

マグネシウム合金連続鍛造材の鍛造プロセス開発

— 結晶粒微細化を利用した鍛造技術 —

斎藤 尚文^{1*}、岩崎 源²、坂本 満³、神原 和夫⁴、関口 常久⁴

省エネルギー・省資源等の社会的要請を背景に、広範囲の工業製品において軽量化が課題となっている。マグネシウム合金は構造用金属材料の中で最も軽量であるため、この課題解決に対する有力な候補である。マグネシウム合金部材の作製法として、寸法精度、部材強度の点で優れている鍛造技術の確立が産業界から求められている。産総研および鍛造企業は双方の技術ポテンシャルを融合してマグネシウム合金連続鍛造材の鍛造プロセス開発に取り組み、現状よりも低コストで高強度のマグネシウム鍛造部材の試作に成功した。そして、特に軽量化が求められる用途では開発プロセスが実用化できる見通しを得た。この論文では技術的成果の概要を述べるとともに、研究背景、目標設定、課題解決のための要素技術、その統合プロセスと構成等を述べる。

キーワード: マグネシウム合金、連続鍛造材、鍛造、動的再結晶、結晶粒微細化、ヒートシンク

Development of forging process for magnesium alloy continuous cast bars

– Forging process utilizing grain refinement –

Naobumi SAITO^{1*}, Hajime IWASAKI², Michiru SAKAMOTO³, Kazuo KANBARA⁴ and Tunekisa SEKIGUCHI⁴

Reducing resource consumption and carbon dioxide emission are recognized as urgent issues. One way of addressing these issues is to reduce product weight. Magnesium alloys are considered promising candidates because of their lightness. To manufacture products using magnesium alloys, we require forging technology that afford higher size accuracy and strength. This paper introduces the results of joint research with a company for the development of a new forging process for magnesium alloys continuous cast bars. We describe the research background, goals of the project, fundamental technologies employed to address these goals, and the integrative/synthetic process.

Keywords: Magnesium alloy, continuous cast bars, forging, dynamic recrystallization, grain refinement, heat sink

1 緒言

省エネルギー・省資源等の社会的要請を背景に、輸送機器や家電製品等広範囲の工業製品において、軽量化とリサイクル促進が課題となっている。一方、マグネシウム合金は、構造用金属材料の中で最も軽量であり、リサイクル性もある。そのため、輸送機器を初めとするさまざまな産業への応用が期待されている。しかし、現状ではアルミニウム合金に比べるとその普及は進んでいない。これは、マグネシウム合金製部材が高コストになることが原因のひとつである。表1にこの研究の対象である鍛造部品に関して、マグネシウム合金とアルミニウム合金を比較した結果を示す。素材特性はアルミニウム合金とマグネシウム合金で大き

な違いはない。しかし素材のコストはマグネシウム合金がアルミニウム合金の5～6倍である。また、マグネシウム合金は塑性加工性が悪く、熱間鍛造しかできないが、アルミニウム合金はマグネシウム合金に比べて低い温度での鍛造(温間・冷間鍛造)が可能である。そのため、加工時の消費電力等もマグネシウム合金鍛造の方が大きくなる。以上の要因が重なり、マグネシウム合金鍛造品のコストは、アルミニウム合金鍛造品のコストの6～7倍になる。しかし、鍛造は高品質の部材を高い生産性で製造できる塑性加工技術である。そのため、マグネシウム合金の鍛造技術の確立、そしてマグネシウム合金鍛造部品の低コスト化が産業界から求められていた。

1 産業技術総合研究所 サステナブルマテリアル研究部門 〒463-8560 名古屋市守山区下志段味穴ヶ洞 2266-98、2 有限会社ハイプロセスリサーチ(元産業技術総合研究所サステナブルマテリアル研究部門) 〒678-1226 赤穂郡上郡町高田台 3-17-13、3 産業技術総合研究所 生産計測技術研究センター 〒841-0052 鳥栖市宿町 807-1、4 宮本工業株式会社 〒329-2441 塩谷郡塩谷町大字船生 9133

1. Materials Research Institute for Sustainable Development, AIST 2266-98 Anagahora, Shimo-shidami, Moriyama-ku, Nagoya 463-8560, Japan * E-mail: naobumi-saito@aist.go.jp, 2. The High Process Research, Ltd. (Former, Materials Research Institute for Sustainable Development, AIST) 3-17-13 Takada-dai, Kamigori-cho, Ako-gun 678-1226, Japan, 3. Measurement Solution Research Center, AIST 807-1 Shuku-machi, Tosu 841-0052, Japan, 4. Miyamoto Industry Co., Ltd 9133 Funyu, Shioya-machi, Shioya-gun 329-2441, Japan

Original manuscript received September 26, 2014, Revisions received November 25, 2014, Accepted November 28, 2014

表1 マグネシウム合金とアルミニウム合金鍛造材の比合金鍛造材の比較

		マグネシウム合金 (AM60)	アルミニウム合金 (A6061)	
素材	比重	1.74 (純 Mg)	2.70 (純 Al)	
	素材・組織	素材	押出材	押出材
		結晶粒	20 ~ 50 μm	20 ~ 50 μm
	特性	強度	260 MPa	280 MPa
		伸び	10 %	12 %
絞り率		35 %	45 %	
加工	軽量化率* 薄肉・小型化	30 % 以上軽量化	20 % 以上軽量化	
	鍛造成形 成形法	熱間加工のみ	冷・熱間加工	
	寸法精度 熱間加工時	±1.5 ~ 2.0 mm	±1.0 ~ 1.5 mm	
価格	素材 現状比(押出材)	500 ~ 600	100	
	製品 鍛造完成品	600 ~ 700	100	

ここでは代表的な鍛造素材である AM60(Mg-6mass%Al-0.1mass%Mn) マグネシウム合金と A6061 アルミニウム合金 (Al-0.8mass%Mg-0.7mass%Si) の例を示す。

*ここで軽量化率とは、小型の自動車部品、例えば鉄製の構造補助材をアルミニウム合金およびマグネシウム合金に材料置換することによる軽量化率。

産総研は、平成 18 ~ 22 年度に (独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト」において (一財) 素形材センターと共同で、低コスト・高信頼性マグネシウム鍛造部材の作製を目指し、マグネシウム合金連続鍛造材の鍛造技術開発を行ってきた。そしてプロジェクト終了後は、宮本工業 (株) と共同研究を実施し、開発した技術の実用化を目指して開発を進めてきた。

2 マグネシウム合金連続鍛造材の鍛造技術開発の背景^[1]

本章では、マグネシウム合金鍛造の平成 18 年時点での現状と、それを踏まえた、NEDO プロジェクトにおけるマグネシウム合金連続鍛造材の鍛造技術開発の目標設定について述べる。

2.1 マグネシウム鍛造プロセスの現状

NEDO プロジェクトにおいて、マグネシウム合金鍛造技術開発の課題を明確にするため、まず実用マグネシウム合金押出材を鍛造素材として、汎用メカニカルプレスを用いて商用プロセスによる実部材の試作鍛造および試作鍛造部品の評価を行った。その結果、これらの試作鍛造部品は 400 °C 程度の高温で鍛造するため結晶粒が粗大になっており、その結果として鍛造部品に期待される成形による機械的特性の向上といった効果が出ていないことがわかった。すなわち平成 18 年時点では、マグネシウム合金の鍛造は割れなどの欠陥がない健全な成形を重視するあまり、鍛造品自体の特性改善は不十分であった。

2.2 鍛造技術開発の目標設定

マグネシウム合金鍛造部品の普及のためには、押出材よりも低コストの鍛造材からの直接鍛造が望まれる。また鍛造

部品に期待される、成形による機械的特性の向上を実現しなくてはならない。そこで NEDO プロジェクトでは、1) 低コスト素材 (連続鍛造材) の鍛造加工性の検証、2) 連続鍛造材の鍛造プロセスの開発、3) 400 °C よりも低い温度での鍛造の実現 (鍛造部品の結晶粒粗大化を抑制) 4) 鍛造による部品の機械的特性向上実現 (鍛造部品の結晶粒粗大化抑制による)、をマグネシウム合金の鍛造における研究開発課題として設定し、研究開発を開始した。

