

# 消失模型鑄造法による難燃性マグネシウム合金の成形技術（第2報） —難燃性マグネシウム合金の材料加工特性に関する研究—

園田正樹・高橋芳朗・清高稔勝  
生産技術部

## Forming Technique of Noncombustible Magnesium Alloy on Evaporative Pattern Casting Process (2nd Report)

Masaki SONODA, Yoshiro TAKAHASHI, Toshikatsu KIYOTAKA  
Production Engineering Division

### 要旨

現在使用されているマグネシウム合金は大気中で溶解すると発火する性質を持ち、生産量の増加に伴い事故も近年増加している。我々は大気中でも発火することなく溶解できる難燃性マグネシウム合金に注目し、要素技術の研究開発とこの合金の適用分野の検討を行なっている。本実験では消失模型鑄造法による難燃性マグネシウム合金の成形について、この合金の肉厚による機械的性質の違いを調べるため、階段型試験片を用いた鑄造実験を行った。鑄造後868K以下の温度域では、鑄造品の肉厚差による冷却速度の明らかな変化は確認されなかった。鑄造品の外観からは、鑄型内への溶湯の充填不良は確認されなかったが、内部にスチロール模型等の未分解残渣によるものと考えられる巻き込み欠陥が確認された。

### 1. はじめに

マグネシウム合金（以下Mg合金とする）は携帯電話・パーソナルコンピュータなどの電子機器筐体として現在広く用いられるようになり、次世代軽量構造金属材料として期待されているが、大気中で加熱すると微粉末では673K以上で、インゴットでは融解（純Mgの融点は約923K）を始めると発火するという弱点を持っている。したがって、Mg合金の溶解・鑄造・加工・熱処理を行なうには酸素を遮断するために大掛かりな設備を必要とし、採算を考慮するとダイカストやチクソモールディングといった成形方法で量産品にMg合金は主に適用されている。また、Mg合金の溶解時には酸素を遮断するシールドガスとしてSF<sub>6</sub>ガスが用いられているが、このSF<sub>6</sub>ガスはフロンガス以上に地球温暖化を促進するガス<sup>1)</sup>として将来的に使用規制が予想され、代替ガス及び新溶解法の開発が現在求められている。したがって、Mg合金を多品種少量生産分野に利用拡大するには、低コストかつ大気中で溶解・鑄造可能なMg合金及びその成形加工技術が求められている。

一方、（独）産業技術総合研究所九州センター（旧工業技術院九州工業技術研究所）で難燃性のMg合金が開発され、大気中でもシールドガスを使用せずに溶解が可能となるため、用途拡大に期待が高まっている。

この合金の成形加工技術が確立されれば、これまでのような高額な設備を用いずにMg合金製品の製造が可能となり、軽量化が望まれる福祉機器などの多品種少量生産分野においてもMg合金の適用が期待できる。したがって、県下中小企業のMg合金市場への参入が可能になる。

現在、我々はこの難燃性Mg合金の溶解技術を導入し、鑄造・熱処理等の要素技術の研究開発を行なうと同時に、本合金の適用分野についての検討及び製品の試作を進めている。今回は、鑄造技術の研究開発として、消失模型鑄造法により難燃性Mg合金を鑄造した際の内部欠陥対策について検討したので報告する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 消失模型鑄造法

消失模型鑄造法とはFig.1に示すようにスチロール模型を鑄型枠内の砂中に埋設し、鑄型枠内を減圧して溶湯を流し込み、スチロールと金属を置換する鑄造方法<sup>2)</sup>である。割り型による鑄造と異なり、鑄バリが生じず、仕上げ工程が減少することが特徴である。しかし、Mg合金に対しては比重が軽いことから、模型消失時に発生するガスにより溶湯が鑄型内の細部に至るまで充填されにくいなどの原因から、実用化

