

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K18252

研究課題名(和文) 溶融金属の層流充填を達成するプレスキャスト制御システムの構築

研究課題名(英文) Control system construction for stationary filling of upward molten metal flow in press casting process

研究代表者

田崎 良佑 (Tasaki, Ryosuke)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70644467

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：鑄造プロセスと先端的システム制御・情報工学技術の融合によって複雑造形・安定品質の金属生産プロセス技術開発を進展させた。金属温度・粘性流動・体積の変動に対応して品質安定を補償するために、力センサ情報処理による環境適応型充填制御システムを構築した。鑄型内の液体の充填挙動を推定し、充填速度を調整して成形品質を向上させる方法の特徴とする。金属加圧充填の実験を行い、提案手法の有用性評価を行った。

研究成果の概要(英文)：We advanced the technology development of metal production process of complex shaping and stable quality by fusion of casting process and advanced system control / information engineering technology. In order to compensate for quality stability in response to fluctuations in metal temperature, viscous flow and volume, we constructed an adaptive filling control system by force sensor information processing. The filling behavior of the liquid inside the mold can be estimated and the filling rate is then automatically adjustable to improve the casting quality. Experiments on metal pressurized filling had been carried out and the effectiveness of the proposed method was evaluated.

研究分野：システム制御工学、鑄造プロセス工学

キーワード：金属生産システム 鑄造 プロセス制御 予測制御 状態推定アルゴリズム システム統合

1. 研究開始当初の背景

日用品から工業製品まで多岐にわたって利用される鋳物であるが、近年では人工骨やロボット部品などの利用も増加し、一品成形や多種小・中量生産への要求が高まっている。これにより、大量生産型の成形プロセスに加えて多種生産対応への技術的進化が求められている。現代に注目されるレーザ粉末焼結法や積層造形などのAM(Additive Manufacturing)技術は、鋳物体積の小さい場合に薄肉・複雑成形を実現する優れた工法といえる。一方で、試作物だけでなく量産品の成形においては、従来の鋳造プロセスと先端的情報・制御システム工学技術の融合によって、高生産能力と低コストを維持しながら安定的な高品質生産を確保することが望まれる。

2. 研究の目的

金属製品の品質安定生産プロセスにおいて鋳造の信頼性は低い。これは熔融金属の充填時の乱流発生による気泡・酸化皮膜の巻き込みが主因であることがわかっている。乱流の発生しにくい鋳型設計と、乱流を発生させない金属充填が必要とされている。複雑形状の一発成形法である鋳造では、金属充填の流動断面積が刻々と変化するため、従来法では乱流発生を防ぐことはできない。申請者が開発を進めるプレスキャスト法は充填速度を微調整することができ、乱流発生を抑制することで鋳物品質の画期的な向上が可能となる。本研究ではプレスキャストによる層流充填の安定化を図る数理計画法と充填挙動予測制御法を開発し、金属充填の最適化を目指す。

従来の湯口・湯道・押し湯の成形後のリサイクル部分を必要としない、高歩留まりの鋳造法を提案している。金型鋳造と違って繊細な充填圧力調整を必要とする砂型鋳造を対象に、プレスキャスト法の開発に取組み、95%以上の高歩留り成形の実現性を立証した。ここで、プレスによる充填圧力が適正値より低い場合に、製品形状の薄肉部に金属が流入せずに形状不良の鋳物欠陥を生じる。一方で、充填圧力が過高になると砂型表面の砂粒間に金属が浸入し、表面品質欠陥を引き起こす。そこで、鋳型三次元形状と金属体積情報から、適正圧力で充填するプレス速度パターンを生成できるフィードフォワード型圧力制御システムを構築した。ここで層流



図1 鋳鉄を用いたプレス鋳造評価試験

充填に対しては、低い充填速度の制約条件を試行錯誤的に設けて制御設計を行った。図1の鋳鉄を用いたプレス充填実験を行い、単純形状鋳物に対して高速・高歩留まり成形、充填圧力の制御による表面品質の向上を確認した。

