

軽金属 casting 材を用いた鍛造技術に関する試験研究事業(第2報)

行武 栄太郎* 上田 聖* 石川 裕理*

吉岡 健* 岩澤 健太* 浅野 俊之*

1. はじめに

軽金属材料は軽量化ニーズに対応するためには必要不可欠な構造用材料である。特にマグネシウム合金は実用金属中最も比重が小さく、近年、注目されている軽金属材料である。茨城県でも「茨城マグネシウムプロジェクト」として、軽金属であるマグネシウム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幅広く技術対応している。

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展伸材(圧延材、押出材)に関する、温間プレス加工(曲げ加工、絞り加工等)、異種金属接合(テーラードブランク材)技術及びブロー成形(張出成形)等の展伸材の塑性加工に関する試験研究事業を実施し、板材成形加工に関する系統的な知見や加工技術情報を有している。しかし、展伸材は成形性がアルミニウムと比べ劣るため生産コストが高く、製品単価も同様に高額となる。しかし、マグネシウム地金の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 casting 材及び casting 製品では、展伸材の加工と比べ安価となる。そこで、 casting 材を用いたものづくり加工技術を高めることで軽量化ニーズに対応できると考える。

2. 目的

本研究事業では、安価な casting 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、 casting 材を用いて緻密な金属加工組織を得ることが可能な鍛造技術を用いた加工技術の高度化をめざしている。

鍛造加工に用いる casting 材は、金属材料の機械的特性に影響する結晶粒径を casting 方法(冷却速度、超音波など)で制御することで、鍛造加工に有利な金属結晶組織を有する素材開発も目的としており、 casting 材作製技術についても試験評価した。

昨年度は超音波を溶湯へ付加させながら凝固させることで、一般的な casting 法による金属組織と比較して微細な金属結晶組織を有することに成功した¹⁾。しかし、設備が超音波付加設備などシステム及び工程が複雑になるなど汎用性が低下する。そこで、今年度は外部から超音波等を付加させることなく、 casting 結晶を微細化する手法として半凝固 casting について検討した。また、半凝固 casting により得られた材料の機械的特性を評価した。また、本事業の取組課題の一つである鍛造特性評価については、数値解析法を用いて、鍛造加工時の変形抵抗の低減を可能とする金型形状についても検討した。

3. 研究内容

3.1 半凝固 casting^{2,3)}について

半凝固 casting とは、完全な溶融金属ではなく固相と液相が混在する領域で溶湯を金型へ注湯し凝固させる casting 法であり、空気の巻きみや凝固収縮の小さな casting 材を得ることが可能である。一般的な重力 casting 法と比べ微細で粒状の金属結晶組織を得ることができ凝固後の機械的特性(強度、伸び等)に優れる。また、凝固前のスラリー状態では固相状態と比較して大幅に変形抵抗が小さいため、一体複雑成形が可能である。さらには、 casting 温度は完全溶解状態の溶湯と比べ低温となり金型寿命の向上も期待できる。

半凝固状態での固相と液相との比率により casting 成形時の素材の流動特性は異なり、固相率が高い場合は固相成分と液相成分とが一体化し変形及び流動するが、固相率が低下すると液相成分が優先的に移動するため均一で健全な casting 組織を得ることが困難である。したがって、製品形状、金型形状及び方案等により固相、液相成分の比率を制御する必要があり半凝固スラリーを用いた casting 成形は実用的なプロセスとしては困難であり、現在では Thixocasting 法として実製品の casting 成形をしている。

半凝固 casting 材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生産設備の高度化も進んでいる。

3.2 半凝固 casting 実験

半凝固 casting 材を作製するには、溶解炉(溶解坩堝)と注湯のための湯路(傾斜板:図1)が設置してある。傾斜板には離型剤が噴霧されており、その傾きも変化させることが可能である。また、溶湯の冷却条件を検証するために傾斜板の周囲には冷却用の配管が設置されている。

傾斜板の傾きを変化させることで固相、液相率を変化させることを可能としており、本装置を用いて AZ91 casting 材を casting した場合に得られる凝固率と傾斜角との関係を表1に示す。傾斜角度が大きいと凝固率が小さくなり凝固率約30%の半凝固材を得ることができ、傾斜角度を小さくすると凝固率約60%の半凝固材を得ることが可能である。

表1 AZ91 casting 材の傾斜角と凝固率の関係

傾斜角(度)	60	45	30
凝固率(%)	30	40	50



図 1 傾斜板の外観

casting時の湯量（溶湯量）は坩堝内に一定の体積を有する断熱材の挿入量及び挿入速度で坩堝から溢れる出る量を制御することで注湯量を調整できる。溢れ出た溶湯は傾斜板をとおり、珪酸カルシウムで作製した型に流れ込む。傾斜板の傾きを 30 度、45 度、60 度と変化させ半凝固鑄造材を作製した。本報告では傾斜板の傾きを 60 度に設定した際に得られた半凝固鑄造材の機械的特性等々を評価した。

供試材には汎用鑄造マグネシウム合金である AZ91D (Al:9mass%、Zn:1mass%) マグネシウム合金鑄造インゴット (5 kg 塊) を用いた。インゴットは切断機を用いて約 100g/個程度に切断した。切断した供試材を鑄造坩堝へ投入し 3 時間以上加熱し完全に溶解させた溶湯を準備した。溶湯保持温度は AZ91D 液相線温度に対して 10℃ 上げた温度 (約 605℃) を保持温度として、保持温度に溶湯温度が達した後に 1 時間保持し、傾斜板を通し型へ注湯した。注湯後は、型へ注湯した半凝固材が完全に凝固するまで大気開放で自然冷却とした。型形状は幅 80mm × 奥行 50mm × 高さ 200mm とし、高さ約 150mm に箇所まで注湯し半凝固材とした。

得られた半凝固材は冷却後、型より取出し半凝固材の下部より高さ 100mm 程度 (半分以下) までの範囲を試験評価材料とした。これは、上部の高さ 100mm 範囲では直径 500 μm 以上の大きな欠陥が X 線 CT (非破壊検査) により観察されたためで、下部には直径 100 μm 以上の大きな鑄造欠陥は観察されない。ちなみに、昨年度実施した超音波鑄造材と比べても半凝固材の鑄造欠陥 (下部の高さ 100mm 範囲) が少ないことが確認された。

機械的特性を評価するために、得られた半凝固材より、φ9mm × 50mm の円柱評価試料をワイヤーカットにより加工し採取した。採取箇所は中央部より欠陥が少ない箇所を X 線 CT により確認して、9 本採取した。また、鍛造特性を評価するために、φ8mm × 高さ 16mm (アスペクト比 1:2) となるよう機械加工したものを圧縮試験片とした。

鍛造性評価のため、室温及び温間 (200℃) でアシユ試験を実施することで変形抵抗などを評価し鍛造特性を検討した。圧縮速度 1.0 mm/min とし、大気雰囲気中で試験した。試験片の両端部には 0.05 mm のテフロンシートを用いて潤滑材とし試験評価した。

3.3 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変形量、変形応力の分布を確認した。解析の計算には、実際に用いる材料の機械的特性を引張試験、圧縮試験にて得られる材料データを用いた。材料データ採取には、AZ91D を小型鑄造機にて金型鑄造し得られた鑄造材より各試験片を採取し各種評価した結果を用いた。また、本試験研究では温間 (200℃以上) での鍛造特性も評価するため、各種試験評価を鍛造温度 (200℃以上) で実施して各種材料データを取得した。

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。

3 次元ソリッド要素により解析を行うことで多くの情報 (変形量、変形応力等) が 3 次元で得ることが可能であるが、3 次元ソリッド要素で解析を実施すると解析時間が多くなる (2 次元解析の 3 倍以上) ため、本試験事業では解析時間の短縮を目的として 2 次元軸対象ソリッド要素による解析を実施した。

解析対象モデルはカップ形状とした (図 3)。パラメータとして、パンチ角 R を 1mm、5mm、10mm の 3 通り、ダイの開き角 θ を 0°、4°、10° と設定し、鍛造加工時の負荷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。