されるに至っていない。

実験に使用した鋳型枠は円筒形（ $\phi 600\text{mm} \times H600\text{mm}$ ）であり、3次元振動テーブル上に載せている。この中の非粘結砂中にスチロール模型を埋設し、3次元方向に振動を加えることにより模型の隙間に砂を充填させた。さらに模型と鋳物砂とを密着させるため、鋳物砂上をポリエチレンシートで覆い真空ポンプにより鋳型枠内を減圧した。砂の充填に対する振動条件と減圧条件をTable.1に示す。鋳造の際には鋳型枠の振動は停止した。

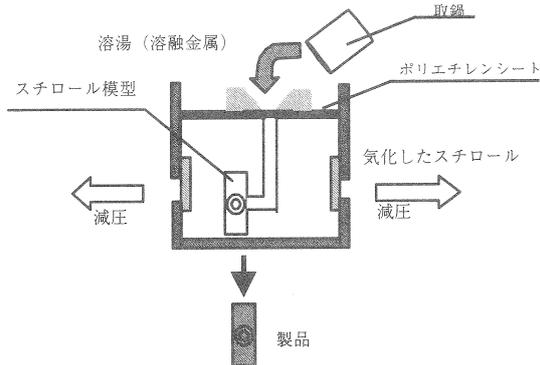


Fig.1 消失模型鋳造法

Table.1 砂の充填に対する振動条件と減圧条件

振動数 (Hz)			鋳型内圧力
X (水平)	Y (水平)	Z (垂直)	mmHg
32	32	24	60

## 2.2 実験材料

研究に使用する難燃性Mg合金（AZC912：Mg-9mass%Al-1mass%Zn-2mass%Ca）は、市販のダイカスト用Mg合金（AZ91：Mg-9.1mass%Al-0.7mass%Zn-0.2mass%Mn-0.0013mass%Be）にカルシウム（純度99.5mass%）を添加した合金である。

この合金は(独)産業技術総合研究所九州センターが開発したもので、合金溶解時に緻密で薄いカルシウム酸化皮膜が溶湯表面を覆うことによって、カルシウム無添加のAZ91合金より燃焼開始温度が200～300K上昇する<sup>3)</sup>。したがって溶解作業が大気中でも安全に行なえるという利点がある。

## 2.3 模型（鋳造方案）形状

円柱、立方体の発泡スチロールより作成した階段型試験片模型をFig.2に示す。階段型試験片を採用したのは難燃性Mg合金の肉厚の差異による冷却速度の差が、鋳造材の機械的強度に与える影響を調べるためである。階段型試験片と鋳造方案の体積はそれぞ

れ $62.5 \times 10^3 \text{mm}^3$ 、 $49.8 \times 10^3 \text{mm}^3$ であり体積比は1:0.79である。この階段型試験片をFig.2中の破線の位置で切断し、肉厚5mm、10mm、20mmの板材を得、旋盤加工により引張強度試験片を作製する。

