

# 型鑄造における要素工程の制御とコンピューターシミュレーション

展 望

野 村 宏 之\*・寺 嶋 一 彦\*<sup>2</sup>

## Computer Simulation and Control of Processes in Shape Casting

Hiroyuki NOMURA and Kazuhiko TERASHIMA

### 1. 緒 言

鑄造工業では多品種少量生産、短納期、高品質・高付加価値、人材確保困難などの厳しい条件にきめ細かく対処していくためには、高度な技術により裏づけされた生産体制と管理システムのもとでの鑄物製造をさらにすすめる必要がある。今後の技術展開で特に望まれることは、コンピューター利用技術及び情報処理技術を積極的に取り込んでいくことであると考えられる。特に各種自動化技術の導入をはじめ、CAD/CAMの展開、工程やプロセスの制御及びコンピューター管理、品質情報のコンピューター管理、各種データベースの利用などFA化を推進する必要がある。これらを基礎として、生産活動や設備能力を高効率に管理する生産管理コンピューターシステムを構築し、生産システム全体の自動化および最適化をはかるトータルFAを指向する時期がきたといえる。このような方向での鑄造業の発展を期するためには、まず個々の要素技術の最適化をはかっておくことが最も重要と考えられる。

本稿では、現在主流を占め、将来とも鑄造法の基盤となり得る生型鑄造及び最近ニアネットシェイプ(Near net shape)成型法の一つとして発展が著しいダイカスト技術に目を向け、特に生砂型、金型設計と深くかわる造型プロセス制御や湯流れ最適化についての技術動向を述べる。無欠陥かつ高機能な鑄造製品を目標とすれば、一方では適正な鑄造方案と凝固管理が要求され、また他方では合理的な鑄型材料管理と造型管理が重要となってくる。これに関した要素技術についてみれば凝固シミュレーション法、材料組織及び変形解析法など各種技術計算が開発され、CAE(Computer Aided Engineering)として整備されつつある。しかし生砂、造型の管理や鑄

型設計についてはまだ経験的な要素が多く、望ましい鑄型が常に得られるような最適な材料処理システムや工程の設計、制御システムの確立が遅れている。この分野は、粉粒体の輸送、混練、変形、融体の流動、伝熱などを含む複雑なプロセスとなるが、これらも考慮した合理的な制御ないし管理システムの構築が望まれる。

ここでは、生型鑄造におけるシステムサンドの冷却、混練、造型の最適化及びダイカスト法におけるメタル流動とベントやゲート条件などキャビティ設計の最適化について著者らの研究成果を中心として展望を述べる。

### 2. 生型造型システムの最適化

#### 2.1 造型システムの現況と最適化因子

Fig. 1はシステムサンドの基本的な流れを示したもので、型砂は混練→造型→注湯→解砕→型砂回収→冷却→混練と循環する間に不純物が取り除かれ、新砂と粘結材の補給がなされる<sup>1)2)</sup>。型砂は循環中に、熱衝撃、摩耗、せん断や圧縮作用などを受け過酷な条件で使用されており、鑄型砂の品質安定化をはかることが是非とも必要である。そのためにはオフラインでの各種特性値管理のほかに、オンラインでの砂性状制御や造型性制御がきわめて重要となる。システムサンドの物理的特性値としては、粘結性、強度、充てん性、流動性、表面安定性、通気性などが代表的なものであり、またその構成要素としては含有水分、粘土分、粒度などがあげられる。これらの管理が不十分な場合には、鑄型や鑄物製品に、型落ち、型張り、ブローホール、引け巣、すくわれなどの欠陥を発生する<sup>3)4)</sup>。このようにシステムサンドにおいて考えるべき要素は多いが、まず個々のラインで問題となっている特性値と管理項目の絞り込みを行い、それらを管理限界内におさえ、かつ工程における動的な特性変化に備え

平成2年12月25日受付(Received Dec. 25, 1990)(依頼展望)

\* 豊橋技術科学大学教授 工博(Toyohashi University of Technology, 1-1 Hibarigaoka Tempaku-cho Toyohashi 441)

\*<sup>2</sup> 豊橋技術科学大学助教授 工博(Toyohashi University of Teohnology)

Key words: sand casting; cooling of sand; sand mulling; computer flow analysis; SMAC method; adaptive control system; die casting process.

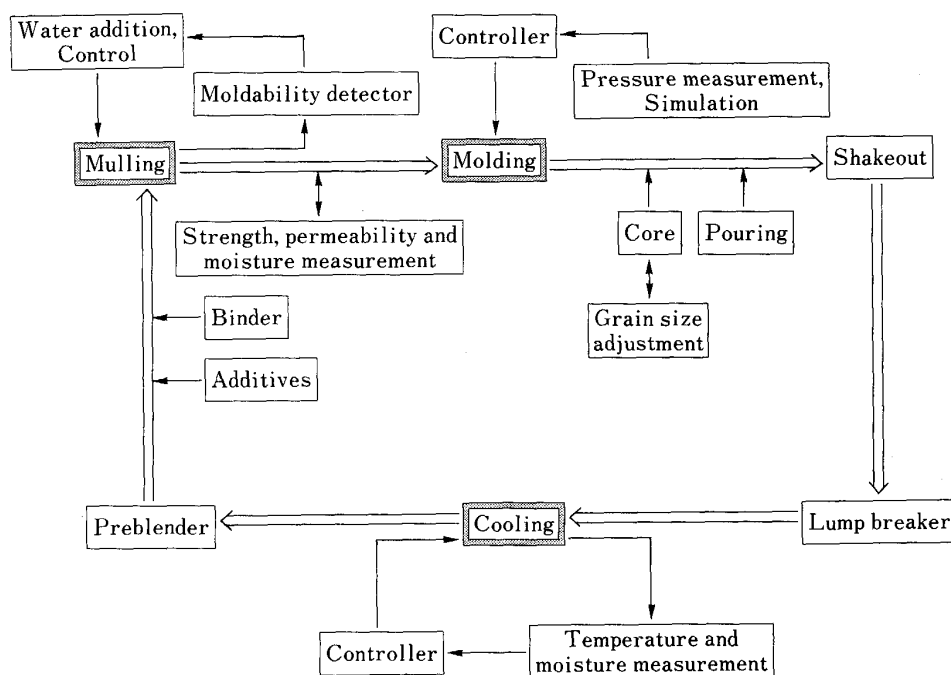


Fig. 1. Schematic diagram for total sand system in foundry.

