金属粉末射出成形における グリーン体成形条件の最適化

前田 安 郭 杉 山 大 吾[†] 野 村 宏 之

名古屋大学工学部材料プロセス工学科

J. Japan Inst. Metals, Vol. 60, No. 11 (1996), pp. 1108-1115

Optimization of Green Compact Forming Conditions in Metal Injection Molding

Yasuhiro Maeda, Daigo Sugiyama and Hiroyuki Nomura

Department of Materials Processing Engineering, Nagoya University, Nagoya

The metal Injection Molding (MIM) process is a key technology which makes it possible to form the complicated parts with a near-net shape. MIM includes several elemental processes such as powder mixing, injection molding, debinding and sintering. Therefore, it is necessary to optimize those processes in order to obtain the sound final products. However, the technology of MIM has not been well established yet, although laboratory work on MIM has been carried out extensively by several researchers.

In this study, the optimum injection process which is a very important stage for making perfect products has been investigated by changing the forming conditions such as injection pressure, temperature of slurry material and composition of pellet. A stainless steel SUS304 powder which is widely used for a lot of major products is selected as the experimental material. On the basis of the obtained experimental facts, the optimization is done for the injection process in which defects are not left in the green compacts and the injection is done with the lowest energy. Furthermore, a numerical simulation is executed for the slurry filling behavior using Flow Analysis Network (FAN) method. According to the calculated results, the location of weld line, the arrival time of slurry and the dice-well filling behavior are almost agreed with the experimental ones. For the optimization of injection conditions the numerical simulation using FAN method is found to be useful only for the slurry showing the dice-well filling behavior.

(Received February 13, 1996)

Keywords: metal injection molding, stainless steel SUS304, flow analysis network method, slurry filling behavior, jetting behavior, optimum injection condition

I. 緒 言

金属粉末射出成形(Metal Injection Molding : MIM)において、射出成形を含めた操業条件が不適切であると、ウェルドラインの発生、充填不足、不均一充填、引け巣発生、反り、膨れなどの変形あるいは欠陥がグリーン成形体に発生し、焼結後の製品において変形、割れなどの品質劣化を引き起こすことがわかっている⁽¹⁾⁻⁽¹⁷⁾。グリーン成形体に現れる欠陥の多くは、不適切なスラリーの充填過程にあるといわれているものの、現段階では原因の究明は不十分であり、金属粉末の射出成形に対する最適な生産技術の確立は困難な状況にある。したがって、プロセス全体の最適化を達成することが現在の基礎研究における主眼となっている。

MIMにおいて健全な焼結体を得るためには、健全なグリーン体成形を行うことが不可欠である。本研究では、MIM

プロセスの中の射出成形プロセスに着目し、グリーン体成形の最適化を目指して幅広い操作条件下で実験を行い、射出条件とグリーン成形体に現れる欠陥との関係を明らかにするとともに、最適な射出条件について考察した。さらに、プラスチック射出成形で用いられる FAN (Flow Analysis Network) 法⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾を MIM に適用し、グリーン体成形におけるキャビティ充填挙動の予測についても検討した。流動計算に関しては、FAN 法の他に有限要素法(FEM)や離散要素法(DEM)を用いた解析例もみられるが、スラリーの充填過程は自由表面を伴う移動境界流れであることから、この種の流れに適した数値解析方法として、今回は FAN 法を採用した。数値解析によるスラリー充填過程のシミュレートは、最適な成形条件を見出す上で有効な手段になるものと考えられる。

II. 実 験 方 法

MIM では均質性や流動性の向上のために、平均粒径が20 数 μm 以下の球状微粉末がよく用いられる。本研究では、比

[†] 名古屋大学大学院材料プロセス工学専攻、現在：トビー工業(株)

Table 1 Distribution of SUS304 particle size.

Particle size/ μm	~3.9	3.9/5.5	5.5/7.8	7.8/11	11/16	16/22	22~
%	0.4	3.6	7.1	12.7	34.8	24.5	16.9

Table 2 Composition of pellet.

