

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高強度スクロール部品用のマグネシウム鍛造工法開発」

研究開発成果報告書

平成27年 3月31日

委託者 関東経済産業局

委託先 M&Dテクノ研究協同組合

目 次

第 1 章	研究開発の概要	
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	P. 2
1-2	研究体制	P. 6
1-3	成果概要	P. 11
1-4	当該プロジェクト連絡窓口	P. 11
本論		
2-1	【サブテーマ 1】耐熱高強度 Mg 合金鍛造用素材の開発	P. 12
2-2	【サブテーマ 2】耐熱高強度 Mg 合金部品の製造を可能にする鍛造工法の開発	P. 18
2-3	【サブテーマ 3】開発リードタイム短縮のための鍛造シミュレーション技術開発	P. 30
最終章	全体総括	P. 34

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

欧州 (EU) では 2020 年に平均 CO₂ 排出量 95g/km の目標値を打ち出すなど、自動車の環境性能に対する環境規制が更に強化されている。CO₂ 排出量を削減するため、自動車メーカーや部品メーカーは、これまで以上の高度な部品軽量技術が必要とされている。また、低燃費性能等に対する消費者の支持の高まりもあり、世界で販売される自動車の 1/4 が次世代自動車であるハイブリッド (HV) や電気自動車等 (EV) になるとの予測もある。現在、自動車メーカーは、次世代自動車の航続距離向上のための研究開発を進めているが、空調機器 (エアコン、ヒータ) を使用すると航続距離が 30% 以上も低下する問題があり、空調機器の効率改善や軽量化が課題となっている。さらに、次世代自動車は車室内が静かになる半面、エアコン圧縮機の作動音と振動音が室内に響くことが課題として顕在化している。このため圧縮機部品の静音化、制振化も求められている。

川下の自動車空調機器製造業者において、前記課題である「軽量化」、「高効率化」、「静音化・振動低減」の解決策として、圧縮機の可動部品であるスクロールを「軽量化」することにより、可動部品の慣性低減による「消費動力の低減 (= 高効率化)」と「音・振動の低減」を同時に達成することが望まれている。現在のスクロールは軽金属のアルミニウム (以降 Al) 合金を使用し、かつ機構設計面の軽量化、高効率化、音・振動の対策は実施しているが、その効果は限定的である。自動車の電動化という大きな変化に対応するためには Al 合金より軽量のマグネシウム (以降 Mg) 合金を適用することが求められている。

しかし Mg 合金は塑性加工が困難なため、実用化されている Mg 部品のほとんどが鋳造品である。鋳造品は強度が低いため、用途はカバー、ケース類に限定されており、圧縮機のスクロールのような耐熱高強度部品には適用出来ない。また、市販されている Mg 合金展伸材は、耐熱性と強度が十分でないため、スクロール部品への適用は困難である。

1-1-2 研究目的及び目標

自動車の環境対応技術として軽量化と高効率化があり、自動車空調機器にも同様の対応が求められている。川下企業では圧縮機の可動部品の軽量化、具体的にはアルミニウム製スクロール部品のマグネシウム化を検討している。しかし、汎用マグネシウム合金では強度が低い、また従来の耐熱マグネシウム合金はレアアースを多く含有するとともに押出し加工が必要なため高コストである、という問題があり、スクロール部品には適用出来ていない。耐熱高強度 Mg 合金の研究開発は従来から進められてきており、本アドバイザーである長岡技術科学大学は、レアアースフリーで耐熱性と強度を市販展伸材より向上させた耐熱高強度 Mg 合金材料を開発している。

本研究開発において、前述レアアースフリー耐熱高強度 Mg 合金をベースに、押出し工程と鍛造工程を一体化することが可能な材料開発ならびに鍛造工法が確立できれば、生産性、コスト面で実用化が難しいとされてきた耐熱高強度 Mg 合金材料の実用化が飛躍的に進むと予想される。

そこで本研究開発において、レアアースフリーの耐熱高強度マグネシウム合金をベースに、押出し工程と鍛造工程の一体化が可能な材料ならびに鍛造工法を開発し、生産性、コスト面で実用化が難しいとされてきた耐熱高強度マグネシウム合金材を高強度スクロール部品に適用する。

【サブテーマ 1】耐熱高強度 Mg 合金鍛造用素材の開発

一般にマグネシウム合金は組織を微細化するほど強度が高くなる。従来は鋳造材を押出し加工して組織を微細化する方法が一般的であった。本研究開発では、鋳造の段階で組織を微細化した材料 (急凝固材) を鍛造素材とすることを検討し、コスト面の対策も解決する。

〔具体的目標〕：組織微細化した鍛造用 Mg 材料の選定と開発

① スクロール部品形状が成形可能となる圧縮率 50% 以上で成形可能

② 圧縮率 70% の圧縮試験後、ビッカース硬度 85Hv 以上 (現行の鍛造用素材 75Hv)

〔対応方法〕

(Sub. 1-1) 断熱鋳型による連続鋳造材の鍛造部品への適用検討 (材料候補①)

断熱鋳型による連続鋳造法は、鋳型を断熱構造とし、鋳型下端からの直接冷却のみによ

って連続的に鑄塊（インゴット）を形成することで結晶粒径の微細化が可能な鑄造法である。本研究開発では、Mg-Al-Ca-Mn系のMg合金インゴット材を製造し、これを鍛造プレス機により圧縮試験に供して、割れの有無ならびにビッカース硬度の評価を行い、成形性および所望の機械的性質を有するMg合金素材を製造する各種条件を明らかにする。

(Sub. 1-2) 双ロール法による連続鑄造材の鍛造部品への適用検討（材料候補②）

双ロール法は、急凝固条件における製造方法であり、溶湯から薄板を直接製造することができるが、冷却速度はおよそ500~3000/°Cといわれている。注湯温度とロール周速を精緻に制御することで、結晶粒径を微細化することが可能である。また、急凝固条件下では、一般的なMg-Al-Ca-Mn系材料において、Al含有量従来よりも増加させて強度を向上させることが可能である。（現状では9%→12%程度まで可能である）本研究開発では、高Al含有Mg-Al-Ca-Mn系の双ロール材を製造し鑄造温度とロール周速度の関係を調査し、比較的大型部品に対応可能とするための厚板製造条件（10~30ミリ）を確立する。さらに、製造したロールキャスト素材を圧縮試験に供して、割れの有無ならびにビッカース硬度の評価を行い、成形性および所望の機械的性質を有する鍛造用Mg合金素材を製造するための各種製造条件を明らかにする。

【サブテーマ2】耐熱高強度Mg合金部品の製造を可能にする鍛造工法の開発

押出工程に相当した塑性ひずみを鍛造工程で蓄積させ部品の機械的強度向上を目指す。塑性ひずみを蓄積させる方法として、サーボプレスのスライドとダイクッションとの制御モード、金型温度、成形速度の各条件の最適値を明らかにする必要がある。また、同時に金型内の材料流れを促進させるため最適な金型形状、金型表面処理及び潤滑離型剤を決定する必要がある。

〔具体的目標値〕：圧縮機構部品への適用を可能とする要求特性値を満足する工法開発

① 室温耐力値 350MPa以上（市販マグネシウム合金鍛造材 205MPa）

② 150°C回転曲げ疲労強度 100MPa以上（高温で使用される部品の実用化無し）

〔対応方法〕

(Sub. 2-1) 均一微細化を可能とする鍛造工法の技術開発

複雑形状部品での鍛造において、組織の均一化と微細化のため動的再結晶を最大限に活用する、精密に制御した鍛造工法を確立する必要がある。本事業では任意の位置でスライド速度を任意に設定可能といった特徴をもつサーボダイクッション搭載型サーボプレスを活用した鍛造工法を確立する。

これまでもサーボプレスを活用してすえ込みと鍛造を一工程で行う方法が開発されている。これは、据え込みと成形の速度を制御する方法であった。しかし、この方法では、複雑な部品形状に対しては据え込みが不均一になり、高い機械的特性が得られなかった。また、十分な据え込みを行うことによる生産性の低下が起るため量産には向かない。

本事業ではサーボプレス機を用い、塑性ひずみを蓄積させるための導入を期待した据え込みを繰り返し付与しながら同時に成形を行うスライドモーションの有効性を確認する。このスライドモーションでは、据え込み速度を遅くすることができるため、動的再結晶は促進しやすくなる。また、据え込み速度は遅くなるが、同時に成形も行うため、成形開始から終了までの時間は従来同等である。さらに、繰り返し据え込み成形を行う利点は、金型とワークの界面への潤滑剤の供給が安定化し成形性が向上することにある。このため、成形速度をさらに高速化できる可能性がある。以上の鍛造工法をサーボプレスのスライドとダイクッションとの制御モード、金型温度、成形速度の種々の関係を明らかにして達成する

(Sub. 2-2) 材料流れを促進する金型設計開発

押し出し加工に相当する塑性ひずみを鍛造1工程で行うために、金型内の材料流れを促進し成形性を高める必要がある。本事業では、Mg合金の温間鍛造解析を行う。この解析結果もとづき、変形が集中し材料流れが集中する部分を局所的に加熱することにより、効率的に成形を可能にする金型の開発、および製造条件を決定する。さらに金型の熱解析の結果をもとに、必要な部分のみを加熱または冷却するスポット加熱金型を設計する。

また、スポット加熱システムを使用しても、まだ金型内の材料流れが不十分である場合には、金型表面にセラミックス系の自己組織化被膜コーティング（ZAC処理）等を行うことにより、従来とは格段に材料流れが向上するように改善を加える。

【サブテーマ3】開発リードタイム短縮のための鍛造シミュレーション技術開発

鍛造条件の最適値を明らかにするためには多くの実験を重ねる必要があるが、工数・費用の限られた開発で最適値を明らかにすることは大きな課題である。ここでは、マグネシウム合金の基礎物性を実験から収集し、鍛造シミュレーション解析の信頼性向上を目指していく。シミュレーション解析を活用することで、予想させる成形性をもとに鍛造条件、金型形状を短期間で決定し工法開発のリードタイム短縮をめざす。

〔具体的目標値〕：成形性予測を可能とする鍛造シミュレーションの構築

〔対応方法〕

本事業で実施する温間鍛造解析（成形シミュレーション）においては、まず、マグネシウム合金の温間成形データベースを実験より作成する。このデータベースを用いた解析の結果から、CADデータをもとに成形予測シミュレーションを開発する。旭産業(株)は成形予測をもとに鍛造成形条件を決定する)。さらに部品精度評価と部品性能を評価し、シミュレーション結果の検証を行い、熱解析および温間鍛造解析を含めて開発リードタイム短縮のための鍛造シミュレーション技術として成形解析結果をデータベース化する。

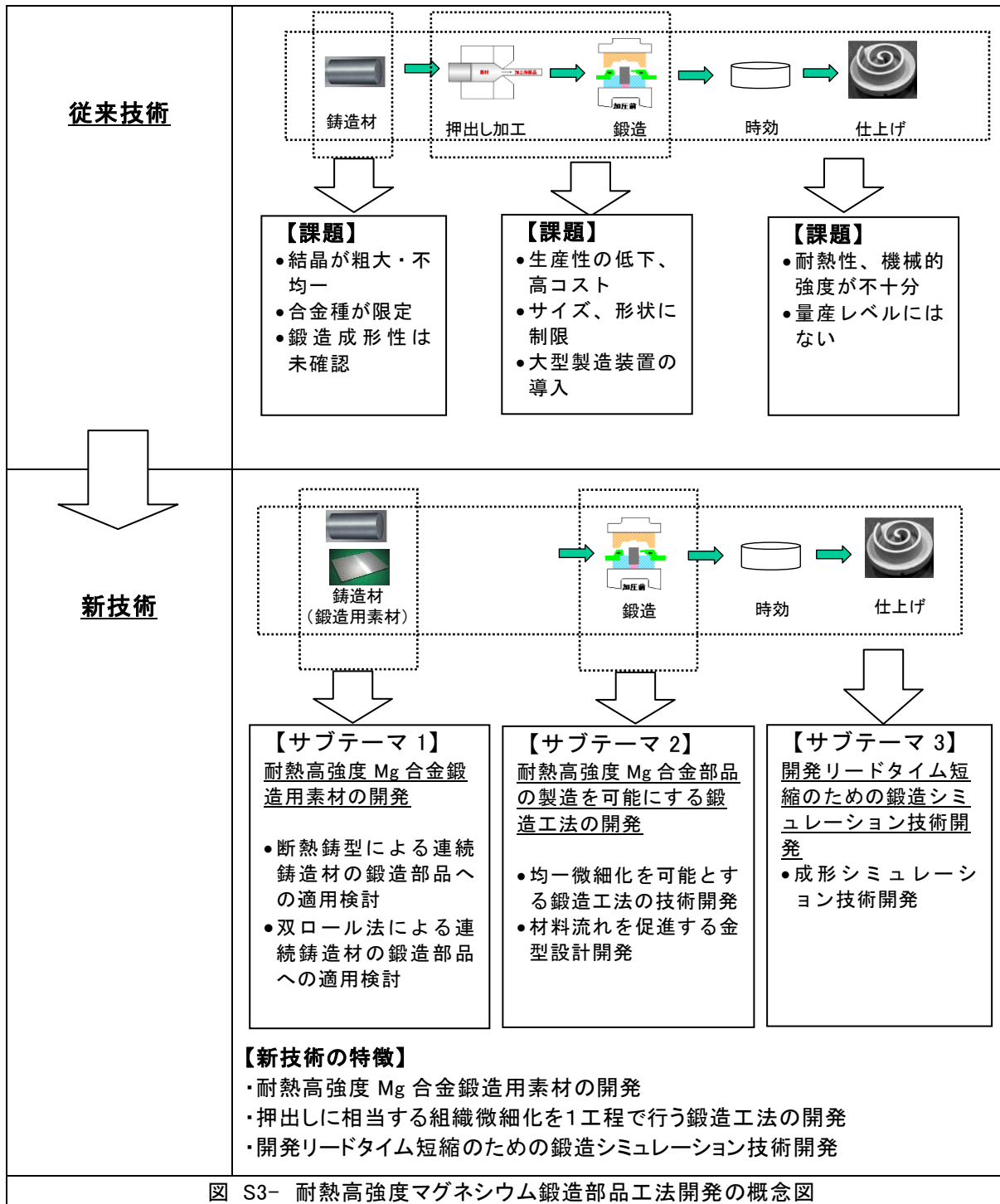
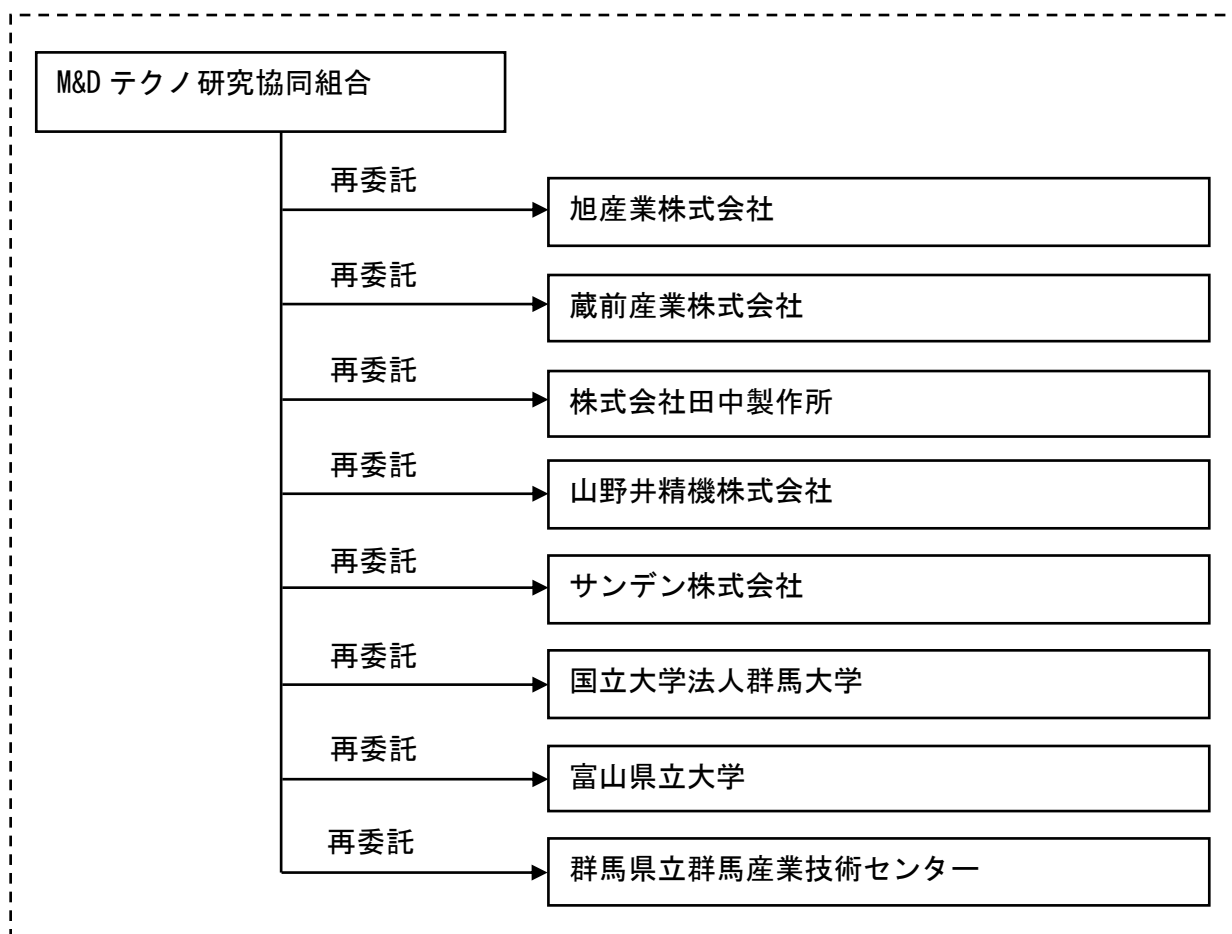


