

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：13501  
 研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2011～2012  
 課題番号：23760205  
 研究課題名（和文） 注湯プロセスの数理解析とシステム統合に基づく高精度注湯制御システムの開発  
 研究課題名（英文） Development of High-precision Pouring Control System Based on Mathematical Analysis of Pouring Process and System Integration  
 研究代表者 野田 善之（NODA YOSHIYUKI）  
 山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授  
 研究者番号：60426492

研究成果の概要（和文）：本研究では、鋳造業で用いられる取鍋傾動式自動注湯ロボットに対して、高速かつ高精度化を実現することを目的とした注湯流量制御を中核とする注湯制御システムを開発した。カルマンフィルタを用いた注湯流量推定システムを設計し、推定流量に対する注湯流量フィードバック制御システムを構築した。そして、注湯流量制御を基幹として充填重量制御をシステム統合することで、充填重量制御の高精度化が実現された。また、所望位置へ高精度注湯することを目的とした高精度落下位置制御が開発された。

研究成果の概要（英文）：In this study, the pouring control system which the flow rate control is installed as the core control system has been developed for pouring precisely and quickly the molten metal into the mold for a tilting-ladle-type automatic pouring robot used in casting industry. In this approach, the flow rate estimation system has been designed by Kalman filter, and the flow rate feedback control system using the estimated flow rate has been constructed. Furthermore, high-precision outflow weight control system has been realized by integrating systematically the outflow weight control with the flow rate control as the core control system. In order to pour precisely to the target position, the falling position control system has been developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：機械力学・制御

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：自動注湯ロボット，流量制御，カルマンフィルタ，フラットネスベースド制御，充填重量制御，落下位置制御，液体カメラ計測

### 1. 研究開始当初の背景

鋳造産業における注湯工程は高温の溶湯を鋳型へ注ぐ工程であることから、作業にとって過酷な作業現場である。また、歩留まり向上や溶湯の溢流を回避するために、正確に注湯することが要求されている。これらの背景から、注湯工程の自動化及び高精度化が進められている。欧州では主に、ストッパーノズル式自動注湯ロボットの開発が進められており、日本を中心とした東アジアでは、

図1に示す取鍋傾動式自動注湯ロボットの開発が進められている。取鍋傾動式自動注湯ロボットは、作業による手動注湯と同様の注湯方式であるため、設備導入が容易である利点をもつが、一方で、ストッパーノズル式自動注湯ロボットと比較して、注湯精度が低いことが欠点となっている。

取鍋傾動式自動注湯ロボットの高精度化に関する従来研究では、注湯プロセスを線形近似モデルで表現し、ファジィ制御による注

湯充填量制御や $H_0$ 制御による湯口内液面レベル制御などが提案されている。しかし、これらの従来制御手法は、使用環境が限定されることや制御系の構築に多くの予備実験を必要とする。溶湯を取り扱う注湯工程では、安全性の観点から数多くの実験を行うことは困難であり、実用化には至っていない。そこで、研究代表者は取鍋内液体流動プロセスの数理解析を行い、精度の高い注湯数理解モデルを提案した。このモデルは、容器形状から多くのモデルパラメータを導出できるため、数少ない実験でモデル構築が可能であり、多様な注湯環境においても高い精度で表現できる利点をもっている。そして、提案した注湯数理解モデルを基にした注湯充填量予測制御を開発した。従来の注湯ロボットにおける充填量精度が5%~10%であったのに対して、提案制御システムを導入した自動注湯ロボットは、3%以下の充填量精度を実現している。

しかし、自動注湯ロボットの高精度化を実現するためには、注湯充填量制御だけでなく、図1に示すように、取鍋から流出する液体の流量を制御する注湯流量制御、流出液体を正確に湯口へ注ぐ流出液体落下位置制御、湯口から液体が溢流しないように湯口内液面レベルを制御する湯口内液面レベル制御の開発が必要である。従来研究では、注湯流量制御、および流出液体落下位置制御に関する研究は報告されていない。また、注湯充填量制御や湯口内液面レベル制御などの一つの要件に特化した制御システムの提案が報告されているが、各種制御をシステム統合した自動注湯ロボットの高精度化に関する研究も報告されていない。