Metal powder: SUS304	Density	7820 (kg/m ³)
	Specific heat	0.46 (kJ/kg·K)
	Thermal conductivity	16.3 (W/m·K)
Wax: Paraffin wax type Solid, Melting point 348 K Viscosity 0.1 Pa·s (at 378 K)	Density	960~970 (kg/m ³)
	Specific heat	2.13 (kJ/kg·K)
	Thermal conductivity	0.18 (W/m·K)
Resin: Poly-methyl-methacrylate Molecular weight 55000	Density	1160~1200 (kg/m ³)
	Specific heat	1.47 (kJ/kg·K)
	Thermal conductivity	1.7~2.5 (W/m·K)

Wax : Resin=1 : 1

較的実用化が進められているステンレス鋼(SUS304)粉末を実験用材料に選択した。使用した金属粉末の粒度分布を **Table 1** に示す。この金属微粉末に射出時に必要な分散性、流動性を付加させるため、バインダとして熱可塑性樹脂(ポリメタクリル酸メチル)および油脂(パラフィンワックス系)とを万能混合攪拌機を用いて熱間混練⁽²⁾した。熱間混練においては、まず油脂を完全に溶解してから熱可塑性樹脂を溶解した。完全に溶解した後、加熱してある金属粉末を少量投入して約 10 min 間混練した。このとき真空ポンプを動作させて空気の混入を防いだ。この作業を繰り返して全量の金属粉末を投入し、その後さらに 30 min 間混練した。この熱間混練により得られた混練物を粉砕機にて適当な大きさの粒状物に粉砕して実験用ペレットとした。ペレット成分の物性値を **Table 2** に示す。また熱可塑性樹脂と油脂の配合割合は mass% で 1 対 1⁽¹⁾⁽²⁾ とし、この配合割合はすべての実験を通じて一定とした。なおペレットを SEM 観察した結果、SUS304 粉末の形状はほぼ球形で、有機バインダによって粒子間が連結されていることを確認した。

射出実験装置としては、50 t 射出成形機を使用した。本成形機は樹脂の射出成形に広く使用されているものであるが、これを MIM 用に流用した。なお、射出の際の操作パラメータである射出圧力、射出温度、型締め圧力などは成形機付属のプログラムで設定した。

Fig. 1 に本実験で使用した金型のゲート部およびキャビティ部分を示す。キャビティ形状は、薄肉二次元であり内部の非対称位置に中子を有している。キャビティサイズは 50 mm×50 mm×4 mm、中子 20 mm×20 mm×4 mm であり、キャビティ容量は約 8.4 cm³ である。またゲートサイズは 2 mm×1 mm である。実際の MIM 生産においてもこの程度の大きさの製品が主流であることから、キャビティ容量を以上のように決定した。なお金型は炭素鋼 S55C(表面精度 R_{max} 6-10 μm) である。

射出圧力、射出温度、粉末配合率などの実験条件を **Table**

Fig. 1 Cavity (shadowed area) shape and its dimension (mm).

Table 3 Experimental conditions.

Injection pressure (MPa)	0.98, 1.96, 2.94
Injection temp. (K)	383, 393, 403, 413
Content of SUS304 powder (mass% (vol%))	90.0, 92.0, 92.6, 93.0, 93.6 (55.0, 61.0, 62.9, 64.3, 66.5)

3 に示す。射出圧力は、0.98~2.94 MPa の 3 条件、射出温度は 383~413 K の 4 条件、ペレット中の金属粉末(SUS304)配合率を 90.0~93.6 mass% (約 55.0~66.5 vol%) の 5 条件の全 60 条件について、実験を行った。なお粉末の配合率に関しては、実際の工場操業では経験的に 92.6 mass% (62.9 vol%) 付近が採用されていることから⁽¹⁾⁽²⁾、本実験ではこの値を中心に数パーセントの幅で範囲を設定した。また金型温度は室温とし、かつペレット中のバインダ成分には水分を吸着しやすい性質があるため、実験室内は空調により湿度を一定に保った。

射出実験においては、射出時間を制御することによりショートショット実験を行い、スラリーのキャビティ内充填挙動を解析した。また得られたグリーン成形体の性状、欠陥の有無を観察し、射出条件との因果関係についても調査した。なお、ショートショット実験を行う関係上、射出圧力と保圧力との間には、特に区別は設けなかった。したがって、設定した射出時間がスラリーの充填時間より長い場合は、充填完了後に保圧が作用したことになる。

