

連携記事

進化するMIMプロセス

Development of Metal Injection Molding Process

九州大学 大学院工学研究院
機械工学部門 教授

三浦秀士
Hideshi Miura

九州大学 大学院工学研究院
機械工学部門 助教

長田稔子
Toshiko Osada

1 はじめに

金属粉末射出成形 (metal injection molding, MIM) プロセスは、従来の金型内で圧粉した金属粉末成形体を焼結して高精度な部品を製造する粉末冶金法 (powder metallurgy, P/M) と溶融した樹脂を金型内に射出することにより複雑形状部品を製造するプラスチック射出成形技術を組み合わせた金属部品製造技術である。ダイキャストやチクソモールディングのような、溶融金属を金型内に圧入する成形法とは異なり、MIMは金属粉末をバインダ樹脂の可塑性・流動により金型内に充填する方法で形状を付与する。その後、脱脂、焼結を経て、ネットシェイプで金属製品を得る。そのため、MIMはプラスチック射出成形法および粉末冶金法の二つの製造法に共通した特徴を持ち、またそれぞれの利点および欠点を互いに補填した特徴を有している。すなわち、MIM製品は射出成形されたプラスチックと同等の複雑形状と精度、生産性を有しており、さらに95%以上の密度を得られることから、P/Mでは達成できない性能レベルも併せ持つ。

MIMは、一般産業機械部品に加え、通信機器部品、さらに自動車部品や医療機器部品など多様な部品製造分野において非常に注目されている。欧米では自動車関連部品へのMIMの登用が多く、日本を含むアジアでは携帯電話部品等に代表される小型精密機器部品への展開が多い。特に日本では、精密金型が短納期で製造可能であり、高品質なMIM用金属微粉末も製造されていることから、MIM製造技術の国際競争力は高い。しかしアジア諸国では低い人件費と大量生産方式により、MIMの製造コストを大幅に低減できるため、中国のiphone用コネクタの大量受注例が示すように、電気・通信機器や自動車部品などの製造も海外移転や新規参入が増加しており、MIMに関してもグローバル化や低コスト化が進行している。

そのような動きの中で、MIMの付加価値を高めるため、

チタン系合金へのMIMプロセスの適用や、超小型化 (μ -MIM)、さらには大型化といった検討も進められており、これらの新しい技術についてMIMの基本工程とともに以下に紹介する。

2 金属粉末射出成形法

2.1 MIMの歴史

粉末を用いた射出成形 (Powder Injection Molding, PIM) に関しては、既に1920年代にセラミックス粉末を用いて試みられており、セラミック射出成形法 (Ceramic Injection Molding, CIM) として確立されてきた。その後、1970年代末にアメリカで金属粉末を用いた射出成形 (Metal Injection Molding, MIM) が開発され、1980年代後半に日本に導入された^{1,2)}。P/M製造企業をはじめ、電機、自動車製造企業関連でも研究開発が盛んに行われたが、市場はさほど伸びず、1990年代後半から通信や医療などの分野でMIM製品の使用が増加し始め、これまで景気の流れに影響されてはいるが年々増加の傾向にある。

2.2 MIMの工程

MIMの工程は、図1に示すように、大きく4工程に分けることができる。混練工程 (Mixing)、射出成形工程 (Injection Molding)、脱脂工程 (Debinding)、焼結工程 (Sintering) である。

混練工程では、金属粉末と熱可塑性樹脂、ワックス、可塑剤、結合材からなる多成分系のバインダを、均一に混合・混練したのち、造粒によりペレット状のMIMの原料 (Feedstock) を作製する。MIMに使用される金属粉末は、粉末冶金の主流である金型プレス成形用の粉末よりも微粉で平均粒径10 μ m程度であり、主に水アトマイズ法もしくはガスアトマイズ法によって製造される³⁾。MIMにおいては原料が

流動する必要があるため、球状粉末の方が流動しやすく、使用するバインダの量も少なくなり、成形性に優れる。また、微細球状粉末の方が焼結性にも優れることから高密度な焼結体が得られる。焼結体の表面粗度は粉末粒径の影響を受けやすく、粉末粒径を小さくすると表面精度は上がる。一方、粉末粒径が小さくなると比表面積が増加し、粉末同士の摩擦も大きくなるため、流動性は低下する。焼結密度を上げるためには、粉末の充填度合いを示すタップ密度が高いものがよく、粒径にある程度の分布があるものが適しているとされている。

