マグネシウム合金の射出成形

附 田 之 欣*・齊 藤 研*

1. はじめに

1872年にHyatt兄弟が縦型ラム式射出成形機でニトロセルロース可塑物を成形したことに始まるプラスチックの射出成形技術の歴史は長く、1958年のスクリュ可塑化方式の開発以来、ほぼ現在の成形機の原型ができあがった。今日では、ちまたにプラスチック製品が溢れ、もはやわれわれの生活にプラスチックはなくてはならない存在となっている。一方、最近よく耳にするマグネシウム合金は、実用金属中で唯一プラスチックに匹敵する密度（約1.8 mg/m³）を有するため、軽量構造材料として古くから注目されてきたにもかかわらず、民生品への実用化が遅れていた。この理由は、製造プロセスにおける溶湯の取り扱いが危険な上、得られた製品が腐りやすいという問題点を抱えていたからである。しかし、SF₆という保護ガスの適用と、耐食性におよぼす不純物元素の役割が明らかにされ、その低減技術が確立されて以来、今日ではマグネシウムも工業材料として認知されるようになってきた。

特に近年、IT革命の牽引となるモバイル機器の普及が急速な勢いで進行するのにもない、このマグネシウムが脚光を浴びるようになってきた。すなわち、薄肉でかつ高剛性、さらに高熱伝導性と電磁波シールド性という要求を満足するために、従来のプラスチックからの代替が着実に行われている。ノートPCを筆頭に、携帯電話やPDAなどの無線通信機器、デジタルカメラやハンディムービーなどのAV機器をはじめとするその他のモバイル製品に関しても、高速デジタル通信網や小型メモリー規格の整備に後押しされて、爆発的な勢いで普及してきている。また、テレビなどの大型家電製品でも、リサイクルの観点からやはりプラスチックに代わってマグネシウムが検討され始めており、一部実用化されているものもある。

また輸送機器分野においても、燃料電池を搭載した電気自動車や航空・宇宙構造物に軽量構造材料が求められている。特に地球環境保全という観点から自動車燃費の向上が以前にも増して要求されてきており、材料置換による車体の軽量化がメーカーにとって常に命題となっている。そこで、数ある軽量材料の中でもマグネシウム合金に大きな期

待がかけられ、比較的応力付加の小さい部品にいくつか適用されてきた。しかし近年では、PL問題に関連して衝突時のエネルギー吸収材料としての高靱性マグネシウム合金が注目されており、ステアリングホイール芯金などの車体系部品が実用化されて大きな伸びを見せている。

これら大量生産型マグネシウム製品は、主として高圧铸造プロセスであるダイカストと金属射出成形（チクソモールディング）により成形されている。ダイカストは1838年にBruceによって発明された活字铸造機がその原型となり、今日までに亜鉛、アルミニウムなどで長年の歴史がある。他方、チクソモールディングの歴史は浅いが、従来のプラスチックのモルダーを中心にかなり普及しており、作業者と環境に優しいプロセスとして最近特に注目されている。

そこで本稿では、まずマグネシウムに関して概説した後、このチクソモールディングのプロセスと成形体の特徴、さらにリサイクルシステムと新技術についてまとめる。

2. マグネシウムとは？

普段の生活の中で馴染みの薄いマグネシウムは、意外にも地殻構成物質の中では8番目に豊富な元素であり、海水中やマグネサイト鉱石、ドロマイト鉱石に含まれ、広く世界中に分布し、ほとんど無尽蔵と言われている。マグネシウムの精錬方法は、海水の電解法と鉱石の熱還元法に大別される。一時期まで日本国内においても精錬を行っていたが、現在ではアルミニウムと同様に、その全量を海外から輸入している。

プラスチックと比較した場合のマグネシウムのメリットとしては、高強度、高剛性、耐熱性、放熱性、電磁波シールド性、静電防止、リサイクル性、高級感などが挙げられる。一方、アルミニウムと比較すると、軽量、高靱性、高減衰能、（薄肉）精密成形性などがメリットとして挙げられる。

