セラミックス，金属粉末の射出成形*

岩橋俊之**

Powder Injection Molding of Ceramics and Metal / Shunji IWAHASHI

Key words: ceramics injection molding, metal injection molding, powder injection molding

1. はじめに

セラミックス射出成形 (Ceramics Injection Molding : CIM) および金属粉末射出成形 (Metal Injection Molding : MIM) は従来技術の圧粉焼結法とプラスチックの射出成形法をドッキングさせた技術で，ニアネットシェイプ (near net shape) の状態で量産を可能にしたもので，日本市場に紹介されてすでに 20 年以上経過した。

CIM の歴史は 1939 年ころにさかのぼる¹⁾。国内では 1978 年 Battel Columbus Lab. の共同研究組織への参画が契機であろう。一方 MIM の本格的な実用化は 1960 年代に米国の Wiech, Jr. がロケット用固体燃料の開発過程で見出したのが始めとされる²⁾。

MIM, CIM 共に出発原料が粉末であるところから粉末射出成形 (Powder Injection Molding : PIM) と総称され，着実に市場規模を拡大してきた。最近の IT 産業の伸びが反映し，新たな進展が期待される。本稿では MIM, CIM の製造工程全般にわたり概要を述べ，あわせて最新の動向，将来性についても展望する。

2. 粉末射出成形 (PIM) の特徴

2.1 PIM 法の長所

PIM 法の長所は原料粉末の射出成形を可能にするために通常約 40 vol% と多量の有機バインダを必要とし，焼結

後の線収縮率は 11~25% (CIM の例，MIM はやや狭い) と高いが，寸法精度は $\pm 0.1 \sim \pm 0.5\%$ と高精度で，微細で複雑形状，難加工材料に有利である。

2.2 PIM 法の短所

短所は多量のバインダの脱脂に長時間 (24~120 時間) を要することで時間短縮が従来からの課題である。また MIM では原料粉末の粒径が $10 \mu\text{m}$ 程度の微粉が要求され，粉末冶金で使用する $100 \mu\text{m}$ 前後の粉末に比べ最近では安くなっているが 2 倍以上と高価であるため，大型・単純形状成形品には不利である。

生産技術上は射出成形用成形材料としては高濃度の粉末が有機バインダ中に懸濁する不均一分散系からなるため特異な流動挙動を示し，各工程を経る過程で欠陥が生じやすい。

3. 粉末射出成形 (PIM) 工程

PIM の代表的な熱分解脱脂法の製造工程を図 1 に示す。脱脂工程では時間短縮のため溶剤・水抽出法，光分解，酸触媒脱脂法など，新規方式，改良技術が登場している。

金属系やセラミックスの非酸化物系では真空，あるいは不活性ガスなど雰囲気と温度の脱脂・焼結が必要である。

図 1 粉末射出成形工程

* 原稿受付 平成 12 年 8 月 23 日
 ** 岩橋応用技術研究所 (藤市中央 1 丁目 17-30-2-703)
 1954 年京都大学工学部冶金学科卒。1954~1978 年住友化学工業(株)：金属マグネシウム製造研究，樹脂応用研究に従事。1979~1990 年(株)新潟鐵工所成形機技術部長，新潟化工(株)取締役，1991~1994 年ジャパンエナジー(株)技術顧問，1995 年~現職。専門分野：射出成形，著書：MIM 活用ハンドブック，ほか

表1 代表的セラミックス射出成形原料

分類	名称	化学記号	比重	硬さ (HV)	熱伝導 (W/m・K)	熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) [*]
酸化物系	アルミナ	Al ₂ O ₃	3.94~3.98	2 300~2 800	29.3~41.9	6.8~9.0
	ジルコニア	ZrO ₂	5.8~6.07	1 300~1 500	2.2~2.9	9.6~11
	チタン酸バリウム	BaTiO ₃	5.63~6.06	—	—	—
非酸化物系	炭化けい素	SiC	3.15	2 400~2 700	58~67	3.5~5.5
	窒化けい素	Si ₃ N ₄	3.17	1 400~1 550	12~22	2~3
	窒化アルミニウム	AlN	3.26	1 200	115~180	4.6