バインダは粉末間の間隙を埋めて成形時の流動性を向上させ、さらに成形体の形状を保持するために付加される。そのため、粉末との濡れ性が高く、さらに、繰り返し使用による劣化に強くなければならない。ワックス、ポリマー、オイル、潤滑剤、表面活性剤などからなる熱可塑性の混合物が一般に用いられる。粉末量が多いと粘度が上がり、粉末間の間隙を埋めることができない。逆に粉末量が少なすぎると脱脂時に形状保持が困難になる。よって、粉末とバインダの比率が重要となる。混練が不均質であると、クラックや変形などが発生し、十分な強度や高い寸法精度が得られないなどの問題が生じ、混練状態の把握は重要である⁴⁾。混練後、成形機への移動を容易にするため、造粒工程によりペレットに加工される。

射出成形工程では、プラスチックの射出成形で一般に使用されるインラインスクリー式射出成形機が用いられる。加熱によりバインダを可塑化させ、粘度が下がり流動が可能となった原料をスクリーによって金型に射出し、成形体 (Green compact) を得る。成形体はこの後の脱脂工程によりバインダが分解されるため、金型は収縮を考慮して作製される。また、原料をほぼ100%使うことができる。

成形体のバインダは溶媒もしくは加熱による脱脂工程で除去され、脱脂体 (Brown compact) が得られる。しかし、溶媒抽出で用いられるアセトンなどの有機溶媒は人体に影響を及ぼし、廃棄処理の問題があり、加熱分解では脱脂に長時間を

要したり、製品形状の変形が生じやすいなどの問題がある。この他、超臨界ガス、光分解法などにより脱脂を行う方法や、水により脱脂が可能な水溶性バインダなども開発されている^{5,6)}。なお、ここで完全に脱脂を行うと焼結時までの形状保持が難しくなるため、完全な脱脂は行わず、残った成分は次の焼結工程において除去される。

焼結工程においては高温に加熱することで金属粉末粒子同士が冶金的に結合し、焼結体 (Silver compact) となる。加熱により粒子を結合して緻密化する目的に加え、化学的にも均質化を図るものである。焼結の際には、バインダの除去分および緻密化の効果で、10～20%程度の収縮が起こる。ここでは、焼結収縮による寸法偏差や残炭、酸化など最終製品の品質に悪影響を及ぼさないよう配慮する必要がある。

以上の一連の工程において最終製品の形状をネットシェイプで作製することが可能であるが、必要に応じてHIP (Hot Isostatic Pressing、熱間等方圧加圧法) などによりさらに緻密化が行われたり、機械加工やメッキ、研磨、析出硬化、溶体化処理、窒化などの熱処理など、溶製材同様の後加工が加えられることもある。

2.3 MIMの特徴

MIMは複雑な三次元形状を有する精密部品のニアネットシェイプによる量産化や、加工が困難な材質およびテーパーメイド合金による少量生産に対して幅広い分野で大きな期待がある。

従来のP/M、すなわち金型プレスによる粉末圧縮成形では、高い圧力を負荷できるが形状は単純になる。また圧力の伝達が均一でないため密度勾配が生じ、焼結時のひずみが一定でなく、収縮にも差が生じ、形状のばらつきの原因ともなっている。このように、P/Mでは対象部品の形状に技術的な制約を伴うだけでなく、焼結材料中に宿命的に残存する気孔が内部切欠きとなり、溶製材と比べると物理的・化学的性質や機械的性質に劣ることが避けられない。一方MIMでは、

