプロセス技術開発を行った。

鍛造素材の動的組織変化を誘導し鍛造性を高めることが可能な、組織微細化を促進する低速の前鍛造と、高速で成形し機械特性を付与する後鍛造の2段階から成る新たな精密鍛造プロセスを提案した。このプロセスは、欠陥がなく、機械的特性が優れた鍛造品の製造を可能にした省工程プロセスである。また、鍛造速度等の制御が容易なサーボプレスでも、広く使用されているクランクプレス等でも、適用が可能で、多くの鍛造企業への普及が期待される。

マグネシウムの変形機構に基づく最適加工条件を容易に実現するプロセスと、微細結晶粒連続鋳造ビレットのマッチングによって、量産可能な高い生産性が実現すると考えられる。

### (3)自動車、電機等の産業に提供する高品質マグネシウム部材生産実用化に目途

輸送機器、ロボット分野に関しては、微細組織を有する連続鋳造材を、サーボプレス機あるいは汎用クランクプレス機により、微細化工程と成形工程を組み合わせた新鍛造プロセスで、二輪車・四輪車用部品等の鍛造試作を行い、鍛造加工性と特性評価を行い、量産が可能であることを確認した。

自動車用エンジン部品や足回り部品、ロボット用アームブラケットのような部材には高強度、高疲労特性、高靱性などの特性が要求されるが、マグネシウム鍛造部材は、これらの要求を満足する高機能化を付与することが可能である。

現在の主要なマグネシウム成形技術であるダイカストに比較して、実用レベルの加工コスト達成の目処が立ち、鍛造・プレス成形本来の生産性が確立されれば、低コストの製造技術へと脱皮する可能性が見えてきた。

情報機器分野の軽量・薄物部材では、ダイカストを主とする鋳造部材に対して、高精度で薄肉の設計ができ、生産性の向上が期待される。薄板のプレスでは成形が困難なボス、リブ等の突起物を有し、表面平滑度も要求されるPC筐体等の試作、評価を行い、プレスと鍛造の複合化に目途をつけたことにより、この分野での広範な実用化が期待できる。さらに、ニアネットシェイプのダイカスト材を元材とし、鍛造・プレスすることで、設計の自由度を必要とする複雑形状品を成形する技術開発の目処がついたことにより、短納期でトータルコストに優れた量産品の供給が不可欠な分野での事業化の道が開けると考えられる。さらに、耐熱性フランジ部の締結力維持が可能な複合鍛造を開発して、特性が優れ寸法精度も高い部材を試作した。

このように、新鍛造プロセス、複合鍛造プロセスで製造した高品質マグネシウム部材を、自動車、家電、ロボットのほかあらゆる機械産業分野に、供給可能になると考えられる。

マグネシウムの特性を活かした軽量製品、振動吸収性等に優れた高機能製品、ハイグレード製品への適用をはじめ、信頼性と強度を求められる多くの分野に対して広く用途が開けると期待される。

#### **(4)マグネシウム普及時代に備えるリサイクル技術を開発**

マグネシウム切削粉等のスクラップから有機不純物を、過熱水蒸気で熱分解除去する技術を開発した。この不純物除去技術は、当面は鉄、銅、アルミ等のスクラップの脱脂に利用可能である。加えてマグネシウム、アルミニウムの選別技術を開発した。これらは将来、マグネシウムのリサイクル市場が活性化した段階で事業化の可能性は十分にある。

また、切削粉を固体化した棒材は、バージン材と同等以上の微細組織、強度、延性を有することを確認した。

さらに、リサイクルにおけるハンドリング技術開発を行い、マグネシウムの工業的な利用局面での安全性評価技術を整備したことは、ユーザーのマグネシウム部材の広範な導入に対する心理的な障壁を取り除く効果大きい。策定した爆発災害防止対策ガイドラインは、マグネシウム普及の福音になると期待され、今後は積極的に広報していくことが必要である。

近年、リサイクル分野の事業化機運が高まりつつある中で、本プロジェクトの成果は、安全・コスト面で競合技術に対して優位性を持つと考えられることから、実用・事業化の可能性は高いと期待される。

#### **1. 1. 2 実用化・事業化に向けての課題と解決方針**

マグネシウム鍛造の実用化・事業化促進には、いかにコストパフォーマンスをあげるかが、現実的な重要課題である。市場が拡大すれば、スケールメリットが活かしてコストが低下することが見込まれるが、それには、まず、技術の安定と高度化が必須でマグネシウム鍛造ならではの魅力の向上が前提となる。「技術の高度化」、「市場の拡大」、「低コスト化」が相俟って初めて、実用化・事業化促進のスパイラル効果が得られるようになる。

今回のプロジェクトで、革新的な鍛造素材、鍛造プロセスの開発を達成したが、今後、マグネシウム鍛造技術の更なる高度化を図った上で、実用化・事業化を進めるためには、以下のような課題がある。これらの課題の解決には、産総研はじめ材料メーカーや鍛造メーカーである各メンバーが、引き続き必要に応じて連携して取り組んでいく所存である。

#### **(1) 鍛造素材**

従来の押出材に比較して、優れた特性を持ち、コストの低減が可能な連続鍛造材の量産化に向けた基本的な技術の確立に目途はつけたが、さらなる量産技術の確立と量産設備の拡充は今後の課題となっている。また、量産化技術の確立と並行して、鍛造メーカーからの強い要望に応えられる材料コスト改善が、マグネシウム鍛造の普及にとって是非とも必要である。

さらに合金種の拡大、対応径の拡大、高精度化を図り、多様な市場ニーズに応えられるようにするとともに、耐熱性などの特性を付与した材料を開発することが、今後の課題である。

## **(2) 鍛造プロセス**

新精密鍛造プロセスは、サーボプレスにも汎用メカプレスにも適用可能なプロセスであるが、サーボプレスを用いた鍛造において、メカプレス並み以上の生産性を、鍛造速度向上によるサイクルタイム短縮に限定せず、工程トータルで実現できる技術の確立が必要である。また、汎用のメカプレスによるプロセスでは、実用性の高い組織制御工法の開発が課題である。

さらに、鍛造温度の低温化を、素材のつくりこみ、微細化を効率よく引き出す工程設計、金型コーティング、潤滑材等の最適化により実現し、冷温間鍛造技術として確立することが必要である。

加えて、マグネシウムの組織形成・制御を考慮した鍛造シミュレーション技術の開発がマグネシウム鍛造技術の高度化に必須である。

また、本プロジェクトでは鍛造データベース及び鍛造加工マップを作成したが、データを拡充し、実質的に価値のある情報を提供できるように整備することが、マグネシウム鍛造の普及に必須である。

## **(3) 実用化に向けてのメンバー企業の取組み強化**

メンバー企業においては、本プロジェクトで得られた技術開発成果を、生産技術として活かすために、技術開発を継続するとともに、より広範な市場開拓を積極的に進めることができる営業力を発揮することが必須である。

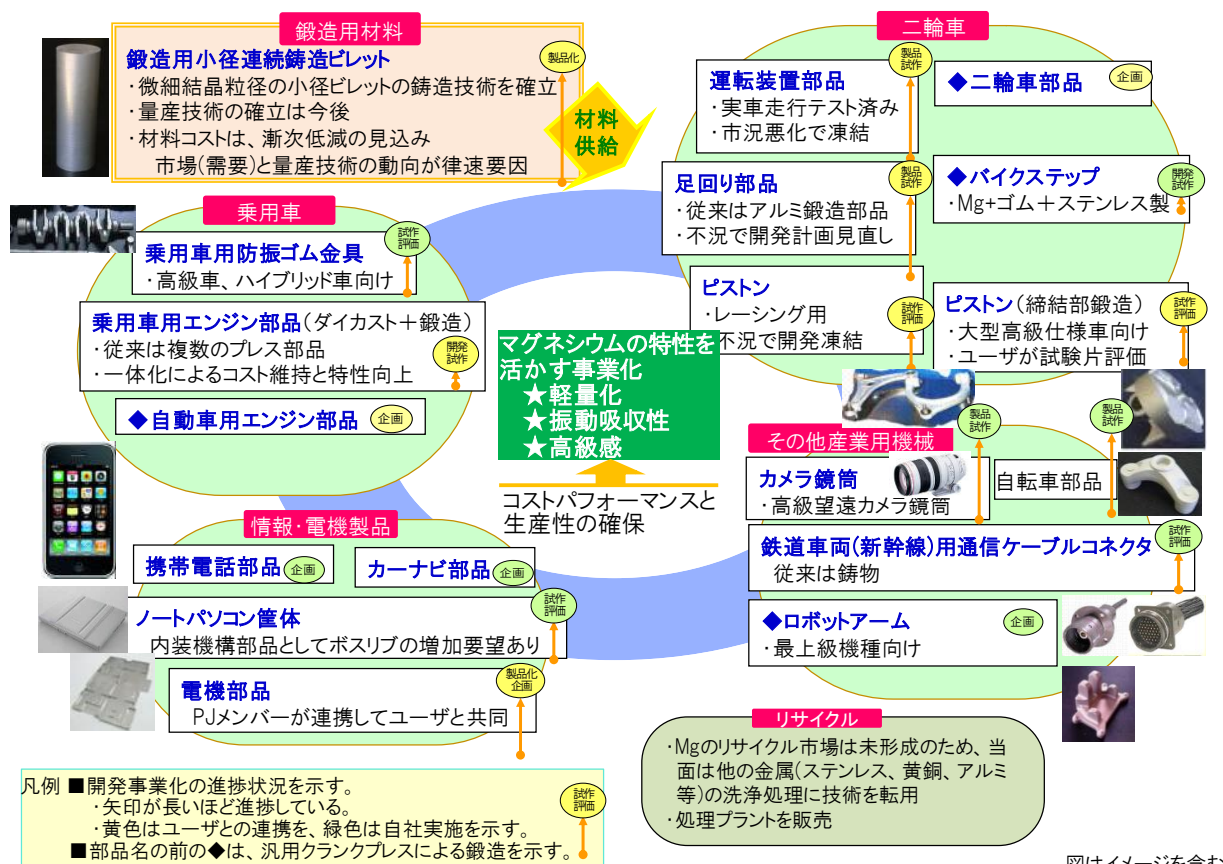
## 1. 2 実用化のシナリオ

### 1. 2. 1 実用化計画 (シナリオ)

技術開発成果の実用化・事業化は、当面、主にメンバー企業を中心として進展し、将来的には各産業分野に波及していくと考えられる。しかし、共通基盤技術の研究開発も継続的に行い、実用化に貢献する技術の深化、確立を進めることが肝要である。プロジェクトでは、マグネシウム鍛造における微細組織制御の重要性が解明され、材料及びプロセスにおける実用化技術開発に大きく寄与した。マグネシウム鍛造プロセスの確立を図っていくためには、前項で述べた今後の課題に係る科学的究明と、これを実用化に結び付けるための技術が必須である。

今後の実用化、事業化を実質的に担うメンバー企業では、事業化取組みを既に進めている。図1. 2. 1-1は各プロジェクトメンバーが、現在までに進めている事業化進捗状況をまとめたものである。

各メンバーは、乗用車、二輪車、情報・家電機器、ロボット等その他の産業機械分野において、それぞれ事業化を目指している。事業化は概ね企画→開発試作→開発試作評価→製品化企画→製品試作→製品化の段階が進むが、まだ企画段階にとどまっているものもあるが、連続鍛造ビレットのように製品化（サンプル出荷）に至っているものもある。



図はイメージを含む

図1. 2. 1-1 メンバー企業における事業化進捗現況

図1. 2. 1-2に示すように、各メンバーは中間目標達成後、実用化技術開発を進め、さらに事業化への取組みとして、試作評価とユーザー開拓を進めてきた。

今後はこれまでの成果を受けて、量産など実用化に耐える生産技術として確立し、開発企画提案から製品化まで実績を積み上げて、マグネシウム鍛造技術の優位性をアピールしていくこととなる。以下に、各分野における事業化までのシナリオをまとめる。

