

傾動式自動注湯システムにおける取鍋動作制御と
液体制振制御に関する研究

(Study on Ladle Motion Control and Liquid Vibration Suppression
Control for Tilting-type Automatic Pouring System)

2017 年 7 月

博士（工学）

伊藤 敦

豊橋技術科学大学

和文要旨

傾動式自動注湯システムにおける取鍋動作制御と

液体制振制御に関する研究

鋳造は溶融金属である溶湯を鋳型へ流し込み、冷却して所望の形状に成形する、ニアネットシェイプ金属成形技術であり、自動車・航空機など種々の産業を支える重要な素形材プロセスである。一方で、鋳造工場は高温の溶湯に曝される、作業者にとって負担の大きい現場であり、自動化・省人化が課題となってきた。筆者らは鋳造プロセスのうち、溶湯を鋳型へ注ぎ込む注湯プロセスを傾動式自動注湯システムによって自動化する研究に取り組んできた。これは、生産ライン上の鋳型を検知し、取鍋を追従させながら溶湯を注ぎ込むシステムである。従来研究ではこれまでに、自動注湯システムの要素技術として、溶湯を揺らさずに高速に搬送する液体制振制御や所望の注湯流量や溶湯の落下軌道・位置を実現するための取鍋動作制御の研究が行われており、様々な成果を挙げている。本論文では、注湯プロセス中の取鍋高さが最も低くなるような取鍋動作軌道の設計と、実際に用いられる堰付き注湯取鍋に対する溶湯運動の CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析とその制振制御について述べる。

まず、注湯した溶湯を溢流させることなく、効率的なプロセスを実施するために、取鍋高さの低位置化を図る取鍋動作設計を行った。取鍋の注ぎ口を最も低く出来る位置を、取鍋と周囲障害物の位置関係・形状、そして流出液体の落下軌跡から幾何学的に導き、注湯中の取鍋動作とした。この取鍋動作は、参照流量と取鍋・障害物形状が定まれば、一意に導かれる。提案法の有用性は、水を用いた実機実験により、注ぎ高さを一定とする落下位置制御と比較することにより検証され、実験の結果、落下位置制御の精度を保持しつつも、常に低い位置から注湯できることを確認できた。

次に、堰付き注湯取鍋に対して CFD シミュレータによる後継動作時の溶湯運動の振動解析と制振制御を実施した。堰なし・堰ありの取鍋で台形速度の後傾動作に対する応答を検証すると、堰あり取鍋では液面振動に加え、堰下部の開口部を液体が移動することにより体積移動残留振動が生じることが確認された。また、動作制御や取鍋形状の条件として、取鍋傾動中心位置、堰の取り付け位置、堰開口部の大きさなどが挙げられる。解析結果から堰の位置や開口部の大きさは発生振動の周波数に関係することがわかっており、取鍋構造の最適化の必要性が明らかとなった。そして最後に液面振動や体積移動振動のモーションコントロールとして、制振制御手法の 1 つである **Input Shaping** 法を用いて、1 次モード液面振動と体積移動振動の固有振動数と減衰比に基づいて制振制御入力を整形した。整形した制振入力により同じ時間で台形速度入力を用いる場合よりも液面振動・体積移動振動を低減することができた。

これらの研究成果により、自動注湯技術や液体ハンドリング技術における学術的および実用化への有用な知見を与えることができた。

ABSTRACT

Study on Ladle Motion Control and Liquid Vibration Suppression Control for Tilting-type Automatic Pouring System

Casting is near net shape manufacturing in which molten metal is poured into a mold and cooled to solidify to a desired shape. This process is of great importance for the automotive, aircraft, and various other industries. On the other hand, the working environment in casting factories is severe for workers because they work in high-temperature conditions close to molten metal. Therefore, it is desirable to automate the process and promote labor saving. The group of which the author is a member has studied automation of the pouring process, using a tilting-type automatic pouring system. This system detects molds on the production line and pours molten metal into molds, with tracking control of the pouring ladle. In previous studies, various fundamental techniques were proposed for the automated pouring system: sloshing suppression control with high-speed transfer of molten metal and ladle motion control to achieve flow rate control and falling position control of outflow liquid based on desired references. This thesis presents an approach for designing a ladle motion trajectory that achieves the lowest ladle position during the pouring process, analysis of molten metal motion for the pouring ladle with a weir used in a real process using a computational fluid dynamics (CFD) simulator, and vibration suppression control design.

Firstly, the ladle motion that achieves the lowest ladle position was designed to avoid spilling and realize effective processes. The ladle motion that achieves the lowest mouth position was derived based on the falling trajectory of the outflow liquid and the positional relationship between the ladle and obstacles. This motion is derived uniquely when the reference of the flow rate and the shapes of the ladle and obstacles are determined. The effectiveness of the proposed approach was verified by laboratory experiments using water. Finally, it was confirmed that the proposed approach achieves the lowest position of the pouring mouth while maintaining the accuracy of falling position control.

Next, molten metal motion in a pouring ladle with a weir was analyzed during backward tilting motion using a CFD simulator and vibration suppression was performed. The comparison between ladles without/with a weir reveals that, in the case of a ladle with a weir, in addition to sloshing there are residual vibrations due to volume moving. Conditions for motion control and the ladle shape include the center point of the tilting of the ladle, the weir position, and the gate size of the weir.

According to the analysis results, variations of the weir position and the weir gate size are related to variations of vibration frequencies, indicating the necessity of optimizing the ladle shape. Finally, the control input to suppress 1st-order-mode sloshing and volume-moving vibrations was formatted based on natural frequencies and damping ratios of vibrations. This input achieves vibration suppression control.

Through the analysis and design, fundamental and practical knowledge was obtained with respect to industrial processes involving automatic pouring and liquid handling.

目 次

第 1 章	緒言	1
1.1	研究背景	1
1.2	従来研究	2
1.2.1	液面制振搬送に関する研究	2
1.2.2	注湯制御に関する研究	3
1.2.3	湯面レベル制御に関する研究	3
1.2.4	その他の関連研究	3
1.3	研究目的と論文構成	5
第 2 章	実験装置概要, プロセスモデル	7
2.1	実験装置概要	7
2.1.1	傾動式自動注湯機	7
2.1.2	取鍋寸法	9
2.1.3	ロードセル	10
2.1.4	モータ特性	10
2.1.5	注湯落下位置計測システム	11
2.2	制御システム構成, プロセスモデル	12
2.2.1	モータモデル	13
2.2.2	注湯流量推定モデル・逆モデル	13
2.2.3	注湯落下位置推定モデル	16
2.2.4	取鍋搬送用位置フィードバック系	18
第 3 章	低位置注湯を実現するための取鍋動作の解析的生成	20
3.1	注湯高さの影響	20
3.2	低位置注湯動作を導くアプローチ	21
3.3	取鍋と障害物の位置関係	23
3.4	取鍋動作の解析的生成	24
3.4.1	モード 1: 鋳型の上面を滑る動作	24
3.4.2	モード 2: 鋳型の角に沿う動作	25
3.4.3	モード 3: 降下限界の上面を滑る動作	26
3.5	動作の切り替え	27
3.6	制御実験による評価	29
3.6.1	目標流量を変化させる場合	29

3.6.2	注湯を複数回行う場合	36
3.7	ノズルあり取鍋への適用	42
3.7.1	取鍋・障害物の位置関係，外形形状の修正	42
3.7.2	ノズルありの場合の動作生成（モード2）	42
3.8	数値解による低位置注湯動作の検証	46
3.8.1	評価関数とペナルティ項目の定義	46
3.8.2	取鍋・鋳型の衝突判定	46
3.8.3	最小値の探索アルゴリズム	48
3.8.4	シミュレーションでの検証結果	50
3.9	初期位置を考慮した取鍋動作の生成	52
3.9.1	取鍋下降動作（モード0）の設計手順	52
3.9.2	台形状取鍋を対象とした注湯実験による評価	54
3.10	まとめ	56
第4章	堰付き取鍋に対する溶湯振動のCFD解析と制振制御	57
4.1	CFDを用いた堰あり取鍋の液体挙動解析と取鍋構造の最適化の検討	58
4.1.1	堰の有無による液面振動・速度分布の比較	61
4.1.2	傾動中心位置の比較	67
4.1.3	堰位置の比較	69
4.1.4	堰開口部の大きさによる比較	71
4.1.5	取鍋構造最適化の考察	73
4.2	振動抑制のための取鍋動作制御	74
4.2.1	Input Shaping法を用いた取鍋内液体振動の制振制御	74
4.2.2	個別の1モード振動に対するInput Shaping制御	76
4.2.3	マルチモード振動に対するInput Shaping制御と後傾終了時間	79
4.3	まとめ	83
第5章	結言と今後の課題	84
5.1	結言	84
5.2	自動注湯に関する今後の課題と展望	85
5.2.1	課題1: 非接触計測システムの構築と注湯流量フィードバック制御	85
5.2.2	課題2: 取鍋サイズに基づく取鍋内溶湯振動の比較	86
5.2.3	今後の展望	86
	参考文献	90
	謝辞	99

