

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 —マグネシウム合金の高機能化に関する研究—

園田正樹・高橋芳朗・清高稔勝

材料開発部

Forming Technique of Noncombustible Magnesium Alloy on Evaporative Pattern Casting Process

Masaki SONODA, Yoshiro TAKAHASHI, Toshikatsu KIYOTAKA

Material Development 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。鑄型内への溶湯の充填は良好だったが、薄肉部分に寸法変形が確認され、試験片内部には主に上部表面付近にブローホールが確認された。

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SF₆ガスが用いられているが、このSF₆ガスはフロンガス以上に地球温暖化を促進するガス¹⁾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。今回の報告では、難燃性Mg合金の消失模型鑄造法に対する鑄造特性について報告する。

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²⁾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。

実験に使用した鑄型枠は円筒形（φ600mm×H600mm）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。鋳造の際には真空ポンプによる吸引を停止し、無振動状態で行なった。

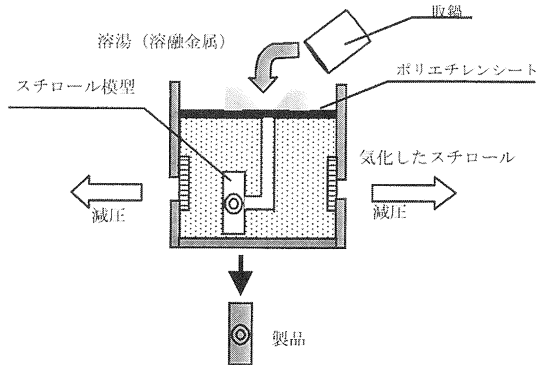


Fig. 1 消失模型鋳造法

Table. 1 砂の充填に対する振動条件と減圧条件

	振動数(Hz)			減圧度
	X (水平)	Y (水平)	Z (垂直)	mmHg
設置時	32	32	24	230
鋳造時	0	0	0	-

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³⁾。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。

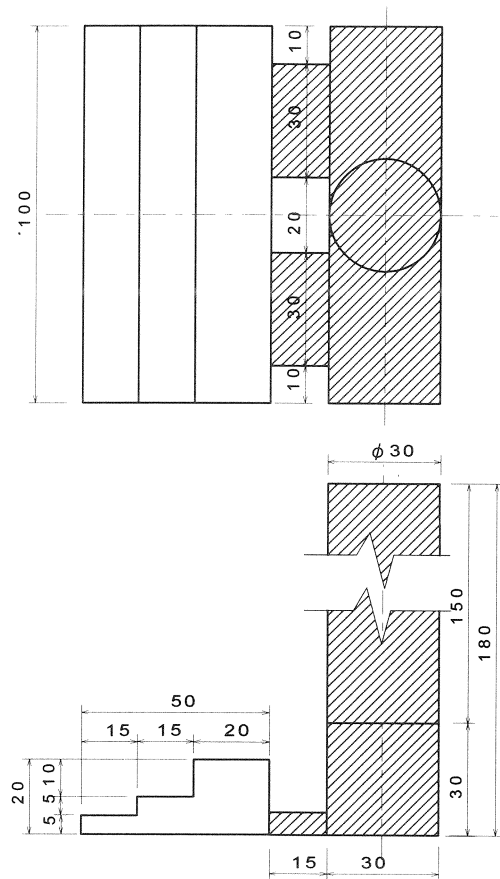


Fig. 2 階段型試験片 (斜線部は方案部分)

階段型試験片を採用したのは難燃性Mg合金の肉厚度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62.5cm³、201.4cm³であり体積比は1:3.22である。

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。塗型剤と水との混練に関して推奨比は10~6:1であるが、攪拌設備の関係上、スラリー状にならず均一な厚さの塗型膜が得られなかった。スラリー状になるまで徐々に水を増した結果、塗型剤と水との重量比が8:3のものを塗布した。この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。塗型剤の付着量はコーティングテストより模型表面積1cm²に対して約0.03g程度であることが確認された。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。