図 1 に、マグネシウム合金連続鍛造材を鍛造素材とすることにより見込まれるコスト低下を見積もった結果を示す。マグネシウム合金連続鍛造材より鍛造部品を作製すると、押出工程がないことなどから鍛造品の価格が現状の約 1/4 になると期待される。

3 マグネシウム合金連続鍛造材の易成形性化^[1]

3.1 従来の知見に基づく課題解決方法の検討

この研究開発のポイントは、鍛造素材の易成形性化、鍛造部品の高強度化である。マグネシウム合金の鍛造は材料を加熱状態で変形させるプロセスであるが、金属材料の加熱状態での変形は粒界滑りが支配的であることが知られている^[2]。また、粒界滑りにおける変形応力は粒径が微細になるほど小さくなるので、材料の結晶粒径が微細であるほど加熱状態で変形し易くなる^[2]。一方、金属材料の室温での降伏応力は結晶粒が微細であるほど高くなる^[3-5]。以上の知見から、鍛造素材および鍛造部品の結晶粒微細化が、課題解決のための重要なポイントであると考えた。

金属材料を加熱状態で変形した場合、動的再結晶が生じて新しい結晶粒が発生し、初期の結晶粒は消失する^[6]ことが知られている。また、マグネシウム合金は動的再結晶が生じやすく、結晶粒微細化も比較的容易に達成できる

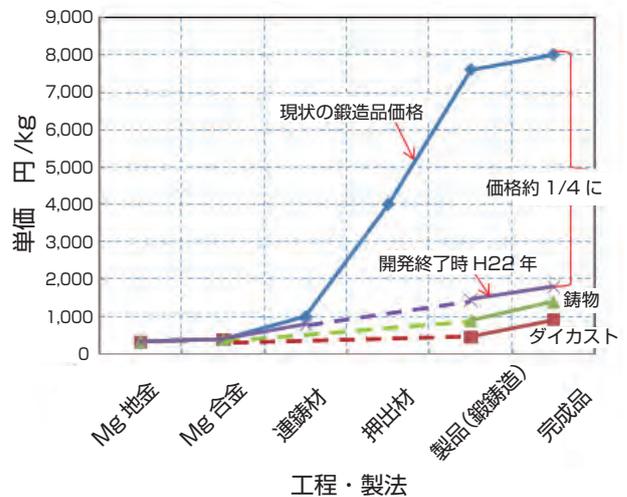


図1 マグネシウム合金製部材のコスト見積もり

という報告もある^[7]。そこで、マグネシウム合金連続鋳造材の動的再結晶による結晶粒微細化挙動を調べることから研究開発を開始した。

3.2 マグネシウム合金連続鋳造材の動的再結晶挙動の検討

本節では、NEDOプロジェクトにおいて鍛造技術開発のための基礎的知見を得るため、産総研が主体となりマグネシウム合金連続鋳造材の動的再結晶による結晶粒微細化挙動を調べた結果について述べる。

3.2.1 AZ91合金連続鋳造材の高温圧縮試験

供試材として、均質化处理（410℃に24時間加熱）したAZ91（Mg-9mass%Al-1mass%Zn）マグネシウム合金連続鋳造材（三協マテリアル（株）製）を用い、産総研で高温圧縮試験を行った。代表例として、直径10mm、高さ12mmの試験片を3種類の温度（250℃、300℃、330℃）およびひずみ速度（0.01s⁻¹、0.1s⁻¹、1s⁻¹）で80%まで圧縮し、その後のマイクロ組織（結晶粒径）を調べた結果を図2

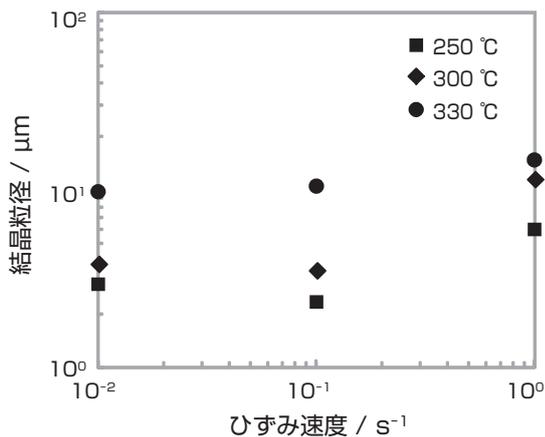


図2 AZ91（Mg-9mass%Al-1mass%Zn）マグネシウム合金連続鋳造材の高温圧縮後の結晶粒径計測結果（圧縮率80%）

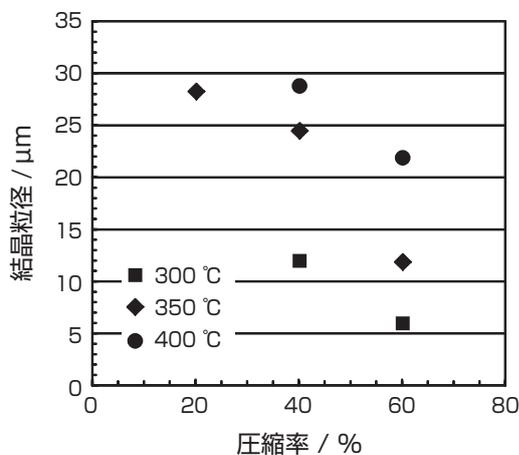


図3 AZ91（Mg-9mass%Al-1mass%Zn）マグネシウム合金連続鋳造材の据え込み圧縮率と結晶粒径の関係（変形速度：200 mm/s）

に示す。この結果より、AZ91合金連続鋳造材を300℃以下で圧縮変形させると、比較的容易に結晶粒径10μm以下まで微細化できることがわかった。

3.2.2 AZ91合金連続鋳造材の据え込み圧縮試験

次に、宮本工業（株）が所有するサーボプレス機を用いて、スケールアップしたサイズのAZ91合金試験片（直径40mm、高さ48mm）の据え込み圧縮試験を行い、結晶粒微細化挙動に対する圧縮率および成形速度の影響を調べた。図3に200mm/sで変形させた場合の結晶粒径と圧縮率の関係を示す。圧縮率が高いと結晶粒は微細化するが、圧縮率60%では試料側面に割れが生じた。図4は圧縮率40%まで変形させた場合の結晶粒径と変形速度の関係である。試験温度が低いほど結晶粒は微細化するが、300℃では結晶粒径の変形速度依存性は余り見られなかった。以上より、300℃で30~40%の変形を与えれば、AZ91合金連続鋳造材の結晶粒径は10μm程度まで微細化し、割れも生じないことがわかった。

4 マグネシウム合金連続鋳造材の試作鍛造および鍛造部品高強度化の検証^[1]

本章では、NEDOプロジェクトにおいて前章での研究成果に基づき、産総研が主体となって開発したマグネシウム合金連続鋳造材の鍛造技術の概要、および当該技術を用いて産総研で試作鍛造を行った結果について述べる。

マグネシウム合金連続鋳造材の動的再結晶挙動の解析結果から、図5に示すような鍛造プロセスを産総研が提案した。このプロセスでは、工程前半はマグネシウム合金連続鋳造材に300℃で30~40%の圧縮加工を行い、結晶粒径を10μm程度まで微細化する。この結晶粒微細化により、鍛造素材は易成形性を有する材料に変化する。そして工程後半ではこの素材を最終形状まで鍛造加工を行う。

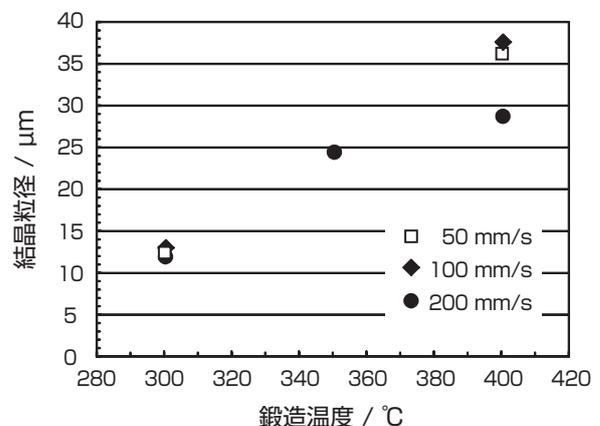


図4 AZ91（Mg-9mass%Al-1mass%Zn）マグネシウム合金連続鋳造材の加工温度と結晶粒径の関係（据え込み圧縮率：40%）

前章で示したように、マグネシウムの動的再結晶組織は加工温度や歪速度に依存する¹⁸⁾。したがって、ここで目指す加工を達成するためには、加工速度やスライド位置を任意に制御できるサーボプレスが有用である。そこで産総研においてサーボプレスを利用して試作鍛造を行い、上記の鍛造プロセスの妥当性を検証することにした。

