

# 注湯・取鍋搬送の複合動作を伴う自走式自動注湯ロボット における円筒形状取鍋の注湯および液面振動抑制制御

野田 善之\*<sup>1</sup> 矢野 賢一\*<sup>2</sup> 寺嶋 一彦\*<sup>1</sup>

## Pouring and Sloshing Suppression Control of Cylindrical Ladle in Self-Transfer-Type Automatic Pouring Robot with Complex Motion of Pouring and Transfer

Yoshiyuki Noda\*<sup>1</sup>, Ken'ichi Yano\*<sup>2</sup> and Kazuhiko Terashima\*<sup>1</sup>

This paper is concerned with development of self-transfer-type automatic pouring robot using a cylindrical ladle. Especially, the paper focuses on the pouring control of the cylindrical ladle and sloshing suppression during ladle transfer and tilting. In order to realize fast pouring, the robot's pouring system was constructed by a feed-forward controller with a system inverse to the pouring process. In order to suppress the sloshing of the liquid in the ladle, the natural frequency of the sloshing caused by the transferring and pouring motion was identified by short-term Fourier transform. The feedback controllers in the control system were then designed by the Hybrid Shape Approach using notch filters corresponding to the identified natural frequency of sloshing. The proposed pouring and sloshing suppression controls were applied to an automatic pouring robot that had both automatic detection of the mold's status filled or unfilled with liquid and tracking control to the mold. The effectiveness of the developed control system was shown through experiments.

**Key Words:** Automatic Pouring Robot, Pouring Control, Sloshing Suppression, Tracking Control

### 1. 緒 言

鑄造産業における注湯工程は高温の溶湯を取鍋から鑄型へ注ぐことから、作業者にとって非常に危険な作業現場の一つであり、現在、自動注湯ロボットの開発が進められている [1] [2]。その中で、自動化された注湯現場の多くは、固定された注湯ロボットの前で鑄型が順次停止し、取鍋を傾動させて、鑄型内へ溶湯を注湯する定点式自動注湯ロボットが採用されている。しかし、このロボットは鑄型ラインの停止、搬送を繰り返すため、注湯後の鑄型内溶湯に不当な衝撃を与え、製品品質を低下させることが懸念されている。また、この衝撃によってしばしば砂型が破損されることも問題となっている [3]。この問題を解決するために、Fig. 1 に示すような稼動し続ける鑄型ライン上の鑄型に注湯ロボットが同期して注湯する自走式自動注湯ロボットが開発されている [4]。この自走式自動注湯ロボットは鑄型が搬送され続けることから、製品に不適当な衝撃を与えず、安定した製品品質を提供できるロボットであり、最新設備を備えた注湯現場において、採用されつつある。しかし、この注湯ロボットは

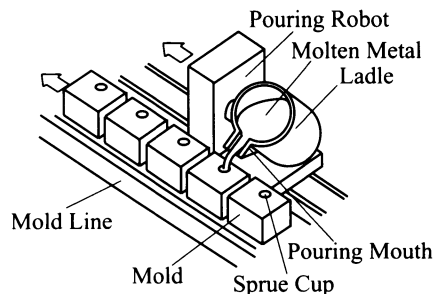


Fig. 1 Self-transfer-type automatic pouring robot

取鍋を搬送させることにより、取鍋内の溶湯が液面振動を生じ、この液面振動によって、溶湯内へのスラグ混入や注湯中に鑄型内湯口へ溶湯を正確に注湯できないなどの問題を抱えている。この問題に対して、現在、採用されている自走式自動注湯ロボットはロボットの搬送速度を液面振動が生じないように低速で搬送している。このため、注湯ロボットが鑄型間を移動する際に時間がかかり、生産性が損なわれてしまうことが懸念されている。したがって、液面振動を抑制し、高速搬送可能な自走式自動注湯ロボットの開発が求められている。

一方で、自動注湯ロボットの多くは、取鍋の傾動角速度と取鍋から流出する溶湯の流量の関係が比例関係となる扇形取鍋が用いられている。しかし、従来の作業者が手動で取鍋を傾動させ

原稿受付 2005年1月21日

\*<sup>1</sup>豊橋技術科学大学工学部

\*<sup>2</sup>岐阜大学工学部

\*<sup>1</sup>Faculty of Engineering, Toyohashi University of Technology

\*<sup>2</sup>Faculty of Engineering, Gifu University

ている注湯現場では、形状が簡素でメンテナンス性が良く、溶湯体積に対して表面積が小さいことから保温性の高い円筒形状取鍋が多く採用されている。したがって、自動注湯へ移行する際には、円筒形状取鍋をそのまま利用したいという要望が強く、円筒形状取鍋に対する注湯制御の開発が求められている。

自動注湯ロボットに関する研究は、数多く提案されている。特に、注湯システムに対する制御として、鋼板製造を目的とした連続铸造に対する液面レベル制御が数多くある [5]~[7]。また、生型砂を用いた鋳物製品製造を目的としたバッチタイプの自動注湯についても様々なシステムが提案されている [8]~[12]。本稿で扱うプロセスは、手動注湯から少ない設備投資で自動化が可能であり、多品種生産向きのバッチタイプの傾動式自動注湯 [1] である。傾動式自動注湯においては、液面振動抑制制御 [13] [14]、注湯量制御 [15] [16] や液面レベル制御 [17]、これらを統合したスーパーバイザリ制御 [2] を用いた注湯制御などがある。これらは扇形取鍋を対象とした研究である。これに対して、筆者らは鋳型内湯口の液面レベルモデルを非線形モデル、円筒形状取鍋の流量モデルを LPV (Linear Parameter Varying) モデルで表現し、注湯制御することを提案している [18]。ここで用いている制御手法は、鋳型内湯口液面レベルモデルの順モデルを用いて、目標液面レベルに一致するように試行錯誤により流量パターンを求め、それから得られた流量パターンをリファレンスとして、流量 LPV モデルに学習制御の一つである Betterment Process を用いて、取鍋の傾動角速度、そして、モータの逆システムを用いて、モータへの入力電圧を導出している。しかし、実際の鋳型ラインでは、様々な鋳物形状が存在するため、その都度、上述の手法でモータへの制御入力を求めなければならない。したがって、与えられた目標液面レベルに対して、より容易に、そして、短時間でモータへの入力電圧を取得する手法が必要となる。

また、筆者らは自走式自動注湯ロボット開発の基礎となる移動物体への液面振動抑制を考慮した追従システムを開発している [4]。このシステムは移動物体の位置情報をリファレンスとする時変ゲインフィルタをもつ 2 自由度制御システムで構成される。さらに、鋳型の位置ずれが生じる場合を考慮して、注湯ロボットにレーザセンサを設置し、湯口位置を自動検出して追従する制御システムを構築している [20]。しかし、上述のシステムは液面振動抑制を考慮した追従制御に特化した制御システムであり、注湯動作までは考慮されていない。注湯動作を含む液体容器の搬送は、液体形状が取鍋傾動角度によって変化するため、液面振動の固有周波数が傾動角度とともに変化する。したがって、注湯動作を含む液体搬送に対して、液面振動抑制を考慮した追従システムを構築する必要がある。

上述の自動注湯ロボットに関する従来研究から、自走式自動注湯ロボットを開発するうえで、次の制御技術が必要となる。

- (P1) **Pouring Problem**: 円筒形状取鍋の注湯制御を行う際に、様々な鋳物形状に対して、与えられた目標液面レベルから短時間でモータへの入力電圧を求める手法。
- (P2) **Sloshing Problem**: 自走式自動注湯ロボットは搬送中に注湯動作を行うため、注湯動作を含む液体搬送に対する液面振動抑制制御システムの構築。

これらの要求に対して、本研究では次のアプローチを提案する。

- (S1) **Proposal Approach to (P1)**: 円筒形状取鍋を用いた注湯プロセスに対して、その逆システムにより制御入力を求める手法を提案する。本手法では目標液面レベルに対して、次のプロセスの逆システムを用いることで、モータへの制御入力を取得する。

