実用取鍋を用いた自動注湯プロセスのモデリングと注湯流量制御

Modeling and Flow Rate Control to Automatic Pouring System by using Real Ladle

正 野田善之 正 寺嶋一彦（豊橋技科大）

Yoshiyuki NODA, Kazuhiko TERASHIMA,
Toyohashi University of Technology, {noda, terasima}@syscon.pse.tut.ac.jp

This paper is concerned with a flow rate control of tilting-ladle-type automatic pouring process in casting industries. In this paper, the flow rate is modeled mathematically by using mass equilibrium and Bernoulli's theorem. And then, the flow rate feedforward control system is constructed by using inverse dynamics of the flow rate model. By using the control system, accuracy of the flow rate can be improved, and it is possible to construct systematically the flow rate control to ladles with various shapes. In order to verify effectiveness of the proposed control system, the system is applied to automatic pouring robot in real casting plant.

Key words: automatic pouring robot, flow rate control, modeling, feedforward control, inverse dynamics

1. 緒言

現在、鑄造工場の注湯工程において、労働者の作業環境改善を目的に、自動化およびクリーンな環境づくりが進められている。その中において、ディスクドラムなどの鑄鉄製品の製造に用いられている傾動式取鍋を利用した注湯工程は、取鍋内の溶湯を鑄型内湯口へこぼさずに短時間で注ぎ、溶湯を溢れさせないといった多くの要求を満たさなければならないことから自動化が困難となっている[1]。

上述の背景に対して、取鍋を扇形に限定して、注湯制御を行った研究が提案されている[2][3]。しかし、扇形取鍋は、取鍋の溶湯容量に対して、注湯装置全体が大型になることや、同一体積に対して表面積が大きくなることにより、取鍋内の溶湯温度が低下しやすい問題を抱えている。一方で、従来の作業者による手動注湯では、円筒形取鍋や鑄型内へのスラグ混入を防ぐための敷居板が設置された取鍋が用いられている。円筒形取鍋は、扇形取鍋と比較して、注湯装置が大型化せず、溶湯温度が低下しにくい特徴をもつ。しかし、取鍋の傾動角度と取鍋から流出する液体の流出量が、扇形取鍋のような比例の関係にないため、流量制御を行うことが困難とされている。そこで、円筒形取鍋の流量制御に対して、ファジィ制御を適用した研究がなされている[4]。文献[4]では、ファジィルールの構築が試行錯誤的であり、多大な時間を必要とする。また、著者らによって、円筒形取鍋の流量モデルを取鍋傾動角度に依存するLPV(線形パラメータ変動; Linear Parameter Varying)モデルで表現し、その逆モデルによって、制御入力を導出する手法

が提案されている[5][6]。しかし、LPVモデルは、各取鍋傾動角度に対して、流量モデルのパラメータを求める必要があるため、多くの同定実験を必要とすることや近似モデルであることから、参照入力である流量パターンが異なると追従精度が低下する等の問題を抱えている。

そこで、著者らは、新たに、物理則に基づく非線形注湯流量モデルを構築し、その逆モデルによる注湯流量フィードフォワード制御を提案した。提案モデルは、円筒形取鍋に対して、高精度に参照流量パターンに追従することを示した。そこで、本稿では、提案システムの汎用性検証として、スラグ防止形取鍋に対して、提案している注湯流量制御を適用する。また、実際に溶湯を用いた注湯実験を行い、提案システムの有用性を確認する。

2. 注湯流量モデル

スラグ防止形取鍋傾動による取鍋内液体の流出を図1に示す。

Fig. 1 Illustration of tilting ladle

図1に示す注湯プロセスは、モータに電圧 u [V]を印加して、容器が角速度 ω [deg/s]で傾動することで容器内の液体が流量 q_c [m³/s]流出する。ここで、モータは式(1)に示す一次遅れ系で示される。

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{T_q}\omega(t) + \frac{K_q}{T_q}u(t) \quad (1)$$

T_q [s]は時定数であり、 K_q はゲイン定数である。

つづいて、流量モデルは式(2), (3)より示される。

$$\frac{dV_r(t)}{dt} = -c \int_0^{\frac{V_r(t)}{A(\theta(t))}} \left(L_f(h_b) \sqrt{2gh_b} \right) dh_b - \frac{\partial V_s(\theta(t))}{\partial \theta(t)} \omega(t) \quad (2)$$

$$q_c(t) = c \int_0^{\frac{V_r(t)}{A(\theta(t))}} \left(L_f(h_b) \sqrt{2gh_b} \right) dh_b \quad (3)$$

ここで、 V_r [m³]は図2に示す容器液体出口下端より上部の液体の体積であり、 V_s [m³]は容器液体出口下端より下部の液体の体積である。 A [m²]は容器液体出口下端に対して水平面の面積である。 θ [deg]は容器傾動角度である。そして、 g は重力加速度であり、 c は流量係数である。