図6に産総研で実施したサーボプレスによる鍛造工程を示す。予熱した鍛造素材（ブランク材）を加熱された金型に投入し、上からパンチで圧縮加工するが、ブランク材の径は金型の径よりも小さいので、最初はブランク材が横に広がり、あるところでブランク材の径と金型の径が一致する。ここまでのいわゆる据え込み圧縮加工（圧縮率約40%）が、結晶粒微細化工程になる。ここからさらにパンチで押し続けると、材料は前方と後方に押出されて最終的な形状に成形される。この加工は1工程で行われるが、前半は結晶粒微細化工程、後半は成形工程である。

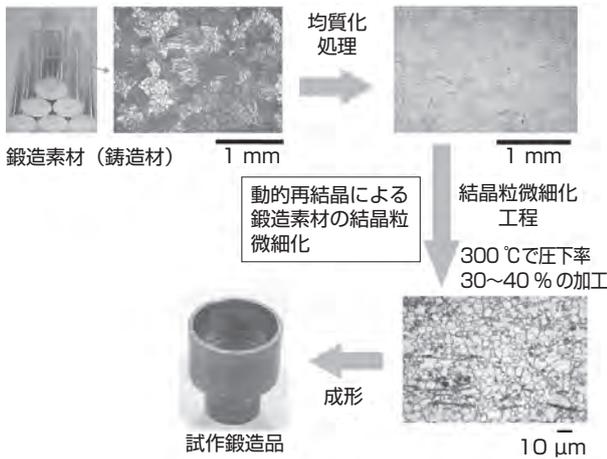


図5 マグネシウム合金連続鋳造材の鍛造プロセスの概要

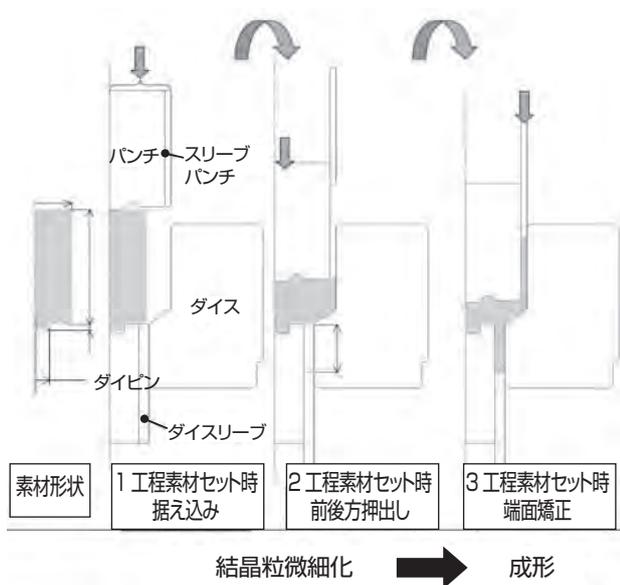


図6 サーボプレスによる鍛造工程

図7にこのプロセスで最初に試作した鍛造品（素材はAZ91 マグネシウム合金）外観写真を示す。写真において①は後方押出部、②は据え込み圧縮部、③は前方押出部である。産総研では温度、加工速度、鍛造後の鍛造品の冷却速度等を変化させた試作鍛造を約150回行い、鍛造品のマイクロ組織観察結果や引張試験結果をデータベースとして整理した。図7に示した試作鍛造品は、鍛造温度300℃、鍛造速度10 mm/sで鍛造を行ったが、鍛造品に欠陥は認められなかった。すなわち産総研が提案したマグネシウム合金連続鋳造材の新規鍛造プロセスにより、300℃で断面減少率81%の前後方管押し鍛造が可能になることを確認した。この結果は世界初のものであり、プロジェクト事後評価において評価委員から高く評価された。試作鍛造部品のマイクロ組織を観察したところ、後方押出部、据え込み圧縮部、前方押出部ともに結晶粒は10 μm以下まで微細化していた。また据え込み圧縮部の機械的特性を評価したところ、室温引張強度359 MPa、破断伸び19%であった。この引張特性は素材の引張特性（226 MPa、15%）よりも高く、鍛造部品に期待される成形による機械的特性の向上が実現した。以上のように、当初に設定した目標を達成した。

5 マグネシウム合金連続鋳造材の鍛造プロセスの実用化検討

5.1 実用化研究で設定する目標

NEDOプロジェクトで開発したプロセスにより、マグネシウム合金連続鋳造材を従来よりも100℃近く低い300℃で鍛造することに試作レベルで成功した。そこでプロジェクト終了後に次の段階として、NEDOプロジェクトの成果について真に実用化する観点から宮本工業（株）と詳細に議論した。その結果、200℃より低温で高強度、高精度成形品を得る鍛造技術の開発を目標とすること、そのために結晶粒微細化が重要との認識を共有できた。これらを共通の



図7 試作鍛造品の例（素材：AZ91 マグネシウム合金連続鋳造材）

目標として、産総研と宮本工業（株）は共同研究を行うこととした。議論の過程で低温鍛造のメリットとして、加工コスト、環境対応、作業環境等について宮本工業（株）から以下の提案がなされた。

1) 加工コスト：鍛造温度が300℃以上の熱間鍛造では、鍛造素材を加熱するために専用の炉が必要となる。それに対して、200℃以下の鍛造では、赤外線ヒーターやホットプレート式の加熱で十分である。また、低温化することにより製品精度が向上するため、工程の削減、切削代の軽減等につながると期待される。さらに素材・金型の加温保持の電力量も低減でき、金型寿命の向上等も見込まれる。以上を考慮して、低温鍛造により見込まれる加工コスト低下を表2に示す。消費電力と後処理のコスト低下が大きいと考えられ、トータルとして加工コストは従来工法に比べ20～30%抑えられると算定している。

2) 環境対応：200℃以下の鍛造では、黒鉛系等の固体潤滑剤に比べて鍛造後の除去が容易な水溶性潤滑剤も使用できるようになる。黒鉛系潤滑剤は、低コストで潤滑性が高いが、黒鉛を分散させる基油の引火点が170～200℃であるため火災の危険を伴う。また黒鉛による作業環境の汚染によって、人体への健康被害が起こる可能性があることが問題となっている。したがって水溶性潤滑剤の使用により、潤滑での作業環境汚染が低減されることが考えられる。

3) 作業環境：熱間鍛造の場合、鍛造作業者は火傷防止のため特別な装備が必要であり、企業は熱による負荷に対して作業者に手当を出している。それに対して、鍛造温度が200℃以下であると、特別な装備を使用することなく材料の取扱いが可能である。すなわち、作業環境は熱間鍛造に比べて良くなると考えられる。

5.2 これまでの研究による知見に基づく課題解決方法の検討

「マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト」では、ひとつの金型を使用して1工程で鍛造を行ったので、成形工程の温度だけを低くすることができなかった。そこで今回は、結晶粒の微細化工程と成形工程を分けた2段階での鍛造を検討した。検討した鍛造工程の概要を図8に示す。本鍛造工程は、結晶粒の微細化工程と成形工程を分けた2段階で行う。すなわち、素材を所定の温度で所定の圧下率だけ据え込み圧縮加工し、動的再結晶により結晶粒を10μm程度まで微細化させる。そして試料を取り出し、新たに200℃以下で鍛造加工を行う。産総研は金属材料の組織制御・解析技術にポテンシャルを、宮本工業（株）は鍛造メーカーとして、鍛造加工技術および周辺技術（金型、潤滑等）に高いポテンシャルを有している。そこでこのプロセスを産総研および宮本工業（株）で、各々のポテンシ