てオンライン・コントロールをおこなうことが合理的と考えられる<sup>5)</sup>。

上記の鑄型砂循環システムで鑄型品質に大きく影響するサブシステムとしては、回収型砂の冷却、混練、造型があげられる。型砂循環システムの最適化因子としてまず第一に回収砂の冷却温度が問題となる<sup>6)7)</sup>。また混練を短時間に終了するには適度な湿潤状態にある回収砂を確保する必要がある。このため冷却工程では、型砂の温度、水分の同時制御（多変数制御）を行うことが望まれる。次いで混練工程では、例えばスクイーズが関係する造型においてはコンパクタビリティ（Compactability）<sup>†</sup>やモルダビリティ（Moldability）<sup>†2</sup>、またブローイング造型やエアインパクト法などでは型砂をまずキャビティ各部分に円滑に移動させるめやすとなるフロービリティ（Flowability）<sup>8)†3</sup>なども要因になると考えられる。型砂の造型性を表す尺度としては、一般にコンパクタビリティとモルダビリティを用いるのが適切であるとされている<sup>9)</sup>。両者には1対1の対応関係があるので、実際の混練プロセスでは、最も適した造型砂への制御指標としてそれらを使えば良いと考えられる。さらに前述の流動性（フロービリティ）などを考える場合には、オフラインであらかじめ型砂粒度や粘結材配合量などを望ましい範囲内に調整しておくことが必要である<sup>8)</sup>。

現在造型の主流となりつつあるブローイング法など空

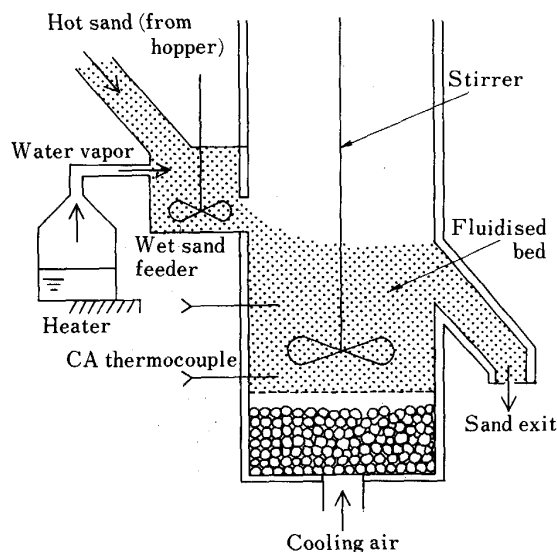


Fig. 2. Illustrative figure of continuous sand cooling apparatus.

気媒体を用いた造型法では、粉粒体の挙動が複雑である。金型キャビティ内に鑄型材料が適正に充てんされて均一に圧縮成型されるためには、輸送媒体としての空気の処理が重要である<sup>1)33)</sup>。吹込み条件とキャビティ設計の合理化のためには、キャビティ内の混相流解析や砂層圧縮、成型機構の解析が必要である。

## 2.2 型砂冷却プロセスの制御

望ましい型砂冷却システムを開発していくためには、まず型砂冷却特性と機構を究明し<sup>10)~15)</sup>、次いでそれらを反映した冷却制御系を組み立てることが重要であ

† 一定加圧力条件のもとでの混練型砂の圧縮度を表すパラメーター

†2 混練型砂が一定メッシュ間隔の篩目から落下する割合であり、型砂の粘結性を表すパラメーター

†3 一定外力条件のもとで混練砂の流れやすさと変形しやすさを表すパラメーター

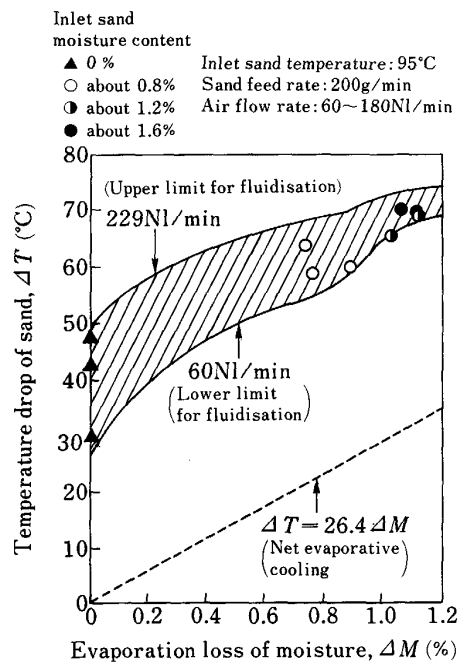


Fig. 3. Relation between temperature drop of sand  $\Delta T$  and evaporation loss of moisture  $\Delta M$ .

る<sup>16)~18)</sup>。Fig. 2 は著者らによる流動層による型砂連続冷却装置の概要図である<sup>17)18)</sup>。冷却プロセスの熱物質移動に関する非線形連立微分方程式を用いてコンピューターシミュレーションを行った結果、流動層冷却の過渡状態から定常状態の広い範囲にわたって実験結果を説明できることがわかった<sup>15)</sup>。Fig. 3 は、乾燥砂から湿り砂にわたる範囲で蒸発水分量  $\Delta M$  と流動層型砂冷却温度  $\Delta T$  との関係を示したものである。初期の水分値と温度によるが、型砂-空気間の対流伝熱による冷却は全体の冷却  $\Delta T$  から蒸発潜熱によるもの (Fig. 3 で点線以下の領域に相当する) を差し引いたものに相当し、これは全体においてかなりの冷却効果を与えていることがわかる。このことは装置設計において砂粒子流動化など効率的な空気接触方式の実現が重要であることを示している。また冷却効率を高めるにも事前に散水による型砂への均一な水分浸透を図る必要がある。

冷却工程での返り砂の温度、水分制御については、冷却装置の入口において、流入型砂温度や水分の測定を行い、それに基づき操作量を決定するフィードフォード (FF) 方式が実作業ではよく用いられている<sup>5)</sup>。しかし動的挙動を考慮した高精度な制御方式は未確立であり、ここでは、現代制御理論を用いた例を述べる。

まず非線形冷却プロセスモデルを線形化し、離散時間系に変換すると次式を得る<sup>15)~17)</sup>。

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Dv(k) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$y(k+1) = Cx(k) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし、状態変数  $x = [T_s, T_a, T_r, X_a, M]^T$ , 出力変数  $y = [T_s, M]^T$ , 操作変数  $u = [q_a, M_{i2}]^T$ , 外乱変数  $v =$

