

令和 3 年 5 月 25 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04016

研究課題名(和文) 手動注湯に対する注湯状態推定と熟練注湯技能を再現する注湯制御システムの開発

研究課題名(英文) State Analysis of Manual Pouring and Development of Control System Replicating Skilled Pouring-Work

研究代表者

野田 善之(NODA, Yoshiyuki)

山梨大学・大学院総合研究部・教授

研究者番号：60426492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：鑄造産業における注湯工程は鑄物品質に影響を及ぼす工程であることから、熟練者の注湯作業を忠実に再現する自動注湯機の開発が求められている。そこで、本研究では作業員による手動注湯を計測し、注湯技能を解析する注湯技能評価システムを開発する。そして、注湯技能評価システムで得られた注湯流量データを教示データとして自動注湯機で再現する注湯制御システムを開発する。本研究の成果では、開発した技能評価システムで手動注湯を定量的に評価できることを示した。また、注湯流量を教示データとした注湯制御システムを実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鑄造産業における注湯工程は鑄物の品質に多大に影響を与えるが、高温の熔融金属を鑄型へ注ぐ工程のため計測および解析が難しく、注湯工程に起因する不具合の改善が困難となっている。本研究は熟練注湯作業を計測・解析できる技能評価システムを開発し、自動注湯機で熟練注湯技能を再現する注湯制御システムを開発した。この研究成果により、鑄物品質のばらつきを抑え、かつ技能継承にも活かすことができ、鑄造産業の作業環境改善と品質向上に貢献できる技術的基盤を構築した。

研究成果の概要(英文)：A quality of casting product is influenced by the pouring process in the casting industry. Therefore, it is required to develop the automatic pouring machine replicating the skilled pouring work. In this study, we developed the assessment system of pouring skill and the pouring control system which replicates the pouring flow rate obtained from the assessment system as the teaching data. As the results in this study, the manual pouring works were scored by the developed assessment system. And, we realized the pouring control system which refers the pouring flow rate obtained from the assessment system.

研究分野：機械力学・制御

キーワード：鑄造 注湯制御 状態推定 技能評価

### 1. 研究開始当初の背景

鋳造業における注湯工程は高温の熔融金属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環境である。そこで、現在では図1に示す自動注湯機の導入が進められている。自動注湯機の制御手法は、鋳型毎に注ぎ方が異なることから鋳型毎に作業者が自動注湯機を操作して、その際の実測データを教示データとし、同様の鋳型形状に対して再生するティーチング&プレイバック制御が用いられている。しかしながら、取鍋の傾動角度や熔融金属の温度によって取鍋から流出する熔融金属の流れが異なるため、再生時に教示データを試行錯誤的に補正しながら自動注湯機を運用しているのが実情である。また、教示データ生成時には作業者が操作機器から取鍋の傾動動作を操作して注湯するため、作業者が所望する注湯状態にすることが困難であり、鋳型によっては自動注湯機を用いることで製品品質が低下するものもある。これらの問題は多品種生産化が進む中で顕在化しており、多くの鋳造工場では大量生産品には自動注湯機を用い、自動注湯機では困難な製品に対しては図2に示す熟練技能者による手動注湯に頼っている。



図1 自動注湯機  
(出典: 藤和電気(株)HP)

自動注湯機の制御技術に関する研究は1990年以降から行われており、図3に示す注湯流量や流出液体の落下位置、鋳型内へ流入した液体の重量を高精度に制御する制御手法が提案されている。しかし、これらの成果が実際の自動注湯機へ適用された事例は報告されておらず、実際の実測データを考慮した制御系設計手法や、粉塵環境下でも注湯状態を推定できる手法は明らかとなっていない。また、自動注湯機と作業者による手動注湯を定量的に比較した事例も報告されていない。



図2 手動注湯  
(出典: JobCafe 北海道 HP)