表2 鍛造温度低温化により見込まれる加工コストの低下

	従来工法	新工法（低温鍛造）
素材	100	100
消費電力	100	70
後処理※1	100	50
後加工※2	100	98
トータルコスト	100	70

※1：潤滑剤の除去など鍛造品の洗浄が主体

※2：切削・アルマイト処理などの後加工処理

ルを活用して、次のようなステップで検討・検証した。

5.2.1 鍛造素材の結晶粒微細化挙動の解析

まず産総研において動的再結晶による結晶粒微細化現象を確認するため、サーボプレス機を使用して鍛造素材の据え込み圧縮試験を行った。

鍛造素材として、AZ91マグネシウム合金にCaを添加して発火温度を200～300℃上昇させた難燃性マグネシウム合金⁹⁾を用いた。Ca添加量は0.2 mass%、0.4 mass%、0.6 mass%、1.0 mass%である。試料には試験前に410℃で24時間加熱処理（均質化処理）が施されている。また試料のサイズは、直径25mm、高さ30mmである。図9に一例として350℃、1mm/sで据え込み圧縮した材料の結晶粒径測定結果を示す。元材の結晶粒径は100～200μmであったが、350℃で60%据え込み圧縮後の結晶粒径はいずれの合金でも10μm以下であり、結晶粒が1/10以下に微細化した。1.0mass%Ca添加合金の場合、圧縮率が60%以上になると結晶粒径は約8μmとおおよそ一定値を示した。

5.2.2 結晶粒微細化素材の圧縮変形特性評価

引き続き産総研において、200℃以下での鍛造可能性に関する知見を得るため、結晶粒微細化素材の高温圧縮試

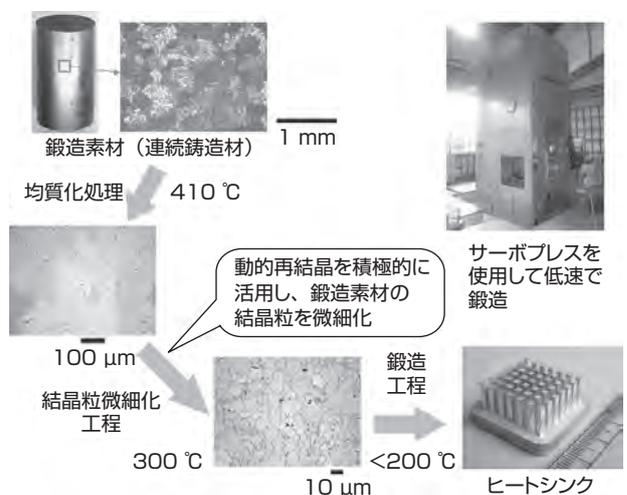


図8 開発した低温鍛造工程の概要

験を行い、圧縮変形挙動を評価した。

図10はAZ91に0.2mass%Caを添加したマグネシウム合金を350℃、1mm/sで60%まで圧縮して結晶粒を微細化させた試料を、初期ひずみ速度 $4.2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、試験温度200℃、175℃および150℃で圧縮試験を行った結果である。試験片のサイズは直径8mm、高さ12mmである。破断が生じる圧縮率は、150℃では約16%、175℃では約20%、200℃では約30%であった。150℃でも16%の変形が可能であったという結果は、素材の結晶粒を10μm程度に微細化することで、200℃以下で鍛造ができる可能性を示している。

5.2.3 低温鍛造の可能性の検討

前項までに得られたデータより産総研、宮本工業(株)が低温鍛造の可能性を検討した。その結果、素材の結晶粒を10μm程度まで微細化することで、200℃以下での鍛造ができる可能性が示されたと判断し、試作鍛造を実施することを決定した。試作鍛造部品としては、宮本工業(株)がアルミニウム合金で鍛造した実績がある角ピンヒートシンクを選択した。角ピンヒートシンクの基本構造は30mm角×厚さ3.5mm、角ピン部は2mm角×高さ8mmで本数は49本である。

5.2.4 鍛造素材の結晶粒微細化

次に、鍛造素材の結晶粒微細化のため、宮本工業(株)においてサーボプレス機を使用して据え込み圧縮を行った。そして据え込み圧縮した材料を産総研でマイクロ組織観察し、結晶粒径測定等を行い、結晶粒微細化挙動を調査した。

鍛造に使用したマグネシウム合金は、市販のAZ31(Mg-3mass%Al-1mass%Zn)マグネシウム合金連続鍛造材(直径155mm)とAZ61(Mg-6mass%Al-1mass%Zn)マグネシウム合金連続鍛造材(直径55mm)の2種類である。いずれも410℃で24時間の均質化処理が施されている。

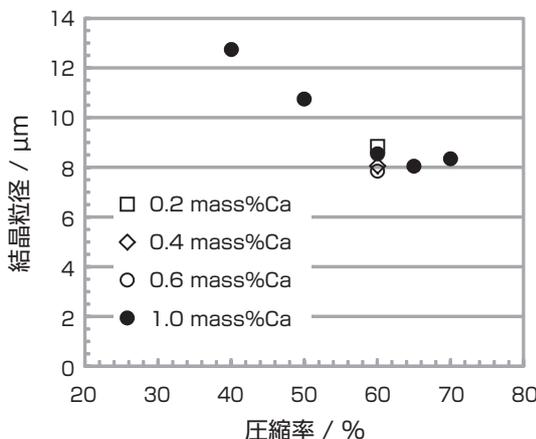


図9 AZX91+0.2mass%Ca、0.4mass%Ca、0.6mass%Ca、1.0mass%Ca合金連続鍛造材の高温圧縮後の結晶粒径計測結果(温度:350℃、加工速度:1mm/s)

結晶粒微細化工程では、平均結晶粒径が100μm以上のブランク材を、温度300℃で所定の圧下率まで据え込んだ。動的再結晶の進行とブランク材の工程初期の割れを防止する観点から、据え込みは平均速度5~10mm/sの比較的低速で行った。AZ31マグネシウム合金連続鍛造材では一部に結晶粒径が10~20μm程度の領域があるものの、それ以外では動的再結晶によって結晶粒径5μm以下まで微細化していた。一方、AZ61マグネシウム合金連続鍛造材でも動的再結晶が生じているものの、平均結晶粒径は約10μmであった。このように、据え込み圧縮加工による鍛造素材の結晶粒微細化を確認した。

5.2.5 結晶粒微細化材の成形工程としての試作鍛造

鍛造素材の結晶粒微細化が確認できたので、試作鍛造を宮本工業においてサーボプレス機を使用して行った。そして試作鍛造品に関して、宮本工業(株)で外観評価、産総研でマイクロ組織評価を行った。

図11に結晶粒微細化処理を施したAZ31マグネシウム合金の連続鍛造材を素材として、今回開発した鍛造方法によって作製したヒートシンクの外観写真を示す。鍛造は、結晶粒微細化処理後の材料をブランク材とし、鍛造温度100℃、150℃、200℃で行った。平均の押し出し比は4.6、平均押し出しひずみは1.5、断面減少率は0.78である。材料の割れを防止するため、平均速度5~10mm/sの比較的低速で鍛造を行った。いずれの鍛造温度でも割れはなく、49本のピンの高さが揃った健全なヒートシンクが鍛造加工できた。またAZ61マグネシウム合金の連続鍛造材を素材としても、今回の鍛造方法により同様のヒートシンクを作成できた。ヒートシンクは機械的強度が要求される部品ではない。しかしマイクロ組織観察により角ピン部の結晶粒径は10μm以下に微細化していることを確認した。したがって、機械的強度もあると考えられる。