注) * R.T.~400°C, 参考比較 Al: 230 W/m・K

表2 金属粉末の製法と粒子特性

製造方法	材料の種類	粒子形状	MIM 適応	価格
物理的 粉状化	水アトマイズ法 低合金鋼 (Fe, Fe-Ni, SCM-)Cu, Ag 高合金鋼 (SUS 430, 316 L, 17-4 PH)	不定形の粒状	△	◎
	高圧水アトマイズ法	同上	○	◎
	ガスアトマイズ	同上	◎	○
	アーク電極回転法 (プラズマ)	単一 (Fe, Ni, Cu, Co, Au, Ag 等) 合金 (Ti 系, Al 系)	◎	△
	粉砕法	単一 (Fe, W, Mo, Ti, Ni 等) 合金 (Fe 系, Al-Mg, Al-Fe, Ti6Al4V)	△*	◎
化学的 粉状化	カルボニル法	Fe, Ni が主体	◎	○
	還元法	単一 (W, Mo, Fe, Ni, Co, Cu 等)	△	○
	電解法	単一 (Fe, Cu, Ag, Ni, Cr, Mn 等)	○	○

注) * 球状化処理により改善可能である。水アトマイズ粉は一般に酸素含有量が多い

3.1 成形材料（フィードストック）の調製

3.1.1 原料粉末

表1にセラミックス系、表2に金属系の原料粉末の代表例を示す⁴⁾。粉末は流動性、保形性、脱脂性、焼結性と低価格が求められる。通常平均粒径が10 μm以下の球状で、充てん密度の高い粒度分布が好ましい。表3は選択の目安である⁵⁾。MIMではカルボニル粉やガスアトマイズ粉、次いで水アトマイズ粉が適する。しかし価格や脱脂時の変形防止効果の点で水アトマイズ粉が多く使用されている。

3.1.2 バインダ処方

PIMのバインダは通常表4（後掲）に示す有機化合物が用いられる。バインダの役目は粉末に射出成形可能な流動性を与えるためであるが、成形体の保形性、脱脂性、リサイクル性なども満足させる必要がある。選択については主に高分子系は保形性、低分子系および液状成分は流動性と脱脂性を分担し、脱脂時に低温域から高温域にかけ逐次移行・揮散、分解するよう配合し、急激な分解を避け、変形、割れ、膨れを防ぎ、かつ効率よく、短時間で行われるような処方が採用されている。溶剤抽出、水抽出法ではそれぞれ

表3 PIM工程上の特性に与える粉末特性とバインダの添加量の影響

成分 特性 項目	粉末特性							バインダ添加量*		
	形状			粒径		分布幅				
	真球	擬球	異形	大	小	広	狭	過多	適量	過少
流動性	◎	○	△	△	○	◎	○	◎	○	△
脱脂性	○	○	△	○	△	△	△	△	○	◎
保形性	△	○	◎	△	○	○	△	△	○	◎
収縮均一性	○	○	△	△	○	○	△	△	○	△

注) * 適量値は空隙率の110±5%の添加量 (40 vol% 付近が目標)

れ適応したバインダ成分を選定する。

フィードストックは一般に加圧ニーダで混練後冷却粉碎するか、押しペレタイザ、あるいは2軸押し機単独混練、造粒しペレット状にしている。フィードストックの粉末/バインダ系の粉末体積分率と流動性の関係は図2で傾向が示される⁴⁾⁶⁾。射出成形に最適な粘度領域は300~500 Pa・sの範囲にある。

必要なバインダ添加量は粉末表面をバインダで濡らし、潤滑膜を形成し、かつ粒子間の空隙を満たす必要がある。比表面積と空隙率に関係するタップ密度が影響する。図3は粉末/媒体界面の概念図を示す⁴⁾⁶⁾。

同量のバインダでは低分子量のワックス系は高分子量の樹脂系に比べ少ない量で粉末粒子を

覆うため、自由媒体比が多く、粘度は低下する。流動限界に近いバインダ量では、高せん断領域でダイラタントな状態を示し、高速成形は困難になる⁷⁾。また粉末の偏析も生じやすく、形状精度に影響する⁸⁾⁹⁾。一般に、樹脂系との併用処方が採用される。

