

# 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 1 報)

行武 栄 太郎\* 早乙女 秀丸\* 上田 聖\*

石川 裕理\* 吉岡 健\* 浅野 俊之\*

## 1. はじめに

低炭素社会へと急速に進む現在、国内では軽量化技術の研究開発が活発であり、特に軽金属材料を用いた軽量化加工技術の研究開発は積極的に各機関が取り組んでいる。茨城県では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、さらには、茨城県をマグネシウム産業の一大集積地とすべく、県内中小企業による一括受注を目的とした連携体の構築等の積極的な PR と受注活動を進めてきた。

これまでに当センターでは、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、板材加工に関する知見や技術を有しているが、さらなる産業利用の促進のためには、安価で生産性が高く、金属組織が緻密(高信頼性)である成形加工技術の開発が不可欠である。

## 2. 目的

本事業は、安価な鑄造材を用いた鍛造加工技術に関する試験研究を目的とし、安価で高品質な製品を生産する加工技術の高度化を目指す。

また、鍛造加工に用いる鑄造材には鍛造加工を有利にする結晶組織を有する素材開発を目的とし、鑄造材作製技術についても試験研究を進める。

本報告では微細で延性のある鑄造組織を得るための鑄造技術(超音波鑄造)についての調査及びその技術を実現できる装置の開発について報告する。また、鍛造評価用として高温で鍛造できる(半凝固加工)システムの検討について報告する。さらには、軽金属材料を対象に超音波鑄造を適用した際の金属組織への影響について報告する。

## 3. 研究内容

### 3.1 超音波について

超音波とは一般的に耳で感じ取れない周波数域であり 20 kHz 以上の周波数の高い音波のことをいう。この超音波技術は、工業的には洗浄(超音波洗浄機)、接合(超音波接合、ワイヤボンダ、ボンダ等)、溶着(プラスチックウェルダ等)、加工(超音波切断機、金型研磨機等)、分散(菌体検査装置等)、計測(超音波厚さ計等)、非破壊検査装置(超音波探傷等)等、様々な分野で応用されている。また、医療用としては、X 線源を用いず、体内の臓器を映し出す超音波

検査装置などがある。

本事業では工業的な応用技術(素形材分野)として、鑄造材の凝固過程において超音波を付加させた場合の金属結晶組織に及ぼす影響を検討する。

鑄造時に超音波を付加することで金属結晶が微細化することについては 50 年近く前から報告されており<sup>1)</sup>、DC 鑄造(大型スラブ)、鑄造・鍛造ビレット(金型鑄造、砂型鑄造)、セミソリッドビレット(チクソモールド、レオキャスト)の製造に応用されている。また、ダイカスト技術においても超音波付加の検討がされている。溶湯へ超音波を付加する手法については直接溶湯へ超音波発生源(ホーン)を挿入し溶湯内に超音波を付加する報告が多い<sup>1,2)</sup>。

超音波鑄造のメリットとしては、新たな添加元素を添加することなしに鑄造材の結晶粒を微細化できることが第一に挙げられる。さらには、超音波による高速で微細な振動により溶湯中の混入ガスの脱ガスが可能となる。

アルミニウム合金溶湯へ超音波を付加した例では、熔融金属の凝固初期に発生する初晶サイズが微細化し球状化する報告がある<sup>3)</sup>。金属結晶組織が微細化し球状化することは、機械的特性(伸び、靱性等)を向上させることが期待できる。また、初晶固相を球状化できることで、加工負荷が小さく、複雑な形状成形を実現できる半凝固鑄造を可能とする。



図 1 小型鑄造機外観

\*先端材料部門

### 3.2 超音波付加製造システム

図 1 に本事業で新規導入した小型鑄造機の外観を示す。高周波溶解炉を有する大亜真空株式会社製の小型鑄造機を基本設計とした。溶解量としては約 1 kg (マグネシウム合金) が可能であり、約 1 時間程度で溶解を完了できる。溶解炉は高周波を用いて溶解時間及び温度 (温度範囲: 室温~1000℃) を制御可能とした。雰囲気は大気及び雰囲気ガス (アルゴンガス等の不活性ガス) 置換が可能であり、マグネシウム合金等の溶解中の酸化が彫像に影響する合金作製も可能である。鑄造鑄型には水冷機構及び温間機構が備わり冷却速度を変化させることができる。さらには、バブリング及び攪拌機能も装備しており、不純物及びガス等の巻込みを最小限に抑制できる。

