

難燃性マグネシウム合金粉末を用いた型内発泡成形体の創製

東京都立大学 システムデザイン学部 航空宇宙システム工学科

教授 北 蘭 幸一

(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021023-B3)

キーワード：ポーラス金属，圧粉体，誘導加熱

1. 研究の目的と背景

発泡スチロールに代表される樹脂を素材とした発泡成形体は，軽量，断熱，衝撃吸収等の特性を有するため，多くの分野で使用されている．一方，金属を発泡させて作製される発泡金属は，そのセル構造と高い強度と耐熱性のため軽量構造材料として注目されている．発泡金属の作製法は，鋳造法と粉末法に大別される．発泡アルミニウムの鋳造法では，熔融アルミニウム中に発泡剤を添加し，発生したガスで発泡させる．この時の発泡剤は，水素化チタンが主に使用される¹⁾．発泡アルミニウムの粉末法では，アルミニウム粉末と発泡剤粉末を混合，固化してから，型内で発泡させることにより，Near net-shape 発泡成形体を作製することができる²⁾．粉末法は，ポーラスチタン等の高融点金属にも適用でき，インプラント用生体材料として使用されている³⁾．

マグネシウム合金は化学的に活性であるため，アルミニウム合金に比べて鋳造法も粉末法も難しい．従来のマグネシウム合金から発泡体を作製する場合，不活性ガス等による燃焼対策が不可欠であった⁴⁾．そのため，マグネシウムをプリカーサとした粉末法による発泡の研究はほとんど行われていなかった．

最近，著者らは，難燃性マグネシウム合金から大気中でのポーラスマグネシウムの作製に成功した⁵⁾．素材として AZX912 合金板と水素化マグネシウム(MgH₂)粉末を用いることにより，気孔率 50%の発泡マグネシウム合金が得られた．この時は自由発泡試験を実施したため，発泡体の外形はほぼ球形となり，中空金属球が得られた．

本研究では，難燃性マグネシウム合金からの発泡体作製プロセスを応用し，発泡体を型内へ充填させることにより，任意の外形の発泡マグネシウム成形体創製を目的とする．発泡プロセスには粉末法を用い，市販の難燃性マグネシウム合金(AZX912 および AMX602)粉末から大気中でプリカーサを作製し，型内で，加熱・発泡・成形させることにより，マグネシウム合金製発泡成形体を作製する．本研究により，アルミニウム合金発泡成形体に代わる輸送機器用超軽量構造材料として，マグネシウム合金発泡体の工業的応用が期待される．

表 1 マグネシウム合金粉末の化学組成(mass%)

	Al	Zn	Mn	Ca	Si	Mg
AZX912	8.80	0.660	0.29	2.01	0.054	Bal.
AMX602	6.13	0.100	0.305	1.99	0.004	Bal.

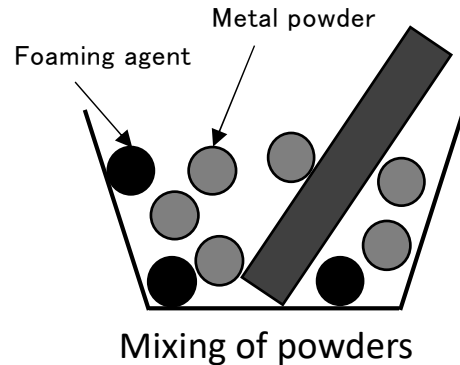


図 1 乳鉢によるマグネシウム合金粉末と発泡剤粉末の混合の模式図

2. 実験方法

戸畑製作所より，粒径 63~150 μm の AZX912 合金粉末，粒径 53~150 μm の AMX602 合金粉末を購入した．化学組成を表 1 に示す．発泡剤として和光純薬工業製水素化マグネシウム粉末と高純度化学研究所製水素化チタン(TiH₂)を用いた．どちらも加熱により水素ガスを発生するため発泡マグネシウムの作製に用いられる発泡剤である．