図 S3- 耐熱高強度マグネシウム鍛造部品工法開発の概念図

1-2. 研究体制

1-2-1 研究組織 (全体)



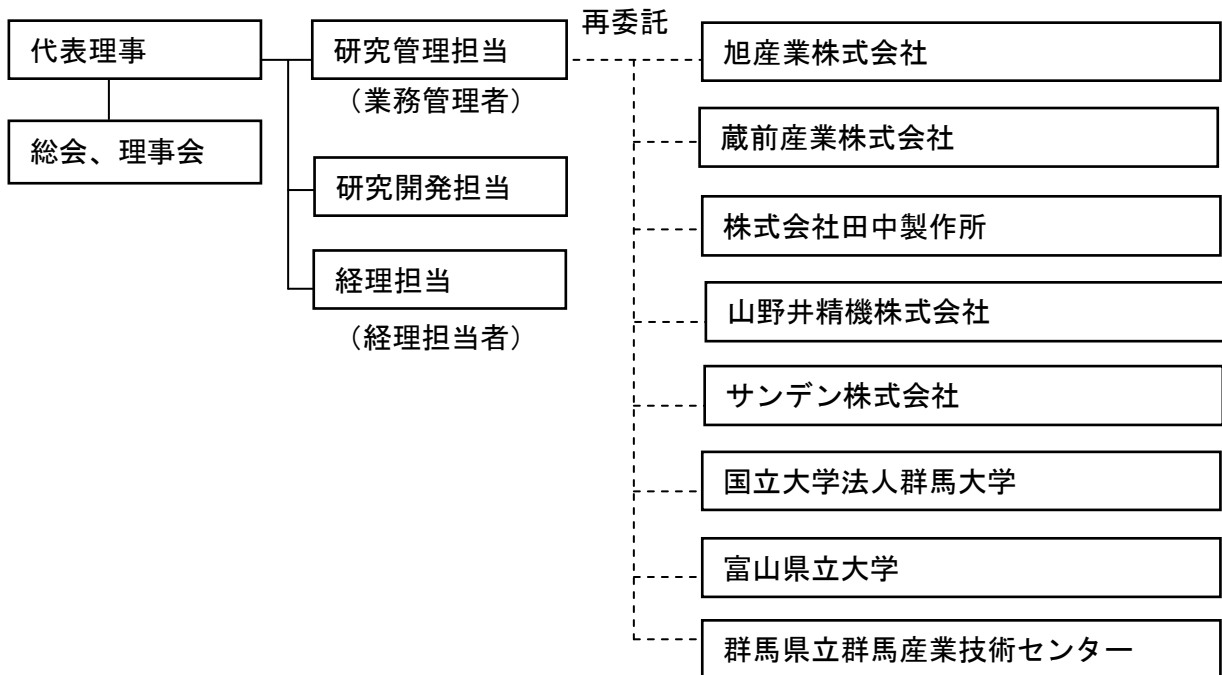
総括研究代表者 (PL)
旭産業株式会社
取締役 生産本部長
林 幸一

副総括研究代表者 (SL)
サンデン株式会社 開発本部
基盤技術部 主席
福井 毅

1-2-2 管理体制

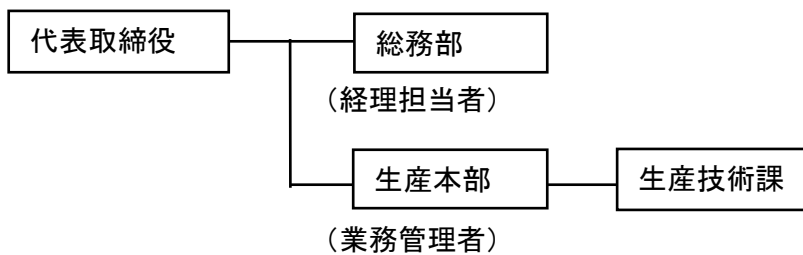
① 事業管理者

【M&D テクノ研究協同組合】

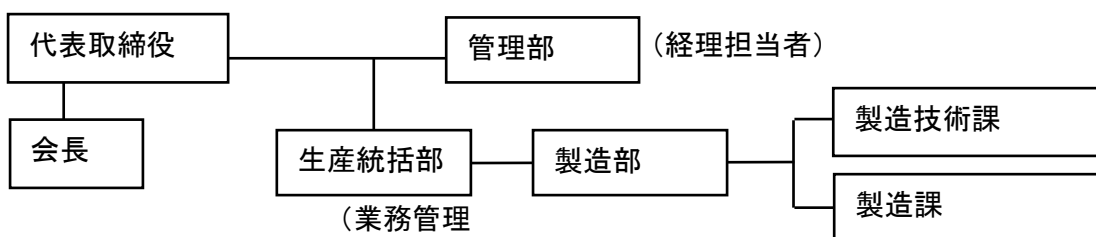


② (再委託先)

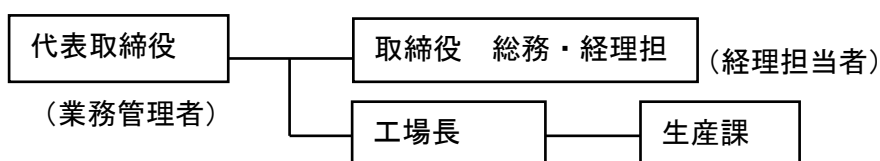
【旭産業株式会社】



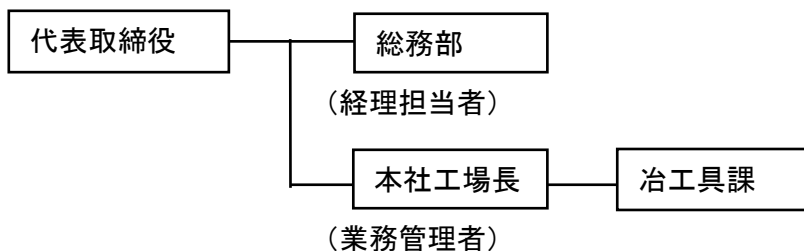
【蔵前産業株式会社】



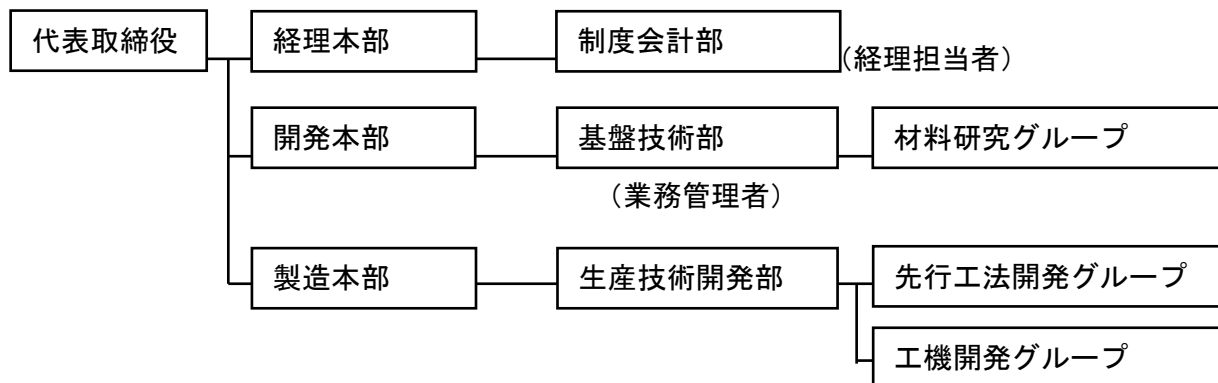
【株式会社田中製作所】



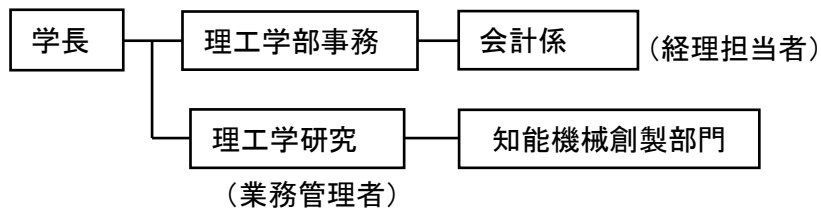
【山野井精機株式会社】



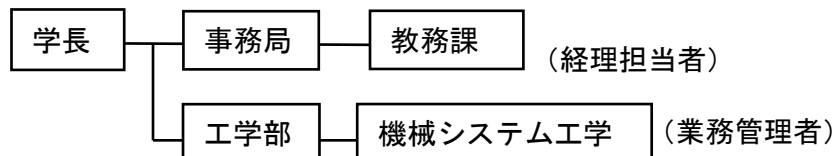
【サンデン株式会社】



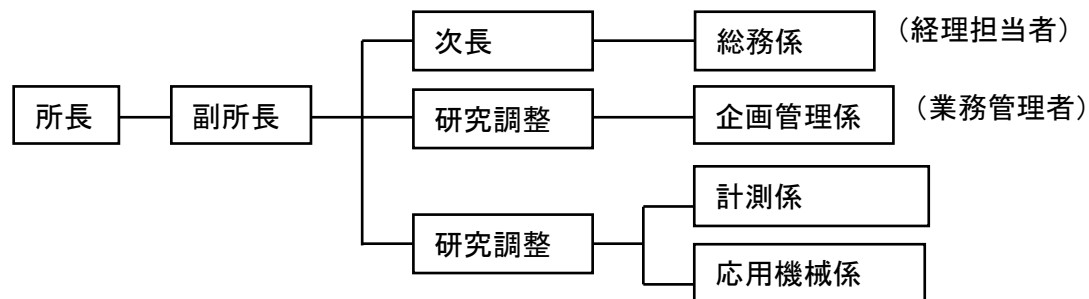
【国立大学法人群馬大学】



【富山県立大学】



【群馬県立群馬産業技術センター】



1-2-3 管理員及び研究員

【事業管理機関】M&D テクノ研究協同組合

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
羽鳥 智久	経理担当	④
千葉 隆一	研究開発担当	④
小和田 雅明	研究管理担当	④

②研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
千葉 隆一(再)	研究開発担当	① -1, 2, ②-1, 2, ③

【再委託先】

(研究員)

旭産業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
林 幸一	取締役 生産本部長	①-1, 2, ②-1, 2, ③
中島 仁	生産本部 生産技術課 課長	①-1, 2, ②-1, 2, ③
佐俣 義幸	生産本部 生産技術課	①-1, 2, ②-1, 2, ③

蔵前産業株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
橋本 勝	会長	①-1, 2, ②-1, 2, ③
永井 靖	製造部 部長代理 兼 製造技術課長	①-1, 2, ②-1, 2, ③
市川 浩之	製造部 製造課	①-1, 2, ②-1, 2, ③
森 正太	製造部 製造課	①-1, 2, ②-1, 2, ③