上記の研究成果を、高難易度の複雑形状鋳物を対象に100%に近い超高歩留まりで層流充填成形する鋳造技術にまで成長させる。本研究の進展は「昔ながらの大量生産なので低歩留まりは仕方ない、乱流を起こさないためにゆっくり充填」という鋳造の常識を一変する革新技術研究と位置づけられる。特に、「鋳型設計」と「充填制御」に着目して、多種多様な鋳物形状に対しても充填時の乱流を発生させずに、安定的な品質を補償する鋳造プロセス技術を提案する。鋳型内の流動に対して乱流現象の大きさを示す評価式を導出することで、鋳型設計の最適化計算法を提案する。さらに、プレス中に乱流発生と圧力上昇を予測しながら抑制する充填制御システムを確立する。

複雑形状の鋳型造形技術の開発は、平成25年度より経産省のプロジェクトとしても開始されている。これまでのAM技術研究の蓄積からも、複雑鋳型造形は近い将来に可能になる。複雑鋳型造形の前工程の鋳型設計の最適化、後工程の金属充填の最適制御システムの構築を目標とする本研究は、先端的金属生産プロセスの主要技術機能を担うことが予想できる。

鋳型設計は、金属流動性・加圧効果・冷却凝固・製品用途に伴う局所的品質補償などが考慮され、金属充填の目に見えない実現象の予測と結果改善を繰り返して最適条件を練りあげる。金属充填は、熔融金属の色や流動挙動から温度を推測し、充填速度を調整してキャビティ(製品形状の空洞部分)に流し込む。これらの職人技の知能情報化・機械化は当然容易ではなく、本研究ではシステム制御・情報工学的に導出可能な鋳型設計と充填制御動作の2つの最適化を目標とする。具体的には、鋳型形状特徴と乱流要因の関係解析から導出される①乱流要因評価式による自動鋳型設計と、②プレス荷重フィードバックによる流動挙動推定・数理モデルベース予測器を備える充填制御システムの確立を目指す。構

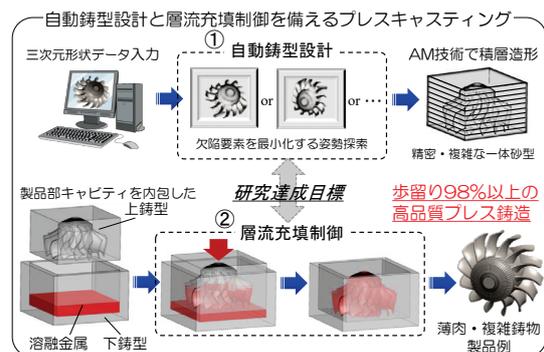


図2 乱流抑制の主要研究の位置づけ

築するプレスキャストの連続のプロセスを図2に示す。キャビティを内包する上鋳型は、最適化された設計情報をもとにAM技術によって造形される。つぎに、上鋳型の下降動作で金属を層流充填して目標形状を成形する。複雑なキャビティ内を充填するときに、上鋳型の下降速度を調整することで乱流および過剰/過小圧力を抑制し、鋳物欠陥レスで高速成形される。

3. 研究の方法

本研究の主なシステム制御技術は、自動的な鋳型設計と、層流充填の流動挙動予測制御である。鋳型設計の最適化計算アルゴリズムは、三次元流路の形状特徴抽出、ポロシティ量一形状特徴量の関係解析、乱流要因組合せ最適化の数値計算法を統合して構築する。層流充填挙動の予測制御システムは、申請者が先行研究で導出した充填圧力挙動と温度依存性粘性流れ要素を含む数理モデルをもとにしたオンライン予測制御則の導出と、鋳造環境変化適応のためのプレス荷重センサ情報処理を組込むことで統合設計される。2つの主要技術が一連工程で機能するプレスキャストプロセスのシステム技術研究として推進する。制御工学を基礎とする動的モデリング・システムの最適化とインテグレーション法を応用し、また鋳造材料・金属流動に関わる研究協力者の支援のもとで技術向上を図り、自動鋳造プロセスの構築を達成する。

3. 1 鋳型設計の最適化

キャビティを内包する上鋳型を樹脂材料で製作し、プレス充填テストを進めている。これにより、複雑形状対応の砂型プレスキャストの実現性が確認される。乱流に起因する巻き込み気泡：ポロシティ量の低減を考慮した鋳型設計の最適化法を提案する。具体的には図3左に示すように、乱流現象が招くポロシティ発生箇所を特定し、流路を特徴づける断面積変化・合流箇所・落下流れ・流動中心の遷移に対するポロシティ発生との相関解析を行う。つぎに、形状特徴量から成る乱流要因評価式を導出する。図3右に鋳型の設計フローを示す。候補姿勢を与えたキャビティについてスライスした断面形状から予測

