



## 高精度かつ複雑形状部品の製造技術

小西 勇介 こにし ゆうすけ  
第一セラモ株式会社 開発部

近年の技術進歩に伴う携帯端末やパソコンなど電子機器の小型化、高機能化により、産業界では高精度かつ複雑な形状の部品需要が伸長している。この要求を満たす新しい製造方法として粉末射出成形(PIM)が注目されている。PIMは、セラミック粉末や金属粉末と樹脂バインダーの混合物を原料として、精密で複雑な小型製品を安価に製造するために適した方法である。

PIMの最大の特長としては、横穴や横溝などの複雑な三次元形状が容易に実現できること、および軽度の機械仕上げ加工で最終製品にできる、いわゆるニアネットシェイブ(near net shape)が実現できることである。これらの特長により寸法や形状修正に必要な研磨、切削などの仕上げ加工を大幅に削減でき、難加工性材料でも大量生産ができることから、コスト削減に大きな効果をもたらす。

PIMは大別してセラミックス粉末射出成形(CIM)と金属粉末射出成形(MIM)がある。本稿ではこれらの成形方法を説明し、共通して重要な要素であるコンパウンド技術について述べる。

### 1. セラミックス粉末射出成形(CIM)

セラミックス成形方法として金型プレス成形、ラバープレス、押出成形などに加え、セラミックス粉末射出成形(CIM)がある(表1)。

CIMの歴史は古く、実用を前提とした本格的な研究は

1930年代に米国の大手自動車会社で始まったといわれている<sup>1)</sup>。CIM製品においては、繊維機械の糸道に古くから使用され、日本でも実績がある。その他の用途としては光通信部品、耐磨耗部品、半導体、歯科材料などがある。近年需要が急拡大している用途の一つとして、光通信コネクタに使用されるジルコニア製のフェルールがある(写真1)。

フェルールは、光ファイバーの延長や分岐の際に必要な小型部品で、長さ10mm程度の円筒形で、かつその中央に微細な内径を有している。光通信網の高い伝達の維持には、高い寸法精度がフェルールに要求される。光通信網の拡大とともに、2010年では月間5,000万個以上を世界で製造されて、2011年は7,000万個以上になると推定している。また光通信網の累積加入者数は、全世界で1億世帯を超え、市場は今後も伸長すると考えられる。

CIM製品の製造工程は次に述べるMIMの製造工程とほぼ同じで、ペレット状のコンパウンドを造り(写真2)、射出成形工程へと進む。



写真1 フェルール(製品)



写真2 CIMコンパウンド

種類	成形方法	バインダー添加量(wt%)	特徴	用途
金型プレス成形	金型内に粉末・バインダ混合物を入れ、圧力をかけて圧縮する	1 ~ 5	・金型が比較的安価で寸法精度が良い ・長尺品(長さ/直径:大)には不向き ・大量生産が可能	タイル、耐火物、メカニカルシールなど
ラバープレス(※CIP)	ゴム型内に粉末を入れ、液体または気体によって圧力を等方的にかけ圧縮する	0 ~ 2	・密度が均一な成形体を得る事が可能 ・設備に高いコストがかかる	電気絶縁物、セッター、るつぼなど
押出成形	可塑性粉末をダイスの穴から押し出し、切断する	8 ~ 15	・断面が同じ製品に向いている ・大物から小物まで連続生産が可能	排水管、セラミックハニカムなど
テープ成形	粘性の高いスラリーをブレードの隙間から、フィルム上に均一な厚みに流し出し、乾燥後切断する	7 ~ 13	・薄板や薄膜製品の大量生産に適している	IC基盤など
鑄込み成形	水などを加えた粘性の低いスラリーを石膏内に流し込み、型面から吸水させ、濃縮固化させる	0.6 ~ 2	・特殊形状、少量生産に適している ・寸法精度が悪い	陶磁器、定盤など
射出成形	加熱可塑性したコンパウンドを金型内に射出し、金型内に冷却固化させる	14 ~ 25	・三次元複雑形状の成形が可能 ・比較的寸法精度が良い ・脱脂時間が長い	フェルール、糸道、半導体など

表1 セラミックスの成形方法と特徴、用途

\*CIP: Cold Isostatic Pressing (静水圧成形法)

