

# 軽金属鑄造材を用いた鍛造技術に関する試験研究事業(第 3 報)

行武栄太郎\* 磯山亮\* 石川裕理\*

吉岡健\* 勝山秀信\* 浅野俊之\*

## 1. はじめに

近年、排ガス規制強化により、輸送機器をはじめとする様々な工業製品における軽量化のための構造設計が求められている。特に、構造材料の軽量化ニーズは需要が高く、軽金属材料を構造用材料に適用することが強く求められている。特に実用金属中で最も軽量であるマグネシウム合金は、近年、注目されている軽金属材料の一つである。

茨城県では、これまでに「茨城マグネシウムプロジェクト」等を実施して、マグネシウム合金を用いた加工技術の開発を積極的に進めており、茨城県をマグネシウム産業の一大集積地とすべく、基盤技術の研究開発、製品化支援など積極的に取り組んでいる。

当センターでは、マグネシウム合金を中心とした軽金属材料の試験研究事業を幅広い技術分野で実施してきた。展伸材(圧延材、押出材)の板成形加工(曲げ加工、絞り加工、ブロー成形等)、異種金属接合(テーラードブランク材、摩擦攪拌接合等)技術等の展伸材の塑性加工に関する試験研究事業を実施し、室温から中間領域での板材成形加工に関する体系的な知見や加工技術情報を蓄積している。

しかし、展伸材は素材の製造コストが高額であり、製品(板材)単価もアルミニウム合金と比較して高い。一方、マグネシウム地金(インゴット: 鑄塊)単価はアルミニウム地金と同等であり、地金を直接溶解して製造する鑄造材及び鑄造製品では、展伸材の加工と比べ安価となる。そこで、鑄造材を用いたものづくり加工技術を高めることを目指した。

## 2. 目的

本試験研究事業は、安価な鑄造材を用いた成形加工技術に関する試験研究が目的であり、鑄造材を鍛造加工することで緻密な金属組織及び機械的特性向上を実現できる加工技術の開発を目指している。

平成 28 年度には超音波を溶湯へ付加させながらマグネシウム合金を凝固させることで、一般的な鑄造法による金属組織と比較して微細な金属結晶組織を得ることに成功した<sup>1)</sup>。

平成 29 年度は液相と固相が混在する溶湯を凝固させる半凝固鑄造(鑄造材)について検討し、凝固率、凝固温度を調整することで、一般的な鑄造材と比較して微細(平均粒径: 20  $\mu\text{m}$  以下)な結晶組織を得ることに成功した<sup>2)</sup>。

本年度は、鑄造材を鍛造加工可能とする金型設計(カップ形状)及び鍛造加工条件を得ることを主な目的とし試験研究を実施した。また、数値解析手法を用いて鍛造工程での塑性流動も検討した。

## 3. 研究内容

### 3.1 半溶融鍛造<sup>3)</sup>について

半溶融鍛造は、鍛造素材を半溶融状態(完全な固相金属ではなく固相と液相が混在した状態)にすることで、変形抵抗(負荷)を軽減でき、金属材料を粘土のように破断のない状態で大変形させることが可能であり、一般的な鍛造と比べ複雑な形状の成形を可能とする特徴的な加工技術である。加工負荷が低減することで加工設備を小型化でき、設備投資費用が安価となるが、金型を加熱及び均熱する必要があるため、金型技術の高度化が必要となる。そこで、本事業では効果的な金型加熱を実現する金型構造についても検討した。

半溶融鍛造の実用化事例としては、アルミニウム合金等では自動車用アルミニウムホイールや、コンプレッサースクロール等に展開されており、生産現場での実用化が進んでいる。また、製品製造装置としてのシステムティックな生産設備の高度化も進んでいる。

### 3.2 半溶融鍛造実験

半溶融鍛造を試験評価するには、融点の異なる 2 種類以上の組織を有する素材が必要となる。本試験研究では、マグネシウム合金に着目した軽量化技術を検討しており、半溶融鍛造をマグネシウム合金で評価することとした。本試験研究ではマグネシウム合金として、一般的に市販しており容易に入手できる AZ 系(アルミニウム、亜鉛添加型合金)を用いることとした。AZ 系マグネシウム合金には数種類の合金が存在するが、第 2 相を有する AZ91 マグネシウム合金を用いた。

表 1 に入手した AZ91 マグネシウム合金の代表的な添加元素成分を示す。マグネシウムを母材とした AZ マグネシウム合金であり、アルミニウム約 9mass%、亜鉛約 1mass% が添加された汎用鑄造合金である。

表 1 AZ91 インゴットの添加元素成分(mass%)

Al	Zn	Mn	Cu	Fe	Si	Bal
9.18	0.72	0.22	0.004	0.002	0.03	—

図 1 に AZ91 マグネシウム合金インゴット外観及び金属組織を示す。インゴット外観は、金型に溶湯を鑄込んだ舟形状をしており、表面は錆等の変色がなく、金属光沢を有する健全なインゴットを用いた。しかし、インゴット内部を X 線 CT で観察したところ、1 mm 以上の大きな内部欠陥(空隙)が確認さ

\* 先端材料部門

れたため、インゴットを約 30 mm×30 mm×30 mmに切断し、雰囲気制御が可能な小型鑄造機で約 2 kgの AZ91 マグネシウム合金を Ar 雰囲気中で再溶解（約 670℃）しφ 50 mm×300 mmの金型で重力鑄造したものを試料として用いた。



インゴット外観 組織観察(光学顕微鏡)  
図 1 AZ91 インゴット外観写真及び組織観察

光学顕微鏡による組織観察では、α相（固溶体）とβ相（第2相）とが混在する組織であることが確認された。β相はX線回折及びSEMによる元素マッピングにより Al と Mg との金属間化合物 ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) であることを確認しており、その融点は約 450℃である。このようにして得た AZ91 マグネシウム合金資料を鍛造評価用試験片として、精密コンター及び汎用旋盤を用いて、φ 50×高さ 25 mmの円盤状の試験片（ブランク）を採取した。試験片表面は加工ままとし、熱処理等の前処理は行わない。また、鍛造評価温度条件を検討するため、再溶解にて得られた AZ91 マグネシウム合金より丸棒引張試験片（平行部形状：φ 6 mm×30 mm）を採取し、温度範囲を室温 (RT) ~400℃とし、一定の速度（初期ひずみ速度： $1.0 \times 10^{-3} s^{-1}$ ）で機械的特性を評価した。評価した結果は、シミュレーション評価での材料データベースとして使用した。

### 3.3 評価金型試作（半溶融鍛造評価金型構造検討）

図 2 に半溶融鍛造に用いた評価金型外観を示す。金型には SKD61 を機械加工後に熱処理したものをを用いた。熱処理温度は、焼き入れ温度を 1050℃、焼き戻し温度を約 600℃とした。金型の平均硬さは約 50HRC とした。パンチとダイ表面はラッピング処理を施し鏡面仕上げとした。金型はスライド式のダイブセット内に固定し、プレス機に設置できるよう製作した。

金型加熱には安価で容易に入手できるカードリッジヒーターを用いた。φ 10 mmのカードリッジヒーターをダイ周囲を囲うように 4本配置した。パンチには、内部に 2本のカードリッジヒーターを設置した。パンチ、ダイ温度はそれぞれ設定が可能となる仕様とした。加熱制御には市販の PID 温調機を用いた制御とした。一般的に SKD 材は熱処理温度（焼き戻し）近傍であ 550℃程度に繰り返し加熱すると、急激に軟化する現象が起きるため最大加熱温度は 500℃とした。

鍛造加工は、110 トン油圧サーボプレス機を用いて、加工速度 20 mm/s 一定で加工した。潤滑は熱間鍛造で実績のある耐熱性の高い固形潤滑材（黒鉛系）を用いて評価した。