Fig. 2 Parameters of ladle

また、式(1), (2)の L_f [m]は、図3に示す液体表面からの深さ h_b [m]における出湯口の幅である。

この流量モデルでは、 V_s , A , L_f は容器形状から得ることができ、液体の特性を表す流量係数 c のみを同定実験により決定する。同定方法は、モータへステップ入力を与え、容器から流出する液体の重量をロードセルにて計測し、その結果と式(2), (3)の流量モデルによるシミュレーション結果をフィッティングさせることで流量係数を得ることができる。本研究で用いる円筒形状容器では、流量係数は $c=0.60$ であった。

Fig. 3 Parameters of pouring mouth

3. 逆モデルによる注湯流量フィードフォワード制御

式(2), (3)に示した流量モデルの逆モデルを導出する。まず、式(3)より、流量 q_c [m³/s]と出湯口より上部液体の高さ $h=V_r/A$ [m]との関係をLook Up Tableで表現する。そして、Tableの入出力関係を逆転させ、式(4)に示す式(3)の逆問題のLook Up Tableとして表現する。

$$\mathbf{h} = f^{-1}(\mathbf{q}_c) \quad (4)$$

式(4)のTableを用いて、式(5)に示す所望の流量パターン q_{cref} [m³/s]を実現するための出湯口上部液体の高さ h_{ref} [m]を求める。

$$h_{ref}(t) = f^{-1}(q_{cref}(t)) \quad (5)$$

そして、高さ h_{ref} [m]より、式(6)を用いて、出湯口上部液体の体積を求めることができる。

$$V_{rref}(t) = A(\theta(t))h_{ref}(t) \quad (6)$$

所望の流量パターン q_{cref} [m³/s]と式(5), (6)より得られた出湯口上部液体体積 V_{rref} [m³]を式(2)の逆モデルである式(7)に与えることで、所望の流量パターンを実現する取鍋傾動角速度 ω_{ref} [deg/s]を得ることができる。

$$\omega_{ref}(t) = -\frac{\frac{dV_{rref}(t)}{dt} + q_{cref}(t)}{\frac{\partial V_s(\theta(t))}{\partial \theta(t)}} \quad (7)$$

4. 実験結果

4.2 対象液体を水とした注湯実験

対象液体を水として、注湯実験を行う。注湯装置の下部にロードセルを設置し、取鍋内液体の重量を含む取鍋重量を計測する。したがって、取鍋内液体が取鍋から流出することにより、取鍋重量が減少する。この減少重量が、流出液体の重量となる。

所望の流量パターン q_{cref} [m³/s]を図4の上端の図に示す。また、この所望の流量パターンをロードセルで計測できる流出重量で表すと図4の下端の図となる。図4の上段において、 0.6×10^{-4} [m³/s]と

Fig. 4 Desired flow rate pattern

$1.2 \times 10^{-4} [\text{m}^3/\text{s}]$ の二段階の流量となっている。これは、砂型プレスキャスト法における注湯時飛散対策のために設けている[7]。

所望の流量パターンを本稿で提案する注湯流量フィードフォワード制御システムに与えて、注湯実験を行う。実験条件として、注湯開始初期角度を26[deg]と28.5[deg]の2つの条件で実験を行う。注湯開始初期角度を26[deg]としたときの注湯実験の結果を図5に示し、注湯開始初期角度を28.5[deg]としたときの注湯実験の結果を図6に示す。

Fig.5 Experimental results

(Initial angle 26[deg])

Fig.6 Experimental results

(Initial angle 28.5[deg])

図5、図6において、左上段の図がモータへの入力電圧を示し、右上段の図が取鍋傾動角速度、左下段の図が傾動角度、右下段の図がロードセルより計測される液体流出重量である。右下段の図において、破線が所望の注湯流量パターンをロードセルより計測される流出重量に変換した目標流出重量であり、実線が注湯実験より得られた流出重量である。ここで、流量制御の精度検証とし

て、目標流出重量と注湯実験による流出重量との誤差率を求める。流出重量誤差率 $p_f[\%]$ は、式(8)に示す。

$$p_f = \frac{\int_0^T |W_L(t) - W_{Lr}(t)| dt}{\int_0^T W_{Lr}(t) dt} \times 100 \quad (8)$$

ここで、 $W_L[\text{Kg}]$ は注湯実験による液体流出重量であり、 $W_{Lr}[\text{Kg}]$ は目標流出重量である。それぞれの実験で得られた流出重量を用いて、流出重量誤差率した結果、表1となる。

Table 1 Error rate of pouring outflow weight

Initial Tilting Angle	Error rate of pouring outflow weight
26 [deg]	9.27[%]
28.5 [deg]	9.22[%]

