

平成 21 年 4 月 2 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760519  
 研究課題名 (和文) CFDシミュレータによる鑄造欠陥解析と鑄造プロセスの最適制御システム開発  
 研究課題名 (英文) Analysis of casting defect by CFD simulator and development of optimum control system for casting process

## 研究代表者

矢野賢一 (Kenichi Yano)  
 岐阜大学・工学部・准教授  
 研究者番号：90314088

研究成果の概要：本研究では、CFD (数値流体力学) モデルを用いて、注湯動作から鑄込み、さらには鑄型搬送までの溶湯の湯流れ解析を行うことにより、一連の鑄造プロセスにおける鑄造欠陥の発生原因を追求し、鑄造欠陥発生の防止と製品品質向上を可能とする鑄造プロセスの最適制御システムを開発することを研究目的とし、研究開発を行った。

結果として、勢いよく流れた溶湯が砂型内の堰を破損させたり、鑄型静止時にはほとんど見られない凝固欠陥の発生確率を高くしている問題に対し、CFD (数値流体力学) モデルを用いた溶湯の湯流れ解析を行うことにより、これら鑄造欠陥の発生原因を明らかにした。さらに、開発した最適入力導出ソフトウェアおよび制御系設計ツールを利用し、鑄造欠陥発生の防止と製品品質向上を実現する鑄造プロセスの最適制御システムを開発した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,300,000	0	2,300,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	270,000	3,470,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属生産工学

キーワード：鑄造

## 1. 研究開始当初の背景

鑄造産業は、日本国内で非常に活発な産業であると同時に、日本の基幹産業である自動車産業をはじめとするものづくり産業における重要な役割を担っている。昨今、本産業分野においては、中国をはじめとする東アジアや東南アジアへその生産場所が移ってきており、産業の空洞化や景気の低迷を招くおそれがある。この問題を打破するためには、

生産効率の向上・製品品質の向上・生産コストの低下を実現する新たな鑄物生産方式を創出する必要がある。本研究結果が実用化されれば、他にはまねのできないレベルにおいて生産効率の向上・製品品質の向上・生産コストの低下を実現でき、本地域における産業活性化に大きく貢献できると考える。それゆえ、日本における新産業創出および経済活性化のために、本プロジェクトを成功させることには大きな意義がある。本研究では、鑄造

メーカーにおける大きな課題であった casting プロセスにおける欠陥発生メカニズムの解明とその対策を打ち出すことを最大の目的とする。

## 2. 研究の目的

申請者らはこれまで、人間の持つ判断力、学習能力、または熟練技能を機械に備えることにより、下図のような機械を自律化・知能化させる知能機械システムの研究開発を行ってきた。

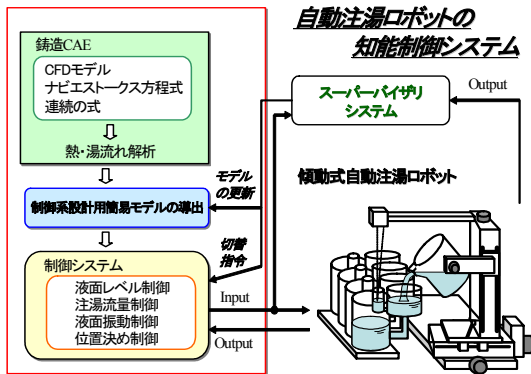


図1 シミュレーション結果1

その中でも、 casting プロセスを対象として、溶融金属の流体挙動を解析し、その挙動を制御する分野においては大きな成果をあげてきた。従来開発した自動注湯ロボットは産学協同プロジェクトとして、現在実用化を進めている。

## 3. 研究の方法

本研究では、 casting メーカーにおける大きな課題であった casting プロセスにおける欠陥発生メカニズムの解明とその対策を打ち出すことを最大の目的とし、以下の3点について研究を行う。

- (1) 空気巻き込み量を考慮したダイカストプランジャの最適速度制御
- (2) 注湯プロセスモデル構築法と注湯制御入力導出法の確立
- (3) ダイカストにおけるプランジャチップ形状の最適化