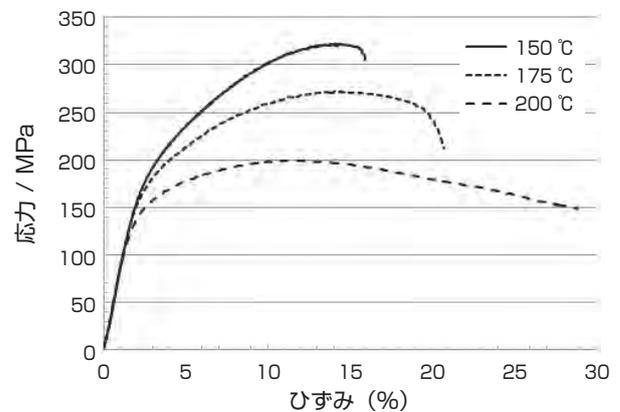


図10 結晶粒微細化処理を行ったAZX91+0.2mass%Ca合金の圧縮試験結果

表 3 本研究の開発目標と従来技術の比較

			マグネシウム合金 (AM60)	マグネシウム合金 (開発目標値)	アルミニウム合金 (A6061)
素材	素材・組織	素材	押出材	連続鋳造材	押出材
		結晶粒	20 ~ 50 μm	10 μm (結晶粒微細化処理後)	20 ~ 50 μm
	特性	強度	260 MPa	340 MPa	280 MPa
		伸び	10 %	15 %	12 %
		絞り率	35 %	60 %	45 %
加工	軽量化率	薄肉・小型化	30 % 以上軽量化	30 % 以上軽量化	20 % 以上軽量化
	鍛造成形	成形法	熱間加工のみ	温間加工可能	冷・熱間加工
	寸法精度		±1.5 ~ 2.0 mm (熱間加工時)	±0.3 mm (温間加工時)	±1.0 ~ 1.5 mm (熱間加工時)
価格	素材	現状比	500 ~ 600	120 ~ 140	100
	製品	鍛造完成品	600 ~ 700	150	100

*表1に研究における開発目標値を追加して示した。

5.2.6 当該鍛造プロセスとマグネシウム合金試作鍛造品の妥当性の検証

試作鍛造終了後に、宮本工業(株)、産総研で開発した鍛造プロセスの妥当性を検証した。

本試作鍛造により、結晶粒を 10 μm 程度以下に制御することで比較的複雑な形状のマグネシウム合金の鍛造が 200 °C 以下で可能なことが確認できた。また、AZ31 合金に比べて鍛造性の劣る AZ61 合金でも、動的再結晶による結晶粒の微細化を行えば支障なく鍛造可能であった。以上の結果から、本鍛造プロセスは実用化可能であると考えられる。

また、表 3 に示すように今回の研究成果をアルミニウム合金鍛造部品と比較すると、製品価格比で約 1.5 倍であるが、現在のマグネシウム合金鍛造部品に比べると 1/4 程度まで下がるのが期待される。今後、さらなる製品コスト低下が課題であるが、軽量化のニーズが特に強い用途では、マグネシウム合金鍛造部品が実用化できる見通しが得られたと考える。

6 この研究開発における要素技術の統合

マグネシウム合金連続鋳造材の低温鍛造技術は、産総研の持つポテンシャルと宮本工業(株)が持つポテンシャルを統合することで開発が可能であった。そこで第 5 章までに述べた内容と議論を踏まえて、図 12 に NEDO プロジェクトや共同研究を通じて課題解決のために設定された仮説や要素技術がどのように統合され、両機関がどのように分担あるいは共同し、最終的なマグネシウム合金鍛造プロセスおよび鍛造品開発に至ったかを整理して示す。

産総研は、金属材料の組織制御・解析・評価技術にポテンシャルを有している。また、マグネシウム合金連続鋳造材の低温鍛造のポイントは、最終形状に鍛造する前に素材の結晶粒を微細化することである。そこで産総研は、鍛造素材の動的再結晶による結晶粒微細化挙動の解析、結晶粒微細化素材の低温での変形挙動解析を行い、その結果より宮本工業(株)と共同で低温鍛造の可能性を検討した。

宮本工業(株)はアルミニウムの鍛造メーカーとして、こ

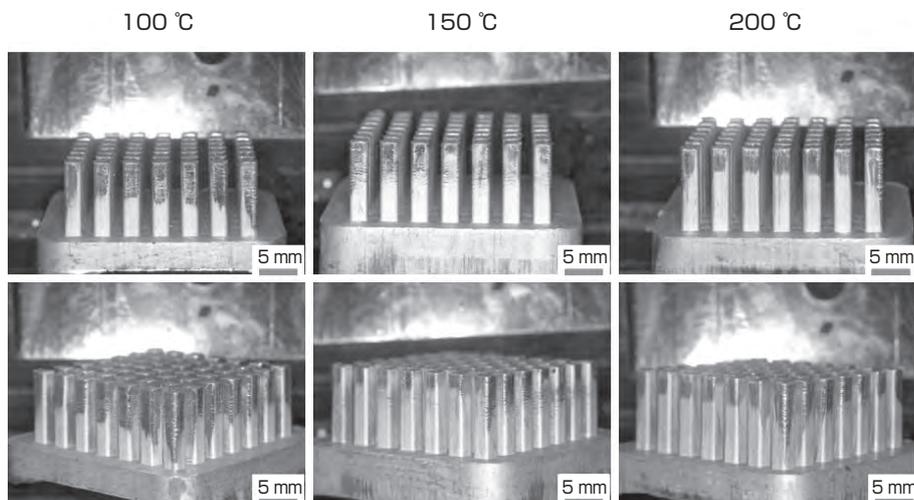


図 11 試作したヒートシンクの外観 (素材は AZ31 合金)

れまでも家電・精密・PC 関連部品、自動車関連部品、レジャー関連部品等実績があり、鍛造加工技術および周辺技術（金型、潤滑等）に高いポテンシャルを有している。そこでこの研究開発では、産総研が提供した基礎データを参照し、開発したプロセスによって実部品を試作鍛造した。また試作鍛造品の外観評価を行った。

このように本共同研究の前半では、産総研が主体となって、後半では宮本工業（株）が主体となって開発を実施した。また後半に実施した試作鍛造品のマイクロ組織解析は産総研が担当するなど、緊密な連携を保ちつつ研究開発が行われた。

7 結果の評価および将来の展開

7.1 結果の評価

マグネシウム合金連続鍛造材の低温鍛造に関する共同研究の成果は、2013年5月15日に産総研プレスリリース「200℃以下の低温でマグネシウム合金の鍛造を実現」として公開した^[10]。プレスリリース直後から新聞の取材があり、最終的に複数の新聞に記事が掲載された。また、複数の雑誌から成果の解説記事執筆の依頼があり、成果の普及につとめた^{[11][13]}。さらに雑誌による取材もあり、記事が掲載された^[14]。このようにこの研究成果は、対外的に多くの反響があり、評価された。

7.2 将来の展開

宮本工業（株）は、さらにマグネシウム合金の低温鍛造を進め、100℃以下の冷間鍛造領域の実現を目指している。そうなれば鍛造時の加温保持が不要となり、生産性が飛躍的に向上すると期待される。また冷間鍛造用の潤滑

剤が使用でき、鍛造精度も向上するため、さらにコストダウンが見込まれる。

この冷間鍛造領域でのマグネシウム合金の量産ベースが可能となれば、現在アルミニウムが使用されている分野や、あるいは、鉄使用分野の一部からの置換も可能性が出る。そうすると、光学や産業機器、電池・電源周辺機器への展開、自動車・二輪車への展開等、幅広い分野への可能性が広がってくる。

現在、宮本工業（株）は本共同研究の成果を活用し、新規需要の開拓を行っている。すでに、低温鍛造したマグネシウム製のデジタルカメラ用部品は量産化している。また、それ以外に新幹線用ケーブルコネクタ、遠心分離機用ホルダー、自動車部品等の営業活動を実施している。

8 結言

マグネシウム合金連続鍛造材の鍛造技術開発は、NEDO プロジェクトとして開始し、引き続き宮本工業（株）との共同研究として実施した。この研究開発のポイントは、動的再結晶というこれまで学問的には多く研究がなされてきた現象を、ものづくりのプロセスに積極的に取り入れ、これまで鍛造素材として実績のなかったマグネシウム合金連続鍛造材の鍛造を可能にした点にある。産総研は基礎的な学術成果ともものづくりプロセスの橋渡しを行ったと言え、「技術を社会へ」という産総研のスローガンの実践例であると考えている。今後も企業との共同研究等を通じて、産総研の持つ基礎基盤技術（材料組織制御・解析・評価技術）と、企業のものづくり技術の連携を実践して行く予定である。