III. 結果および考察

1. キャビティ流動実験

それぞれの射出条件によって生じる欠陥とその原因、および充填パターンについて考察する。本実験で得られた結果を簡単にまとめると、以下の通りである。(1)粉末配合率の低い材料ではバインダ量が多いために粘性が低く(流動性が良く)、その結果充填時間が非常に短くなるが、引け巣や金型合わせ面でのバリなどの欠陥が発生する、(2)射出温度が低い場合、いわゆるジェットング現象が見られることがある、

(3)粉末配合率の高い材料では、バインダが少ないため粘性が高く(流動性が悪く)、その結果充填時間が長くなり、また温度低下による粘性増大のため未充填となる条件が存在する、
(4)射出条件によらずスラリー充填パターンはほとんど変化しない。以下、これらを順に考察していく。

(1) 引け巣やバリなどの欠陥発生

引け巣やバリの欠陥は、主に粉末配合率が低い条件において発生したので、ここでは粉末配合率が 90.0 mass% (55.0 vol%) の結果を示しながら考察する。

粉末配合率が 90.0 mass% (55.0 vol%)、射出圧力が 1.96 MPa、射出温度が 383~413 K における射出時間と流入量との関係を Fig. 2 に示す。図の縦軸は矩形キャビティへのスラリー流入量であり、ショートショット実験で得られたグリーン成形体の質量を測定したものである。横軸は射出時間で、材料が加圧されて射出され始める時間をゼロとした。そのため、実際のキャビティ流入開始時間はスラリーがランナーを通過する時間分の遅れが存在している。

図より、スラリー流入量は射出時間に対してほぼ直線的に増加していき、充填後期において飽和する傾向にあることがわかる。このスラリー流入量が飽和傾向を示している区間は保圧段階であり、時間の経過とともに少しずつ充填量が増大していく。これは、充填途中で生じたスラリーの収縮、引け巣を、保圧力により補っているためである。

MIM の射出プロセスにおける代表的な欠陥には、引け巣、バリ、ウェルドラインなど⁽⁵⁾⁽¹¹⁾がある。ウェルドラインは、スラリー合流部(最終充填部)付近に発生しやすく、スラリー相互の融着が不十分で材料強度の低下、亀裂の発生源などの品質上の問題を招く。

この粉末配合率が 90.0 mass% (55.0 vol%) の条件の場合、他の条件よりバインダ量が多いため、その分収縮量も多くなる傾向がある。また、粘性が低いことによる充填速度増大の

Fig. 2 Relationship between injection time and inflow mass in the case of injection pressure of 1.96 MPa and content of SUS304 powder of 90.0 mass% (55.0 vol%).

Fig. 3 Mechanism for shrinkage.

Fig. 4 Relationship between injection time and inflow mass in the case of injection pressure of 1.96 MPa and content of SUS304 powder of 92.6 mass% (62.9 vol%).

影響も考えられ、他の配合率の場合に比べて引け巣やバリなどの欠陥発生が多かった。Fig. 3 に本実験で生じたと考えられる引け巣(外引け)発生メカニズムの概略を示す。スラリーの収縮は充填途中段階から始まっていると考えられ、この収縮量を補うためにはゲートから先端にかけて十分な圧力(保圧力を含む)を作用させる必要がある。この圧力が不十分な場合は Fig. 3 に示すような外引けが発生すると考えられる。この粉末配合率が 90.0 mass% (55.0 vol%) の条件では、これらをなかなか解消することができず、長い保圧時間を要する結果となった。

(2) ジェット現象

粉末配合率が 92.6 mass% (62.9 vol%)、射出圧力が 1.96 MPa、射出温度が 383~413 K における射出時間と流入量との関係を Fig. 4 に示す。また、射出温度が 383 K、403 K でのショートショット写真、スラリーのフロントラインの経時変化を Fig. 5、Fig. 6 に示す。Fig. 5 は、通常の充填パターンを示す場合であり、Fig. 6 がジェット現象を生じる場合の結果である。Fig. 6 を見ると、スラリーが金型壁面からはく離して、特にフロントライン近傍では凝固がかなり進行しつつ棒状になってキャビティに流入していくのがわかる。

MIM における充填挙動の形態は大きく分けて二種類⁽⁵⁾存

Fig. 5 Slurry filling pattern obtained by short-shot in the case of injection pressure of 1.96 MPa, content of SUS304 powder of 92.6 mass% (62.9 vol%) and injection temp. of 403 K.