(1) 空気巻き込み量を考慮したダイカストプランジャの最適速度制御

### ①はじめに

ダイカストにおいて、スリーブ内の溶湯の流れが引き起こす空気巻き込みによる欠陥形成が問題となっている。しかしながら、スリーブ内の溶湯の流れが引き起こす空気巻

き込みによる欠陥形成などは解明されていない部分が多く、さらなる解析を行う必要がある。また、引け巣の発生を防止することのできるプランジャ速度の最適制御に関する問題は未解決であり、早急な解決が望まれる。そこで本研究では、 casting CAE を援用し、スリーブ内におけるプランジャの移動が引き起こす湯流れ挙動および空気巻き込み量を解析し、その製品品質への影響を評価するとともに、スリーブ内での空気巻き込み量を低減し、ダイカスト中の引け巣の発生を防止することのできる2段階速度切替法におけるプランジャ速度の最適化を行うことを目的とする。

### ②CFD シミュレータを用いた欠陥解析

CFD シミュレータの中でも信頼性の高いと言われている *FLOW-3D* を用いスリーブ内容湯挙動解析を行った。入力に加速距離  $x=0.05$  [m] に固定し、低速側速度  $v_l$  を変動させる一般的な方法を用いて設定した。  $v_l=0.21, 0.50$  [ $m/s^2$ ] によるシミュレーション結果を図2, 3に示す。

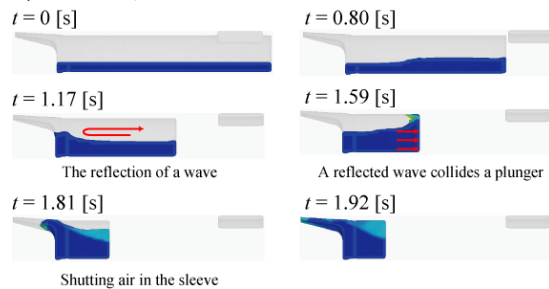


図2 シミュレーション結果1

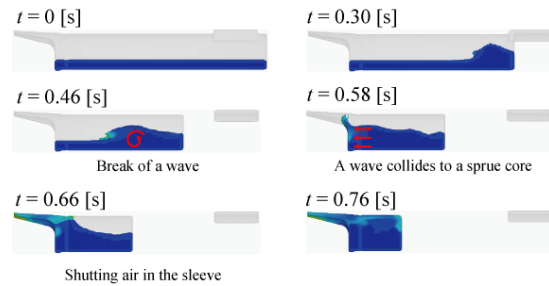


図3 シミュレーション結果2

シミュレーション結果より、  $v_l=0.21$  [ $m/s^2$ ] では振り返り波とプランジャの再衝突およびスリーブ内での空気閉じ込めが発生し、  $v_l=0.50$  [ $m/s^2$ ] では初期の波の崩れ、スプルーコアへの波の衝突、スリーブ内での空気閉じ込めが発生していることが予想される。これらは空気巻き込みによる欠陥の発生原因と考えられ、プランジャの速度制御を行うことによりこれらの欠陥原因を抑制することが望まれる。

③遺伝的アルゴリズムを用いた最適プランジャ速度入力の導出

低速側速度  $v_l$  [m/s], 加速距離  $x$  [m] を変数とし, プランジヤ速度パターンを定義し, プランジヤ速度入力 of 最適化を行った. 最適化手法には遺伝的アルゴリズムを用いた. 評価関数  $J$  を式(1)のように定式化し, 最適化問題を定式化した.

$$\text{minimize } J = w_a A(v_l(t), x) + w_t T(v_l(t), x) \quad (1)$$

ここで,  $A$ : 空気巻き込み量,  $T$ : スリーブ充填時間,  $w_a$ : 空気巻き込み量重み,  $w_t$ : スリーブ充填時間重みである.

提案した最適化手法を用い導出された最適プランジヤ速度入力を図4に示す. 結果として, 本最適プランジヤ速度入力を実機に適用することより, スリーブ内の波立ちを抑え, 空気巻き込み量を低減することができた.