またCIM技術の確立には、特に異物混入により、外観不良および強度低下などの致命的な不具合の解決が必要である。例えば、わずかな金属の混入でも、焼結体が発色し外観不良となる。原料となるコンパウンドは、高い品質と製造工程における、厳しい品質管理が必要である。

## 2.金属粉末射出成形（MIM）

金属のおもな成形方法としては、切削加工を行う機械加工法、溶湯を金型内へ注入して製造するダイキャスト法、鋳造法的一种であるロストワックス法、金属粉末と添加物と混合して、プレス成形後に焼結工程を行う圧粉焼結法がある（表2）。MIMの実用化は、1970年代にアメリカの元NASA研究員であったウィーチ博士が始めたとされている<sup>2)</sup>。日本においては1980年代初めに、このウイテックプロセスの技術と量産システムが紹介され、ギア、切削工具などの高強度・耐摩耗性部品や腕時計部品のバンド、ケースをはじめとしたさまざまな部品に利用されるようになった。従来の成形方法に対して、MIMを使う利点としては、次の通りである。

- ①難加工性材料や複雑な三次元形状の成形が可能。
  - ②相対密度95%以上の高密度製品が得られる。
  - ③1辺50mm以下のもので±0.5%と寸法精度が高い。
- 例えば、圧粉焼結法では、プレス成形をした際に粉

末間の摩擦力が原因で、圧力分布が不均一となる。結果、緻密性が悪く、密度が低くなることで製品の機械性能を低下させる。比べてMIMは、φ10μm程度の微粉末にバインダーを加えるので、成形時に圧力や密度の均一性が保たれ、高い機械性能を持つ製品を得ることができる。

最近の市場ではMIM製品は、携帯電話の回転2軸ヒンジや自動車、医療機器など、厳しい品質が要求される広範囲な産業用部品に用いられ、世界的に市場は成長を続けている。現在の年間5,000t規模から2020年には年間8,000t超の規模になると見込んでいる。

MIM製品の簡単な製造工程は次のようになる（図1）。

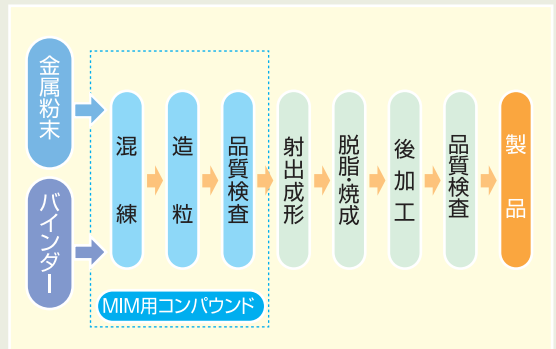


図1 MIM製品の製造工程

まず、金属粉末同士を結合させ、かつ熱可塑性を与えるバインダーを溶融混練し、ペレット状のコンパウンドを

種類	材質の自由度	形状の自由度	三次元複雑形状	寸法精度	機械的強度	金型コスト	量産性	製品価格
機械加工	△	△	◎	◎	◎	—	×	×
ダイキャスト	×	○	○	△	△	×	◎	◎
ロストワックス	○	◎	◎	△	○	○	×	△
圧粉成形	◎	×	×	○	△	○	◎	○
金属射出成形	◎	○	◎	○	△	△	◎	△

◎:優  
○:良  
△:可  
×:劣

表2 金属成形方法の特徴

造る(写真3)。次にコンパウンドを射出成形機で金型に高圧で注入して成形体を得る(射出成形工程)。



写真3  
MIMコンパウンド

この成形体に含まれるバインダー成分を加熱分解または溶媒抽出などで除去(脱脂工程)した後、炉で焼成し(焼成工程)、後加工を経て最終製品となる。

射出成形工程では、高温に加熱されたシリンダ内の熔融コンパウンドが、金型中へ高圧で注入される。金型に充填されたコンパウンドは、冷却固化され、最後に金型から成形体を取り出して1サイクルが終了する。通常このサイクルは、24時間繰り返し稼動することもでき、大量生産が可能となる。

クラック(ひび割れ)・空孔・ヒケなど、欠陥のない良好な成形体を得るためには、成形温度、金型温度、射出速度、射出圧力などの射出条件が重要であり、使用するコンパウンドや金型に応じて最適化する必要がある。また、同じ成形機、同じ材料で射出成形をしても、連続運転中に金型の温度上昇や環境温度・湿度の変化などのさまざまな要因から、成形体のバラツキが発生する。従って高い寸法精度を必要とする場合、良好な成形体を安定生産することは困難である。これらの理由から、バラツキを発生させる要因に対して許容できる範囲が広く、かつ多少の環境変化があっても良好な成形体ができるコンパウンドが求められている。