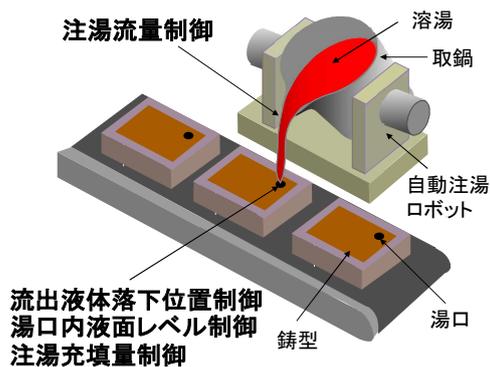


図1 取鍋傾動式自動注湯ロボット

## 2. 研究の目的

本研究では、研究代表者が提案した注湯数理解モデルを基に、注湯流量制御、流出液体落下位置制御、および充填重量制御を開発し、それぞれの制御をシステム統合することで、自動注湯ロボットの高精度化を実現する。ここで、注湯プロセスは、図2に示すように、

注湯流量が流出液体落下位置、湯口内液面レベル、および充填量に關与する。したがって、注湯流量を高精度に制御することで、これらの注湯状態に対する制御の精度を向上させる。そこで、本研究では、注湯流量制御を基幹とした注湯制御システムを開発する。注湯流量制御において、注湯流量計測が必要となるが、計測対象が高温の溶湯であることから、流量計などによる直接計測は困難である。一方で、実用自動注湯ロボットの多くは、取鍋から流出する溶湯の流出重量を計測するためのロードセルを備えている。そこで、ロードセルで計測される液体流出重量データを基に非線形形状推定理論を用いて注湯流量を推定し、非線形制御理論を用いた注湯流量制御を開発する。従来研究では、線形モデルによる注湯制御が提案されていた。しかし、研究代表者による注湯プロセスの解析結果より、取鍋傾動角速度から注湯流量までの間で非線形特性を有していることが確認されており、この非線形特性を考慮した注湯流量制御の開発が、精度の高い注湯制御システムを実現する。②注湯落下位置制御の開発では、取鍋から流出する液体の落下軌跡の数理解モデルを構築し、注湯流量に応じて、取鍋を前後移動させ、鑄型内湯口へ正確に注ぐ落下位置制御システムを開発する。流出液体の落下位置計測にはカメラシステムを導入し、落下軌跡モデルの精度評価、および落下位置フィードバック制御を開発する。そして、③開発された注湯流量制御、注湯落下位置制御、および充填量制御をシステム統合し、自動注湯ロボットの精度評価を行う。特に、従来の自動注湯ロボットには注湯流量制御が導入されていない。そこで、注湯流量制御の有無による充填量の精度評価を行い、流量制御の有用性を明確にする。

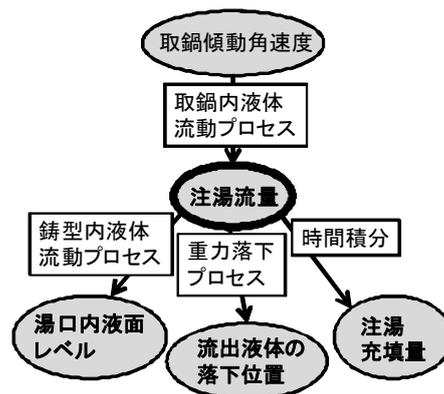


図2 注湯プロセスのフロー図

## 3. 研究の方法

本研究では、図3に示す実験用自動注湯ロボットを構築し、図4に示す自動注湯ロボッ

トの制御システムを開発する。本研究で用いる自動注湯ロボットは、実用自動注湯ロボットと同様の構造を有している。また、本研究では、安全性の観点から対象液体を水とする。

そして、開発段階から図4に示すように、システム統合した際の各制御システムの役割と情報の流れを明確にすることで、多様な高精度化の要求に応える自動注湯ロボットが実現する。特に、太線表示は、注湯流量制御に係る部位であり、本研究で開発される注