図 2 評価金型外観

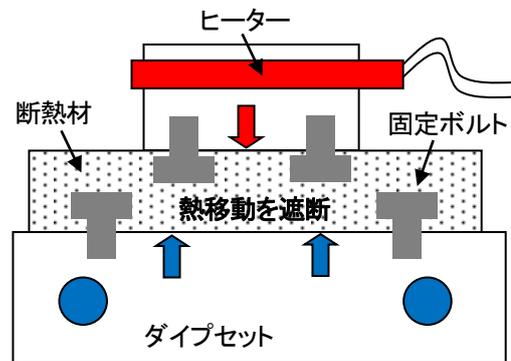


図 3 金型断熱機構（概略図）

図 3 に金型断熱機構の概略図を示す。金型温度を 400℃程度まで上げることを考慮して、金型周辺部には断熱機構を施した。断熱機構として、金型とダイプレートとの間に高耐圧性の断熱材を用い、金型と断熱材、ダイプレートと断熱材とを個々に固定することで、加熱される金型（ダイ、パンチ）と、それらを固定するダイプレート間との熱移動を遮断することに成功した。この機構により安定して金型を加熱することが可能となる。また、金型温度が安定することで金型寸法も安定し、加工精度が向上することが期待できる。さらには、金型加熱時間の大幅な短縮にも成功した。断熱機構を用いない場合（直接、ダイセットに金型を設置）では、熱がダイセットに逃げ、さらには、プレス機本体にも逃げるため、150℃程度しか金型温度が上昇しない。しかし、今回検討した断熱機構を用いることで、金型温度が 300℃に達するまでの昇温時間として、30 分以内に短縮することができた。また、最大到達温度目標である 400℃にも昇温可能であることも確認した。

### 3.4 鍛造シミュレーション

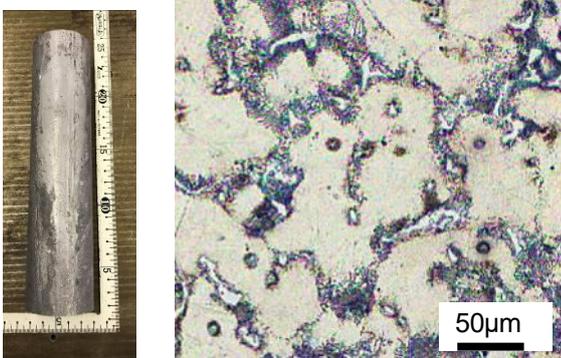
鍛造特性を評価するために、CAE 解析ソフトを用いてバルク形状による変形量、変形応力の分布を確認した。解析の計算に使用する材料物性値は、機械的特性評価（引張試験等）を行い取得した。

CAE 解析には米国 Livermore Software Technology Corporation 社が開発した非線形動的構造解析ソフトウェア LS-DYNA を用いて計算を行い、プリポストは同社開発のフリーソフトの LS-PrePost を用いた。解析対象モデルは半熔融鍛造評価金型と同形状であるカップ形状とした。パンチ R を 10 mm とし、ダイの開き角  $\theta$  を  $10^\circ$  と設定し、ブランク形状を変化させることで鍛造加工時の負荷、変形量、塑性流動等がどのように変化するか確認した。なお、パンチとダイは剛体とし、塑性変形や摩擦等による材料の発熱の影響は無視した。

## 4. 研究結果と考察

### 4.1 半熔融鍛造

図4に小型铸造機で铸造したAZ91マグネシウム合金の铸造材外観と金属組織写真を示す。外観観察において大きな欠陥等は確認されない。また、X線CTにより内部欠陥がないことも確認した。金属組織観察では図1と同様に $\beta$ 相が $\alpha$ 相の周りに断続的に分散しており、平均粒径は $60\mu\text{m}$ 以下の組織であることを確認した。ビッカース硬さは約60HVである。



铸造材 金属組織写真（光学顕微鏡）

図4 铸造材外観及び金属組織写真

図5にAZ91マグネシウム合金铸造材より採取した試験片についての各温間雰囲気での機械的特性を示す。AZ91マグネシウム合金铸造材の室温での伸びは約数%であるが、 $100^\circ\text{C}$ 、 $200^\circ\text{C}$ に雰囲気温度を高くすると伸びが向上する傾向があり、再結晶温度である $300^\circ\text{C}$ 以上では大きく伸びが向上し、雰囲気温度 $400^\circ\text{C}$ では100%以上の伸びを示す。一方、引張強さは雰囲気温度の上昇に伴い低下し、再結晶温度である $300^\circ\text{C}$ では60MPa以下、 $400^\circ\text{C}$ では40MPa以下を示し、温間での変形抵抗の低下が確認された。

一般的なAZ31マグネシウム合金展伸材では、再結晶温度（約 $300^\circ\text{C}$ ）以上において、すべり系が増加することによる機械的特性の変化が報告<sup>4)</sup>されており、

AZ91铸造材においても同様な結果が得られた。また、 $400^\circ\text{C}$ では、 $\beta$ 相の融点温度が約 $450^\circ\text{C}$ 付近であることから、 $400^\circ\text{C}$ 付近では硬質な $\beta$ 相が大きく軟化することで、変形抵抗が低下し、伸びが向上することが考えられる。