次に、脱脂(脱バインダー)工程について説明する。一般的な成形体からのバインダー除去方法は、溶媒抽出法と加熱脱脂法(常圧・減圧)がある。脱脂工程で成形体に発生する不良としては、変形やフクレ・クラックがある。原因としてはバインダーから発生するガス起因によるものや、温度変化による熱膨張・収縮によるもの、自重による変形などがある。加えて脱脂炉の温度と時間を設定するヒートパターンや窒素、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、使用するコンパウンドおよび製品形状に応じて異なり、MIMメーカー各社が設備を勘案し独自の条件を設定している。

焼成工程では、金属材料の酸化を避けるために雰囲気

炉や真空炉を使用する。脱脂工程と同様、焼成炉においてもヒートパターンと炉内雰囲気的最適化が重要である。これらの条件を合致して焼結した場合に限り、金属粒子同士の良好な融着・結合が得られ、目的の寸法に収縮し、なおかつ緻密な金属焼結体を得られる。以上の理由から、複雑な製品形状に適用でき、かつ短時間で不具合なく脱脂・焼成することがコンパウンドに求められている。

### 3.コンパウンドメーカーの役割

CIM・MIMはコンパウンド、射出成形工程、脱脂工程・焼成工程の各因子がお互いに影響をおよぼす関係、すなわち交互作用を持っており、一部の工程に不備があっても良好な製品は得られない。

コンパウンドとして、持つべき機能は次のとおりである。

- ①流動性、離型性、保形性など良好な成形性を確保。
- ②保管時および射出成形時に変質・分離しない。
- ③脱脂・焼成工程において変形やフクレ、クラックなどの不良が発生しない。
- ④異物・夾雑物の混入が少なくバインダーなどの有機物の配合比率が安定し、かつ均一に分散していること。

以上の点を考慮した上で、粉末種、金型、成形条件、脱脂条件など顧客要望を満たすバインダー処方を選定することにより、最適なCIM・MIM用コンパウンドの供給が可能となる。

当社では主にジルコニア、アルミナ、SUS316L、SUS630などのPIM用粉末を原料として取り扱っている。他に使用可能な粉末としては、チタン酸塩、窒化ケイ素、タングステンなどがある(表3)。また、これらに使用するバインダーの種類としては、スチレン系ポリマー、アクリル系ポリマー、酢酸ビニルなどの結合剤、パラフィンワックスなどのワックス類、ステアリン酸など滑材や可塑剤などがある(表4)。

処方による解決例として、CIMによるフェールールのクラック対策をあげる。従来コンパウンドでは、クラック

分類	使用粉末
セラミックス	アルミナ、ジルコニア チタン酸塩、チタン酸ジルコン酸鉛 窒化ケイ素、炭化ケイ素 窒化アルミ、フェライトなど
金属	SUS系、鉄、ハイス コバルト、パーメンジュール、 スーパーインパー タングステン、超硬、モリブデン 銀、銅など

表3 PIMに使用可能な粉末

分類	主な材料	機能
結合剤	エチレン酢酸ビニル	成形体の強度保持 成形体の確保 離型性の改善
	ポリスチレン	
	アクリル樹脂	
	ポリプロピレン	
ワックス類	パラフィンワックス	流動性の付与 脱脂性の改善
	マイクロクリスタリンワックス	
	カルナバワックス	
滑剤	ステアリン酸	流動性の付与 離型性の改善
	ステアリン酸アミン	
可塑剤	DOP	可塑性の付与
	DBP	

表4 バインダーの機能

による歩留まり低下が発生し、改善要望を受けた。当社で原因を調査したところ、脱脂工程の昇温時にクラックが発生していることが判明した。脱脂時のクラック発生原因は、昇温時の外径部と内径部の温度差による熱応力によって、内径部に応力集中が発生していることが原因であると考えた。その対策として、①昇温速度を緩やかにすること、②添加する結合剤の配合比、種類を変更し、成形体の強度向上を図った。