表1から、流出重量の誤差率は、1[%]以内となる。線形パラメータ変動モデルを用いた流量制御[5][6]では、流出重量誤差率が20[%]前後であったことから、本稿で提案する流量制御は精度良く所望の流量パターンに追従できることが確認された。

4. 2 対象液体を溶湯とした注湯実験

対象液体を溶湯として、本稿で提案した注湯流量制御の注湯実験を行う。水実験と同様に注湯開始初期角度を26[deg]、28.5[deg]として、実験を行う。ここで、溶湯用注湯装置では、位置制御により取鍋の傾動角度を制御しているため、制御入力は傾動角度となる。注湯開始初期角度が26[deg]としたときの注湯実験の結果を図7、28.5[deg]としたときの注湯実験の結果を図8に示す。

Fig.7 Experimental results by molten metal (Initial angle 26[deg])

Fig.8 Experimental results by molten metal (Initial angle 28.5[deg])

図7、図8において、左側の図が取鍋傾動角度であり、右側の図が液体流出重量である。液体流出重量において、破線が所望

の流量パターンをロードセルにより計測できる流出重量へ変換した目標流出重量であり、実線は提案した制御システムによる注湯実験の結果である。溶湯は水の比重の7倍であるため、目標流出重量も水の7倍となっている。また、溶湯を用いた注湯実験では、安全への配慮のため、注湯開始初期角度が26[deg]の実験では、実験開始時の取鍋角度を25[deg]と1[deg]手前とし、等角速度で26[deg]まで傾動し、26[deg]に到達した時点で、流量制御システムが適用される。注湯開始初期角度が28.5[deg]に対しても同様である。注湯終了時の取鍋後傾に対しても、安全への配慮から水実験よりも後傾角度を大きく取っている。ここで、目標流出重量と注湯実験による流出重量との誤差率を求める。水実験と同様に式(8)を用いて、誤差率 p_f [%]を求める。注湯流出重量誤差率を表2に示す。

Table 2 Error rate of pouring outflow weight

Initial Tilting Angle	Error rate of pouring outflow weight
26 [deg]	12.40[%]
28.5 [deg]	11.76[%]

表2より、溶湯を用いた注湯実験では、水実験ほどの注湯制御の精度が得られていないことが確認できる。

これは、注湯開始初期角度が本来26[deg]から開始するはずであるが、溶湯を用いた場合には異なることが流出重量の誤差を大きくする原因と考えられる。そこで、溶湯実験から得られた流出重量に対して、流量モデルのシミュレーション結果が一致するように注湯開始初期角度を変更させた結果を図9に示す。

Fig.9 Result of fitting simulation outflow weight to experimental outflow weight

図9において、実線が注湯実験の結果であり、破線がシミュレーション結果である。注湯実験では、注湯開始初期角度が26[deg]として実験を行ったが、シミュレーションにおける注湯開始初期角度を変更し、注湯実験結果にフィッティングさせた結果、注湯開始初期角度が25.8[deg]となった。このときの誤差率は5.13[%]であった。このように注湯開始初期角度が0.2[deg]異なるだけで、流出重量の誤差が大きくなることが確認された。

5. 結 言

本稿では、実際に注湯現場で採用されているスラグ防止形取鍋

を用いて、注湯流量制御を行った。スラグ防止形取鍋に対する注湯流量モデルを構築し、その逆モデルによる注湯流量フィードフォワード制御システムを構築した。そして、水実験を通じて、従来の注湯流量制御よりも高精度に所望の注湯流量を実現できることを示した。また、溶湯を用いて、注湯実験を行った。その結果、注湯開始初期角度が僅かにことなるだけで、注湯流出量の誤差が大きくなることが確認された。

実際の注湯プロセスを考えると注湯開始初期角度には常に誤差が生じることが考えられる。このようなモデル化誤差に対しては、フィードフォワード制御では精度を改善することが困難である。したがって、今後は注湯流量フィードバックシステムの開発が望まれる。

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.39-6, 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ー制御”, 日本ロボット学会誌, vol.21-6, pp.90-101, 2003
- [3] 佐藤二朗, 吉田健逸, “メルボアシシステム鋳造用自動注湯装置”, 工業加熱, vol.29-4, pp.19-27, 1991
- [4] 篠原一寛, 森本博幸, “自動注湯機の開発”, 自動車技術, vol.46-11, pp.79-85, 1992
- [5] 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”, 機論C編, vol.70-694, pp.206-213, 2004
- [6] 野田善之, 矢野賢一, 寺嶋一彦, “取鍋搬送の複合動作をともな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”, vol.24-1, pp.94-103, 2006
- [7] 松尾祐介, 野田善之, 寺嶋一彦, 矢野賢一, 鈴木新雄, 太田和弘, “フィードフォワード注湯量制御システムの傾動式自動注湯実用装置への適用”, 日本鋳造工学会第147回全国大会講演概要集, pp.123, 2005