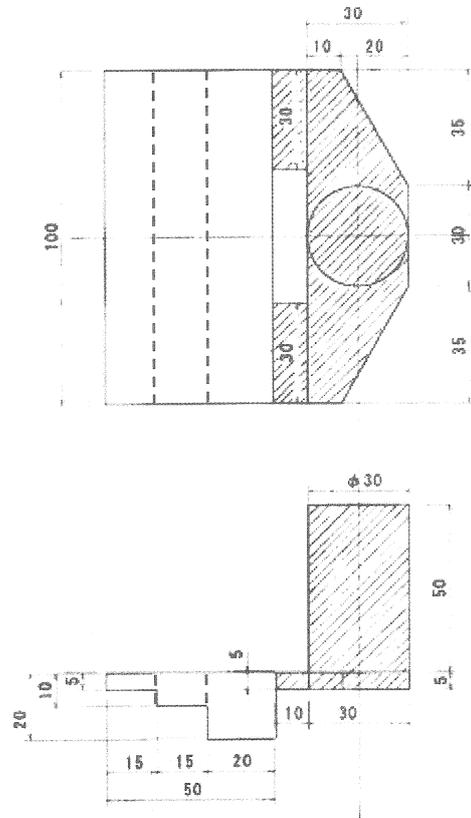


Fig.2 階段型試験片（斜線部は方案部分）

## 2.4 塗型剤の塗布条件

砂型鋳造の際、鋳物砂との焼付きを防ぐため溶湯と接する砂型表面に塗型剤を塗布する。スチロール模型表面に塗布する塗型剤として、アルミニウム合金用の消失模型鋳造用塗型剤エピコK-016C（神戸理化学(株)製）を用いた。塗型剤と蒸留水とを混練した後、ディッピング方式（スラリー状になった塗型剤中に試料を一定時間浸漬させ、引き上げて余分な塗型を落として塗布する方法）で10秒間浸漬させてスチロール模型に塗布した。塗布後、318Kに保持した乾燥機内で40時間乾燥させたものを実験に用いた。今回調整した塗型剤の粘度を回転粘度計により測定した結果をFig.3に示す。

塗型剤の付着量は、模型と同じ発泡スチロールで作製したコーティング試験片（付着面積 $900\text{mm}^2$ ）に同条件で塗付、乾燥させた後、重量測定により求めた。

付着試験結果をTable. 2に示す。模型表面積100mm<sup>2</sup>に対して付着量は約0.04g程度であることが確認された。

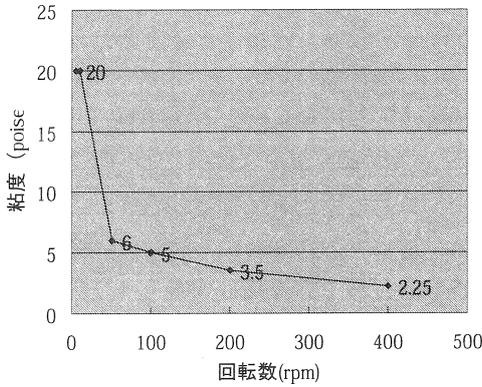


Fig. 3 回転数に対する塗型剤の粘度

Table. 2 塗型剤のコーティング試験結果

試験片 No.	塗付前重量 (g)	塗付後重量 (g)	付着量 (g)	100mm <sup>2</sup> 当り付着量 (g)
1	0.3887	0.8258	0.4371	0.0486
2	0.4404	0.7440	0.3036	0.0337
3	0.5085	0.8168	0.3083	0.0343
4	0.4128	0.6496	0.2368	0.0263
5	0.3865	0.8169	0.4304	0.0478
平均	0.4274	0.7706	0.3432	0.0381

### 2.5 溶解・溶湯清浄・鑄造

約300gの難燃性Mg合金インゴットを蓋付きの黒鉛るつぼに入れ、高周波誘導電気炉により溶解した。溶湯温度を1023Kまで上昇させた後、Fig. 4に示すようにるつぼごと減圧装置内に移し、装置内を60mmHgまで減圧し2分間保持することによって溶湯中の非金属介在物を溶湯表面まで浮上させ除去した。減圧処理による溶湯清浄後、るつぼを炉へ戻し、溶湯を1033Kまで加熱させて鑄造を行なった。

鑄型内の減圧が鑄造体の冷却速度に与える影響を調べるため、Table. 3に示すように、鑄造条件A：鑄型枠内を60mmHgまで減圧した状態と、鑄造条件B：鑄型枠内を大気圧にした状態、の2通りで鑄造を行なった。

