

高精度自動注湯ロボットを実現する流出重量シーケンス制御

野田善之*, 寺嶋一彦*, 鈴木薪雄**, 橋本邦弘**

Outflow Weight Sequence Control Realizing Automatic Pouring Robot with High-precision

Yoshiyuki NODA*, Kazuhiko TERASHIMA*, Makio SUZUKI**, Kunihiro HASHIMOTO**

This paper presents an outflow weight control of tilting-ladle type automatic pouring robot in casting industry. A sequence control has been widely used to automatic pouring robots. In this paper, the sequence parameters are designed for suppressing the splash of molten metal and filling the molten metal into the mold precisely. At first, dynamics of the pouring process is modeled by using mass balance and Bernoulli's theorem. Then, in order to suppress the splash of molten metal during the pouring motion, the pouring pattern which has two step's flow rate is used to reference pouring pattern. In order to perform the pouring motion at short times and reduce the error between reference outflow weight and real one, the sequence control parameters are then optimized. The effectiveness of the present system is demonstrated through simulations and experiments by real industry plant.

Key Words : Casting, Automatic pouring robot, Outflow weight control, Sequence control, Splash suppression

1. 緒言

鑄造産業における注湯工程は、高温の溶湯を鑄型へ注ぐ工程であることから、作業者にとって危険、かつ過酷な作業環境である^{1)~5)}。そこで、現在、注湯工程の自動化が進められている。ここで、注湯工程は、安全性と歩留まり向上の観点から、正確に規定量へ注湯することが求められる。その一方で、注湯中の溶湯の温度低下による鑄物品質の低下や生産性向上の観点から、素早く注湯することが求められている^{6),7)}。

また、近年では、大幅な歩留まり向上と省エネルギー化を目的に、**Fig. 1**に示す新しい鑄造手法である砂型プレスキャストの開発が進められている^{8),9)}。この鑄造手法は、下鑄型に溶湯を注湯し、上鑄型で溶湯をプレスすることで成形する手法である。湯道や湯口が不要なことから、湯道や湯口を必要とする従来手法に対して、歩留まり率を70%程度から95%まで向上させることができる。また、製品部に直接注湯することから、溶湯の温度低下を抑えることができる。したがって、注湯中の溶湯温度を低くすることができ、省エネルギー化に貢献できる。しかし、従来手法における湯道や湯口部は、充填量の誤差を吸収する役割を担っており、湯

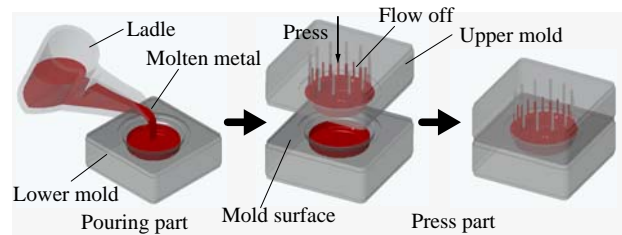


Fig. 1 Press Casting Process with Greed-sand Mold

道・湯口部がない砂型プレスキャストでは、従来の鑄造手法よりも高精度に注湯することが要求されている。

上述のように、従来の鑄造手法においても、そして、新しい鑄造手法である砂型プレスキャストにおいても、自動注湯ロボットの高速・高精度化が強く求められている。

ここで、自動注湯ロボットの高速・高精度化に対する制御システムの研究は、数多く報告されている。ファジィ制御による注湯流量制御¹⁰⁾や扇形取鍋を用いた自動注湯ロボットに対して、注湯プロセスを線形モデルで表現し、その逆モデルを用いたフィードフォワード制御と H_{∞} 制御によるフィードバック制御を備えた湯口内液面レベル制御¹¹⁾などが挙げられる。また、円筒形取鍋を備えた自動注湯ロボットに対して、注湯プロセスをLPV（線形パラメータ変動）モデルで表現し、その逆モデルを用いた注湯制御手法¹²⁾などが提案されている。しかし、多くの制御システムが、モデルパラメータや制御パラメータを得るために数多くの実験を必要としている。したがって、その多くは、対象液体を水とした実験室レベルでの注水実験にとどまっており、実際の溶湯による

* 豊橋技術科学大学工学部 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

** 新東工業株式会社 豊川市穂ノ原三丁目 1

* Faculty of Engineering, Toyohashi University of Technology, Toyohashi-city, Aichi

** Shintokogio, Ltd., Toyokawa-city, Aichi

(Received March 12, 2010)

TRIA 014/10/0914 © 2010 SICE

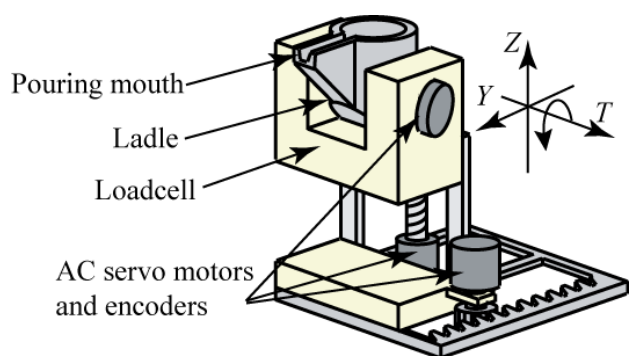


Fig. 2 Tilting-Ladle Type Automatic Pouring Robot

注湯実験には至っていなかった。筆者らは、取鍋内溶湯の物質収支式とベルヌーイの定理を用いて、注湯プロセスの数理モデルを導出し、その逆モデルによるフィードフォワード注湯流量制御を提案した¹³⁾。また、所望の液体流出重量へ高精度に注湯するフィードフォワード流出重量制御を提案した⁹⁾。著者らが提案した注湯数理モデルは、モデルパラメータの多くを取鍋形状から獲得できるため、数回の基礎実験で制御システムを構築できる利点をもっている。そして、対象液体を水とした注水実験では、目標流出重量に対する流出重量誤差率が±2.3[%]と高精度に目標流出重量へ注湯できることが確認されている。しかし、実際の溶湯を用いた注湯実験では、流出重量誤差率が10[%]程度と高精度に注湯することが困難であった。その理由として、取鍋形状誤差やスラグの取鍋への付着、溶湯の表面張力の影響で、計算で求めた溶湯流出開始角度と異なる角度で流出が開始されたことなどが要因として挙げられており、フィードフォワード制御での更なる高精度化は困難であることが示されている⁹⁾。

一方で、実際の鋳造工場では、制御機器としてPLC（プログラマブルロジックコントローラ）が導入されており、注湯流出重量に応じて、取鍋傾動角速度が間欠的に変化する注湯流出重量シーケンス制御が利用されている^{6,14)}。しかし、制御パラメータの調整は、熟練者の経験則に頼るところが多く、系統的に制御パラメータを設計する手法の開発が求められている。

そこで、本稿では、自動注湯ロボットの高精度化を実現する注湯流出重量シーケンス制御の設計手法を提案する。著者らが提案している注湯数理モデルを用いて、高速かつ高精度に所望の注湯流出重量へ注湯できるシーケンス制御パラメータを設計する。また、注湯中の溶湯飛散抑制も考慮する。