マグネシウムを単体で使用することは稀で、ほとんどの場合、各種の添加元素を加えた合金の形で加工・製品化される。マグネシウム合金は、一般の金属材料に用いられるほぼ全ての手段で加工可能であり、液相加工による铸造材と塑性加工による展伸材に大別される。铸造法には砂型や金型を用いた低圧铸造法や、ダイカストや金属射出成形法を用いた高圧铸造法があるが、特殊用途を除くと、マグネシウム合金製品のほとんどが高圧铸造法により製造されている。塑性加工法には押し出し、圧延、鍛造があるが、結晶

* Tsukeda, Tadayoshi / Saito, Ken
 (株)日本製鋼所 マグネシウム事業部 技術部 MG開発グループ
 広島市安芸区船越南1-6-1 (〒736-8602)
 2000.11.24 受理

構造（六方最密充填）に由来して室温でのすべり系が少ないため加工性に乏しく、主として熱間加工が用いられている。展伸材の機械的性質は casting 材に比べて優れているものの、加工用素材が高価な点が普及を妨げている。

3. チクソモールディングプロセスの概略とその特徴

チクソモールディング (Thixomolding™) とは、チクソトロピー (Thixotropy) とインジェクションモールディング (Injection molding) からできた造語であり、1977 年に米国のダウ・ケミカル社とバッチル研究所により開発された低融点 (900 K 程度) 合金の半溶融射出成形法を指し、現在商標登録されている。すなわち、ある程度の固相を含んだ金属スラリーでも、溶融プラスチックのように射出成形が可能ということを意味する。その際、固相粒子が通常の凝固相である樹枝状晶 (デンドライト) と異なり、比較的粒状に存在するため、スラリー全体の粘性が低く、結果として流動抵抗が完全液相なみに小さくなることが期待できる。また、このスラリーの粘性はせん断速度依存性を示すと同時に温度変化に対して可逆的であり、本プロセスはこの性質、すなわち「チクソトロピー性」に由来して名付けられた。

ダイカストなどの従来プロセスに比較して、特にマグネシウム合金のチクソモールディング法には以下の特徴がある。1) 原料の溶解がシリンダ内に限られるため、作業者は大気に触れると容易に燃焼する危険なマグネシウム溶湯を直接取り扱うことなく製品を得ることができる。2) 鑄造作業後に溶解炉に残り残されるドロスやスラッジなどの酸化物を発生しない。これらは、放置すると NH_3 ガスや Cl_2 ガスを発生する上、非常に硬いために産業廃棄物として処理する際に手間がかかり、問題となっている。3) 従来プロセスでは溶湯酸化防止ガスとして必須の SF_6 は、地球温暖化係数が CO_2 の数万倍以上も大きいことが報告されており、代替ガスとして SO_2 や BF_3 などが検討されているが、いずれも人体に有毒のものばかりである。これに対してチクソモールディングでは、使用するガスが Ar のみであることから、地球環境に優しいプロセスといえる。4) 一般のダイカストに比べて溶湯温度を約 100 K 低くできる結果、金型への焼き付きが少なく、かつ熱負荷が小さくなるため金型などの長寿命化が期待できる。5) 成形機本体以外に溶解炉を必要としないために、トータルとしての設備費が安くなる。

4. マグネシウム合金射出成形機の構造と運転動作

装置の概略図、および原料チップの外観図をそれぞれ図 1、図 2 に示す。チクソモールディング用のマグネシウム合金原料は、インゴットから数 mm 程度の大きさに切削

後、篩により分級したもので、自然発火などの心配がなく、危険物には相当しないことを確認済みである。この原料チップをローダによりホップ内に貯えた後、フィーダにより製品に応じた 1 ショット分をシリンダ内に供給する。その際、不活性ガスである Ar を一定量流すことで、原料中にわずかに含まれる微粉末による粉塵爆発を防止している。

シリンダ内に供給されたチップは、スクリュの回転により前方に搬送される。その際、輸送量を厳密に制御するため、スクリュはプラスチックの場合と異なり一定速度で強制的に後退する (サックバック計量)。チップはこの搬送工程で、シリンダ周囲に設置されたヒーターから急速な加熱を受けて軟化し、かさ密度が徐々に上昇するとともに部分的な溶融が進行する。次に、圧縮部において半溶融状態でせん断を受け、最終的に逆流防止装置を通過して前方に貯えられた後、ノズルを通して温度調節された金型内に高速射出される。製品は型内で冷却された後に、型開きと同時にエジェクタピンにより離型される。