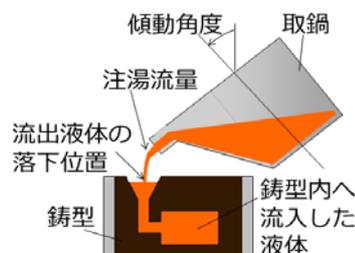


図3 注湯プロセスの概要

### 2. 研究の目的

本研究では実際の熔融金属を扱う手動注湯を対象に、注湯流量を推定できる注湯状態推定システムを開発し、熟練技能者や未習熟者による手動注湯を比較解析する。そして解析結果に基づいて教示データを生成し、注湯流量制御や流出液体の落下位置制御を用いて自動注湯機の制御システムを系統的に設計して熟練注湯技能を再現することを目的とする。

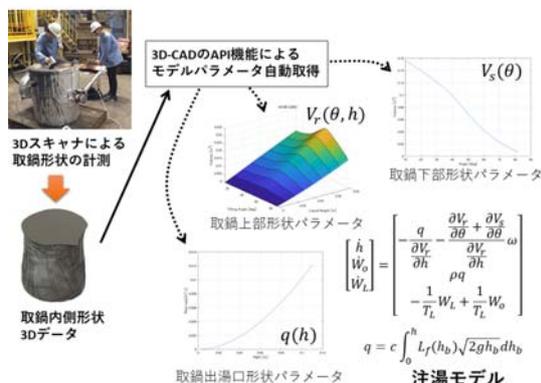


図4 注湯モデルパラメータ生成手法

### 3. 研究の方法

#### (1) 手動注湯状態推定システムの開発

手動注湯における注湯流量を推定する注湯状態推定システムを開発する。本研究では実際の手動注湯で用いられる取鍋を対象としており、複雑な容器形状の実測が求められる。そこで、図4に示すように3Dスキャナを用いて、取鍋内側形状を計測し、計測された3Dデータから注湯数理モデルに必要なモデルパラメータを生成する注湯数理モデルの設計手法を開発する。

また、手動注湯作業を計測する目的で、図5に示すようにロードセルと姿勢角センサを取鍋に設置して、流出した液体の重量や取鍋の傾動角度を計測する。また、カメラで取鍋から流出する液体の落下軌跡を計測する。ここで、流出液体の落下軌跡計測において、図2に示すように熔融金属は発光液体で、か

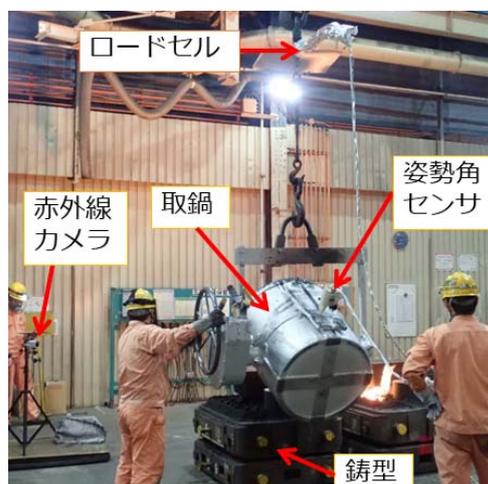


図5 手動注湯作業の計測

つ粉塵が舞う環境での計測となることから、可視光カメラでの計測は困難である。そこで、赤外線サーモカメラで落下軌跡を計測する。そして、注湯数値モデルおよび各センサデータを基に、注湯流量および流出液体の落下位置推定システムを開発する。ここで、推定アルゴリズムに拡張カルマンフィルタを用いる。

## (2) 注湯技能評価システムの開発

上記(1)で開発された注湯状態推定システムを用いて、熟練技能者と未習熟者による手動注湯の注湯流量と流出液体の落下位置を計測し、解析・評価を行う。熟練技能者と未習熟者それぞれに対して、同じ鋳型に複数回注湯してもらい、注湯流量を推定する。そして、最も品質の良い注湯作業との相関解析を行い、それぞれの注湯作業のばらつき評価を行う。また、計測されたデータと注湯後の鋳物品質の評価を行い、良好な品質となる注湯流量を明らかにする。