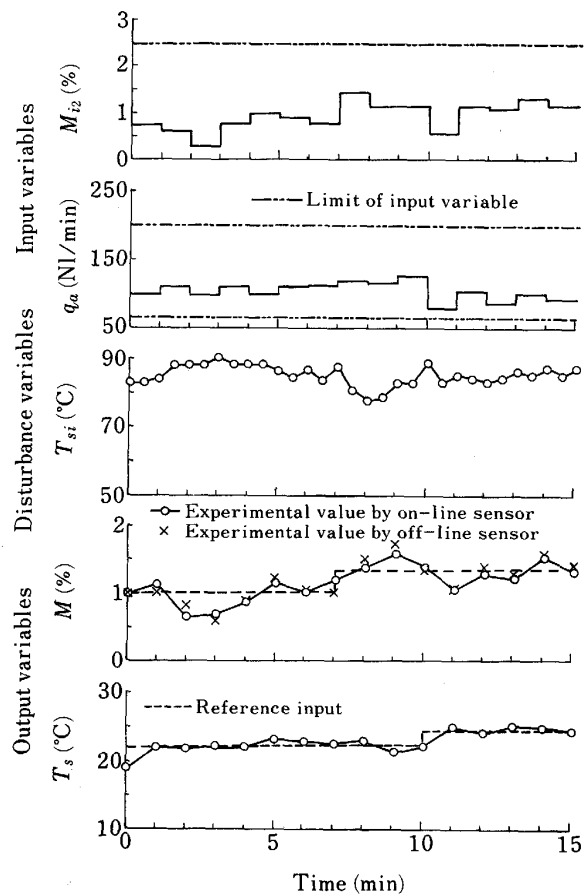


Fig. 4. The experimental result of LQI control with observer (measurement of both controlled variables).

$[T_{si}, M_{i1}, q_s]^T$  であり、 $A, B, C, D$  は定数行列である。また  $T$  は転置行列であることを示す。なお、 $T_s$ : 流動層内 (排出) 型砂温度、 $T_a$ : 流動層内空気温度、 $T_r$ : スターラー温度、 $X_a$ : 流動層内空気湿度、 $M$ : 流動層内 (排出) 型砂含有水分率、 $q_a$ : 流入空気量、 $M_{i2}$ : 添加水分率、 $T_{si}$ : 流入型砂温度、 $q_s$ : 流入型砂量である。

次に、(1), (2) 式に対して、近年有用性が広く認識されてきた LQI (Linear, Quadratic, Integral; 積分器付き最適レギュレーター)<sup>19)</sup> を用いて、状態変数と出力値のフィードバックによる制御を行った。LQI では、制御系の速応性とエネルギー消費の両者を考慮しており、それらのバランスを表す重みを与えると一意的に制御ゲインが求まり、最適な操作量が決定される。なお、制御対象プロセスの状態変数  $x(k)$  のうち、いくつかは測定できない場合、状態観測器 (オブザーバー)<sup>19)</sup> を設けてそれらを推定できる。ここでは、 $[T_a, T_r, X_a]$  の推定にオブザーバーを用いた。

Fig. 4 は、Fig. 2 の流動層を用いて砂温と水分値の計測を行い、フィードバックをした場合の LQI 制御の実験結果である。水分値にややばらつきが多いものの良好な制御が行われている。また途中の水分と温度の目標

値変更に対しても追従性は良い。なおこの研究では、熱電対と電気抵抗式水分センサーをオンライン計測に用い、コントローラ演算部として16ビットコンピュータを使用した。

著者らは、他にも、外乱が計測できる場合や、制御変数の片方が測定できない場合に対して、各種制御系を構築し、制御精度、計測時間、オンラインへの適用性の面より検討を行っている<sup>18)</sup>。

### 2.3 型砂混練プロセスの制御

従来大部分の混練は非定常のバッチプロセスである。混練操作では注水制御が重要となるが、操作量としての水分の型砂からの抽出は不可能であるため、過注水によるオーバーシュートは許されない。一方、粉粒体の混練は気温や湿度などの環境因子にも影響をうける複雑なプロセスである<sup>20)~22)</sup>。したがって、制御の最適化は困難であると考えられるが、ここでは上記のような条件でも合理的な制御が可能な適応制御<sup>23)</sup>を活用した例を述べる。なお以下の研究で使用型砂は、けい砂(平均粒径200 $\mu\text{m}$ )、ナトリウムベントナイト、水の3成分で構成されたものである。また型砂混練性状の評価値としては型砂の粘結性を表すモルダビリティ指数(M値)を用い、目標M値として一般に最適とされている75とした<sup>9)</sup>。

Fig. 5 はベントナイト配合率6~10%の型砂に対して、第1, 2, 3次注水に対する混練動特性実験結果を示す。各ベントナイト配合率で必要水分量は異なり、また1次注水と2次注水以後ではプラントゲイン、すなわち $K=(\text{M値の変化量})/(\text{注水添加量})$ は大きく変化している。これは、M値90以下になると水分添加に対するM値の感度が高くなることを表し、この領域でのM値検知による水分コントロールが重要であることを示す。この線形領域に対して、2次注水によるプラントパラメータのバッチ間変動については、時定数 $T0.2\sim$

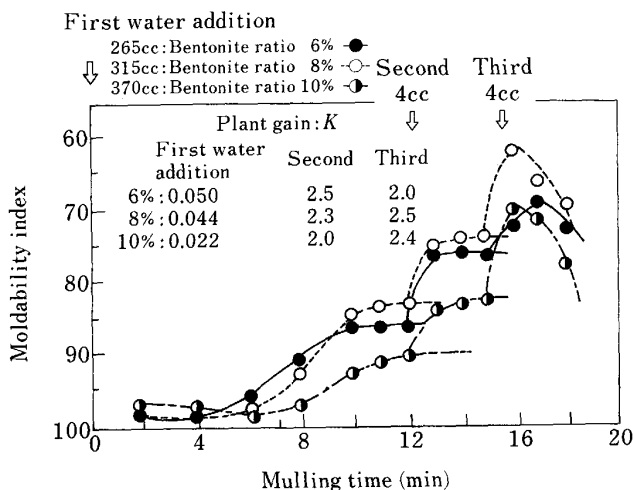


Fig. 5. Dynamical behavior of mulling process for various bentonite ratios.