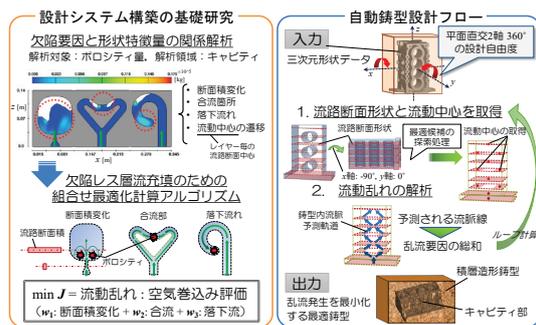


図3 鋳型設計の最適化

される流脈線の情報をもとに、乱流要因評価式を計算して組合せ総和が最小化する姿勢を探索する。これにより、乱流の発生しにくい鋳型を自動的に設計する。

3. 2 充填挙動の最適制御

乱流を起こさない層流充填を高速で実現し、同時に金属に付加する充填圧力を制御することで安定した品質を得るプレス制御システムを構築する。鋳型内流動挙動の計測には、接触式の圧力センサを用いることが望ましいが、金属が高温なために間接的な方法で計測する。そこで上鋳型を支持するサーボプレスと上鋳型の間には荷重センサを設置する。申請者の先行研究ですでに提案した、鋳型の三次元形状データと金属体積情報から充填圧力を推定する数理モデルの逆システムに加えて、溶湯反力情報に準ずる金属流動のオンライン状態推定法を導出する。充填挙動の推定には、CFDモデル計算も一つの有力な方法であるが、計算コストが大きいために生産プロセスのリアルタイム制御には不向きであるので採用しない。

鋳造環境変化の金属温度低下を考慮して、温度依存性粘性モデルを導入して充填圧力モデルと統合し、実観測圧力の情報フィードバックによる層流充填挙動推定とオンライン予測制御システムを構成する。これにより、仮に相変態温度付近の半熔融金属に対しても圧力制御（差込み欠陥抑制）と流動制御（乱流抑制）が機能し、低エネルギープロセスの高度な品質補償を達成する。構築する予測型充填制御システムフローを図4に示す。

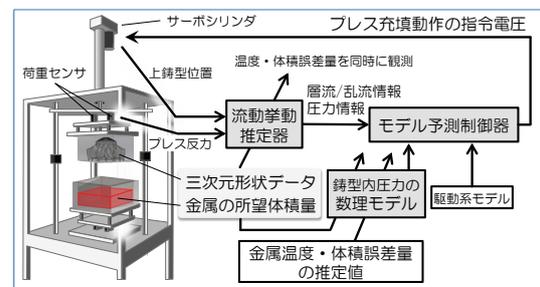


図4 予測型充填挙動の最適制御システム

4. 研究成果

4. 1 空気巻き込み抑制を考慮したキャビティ姿勢の最適設計

鋳型キャビティの設計時に CFD (Computational Fluid Dynamics) による流れ解析が行われている。空気巻き込み現象による製品欠陥を予測する方法として流れ解析は重要であるが、解析に膨大な時間を要し多用することは難しい。しかしながら、内部の流動はキャビティ形状に影響を受けるため、最適な姿勢設計により空気巻き込みの抑制が可能である。そこで本研究では、CFDに替わりキャビティ形状に基づいて最適鋳型キャビティ姿勢を導出する手法を提案する。提案法では、鋳型キャビティ形状情報に基づ

いてキャビティ姿勢を評価する。キャビティ内の流速が層流と見なせる場合、液体の表面は水平を保ったまま上昇する。そこでこの仮定の下で図5に示すようにキャビティを水平断面の積層したものとし、各層の形状的特徴を抽出することで、キャビティ内の流動方向を推定する。

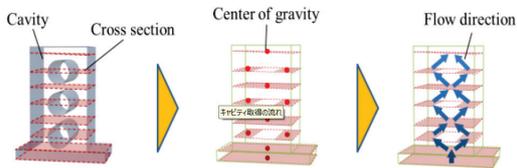


図5 流線の予測フロー

鋳型内での空気巻き込みは図6で示すような落下流れ・断面積変化・合流箇所で見ることが分かっている。そこで前述の形状情報を用いて各要素を次のように評価する。

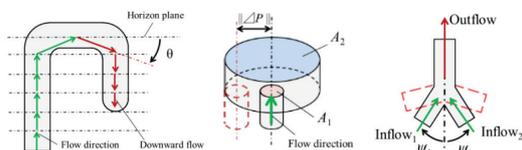


図6 流動乱れの主要因

流れ方向に大きく関わる要素であるため、落下角度 θ_{ik} に着目し、上述の3要因を含めた評価関数で表す。

$$\min J = W_1 \cdot J_{df} + W_2 \cdot J_{csc}(W_{csc}) + W_3 \cdot J_c(W_c)$$

事前計算が可能なCFD流れ解析結果を参照して評価値 J との二乗差が最小となる重み $W_1 \sim 3$, W_{csc} , W_c を滑降シンプレックス法より決定した。提案法とCFDの結果を比較した。対象としたキャビティ形状を図7に示す。キャビティ姿勢角度ごとの空気巻き込み量、および評価値の推移を示す。空気巻き込み量が最大値および最小値を示す姿勢角度に対して評価値の最大最小値も近辺の姿勢角度を示しており、提案手法が空気巻き込み現象の傾向を捉えていることが分かる。

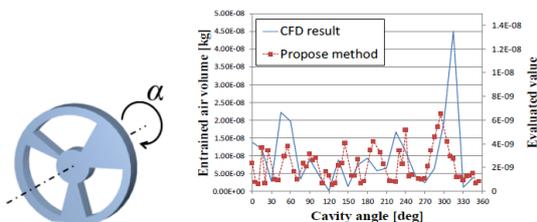


図7 CFDソフトと提案手法の流動乱れ比較

キャビティ形状に基づいて空気巻き込み抑制を目的とする最適キャビティ姿勢の評価手法を提案し、CFDの解析結果に近い評価傾向が得られた。これをもとに最も流動

乱れを起こしにくい鋳型姿勢の設計が可能となる。さらに複雑なキャビティ形状を想定したアルゴリズムの改良を行う。

4.2 プレス反力情報を用いた鋳型内圧力推定と制御

プレス動作中に鋳型内に過剰な圧力が発生すると、差込み・型張りなどの製品欠陥が生じるためプレス動作制御による圧力調節が必要となる。しかしながら高温溶湯の圧力の直接測定は困難であり、一般的なフィードバック制御の実装ができない。一方で、フィードフォワード制御では注湯誤差や溶湯温度及び粘性変化などに対応しない。プレス反力を用いることで鋳型内圧力を推定し、制御システムを構築して実用環境での高速・高品質鋳造プロセスの実現を目指す。

本研究で使用するプレス機はプレス反力を計測する目的で上鋳型上部にロードセルは取り付けられている。しかしながら、プレスをする際は上鋳型には鋳型内圧力だけでなくプレス動作による慣性力および上下鋳型の壁面摩擦も作用することになる。

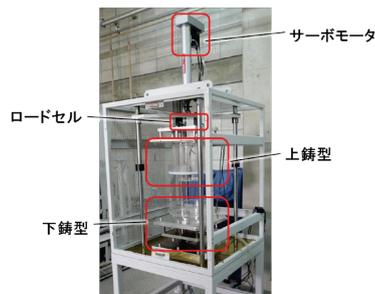


図8 プレス装置外観と力センサ配置

このためプレス反力から鋳型内圧力を推定するためには、プレス動作で生じる慣性や摩擦の影響を除外しなければならず、それぞれの挙動予測モデルを構築して用いることで、鋳型内圧力のみを推定する方式を提案している。プレス下降動作情報をもとに、ロードセルによる反力測定値から鋳型内に作用する溶湯反力のみを取得できることを確認した。また、プレス位置情報を用いて注湯誤差（鋳型内の液体体積）を判別でき、鋳型内圧力を高精度に推定できる。