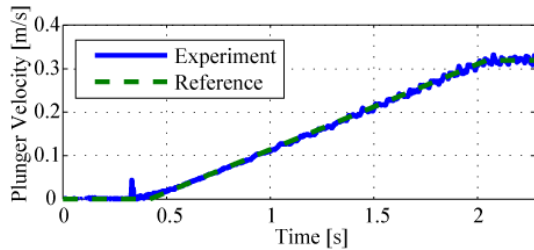


図4 最適プランジヤ速度入力

## (2) 注湯プロセスモデル構築法と注湯制御入力導出法の確立

### ①はじめに

一般的な鋳造工場で用いられている自動注湯システムの制御において, 溶湯の溢流防止, 鋳型への鋳込み時間の短縮, 鋳型への不純物混入回避のために, 湯口カップ内液位を高いレベルで保持する液面レベル制御が必要である. しかし, 現状では注湯プロセスにおける溶湯の挙動の計測, 解析が困難であるため, 注湯流量を自動的に決定することができず, 技術者によるティーチングプレイバック方式によって決定されている. また, 繰り返し実験は高温溶湯を取り扱うため, 非常に危険であり, コストもかかる. 従来研究では, 理論式によって注湯流量を導出しているが, 複雑な鋳型形状への適用は難しい. そこで本研究では, 流体解析シミュレータを援用した繰り返し学習制御を行うことにより, 鋳型カップ内の液面レベル制御が可能な注湯入力の導出を行う. これにより, 実験によるコストの削減や, 安全性の向上が期待できる.

### ②繰り返し学習制御による注湯制御入力の導出

本研究では繰り返し学習制御における試

行に流体解析シミュレータ *FLOW-3D* を用いる. 目標液位とシミュレータにより計算された液位との誤差を 0 に近づける流量制御入力を複数の試行を繰り返すことによって導出する. 繰り返し計算時の流量の修正には式(2)を用いる.

$$Q_{k+1}(t) = Q_k(t) + A(h_k(t)) \frac{dh_k(t)}{dt} - A(H_{ref}(t)) \frac{dH_{ref}(t)}{dt} \quad \dots (2)$$

また, 実機への適応を考え, 液面の細かな変動や数値誤差などの影響を抑えるため, 式(3)で表されるフィルタリング処理を液位の変化量の値と, 流量の修正後の値に行った. ここで, 本研究では  $a=10$  とした.

$$Q(t) = \frac{\sum_{n=-a}^a Q(t+n)}{2a+1} \quad \dots (3)$$

### ③制御結果

高さによって鋳型断面積が一定でない鋳型形状を対象とし, 提案手法を適用した. 繰り返し制御により得られた流量とカップ内の液面レベルを図5に示す. 結果より, 初期値から試行を重ねるごとに液位を目標液位へと近づけ, 最終的に良好に液面レベル制御を実現する流量が導出された. また, その際の初期流量での解析結果を図6上図, 試行10回目の解析結果を図6下図に示す. これら解析結果からも, 初期流量では目標値に一致させることができていないが, 最終的に得られた注湯制御入力では液位を一定に保つことが可能となった.