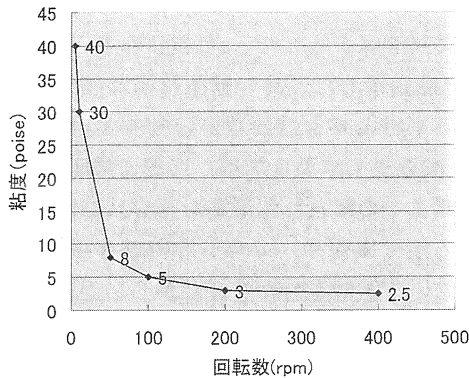


Fig. 3 回転数に対する塗型剤の粘度

2.5 溶解・溶湯清浄・鑄造

約600gの難燃性Mg合金インゴット1個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に示すようにな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高周波誘導電気炉へ戻し、溶湯温度を1053Kまで再び上昇させて鑄造を行なった。

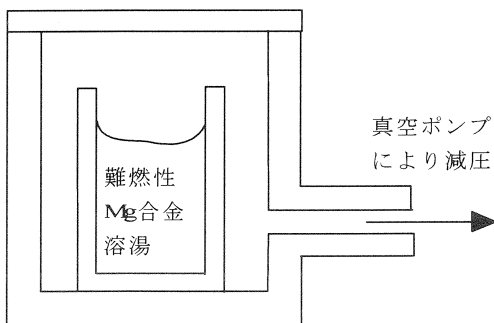


Fig. 4 減圧装置模式図

3. 実験結果及び考察

3.1 鑄造品外観観察

鑄造後の階段型試験片と鑄造方案の重量比は約1:4であった。実験前の体積比より方案側の重量が増しているのは湯口鉢側に加えられた溶湯分である。なお、平成12年度に試験的にジョイント部品を試作した際の製品と鑄造方案の重量比はおよそ1:10であった⁴⁾。このときは鑄造時に鑄型枠内の減圧状態を230mmHgに保ったままで行なった以外は全て今回と同じ条件であり、中空部分を持たない形状であれば製品と方案の重量比が1:4程度でも鑄型内への溶湯の充填には支障をきたさな

いと考えられる。

鑄造後の表面状態を観察したところ、塗型剤が付着し難いと考えられるコーナー部に砂が焼付いているようだったが、ワイヤブラシにより塗型剤を除去する過程で、これらの砂は容易に除去された。塗型剤の付着量が少ない分、砂の焼付きを懸念したが、仕上げ工程によって除去できる程度であることが確認された。Fig. 5に鑄造後の階段型試験片の写真を示す。模型消失時のガスによる鑄型内への溶湯の充填不良は確認されず、模型表面の状態（スチロール粒子の粒界等）がそのまま試験片に転写されていた。製品の鑄造後の変形については、底辺部分の両端がFig. 6に示す座標軸のX、Y軸に対して+Z方向に約1mm程度の反りが確認された。試験片上部については、階段の第1段部分（肉厚5mm）はX軸に対して+Z方向への反りが確認されたが、第2、3段（肉厚10、20mm）は目視では反りは確認されなかった。

製品に反りが発生した原因として、肉厚が最も薄い第1段部分の反りが顕著であったことから以下の2点が挙げられる。

- (1) 模型を設置した際、最薄肉部である第1段が砂の圧力によって変形した。
- (2) 溶湯が凝固する際、肉厚差による収縮量の差異から生じた残留応力が時間の経過によって開放され変形した。

残留応力を除去するためには、歪み取り焼きなまし熱処理を行なう必要があるが、この熱処理条件は鑄造体の質量によって適性値が変化するため、鑄造と平行して熱処理条件に関する研究を進める必要がある。