Table. 3 鑄造条件

	鑄造温度 (K)	鑄型内圧力 (mmHg)
鑄造条件A	1033	60
鑄造条件B	1033	760

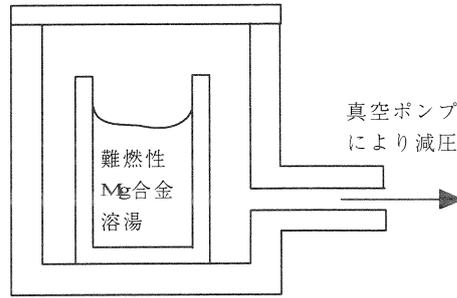


Fig. 4 減圧装置模式図

### 2.6 鑄造体の冷却速度測定

鑄造体の肉厚の差異と冷却速度の関係を調べる鑄造実験では、Fig. 5に示すように、階段型試験片から切り離した際、肉厚5mm、10mm、20mmの板材の中心となる位置T1, T2, T3に熱電対を取り付けた。鑄造直後から室温まで冷却する間、1秒毎に温度を測定した。

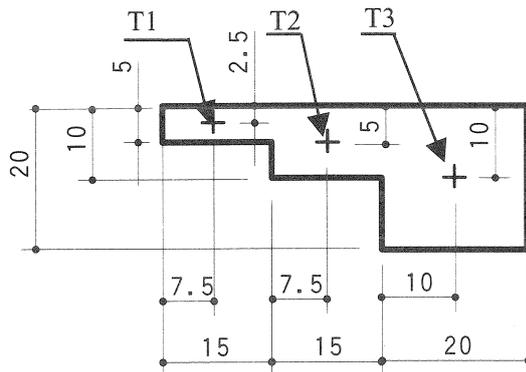


Fig. 5 温度測定位置 (十字線の箇所)

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 鑄型内への溶湯の充填

熱電対による計測値より、両鑄造条件共、溶湯はT1, T2, T3各位置に1秒未満の差で到達したのが確認された。鑄造品と湯口鉢を含めた方案の重量比は1:1.7であり、実験前は充填不良の発生も予測されたが、鑄造品と方案とも、外観からは溶湯の充填不良は確認されなかった。溶湯温度1033Kであれば、発生したガスの抵抗を受けても、Fig. 2に示されるような鑄型内を充填する流動性を持つと考える。

### 3.2 鑄造体の冷却速度

T1, T2, T3各位置の冷却速度は、温度と時間の冷却曲線を5つの温度領域に区切り、直線近似によって算出し

た。Table.4, Table.5にその結果を示す。Table.4, Table.5中の868~710Kまでの温度領域は、本研究に用いた難燃性Mg合金AZC912のベースメタルであるAZ91合金の液相点と固相点がそれぞれ868K<sup>5)</sup>と743K<sup>5)</sup>であることと、Mgとアルミニウムの共晶温度が710K<sup>6)</sup>であることを基に、AZC912合金が凝固を開始、終了すると推測した温度領域である。868~710Kの温度領域の鑄造条件A, Bの冷却速度は、ほぼ同値であることが判る。710K以下の温度領域では、鑄造条件Aの方が僅かながら冷却速度が速くなり、両鑄造条件共、製品の肉厚の差異と比較して冷却速度の差は僅かであることが判る。

Table.4 各温度領域における冷却速度(鑄造条件A)

温度領域	冷却速度 (K/S)		
	T1	T2	T3
868~710K	-1.2	-1.2	-1.2
710~573K	-0.8	-0.8	-0.8
573~473K	-0.3	-0.3	-0.3
473~423K	-0.2	-0.2	-0.2
423~373K	-0.2	-0.2	-0.2

Table.5 各温度領域における冷却速度(鑄造条件B)

温度領域	冷却速度 (K/S)		
	T1	T2	T3
868~710K	-1.3	-1.2	-1.2
710~573K	-0.7	-0.7	-0.6
573~473K	-0.2	-0.2	-0.2
473~423K	-0.1	-0.1	-0.1
423~373K	-0.04	-0.04	-0.04

### 3.3 階段型試験片の内部欠陥

冷却速度の違いによる機械的強度を調べるため、肉厚5mm, 10mm, 20mmにおける引張強度試験片作製を旋盤加工により行なったところ、破損が相次いだ。破片の観察により黒色繊維状の物質の巻き込みを確認した。この物質は、溶湯の冷却速度に、発泡スチロール又はスチロール模型の組立に使用した接着剤の分解が間に合わずに金属中に巻き込まれたものと考えられる。

