

## 難燃性マグネシウム合金の超音波鋳造による成形性への影響

勝山 秀信\* 行武 栄太郎\*\* 磯山 亮\* 上田 聖\*

### 1. はじめに

近年、CO<sub>2</sub>などの温室効果ガス削減のため、輸送機器の軽量化が求められている。軽金属材料であるマグネシウム（以下、Mg）は実用金属の中で最軽量であり、Mgの構造部材への適用により輸送機器の軽量化、省エネルギー化が期待されている。

Mgは六方最密充填（hcp）構造を有しており、圧延加工や押出加工などの塑性加工により、主すべり系である底面が同方向に配向した集合組織が形成される傾向がある。集合組織の形成により底面すべりが板厚方向には作用しなくなり、冷間での塑性加工は困難なため、非底面すべりの活動が活発化する高温での成形加工が行われる<sup>1)2)</sup>。そのため、Mgの冷間成形加工性を改善する研究開発が実施されている<sup>2)~6)</sup>。

### 2. 目的

難燃性 Mg 合金の一つである AZX912 合金は高強度、耐熱性を有するが、脆く硬質な金属間化合物がネットワーク状に晶出し、塑性加工時に割れが生じやすい<sup>7)8)</sup>。

本研究では、AZX912 合金鋳造材の塑性加工性（成形性）向上のため、鋳造材の凝固組織の改善が期待される超音波鋳造<sup>9)~11)</sup>に注目し、超音波付加により金属組織中に晶出する金属間化合物を分散させることを試みた。

### 3. 研究内容

#### 3.1 超音波鋳造材の作製

図 1 に超音波鋳造装置の概要を示す。この装置は超音波発振器と振動子、振動子に接続した振動容器から構成される。振動容器は市販のステンレス容器（約 100mm×100mm×70mm）を用いた。超音波発振器で発生した超音波は、振動子を介して容器へ伝達される。超音波発振器は新科産業(有)製 WK20-04 を用い、周波数は 20kHz とした。また、超音波発振器のエラーによる振動停止を防ぐため超音波は断続的に付与した。

供試材には AZX912 合金インゴットを用いた。表 1 に供試材の代表的な添加元素成分を示す。Mg 合金にカルシウムを添加した難燃性 Mg 合金では溶湯表面にカルシウムを主成分とする保護膜が形成され、溶湯の燃焼が抑制されることで鋳造時の溶湯の取り扱いが容易となる。

表 1 AZX912 マグネシウム合金の添加元素成分 (mass%)

Al	Zn	Mn	Ca
9.05	0.70	0.21	1.72

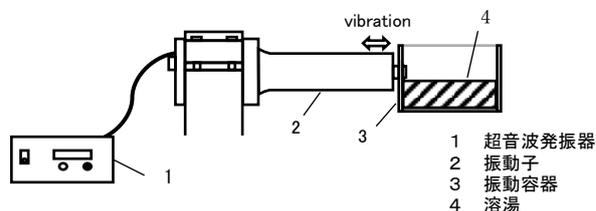


図 1 超音波鋳造装置外観

超音波鋳造材の作製では、カーボン坩堝に入れたインゴットを電気炉で溶解し、約 680℃で保持した。振動容器は離型剤を塗布し、ガスバーナーで約 200℃に加熱した。溶湯を振動容器に注ぎ、溶湯が凝固するまで超音波振動を付加した。本振動容器は一般的な金型鋳造と比べて板厚が薄いため、保持できる熱量が少なく冷却時間が長くなる。注湯後、溶湯が凝固するまで数分間要するため、凝固まで十分な時間、超音波振動の付加が可能となる。比較材として、溶湯を振動容器に注いで大気冷却したものを作製した。（超音波付加した鋳造材を「超音波付加」、超音波を付加せず注湯後、大気冷却したものを「超音波無し」と称する。）

図 2 に得られた鋳造材の外観写真を示す。超音波無しでは表面が平滑になっている一方、超音波付加では材料の縁部で凹凸がみられる。溶湯の凝固中に超音波振動を付加したため、溶湯が壁面に接して凝固し、側面に盛り上がりが生じている。超音波付加、超音波無しとも材料内部等に目立った欠陥はみられなかった。また、凝固中に溶湯表面の燃焼は確認されなかった。

図 3 に AZX912 合金押出材の外観写真を示す。成形性評価用の比較材として、市販の AZX912 合金押出材を用意した。押出材は直径 98mm、長さ 300mm、押出比 10 のものを用いた。