株式会社田中製作所

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
田中 征男	代表取締役	①-1, 2, ②-1
大塚 和正	生産課 品質管理主任	①-1, 2, ②-1
小川 孝明	生産課 NC 主任	①-1, 2, ②-1
吉田 一也	生産課 MC 主任	① -1, 2, ②-1

山野井精機株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
幸田 稔	冶工具課 課長	①-1, 2, ②-1, 2, ③
大山 智弘	冶工具課 主任	①-1, 2, ②-1, 2, ③
笹本 陽平	冶工具課	①-1, 2, ②-1, 2, ③

サンデン株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
福井 毅	開発本部 基盤技術部 主席	①-1, 2, ②-1, 2, ③
福島 誠	開発本部 基盤技術部 材料研究グループ リーダー	①-1, 2, ②-1, 2, ③
平渡 末二	開発本部 基盤技術部 材料研究グループ	①-1, 2, ②-1, 2, ③
小和田 芳夫	開発本部 基盤技術部 材料研究グループ	①-1, 2, ②-1, 2, ③
真崎 武	製造本部 生産技術開発部 部長	①-1, 2, ②-1, 2, ③
千葉 隆一	製造本部 生産技術開発部 先行工法開発グループ リーダー	①-1, 2, ②-1, 2, ③
洪沢 英俊	製造本部 生産技術開発部 工機開発グループ リーダー	①-1, 2, ②-1, 2, ③
石関 祥典	製造本部 生産技術開発部 工機開発グループ	①-1, 2, ②-1, 2, ③

国立大学法人群馬大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
渡利 久規	理工学研究院 知能機械創製部門 教授	①-1, 2, ②-1, 2, ③

富山県立大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
鈴木 真由美	工学部 機械システム工学科 准教授	①-1, 2

群馬県立群馬産業技術センター

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
横山 靖	計測係 独立研究員	①-2, ②-1, 2
矢澤 歩	応用機械係 独立研究員	① -2, ②-1, 2

1-2-4 他からの指導・協力者

氏名	所属	役割・担当
鎌土 重晴	国立大学法人長岡技術科学大学 工学部 機械系 材料システム工学講座 教授	アドバイザー
行武 栄太郎	茨城県工業技術センター 先端材料部門 主任研究員	アドバイザー
久米原 宏之	一般財団法人地域産学官連携ものづくり研究機構 リサーチフェロー (国立大学法人群馬大学 名誉教授)	アドバイザー

1-3 成果概要

【サブテーマ1】

断熱鋳型による連続鋳造材の鍛造部品への適用(材料候補①)に関しては、Mg-Al-Ca-Mn系合金の連続鋳造材を試作し、高温圧縮試験により合金の応力ひずみ特性を取得し、成形性に及ぼす圧縮温度、ひずみ速度の影響を調査した。その後徹底した温間物性値取得を実施した。その後、連続した成形を実現するため、及び複雑形状であるスクロール部品をターゲットとしているため、金型への貼り付き性を抑制でき、摩擦係数をさらに低減した潤滑剤の再選定を実施した。その結果、複数種を選定し圧縮試験を行い、金型との貼り付き性と摩擦係数の定量化を行ない、低摩擦かつ金型への張り付きを抑制する潤滑剤を選定する事が出来た。

双ロール法による連続鋳造材の鍛造部品への適用(材料候補②)である、高Al含有マグネシウム合金の双ロール鋳造法材料開発では技術目標である10mm以上の厚板の材料を生成する事が実現すると共に、基礎圧縮特性を取得した結果にて圧縮荷重はAl含有量が増加すると低減する事を明らかにしている。

【サブテーマ2】

サブテーマ1にて選定した低摩擦かつ張り付き抑制効果の期待できる潤滑剤の実証実験の結果、成形性課題が解消され連続成形が可能となり、研究開発が加速すると共に、事業化に対する可能性を見出せた。これを受けてミニスクロール金型を用いて、条件最適化に向けた各条件因子の影響度検証を実施した。特に鍛造成形性と機械的特性双方の向上を目指すために、背圧鍛造の効果を検証した結果、背圧を付与することで、背圧無しの条件では十分な成形性が得られていなかった鍛造温度が低温領域での良好な成形性が得られている。これらの条件最適化により目標機械的特性値を満たす結果を得て、その結果にて川下企業から実機モデルでのサンプル提示を要求され、事業化計画を変更し、実機モデル成形実験を実施し、評価用サンプルを採取している。

更に、高Al含有マグネシウム合金の双ロール鋳造法材料の鍛造成形性を検証にて、鍛造荷重はAXM4303に比べて低くすることが可能であり、加えて、背圧を付与しなくてもスクロール部品の成形が可能である事と静的機械特性にて材料候補①を上回る特性が得られる事を明らかにした。

金型開発においては、一般的に使用されている高剛性の鍛造金型構造でなく、汎用プレスでも成形可能なコンパクトな金型開発をコンセプトとし、材料温度安定化を考慮し材料加熱に金型温度伝熱方式、及びアルミ鍛造にて実用化されている背圧付与成形を採用し、実サンプル成形に耐え得る金型開発を実現している。

【サブテーマ3】

材料候補①と材料候補②の温間物性値を基に、サブテーマ2による鍛造成形実験結果と鍛造解析結果の照合とチューニングに注力した。その結果、成形性精度を期待できると判断し、実機モデルの事前予測解析を実施し、本製品の金型開発に結果のフィードバックをすると共に、実成形荷重にて誤差5%であった。

また本開発情報を開発メンバーと共有し、製造へ各種条件選定の根拠等を確実に移管するために、開発プロセスにて得られる情報、データを一元管理するシステムの運用を開始した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

事業管理者：M&Dテクノ研究協同組合
〒370-8502 群馬県伊勢崎市寿町20番地
TEL 0270-22-1321, FAX 0270-21-2646
研究管理担当 小和田雅明

2-1【サブテーマ1】耐熱高強度 Mg 合金鍛造用素材の開発

Sub1-①：断熱鑄型による連続鑄造材の鍛造部品への適用検討及び金型と素材との接触抵抗値の基礎データ取得（材料候補①）

目的

鑄造材から直接鍛造するために、結晶粒の微細化するための試みを実施した。供試材料として耐熱性を有する Mg-Al-Ca-Mn 系合金（AXM 合金）を用いて、急冷凝固することが可能な断熱鑄造法により製造された連続鑄造材を入手し、温間から熱間までの変形抵抗および硬度を調査する。また、これまでマグネシウム合金の鍛造において課題として明らかになっている、金型への材料の貼り付を解決するために適切な潤滑剤の選定を行う。また、同時に潤滑剤の摩擦係数を明らかにするためにリング圧縮試験法を用いた試験を行い定量化した。

研究成果

Sub1-①-1 AXM4303 材の急冷凝固材の結晶組織観察

図 S1- 1 は、一般的な鑄造方法で製造したマグネシウム合金 AZ31 の結晶組織（図 S1- 1(a)）と急冷凝固法で製造した AXM4303 の結晶組織（図 S1- 1(b)）を示している。図 S1- 1(a)と図 S1- 1(b)とは合金の種類が異なるものの結晶組織は図 S1- 1(b)で示している AXM4303 合金の方が微細になっている。

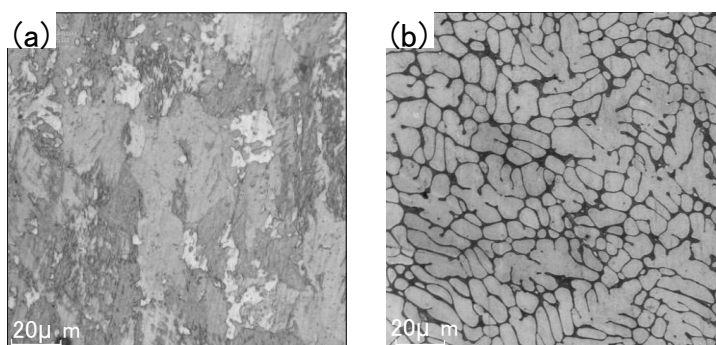


図 S1- 1 鑄造材の結晶組織 (a)AZ31 一般的な鑄造材 (b)AXM4303 断熱鑄型鑄造材

Sub1-①-2 AXM4303 材の真応力-真ひずみの関係

図 S1- 2 は、圧縮特性を調べるために用いた圧縮試験用の金型（図 S1- 2(a)）および試験前後の試験片の外観（図 S1-2(b)）を示している。圧縮試験片は、外径 8mm、高さ 12mm の円柱試験片で、連続鑄造材の中心部から採取している。

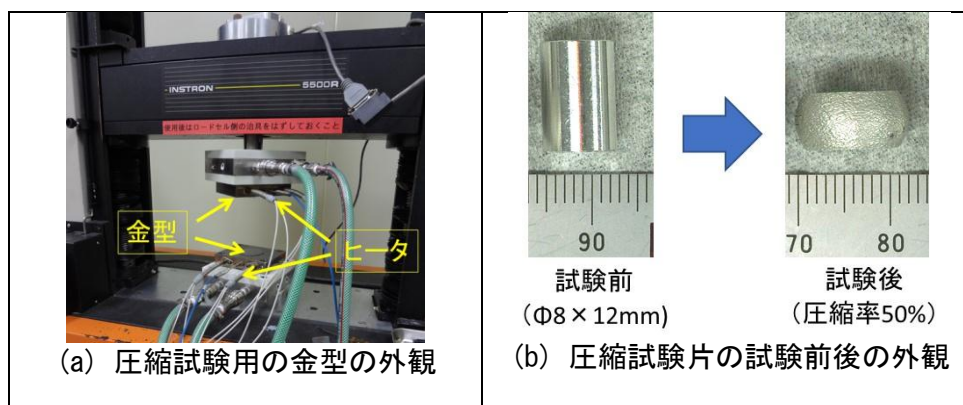


図 S1- 2 圧縮試験用の金型の外観および圧縮試験片の試験前後の外観

図 S1- 3はAXM4303の真応力-真ひずみ線図を示している。図 S1- 3(a)はひずみ速度 $0.1s^{-1}$ の場合、図 S1- 3(b)はひずみ速度 $0.01s^{-1}$ の場合を示している。図 S1- 3(a)のひずみ速度が $0.1s^{-1}$ の場合においては、試験温度 $350^{\circ}C$ と $400^{\circ}C$ ではひずみ 0.1 付近をピークに応力は低下している。試験温度 $300^{\circ}C$ と $250^{\circ}C$ 場合では、応力は降伏した後も増加し、ひずみ 0.3 程度で最大に達した後わずかに低下する。試験温度 $350^{\circ}C$ と $400^{\circ}C$ の場合では、降伏後に応力が軟化は動的再結晶特有の挙動が表れているものと考えられる。 $300^{\circ}C$ と $250^{\circ}C$ の場合、降伏後も応力が上昇していることから加工硬化が進んでいるものと考えられる。図 S1- 3(b)のひずみ速度が $0.01s^{-1}$ の場合においては、 $400^{\circ}C$ 、 $350^{\circ}C$ および $300^{\circ}C$ が降伏後に応力軟化している。225は降伏後も応力の増加が認められている。ひずみ速度が $0.01s^{-1}$ の場合、ひずみ速度が $0.1s^{-1}$ の場合に比べて、より低温($300^{\circ}C$)でも動的再結晶が起こると考えられる

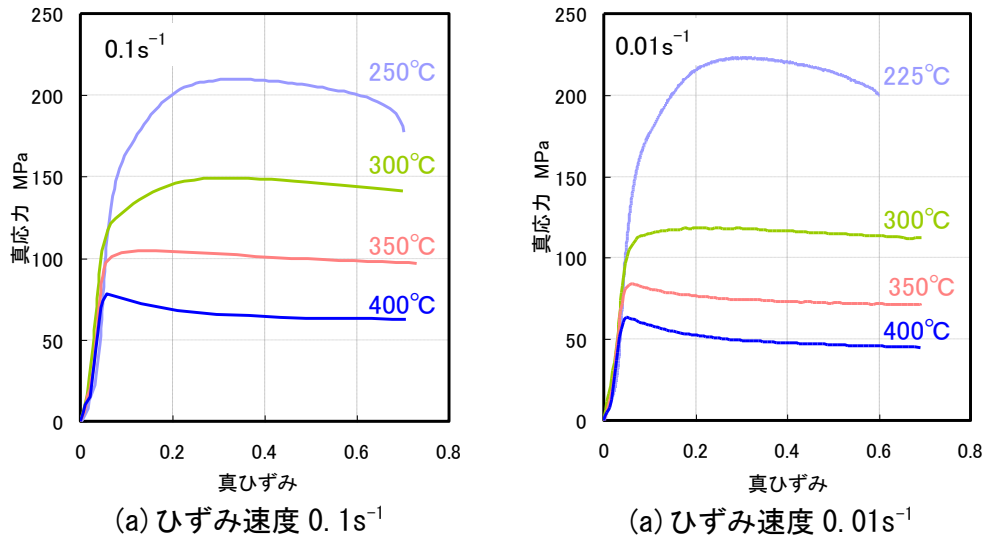


図 S1- 3 圧縮試験により得られた真応力-真ひずみの関係

図 S1- 4 および図 S1- 5 は、図 S1- 3 で示している真応力-真ひずみ線図から得られたピーク応力およびピークひずみを試験温度との関係で整理している。図 S1- 4 はピーク応力と試験温度の関係、図 S1- 5 はピークひずみと試験温度の関係をそれぞれ示している。図 S1- 4 よりひずみ速度が小さくなるとピーク応力は低下して $300^{\circ}C$ 以下でも割れが発生していない。図 S1- 5 で示しているピークひずみは、ひずみ速度が小さくなると高くなっている。図 S1- 4 と図 S1- 5 から、ひずみ速度が小さいとピーク応力は低下し、同時にピークひずみも低くなる。ひずみ速度が小さくなるとピーク応力とピークひずみが低下する理由は、動的再結晶が生成しやすくなるためと考えている。