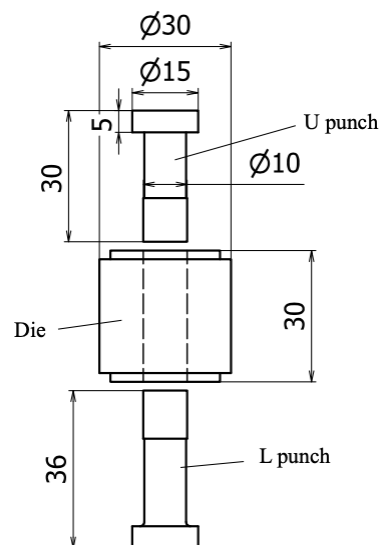


図 2 円柱状プリカーサの作製に用いた超硬ダイスの模式図．

図 1 のように AZX912 金粉末に対して 2 mass%MgH₂ 粉末, AMX602 合金粉末に対して 1 mass%TiH₂ を乳鉢で混合した. 得られた混合粉末を内径 10 mm のエヌピーエーシステム製超合金製ダイス [図 2] に入れた. このダイスはフローティング状態で両軸成形が可能である. ダイスにバンドヒーターを巻き付け, 400℃, 15 kN で 1200 s 圧粉成形し, 高さ 10 mm の円柱状プリカーサを作製した. ダイスの温度は, K 熱電対をスポット溶接することにより

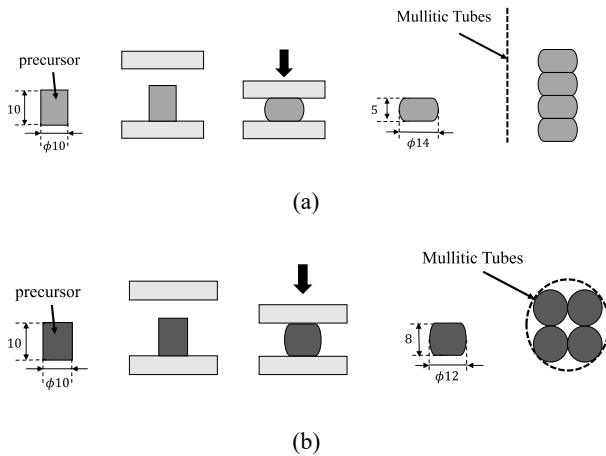


図 3 円柱プリカーサの高温圧縮変形と配置. (a)AZX912 合金, (b)AMX602 合金

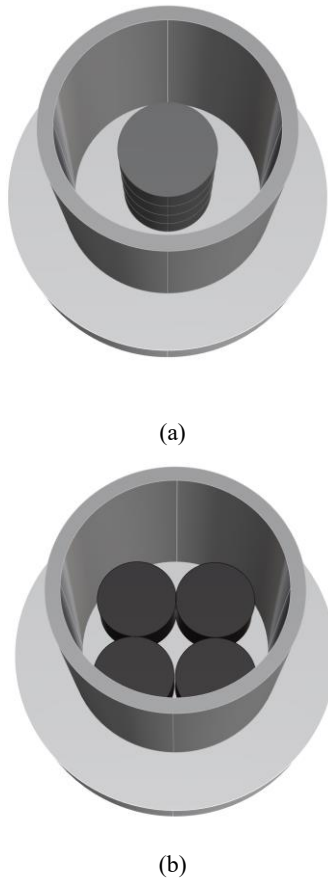


図 4 内径 30 mm のムライト製円筒内の円柱状プリカーサ配置の模式図. (a) 鉛直方向に配置. (b) 平面内に配置.

測定した. 完成したプリカーサの断面を研磨し, 光学顕微鏡で観察した.

SK メディカル電子製高周波加熱装置 MU-mini を用いてプリカーサの加熱発泡試験を行った. 最大出力は 2.8 kW である. 配置の前に円柱状プリカーサを 300℃, 4 mm/min で圧縮変形することにより, AZX912 合金プリカーサの高さを 5 mm, AMX602 プリカーサの高さを 8 mm とした [図 3]. 圧縮には島津製作所製圧縮試験機 CONCRETO 2000X を用いた. 内径 30 mm のムライト円筒中に 4 つのプリカーサを鉛直方向と平面内に配置した. 配置の模式図を図 4 に示す. AZX912 合金プリカーサは縦方向, AMX602 プリカーサは平面内に配置した.