図 2 鋳造材外観  
(左：超音波無し、  
右：超音波付加)



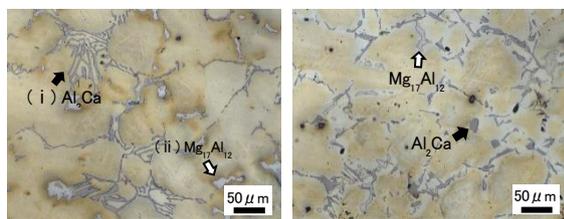
図 3 AZX912 合金押出材

#### 3.2 金属組織観察

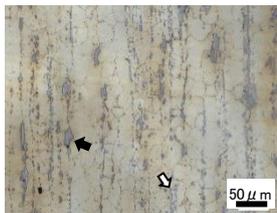
図 4 に金属組織写真を示す。得られた鋳造材は鏡面仕上げまで研磨を実施後、ピクラール（ピクリン酸 5g、酢酸 5ml、エタノール 10ml、蒸留水 100ml）にてエッチングを行い、金属組織観察を実施した。

図 4 (a) の超音波無しの金属組織では、2 種類の晶出物が確認された（図 4 (a) の (i) と (ii)）。(i) の

晶出物（黒矢印部➡）は、ネットワーク状に分布しており、層状の晶出物が偏在している。(ii)の晶出物（白矢印部⇨）は塊状に分布している。晶出物の元素分析のため、SEM-EDX 分析と XRD 測定を実施したところ、ネットワーク状と層状の晶出物は、Al-Ca 系金属間化合物の  $Al_2Ca$ 、塊状の晶出物は  $Mg_{17}Al_{12}$  であることが確認された。超音波付加の金属組織では、 $Al_2Ca$  が層状から比較的細かな塊状に変化して分散していた。金属組織中の  $Al_2Ca$ 、 $Mg_{17}Al_{12}$  の金属間化合物の平均面積を画像処理 (Image J 倍率 200 倍) により測定したところ、面積の平均値は超音波付加無しでは、 $103.9 \mu m^2$ 、超音波付加では、 $36.4 \mu m^2$ 、押出材では、 $12.5 \mu m^2$  となり  $Al_2Ca$  の微細化が確認された。溶湯の凝固時に超音波振動が付加されたことで  $Al_2Ca$  が分断され、比較的微細に分散したことが考えられる。押出材の金属組織では、押出方向に沿って組織の流れがみられ、結晶粒と晶出物が微細に分布していた。



(a) 超音波無し (b) 超音波付加



(c) 押出材

図4 各鑄造材と押出材

### 3.3 成形性評価

図5に鍛造用金型の外観写真を示す。鍛造試験により成形性評価を実施した。金型は円盤バルク状の試験片をカップ形状に成形することができる。金型はダイセットに固定し、110t 油圧サーボプレス機 (株アマダ製 SDH110) に設置した。



図5 鍛造用金型外観

図6に金型のパンチおよびダイの概要図を示す。パンチ先端径は  $\phi 32mm$  とし、金型内にはカートリッジヒータを設置し加熱可能とした。パンチとダイは断熱材を用いて金型内の熱移動を抑制し、温度保持できる構

造となっている。

図7に鑄造材から採取した鍛造試験用バルク材と、採取後の鑄造材外観を示す。鑄造材からワイヤー放電加工機により円柱状にくり抜いた後、旋盤加工を行い、 $\phi 53mm \times h23mm$  の円盤バルク材を作製した。押出材では押出方向と平行に円柱状にくり抜き、旋盤加工によ