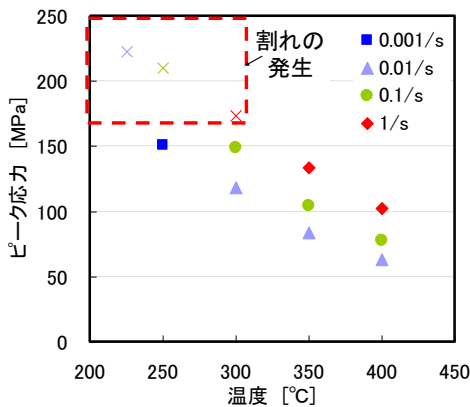


図 S1- 4 ピーク応力と試験温度の関係

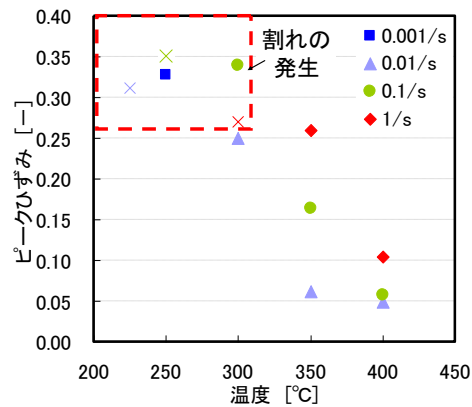


図 S1- 5 ピークひずみと試験温度の関係

Sub1-①-3 マグネシウム合金鍛造用の潤滑剤選定

マグネシウム合金の熱間および温間の鍛造では、金型と材料の貼り付きが課題である。本サブテーマでは、表 S1- 1 に示している潤滑剤を用いてリング圧縮試験を行い、試験後の圧縮金型と材料の貼り付きが発生しない潤滑剤を選定した。

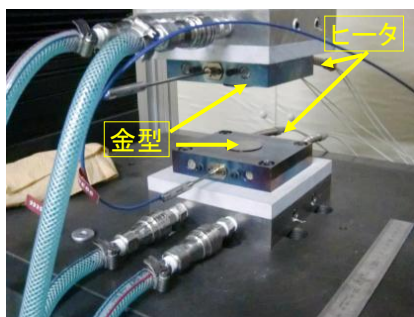
表 S1- 1 リング圧縮試験から求めた各種潤滑剤の摩擦係数

潤滑剤 種類	性状	メーカー	粘度 (mPa・s)
A 剤(油)	オイル	ABC 社	1587
B 剤(油)	オイル	XYZ 社	7310
C 剤(油+黒鉛)	ペースト	XYZ 社	3460
D 剤(油+無機化合物)	ペースト	XYZ 社	—
E 剤(油)	オイル	XYZ 社	—
F 剤(油)	オイル	OPQ 社	—
G 剤(水溶性)	水溶液	XYZ 社	3
Mo2S	ペースト	—	—

図 S1- 6 は、潤滑剤の選定を行うために実施したリング圧縮試験の金型および概略図を示している。試験に使用したリング圧縮試験片は、外径 (D_0) 20mm、内径 (d_0) 10mm および高さ (h_0) 5mm となっている。また、試験温度は、300℃と 400℃、圧縮率は 50% で行っている。リング圧縮試験からは、式 (1) と式 (2) で示している圧縮率 ($\Delta h/h$) と内径変化率 (D_e) を求めて摩擦係数の定量も行っている。

$$\Delta h/h_0 = \frac{h_0 - h}{h_0} \times 100 \quad (1)$$

$$D_e = \frac{d}{d_0} \times 100 \quad (2)$$



(a) リング圧縮試験用の金型外観



(b) リング圧縮試験の概略図

図 S1- 6 リング圧縮試験の金型の外観およびリング圧縮試験の概略図

表 S1- 2 は試験温度 300℃の場合と 400℃の場合で圧縮試験を行ったときの潤滑剤と金型の貼り付きの状態と摩擦係数を示している。表 S1- 2 で示している摩擦係数は、あらかじめ有限要素法により摩擦係数ごとに求めた内径変化率と圧縮率の関係 (校正曲線図) に、実験で得られた試験片の内径変化率と圧縮率をプロットして決定している。

表 S1-2 より、材料と金型の貼り付きは、300℃の場合では発生していないが、400℃の場合では現行 (A 剤) で使用していた潤滑剤と G 剤および Mo₂S 等で発生した。G 剤の摩擦係数は、300℃の場合と 400℃の場合で最も低い値を示している。

表 S1- 2 材料の金型貼り付きに及ぼす潤滑剤の影響

	300℃		400℃	
	摩擦係数	貼り付き	摩擦係数	貼り付き
A 剤(現行)	0.65	OK	0.45	NG
B 剤	0.15	OK	< 0.1	OK
C 剤	0.11	OK	< 0.1	OK
D 剤	0.25	OK	0.40	OK
E 剤	0.23	OK	0.20	OK
F 剤	0.23	OK	.35	OK
G 剤	0.15	OK	0.40	NG
Mo ₂ S	0.18	OK	0.20	NG

Sub1-②：双ロール法による連続鋳造材の鍛造部品への適用検討（材料候補②）

・目的

汎用性の Mg-Al-Zn 系合金（AZ 合金）を基本組成として、急冷凝固することで Al 量を 9%から 13%まで固溶させた高 Al 含有マグネシウム合金の圧縮特性について調査する。高 Al 含有マグネシウム合金の鋳造材は双ロール鋳造法により製造した。

・研究成果

Sub1-②-1 双ロール鋳造法による Mg-Al-Zn 合金の高板厚化と微細化

図 S1- 7 に高 Al 含有マグネシウム合金の双ロール鋳造板材の実験装置の概要を示す。

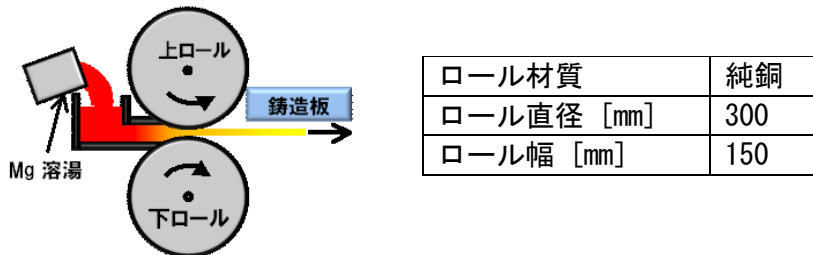


図 S1- 7 双ロール鋳造板材の実験装置概要

図 S1- 8 は、これまでの実験から求めたロール材の板厚とロール速度の関係を示している。図 S1- 8 は一例として Al を 10% 固溶させた AZ101 の結果を示している。図 S1- 8 より AZ101 鋳造材の板厚は 2mm から 10mm 以上までが得られており、鍛造用のビレットとしても充分に使用できると考えている。

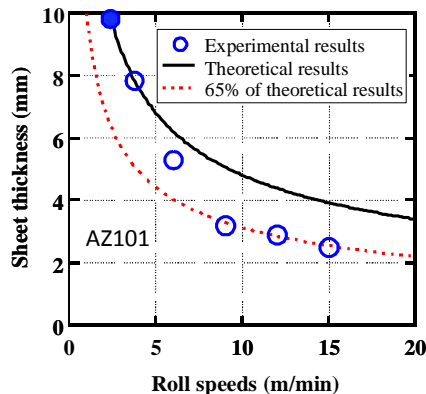


図 S1- 8 AZ101 鋳造材のロール周速度と板厚の関係

図 S1- 9 は、AZ91, AZ101 および AZ111 合金の双ロール鋳造材の組織観察結果を示している。結晶組織を板厚方向で観察すると表面部分と中心部では結晶粒径に差異はあるが、いずれの位置でも結晶粒径は 100 μm 以下まで微細になっている。また、結晶粒径は、AZ91, AZ101, AZ111 の順に小さくなり、Al 含有量が多くなると結晶粒径は小さくなる傾向が認められている。特に Al 量が多い AZ111 の中心部の結晶粒径は 20 μm 程度まで微細になっている。

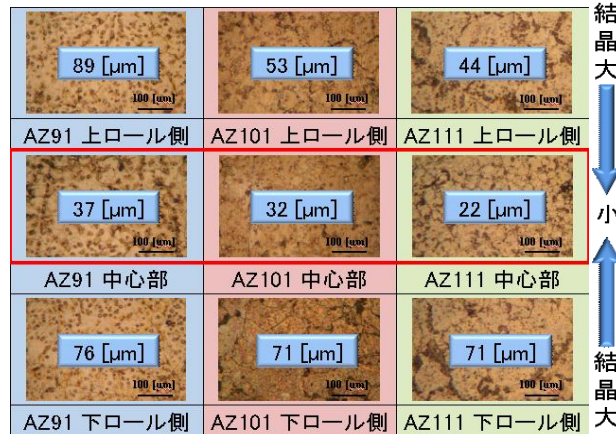


図 S1- 9 双ロール鋳造材の組織観察結果

Sub1-②-2 双ロール鋳造法で製造した高 Al 含有マグネシウム合金の圧縮特性

図 S1- 10 は高 Al 含有マグネシウム合金 (AZ91, AZ101, AZ111 および AZ121) と AXM4303 の真応力-真ひずみの関係を示している。図 S1- 10(a) は試験温度 300°C の場合、図 S1- 10(b) は試験温度 400°C の場合を示している。高 Al 含有マグネシウム合金においては、300°C の場合では Al 含有量が多くなると応力はわずかに低下し、400°C の場合ではどれも同じ傾向である。高 Al 含有マグネシウム合金と AXM4303 の結果を比較すると、高 Al 含有マグネシウム合金の方が 30% 程度低くなっている。この傾向は試験温度 300°C と 400°C で同じである。

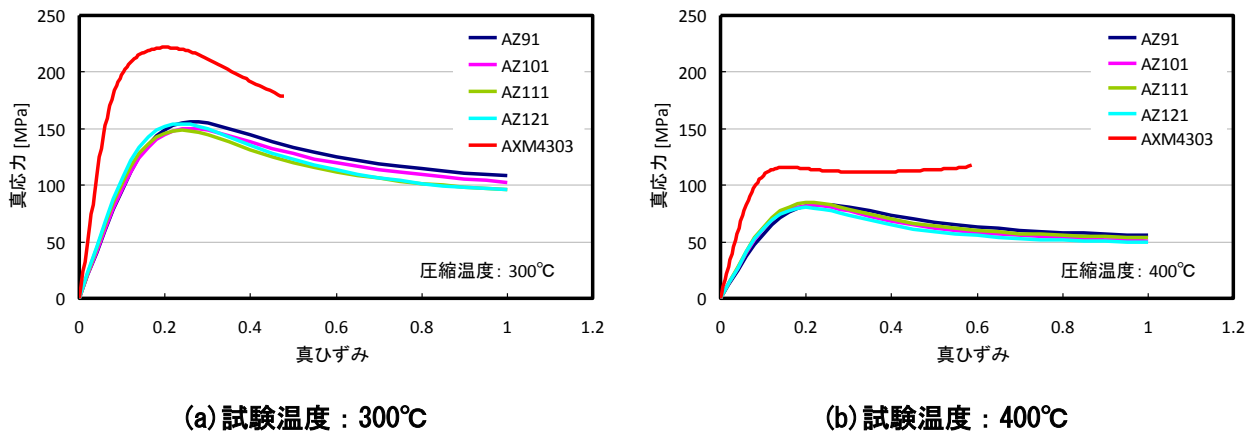


図 S1- 10 双ロール法により製造させた高 Al 含有マグネシウム合金の圧縮特性

Sub1-②-3 双ロール鋳造法と金型鋳造法の比較

図 S1- 11 は、高 Al 含有マグネシウム合金を双ロール鋳造法と金型鋳造法の二種類の方法で製造し、圧縮試験を行った場合の、試験片の外観を示している。双ロール鋳造法で製造した試験片は、試験温度が 300°C の場合も 400°C の場合も大きな差異は認められない。一方、金型鋳造法で製造した試験片は試験温度が 400°C の場合は、AZ91, AZ101 および AZ111 で材料の溶解が発生した。試験温度 300°C の場合では溶解は起きていない。図 S1- 11 の結果は、双ロール鋳造法で製造した試験片の方が耐熱性が向上していることを示していると考えられる。

	双ロール鋳造材	金型鋳造材
AZ91	300 °C	1 2 3 300 °C
	400 °C	4 5 6 400 °C
AZ101	300 °C	7 8 9 300 °C
	400 °C	10 11 12 400 °C
AZ111	300 °C	13 14 15 300 °C
	400 °C	16 17 18 400 °C
AZ121	300 °C	19 20 21 300 °C
	400 °C	22 23 24 400 °C
AZ131		25 26 27 300 °C
		28 29 30 400 °C

図 S1- 11 圧縮試験後の試験片の外観

2-2【サブテーマ2】耐熱高強度 Mg 合金部品の製造を可能にする鍛造工法の開発

Sub2-①：成形性と機械的特性の双方を向上する鍛造工法の技術開発

目的

サブテーマ1で検討したマグネシウム合金の鍛造成形性を調べるために、二重円筒形状の金型を用いて鍛造試験を行い最適な鍛造加工条件を見つけた。さらに製品形状により近いミススクロール金型を用いて、二十円筒金型で得られた最適な加工条件の検証と、スクロール形状特有の鍛造成形性のし難さを補うための加工方法および加工条件を見つけた。さらに、鍛造成形性と機械的強度を同時に満足できる加工条件を明らかにした。最終的には実部品の金型を用いて鍛造試験を行い、鍛造成形性と機械的強度の検証を行い製造条件を決定する。

研究成果

Sub2-①-1 AXM4303 の二重円筒金型を用いた鍛造成形性の検討

図 S2- 1 は基礎的な鍛造成形性を調べるために用いる二重円筒鍛造品の寸法を示している。

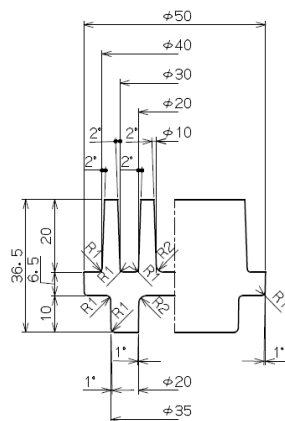


図 S2- 1 二重円筒鍛造品の断面寸法

図 S2- 2 は二重円筒の壁高さの最大値と最小値の差を鍛造温度の関係で示している。図 S2- 2 は、最大値と最小値の差が大きくなると成形性が悪くなることを示している。図 S2- 2 より、壁の最大値と最小値との差は鍛造温度が低くなると大きくなっている。鍛造速度が 0.1mm/s の場合では、鍛造温度 350℃と 400℃の間に成形性の変化点があり、鍛造速度が 1mm/s の場合では、鍛造温度 300℃と 350℃の間に成形性の変化点がある。以上より、鍛造速度が高速の方がより低温で鍛造成形性を改善できる。