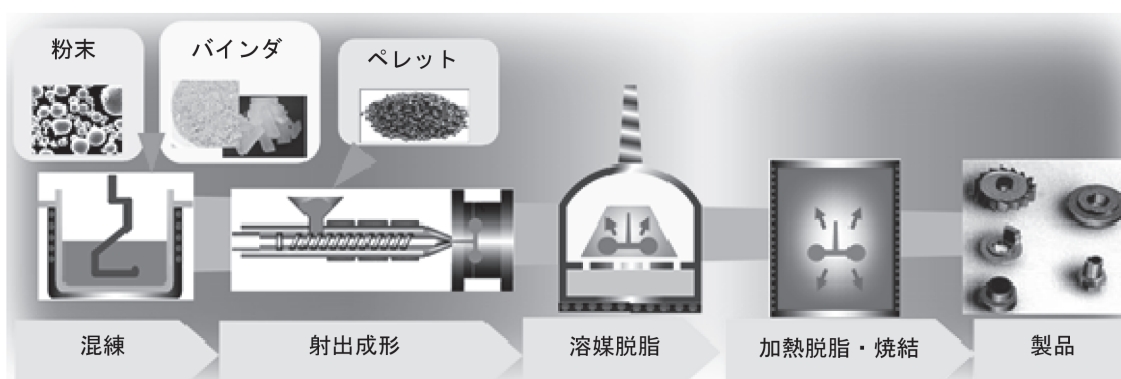


図1 MIMの工程

これらの問題点を克服し、高い形状自由度と高密度化を比較的容易に両立させることが可能である。

また、その他の機械加工やロストワックスなどの金属加工法と比較すると、量産性に極めて優れており、形状の自由度は機械加工より高く、ロストワックスと比べてコストも抑えられるため、様々な側面で優れた加工法と言える。

さらに、P/Mでは成形が難しい硬質金属材料、あるいはこれまでの成形技術では困難であった熱膨張合金や軟質磁性材料などの難加工性機能材料にも適用できるため、用途に応じた材料の選択自由度が大きいことも特徴である。したがって、対象材質としてもステンレス鋼、磁性材料、Fe-Ni合金、低合金鋼、W系重合金、工具鋼などがすでに量産の主流となっており、その他に、SiやCo合金、高速度鋼、Ti合金、Ni基やCo基の超合金、超硬合金、サーメット、繊維強化型合金などの広範囲な種類のものも検討されている。

種々の材質に適用可能なことから、MIMの用途は各種機械部品、通信機器部品（パッケージ、コネクタ等）、自動車部品（ターボチャージャー、ロッカーアーム、センサー、鍵等）、医療用部品（内視鏡、歯列矯正等）、情報機器部品（プリンタ、パソコン、コピー機用等）等様々な種類があり、今後の需要増が期待されている。

しかしながら、MIMでは比較的高価な微粉末を使用することから、大型品は使用粉末量が多くなりコストが上がることや、脱脂焼結時の収縮が大きくなり、変形や損傷が起こる可能性が高いことからMIMでは困難とされている。そのため、MIMは主に中型から小型の製品に適用されることが多いが、形状が簡単で小さい場合は、機械加工やプレス、鋳造でも成形が可能で経済的であるため、MIMの特徴をより生かすためには、より小型で複雑形状の精密部品をできるだけネットシェイプで作製することにある。

近年の日本のMIMに関しては、原料や金型などのコストダウンに対する取り組み、工程内および工程間の自動化、焼結密度および寸法精度の向上などに主力が注がれているほか、粉末冶金工業会におけるMIMの規格化を始めとして、アメリカ、ヨーロッパ諸国とも協力し、ISO規格への登用も図っているのが現状である。MIMプロセスは比較的新しい技術であり、バインダの選択や製品の寸法精度、製品の大型化や超小型化など技術的に解決しなければならない問題点も多く残されており、種々の検討が行われている。

3 最近のトピックス

3.1 チタン系材料と疲労特性の検討

Ti合金は化学プラントや航空機部材など様々な用途に用いられる金属であり、通常は切削などの方法を用いて製品に

加工される。しかしTi合金は難加工材に分類され、被削性や鋳造性に劣るという性質も持ち合わせているために、製造コストがかかり量産しづらいという欠点もある。そこで、そのコスト低減に向けてMIMの適用も考えられている。ただ、チタンは活性が高く、酸素、窒素、炭素などと容易に反応し、化合物を生成する。そのため、チタン粉末の焼結は難しく、高い真空度での焼結が必要である。

TiおよびTi合金粉末は国内でガスアトマイズによる低酸素量の粉末が供給されている。そこで、生体材料や航空機部品の登用を狙い、純Ti、およびTi-6Al-4V (Ti64) のMIMを検討し、さらにはVを生体適合性に優れるNbに置換したTi-6Al-7Nbについても検討を行った。また、結晶粒の微細化を図り、機械的特性の向上が期待できるCr粉末をTi-6Al-4Vの粉末に添加した、Ti-6Al-4V-4Cr (Ti644) についても検討を行った⁷⁾。