本稿で提案する注湯流出重量シーケンス制御は、著者らが過去に提案した流出重量フィードフォワード制御⁹⁾で利用している注湯数理モデルを基に、適当な流出重量で間欠的にフィードバックするシーケンス制御システムの制御パラメータを設計する手法の提案であり、過去に提案された流出重量フィードフォワード制御システムを発展させたものである。

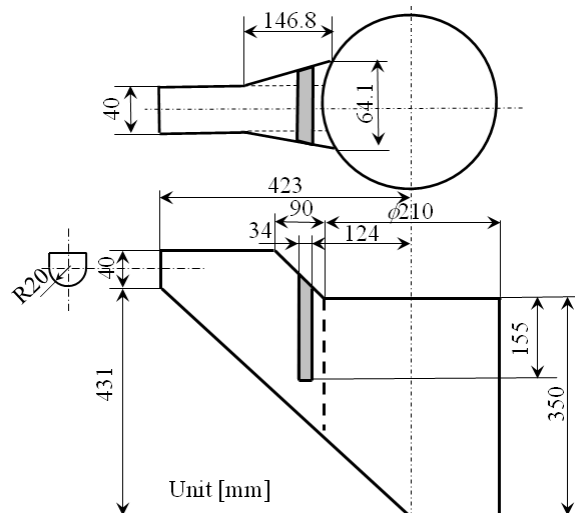


Fig. 3 Inside Dimension of Ladle

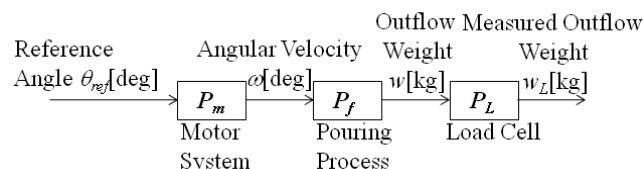


Fig. 4 Block Diagram of Automatic Pouring Robot

本稿で対象とする鋳造手法は、高精度化が特に重要な砂型プレスキャストに適用する。しかし、従来鋳造手法に対しても同様の設計手法が適用できるため、自動注湯ロボットの制御システムに対して汎用性の高い設計手法となり得る。

本稿では、溶湯を用いた注湯実験により、提案制御システムの有用性を示す。また、注湯流出重量シーケンス制御における注湯精度と注湯時間についての考察を示す。

2. 取鍋傾動式自動注湯ロボット

取鍋傾動式自動注湯ロボットをFig. 2に示す。取鍋はY軸（前後方向）、Z軸（上下方向）それぞれに設置されたサーボモータにより駆動される。また、取鍋側面に設置されたサーボモータにより、取鍋はT軸まわりに傾動する。それぞれのサーボモータにはロータリーエンコーダが取り付けられ、取鍋の上下、前後位置、傾動角度を計測することができる。取鍋内の溶湯重量は、取鍋支持部に内蔵されているロードセルにより計測される。サーボモータシステムは、PLCからそれぞれのモータドライバへ位置指令信号が与えられ、指令値に応じた動作を実現する。PLCの制御周期は0.01[s]であり、注湯流出制御に対して、十分に短い制御周期である。実際の鋳造工場で用いられる自動注湯ロボットの多くは、Fig. 2に示す自動注湯ロボットと同様の構成である。ここで、本稿で用いる自動注湯ロボットの傾動角速度制約は15.00[deg/s]であり、また、Fig. 3に示す取鍋形状を用いる。

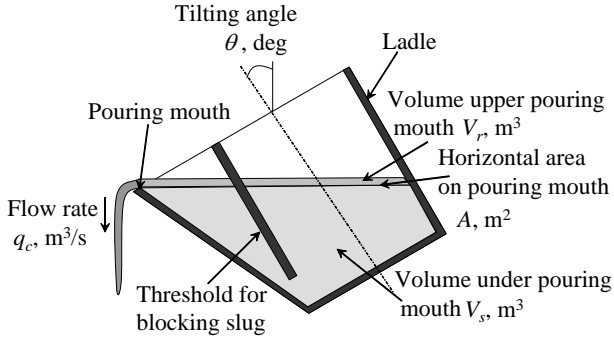


Fig. 5 Parameters of Pouring Process

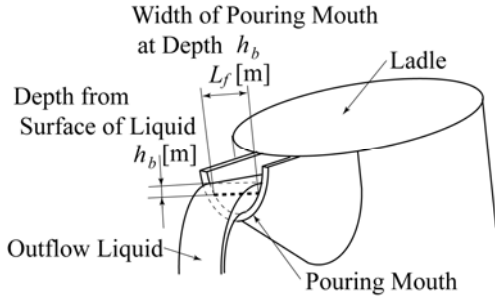


Fig. 6 Parameters of Pouring Mouth

3. 自動注湯ロボットの数理モデル

本章では、自動注湯ロボットの数理モデルを導出する。導出の詳細については、文献^{9),13)}を参照していただきたい。

自動注湯ロボットは、**Fig. 4**のブロック線図に示すように、モータへ指令電圧が与えられ、取鍋が傾動し、取鍋内液体が流出する。そして、自動注湯ロボットに内蔵されたロードセルにより、取鍋から流出した液体の流出重量が計測される。モータシステム、注湯プロセス、およびロードセルに対するそれぞれの数理モデルをつぎに示す。

3. 1 モータシステム

鋳造工場で用いられる多くの自動注湯ロボットは、位置・角度制御システムにより、所望の取鍋位置や角度を実現している⁹⁾。本稿では、取鍋傾動角度制御を含むモータシステム P_m に対して、(1)式の2次遅れ系で表現する。

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} + 2\zeta_c\omega_c \frac{d\theta(t)}{dt} + \omega_c^2\theta(t) = \omega_c^2\theta_{ref}(t) \quad (1)$$

ここで、 θ_{ref} [deg]はモータシステムへ与える位置指令信号である。 ζ_c と ω_c は同定パラメータであり、本稿では、同定実験により、 $\zeta_c=0.74$ 、 $\omega_c=11.68$ が得られた。

3. 2 注湯プロセス

Fig. 5は、取鍋の傾動角度 θ [deg]における注湯状態を示している。取鍋が角速度 ω [deg/s]で傾動し、出湯口より上方の溶湯が流量 q_c [m³/s]で流出する。このときの物質収支式は、(2)式となる。

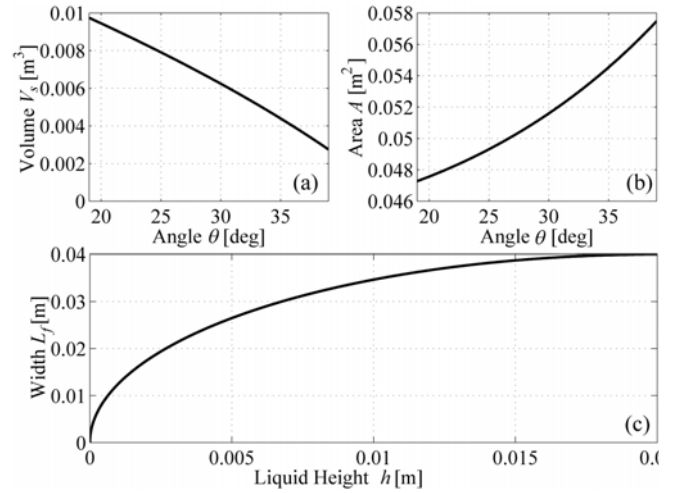


Fig. 7 Parameters of Ladle

$$\frac{dV_r(t)}{dt} = -q_c(t) - \frac{\partial V_s(\theta(t))}{\partial \theta(t)}\omega(t) \quad (2)$$