0.4(min)であり、ゲイン $K0.8\sim2.5$ (M値/cc)であることがわかった。この原因は、混練機の状態、環境状況の変化によるものと考えられた<sup>24)</sup>。したがって本研究では適量の1次注水の後、オンライン入出力データによりゲイン、時定数を逐次推定しつつ制御する適応制御を採用した。なお、ファジイ理論による初期(1次)注水の合理的な決定については4節で述べる。

プラントモデル式は、動特性実験結果より1次遅れモデルを用いた。

$$y(k+1) = \alpha_2 y(k) + \alpha_1 u(k) \quad (3)$$

ただし、 $y(k)$ はM値を表し、 $\alpha_1 = k\{1 - \exp(-\tau/T)\}$ 、 $\alpha_2 = \exp(-\tau/T)$ で、 $\tau$ は、サンプリング周期である。間接法MRACS(Model Reference Adaptive Control System)の制御アルゴリズムは次のとおりである。

$$\hat{\alpha}(k) = \hat{\alpha}(k-1) - \Gamma \zeta(k) (\hat{\alpha}(k-1)^T \zeta(k) - y(k)) / (1 + \zeta(k)^T \Gamma \zeta(k)) \quad (4)$$

$$u(k) = (y_m(k+1) - \hat{\alpha}_2(k)y(k)) / \hat{\alpha}_1(k) \quad (5)$$

ただし、 $\hat{\alpha}(k) = [\hat{\alpha}_1(k), \hat{\alpha}_2(k)]^T$ 、 $\zeta(k) = [u(k-1), y(k-1)]^T$ であり、 $\Gamma$ は正定行列である。ここで、 $\hat{\alpha}(k)$ は未知パラメータ $\alpha_1, \alpha_2$ の推定値、 $u(k)$ は制御入力、 $y_m(k)$ は規範(目標)出力である。

Fig. 6 は制御実験の一例を示す。ここでは各時点での目標値は設定M値とせず、望ましい過渡特性を規範モデルによって与え、操作量を添加水分量、制御量をM値とするモデル規範型の適応制御方式を用いている。図は2次注水を行う10min以後の制御経過を示している。

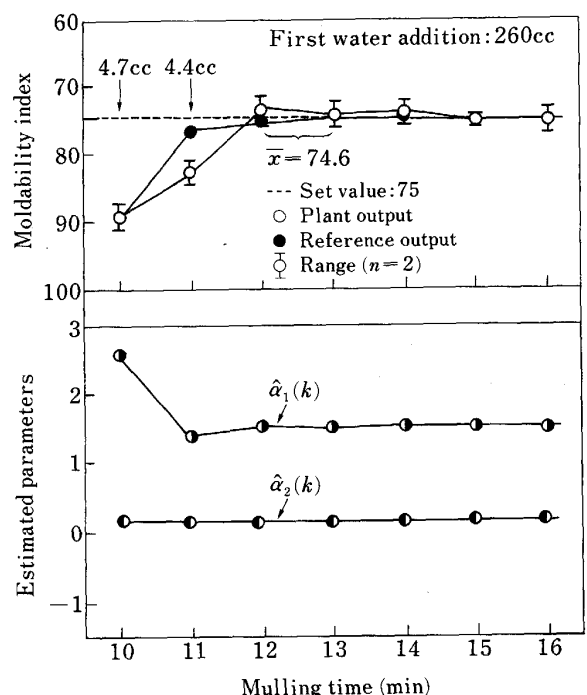


Fig. 6. The control experiment by MRACS (bentonite ratio 6%).

Table 1. Comparison of control experiments by several methods.

|                                         | Control precision                      |                    | Bentonite ratio | Batch number |
|-----------------------------------------|----------------------------------------|--------------------|-----------------|--------------|
|                                         | Average of M value<br>(Set value : 75) | Standard deviation |                 |              |
| Feedforward<br>(Prediction by AR model) | 76.0                                   | 1.92               | 8%              | 19           |
| Conventional PID                        | 75.3                                   | 1.72               | 8%              | 30           |
| Conventional LQI                        | 74.5                                   | 1.25               | 8%              | 30           |
| MRACS                                   | 74.4                                   | 0.77               | 6~10%           | 20           |

るが、パラメーター  $\hat{a}(k)$  を推定し、それにともない適切な制御ゲインにより、M 値はオーバーシュートなく、精度良く目標値に制御されていることがわかる。

Table 1 は混練制御における各種制御手法の比較を示したものである<sup>24)</sup>。AR (Auto Regressive) モデル<sup>25)</sup> によるフィードフォワード方式や、固定制御ゲイン方式である PID<sup>26)</sup>、LQI と比べ MRACS の制御精度が良い。適応制御方式では変動するプロセスにおいて制御パラメーターが可変であり、実際の性状推移への追従性が良く、これが四つの制御方式のなかで最も精度が優れている理由と考えられる。なお著者らは、回収砂に対しても同様の結果を得ている<sup>55)</sup>。

粉粒体の混練は容器内での物性値のばらつきや測定誤差を生じやすい工程である。著者らはこれに対応するため、ソフト的な手法であるカルマンフィルターを用いるなど<sup>55)</sup>、より一般的でかつインテリジェントな混練制御方式の究明を続けている。

## 2.4 造型プロセスの最適化

前述したように、最近の造型法には圧縮空気利用によるプロセスが多くみられ、鑄型砂と空気の混相流れの特性が造型性の良否に直接かかわると考えられる。型砂がキャビティ中に吹き込まれる際の、圧力挙動や空気流線など、さらに吹込みエネルギーと鑄型性状の関連について、従来かなりの研究がみられる<sup>27)~33)</sup>。しかし吹込み造型は高速現象を伴い、鑄型性状支配因子の究明が遅れており、型砂吹込み挙動、充てん圧縮機構、鑄型成型過程の一連のプロセスのモデルがまだ確立されておらず、造型工程の最適化は現状では困難である。著者らの研究室ではキャビティ内の混相流解析、型砂堆積層中の流れ、砂層圧縮、成型をシーケンシャルに取り扱えるアルゴリズムを開発しつつあり、吹込み条件とキャビティ設計の合理化を目ざしている。次にその概要を、代表的な吹込み造型の一つであるブローイング造型について述べる。

混相流モデルとしては、固気滑りなしの二次元均質モデル<sup>34)</sup>を採用し、有限要素法により鑄型砂のキャビティへの流入過程と堆積型砂層の圧縮成型過程を数値計算した。なお空気による砂層の圧縮成型（つき固め）プロセスは、輸送されてくる型砂の有する運動エネルギーと堆積砂層中の流気エネルギーの両者で決まる粉体圧により支配されることが著者らの研究ですでにわかっている<sup>32)33)</sup>。ここでは一例として内部障害物をもつ薄い直

方体キャビティに対してのシミュレーション例を示す。Fig. 7 にブローイング開始後の三つの時間における、型砂-空気混相体の速度分布、その時間までの圧縮変形砂層、新たな堆積砂層を示す。さらに、Fig. 7 上部にキャビティ内で型砂の存在する部分（速度分布と砂層があるところ）のスケッチを描いた。特に障害物の側部から後方部にかけての型砂充てんと変形の特徴的な挙動が示されている。一方 Photo. 1 はブローイング実験において高速度カメラを用いて充てん状況を撮影した結果である。写真では流動中の鑄型砂と堆積、変形砂層の区別が不明瞭であるが、Fig. 7 のシミュレーション結果で速度ベクトルと堆積、変形砂層が存在しない領域（スケッチで白い部分）が Photo. 1 のキャビティ内空白部（白色部）に相当すると考えられる。図と写真より、型砂存在部分についてのシミュレーション結果と実験結果はほぼ対応しており、今後本ブローイングアルゴリズムをブローイング造型時の鑄型砂の動的挙動の予測に利用してゆくことができる。

吹込み造型におけるキャビティ設計、特にベント（排気孔）配置やベント断面積の決定の観点からみると、上述の混相流解析を用いてまず均一な充てんと成型が可能となる流線設計を行う必要がある。さらに適当な制御系を構成して実ラインで鑄型性状を最適に調整することが望まれる。これについては著者らは学習制御を導入した手法による鑄型性状の最適化法を提案している<sup>35)</sup>。

## 3. ダイカスト法における湯流れと金型設計の最適化

### 3.1 製品性状と湯流れの関連

ダイカスト法は、金型キャビティに溶湯を高速で注入することにより製品を得る鑄造法であり、種々の複雑形状の鑄物を短時間で大量に生産することができる。製品の寸法精度や鑄肌は他の鑄造方法に比べ優れている反面、高速、高圧の射出プロセスに起因する鑄造技術上のファクターがしばしば製品品質に影響し、問題となる。従来鑄造条件の設定には経験に基づく面が多く、その最適化が製品歩留りの向上やダイカスト製品の品質向上、高機能化を図るうえで不可欠となっている。

ダイカスト法では金型キャビティへの溶湯の射出、凝固、冷却、製品取りだしのサイクルをもって操業されるが、なかでも溶湯充てん時のキャビティ内流動状態は、

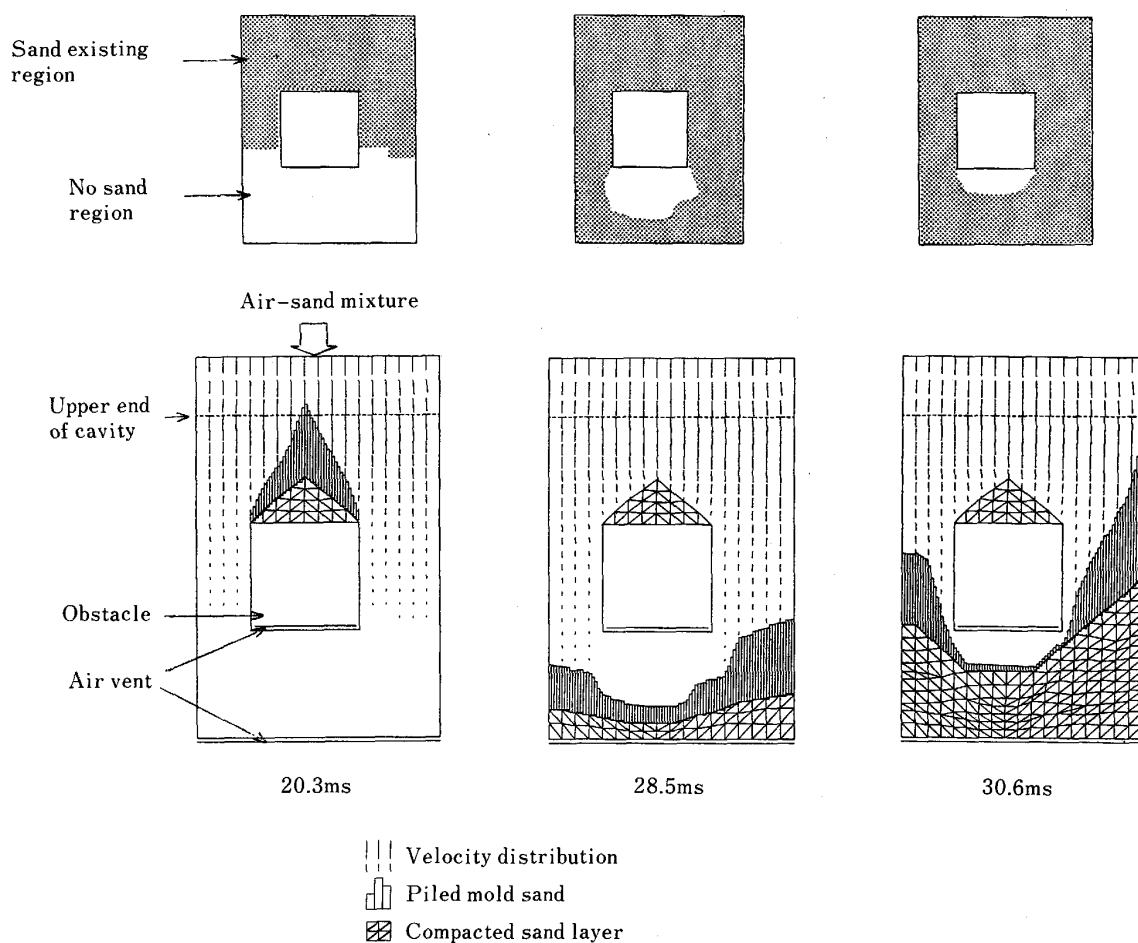


Fig. 7. The simulation result of mold sand blowing process.

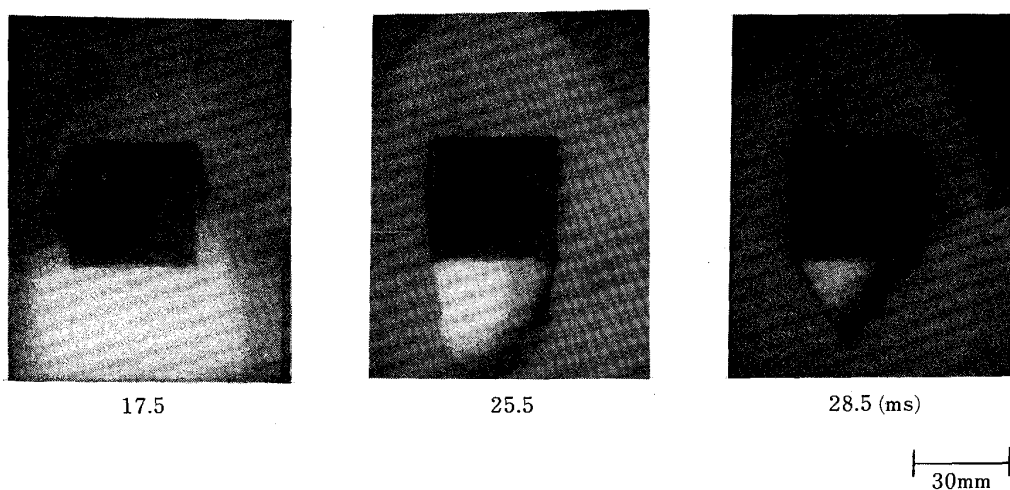


Photo. 1. Behavior of mold sand blowing into the cavity.

凝固と同様に製品品質に直接影響を及ぼすことが知られている<sup>36)</sup>。ダイカスト法による鑄造において見られる欠陥ないし不良は大別して、1) 外観不良、2) 内部欠陥、3) 寸法不良、4) 材質上の欠陥、5) その他、があげられ<sup>37)</sup>、そのうち1) では湯回り不良、湯境、湯

じわなど、2) ではポロシティ生成、空気や介在物の巻込みなどがキャビティ内の湯流れに起因する欠陥として知られている。したがってこれら欠陥を防止し製品の信頼性を高めるためには溶湯の流れ状態を定量的に把握し、射出条件や金型キャビティ形状などを最適化するこ

とが是非とも必要である。

### 3.2 湯流れ研究の概観

上記のように湯流れの重要性を指摘した基礎研究は従来多く行われ、主に溶湯を用いた金型内の流動挙動の調査、及び数値シミュレーションによる湯流れの研究がなされてきた<sup>38)~52)</sup>。中村らは Al 合金を用いて湯流れと材質の関連を調査した一連の研究を行い<sup>43)~45)</sup>、特に最終充てん領域での湯流れ速度及びキャビティ内圧力挙動の欠陥発生への影響、また健全な品質を確保するための射出速度の切替えやスリーブ内の溶湯充てん率などについて究明した。ダイカスト湯流れは一般にゲート付近で数十 m/s に達する高速流れとなり、キャビティ内の流れ状態を正確に把握することは実験的にも困難である。そこで数式モデルに基づいてコンピューターシミュレーションを行い、流動を予測する研究も多くみられる。安斎らは擬三次元及び改良擬三次元のモデルを用いて円板状、平板状キャビティへの湯流れシミュレーションを行い<sup>46)~48)</sup>、短時間で精度の良い流れ予測をするための計算アルゴリズムを提案している。岩田らも上記モデルを用いて実際のダイカスト充てん挙動を考察し、擬三次元モデルの有効性を確認している<sup>49)</sup>。また大塚らはプラスチック成形などによく利用される FAN 法を発展させ<sup>50)</sup>、ダイカスト問題に適用し、湯流れと伝熱を考慮して実際のキャビティのメタル充てん状況を計算し、欠陥発生を予測を行っている。

以上湯流れに着目した研究を概観したが、従来報告されたシミュレーション技術では複雑な三次元形状のキャビティに対して充てん挙動を精度良く把握するにはまだ不十分であり、したがって欠陥発生位置の予測、最適な金型設計、さらには射出条件合理化のための知見が十分には得られない。最近では大容量、高速度のコンピューターの発展により高速で複雑な三次元流れの解析が可能となっており、今後ダイカストプロセスのシミュレーションにも幅広く応用されていくことが期待される。次に著者らの、三次元湯流れシミュレーションとそれのキャビティ設計への利用について述べる<sup>51)52)</sup>。

### 3.3 三次元湯流れシミュレーションとキャビティ最適化

基礎式として特別な乱流モデルは使用せず、次の非圧縮のナビエ・ストークス式と連続の式を用いて解析する。

$$\rho D\mathbf{v}/Dt = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (7)$$

ここで  $\mathbf{v}$ : 流体速度,  $p$ : 圧力,  $\rho$ : 流体密度,  $\mu$ : 粘性係数,  $\mathbf{g}$ : 重力加速度であり,  $D/Dt$  は実質微分を表す。上式を数値的に解くにあたり差分法を用いるが、ダイカストの充てん解析では複雑な自由表面流れも取り扱えることが必要であり、著者らは SMAC (Simplified Marker And Cell) 法<sup>53)</sup>を用いてシミュレーションを行った。解析対象としてここでは、キャビティ肉厚が射

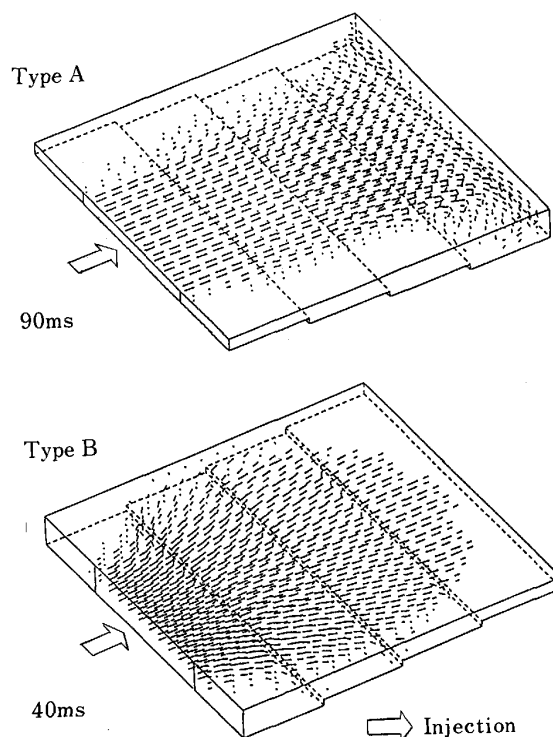


Fig. 8. The 3-D velocity profile from the simulation for two cavities.

出ゲートから離れるとともに、ステップ状に減少するタイプ A と増加するタイプ B の二つのキャビティをとりあげる。

Fig. 8 は両タイプのキャビティについて速度ベクトルの計算値の一例を示す。ゲートでの射出速度は 2 m/s である。図では厚み方向は 5 層に分割して計算されており、特に肉厚が増加するキャビティでは流れが対向壁に衝突した後、両横に向かう流れと厚み方向にもぐりこむ流れにより特徴づけられるパターンが示されている。このような計算を流体がキャビティを満たすまで行えば、その結果から、最終充てん領域とそこでの充てん速度、合流部 (Weld line)、巻込み空気残留位置など製品品質に対して直接関連する重要な情報を得ることができる。その例については後述する。

Fig. 9 は数値計算で得られた流体のフロントラインの時間変化と、水モデル実験で電極探針を使用して求めた結果を比較して示したものである。これからフロントラインの進行状況及び形状ともほぼシミュレーションで予測できることがわかる。これらの計算情報は、製品欠陥防止のための金型キャビティの設計にも有用な知見を与える。例えば空気、介在物など巻込み異物質は、キャビティ内で流体の到達が遅れる所、フロントラインと壁による閉ループの生成場所、渦流生成場所などで残留する可能性が大きく、それらの場所をシミュレーションで予測し、キャビティのベント (排気孔) 設計にいかすことができる。その一例として Fig. 10 に計算で予測した

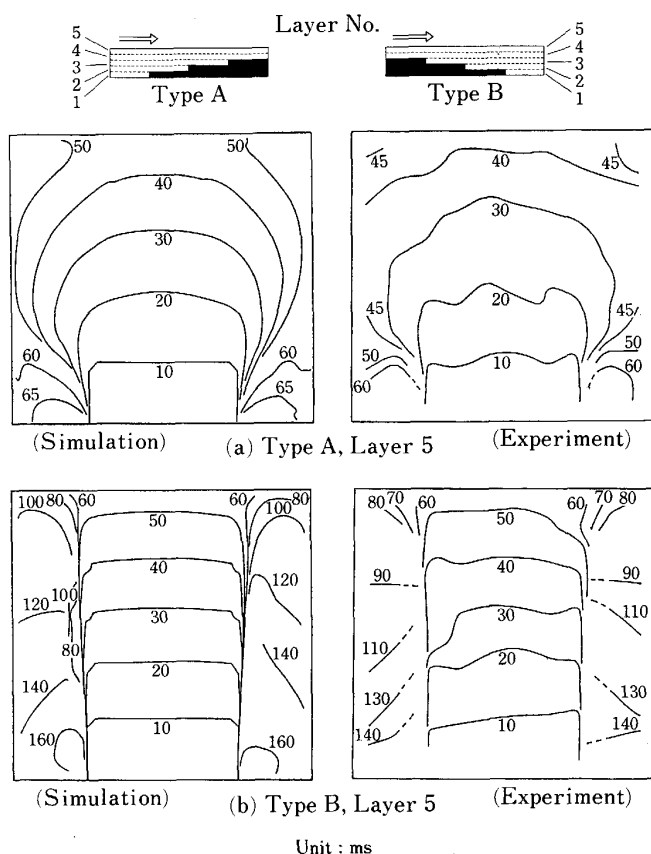


Fig. 9. Comparison of flow front line between the simulation and the experiment.

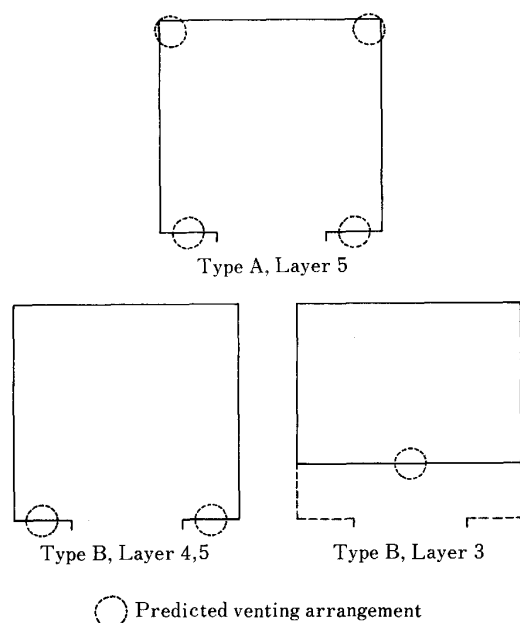


Fig. 10. Venting arrangement predicted from the simulation.

ベント配置の結果を示す。予測結果に基づいて適正にベントを配置することにより空気、介在物など異物質の除去をはかることができ、品質の向上を期待することがで

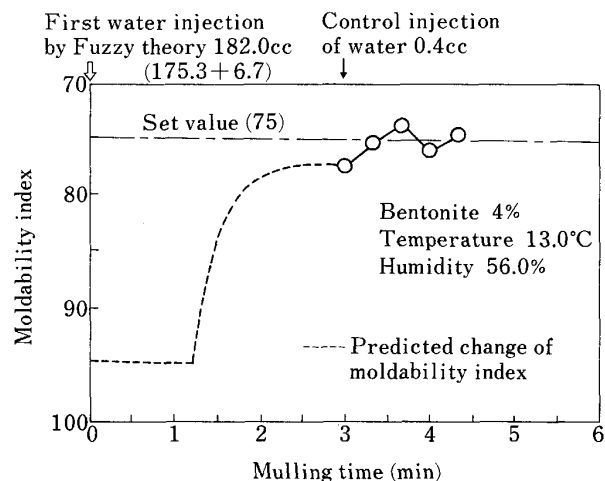


Fig. 11. Hybrid adaptive control system using Fuzzy prediction.

きる。

ダイカストの充てん挙動は高速現象であり、充てんシミュレーションを高精度で安定良く行うことは現状では必ずしも十分ではない。今後計算アルゴリズムをいっそう改良、発展させることが必要である。また著者らは、ダイカスト法、低圧鑄造法など幅広い金型鑄造での充てん挙動の予測とキャビティ最適化のため、エネルギー方程式も加えたモデルで考察を行いつつある。

#### 4. 知識工学の利用

前述したようにコンピューター援用技術、情報処理技術を鑄物製造業において導入し、合理的な生産体系を構築していくためにはまず個々の要素工程に対する合理的なシステム造りが問題となる。鑄造プロセスは物理的モデルに立脚して解明されているものもあるが、一方では経験的要素が多く、熟練者によるノウハウが重要となる工程も多い。経験的な面、あいまいな挙動を含む鑄造や造型のプロセスの制御や管理に対して AI (Artificial Intelligence)、ファジィ理論など知識工学の利用が今後広がると予想される。

一例として鑄型砂の混練について述べる。2・3 で述べたように従来鑄型砂など粉粒体の混練は気温や湿度など環境因子により影響を受けやすく、注水はおもに経験に頼って行われ不安定であった。著者らは混練装置への初期注水量の合理的決定に対してファジィ理論を適用した混練制御の研究を行っている<sup>54)</sup>。Fig. 11 は結果の一例を示す。図では、温度や湿度を考慮した通常の回帰式による一次注水量 175.3 cc に対してファジィ理論を用いれば 6.7 cc 補正されることを示しており、結果として混練初期に追加注水する必要もなく合理的に制御注水に移行でき、混練プロセスの単純化と時間短縮を図ることができる。このような研究の動きは鑄造分野でまだスタートラインにいたばかりであり、関連データベース



の整備が必要とされるなど、生産現場で活用される成果となるまでにはかなりの期間を要すると考えられる。しかし数式モデル化が困難な工程に対して今後先端的な理論を導入しつつ最適化を進めていくことが必要である。

## 5. 結 言

鑄造業が 21 世紀に向かって素形材製造分野において確固たる地位を占め、魅力ある産業として発展するには、常に信頼性の高い製品を供給できるように鑄造システムの最適化を推進し、高度の技術により保証された生産体制を築く必要がある。そのためにはまず個々の要素工程の合理化を行っていくことが不可欠であり、本稿ではその観点からのアプローチ、研究成果を述べた。今後さらにコンピューター援用によるプロセス解析や合理的理論に基づく制御設計などのエンジニアリングをはばひろく適用していくことが望まれる。

鑄造や造型においては理論的究明が困難なプロセスや複雑で経験に頼る工程も多く、先端的な技術が育ちにくい面があるが、逆に今後 AI、ファジィ理論など知識工学の導入により新たな技術展開が期待される。これら学際分野の知見と既存の鑄造技術をタイアップさせて工程やシステムのインテリジェント化をすすめ、コンピューター統合生産システム (CIM) への基盤を整備していくことが必要である。

## 文 献

- 1) 坂野武男, 野村宏之, 寺嶋一彦: 鑄物, **60** (1988), p. 359
- 2) C. R. McMULLEN, A. W. WARD and P. E. WARD: Modern Casting, **68** (1978) Oct., p. 50
- 3) 研究報告 25 (システムサンドの品質評価と制御に関する研究) (日本鑄物協会システムサンドの品質評価と制御に関する研究部会編) (1980)
- 4) 若尾芳之: 鑄物, **50** (1978), p. 107
- 5) 若尾芳之: 鑄物, **59** (1987), p. 16
- 6) P. V. PALMER: Foundry Trade Journal (1973), p. 607
- 7) 志村 洋, 春日井俊作, 鈴木喜好: 鑄物, **46** (1974), p. 462
- 8) L. M. DIRAN, A. J. SHAFER and H. F. TAYLOR: AFS Trans., **60** (1952), p. 803
- 9) H. Md. ROSHAN: Foundry Trade Journal (1975 年 9 月 4 日), p. 333
- 10) 大中逸雄, 喜多幸雄, 千々岩健児: 鑄物, **46** (1974), p. 124
- 11) P. W. HEINE, J. S. SCHMACHER and R. A. GREEN: AFS Trans., **84** (1976), p. 281
- 12) J. H. MORGAN: Foundry Trade Journal (1983 年 6 月 16 日), p. 777
- 13) H. NOMURA, M. WATANABE and T. BANNO: Trans. Japan Foundrymen's Soc., **5** (1986), p. 33
- 14) 野村宏之, 寺嶋一彦, 坂野武男, 尾本宗之: 鑄物, **57** (1985), p. 574
- 15) 野村宏之, 寺嶋一彦, 坂野武男, 柘植 厚: 鑄物, **59** (1987), p. 26
- 16) K. TERASHIMA, H. NOMURA and T. BANNO: Proc. 10th IFAC World Congress, **2** (1987), p. 182
- 17) 寺嶋一彦, 野村宏之, 坂野武男, 門田和也: システムと制御, **31** (1987), p. 537
- 18) 寺嶋一彦, 野村宏之, 坂野武男, 野村貞夫: 計測自動制御学会論文集, **24** (1988), p. 730
- 19) 高橋安人: システム制御下巻 (1982), p. 378, p. 399 [岩波書店]
- 20) H. W. DIETERT, A. L. GRAHAM, T. H. HANNA and R. T. DAKSIEWICZ: AFS Trans., **27** (1963), p. 393
- 21) 掛 昭次, 田中佑二, 永久正行, 山本義昭: JACT NEWS, **332** (1984), p. 29
- 22) 西田 理, 内村勝次, 落合一彦, 戸荻吉孝: 鑄物, **57** (1985), p. 593
- 23) 市川邦彦: 適応制御 (1984), p. 268 [昭晃堂]
- 24) 寺嶋一彦, 野村宏之, 坂野武男, 佐藤健司: システム制御情報学会論文誌, **1** (1988), p. 17
- 25) 寺嶋一彦, 野村宏之, 坂野武男, 白井祥枝: 鑄物, **58** (1986), p. 33
- 26) 寺嶋一彦, 野村宏之, 坂野武男, 浅野裕昭: 鑄物, **60** (1988), p. 91
- 27) V. L. LESNICHENKO: Russian Casting Production (1975) **11**, p. 471
- 28) M. UZAKI: AFS Trans., **88** (1980), p. 529
- 29) 松浦 誠, 片島三郎, 金山良治: 鑄物, **55** (1983), p. 460
- 30) 松浦 誠, 片島三郎: 鑄物, **56** (1984), p. 163
- 31) 松浦 誠, 片島三郎: 鑄物, **57** (1985), p. 174
- 32) 野村宏之, 坂野武男, 寺嶋一彦, 新実 真: 鑄物, **60** (1988), p. 378
- 33) 前田安郭, 野村宏之: 鑄物, **61** (1989), p. 687
- 34) 流体力学ハンドブック (日本流体力学学会編) (1987), p. 582 [丸善]
- 35) 厚美智浩, 前田安郭, 寺嶋一彦, 野村宏之: 日本鑄物協会第 117 回全国講演大会講演概要集 (1990), p. 65
- 36) たとえば菅野友信, 植原寅藏: ダイカスト技術入門 (1975), p. 95 [日刊工業新聞社]
- 37) 木村則行: 鑄物, **60** (1988), p. 716
- 38) B. SACHS: ASTM Bulletin (1953) Sep., p. 117
- 39) W. E. SMITH and J. F. WALLACE: AFS Trans., **71** (1963), p. 325
- 40) H. K. BARTON: Machinery and Production Engineering, **26** (1967) July, p. 181
- 41) F. C. BENNETT: Foundry, **89** (1961) Dec., p. 75
- 42) H. K. BARTON: Foundry, **91** (1963) July, p. 52
- 43) 岩田 靖, 戸沢勝利, 山本善章, 中村元志, 笹岡晃次: 軽金属, **36** (1986), p. 10
- 44) 岩田 靖, 戸沢勝利, 山本善章, 中村元志, 水野邦明, 坪井晋吾: 軽金属, **37** (1987), p. 48
- 45) 山本善章, 岩田 靖, 中村元志: 鑄物, **60** (1988), p. 770
- 46) 安斎浩一, 内田敏夫, 片岡勝利: 鑄物, **60** (1988), p. 763
- 47) 安斎浩一, 内田敏夫: 鑄物, **62** (1990), p. 90
- 48) 安斎浩一, 内田敏夫, 片岡勝利: 鑄物, **62** (1990), p. 174
- 49) 岩田 靖, 米倉浩司, 山本善章: 鑄物, **62** (1990), p. 536
- 50) 大塚幸男, 小野高興, 水野邦明, 松原永吉: 鑄物, **60** (1988), p. 757
- 51) 野村宏之, 寺嶋一彦, 慶島浩二: 鑄物, **63** (1991), p. 425
- 52) 野村宏之, 慶島浩二, 寺嶋一彦: 鑄物, **63** (1991), p. 431
- 53) A. A. AMSDEN and F. H. HARLOW: Los Alamos Scientific Lab. Report La-4370 (1970)
- 54) 笹川英一郎, 寺嶋一彦, 野村宏之: 第 33 回自動制御連合講演会概要集 (1990), p. 381
- 55) K. TERASHIMA and H. NOMURA: Proc. IASTED International Congress (Control '90) (1990), p. 28