MIMによるTi合金では、95%以上の高密度が得られており、静的引張特性については溶製材と同等であった。図2に回転曲げ疲労試験より得られたS-N線図を示す。材料名とともに記しているのは焼結温度(°C)と時間(hr)である。疲労強度は引張強度の約三分の一であった。残存した空孔が切欠きとなり、とくに硬度や引張強度の高い材料では切欠き感受性が高くなることから、疲労強度の低下の原因になったと考えられる。しかしCrを添加したTi-6Al-4V-4Crでは結晶粒の微細化により、Ti-6Al-4Vより疲労強度の向上が得られた。また焼結材にHIP処理を行うことにより、疲労強度の改善も見られた。この他、適切な熱処理を施すことで、高い疲労強度を得られることもわかった。

以上のように、日本では、国産の低酸素量のガスアトマイズ微粉末を入手可能であることから、MIMが普及し始めた

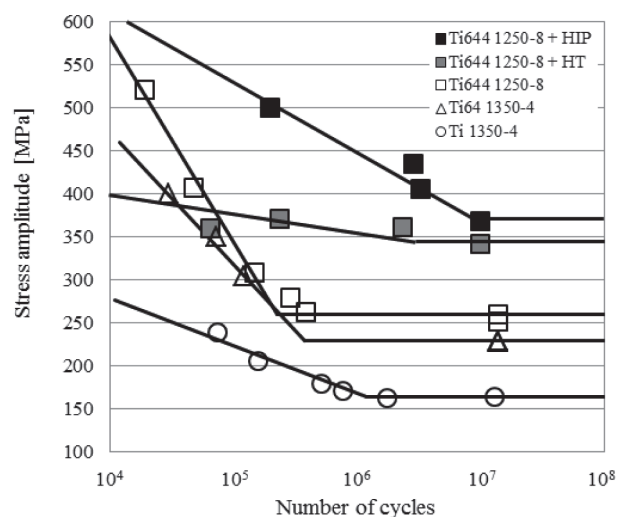


図2 疲労線図

当時から研究や製品化が行われてきているが、昨今欧米でもチタン系合金への注目が高まり、2012年度のヨーロッパ粉末冶金会議 (EuroPM2012) ではTi合金のMIMについてのセッションも取り上げられ、歯科用インプラントなど、生体材料に向けた開発が報告されている。

3.2 小型化 (μ -MIM)

MIMは小型の複雑形状部品の作製に適している。また近年、微粉末の開発も進んでいることから、マイクロシステム技術 (Micro System Technology, MST) やマイクロマシン技術 (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS) などの超精密加工技術を応用し、超微細構造金型を用いてマイクロサイズの構造体を有する金属製品を量産化する、マイクロ金属粉末射出成形 (Micro Metal Injection Molding, μ -MIM) なるものも開発されている。

超微細構造金型を用いた μ -MIM製造では、1) 原料の製造工程における混練の不均質性や不均一性の影響、2) 射出成形工程における微細構造孔への原料の未充填や離型の問題、3) 脱脂工程における溶融バインダの流動によるマイクロ構造体の変形や損傷、4) 焼結時の収縮によるマイクロ構造体の変形や破損など、克服すべき課題も多い。そのため、 μ -MIMに特化した原材料の選定および金型設計や射出条件、脱脂・焼結条件の最適化に加え、 μ -MIM部品の評価を微視的スケールで実施することが必要である。

そこで、図3に示すようなマイクロダンベル型引張試験片をMIMにより作製し、 μ -MIMのプロセス諸因子並びにマイクロ構造体の力学的特性評価法の有用性について調査検討し

た⁸⁾。金属粉末の粒径や配合割合、焼結条件などを変化させてマイクロダンベル型引張試験片を作製し、密度、組織観察、および引張試験を行ったところ、粒径および金属粉末配合割合の違いが、製品の成形性や歩留まり率に影響を及ぼすことから、成形条件を最適化することにより良好な試験片を作製することができた。