ここで、 V_r [m³]は取鍋の出湯口より上部の液体体積を示し、 V_s [m³]は出湯口より下部の液体体積を示す。また、出湯口より上部の液体高さ h [m]は(3)式で近似することができる¹³⁾。

$$h(t) \approx \frac{V_r(t)}{A(\theta(t))} \quad (3)$$

A [m²]は、出湯口下端位置に対して、水平な取鍋内液体面積である。ここで、出湯口先端における局所的な液面高さは、取鍋内部の液面高さよりやや低くなるが、この縮流を無視する。また、出湯口上部の流れに対して、すべての流線が、十分に上流の取鍋内液面から開始すると仮定すると、ベルヌーイの定理より、出湯口より上部液体の高さと取鍋流出流量の関係は、(4)式となる¹⁵⁾。

$$q_c(t) = c \int_0^{h(t)} L_f(h_b) \sqrt{2gh_b} dh_b, \quad (0 \leq c \leq 1) \quad (4)$$

L_f [m]は、**Fig. 6**に示すように液体上面からの深さ h_b [m]における出湯口の幅である。また、 c は流量係数であり、 g [m/s²]は重力加速度である。そして、流量 q_c [m³/s]を時間積分することで、(5)式に示す流出重量 w [kg]を得ることができる。

$$w(t) = \rho \int_0^t q_c(\tau) d\tau \quad (5)$$

ここで、 ρ [kg/m³]は取鍋内液体の密度である。

(2)~(5)式は、取鍋傾動角速度 ω [deg/s]から流出重量 w [kg]までの注湯プロセスの数理モデルとなる。このモデルは、流量係数以外のモデルパラメータが取鍋形状から幾何学的に獲得できる。従来の注湯モデル¹²⁾では、傾動角度ごとにモデルパラメータを得る必要があったため、モデルパラメータの取得に数多くの同定実験を必要とした。しかし、本稿で示す注

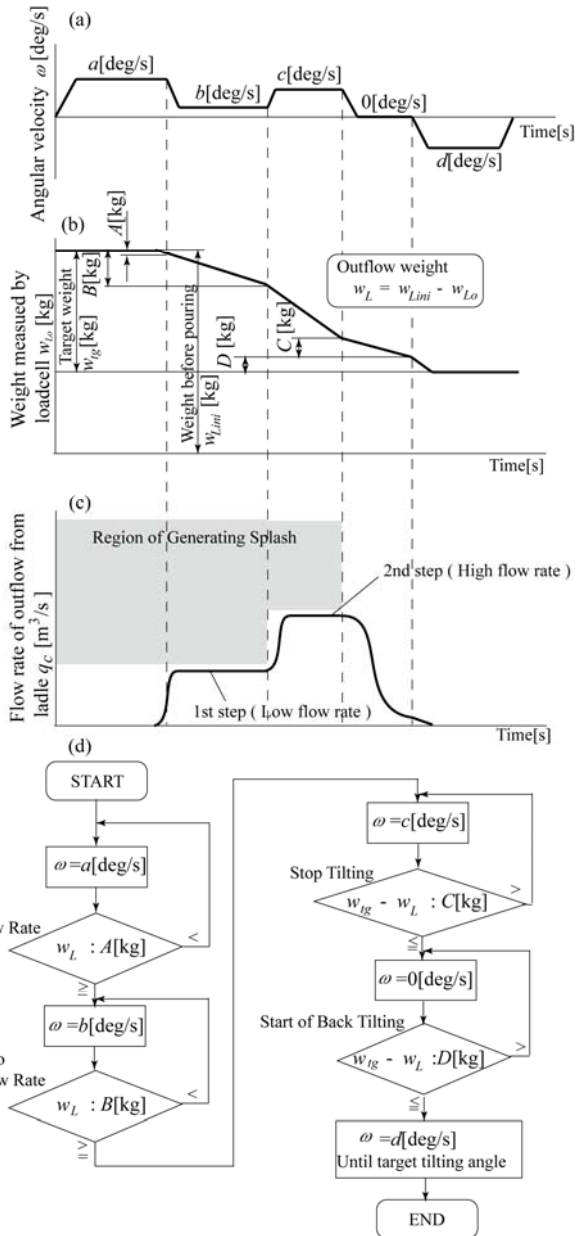


Fig. 8 Outflow Weight Sequence Control

湯数理モデルは、流量係数に対してのみ同定実験を行うことで、モデルパラメータを獲得することができる。

ここで、本稿で用いる取鍋形状に対して、(2)~(4)式におけるモデルパラメータを Fig. 7 に示す。Fig. 7(a)は傾動角度に対する取鍋出湯口より下部の液体体積 $V_L[m^3]$ を示し、(b)は出湯口下端位置に対して、水平な取鍋内液体面積 $A[m^2]$ である。(c)は出湯口下端からの高さ $h[m]$ における出湯口の幅 $L_L[m]$ である。また、(4)式の流量係数 c は、実験値とシミュレーション値のフィッティングにより、0.61 が得られた。(5)式の出湯内溶湯の密度 $\rho[kg/m^3]$ は、 $7.0 \times 10^3[kg/m^3]$ である。これらのモデルパラメータの取得方法、および本稿に示す注湯プロセスモデルの検証実験の結果の詳細は、文献⁹⁾を参照していただきたい。



Fig. 9 Splash on Pouring in Press Casting Process

3. 3 ロードセル

取鍋から流出した液体の重量は、自動注湯ロボットに内蔵されているロードセルにより計測される。ロードセルの動特性は、(6)式に示す1次遅れ系で表現される。

$$T_L \frac{dw_L(t)}{dt} + w_L(t) = w(t) \quad (6)$$

ここで、 $w[kg]$ は、取鍋から流出する液体の流出重量であり、 $w_L[kg]$ は、ロードセルによって計測される流出重量である。 $T_L[s]$ はロードセルの時定数であり、本稿では同定実験により $T_L=0.5[s]$ が得られた。

4. 注湯流出重量シーケンス制御

注湯流出重量シーケンス制御の概要を Fig. 8 に示す。Fig. 8において、(a)は、取鍋傾動動作における角速度を示し、(b)は、ロードセルによって計測される取鍋内液体重量である。(c)は、取鍋から流出する液体の流量である。(d)は注湯流出重量シーケンス制御のフローチャートを示す。ロードセルによって計測される取鍋内液体重量 $w_{Lo}[kg]$ と(6)式に示す注湯流出重量 $w_L[kg]$ の関係を(7)式に示す。

$$w_L = w_{Limi} - w_{Lo} \quad (7)$$

$w_{Limi}[kg]$ は注湯開始前にロードセルによって計測された取鍋内液体重量である。この制御システムは、ロードセルによって計測された注湯流出重量に応じて、サーボモータシステムへ与える目標傾動角度指令内の角速度を変化させることで、注湯流出重量を制御するシステムである。