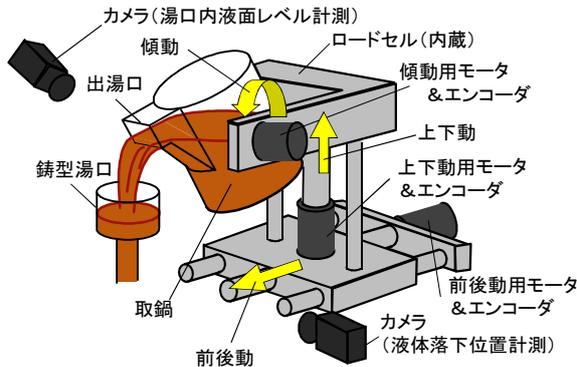


図3 開発自動注湯ロボット概略図

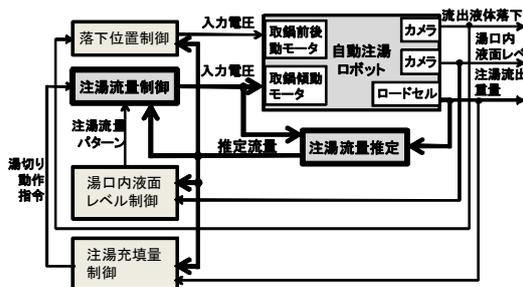


図4 制御システム構成

湯制御システムの基幹をなす。以下に研究方法の詳細を示す。

#### (1) 注湯流量推定・制御の開発

注湯流量制御において、ロードセルによって計測された注湯流出重量を時間微分することで、注湯流量が得られる。しかし、流出重量データには計測ノイズやロードセル動特性が重畳されるため、精度良く注湯流量を計測することは困難である。そこで、研究代表者が提案している注湯数理モデルを非線形状態推定理論に適用し、注湯流量推定システムを構築する。ここで、取鍋形状によっては、状態方程式からヤコビ行列が導出できない場合があるため、ヤコビ行列を必要としない状態推定理論である Unscented カルマンフィルタを用いる。そして、注湯流量制御において、注湯数理モデルは非線形特性を有しており、線形近似せずに制御系設計することが注湯流量の高精度化に繋がる。また、目標流量への追従特性が求められる。そこで、非線形制御理論の一つで、目標軌道への追従特性を良好にする2自由度制御が構成できるフ

ラットネスペースド制御を導入する。

#### (2) 注湯落下位置制御の開発

空中における液体挙動は自由落下運動とみなすことができる。そこで、注湯数理モデルから得られる注湯流量と出湯口液体高さから出湯口平均流速を求め、その流速に応じた落下位置モデルを自由落下問題より導出する。モデル検証にはカメラシステムを導入し、高精度な落下位置モデルを構築する。ここで、カメラ画像をエッジ処理することにより液体落下位置を計測できる。そして、落下位置を目標位置である湯口へ正確に注湯するように、取鍋の前後動作を制御する落下位置制御システムを開発する。ここで、出湯口から流出した液体は、湯口に到達するまでの時間遅れが生じる。そこで、時間遅れを考慮した制御系設計が可能な内部モデル制御を用いた注湯落下位置制御システムを開発する。

#### (3) システム統合による自動注湯制御システムの精度検証

開発した自動注湯制御システムを統合し、精度評価を行う。各制御システムの単体精度とシステム統合による精度を比較評価する。また、全体の注湯精度向上に關与する注湯流量制御の有無による精度評価を行い、注湯流量制御の有用性を示す。