Fig. 6 Slurry filling pattern obtained by short-shot in the case of injection pressure of 1.96 MPa, content of SUS304 powder of 92.6 mass% (62.9 vol%) and injection temp. of 383 K.

在する．一つはスラリーがランナーを通りゲートから進出し、最初に流入したスラリーが金型壁面からはく離して棒状になって進み、後から流入したものは凝固が進行したそれらとを避けるようにして充填していくジェットング現象を伴う場合である．もう一つは樹脂の射出成形で見られるように、スラリーが棒状に進出することなく初期の段階から金型壁面に接触しながら放射状に充填していくダイスウェル充填である．ジェットング現象の発生機構は、一般にバラス効果（ゲート通過直後に膨張が生じる現象）が小さいときに発生する⁽⁴⁾⁽⁵⁾といわれている．また、ゲート厚がキャビティ厚より小さい時もジェットングが起こりやすいとの報告例もある⁽²⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾．

この現象を支配する因子としては、スラリー成分、金型および射出条件、ゲート形状など多岐にわたり複雑である．本実験では、スラリーがゲートから流入してすぐに障害物である中子に衝突するため、真の意味でのジェットングは起こり得ないが、写真に見られるように二手に分かれたスラリーの一方が金型壁面からはく離するというジェットングの典型的な例が見られた．これは Fig. 4 からわかるように、383 K では他の条件に比べてスラリー粘性が高い条件であるため流入速度が小さく充填に多くの時間を要する．その結果として流動中の金型からの抜熱も相対的に大きくなり、先端部が固化し充填中に括がりにくくなったものであると推察される．また、本実験のスラリーは粘性がせん断速度の増加とともに低下する擬塑性流体であるが、スラリーの流入速度が小さい条件ではせん断速度も小さいため、粘性が大きかったとも考えられる．なお、ジェットング現象を示したのは、この条件のみであり、その他の条件では Fig. 5 のような良好な充填挙動を示した．

(3) 未充填となる射出条件

粉末量の多い材料では、バインダが少ないため粘性が高く、その結果充填時間が長くなり、また温度低下による粘性増大のため未充填となる条件が存在した．粉末配合率が 93.0 mass% (64.3 vol%)、射出圧力が 1.96 MPa における射出時間と流入量との関係を Fig. 7 に示す．ここで、射出温度が 383 K の条件では、図に示されるようにキャビティに完全には材料を充填させることができなかった．

Fig. 2, Fig. 4 および Fig. 7 の結果を比較すると、粉末量が多くバインダ量が減少すると、スラリーの粘性増大のために充填速度がかなり低下していることがわかる．特に射出温度が 383 K においては、顕著な速度低下がみられ、このためスラリーは流入しにくく射出が止まってしまったもの (Fig. 7) と考えられる．また、粉末配合率を 93.6 mass% (66.5 vol%) とさらに増加させると、スラリーがランナー途中で止まってしまいキャビティに充填させることすらできなかった．さらに、これらバインダ量が少ない条件の場合、グリーン成形体取り出しにおいてイジェクターピンによる割れが生じやすく、離型性の問題も生じた．

Fig. 7 Relationship between injection time and inflow mass in the case of injection pressure of 1.96 MPa and content of SUS304 powder of 93.0 mass% (64.3 vol%).