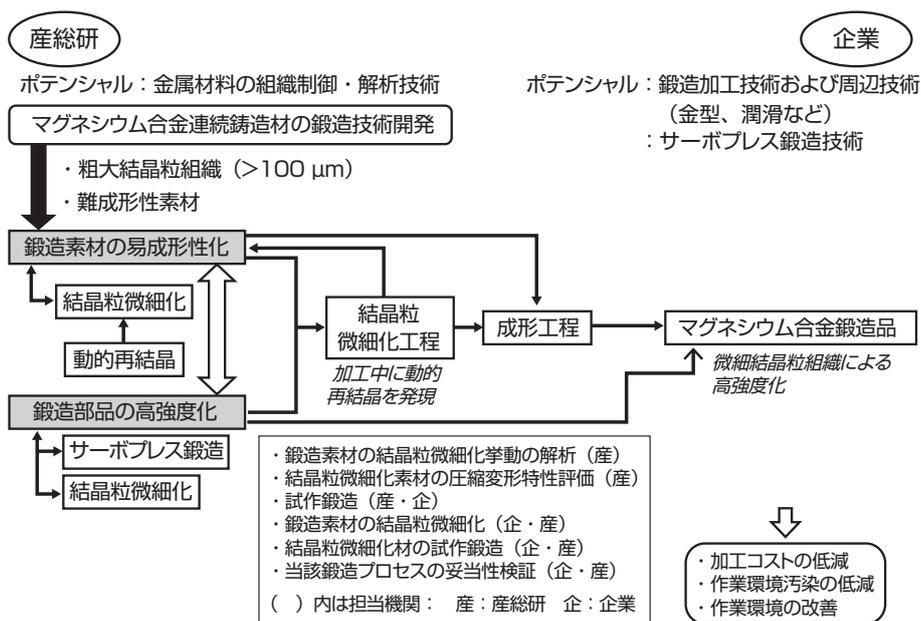


図 12 本研究開発における要素技術の統合

参考文献

- [1] NEDO(2012): 「マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト」事後評価資料, http://www.nedo.go.jp/introducing/iinkai/kenkyuu_bunkakai_23h_jigo_12_1_index.html.
- [2] 森永正彦, 古原忠, 戸田裕之編: 金属材料の加工と組織, 共立出版, 71-72 (2010).
- [3] E. O. Hall: The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results, *Proc. Phys. Soc. B.*, 64, 747-753 (1951).
- [4] N. J. Petch: The cleavage strength of polycrystals, *J. Iron Steel Inst.*, 173, 25-28 (1953).
- [5] George E. Dieter, Jr.: *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, 119-123 (1961).
- [6] F. J. Humphreys and M. Hatherly: *Recrystallization and Related Annealing Phenomena*, Elsevier, 373-382 (1995).
- [7] 森永正彦, 古原忠, 戸田裕之編: 金属材料の加工と組織, 共立出版, 150-153 (2010).
- [8] H. Watanabe, H. Tsutsui, T. Mukai, K. Ishikawa, Y. Okanda, M. Kohzu and K. Higashi: Grain size control of commercial wrought Mg-Al-Zn alloys utilizing dynamic recrystallization, *Materials Transactions*, 42 (7), 1200-1205 (2001).
- [9] 坂本満, 上野英俊: 部材の軽量化による輸送機器の省エネ化-難燃性マグネシウムの研究開発-, *Synthesiology*, 2 (2), 127-136 (2009).
- [10] 産総研 (2013/05/15): 「200℃以下の低温でマグネシウム合金の鍛造を実現」, http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2013/pr20130515/pr20130515.html.
- [11] 斎藤尚文, 岩崎源, 神原和夫, 関口常久, 宮本尚明: マグネシウム合金の結晶粒微細化を利用した鍛造プロセスの開発, *アルトピア*, 43 (8), 26-32 (2013).
- [12] 斎藤尚文, 岩崎源, 神原和夫, 関口常久, 宮本尚明: マグネシウム合金連続鋳造材の鍛造技術の開発, *日本鍛造協会広報誌「JFA」*, 45, 12-16 (2014).
- [13] 斎藤尚文, 岩崎源, 神原和夫, 関口常久, 宮本尚明: マグネシウム合金連続鋳造材の鍛造技術, *素形材*, 55 (6), 20-24 (2014).
- [14] 産業技術総合研究所, 宮本工業: 据え込み加工で結晶粒を微細化200℃以下で生産性向上を狙う, *日経ものづくり*, 711, 49-50 (2013).

執筆者略歴

斎藤尚文 (さいとう なおぶみ)

1985年東北大学工学部金属工学科卒業、1990年東北大学工学研究科材料物性学専攻博士課程修了、工学博士。同年4月工業技術院名古屋工業技術試験所金属部に入所後、軽量金属材料に関する研究に従事。2002年4月産総研サステナブルマテリアル研究部門に配置換。本研究では、マグネシウム合金連続鋳造材、結晶粒微細化材、試作鍛造部品のミクロ組織解析を担当した。



岩崎源 (いわさき はじめ)

1969年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了、工学博士。同年姫路工業大学金属工学科に赴任、2003年3月退職。その間塑性力学、塑性加工学、材料加工学特論等の授業を担当、研究分野は軽金属の超塑性を主とする高温塑性である。2004年から2年間産総研の客員研究員として「超軽量材料の柔軟成形法の開発」に、2006年から5年間、財団法人素形材センターの嘱託研究員としてAIST中部センターでNEDO「マグネシウム鍛造部材技術開発プロジェクト」に従事した。



現在、有限会社ハイプロセスリサーチ代表取締役。本研究では、マグネシウム合金連続鋳造材の変形挙動の評価・解析を担当した。

坂本 満 (さかもと みちる)

1980年筑波大学第一学群自然科学類卒業、1985年筑波大学大学院博士課程地球科学研究科修了、博士(地質学)。同年4月工業技術院九州工業技術試験所機械金属部入所後、金属基複合材料の研究開発に従事。2007年8月産総研サステナブルマテリアル研究部門に配置換、同年11月中部センターへ異動。2011年8月九州センターへ異動。本研究ではNEDOプロジェクトにおいて全体計画の立案と研究管理・運営を行った。



神原 和夫 (かんばんら かずお)

1970年工学院大学専門学校金属加工科卒業、同年4月宮本工業(株)技術部に所属し、1979年技術部課長、1986年製造部課長、1990年技術部部長。一貫してアルミニウム合金、銅の冷間鍛造技術の開発に従事、1994年軽金属協会よりアルミニウム鍛造特別技術賞受賞、2000年よりマグネシウム合金の鍛造技術開発を推進。本研究では、マグネシウム合金の連続鋳造材を素材としたヒートシンクの試作鍛造を担当した。



関口 常久 (せきぐち つねひさ)

1969年早稲田大学理工学部機械工学科修士課程修了、1969年昭和電工株式会社入社、1993年工学博士(機械工学)、1984年発明協会・協会会長賞受賞、1995年早稲田大学材料技術研究所 特別研究員、2000年宮本工業(株)入社、技監、2005年日本大学大学院講師(兼務・非常勤)、2006年日本鍛造協会研究員(兼務)。主にアルミニウム(高ケイ素合金)の材料開発及び鍛造技術開発に従事。本研究ではマグネシウム合金連続鋳造材を素材としたヒートシンクの試作鍛造を担当した。



査読者との議論

コメント1 全体 (清水 敏美: 産業技術総合研究所)

省資源・省エネルギーの観点から広範囲の工業製品に対して軽量化の社会的要請がある。この論文は、構造用金属材料の中で最も軽量であるマグネシウム合金に関して、従来困難とされてきた連続鋳造材の低温鍛造プロセスの開発事例を示している。特に、産総研が有する基礎基盤技術と企業が有するものづくり技術の密接な連携によって、コスト低減、環境低負荷、作業環境改善に大きく貢献する鍛造プロセスを開発した際に選択した要素技術やその統合シナリオが述べられている。

議論1 シナリオ、要素技術の組み立てについて

コメント (清水 敏美)

耐食性や塑性加工性に劣るマグネシウム合金の鍛造に対して、動的再結晶というミクロ組織の変化を積極的に利用することで結晶粒の微細化を達成した。さらに、その鋳造材を用いた企業との共同研究により従来困難であった低温鍛造法を開発した物語が示されています。しかし、初稿の段階ではNEDOのプロジェクト報告書と企業との共同研究報告書の域を出ておらず、それらの合体版のように見受けられます。すなわち、シンセシオロジ論文の本質である要素技術の詳細や統合シナリオに関して詳しい説明や記述が見当たりません。極端に言えば、連続鋳造材の結晶粒を微細化するために必要な動的再結晶化の重要因子(温度、加工速度、加工率等)の条件設定につ