この際、ノズル先端に前回の射出後、自然冷却して形成された凝固プラグが存在し、これがノズルからのスラリーの漏れ防止とともに大気混入防止の役割をはたす。またこのプラグは、次回射出時に金型内に設置されたプラグキャッチャーにより捕獲され、ダイカストのように凝固片として製品部に混入することがない (図 3)。

A社

B社

図 2 原料チップの外観

図 1 チクソモールディング装置の概略図

図 3 プラグの役割

チクソモールディング装置は、一般のプラスチック用成形機と比較すると加熱温度が高いため、特殊なヒータと構造材料が使用されている。特にシリンダ、スクリュ、逆流防止リング、ノズルなどは、高温強度やクリープ抵抗性のみならず、熔融マグネシウムに対する化学的な溶損や機械的な摩耗に関しても十分な耐久性を有することが必要とされる。さらにスラリーの凝固速度が速いため、プラスチックの場合と比較して十倍以上の射出速度を達成する高速射出機構が要求される。またプラスチックでは金型を冷却するのに対して、チクソモールディングでは金型を所定温度に加熱保持するため、高温仕様の金型温調装置と、焼き付き防止用の離型剤噴霧装置が用いられている。

5. 成形体の機械的性質と耐食性

チクソモールディングにより得られる成形体品質に関しては、溶湯温度が低いために引けや割れなどの凝固欠陥が少ない、寸法精度が高い、そりが小さいなどの長所がある。またシリンダ温度の設定の幅が広く、完全液相から数十%の固相を含むスラリーでも成形できるため、対象製品の形状や要求特性により、最適な固相率を選ぶことができる。さらにスクリュによる攪拌効果により、従来は高価でかつ複雑であった金属基複合材料製造プロセスへの応用が期待できる。

今日までに高圧鑄造用に開発・実用化されている既存マグネシウム合金の特徴を以下にまとめる。

汎用合金AZ91D(Mg-9mass%Al-0.6mass%Zn-0.3mass%Mn)はマグネシウム製品として最も使用実績が多いが、その理由は優れた鑄造性(流動性)とともに、高強度、高耐食性を兼ね備えている点にある。現在、家電分野において使用されている製品のほとんど全てがこのAZ91D製であり、自動車分野においても熱負荷の小さい部品に用いられている。

高延性合金AM60B、AM50A(Mg-6 or 5 mass%Al-0.3 mass%Mn)はAl含有量が低いためにAZ91Dに比べて固相線温度と融点が上昇し、鑄造性は若干低下するが、機械的性質に関しては高い破断伸びを示す。したがって、衝突時(高ひずみ速度)にぜい性的な破壊をせずに、塑性変形することが求められる保安部品に使用される。具体的には自動車のステアリングホイール芯金やロードホイールに始まり、現在ではシートフレームやインストルメントパネルなどの量産が行われている。今後はドアフレームなどへ適用されていくものと期待されている。

耐熱性合金AS41B(Mg-4mass%Al-1mass%Si-0.3mass%Mn)は、アルミニウムと比較したときのマグネシウムの欠点であるクリープ抵抗性の低さを改善するために開発された。実際に、ドイツにおいて耐熱部品として使用された実績を持つ。ただし、鑄造性はその他の合金に比べて劣っている。

これらの実用マグネシウム合金に関して、チクソモールディングにより試験片を作製し、機械的性質と耐食性に関する評価を行った。原料チップの組成分析結果とASTM規格を表1に、また室温における引張特性を表2にまとめる。いずれの合金についても、チクソモールディング材は従来プロセスであるダイカスト参考値に比べて優れた機械

的性質を有していることがわかる。またAM60BとAM50Aに関しては、実際にコールドチャンバー式ダイカストで作製した同一形状試験片を同じ引張試験機により評価したが、やはりチクソモールディング材の方が高い特性値を示していた。試験片のミクロ組織を調査した結果、チクソモールディング材では液相から晶出した等軸晶が微細であるのに対して、ダイカスト材では射出前にスリーブ内で凝固したと思われるデンドライトが多数観察された。したがって、この機械的性質の差は結晶粒のサイズに起因しているものと考えられる。