次に、自社のフェール金型を用いて成形体を作成し、脱脂・焼成評価を行い、クラックが発生する温度域、助長する成分や抑える成分、組み合わせについて調査した。これらのデータを基に処方をも最適化し、短期間でクラック不良を抑制した。

次に混練条件の改良によるMIMの成形性の解決例を紹介する。射出成形時、不完全な金型充填状態でコンパウンドが冷却固化され、シワ不良となる問題が発生した。そこで、熱流動性を向上し、金型への充填性をあげるコンパウンドの開発をめざした。ここでは、脱脂・焼成工程で悪影響が出るため、バインダーの種類、添加量の変更はできなかった。そのためコンパウンド製造時において、金属粉末とバインダーの混練条件を工夫し、流動性の改善を図った。正常な混練下では、機械的せん断作用に伴い、混練材料の均質性が増す。そして、材料温度や分子量が時間的に変化し、粘度が変化する。今回、従来の混練条件に対して、温度、加熱時間を最適化した混練条件を確立し、大幅なコンパウンドの流動性向上を達成した。それぞれの混練条件に対して、定温下でフローレート(ml/sec)を測定し、熱流動評価を行った結果を図に示す(図2)。

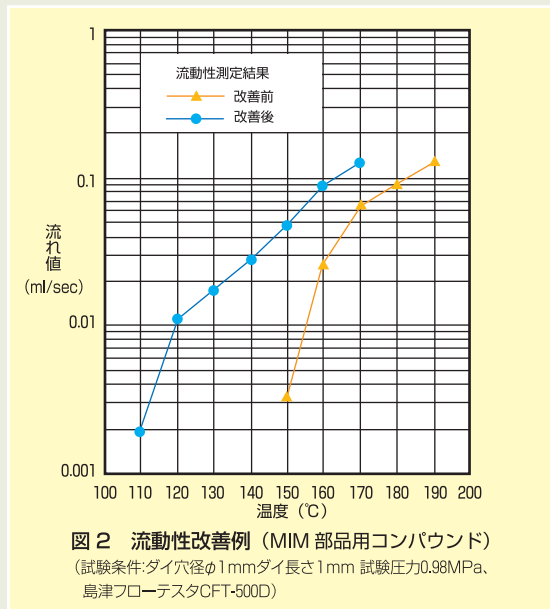
従来法では150℃で0.003(ml/sec)であるのに対し、新方法では0.047(ml/sec)と飛躍的に流動性が向上した。その結果、金型へ密に充填でき、表面シワのない光沢がある成形体を得られた。

当社は、CIM・MIM用コンパウンド製造にはバッチ式の加圧ニーダーを採用し、20Lまたは35Lといった量産か

ら0.5L~3.0Lの試作用の少量生産まで幅広く対応する生産設備を保有している。また、原料粉末ごとに生産ラインを分け、ブースで囲み、異物除去装置を設置することで、より異物混入の低減を実現している。

当社コンパウンドの特長は次の3点となる。

- ①優れた成形性(熔融粘度が低く、熱安定性が良い)
- ②安定した品質(高品質原料の使用と工程改善により徹底的に抑えた異物・夾雑物)
- ③少ないバラツキ(歩留まりの向上、優れた寸法精度の実現)



#### 4.さいごに

当社は、1988年に第一工業製薬からセラミックス研究グループが独立し、(有)第一セラモとしてスタートしました。おもにCIM・MIM用コンパウンドの開発、製造、および販売をしており、現在は海外へも販売展開しています。射出成形評価を実施し、お客様との密な連携により、最適なコンパウンドを提供しています。今後も、蓄積した知見をもとに技術革新を進め、お客様および産業界の発展に貢献していく所存です。

高精度かつ三次元複雑形状を持つ小型部品の量産など、CIM・MIM技術についてお問い合わせください。またCIM・MIM用コンパウンド以外の粉末と樹脂の混練に関することも承っております。

参考文献：  
 1) 斉藤勝義, 荒木田豊, 井上誠, ファインセラミックスの射出成形技術, 日刊工業新聞社 (1987)  
 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, 株式会社コーテス  
 3) 第12回MIM/CIM射出成形システムと応用開発, プラスチック工業技術研究会  
 4) ノー瀬昇, 図解ファインセラミックス読本, 株式会社オーム (1983)

用語説明:  
 PIM: Powder Injection Molding  
 MIM: Metal Injection Molding  
 CIM: Ceramics Injection Molding