ここで、砂型プレスキャストにおいて、Fig. 9に示すように、注湯初期に過大な流量で注湯した場合、溶湯飛散が生じることが確認されている^{9),16)}。そこで、Fig. 8(c)に示すように、注湯流量が飛散領域に侵入せず、かつ高速注湯することを目的に、注湯流量を2段階に変化させる。

また、取鍋の後傾動作前に取鍋傾動を停止させている。これは、傾動動作による機械振動がロードセルデータに重畳され、計測精度が低下し、高精度注湯が困難となる。そこで、後傾動作判別の前に取鍋を停止させて、機械振動の影響を抑え、高精度注湯を実現する。

5. シーケンス制御パラメータの設計法

Fig. 8 に示す注湯流出重量シーケンス制御のシーケンス制御パラメータを設計する。ここで、制御系設計のための設計条件をつぎに示す。

(設計条件)

- I. 注湯初期の溶湯飛散を抑制するために、注湯流出重量 w_L が 0.8[kg]に達するまで、注湯流量 q_c は 0.65×10^{-4} [m³/s]以下とする。また、注湯流出重量 w_L が 0.8[kg]に達した後の溶湯飛散抑制を目的に、注湯流量を 1.50×10^{-4} [m³/s]以下とする。この飛散抑制に対する注湯流量条件の導出は、文献^{9),16)}を参照していただきたい。
- II. シーケンス制御パラメータ a, b, c, d [deg/s]、および A, B, C, D [kg]は定数とする。
- III. 自動注湯ロボットで注湯する際の液体が流出する傾動角度範囲は、19[deg]~35[deg]、取鍋から流出する液体の流出開始角度の範囲は 19[deg]~28[deg]とする。取鍋から流出する液体の流出開始角度は、ロードセルによって計測された注湯前の取鍋内液体重量 w_{Lim} [kg]を体積へ変換し、取鍋内側形状から算出することで得られる。
- IV. 目標注湯流出重量の範囲は、5.4[kg]~13[kg]とし、目標注湯流出重量との許容誤差は±0.1[kg]以内とする。

上記に示す条件を満たした中で、高速注湯が可能なシーケンス制御パラメータを設計する。設計手法をつぎに示す。

5. 1 注湯初期の飛散抑制を目的としたパラメータの設計

注湯初期の飛散抑制を目的に、Fig. 8 に示すシーケンス制御における流出重量パラメータ A [kg]と B [kg]、および取鍋傾動角速度 a [deg/s]と b [deg/s]を求める。ここで、定常流量 q_{cst} [m³/s]を実現する取鍋傾動角速度 ω_{st} [deg/s]は、(2)~(4)式より(8)式のように導出される。

$$\omega_{st} = -\frac{q_{cst}}{\frac{\partial V_s(\theta)}{\partial \theta} + h(q_{cst})\frac{\partial A(\theta)}{\partial \theta}} \quad (8)$$

$h(q_{cst})$ [m]は、定常流量 q_{cst} [m³/s]を実現する出湯口上部液体高さであり、(4)式に対して、逆問題解析を行うことにより得られる。そして、(8)式に基づいて、設計条件 I に示す溶湯飛散を抑制する注湯流量条件 $q_{cconst} = 0.65 \times 10^{-4}$ [m³/s]を満たすシーケンス制御パラメータ b [deg/s]は、(9)式のように得られる。

$$b < \min \left\{ -\frac{q_{cconst}}{\frac{\partial V_s(\theta)}{\partial \theta} + h(q_{cconst})\frac{\partial A(\theta)}{\partial \theta}} \right\} \quad (9)$$

シーケンス制御パラメータ b [deg/s]は、(9)式へ設計条件IIIに示す液体が流出する傾動角度範囲と設計条件 I に示す注湯流量条件を代入し、(9)式を満たす中で最大角速度とする。得られたシーケンス制御パラメータ b [deg/s]は、0.17[deg/s]であった。

つぎに、シーケンス制御パラメータ A [kg]と a [deg/s]を求める。パラメータ A [kg]と a [deg/s]は、設計条件 I と III を満たした中で、短時間で設計条件 I の注湯流出重量 $w_{Lcond}=0.8$ [kg]に達するパラメータとする。そこで、(10)式に示す評価関数を最小にすることで、パラメータ A [kg]と a [deg/s]を得る。

$$J = \sum_{i=0}^N T_{wi} + J_P \quad (10)$$

T_{wi} [s]は注湯流出重量 w_{Lcond} [kg]に達するまでの時間を示す。添字 i は、(11)式に示すように取鍋から流出する液体の流出開始角度 θ_i [deg]の範囲を $\Delta\theta$ [deg]で分割した際のサンプル点番号である。

$$\theta_{si} = \theta_{s0} + i\Delta\theta, \quad (i = 0, 1, \dots, N) \quad (11)$$

本稿では、設計条件IIIより、 $\theta_{s0}=19$ [deg]、 $\theta_{sN}=28$ [deg]であり、 $\Delta\theta=0.2$ [deg]とすると $N=45$ となる。また、 J_P はペナルティ項であり、(12)式の条件を満たすことができない場合に $J_P=10^8$ が与えられる。

$$q_{ci} < q_{ccond}, \quad (i = 0, \dots, N) \quad (12)$$

q_{ci} [m³/s]は、各流出開始角度 θ_{si} [deg]で注湯した際の流量を示す。(10)式に示す評価関数の最小化は、パラメータ A [kg]に対して、探索範囲 $0 \leq A \leq 0.30$ [kg]、刻み幅 0.01[kg]とし、パラメータ a [deg/s]に対して、探索範囲 $0 \leq a \leq 1.00$ [deg]、刻み幅 0.01[deg/s]として全数探索を行った。その結果、 $A=0.17$ [kg]、 $a=0.82$ [deg/s]が得られた。

シーケンス制御パラメータ B [kg]は、設計条件 I より溶湯飛散を抑制する条件（流出重量 $w_L=0.8$ [kg]に達するまで注湯流量 $q_c=0.65 \times 10^{-4}$ [m³/s]以下）から、0.8[kg]が与えられる。

5. 2 高速注湯を目的としたパラメータの設計

設計条件 I に示す注湯流出重量が 0.8[kg]に達した後の注湯流量条件 $q_{cconsth} = 1.50 \times 10^{-4}$ [m³/s]を満たすシーケンス制御パラメータ c [deg/s]は(9)式と同様に得ることができる。得られたパラメータは、 $c=0.40$ [deg/s]であった。ここで、現時点まで得られたシーケンス制御パラメータ ($a=0.82$ [deg/s]、 $b=0.17$ [deg/s]、 $c=0.40$ [deg/s]、 $A=0.17$ [kg]、 $B=0.8$ [kg])を用いて、注湯シミュレーションした結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 において、(a)は取鍋傾動角速度であり、(b)は注湯流量を示す。(b)において、2段階目の注湯流量は、定常流量にな

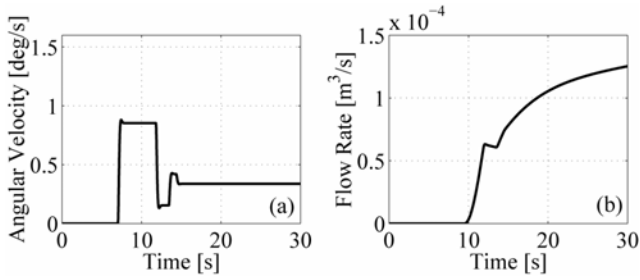


Fig. 10 Simulation Results of Outflow Weight Sequence Control ($a=0.82[\text{deg/s}]$, $b=0.17[\text{deg/s}]$, $c=0.40[\text{deg/s}]$, $A=0.17[\text{kg}]$, $B=0.8[\text{kg}]$)

るまでに時間がかかっていることが確認できる。これは、注湯流量の応答特性が緩慢であることを示している。

そこで、注湯流出重量が $0.8[\text{kg}]$ に達した後の注湯流量を素早く立ち上げるために、取鍋傾動角速度を変更するシーケンスブロック（シーケンス制御パラメータ $c_{add}[\text{deg/s}]$ 、および $C_{add}[\text{kg}]$ ）を追加する。設計条件 I における注湯流出重量が $0.8[\text{kg}]$ に達した後の注湯流量条件 ($q_c \leq 1.50 \times 10^{-4} [\text{m}^3/\text{s}]$) を満たす中で流出重量が最大となるように、シーケンス制御パラメータ $c_{add}[\text{deg/s}]$, $C_{add}[\text{kg}]$ を求める。そこで、(13)式に示す評価関数を最小化するパラメータ $c_{add} [\text{deg/s}]$ 、および $C_{add}[\text{kg}]$ を求める。

$$J = -\sum_{i=0}^N w_{bi} + J_P \quad (13)$$

ここで、 $w_{bi}[\text{kg}]$ は、(5)式に示すように、注湯流量を時間積分した流出重量である。また、添字 i は、(11)式に示すように取鍋から流出する液体の流出開始角度 $\theta_s[\text{deg}]$ の範囲を $\Delta\theta[\text{deg}]$ で分割した際のサンプル点番号である。 J_P はペナルティ項であり、(14)式の条件が満たされない場合に $J_P=10^8$ が与えられる。

$$q_{ci} < q_{ccondh}, \quad (i = 0, \dots, N) \quad (14)$$

$q_{ccondh}[\text{m}^3/\text{s}]$ は、設計条件 I における注湯流出重量が $0.8[\text{kg}]$ に達した後の注湯流量条件 ($1.50 \times 10^{-4} [\text{m}^3/\text{s}]$) である。(13)式に示す評価関数の最小化は、パラメータ $C_{add}[\text{kg}]$ に対して、探索範囲 $0.8 < C_{add} \leq 3.00[\text{kg}]$ 、刻み幅 $0.01[\text{kg}]$ とし、パラメータ $c_{add}[\text{deg/s}]$ に対して、探索範囲 $0.40 \leq c_{add} \leq 2.00[\text{deg/s}]$ 、刻み幅 $0.01[\text{deg/s}]$ として全数探索を行った。その結果、パラメータ $C_{add}=1.22[\text{kg}]$ 、および $c_{add}=1.46[\text{deg/s}]$ を得た。

ここで、シーケンス制御パラメータ ($a=0.82[\text{deg/s}]$, $b=0.17[\text{deg/s}]$, $c_{add}=1.46[\text{deg/s}]$, $c=0.40[\text{deg/s}]$, $A=0.17[\text{kg}]$, $B=0.8[\text{kg}]$, $C_{add}=1.22[\text{kg}]$) を用いて、注湯シミュレーションした結果を Fig. 11 に示す。Fig. 11(a)は取鍋傾動角速度であり、(b)は注湯流量を示す。Fig. 11(a)が示すように、シーケンスブロックの追加により、13[s]付近において取鍋傾動角

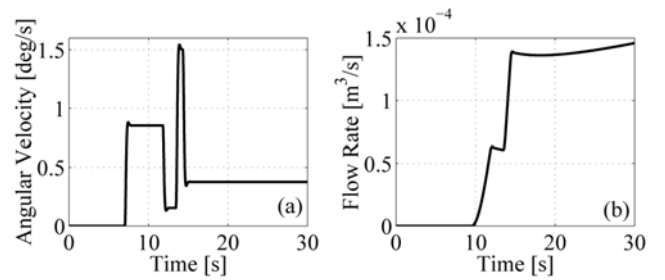


Fig. 11 Simulation Results of Outflow Weight Sequence Control ($a=0.82[\text{deg/s}]$, $b=0.17[\text{deg/s}]$, $c_{add}=1.46[\text{deg/s}]$, $c=0.40[\text{deg/s}]$, $A=0.17[\text{kg}]$, $B=0.8[\text{kg}]$, $C=1.22[\text{kg}]$)

速度が増加しており、それによって、Fig. 11(b)で示すように、注湯流量が素早く立ち上がっていることが確認できる。

5. 3 流出重量の高精度化を目的としたパラメータの設計

目標流出重量へ高精度に、かつ素早く注湯するために、Fig. 8 に示す流出重量シーケンス制御のパラメータ $C[\text{kg}]$ 、および $D[\text{kg}]$ を設計する。ここで、素早い湯切り動作を行うために、後傾動作に対するシーケンス制御パラメータ $d[\text{deg/s}]$ は自動注湯ロボットの最大角速度 $-15.00[\text{deg/s}]$ とする。設計条件IVを満たした中で、高速注湯を実現するために、シーケンス制御パラメータ $C[\text{kg}]$, $D[\text{kg}]$ は、(15)式に示す評価関数を最小化することで得られる。

$$J = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M T_{fij} + J_P \quad (15)$$

ここで、 $T_{fij}[\text{s}]$ は、注湯時間を示す。添字 i は、(11)式に示したように取鍋から流出する液体の流出開始角度 $\theta_s[\text{deg}]$ の範囲を $\Delta\theta[\text{deg}]$ で分割した際のサンプル点番号である。添字 j は、設計条件IVに示す目標流出重量 $w_{ig}[\text{kg}]$ の範囲を $\Delta w[\text{kg}]$ で分割した際のサンプル点番号であり、(16)式に示す。

$$w_{t_{ij}} = w_{t_{ig0}} + j\Delta w, \quad (j = 0, 1, \dots, M) \quad (16)$$

本稿では、設計条件IVより、 $w_{t_{ig0}}=5.40[\text{kg}]$, $w_{t_{igM}}=13.00[\text{kg}]$ であり、 $\Delta w=0.2[\text{kg}]$ とすると $M=38$ となる。また、 J_P はペナルティ項であり、(17)式の条件を満たすことができない場合に $J_P=10^8$ が与えられる。

$$\left\| w_{Lij}(T_{fij}) - w_{t_{ij}} \right\| \leq w_{error}, \quad (i = 0, \dots, N, j = 0, \dots, M) \quad (17)$$

$w_{Lij}[\text{kg}]$ は、(11)式のサンプル点 i における流出開始角度 $\theta_{si}[\text{deg}]$ 、および(16)式のサンプル点 j における目標流出重量 $w_{t_{ij}}[\text{kg}]$ で注湯した際の取鍋から流出した液体の流出重量である。(17)式に示す評価関数の最小化は、パラメータ $D[\text{kg}]$ に対して、探索範囲 $0 < D \leq 2.00[\text{kg}]$ 、刻み幅 $0.01[\text{kg}]$ とし、パラメータ $C[\text{deg/s}]$ に対して、探索範囲 $0 \leq C \leq 2.00[\text{kg}]$ 、刻