高周波加熱試験では, 装置の出力を固定し, 大気中で加熱発泡試験を行った. 発泡中のプリカーサの形状変化を上面からデジタルビデオカメラで観察した. 完成した発泡体の密度 ρ^* を Archimedes 法で測定し, 気孔率 p を

$$p = 1 - \frac{\rho^*}{\rho_s} \quad (1)$$

として算出した. ここで ρ_s はマグネシウム合金の密度である. また, 型内の充填率 ρ_v は,

$$\rho_v = \frac{V^*}{V} \quad (2)$$

と定義した. ここで V^* は発泡体の体積, V は $p = 50\%$ の発泡体が型内を完全に充填していると仮定したときの体積である.

3. 実験結果および考察

作製したプリカーサ断面の光学顕微鏡写真を図 5 に示す. 図 5(a)の赤丸は MgH₂ 粒子, 図 5(b)の赤丸は TiH₂ 粒子を示している. 組織観察により, どちらの試験片において

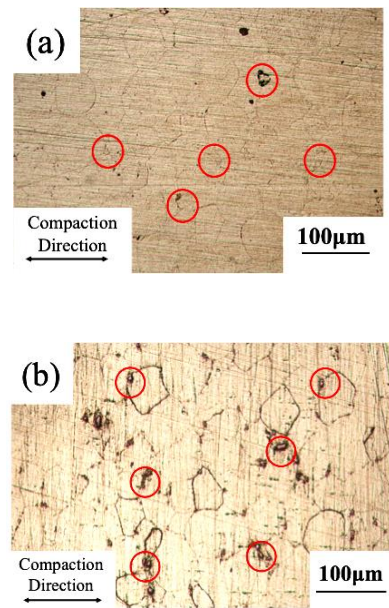


図 5 マグネシウム合金プリカーサ断面の光学顕微鏡写真. (a)AZX912 合金, (b)AMX602 合金

もプリカーサ中に発泡剤粒子が均一に分散していることがわかった。プリカーサの充填率を測定した結果、AZX912 合金は 98.7%, AMX602 合金は 97.9%であり、十分に緻密化されていた。

高周波コイルによる加熱発泡試験後の外観写真と断面写真を図 6 に示す。(a), (b), (c)は AZX912 合金プリカーサをそれぞれ高周波出力 3.5, 4, 5 で加熱した結果, (d)は AMX612 合金プリカーサを高周波出力 3.5 で加熱した結果である。(e)-(h)はそれぞれの試験で得られた発泡体の断面写真である。

縦に配置した AZX912 合金の場合, 4 つのプリカーサは発泡によって一体化し, ムライト型内に充填された。一方, 断面写真より, 気孔は試験片の上部に集中していた。これは高周波コイル内では上部の温度が高く優先的発泡が生じたが, 下部の温度が低かったため, 発泡が不十分であったためと考えられる。

平面内に配置された AMX602 合金の場合, 発泡が不十分で一体化しなかった。これは AZX912 合金の固相線温度(522℃)に比べて AMX602 合金の固相線温度(545℃)が高いため, 同じ温度でも固相の変形抵抗が大きく, 膨張が不十分になったと考えられる。

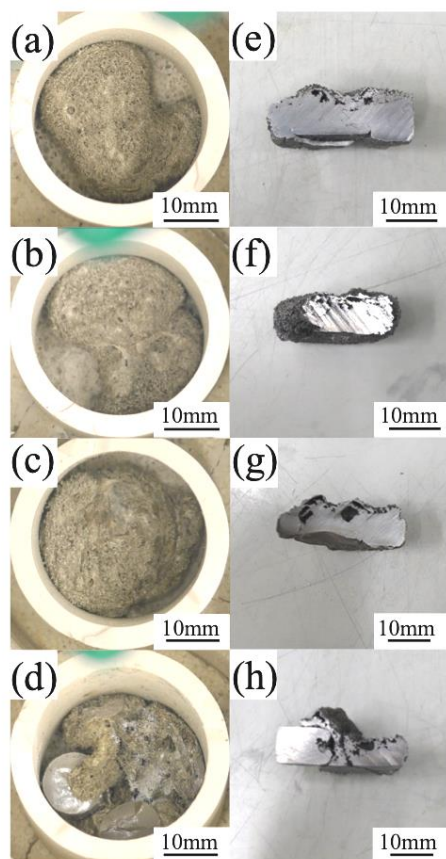


図 6 マグネシウム合金プリカーサの高周波加熱による型発泡試験結果。(a)(e)AZX912 合金 (出力 3.5), (b)(f)AZX912 合金 (出力 4), (c)(g)AZX912 合金 (出力 5) (d)(h)AMX602 合金 (出力 3.5)