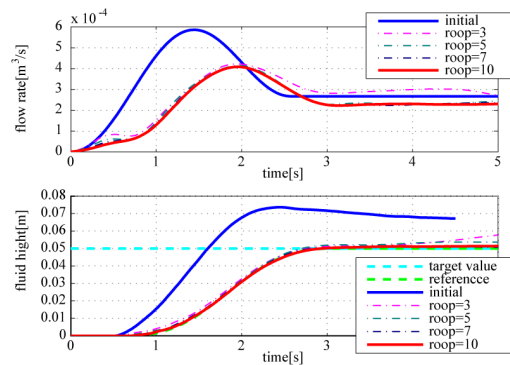


図5 繰り返し制御による注湯入力導出結果

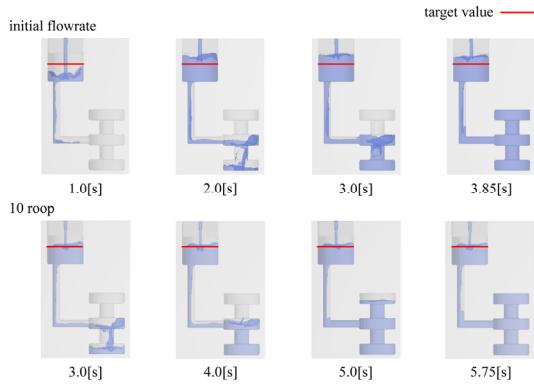


図6 注湯制御シミュレーション結果

### (3) ダイカストにおけるプランジャチップ形状の最適化

#### ①はじめに

ダイカストは大量生産に適した casting 法であり、寸法精度よく複雑形状を成型することができ、多くの利点を持つ。しかしながら、プランジャによる圧入で金型に溶湯を高速充填するため、空気の巻き込みによるブローホールが発生するという欠点がある。またダイカストでは、スリーブ内の溶湯の挙動解析が困難であるうえ、鑄込み動作および凝固現象が鑄型内部の可視化できない場所で発生することから、ブローホール発生メカニズムはまだ不明なことが多く、その低減手法についても未解決の問題が多い。これまで、ダイカスト鑄造における空気巻き込み欠陥の低減を目的とした研究は数多く行われてきた。しかしながら、そのほとんどは射出速度と湯道形状に限られており、プランジャチップ形状に対する波立ちと空気巻き込みのメカニズム、また欠陥の発生にチップ形状がどのように影響しているかを明らかにする研究はなされていない。

そこで本研究では、流体挙動解析シミュレーターである *FLOW-3D* を用いてプランジャチップ形状変化に対する空気巻き込み現象を解析するとともに、射出時の空気巻き込みを抑え、製品欠陥の発生を低減することのできるプランジャチップ形状の最適設計を行うことを目的とする。

#### ②プランジャチップの最適設計

空気の巻き込みを低減するためには、射出時に波を崩さないようなチップ形状にすることが良いと予想される。そこで、頂点  $q$  と終点  $r$  を未知数とした2次関数形状にプランジャチップを設計した。その変数と評価関数を式(4)のように定式化し、遺伝的アルゴリズムを用いることで最適化を行った。

$$\text{Minimize } J = A(q, r)$$

$$\text{Subject to } 0 \leq q \leq 0.075$$

$$0 \leq r \leq 0.025 \quad (4)$$

ここで、 $A$ : 0.1s での空気巻き込み量である。

図7は最適化による評価関数の推移を表しており、17世代目で収束していることが確認できる。この設計によって求められたチップでの溶湯挙動解析を図8に示す。数値的に空気をほとんど巻き込むことのないチップの設計に成功した。またこのチップを使用した実機実験において、製品の欠陥を低減できることを確認した。

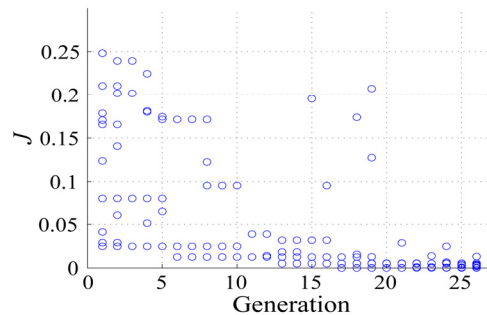


図7 評価関数の推移

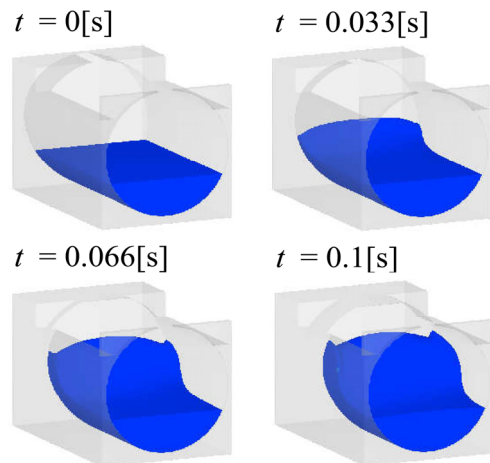


図8 最適形状を用いたシミュレーションの結果

## 4. 研究成果

### (1) 空気巻き込み量を考慮したダイカストプランジャの最適速度制御

CFD を用いることにより、スリーブ内での空気巻き込み原因を解析した。また、遺伝的アルゴリズムを用いることによりプランジャ速度の最適化を行い、良好な入力を導出し、実機を用いた実験においてもその有効性を確認することができた。

### (2) 注湯プロセスモデル構築法と注湯制御入力導出法の確立

流体解析シミュレータを援用した繰り返し学習制御を適用することにより、複雑な鋳型形状でもカップ内液面レベルを一定に保つことができる流量制御入力の導出に成功した。これにより、コストの削減や安全性の向上が期待できる。

(3) ダイカストにおけるプランジャチップ形状の最適化

本研究では、CFD を使用することによりプランジャチップ形状の変化に対する空気巻き込み現象を解析し、その影響を調査した。またその考察に基づきプランジャチップの最適設計を行うことで巻き込み量を低減するチップを設計した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 8 件)