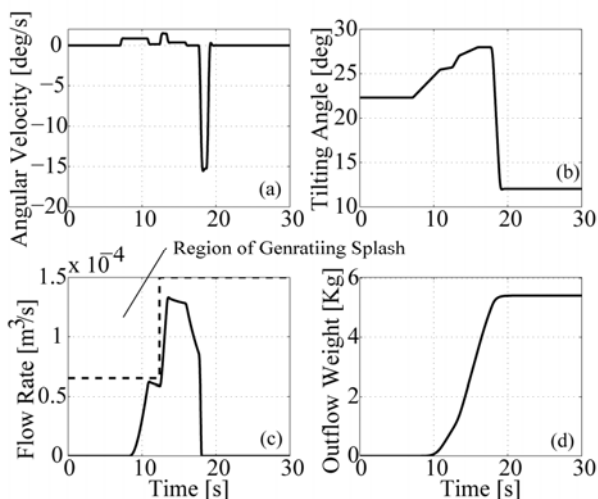


Fig. 12 Simulation Results of Proposed Sequence Control (Target Outflow Weight 5.48[kg], Tilting Angle on Starting Outflow 23.30[deg])

み幅 0.01[deg/s]として全数探索を行った。その結果、パラメータ $C=1.48$ [kg], および $D=0.60$ [kg]が得られた。

5. 4 提案制御システムのシミュレーション

提案制御システムのシミュレーション結果を Fig. 12 に示す。シミュレーション条件として、取鍋からの液体流出開始角度は $\theta_s=23.30$ [deg], 目標流出重量 $w_{ig}=5.48$ [kg]とする。このシミュレーション条件は、後述する溶湯による注湯実験と同条件としている。Fig. 12 において、(a)は取鍋傾動角速度を示し、(b)は取鍋傾動角度、(c)は注湯流量、(d)は流出重量を示す。Fig.12(c)では、注湯流量が設計条件 I の溶湯飛散抑制条件を満たしていることが確認できる。ここで、Fig.12(c)に示される注湯流量は、溶湯飛散抑制条件に対して、余裕のある結果となっている。これは、一定の傾動角速度においても注湯流量は増加する傾向にあり、目標流出重量が大きい場合には注湯流量が、溶湯飛散抑制条件に達する可能性がある。本稿で提案する流出重量シーケンス制御は、目標流出重量に関係なく、固定のシーケンスパラメータを用いるために、Fig.12 のシミュレーション結果のような目標流出重量が小さい場合には、溶湯飛散抑制条件に対して、余裕のある注湯流量となる。

このシミュレーション結果において、最終流出重量は 5.41[kg]と目標流出重量へ高精度に注湯することができることが確認された。取鍋からの液体流出開始角度を $\theta_s=28.0$ [deg]へ変更した場合には、最終流出重量は 5.57[kg]であり、目標流出重量 5.48[kg]に対して、設計条件IVを満たす ± 0.1 [kg]以内であることが確認された。

液体流出開始角度を $\theta_s=27.0$ [deg], 目標流出重量 $w_{ig}=13.00$ [kg]とした際のシミュレーション結果を Fig. 13 に示す。Fig. 13 において、(a)~(d)の構成は、Fig. 12 と同様であ

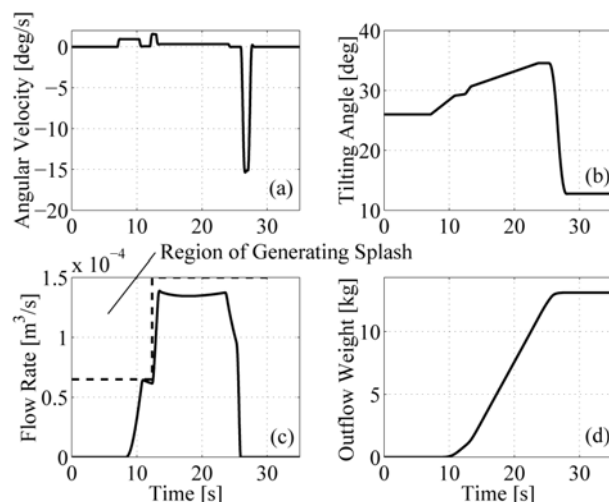


Fig. 13 Simulation Results of Proposed Sequence Control (Target Outflow Weight 13.00[kg], Tilting Angle on Starting Outflow 27.00[deg])

る。Fig. 13(d)に示すように、最終流出重量は 13.10[kg]と目標流出重量に対して、 ± 0.1 [kg]以内と高精度に注湯できていることが確認できる。

6. 溶湯による注湯実験

提案制御システムを実装した自動注湯ロボットを用いて、溶湯による注湯実験を行う。目標流出重量は、Fig. 12 に示す注湯シミュレーションと同様に 5.48[kg]である。この注湯実験では、注湯前の取鍋内注湯重量は、59.19[kg]であり、取鍋形状から計算される流出開始角度は、23.3[deg]である。実験結果を Fig. 14 に示す。Fig. 14 において、(a)は、取鍋の傾動角速度である。取鍋傾動角速度は、取鍋傾動用サーボモータに取り付けられているロータリーエンコーダから得られた傾動角度データを、後進差分による時間微分したものである。Fig. 14(b)は、ロータリーエンコーダにより計測された取鍋傾動角度であり、(c)は、ロードセルにより計測された取鍋から流出した溶湯の流出重量である。Fig.14(c)において、実線は注湯実験の結果を示し、破線は、自動注湯ロボット数理モデルを用いたシミュレーション結果を示す。注湯実験では、取鍋が垂直状態 ($\theta=0$ [deg]) において、溶湯を取鍋に注ぎ、その後、垂直状態から注湯実験を開始しているため、20[s]付近において溶湯流出が開始している。そこで、Fig. 14 では、取鍋から溶湯が流出している近傍の実験データ (10[s]~35[s]) の実験データを示す。また、Fig.14(a)において、後傾時の取鍋傾動角速度は、ノイズの影響で判然としないが、指令信号の取鍋傾動角速度は、シミュレーション結果と同様に -15 [deg/s]である。Fig. 14(c)の 29[s]付近において、ロードセルによって計測された流出重量に大きな振れが生じている。これは、取鍋を動作させる際に、取鍋の重心移動時の加速度

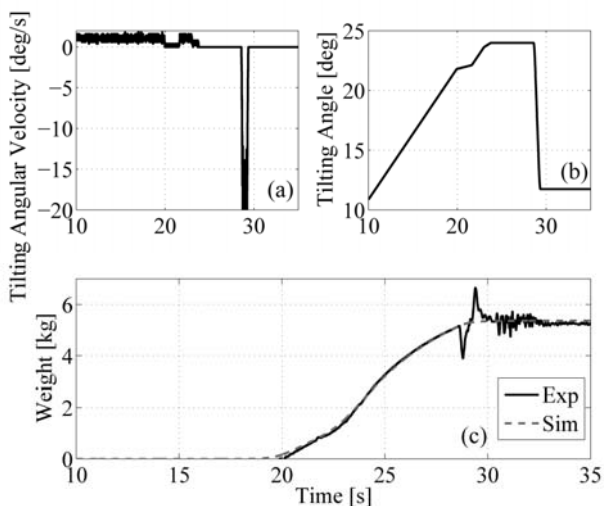


Fig. 14 Experimental Results of Proposed Sequence Control (Target Outflow Weight 5.48[kg])