(4) 充填挙動の特徴

本実験のショートショット写真の Fig. 5 および Fig. 6 からわかるように、スラリーの充填挙動に幾つの特徴が認められた。一つはどの条件においても経路幅が広い方の充填速度が速いことである。これは、経路幅の狭い方では金型からの抜熱が大きくて温度低下が速く、その結果粘性が増大して経路幅の広い方よりも流入速度が遅くなるからと考えられる。もう一つは、最終充填部(スラリー合流部)の位置であるが、これは射出条件によらずほぼ一致することが写真より確認された。この結果は、スラリーは圧力伝播の作用で充填していることを示すものであり、最終充填位置は基本的にはキャビティ形状に依存すると考えられる。

2. グリーン体成形プロセスの最適化

MIM には様々なプロセスが存在する。最適な性状をもつ製品を得るためには、それぞれのプロセス、混練、射出、脱脂、焼結を最適化する必要がある。本研究で取り上げているグリーン体成形プロセスについては、その良否が後続の脱脂、焼結プロセスに直接影響を与えるため、その最適化をはかることは非常に重要であると考えられる。

射出プロセスを含むグリーン体成形の最適条件を考察するにあたっては、様々な判断基準が存在する。しかしながら、実際の操業において最優先されるべき考えは、まず無欠陥のグリーン成形体を得ることであり、さらにそのプロセスが要する総エネルギーを可能な限り低減するという点にほかならない。一口にエネルギーの低減といっても様々な概念が存在する。これには、射出時間の短縮による成形サイクルの改善、使用温度や圧力に関する電力エネルギーの削減、不良発生頻度を抑えるプロセスの改善、などすべてコストの削減につながっていくものである。また、MIM におけるプロセ

スは連続したものであるから、射出プロセスで設定した条件が後の脱脂、焼結プロセスに悪影響を及ぼすものであってはならない。

以上より、最適化の判断基準として以下を設定した。

- ① バリ、ウェルドラインや引け巣欠陥が完全に解消される、保圧を含めたトータルの射出時間の短縮化。
- ② 射出圧力、射出温度はコスト削減の見地から極力抑える。
- ③ 使用する有機バインダは可能な限り少量にする。

以上の点に注目してグリーン体成形プロセスの最適化について考察していく。

得られた実験データから、射出圧力が 1.96 MPa (20 気圧) におけるキャビティを完全に充填するのに要する時間をまとめたもの、およびそれをグラフ化したものを Fig. 8 に示す。ここでの“充填時間”は、キャビティ内にスラリーが過不足なく充填され、かつ保圧のかかる直前の時間である。したがって、設定条件によっては引け巣などの欠陥を発生している場合もあり得る。つまり、この時間はスラリーの流動特性を示していることになる。以後これを条件 A と表現する。

Fig. 8 より、キャビティの充填時間は、射出温度が高い程、またスラリーの粉末配合率が低い程短くなっていることがわかる。この流動特性の違いは、前述したようにスラリー中のバインダ粘性に起因し、射出温度が高ければ粘性は低くなり、バインダ量が増えればスラリー自体の粘性が低下することによって充填時間が変化したものと推察される。しかしながら、条件 A の充填時間だけでは引け巣が残留している

SUS304 (mass%)	Temperature, 77K			
	383	393	403	413
90.0	0.80	0.55	0.50	0.45
92.0	1.30	0.70	0.65	0.45
92.6	2.20	1.20	0.80	0.50
93.0		1.80	1.00	0.70
93.6				

unit : s

:incomplete filling
 :unable to injection

Fig. 8 Injection time for full-filling in the case of injection pressure of 1.96 MPa.

Fig. 9 Injection time for shrinkage-free filling in the case of injection pressure of 1.96 MPa.

こともあり、射出時間としては引け巣が解消されるまでの保圧時間も加える必要がある。すなわちグリーン体成形の最適化のためには、引け巣を完全に解消させるだけの保圧まで含めた、トータルの充填時間を考える必要がある。以後これを条件 B とする。

この条件 B に従った充填時間をまとめたもの、およびそれをグラフ化したものを Fig. 9 に示す。これを見ると、条件 A において充填時間の短かった射出条件では引け巣発生量が多いため、条件 B ではかなり時間がかかるという結果になっている。よって、条件 B で射出時間が最も短くなる条件を探すと、射出圧力が 1.96 MPa の実験では、粉末配合率が 92.6 mass% (62.9 vol%)、射出温度が 393 K の設定条件で充填時間が 1.6 s と最短であった。引け巣、ウェルドラインなどの欠陥の無い完全なグリーン体成形が、最も効率の良い最短時間で行われるという意味において、この設定条件が射出圧力が 1.96 MPa の場合での射出プロセスの最適条件であるといえる。なお、本実験のその他の射出圧力が 0.98, 2.94 MPa の条件でも同様の評価を行ったが、これを上回る良好な結果は得られなかった。よって、射出圧力が 1.96 MPa、粉末配合率が 92.6 mass% (62.9 vol%)、射出温度が 393 K を、本実験における最適なグリーン体成形条件と判断した。

このように、上で求めた最適条件はスラリーのキャビティ充填性と引け巣防止のためのスラリー押し込み効果の両方についての条件を最適化したものといえる。現在のところ著者らは、本実験のバインダを用いる場合には、射出装置などが

変わっても最適条件は上述したものとあまり変わらないと考えている。しかし、最適なグリーン体成形条件は、厳密には上記の射出温度、射出圧力、粉末配合率のみならず、金型形状、金型温度、ワックスとレジンの比率、SUS 粉末粒度など多くの因子と複雑に絡み合っていると考えられ、それら因子のすべての組合せで確認していく必要がある。しかしながら、全条件について実験を行い、最適な射出条件を探索することは容易ではなく、かつ多くの時間を要する。特に複雑形状の製品に対して他品種少量生産を行う場合においては、むしろコンピュータシミュレーションを活用して効率よく最適な条件を探索することが望ましいと考えられる。

3. FAN 法による解析

ここでは、樹脂の射出プロセスで用いられる FAN (Flow Analysis Network) 法⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾を MIM のグリーン体成形プロセスに適用して、その有効性について検討した。他の流動計算方法として、有限要素法 (FEM) や離散要素法 (DEM)⁽¹⁴⁾を用いた解析例もみられるが、スラリーの充填過程は自由表面を伴う移動境界流れ問題であり、この問題に適した数値解析方法として今回は FAN 法を採用した。

Tadmor らの考案による FAN 法は、非ニュートン流体を対象とした Hele-Shaw 流れを基礎としている。流動計算では、キャビティ内部を各々隣接するノードに分割してノード間のネットワークを組み、圧力分布を求める。得られた圧力から圧力差を算出して自由表面移動を行う方法である。

計算条件としては、粉末配合率を 92.6 mass% (62.9 vol%) 一定とし、射出温度を変化させた。計算条件を Table 4 に示す。物性値は Table 2 のものを用いて、ペレット成分比をもとに加重平均により算出した。なお、ワックスに関しては、その詳細が明確でないため油脂で代用した。また、非ニュートン流体であるスラリーの粘度式は、指数則とアレニウス式を組合せた式を用いた。この粘度式は、射出成形機のノズル部を用いたキャピラリー試験を行って得られたものであり、詳細は次報で報告する。

計算は、スラリーの流動挙動に関しては FAN 法による 2 次元解析で、また、熱流動に関しては有限差分法による 3 次元解析を行った。Fig. 10 に射出圧力が 1.96 MPa、射出温度が 393 K における計算結果を示す。図より、スラリー

Table 4 Calculation conditions.

Mesh size (mm)	2×2×4
Mesh number	27×27 (Fluid flow) 37×37×13 (Thermal flow)
Injection pressure (MPa)	1.96
Injection speed (m/s)*	0.48~2.10
Injection temp. (K)	383, 393, 403, 413
Content of SUS304 powder (mass% (vol%))	92.6 (62.9)

* This value is varied by injection temperature.

Fig. 10 Slurry filling pattern in the case of injection pressure of 1.96 MPa, content of SUS304 powder of 92.6 mass% (62.9 vol%) and injection temp. of 393 K.

は、実験結果と同じく、ジェット現象の無い逐次充填挙動をしていることがわかる。また、スラリーの合流位置(ウェルドラインの位置)もほぼ一致していることがわかる。さらに、充填中におけるスラリーの温度低下量も知ることができる。Fig. 11 に各位置におけるスラリーの到達時間比較を示す。図より、中子の左右ともに、その充填時間は、ほぼ一致していることがわかる。なお、最終充填時間に若干の差異がみられるが、これは、実験では射出シリンダを制御しているために、計算において与えるゲートでの流入条件が不明確であるためである。より正確な流入条件を与えることができれば、十分に精度よく計算できるものと考えられる。