引張試験片の加工により、鑄造条件と肉厚差による巻き込み欠陥の発生状況の違いを観察した結果をFig.6に示す。肉厚の増加と鑄型内の減圧により巻き込み欠陥の発生が顕著になっているのが判る。鑄造条件Aでの巻き込み欠陥の発生原因は、減圧で溶湯が鑄型内壁を引っ張られることにより、模型内深部を未分解のまま包み込

んでしまったことが考えられる。両鑄造条件とも肉厚20mmの箇所では巻き込み欠陥が発生した原因として、無減圧でも溶湯の流動速度が速すぎたことと、厚肉による断面積の増加に比して周辺長が短いため、ガス排出が不十分になったことの2つが推測される。原因を絞り込むには、減圧度の強弱と溶湯温度による溶湯の流動速度を測定して検証する必要がある。

消失模型鑄造における巻き込み欠陥の発生対策として以下の2通りが考えられる。

- ① 鑄型内への溶湯充填前に模型の分解を完了させる。
  - ② 鑄型内に溶湯を鑄込む前に、模型を分解除去する
- 対策①の手法として、鐵鋼材料やアルミニウム合金の消失模型鑄造では以下の3通りが提案されている<sup>8)</sup>。

- (1) 減圧度をできる限り弱める。
- (2) 溶湯の鑄造温度を上げる。
- (3) 模型発泡率を上げる。

(1)の鑄型内の減圧は、アルミニウム合金のように融点が高い合金が鑄型内に充填する前に凝固するのを防ぐため、発生ガスの排気を促進させ溶湯の流動性を高める方法であるが、減圧度が強過ぎると本研究で確認されたような巻き込み欠陥が発生するため、必要最低限の減圧条件を出す必要がある。この減圧条件は製品の寸法、形状ごとに変化することが考えられる。(2)の方法は水素欠陥等が発生しない程度の温度上昇に制限される。また難燃性マグネシウム合金も1100K以上になると発火開始温度域になるため<sup>3)</sup>、本研究の鑄造温度より数10K程度の上昇が限度と考える。(3)については模型を形成するスチロールの発泡率を上げることによって、分解除去する模型の質量を減少させる効果があるが、発泡率を上げることにより模型の強度低下や表面から発泡粒子が欠落しやすくなるので、スチロール模型の設計や塗型剤の塗付技術を考慮する必要があると考える。

対策②の研究例として、事前消失型消失模型鑄造法と称される鑄造法が挙げられる<sup>8)</sup>。これは塗型剤にセラミックス等の繊維を複合化させることにより塗型膜を強化し、鑄物砂中に設置後、スチロール部分を燃焼除去して鑄造する方法である。従来の消失模型鑄造法で発生する製品中への炭素吸収や残渣問題の対策として開発されている鑄造法で、鑄鋼品の鑄造等の報告がなされている。難燃性マグネシウム合金にこの方法を適用する場合、鑄型内部の空気を排出できるよう繊維の複合化による塗型膜の強度の向上と共に、十分な通気性を保つ必要があると考えられる。