Fig. 15 Pouring by Proposed Sequence Control

によって生じている。しかし、Fig. 8 のフローチャートからもわかるように、注湯流出重量シーケンス制御では、後傾動作前は傾動角速度を $\omega=0[\text{deg/s}]$ として、取鍋を停止させて、後傾動作開始判定をしているため、重心移動の影響が、流出重量制御の高精度化に影響を与えることはない。Fig.14(c)に示す注湯実験結果と自動注湯ロボットの数理モデルによるシミュレーション結果において、シミュレーション結果が注湯実験結果に高精度に追従している。この結果から、本稿に示す数理モデルが自動注湯ロボットの注湯プロセスを高精度に表現していることが確認できる。また、Fig. 15 では、実験中の注湯状態を示す。Fig. 15 から確認できるように、提案制御システムにおいて、2段階注湯流量により、注湯中に飛散が抑制されている。

そして、目標流出重量 5.48[kg]に対して、実験による流出重量は 5.38[kg]であり、目標流出重量との誤差比率は-1.8[%]であった。この結果は、過去の文献⁹⁾で提案されている注湯流出重量フィードフォワード制御の流出重量誤差比率(5.5~11.0[%])と比較して、高精度注湯が実現していることが確認できる。また、異なる取鍋傾動角度に対して、溶湯による注湯実験を4回実施した結果、注湯流出重量誤差比率は±

2.7[%]以内であった。これらの結果より、提案する注湯流出シーケンス制御は、高精度に注湯できることが確認された。

取鍋の液体流出が開始してから終了するまでの注湯時間については、本稿で提案する制御システムでは 9.5[s]から10[s]の間で注湯がなされている。一方、過去の文献⁹⁾で提案されている注湯流出重量フィードフォワード制御では、9[s]から 9.5[s]の間で注湯されている。本稿で提案する注湯流出重量シーケンス制御では、注湯環境の変化を考慮して、固定シーケンス制御パラメータを設計しており、注湯精度に重点を置いた保守的な制御システムであるため、フィードフォワード制御よりも注湯時間が長くなる。しかし、フィードフォワード制御と比較し、0.5[s]と僅かな遅れでありながら、流出重量精度の面で、フィードフォワード制御での 5.5%~11%に対して、本稿で提案する流出重量シーケンス制御は2%以内の高精度注湯を実現するため、高速・高精度化が求められる自動注湯ロボットに対して、有用な注湯制御システムとなり得る。

7. 注湯精度と注湯時間

本稿で提案する注湯流出重量シーケンス制御では、4章に示す設計条件を満たすシーケンス制御パラメータを設計している。特に、設計条件IVにおいて、注湯精度 $\pm 0.1[\text{kg}]$ 以内の制約を設けており、これを満たした中で、素早い注湯を実現している。そこで、本手法における注湯精度の制約と注湯時間の関係を明らかにする。設計条件における許容注湯精度を $\pm 0.1[\text{kg}]$ 、および $\pm 0.15[\text{kg}]$ として、それぞれについて提案設計手法でシーケンス制御パラメータを設計し、注湯シミュレーションにより注湯時間と注湯精度を確認する。それぞれの許容注湯精度に対する本設計手法で求めたシーケンス制御パラメータを Table 1 に示す。Table 1において、それぞれの許容注湯精度に対して、シーケンス制御パラメータ $C[\text{kg}]$ と $D[\text{kg}]$ のみが異なっている。これは、5.3節に示すように注湯流出重量の精度に関与するシーケンス制御パラメータが $C[\text{kg}]$ と $D[\text{kg}]$ であることによる。

そして、Table 1 に示すシーケンス制御パラメータを用いて、注湯シミュレーションを行う。設計条件における許容注湯精度、シミュレーションにおける注湯条件(流出開始角度、目標流出重量)、シミュレーションで得られた注湯精度と注湯時間を Table 2 に示す。ここで、注湯時間とは、取鍋内の液体が流出を開始してから、流出が終了するまでの時間を示している。Table 2(a)は、設計条件の許容注湯精度を $\pm 0.1[\text{kg}]$ として、本設計手法で設計し、注湯シミュレーションを行った結果であり、Table 2(b)は、許容注湯精度を $\pm 0.15[\text{kg}]$ とした際のシミュレーション結果である。Table 2 において、許容注湯精度を緩和すると注湯時間を短縮できるこ

Table 1 Parameters of Sequence Control by Proposed Approach

| | | | | | |
|--|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------|
| Allowable Error of Outflow Weight [kg] | A[kg] | B[kg] | C_{add} [kg] | C[kg] | D[kg] |
| ± 0.1 | 0.17 | 0.80 | 1.22 | 1.48 | 0.60 |
| ± 0.15 | 0.17 | 0.80 | 1.22 | 0.81 | 0.72 |
| | a [deg/s] | b [deg/s] | c_{add} [deg/s] | c [deg/s] | |
| | 0.82 | 0.17 | 1.46 | 0.40 | |
| | 0.82 | 0.17 | 1.46 | 0.40 | |

Table 2 Simulation Results by Sequence Parameters in Table 1

(a) Allowable Error of Outflow Weight: ± 0.1 [kg]

| No. | Tilting Angle of Starting Outflow [deg] | Target Outflow Weight [kg] | Error of Outflow Weight [kg] | Pouring Time [s] |
|-----|---|----------------------------|------------------------------|------------------|
| 1 | 19.00 | 5.40 | -0.01 | 10.18 |
| 2 | 19.00 | 13.00 | -0.03 | 19.25 |
| 3 | 28.00 | 5.40 | +0.09 | 9.59 |
| 4 | 28.00 | 13.00 | +0.10 | 17.46 |

(b) Allowable Error of Outflow Weight: ± 0.15 [kg]

| No. | Tilting Angle of Starting Outflow [deg] | Target Outflow Weight [kg] | Error of Outflow Weight [kg] | Pouring Time [s] |
|-----|---|----------------------------|------------------------------|------------------|
| 5 | 19.00 | 5.40 | -0.01 | 9.91 |
| 6 | 19.00 | 13.00 | -0.03 | 18.96 |
| 7 | 28.00 | 5.40 | +0.10 | 9.38 |
| 8 | 28.00 | 13.00 | +0.15 | 17.28 |

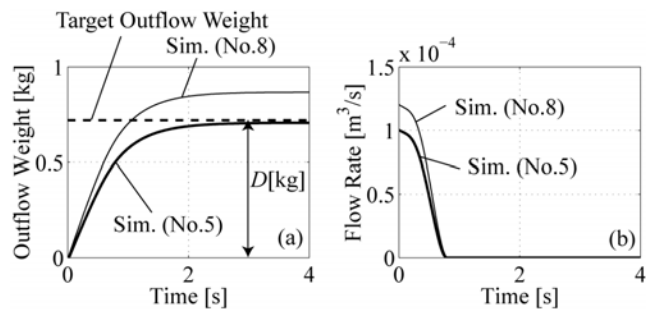


Fig. 16 Outflow Weight and Flow Rate on Back Tilting Motion in Simulation

とが確認できる。また、シミュレーションによる注湯精度は、注湯条件によって異なることが確認できる。ここで、Table 2 に示すシミュレーション結果 No.5 と No.8 における後傾動作時の注湯流出重量と注湯流量を Fig. 16 に示す。Fig. 16 において、(a)は流出重量を示し、(b)は注湯流量を示す。実線は、Table 2 に示すシミュレーション結果 No.5 の流出重量、および注湯流量を示し、細線はシミュレーション結果 No.8 の流出重量、注湯流量を示す。破線は目標流出重量を示す。Fig. 16 において、後傾動作開始時点時刻 0[s]として、流出重量と注湯流量を示している。また、Fig. 16(a)では、後傾動