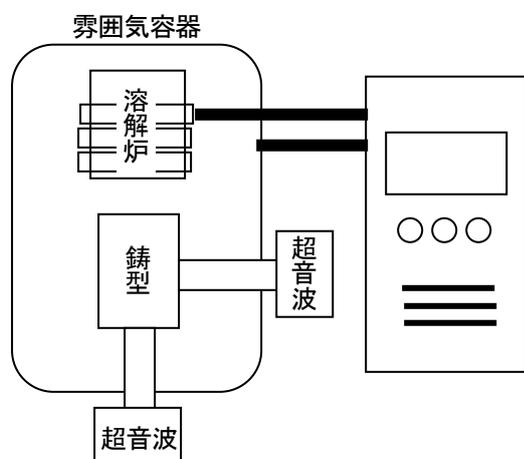


図 2 超音波付加製造システム概略図

図 2 に凝固中に超音波を付加できる鑄造システムの概略図を示す。鑄型に超音波を付加できるよう専用ポートを設け、注湯後及び注湯中の鑄型へ雰囲気容器の外部より超音波を直接付加できる構成とした。超音波は鑄型の側面部及び底面部よりそれぞれ付加が可能である。超音波には方向性があるため、直行する 2 方向よりそれぞれ超音波を付加することで凝固組織へ与える影響を評価する。

### 3.3 鑄造実験

図 3 に小型鑄造機を用いてマグネシウム合金 AZ91D (Al:9mass%, Zn:1mass%) を鑄造して得られた鑄物の外観を示す。溶解温度 700℃, 溶解時間 60min とし、雰囲気アルゴンガス置換し、一般的な鑄型を用いて鑄造することで、φ50×300 mm の鑄物を得ることに成功した。鑄物内部には大きな欠陥 (ガスの巻込み等) 等は観察されず、健全な鑄物を得ることが可能である。鑄物上部には一般的に観察される引けが確認されるが底部から 200 mm 程度は健全な評価試料を得ることができる。しかし、溶解温度、鑄型温度により中心部に 200 μm 以上の欠陥が発生することも確認された。

図 4 に鑄物より評価用サンプルを採取した鑄物の外観を示す。得られた鑄物は機械的特性を評価するために、φ50 mm の円柱から、φ9 mm×50 mm の円柱試験片をワイヤーカットにより採取した。円周辺及び中心部とはビッカース硬さが 15Hv 程度異なることが確認されたため、評価用サンプルは各箇所より採取した。



図 3 鑄物 (AZ91D)



図 4 鑄物材より採取した円柱試験片外観

採取したサンプルは、引張試験用にダンベル形状に機械加工を行い、平行部寸法が φ6 mm×20 mm のダンベル形状試験片を作製した。引張試験は 15 トン万能試験機 (INSTRON 製: 5982 型) を用い、初期ひずみ速度  $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  とし、大気中で試験した。伸びはビデオ伸び計により試験開始から破断まで実施した。また、円柱状の圧縮試験片も作製した。形状は引張試験片作製時と同様に汎用機械加工機を用いて φ8 mm×16 mm (アスペクト比 1:2) の圧縮試験片を作製した。圧縮速度 1.0 mm/min とし、大気雰囲気中試験した。試験片の両端部には厚さ 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。

### 3.4 熱間鍛造評価システム

図 5 に熱間鍛造評価システム (株式会社日興機械製作所製) の外観を示す。本システムは、弊所保有の 110 トン油圧サーボプレス機 (株式会社アマダ製: SDH110) に設置可能で、金型上部に 600℃ まで加熱可能な加熱炉を設置し金型温度が制御可能である。また、金型下部に空間を設け押出用の金型を設置することで簡易的な押出加工も評価することが可能である。

熱間鍛造評価システムでは、400℃ (融点の約 80%) 以上の温度域での塑性加工による結晶組織への影響及びその組織が機械的特性に与える影響についても評価し、CAE と連携させて鍛造後の製品強度及び信頼性を予測できる加工評価のデータ蓄積を行う。また、融点に近い温度域での加工を行うため、固相、液相が混在した半溶融状態における塑性加工特性及び塑性加工後の結晶組織への影響も併せて評価する。



図 5 熱間鍛造評価システム（外観）

また、本熱間鍛造評価システムでは、高温鍛造時の金型の変形についても評価を行う。鍛造金型表面に、直径 2.0mm のサークルパターンを罫書き、鍛造時の罫書き線の変形量（変化量）、荷重及び温度を観察することで、鍛造時の金型変形量の変化についても評価でき、精度の高い鍛造 CAE を実現するために必要なデータの蓄積を行う。