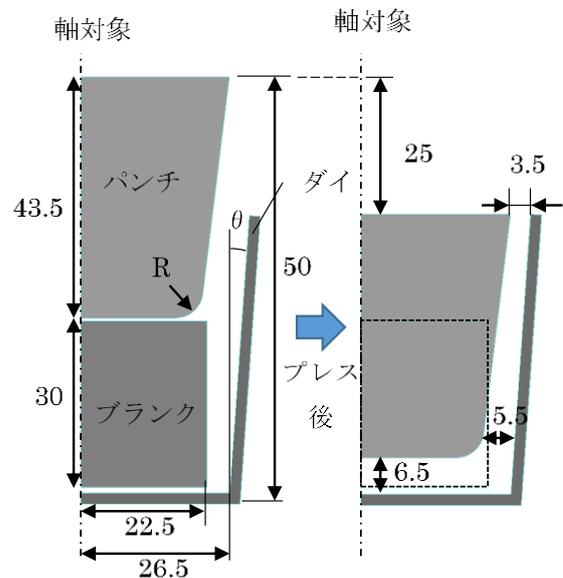


図 2 解析モデル：カップ形状 (mm)

4. 研究結果と考察

4.1 半凝固鑄造材の組織観察

図3に傾斜角60°で作製した半凝固鑄造材を光学顕微鏡で観察した写真を示す。結晶粒径は100 μ m以上を示すが金型鑄造材と比較して β 相(第2相: Mg₁₇Al₁₂)の大きさは約50 μ m程度を示し同等であるが、体積率が減少している。これは、溶湯が傾斜板を通過する際に急激に冷却され凝固するため β 層の発生が抑制されていると考えられる。また、半凝固鑄造材では金型鑄造材のように β 層がネットワーク状で分布するのではなく、断続的に分散していることも確認された。

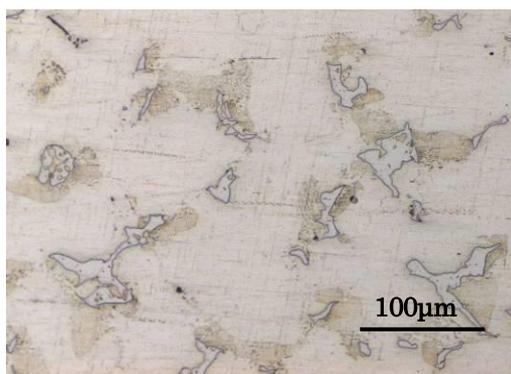


図3 半凝固鑄造材の光学顕微鏡写真

図4にEPMA(電子線マイクロアナライザ)によりアルミニウム元素の半凝固鑄造材中の分布を観察した結果を示す。アルミニウム元素の濃度分布が β 層を中心に広範囲に広がりを示した。この原因について現在調査中であるが、半凝固鑄造の場合、鑄造材の完全凝固までの時間が金型鑄造材と比べ長い間、溶湯の蓄積熱により β 層のアルミニウム原子が周囲へ拡散することが一要因と考えられる。

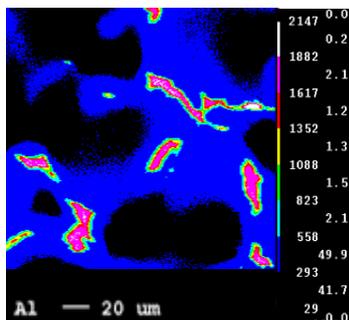


図4 半凝固鑄造材のAl観察

4.2 半凝固鑄造材の機械的特性

AZ91Dの金型鑄造材、超音波鑄造材、半凝固鑄造材の室温での圧縮試験を実施した。試験雰囲気は大気とした。金型鑄造材が最も高い機械的特性を示し、耐力150MPa以上を示した。半凝固鑄造材は金型鑄造材に比べ機械的特性が劣るが耐力120MPa程度を示した。これは、超音波鑄造材より良好な機械的特性である。また、弾性域での直線的な負荷増加では、金型鑄造材と半凝固鑄造材は同様な傾きを有するが、超音波鑄造材ではその傾きが減少することが確認された。この原因として鑄物中の鑄造欠陥の大きさ及

び量(総体積)が考えられる。鑄造材中の欠陥(空隙)が多いことで、見かけの剛性が低下し弾性率も小さくなり傾きが減少すると推察される。半凝固鑄造材は超音波鑄造材と比べ鑄造欠陥が少なく、金型鑄造材と同様な傾き(剛性, 弾性率)を示す。

図5に温間(200°C)での圧縮試験による、ひずみ量0.05以下での公称圧縮応力-公称ひずみ曲線を示す。温間での試験は循環式の恒温槽を用い、試験片温度が200°Cとなるように層内温度を制御した。雰囲気は大気雰囲気とした。