第1章 緒言

1.1 研究背景

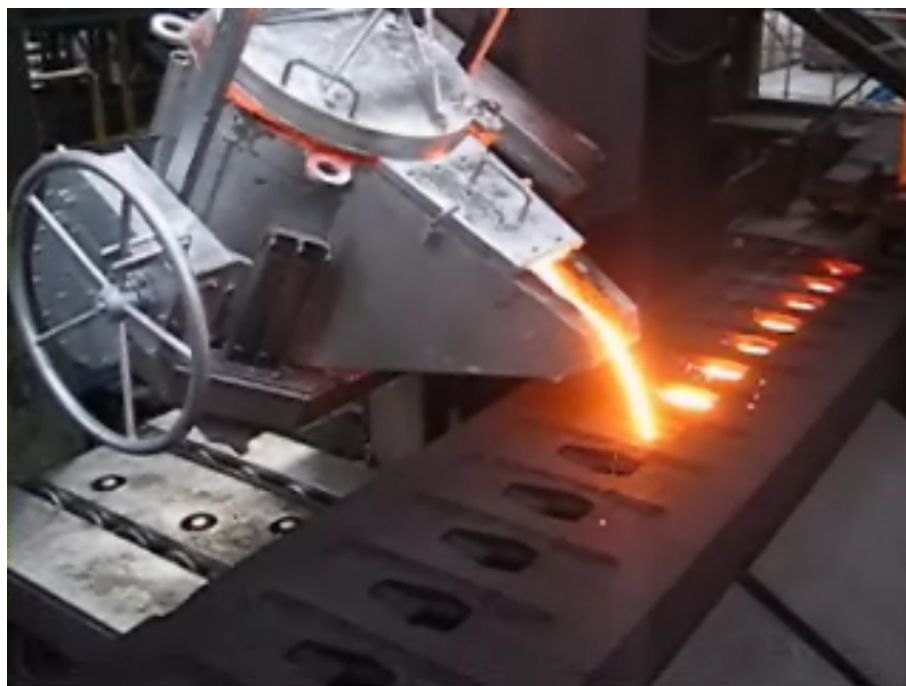


Fig. 1.1 Automatic Pouring Robot System

鋳造とは溶融金属である溶湯を鋳型に流し込み、所望の形状に成形する金属加工プロセスである。複雑形状の成形が可能であることや、溶湯の成分を任意に調整できることなどの特徴を有し、産業機械や自動車、航空機部品などの生産に貢献している。一方で、鋳造工場は 1000°C を超える高温の溶湯を扱う危険性や解砕時に粉塵発生、粘結剤からの有毒ガス発生といったことから3K（きつい、汚い、危険）の職場といわれており、作業者の負担が大きい環境になっている。また、取鍋内溶湯の温度や密度などの状態計測や液体の動作的な取り扱いが困難であることから、手作業による操業では製品精度にも限界がある。このような背景から、鋳造工程、特に溶湯を鋳型に注ぐ注湯工程の自動化が求められている^{[2]–[7]}。

注湯工程の自動化手法としては、ストッパーノズル式^{[8]–[13]}、加圧式^{[14],[15]}、電磁誘導式^{[16]–[19]}、傾動式などが挙げられる。アルミニウムや銅など導電性の高い材料では電磁誘導式が用いられることが多く、また鋳鉄を扱う場合には他3つの方法のどれかが用いられる。このうち、Fig. 1.1に示すような傾動式の自動注湯機では、簡易な構造のため、メンテナンスが行い易いという利点がある。また、注湯方法は手作業で注湯する場合と環境が変わらないため熟練技能者のノウハウを活かすことができる。これまで筆者らは、傾動式自動注湯ロボットに関連した研究

を行ってきた。主に溶湯液面を揺らさず高速で取鍋を搬送するための液面振動抑制制御^{[31]–[35]}、精密な充てん量とスムーズな湯流れを実現させるための注湯流量制御^{[44]–[48]}、注湯落下位置制御が挙げられる^{[51]–[56]}。

特に注湯落下位置制御の研究では鋳型の湯口がどの位置にあっても溶湯を的確に注ぎ込めるようにすることが求められる。これにより、様々な形状の鋳型を同一の生産ラインで取り扱うことによる多品種少量生産への適用が容易となる。更に湯口位置を任意に変えることができれば、方案設計の自由度が拡大し、鋳型内に流れる溶湯をよりスムーズに充填させることができる。従って、製品品質の更なる向上が期待される。また、自動注湯機で溶湯を保持し、注ぎ込むための容器として使用される取鍋は、注湯性能の向上や溶湯の汚染防止のために、長いノズルや堰となる仕切り板が取り付けられている。高速・高精度な自動注湯制御の実現のためには、このような複雑形状容器における液体振動の制振制御ができることも重要な要素となる。

このような背景に基づき、本論文では、障害物回避をし、注湯落下位置制御、注湯流量制御を同時に実現できる取鍋の低位置注湯制御と共に、振動を低減化する取鍋の構造、および運動制御について研究を行い、実プロセスで有用な新しい知見を得ることを目的とした。

1.2 従来研究

1.2.1 液面制振搬送に関する研究

Grundelius らはレーザーセンサとカメラ撮影をによる計測により液体製品の梱包・搬送工程における液面振動を定式化し、線形化したモデルからコントローラを構築している^[20]。高原らは、内側に仕切り板や円筒の構造物を有する液体容器において容器の動作によって生じる液面振動について実験・シミュレーションによる解析を行っている^{[21][22]}。勝部らは一次モードの液面振動を二重振子系で近似し、傾動式自動注湯機について、取鍋の傾動動作と搬送動作を同時に行う際の液面振動制御をシミュレーション・実験によって検証している^{[23]–[25]}。Tzamtzi らはメタヒューリスティックな探索法を用いることでロボットアームや自走式搬送機による液体搬送とそれに伴う液面振動制御についてのシミュレーションを行っている^{[26][27]}。研究室内では、浜口らが境界要素法に基づく、タンク内液体の振動解析を行うと共に^[28]、曲線軌道を容器に走行させつつ行う制振制御^[29]、振子モデルによるプラントモデルの表現と制御系の構築を行っている^[30]。矢野らは複数のフィルタ関数をシンプレックス法に基づき目的のフィルタ関数を合成する、ハイブリッド整形法を考案し、液面振動固有周波数に応じた制振制御を実現した^[31]。またCFD(Computational Fluid Dynamics)による解析を行い、実際の溶湯を想定した振動制御のシミュレーションを行っている^[32]。渋谷、寺嶋らは傾動角度や液体流出重量による液面振動固有周波数の変化をエンコーダとロードセルを用いて推定、ノッチフィルタを用いて制振する手法や速度ポテンシャルを用いた厳密な制御モデルに対して、一般化予測制御を用いて搬送入力を設計する方法を提案している^{[33][34]}。また、渋谷は姿勢や液体容量の変化する液体タンクについて、固有周波数の時変モデルを構築し、これに合わせてノッチフィルタを変化させることでリアルタイム制振を実現している^[35]。

1.2.2 注湯制御に関する研究

篠原らは取鍋内の溶湯重量についてファジィコントローラを構築することによって注湯重量・注湯速度の制御に成功している^[36]。佐藤らは熟練技能者の教示データを基に制御を行う，ティーチング・プレイバック方式により，注湯の無人化や製品品質の向上を実現している^[37]。寺嶋らは出湯口先端が傾動中心になるように各軸を同期制御する，VN 制御（Virtual Nozzle Control）を提案し，注湯落下位置の安定化を行っている^[51]。松田らは取鍋の出湯口下端に昇降装置を取り付けることによって，注湯流量の最適化や初期流量の増大化を実験的にやっている^{[38]–[41]}。東海らは機械動作をパターン化し，注湯条件の作りこみと局所的なデータ修正を可能にした^[42]。矢野，寺嶋らは Betterment Process と呼ばれる反復学習制御法を用いて取鍋傾動用モータへの制御入力を導出する方法を提案している^[44]。野田，寺嶋らは種々の傾動式取鍋に対して物理則に基づいた注湯流量モデルを確立し，流量制御の高精度化を実現している^[45]。また，拡張カルマンフィルタを用いることで，ロードセルの計測データに基づいた出湯流量のオンライン推定を行っている^[46]。辻，野田らは，前バッチまでの注湯データから，注湯時の溶湯の流出係数や密度のパラメータを最適化手法により同定し，次回以降のバッチに適用することで注湯流量制御の精度向上に成功している^{[49][50]}。また，落下位置制御については，福島，寺嶋らは溶湯の出湯速度・出湯口高さに応じた注湯落下位置推定モデルを構築すると共に，カメラによる画像計測を行うことで注湯落下位置のフィードバック制御系を確立した^{[52][53]}。

1.2.3 湯面レベル制御に関する研究

湯面レベル制御に関しては連続鑄造のタンディッシュと呼ばれる取鍋と鑄型の中間に位置する容器についてよく研究が行われている。Grabe はスライディングノズルについて厳密なモデリングを行い制御を行っている^[63]。Barron は未知となっているノロの詰まり具合やノズルの流量係数を推定し，離散制御により湯面レベルを制御している^[64]。北田は4つの重み関数を使用した H^∞ 制御による液面制振を行い PID 制御よりも精度よく液面制御を実現している^{[65]–[67]}。渡辺らはニューラルネットワークを用いることによって液面振動の抑制を行っている^[68]。また，スライディングモード制御を用いることで高精度かつ高いロバスト性を有する湯面レベル制御系を実現している^[69]。Kim らは遅延補償を適用した外乱オブザーバを導入することにより湯面レベルへの外乱の影響を大幅に減少させている^[70]。

1.2.4 その他の関連研究

注ぎロボットに関する研究

ここまでは自動注湯機に関連した研究を紹介してきたが，近年では介護やエンターテインメント性の追求を目的として，アームロボットや二足歩行ロボットによる液体操作技術が研究されており，その中には注ぎ動作も含まれている。杉田らは高速ビジョンを活用したビジュアルフィードバックによりロボットアームによる注ぎ動作および液体充てん量の制御を実現している^[73]。