## (3) 自動注湯機による熟練注湯技能の再現

熟練者による注湯作業で得られた注湯流量に対して、ノイズ除去や平滑化を行い、自動注湯機で実現可能な教示データを生成する。そして、自動注湯機には注湯流量制御を実装し、教示データを高精度に再現する注湯制御システムを開発する。

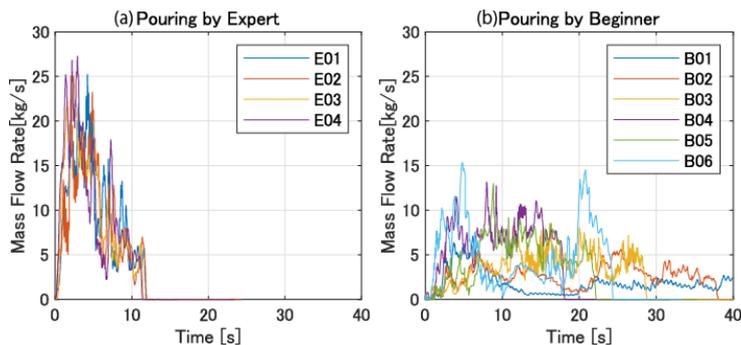


図6 注湯流量推定の結果

## 4. 研究成果

### (1) 手動注湯状態推定システムの実現

手動注湯作業に対する注湯流量推定の結果を図6に示す。図6の(a)は熟練者による注湯作業に対する注湯流量の結果であり、(b)は未習熟者による注湯流量の結果である。熟練者と未習熟者は同一の鋳型形状に対して注湯作業を行っている。この結果は、既存の手動注湯作業に対して、注湯流量を推定できることを示している。また、取鍋の側方に設置してある赤外線サーモカメラで注湯作業を計測した画像を図7に示す。赤外線サーモカメラで計測された画像から取鍋から流出した熔融金属の落下位置を図8に示す。粉塵環境下でも赤外線サーモカメラで落下位置を計測することができる。

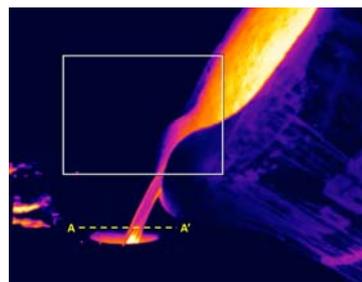


図7 赤外線カメラによる注湯作業計測

### (2) 注湯技能評価システムによる解析結果

図6に示した注湯流量推定に対して、注湯作業の技能評価を行う。図6の注湯作業の中で、熟練者による1回目の注湯作業が最も良い鋳物品質を生み出している。そこで、熟練者の1回目の注湯作業に対して、他の注湯作業を比較評価する。まず、相関解析とマンハッタン距離解析にて注湯流量データの数値化を行う。マンハッタン距離解析では位相の影響を低減するために動的時間伸縮法を用いる。得られた相関係数とマンハッタン距離に対して、鋳物品質との関係解析をロジスティクス回帰分析にて解析する。結果を図9に示す。図9の横軸は相関係数を示し、縦軸はマンハッタン距離の符号を反転したものである。したがって、相関係数が1でマンハッタン距離が0のとき、良品鋳物を生み出している注ぎ方と同じ注ぎ方が出来ていることを示す。また、青色○印は熟練者による良品鋳物を生み出している注湯作業を示し、赤色○印は未習熟者による