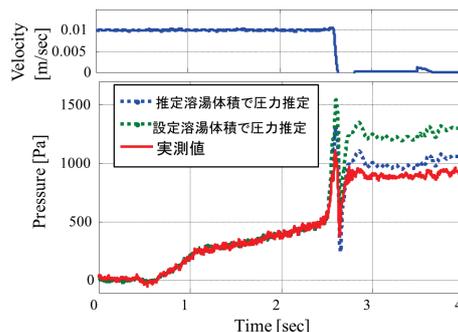


図9 圧力推定の結果

大気や砂鑄型への熱移動によって鑄型内の溶融金属温度が大幅に低下することで、金属凝固の開始によりプレス動作を妨げる問題である。そこでプレス中の鑄型内溶融状態金属と温度変化をCFDで解析し、この結果に基づき圧力・温度条件を満たすプレス動作設計を行った。最終的に金属溶湯を用いたプレス実験により、最適設計したプレス動作の有用性を確かめている。

CFDを援用した温度解析結果をもとに、溶融金属を用いてプレスキャストの成形実験を行った。金属材料は鑄鉄を用いている。溶融金属の初期温度を1400 [°C]としている。プレス速度応答はオフライン計算での予測制御シミュレーションにより生成される。砂鑄型を200 [°C]まで予熱した場合と予熱しない場合(常温)の2条件の比較検証を行った。余熱ありの場合にバリ厚みの減少が確認され、適切な鑄型予熱に効果があることが実証された。さらに同条件でのCFD解析を行い、所望の条件を満足する鑄型内圧力応答および乱れのない上昇流動が確認され、高速高品質鑄物造形として適切な計測制御システムが構築されている。実用上の鑄物成形を想定した、多品種材料・形状に応じるために提案した充填システムの適応性を拡大させることが望ましいため、今後も本研究を継続して実施していく。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5件)

- ① R. Tasaki, K. Terashima: Molten metal's reaction force measurement for pressure estimation and control system construction in press casting, Journal of ACTA-IMEKO, Vol. 6, No. 2, Accepted, 2017
- ② A. Ito, R. Tasaki, M. Suzuki and K. Terashima: Analysis and Control of Pouring Ladle with Weir for Sloshing and Moving Volume Vibration in Pouring Cut-off Process, Int. Journal of Automation Technology, Accepted, 2017
- ③ A. Ito, Y. Noda, R. Tasaki, K. Terashima: Outflow Liquid Falling Position Control Considering Lower Pouring Mouth Position with Collision Avoidance for Tilting-Type Automatic Pouring Machine, Material Transactions, Vol. 58, No. 3,

pp. 485-493, 2017

- ④ 伊藤敦, 野田善之, 田崎良佑, 寺嶋一彦: 傾動式自動注湯機における出湯口の低位置化と障害物回避を考慮した流出液落下位置制御, 鑄造工学, Vol. 88, No. 1, pp. 27-36, 2016
- ⑤ 寺嶋一彦, 田崎良佑, 渡辺勇樹: 素形材産業におけるロボットの導入と今後の展望, SOKEIZAI, Vol. 56(11), pp. 10-18, 2015

[学会発表] (計 4件)

- ① R. Tasaki, Y. Watanabe, K. Terashima: Dynamic Grinding Manipulation Based on Removal Volume Rate Control, IEEE International Conference on Industrial Technology 2017, pp. 773-778, Toronto, Canada, 2017
- ② T. Takako, R. Tasaki, K. Hashimoto, K. Terashima: Optimum Feedforward and Model Predictive Control of Molten Metal Pressure in Greensand Mold Press Casting, 72nd World Foundry Congress, No. 0-152, Japan, 2016
- ③ R. Tasaki, M. Kitazaki, J. Miura, K. Terashima: Prototype Design of Medical Round Supporting Robot, Terapio, Proc. of IEEE-ICRA(Int. conf. on robotics and automation), pp. 829-834, 2015
- ④ R. Tasaki, T. Takako, Kazuhiko Terashima: Molten Metal's Reaction Force Measurement for Pressure Estimation and Control System Construction in Press Casting, Proc. of Asia-Pacific Symposium on Measurement of Mass, Force & Torque (APMF 2015), pp. 188-193, 2015, Young Scientist Award

[その他]

ホームページ等

http://www.syscon.me.tut.ac.jp/research_theme/presscast/index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田崎良佑 (TASAKI, Ryosuke)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 70644467