

高精度かつ複雑形状部品を造る MIM用コンパウンド

情報通信機器や医療用機器などの技術進歩に伴い、産業界では精密金属部品の需要が高まり、加工が難しい複雑な三次元形状部品を量産できる金属粉末射出成形（MIM）が、一層注目されている。MIMとセラミックス粉末射出成形（CIM）の世界市場は、2014年の20億米ドルから、今後2020年には31億米ドルまで伸張することが予想されている¹⁾。

MIMは小型部品の量産製造に適した方法であり、横穴や横溝などが組み込まれた部品を比較的短期間かつ軽度の後加工で完成品に仕上げることができる。例えば、スマートフォンなどのモバイルデバイスの充電用やデータ通信用のコネクタ、およびSIMカードトレイにおいて本方法が実用化されている。

成形用原料として、金属粉末とワックス・樹脂などのバインダーを均一に混練して得られるMIM用コンパウンドが使用される。射出成形機で成形後、バインダーを除去し焼結を経て、部品が製造される。

本稿ではMIMプロセスと当社のMIM用コンパウンドの特長について述べる。

1. 金属粉末射出成形（MIM）の利点

金属部品の代表的な製造方法としては、切削や研削などにより金属素材を加工して製造する機械加工、アルミニウム・亜鉛などの低融点の熔融金属を金型内に圧入して製造するダイカスト、熔融金属を鋳型に流し込んで製造するロストワックス（精密鋳造）、金属粉末を金型に入れて圧縮して固めた後に高温で焼結して製造する粉末プレスがある。この粉末プレスに代表される粉末冶金の技法とプラスチック射出成形技術を組合わせた画期的な金属部品の製造方法がMIMである。またそれぞれの製造方法の比較は図1のようになる。

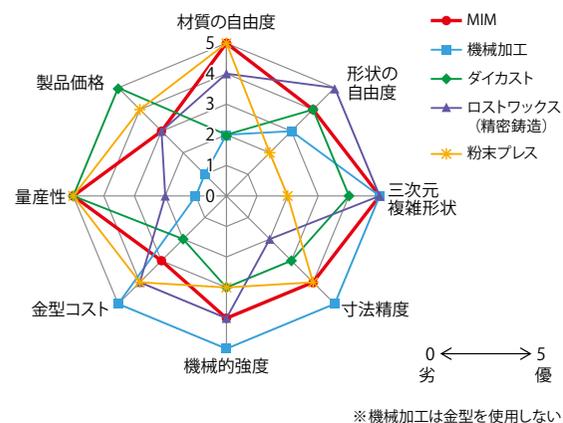


図1 金属部品製造方法の比較

MIMを使う利点は次のとおりである。

- ① 難加工性材料や複雑な三次元形状が可能である。
- ② 相対密度95%以上の高密度部品が得られるため機械的強度が高い。
- ③ 1辺50mm以下のもので±0.5%と寸法精度が高い。
- ④ 要求される部品形状に極めて近い形状が可能であるため、材料費および後加工費が節約できる。
- ⑤ 射出成形時のスプルー、ランナーを粉砕して再利用できるため、材料のロスを抑えることができる。

MIMは、部品サイズや重量に限界があり、一般的には成形体の厚み5mm以下、重量50g以下の部品に適用される。ただし、条件によっては厚み15mm以上や重量600g以上の大物部品や肉厚部品が可能である。

2. MIMプロセス

MIM用コンパウンドおよびMIM部品のプロセスを図2に示す。

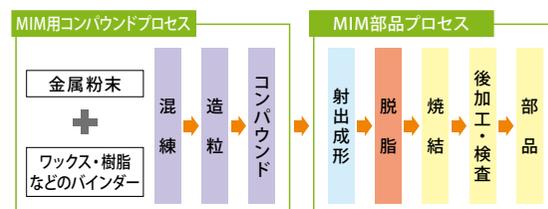


図2 MIMプロセス

2.1 混練・造粒

まず加圧ニーダーなどの混練機に一般的には粒径10μm程度の金属粉末と所定の割合のバインダーを投入する。バインダーの軟化点以上の温度まで加熱し、金属粉末がバインダーにコーティングされるよう混練する（図3）。その後、専用の造粒機で処理し、冷却することにより常温で取り扱えるペレット形状のMIM用コンパウンドが得られる。