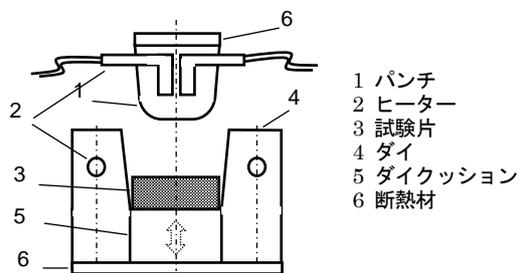


図6 パンチおよびダイの概要



図7 鍛造試験用バルク材と採取位置

り円盤バルク材を作製した。



加工速度 0.1mm/s 加工速度 1.0mm/s (a) 超音波無し



加工速度 0.1mm/s 加工速度 1.0mm/s (b) 超音波付加



加工速度 0.1mm/s 加工速度 1.0mm/s (c) 押出材

図8 鍛造試験後の試験片外観

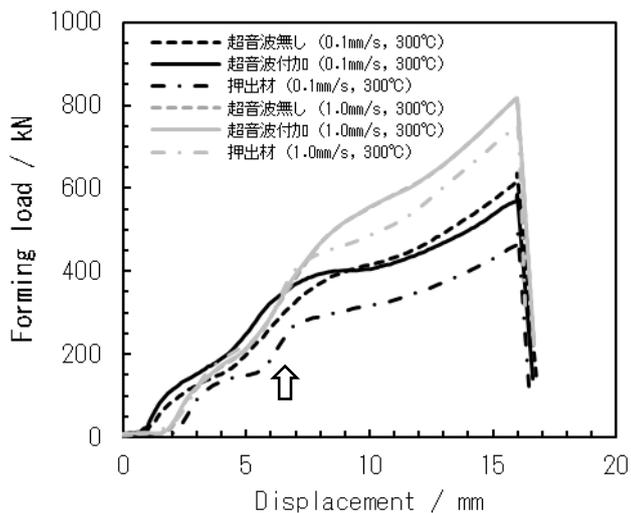


図 9 成形荷重曲線

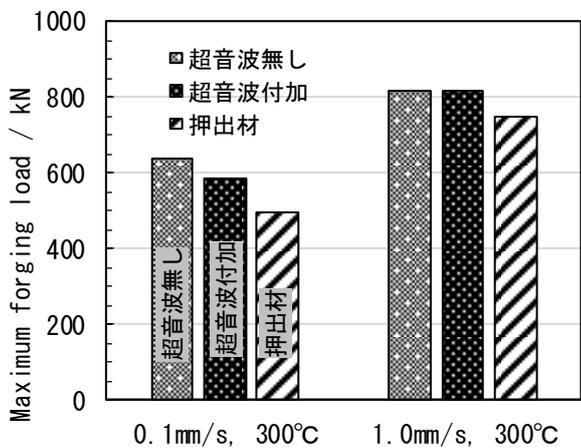


図 10 各鍛造条件の最大成形荷重

鍛造試験は加工温度 300°C、加工速度（パンチ移動速度）0.1mm/s と 1.0mm/s で実施した。バルク材を加工温度に設定した電気炉内で 30 分ほど保持した後、試験直前に電気炉から取り出してダイに設置し、鍛造試験を実施した。潤滑剤として黒鉛系潤滑剤をパンチ、ダイ、バルク材に塗布した。

図 8 にバルク材の鍛造試験後の外観写真を示す。超音波無しでは、加工速度 0.1mm/s、1.0mm/s ともカップ縁部に割れが確認される。一方、超音波付加では、加工速度 1.0mm/s では割れが確認されたが、加工速度 0.1mm/s では割れが確認されなかった。また、押出材は加工速度にかかわらず、割れの無い健全なカップ形状が得られた。

図 9 に鍛造試験時の成形荷重曲線（荷重-変位曲線）を示す。成形荷重は、加工速度の速い 1.0mm/s の方が 0.1mm/s よりも荷重が増加した。铸造材の超音波無し、超音波付加と比べて押出材は成形荷重が減少している。加工速度 0.1mm/s、1.0mm/s とともに、変位量が約 6mm（図 9 矢印部 ⇒）までは各条件で荷重-変位曲線の差は



(a) 超音波無し（マクロ組織とミクロ組織）



(b) 超音波付加（マクロ組織とミクロ組織）



(c) 押出材（マクロ組織とミクロ組織）

図 11 鍛造試験後の試験片断面の金属組織

ほぼみられないが、それ以降は成形荷重の差が広がる。

次に、鍛造試験時にバルク材に生じる変形について、推察する。試験片がダイ下部に充填された後、パンチの荷重付加方向とは逆方向にパンチとダイ間の隙間に押し出される。パンチ、ダイおよびバルク材との接触面積が増加することにより、急激な成形荷重の増加が生じ、成形荷重の差が顕著にみられたことが、変形の原因と考えられる。

図 10 に試験片の各鍛造条件における成形荷重のピーク値を示す。最大成形荷重は加工速度 0.1mm/s では、超音波無しが 635kN、超音波付加が 583kN、押出材が 493kN で、超音波無しが最も高く、押出材が最も低い。加工速度 1.0mm/s では超音波無しが 818kN、超音波付加が 818kN、押出材は 748kN となった。加工速度の増加により変形抵抗が増加したことが考えられる。