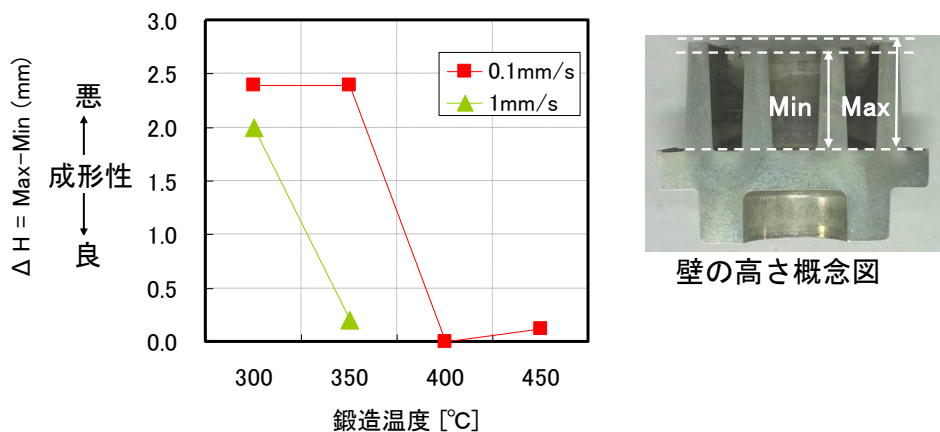


図 S2- 2 二重円筒鍛造品における鍛造成形性に及ぼす鍛造温度の影響

図 S2- 3 は 0.2%耐力，引張強さおよび破断伸びに及ぼす鍛造温度の影響を示している。0.2%耐力と引張強さは鍛造温度が低くなるほど高くなっている。破断伸びは，鍛造温度にはあまり影響していない。なお，本試験条件（鍛造速度 0.1mm/s）においては，350℃以下の鍛造温度では十分な鍛造成形性は得られていないため，300℃程度の鍛造温度で成形性を改善する必要がある。

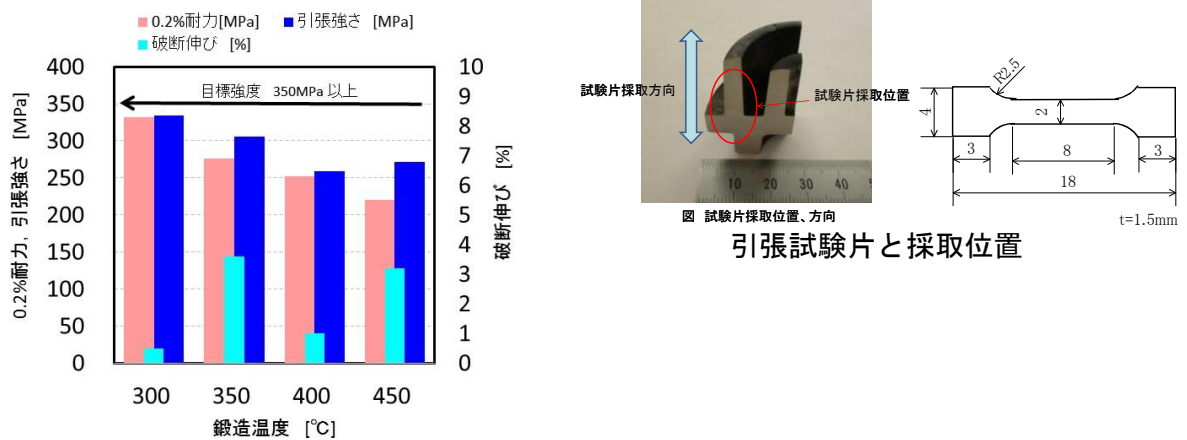
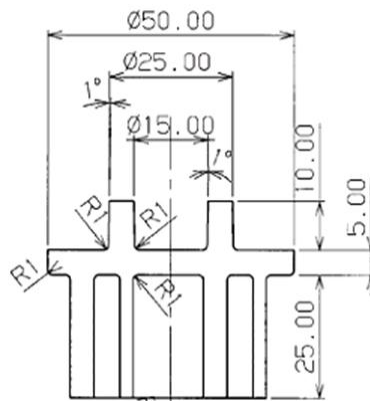


図 S2- 3 二重円筒鍛造品における引張特性に及ぼす鍛造温度の影響（鍛造速度 0.1mm/s）

Sub2-①-2 AXM4303 のスクロール金型を用いた鍛造成形性の検討

図 S2- 4 は，鍛造試験に用いたスクロール（ミニスクロール）の金型寸法を示している。図 S2- 4 で示している金型は，壁の先端側（図 S2- 4 の下側）からは背圧が付与できる構造となっている。



単位：[mm]

図 S2- 4 鍛造試験用に用いた鍛造部品の寸法（ミニスクロール）

図 S2- 5 は，これまで用いた油性潤滑剤（以下 A 剤）と Sub1-①で検討した低摩擦係数の黒鉛含有滑剤（以下 C 剤）を用いて得られた鍛造品の外観を示している。図 S2- 5 には背圧を 20kN および 100kN 付与したときの結果（鍛造品）も示している。A 剤を用いた鍛造の場合，背圧なしで壁の根元で割れが発生している。C 剤を用いた場合では，背圧なしで割れは発生しない。背圧を 20kN および 100kN 付与した場合は，どちらの潤滑剤を用いても割れ等は発生していない。

背圧荷重	潤滑剤：A 剤	潤滑剤：C 剤
0 kN (背圧無し)		
20 kN		
100 kN	※) プレス機の荷重上限以上となり鍛造品は得られていない	

図 S2- 5 はスクロールの壁の高さ差 Δh (最大値-最小値) と背圧荷重の関係を示している。スクロール壁高さ差 Δh は 2mm 以下が製品仕様となっている。鍛造温度が 350°C の場合では、背圧を 20 kN 程度付与することで製品仕様を満足した鍛造品が得られている。一方、鍛造温度 300°C の場合では背圧 70kN 付与すると製品仕様を満たした鍛造品が得られる。鍛造温度 350°C と 300°C の場合では、背圧を 100kN 程度まで付与すると壁高さ差はほとんど無くなっている。

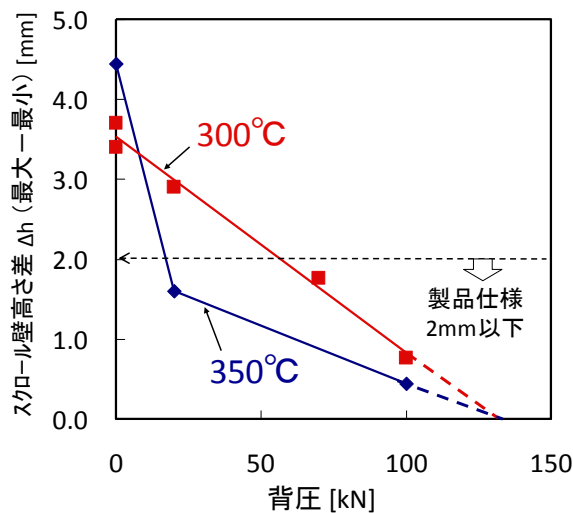
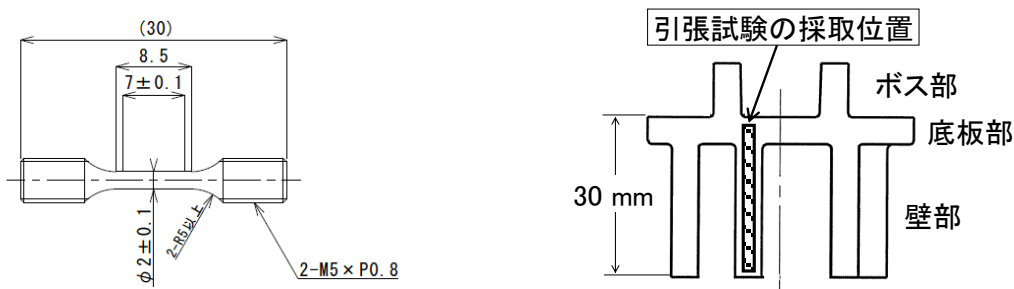


図 S2- 5 スクロールの壁高さ差と背圧の関係
(鍛造速度：40mm/s 潤滑剤：C 剤)

これまでの試験で得られたミニスクロール鍛造品の引張特性を評価した。引張特性の測定は、図 S2- 6 に示している引張試験片を、ミニスクロールの壁内部から採取して行った。



単位：[mm]

図 S2- 6 引張試験片の寸法および鍛造品からの試験片採取位置

図 S2- 7 は、ミニスクロール鍛造品の引張特性と鍛造条件の関係を示している。0.2%耐力および引張強さは、鍛造温度が低くなると高くなっている。また、鍛造温度が 350℃ の場合では、鍛造速度が大きくなると 0.2%耐力および引張強さは高くなる傾向がみられる。破断伸びについては、鍛造温度および鍛造速度に依存した傾向は認められない。鍛造品の目標強度 0.2%耐力および引張強さ 350 MPa 以上を満たしている条件は、鍛造温度 300℃、鍛造速度 10mm/s である。なお、背圧は 100kN 付与している。

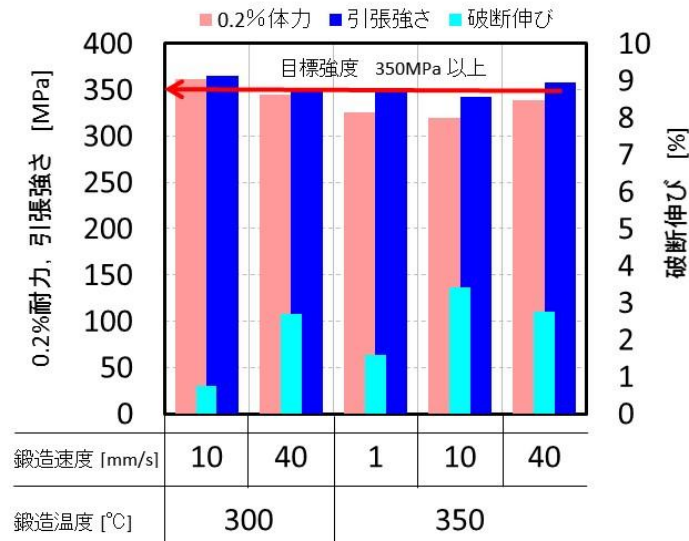


図 S2- 7 ミニスクロール鍛造品の引張特性（背圧 100 kN）

※スクロール壁高さ差 Δh はいずれも 2mm 以下だったものを示している

図 S2- 8 は、図 S2- 7 で得られている最高強度と、アルミニウム合金の鍛造品および鍛造前の鋳造材の強度を比較して示している。図 S2- 7 で得られたミニスクロールの 0.2%耐力は、アルミニウム合金 A4032 および A6061 鍛造品の 0.2%耐力よりも高くなる。

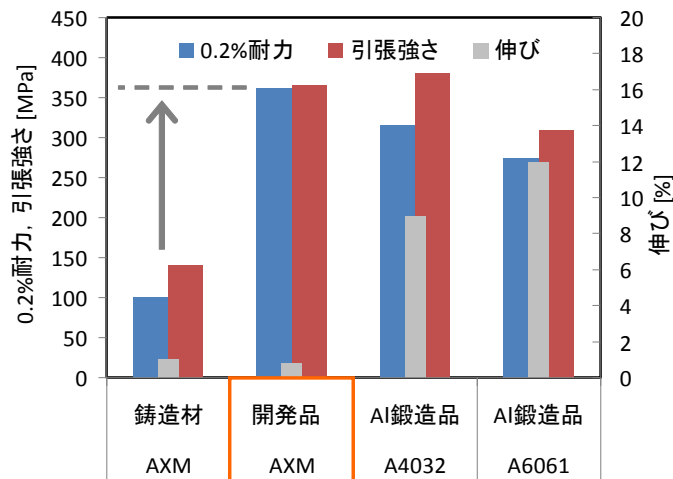


図 S2- 8 ミニスクロール鍛造品，鑄造品および Al 鍛造品の引張特性の比較
 (開発品：鍛造温度 300℃，鍛造速度 1mm/s，背圧 100kN)

図 S2- 9 は，鍛造温度 300℃，鍛造速度 10mm/s，背圧 100kN の鍛造条件で製造した鍛造品の 10⁷回の疲労強度を示している。図 S2- 9 の疲労強度は，測定温度が室温の場合と 150℃の場合を示している。測定温度が室温の場合では，疲労強度は 160MPa 以上であり，測定温度が 150℃の場合では，100MPa 以上となっている。図 S2- 9 の結果は，製品仕様の疲労強度 100MPa を満足している。

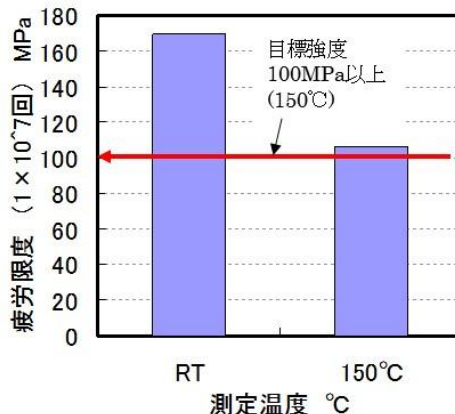


図 S2- 9 スクロール鍛造品の室温及び 150℃での疲労限度

Sub2-①-3 高 Al 含有マグネシウム合金のピン金型による鍛造成形性と Al 含有量の関係

上記サブテーマでは，AXM4303 の鍛造成形性および機械強度の評価について述べてきた。本章からは，高 Al 含有マグネシウム合金 (AZ91, AZ101, AZ111, AZ121, AZ131) を用いて鍛造成形性および機械的強度の評価について述べている。

図 S2- 10 は高 Al 含有マグネシウム合金の鍛造成形性を評価するために用いた金型および鍛造品の寸法を示している。鍛造に用いているビレットは双ロール鑄造材の板材から直径 10mm，厚さ 7 mm を切り出している。