3.2 射出成形機と成形工程

通常のプラスチック射出成形機が用いられる。ただし原料粉末の硬度により射出ユニット材質が選択される。特に、CIMでは摩擦によるコンタミネーションを避けるた

図2 カルボニル鉄粉末/バインダ混合系の粉末体積分率と流動性の関係⁶⁾

図3 粉末粒子/バインダ界面の模式図⁴⁾

めに，超耐磨耗仕様が必須である。

3.3 金型設計上の留意点

金型は成形品の形状，精度，品質を決定する最も重要な役目を果たす点ではプラスチック型と同様である。以下はPIM型として留意する項目のみに絞った。

3.3.1 キャビティデザイン

- (1) 製品設計：基本的には各部の偏肉は避けることである。
- (2) キャビティ寸法：金型キャビティ寸法決定はプラ

スチック型では成形収縮率のみ考慮すればよいが，PIM型では脱脂，焼結収縮を加算した収縮率を採用し，次式(1)から求める。

$$M_L = \frac{P_L}{1 - S_T} = P_L(1 + S_T + S_T^2 + S_T^3 + \dots) \quad (1)$$

・全収縮率 S_T の算出³⁾⁵⁾

図4において，焼結線収縮率は水アトマイズ粉など1000 ppm オーダの酸素量を含む場合はこれを考慮し次式で算出する。

$$S_L = 1 - \sqrt[3]{\frac{(1 - B_V)(1 - O_V)}{S_D}} \quad (2)$$

相対密度が1，酸素量を無視できるときは

$$S_L = 1 - \sqrt[3]{1 - B_V} \approx \frac{1}{3}B_V + \frac{1}{9}B_V^2 + \frac{1}{16}B_V^3 + \dots \quad (3)$$

少なくとも3乗の項まで算出しないと

誤差の原因となる。

これにグリーンの成形収縮率を加えた全収縮率から式(1)で金型寸法が求まるが，異方性も含め補正が必要である。

3.3.2 その他の留意点

- (1) ゲート：PIM材料は熱伝導率は樹脂の4~7倍¹⁰⁾と大で固化が速い。またダイスウェル比が小で⁷⁾，ジェットングを生じやすいため¹¹⁾，樹脂型より通常ゲート断面積は大きめにとり，型内ゲートカット法¹²⁾を採用するのが好ましい。

基本的には材料が均一にバランスよく充てんする位置，形状を選ぶ。図5は偏析による粉末充てん率に差を生じ，焼結に伴い収縮率の差により変形する概念図を示す⁶⁾。

図4 粉末射出・焼結工程中の収縮率

図5 サイドゲートを採用した場合の焼結後の変形例⁶⁾

(2) ランナ：リサイクル率を減らすため欧米ではホットランナが普及している。米国の Thermat 社ではバルブゲート式ホットランナが SUS 316 L のスライドロックの成形に採用されていた。

(3) エアベント：低分子量のバインダはバリを生じやすいためエアベントを樹脂用型 (<0.03 mm) より小さく、0.01 mm 以下に抑える。また入子、分割構造では合わせ目よりガスが抜けるが、粉末材料の侵入に注意を要する。理想的には真空引きを奨める。

3.4 脱脂工程

この工程は成形が完了すれば不要になる有機バインダを除くのが目的である。脱脂には一般に熱分解法が採用されている。加熱方式には材質、肉厚により雰囲気、昇温速度、最高保持温度など材質劣化、変形、欠陥などの生じないように選定する。昇温速度はセラミックスなどサブミクロンの厚肉成形品 (>10 mm) では 2~3°C/h の昇温速度で 350~400°C まで 120 時間もかけることもある。一方熱分解時の雰囲気ガスは酸化物系セラミックスでは大気雰囲気炉で行うのが効率的であるが、酸化を嫌う非酸化物系セラミックスや金属系では真空脱脂かキャリアガスに N₂, Ar ガスが採用される。脱脂時の変質により、緻密化を妨げ、耐食性を低下させたり、磁性材料では磁気特性に影響する。

通常熱分解法では、急激な昇温による、ワークの変形、分解ガスによる割れ、膨れを避けるため、一般に昇温速度を抑えているため生産性が劣る。これを改善するため、低温度領域での溶剤、水抽出あるいは真空脱脂を行い、併用する高温域熱分解脱脂時の変形を防止し、分解ガスの拡散を容易にしトータルの脱脂時間を短縮するなどの改良がなされている。

さらに最近では真空脱脂/真空焼結によりワークの移動を必要とせず、20~30 時間と従来の 1/3 程度に短縮することが可能になってきた。ただし各方式に適合したバインダ処方不可欠である¹³⁾。また BASF 社が開発した POM をバインダとし、硝酸ガスなど酸触媒による連鎖反応を利用して分解する方式ではバインダの軟化点 (約 150°C) 以下の 100~140°C で行われ、脱バインダ速度は 1~3 mm (肉厚)/h と熱分解法の 1/10 以下に短縮した例もある¹⁴⁾。さらに、寒天 (ハネウエル社 USP) をバインダに用いた例では常温乾燥のみで従来のプレス法と同様脱脂工程を省