μ -MIMはヨーロッパでマイクロ構造体の作製や金属-セラミックスの二色成形などが報告され⁹⁾注目されていたが、近年、アジアやアメリカでも報告が増えてきている。製品の充填性や離形性およびハンドリング性を改善するため、樹脂材料を型に用いてMIM原料を射出し、脱脂工程で樹脂型を除去する、犠牲樹脂型インサートMIMといった技術も報告されており¹⁰⁾、 μ -MIMはマイクロシステム技術の補間技術として認知されつつある。

3.3 大型化

MIM製品は小型部品の製造には適しているが、MIMの普及のためには、MIM製品の大型化が必須である。しかしながら、脱脂・焼結時には大きな収縮が伴うため、製品サイズの増大に従って収縮量も増加し、焼結体のたわみや変形などの問題が生じやすい。また、肉厚部で内部のバインダが十分脱脂されない場合には、結果として大きな空孔が残存して焼結後にクラック発生の要因になるといった問題もある。そのため大型・複雑形状部品へのMIMの応用に関しては、未だ対応されていないのが現状である。

そこで、MIM製品の航空機への適用を目標に、まず基礎研究として、Ti-6Al-4V合金粉末を用いて、外径および厚さの異なる円盤試験片を用いた実験を行い、溶媒脱脂体の脱脂率が焼結体寸法精度に及ぼす影響や、加熱脱脂時の昇温速度が変形に及ぼす影響などについて検討し¹¹⁾、最大で直径65mm、厚さ8.6mm、重さ80gのサンプルに対しても一般的なMIM製品の寸法公差 $\pm 0.3\%$ に収めることが可能であり、複雑形状大型部品へのMIMの適用を示唆するものであった。

ついで、種々のチタン系合金粉末を用い、航空機部品に使用される複雑形状部品をMIMプロセスによって試作した¹²⁾。本工程で作製した部品を図4に示す。これは航空機のエンジン周辺に使われている部品である。MIM製品の一般的なサイズは2～50mmであり、チタン系では30g程度であるが、対象部品はTi-6Al-4V合金で55gとなり、大型に分類されるサイズである。また、シリンダやフランジなどが付いた、MIMでも作製困難とされる複雑形状にあえて挑戦した。試験片の変形をできるだけ抑えるため、MIMプロセスにおける以下のパラメータに着目した。1) 粉末の粒度分布、2) バインダの成分比、3) 粉末/バインダ配合比、4) 脱脂時の設置方法、5) 脱脂時の昇温速度、6) 焼結時の設置方法である。