### 4. 研究成果

#### (1) 注湯流量推定・制御の開発

Unscented カルマンフィルタを用いてリアルタイム注湯流量推定を開発した。この注湯流量推定システムを開発したことにより、複雑形状を有する実用取鍋に対しても高精度に注湯流量を推定することが可能となった。また、Unscented カルマンフィルタでは、産業用制御器への実装が困難であった。そこで、拡張カルマンフィルタを分離して計算負荷を低減する注湯流量推定法を提案した。これにより、産業用制御器でも実装が可能となった。そして、推定された注湯流量に対して、注湯流量制御システムを構築した。フラットネスペースド制御を用いて、注湯モデルを厳密線形化し、フィードフォワード制御とPI制御によるフィードバック制御を組み合わせた2自由度注湯流量制御システムを設計した。注湯実験によって、提案流量制御システムの有用性を検証した。図5に実験結果を示す。図5(a)は取鍋傾動用モータへの入力電圧であり、(b)は取鍋の傾動角度、(c)は取鍋からの流出重量であり、(d)は注湯流量推定システムより推定された注湯流量である。図5(a)~(c)では、青線が比較対象として従来研究で提案されている注湯流量フィードフォワード制御システムの結果であり、緑線

が本研究で提案した2自由度注湯流量制御である。また、図5(d)では、従来手法であるフィードフォワード流量制御を青線、2自由度流量制御を緑線に加えて、所望の注湯流量パターンである。目標注湯流量を赤線で示す。本研究では、出湯開始角度が事前計算と異なることによって生じる出湯開始誤差を外乱として注湯流量が所望値になるように制御を行う。したがって、フィードフォワード流量制御では、外乱の発生によって、目標注湯流量から大幅に下回る注湯流量となっているのに対して、2自由度流量制御ではフィードバック制御の効果により、外乱が生じた場合でも目標流量に精度良く追従していることが確認できる。

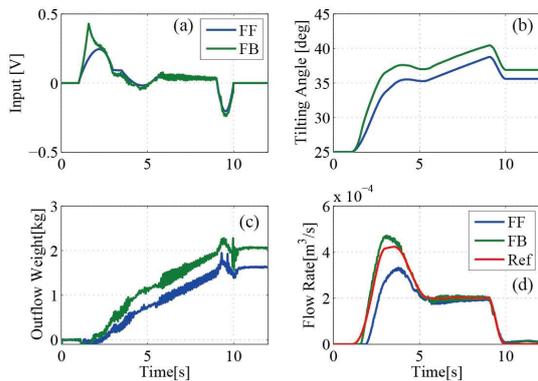


図5 注湯流量制御の実験結果

## (2) 流出液体の落下位置制御

注湯流量から流出液体の自由落下運動をモデル化した注湯落下軌跡モデルを導出し、モデルによって推定された落下位置を所望位置に追従させる落下位置制御システムを開発した。注湯実験の結果を図6に示す。図6(a)は目標流量パターンを示し、(b)は取鍋傾動用モータへの入力電圧、(c)は取鍋傾動角度、(d)は取鍋から流出する液体の流出重量を示す。(e)はモデルから推定された取鍋出湯口での流速であり、(f)は取鍋の前後方向位置、(g)は取鍋上下方向位置を示す。(h)は流出液体の落下位置を示す。図6(c)(d)において、実線は実験結果であり、破線はモデルによるシミュレーション結果を示す。図6(d)より、実験から得られた流出液体重量をシミュレーション結果が精度良く再現していることから、注湯流量制御の有用性が確認できる。そして、図6(h)の黒線が落下位置制御を導入した注湯実験における落下位置であり、薄線は落下位置制御を用いない場合の落下位置を示す。所望の落下位置は0mとしており、落下位置制御を導入することで、所望の落下位置へ高精度に注湯できることが確認された。