MIM部品の製造会社はMIM用コンパウンドを自社で製造するか、もしくは当社のようなコンパウンド専門会社から調達する。



図3 MIM用コンパウンドの混練状態

2.2 射出成形

MIMは他の製造方法に比べてバインダーを一般的には40～60vol%（7～16wt%）と多量に添加することで、100～200℃程度にて流動を示すようになり、射出成形が可能となる。

バインダー量の不足時は流動性が得られなくなり、また過剰時は脱脂以降のプロセスに負荷がかかるため、充填可能な成形性を有する範囲内で必要最少限の量が求められる。

MIMの射出成形はプラスチック射出成形と基本的には同様で、射出成形機に原料（MIM用コンパウンド）を投入し、あらかじめ130～190℃程度に熱されたシリンダ内にて可塑性溶解させ、金型に高圧充填することで目的形状の成形体得られる。なお射出成形機のシリンダやスクリュは耐磨耗仕様が望ましい。また金型もMIMを考慮した設計が必要となる。

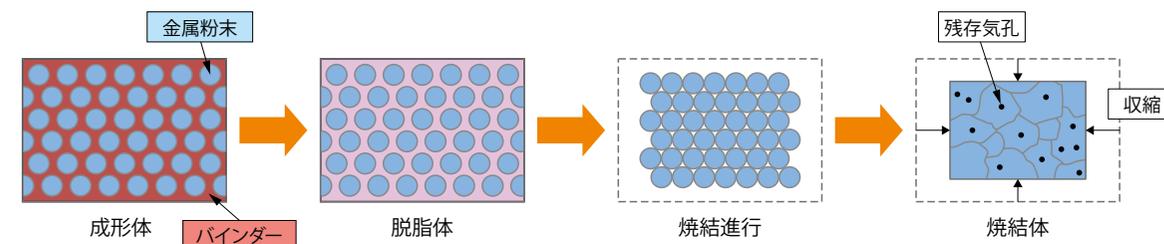


図4 脱脂・焼結の概念図

2.3 脱脂・焼結・後加工

次に脱バインダーとも呼ばれる脱脂にて成形体のバインダー成分を除去する。脱脂は焼結前に行われ、成形後に不要となったバインダーを成形体から除去することが目的である。次に焼結炉で処理することで焼結体が作製される。部品によってはこの後、硬度や特性を向上させる熱処理が施され、最終的に後加工を経て完成する。

脱脂体はポラス状態で成形体からの体積変化はほとんどないが、後に続く焼結にて金属粉末の焼結収縮による緻密化が進み、焼結体では体積は等方的に収縮する（図4、5、6）³⁾。

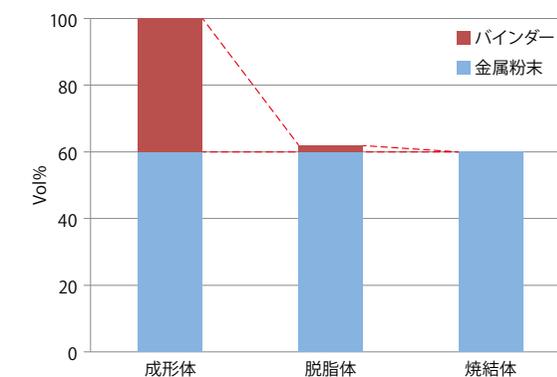


図5 バインダー量の推移例



図6 MIM用コンパウンド、成形体、焼結体例

2.4 MIMの脱脂方法

MIMの一般的な脱脂方法としては、加熱脱脂、溶剤脱脂および酸脱脂がある(表1)。

表1 各種脱脂方法

脱脂方法	必要設備	条件	特徴	バインダー例
加熱脱脂	加熱脱脂炉 排ガス燃焼装置 脱脂・焼結一貫 パッチ炉	常圧・減圧 不活性ガス (窒素、アルゴンなど) 水素、大気	溶剤不使用 汎用脱脂炉 脱脂時間が長い	樹脂+低分子系
溶剤脱脂	溶剤浸漬脱脂炉 (加熱脱脂設備)	有機溶剤による抽出	変形小 大物・肉厚部品可 溶剤危険性	樹脂系 ワックス系
酸脱脂	特殊酸脱脂炉 排ガス燃焼装置	触媒媒 (硝酸ガス)	短時間 変形小 大物・肉厚部品可 特殊設備必要	ポリアセタール系
その他	—	—	—	水系バインダー