金型鑄造材、超音波鑄造材、半凝固鑄造材とも室温での圧縮試験評価と同様に弾性域では超音波鑄造材の傾きが小さい。金型鑄造材と半凝固鑄造材は同様な挙動を示した。耐力については、各鑄造材ともに室温での耐力に比べ30%以上低下することが確認された。また、室温では円筒圧縮試験片は完全にせん断破壊をおこし2個以上に分断されるが、試験温度200°Cでは、破壊することなくひずみ量50%以上の圧縮変形を示した。

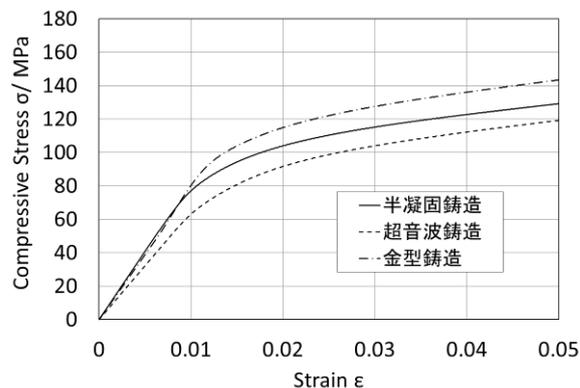


図5 公称圧縮応力-公称ひずみ曲線(200°C)

同一変形量での圧縮応力を、金型鑄造材、超音波鑄造材、半凝固鑄造材で比較すると、金型鑄造材が最も高い圧縮応力を示した。超音波鑄造材は最も小さい圧縮応力を示し、半凝固鑄造材は、金型鑄造材と超音波鑄造材の中間的な圧縮応力を示した。これは、第2相である硬質な β 層のネットワークが連続的でなく微細に分散することで変形抵抗が低下し、破壊なく大きな変形量を得ることを可能としていると考えられる。これらの結果より、半凝固鑄造材は内部鑄造欠陥が少なく金型鑄造材と同等の剛性を有し、かつ、圧縮応力が金型鑄造材と比べ小さく、大きな変形量を有する鑄造材であると考えられる。また、変形抵抗を低減して大きな変形量を発現する特性を有する鑄造材を製造する方法としては半凝固鑄造法が有効と考える。

4.3 CAE解析による鍛造シミュレーション

カップ形状の製品を想定して鍛造加工する際に、パンチやダイ形状が加工特性(変形量, 変形負荷)に及ぼす影響をCAE解析技術を用いて検討した。ま

た、素材の材料物性としては一般的な AZ91D の特性とし密度 1.83g/mm³、ヤング率 45GPa、ポアソン比 0.3 とした。塑性域の変形挙動については AZ91D の特性評価で得た値（応力-ひずみ曲線）を用いた。パンチの移動速度は 10mm/s とし数値解析を実施した。

図 6 にパンチとダイにより素材（φ45×高さ 30mm）を鍛造した際の素材の塑性変形挙動を 4 分割とし、①加工前、②③加工中、④加工後の相当ひずみを示す。変形初期段階では単純な圧縮変形が負荷され、高さが減少し円周方向に膨れるような変形が発生する。素材の円周端がダイ側面に達した後、パンチとダイとの隙間を上部へ向け素材が押し出され最終的にカップ形状となる。モデル金型は開放型とし圧縮変形と押出変形を組み合わせる（据え込鍛造）ことで、局部的な変形及びデッドメタル（塑性流動しない箇所）を抑制し、素材全体に一律な塑性変形を付与することで、鍛造後の成形材の各箇所での機械的特性（強度、硬さ等）の変化を小さくすることができ、大きな塑性流動も得ることが可能となる。