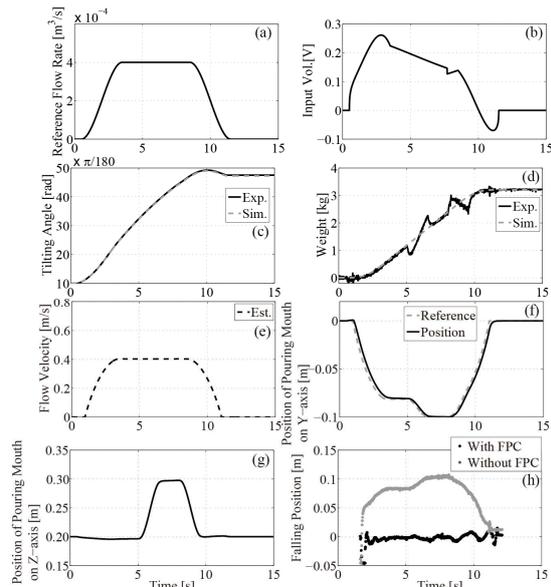


図6 落下位置制御の実験結果

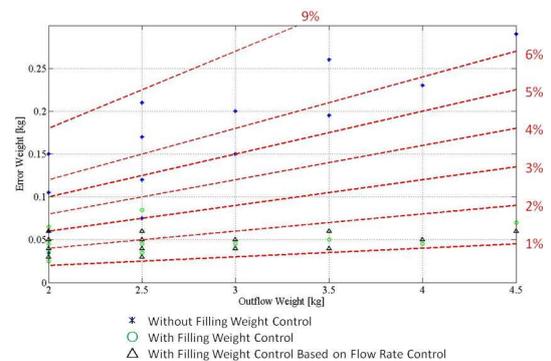


図7 注湯充填重量制御の結果

## (3) 注湯充填重量制御への注湯流量制御のシステム統合による高精度化

注湯流量制御をベースとした注湯充填重量制御を開発した。流量が制御されることで、充填重量の高精度化が図れる。実験結果を図7に示す。図7では、横軸が目標充填重量を示し、縦軸が目標充填重量と実際の充填重量との誤差を示す。黒丸印は充填重量制御を用いない場合の結果であり、緑色の丸印は充填重量制御の結果を示し、三角印は注湯流量制御をベースとした充填重量制御の結果を示す。充填重量制御のみの場合でも、高精度化が実現していることが確認できる。そして、注湯流量制御を導入することで、特に、目標注湯充填重量が少ない場合においても精度が向上していることが確認できる。目標充填重量が少ない場合には、取鍋内の液体流れが非定常の状態ですべて注湯が完了してしまうため、高精度化が困難であったが、流量制御を導入することで、注湯流量を素早く定常状態にさせ、注湯を安定化させることから、注湯精度が向上した。

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3件)

(1) 野田善之、福嶋隆輔、寺嶋一彦、取鍋傾動式自動注湯機における取鍋から流出する液体の落下位置制御、日本機械学会論文集(C編)、査読有、78巻、794号、2012、3446-3458

〔学会発表〕(計19件)

① Atsushi Ito, Yoshiyuki Noda, Kazuhiko Terashima, Outflow Liquid Falling Position Control by Considering Lower Ladle Position an Clash Avoidance with Mold, Preprints of IFAC Workshop on Automation in the Mining, Mineral, and Metal Industries, 2012, 240-245.

② Yoshiyuki Noda, Kazuhiko Terashima, Simplified Flow Rate Estimation by Decentralization of Kalman Filters in Automatic Pouring Robot, Proceedings of SICE Annual Conference 2012, 2012, 1465-1470.

③ Yoshiyuki Noda, Michael Zeitz, Oliver Sawodny, Kazuhiko Terashima, Flow Rate Control Based on Differential Flatness in Automatic Pouring Robot. Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Control Application, 2011, 1468-1475.

〔産業財産権〕

○出願状況(計2件)

名称：注湯制御方法及びコンピュータを注湯制御手段として機能させるためのプログラムを記憶した記憶媒体

発明者：野田善之、辻高明、鈴木新雄、寺嶋一彦

権利者：山梨大学、新東工業株式会社、豊橋技術科学大学

種類：特許

番号：特願 2013-094810

出願年月日：平成 25 年 4 月 27 日

国内外の別：国内

名称：注湯制御方法及びコンピュータを注湯制御手段として機能させるためのプログラムを記憶した記憶媒体

発明者：鈴木新雄、寺嶋一彦、伊藤敦、野田善之

権利者：新東工業株式会社、豊橋技術科学大学

種類：特許

番号：特願 2012-54827

出願年月日：平成 24 年 3 月 12 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.me.yamanashi.ac.jp/lab/noda/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野田 善之 (NODA YOSHIYUKI)

山梨大学・大学院医学工学総合研究部・准教授

研究者番号：60426492

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし