

© 1990 ISIJ

解 説

金属粉末射出成形の動向

中 村 秀 樹*

Progress of Metal Powder Injection Molding

Hideki NAKAMURA

1. はじめに

プラスチックの射出成形は、「閉鎖している金型中に流動状態のプラスチックを圧入し、冷却（加熱）固化（硬化）した後、取り出すプロセス」として定義づけられる。金属粉末射出成形の場合、金属またはセラミックス粉末を流動性物質と混練後、可塑性を付与することによって、プラスチックと同じような形状の成形体を得ることができる。プラスチック成形と異なる点は、成形後流動性物質を除去し、焼結することによって、はじめて、高精度複雑形状の三次元製品を製造できることである。

この手法は原理的には1919年ドイツで開発され、1930年代にはセラミックスの成形法としての研究例¹⁾がある。国内では1950年代に自動車用プラグへの適用が試みられたが²⁾、コスト、品質安定性の点から冷間静水圧法（CIP）に勝てず、本格的実用化に至らないまま推移した経緯がある。その後セラミックス粉末と平行して、金属粉末への適用が試みられ、R. E. WIECH, Jr. が WITEC プロセス³⁾を開発し、1972年市販化するに到った時から、金属粉末の新しい成形法 MIM (Metal Injection Molding) として脚光を浴び始めた。

その後世界各所でバインダー組成開発を中心とした MIM の研究が進められ、国内でも1987年頃から本格的営業生産が開始された。Gorham Inst. のマーケティング結果では、1988年の米国市場はまだ19百万\$で

あるが、2000年には年間2億\$になるという大きな伸びを予測⁴⁾している。国内では十数社が生産しているが、公表された統計データはなく、米国よりはまだ市場規模は小さいと推定される。当初 MIM が広く宣伝されたほどにはまだ普及していないが、これは、競合技術のロストワックス、ダイキャストに比べ、まだ信頼性、コスト等未解決の技術問題を抱えているためと考えられる。MIM については刊行書⁵⁾⁶⁾も含めて、概説文⁷⁾⁹⁾も数多く出版されており、ここでは技術文献を中心に、MIM の技術的側面について解説する。

2. 製造プロセス

図1に代表的プロセスを示す。バインダー種類によって、プロセス要因、プロセスパラメーターは変化するが、MIM の原理原則として、次の2点があげられる。(1) 粉末は成形中に塑性変形はしない。すなわち非加圧成形であり、変形は粉末粒子間隙を埋めた流動性物質（通称バインダー）の粘性流動によって生じる。(2) バインダーは成形後特殊な場合を除いて完全に除去する必要がある。この時形状保持力は粒子間摩擦力による。この(1)(2)の矛盾する項目を併立させることがむづかしく、工業的制約を大きくしている。以下に各工程別の技術要素と課題について述べる。

2.1 原料粉末

原料粉末はバインダーと混練後の流動特性、脱バインダー特性、焼結性の三つの特性を勘案して選定される。

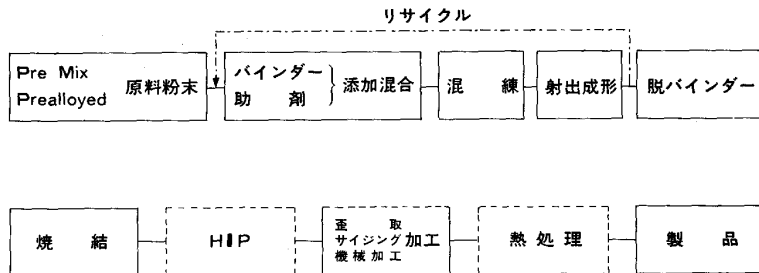


図1 メタルインジェクションプロセス

平成元年5月8日受付 (Received May, 8, 1989) (依頼解説)

* 日立金属(株)安来工場冶金研究所 (現:日立金属(株)安来工場技術部主任技師) (Metallurgical Research Laboratory, Now Material & Process Engineering Dept., Yasugi Works, Hitachi Metals Ltd., 2107-2 Yasugi-cho Yasugi Shimane pref. 692)

Key words: powder metallurgy; metal injection molding; rheology; binder; debinding; mixing; sintering; hot isostatic pressing.

表 1 粉末/バインダー混練体の模式的モデル⁵⁾

系の模式図					
固相の状態	連続	連続	連続	不連続	不連続
液相の状態	不連続	連続	連続	連続	連続
気相の状態	連続	連続	不連続	なし	なし
充填状態	ベンチュラー域	ファニキュラーI域	ファニキュラーII域	キャピラリー域	スラリー域
系の呼称	混合物	混合物	混合物	坏土(可塑性)	泥しよう(スリップ)
レオロジー的性質	弾性体	弾性体	弾性体	弾塑性体	粘弾性体

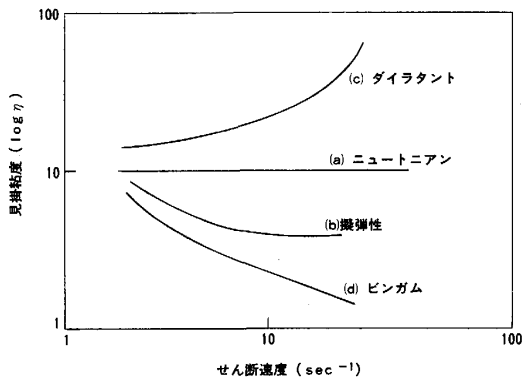


図 2 代表的流体のレオロジカルな挙動⁵⁾

2.1.1 流動特性 (レオロジー特性)

表 1 に粉末とバインダー混合系の充填状態⁵⁾を示す。固相 (粉末), 液相 (バインダー), 気相 (空気) の混合系で, レオロジー特性が弾塑性体となるキャピラリー域にないと射出成形ができない。混合系のレオロジーはせん断速度 ($\dot{\gamma}$) にたいする見掛け粘度 (η), せん断応力 (τ) の関数で次式で示される。

$$\tau = c \dot{\gamma}^n \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta = c \dot{\gamma}^{n-1} \dots\dots\dots (2)$$

c, n は定数

これをモデル的に示すと図 2 のようになり, τ と η が小さく, n が 1 に近いレオロジー特性を得るために, 適正なバインダーと粉末を選定することが必要となる。金属粉末との混練体は (b) タイプの擬塑性弾性体で, $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ のせん断速度範囲で 10^4 poise 以下の粘度が MIM に適しているとされる。

金属粉末諸元とレオロジー特性の定量的関係の研究は少ないが, セラミックスの事例¹²⁾¹⁴⁾では, 相対粘度 η_{rel} (混練体粘度/バインダー粘度) は混練体中に占める粉末の体積比 Φ が大きいほど, また粒径 d が微細なほど大きくなる。粉末の配位要因 (Crowding factor) を

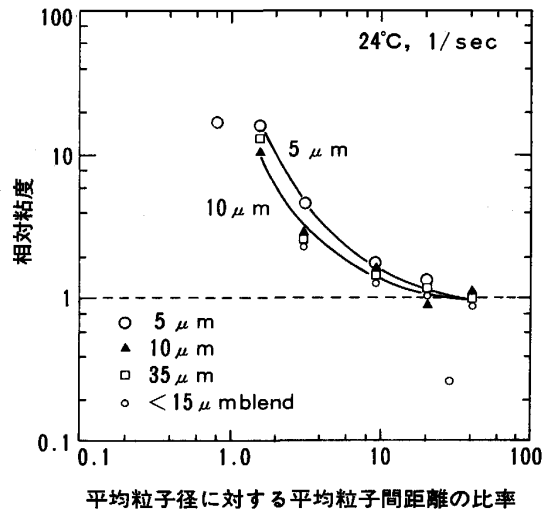


図 3 相対粘度に及ぼす平均粒子径に対する平均粒子間距離の影響 (316L 球状ステンレス粉末)¹⁴⁾

k とすると,

$$\eta_{rel} = \exp(2.5\Phi / (1 - k\Phi)) \dots\dots\dots (3)$$

で相対粘度は示され¹⁴⁾, k と平均粒径 d との間には, 経験式として次式が提案¹³⁾されている。

$$k = 1.079 + \exp(0.01008/d) + \exp(0.00290/d^2) \dots\dots\dots (4)$$

また体積比の最大確率 Φ_m は

$$\Phi_m = 0.37 \left(1 + 0.707 \exp - \frac{\beta \pi^2 q^2 \lambda}{6 l^2 d} \right) \dots\dots\dots (5)$$

β : 確率定数

q : 原子密度 (The atomic density)

λ : London's 係数

l : 粒子間距離

で示される¹⁵⁾。 Φ_m は bcc 配位では 0.52, fcc では 0.74 となる。粒径の異なる二種類の粉末を混合し, 粗粉末の空隙に微粒粉末を充てんする場合, 例えば $d_2 = 0.42d_1$ の場合 Φ_m は fcc では 0.80 まで上昇させることが可能となる¹⁵⁾。

一方 (4) 式の k 値の数学的意味がはっきりしないため, 実測できる数字である平均粒子間距離 \bar{l} と平均粒子径 \bar{d} の比 $R = \bar{l}/\bar{d}$ と η_{rel} を用いて, 図 3 の関係が成立することが明らかにされている。この時 R 値の減少につれて η_{rel} が増加することがステンレスの球状粉末で報告¹⁶⁾されている。 R 値が 100 になると, η_{rel} は 1 となりバインダーそのものの粘度と変わらなくなる。

この他超硬合金粉末で, 粉末容積比を増加させると, 粘度は増加するが, 高容積比ではダイラタント流体に近い挙動をする例¹⁷⁾もある。全般的には粉末諸元よりも, Φ 値の方が粘度には影響が大きい。

次に焼結性からの粉末諸元を選定が重要である。粉末の焼結は 5 種類に大別できるが, d を粒子径, x を粒子

ネック部の半径, t を時間, m, n を定数, $F(T)$ を温度依存の定数とすれば, 次式で総括¹⁸⁾される.

$$\frac{x^m}{d^n} = F(T) \cdot t \dots\dots\dots (6)$$

この時焼結機構別に

粘性流動; $m = 2, n = 1, x^2 \propto t, (x/d)^2 \propto td^{-1}$
 (7)

蒸発凝縮; $m = 3, n = 1, x^3 \propto t, (x/d)^3 \propto td^{-2}$
 (8)

体積拡散; $m = 5, n = 2, x^5 \propto t, (x/d)^5 \propto td^{-3}$
 (9)

表面拡散; $m = 7, n = 3, x^7 \propto t, (x/d)^7 \propto td^{-4}$
 (10)

粒界拡散; $m = 6, n = 2, x^6 \propto t, (x/d)^6 \propto td^{-4}$
 (11)

となる. いずれの式も微粒であるほど焼結性がすぐれることを示している. MIM の場合グリーン密度が低いため, とくに焼結性のすぐれた微粉の使用が必要となる. この他粉末の比表面積や, 粉末の表面の化学的活性度等の焼結性に与える影響は一般の粉末冶金と同様と考えられる. ただバインダーとの濡れ性, 粉末の凝集等 MIM 特有の問題を考慮する必要がある場合もある. 以上総合すると, MIM 用の原料粉末としては, 焼結性からは高充てん密度が得られ, 微粒で不規則形状の比表面積が大きい粉末が要求され, 一方成形性からはむしろ逆の傾向の粉末が望まれる. 最大公約数的には微粒の球状粉末がもっとも適していることになる. 通常粒子径が 10 μm 以下が良いとされるが, 焼結体の特性が許容される範囲で粒径は大きい粉末を使用することが経済的となる.

現在 MIM 用の粉末としては, Fe-Ni 系はカーボニル鉄, Ni 粉末や H_2 還元粉, ステンレス粉末はアトマイズ粉末が主として使用されている. 従来の粉末冶金用粉末と比較すると, 微粒粉末を使用せざるを得ず, 原料コストが高いことが MIM の普及を遅らせている最大原因とされている. 価格が 0.35~0.50 \$/lb になれば飛躍的に MIM は伸展するとされている¹⁹⁾. このような要求にたいして, 武田らによって開発された超高压水アトマイズ法²⁰⁾ が国内でも実用化域に達し始めた. 現在はまだ通常の水アトマイズ粉末と比較して格段に高価であるが, 安価な粉末の供給法としての期待が大きい.

2.2 バインダーの選定

原料粉末とならんでバインダーの選定がもっとも重要である. 要求特性としては, (i)少量添加で射出成形性が良いこと, (ii)金型からの離型性がよいこと, (iii)成形品の生強度が高いこと, (iv)金属微粉を変質させぬこと, (v)くり返し使用が可能なこと, (vi)脱バインダー性がよいこと, (vii)焼結品の残留炭素の制御が容易なこと, (viii)毒性のないこと, があげられる²¹⁾. なかでも (vi)項が MIM 最大の技術問題で脱バインダー速度を

上げることが課題となっている. 現在大別すると, R. E. WIECH, Jr. によって開発された熱可塑性樹脂とワックスの混合体¹³⁾, R. D. RIVERS によるメチルセルロースのゲル化現象を利用した水溶性バインダー²²⁾ の 2 種類に区分できる. 前者のタイプが主流で, 使用する樹脂の種類, 組成, 配合比等各社のノウハウと特長がある. 先に示した要求特性にたいして単独物質ではこれらを満たすことができず (i)結合剤, (ii)分散剤 (解こう剤), (iii)滑剤, (iv)可塑剤等複数種の物質が添加混合される. 評価手法として混練性は混練トルク値とその経時変化, 流動性はフローテスターによるせん断速度とせん断応力, 粘度の関係, 射出成形時のスパイラルフロー長, 脱脂性

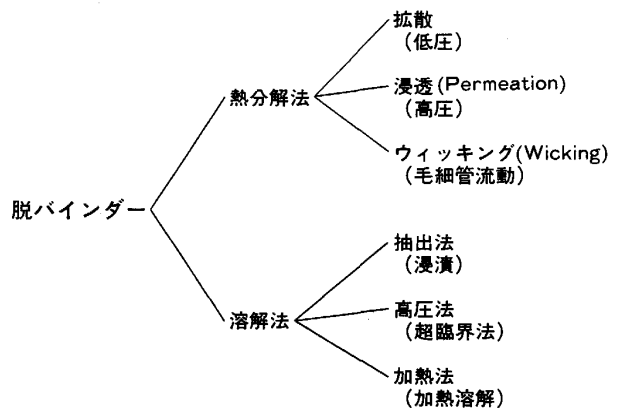


図 4 熱分解法と溶解法による数種類の脱バインダー方法の分類²³⁾

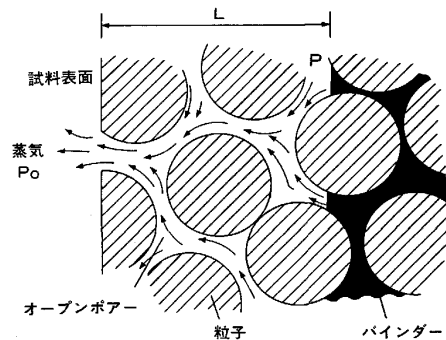


図 5 バインダー ↔ 蒸気界面の成形体の表面から距離 L 地点の場合の浸透または拡散による脱バインダーの進行を示す空孔モデル²³⁾

表 2 脱バインダー時間に及ぼす各パラメーター因子の比較²³⁾

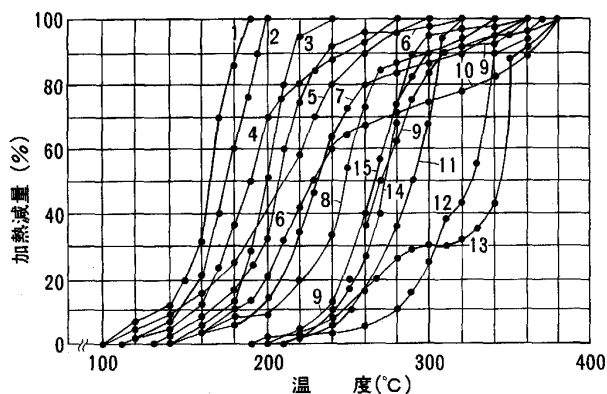
パラメーター	拡散	浸透	ウィッキング (Wicking)
粒 径	D^{-1}	D^{-2}	$D_W / (D_C (D_C - D_W))$
空 孔 度	E^{-2}	$(1-E)^2 / E^3$	$(1-E_C)^2 / E_C^3$
断面肉厚	H^2	H^2	H^2
粘 度	—	G	G
圧力降下	$(P - P_0)^{-1}$	$P / (P^2 - P_0^2)$	—

P : バインダー蒸気界面の圧力 P_0 : 成形体外表面部の圧力
 D_W : Wick の粒子径 D_C : 成形体の粒子径 E_C : 成形体の空孔度

は熱天秤による熱分解速度を測定することが通常行われる⁵⁾。

脱バインダーの手法は図4²³⁾のように区分できる。通常熱分解方式が採用されているが、溶剤抽出法に成功したとの報告²⁴⁾がある。熱分解方式の脱バインダーのメカニズムは模式的には図5のように理解され、表2に拡散、浸透、浸出のそれぞれについて、粒径、空隙率等と脱バインダー時間との関係が予測されている²³⁾。脱バインダー時間はいずれのメカニズムの場合も成形体の肉厚の2乗で長くなり²³⁾、これがMIM製品の許容肉厚を大きく制限する原因となっている。

図6にMIMに使用される代表的バインダーの熱分解曲線⁵⁾を示す。樹脂の種類によって熱分解温度、速度が異なり、特定温度領域で急速に分解するものが多い。これは脱バインダー中でのふくれ、割れ等の原因となり、数種のバインダーを組み合わせた場合、分解曲線をできるだけなめらかなものとする必要がある⁵⁾。すべての有機物は、高温で熱分解するが、ワックスのような低分子有機物は一般に加熱により、まず固相→液相→気相に相変化後気相で熱分解する。これにたいしポリマーの熱分解は固相または液相の状態ですずる。この時ポリマーは熱分解で低分子量化し、最終的にすべて気体生成物となって失われる場合と、かなりの量が炭化して残渣を残すものに分けられる。ポリエチレン、ポリプロピレンなどのオレフィン系ポリマーは、主鎖がランダムに切断し、低分子量化して蒸発し、ポリスチレン、ポリメチルメタクリレート、ポリブチルメタクリレートなどは、解重合といわれる分解を起こし、モノマーとして蒸発²⁵⁾する。この時低分子量化物質に分解すると多量のガスを発生し、これによる応力が粉末-バインダー間の結合力を超えると「脱脂割れ、ふくれ」等が発生するため、できるだけ大きな分子量で熱分解させることが重要²⁶⁾となる。主



1: DEP 2: DBP 3: DOP 4: ステアリン酸 5: 液状ポリスチレン 6: パラフィンワックス(66) 7: APP(低分子) 8: APP(高分子) 9: スチレンオリゴマー 10: マイクロワックス #200 11: ポリスチレン 12: 高密度ポリエチレン 13: エチレン-酢ビ共重合体 14: ポリプロピレン 15: ポリメタクリル酸ブチル(空气中, 昇温速度 2°C/min)

図6 代表的ポリマーの熱分解曲線⁵⁾

鎖、側鎖の結合解離エネルギー値が熱分解温度、分解形式の目安となる。

ワックス系は熔融状態では粘度が低い液体となり、成形体内部より表面に移行しやすく、表面でガス化する。これにたいして、樹脂系は熔融粘度が高く、成形体中での移動が起こりにくく、成形体内部でガス化して、成形体を破壊しやすくなる²⁶⁾。成形体の粒子より粒径が微細な粉末中への埋没や、ベッド(積載台)に置き、毛管現象を利用して溶融物質を速やかに除去する工夫³⁾もされている。この他脱バインダー時の成形体の欠陥防止策として、減圧²⁷⁾、加圧脱脂法²⁸⁾⁵⁾がある。前者は常圧脱脂で成形体に気孔を作り、バインダー蒸発時のガス発生によるふくれを防止するもの、後者は雰囲気圧力をその温度におけるバインダーの飽和蒸気圧より大きくし、バインダー分解成分の沸騰、内部的昇華を抑制する考え方である。同様の考え方でガスの発生量を各温度領域で平準化する方法⁵⁾や昇熱速度を制御する方法がある。この他熱分解法では分解生成物が成形体表層部に堆積し、表皮を生ずることがある。バインダーの熱分解速度は空気>H₂>Arガスの順序となる。金属の場合酸化のため空気は非酸化温度領域のみ使用して分解速度を上げることに³⁾に利用される事例がある。

以上の観点からワックス系バインダーの方が樹脂よりは熱分解が容易であり、MIMにはその成形性を若干犠牲にしても多く使用されるようになった。しかしそれでも工業的レベルでは脱バインダーが可能な成形体の肉厚は最大10mm程度で、脱脂時間も通常20h以上かかり、MIMの伸展にはこの大幅な短縮が必須となっている。

バインダーの熱分解と関連して炭素の残留の問題がある。高分子有機物では多くの素反応が同時に起こり、これが同一材質でも製造条件によって異なったり、また分解時の拡散効果や、分解反応の進行と共に変質する問題もあって非常にやっかいである。ある程度試行錯誤的にバインダー組成や分解条件をいじることになる。

脱バインダー時間の大幅短縮と許容肉厚増加による対象製品拡大が、MIMの伸展の鍵となっていることは間違いない。

2.3 混練・射出成形

粉末とバインダーを凝集せずに均一分散させ、粉末の容積比を最大にした混練体を得ることが混練の目的となる。バインダー組成、粉末諸元、配合比によって、混練方式、混練機の機種、混練条件(速度、温度、時間、添加順序)を特定する必要²⁹⁾がある。混練中のバインダーの高せん断応力下での変質、揮発、蒸発による組成変化、空気の巻き込み等に留意しなければならない。表3に混練機選定のガイドライン²⁹⁾を示す。混練体特性は粘性トルクの絶対値と温度変化、せん断速度とせん断応力、粘度の関係で評価されることが多い。

表 3 混合, 混練装置の選択ガイド²⁹⁾

タイプ	粘 度 域 (CPS)	パワーレンジ (HP)	対 象	価格レンジ (1985)10 ³ \$
リボン混合機 (Ribbon blender)	Up to 5×10 ⁴	1~100	乾燥粉末, 液体, ペースト	5~50
高力ブレンダー (High intensity blender)	Up to 5×10 ³	20~105	固形 PVC の混練体	10~35
遊星混合機 (Planetary mixer)	10 ² ~2×10 ⁶	5~40	粉末樹脂懸濁液有機懸濁液等	10~100
シグマブレードニーダー (Sigma blade kneader)	10 ⁵ ~5×10 ⁶	1~300	高粘度プラスチック	10~200
プラスチックナイダー (Banbury type)	10 ⁵ ~10 ⁷	25~3 000	ゴムと PVC 混合物	25~500

表 4 粉末射出成形体の品質を支配する成形条件因子⁷⁾

項目分類	条 件・因 子
スクリュウ設計	L/D, ピッチ角, ピッチ間隔, 溝深さ, 圧縮比, ミキシング部の有無, ミキシングピース構造
金 型 設 計	スプルー形状, ランナー太さ, ゲート種類, 加熱方式, 脱気孔の有無と位置
温 度 設 定	シリンダー各ゾーンの温度分布* ² , ノズル温度, 金型温度* ² , 作動油温, 原料温度* ²
圧 力 設 定	射出圧力*, 保圧力*, 射出圧から保圧への切替時期*
射 出 速 度	スクリュウ前進速度*, アクキュムレーターの有無
可 塑 化	スクリュウ回転数*, 背圧力*, 残量* ²
成形サイクル	射出時間, 保圧時間, 冷却時間, 金型開閉時間

* : 必要ならばプログラム制御実施

*²: 必要ならば, たとえば保圧力または金型内原料圧力, 温度, もしくは計量値によりフィードバック制御実施

射出成形機は荒木田⁷⁾の詳しい報文があるので, ここでは詳細は割愛する. 成形機の構造そのものはプラスチック用と大差ないが, 被成形物が高粘度でアプレッション作用を持つため, 種々の配慮が行われている. 表 4 に射出成形体の品質を支配する条件因子例について示したが, 各因子と成形体の品質に関する具体的報告はまだ少なく, この分野の検討はまだ端緒にたばかりである. 薄肉のプラスチック成形品ではコンピューターによって充填過程の流動解析が可能になっている. そのシミュレーション結果によって成形品形状, 金型構造, 成形条件の適正化を図ることができ, 金型製作期間の短縮, 費用の低減および成形品の品質向上に寄与している. MIM の場合は CAE (Computer Aided Engineering) の例は少ないが, 流動解析から焼結後の収縮率の予測がされつつある³⁰⁾. 欠陥の発生防止と精度向上にはこのようなアプローチが必要と思われる.

2.4 焼結

脱バインダー後の焼結はプレス成形品と同一なので, ここでは割愛する. ただ脱バインダー後の成形品が脆弱で, ハンドリング性が悪いこと, サイクルタイムを短縮するため, 脱バインダーと焼結を連続的に実施したり, さらに熱間静水圧プレス (HIP) まで同一炉で行う設備も発表されている.

3. MIM 製品の特性

3.1 材料特性

表 5 に MIM 製品の代表的性質³¹⁾を示す. 同一合金系でも報告者によって多少の差異はあるが, いずれも高密度化, 残留空洞の球状化によって機械的性質, 磁気的性質, 物理的性質等が従来のプレス成形焼結製品の特性値よりはるかに高く, 溶製材に近いとするものが多い. ただこのようなすぐれた性質は MIM によるものではなく, 微粒粉を使用することに帰因すると筆者は考えている.

最近の傾向として, 対象材質がきわめて広がってきたことがあげられる. 表 3 のようなスーパーアロイをはじめとして, W 合金³²⁾, Ti 合金³³⁾, 高速度工具鋼³⁴⁾, 金属間化合物³⁵⁾, 超硬合金³⁶⁾ 等の高級合金にまで適用が検討されつつある. 全般的には Fe-Ni³⁷⁾, Fe-Si 合金³⁸⁾, ステンレス³⁹⁾, Fe-Cr⁴⁰⁾ に MIM を適用した材質特性の報告が多いが, これらは引用文献を参考にされたい.

3.2 対象製品と製品精度

MIM の用途はとくに限定されたものではない. 脱バインダー, 粉末価格の制約を満足するものから遂次製品化が行われている. 20 g 以下の小物製品で精鑄品に代替できるものが, ターゲットとなっているようである. 一般機械, 電磁気, 輸送, OA 関連, 生体医療機器分野等広範囲な用途開発が行われているが, 各メーカーが実体を公表しない事例が多い.

寸法精度は焼結収縮率が通常 15~20% と大きいにもかかわらず, ±0.3~±0.1% の精度といわれている. 前者の数字は精鑄, ダイキャストを上廻り, プレス成形の粉末冶金製品にやや劣るレベルである. 後者の数字を上げているメーカーは一家のみであるが, この精度レベルになると機械加工と拮抗し, MIM は飛躍的に伸展するとされている⁴⁾. しかし原料粉末の諸元から, バインダー組成, 配合比, 混練条件, 金型設計, 射出条件混練体のレオロジー特性, 脱バインダー条件, 焼結条件等全工程にわたって寸法精度の影響要因はあまりに多い. これらの各要因の影響度が明確になり, 制御できるまでにはまだまだたくさんの技術問題の解決が必要と思われる.

表 5 MIM 法によって製造される数種の合金の材料特性³¹⁾

合金系		オーステナイト系 ステンレス 316L		析出硬化型 ステンレス 17-4PH		Ni基 スーパーアロイ IN-100		低熱膨張合金 Invar 36		高速磁率 合金 HY-MU80		シリコン鉄 Fe 2,5Si	
性質	単位	***	ME **	MIM	MIL-	ME	MIM	ASTM	MIM	ME	MIM		
		MIM	1-18		HOBK-								MIM 2-40
			BAR	H1000	5 C	MIM	CAST						
密度	g/cm ³	7,95	8,08	7,63	7,79	7,70	7,75	7,91	8,14	8,38	8,74	7,50	7,5 56
	lbs/in	0,287	0,290	0,276	0,282	0,278	0,280	0,286	0,294	0,303	0,316	0,271	0,276
抗張力	Mpa	690	552	1034	11089	1083	1014	552	552	524	545	310	338
	10 ³ psi	10	6	80	158	157	147	80	80	76	79	45	49
降伏力	Mpa	310	207	965	1013	904	848	255	251		152		
	10 ³ psi	45	30	140	147	131	123	37	35		22		
伸び	Mpa	56	60	12	11	12	9	29	30	37	64		
	% i			12									
硬さ		99	79						80		62		70
熱膨張係数	R _B							0,33	1,26				13,24
	10 ⁻⁶ /K							0,18	0,70	0,78			7,35
飽和磁化	10 ⁻⁶ ·F									7,800	0,78		2,06
	T									0,20	7,800		20,600
抗磁力	G									0,13	0,016		0,56
	A/cm										0,02		0,70
最高透磁率	Oe									> 3,02			
	A·cm									> 3,02	1256	0,427	0,484
	G/Oe									> 240001	100000	3,400	3,850
脚注	Wb/S	高耐食性 溶接可能		航空機 海水用 極低温用 — 他の粉末法 では実用性なし		タービン ブレード 他の粉末法 では実用性 なし		42Niも MIM適用 可能 他の粉末法 では実用性 なし		磁気シールド トランスコアー用 等 他の粉末法 では実用性 なし		アマチュア ポールピース リレイ等	
*** Sources: Materials Engineering - 1984 Mat. Selector - December 1983 *** Metal injection molding													

4. おわりに

以上 MIM の動向と技術課題について概説した。紙数の関係で多くの研究を割愛させていただいたが、今後の展望についてふれてみる。

現在 MIM 技術が三次元の複雑形状製品と製造法としてかなりの地歩を固めつつあることは間違いない。しかし現状ではそのサイズが小物製品に限定されることや、形状によっては脱バインダー時の自重による形状変化等で、プラスチックの射出成形製品ほどの精度と形状多様性をもっていないことも事実である。残留空孔が消失できない材質も数多く、鍛造後の機械加工製品と比較して、強度機能他で絶対特性と信頼性がまだ遠く及ばないし、データベースも不備な状況にある。創生期の技術として、まずは二極分化しながら伸展する可能性が強い。ひとつは精铸件と対比して、特性、コスト、精度が競合できる生産部材の分野で、経済性をもっとも重要視される量産型製品である。原料価格、技術発展も含めて、MIM のコスト低減が進み、機械加工品との競合も起こり得る可能性がある。構造用鋼、ステンレス、軟磁性合

金等が対象材質で比較的low付加価値材料が多い。もう一つは粉末化することで組織微細化により品質向上が可能な材料（たとえば高速度工具鋼、高炭素コバルト合金等）や、粉末プロセスでしかできない材料（超硬合金、サーメット、耐火合金等）である。これらはコストより特性が要求され、一般的に被加工性も悪いことから、NNS 化のメリットも派生的に生ずる分野である。金型費に見合う量産製品は少ないが、高付加価値材料が多く、新素材分野でも意外な発展を示す可能性もある。