巻渕らは自己増殖型ニューラルネットワークにより、あいまいな視覚情報の認識や視覚・聴覚情報からの学習が可能なヒューマノイドロボットの研究を行っており、ティーチングにより注ぎ動作を実現できる^[74]。本研究グループでも、田崎が傾動式自動注湯機向けに開発してきた液体制御技術を応用したバーテンダーロボット・ウェ이터ロボットの開発を行っている^[75]。

軌道生成・衝突回避に関する研究

衝突回避を目的とした軌道計画法としては、ポテンシャル法、グラフ理論、数理計画法などが挙げられる。

関らは長方形形状の移動ロボットについて、形状に合わせてポテンシャル法を適用することによって、移動体を単純に円形近似する場合には通れない狭い道でも衝突回避を実現している^[76]。本研究室でも、鈴木、竹本らが天井クレーンや旋回クレーンの荷運びの動作計画のために拡散方程式をベースとしたポテンシャル法を用いた衝突回避動作を提案している^{[78]–[80]}。

また、ポテンシャル法では形成したマップに特異点が生じる部分があることから、障害物の位置をマップを格子分割する離散的な方法で行うことでデッドロックの問題を回避し^[81]、三次元空間に拡張することで小型ヘリコプターの動作計画も実施している^[82]。

液中への空気巻き込みや液体挙動に関する研究

溶湯の落下挙動や空気巻き込みなどを考える上で流体力学的な知見は必要不可欠である。液体流動時の形状の変化や速度の分布を知ることができなければ、液体の落下位置を推定することはできない。Sambuco and Whitehead は水が半円状の堰を越えていくときの越流流量や液体の形状について理論的に示すとともに、小型の装置による実験検証を行っている^[86]。井筒は河川の落差工からの流れについて、水流による実験を行い、液体の落下挙動についての物理モデルを提案している^{[87][88]}。Vanden-Broeck and Keller は堰から流れ出る液体の挙動について理論的な解析を行っている^[91]。

液体落下中の流動に関する研究の他に液体と液面の衝突のみに着目している研究では、河川の堰などを対象とした研究などでは騒音の低減のため、液体の衝突音を扱う研究が多い。森らは剛球、水滴、水流についてそれぞれ液面への衝突実験を行っており、録音した衝突音の周波数解析を行うことで衝突の特徴を解析している^{[83][84]}。高木らは越流堰について落下時の衝突音の周波数解析を行い、騒音を低減可能な越流堰の設計法を示している^[85]。

液体が液面へ衝突する瞬間をカメラで撮影し、得られた画像から液体衝突に関する空気巻き込みや変形挙動をモデル化する研究も数多く存在する。Pumphrey and Elmore は音波で加振し、液膜から切り離れた液滴の落下挙動についてカメラで観察と数値流体解析によるシミュレーションにより現象のモデル化を行っている^[89]。Zhu et al. は定常な水流に、上側の水槽内の圧力や流動を制御することによって節状の液塊を作り、液塊が注がれる側の液面に衝突する際の現象をカメラシミュレーションによって明らかにしている^[90]。どの研究でもカメラは高速ビジョンの取得が可能なものが使用されている。

また、液体金属を用いてガス巻き込み量を計測・巻き込みモデルの提案を行った研究もある。岩田らは連続鋳造におけるタンディッシュ（鋳型）を想定した装置を用いて、水、低融点合金を対象として、液中へのガス巻き込み量のモデル実験を行っている^[92]。

1.3 研究目的と論文構成

本論文の目的は次の2つである。

1つ目は、鋳型の位置を考慮し、注湯精度を維持しながらなるべく取鍋を鋳型へ接近させ、極力低位置での注湯動作を実現する、取鍋搬送軌道生成法の解析的アルゴリズムを新たに提案することである。多くの軌道計画法では、最適化手法を用いた軌道の数値的生成が行われているが、本研究においては取鍋搬送軌道を一意に求めることを考える。これは従来の研究において、注湯流量・注湯落下位置の推定モデルが確立されていること、取鍋形状が既知であることから可能であると判断したためである。数値解析法では、各サンプリングにおいて計算が必要となるため、実プロセスには不向きである。まずは、最も低位置での注湯動作がどのような状況で行われるかを考え、考案した2つのケースについて出湯口座標の導出式を構築した。また、傾動角度や溶湯流出速度によっては高位置からの注湯動作となる場合があるため、2つの軌道生成法による動作を切替えることで常に低位置での注湯動作を行うことができるよう、動作切替点の定義を行った。最後に従来研究で行われた注湯落下位置制御との比較を行うことで、提案手法の注湯落下位置制御の精度と出湯口高さの差から低位置注湯が実現されることを示した。なお、本研究で得られた解析的アルゴリズムの妥当性の検証のため、最適化手法を用いた数値解を求め、提案法による解析解との比較・検証を行う。

2つ目の目的は、実際の自動注湯プロセスで用いられる、内部に堰構造を有する取鍋に対して、後傾動作時の取鍋内溶湯振動の特性をCFD解析により明らかにすると共に、発生する振動を制振制御手法を用いて抑制することを行う。取鍋の堰の機能は、溶湯表面に浮かぶ介在物・酸化物を鋳型内へ流入させないことにあり、それ故、取鍋の動作時には液面振動の他に、堰で隔てられた取鍋のボディ側とノズル側を溶湯が行き来する体積移動振動が発生することがわかっている。体積移動振動が線形の2次遅れ振動にフィッティングできるものとして、従来研究でも用いられてきた複数モードInput Shaping法を用いて後傾動作入力を整形し、液面振動と体積移動振動の両方を低減することに成功した。

本論文は以下のように構成する。第1章では、本研究の背景と目的について述べる。第2章では、実験装置の構成と注湯制御を行うためのプロセスモデルについて述べる。第3章では、低位置注湯動作の解析的な生成を行い、生成動作の有用性をシミュレーション・実機実験により示す。第4章では、実際の自動注湯プロセスで用いられる堰付き取鍋に対し、CFD解析を用いて、取鍋の形状的特長と液体振動との関係性を解析すると共に、制振制御の方法を示す。最後に第5章では、本論文の内容を総括する。Fig. 1.2に各章の位置づけと概要を示す。

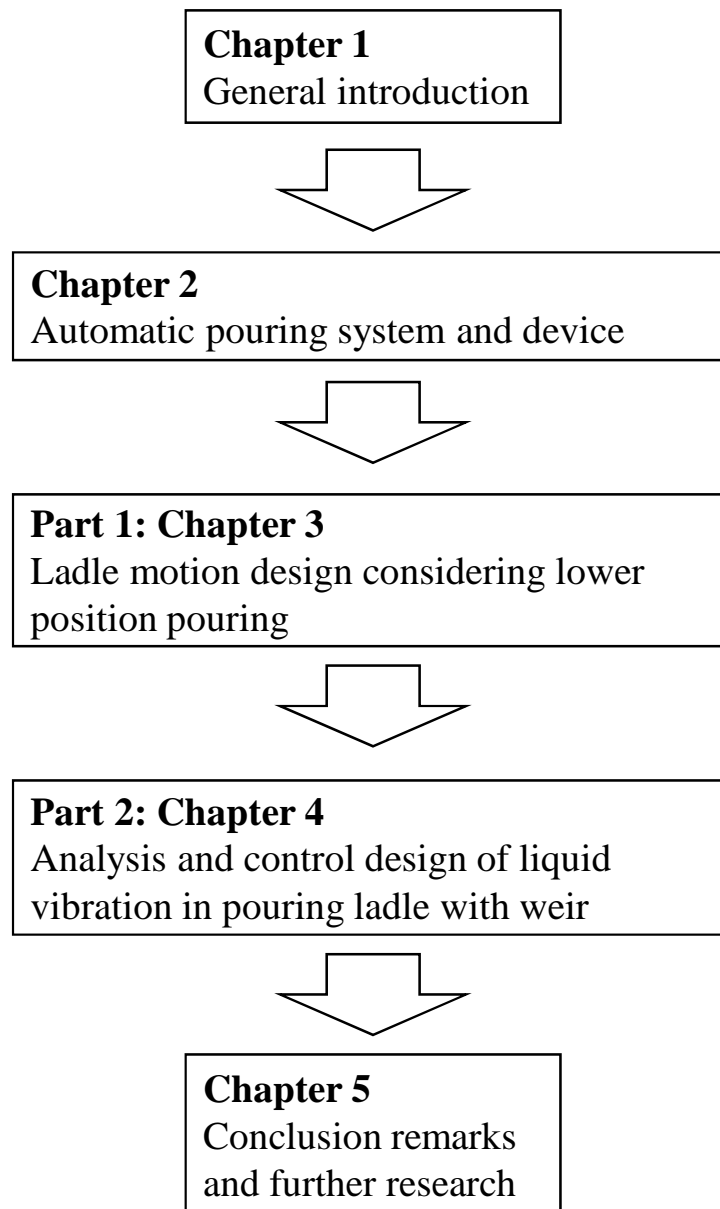


Fig. 1.2 Outline of Dissertation

第2章 実験装置概要, プロセスモデル

本章では, 本研究で使用する実験装置について述べる. 2.1 章では実験装置の概要を, 2.2 章では注湯動作を実現するプロセスモデルについて示す.

なお, 実際の注湯工程では溶融金属である溶湯を扱うが, 実験実施の際には対象流体として水を使用することとした. 流体の物性値に着目すると, 鑄鉄溶湯では, 温度 1400[K] での動粘性係数は $\nu = 1.237 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$, 温度低下後の 1350[K] では $\nu = 1.365 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ であり, 水の動粘性係数 $\nu = 1.0 \times 10^{-6} [\text{m}^2/\text{s}]$ とほぼ同じ値を示す. そのため, Reynolds の相似則に基づけば, 液面振動の形態も定性的にはほぼ同様となると考えられる. また, 水と高温溶湯に関する液面振動形態の相似性に関しては CFD による応答解析シミュレーションにより, その妥当性が定量的に示されている^[32]. したがって, 本研究では, 実験室において取り扱いやすい水を対象流体として用いても問題ないと考えた.