実験で得られた気孔率と型充填率を図 7 に示す。AZX912 合金は高周波出力 3.5, 4, 5 で気孔率は 15.4%, 13.7%, 13.4%, 型充填率は 59.6%, 58.1%, 58.9%であった。一方, AMX602 合金では, 高周波出力 3, 3.5 で気孔率 9.7%, 16.7%, 型充填率は 55.3%, 59.9%であった。AZX912 合金では高周波出力による発泡挙動に違いはほとんどなかったが, AMX602 合金では, 高周波出力が高いほど気孔率, 型充填率が増加した。これは AZX912 合金では高周波出力が高くなると発泡体が縦方向につぶれてしまい, 得られる気孔率に限界があるためと考えられる。

全ての実験において, 型充填率は 60%未満となった。充填率の向上のためには大きなプリカーサを用いる必要があることがわかった。

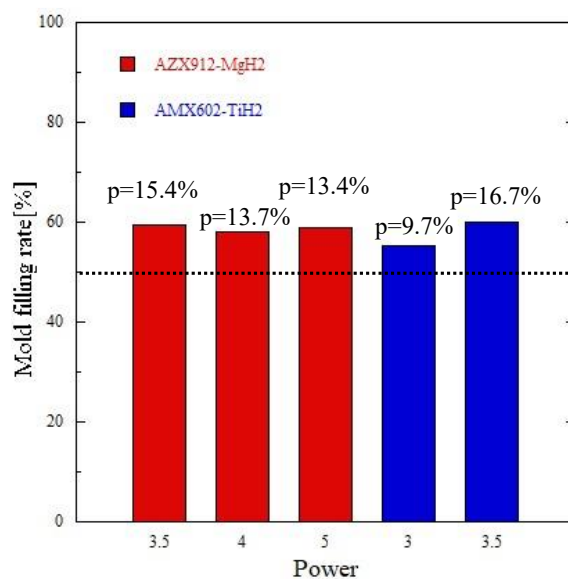


図 7 2 種類のマグネシウム合金における型充填率と高周波出力の関係

4. まとめ

本研究では, 型発泡と粉末法により, 任意の形状を有するポーラスマグネシウム合金成形体の作製を試み, 以下のような知見を得た。

- AZX912 合金粉末から円柱状プリカーサを作製した。積み重ねて高周波誘導加熱により発泡させると, 一体化し, 最大気孔率 15.4%, 最大型充填率 59.6%の発泡体が得られた。
- AMX602 合金粉末から円柱状プリカーサを作製した。平面内に並べて高周波誘導加熱により発泡させると, 最大気孔率 16.7%, 最大型充填率 62.5%の発泡体が得られた。
- 難燃性マグネシウム合金粉末からプリカーサを作製し, 型発泡を行う場合, 融点の高い AMX602 合金よりも融点の低い AZX912 合金の方が適することがわかった。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2021 年度一般研究開発助成によって行われた。本研究の実施における東京都立大学大学院生の山下竜弥君の協力に心より感謝申し上げる。

参考文献

- 1) T. Miyoshi, T. Mukai, K. Higashi: Mater. Trans., **43** (2002), 1778.
- 2) F. Baumgärtner, I. Duarte, J. Banhart: Adv. Eng. Mater., **2** (2000), 168.
- 3) M. Takemoto, S. Fujibayashi, M. Neo, J. Suzuki, T. Kokubo, T. Nakamura: Biomaterials, **26** (2005), 6014.
- 4) D.-H. Yang, B.-Y. Hur, S.-R. Yang: J. Alloys Compd., **461** (2008), 221.
- 5) 鎌田 凌, 小林真奈, 北薮幸一: 軽金属, **72** (2022), 139.