いて、サーボプレスを活用して調べたら最適な条件が見つかり、それらの基礎データを基に企業が得意とする冷間鍛造プロセスで検討したら容易に開発できたように見えてしまいます。社会的価値を目標に設定して、研究を推進する上で立ててきた作業仮説とその実証結果、企業技術との融合時に遭遇した問題点、それらを克服してきた技術内容、あるいは技術の統合など論理展開において抑揚あるストーリー性、さらに各課題や技術の重要度、難易度、緊急度の区別が文面に欲しいところです。

コメント（景山 晃：産業技術総合研究所イノベーション推進本部）

初稿を読むと、技術課題とその突破方法は既知であり、それらについて淡々と実験を進めた結果、低温で成形でき、割れなどが生じにくく、高強度のマグネシウム合金の鍛造技術が完成したかのように見えます。実際には、着想、仮説設定、要素技術の組み合わせ方などについて、執筆者のオリジナリティが発揮された部分が相当あったのではないかと思いますので、そのプロセスや検証結果についてシンセシオロジー誌が目指す方向性に沿って緻密に論を組み立てるよう再検討をお願いします。

回答（斎藤 尚文）

同様の指摘を二人の査読者からいただきました。初稿では、NEDO プロジェクト後の研究内容に重点を置いて記述しました。しかし、NEDO プロジェクトにおける課題解決のプロセスを記述しないと、この研究の意味が読者に理解されないように思います。そこで、論文の構成を大幅に変更しました。

議論2 要素技術の統合図について

コメント（清水 敏美）

シンセシオロジー誌の内容として必要不可欠に近い、要素技術の統合とそれを踏まえた構成に関する図面が欲しいところです。本査読者が、内容を加味して、あくまで一案ですが仮作成してみましたので参考にしてください。例えば、これまでの材料開発に関するシンセシオロジーの他論文等も参考にしながら、適宜、追加、修正をしてください。もちろん、図は全面的に書き換えていただいても結構です。

コメント（景山 晃）

この論文に出てくるキーワードを拾い出すと、以下のようなものがありそうです。1) 機械的強度の向上、2) 鍛造材からの直接鍛造、3) 鍛造材の製作プロセスの見直し＝押し出し工程の回避、4) 易成形性、5) 動的再結晶、6) 結晶粒微細化、7) 低コスト化の観点からの検討、8) マグネシウム合金組成、9) プロセス条件としての成形温度、ひずみ速度、圧縮率、これらを連続的に変化させられるサーボプレスの導入、10) 潤滑剤技術の最適化、11) 作業環境負荷の低減、などです。ここで、1)～4)と7)は目標、8)と9)は目標達成の具体的検討項目、5)と6)はこの研究を支える基盤技術、10)と11)は広義の環境負荷の低減というくり方ができると思います。異なる切り口でいえば、目標を達成するために物理現象の基礎としての動的再結晶と結晶粒微細化を根幹に置き、8)、9)の変動要因について緻密な研究開発を行った。その際、環境負荷低減も強く意識して検討を進めたという組み立て方もあり得ると思います。上記を参考にこの論文の全体組み立てストーリーを1枚の図で表すことにチャレンジしてみてください。

回答（斎藤 尚文）

要素技術の統合に関する図面案をご教示いただきありがとうございます。この研究開発において「鍛造素材の易成形性化」が必要であったのは、結晶粒径が100 μm以上の連続鍛造材を鍛造素材としたからです。従来から鍛造素材として用いられている押出材では、鍛造素材の易成形性化は不要です。そこで、「連続鍛造材の鍛造技術開発」という文言を加えて、ご教示いただいた図面を少し修正し、

図12としました。その他の箇所も、少し修正しました。さらに、第6章を新たに設けそこに図12を挿入し、要素技術の組み合わせについて記述しました。

議論3 NEDOプロとの関係について

質問・コメント（景山 晃）

NEDO プロジェクトの成果を上手く活用し、その発展型を研究開発したところがこの研究だと思います。そこで、NEDO プロジェクトの成果と今回の共同研究の成果との全体を示すことはよいですが、どこまでがNEDO プロジェクトで、どこからが本件共同研究なのか明らかにした記載をお願いします。第2稿を読むと、4章まではNEDO プロジェクト当時の成果と読めます。そうであれば、第4章の最後でNEDO プロジェクトの成果をまとめておき（NEDO プロジェクトの報告書を引用文献に示すこと）、第5章の前書は例えば、「前述のNEDO プロジェクトの成果について真に実用化する観点から宮本工業（株）と詳細に議論した。その結果、200℃より低温で高強度、高精度成形品を得る鍛造技術の開発を目標とすること、そのために結晶粒微細化が重要との認識を共有できた。これらを共通の目標として、産総研と宮本工業（株）で共同研究を行うこととした。議論の過程で低温鍛造のメリットとして、加工コスト、環境対応、作業環境などについて以下の提案がなされた。」とするのでいかがでしょうか。

回答（斎藤 尚文）

ご指摘のように、第4章までがNEDO プロジェクトの内容です。第2稿において第2章で引用した参考文献[1]は、NEDO プロジェクトの研究成果のエッセンスを解説したのですが、NEDO プロジェクトの事後評価資料(公開版)を引用する方が適切であると思います。そこで、第2～第4章に評価資料を引用するとともに、NEDO プロジェクトの成果であることが明確にわかるように文章を修正しました。なお第3稿では参考文献1を、NEDO プロジェクトの事後評価資料(公開版)としました。また5.1の目標設定に関しては、ご指摘を参照して文章を修正しました。

議論4 鍛造品の比較について

コメント（景山 晃）

緒言でマグネシウム合金はアルミニウム合金と比較して普及が進んでいないことを述べています。その原因として耐食性、塑性加工性、トータルコストを挙げていますが、アルミニウム合金をリファレンスとして、マグネシウム合金の現状と本件研究が目指すものを表のような形で示すよう検討してください。その際、コストについても例えば材料コスト、製造・加工コスト、消費エネルギー、寸法調整コスト等に分解し、かつ、高低という表現は極力避けて、コスト指数のような表現が望ましいです。これを記載することで、要約にある「有力な候補」という意味が軽合金分野の専門家以外にもよく理解できると思います。恐らく市場ではアルミニウム比較のトータルパフォーマンスを見ていると思いますので、これを示すことができればマグネシウムの本質的弱点である耐食性を、総合力で打ち消すことも可能かと思えます。

回答（斎藤 尚文）

共著者である宮本工業（株）の関口氏にマグネシウム鍛造品とアルミニウム鍛造品の比較表をご教示いただき、表1として論文に追加しました。

議論5 表1について

質問・コメント（景山 晃）

表1の記載はマグネシウム合金とアルミニウム合金とのこの研究開発前段階の特性比較と理解してよいでしょうか。

1) 表に双方の密度(Mg = 1.738, Al = 2.70)を記載してください。マグネシウム合金の場合、AlとZnが少し含まれるので1.738より密

度は少し高くなると思いますが、アルミニウム合金の2/3程度に軽量化できることを示せると思います。なお、軽量化率30%、20%とは何に対する軽量化でしょうか。

2) 5.2.6の最後に表1を再掲し、マグネシウム合金（従来）、アルミニウム合金、この研究成果・データを併記して対比する表3を記載するのがよいと思います。なぜなら、表1により軽量化においてアルミニウム合金に対するマグネシウム合金の優位性が明確になり、表3によってマグネシウム合金における従来技術とこのテーマの結果との比較が理解しやすくなります。また、表3にアルミニウム合金を再掲するかどうかの最終判断は執筆者にお任せしますが、査読者は以下の理由から再掲した方がよいと思います。

- ・市場における比較対象（競合技術）はアルミニウム合金である。
- ・従来のマグネシウム合金は強度、伸び、寸法精度および鍛造完成品のコスト等の点でアルミニウム合金を置換できる可能性は高くなかったが、この研究により可能性が具体的になった。もちろん、従来からマグネシウム合金が使用されていた用途では比較的簡単に置き換えができていますが、それだけではマグネシウム合金の市場が拡大することは期待できない。