他の射出条件についても計算を行った結果、ジェット現象の無いダイスウェル充填を行うタイプについては、FAN法を用いた数値解析を活用すれば、十分にその充填挙動を知ることができることがわかった。しかしながら、Fig. 6 のようなジェット現象を起こしながら充填するものについては、FAN法では、その説明ができないことも明らかになった。ジェット現象は、バラス効果が無いとき、あるいは半凝固状態での慣性移動により起こるといわ

Fig. 11 Comparison of local arrival time between the experiments and the calculations in the case of injection pressure of 1.96 MPa, content of SUS304 powder of 92.6 mass% (62.9 vol%) and injection temp. of 393 K.

れており⁽²⁾、これらを計算アルゴリズムの中に導入する必要があると考えられる。特に、前節の最適な射出条件を数値解析を用いて探索するためには、より正確にスラリーの充填過程をシミュレートできるように改善していく必要がある。

IV. 結 言

本実験の結果から MIM におけるスラリーは、射出速度が非常に遅い条件を除いて、ジェット現象が生じ無い良好な充填挙動を示すことが確認された。また、引け巣などの欠陥は、スラリー粘度が低く射出速度の速い条件で顕著であるが、保圧を加えることでそれらは完全に改善できることがわかった。

また、粉末配合率、射出圧力、射出温度を変化させて行った実験結果から、欠陥の無い完全なグリーン成形体を最も低エネルギーで成形できる射出条件が存在することがわかった。この最適な射出条件は、射出(射出と保圧)に要する時間の最小値で決定するができた。

さらに、グリーン体成形の最適化をはかるために必要と考えられる数値解析手法について検討した結果、ダイスウェル充填を行う通常の場合に関しては、FAN法は、十分に適用できることが明らかになった。

文 献

- (1) 野崎佳彦: 鋳物, **62**(1990), 11.
- (2) 加藤清隆, 野崎佳彦: 金属, **59**(1989), 44.
- (3) 斎藤勝義: 金属, **59**(1989), 51.
- (4) N. Piccirillo and D. Lee: The International Journal of Powder Metallurgy, **28**(1992), 13.
- (5) K. F. Hens, D. Lee and R. M. German: The International Journal of Powder Metallurgy, **27**(1991), 141.

- (6) J. Shah and R. E. Nunn: Powder Metallurgy International, **19**(1987), 38.
- (7) D. A. Issitt and P. J. James: Powder Metallurgy, **29**(1986), 259.
- (8) 武川淳二郎: 粉体および粉末冶金, **37**(1990), 608.
- (9) 笠原範雄, 大山良隆, 金子泰成, 岩崎弘通, 寒川善光, 斉藤勝義: 粉体および粉末冶金, **36**(1989), 178.
- (10) 斉藤勝義, 金子泰成: 材料, **39**(1990), 844.
- (11) 斉藤勝義, 寒川善光: 粉末の射出成形技術1992, 粉末の射出成形研究会編集, (1992).
- (12) 三浦 立: 工業材料, **11**(1990), 96.
- (13) 岩井 隆, 木原諄二, 相澤龍彦: 塑性加工春期講演会論文集, (1992), 265.
- (14) 岩井 隆, 相澤龍彦, 木原諄二: 第43回塑性加工連合講演会論文集, (1992), 107.
- (15) 三浦秀士, 馬場剛治, 安藤新二, 本田忠敏: 粉体および粉末冶金, **41**(1994), 240.
- (16) T. Iwai, T. Aizawa and J. Kihara: ASME, AMD-175 (Developments in Non-Newtonian Flows), (1993), 39.
- (17) H. Nomura, Y. Maeda, N. Wade and M. Ohara: First International Conference on Processing Materials for Properties, Hawaii, The Minerals, Metals & Materials Society, (1993), 701.
- (18) Z. Tadmor, E. Broyer and C. Gutfinger: Polymer Engineering and Science, **14**(1974), 660.
- (19) E. Broyer, C. Gutfinger and Z. Tadmor: Transactions of The Society of Rheology, **19**(1975), 423.
- (20) 松岡孝明, 高橋秀郎, 上垣外修己: 粉体および粉末冶金, **29**(1986), 259.