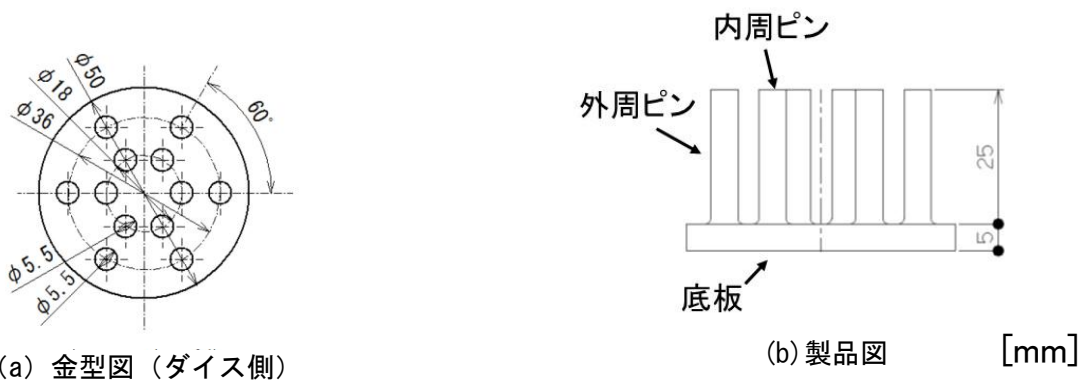


図 S2- 10 高 Al 含有マグネシウム合金の鍛造実験に用いた金型および鍛造製品の寸法

図 S2- 11 は図 S2- 10 で示している金型を用いて鍛造を行ったときに得られた鍛造品の外観を示している。図 S2- 11(a)は Al 含有量 9%, 図 S2- 11(b)は Al 含有量 10%, 図 S2- 11(c)は Al 含有量 11%, 図 S2- 11(d)は Al 含有量 12%, の結果を示している。いずれの鍛造品ともに割れ等の欠陥は認められないが、ピンの高さは内周が高く、外周は低い傾向になっている。

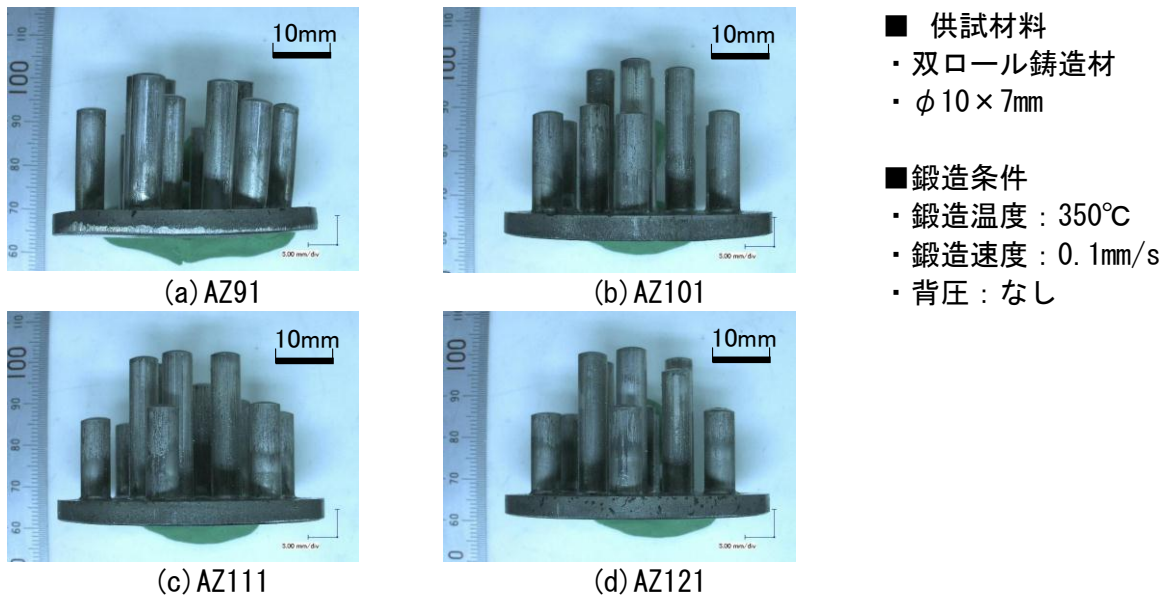


図 S2- 11 高 Al 含有マグネシウム合金の鍛造成形品の外観

図 S2- 12 は最大荷重に及ぼす Al 含有量の影響を示している。最大荷重は、Al 含有量が 9% の場合では、Al 含有量が 12% の場合と比較して 50kN 低くなっている。この傾向は、図 S1- 9 で示しているように、双ロール铸造材の結晶粒径が Al 含有量の増加に伴い小さくなっているためと考えている。

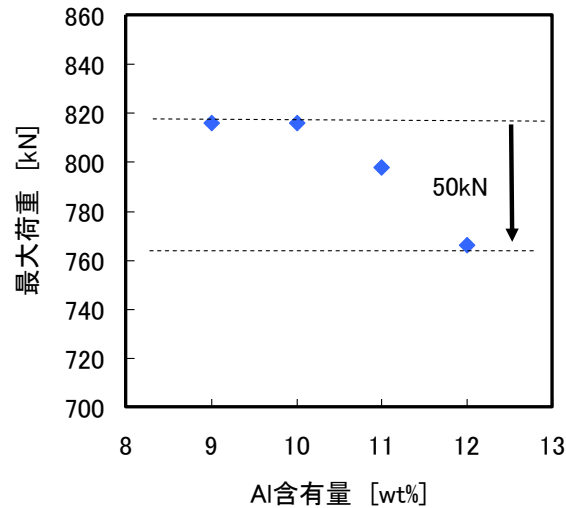


図 S2- 12 最大荷重に及ぼす Al 含有量の影響

図 S2- 13 および図 S2- 14 はピン鍛造品の結晶組織の観察結果を示している。図 S2- 13 は、観察位置がピン根元付近の場合で、図 S2- 14 は観察位置が底板中央部の場合をそれぞれ示している。図 S2- 13 のピン根元付近の結晶組織は、図 S2- 13 (d) の Al 含有量 12%の方が、図 S2- 13 (a) の Al 含有量 9%に比べて微細になっている。図 S2- 14 で示している底板中心部の結晶組織も Al 含有量が増すと微細になる傾向が確認できる。

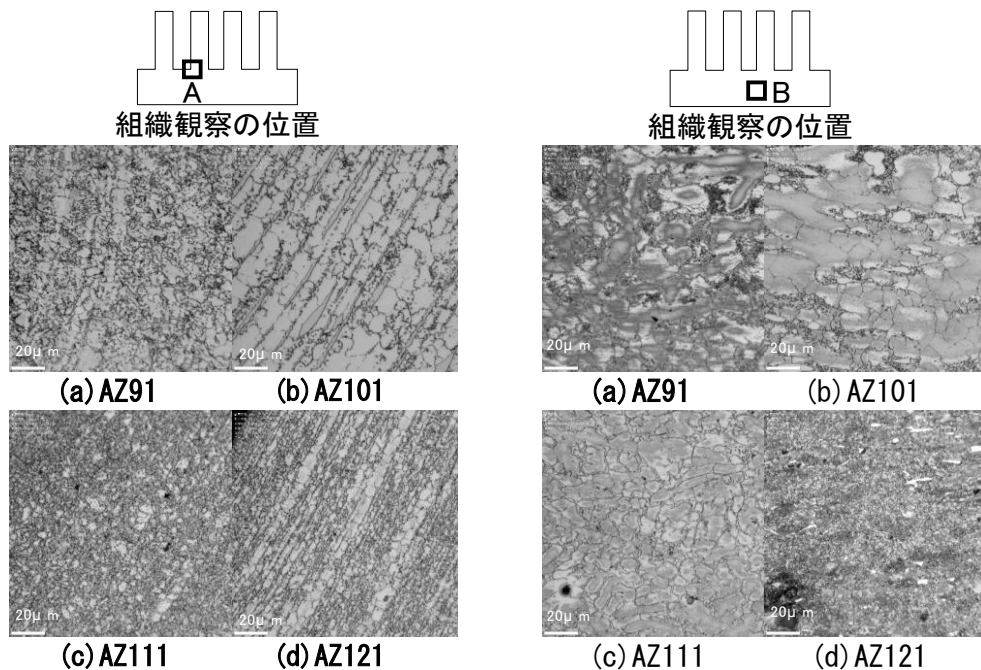


図 S2- 13 ピン根元付近の結晶組織観察結果 (ピン根元)

図 S2- 14 底板中心部の結晶組織観察結果 (底板中央部)

図 S2- 15 は引張試験片の採取位置と形状寸法を示している。引張試験片はピンの高さ方向と平行に採取している。

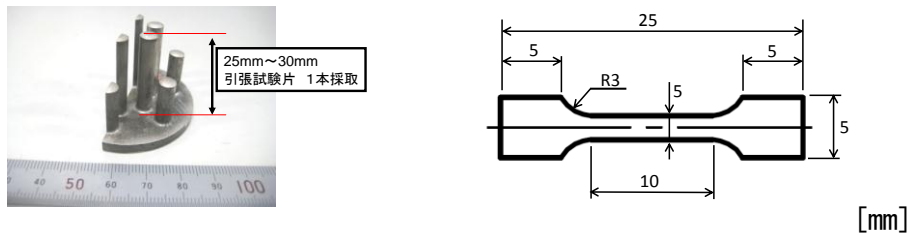


図 S2- 15 ピン鍛造品からの引張試験採取位置と試験片形状

図 S2- 16 は 0.2%耐力と引張強さおよび破断伸びの測定結果を示している。0.2%耐力，引張強さおよび破断伸びは Al 含有量が増すと高くなっている。Al 含有量が 12%では引張強さは 350MPa 程度になっており，図 S2- 7 で示している AXM4303 の場合と同等の強度となっている。また，Al 含有量が 12% の場合では，破断伸びは 10%以上が得られており，図 S2- 7 で示している AXM4303 の場合の破断伸びと比べて著しく大きくなることを確認している。

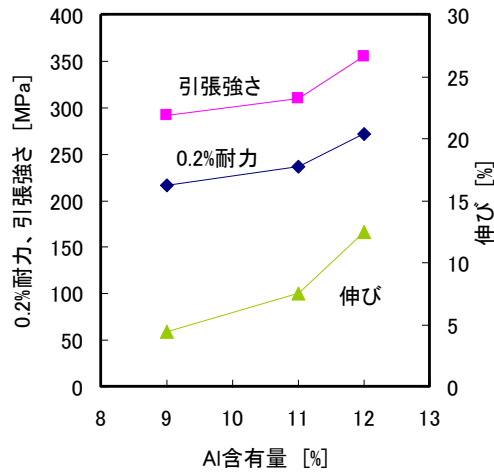


図 S2- 16 引張特性に及ぼす Al 含有量の影響

sub2-①-4 実部品の製造試作

これまで行ってきた AXM4303 高 Al 含有マグネシウム合金を用いた鍛造試験の結果をもとに実製品であるスクロール部品の鍛造を行った。図 S2- 17 は鍛造ブランクの寸法を示している。供試材料は AXM4303 と高 Al 含有マグネシウム合金 (AZ131, AZ121, AZ111) とした。

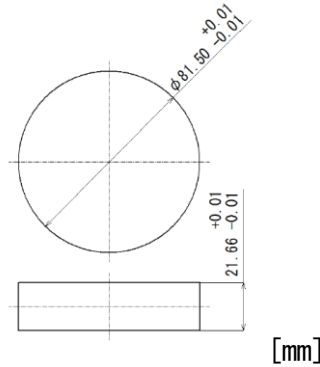


図 S2- 17 実部品の鍛造ビレット寸法

図 S2- 18 は AXM4303 を用いて得られた製品の外観を示している。図 S2- 18 で示している A-2, A-3 および A-4 は壁の先端部で割れが発生している。割れが発生している鍛造条件は, A-2 (300°C, 130mm/s, 背圧無し), A-3 (300°C, 40mm/s, 背圧無し), A-4 (300°C, 10mm/s, 背圧無し) となっており, いずれも背圧付与はしていない。一方, A-1 は鍛造温度が 350°C と高いため成形性は良好である。また, A-5 は背圧を 100kN 付与しているため成形性は良好であったと考えている。以上より, AXM4303 の鍛造では, ミニスクロールの鍛造試験の結果でも示したとおり, 鍛造温度 300°C においては, 背圧を付与しない場合では良好な成形性は得られていない。



図 S2- 18 AXM4303 を用いた実部品の外観

図 S2- 19 は高 Al 含有マグネシウム合金 (AZ131, AZ121, AZ111) を用いて得られた製品の外観を示している。図 S2- 19 よりいずれも成形性は良好であった。



図 S2-19 高 Al 含有マグネシウム合金を用いた実部品の外観

図 S2-20 は機械的特性の評価結果を示す。採取位置は川下企業指定位置としているが、ミニスクロール鍛造サンプルの評価結果と同等の結果を得ており、要求特性を全て満足している。
 エラー！参照元が見つかりません。