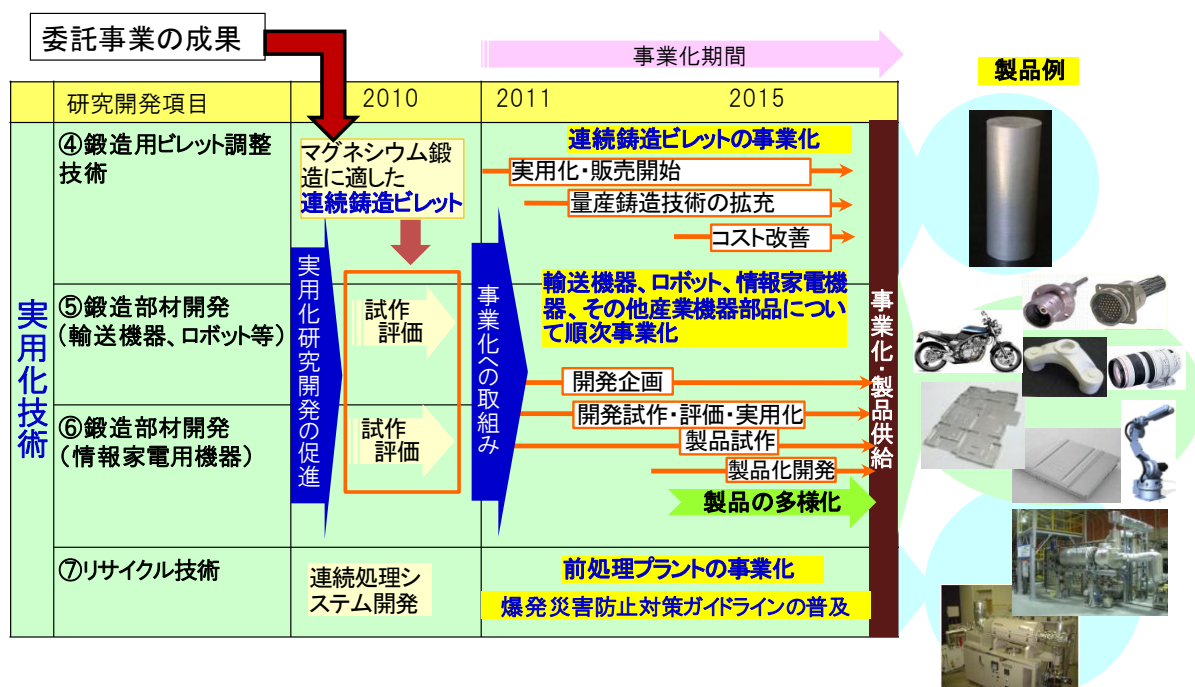


図1. 2. 1-2 事業化までのシナリオ

### (1) 素材分野

マグネシウム合金の小径連続鍛造ビレットは、鍛造加工用素材として全くの新規素材である。これまでに、多面同時連続鍛造によるφ55mm×8面、鍛造長さ3.5mの鍛造を実現し、基本的な量産技術の確立に目処をつけている。但し、現在のマグネシウム鍛造の市場は小さく、鍛造素材の需要は連続鍛造材の量産を軌道に乗せるほどには至っていない。自動車企業等のユーザーでは3、4年前にはマグネシウムへの関心は希薄で、さらにリーマンショックの影響で新規技術への扉は固い感があった。しかし、最近、ハイグレード製品等へのマグネシウムの適用について、関心が回復してきた傾向がある。東日本震災の影響で再び、経済動向に不透明感があるが、プロジェクトメンバーの鍛造メーカーを中心に鍛造試作が、前述したように頻繁に行われるようになってきた。

本プロジェクトで連続鍛造ビレットを開発した素材メーカーは、プロジェクト終了時点より1年前に助成事業を終了しており、既に小径マグネシウム鍛造用素材を、プロジェクトメンバー企業等の様々な試作に供給し始めている。また、この素材メーカーは軽量化ニーズのある分野を中心に、積極的な技術紹介・提案と用途開発を展開し始めている。

マグネシウム鍛造技術の確立が進むにつれ、その実用化・事業化に向け、鍛造用素材の低コスト化を望む、鍛造メーカーの要望は一層強まっている。低コスト化はマグネシウム鍛造の需要の増大と、連続鋳造ビレット量産化技術の構築により為されると考えられる。また、当面は小型鍛造用マグネシウム合金素材の事業化が先行すると考えられる。需要と供給バランスでコストは決まるが、将来的には、鍛造業界が目安としている 1,000 円/kg 以下の実現が期待される。

製品化事例の増加、さらには市場での定着により需要が拡大することによって、鍛造素材の量産技術開発スピードが加速することが期待される。また、鍛造素材の販売を、用途開発、技術提案と合わせて進めることで製品化実績が拡大するであろう。

## (2) 輸送用機器、ロボット分野等

マグネシウムに適した鍛造用素材及び鍛造プロセスの開発を受けて、図 1.2.1-1 に示したように現在、乗用車(エンジン部品等)、二輪車(足回り部品、ピストン等)、鉄道車両(新幹線用通信ケーブルコネクター部品)、自転車、ロボット(アーム)、カメラ(鏡筒)等に係る部品の試作が進められている。中でも二輪車部品の試作が比較的進んでいるが、リーマンショック以後の不況で、製品化直前で計画がストップしたものがあなど減速傾向が懸念されている。何れもハイグレード製品の部品であるため、景況変化に敏感に左右される。

事業化は、図 1. 2. 1-1 に示したように多くが二輪・四輪自動車等のユーザー企業と一体となって、企画から製品試作まで連携して進められている。但し、中には企画、試作段階までは共同で実施し、試作品評価はユーザー企業の主導で行われているケースもある。

今後は、特に既存のアルミ部材の代替のためにはコスト競争力の確立が事業化の前提であり、低コスト素材の供給と共に、アルミ部材と同等の製品コストを目処とする。事業化の主なアイテムは、スポーツ用モータサイクル部品、自動車部品、介護用ロボット部材、光学機器(レンズ筐体等)等が視野に入っているが、新規アイテムの探索とともに、既存のアルミ鍛造部材の代替に引続き、コスト競争力の改善とともにアルミ鋳造部材の代替を進めて行く。

所要の強度等を満足する「軽量化」部材として、既存のアルミニウム部品を代替するというだけではユーザーに対する切り札としては十分ではない。振動吸収性等のマグネシウムならではの特性付与を可能にして高付加価値化を進めることが、エンドユーザーの関心を惹起するために必要である。

事業化を進めるに当たって最も求められるのはコストパフォーマンスであるが、鍛造素材の低コスト化だけに依存するのではなく、部材の製造段階においても生産性の改良、高付加価値化などによりコストパフォーマンスをあげていくことが肝要となる。

現在、各メンバーにおいて、ユーザー企業に対する営業活動が活発化しているが、製品提案力を含めた営業の強化も重要である。

このような対処により、製品企画、試作の多様化、用途拡大を図り、実績を積み重ねていくことが、事業化を軌道に乗せる方途となる。



### (3) 情報家電用機器分野

情報家電用機器分野では、ユーザーと連携してノートパソコン筐体では試作評価まで、攪拌機部品では製品化企画まで進んでいる。携帯電話部品は、製品モデルチェンジの期間が短く、またコスト面から海外生産へシフトしているため、国内生産の道は険しい。

ノートパソコン筐体は、プラスチック等との競合が厳しい状況にある。加えて、プロジェクト発足当初は、大型外観製品の事業化を目指していたが、ニーズはより小型軽量品へと変化しており、市場の見極めが必要になっている。放熱性や制振性の特性を活かし、かつボス・リブの成形技術の完成度や設計自由度を高めることによって、パソコン筐体に限らずカーナビ部品等の情報・電機機器の事業化を目指す。

### (4) リサイクル分野

スクラップの過熱水蒸気による不純物除去技術は、現状は、マグネシウム以外の切削粉の脱脂処理等に使用されている。さらに当面は、製造過程の大型残材の脱脂処理や、塗装前処理としての脱脂・乾燥、製品の塗装剥離に活用を進めていく。処理プラント自体の販売を進めていく。

マグネシウム製品の普及が進み、それに伴いリサイクル市場が形成された段階では、リサイクル前処理としての活用が期待される。

固体化リサイクル技術は、実用化に向けてはまだ研究開発を続けていく必要がある。

また、選別技術や安全性評価技術は、マグネシウムを使用するメーカーにとってひとつの指針となると考えられるので、種々の機会を利用して、マグネシウムに対する理解と認知度を高めるべく広報を重ねていく。

さらに、マグネシウムリサイクル市場の活性化がなされる時に向けて、現在、到達している技術の完成度を高めていくこととする。

## 1. 2. 2 市場動向

マグネシウムの需要は図1. 2. 2-1に示すように、2008年まで順調に右肩上がりの成長を遂げてきた。2008年のリーマンショックで大幅な落ち込みを見せたが、2010年には堅調な回復傾向を示した。

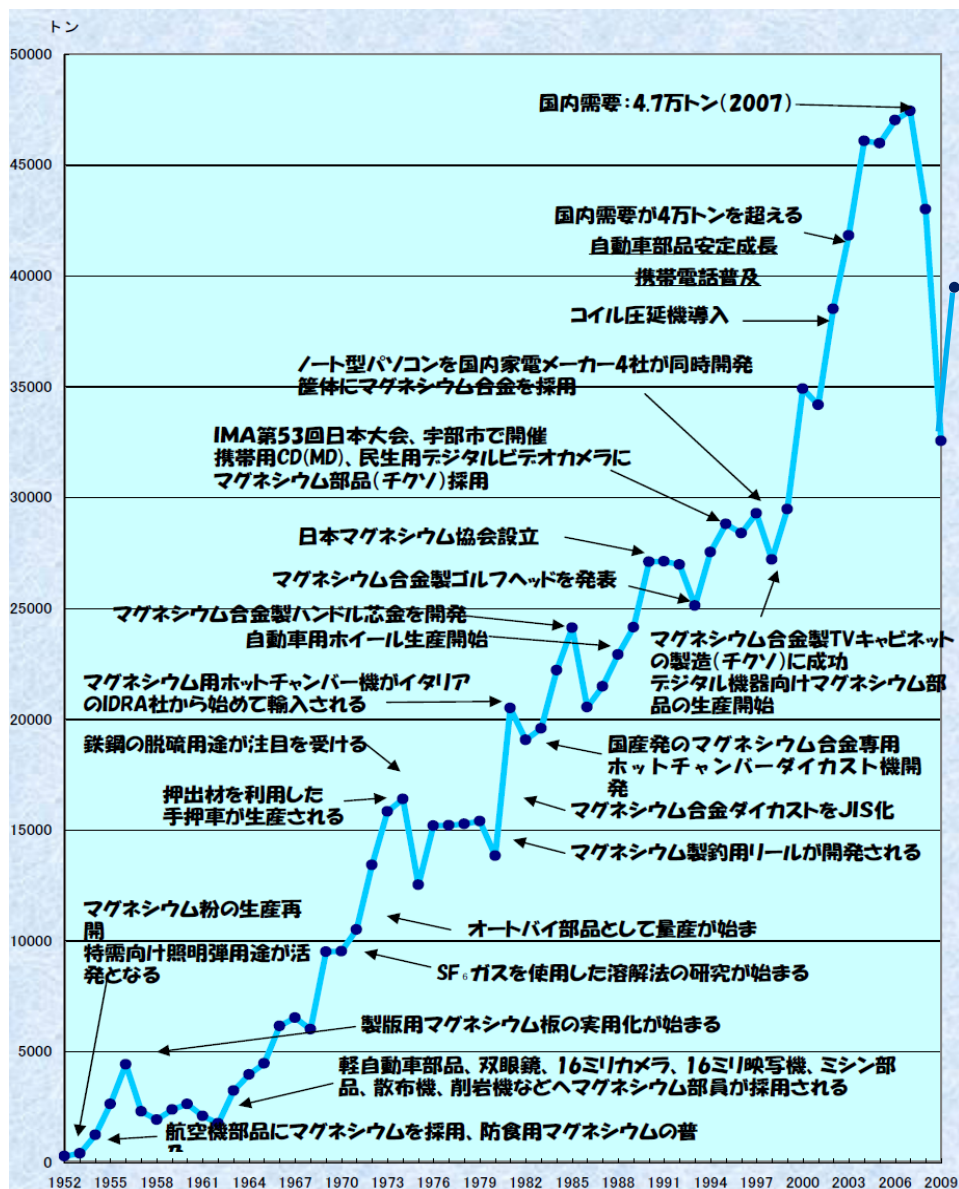


図1. 2. 2-1 マグネシウムの需要推移

出所：日本マグネシウム協会

マグネシウムの2010年の国内総需要量は約4万トンで、用途は大別すると、純マグネシウムを利用するアルミ合金等への添加材と、マグネシウム合金を主として使用する構造材である。添加材が需要の72.1%、構造材が20.8%を占める。構造材需要は必ずしもまだ大きくはないが、2010年に前年比31.9%増となり、今後の回復と伸長が期待される。

構造材用マグネシウム地金需要量の推移を図1. 2. 2-2に示す。マグネシウムの成形は多くがダイカストによる。鍛造部材も構造材に属するが、量的にはまだ微々たるもので、「その他」に押出や圧延と共に含まれている。

マグネシウム鍛造部材の需要は、量的には自動車向けが最も多いと予想される。そこで、自動車に係る需要動向を以下に述べる。

軽量化を進めてきた自動車では、鉄(鋼・铸铁等)からアルミニウムへの材料転換が進み、さらにまだアルミに比べれば微量ではあるがマグネシウムの採用も進められてきた。マグネシウムの需要は、アルミニウムと同様の普及過程をたどると予想されることから、アルミニウムのこれまでの動向を参考に、今後のマグネシウム需要を考えてみる。

図1. 2. 2-3に示すように自動車に使用されているアルミニウムは2010年に120万トン、マグネシウム(ダイカスト)は0.5万トンである。アルミニウムはおよそ2/3がダイカストで、1/3がその他の鋳物である。アルミニウム鍛工品は1980年代後半2000年代前半に急成長したが、3万トンに過ぎない。

表1. 2. 2-1に、自動車の主要部品の材種別の生産重量、部品単価(1個当たり、kg当たり)及びアルミニウムに対する他材種の重量比をまとめて示す。数量を見ると、ステアリングホイール芯金ではすでにマグネシウムがアルミニウムを凌駕しており、シートフレームもアルミニウムの2/3に迫っている。製品単価を見ると重量単価はアルミニウムの1.3~2.4倍であるが、一個当たり価格は1.1~1.5倍とアルミニウム単価に比較的迫っている。