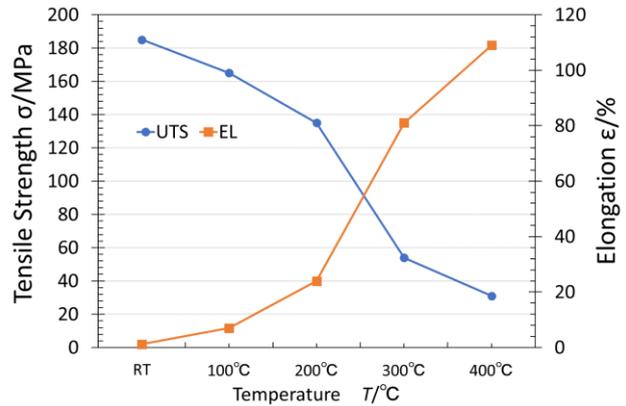


図5 AZ91マグネシウム合金铸造材の機械的特性

図6に、図2に示す鍛造評価金型を用いて、図4、5に示す金属組織及び機械的特性を有するAZ91マグネシウム合金铸造材を鍛造評価して得られたカップ形状のサンプル外観写真を示す。鍛造温度 $200^\circ\text{C}$ では、加工終了後のカップ端部に多数のクラックが観察された。また、サンプル表面はパンチと素材とが擦れたような状態が観察された。この表面の荒れは、加工負荷が大きく潤滑材が切れることで発生する表面状態と一致しており、加工温度が低く加工負荷が大きいために原因と考える。一方、加工温度 $400^\circ\text{C}$ では、カップ端部の割れは観察されない。また、サンプル表面の状態も滑らかであり、 $200^\circ\text{C}$ と比較して良好である。これは、加工温度が高いことで铸造材の変形抵抗が低減し、パンチと素材間の潤滑切れの発生もなく、円滑に加工されたことが影響していると考えられる。これらの結果は、図5に示す铸造材の機械的特性結果とも一致しており、 $400^\circ\text{C}$ 及びそれ以上で鍛造加工することで、低負荷で良好な成形限界を得ることが可能となる。



鍛造温度： $200^\circ\text{C}$  鍛造温度： $400^\circ\text{C}$

図6 鍛造加工後のカップ形状外観写真

図7に $400^\circ\text{C}$ で鍛造加工したカップ形状サンプル

の垂直断面での底部及び側部の金属組織写真を示す。底部の組織観察では、パンチにより鑄造材が上下方向に圧縮され横方向に展伸した金属組織が観察される。また、側面では上下方向に展伸した金属組織が観察された。鍛造加工後の側部、底部のビッカース硬さは、約 90HV を示し、加工前の鑄造材と比較して 50% 程度硬さが向上した。

底部、側部共に  $\alpha$  相は大きく塑性変形していることが確認され、 $\beta$  相も同様に大きな塑性変形が確認された。 $\beta$  相は共晶金系の金属間化合物で硬質で脆い金属組織であり成形限界は低い。しかし、400°C の加工では大きく変形していることから、400°C では  $\beta$  相の変形能が向上することが推測される。また、 $\beta$  相の融点が約 450°C であることから、AZ91 マグネシウム鑄造材を 400°C で鍛造加工することで、高温、高圧により  $\beta$  相の一部が半溶融状態となり、変形抵抗の低下及び塑性変形量の増大を実現したと考えられる。つまり、400°C 以上で AZ91 マグネシウム鑄造材を鍛造することで半溶融鍛造を行うことが可能であり、低負荷、大変形が可能となる。