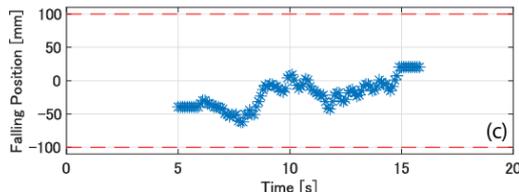


図8 流出した熔融金属の落下位置

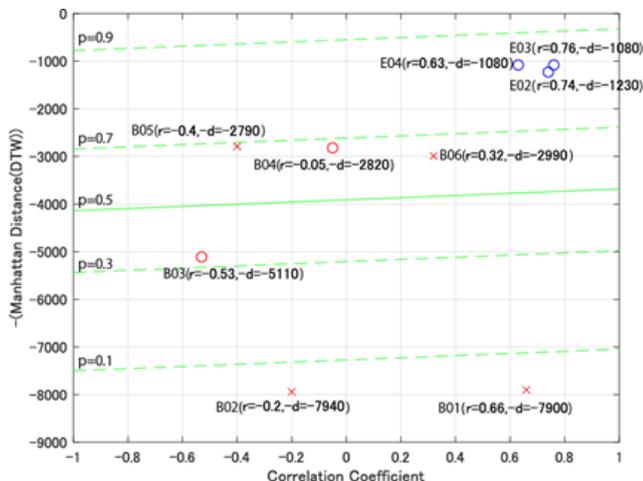


図9 注湯作業の評価結果

良品鋳物を生み出している注湯作業、赤色×印は未習熟者による不良品鋳物となった注湯作業を示している。緑色の線は良品率を示しており、 $p=1$  が全て良品になることを示している。図9からわかるように、熟練者の注湯作業はばらつきが少なく、相関係数が0.7付近であり、マンハッタン距離も0に近いことから良好な注湯作業が行われていることが確認できる。また、未習熟者による注湯作業では、注湯回数を重ねる毎にマンハッタン距離が小さくなり、熟練者の注ぎ方に近くなっていることが確認できる。しかし、未習熟者による5回目および6回目注湯作業が不良品となっている。これは1回目からの注湯作業に時間がかかってしまい、取鍋内溶融金属が温度低下したことによるものである。したがって、注湯時間や注湯温度も評価項目に入れることが望ましい。

### (3) 自動注湯機による熟練注湯技能の再現

熟練者による注湯作業を自動注湯機で再現する。ここで、手動注湯で得られた注湯流量を教示データとして自動注湯機で再現するが、(1)に示す注湯作業では注湯時間が短いため、自動注湯機での再現は困難になる。そこで、注湯時間が長い鋳物製品に対して一定流量の注湯作業で得られた注湯流量データを教示データとして自動注湯機で再現する。実験結果を図10に示す。図10の上段のグラフは注湯流量の結果を示し、下段のグラフはロードセルによって計測された流出重量の結果を示す。上段の緑線が教示データを示し、赤線が注湯流量推定の結果を示す。また、下段の赤線が教示データ、緑線がロードセルで計測された流出重量を示す。図10からもわかるように、教示データに対して、自動注湯機で高精度に再現できることが確認された。