表 4 脱脂方式の種類と特徴

脱脂方式	条 件			適 用 バインダ	長所・短所
	加熱方式	圧 力	雰 囲 気		
熱分解法	抵抗発熱	常 圧 加 圧	大 気	樹 脂 (高分子)	◎大量処理可
	高周波	1~10 kg/cm ² 減 圧	不活性 N ₂ , Ar ガス	+	▲概して処理時間が 長い (24~120 h)
	遠赤外線	-10 ⁻⁴ Torr	真 空	低分子 (WAX 等)	
溶媒抽出 + 熱分解 (補助)	① 有機溶剤による抽出 (AMAX 法) (マックファーソン法: フタル酸・脂肪酸 エステル) (SPS プロセス: PS, ステアリン酸-エ タノール抽出)			樹 脂 油・ワックス 低分子	○処理時間短縮 (5~10 h) ▲溶剤回収・環境
	② 水による抽出 (Rivers-Cabot 法) メチルセルローズ, 天然高分子, 寒天 (ハネウエル)* ポリエチレンオキシド (セイコー電子・ 住友セメント)			水溶性バイン ダ	○処理時間短縮 ◎クリーン △グリーン強度低い
	③ 超臨界液化ガスによる抽出 (主に CO ₂ ガス: 住友重機ほか)			樹 脂 油・ワックス 低分子	◎処理時間短縮 (1~5 h) ▲設備費高価
溶媒抽出 + 熱分解	溶媒抽出後、残量を加熱分解 (John- son, 旭硝子)			樹 脂 + 可溶樹脂	○時間短縮 (3~10 h) ▲溶剤回収・環境
真空+ 熱分解	高真空脱脂と焼結を同一炉で実施 (島津 法, Vacuum Industry 法)			ポリエチレン ポリアセタール +ワックス	○時間短縮 △設備自由度少
光分解 +熱分解	紫外線を利用する光分解法 (日本ウェル ディングロッド(株))			光分解型樹脂	○時間短縮 ▲肉厚品に不適
触媒法	酸触媒 (硝酸, 蓚酸) で連鎖反応を利用 し還元する (BASF 社)			変性ポリアセ タール	◎時間短縮・保形良 (10 mm > : 1~3 h) ▲専用設備要す

注) 長所 ◎ > ○ > △ > ▲ 短所, * 寒天では常温乾燥のみで脱脂可能

図6 脱脂から焼結過程の粉末粒子形態の変化概念図

略可能である。表4は各種脱脂方式を示す。

3.5 焼結工程

この工程において組織の均質化、緻密化、粒界成長が進行し、最終的に目的とする形状、寸法、組織の焼結体が得られる。図6は脱脂、焼結過程の粉末粒子形態の変化の概念図を示す。粉末冶金では相対密度は通常 86~92% 程度であるが、MIM では 96~98%、鋼種によりそれ以上が期待できる。WC-Co, W-Cu, W-Ni-Fe の液相焼結では 100% 近い緻密化が可能である。

最近のワークを移動せず、脱脂、焼結を連続的に短時間で行う真空脱脂・焼結パターンを図7に示す¹⁵⁾。また図8は真空脱脂・焼結炉を示す。分解ガスは燃焼処理される。

一方セラミックス系では脱脂に長時間を要する例では脱脂炉と焼成炉を分離するのが一般的である。Si₃N₄, AlN

図7 真空脱脂焼結炉による一貫運転の基本パターン（島津メクトム）

図8 MIM プロセス脱脂・焼成工場（真空炉）（インジェックス社）

など非酸化物系では N₂ ガス脱脂炉と Ar 雰囲気焼結炉が採用される。

3.6 後工程

通常回転，または流動バレル加工，バフ研磨が行われる。また必要に応じ MIM ではサイジング，部分的機械加工，めっきが行われる。最後に検査工程を経て製品となる。

PIM 製品の面粗さは表 5 に示すが，粉末粒径に制約される。バレル研磨でジルコニアで 0.1～0.3 S，金属で 0.5 S 程度まで向上が期待できる。ただしエッジが損耗する。

4. PIM 製品の用途と将来展望

PIM 製品の用途は OA・電気通信・情報機器の急速な進展に伴い需要は回復し，用途範囲も医療・バイオ関係のマイクロ製品など応用範囲は拡大している。

4.1 CIM 関係

表 6 はファインセラミックスの用途例を示す。分野別では電磁気，光学，機械的，熱的，化学・生体生物などの各部材，生活・文化用品，その他部材からなり，機能部品と構造部品が対象で前者が 80% を占める。