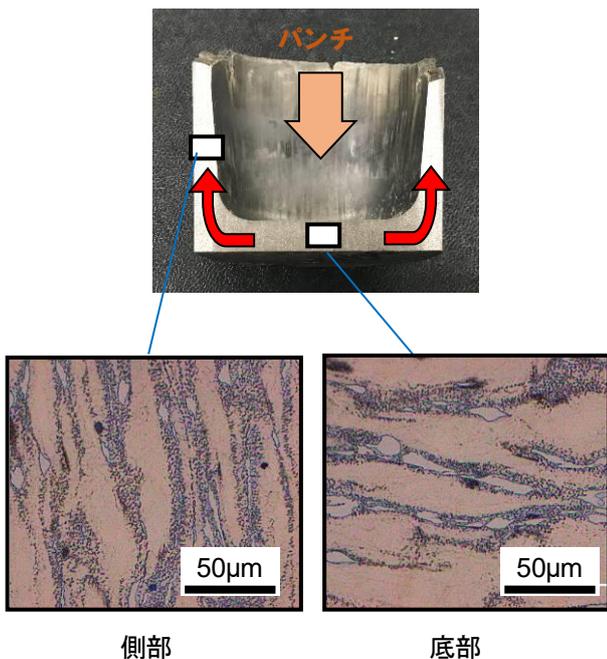


図 7 カップ形状鍛造品（鍛造温度：400°C）

#### 4.2 CAE 解析による鍛造シミュレーション

解析に必要な材料物性には AZ91 マグネシウム合金の物性値とし密度：1.83g/mm<sup>3</sup>、ヤング率 45GPa、ポアソン比 0.3 を用いた。塑性域の変形挙動については図 5 に示す機械的特性評価で得た値（応力-ひずみ曲線）を用いた。パンチの移動速度は油圧サーボプレスによる鍛造評価と同一の 20mm/s とした。

図 8 に加工温度 400°C、体積を  $\phi 50 \times$  高さ 25mm 一定として、プランク直径を  $\phi 50$  mm（高さ：25 mm）、 $\phi 30$  mm（高さ：70 mm）の 2 種プランクでの鍛造加工後の材料中相当塑性ひずみ量分布を示す。全体の相当塑性ひずみ量はプランク  $\phi 30$  mm が  $\phi 50$  mm と比べ

相対的に増加することを確認した。これは、初期バルク径を小さくすることで、側壁に接触する（ダイス内径： $\phi 50$  mm）までの短軸圧縮行程（周方向への変形）が追加されるため、最終的に全体の相当塑性ひずみ量が増加する。周方向への塑性変形負荷は、側壁沿いに塑性変形する負荷と比べ小さいことも、本解析により確認された。

一方、プランク高さは  $\phi 50$  mm と比べ  $\phi 30$  mm では 200% 以上高く、パンチストローク量が増加するため、同一ストローク速度で比較すると、プランク  $\phi 30$  mm では 2 倍以上の加工時間が必要となる。加工時間については、サーボプレス機を用いることで、低加重領域（横に広げる加工領域）ではストロークを高速化し、高加重域（側壁沿いに塑性変形）では低速化することが可能であり、加工工程を最適化することで、総加工時間を短縮することは可能である。

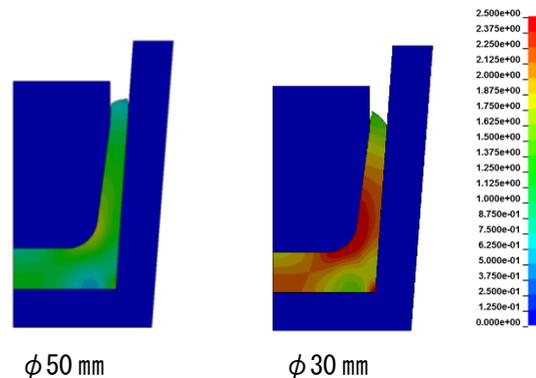


図 8 相当塑性ひずみ量分布

#### 5. まとめ

- 400°C まで加熱できる断熱構造を有し、鍛造評価を可能とするカップ形状金型を製作した。
- AZ91 マグネシウム合金鑄造材を用いて、カップ形状の鍛造成型品を試作できた。
- 加工温度 400°C では、AZ91 マグネシウム合金鑄造材は半凝固状態となり、割れなくカップ形状を加工できた。
- プランク径を小さくすることで、加工後の相当塑性ひずみ量を増加させることが可能である。

本試験事業における成果（鍛造評価金型の作製）には、山野井精機株式会社 幸田稔氏、山野井周一氏に的確なご指導、ご鞭撻をいただきました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 行武栄太郎他：茨城県工業技術センター研究報告，第 45 号（2017）
- 2) 行武栄太郎他：茨城県産業技術イノベーションセンター研究報告，第 46 号（2018）
- 3) 木内学：生産研究，34（6），p179-184，1982
- 4) Eitaro Yukutake 他：Materials Transactions，44（4），2003