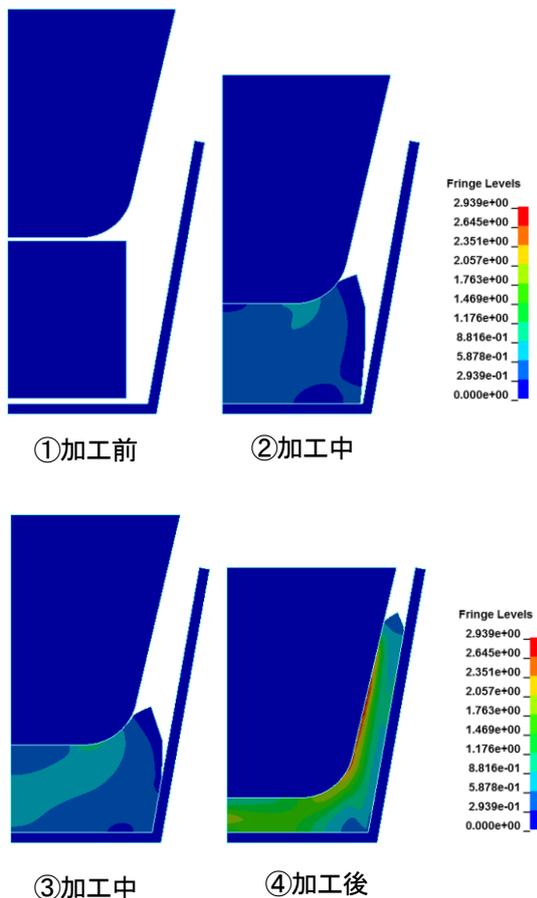


図 6 鍛造工程中の塑性流動（相当ひずみ）

図 7 にダイの開き角 θ を 10° とし、パンチ先端 R を変化させ場合の加工負荷とパンチ変位との関係を示す。パンチ先端 R が小さいと、初期段階の単純圧縮変形終了後に加工負荷が急激に上昇する。しかし、パンチ先端 R が大きいとその上昇は緩やかになり、かつ、最終加工時（パンチ変位 25mm）での加工負

荷が減少することが確認された。これは、パンチ先端 R が大きくなることで素材とパンチが接触する面積が減少することと、パンチ先端 R が大きいことで素材が大きなせん断変形等をすることなく滑らかに変形することが要因と考えられる。

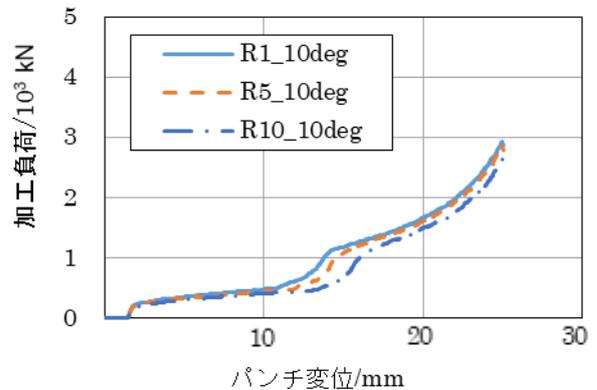


図 7 加工負荷に与えるパンチ角 R の影響

ダイの開き角度 θ を変化（ $0 \sim 10^\circ$ ）させた場合には加工負荷の大きな変化は観察されない。しかし、変形初期（圧縮変形のみ）段階から大きく変形挙動が変化する箇所では、ダイの開き角度 θ が小さい場合に変形抵抗が小さくなる傾向が確認された。ダイの開き角度 θ が小さくなるとダイ底部の角部にデッドメタル（変形しない素材）が増加するため、変形する素材の総体積が減少することが一要因と考えられるが、さらなる検証が必要である。

これらの結果より、カップ形状の鍛造加工を行うには、パンチ先端 R を大きくし、ダイ角度 θ は小さくすることで変形抵抗及び局部的な大変形を抑制できることが CAE 解析結果より確認された。

5. まとめ

- ・半凝固鑄造法を用いて鑄造欠陥の少ない AZ91D の鑄造材を得ることができた。
- ・半凝固鑄造材では β 層の体積率が、一般的な鑄造材と比べ小さい。
- ・室温、温間（ 200°C ）での圧縮変形負荷は一般的な鑄造材より半凝固鑄造材が小さい。
- ・鍛造金型におけるパンチとダイとの関係では、パンチ先端 R が大きくなると加工負荷が低減する。

本試験事業における成果（半凝固鑄造材の作製）には、株式会社戸畑製作所 城戸太司氏、松本敏治氏に的確なご指導をいただきました。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) 難波明彦：軽金属，Vol. 45, No. 6（1995）346
- 3) 鎌土重晴他：軽金属，Vol. 50, No. 12（2000）682