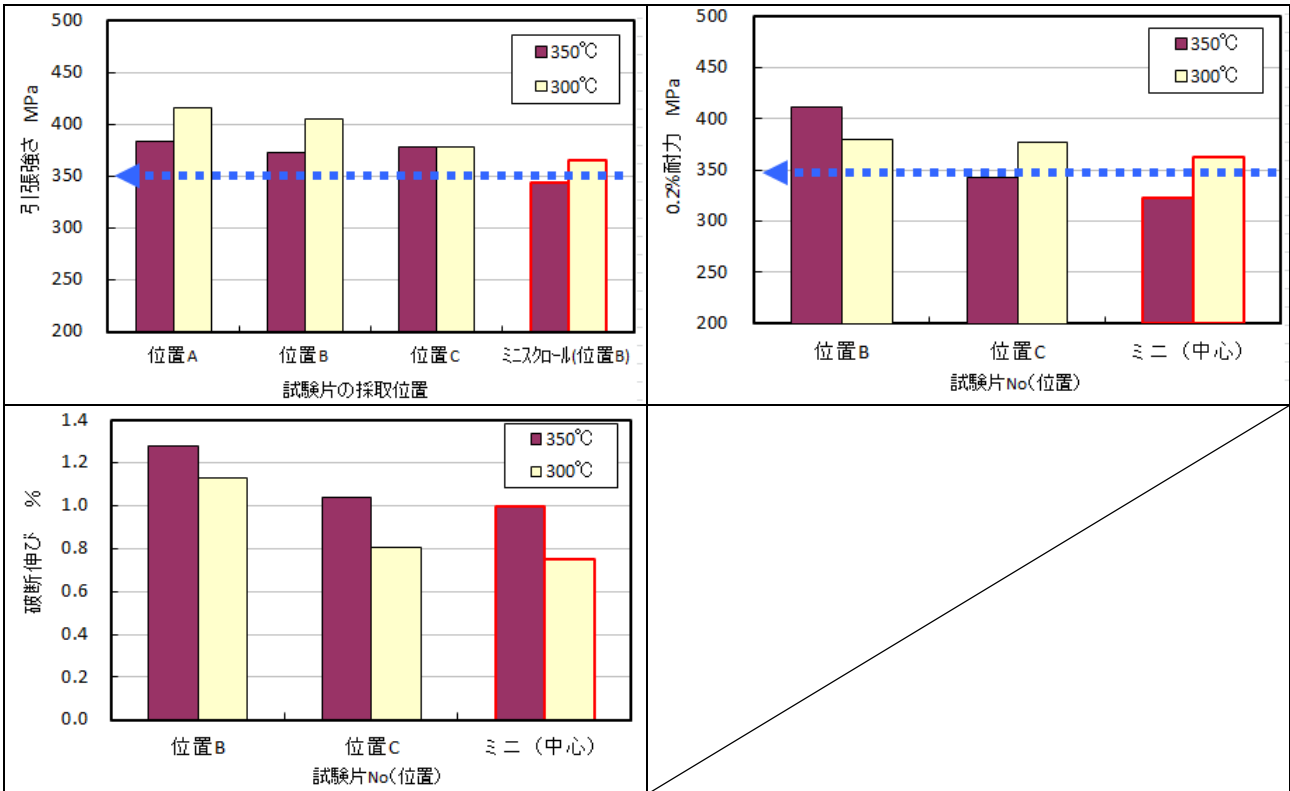


図 S2-20 実部品機械的特性評価結果

Sub2-②：特性向上を促進する金型設計開発

目的

特性向上施策案の検証を可能とする簡易金型を設計・製造する。加えて金型表面皮膜について検討し、高速成形が可能となる皮膜を選定する。これらから得られた施策により、本研究の対象部品であるスクロール部品を想定した実験金型を開発し、事業化に向けた各種金型表面皮膜の選定等について、生産性を含めて研究する。

Sub2-②-1 Mg 鍛造基礎実験用金型の開発

スクロール部品を想定した簡易モデル金型開発の際し、被加工材の昇温は圧縮試験用金型における高度温度安定性が得られる結果より、構成メンバーである山野井精機のノウハウである金型温度伝熱方式を選定した。更に圧縮試験結果及び各種文献にてMg鍛造成形において成形温度が成形性、特性値に大きく寄与する事を把握できたので、ダイス、パンチの十分な加温機能、プレス本体への

伝熱を遮断する冷却機能及びには最大限の配慮をした設計としている。例えばダイスとパンチの締結方法もダイセットへの取り付けに関しても最小の接面かつ成形荷重に耐え得る構造としている。更に加温、冷却を遮断する断熱材に関して断熱効果と成形荷重に耐え得る耐圧効果の高い材種を選定している。(図 S2- 21)



図 S2- 21 二重円筒形状金型の外観と構造

Sub2-②-2 Mg 鍛造背圧効果確認用金型開発

ダイクッションの背圧効果による成形性向上の事例はあるものの、安定的な成形を実現する設定及び管理に関する報告は少ない。更に背圧効果による高い塑性ひずみを蓄積も確認可能とする、背圧評価用金型を開発した。

開発金型モデルと金型の基本仕様は、H24 年度活動における金型開発にて得られたダイス、パンチの十分な加温機能と、プレス本体への伝熱を遮断する冷却機能を有す設定とし、昨年度発生したパンチとダイスへの傷に発生に関しては熱膨張によるクリアランス設定が起因していると考えていたが、その後の継続実験の結果にてパンチとダイスの位置精度の問題である事を確認しており、構造面での位置精度向上を図る事とした。これらの前型情報上で、本金型には成形時の背圧及び離型時の荷重に耐え得る強度を考慮した機能を付与している(図 S2- 22)。

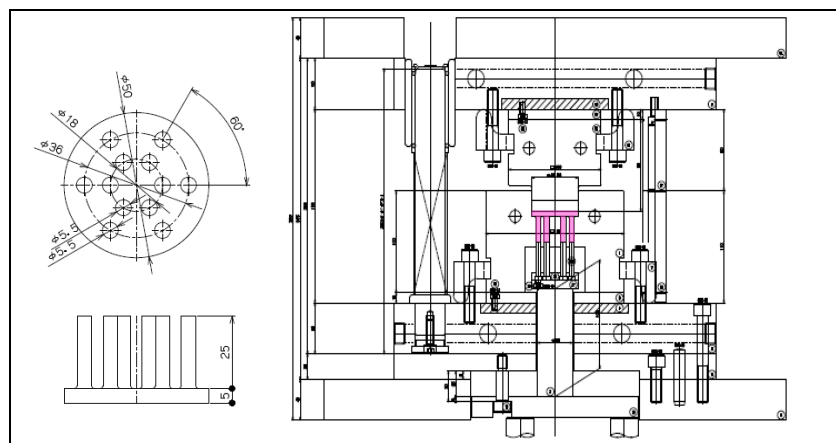


図 S2- 22 背圧効果確認金型

図 S2- 23 はダイス Mg 材の堆積状況と内径測定結果であるが、金型表面に潤滑剤及び Mg の固着が確認できる。そのダイスのピン穴径寸法を測定した結果を確認すると、測定はピン 12 本すべてについて実施しており、縦軸に穴深さ、横軸に穴径を示しているが、最大深さ 25mm の中間部に当たる 15mm 付近で、約 $5\mu\text{m}$ ほどの寸法変化が認められた。これはクッションピン位置と完全な相関があり、成形圧に応じてクッションピンが下降して当該ピン穴が素材で充満した際にダイスとクッションピンのクリアランス(片側 0.025mm)に余肉が入り、クッションピン可動不良に至っている。これはダイクッションの圧力計での圧力上昇に応じたピン位置と一致している。これは成形部品形状に応じた適切な背圧力設定が数量を加味した成形性に重要であることを示唆しており、背圧効果の確認の際にピン高さ均一性だけでなく荷重波形での評価に適用されている。また前述の潤滑剤及び Mg

材の堆積物に関しては、昨年度同様に弾性砥石の対応にて安易に除去が出来、さらに成形荷重及びダイクッション荷重をモニタリングし荷重変化に応じメンテナンスする事で金型の傷等の品質に与える影響を回避できている。後に Sub1 にて選定した潤滑剤にて安定的な成形が実現し、適切なクリアランス設定でメンテナンスは不要となっている。

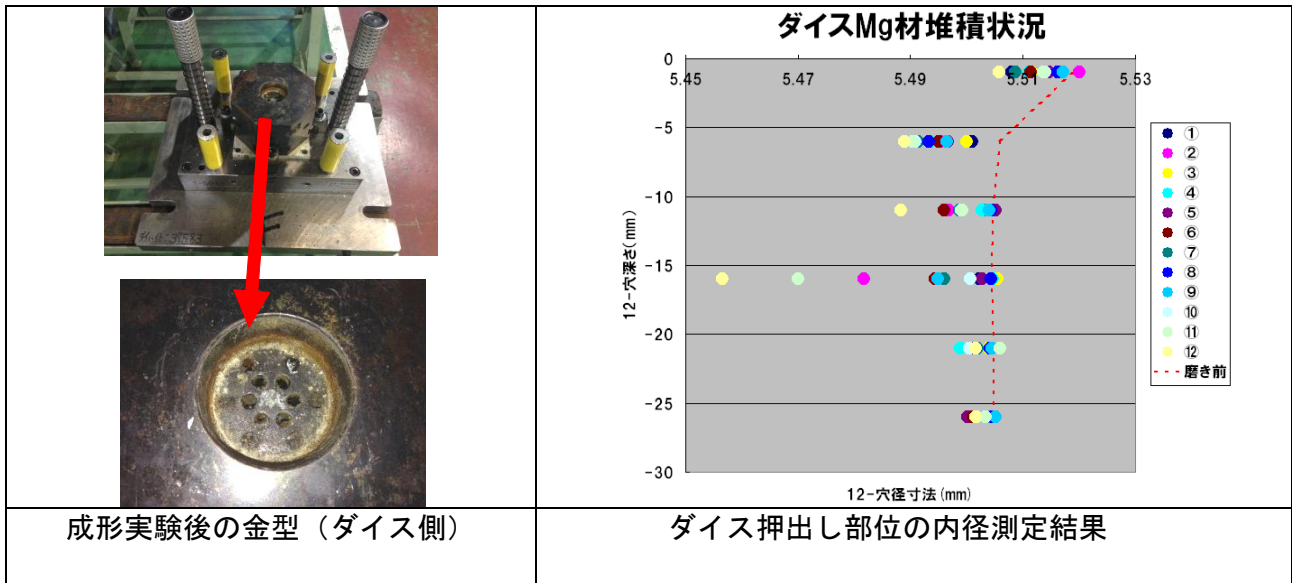


図 S2- 23 ダイス Mg 剤堆積状況の確認

Sub2-②-3 製品形状想定モデル金型開発

基本的な金型仕様は図 S2- 22 の Mg 鍛造背圧効果確認用金型に準ずるものとして、以下に述べる項目を付与している (図 S2- 24)。

- ・クッション及び離型のストロークを可変可能とするダイクッション関連部品の再設定
川下企業情報により将来的な部品群においてはスクロール壁高さに様々な仕様があるため、それらに応じた設定の見極めが必要。
- ・後方押し出し部分の抱き付きを想定したスライドロックアウト機構の付与
現行のアルミ鍛造にて頻度は少ないもののパンチ側への製品張り付きは発生している。
- ・各種施策に迅速に対応可能とするモデル形状に影響する金型部品のコンパクト&簡易交換化
複数種の潤滑剤、金型表面処理の評価が必須、さらにクッション部品の製品取り出し時の強度不足を代表とする成形性に応じた部品形状変更の提案の必要性

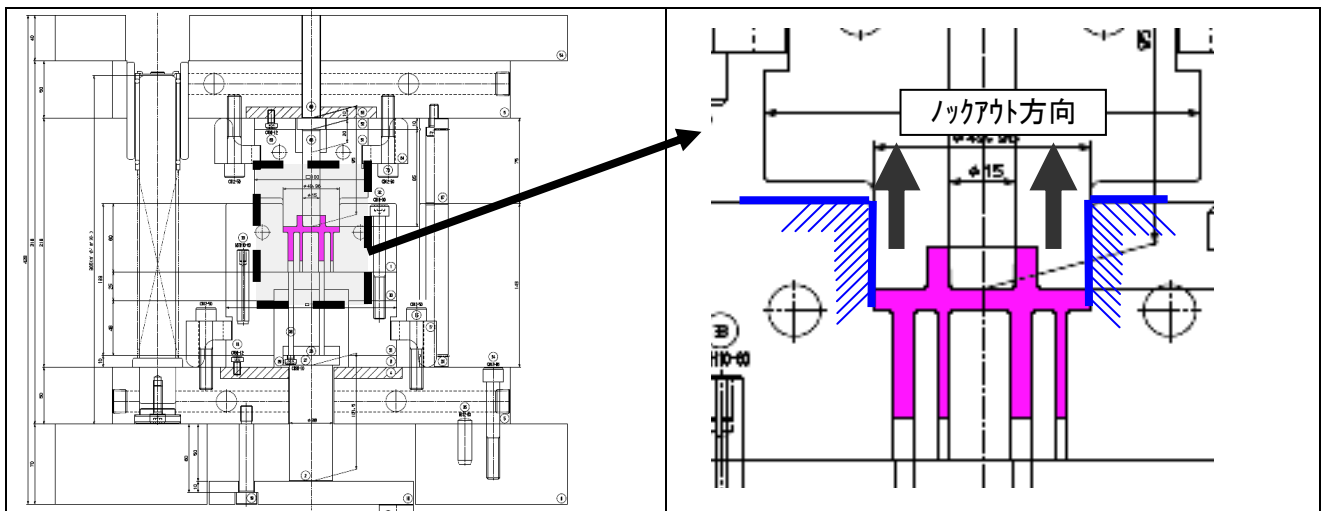


図 S2- 24 スcroll金型断面図

Sub2-②-4 実機部品の金型設計

これまでの活動にて3種の基礎実験用金型、開発対象のスクロール部品の形状依存度を把握するミニスクロール金型の設計、製作の開発を実施してきた。その結果、採取サンプルの特性評価にて目標値を達成し、川下企業より実機スクロール部品の評価依頼を受け、実機対応金型開発を実施した。実機金型開発においては、基本仕様としてはミニスクロール金型として、

- ① サンプル体積 2.43 倍にて加熱時間同等のヒータ能力保有、
- ② Sub3 による鍛造解析による成形荷重 (500~600ton) に耐え得る各部品設定
- ③ 外部借用大型プレス仕様に対応しつつ、構成メンバー保有 400ton プレスに設置可能な

なお本実機スクロール鍛造成形においては、株式会社ヤマナカゴーキン殿の御協力の元、同社保有の油圧背圧機構を付帯したサーボプレス 1500ton を使用した(図 S2- 25)。

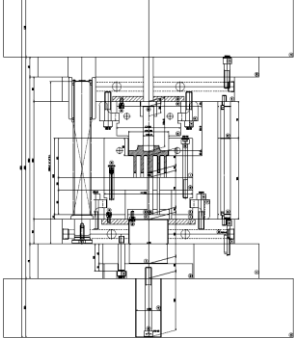


		
金型構造 (組立図)	金型設置状況	借用大型サーボプレス

図 S2- 25 実機部品の金型

2-3【サブテーマ3】開発リードタイム短縮のための鍛造シミュレーション技術開発

sub3：等温流動応力解析と鍛造成形解析の課題明確化

目的

温間鍛造シミュレーションの基礎となる Mg 合金の温間成形性データを収集する実験を継続する。流動性を向上させるための成形条件を予測すると共に、圧縮特性と引張特性を考慮した成形解析の確立を進める。特に金型と素材界面の接触抵抗値について、Sub1にて取得した実データとの解析結果の照合を徹底することによりシミュレーションの適正パラメータを見極め、成形予測精度向上を図る。

研究成果

Sub3-①-1 鍛造解析

図 S3- 1 は、解析モデルを示す。解析モデルは解析時間短縮のため 1/4 モデルとしている。ビレットは剛塑性体で、ダイスは剛体とした。表 S3- 1 に解析条件を示す。