1. 矢野賢一, 平光広太郎, 福井貴宏, 山本茂, 西戸誠志, 渡辺守, 根本泰則, “空気巻き込み量を考慮したダイカストプランジャの最適速度制御”, 鋳造工学, 第 80 巻, 第 7 号, 418 頁~423 頁, 2008 年 (査読・有)
2. 矢野賢一, 前田将宏, “空気取り込み量を考慮した高速揺動攪拌制御”, 化学工学会論文集, 第 34 巻, 第 4 号, 424 頁~431 頁, 2008 年 (査読・有)
3. K.Yano, K.Hiramitsu, Y.Kuriyama and S.Nishido, “Optimum Velocity Control of Die Casting Plunger Accounting for Air Entrainment and Shutting”, International Journal of Automation Technology, Vol. 2, No. 4, pp.259-265, 2008 (査読・有)
4. K.Yano, K.Hiramitsu and S.Nishido, “Analysis of Air Entrainment in the Die Casting Process and its Reduction by Plunger Velocity Control”, International Foundry Research, Vol. 60, No. 3, pp.8-13, 2008 (査読・有)
5. K.Yano, K.Hiramitsu, T.Fukui, S.Yamamoto and S.Nishido, “Velocity Control of Die-casting Plunger Considering Air Entrainment”, Proc. of World Foundry Congress, pp. 75-79, 2008 (査読・有)
6. K.Yoshimura, K.Yano, T.Fukui, S.Yamamoto, S.Nishido, M.Watanabe and Y.Nemoto, “Optimum Design of Die Casting Plunger Tip Considering Air Entrainment”, Proc. of Asian Foundry Congress, pp. 455-460, 2008 (査読・有)
7. M.Maeda and K.Yano, “Fast Shake Mixing Control with Low Air Entrainment”, Proc. of IFAC'08, pp. 9661-9666, 2008 (査読・

有)

8. K.Yano, K.Kaneko, Y.Noda and K.Terashima,, “Supervisory Control of Automatic Pouring Process Considering Residual Pouring Quantity”, Proc. of European Control Conference, pp. 2045-2050, 2007 (査読・有)

[学会発表] (計 6 件)

1. 栗山嘉文, 矢野賢一, 西戸誠志, ダイカストの品質向上を目的とした多段階射出速度制御, 第 153 回日本鋳造工学会全国講演大会講演概要集, 金沢, 2008 年 10 月 24-27 日 (査読・有)
2. 鈴木優介, 矢野賢一, 日出勝利, 流体解析シミュレータを援用した繰り返し学習制御による注湯制御入力の導出, 第 153 回日本鋳造工学会全国講演大会講演概要集, 金沢, 2008 年 10 月 24-27 日 (査読・有)
3. 前田将宏, 矢野賢一, 攪拌プロセスにおける空気取り込み量低減化制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 長野, 2008 年 6 月 5-7 日 (査読・有)
4. 矢野賢一, 流体解析シミュレータ援用によるダイカストプランジャ多段階最適速度入力の導出, 第 152 回日本鋳造工学会全国講演大会講演概要集, 名古屋, 2008 年 5 月 23-26 日 (査読・有)
5. 吉村高行, 矢野賢一, 西戸誠志, 渡辺守, 空気巻き込みを考慮したプランジャチップ形状の最適化, 第 152 回日本鋳造工学会全国講演大会講演概要集, 名古屋, 2008 年 5 月 23-26 日 (査読・有)
6. 平光広太郎, 矢野賢一, 福井貴宏, 山本茂, 西戸誠志, 渡辺守, 根本泰則, ダイカストプランジャ速度最適化による空気巻き込み量の低減化, 第 150 回日本鋳造工学会全国講演大会講演概要集, 仙台, 2007 年 10 月 19-22 日 (査読・有)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: 金属成形用シリンダ装置および金属成形用プランジャチップ

発明者: 西戸誠志, 福井貴弘, 矢野賢一, 吉村高行

権利者: アイシン高丘株式会社, 岐阜大学

種類: 特願

番号: 2008-109963

出願年月日: 2008 年 4 月 21 日

国内外の別: 国内

7. 研究組織

(1) 代表者名  
矢野賢一 (YANO KENICHI)  
岐阜大学・工学部・准教授  
研究者番号：90314088