最近インターネット普及の急加速，IT 産業の急成長による情報技術の進展に伴い，北米をはじめとする世界的光網のインフラ整備に支えられ光ファイバコネクタ主要部品のフェルールの需要が 65% から 80% に急激に伸び市場

表 5 成形体および焼結体の面粗さ

原 料 材 料 名	粉 末 平均粒径	射出成形体 R _{max} (μm)	焼 結 体 R _{max} (μm)	製 品 名
水アトマイズ銅	8 μm	0.75～0.9	5.18	引張試験片
水アトマイズ SUS 316	9～10 μm	0.69～0.92	5～8	計測器部品
ジルコニア	400 Å	0.70～0.75	2.7～3.4	中子部品
アルミナ	0.4 μm	0.80～0.85	4.2～5.6	中子部品
プラスチック (ABS)	—	0.45～0.65	—	計測器部品

表 6 セラミックス射出成形の用途例

分 類	内 容
エンジン部品	ガスタービン部品…ロータブレード 自動車エンジン…ターボチャージャーロータ
OA・事務機器	ドットプリンタワイヤガード，FDD，HDD 用スライダ
電子・通信	光通信…フェルール，スリーブ，携帯電話器コンデンサ，IC パッケージ，各種センサ，磁性材料
医療・理化学機器・分析部品	人工腎臓用ポンプ部品，血液分析バルブ・配管部品，治療器具・機器部品，耐熱耐薬品器具
食品機械部品	充てん機用部品，バルブ部品，混練機・ポンプ部品
繊維機械部品	糸道，糸加工用ノズル，ローラ，擦糸部品
工具・カッタ	切削工具，カッタ，スリッタ…繊維・紙・フィルム，耐摩耗部品類
生活・文化用品	包丁，はさみ，ゴルフクラブ，スパイク，レジャー関係
産業用，その他	ポンプ・バルブ部品，半導体製造装置ジグ，粉碎機部品，搬送…コンベア，吸着，熱処理ジグ 伸線機用部品…キャプスタンローラ，ガイドローラ，洗浄ノズル，バーナノズル，溶接ノズル

は品不足が続いている。世界の業界では 2005 年には 2000 年対比で 3.5～4 倍（約 5 億本/年）へと拡大が予測される。このため世界の生産拠点である日本のメーカは軒並み生産能力増強を図る一方，新規参入メーカも相次いでいるという¹⁶⁾。

製法は押出方式より後加工工程の少ない射出成形方式が主流になりつつある。また車載光コンポーネントシステムもこれからの有望な市場になるであろう。

CIM に関する需要統計は明らかではないが，ファインセラミックス産業の需要は日本セラミックス協会の予測では，1998 年の実績 17 481 億円に対し，2000 年は 23 200～27 700 億円，2005 年は約 2.8～約 4 兆円としている。製品用途分野別では電磁気・光学用部材が約 70% を占める。その内 CIM 市場は数% とはいえ，その市場規模から将来が有望視される。

4.2 MIM 関係

MIM の用途は表 7 および図 9 に示す。国内の最近の需要動向は時計関係のウェイトが減少し，通信・AV，カメラ・精密，医療，一般産業機械の部品が増加する傾向にある。光通信関連部品は CIM の場合と同様な関係で有望な市場である。医療機器はまだアメリカに比べ少ないが次第に増加し，Ti など人体に馴染む材料の利用も含め有望な

表7 金属粉末射出成形の用途例

分類	内 容
時計部品	バンド，外枠，基盤，ギヤなどモジュール部品
OA・情報機器	プリンタヘッドヨーク，コア，レバー，複写機
通信機器部品	光通信関連コネクタ，アダプタ部品，ヒートシンク，信号増幅器
AV・電子・電機	VTR・LD・CD・MD機器，磁気部品
産業機械部品	半導体製造装置ジグ，自動化機器，電動工具，工作・印刷機械，機械工具部品，油圧機器，建設・農業機械部品
生活・文化用品	スポーツ・レジャー用部品，眼鏡・オペラグラス部品，装身具類
カメラ・精密・マシン	カメラ部品，現像機械部品，マシン部品
医療機器部品・理化学機器	歯科治療機器・矯正部品，検査・分析機器，血液機器配管部品，内視鏡先端部品，ジグ類，計測機部品
自動車・航空機	キャブレタストレーナ，ノズル，エンジン油圧系フィルタなどエンジンまわり部品，ショックアブソーバ部品ほか各種構造部品