(S1-1) モータモデル

(S1-2) 取鍋流量モデル

(S1-3) 鋳型内湯口の液面レベルモデル

これにより、目標液面レベルから瞬時にモータへの制御入力を求めることができる。詳細は 3 章に示す。

- (S2) **Proposal Approach to (P2)**: 注湯動作を含む液体搬送に対して、液面振動抑制を考慮した追従システムを提案する。本手法では、次の手順により制御系を構築する。

(S2-1) 注湯動作を含む液体搬送から液面振動データを取得し、そのデータに短時間フーリエ変換を施すことで液面振動の時変固有周波数を得る。

(S2-2) 筆者らが提案している追従制御システムのフィードバックコントローラに Hybrid 整形法 [4] を適用して、変動固有周波数帯のエネルギーを減衰させる複数のノッチフィルタをもつコントローラを設計する。

(S2-1), (S2-2) の詳細は、4 章で示す。

(S1), (S2) で提案している注湯制御システムと追従制御システムを統合して、円筒形状取鍋に対する液面振動抑制を考慮した自走式自動注湯ロボットを開発する。そして、実験を通じて、開発した自走式自動注湯ロボットの有用性を確認する。

## 2. 自動注湯ロボットの概要

本研究で用いる自動注湯ロボットを Fig. 2 に示し、概要図を Fig. 3 に示す。この自動注湯ロボットは当研究室で開発された実験室用自動注湯ロボットである。

鋳型ライン上に容量  $1.19 \times 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$  の鋳型を三つ設置する。取鍋は半径 0.12 [m]、高さ 0.30 [m] の円筒形状取鍋を使用する。そして、取鍋内の液体は水を用いる。293 [K] の水と 1,673 [K] の溶湯の動粘性係数は、それぞれ  $1.004 \times 10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]}$  と  $0.970 \times 10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]}$  であり、水の挙動は溶湯の挙動とはほぼ同等であることから、本研究では水を用いることとした [19]。取

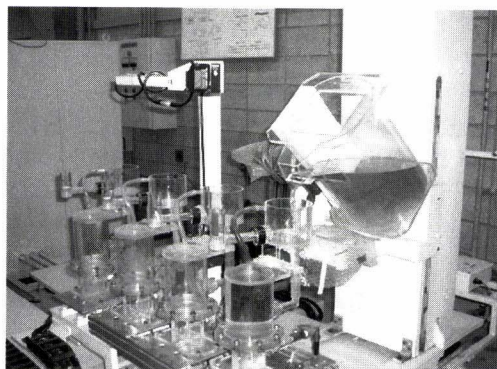


Fig. 2 Self-transfer-type automatic pouring robot

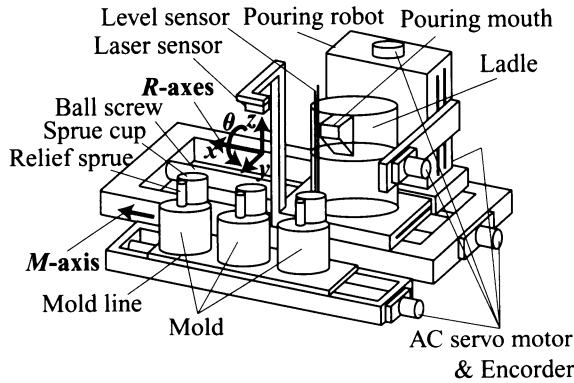


Fig. 3 Illustration of automatic pouring robot

鍋が設置された注湯ロボットは、AC サーボモータによりボールネジを介して、三次元空間内を移動する。鋳型ラインは、AC サーボモータとボールネジにより 1 軸方向のみ移動可能である。また、AC サーボモータ直動により取鍋を傾動させる。モータの搬送、傾動軸は Fig. 3 に示すように  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ,  $R_\theta$ ,  $M$  軸である。また、取鍋の三次元空間内の位置と取鍋傾動角度はモータに取り付けられたエンコーダにより計測される。

ここで、各軸のモータへ印加される入力電圧から注湯ロボットの各軸の位置、取鍋の傾動角度、鋳型ラインの位置までの伝達関数を式 (1) に示す。

$$P(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (1)$$

$y(t)$  は注湯ロボットの各軸の位置、傾動角度、鋳型ライン位置を示し、 $u(t)$  はモータへ加えられる入力電圧を示す。そして、 $K_m$  はゲイン定数、 $T_m$  は時定数を示す。各軸のそれぞれのパラメータを Table 1 に示す。各軸モータのパラメータは、ステップ応答による過渡応答法を用いて同定した。また、液体の有無によるモータ時定数の変動は、 $R_x$  軸が  $0.5 \times 10^{-3}$  [s]、 $R_y$  軸が  $0.1 \times 10^{-3}$  [s]、 $R_z$  軸が  $1.0 \times 10^{-3}$  [s]、 $R_\theta$  軸が  $0.4 \times 10^{-3}$  [s] と時定数に対してわずかであるから、本稿で用いる注湯ロボットのモータ時定数は、負荷変動にかかわらず一定値としている。また、Table 1 では各軸モータの速度、加速度制約についても示す。

取鍋内の液面振動を計測するために、取鍋内に 2 本のステンレス棒が設置され、その抵抗値より液位を計測する。さらに、湯口内の液面レベルを計測するために自動注湯ロボットにレーザ変位センサを Fig. 3 のように取り付ける。なお、液面レベルを正確に計測するために、湯口カップには副湯口が設けられ、その中に浮かせたフロートの高さを検出することにより、液面レベルを計測する。このレーザセンサは未充填鋳型の湯口位置検出にも用いられる。ここで、レーザセンサによる湯口検出手法について記述する。レーザセンサと充填、未充填鋳型の位置関係を Fig. 4 に示す。

注湯ロボットが鋳型上を通過する際に、レーザセンサは鋳型内の副湯口上を通過する。レーザセンサが副湯口中心にあるとき、湯口中心と注湯ロボット中心（取鍋中心）が搬送軸上で同期する。もし、レーザセンサが副湯口中心にあるにもかかわらず、湯口中

Table 1 Motor parameters

Parameter	Symbol	Value
$R_x$ -axis gain	$K_{xm}$	0.166 [m/sV]
$R_x$ -axis time constant	$T_{xm}$	0.007 [s]
$R_x$ -axis maximum velocity	$V_{xmax}$	0.800 [m/s]
$R_x$ -axis maximum acceleration	$A_{xmax}$	2.0 [m/s <sup>2</sup> ]
$R_y$ -axis gain	$K_{ym}$	0.083 [m/sV]
$R_y$ -axis time constant	$T_{ym}$	0.006 [s]
$R_y$ -axis maximum velocity	$V_{ymax}$	0.500 [m/s]
$R_y$ -axis maximum acceleration	$A_{ymax}$	1.0 [m/s <sup>2</sup> ]
$R_z$ -axis gain	$K_{zm}$	0.083 [m/sV]
$R_z$ -axis time constant	$T_{zm}$	0.018 [s]
$R_z$ -axis maximum velocity	$V_{zmax}$	0.500 [m/s]
$R_z$ -axis maximum acceleration	$A_{zmax}$	1.0 [m/s <sup>2</sup> ]
$R_\theta$ -axis gain	$K_{tm}$	24.6 [deg/sV]
$R_\theta$ -axis time constant	$T_{tm}$	0.006 [s]
$R_\theta$ -axis maximum velocity	$V_{tmax}$	150.0 [deg/s]
$R_\theta$ -axis maximum acceleration	$A_{tmax}$	$150 \times 10^1$ [deg/s <sup>2</sup> ]
$M$ -axis gain	$K_{mm}$	0.167 [m/sV]
$M$ -axis time constant	$T_{mm}$	0.005 [s]
$M$ -axis maximum velocity	$V_{mmax}$	0.500 [m/s]
$M$ -axis maximum acceleration	$A_{mmax}$	1.0 [m/s <sup>2</sup> ]

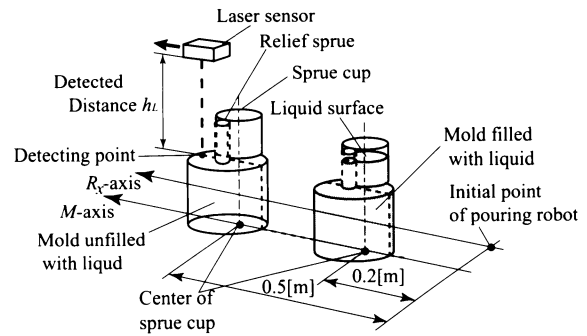


Fig. 4 Relation between molds and laser sensor

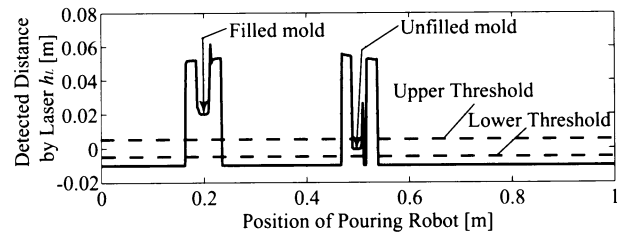


Fig. 5 Experimental result of laser sensor detecting molds

心と注湯ロボット中心が同位置にないときは、湯口中心と注湯ロボット中心のオフセット距離を考慮する必要がある。また、レーザセンサにより、未充填鋳型の副湯口を検出するために、レーザセンサの搬送直線上に副湯口底面と同じ高さのものは存在しないとす。ここで、実際に鋳型上をレーザセンサが通過した際の実験結果を Fig. 5 に示す。初期状態において、Fig. 4 に示すように注湯ロボット中心位置を 0.0 [m] とし、充填鋳型を 0.2 [m]、未充填鋳型を 0.5 [m] の位置に設置する。Fig. 5 において、横軸は注湯ロボットを  $R_x$  軸上で搬送したときの位置を示し、縦軸はレーザセンサにより検出された距離  $h_L$  を示す。また、レーザセンサにより検出された距離は未充填鋳型の副湯口底面におい

て、 $h_L = 0.0$  [m] となるように補正されている。そして、副湯口より低い位置  $h_L \leq -0.01$  [m] は、 $h_L = -0.01$  [m] としている。Fig. 5 の結果において、注湯ロボットの中心位置が 0.2 [m] のとき、レーザセンサにより検出された距離  $h_L = 0.02$  [m] を示している。そして、注湯ロボットの位置が 0.5 [m] で検出された距離は  $h_L = 0.0$  [m] を示している。したがって、検出された距離  $h_L$  に閾値  $h_{Lth} = 0.005$  [m]  $> |h_L|$  を設けることで、未充填鋳型を検出することができる。ここで、理論的には、閾値を  $h_{Lth} = 0.0$  [m]  $\equiv |h_L|$  とすることで、未充填鋳型を検出できるが、測定誤差を考慮して、閾値を  $h_{Lth} = 0.005$  [m]  $> |h_L|$  としている。Fig. 5 において、閾値  $h_{Lth}$  は破線で示されている。これによって、未充填鋳型を検出することが可能となる。

### 3. 注湯制御システム

#### 3.1 注湯モデル

注湯プロセスの概略図を Fig. 6 に示す。ここで、取鍋傾動モータへの入力電圧から鋳型の副湯口の液面レベルまでの注湯モデルを三つの部位 (1 章で記述した (S1-1), (S1-2), (S1-3) の順モデルを示す) に分ける。

- (S1-1) モータへの入力電圧  $u_i(t)$  から取鍋の傾動角速度  $\omega(t)$  までのモデル (モータモデル):  $P_\theta(s)$
- (S1-2) 傾動角速度  $\omega(t)$  から取鍋から流出する流量  $q(t)$  までのモデル (流量モデル):  $P_f(s)$
- (S1-3) 取鍋から流出する液体の流量  $q(t)$  から鋳型内湯口の液面レベルまでのモデル (鋳型レベルモデル):  $P_h(s)$

上述の三つのモデルの詳細を以降に示す。

(S1-1) : 入力電圧から傾動角速度までのモータモデル  $P_\theta(s)$  は式 (1) から積分器を除いたものを用いる。

(S1-2) : 流量モデルにおいて、文献 [17] では Fig. 7 (a) に示す扇形取鍋に対するモデルが示されている。扇形取鍋は傾動角度に対して、液体表面積が一定であることから、式 (2) に示す一次遅れ系で示される。

$$\frac{dq_f(t)}{dt} = -\frac{1}{T_f}q_f(t) + \frac{K_f}{T_f}\omega(t) \quad (2)$$

ここで、 $K_f$  [ $\text{m}^3/\text{rad}$ ] は流量モデルのゲイン定数であり、 $T_f$  [s] は時定数である。しかし、円筒形状取鍋は取鍋の傾動角度に対して、液体表面積が Fig. 7 (b) に示すように変動する。したがっ

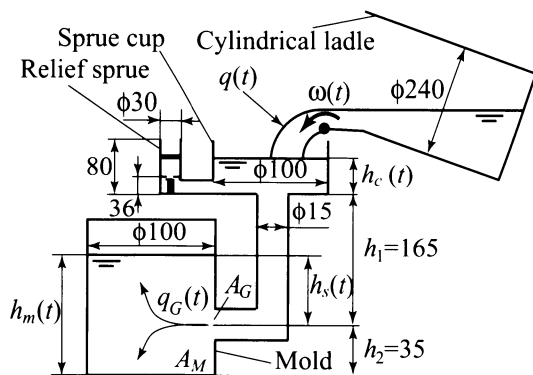


Fig. 6 Illustration of a pouring model

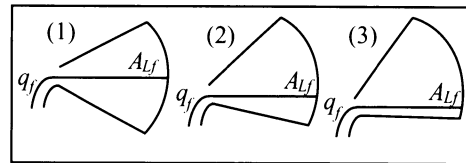
て、円筒形状取鍋からの流量は、取鍋傾動角度に依存すると考え、流量モデルは式 (3) に示す傾動角度に依存して、パラメータが変動する LPV モデルとして表現する。

$$\frac{dq_c(t)}{dt} = -\frac{1}{T_{cf}(\theta)}q_c(t) + \frac{K_{cf}(\theta)}{T_{cf}(\theta)}\omega(t) \quad (3)$$

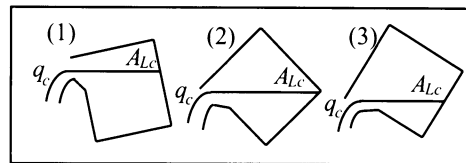
ここで、 $K_f(\theta)$  [ $\text{m}^3/\text{rad}$ ] は流量モデルの傾動角度によって変動するゲインであり、 $T_f(\theta)$  [s] は時定数である。 $\theta$  は傾動角度である。傾動角度によって変動するゲイン、時定数を同定するために、取鍋の各傾動角度において、ステップ入力を与えて、3 [deg] 傾動させ、そのときの実験結果を一次遅れ系でフィッティングさせることで、各傾動角度に対するゲイン定数、時定数を求める。同定されたゲイン定数、時定数を Fig. 8 に示す。横軸は傾動角度を示し、縦軸はゲイン定数と時定数を示す。ゲイン定数の結果において、傾動角度が 45 [deg] に達するまでゲインが増加している。これは傾動角度が 45 [deg] である Fig. 7 (b) (2) の状態まで表面積が増加し、流量が増加することから、ゲインが増加することを示している。そして、45 [deg] 以降の Fig. 7 (b) (3) の状態では表面積が減少し、流量が減少することからゲインが減少することを示している。したがって、Fig. 8 に示す傾動角度に対するパラメータが妥当であることが分かる。

(S1-3) : 鋳型内湯口の液面レベルモデルは Fig. 6 からベルヌーイの定理、連続の式を考慮して、式 (4), (5) のように得られる [18]。

$$\frac{dhc}{dt} = \frac{1}{A_C}q_c(t) - c\frac{A_G}{A_C}\sqrt{2g(h_c(t) + h_1 - h_s(t))} \quad (4)$$



(a) Fan-type ladle



(b) Cylindrical ladle

Fig. 7 Flow characteristics of two type ladles

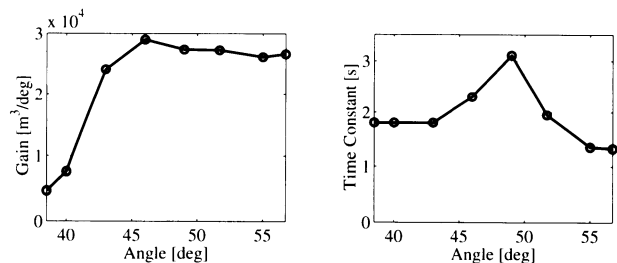


Fig. 8 Gain and time constant for tilting angle

$$\frac{dh_m(t)}{dt} = c \frac{AG}{A_M} \sqrt{2g(h_c(t) + h_1 - h_s(t))} \quad (5)$$

$c$  は流量係数,  $g$  は重力加速度である. また,  $h_s(t)$  が 0 [m] 以下であるとき,  $h_s = 0$  としている. ここで, 流量係数  $c$  は式 (6) とする.

$$c(t) = \frac{c_e}{h_{ref}} h_c(t) \quad (6)$$

$h_{ref}$  は目標液面保持高さであり,  $c_e$  は目標液面保持高さにおける流量係数である. これは, 注湯プロセスにおいて湯口の液面レベルが低い場合には, 湯口に投入される液体が湯口底面に衝突し, 液体が乱れるため, 湯道に液体が流れ込み難くなる. 一方で, 湯口内の液面レベルが上昇すると湯口内の液体の乱れは抑えられ, 湯道に液体が流れやすくなる. この状態を表現するために, 流量係数を式 (6) のような液面レベルに対応した変動パラメータとしている. 本論文では, 流量係数  $c_e$  は実験値とフィッティングすることで得ることができ,  $c_e = 0.59$  となった.

そして, 制御入力  $u_t(t)$  から鋳型内湯口の液位  $h_c(t)$  までのモデルは式 (1), (3)~(5) より, 式 (7) のように得られる.

$$P(s) = P_\theta(s)P_f(s)P_h(s) \quad (7)$$

### 3.2 注湯フィードフォワード制御

注湯プロセスで要求される制御仕様は, 注湯動作を短時間で遂行することである. したがって, 注湯してから素早く湯口内の液面を高い位置まで上昇させ, その液位を保持することである. この要求を実現するために注湯モデルの逆システムを用いたフィードフォワード制御を構築する.

(S1-3) 鋳型モデルの逆システム導出: 理想的な液面レベル曲線  $h_{cref}$  が与えられると式 (5) より  $h_s$  を得ることができる. ここで,  $h_s$  は前述でも示したように  $h_s > 0$  である. そして, 得られた  $h_s$  と  $h_{cref}$  を式 (8) に代入することにより, 取鍋から鋳型へ流入させる理想流量  $q_{ref}$  を得られる.

$$q_{ref} = AC \frac{dh_{cref}}{dt} + cAG \sqrt{2g(h_{cref} + h_1 - h_s)} \quad (8)$$

(S1-2) 取鍋の傾動角速度から流出流量までの流量モデルの逆システム導出: 流量モデルは式 (3) の 1 次遅れ系の LPV モデルであることから, 逆システムは式 (9) となる.

$$\omega_{ref} = \frac{T_{cf}(\theta)}{K_{cf}(\theta)} \frac{dq_{ref}}{dt} + \frac{1}{K_{cf}(\theta)} q_{ref} \quad (9)$$

(S1-1) モータモデルの逆システム導出: 入力電圧から傾動角速度までのモータモデルの逆システムは式 (1) を用いて, 式 (10) のように示される.

$$u_t = \frac{T_{tm}}{K_{tm}} \frac{d\omega_{ref}}{dt} + \frac{1}{K_{tm}} \omega_{ref} \quad (10)$$

式 (8)~(10) を用いることで, 理想液面レベル曲線  $h_{cref}$  から入力電圧  $u_t$  を得ることができる.

ここで, 逆システムに与える理想液面レベル曲線は, 式 (8)~(10) から制御入力を得るために, 3 回微分可能な関数でなければならない. したがって, 理想液面レベル曲線を式 (11) と

する.

$$h_{cref} = \begin{cases} -\frac{h_{ref}}{2\pi} \sin \frac{2\pi}{t_r} t + \frac{h_{ref}}{t_r} t & (0 \leq t < t_r) \\ h_{ref} & (t_r \leq t) \end{cases} \quad (11)$$

ここで,  $h_{ref}$  は式 (6) においても示している湯口内液面レベルの目標保持高さであり, 本論文では,  $h_{ref} = 0.06$  [m] としている.  $t_r$  は取鍋が傾動を開始してから目標保持液面高さへ到達するまでの時間であり,  $t_r = 2.5$  [s] としている. この理想液面レベル曲線を用いて, 取鍋の初期傾動角度を 38.8 [deg] としたときの液面レベル曲線  $h_{cref}$ , 理想流量  $q_{ref}$ , 傾動角速度  $\omega_{ref}$ , 入力電圧  $u_t$  を Fig. 9 に示す. ここで, 初期傾動角度 38.8 [deg] は, 取鍋が直立した状態で液位を 0.16 [m] とし, その後, 取鍋を傾動させて, 取鍋ノズル先端に液位が達したときの傾動角度であり, この角度から注湯を開始する.

Fig. 9 に示した初期傾動角度 38.8 [deg] としたときに得られた入力電圧を注湯ロボットへ与えたときの実験結果を Fig. 10 (a) に示す. また, 初期角度を変更した場合の検証として, 初期傾動角度 45.0 [deg] としたときに得られた入力電圧を注湯ロボットへ与えたときの実験結果を Fig. 10 (b) に示す. Fig. 10 において, シミュレーション結果である理想液面レベル曲線を破線で示し, 実験結果を実線で示す. 実験結果の液面レベルが 0.036 [m] から出力しているのは, Fig. 3 に示すようにレーザーセンサで液面レベルを計測するためのフロート位置が湯口下面から 0.036 [m] 上方にあるために, 液面レベルが 0.036 [m] 以下は 0.036 [m] を

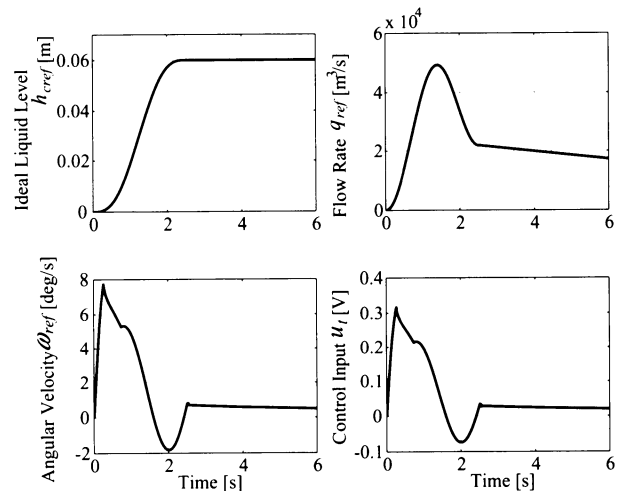


Fig. 9 Simulation results obtained from inverse model

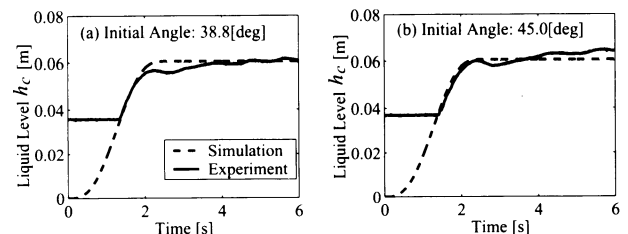


Fig. 10 Experimental results of pouring control

示している。実験結果より、円筒形状取鍋を用いた注湯モデルの逆システムから得られる入力電圧を傾動モータへ与えることで、素早く目標保持液面レベルへ到達し、保持していることが確認できる。また、初期傾動角度を変更しても同様の結果が得られることから、式 (3)~(5) の注湯モデルが妥当であることが確認できる。そして、注湯プロセスの順システムを用いた従来手法 [18] ではモータへの制御入力取得にかかる計算時間が、Pentium3 1.26 GHz のコンピュータを使用して 1.75 [s] であったが、本手法では 0.05 [s] と短時間で取得できることが確認された。従来手法は順モデルに Betterment Process を用いて制御入力を求めるため、繰り返し計算（本稿では繰り返し数 60 回）に時間を費やすが、本手法は逆モデルによって制御入力を求めるため、繰り返し計算を必要としないことから短時間計算が可能となる。

#### 4. 液面振動抑制を考慮した移動物体への追従制御

##### 4.1 制御系の概要

液面振動抑制を考慮した移動物体への追従システムを構築するために、Fig. 11 に示すリファレンス生成器を含む 2 自由度制御系を構成する。ここで、Target System は鋳型ラインの位置制御システムを示し、Tracking System は注湯ロボットの  $R_x$  軸方向の位置制御システムを示す。 $P_M(s)$ ,  $P_X(s)$  は式 (1) のモータモデルであり、 $S_X(s)$  は注湯ロボットが搬送されることによって、励振される取鍋内液体の液面振動を示す。 $K_M(s)$ ,  $K_X(s)$  は Target System, Tracking system のフィードバックコントローラを示す。また、Tracking System には、追従性能の向上を目的にフィードフォワードコントローラに注湯ロボットの逆システム  $P_X^{-1}(s)$  を適用する。Target System と Tracking System の間にある  $K_V$  は、注湯ロボットが移動物体へ追従を開始する際に  $u_V$  に生じるステップ状の信号から直接、フィードフォワードコントローラで用いている逆システムを解くことを避けるために設けられたゲインが 0 から 1 へと連続的に変化する時変ゲインフィルタを示す。 $r_M$ ,  $r_X$  は Target System と Tracking System の位置リファレンスであり、 $u_M$ ,  $u_X$  は鋳型ライン、注湯ロボットへ印加される入力電圧である。 $y_M$  は鋳型ラインの搬送距離、 $y_X$  は注湯ロボットの搬送距離である。そして、 $y_{Mi}$  は目標位置となる鋳型内湯口位置であり、 $y_M$  に偏差  $e_{Mi}$  を加え合わせたものである。また、 $e_X$  は  $e_X = y_X - y_M$  である。

本システムの理解を容易にするために、Fig. 11 のパラメータ

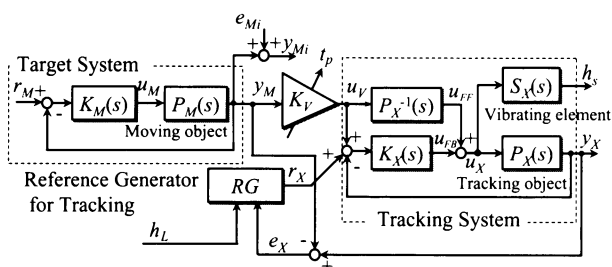


Fig. 11 Block diagram of tracking control system

を注湯ロボットの位置関係で示すと Fig. 12 となる。本論文では、 $e_{Mi}$ 、それに伴い  $y_{Mi}$  が未知情報であり、この未知情報をレーザセンサから得られた距離  $h_L$  をもとに未充填鋳型の湯口位置を検出し、Fig. 11 に示すリファレンス生成器  $RG$  を用いて、目標位置を生成し、追従する制御システムを構築する。

##### 4.2 フィードバックコントローラ $K_M(s)$ , $K_X(s)$

Fig. 11 におけるシステムのフィードバックコントローラ  $K_M(s)$ ,  $K_X(s)$  は、取鍋内の液面振動抑制を目的にハイブリッド整形法を用いて設計する。ハイブリッド整形法の設計手順については、文献 [4] を参照されたい。

本稿で用いるフィードバックコントローラの設計手法を次に示す。文頭の記号 (S2-1), (S2-2) は 1 章のアプローチ概要との対応を明確にするため示している。

(S2-1) 液面振動固有周波数の推定：コントローラを設計する際に、振動要素がもつ固有周波数を同定する必要がある。直立円筒形状容器に対する液面振動固有周波数の同定には、理論的に求める手法が提案されている [4]。しかし、取鍋傾動動作を含む取鍋内液体の液面振動固有周波数は、傾動角度によって液体形状が変化するため一定値とはならない。そこで、本論文では取鍋傾動動作中の液面振動を式 (12) に示す短時間フーリエ変換を行うことで、注湯中に変動する液面振動固有周波数の同定を行う。

$$Sp(t, f) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} h_s(\tau) w(t - \tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \right|^2 \quad (12)$$

ここで、 $h_s(t)$  は液面振動データであり、 $w(t)$  は窓関数である。本論文ではサンプリング周期 0.01 [s]、窓幅 256 点、大きさ 1 のパルス信号を窓関数とした。窓幅を広くすると時間に対する固有周波数変動が緩慢になる。また、データ点数が少ないと周波数分解能が劣化する。したがって、固有周波数変動が緩慢にならない中で窓幅を広くすることを考え、試行錯誤的に窓幅 256 点とした。

液面振動データは、注湯ロボットを Fig. 13 (a), (b) に示すように搬送と取鍋傾動を行うことで取得する。まず、 $R_x$  軸方向へ注湯ロボットを搬送することで、液面振動が生じる。そして、取鍋を  $R_\theta$  軸方向へ傾動させることで、液面振動固有周波数が変動する。取鍋傾動は 1 回の注湯動作を行う際の傾動軌道を用いる。取鍋が直立状態での静止液位は 0.16 [m] とし、初期傾動角度の 38.8 [deg] まで傾動させ、その後、3 章で示した注湯プロセスの逆システムによる傾動パターンを用いる。この動

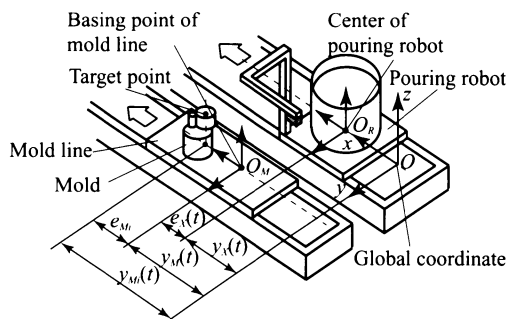


Fig. 12 Positions of whole system

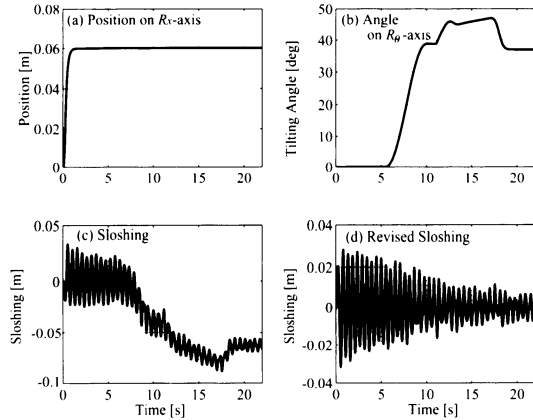


Fig. 13 Experimental results for sloshing analysis

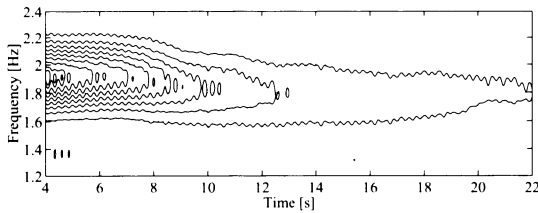


Fig. 14 Energy contour of sloshing

作によって得られた液面振動データを Fig. 13 (c) に示す。ここで、Fig. 13 (c) の液面振動データにおいて、6 [s] 以降の液面レベルが低下していることが確認できる。これは取鍋の傾動と注湯による液体の流出によって、液面レベルが低下したことを示している。この液面レベルの低下は周波数領域で低周波帯域のエネルギーを増大させ、液面振動の固有周波数の同定を困難にさせる。したがって、式 (13) を用いて、実験より得られた液面振動データ  $h_s$  を補正する。

$$\bar{h}_s(k) = h_s(k) - \frac{1}{2N+1} \sum_{m=-N}^N h_s(k+m) \quad (13)$$

ここで、 $t = k\Delta T$  であり、 $\Delta T$  はサンプリング周期を示す。本論文では  $\Delta T = 0.01$  [s] である。式 (13) の第 2 項は移動平均を示す。液面振動データだけを取り出すために、 $N = 50$  とした。これより得られた液面振動データ  $\bar{h}_s$  を Fig. 13 (d) に示す。

Fig. 13 (d) の液面振動データ  $\bar{h}_s$  に対して、式 (12) の短時間フーリエ変換を行う。これによって、得られた結果を Fig. 14 のエネルギー等高線図で示す。ここで、取鍋傾動に対する液面振動の変動を確認するため、取鍋傾動中の液面振動データ (4~22 [s]) に対して、短時間フーリエ変換を施す。Fig. 14 において、等高線が集中している部分が最もエネルギーが高いことを示している。したがって、時間が 4 [s] で周波数が 1.9 [Hz] 付近のエネルギーが最も高いことを示している。

ここで、各時間におけるエネルギーのピーク周波数を Fig. 15 (a) に示す。また、1 回目の注湯から続けて、2 回目の注湯動作を行った際の液面振動データ (27~45 [s]) に短時間フーリエ変換を施して、このときのエネルギーのピーク周波数を Fig. 15 (b) に示す。Fig. 15 (a) において、4 [s] のときのピーク

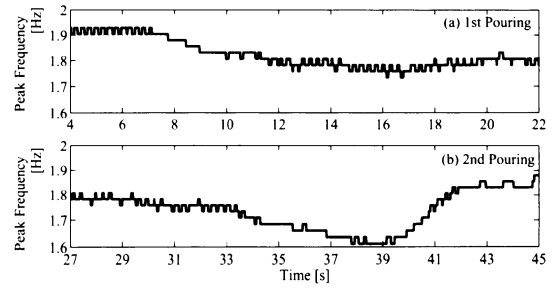


Fig. 15 Peak frequency obtained from short time fourier transform

ク周波数は 1.93 [Hz] を示している。これは、直立した円筒形状容器 (直径 0.24 [m]、液位 0.16 [m]) の理論的に得られる液面振動固有周波数と一致している。したがって、ピーク周波数が液面振動固有周波数を示していることが確認できる。そして、1 回注湯から 2 回注湯までの液面振動固有周波数は、この結果 1.93 [Hz] から 1.61 [Hz] まで変動している。この周波数帯域でのエネルギーを低減させることで、2 回の注湯動作を伴う液体搬送によって生じる液面振動を抑制することができる。この液面振動固有周波数の同定結果をハイブリッド整形法に反映させる。

(S2-2) コントローラの設計：ハイブリッド整形法では、最初にコントローラを定式化する。コントローラ  $K_M(s)$ 、 $K_X(s)$  は式 (14) となる。

$$K_i(s) = \frac{K_{pi}}{T_{li}s + 1} \prod_{k=1}^2 \frac{s^2 + 2\zeta\omega_{nk}s + \omega_{nk}^2}{s^2 + \omega_{nk}s + \omega_{nk}^2}, \quad (i = M, X) \quad (14)$$

$K_p$  は比例ゲインであり、 $T_l$  はローパスフィルタの時定数である。また、 $\omega_{nk}$  はノッチフィルタの阻止角周波数である。液面振動固有周波数は 1.93 [Hz] (12.13 [rad/s]) から 1.61 [Hz] (10.12 [rad/s]) まで変動することから、二つのノッチフィルタ ( $\omega_{n1} = 12.13$  [rad/s]、 $\omega_{n2} = 10.12$  [rad/s]) を用いて、液面振動固有周波数帯域のエネルギーを低減させる。 $\zeta$  は減衰係数であり、 $\zeta = 0.0001$  としている。添字  $M$ 、 $X$  は Target System, Tracking System のフィードバックコントローラを示す。一方、比例ゲイン  $K_p$  とローパスフィルタの時定数  $T_l$  は設計仕様 (装置制約、振動抑制のための周波数制約) を満たした中で整定時間を最小とする評価関数を用いた最適化により得られる。得られた結果を Table 2 に示す。ここで、 $T_s$  は鋳型ラインが 0.8 [m]、注湯ロボットが 1.0 [m] 搬送されたときの整定時間を示す。

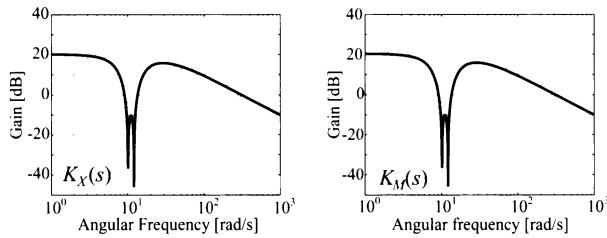
得られたコントローラの周波数特性を Fig. 16 に示す。これより、液面振動固有周波数 12.17 [rad/s] から 10.12 [rad/s] までの帯域でコントローラゲインが減衰していることが分かる。また、比例ゲインとローパスフィルタより低周波数帯域におけるゲインが高く、高周波数帯域におけるゲインは低くなっている。このことから、固有周波数が変動する液面振動を抑制し、短時間で目標値に到達することが可能となる。

#### 4.3 時変ゲインフィルタ

自走式自動注湯ロボットにおいて、移動している最中の鋳型へ注湯ロボットが停止した状態から追従を開始する場合がある。

**Table 2** Parameters of obtained feedback controllers

	$T_s$ [s]	$K_p$ [V/m]	$T_i$ [s]
Target System $K_M$	3.04	10.47	0.034
Tracking System $K_X$	2.88	10.22	0.033

**Fig. 16** Gain diagram of FB controllers

その例としては、取鍋内の溶湯が空になった場合に給湯するために補給ポイントへ注湯ロボットを移動させて、取鍋内へ溶湯を給湯し、給湯終了後に再び注湯ロボットが未充填鋳型へ追従するプロセスがその一つである。これは、Fig. 11の追従システムにおいて、Target SystemとTracking Systemの間にスイッチング回路を設けることで実現できる。しかし、このスイッチングによって、 $u_V$ にステップ状の信号が生じ、これがフィードフォワードコントローラを通じて、過大なインパルス信号となり、振動要素を励振することとなる。これを回避するために、0から1へと連続的に変化する時変ゲインフィルタを用いる。設計手順については、フィードバックコントローラ同様、文献[4]を参照されたい。本論文では、得られた時変ゲインフィルタのみを示す。

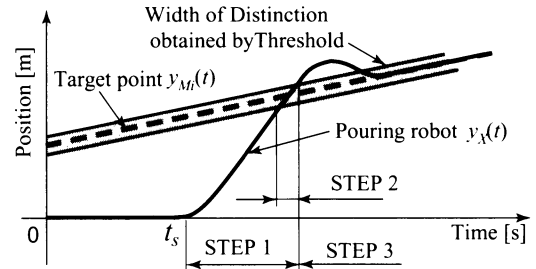
時変ゲインフィルタは式(15)に示す時間多項式を用いる。

$$K_V = \begin{cases} 0 & (t_p < 0) \\ \frac{10}{T^3}t_p^3 - \frac{15}{T^4}t_p^4 + \frac{6}{T^5}t_p^5 & (0 \leq t_p < T) \\ 1 & (t_p \geq T) \end{cases} \quad (15)$$