一方、100 hrの塩水噴霧試験によって得られた各合金の腐食速度を図4に示す。なお図中には、AZ91Dダイカスト材の実験値およびその他合金の文献値をあわせて示す。

表1 原料チップの組成分析結果 (mass%)

Material	Mg	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe
AZ91D	bal.	8.89	0.70	0.25	0.01	≤0.005	≤0.001	≤0.004
AZ91D*	bal.	8.5-9.5	0.45-0.9	0.17-0.4	≤0.05	≤0.025	≤0.001	≤0.004
AM60B	bal.	5.61	0.01	0.29	0.01	≤0.005	≤0.001	≤0.004
AM60B*	bal.	5.6-6.4	≤0.20	0.26-0.5	≤0.05	≤0.008	≤0.001	≤0.004
AM50A	bal.	5.19	0.01	0.38	0.01	≤0.005	≤0.001	≤0.004
AM50A*	bal.	4.5-5.3	≤0.20	0.28-0.5	≤0.05	≤0.008	≤0.001	≤0.004
AS41B	bal.	4.30	0.01	0.36	0.71	≤0.005	≤0.001	≤0.0035
AS41B*	bal.	3.7-4.8	≤0.10	0.35-0.6	0.60-1.4	≤0.015	≤0.001	≤0.0035

*For magnesium alloy ingots specified in ASTM B 93-94 a

表2 引張試験結果

Material	Process	Barrel temperature(K)	Injection velocity(m/s)	Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	EL. (%)
AZ91D	Injection molding	878	1.4	180	299	10
	(Die casting)*			160	240	3
AM60B	Injection molding	893	1.4	148	278	19
	(Die casting)*			130	225	8
AM50A	Injection molding	898	1.4	140	269	20
	(Die casting)*			112	232	13
AS41B	Injection molding	903	1.7	157	249	9
	(Die casting)*			140	215	6

*: the values for die casting are taken from the catalogue

図4 各種マグネシウム合金の腐食速度

この図から明らかなように、各合金ともチクソモールディング材の方がダイカスト材に比べて優れた耐食性を示すことがわかる。この理由は、初晶粒を取り囲むように晶出した耐食性に優れた共晶化合物の形態の違いに起因するものと考えられる。すなわち、結晶粒が等軸で微細なチクソモールディング材では、初晶粒の腐食に対してネットワーク状に発達した共晶化合物がバリアの役割を果たしているのに対して、ダイカスト材では粗大なデンドライト状結晶粒界の共晶化合物が不連続に晶出しているために、腐食が進行しやすくなっているものと思われる。

6. チクソモールディング用リサイクルシステム

マグネシウム合金はプラスチックに比較して、原理的にリサイクルしやすい材料である。プラスチックは材質が極めて多岐にわたるため分別回収が困難である上、燃焼させる際にもダイオキシンなどの有害ガスをともなうなどの問題点がある。一方、マグネシウム合金は比較的材質が限られているため回収のインフラが整備しやすいことや、溶解により容易に原料として再生できるなどの優位性を有している。特にチクソモールディングでは、使用原料形状が特殊であるため、ユニークなリサイクル方法も可能となる。

図5には、チクソモールディング工場で発生したスクラップのリサイクル方法を示す。まず再溶解法では、成形時に発生するスプルー、ランナー、オーバーフローあるいは不良成形体を回収後、再溶解・再精錬を行い、所定形状のインゴットに casting 直す。ここまでは、従来のダイカストと同様のリサイクル方法である。ダイカストでは、この再生インゴットをいったん炉に投入して完全に溶解させた後、高圧 casting を行う。これに対してチクソモールディングでは、バージンチップの場合と同様に切削・分級して原料チップを作製し射出成形を行う。もう一方の直接法では、再溶解工程を経ずに直接スクラップを粉砕し、その際生じた微粉末を分離・除去して原料チップを作製する。したがって、通常の再溶解法に比較してより省エネルギー型のリサイクル方法であり、かつコストも低く抑えられるとい

図5 金属射出成形法のリサイクル方法

う特徴を有する。

実際に、表3に示す各種の合金に着目して、色々なスクラップを用いてリサイクル材原料チップを作製し、引張試験片を成形して室温における機械的性質の評価を行った。試験結果の一例を図6に示すが、耐力、引張強さ、破断伸びのいずれの特性値とも、全ての供試材においてダイカストカタログ値を上まわっていた。また合金別に比較しても、バージン材とほぼ同等の特性を示すことが確認された。

さらに直接法に着目し、繰り返しリサイクルすることにより

表3 リサイクル材原料の製造方法

No.	材料	スクラップ	製法
1	AZ 91 D	—	バージン
2	AZ 91 D	ダイカスト	再溶解
3	AZ 91 D	金属射出成形	再溶解
4	AM 60 B	—	バージン
5	AM 60 B	金属射出成形	直接法
6	AM 60 B	ダイカスト	直接法
7	AM 60 B	金属射出成形	再溶解
8	AM 60 B	ダイカスト	再溶解
9	AM 50 A	—	バージン
10	AM 50 A	金属射出成形	直接法
11	AM 50 A	金属射出成形	混合

混合 = バージン : 直接法 (8 : 2)

図6 各種リサイクル方法と引張強さ

図7 リサイクル材の特性変化 (引張強さ)

よる AZ 91 D 成形体の機械的性質の変化について検討した。引張強さにおよぼすリサイクル回数の影響を図 7 に示すが、各特性とも繰り返しリサイクルした 7 回目においてさえも、バージン材と同等の値が得られた。さらに各特性の最低値ですら、ダイカストカタログ値を上まわることが判明した。またその標準偏差も小さく、安定した特性が得られているのが大きな特徴である。

7. 新 技 術

プラスチックの場合と同様にチクソモールディングにおいても、ホットランナーにより成形歩留まりの向上や流動距離の低減が期待できる。しかし、実用マグネシウム合金の融点が 870~890 K と高温であるため、マニホールドには耐熱性に優れた材料を用いる必要がある。今回、弊社の特殊耐熱合金と㈱十王殿の精密な温度制御を可能にする電磁誘導加熱の組み合わせにより、世界に先駆けて金属射出成形用ホットランナーシステムを開発した。

図 8 には、ホットランナー金型の構造を示す。また図 9 に示すように、実際のノート PC 筐体 (B5 サイズ) サンプルを成形したところ、大幅な材料歩留まりがはかれることが確認された。現在、数社に販売実績があり、今後も需要が伸びることが期待される。

その他、新規なマグネシウム合金や表面処理方法、および離型剤噴霧方法などについても開発を進めている。

図 8 チクソモールディング用ホットランナーの概略図

図 9 ホットランナーを使用した成形品例

6. おわりに

古くより軽量材料として期待されてきたマグネシウム合金が、ほぼ完成の域に達しているプラスチックの射出成形技術をベースとしたチクソモールディングにより、着実に普及している。ラインアップも 6 種類有り (型締力: 75, 150, 220, 450, 650, 850 ton)、現在までに 40 社を越えるメーカーに設置されており、通算台数も 180 台を上まわる実績を持つ。今後もプラスチックモルダーを中心に、その台数は増加することが期待される。

一方、マグネシウムという新しい材料をさらに普及させるためには、関係学協会と連携して、設計者に対しては各種特性データベースの整備、作業者に対しては金型設計を含めた casting 方案の標準化などを早急に行い、使用者への便を図っていくことが重要である。

新規にマグネシウム産業への参入を考えておられる方々に対して、本稿が少しでもお役に立てれば、浅学な筆者のこの上もない喜びである。

参 考 文 献

- 1) 附田之欣, 武谷健吾, 斉藤 研: 鋳物, **67**, 936 (1995)
- 2) 附田之欣, 斉藤 研: 軽金属, **47**, 298 (1997)
- 3) 附田之欣, 中津川勲, 斉藤 研: 工業材料, **46**(10), 109 (1998)
- 4) 山口 毅, 附田之欣, 斉藤 研: 機械技術, **47**(10), 59 (1998)
- 5) 附田之欣, 斉藤 研: 鋳造工学, **70**, 697 (1998)
- 6) 前原明弘, 山口 毅, 附田之欣, 斉藤 研: 経営工学実践研究論文集, No. 6, 107 (1999)