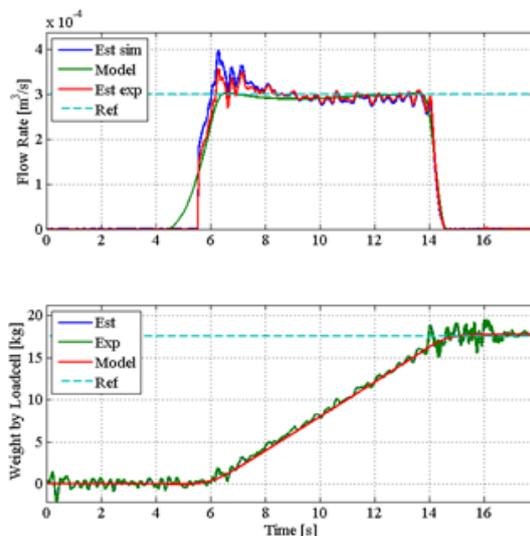


図10 自動注湯機による注湯作業の再現

図10からもわかるように、教示データに対して、自動注湯機で高精度に再現できることが確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Noda Yoshiyuki, Sueki Yuta	4. 巻 9
2. 論文標題 Implementation and Experimental Verification of Flow Rate Control Based on Differential Flatness in a Tilting-Ladle-Type Automatic Pouring Machine	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1978 ~ 1978
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app9101978	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kabasawa Nobutoshi, Noda Yoshiyuki	4. 巻 10
2. 論文標題 Model-Based Flow Rate Control with Online Model Parameters Identification in Automatic Pouring Machine	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Robotics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/robotics10010039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 榊沢暢俊, 野田善之
2. 発表標題 オンラインモデルパラメータ同定を備えた注湯流量制御システムの開発
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 榊沢暢俊, 野田善之
2. 発表標題 オンラインモデルパラメータ同定を用いたフィードフォワード型注湯流量制御の高精度化と同定の高速化
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 雨宮敦, 野田善之
2. 発表標題 垂直多関節ロボットを用いた液体容器傾動による注水流量制御
3. 学会等名 第38回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 樺沢暢俊, 野田善之
2. 発表標題 実用取鍋における注湯状態を高精度に表現できる注湯流量モデル
3. 学会等名 日本鑄造工学会第176回全国講演大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田善之, 松本圭司, 雑賀利信
2. 発表標題 鑄造業の注湯作業における注湯流量推定と作業評価
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 樺沢暢俊, 野田善之
2. 発表標題 取鍋形状の3Dデータを活用した流量制御システムの開発
3. 学会等名 日本鑄造工学会第174回全国講演大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Sueki, Yoshiyuki Noda
2. 発表標題 Development of Flow Rate Feedback Control in Tilting-ladle-type Pouring Robot with Direct Manipulation of Pouring Flow Rate
3. 学会等名 The 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Sueki, Yoshiyuki Noda
2. 発表標題 Experimental Verification of Flow Rate Estimation Using Extended Kalman Filter in Tilting-ladle-type Automatic Pouring Machine
3. 学会等名 Asia Pacific Measurement Forum on Mechanical Quantities 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Taito Yajima, Yoshiyuki Noda
2. 発表標題 Teaching-and-playback Approach based on Pouring Flow Rate in Tilting-ladle-type Pouring Machine
3. 学会等名 Young Researchers Seminar in 73rd World Foundry Congress (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuta Sueki, Yoshiyuki Noda
2. 発表標題 Operational Assistance System with Direct Manipulation of Flow Rate and Falling Position of Outflow Liquid in Tilting-ladle-type Pouring Machine
3. 学会等名 73rd World Foundry Congress (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 末木裕太, 野田善之
2. 発表標題 注湯流量操作型注湯ロボットにおける拡張カルマンフィルタを用いた流量推定および流量フィードバック制御の開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 矢嶋泰斗, 野田善之
2. 発表標題 注湯シミュレータによる注湯技能を安全に習得できる教示訓練システムの開発
3. 学会等名 日本鋳造工学会第172回全国講演大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 矢嶋泰斗, 野田善之
2. 発表標題 鋳造プロセスにおける注湯技能獲得のためのスキルトレーニングシミュレータの開発
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 注湯状態の推定システム	発明者 野田善之, 樺沢暢 俊, 末木裕太	権利者 国立大学法人山 梨大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-012528	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

http://www.me.yamanashi.ac.jp/lab/noda/  
 注湯制御技術に関する紹介  
 http://www.me.yamanashi.ac.jp/lab/noda/study\_apm.html

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	今村 孝  (Imamura Takashi)  (10422809)	新潟大学・自然科学系・准教授    (13101)	
研究分担者	中山 栄浩  (Nakayama Yoshihiro)  (40227971)	山梨大学・大学院総合研究部・教授    (13501)	
研究分担者	阿部 壮志  (Abe Takeyuki)  (60756469)	埼玉大学・理工学研究科・助教    (12401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関