ここで、 $t_p$ は注湯ロボットが追従を開始した時点 $t=0$ とした時間軸である。そして、 $T$ は追従開始( $K_V=0$ )からFig. 12に示す鋳型ラインの基準 $O_M$ に到達( $K_V=1$ )した時間を示す。したがって、 $T$ を小さくすることで、注湯ロボットが鋳型ラインの基準位置へ短時間で到達できる。このことから、設計仕様(装置制約、振動抑制)を満たした中で、 $T$ を最小とする評価関数を用いて最適化を行う。この結果、 $T=2.84$ が得られた。

#### 4.4 リファレンス生成器の設計

目標位置である未充填鋳型の湯口の自動位置検出を行い、検出した湯口へ追従するリファレンスを生成するために、Fig. 11に示すリファレンス生成器RGを構築する。リファレンス生成器RGはレーザセンサから得られた距離 $h_L$ 、そして、注湯ロボット中心 $O_R$ の位置 $y_X$ と鋳型ライン基準 $O_M$ の位置 $y_M$ との位置偏差 $e_X$ を用いて、目標位置である未充填鋳型内湯口中心位置 $y_{Mi}$ を算出し、リファレンス $r_X$ を出力する。リファレンス生成器の詳細については、文献[20]を参照されたい。ここで、概略として、リファレンス生成器で行われる三つのプロセスを示す。

**Fig. 17** Detection and tracking process of reference generator

#### ステップ1：目標位置が検出されるまでのリファレンス生成

目標位置である鋳型の湯口位置を探索するために、リファレンス生成器は等速リファレンスを出力する。等速リファレンスは注湯ロボットが鋳型の湯口を通過するまで与えられる。

#### ステップ2：目標位置の検出方法

注湯ロボットに設置されているレーザセンサが未充填鋳型の湯口を通過する際に、鋳型ラインの基準 $O_M$ から未充填鋳型の湯口までの偏差 $e_{Mi}$ を式(16)を用いて計算する。

$$e_{Mi} = \frac{\max(e_X) + \min(e_X)}{2} \quad (|h_L| < h_{Lth}) \quad (16)$$

ここで、 $e_X$ はFig. 12に示す注湯ロボット中心 $O_R$ から鋳型ライン基準点 $O_M$ までの位置偏差である。 $h_L$ はFig. 4に示すレーザセンサから得られた距離であり、 $h_{Lth}$ はFig. 5に示す未充填鋳型内湯口の底面を抽出するための閾値である。また、 $\min(e_X)$ はレーザセンサから検出された距離が閾値内にあるときの鋳型ラインの基準 $O_M$ と注湯ロボット中心 $O_R$ との最小偏差である。これは、レーザセンサが未充填鋳型内湯口に最初に入ったときの $e_X$ を示す。 $\max(e_X)$ はレーザセンサから検出された距離が閾値内にあるときの鋳型ラインの基準 $O_M$ と注湯ロボット中心 $O_R$ との最大偏差であり、レーザセンサが未充填鋳型内湯口を過ぎる直前の $e_X$ を示す。したがって、 $\min(e_X)$ と $\max(e_X)$ の平均をとることで、鋳型ライン基準から未充填鋳型内湯口の中心までの距離 $e_{Mi}$ を得ることができる。

#### ステップ3：追従するためのリファレンス生成

ステップ1、ステップ2の後、すなわち、式(16)の目標位置検出が行われた後にリファレンス生成器は式(17)のリファレンスを出力する。

$$r_X = e_{Mi} \quad (17)$$

これにより、注湯ロボットが目標位置である未充填鋳型内湯口に追従することが可能となる。ここで、鋳型ラインが等速で移動するときのリファレンス生成器のプロセスをFig. 17に示す。注湯ロボットの位置を実線で示し、目標位置である未充填鋳型内湯口の中心を破線で示す。そして、閾値によって検出される湯口底面を灰色で示す。これより、湯口を通過するまではステップ1で与えられたリファレンスにより目標位置が探索される。そして、湯口に入った段階で、ステップ2によって目標位置が計算される。湯口を通過後、ステップ3で目標位置に追従するためのリファレンスが出力される。

#### 4.5 実験結果

提案した注湯動作を含む液体搬送に対する液面振動抑制制御



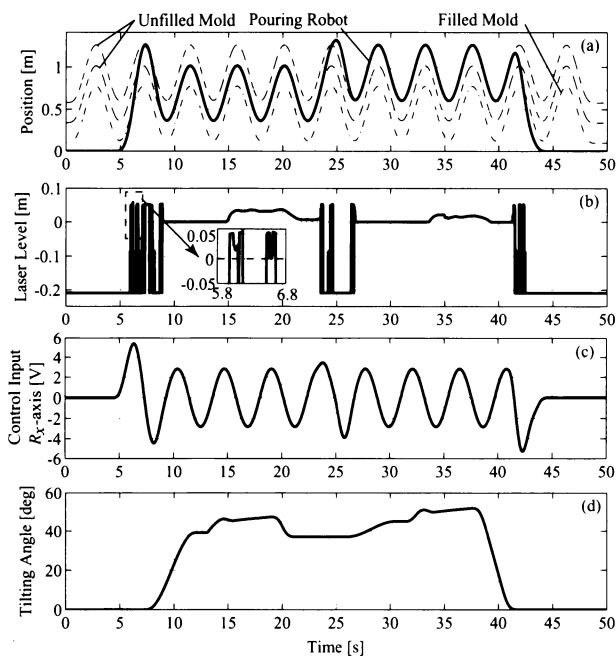


Fig. 18 Experimental results of automatic pouring robot

の検証として、Fig. 3 に示す自走式自動注湯ロボットを用いて、未充填鋳型への追従制御実験を行う。本研究で用いる実験室用鋳型ラインは、搬送距離が 0.8 [m] と限界があることから、鋳型ラインを正弦波状（振幅 0.35 [m]、周波数 0.23 [Hz]）に搬送させる。Fig. 3 に示す鋳型ライン上には 3 体の鋳型を搭載し、右側の鋳型は液体が充填されており、中央と左側の鋳型は未充填である。それぞれが 0.24 [m] 間隔で配置されている。そして、鋳型ラインが搬送を開始してから 4.5 [s] 後に注湯ロボットが追従を開始する。また、本実験の注湯動作は、3 章で示した逆システムによる注湯フィードフォワード制御を用いて、未充填鋳型に対して、2 回注湯を行う。

上述の実験条件によって得られた実験結果を Fig. 18 に示す。Fig. 18 (a) は鋳型と注湯ロボットの位置を示す。破線は未充填鋳型の湯口中心を示し、一点鎖線は充填鋳型の湯口中心を示す。そして、実線は注湯ロボットの中心位置（取鍋ノズル中心位置）を示す。Fig. 18 (b) は注湯ロボットに取り付けられているレーザーセンサから検出された距離  $h_L$  を示す。この距離は湯口底面を 0 [m] としている。また、破線部で示す注湯ロボットが充填鋳型と未充填鋳型を通過した際（5.8～6.8 [s]）のレーザーセンサから検出された距離を拡大図で示す。Fig. 18 (c) は注湯ロボットの  $R_x$  軸モータへ印加される入力電圧である。そして、Fig. 18 (d) は取鍋の傾動角度である。Fig. 18 (a) より、注湯ロボットが充填鋳型を通過して、未充填鋳型へ追従していることが確認できる。そして、Fig. 18 (b) の拡大図より、レーザーセンサから検出された距離が充填鋳型と未充填鋳型では異なり、未充填鋳型で  $|0.005|$  [m] 以内を示していることから、未充填鋳型の湯口底面を検出していることが確認できる。また、注湯動作を行うことにより湯口に液体が注がれるため、1 回注湯時の 15～20 [s]、2 回注湯時の 34～39 [s] の間でレーザーセンサの計測高さが変動している。このように移動している鋳型へ追従しながら、注湯が