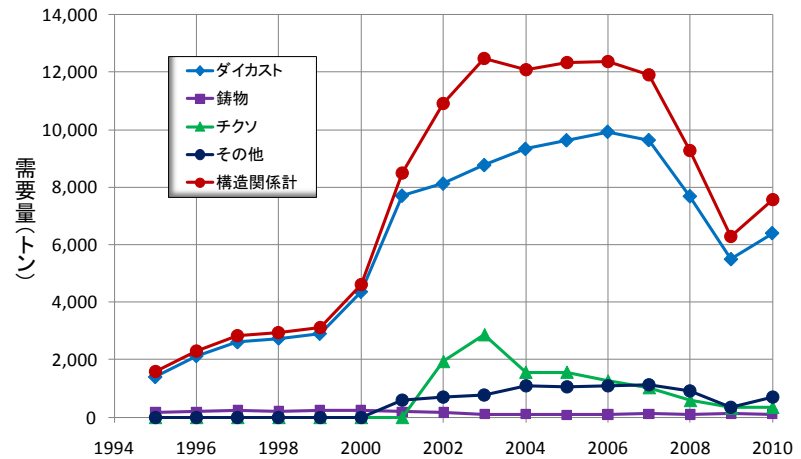


図1. 2. 2-2 構造材用マグネシウム地金の需要推移  
出所: 経済産業省 機械統計、鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計等を基に作成

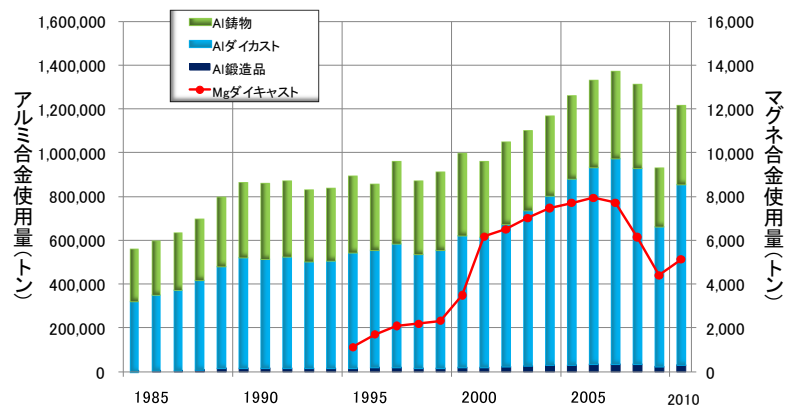


図1. 2. 2-3 自動車用へのAl、Mgの使用量推移  
出所: 経済産業省 機械統計、鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計等を基に作成

表 1. 2. 2-1 自動車主要部品の材種別の生産重量、部品単価及びアルミニウムに対する他材種の重量比

部品名称	素材	数量 千トン	製品単価				重量比 (対Al)
			円/個	(対Al)	円/kg	(対Al)	
サスペンションアーム	Al	6,100	1,150	1	1,769	1	1
	ハイテン	60,900	835	0.73	549	0.31	2.34
シートフレーム	Al	8,510	2,550	1	927	1	1
	Mg	5,490	2,750	1.08	1,222	1.32	0.82
	炭素鋼	-	1,500	0.59	341	0.37	1.60
ステアリングホイール芯金	Al	720	-	-	-	-	1
	Mg	6,890	235	-	336	-	0.67
シリンダーブロック	Al	203,310	25,000	1	877	1	1
	Mg	0	32,000	1.28	1,455	1.66	0.77
	鑄鉄	-	17,500	0.70	479	0.55	1.28
シリンダーヘッドカバー	Al	9,280	1,350	1	1,125	1	1
	Mg	340	2,000	1.48	2,500	2.22	0.67
オイルパン	Al	17,330	3,900	1	1,238	1	1
	炭素鋼	22,100	3,000	0.77	750	0.61	1.27
エンジンマウントブラケット	Al	9,090	950	1	1,188	1	1
	炭素鋼	17,290	700	0.74	737	0.62	1.19
インテークマニホールド	Al	19,020	3,650	1	760	1	1
	PA	-	3,900	1.07	1,130	1.49	0.72
	Mg	100	5,250	1.44	1,826	2.40	0.60
ラジエータタンク	Al	260	1,650	1	3,056	1	1
	PA	-	1,100	0.67	1,849	0.61	1.10
ECUハウジング	Al	3,160	53	1	955	1	1
	炭素鋼	6,600	25	0.47	385	0.40	1.18
トランスミッションハウジング	Al	60,870	3,950	1	790	1	1
	Mg	490	4,250	1.08	1,063	1.35	0.80

「2009年新自動車部品マーケティング便覧」(2009年7月 株式会社キメラ総研)より作成

鉄に代わる軽量化材として、マグネシウムに先行して多用されているアルミニウム鍛造品の市場拡大の経緯をみると、当初はアルミニウム鍛造品コストに占める材料費が過半であったが、高品質鑄造ビレットの開発で素材コストを低減し、さらに、コンパクト・スリムな鍛造工程の採用および鍛造用高強度合金の開発がなされた。

これらにより、図 1. 2. 2-4 に示すように鍛造品の単価低減と乗用車への使用量が拡大され、1990 年頃には概ね 1.6kg/台、1,500 円/kg 程度であったが、2005 年頃には 4.1kg/台、900 円/kg 程度になった。アルミニウム鍛造品は、使用量の増加に伴い、単価が下がっており、需要とコストが強い関係にあるといえる。

マグネシウム鍛造もアルミニウム鍛造と同様に、市場の伸長につれ、単価も下がることが期待される。BEV、PHEV 等の次世代自動車においても、車両軽量化は必須であるので、構造材へのマグネシウムの採用が期待される。

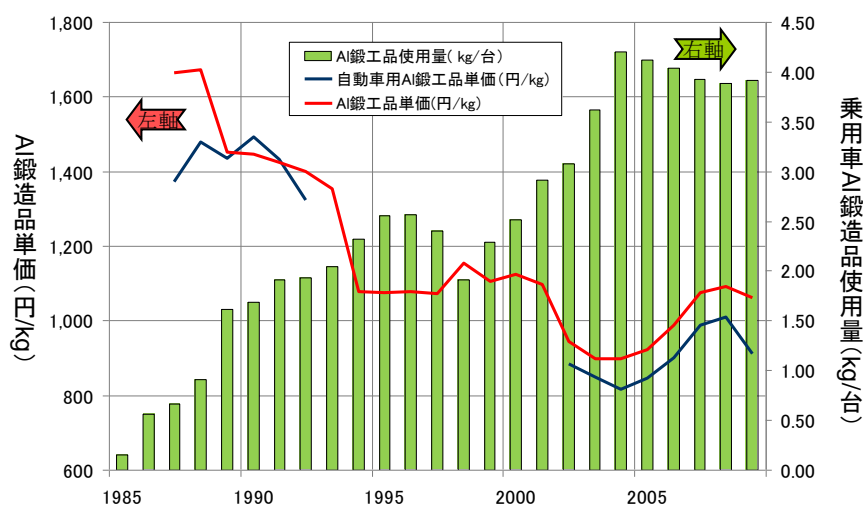


図 1. 2. 2-4 乗用車用 Al 鍛造品の使用量と単価の推移

出所：経済産業省 機械統計、鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計等を作成

### 1. 3 波及効果

NEDO プロジェクト実施による各分野への波及効果は次のとおりである。

<p><b>産業</b> : マグネシウム関連部材の市場化、 及び環境整備(鍛造技術+リサイクル技術+安全ガイド ラインを一体となって実施)</p> <p><b>経済</b> : マグネシウム産業の国際競争力の強化、雇用増加</p> <p><b>社会</b> : 軽量化部材の一層の普及により、 省エネ化、CO2削減効果が期待</p> <p><b>人材育成</b> : 研究者の知識、スキルの向上</p>
--

製造業のグローバル展開に伴い、国内生産は、我が国の高度な技術を使用したハイグレード製品に特化される傾向がある。マグネシウム鍛造部材は現在、市場新規性を維持しており、軽量性、制振性や優れた外観等の特性と相俟って、主にハイグレード製品に使用され始めている。

プロジェクトによって、難加工性素材のマグネシウム合金を、材料製造及びプロセスにおいてそれぞれ組織制御することにより、鍛造性を大幅に改善し、量産に目途をつけた。優れた特性を有しコストパフォーマンスも高い材料の供給、工数の削減による型費節減、従来の熱間鍛造に比べ鍛造温度が低温化に見込みがついた。これは生産のグローバル化やコストパフォーマンス、環境配慮という視点からも評価される。

これらにより、実用金属では最も軽量で優れた特性を有するマグネシウムの使用拡大が進むと期待される。また、マグネシウムの成形は多くはダイカストによっているが、より高い機械的強度を求められる製品の成形が鍛造によって可能になる。

マグネシウムの最大の特徴は軽量であることであるが、軽量化による燃費改善が大きな課題となっている自動車を例にあげると、乗用車では 1524kg の乗用車に 155kg のマグネシウムを使用することにより、1297kg に軽量化し、この約 200kg の軽量化で燃費が 2km/l改善するという報告もあり、CO<sub>2</sub>排出削減への大きな貢献が期待される。

アルミニウム鍛造品が使用されている主要製品について、その 10%をマグネシウム鍛造部材が置き換えるとし、マグネシウム鍛造用ビレットの需要量を予測すると、表 1. 3-1 に示すように、ビレット需要量は 3,270 トンとなった。アルミニウムからマグネシウムに置換されるまでにどれだけの時間を要するかは、部品によって技術的難易度等が異なるため、一概には言えないが、Al 鍛工品の需要拡大の例からみると、少なくとも 10 年程度の期間は必要となろう。

マグネシウムのリサイクル対象となるスクラップの年間発生量は、2010年では約2,000tと見積もられており、市場規模としては現状ではまだ小さい。しかし、マグネシウムの利用拡大に伴い、2015年頃には年4,000～5,000トンの発生量が見込まれている。2007年の回収量300トンが、2015年頃には1,800トンに増加し、2020年頃までは毎年2,000トン程度の回収が続くものと予想される。このようなリサイクル市場の成長に伴い、リサイクル処理装置、アルミニウムとマグネシウムとの分離・回収装置の需要増加も見込まれるため、市場動向に沿った事業化計画の立案と実行を進めてゆくことが重要となる。

図1. 3-1は、今後、期待される波及効果をまとめたものである。

表1. 3-1 マグネシウム鍛造部材の市場規模予測

分野	対象	部品例	年間生産数量	ピレット重量(トン)	備考
自転車	スポーツ車、MTB、輸出部品	ステム ギアクランク	26万台 150万組	90	完成車生産台数と輸出部品を含む。
二輪自動車	小型2輪車 (250CC以上)	アッパーブラケット、 ローアブラケット、ピ ストン、ホイール等	30万台	490	Al鍛造部品装着車
自動車	スポーツ車、中大 型セダン、SUV等	ホイール、エンジン マウントブラケット、 アーム類、ピストン	3.7万台(ホイール) 279万台(アーム類) 75万台(ピストン) 465万台(エンジンマウントブラケット)	(170) (1,640) (100) (370) 2,280	Al鍛造部品装着車
光学機器	一眼レフ用交換レ ンズ	鏡筒	80万本	390	重量800g以上の望遠レンズ
レジャー	釣用リール	リール	100万個	20	輸出用のAl鍛造品装着
ロボット*	工業用	上腕アーム部品等	9万台	-	現在は鋳鉄またはAlの鋳造品を使用。鍛造品は使用していない。
計	【対象製品数量の10%がMg鍛造部材使用製品とした】			3,270	

\*半導体用等では高速化・位置決め精度向上が課題となっている。Mgの比強度大、制振性等の効果が確認されれば、Mg鍛造部材の使用拡大につながる可能性大。

輸送機器、ロボット機器、情報機器等へのマグネシウム部材の適用の拡大にともなうマグネシウム製品市場の拡大は、軽量化による消費エネルギーの削減や動作性能の向上が求められる光学機器(レンズ筐体等)や産業機器(ロボットアーム等)、福祉機器(介護ロボット、車椅子等)などの分野への、一層の波及効果が期待される。また、輸送機器分野においても航空機や鉄道車両等への適用拡大が期待される。さらに、量産効果による材料コストの低下や材料としての実績の蓄積により、各種の情報家電製品やその他のプラスチック代替用途への実用化展開が可能と考える。

波及のシナリオを図1. 3-2に示す。現在、プロジェクトメンバーにおいては各

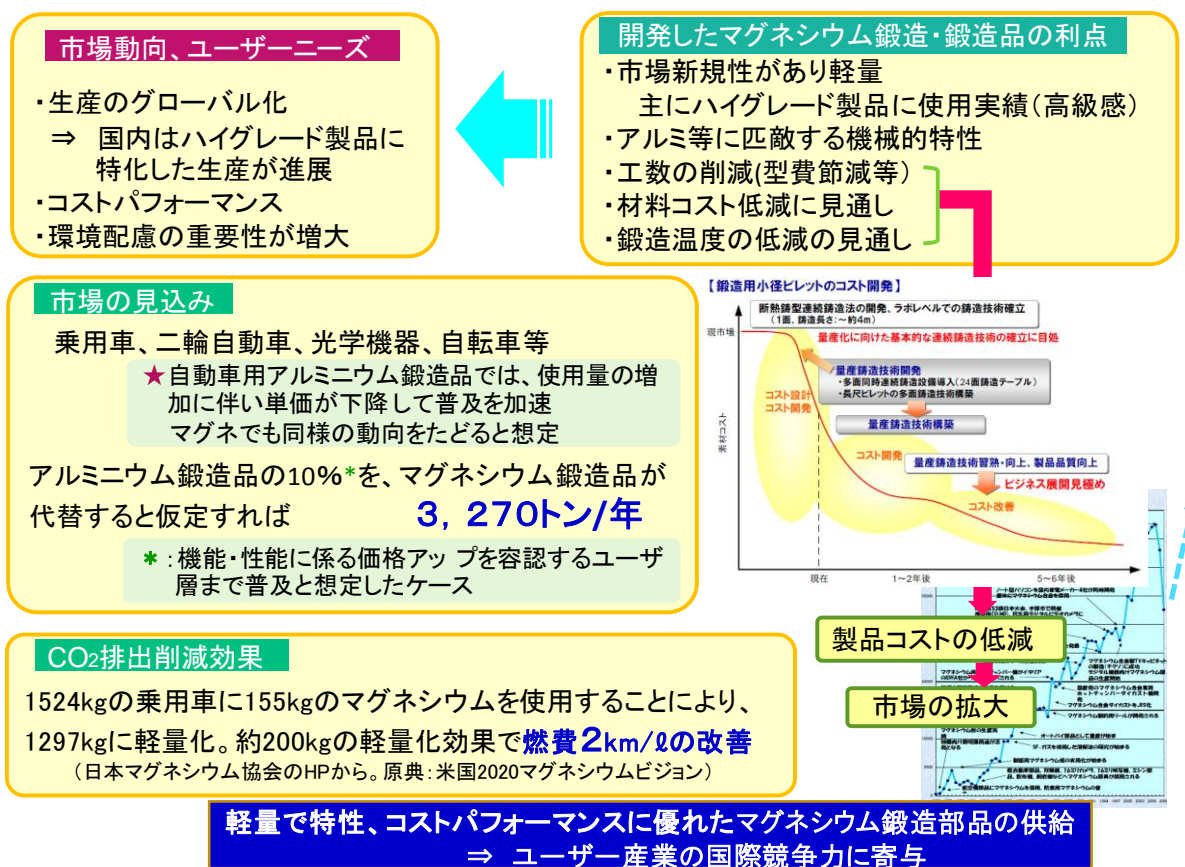


図1. 3-1 波及効果

種の製品試作が進んでいるが、製品の実用化事例の増加に伴い、対象製品・市場が拡大し、これがコスト低減(材料・製造)及び技術の一層の高度化を可能にし、さらに製品の高度化を実現することによって、また1ランク上の製品・市場の多様化を促進する、という良い連環が創成されると期待される。

本プロジェクトでは、マグネシウムという新しい材料の産業応用を目指し、材料メーカー、鍛造メーカー、リサイクル企業が加わり、それぞれのエンドユーザーの動向も踏まえ、異業種を含む有機的な水平連携の構築がなされている。これを通じて、技術開

発の促進に留まらず、広範な分野への成果普及、技術の認知度の拡大、新しい技術の社会的な受容促進、さらにはこれらの結果の総体としての大きな経済的波及効果が期待される。

また、プロジェクトにおいて基盤技術開発を担った集中研の中核機関である(独)産業技術総合研究所は、我が国におけるマグネシウム鍛造技術の研究開発拠点として、技術の高度化をさらに進め、開発技術を国内外に発信していくと共に、マグネシウムはじめ難加工材の成形技術を研究開発する官民の人材育成にも寄与すると、大いに期待される。

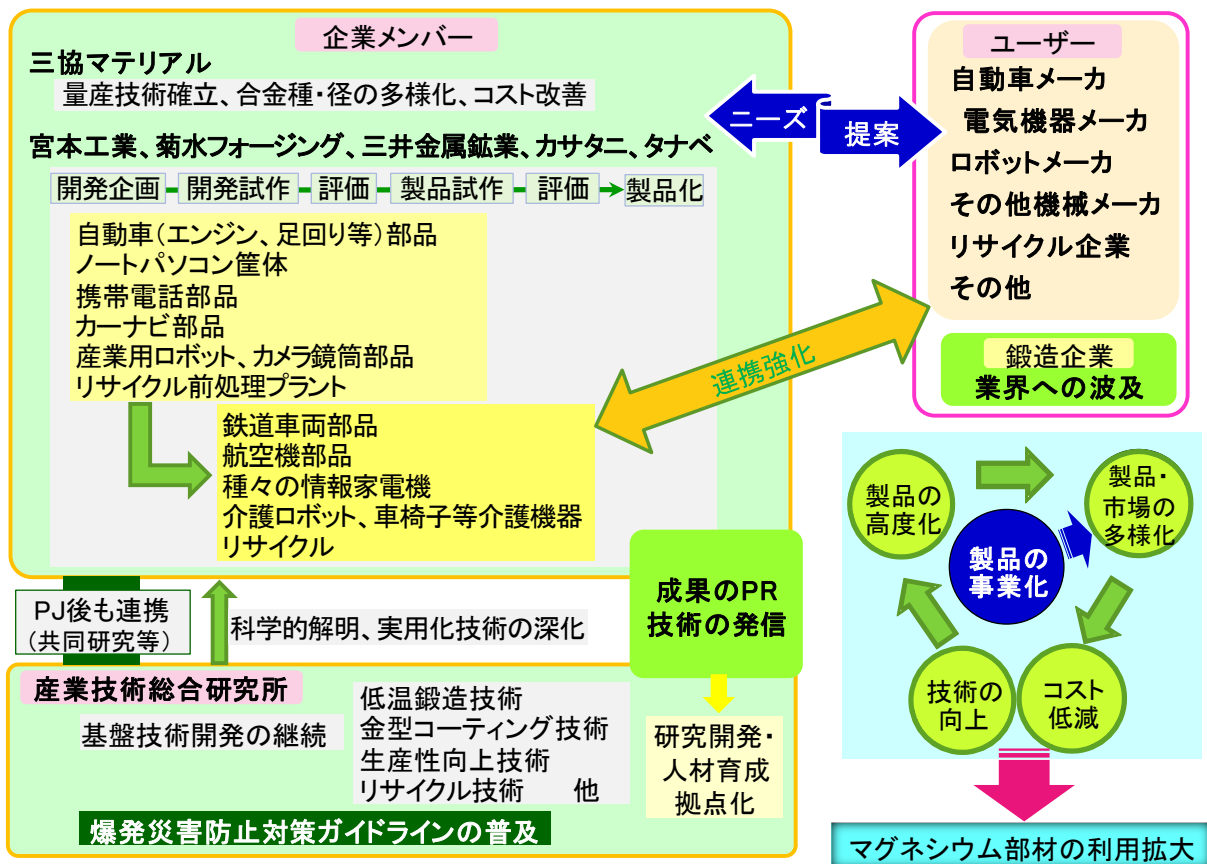


図1. 3-2 波及シナリオ



## 1. 4 まとめ

経済変動の影響を受けて、マグネシウム市場の伸びは当初の予想ほどには伸長していないが、着実に使用実績は広がっている。

本プロジェクトでは、マグネシウム鍛造に適した素材とプロセスを開発し、特性、コスト両面で、マグネシウム鍛造の実用化を可能にする成果をあげた(図1.4-1)。さらに将来のリサイクル対応を備えた技術に目途をつけた。

プロジェクトメンバーは、開発技術の一層の高度化と実用化技術開発を進めつつ、既に輸送機器、情報機器、光学機器、その他の産業機器用の種々の製品試作評価を、ユーザーと共に、あるいはメンバー間で連携しつつ、あるいは独自で展開している。その結果、製品化して近々市場に出る予定のものもある。

不況の波に抗いながらの市場開拓ではあるが、ハイグレード製品を主に、マグネシウム鍛造品が市場に出回り始めるのは遠くない。技術の優位性による市場の拡大が、コストパフォーマンスを高め、一層の事業化、普及を促進すると考えられる。

アルミニウム等からの材料転換、ダイカスト等からの工法転換が、当面の動きとして想定される。マグネシウム鍛造品が使用される産業分野としては、二輪車や乗用車、自転車等、情報・家電機器、光学機器等に加え、福祉機器、鉄道車両、航空機などあらゆる産業への波及が期待される。

高品位マグネシウム鍛造品の実用化を可能にする新たな技術は、我が国の製造業の国際競争力を高めるものである。

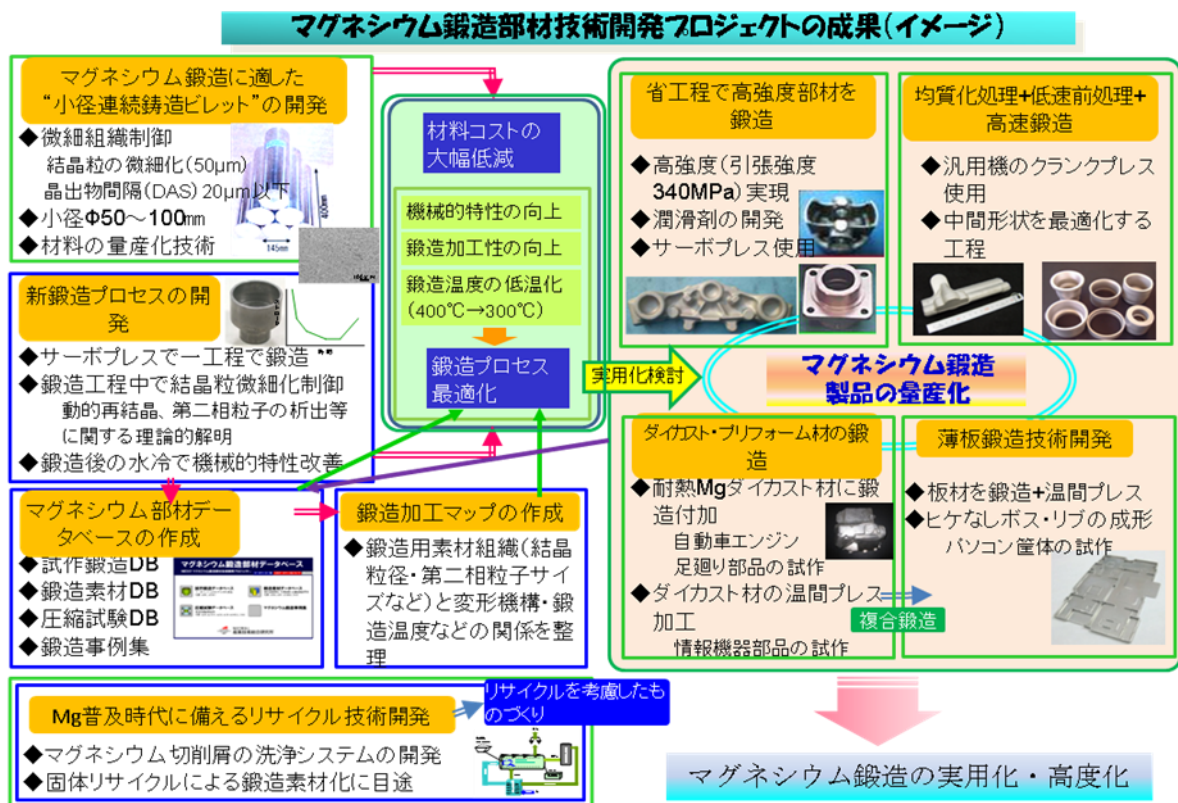


図1.4-1 プロジェクト成果のイメージまとめ

## V. 成果資料（委託事業）

### 1. 各種展示会での成果の発表リスト

大学・法人・企業名	展示内容
独立行政法人産業技術総合研究所・財団法人素形材センター	北海道洞爺湖サミット記念環境総合展 2008 ( 2008 年 6 月 19 日～ 21 日 )
独立行政法人産業技術総合研究所・財団法人素形材センター	環境にやさしい「クルマ」の技術産業展～なごやエコ クリーンカーフェア 2008 ～ ( 2008 年 11 月 7 日～11月 9 日 )
独立行政法人産業技術総合研究所・財団法人素形材センター	国際マグネシウム展 in つくば 2008 ( 2008 年 11 月 27 日～ 28 日 )
独立行政法人産業技術総合研究所・財団法人素形材センター	Nano tech 2009 ( 2009 年 2 月 18 日～ 20 日 )
独立行政法人産業技術総合研究所・財団法人素形材センター	国際マグネシウム展 in つくば 2009 ( 2009 年 10 月 1 日～ 3 日 )
独立行政法人産業技術総合研究所・財団法人素形材センター	産総研オープンラボ ( 2009 年 10 月 16 日～ 17 日 )
独立行政法人産業技術総合研究所	Nano tech 2010 ( 2010 年 2 月 17 日～ 19 日 )
独立行政法人産業技術総合研究所・財団法人素形材センター	第 2 回国際自動車素材・加工展 ( 2010 年 3 月 18 日～ 19 日 )
独立行政法人産業技術総合研究所・財団法人素形材センター	軽量化・高強度化技術展 2010 ( 2010 年 5 月 19 日～ 21 日 )
独立行政法人産業技術総合研究所・財団法人素形材センター	産総研オープンラボ ( 2010 年 10 月 14 日～ 15 日 )
独立行政法人産業技術総合研究所・財団法人素形材センター	中部地域公設研テクノフェア 2010 ( 2010 年 10 月 27 日～ 30 日 )
独立行政法人産業技術総合研究所・財団法人素形材センター	第 4 回つくば産産学連携促進市 in アキバ ( 2011 年 02 月 08 日 )
独立行政法人産業技術総合研究所・財団法人素形材センター	Nano tech 2011 ( 2011 年 2 月 16 日～ 18 日 )

## 2. 論文リスト

No.	発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2006年8月	Proceedings of The Sixth ISHPMIE (Halifax, Nova Scotia, Canada, August 27-September 1, 2006), pp. 77-86	Ignitability characteristics of aluminium and magnesium dusts relating to the shredding processes of industrial wastes	M. Nifuku, S. Koyanaka, H. Ohya, C. Barre, M. Hatori, S. Fujiwara, S. Horiguchi and I. Sochet
2	2006年8月	Proceedings of The Sixth ISHPMIE (Halifax, Nova Scotia, Canada, August 27-September 1, 2006), pp. 797-817	MODERATION OF DUST EXPLOSIONS	Paul R. Amyotte <sup>1</sup> , Michael J. Pegg, Faisal I. Khan, M. Nifuku and T. Yingxin
3	2006年10月	J. Mater. Res., 21, (2006), pp.754-760	Mechanical properties of AZ31 Mg alloy recycled by severe deformation	Y. Chino, T. Hoshika, J.-S.Lee and M. Mabuchi.
4	2006年11月	Mater. Sci. Eng. A, 424, (2006), pp. 335-360,	Influence of distribution of oxide contaminations on fatigue behavior in AZ31 Mg alloy recycled by solid-state processing	Y. Chino, T. Furuta, M. Hakamada and M. Mabuchi.
5	2006年12月	J. Mater. Sci., 41, (2006), pp.3229-3232,	Fatigue behavior of AZ31 magnesium alloy produced by solid-state recycling, J. Mater. Sci., 41, (2006), 3229-3232,	Y. Chino, T. Furuta, M. Hakamada and M. Mabuchi.
6	2006年12月	Mater. Sci. Eng. A, 435-436, (2006), pp.275-281	Enhanced corrosion properties of pure Mg and AZ31 Mg alloy recycled by solid-state process	Y. Chino, T. Hoshika and M. Mabuchi,.
7	2007年1月	MATERIALS SCIENCE FORUM, 544(2007), p.419-422	Noncombustible Magnesium Alloy Processed by Rotary-Die Equal Channel Angular Pressing Method	A. Watazu, I. Shigematsu, X. Huang, K. Suzuki and N. Saito
8	2007年6月	軽金属, 57(2007), pp.250-255.	熱間押出を利用したマグネシウム合金切削粉の新再生法	千野靖正、馬渕守
9	2007年7月	Journal of Loss Prevention in the	Ignitability characteristics of aluminium and	M. Nifuku, S. Koyanaka, H.

		Process Industries, 20 (2007), pp.322-329	magnesium dusts that are generated during the shredding of post-consumer wastes	Ohya, C. Barre, M. Hatori, S. Fujiwara, S. Horiguchi and I. Sochet
10	2007年7月	Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 20(2007), pp.675-687	Moderation of dust explosions	P.R. Amyotte, M.J. Pegg, F.I. Kahn, M. Nifuku, T. Yingxin
11	2007年9月	粉体および粉末冶金, 54(2007), pp.653-657	固化成形した Mg 切削粉の機械的特性	村越庸一、初鹿野寛一、松崎邦男
12	2007年9月	Proceedings of 2007 MP3(中国 北京), CD-ROM(ISBN : 978-981-05-9014-7)	Consolidation of Mg Alloy Chips by Hot Extrusion and Their Mechanical Properties	Y. Murakoshi, K. Hatsukano, K. Matsuzaki
13	2007年11月	Proceedings of 10th Asian Symposium on Precision Forging, pp.265-274	Deformation Behavior and Forgeability of Hot-Extruded AZ31 chips	K. Hatsukano, Y. Murakoshi, K. Matsuzaki, K. Shinozaki
14	2007年11月	Advanced Materials Research, 26-28 (2007), pp.449-452	Dynamic Recrystallization during Hot Extrusion in AZ31 and AZ80 Alloys	M. Honda, T. Uesugi, Y. Takigawa, H. Mabuchi and K. Higashi
15	2007年12月	Mater. Sci. Forum, (2007), pp.539-543	Superior corrosion resistance and mechanical properties of a Mg alloy recycled by solid-state process	Y. Chino, T. Hoshika and M. Mabuchi
16	2007年12月	Mater. Trans., 47 (2007), pp.1040-1046,	Mechanical and corrosion properties of AZ31 magnesium alloy repeatedly recycled by hot extrusion	Y. Chino, T. Hoshika and M. Mabuchi.
17	2008年1月	Journal of Materials Science, 43 (2008), pp. 2066-2068	Dynamic recrystallization behavior during compressive deformation in Mg-Al-Ca-RE alloy	M. Hakamada, A. Watazu, N. Saito and H. Iwasaki
18	2008年2月	Materials Transactions, 49 (2008), pp.554-558	Tensile Properties of Forged Mg-Al-Zn-Ca Alloy	M. Hakamada, A. Watazu, N. Saito and H. Iwasaki

19	2008年3月	粉体と工業、 40(2008), 57-63	リサイクルや廃棄物処理等 における粉じん爆発とその 特性	荷福正治
20	2008年5月	Materials Transactions ,49 (2008), pp.1032-10 37.	Effects of homogenization ann ealing on dynamic recrystalli zation in Mg-Al-Ca-RE (rare e arth) alloy	M. Hakamada, A. Watazu,N. Saito And H.Iwasaki
21	2008年7月	Proceedings of the Se venth International S ymposium on Hazards , Prevention, and Miti gation of Industrial E xplosions, 3, (2008) pp .27-35, St. Petersburg	Assessment of explosion risk of magnesium dust	M. Nifuku, H. Ohy a and S. Koyanaka
22	2008年9月	Materials Transaction s, 49(2008), pp.1979-1982	Effect of Initial Grain Size o n Dynamically Recrystallized Grain Size in AZ31 Magnesi um Alloy	Y.Takigawa,M.Hond a, T.Uesugi and K.Hig ashi
23	2008年10月	Materials Transactions, 49 (2008), pp.1093-110 0.	Deformation characteristics of recycled AZ91 Mg alloy conta ining oxide contaminants	Y. Chino and M. M abuchi
24	2008年11月	帯電の測定方法と静 電気障害対策（単行 本）、pp. 234～249 、サイエンス&テク ノロジー株式会社、 東京（2008）	（第4章第3節）粉体の取 扱における帯電現象と正しい測定方法および静電気対策	荷福正治
25	2009年4月	Materials Transactions, 50(2009), pp.711-718	Grain Refinement and Super plasticity Induced by Hot Com pression of Continuously-Cast ed Mg-9Al-1Zn-1Ca and Mg-9 Al-1Zn Alloys	M. Hakamada, A. Watazu, N. Saito and H. Iwasaki
26	2009年7月	Materials Transactions, 50(2009), pp.1898-1901	Tension/compression an-isotro py in hot forged Mg-Al-Ca-RE alloy	M.Hakamada, A.Watazu,N.Saito a nd H.Iwasaki
27	2009年8月	Scripta Materialia, 61 (2009), pp. 249-252.	Dynamic microstructural chan ges in Mg-9Al-1Zn alloy dur	S. W. Xu, N. Matsumoto,

			ing hot compression	S. Kamado, T. Honma and Y. Kojima
28	2009年8月	Materials Science and Engineering A, 517(2009), pp. 354-360.	Effect of pre-aging treatment on micro-structure and mechanical properties of hot compressed Mg-9Al-1Zn alloy	S. W. Xu, N. Matsumoto, K. Yamamoto, S. Kamado, T. Honma and Y. Kojima
29	2009年10月	Materials Science and Engineering A, 523(2009), pp. 47-52.	Effect of Mg <sub>17</sub> Al <sub>12</sub> precipitates on the microstructural changes and mechanical properties of hot compressed AZ91 magnesium alloy	S. W. Xu, N. Matsumoto, K. Yamamoto, S. Kamado, T. Honma and Y. Kojima
30	2009年10月	Proceedings of The 10th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology (EARTH2009) (2009), pp. 765-768	Automatic Sorting of Lightweight Metal Scrap by Sensing Apparent Density and Three Dimensional Shape	S. Koyanaka and K. Kobayashi
31	2009年10月	Magnesium, WILEY-VCH Verlag (2009), pp. 1091-1096	Technological development of forging for high-performance magnesium parts	H. Iwasaki, N. Saito, M. Hakamada, M. Sakamoto and K. Higashi
32	2009年11月	Proceedings of the 10th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology, pp. 765-768	Automatic Sorting of Non-Ferrous Metal Scraps by Sensing Apparent Density and Three-Dimensional Shape	S. Koyanaka and K. Kobayashi
33	2009年11月	Proceedings of 8th Int. Conf. on Magnesium Alloys and their Applications	Consolidation and Forging of AZ31 Chip Cleaned with Super Heat Steam	Y. Murakoshi, K. Matsuzaki, S. Koyanaka and M. Kimura
34	2009年12月	Proceedings of a Processing and Fabrication of Advanced Materials X VIII, pp. 48	Effects of Heavy Metal Additions on Deformation Characteristics at Elevated Temperatures in Magnesium	K. Sumimoto, T. Uesugi, Y. Takigawa and K. Higashi

		3-486(2009).		
35	2009年12月	Materials Science and Engineering A, 527(2009), pp. 52-60.	Recrystallization mechanism of as-cast AZ91 magnesium alloy during hot compressive deformation	S. W. Xu, S. Kamado, N. Matsumoto, T. Honma and Y. Kojima
36	2009年12月	Proceedings of the 7th Japan/Korea International Symposium on Resources Recycling and Material Science, pp.11-19	Fast identification of lightweight metal scrap generated in end-of-life vehicles shredder facility	S. Koyanaka
37	2010年2月	Journal of Materials Science, 45(2010), pp. 719-724	Effect of initial microstructures on hot forging of Ca-containing cast Mg alloys	M.Hakamada, K.Shimizu, Y.Yamashita, A.Watazu,N.Saito and H.Iwasaki
38	2010年2月	軽金属、60(2010), pp. 88-92	マグネシウム合金鍛造部材の強度・延性改善のための技術開発	斎藤尚文、渡津章、袴田昌高、岩崎源、坂本満
39	2010年4月	粉碎技術とエコ・リサイクル(単行本), NGT, 2010, pp.110-115	ソーティング分離	古屋仲茂樹
40	2010年5月	Resources Conservation and Recycling 2010, pp.54,571-578	Automatic sorting of lightweight metal scrap by sensing apparent density and three-dimensional shape	S. Koyanaka and K. Kobayashi
41	2010年7月	塑性と加工,51(2010), pp. 1043-1047	押出し固化成形を利用したマグネシウム合金切削屑の新再生法	馬淵守、千野靖正
42	2010年7月	Materials Transactions, 51(2010), pp.1249-1254	Investigation on Dynamic Friction Properties of Extruded AZ31 Magnesium Alloy Using Ring Upsetting Method	Li-Fu Chiang; H. Hosokawa, Jian-Yih Wang, T. Uesugi, Y. Takigawa and K. Higashi
43	2010年8月	金属、80(2010), pp.689-692	マグネシウム合金の鍛造技術	坂本満、袴田昌高、渡津章、斎藤

				尚文、重松一典、 岩崎源
44	2010年8月	Explosion Dynamics and Hazards(単行本), pp.237-246, TORUS PRESS, (Moscow 2010),	Assessment of explosion risk of magnesium dust	M. Nifuku, H. Ohya, S. Koyanaka
45	2010年8月	Explosion Dynamics and Hazards(単行本), pp.247-272, TORUS PRESS, (Moscow 2010)	Static electrification of powders and dust explosions	M. Nifuku
46	2010年8月	Scripta Materialia, 63(2010), pp.293-296	Recrystallization mechanism and the relationship between grain size and Zener-Hollomon parameter of Mg-Al-Zn-Ca alloys during hot compression	S.W. Xu, S. Kamado, T. Honma
47	2010年9月	型技術、25(2010), pp.24-28	マグネシウム成形における留意点	岩崎源、斎藤尚文、坂本満、重松一典、渡津章、袴田昌高、東健司
48	2010年9月	Steel Research International, 81(2010), pp.1279-1282	Hot Forging of Continuously Cast AZ91 Magnesium Alloy	H.Iwasaki, N.Saito, M.Hakamada, M.Sakamoto and K.Higash
49	2010年9月	Steel Research International, 81(2010), pp.1271-1274	Forging of Magnesium Billets Consolidated Dry Chip with Hot Press and Extrusion	Y. Murakoshi, K. Hata sukano, T. Shimizu and K.Matsuzaki
50	2010年10月	金属、80(2010), pp.923-928	マグネシウム合金連続鑄造材の鍛造特性	斎藤尚文、袴田昌高、岩崎源、坂本満
51	2010年10月	Materials Science and Engineering A, 527 (2010), pp.7143-7146	Dynamic recrystallization during hot compression of as-cast and homogenized noncombustible Mg-9Al-1Zn-1Ca (in mass%) alloys	M.Hakamada, A.Watazu, N.Saito and H.Iwasaki
52	2010年11月	金属 80(2010), pp.31-35	マグネシウム切削粉の固体リサイクル技術の開発	松崎邦男、村越庸一



53	2010年11月	Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering, 47(2010), pp.609-618	Automatic sorting system for lightweight metal scraps in the shredder of end-of-life vehicles	S. Koyanaka
54	2011年3月	Resources Conservation and Recycling, 55(2011), pp.515-523	Incorporation of neural network analysis into a technique for automatically sorting lightweight metal scrap generated by ELV shredder facilities	S. Koyanaka and K. Kobayashi
55	2011年3月	Magnesium Technology 2011, pp.485-489	Microstructure and Mechanical Properties of Solid State Recycled Mg Alloy Chips	K. Masuzaki, Y. Murakoshi and T. Shimizu
56	2011年3月	Materials Science and Engineering A, 528(2011), pp.2385-2393	Effect of homogenization on microstructures and mechanical properties of hot compressed Mg-9Al-1Zn alloy	S.W. Xu, S. Kamado, T. Honma
57	2011年8月	Science and Technology of Energetic Materials (日本火薬学会) 72(2011), pp.106-110	Explosibility characteristics of magnesium dust and detection of igniting spark in shredding process	M. Nifuku and S. Koyanaka
58	2011年	「軽金属」投稿中	AZ91マグネシウム合金連続鋳造棒と押し棒のすえ込み特性	渡津章、斎藤尚文、岩崎源、重松一典、坂本満

### 3. 口頭発表リスト

No.	発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
1	2006年 8月27日	The Sixth ISHPMIE (Halifax, Nova Scotia, Canada, August 27-September 1, 2006)	Ignitability characteristics of aluminium and magnesium dusts relating to the shredding processes of industrial wastes	M. Nifuku, S. Koyanaka, H. Ohya, C. Barre, M. Hatori, S. Fujiwara, S. Horiguchi and I. Sochet
2	2006年 8月27日	The Sixth ISHPMIE (Halifax, Nova Scotia, Canada, August 27-September 1, 2006), 2006年8月	MODERATION OF DUST EXPLOSIONS	Paul R. Amyotte1, Michael J. Pegg, Faisal I. Khan, Masaharu Nifuku and Tan Yingxin
3	2006年 11月19日	軽金属学会 第1 11回秋期大会	マグネシウム合金の上昇運 動支配型クリープにおける 耐クリープ性のサーベイと 評価	上杉徳照、山口昌 宏、瀧川順庸、東 健司
4	2006年 12月2日	日本金属学会北陸 信越支部 平成18 年度連合講演大会	圧縮変形に伴う展伸用マグ ネシウム合金の組織変化	小川健二、徐世偉 、鎌土重晴、小島 陽
5	2006年 12月7日	(社)粉体粉末冶 金協会 平成18年 度秋季大会	固化成形した Mg 切子の組 織と機械的性質	初鹿野寛一、村越 庸一、松崎邦男
6	2007年 1月12日	The 8 <sup>th</sup> international symposium on eco-materials processing and design(Kita-kyushu, Japan)	Noncombustible Magnesium Alloy Processed by Rotary-Die Equal Channel Angular Pressing Method	A. Watazu et al.
7	2007年 4月18日	粉塵爆発セミナー	粉塵爆発の基礎と災害防止	荷福正治
8	2007年 5月11日	第112回軽金属学 会春期大会	Mg-Al系合金の高温圧縮変 形特性	小川健二、徐世偉 、鎌土重晴、小島 陽
9	2007年 5月21日	産総研 環境・エ ネルギーシンポジ ウムシリーズ1	マグネシウムリサイクルプ ロセスでの安全性評価	荷福正治、古屋仲 茂樹、大矢仁史
10	2007年	第58回塑性加工連	熱間押しAZ31切削粉の変	初鹿野寛一、村越

	10月26日	合講演会	形挙動と鍛造性	庸一、松崎邦男
11	2007年 11月6日	環境資源工学会第 119回例会	レーザー3次元計測を用いた非鉄金属破砕片の識別分離技術	古屋仲茂樹、小林賢一郎、大矢仁史
12	2007年 11月6日	環境資源工学会第 119回例会	安全なリサイクルのためのマグネシウム粉の発火性測定	荷福正治、古屋仲茂樹、大矢仁史
13	2007年 11月7日	PRICM6—the Sixth Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing—(Jeju, Korea, Nov. 5-9, 2007)	Dynamic Recrystallization during Hot Extrusion in AZ31 and AZ80 Alloys	M. Honda, T. Uesugi, Y. Takigawa, H. Mabuchi and K. Higashi
14	2007年 11月11日	第113回軽金属学会秋期大会	Mg-Al系合金の高温圧縮変形特性	小川健二、徐世偉、鎌土重晴、小島陽
15	2007年 11月18日	日本機械学会第15回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2007)	AZ91マグネシウム合金の圧縮特性および機械的性質に及ぼすCa添加の影響	小川健二、徐世偉、鎌土重晴、小島陽
16	2007年 11月19日	(社)粉体粉末冶金協会平成19年度秋季大会	過熱水蒸気処理されたマグネシウムスクラップ材の固化とその機械的特性	村越庸一、初鹿野寛一、松崎邦男
17	2007年 12月1日	日本金属学会北陸信越支部・日本鉄鋼協会平成19年度北陸信越支部連合講演会	Mg-Al-Ca合金の高温変形時のミクロ組織変化	松本尚也、徐世偉、本間智之、鎌土重晴、小島陽
18	2007年 12月5日	第30回半溶融・半凝固加工分科会	マグネシウム切削粉の固化成形とその機械的性質	初鹿野寛一
19	2008年 3月27日	日本金属学会2008年春期(第142回)大会	Mg-Al-Ca-RE合金の動的再結晶に及ぼす均質化熱処理の影響	袴田昌高、渡津章、斎藤尚文、岩崎源
20	2008年 3月27日	日本金属学会2008年春期大会(東京	AZ31マグネシウム合金の動的再結晶挙動におよぼす初	本田雅義、上杉徳照、瀧川順庸、東

		、2008年3月26～28日)	期粒径の影響	健司
21	2008年 3月27日	資源・素材学会春季大会	レーザー3次元解析を用いた非磁性金属破砕片(銅、アルミ、マグネシウム)の識別分離	古屋仲茂樹、小林賢一郎、大矢仁史
22	2008年 5月10日	軽金属学会 第114回春期大会	マグネシウム合金の積層欠陥エネルギーに及ぼす溶質原子濃度の影響	内田修平、本田雅義、上杉徳照、瀧川順庸、東健司
23	2008年 5月10日	軽金属学会 第114回春期大会	高温変形に伴うAZ91マグネシウム合金のミクロ組織変化	松本尚也、徐世偉、本間智之、鎌土重晴、小島陽
24	2008年 5月10日	軽金属学会 第114回春期大会	AZ91マグネシウム合金時効処理材高温圧縮変形に伴うミクロ組織変化	徐世偉、松本尚也、本間智之、鎌土重晴、小島陽
25	2008年 5月20日	粉体工学会 2008年度春期研究発表会	粉じん爆発における着火性	荷福正治、大矢仁史、古屋仲茂樹
26	2008年5月 29日	(社)粉体粉末冶金協会 平成20年度春季大会	固化成形プロセスがマグネシウム合金切削粉の脱脂に及ぼす効果	村越庸一、松崎邦男、西郷宗玄、大矢仁史、木村正人
27	2008年 6月9日	3 <sup>rd</sup> International Symposium on Magnesium	Microstructure changes of Mg-Al-Ca alloys with high temperature deformation	S. Xu, N. Matsumoto, K. Yamamoto, S. Kamado, T. Honma, Y. Kojima
28	2008年 6月12日	International Materials Research Conference 2008	Contribution of Solid Solution Strengthening in High Creep Resistant Magnesium Alloys	Y. Takigawa, T. Uesugi, K. Kurushima, H. Tsuda, S. Mori and K. Higashi
29	2008年 7月11日	Proceedings of the Seventh International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, 3, (2008) 73-96, St. Petersburg	Static electrification of powder and dust explosion	M. Nifuku
30	2009年	平成20年度産業	マグネシウム合金の鍛造技	渡津 章、

	01月27日	技術連携推進会議 ナノテクノロジー・材料部会 研究発表会	術の開発研究	袴田昌高、岩崎源 、 齋藤尚文
31	2009年 2月13日	環境資源工学会 第18回シンポジウム	廃車シュレッダー処理で発生するAl、Mgスクラップの自動選別技術	古屋仲茂樹
32	2009年 3月10日	2009年度 第1回静電気学会 研究会	粉じん雲の着火性評価に関する考察	荷福正治
33	2009年 3月26日	資源・素材学会 平成21年度春季大会	廃車シュレッダー処理で発生する非鉄ミックスメタルの自動選別技術 -ニューラルネットワークの活用-	古屋仲茂樹、小林賢一郎、小林幹男
34	2009年 5月21日	軽金属学会 第116回春期大会	マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト(マグネシウム鍛造部材のミクロ組織と特性その1)	袴田昌高、渡津章、齋藤尚文、坂本満、岩崎源
35	2009年 5月21日	軽金属学会 第116回春期大会	マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト(マグネシウム鍛造部材のミクロ組織と特性その2)	袴田昌高、渡津章、齋藤尚文、坂本満、岩崎源
36	2009年 5月21日	軽金属学会 第116回春期大会	マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト(高信頼性マグネシウム合金鍛造部材製造プロセスの開発その1)	岩崎源、齋藤尚文、渡津章、袴田昌高、坂本満、笹谷純子、田邊秀一
37	2009年 5月21日	軽金属学会 第116回春期大会	マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト(高信頼性マグネシウム合金鍛造部材製造プロセスの開発その2)	岩崎源、齋藤尚文、渡津章、袴田昌高、坂本満、笹谷純子、田邊秀一
38	2009年 5月21日	軽金属学会 第116回春期大会	マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト(マグネシウム合金の第二相粒子と動的再結晶挙動の関係)	鎌土重晴、徐世偉 松本尚也、本間智之 小島陽
39	2009年	軽金属学会	高温圧縮変形に伴うAZ91合金鍛造材の再結晶メカニズム	徐世偉、松本尚

	5月21日	第116回春期大会	ム、(優秀ポスター発表賞)	也、春原宏樹、本間智之、鎌土重晴、小島陽
40	2009年 5月21日	軽金属学会 第116回春期大会	マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト(マグネシウム合金の溶質元素と動的再結晶挙動の関係)	瀧川順庸、上杉徳照、森茂生、津田大、辻川正人、間淵博
41	2009年 5月21日	軽金属学会 第116回春期大会	マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト - 固体系リサイクル材の鍛造素材化 -	村越庸一、松崎邦男、古屋仲茂樹、木村正人
42	2009年 5月30日	平成21年度(第40回)塑性加工春季講演会	連続 casting Mg合金の高温圧縮鍛造による組織・引張特性変化	袴田昌高、渡津章、斎藤尚文、岩崎源
43	2009年 5月30日	平成21年度(第40回)塑性加工春季講演会	マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクトにおける試作鍛造品	岩崎源、斎藤尚文、渡津章、袴田昌高、坂本満、笹谷純子、東健司
44	2009年 6月4日	(社)粉体粉末冶金協会平成21年度春季大会	マグネシウム切削粉の後方押し鍛造 - 鍛造条件の影響 -	村越庸一、松崎邦男、西郷宗玄、古屋仲茂樹、木村正人
45	2009年 6月24日	2009年度第2回静電気学会静電気障害研究委員会	粉じん爆発試験の着火源に関する問題	荷福正治、古屋仲茂樹
46	2009年 8月28日	International Conference on PROCESSING & MANUFACTURING OF ADVANCED MATERIALS (THERMEC'2009)	Contribution of Solid Solution Strengthening In Creep Resistance of Magnesium Alloys	Y. Takigawa, T. Uesugi K. Higashi
47	2009年 8月29日	International Conference on Processing and Manufacturing on Advanced Materials	Formability of AZ31 Alloys Prepared by Hot-extrusion of Their Machined Chips	松崎邦男、村越庸一、清水透、菊地薫

48	2009年 9月15日	日本金属学会2009年秋期(第145回)大会	Sn, Pb, In を添加した 2 元系マグネシウム固溶体の高温変形特性	住本健一, 上杉徳照, 瀧川順庸, 東健司
49	2009年 9月16日	日本金属学会2009年秋期(第145回)大会	AZX911 Mg 合金鑄造材の高温圧縮鍛造に及ぼす初期組織の影響	袴田昌高, 清水和紀, 山下友一, 渡津章, 斎藤尚文, 岩崎源
50	2009年 9月23日	The 3rd Asian Symposium on Magnesium Alloys, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, China, p.276.	Recrystallization mechanism of as-cast AZ91 magnesium alloy during hot compressive deformation (Outstanding Poster Award)	S. W. Xu, S. Kamado, N. Matsumoto, T. Honma, Y. Kojima
51	2009年 10月9日	軽金属学会東海支部・若手研究者ポスター講演会および特別講演会	連続鑄造マグネシウム合金の高温圧縮鍛造による高性能化	袴田昌高, 渡津章, 斎藤尚文, 岩崎源
52	2009年 10月22日	粉体工業展大阪2009 粉じん爆発セミナー	静電気の基礎と対策	荷福正治, 古屋仲茂樹
53	2009年 10月28日	8th International Conference on Magnesium Alloys and Their Applications	Technological development of forging for high-performance magnesium parts	H. Iwasaki, N. Saito, M. Hakamada, A. Watazu, M. Sakamoto
54	2009年 11月4日	10th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology	Automatic Sorting of Non-Ferrous Metal Scraps by Sensing Apparent Density and Three-Dimensional Shape	S. Koyanaka and K. Kobayashi
55	2009年 11月15日	軽金属学会第117回秋期大会	軽金属におけるスカンジウム添加による影響の第一原理計算による検討	上杉徳照, 東健司
56	2009年 11月15日	軽金属学会第117回秋春期大会	マグネシウム合金切削粉から製造した素材の後方鍛造	村越庸一, 初鹿野寛一, 松崎邦男
57	2009年 11月26日	8th Int. Conf. on Magnesium Alloys and	Consolidation and Forging of AZ31 Chip Cleaned with Super	Y. Murakoshi, K. Matsuzaki, S. Koyanaka,

		their Applications	Heat Steam	M. Kimura
58	2009年 11月30日	Materials Research Society (MRS) 2009 Fall Meeting	Suzuki Effect and Stacking Fault Energies for Cu Based Binary Alloys Using First-Principles Results of Segregation Energy	T. Uesugi K. Higashi
59	2009年 12月7日	第19回日本MRS 学術シンポジウム	偏析エネルギーの第一原理計算結果を用いた銅合金の積層欠陥エネルギーの算出	上杉徳照, 東健司
60	2009年 12月12日	Processing and Fabrication of Advanced Materials(PFAM) 18	Effects of Heavy Metal Additions on Deformation Characteristics at Elevated Temperatures in Magnesium	K. Sumimoto, T. Uesugi, Y. Takigawa K. Higashi
61	2009年 12月16日	7th Japan/Korea International Symposium on Resources Recycling and Material Science	Fast identification of lightweight metal scrap generated in end-of-life vehicles shredder facility	S. Koyanaka
62	2010年 1月6日	軽金属学会関西支部主催若手研究者・院生による研究発表会	Mg-Sn合金における高温変形特性の調査及び動的再結晶挙動の解明	住本健一, 上杉徳照, 瀧川順庸, 東健司
63	2010年 1月14日	(社)日本アルミニウム協会技術サロン	廃車シュレッダー処理で発生する軽金属スクラップの自動選別技術	古屋仲茂樹
64	2010年 1月28日	名古屋工業技術協会講演会	高信頼性マグネシウム鍛造部材製造技術の開発	斎藤尚文、岩崎源、袴田昌高、重松一典、坂本満
65	2010年 2月17日	日本労働安全衛生コンサルタント会城南部会	粉体の帯電現象と粉じん爆発	荷福正治
66	2010年 2月19日	産総研技術シーズ発表 in 東葛テクノプラザ	非鉄金属スクラップの自動ソーティングシステム	古屋仲茂樹
67	2010年 2月19日	Nano Tech 2010	マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト	斎藤尚文、岩崎源、袴田昌高、重松一典、渡津章、坂本満



68	2010年 3月30日	資源・素材学会 平成22年度春季大会	廃車シュレッダー処理で発生する軽金属スクラップの識別・分離技術－複数施設への適用性に関する検討－	古屋仲茂樹、小林賢一郎
69	2010年 4月15日	粉体工業展名古屋 2010最新情報セミナー	粉じん爆発 最小着火エネルギーの測定	荷福正治
70	2010年 5月23日	軽金属学会 第118回春期大会	マグネシウム合金における溶質原子のミスフィットひずみの第一原理計算	上杉徳照、東健司
71	2010年 5月10日	軽金属学会 第118回春期大会	350℃における高温圧縮変形中のAZ91合金鑄造材の再結晶メカニズム	徐世偉、鎌土重晴、本間智之
72	2010年 5月23日	軽金属学会 118回春期大会	マグネシウム合金切削粉から製造した素材の後方鍛造におけるパンチの影響	村越庸一、初鹿野寛一、清水透、松崎邦男
73	2010年 6月9日	第2回産総研マグネシウムシンポジウム	マグネシウム連続鑄造材の鍛造特性	斎藤尚文、岩崎源、袴田昌高、重松一典、渡津章、坂本満
74	2010年 7月7日	第65回PSEセミナー 現場で役立つ基礎からの粉体技術講座“粉体装置・プロセスにおけるトラブルとその対策”	粉じん爆発の危険性とその防止対策	荷福正治
75	2010年 7月8日	軽金属学会 関西支部「関西軽金属サマースクール」	マグネシウム合金の高温変形および動的再結晶挙動における固溶元素の効果	瀧川順庸
76	2010年 7月14日	平成22年度第1回粉じん爆発委員会事例勉強会	可燃性粉じんの爆発性と着火性の評価	荷福正治
77	2010年 8月9日	軽金属学会関東支部・若手研究者ポスター発表会	高温圧縮変形に伴うAZ91合金均質化処理材の再結晶メカニズムに及ぼす圧縮温度の影響	徐世偉、鎌土重晴、本間智之

78	2010年 9月10日	8th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions	Explosibility characteristics of magnesium dust and detection of igniting spark in shredding process	M. Nifuku and S. Koyanaka
79	2010年 9月21日	The 13th International Conference on Metal Forming	Hot Forging of Continuously Cast AZ91 Magnesium Alloy	H.Iwasaki, N.Saito, M.Hakamada, M.Sakamoto, K.Higashi
80	2010年 9月22日	Metal Forming 2010	Forging of Magnesium Billets Consolidated Dry Chip with Hot Press and Extrusion	村越庸一、初鹿野寛一、清水透、松崎邦男
81	2010年 9月23日	日本物理学会2010秋期大会	偏析エネルギーの第一原理計算結果を用いたCu合金の積層欠陥エネルギーの算出	上杉徳照、東健司
82	2010年 9月25日	日本金属学会2010年秋期(第147回)大会	リング圧縮試験によるマグネシウム合金の摩擦係数測定と組織変化観察	西岡典昭、江立夫、上杉徳照、瀧川順庸、東健司
83	2010年 9月25日	The 4th International Conference on Magnesium	The influence of deformation temperature on the recrystallization mechanism of homogenized AZ91 magnesium alloy during hot compressive deformation	S.W. Xu, S. Kamado, T. Honma
84	2010年 10月16日	第61回塑性加工連合講演会	AZ91マグネシウム合金連铸材の動的組織制御による熱間すえ込み加工限界の増加	岩崎源、斎藤尚文、坂本満、東健司、渡津章、重松一典、関口常久
85	2010年 10月26日	2010 Asian Forum on Light Metals	Dynamic microstructural changes during hot extrusion and mechanical properties of a Mg-5.99 Zn-1.76 Ca-0.35 Mn (wt.%) alloy	S. W. Xu, S. Kamado, T. Honma
86	2010年 11月11日	(社)粉体粉末冶金協会平成22年度秋季大会	AZ31切削粉をリサイクルした素材の鍛造	村越庸一、初鹿野寛一、清水透、松崎邦男、古屋仲茂樹、木村正人

87	2010年 11月13日	軽金属学会 第119回秋期大会	高温圧縮変形に伴うAZ91合金均質化処理材の再結晶メカニズムに及ぼす圧縮温度の影響	徐世偉、土重晴、 本間智之
88	2010年 11月14日	軽金属学会 第119回秋期大会	AZ31板材スクラップをリサイクルした素材の鍛造加工	村越庸一、初鹿野 寛一、清水透、松 崎邦男
89	2010年 11月16日	2010 Far-East Asia n Symposium on th e Educational Progr am of Energy & R esources Engineerin g	Fast identification of lightweig ht metal scrap generated in e nd-of-life vehicles shredder fa cility	S. Koyanaka
90	2010年 11月17日	The 5th Pan-Yellow Sea Rim Internatio nal Symposium on Magnesium Alloys(Y SR5)	Stacking fault energies in Mg- Al and Mg-Y alloys using firs t-principles results	T. Uesugi and K. Higashi
91	2010年 11月17日	The 5th Pan-Yellow Sea Rim Internatio nal Symposium on Magnesium Alloys(Y SR5)	Strain-rate and temperature d ependences of dynamic friction properties and microstructura l evolution in AZ31 magnesi um alloy	N. Nishioka, Li-Fu Chiang, T. Uesugi, Y. Takigawa and K. Higashi
92	2010年 11月17日	The 5th Pan-Yellow Sea Rim Internatio nal Symposium on Magnesium Alloys(Y SR5)	Influence of tin concentration on high temperature deformat ion behavior in Mg-Sn alloys	K. Sumimoto, T. Ue sugi, Y. Takigawa a nd K. Higashi
93	2010年 11月18日	第19回素材工学研 究懇談会	Mg 切削粉の固体リサクル 技術の開発	松崎邦男、村越庸 一
94	2010年 11月25日	セミナー「これか らのマグネシウム 鍛造の可能性を拓 く」	高信頼性マグネシウム合金 鍛造部材製造プロセスの開 発	斎藤尚文、岩崎 源、袴田昌高、重 松一典、渡津章、 坂本満
95	2010年 11月25日	Mg 鍛造部材技術 開発セミナー	マグネシウム材をリサイク ル可能とする ための不純	古屋仲茂樹

			物除去技術の開発	
96	2010年 11月25日	Mg 鍛造部材技術 開発セミナー	固体リサイクル材の鍛造素 材化	松崎邦男、村越庸 一
97	2010年 12月2日	全国公設試験研究 機関素形材技術担 当者会議	マグネシウム合金連続鍛造 材の鍛造特性	斎藤尚文、岩崎 源、袴田昌高、重 松一典、渡津章、 坂本満
98	2010年 12月4日	平成22年度連合講 演会	AZ91マグネシウム合金高温 圧縮材のミクロ組織と機械 的性質に及ぼすカルシウム 添加量の影響	吉増龍一、内田フ ランソワオリヴィ エ、徐世偉、本間 智之、鎌土重晴
99	2011年 1月7日	軽金属学会関西支 部主催若手研究者 ・院生による研究 発表会	マグネシウム合金の変形時 の摩擦係数に及ぼす各種因 子の影響	西岡典昭、江立夫 、上杉徳照、瀧川 順庸、東健司
100	2011年 1月7日	軽金属学会関西支 部主催若手研究者 ・院生による研究 発表会	マグネシウム2元系合金の 高温変形挙動	住本健一、上杉徳 照、瀧川順庸、東 健司
101	2011年 1月14日	第53回粉体技術専 門講座～粉碎技術 とエコ・リサイク ル～	廃自動車の破砕処理で発生 する金属スクラップの機械 的分離技術	古屋仲茂樹
102	2011年 2月1日	TAMOP-4.2.2 -08/1/2 008-0016, College of Dunaujvaros (H ungary)	Static electrification of powder and dust explosion	M. Nifuku
103	2011年 2月18日	nano tech2011 第10 回国際ナノテクノ ロジー総合展・技 術会議	高信頼性マグネシウム合金 鍛造部材製造プロセスの開 発	斎藤尚文、岩崎 源、袴田昌高、重 松一典、渡津章、 坂本満
104	2011年3月 3日	TMS2011	Microstructure and Mechanica l Properties of Solid State Rec ycled Mg Alloy Chips	K. Matsuzaki, Y. M urakoshi and T. Sh imizu

#### 4. 特許リスト

出願日	受付番号	出願に係る特許等の 標題	出願人
平成 20 年 4 月 22 日	特願 2008-111521	非磁性金属の識別方法及び識別回収装置	古屋仲茂樹、小林賢一郎
平成 21 年 2 月 20 日 (産総研知的財産部に登録)	2009000204	Mg-Al系押し出し材鍛造データベース	産業技術総合研究所、 素形材センター
平成 21 年 1 月 28 日	特願 2009-016139	非磁性金属の識別方法	古屋仲茂樹、小林賢一郎
平成 21 年 2 月 24 日 (産総研知的財産部に登録)	2009000534	AZ系押出材以外材料鍛造データベース	産業技術総合研究所、 素形材センター
平成 21 年 2 月 24 日 (産総研知的財産部に登録)	2009000551	モデル鍛造品 1 鍛造データベース Ver1	産業技術総合研究所、 素形材センター
平成 21 年 2 月 24 日 (産総研知的財産部に登録)	2009000552	モデル鍛造品 2 鍛造データベース Ver1	産業技術総合研究所、 素形材センター
平成 21 年 2 月 24 日 (産総研知的財産部に登録)	2009000553	モデル鍛造品 2 鍛造データベース Ver1	産業技術総合研究所、 素形材センター