回答（斎藤 尚文）

ご指摘のように、表1はこの研究開発開始前段階の比較結果です。

- 1) 表1に純マグネシウムと純アルミニウムの比重を追記しました。共著者である宮本工業（株）の関口氏によれば、軽量化の試算は小型の自動車部品、例えば鉄製の防振ゴムマウント、エンジンマウントやリンクアーム等の構造補助材に関して計算したものとこのことです。比重分が丸々軽量化に寄与するのではなく、剛性（弾性係数）が不足するために若干軽量化が損なわれるとのことでした。
- 2) 表3としてご指摘のような表を5.2.6に追加しました。

議論6 加工コストについて

質問・コメント（景山 晃）

第5章において、加工コスト、環境対応、作業環境について触れていますが、加工コストについては1) 専用炉と赤外線ヒータ≒消費電力、2) 工程削減、切削代、3) 金型寿命での差分を示してください。これらの合計が20～30%ということですが、どれが最も大きいのかが読者には不明です。企業秘密にもつながりますので、指数化しても結構です。一方、環境対応ではグラファイトではどのような作業環境の悪化および環境負荷の増大があるのでしょうか。また、「低温化することにより製品精度が向上するため」とありますが、熱膨張係数×温度差が原因でしょうか。

回答（斎藤 尚文）

共著者の関口氏に加工コストの内訳表をご教示いただき、表2として論文に追加しました。ただし、数値の精度はそれほど厳密ではないとのコメントがありました。グラファイトによる作業環境の悪化および環境負荷の増大についてはこの論文に記述しました。低温鍛造による製品精度向上の理由は、ご指摘の通りです。

議論7 産総研の基礎基盤技術について

質問・コメント（清水 敏美）

産総研が得意とする基礎基盤技術として、金属材料の組織制御、解析、評価技術を挙げています。しかし、それらは大学や他の公的研究機関においても同様な、かつ同程度のポテンシャルを有していると考えられます。産総研のみが有するポテンシャルについて詳細に紹介できないでしょうか。関連して、鍛造技術の国内外の最新研究動向、それらと産総研技術との関連についても図や表で触れることはできないでしょうか。初稿では、写真図面が多用されています。専門分野の読者に対しては直接的な証拠として最適な根拠となるかも知れませんが、一般読者に対してはその差異を理解するのは困難です。数値的な表を用いて結果や根拠を示すことはできないでしょうか。

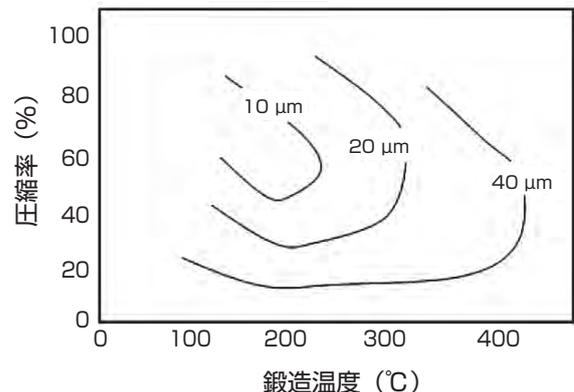
回答（斎藤 尚文）

この研究開発のポイントは、動的再結晶というこれまで学問的には多く研究がなされて来た現象を、ものづくりのプロセスに積極的に取り入れ、これまで鍛造素材として実績のなかったマグネシウム合金連続鋳造材の鍛造を可能にした点にあります。したがって、産総研は基礎的な学術成果とものづくりプロセスの橋渡しを行ったと言えます。このようなことが可能であるのが産総研のポテンシャルだと思います。これは、「技術を社会へ」という産総研のスローガンの実践であり、そのような内容を結言に入れました。鍛造技術の国内外の最新研究動向についてですが、企業との共同研究の成果を中心とした論文であること、鍛造技術全般となると内容が拡散してしまう恐れもあり、特に加筆はしていません。また、一般の読者でも理解できるように、写真とグラフを適材適所に配置しました。

議論8 基礎基盤技術としての動的再結晶の効果を示す等高線マップについて

質問・コメント（景山 晃）

この論文での技術の最大のポイントは動的再結晶によって結晶粒径を1桁下げることかと思えます。動的再結晶に対して温度と圧縮率とが影響するのであれば、X-Y2次元の座標上に得られた結晶の粒径を示す一種の等高線図で表し、マップ表現することを検討してはいかがでしょうか。例えば、執筆者がもっているデータからAZ91合金またはAZX91+Ca合金を用いた場合、X軸に温度、Y軸に圧縮率をとって、得られる結晶粒径を示すことはできませんでしょうか。（添付は参考図です）

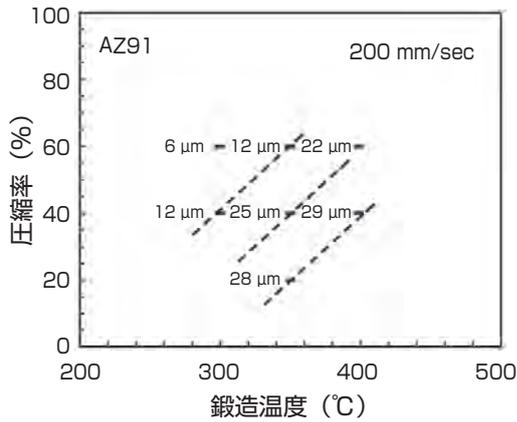


鍛造温度および圧縮率と結晶粒径との関係の概念図

このデータはプロセスウィンドウそのものとなり、技術を実用化する際に極めて重要です。また、結晶粒径が100 μmのオーダーから5～20 μmに小さくなると成形部材の強度は向上するのでしょうか。そうだとすれば、強度向上のメカニズム（一部仮説があってもよい）を本論中で述べてください。この議論を進めると、最適な結晶粒径は何 μmなのかという問いに行き着きます。このあたりも論じていただくと、産総研の基礎基盤技術（組成制御・解析・評価技術）を実証したケースとして生きてきます。

回答（斎藤 尚文）

ご指摘の点は、NEDOプロジェクトでの研究開発で重要な意味を持っていました。そこで、NEDOプロジェクトでの着想、仮説設定、要素技術の組み合わせ方を論じる部分で、図3のデータを基にご指摘のような図の作成を試みました。しかし、データ数が十分でないこともあり、余り説得力のある図とは言えませんので、現在の図3で代替させていただきます。なお、ご参考までに試作した図面を下に示します。



参考図 実験結果から作成した鍛造温度および圧縮率と結晶粒径の関係

また、金属材料の結晶粒を微細化することにより室温での強度が増加することは、Hall-Petchの法則として既に知られています。そのことも、3.1に文章を追加しました。

議論9 試作鍛造品について

質問（清水 敏美）

企業は、試作品鍛造品として角ピンヒートシンクを選択し、産総研が提供した鍛造用ブランク材と基礎データを基に低温鍛造処理を実施しています。初稿では鍛造温度を変化させた場合の結果のみが示されていますが、試作、開発時に新たに克服すべき課題等は出なかったのでしょうか。論文の最初に述べられている、「従来、マグネシウム合金に関しては成形プロセスにより機械的特性を満足させることは困難であった」という背景に対して、いとも簡単に克服しているように見えます。

回答（斎藤 尚文）

試作、開発時に新たに克服すべき課題等については特に企業から話はありませんでした。また本試作品（ヒートシンク）は強度が要求される部品ではありませんので、機械的特性の評価は実施していません。しかしヒートシンクのピン部のマイクロ組織観察により、結晶粒が10 μm以下に微細化していることを確認しています。したがって強度も高いと考えられます。動的再結晶による結晶粒微細化を鍛造プロセス中に発現させるというアイデアはコロンブスの卵的であり、現在の視点からは当然のように見えるかもしれませんが、プロジェクト開始当初にそのような発想はなく、企業や大学との議論を経て産総研が提案したということは強調したいと思います。またマグネシウム合金は動的再結晶による結晶粒微細化が施しやすい材料であり、結晶粒微細化をキーポイントとしたこの研究は、結果として比較的スムーズに開発が進みました。