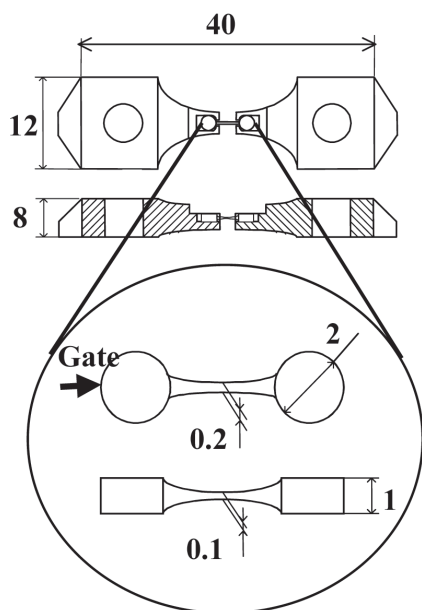


図3 マイクロダンベル試験片

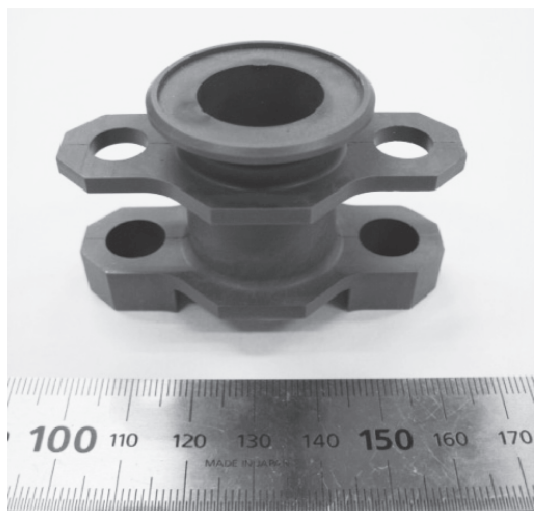


図4 航空機部品の作製例

試験片の変形を評価するため、試験片形状は三次元測定機を用いて評価した。試験片の成形体や脱脂体は非常に脆く崩れやすいため、測定は非接触で行う必要があることから、レーザプローブを用いた三次元形状の非接触測定を行った。その結果、最も変形の少ない最適化条件で作製した場合、最終的に焼結体の変形量は設計寸法に対しておおよそ0.2mm以下であり、試験片サイズに対しては小さく、ISOの規格範囲内に収めることができ、さらなる大型化も可能であることが示唆された。

4 おわりに

MIMは複雑三次元形状の部品を精度よく量産するのに適した製造技術である。適切なバインダの選択や寸法精度の向上、製品の大型化、小型化、各種特殊金属粉末への適用も可能であることから、今後もMIM技術の発達が期待される。

なお、複雑三次元形状部品の製造法として、最近、3Dプリンタが流行しているが、金属粉末を用いてのレーザ照射による粉末積層造形法に関しても2000年初期から手掛けており、MIM等では不可能な複雑内部構造品も製造可能である¹³⁻¹⁹⁾が、紙面の都合上、今回は割愛させて頂くとし、機会があればまた紹介させて頂く。

参考文献

- 1) R.M.German : Powder Metallurgy Science, Metal Powder Industries Federation, (1984)
- 2) R.M.German and A. Bose : Injection Molding of Metals and Ceramics, Metal Powder Industries Federation, (1997)
- 3) 加藤欽之 : アイピーシー, (1996), 23.
- 4) 長田稔子, 西藪和明, 唐崎靖夫, 田中茂雄, 三浦秀士 : 粉体および粉末冶金, 51 (2004), 435.
- 5) 清水透, 望月諭, 佐野利男, 淵沢定克 : 粉体および粉末冶金, 43 (1996) 10, 1188.
- 6) G.Chen, G.Wen, N.Edmonds, P.Cao and Y.Li : Key Engineering Materials, 520 (2012), 174.
- 7) T.Osada, M.Noda, H.Kang, F.Tsumori and H.Miura : Proceeding of International Conference on Materials Processing Technology 2012, (2012)
- 8) 長田稔子, 西藪和明, 松崎寛, 田中茂雄, 三浦秀士 : 日本機械学会論文集A編, 72 (2006), 148.
- 9) V.Piotter, W.Bauer, R.Knitter, M.Mueller, T.Mueller and K.Plewa : Microsystem Technologies, 17 (2011) 2, 251.
- 10) 西藪和明, 田辺大貴, 鹿子泰宏, 田中茂雄 : 日本機械学会論文集A編, 77 (2011) 780, 1378.
- 11) 三浦秀士, 篠崎亮平, Shinta Virdhian, 長田稔子 : 粉体および粉末冶金, 57 (2010) 5, 352.
- 12) Shinta Virdhian, 長田稔子, 園田拓真, 姜賢求, 津守不二夫, 三浦秀士 : 粉体および粉末冶金, 59 (2012) 5, 272.
- 13) 大津雅亮, 福永智紀, 三浦秀士 : 粉体および粉末冶金, 51 (2004) 6, 447.
- 14) 三浦秀士, 前田浩幸, 竹増光家, 上村誠, 大津雅亮 : 粉体および粉末冶金, 53 (2006) 9, 740.
- 15) 三浦秀士, 永田優, 石橋秀基, 上村誠, 大津雅亮 : 粉体および粉末冶金, 54 (2007) 10, 707.
- 16) 三浦秀士, 長田稔子, 石橋秀基, 大川内健太, 上村誠 : 粉体および粉末冶金, 55 (2008) 10, 738.
- 17) H.G.Kang, T.Osada and H.Miura : Advanced Materials Research, 89-91 (2010), 281.
- 18) H.Miura, K.Okawachi, H.G.Kang, F.Tsumori, K.Kurata and N.Arimoto : Materials Science Forum, 654-656 (2010), 2057.
- 19) H.G.Kang, K.Yamada, T.Osada, F.Tsumori and H.Miura : Proceedings of the 2012 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition.

(2013年7月16日受付)