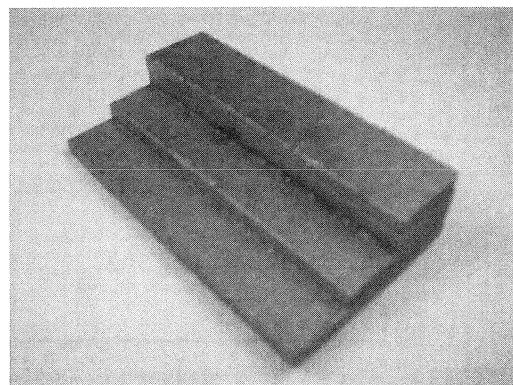


Fig. 5 消失模型鑄造による階段型試験片

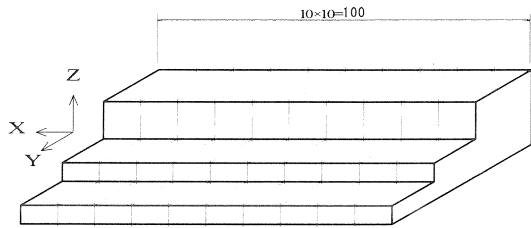


Fig. 6 階段型試験片模式図

3.2 階段型試験片内部観察

階段型試験片内部の状態を観察するため、試験片をFig. 6に示すように1cm間隔で切断した。主に上部表面付近のコーナー部にブローホールが確認され、第1段部分（肉厚5mm）に多く観察された。これらは模型蒸発時に発生したガスによるものと考えられるが、肉厚の薄い部分やコーナー部に多く発生したのは、鋳型内への溶湯の流入とガスの移動形態に関係していると推測される。方案にガス放出が容易となるような箇所、Fig. 6の+z方向へガスが抜け出るとなると押湯等を設けるとブローホールの発生が抑えられると考える。

試験片各段の結晶粒の状態を観察する為、エッチングを行った。エッチングの条件はTable. 3に示す。Fig. 7に示すように階段各段の肉厚中心部の金属組織を観察した。

Table. 3 エッチング条件

腐食薬	条件
エチルアルコール 100ml 硝酸 8ml	2秒間浸漬後、水洗、エチルアルコールで水を除去後、温風乾燥

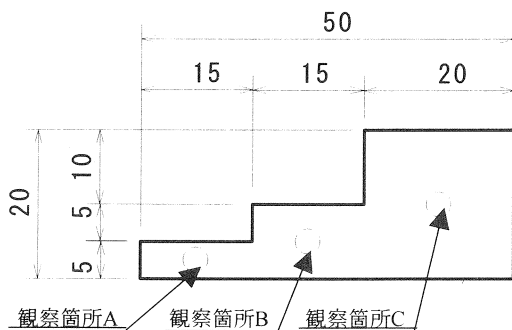


Fig. 7 金属組織観察場所

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10に各段の金属組織写真を示す。観察箇所C（肉厚20mm部分の中心部）においてデンドライトの2次アームの発達を確認された。肉厚差に対する結晶粒径を測定した結果をFig. 11に示す。測定に

ついては交線法⁵⁾により行なった。市販のAZ91合金の結晶粒径は冷却速度や純度、溶解方法により異なるが、およそ100 μ m以上である⁶⁾。しかし、高純度材を過熱処理法により溶解すると80 μ m程度になると報告されている⁶⁾。今回鋳造した製品の結晶粒径は45~65 μ m程度であり、従来材よりも低い数値となっている。その原因として1023Kまで溶湯を加熱した後に減圧処理を行ない、約873Kまで冷却された溶湯を再び1053Kまで加熱して鋳造する温度操作や、カルシウムが存在している点に起因していると考えられる。しかし、過熱処理は1123-1173Kにて一定時間保持した後、150K/分以上の冷却速度で鋳造温度まで冷却した後直ちに鋳造する方法であり、今回の方法とは異なっている。カルシウムは結晶粒界にAl₂Caとして偏析する⁷⁾ことが知られている、粒界に偏析する物質が増すことで結晶粒の成長が抑制されている可能性もあるが、冷却速度を変化させた際の粒界の状態を今後詳しく調べる必要がある。したがって、結晶粒径が細くなった理由については今後も継続して研究する予定である。

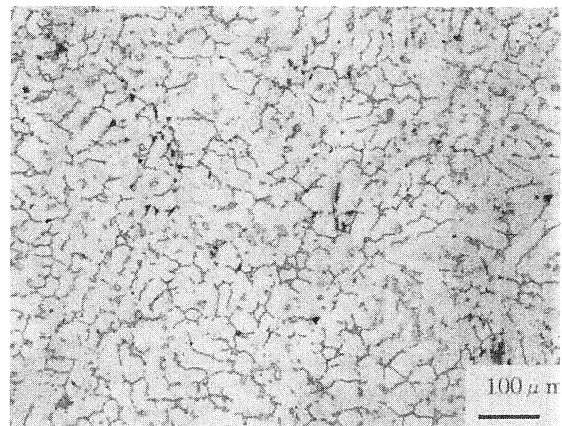


Fig. 8 金属組織 (観察箇所A)

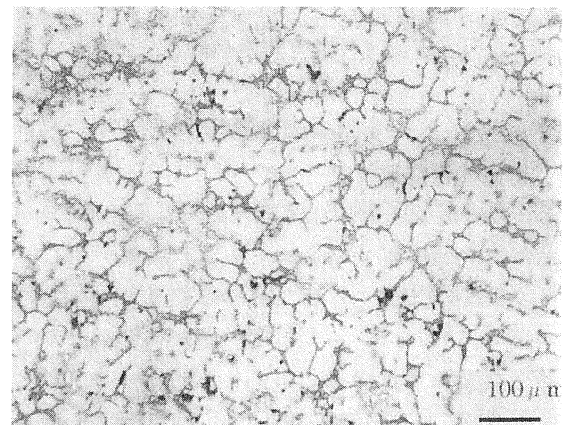


Fig. 9 金属組織 (観察箇所B)

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) 軽金属学会 鋳造・凝固部会:軽金属 Vol.38 No.1 1988, 54
- 6) 日本マグネシウム協会:マグネシウム技術便覧 16 5
- 7) 秋山茂:金属 Vol.70 2000 No.6

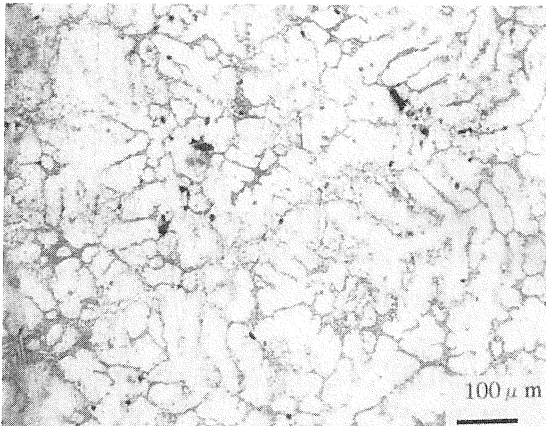


Fig. 10 金属組織(観察箇所C)

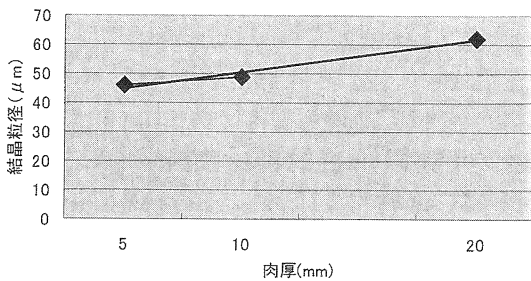


Fig. 11 肉厚差に対する結晶粒径

4. まとめ

階段型試験片を用いて難燃性Mg合金の消失模型鋳造実験を行った。

- (1) 方案と製品の体積比が1:4程度で溶湯温度が1053Kであるとき、スチロール模型が蒸発する際のガス圧に押し返されることなく難燃性Mg合金溶湯は型内に充填された。
- (2) 試験片に凝固収縮時の残留応力が開放されて発生したと考えられる反りが確認された。鋳造条件と同時に熱処理条件についても研究を行なう必要があると考える。
- (3) 試験片内部の上部表面付近に、スチロールがガス化した際塗型層を通り抜けずに発生したブローホールが確認された。
- (4) 結晶粒径の測定値は市販のAZ91合金鋳造材よりも細かい値が得られた。

スチロール模型の形状と鋳造後の変形、及び結晶粒径がこの合金の機械的強度に与える影響、冷却速度と結晶粒径の数値的な関係の調査が今後の課題である。

5. 謝辞

本研究の遂行にあたり、難燃性マグネシウム合金を