#### 4. 研究結果と考察

##### 4.1 鑄造材作製

図 6 に大気中でマグネシウム合金 (AZ91D) を溶解した時の溶湯表面状態を示す。黒鉛のつぼを用いて溶解温度 700°C にて大気中でマグネシウム合金を溶解すると、図 6 に示すように、溶湯表面にスポンジ状の塊が溶湯表面より成長していることが観察される。これはマグネシウムが燃焼（酸化）することで発生する酸化物であり、溶湯表面が燃焼し始めていることを示す。また、大気中で溶解温度 700°C を保持し続けると、スポンジ状の塊が溶湯表面を埋め尽くし、さらに保持すると表面温度が上昇しマグネシウムが激しく燃焼をはじめ、溶湯全体が燃焼する。この燃焼を抑制するためにマグネシウム合金の溶解作業では、一般的にカバーガスとして SF<sub>6</sub>（六フッ化硫黄）を用いて溶湯表面の燃焼防止を行う。しかし、SF<sub>6</sub>は温室効果ガスのため地球環境へ負荷が大きいため、本試験研究では図 1 に示す完全密閉型で雰囲気を置換できる小型鑄造機で鑄造実験を行う。雰囲気には不活性ガスである高純度 Ar を用いた。雰囲気を不活性ガスに置換すると溶湯表面の燃焼は確認されない。



図 6 マグネシウム合金溶湯表面（雰囲気：大気）

小型鑄造機を用いた鑄造では、溶解温度を 700°C に設定し、室温から 1 時間かけて 700°C へ昇温し 30 分溶湯を保持し金型へ注湯した。溶湯温度は高周波コイルによりつぼを加熱し、溶湯内の温度を熱電対を用いて測定することで制御した。供試材には一般的な鑄造マグネシウム合金である AZ91D を 20mm × 20mm × 20mm 程度のサイコロ状に切断し、溶解量 1 kg 程度となるよう計量し溶解した。

溶融された供試材は、金型（材質：SKD61）へ注湯し φ 50mm × 300mm 円柱状の鑄物を得た。得られた鑄物材の内部観察を X 線 CT を用いて非破壊で観察した結果、鑄物表面付近では内部欠陥は確認されないが、中央部に数十 μm の内部欠陥（空隙）が観察された。また、得られた円柱状鑄物を長手方向と垂直に切断し、断面の硬さをビッカース硬度計を用いて評価した。鑄物表面から中央部へ向け硬さの低下が確認されるが大きな低下はなく、約 55HV を示した。

鑄物材の機械的特性を評価するため、φ 50mm の円柱から φ 9mm × 50mm の円柱状サンプル（図 4：サンプル形状）を採取し、機械加工により平行部寸法が φ 6mm × 25mm のダンベル形状引張試片を作製し、万能材料試験機（INSTRON 製：5982 型）にて引張試験評価した。初期歪み速度 1.0 × 10<sup>-3</sup>s<sup>-1</sup> とし、速度一定で破断に達するまで試験した。伸びは非接触式で測定し、雰囲気は大気とし試験温度を室温で 5 本の試験評価をした。

図 7 に小型鑄造機で得られた AZ91D 鑄物材の応力-歪み曲線の一例を示す。一般的な AZ91D 合金と同様な曲線挙動を示すことが確認され、本鑄造機（小型鑄造機）で得られた鑄物材は健全と考えられる。5 本の試験評価を行い、各試験片ごとにバラツキがないことも確認した。また、円柱状の圧縮試験も同様に評価したが、一般的な AZ91D 合金と同様な結果が得られた。

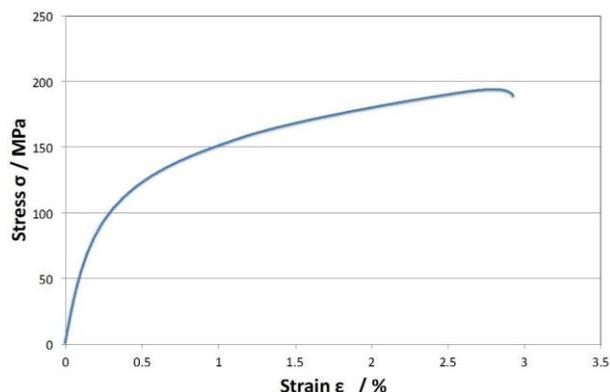


図 7 応力-歪み曲線（AZ91D:室温）

供試材（鑄物材）の機械的特性は図 7 に示すように、耐力（0.2%）：140MPa 程度、引張強さ：200MPa 程度を示し、伸びは約 3% を示した。伸びに関して

は、一般的な AZ91D と比べ小さいが、耐力、強度は同等の特性を示した。伸びが低下した要因としては、引張試験形状が一般的な試験片と比べ小さく、平行部距離も短いと伸び値が低下したと考えられる。

図 8 に供試材（鋳物材）を長手方向と垂直方向に切断した断面の EPMA（日本電子株式会社製：JXA-8200T）による組織観察結果を示す。平均粒径  $200\mu$  程度の結晶組織を有し粒界には Al と Mg の化合物である第 2 相： $\beta$  相 ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) が確認できる。また、 $\beta$  相は  $\alpha$  相（母相：Mg）の周りにネットワーク状に晶出しているが、その形態は断続的である。また、 $\beta$  相には亜鉛の濃化も観察されており、亜鉛との化合物も生成されている。このような組織形態は一般的な AZ91D 合金において同様に観察されることから、小型鋳造機で鋳造した鋳物の結晶組織は機械的特性と同様に健全であることが確認された。