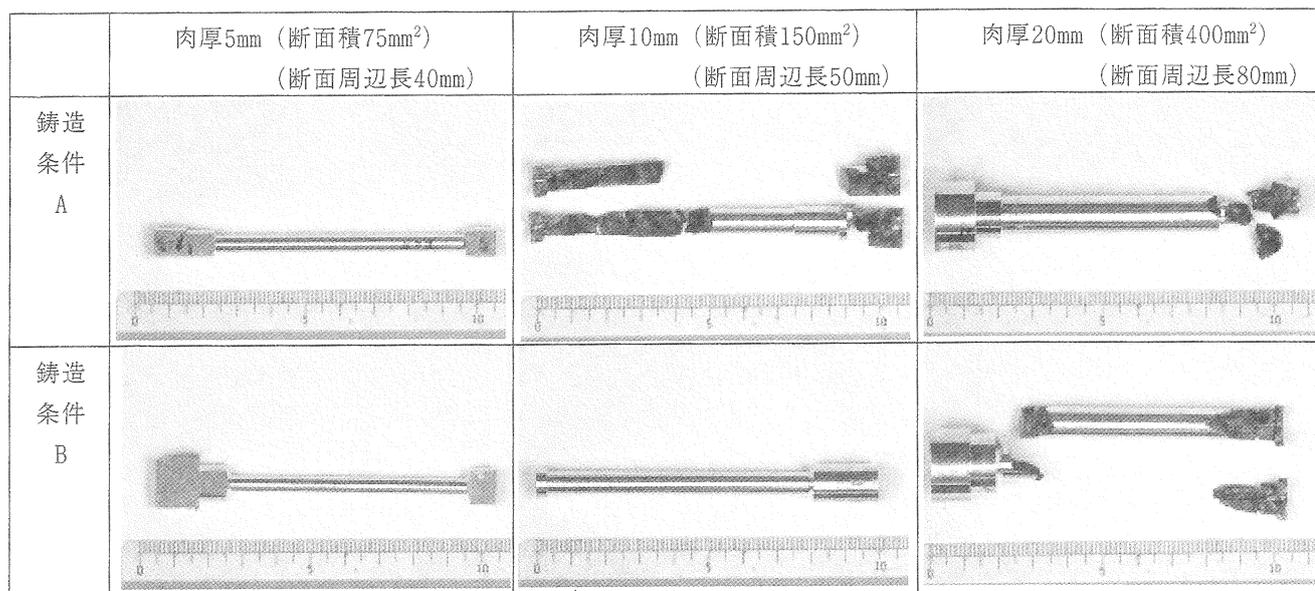


Fig.6 鑄造条件と製品肉厚による巻込み欠陥の発生状況

#### 4. まとめ

階段型試験片を用いて難燃性Mg合金の消失模型鑄造における鑄造特性を調べた。

- (1) 溶湯温度1033Kであるとき鑄型内を減圧に保たなくても溶湯の充填に問題はなかった。
- (2) 鑄造後、868K以下の温度領域では、肉厚差による冷却速度の違いは確認されなかった
- (3) 肉厚20mmの厚肉部内部に模型の未分解残渣と考えられる巻込み欠陥が確認された。鑄型内部を減圧した鑄造品では肉厚10mmの部分にも巻込み欠陥が確認された。

巻込み欠陥の発生条件を調べるため、溶湯温度と鑄型内の減圧による溶湯の移動速度の変化を調べ、巻込み欠陥の発生状況と照らし合わせ検証することが今後の課題である。

本研究の遂行にあたり、難燃性マグネシウム合金をご提供頂くと同時に、貴重なご助言を頂きました(独)産業技術総合研究所九州センター上野英俊主任研究官、坂本満主任研究官に深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 日刊工業新聞 1998.1.28
- 2) 吉浦洋之, 清高稔勝:平成元年度大分県工業試験場研究報告, 38
- 3) 秋山茂, 上野英俊, 坂本満:まてりあ Vol.39 No.1 2000, 72
- 4) 園田正樹, 高橋芳朗, 清高稔勝:平成12年度研究報告(大分県産業科学技術センター) 2000, 104

- 5) 日本マグネシウム協会:マグネシウム技術便覧 2000, 58
- 6) Thaddeus B.Massaiki et al :Binary Alloy Phase Diagrams 1990, 170
- 7) 日本マグネシウム協会:マグネシウム技術便覧 2000, 165
- 8) 秋山茂:金属 Vol.70 2000 No.6
- 9) 阪口康司:鑄物 第64巻(1992)第1号, 38
- 10) 藤田英明, 西山博輝, 川端勝弘, 志村勝司:日本鑄造工学会第138回全国講演大会概要集 2001, 21