図 11 に加工速度 0.1mm/s の鍛造試験後のカップ状試験片の中心近傍を縦割りに切断した断面の金属組織を示す。せん断変形により金属組織が微細化されており、超音波付加無しの条件では、金属組織中に鍛流線が偏在しているのが確認された。これは、Mg 母相と比べて硬く脆い金属間化合物の  $Al_2Ca$  が結晶粒界にネットワーク状および層状に偏析していることで結晶粒の変形が阻害され、金属組織の流れに偏りが生じているためと考えられる。また、温度 300℃で鍛造試験を実施しており、動的な再結晶による延性向上、結晶粒界のすべり変形の増加が期待されるが、結晶粒界に偏析する粗大な金属間化合物の  $Al_2Ca$  により結晶粒界の動的な再結晶、すべり変形が抑制され、成形性が低下していることが考えられる。また、変形時に硬質な化合物を起点として亀裂伝播速度の速い割れが進展し、亀裂が広がることが予想される。

超音波付加有りの条件では、鍛流線が全体的に広がり、比較的均一な組織の塑性流動が確認された。 $Al_2Ca$  が比較的細かい塊状に均一に分散したことで、結晶粒界のすべり変形や動的な再結晶が改善し、鍛造時の金属組織の流れが比較的均一になり、超音波付加無しの条件と比べて成形性が向上したと考えられる。

押出材については、鑄造材と比べて金属組織中の結晶粒が十数  $\mu m$  であり、Al と Ca との金属間化合物が数  $\mu m$  以下と微細であるから、鑄造材および超音波振動を付加した素材と比べ、塑性流動性が良好であることにより、高い成形性を示したと考えられる。

#### 4. まとめ

難燃性 Mg 合金の一つである AZX912 合金の溶湯の凝固過程に、超音波振動を付加した鑄造材を作製し、鍛造試験により成形性評価を実施した。

- ・超音波振動を付加した鑄造材では、金属間化合物の  $Al_2Ca$  が比較的細かい塊状に分布し、超音波付加無しの条件と比べて、成形性の向上が確認された。
- ・結晶粒界に偏析する  $Al_2Ca$  が超音波振動により分断され、比較的微細な塊状になることで、塑性変形時の結晶粒の変形抑制が改善されたと考えられる。

今後、超音波振動を付加した素材が押出材並みの成形性を得るためには、超音波出力の増加や冷却速度を速くすることで、結晶粒および金属間化合物を微細化させることが必要であると考えられる。

#### 5. 謝辞

本研究の一部は塑性加工技術振興事業基金研究助成を受けて実施した。

#### 6. 参考文献等

- 1) 日本本マグネシウム協会編：マグネシウム技術便覧、(2001)、カロス出版。
- 2) 千野靖正、他：プレス技術、**48**(2010)、23-27。
- 3) 行武 栄太郎、他：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）、茨城県工業技術センター研究報告、**45**(2016)。
- 4) 行武 栄太郎、他：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 2 報）、茨城県工業技術センター研究報告、**46**(2017)。
- 5) 行武 栄太郎、他：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）、茨城県産業技術イノベーションセンター、**47**(2018)。
- 6) 行武 栄太郎、他：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 4 報）、茨城県産業技術イノベーションセンター、**48**(2019)。
- 7) 坂本 満：難燃性マグネシウム合金の開発と歴史、軽金属、**66**(2016)、240-245。
- 8) 小原 久：難燃性マグネシウム合金や耐熱マグネシウム合金の開発と応用、軽金属、**66**(2016)、233-239。
- 9) コマロフ セルゲイ：超音波鑄造におけるキャビテーション現象とその工業的応用、鉄と鋼、**102**(2016)、179-185。
- 10) 大澤 嘉昭：超音波振動による軽金属材料の凝固組織制御、軽金属、**61**(2011)、220-225。
- 11) Y. J. Cehn, W. N. Hsu and J. R. Shih: The Effect of Ultrasonic Treatment on Microstructural and Mechanical Properties of Cast Magnesium Alloys, Mater. Trans., **50**(2009)、401-408。
- 12) 平渡末二：高強度マグネシウム合金の熱間鍛造に関する研究、群馬大学、2015。