## 5. 受賞リスト

- 1) 2007年5月25日、平成19年度(第42回)日本塑性加工学会優秀賞会田技術奨励賞(軽金属材料の塑性変形挙動に関する研究)
- 2) 2009年9月15日、日本金属学会論文賞若手講演論文部門第22号、袴田昌高(論文題目: Grain Refinement and Superplasticity Induced by Hot Compression of Continuously-Casted Mg-9Al-1Zn-1Ca and Mg-9Al-1Zn Alloys、著者: 袴田昌高、渡津章、斎藤尚文、岩崎源)
- 3) 2009年 第116回軽金属学春期大会優秀ポスター発表賞、徐世偉, 松本尚也, 春原宏樹, 本間智之, 鎌土重晴, 小島陽: 「高温圧縮変形に伴うAZ91合金鑄造材の再結晶メカニズム」
- 4) 2009年9月23日 Outstanding Poster Award: The 3rd Asian Symposium on Magnesium Alloys、S. W. Xu, S. Kamado, N. Matsumoto, T. Honma and Y. Kojima: 「Recrystallization mechanism of as-cast AZ91 magnesium alloy during hot compressive deformation」, The 3rd Asian Symposium on Magnesium Alloys, Shenyang, China, September 21-23, 2009.
- 5) 2010年1月6日、軽金属学会関西支部主催若手研究者・院生による研究発表会、ベストポスター賞、住本健一, 上杉徳照, 瀧川順庸, 東健司、「Mg-Sn合金における高温変形特性の調査及び動的再結晶挙動の解明」
- 6) 2010年6月3日、環境資源工学会 平成22年度技術賞、古屋仲茂樹、「廃車シュレッダー処理で発生するAl、Mgスクラップの自動選別技術」
- 7) 2010年11月17日、Best Poster Award, First Prize、N. Nishioka, Li-Fu Chiang, T. Uesugi, Y. Takigawa and K. Higashi、「Strain-rate and temperature dependences of dynamic friction properties and microstructural evolution in AZ31 magnesium alloy」、The 5th Pan-Yellow Sea Rim International Symposium on Magnesium Alloys (YSR5), November 16-18, 2010.
- 8) 2011年1月7日、軽金属学会関西支部主催若手研究者・院生による研究発表会ベストポスター賞、住本健一, 上杉徳照, 瀧川順庸, 東健司、「2元系マグネシウム合金の高温変形特性」、平成23年1月7日 社団法人軽金属学会関西支部より
- 9) 2011年3月16日、第19回アルミニウム鍛造賞、清水和紀、宮本尚明、森脇孝、斎藤尚文、組織制御を伴う素材製造法・鍛造法の開発

## 事前評価書

	作成日	平成 18 年 2 月 8 日
1. 事業名称 (コード番号)	マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト (革新的部材産業創出プログラム)	
2. 推進部署名	ナノテクノロジー・材料技術開発部	
3. 事業概要	<p>(1) 概要</p> <p>マグネシウムは実用金属中最も軽く、鉄鋼やアルミニウムに対して比強度、比剛性で優れた材料である。さらに成形加工における優位性やリサイクルに要するエネルギー消費が少ない循環型素材としての特性を持つ。これらの特長からマグネシウム合金は主に自動車と家電において用途が拡大しており、諸外国においてもマグネシウム成形技術開発が進められている。</p> <p>こうしたなか、マグネシウムの冷間鍛造についての新発見等、我が国が世界をリードする基礎研究成果と、我が国に蓄積された金型設計、製造技術等の現場の技術優位性を活用してマグネシウム合金鍛造技術課題を克服し、川下産業の技術革新を支えていくことが重要な課題となっている。</p> <p>本プロジェクトではマグネシウム合金部材について、製品歩留まりが高く、高耐疲労性を付与する鍛造技術の開発を行う。強度が求められる高信頼性鍛造部材開発（自動車部品等）、および精度が求められる高精密鍛造部材開発（情報家電用精密筐体等）として研究開発を進める。すなわち、ビレットの指向性凝固組織や部分鍛造を活用した鍛造法の開発、および複雑な形状を有する部材に対して、高精度鍛造を可能にするための複合成形技術の開発を行って、高性能鍛造部材の製造技術を確立する。</p> <p>また、循環型素材としてのマグネシウム合金部材の特性を活かし、リサイクル前処理技術、およびマグネシウム合金の再生技術の検討を行い、リサイクル材の鍛造用ビレット化に係る課題抽出と課題解決のための技術開発を行う。さらに、マグネシウム合金のリサイクルシステムの提案と安全性評価を行う。</p> <p>(2) 事業規模：35億円</p> <p>(3) 事業期間：平成18年度～22年度（5年間）</p>	

#### 4. 評価の検討状況

##### (1) 事業の位置付け・必要性

マグネシウム合金は、その軽量性とリサイクルに要するエネルギー消費が少ない循環型素材としての可能性から、おもに自動車部品と家電製品において用途が拡大してきており、欧米や中国などの諸外国においてもマグネシウム成形技術開発が進められている。

自動車ならびに家電分野は、日本が強みとする産業分野であり他産業への波及効果も大きい。それらの競争力の維持・強化を図るためには、世界をリードする国内のマグネシウム合金に関わる基盤技術、および金型設計、鍛造技術等の我が国ものづくり技術の優位性を活用した本事業を推進することが必要である。

部材分野の技術戦略マップでは、医療・福祉／安全・安心分野、環境・エネルギー分野、ならびに情報家電分野において、耐疲労性の向上、部材コストの削減とともに、軽量化による省エネルギー効果の観点からもマグネシウム部材の可能性・重要性が指摘されている。そして、これらの分野は経済産業省の新産業創造戦略において世界を勝ち抜く先端産業群に位置付けられている。



## (2) 研究開発目標の妥当性

本事業では、ビレットの指向性凝固組織や部分鍛造を活用した鍛造法を開発し、高強度・高耐疲労性部材を製造できる鍛造技術を確立する。また、複雑な形状を有する部材に対して、高精度鍛造を可能にするために、ダイカストを併用した成形技術を用いる複合成形技術を開発する。これら鍛造に関する共通基盤技術として鍛造特性の解明を行う。

また、コスト低減と循環型素材としての可能性の観点から、リサイクル技術の検討を行い、リサイクル材の鍛造用ビレット化に係る課題抽出を行い、課題解決のための技術開発とリサイクルシステムの提案と安全性評価を行うことも目標とする。

目標として以下を設定する。

共通基盤技術（委託事業）

### ①マグネシウム試作鍛造部品の評価、解析、データ集積

中間目標：川下産業に要求される鍛造部材に対応するモデル部材を対象に、鍛造部材製造に必要な素材の組成、組織と鍛造条件の設定を可能とする鍛造用素材の結晶組織と変形機構との関係をデータベース化する。

最終目標：鍛造部材製造における素材特性、加工条件、部品特性の関連性を整理し、鍛造部材の評価方法を確立する。

### ②マグネシウム合金鍛造加工における微細組織と変形機構との関連性の解明

中間目標：鍛造用耐熱合金ビレットに要求される素材組織を明らかにし、耐熱合金ビレットの連続鍛造条件を決定するために必要な結晶粒径や結晶形態等のパラメーターを明らかにする。

鍛造素材組織と鍛造加工性の関係解明において実施した組織微細化技術を適用して、結晶（等軸状もしくは柱状）の平均粒径が  $50\mu\text{m}$  以下の凝固組織を持つ耐熱合金ビレットの連続鍛造技術の開発に貢献する。

最終目標：鍛造用素材の組織の結晶粒子と変形機構の関係についてデータベース化を進め、鍛造加工マップとして整備することによって、実用的な鍛造温度低温化技術を開発し、実用化レベルの部材として  $170\text{MPa}$  ( $10^7$ 回) の疲労強度を持つ構造用マグネシウム鍛造部材の最適な鍛造加工手順を導出するための鍛造組織形成技術の基盤技術を構築する。

### ③マグネシウム合金のリサイクルに係る課題抽出

中間目標：・切削粉等の工場内スクラップにおける含有炭素を  $0.1\%$  以下にするリサイクルシステムを構築し、マグネシウムハンドリング時の安全性評価方法に必要な主要因を明らかにする。

・固体リサイクル材の鍛造用ビレットへの適用目的として、圧縮率  $0.64$  以上の変形性を発現させるために必要な組織および不純物組成の限界を明ら

かにする。

最終目標：・従来のカスケード型リサイクル（低品位素材へのリサイクル）に代えて、リサイクル材料が新材料と同等の特性を維持する市中スクラップリサイクル基盤技術の開発を行うとともに、総合的なマグネシウムリサイクルについての信頼性評価、データ集積を行う。

・大量排出時を想定した市中回収品スクラップの前処理技術（分別、分離、不純物除去など）の課題摘出し、市中スクラップリサイクル基盤技術を提案する。実用化技術（助成事業）

#### 実用化技術（助成事業）

以下の事業は、共通基盤技術の成果を活用して実施する。

##### ④マグネシウム合金の鍛造用ビレット調整技術開発

最終目標：結晶粒径（粒状組織）もしくは指向性凝固組織の平均粒径が  $50\mu\text{m}$  以下の凝固組織を持つ耐熱合金ビレットの連続鍛造技術を開発する。

##### ⑤マグネシウム合金の鍛造部材開発（輸送用機器、ロボット）

最終目標：・耐熱部材として、締結フランジ部の構造に対し、現状マグネシウム構造部材として実用的に要求される残存軸力して  $6400\text{N}$  の締結力維持を達成する複合鍛造技術を開発する。

・耐疲労部材として、引張強度  $340\text{MPa}$ 、伸び  $15\%$ 以上、疲労強度  $170\text{MPa}$  ( $10^7$ 回) を有する実用部材が供給可能な鍛造技術を開発し、実用化検証を行う。

##### ⑥マグネシウム合金の鍛造部材開発（情報家電用機器）

最終目標：複雑な形状を持つ部材を製造できる技術を開発し、A3 サイズ大の高精密大型部材として平坦度  $0.1\text{mm}/40\text{mm}$  の実用部材が供給可能な鍛造技術を開発し、実用化検証を行う。

##### ⑦マグネシウム合金のリサイクルに係る技術開発

最終目標：工場内スクラップの連続処理方式における表面付着物除去（含有炭素  $0.1\%$ 以下）を達成する技術開発を行う。また、工場内スクラップに対する固体リサイクル前処理システムとしてその有用性を検証する。

これらの目標設定に関しては、川下側ユーザー企業へのヒアリング結果を反映していることから、目標として妥当である。

### (3) 研究開発マネジメント

公募を行い最適な研究開発体制を構築する。最終ユーザーのニーズに対応する材料メーカー、機器メーカーの垂直連携体制を構築し、実用化までの加速を図る。

プロジェクト開始後3年目に中間評価を行い、その評価結果を踏まえ、事業全体を見直すことを想定している。

### (4) 研究開発成果

本事業の成果としてマグネシウム鍛造部材製造技術の基盤を構築し、我が国の自動車、家電等の川下産業競争力の維持・強化に不可欠な高性能部材を供給することができる。

### (5) 実用化・事業化の見通し

本事業でマグネシウム合金の高性能鍛造部材開発技術を確立した後、この製造技術基盤を元に大量生産技術を開発する。事業後半で生産技術の目処をつけ、終了後3年後の本格的生産実現を目指す。鍛造加工業者は開発された高性能鍛造技術によって、ユーザー企業から提示されたスペックに基づくプロトタイプ製造を通じて高性能鍛造技術基盤を構築する。事業終了後、川下との更なる摺り合わせに活用することによって、マグネシウム高性能鍛造製品の事業展開を行う。2010年におけるマグネシウム部材の国内市場は、自動車用約1,900億円、情報家電用約320億円程度と予想される。

### (6) その他特記事項

本事業は、今後市場拡大が予想されるマグネシウム産業の強化を図ることである。そのためには、川上・川下の連携や産学官の連携により、こうした企業が保有する技術・技能を活用することが重要かつ必要である。

このように関係者が多岐に渡る体制を整備するためには、NEDOの事業として取り組む必要がある。

本事業の他にNEDOのマグネシウム関連事業としては、平成16～18年度「SF<sub>6</sub>フリー高機能発現マグネシウム合金組織制御技術開発プロジェクト」があり、この中では結晶粒を微細化する凝固プロセス技術の開発を行っている。これは本事業の対象出口とは異なるものの、この成果は本事業における鍛造用ビレットの製造に関する材料開発に活かされることになる。

## 5. 総合評価

NEDOの実施する事業として適切であると判断する。

## 「マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト 基本計画（案）」に対するパブリックコメント募集の結果について

平成18年3月13日  
NEDO技術開発機構  
ナノテクノロジー材料技術開発部

NEDO POST 3において標記基本計画（案）に対するパブリックコメントの募集を行いました結果をご報告いたします。  
みなさまからのご協力を頂き、ありがとうございました。

### 1. パブリックコメント募集期間

平成18年2月15日～平成18年2月21日

### 2. パブリックコメント投稿数＜有効のもの＞

計0件

以上