作開始時点における流出重量（目標流出重量からシーケンス制御パラメータ D [kg]を差し引いた流出重量）を 0[kg]として、後傾動作中の流出重量を示している。Fig. 16 からわかるように、同じシーケンス制御パラメータでも、注湯条件によって注湯流量の応答特性が異なり、その結果、後傾動作中の流出重量に差異が生じることが確認できる。この結果は、注湯流出重量のみで後傾動作開始の判別を行うのではなく、注湯流量も考慮することで、自動注湯ロボットの更なる高速化・高精度化が図れることを示している。

8. 結言

本稿では、自動注湯ロボットにおける注湯流出重量シーケンス制御に対して、所望の注湯精度を満たし、かつ高速注湯を行うシーケンス制御パラメータの設計法を提案した。

具体的な提案内容をつぎに示す。

1. 注湯中の溶湯飛散を抑制する目的で、溶湯飛散を引き起こす注湯流量領域を回避するように注湯流量制約を設け、素早い注湯を実現するように2段階注湯流量とする。その結果、溶湯飛散が抑制されていることが実験により確認された。
2. 注湯流量の応答性は緩慢であることから、注湯流量の素早い立ち上がりを実現するために、取鍋傾動角速度を一時的に速くするシーケンスブロックを追加する。これにより、注湯流量が素早く所望の流量へ達し、注湯動作の高速化が図れる。
3. 取鍋の後傾動作は、注湯精度に影響するため、所望の流出重量を満たした中で、高速注湯を実現するシーケンス制御パラメータの設計手法を提案した。溶湯を用いた注湯実験により、注湯流出重量誤差比率は 2.7[%]以内であり、過去の論文⁹⁾で提案されたフィードフォワード流出重量制御による注湯流出重量誤差比率 5.5[%]~11.0[%]に対して、高精度に注湯されていることが確認された。
4. 設計条件における許容注湯精度を緩和すると、より高速な注湯動作が可能となるシーケンス制御パラメータが得られる。
5. 注湯精度は注湯条件に影響される。注湯条件によって、注湯流量の応答特性が異なり、その結果、後傾動作中の流出重量に差異が生じる。後傾動作開始の判別に、注湯流出重量のみを用いるのではなく、注湯流量も用いることで、自動注湯ロボットの更なる高速化・高精度化が図れる。

本稿で提案した注湯流出重量シーケンス制御設計手法は、砂型プレスキャストを対象に開発されている。しかし、湯口や湯道を利用して、溶湯を充填する従来型の鑄造法に対

しても、飛散抑制、および高速・高精度注湯は必要であり、本手法が適用可能であると考える。

[参 考 文 献]

- 1) 寺嶋一彦：鋳造業における自動注湯・溶湯搬送の現状，素形材，**39-6**，1/8 (1998)
- 2) W. Lindsay: Automatic Pouring and Metal Distribution Systems, Foundry Trade Journal, **10**, 151/176(1983)
- 3) J. Thielk: Using Electric Furnaces to Store and Pour Treated Ductile Iron, Part 2, Modern Casting, November, 25(1987)
- 4) K. Kozuszek: Robotic Problem Solving, Modern Casting, April, 24(2006)
- 5) 浅海洋一：縦型自動造型機ラインにおける造型効率の向上，素形材，**47-10**，11/13(2006)
- 6) 西田理：注湯工程の自動化，素形材，**47-10**，6/10(2006)
- 7) 野田善之，西田理：取鍋傾動式自動注湯機による鑄込重量の精度解析，鋳造工学，**81-9**，451/456(2009)
- 8) K. Hashimono, K. Ota, J. Iwasaki, Y. Hagata, Y. Suzuki and K. Terashima: Development of a Sand Mold Press Casting Process: Post-Filled Formed Casting Process, International Journal of Automation Technology, **2-4**, 253/258 (2008)
- 9) 野田善之，松尾祐介，寺嶋一彦，橋本邦弘，鈴木新雄：高精度取鍋傾動式自動注湯機のための重量センサレスフィードフォワード鑄込重量制御，鋳造工学，**80-8**，466/474(2008)
- 10) 篠原一寛，森本博幸：自動注湯機の開発，自動車技術，**46-11**，79/85(1992)
- 11) 矢野賢一，金子元樹，杉本祐，寺嶋一彦：注湯プロセスにおける熟練技能を実現する自動注湯ロボットのスーパーバイザリ制御，日本ロボット学会誌，**21-6**，90/101 (2003)
- 12) 矢野賢一，杉本祐，野田善之，寺嶋一彦：Betterment Process による円筒取鍋型自動注湯ロボットの注湯流量制御，日本機械学会論文集（C編），**70-694**，206/213 (2004)
- 13) 野田善之，寺嶋一彦：傾動式自動注湯システムにおける注湯流量モデルと逆モデルによる注湯流量フィードフォワード制御，日本機械学会論文集（C編），**72-722**，3147/3154(2006)
- 14) Y. Noda, M. Suzuki and K. Terashima: Optimal Sequence Control of Automatic Pouring System in Press Casting Process by using Greensand Mold, Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference 2006, 4083/4089(2006)
- 15) 須藤浩三，長谷川富市，白樫正高：流体の力学，コロナ社，(1994)

- 16) C. Samnang, Y.Noda, K.Terashima and K.Hashimoto: Modeling and Analysis of Pouring Flow Rate to Prevent the Splash in Sand-mold Press Casting, Proceedings of European Metallurgical Conference (EMC)2007, **4**, 1899/1916 (2007)

[著 者 紹 介]

野 田 善 之 (正会員)



2006年豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年豊橋技術科学大学工学部生産システム工学系助手，2007年助教，現在に至る。2005年6月～8月メルボルン大学客員研究員。鋳造設備の自動化，制振制御，パーソナルビークルの研究に従事。日本機械学会，日本鋳造工学会，システム制御情報学会などの会員。

寺 嶋 一 彦 (正会員)



1981年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。82年豊橋技術科学大学工学部生産システム工学系助手。講師，助教授を経て94年教授，現在に至る。91年～92年ミュンヘン工科大学客員研究員。システム制御理論とその応用に従事。日本機械学会，システム制御情報学会，日本ロボット学会，日本鋳造工学会，IEEEなどの会員。

鈴 木 新 雄



2001年豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年新東工業（株）入社。日本機械学会，日本ロボット学会の会員。

橋 本 邦 弘



1987年京都大学工学部卒業。同年新東工業（株）入社。現在，同社鋳機技術グループ副マネージャー。日本鋳造工学会の会員。