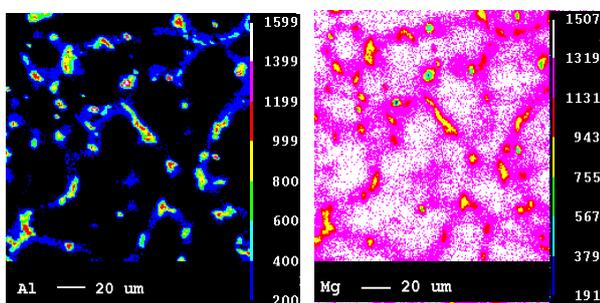


図 8 EPMA による鋳造組織観察 (AZ91D: 重力鋳造)

図 9 に溶湯凝固中に溶湯へ直接超音波を付加する実験方法の一例を示す。供試材が完全に溶解した溶湯に、超音波発信機（ホーン先端）を挿入し、一定の周波数にて超音波を付加しながら溶湯を冷却することで凝固過程において連続的に超音波を付加させながら凝固を可能とする。本試験では、溶湯 (AZ91D) を  $700^{\circ}\text{C}$  以上に加熱し超音波発信機を溶湯内へ挿入し超音波を付加しながら空冷して鋳物材を作製した。得られた鋳物材の結晶組織と機械的特性を評価した。

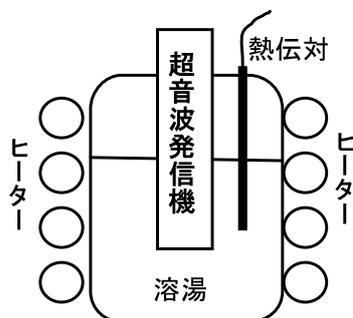


図 9 超音波付加鋳造方法の一例（溶湯直接付加）

図 10 に AZ91D 溶湯に超音波を付加しながら凝固させた鋳物材の EPMA による組織観察結果を示す。超音波を付加した鋳物材についても、空冷だけの鋳物材と同様に、第 2 相である  $\beta$  相 ( $Mg_{17}Al_{12}$ ) が観察された。しかし、その  $\beta$  相の分布及びサイズを空冷

材と超音波付加材とで比較すると、超音波を付加した鋳物材の  $\beta$  相のサイズは小さく、 $\beta$  相が細かく分散しているような結晶組織が観察された。また、空冷材ではネットワーク状に観察された  $\beta$  相が超音波材では細かく分断され分散していることが観察されたが、その面積率は同等である。超音波付加材の室温での機械的特性は、空冷材と比較して同様の挙動を示したが、耐力は若干低下する傾向が確認された。この要因は現在検討中である。

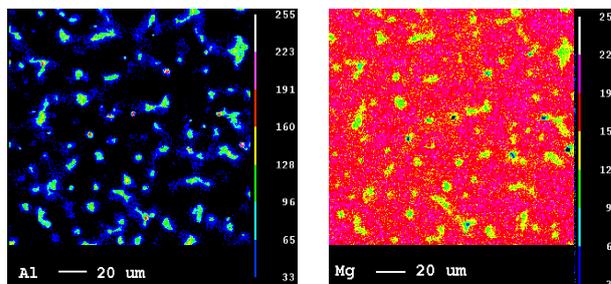


図 10 EPMA による鋳造組織観察 (AZ91D: 超音波材)

## 5. まとめ

- ・大気雰囲気中でマグネシウム合金を燃焼しないで鋳造できる鋳造システムを作製できた。
- ・ $500^{\circ}\text{C}$  以上で軽金属材料の鍛造加工を評価できる熱間鍛造評価システムを構築できた。
- ・小型鋳造機にて燃焼することなく  $\phi 50\text{mm} \times 300\text{mm}$  の AZ91D の重力鋳造鋳物が作製できた。
- ・溶湯中に超音波を付加しながら凝固させることで  $\beta$  相が細かく分散した。

## 6. 参考文献

- 1) 佐藤隆夫：鉄と鋼，第 47 年（1961）第 5 号 50～60。
- 2) Y.Osawa,X.Liu,S.Takamori,H.Somekawa,T.Mukai：Materials Transactions.vol.49, No.5(2008)pp.972-975.
- 3) 平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「振動プロセスによる高品質、高強度、高信頼性自動車用アルミニウム部品創製技術の開発」財団法人中部科学技術センター

本事業における成果（超音波付加鋳造材の作製）には、国立研究開発法人物質・材料研究機構 染川英俊氏との共同研究成果も含まれており、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。