市場となりつつある。量産性の要求される自動車部品もエンジン周りの採用により将来の伸びが期待できる。

材料別ではSUS系がほぼ半ばを占め，増加の傾向にある。通信機器分野ではコパール，インパー，Ni系合金など低膨張材，タングステン系が伸びている。Tiも医療，スポーツ・玩具などで3%程度の市場がある。従来苦手とされた大型部品（3kg）も手がけられている。

MIM市場規模は矢野経済研究所調査報告によると年率15~20%の伸びを示したが，1998年度は77.4億円と不況の影響を受け停滞はあったが，1999年度は回復し85.6億円の見込みである。2000年度は112.4億円と遂に100億円台に乗り，また2005年度には207.6億円と200億円台に乗る予測をしている。世界市場もやがて10億ドル台に乗るであろう。

5. お わ り に

従来，新材料や，新プロセスが生まれたとき既存の材料の代替え，単に製法の転換から参入したが，次第に独自の用途，形態，プロセスの複合化，短縮化を図り，需要を開拓して行ったように，CIM，MIMプロセスでも新しい道を歩み始めた感がある。ことに，情報通信技術普及の追い風になり，またモバイル機器の台頭，医療やバイオ技術の高度化が進み，マイクロテクノロジーの分野でも活躍する機会が多くなり今後の発展が期待されている。

なお，本稿の執筆に当たり，資料のご提供と，ご助言をいただいた(株)インジェックスの山下賢一氏，(株)アトムミックスの加藤欽之氏，ガウス(株)の高根勝久氏をはじめ関係各位に感謝の意を表します。

① 時計ケース，材質：純チタン，② 時計バンドこま，材質：SUS 316 L，プリンタ部品，材質：SUS 316 L，④ 鍵部品シリンダ，材質：SUS 440 C（盗難防止のため硬度の高い材質に変更），⑤ プリンタ用ヘッドヨーク部品，材質：Fe-Co-V（Permendur），⑥ 医療機器：内視鏡部品，材質：SUS 316 L，⑦ 玩具部品，材質：純チタン

図9 MIMプロセスによる製品事例（インジェックス社）

引 用 文 献

- 1) E. Klingler, G. Weitbrecht & E. Dreher : Ger. Pat. No. 680, 250, (Aug. 1939).
- 2) A. R. Erickson and R. E. Wiech, Jr. : Injection Molding, Metals Hand Book, 9th ed., Vol. 7, ASM 7, (1986) 479.
- 3) 岩橋俊之：粉末射出成形金型技術，合成樹脂，40, 5 (1994) 54.
- 4) 岩橋俊之：粉末射出成形金型設計，第6回金属射出システムと応用開発講演会，プラスチック工業技術研究会，(1991.10) 5-1.
- 5) 岩橋俊之：金属射出成形法概要，金属射出成形ハンドブック，ユーテス社，(1998) 3.
- 6) 岩橋俊之：成形技術と金型構造，粉末の射出成形技術，粉末射出成形研究会，アイビーシー，(1996) 104.
- 7) 岩橋俊之：粉末射出成形材料組成の成形条件に及ぼす影響，第44回塑性加工連合講演会講演論文集，(1993) 107.
- 8) 岩橋俊之：金属粉末射出成形における寸法精度に及ぼす要因，日本金属学会シンポジウム，(1992) 25.
- 9) 岩橋俊之：粉末射出成形における偏析現象，粉体粉末冶金協会講演秋期大会，(1992) 110.
- 10) 岩橋俊之：PIMにおける熔融材料の凝固挙動と品質に及ぼす成形条件の影響，第47回塑性加工連合講演会講演論文集，(1996) 5.
- 11) 岩橋俊之：ファインセラミックスの射出成形，機械と工具，32, 5 (1988) 96.
- 12) 宇高 靖，小倉信宏，吉田秀樹：局部加振，加圧装置，成形加工，5, 11 (1993) 712.
- 13) 寒川喜光：MIM成形技術の現状と今後—脱脂焼結一貫プロセスにおけるMIMシステム短縮化—，第9回粉体成形セミナー，粉体粉末冶金協会，(2000) 49.
- 14) W. F. Muller : Powder Injection Molding, 新素材展セミナー，18 May (1993).
- 15) 山内一平，中務栄治：MIM用真空脱脂焼結炉の技術動向，工業加熱，34, 6 (1997) 36.
- 16) 電線新聞，2000年7月10日，p.4.