表 S3- 1 鍛造解析条件の検討

金型	剛体
材料	剛塑性体
要素数	80000
せん断摩擦係数	0.22
熱伝達係数 (W/m ² ・k)	5000

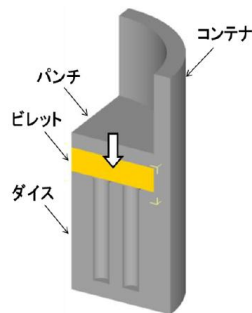


図 S3- 1 鍛造品モデル（ピン金型 1/4 モデル）

図 S3- 2 は背圧無しの場合における実験と解析の荷重-変位線図を示す。

解析で得られた荷重-変位線図は変形初期で荷重が急増し、変位 0.5mm でピーク荷重を示した後に荷重は安定した。一方、実験で得られた荷重-変位線図では変位の増加とともに荷重は緩やかに増加し、下死点付近で最大荷重を示した。最大荷重が異なる原因としては成形後期において金型内で成形された材料と金型間の摩擦力の上昇などが考えられる。

また、解析と実験の立ち上がり部の荷重-変位線図の違いは、解析においては金型を剛体として解析していることに起因するものと考察する。すなわち実験における押し変位は 4.65mm であることから、これから計算されるピン鍛造品の底板の厚さは 5.35mm であり、実験後に得られた実際の厚さは 6.7mm となっている。したがって、押し変位量は設定値よりも 1.35mm 少ない。

この結果より、実験においては金型やダイセットおよび工具の弾性変形が発生し、押し変位に影響を与えているものと考えられる。しかしながら、解析では工具が剛体として取り扱われているため、荷重-変位線図に違いが現れたものと考えている。または、ダイセットにおける締め付けの緩み等も考えられる。

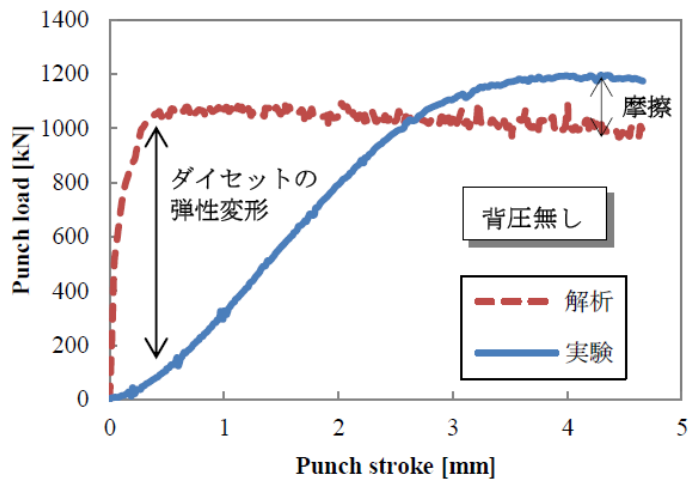


図 S3- 2 背圧無しの荷重－変位線図

図 S3- 3 は、背圧の有無の条件で鍛造試験を行い得られた鍛造品の外観および鍛造実験と同条件の解析で得られた解析品の外観を示している。図 S3- 3 には、各押し込み量での外観を示している。背圧無しの場合では、初期から壁高さが不均一となっており、背圧有りの場合では初期から壁高さが均一となる。この実験品の外観は、鍛造解析により得られた解析品の外観とよく一致している。鍛造解析により、背圧を付与した鍛造実験の傾向を再現することが出来た。

	背圧 無し	背圧 有り
実験品	 5.5mm 7.5mm 9.5mm 実験品	 5.5mm 7.5mm 9.5mm 実験品
解析品	 6.0mm 8mm 9.5mm 解析品	 2.9mm 3.6mm 9.5mm 解析品
試験（解析）条件	350℃, 10spm, 背圧 0kN	350℃, 10spm, 背圧 100kN

図 S3- 3 背圧の有無における鍛造外観と解析結果の比較

図 S3- 4 は背圧付与したときの実験と解析により得られた荷重－ストローク線図を示している。図 S3- 4 の結果は、鍛造温度 350℃、鍛造速度 1mm/s および背圧 100kN の場合である。図 S3- 4 より、ストロークが 5mm 付近までは実験と解析で似た傾向を示しているが、5mm 以上では解析結果では荷重が一定になっているのに対して、実験では荷重は直線的に上昇する。図 S3- 4 でストローク 5mm 以上で実験結果の荷重が増加する理由は、材料と金型間の摩擦力の上昇ではないかと考えている。

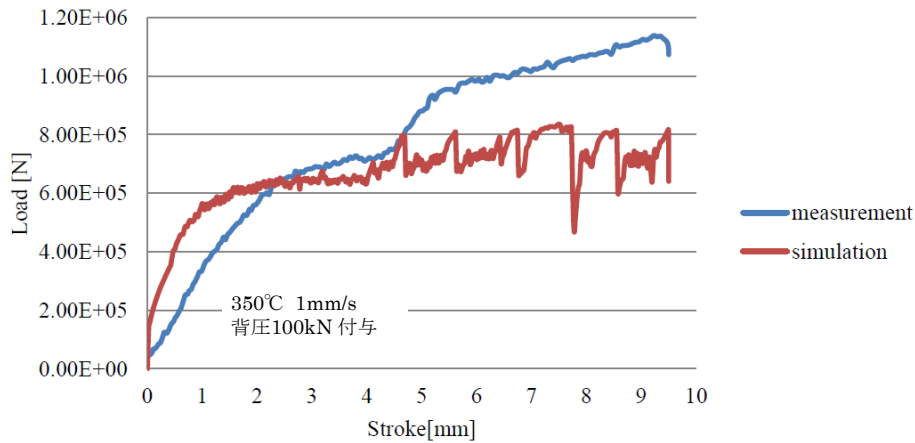


図 S3- 4 背圧付与したときの荷重—ストローク線図（実験値と解析値の比較）

Sub3-2 実機スクロール成形の事前予測

前述実験用ミニスクロール金型における鍛造解析の結果精度を踏まえ、実機スクロール金型設計におけるプレス機選定及び金型仕様設定を目的として、鍛造解析にて事前予測解析を実施した。その解析結果を(図 S3- 5)に示す。この解析結果から以下を金型設計及び鍛造成形へフィードバックした。

- ・ 背圧 10ton にて 600ton の成形荷重予測から 600ton 以上のプレス機選定
 ⇒ 解析設定同一条件にて実成形荷重 570ton
- ・ 荷重ストローク線図と成形プロセス：
 - ～① 材料据え込み成形
 - ① ～② 背面ボス部の充填開始+スクロール押出し成形
 - ② ～③ 背面ボス部壁部充填開始→荷重安定
 - ③ ～④ スクロール壁部充填開始→充填完了
 - ⇒ 背圧金型部品の待機位置設定に活用

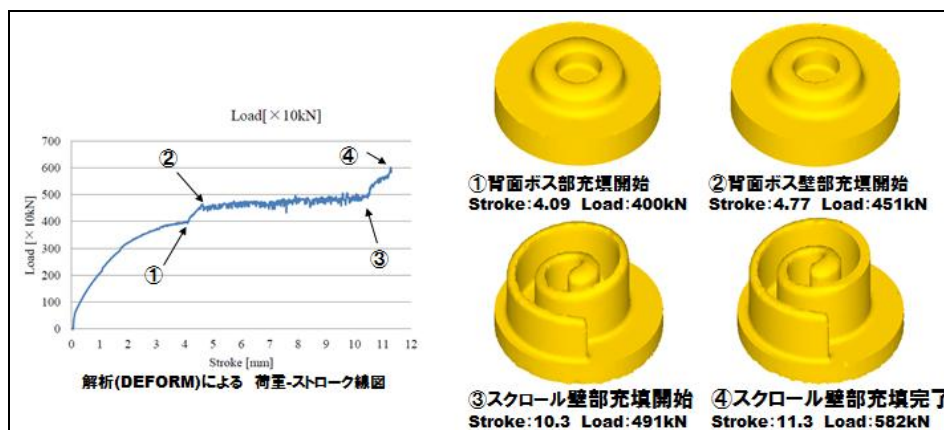


図 S3- 5 実機スクロール成形の事前解析結果

Sub3-3 金型の品質トラブル低減の総括

金型および品質に関するトラブルに対しては、経験に基づく試行錯誤により対応してきたため、後戻りが多かった。鍛造解析を用いた事前検討により、表 S3- 2 に示すトラブルを回避し、試作回数の削減と品質トラブルの低減の実現性が高くなった。

表 S3- 2 過去のトラブルに対する従来の対応および解析導入の効果

過去のトラブル		従来の対応	解析導入の効果
金型	金型の割れ	経験に基づく金型修正と 実験確認の 繰り返し	金型への応力の予測 により、金型 材料強度を超えない金型設計可能
金型	プレス能力不足	大容量プレス機への変更、 金型再作製	成形荷重の予測 により、最適なプレ ス機の選定および金型設計が可能
品質	壁高さ不均一	経験に基づく金型修正と 実験確認の 繰り返し	壁高さの予測 により、最適な金型が 設計可能
品質	成形品の割れ	経験に基づく金型修正と 実験確認の 繰り返し	材料への応力の予測 により、材料 強度を超えない金型設計可能

またこれを確実な基とするため、これまでの開発経緯をメンバー企業・機関と共有及び開発情報を確実に製造に移管する必要があった。そこで本開発における事業管理法人による過去の戦略的基盤技術高度化支援事業テーマ「高強度・高耐圧アルミ部品の新工法開発」の成果である、実験情報管理システムを活用する事とした。本システムは(図 S3- 6)に示す概要となっており、開発メンバーにて継続運用してシステムの高度化も図られ汎用システム化され、エクセルベースの実験表を基として、各種汎用ソフト、動画、画像データにも対応しており(図 S3- 7)、開発条件の選定→実験状況→サンプル評価結果等の一連を、Web上にアップロードし共有する事で、開発活動における各実験の評価結果など共有サーバへの格納忘れや、各担当者の主観で不要情報と判断して共有化出来ていない、製造移管の際に条件設定根拠が明確でないなどが回避される。本システムは事業化活動においても継続運用し、将来的な新機種等の開発リードタイム短縮も実現すると考える。

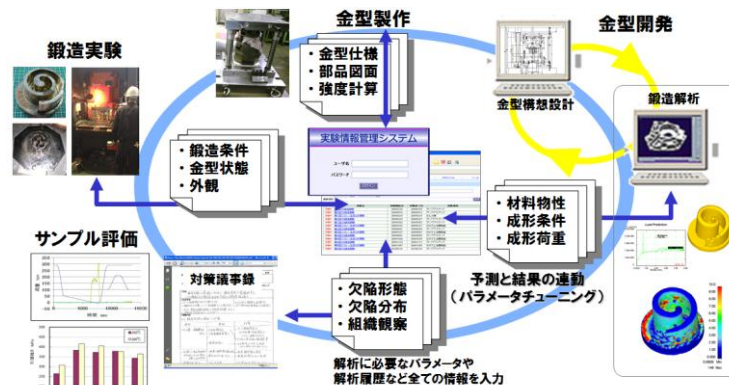


図 S3- 6 実験情報管理システム概要



図 S3- 7 実験情報管理システムのWeb画面

最終章全体総括

安定的な鍛造成形を実現するため、構成メンバーの経験及び情報収集により潤滑剤選定に注力した。その結果、低摩擦係数かつ金型への張り付き抑制を期待できる剤種を選定し、鍛造検証実験により有効性が立証され、研究開発が加速させる事が出来た。これに対しては、鍛造成形における最重要な因子である潤滑剤選定プロセスを確定できたことは我々開発メンバーの大きな成果と考える。

潤滑剤再選定により連続した成形が実現し、製品を想定したモデル金型を用いた鍛造実験に特化し、その成形条件の最適化とその選定プロセスも構築し、高速成形及び低温成形それぞれに対応した条件選定も出来ている。特に開発対象部品であるスクロール部品成形において賦形と機械的特性の双方を満足する方策として、背圧荷重付与の効果を確認出来ていたが、その背圧条件設定の最適化が本年度実現すると共に、その背圧機構は現状の市販設備では、制御しきれていない事を明らかにし、事業化課題とすると共に、実験による事実データにてプレスメーカーと協議を開始出来ている。更にこれら成形実験における成形サンプルの機械的特性は川下企業要求の機械的特性を満たし、実機モデルでの成形サンプル提示を求められ、実成形の後サンプル提示が実現している。

また双ロール法による連続鍛造材の鍛造部品への適用(材料候補②)では、実成形検証が実現し、鍛造荷重は本適用材料である断熱鑄型による連続鍛造材の鍛造部品への適用(材料候補①)に比べて低くすることが可能であり、加えて、背圧を付与しなくてもスクロール部品の成形が可能であることが明らかとなると共に、静的機械特性のみであるものの要求値を満足しており、更なる高強度Mg合金鍛造品開発の期待ができることを見出した。

鍛造解析では、徹底的な実成形結果との照合とチューニングを経て、実機モデルの事前検証を実施し、金型開発へ結果フィードバックをすると共に、実成形結果との誤差が小さい結果にて事業化に対する有益なツールである確信をしている。

以下に事業化に向けた各サブテーマ対応の課題を示す。

【サブテーマ 1】

- ・材料メーカーとの Mg 材料の安定供給とコスト低減活動
- ・実機サイズ対応に向けた Mg 材料大径化と高品質化
- ・強度の異方性の見極め

【サブテーマ 2】

- ・背圧機構の荷重、位置制御高度化
- ・潤滑剤塗布を含めた自動化設備開発
- ・N 増しにより品質バラツキ確認

【サブテーマ 3】

- ・成形機の弾性変形を考慮した解析手法の確立
- ・部品特性予測と最適鍛造成形条件選定手法の確立

参考文献

- (1) 鎌土重晴：塑性と加工，54-627（2013），336-341
- (2) Hisaki Watari, Yoshimasa Nishio, Mayumi Suzuki, Toshio Haga, Keith Davey and Nobuhiro Koga: Mater. Sci. Forum, Vol. 675-677 (2011) pp667-670
- (3) O.Kada, T.Miki, M.Toda and K.Osakado; Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. Ser.C 64,628(1998)384-389
- (4) 特開平 05-305380
- (5) 山下友一、清水和紀、軽金属，80(2013)，672-676
- (6) T.Yamashita, et. : Int. J. Cast Metals Res., 9(1996)