加熱脱脂の場合、常圧または減圧で窒素やアルゴンなど不活性ガス雰囲気処理されることが多い。バインダーの種類にもよるが300~500℃でほぼ除去できる。大気雰囲気でも実施されている例もある。

加熱脱脂では炉内の昇温速度が急激な場合、部品にクラック(図7)やフクレ(図8)などの不具合が発生しやすい。通常は昇温速度を低めに設定されており、処理完了までに10時間以上を要する。また成形体の厚みや形状に応じて調整も必要である。



図7 内部クラック不良例
(写真は切断した焼結体)



図8 フクレ不良例 (写真は焼結体)

溶剤脱脂の場合、低温度領域でヘプタンやヘキサンなどの有機溶剤を用いてバインダーに含まれるワックスなどの可溶分を除去したあとに樹脂成分などを加熱分解する。通常の加熱脱脂と比較して高温領域での変形が防止できることから大物部品や肉厚部品への対応が可能となる。なお有機溶剤は可燃性であり、設備および取り扱いには安全上注意が必要である。

酸脱脂は硝酸ガスを触媒としてバインダーに使用されているポリアセタールを分解する方法である。ポリアセタールの融点より低い温度(100~140℃)で脱

脂が行われるため塑性変形が防止される。また、処理時間も短く済むといわれている。一方、ポリアセタールの分解により生じるホルムアルデヒドは人体に有害であり、また触媒に酸を取り扱うため、特殊な設備が必要である。

2.5 MIMの脱脂不具合例

MIMはバインダー処方や部品形状などによって脱脂に難易が生じる。脱脂の不具合として、部品の厚みや自重または熱膨張、収縮による変形や、バインダーの急激な熱分解による成形体内部での欠陥などがある。

一例としてバインダー処方の違いによる加熱脱脂時の脱脂変形を示す。当社の試験金型を用いた成形体で比較試験を実施した結果、同一の脱脂条件においても、変形しないものから、原型を留めないものまであり、明らかな有意差があった(図9)。またバインダー量が適正量よりも多い方が変形の程度が大きくなる。

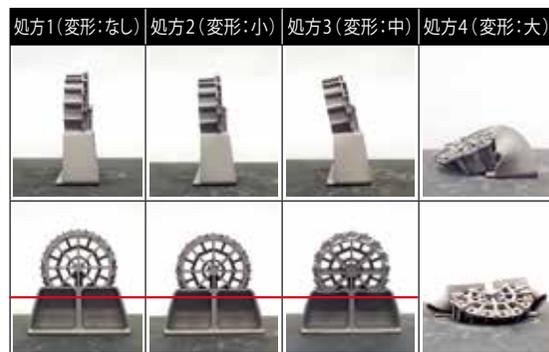


図9 バインダー処方の違いによる脱脂変形

クラック不良やフクレ不良もバインダー処方の組み合わせやバインダー量によって影響される。

脱脂条件が不適切な場合にも同様の不良は発生するため、セッター、成形体の置き方や脱脂炉の温度と時間を設定するヒートパターンおよび窒素、水素、大気などの炉内雰囲気の設定はとりわけ重要である。最適な脱脂条件は、使用するMIM用コンパウンド、部品形状、炉の種類に応じて異なり、それぞれにおいて調整する必要がある。

加熱脱脂の場合、脱脂条件で調整する不良対策や脱脂時間の短縮には限界があり、対策のひとつとして脱脂性に優れたMIM用コンパウンドが求められている。利点は次のとおりである。

- ① 脱脂時間の短縮による製造能力増大。
- ② 脱脂時の不具合解消による歩留まり向上。
- ③ 脱脂条件の範囲拡大による運用の柔軟性向上。
- ④ 大物部品や肉厚部品に適応が可能。

脱脂時の不良発生の抑制や形状維持のためにバインダー量の低減が効果的だが、MIMにおいては高い流動性や成形体強度が求められるため、バインダー量が必要となってくる。このように脱脂性と成形性は二律背反の関係にある。

3. 当社のMIM用コンパウンド

当社のMIM用コンパウンドは現在、おもに加熱脱脂に対応している。市場ニーズにより、溶剤脱脂や酸脱脂にも対応できる新たなコンパウンドの開発も行っている。

加熱脱脂に対応したMIM用コンパウンドの場合、溶剤、特殊ガスなどは不要なため、安全性、環境面でのメリットがある。特長としては、一般的なものに比べてバインダー量が少ないこと、また優れた成形性、成形バラツキの低減、優れた寸法精度、良好なりサイクル特性が挙げられる。当社従来品の脱脂性を向上させた改良品(Fシリーズ)や低収縮率に着眼した開発品(Kシリーズ)などラインアップしている(表2、3)。

表2 改良品(Fシリーズ)の脱脂性

コンパウンド	成形性	脱脂性*		総合評価
		肉薄	肉厚	
従来品	○	△	×	△
改良品(Fシリーズ)	○	○	○	○

*肉薄:厚み5mm以下 肉厚:厚み5mmを超える

表3 MIM用コンパウンドのラインアップ

項目	製品名	DM316L		DM630-	
		3001F (改良品)	3001K (開発品)	3101F (改良品)	3101K (開発品)
金属粉末	SUS316L	17-4PH (SUS630)			
バインダー量 ^{※1}	6.6wt% 36vol%	5.2wt% 31vol%	6.5wt% 35vol%	5.7wt% 33vol%	
射出温度	160-180℃	130-160℃	160-180℃	130-160℃	
収縮率 ^{※2}	約13%	約11%	約13%	約12%	
相対密度 ^{※3}	97%	98%	98%	98%	

- ※1 計算値
- ※2 収縮率=(成形体寸法-焼結体寸法)/成形体寸法×100
- ※3 アルゴン雰囲気
SUS316L:7.95g/cm³を100%とした場合
17-4PH(SUS630):7.70g/cm³を100%とした場合

3001Fや3101FのFシリーズは、バインダー組成を改良し、従来品の優れた成形性は保持したまま、加熱脱脂時の脱脂不良発生を抑制、さらに脱脂時間の短縮も可能とした。

3001Kや3101Kの開発品Kシリーズは、バインダー組成の改良と混練条件の最適化により、さらに少ないバインダー量にもかかわらず流動性の確保ができる低収縮率MIM用コンパウンドである。低収縮率MIM用コンパウンドに期待される機能は、焼収縮が小さいため寸法バラツキが低減し、寸法精度が向上する。脱脂時にフクレや変形が発生しにくく、歩留まり低下を抑制する。また脱脂時間の短縮や、大物部品や肉厚部品への適応などがある。

4. おわりに

MIM材料のおもな鋼種に関してISO規格が定められており、また日本粉末冶金工業会も同様に金属粉末射出成形材料の化学成分、機械的特性および物理的特性についての規格を発行している⁶⁾。これらの規格が浸透することでMIMの用途拡大など、ますますの発展が期待される。

今後は、さらなる脱脂時間の短縮や、大物部品や肉厚部品への適応をめざすとともに、微細部品にも対応できるMIM用コンパウンドの開発を進め、幅広いニーズに応えるラインアップの充実を図る。

【参考文献】

- 1) BCC Research,金属+セラミック射出成形の世界市場,株式会社グローバルインフォメーション(2016)
- 2) 渡辺悦尚,岩橋俊之,下平賢一,金属射出成形活用ハンドブック,株式会社ユーテス(1998)
- 3) 岩橋俊之,セラミックス,金属粉末の射出成形,精密工学会誌 Vol.66, No.10, 2000
- 4) 新家光雄監修,チタンの基礎+加工と最新応用技術,シーエムシー出版(2009)
- 5) Randall M. German,三浦秀士・高木研一共訳,粉末冶金の科学,内田老鶴園(1996)
- 6) 日本粉末冶金工業会 射出成形粉末冶金委員会 MIM規格化分科会,金属粉末射出成形材料-仕様 JPMA S 01:2014,日本粉末冶金工業会

【用語説明】

MIM: Metal Injection Molding
CIM: Ceramic Injection Molding



小西 勇介 こにし ゆうすけ
第一セラモ株式会社
開発部