重厚長大の金属、鉄鋼材料分野で、軽薄短小の MIM がどのような方向を見出すかは興味深い。

文 献

- 1) M. A. STRIVENS: Ceramic Bulletin, 42 (1963)1, p. 13
- 2) 茂木朝雄: 窯業, 67 (1959)12, p. 387
- 3) R. E. WIECH, Jr.: US Patent 4305756, 4404166, 4445936, 4415528, 4602953, 4661315
- 4) L. F. PEASE III: The Int. J. Powder Met., 24 (1988)2, p. 123
- 5) 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 (1987) [日刊工業新聞社]
- 6) 素形材技術調査報告書: 粉末射出成形技術調査部会報告,

- 研究調査報告 (素形材センター編) 355-3(1989)
- 7) 荒木田豊: 日本金属学会会報, **26** (1987), p. 473
 - 8) 斉藤勝義: 金型技術, **5** (1989), p. 40
 - 9) L. F. PEASE III: MPR April (1988), p. 242
 - 10) 文献 5), p. 73
 - 11) Battle. Labo; Process Handbook Complex Metal Powder Shapes by Injection Molding, p. 54 (非公開資料)
 - 12) B. C. MUTSUDDY: Proceeding of the British Ceramic Society, No. 233 (1988), p. 117
 - 13) C. PARKINSON, S. MATSUMOTO and P. SHERMAN: J. Colloid and Interface Science, **33** (1970)1, p. 150
 - 14) M. MOONEY: J. Colloid Science, **6** (1951), p. 162
 - 15) R. BILLET: SAWE Paper No. 1575, Index Category No. 270
 - 16) R. L. MACKEY and B. R. PATTERSON: Compendium on Metal Injection Molding, Metal Powder Industries Federation (American Powder Metallurgy Institute) (1980), p. 55
 - 17) M. T. MARTYN, D. A. ISSIT, B. HAWORTH and T. JAMES: Powder Met., **31** (1988), p. 106
 - 18) 松山芳治, 三谷裕康, 鈴木 寿: 総説粉末冶金学 (1981), p. 131 [日刊工業新聞社]
 - 19) L. F. PEASE III: 文献 16), p. 1
 - 20) 武田 徹, 皆川和己: 特開昭 60-152605
 - 21) 黒川壮夫: 合成樹脂, **34** (1988) 6, p. 21
 - 22) R. D. RIVERS: US Pat. 4113480 (1978)
 - 23) R. M. GERMAN: The Int. J. Powder Met., **23** (1987) 4, p. 237
 - 24) K. P. JOHNSON: US Patent 4765950 (1988)
 - 25) Degradation and Stabilization of Polymers Elsevier Amsterdam, ed. by H. H. G. JELLINEK (1983), p. 235
 - 26) 木本三夫, 内田真郎: 合成樹脂, **34** (1988)6, p. 2
 - 27) 斉藤勝義: ファインセラミックス成形と有機材料 (1985), p. 126 [CMC]
 - 28) J. A. CARLSTROM: 5th Cimittee Conference (1982) June
 - 29) R. BILLET: 文献 15), p. 91
 - 30) D. LEE, K. F. HENS, B. O. RHEE and C. M. SIERRA: Modern Powder Development, **18** (1988), p. 417 [APMI]
 - 31) R. BILLET: SAWE Paper No. 1575, Index Category No. 270
 - 32) T. S. WEI and R. M. GERMAN: The Int. J. Powder Met., **24** (1988) 4, p. 327
 - 33) 金子泰成, 飴山 恵, 斉藤勝義, 岩崎弘通, 時実正治: 粉体および粉末冶金, **35** (1988), p. 646
 - 34) L. F. PEASE III: A Perspective on the markets and technology for injection molded metal Powder and Ceramic parts, Third International Cof. (1986) [Gorham International Inc.]
 - 35) A. BOSE and R. M. GERMAN: 文献 30), p. 299
 - 36) E. LANGE and M. PONIATOWSKI: ATB Metallurgie XXVII No. 2-3 (1987), p. 103
 - 37) P. BHAVE, W. DORMON and D. TEEL: 文献 30), p. 333
 - 38) C. LALL and L. V. BAUM: 文献 30), p. 363
 - 39) T. P. MARSHALL: Automoto Eng. Special Published 841516 (1981), p. 47
 - 40) A. R. ERICKSON and H. E. AMAYA: 文献 30), p. 145