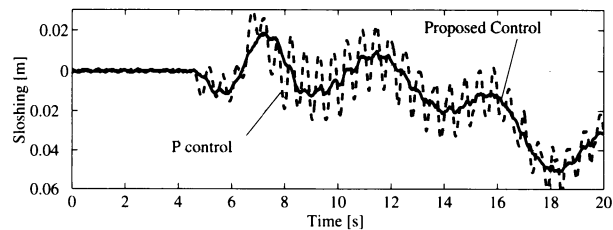


Fig. 19 Experimental results of sloshing in ladle

なされていることが確認できる。

この実験から得られた液面振動を Fig. 19 に示す。ここで、比較対象として、Fig. 11 に示すシステムのフィードバックコントローラを比例制御とした場合の実験結果も同時に示す。このときの比例ゲインは注湯ロボットが移動鋳型へ同期するまでの時間が同じになるように設定している。したがって、比例ゲインは 29.8 とした。破線が比例ゲインによる液面振動であり、実線が提案した制御系での液面振動である。また、Fig. 19 は鋳型ラインが搬送を開始してから、1 回注湯が終了する 20 [s] までを示している。この結果は 2 回目の注湯においても同様の結果を得ている。Fig. 19 において、液面振動が注湯ロボットの追従開始時間（4.5 [s]）以降に生じている。そして、比例制御、提案制御系の両方ともに 0.23 [Hz] の振動が生じている。これは、鋳型ラインが正弦波状に搬送されているため、このときの加減速によって液面が傾いていることを示している。また、液面レベルが徐々に低下していることが確認できる。これは、液体が注湯動作によって流出していることを示している。しかし、比例制御においては、1.9 [Hz] 付近の液面残留振動が生じている。この液面振動によって、注湯流線が乱れ、正確に湯口へ注湯できなくなることが確認された。一方で、提案した制御系は 1.9 [Hz] 付近の液面残留振動を抑制できているため、安定した注湯流線を得ることが確認された。

## 5. 結 言

本論文は円筒形状取鍋に対する逆システムを用いた注湯制御と未充填鋳型の自動位置検出、液面振動抑制を考慮した自走式自動注湯ロボットを構築した。円筒形状取鍋の流量モデルに対して、LPV モデルを用い、鋳型モデルからモータモデルまでの逆システムを導出することで、円筒形状取鍋の高速注湯動作を実現した。そして、注湯動作を含む液体搬送の液面振動に対して、短時間フーリエ変換を用いることで変動する液面振動固有周波数を同定し、この周波数帯のエネルギーを低減させることで、液面振動を抑制できることを示した。本制御システムにより、自走式自動注湯ロボットに対して高速かつ流量が安定した注湯動作が実現できることを実験を通して示した。

これらのことから、提案した注湯、液面振動抑制制御システムを自走式自動注湯ロボットへ適用することにより、製品品質向上、生産性向上が期待できると思われる。

## 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，vol.39, no.6, pp.1-8, 1998.
- [2] 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熱

- 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, vol.21, no.6, pp.670-681, 2003.
- [3] 川岸博伸, 矢野賢一, 寺嶋一彦, 鈴木祐二: “CFD シミュレーションによる移動鋳型内凝固欠陥解析と搬送制御”, 第144回日本鑄造工学会全国大会講演概要集, p.56, 2004.
- [4] 野田善之, 矢野賢一, 三好孝典, 寺嶋一彦: “移動物体への液面振動抑制を考慮した追従制御”, 計測自動制御学会論文集, vol.40, no.4, pp.424-433, 2004.
- [5] H. Kitada, O. Kondo, H. Kasachi and K. Sasame: “ $H_{\infty}$  Control of Molten Steel Level in Continuous Caster,” IEEE Trans. Systems Technology, vol.6, no.2, pp.200-207, 1998.
- [6] M. Abarron, R. Aguilar, J. Gnozalez and E. Melendez: “Model-based Control of Model Level in a Continuous Caster under Model Uncertainties,” Elsevier Science Ltd, pp.191-196, 1998.
- [7] S.F. Graebe, G.C. Goodwin and G. Elsley: “Control Design and Implementation in Continuous Steel Casting,” IEEE Control Systems, vol.15, no.4, pp.64-71, 1995.
- [8] W. Lindsay: “Automatic Pouring and Metal Distribution Systems,” Foundry Trade Journal, Feb. 10, pp.151-176, 1983.
- [9] R.C. Rodgers: “Automatic Pouring '88,” Foundry management and technology, October, pp.36-38, 1988.
- [10] T. Bex: “Melting and Pouring,” modern casting, August, pp.27-34, 1992.
- [11] 藤江正克: “自動注湯機へのマイコンの利用”, 総合鋳物, vol.22, no.10, pp.7-11, 1981.
- [12] 佐藤二郎, 吉田健逸: “メルボアシステム鑄造用自動注湯装置”, 工業加熱, vol.29, no.4, pp.19-27, 1992.
- [13] 勝部展生, 永井正夫: “傾動式自動注湯機の液面制御に関する研究 (第1報 モデリングと制御)”, 日本機械学会論文集 (C編), vol.65, no.634, pp.2345-2351, 1999.
- [14] K. Terashima and K. Yano: “Sloshing Analysis and Suppression Control of Tilting-Type Automatic Pouring Machine,” IFAC Journal of Control Engineering Practice, vol.9, no.6, pp.607-620, 2001.
- [15] 松田政夫, 頃安貞利: “傾動軸昇降装置を有する自動注湯機からの流量計算法”, 鑄造工学, vol.71, no.1, pp.3-8, 1999.
- [16] M. Kaneko, Y. Sugimoto, K. Yano and K. Terashima: “Supervisory Control of Pouring Process by Tilting-Type Automatic Pouring Robot,” Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems Las Vegas, pp.3004-3009, 2003.
- [17] Y. Sugimoto, K. Yano and K. Terashima: “Liquid Level Control of Automatic Pouring Robot by Two-Degrees-of-Freedom Control,” Proceedings of IFAC 15th Triennial World Congress, 2002.
- [18] 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), vol.70, no.694, pp.206-213, 2004.
- [19] 矢野賢一, 川岸博伸, 寺嶋一彦: “CFD によるスロッシング解析と溶湯搬送制御システム設計”, 日本機械学会論文集 (C編), vol.68, no.671, pp.2001-2008, 2002.
- [20] Y. Noda, K. Yano and K. Terashima: “Detection and Tracking Control to Unknown Moving Object Considering Sloshing-Suppression in Pouring Robot,” Proceedings of the 23rd IASTED International Conference MODELLING, IDENTIFICATION, AND CONTROL, pp.345-350, 2004.



野田善之 (Yoshiyuki Noda)

1972年8月6日生。2003年豊橋技術科学大学大学院工学研究科修士課程修了。同年、豊橋技術科学大学大学院工学研究科博士課程に入学、現在に至る。2005年6~8月メルボルン大学客員研究員。鑄造産業における注湯工程の自動化、制振制御、トラッキング制御、および動的計量の研究に従事。計測自動制御学会、日本鑄造工学会、日本計量史学会の会員。

(日本ロボット学会学生会員)



矢野賢一 (Ken'ichi Yano)

1969年4月4日生。1999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。2004年岐阜大学工学部機械システム工学科助教授となり現在に至る。2002年8月~2003年8月ベルリン工科大学客員研究員。システム制御理論とその応用に関する研究に従事。計測自動制御学会、システム制御情報学会、日本機械学会、日本鑄造工学会、IEEE等の会員。(日本ロボット学会正会員)



寺嶋一彦 (Kazuhiko Terashima)

1952年6月24日生。1981年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了。1982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1994年教授、現在に至る。1991年9月~1992年9月ドイツ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関する研究に従事。計測自動制御学会、システム制御情報学会、日本機械学会、日本鑄造工学会、IEEE等の会員。

(日本ロボット学会正会員)