2.1 実験装置概要

2.1.1 傾動式自動注湯機

本研究では, 多品種少量生産に適し, 設備自体も小型であり, さらに既存の手注湯式注湯ラインから自動注湯ラインへの移行が容易な取鍋傾動式自動注湯システムを対象とする. 傾動式自動注湯機の概略図を Fig. 2.1 に示す.

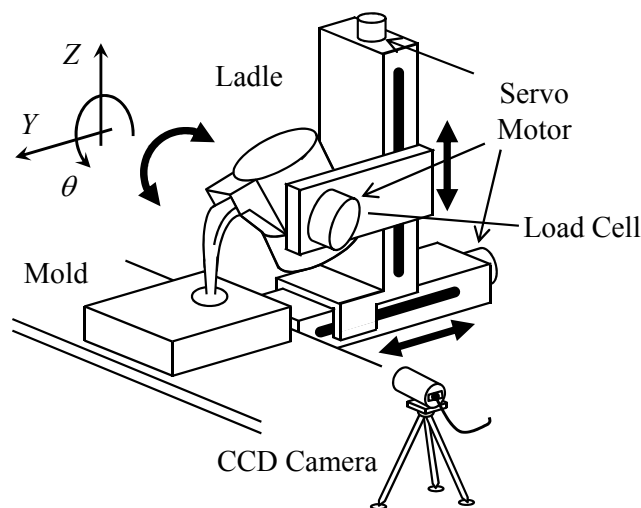


Fig. 2.1 Structure of Tilting Type Automatic Pouring System

鑄型ラインに対し平行方向の軸を X 軸, 垂直方向の軸を Y 軸, タンク上下方向を Z 軸, 傾動

方向を Θ 軸とし、タンクは3次元的に搬送される。ただし、 Θ 軸方向のみモータ直動で回転される。また、本研究で使用しないため図には記載していないが、鋳型もX軸方向に搬送可能である。よって、本自動注湯機は5自由度を持つ。取鍋の回転中心は取鍋の重心付近にあり、これはACサーボモータへの無理な負荷がかかるのを避けるためである。しかし、取鍋の重心を中心として傾動することにより、取鍋の出湯口先端位置が変動してしまい、鋳型との衝突の危険が生じる他、液体の落下位置が安定しないことが問題となる。寺嶋は傾動軸が取鍋重心付近にある注湯機について、Fig. 2.2に示すように取鍋を傾動動作に同期して前後、上下に搬送することで、出湯口を仮想的な傾動中心とする手法を提案している^[51]。ここで、出湯口を仮想的に固定するための前後、上下の修正量 y_n, z_n は、式(2.1)で示される。

$$\begin{aligned} y_n &= a (\cos \theta_{vn} - \cos (\theta_{vn} - \theta)) \\ z_n &= a (\sin \theta_{vn} - \sin (\theta_{vn} - \theta)) \end{aligned} \quad (2.1)$$

ここで、 $\theta_{vn}[\text{deg}]$ はモータ回転軸と出湯口先端を結んだ直線と水平面のなす角度である。 $\theta[\text{deg}]$ は取鍋の傾動角度である。 $a[\text{m}]$ は出湯口先端と傾動軸中心との直線距離である。傾動角度に対してこの修正移動量を与えることにより、出湯口が固定され、安定した注湯動作が可能となる。また、取鍋傾動により重心が変化するが、重心変動による重量変化は微小であるとする。

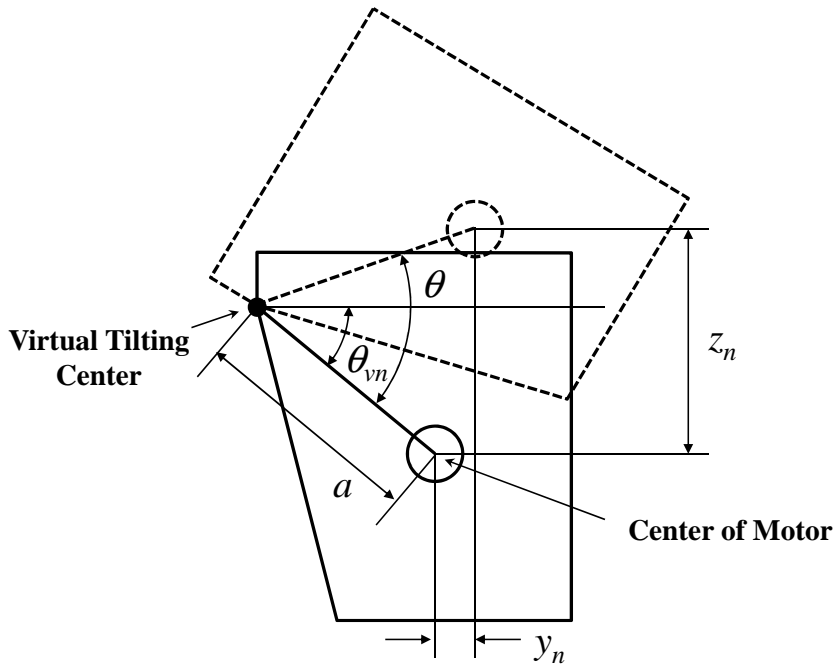


Fig. 2.2 Virtual Fixed Pouring Mouth

また、タンクの3次元空間における位置とタンク回転角は、各モータに取り付けられた計4つのロータリーエンコーダにより測定する。タンク内重量は、タンク設置部に取り付けられたロードセルにより測定される。各軸のエンコーダおよびレーザセンサ、ロードセルからの測定値はカウンタボード、およびA/Dコンバータによりコンピュータに取り込まれる。また、入力

指令値はD/Aコンバータからモータドライバへ送られ、ACサーボモータを駆動する。モータへの制御指令、制御則の計算、データ処理はDSPにて行う。本研究における制御系設計にはMATLABを用いる。

2.1.2 取鍋寸法

本研究で使用する取鍋寸法を示す。簡易形状取鍋を Fig. 2.3, 円筒形状取鍋を Fig. 2.4 に示す。

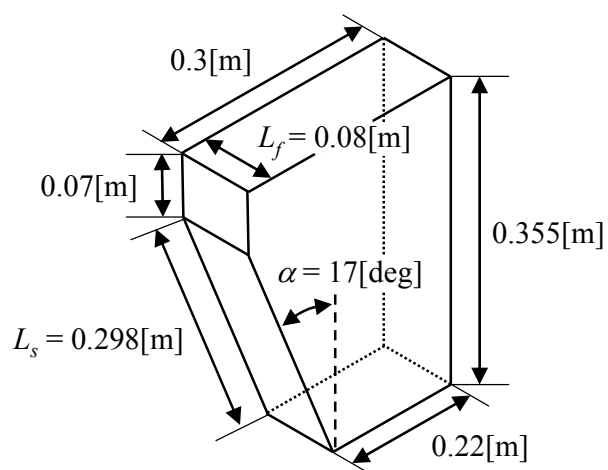


Fig. 2.3 Simple Shape Ladle

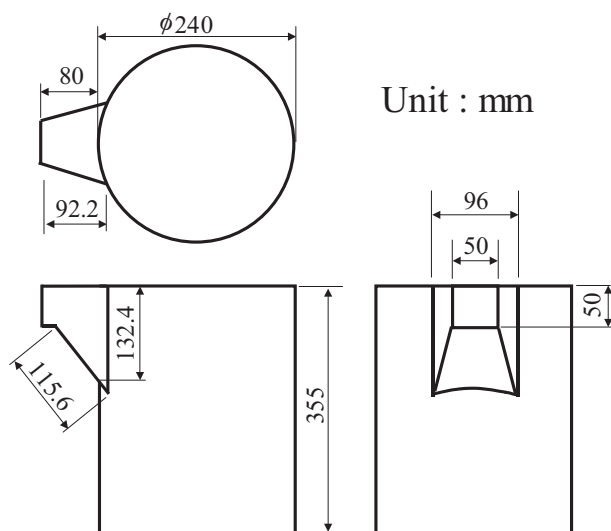


Fig. 2.4 Cylindrical Shape Ladle

2.1.3 ロードセル

本研究で用いるロードセルの仕様を Table2.1 に示す. ロードセルは Fig. 2.1 に示す, 取鍋の支持部に1個取り付けられており, 取鍋, 液体, モータを含めた総重量を計測する.

Table 2.1 Specification of Load-cell

Manufacturer	NMB
Model	U2D1-100K
Basis Capacity	980.7[N]
Allowable Load	200 % RC
Limit Load	300 % RC
Output Voltabe	2mV/V \pm 0.2mV/V

2.1.4 モータ特性

各軸の入力電圧 u_i [V] から出力速度 ω_i [deg/s] までの伝達関数を一次遅れ系として, 式 (2.2) のように表現する.

$$\frac{d\omega_i(t)}{dt} = -\frac{1}{T_{mi}}\omega_i(t) + \frac{K_{mi}}{T_{mi}}u_i(t) \quad (2.2)$$

ここで, K_{mi} はモータゲイン, T_{mi} はモータ時定数である. また, 添字 i はそれぞれの軸に対するパラメータであることを示す. 各軸におけるパラメータ K_{mi} , T_{mi} と最大速度 V_{maxi} , 最大加速度 A_{maxi} を Table2.2 に示す.

Table 2.2 Motor Parameter

	K_m	T_m	V_{max}	A_{max}
Y-axis	0.0830[m/sV]	0.006[s]	0.5[m/s]	1.0[m/s ²]
Z-axis	0.0828[m/sV]	0.007[s]	0.5[m/s]	1.0[m/s ²]
Θ -axis	24.6[deg/sV]	0.006[s]	150[deg/s]	1500[m/s ²]

2.1.5 注湯落下位置計測システム

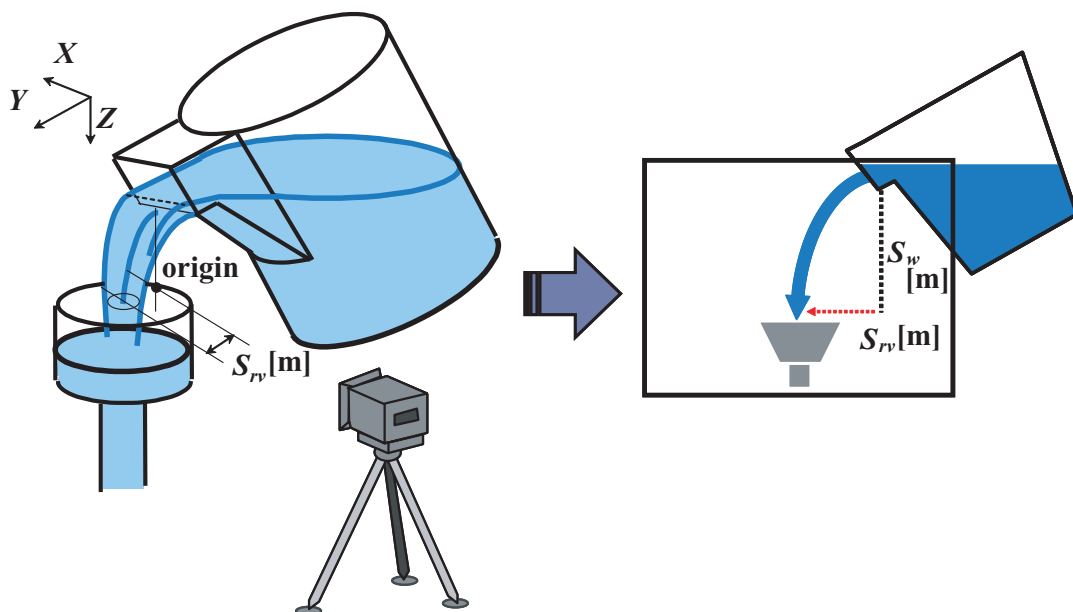


Fig. 2.5 Measurement System for Falling Position of Outflow Liquid

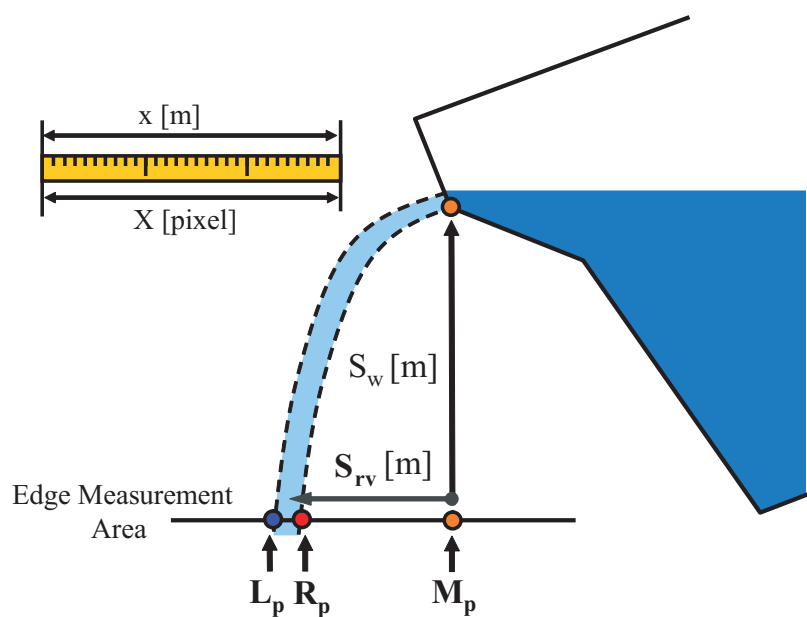


Fig. 2.6 Measurement Approach of Falling Position

注湯された液体の落下位置の評価は従来研究で構築されたカメラ計測システムにより行う^[53]. この計測システムでは, Fig. 2.5 で示すように, 注湯機側方の CCD カメラにより鋳型湯口付近を撮影し, 撮影した動画を PC 上で処理することにより液体の落下位置データを得る. 画像処理には従来研究で National Instrument 社の LabVIEW により構築されたプログラムを使用する. LabVIEW とは, 関数ブロックを組み合わせてプログラムを行う, グラフィカルプログラミング言語であり, プログラムを直観的に理解しやすい特徴がある.

Fig. 2.6 に液体落下位置の計測原理を示す．画像解析に使用するプログラムでは，湯口に相当する部分にエッジ検出領域を設定し，落下する液体の両端の点 L_p [pixel] と R_p [pixel] を検出する．本研究で使用するカメラの画素数が横 640[pixel] であるため， L_p と R_p は 0 から 639 までの値で表現される．計測する落下位置は L_p と R_p の中点と定義する．以上より，ピクセル変換後の液体落下位置 S_{rv} [m] は次式で計算される．

$$S_{rv} = \left(M_p - \frac{L_p + R_p}{2} \right) \times \frac{x}{X} \quad (2.3)$$

M_p [pixel] は補正值， x/X [m/pixel] は pixel 値から実寸への変換係数である． x/X はカメラ計測の範囲にスケールを置き，実寸 x [m] に対する画面上でのピクセル数 X [pixel] を計測することにより決定する．

2.2 制御システム構成，プロセスモデル

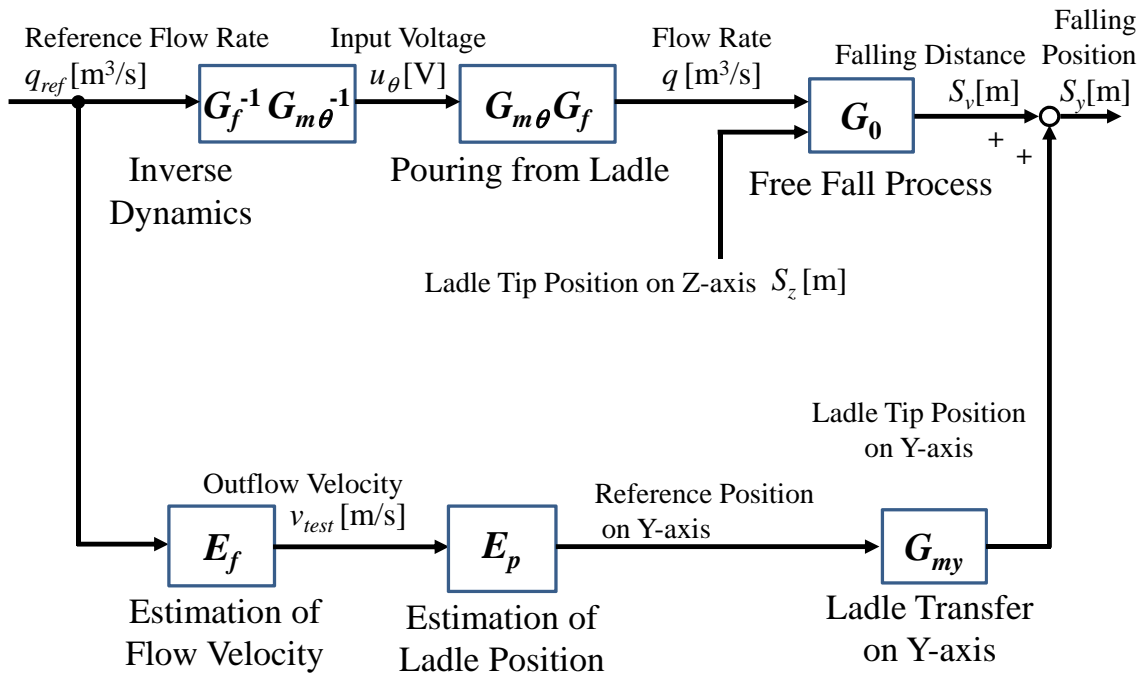


Fig. 2.7 System Configuration

本稿では，取鍋からの流出流量と鋳型の目標位置への落下位置制御を実施する．Fig. 2.7 にこれらの制御をフィードフォワードにより実現するための制御システム構成を示す．構築する自動注湯機の制御システムは，取鍋の傾動・搬送のためのモータ制御部，傾動時の流出流量制御部，流出後の液体落下位置制御部から構成される．以降でまず各プロセスモデルについて説明し，フィードフォワード制御のための制御系構成について説明する．

2.2.1 モータモデル

傾動用モータモデル $G_{m\theta}$

入力電圧 $u_i(t)$ [V] から傾動角速度 $\omega_i(t)$ [rad/s] までのモータモデルは 2.1.4 の式 (2.2) で示した通りである．また，各パラメータは Table 2.2 の通りである．

傾動用モータ逆モデル $G_{m\theta}^{-1}$

式 (2.2) より，傾動角速度 $\omega(t)$ [rad/s] から入力電圧 $u_\theta(t)$ [V] までの関係は次式より求められる．

$$u_\theta(t) = \frac{T_{m\theta}}{K_{m\theta}} \frac{d\omega(t)}{dt} + \frac{1}{K_{m\theta}} \omega(t) \quad (2.4)$$

式 (2.2)，(2.4) に示す各モデルを用いることで，所望の傾動角速度 $\omega(t)$ [rad/s] を実現する．

2.2.2 注湯流量推定モデル・逆モデル

注湯流量推定モデル G_f

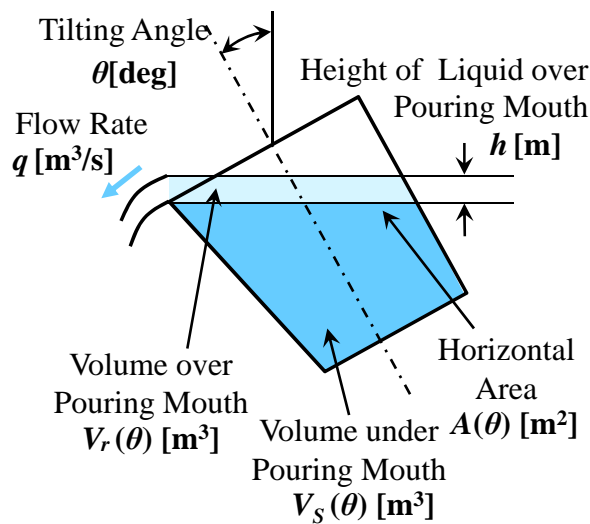


Fig. 2.8 Flow Rate Model

正確な流量で鋳型に溶湯を充填させるためには，取鍋傾動時の角速度 ω [rad/s] と流量 q [m³/s] の関係を明らかにする必要がある．流量 q [m³/s] と取鍋内の液体の体積との関係を示す．取鍋出湯口水平面よりも上側に存在する液体の体積 V_r [m³] の変化量は物質収支式より式 (2.5) のような微分方程式で表される．

$$q(t) = -\frac{dV_r(\theta)}{dt} - \frac{\partial V_s(\theta(t))}{\partial \theta(t)} \omega(t) \quad (2.5)$$

ここで流量 $q[\text{m}^3/\text{s}]$ はベルヌーイの定理より次のように記述される.

$$q(t) = \int_0^{h(t)} cL_f \sqrt{2gh_b} dh_b = \frac{2}{3} cL_f \sqrt{2g} h(t)^{\frac{3}{2}} \quad (2.6)$$

c は取鍋の流量係数, $L_f[\text{m}]$ は出湯口の幅, $h[\text{m}]$ は Fig. 2.8 に示すように出湯口からの液面高さである. 流量係数 c は注湯実験の結果をシミュレーション結果と比較・同定することによって得ることができる. 本研究では, 簡易形状取鍋の場合に $c = 0.65$, 円筒形状取鍋の場合に $c = 0.89$ であった.

また, 式 (2.5) 中の $V_r[\text{m}^3]$ と液面高さ $h[\text{m}]$ には次のような関係がある.

$$h(t) = \frac{V_r(t)}{A(\theta(t))} \quad (2.7)$$

注湯流量推定逆モデル G_f^{-1}

注湯流量の制御は q_{ref} から目標傾動角速度 ω_{ref} を求める G_f の逆モデルによって実現される. まず, 式 (2.6) の逆関数から目標液体高さ $h_{ref}[\text{m}]$ を推定することができる.

$$h_{ref}(t) = \left(\frac{3q_{ref}}{2cL_f\sqrt{2g}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.8)$$

式 (2.8) と式 (2.7) を式 (2.5) に代入し, 傾動角速度について整理すれば, 目標傾動角速度 ω_{ref} の推定式は次式のように求まる.

$$\omega_{ref}(t) = -\frac{A(\theta(t)) \frac{dh_{ref}(t)}{dt} + q_{ref}(t)}{\frac{\partial V_s(\theta(t))}{\partial \theta(t)} + \frac{\partial A(\theta(t))}{\partial \theta(t)} h_{ref}(t)} \quad (2.9)$$

この流量逆モデルにより, q_{ref} に応じた流量制御が可能となる. Fig. 2.9 に簡易形状取鍋の, Fig. 2.10 に円筒形状取鍋の液面面積 $A(\theta)$, $V_s(\theta) [\text{m}^3]$ の角度との対応関係を示す. これらの値は予め取鍋の形状から計算しておき, データベース化しておく必要がある.

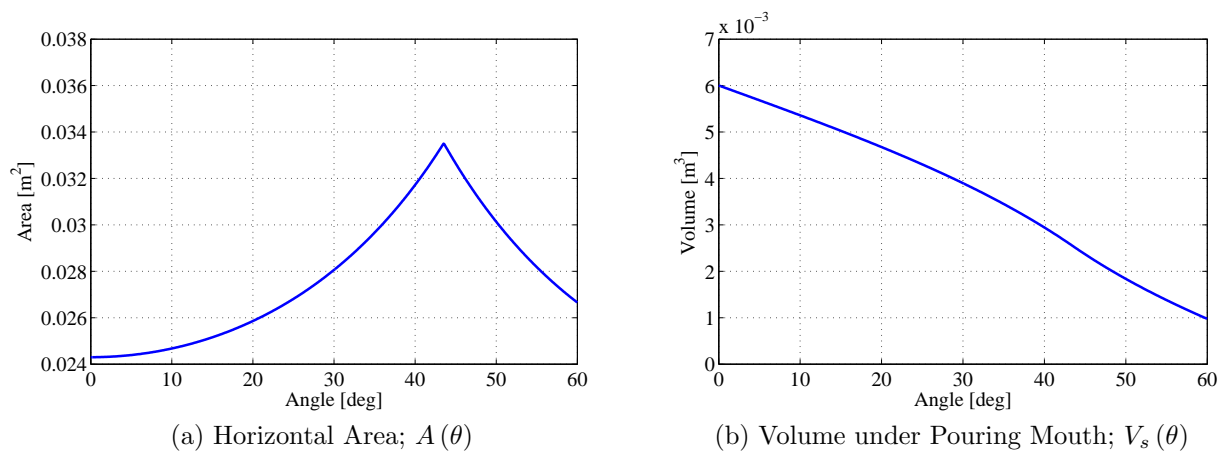


Fig. 2.9 Parameters of Simple Shape Ladle

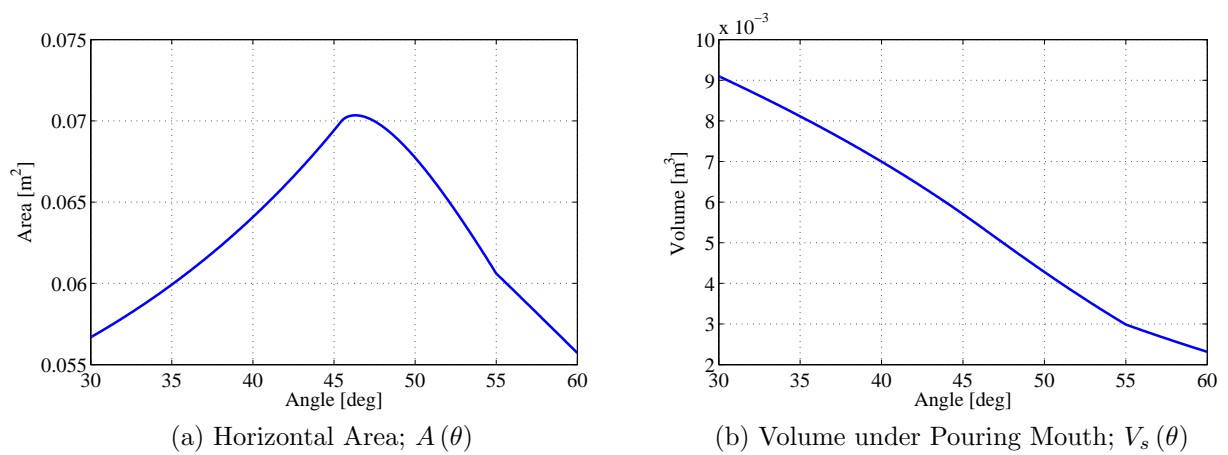


Fig. 2.10 Parameters of Cylindrical Shape Ladle

2.2.3 注湯落下位置推定モデル

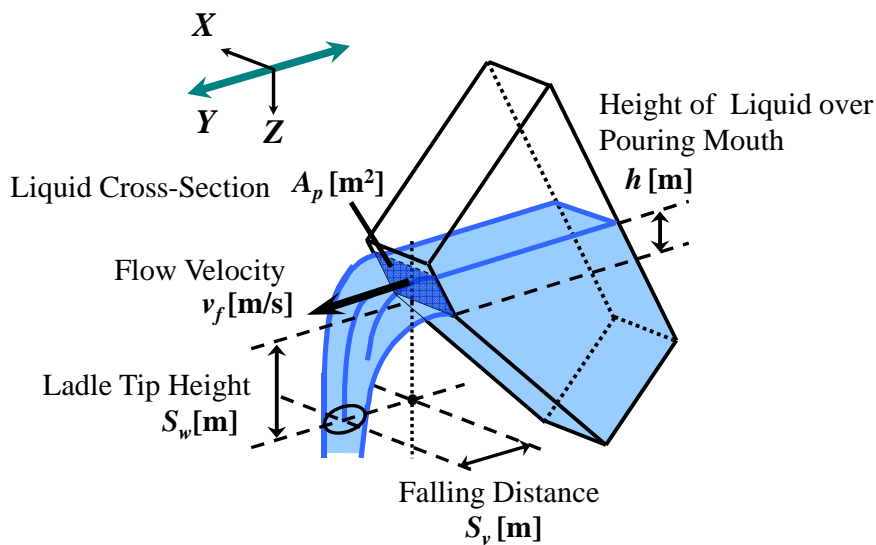


Fig. 2.11 Free Fall Process

溶湯は取鍋から出湯した後、重力の作用で放物線を描いて自由落下していく。この運動は質点における等加速度運動と等価なものとして表せるため、注湯高さ S_z と落下時間 T_f には次のような関係がある。

$$S_z = \frac{1}{2} g T_f^2 \quad (2.10)$$

また、液体の出湯速度 v_f [m/s] は式 (2.9) から求まる q_{ref} より次のように求められる。

$$v_f(t) = \frac{q_{ref}(t)}{A_p(t)} = \frac{\frac{2}{3} c L_f \sqrt{2gh(t)}^{\frac{3}{2}}}{L_f h(t)} = \frac{2}{3} c \sqrt{2gh(t)} \quad (2.11)$$

A_p [m²] は出湯口での液体断面積であり、式 (2.11) から明らかなように、 v_t [m/s] は上澄み液体高さ h [m] によって決まる。

以上に示した式によって求まる v_f [m/s], T_f [sec] によって液体の落下位置 S_v [m] は次式のように示される。

$$S_y(t) = v_f(t) T_f = v_f(t) \sqrt{\frac{2S_z}{g}} \quad (2.12)$$

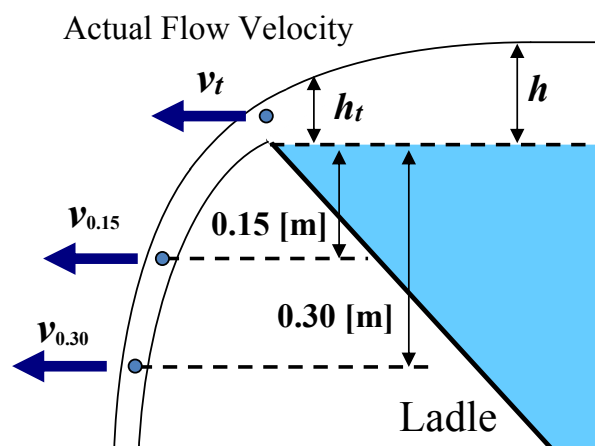


Fig. 2.12 Falling Position Model

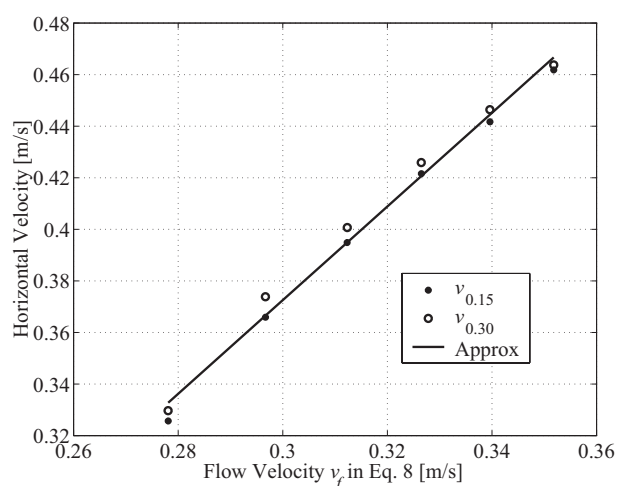


Fig. 2.13 Falling Position Model

ただし, 従来研究において, 単純に流量 $q[\text{m}^3/\text{s}]$ を液体断面積 $A_p[\text{m}^2]$ で除すだけでは正確な流出速度を得ることができないことがわかっている^[53]. これは, Fig. 2.12 に示すように, 上澄み液体高さ $h[\text{m}]$ が出湯口付近で低くなり, 流出速度 $v_f[\text{m/s}]$ が式 2.11 で推定した値よりも大きくなることによる.

流出後の液体の運動は, 垂直方向では自由落下運動のため等加速度運動となっているが, 水平方向では空気抵抗の影響が小さいため, 等速度運動となっている. このため, 実際の流出速度 $v_t[\text{m/s}]$ は, 落下後高さ $0.15[\text{m}]$, $0.30[\text{m}]$ の地点での並進速度 $v_{0.15}$, $v_{0.30}[\text{m/s}]$ と等しくなる. よって, $v_t[\text{m/s}]$ が $v_f[\text{m/s}]$ の一次関数であると仮定すると, 次のような関係で表される.

$$v_t(t) = v_{0.15} = v_{0.30} = \alpha_1 v_f(t) + \alpha_0 \quad (2.13)$$

式中の係数 α_1 と α_0 は流出速度に関する実験結果とシミュレーション結果の関係から最小二乗法により求まる値である. 簡易形状取鍋の場合, 水を使った実験結果は Fig. 2.13 のようになり, α_1, α_0 はそれぞれ $1.82, -0.17$ と求まった.

ノズルがある場合

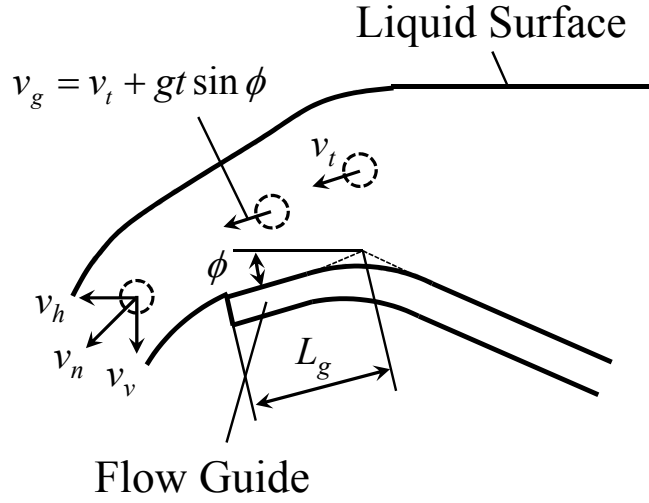


Fig. 2.14 Liquid Behavior at Nozzle of Ladle

取鍋にノズルがある場合、ノズル部の長さ L_g とガイド部の角度 ϕ に応じて重力が作用し、ノズル上にある液体の移動速度が増加する。

$$v_n = \sqrt{v_t^2 + 2L_g g \sin \phi} \quad (2.14)$$

本研究で取り扱う円筒形状取鍋では、ガイド部の角度は $\phi = \theta$ である。このとき水平方向の液体流出速度 v_h 、落下時間 T_{fg} は次のように求まる。

$$v_h = \sqrt{v_t^2 + 2L_g g \sin \phi} \cdot \cos \theta \quad (2.15)$$

$$T_{fg} = \frac{-v_n \sin \phi + \sqrt{(v_n \sin \phi)^2 + 2S_z g}}{g} \quad (2.16)$$

$$(2.17)$$

ノズル先端から水平方向で見た液体の落下距離 S_y は次のように表すことができる。

$$S_y = v_h \cdot T_{fg} \quad (2.18)$$

尚、ノズルがない場合には、 $L_g = 0$ 、 $\phi = 0$ となり、式 (2.12) と一致する。

2.2.4 取鍋搬送用位置フィードバック系

傾動軸については逆モデルを用いた制御を行っていたが、取鍋の搬送を行う Y,Z 軸については位置フィードバック系による制御を行う。モータ特性が一次遅れ系であることから、この系全体の伝達関数は、次のような二次遅れ系となる。

$$G_{mi} = \frac{K_{pi}K_{mi}}{T_{mi}s^2 + s + K_{pi}K_{mi}} \quad (i = y, z) \quad (2.19)$$

ここで, K_{pi} は Y,Z 軸の位置フィードバック系におけるフィードバックゲインである. 本研究では $K_{py} = K_{pz} = 100$ [V/m] とした.

第3章 低位置注湯を実現するための取鍋動作の解析的生成

本章では，注湯取鍋の出湯口高さを，注湯プロセス中常に最も低くすることのできる取鍋動作軌道の生成方法について示す．まずは出湯口の低位置化を実施するモチベーションについて説明する．

3.1 注湯高さの影響

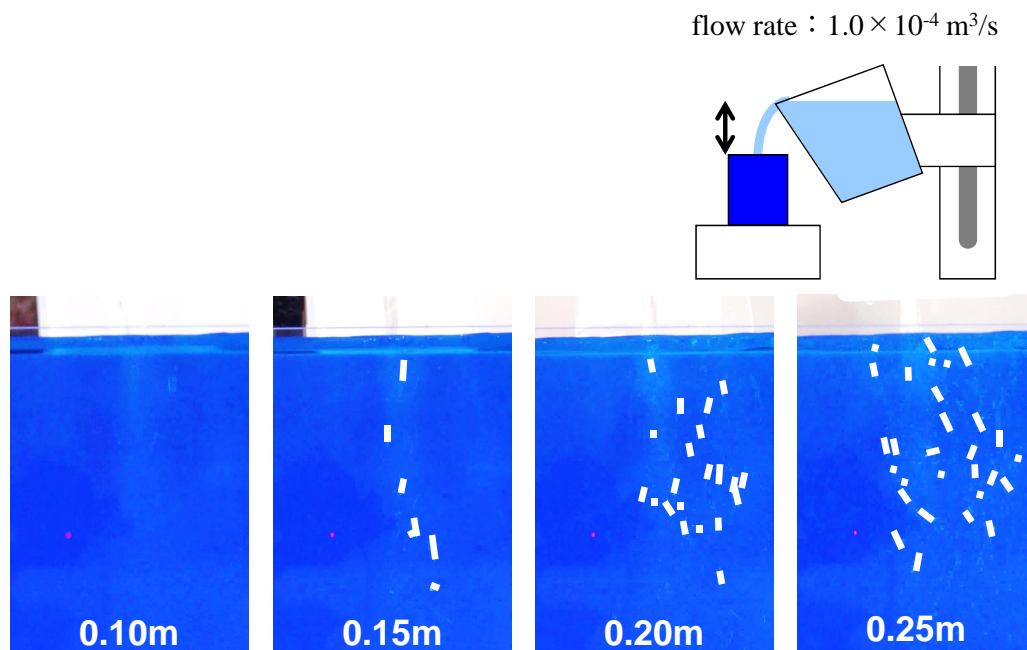


Fig. 3.1 Fundamental Experiment using Water

Fig. 3.1 に注湯高さと鋳型側液体の挙動を検証するために行った簡易実験の様子をまとめる．この簡易実験では，Fig. 3.1 右上の図のように，着色した水を満たした直方体形状の水槽に対して，フィードフォワードによる注湯流量・落下位置制御を実施し，水槽の中央部分に対して，一定流量の水を注ぐ操作を行う．この操作中に，落下位置制御は行いつつも，緩やかに取鍋高さを上昇させていくことにより，時間と共に注湯高さを変化させ，水槽の状況から注ぎ高さが液体の運動にどのような影響を与えるのかを検証することとした．このとき注湯流量は，ベル形状の滑らかな立ち上がり部・立下り部を持ち，平坦部が $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ となる目標流量パターンを成形し，逆モデルコントローラにより， Θ 軸の傾動モータへの印加電圧を導いた．使

用した取鍋は台形形状取鍋であり、すなわち、鉛直方向の加速は理論上は重力加速のみであり、高さが液体の落下に与える影響を検証することができる。

Fig. 3.1 下側に水槽を側方からビデオ撮影したときのキャプチャ画像をまとめる。取鍋高さは設計した上昇動作と撮影時刻から導いている。また、撮影中に気泡の発生した箇所を白くマークした。実験の結果、0.10mの注湯高さにおいては、水槽から液体が溢れるのみであったが、注湯高さ0.15mから高さを上げていくと、衝突により取り込まれる気泡量が高くなるほど増大していくことが確認された。また、写真には明確に示されていないが、注湯高さが高いほど、鋳型側の液面から水の飛び散る量も多くなることも実験実施時に確認している。このような空気の巻き込みや飛散の現象は、従来研究においても金属溶湯を用いた同様の液体落下実験^{[92]–[95]}により確認がされている。溶湯でこれらの現象が起こることは、空気巻き込みであれば鑄造製品に空洞などの欠陥を発生させる要因となり、飛散となれば作業ラインの汚染・故障に繋がるだけでなく、現場作業員の安全を脅かすことに繋がりがかねない。

以上のことから、注湯プロセスにおいて取鍋の注ぎ口を可能な限り低くし、空気巻き込み量や液体飛散量を抑制することが望ましいということがわかる。

3.2 低位置注湯動作を導くアプローチ

取鍋の位置を低くするだけであれば、周囲の障害物の位置を考慮して、衝突が発生しない範囲でなるべく低い位置へ配置してやれば良い。しかし、望まれているのは注湯プロセス中の取鍋の低位置化であるため、衝突以外の要因も考慮に入れなければならない。

まず考慮しなければならないのは、注湯流量の制御を傾動式注湯で行う場合、取鍋を傾けて注ぐ方式故に、取鍋姿勢が時々刻々と変化することである。この取鍋傾動動作は、流量制御を行う際には、一定速度ではなくプロセスモデルに基づき設計されたコントローラと目標流量パターンによって決定される。モデルパラメータが適切に導かれていれば、目標流量パターンの実現のために必要とされる取鍋動作はプロセスモデルの逆伝達関数から予測することができる。

次に重要なのは取鍋の動作中も目標とする位置へ適切に流出液体を落下させ、プロセス中に溢すことなく注ぎ続けられることである。前章でも取り上げたように、取鍋からの流出液体の落下軌跡は、放物線運動として取り扱うことができ、それ故水平方向の飛距離は、流出時の液体初速と目標位置から見た取鍋出湯口の高さで決まる。先行研究では、この出湯口高さを一定とし、注湯流量によって変化する液体の流出初速に応じた前後動作を加え、落下位置制御を達成していたが、低位置注湯のを達成するためには、出湯口高さも考慮した動作生成が必要になる。前章に基づく以上のことを集約すると次のようになる。

- 取鍋出湯口高さの低位置化は注湯プロセス中に行うため、流量制御、液体落下位置制御も重要である。
- 目標注湯流量を定めることで、プロセスモデルに基づき、取鍋傾動角度、取鍋流出液体の初速度を予測できる。
- 落下位置制御を実現する取鍋の前後位置を定めるには、流出液体の初速度と共に取鍋の

出湯口高さの情報が必要である。

これらのことから筆者らのグループでは、プロセスモデルを用いて得られる注湯情報に加え、動作対象である注湯取鍋の外形と注湯制御を行う環境にある障害物の外形の幾何学的情報があれば、所望とする、取鍋出湯口高さを低位置化しながらの注湯制御の実現が可能となると考えた。得られる情報、高さ情報の受け渡しの観点から、フィードフォワード注湯制御を行う場合には、Fig. 3.2のようなフローで黒塗りのブロックで示す段階において取鍋の出湯口高さを導くプロセスを新たに設け、注湯状態・取鍋姿勢の情報を基に取鍋が最も低位置となる出湯口高さを導き、落下位置制御を実現させるためにその高さ情報を渡す流れを構成することとした。

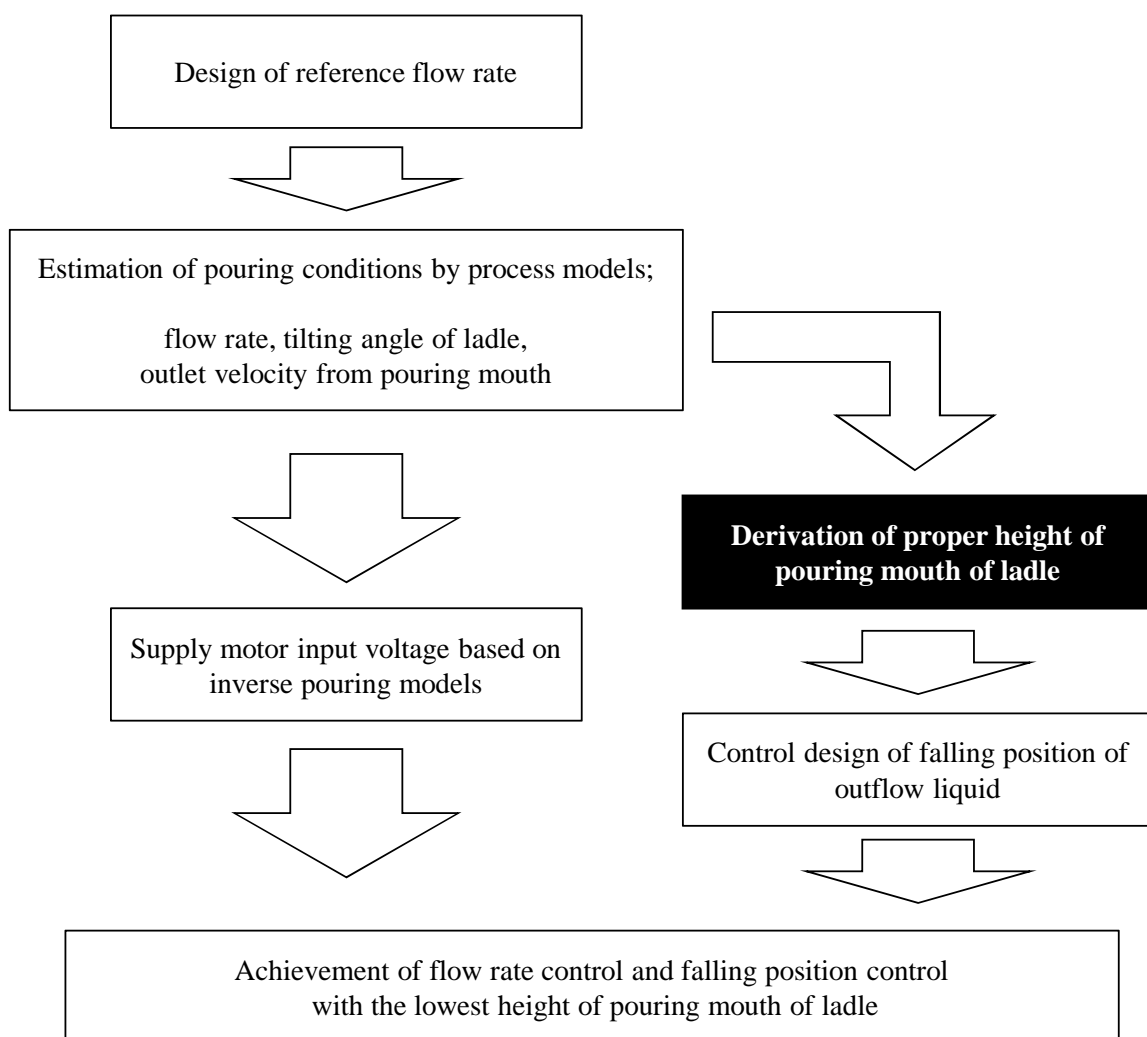


Fig. 3.2 Derivation Strategy of Ladle Motion with the Lowest Position of Pouring Mouth on Feedforward Process Control

取鍋の動作生成を行うためのアイディアには、最適化手法を用いて得られる数値解などもあるが、1バッチの注湯プロセスに要する時間は短く、今後もしフィードバック制御にも適用するのであれば、尚のこと最適化計算に時間がかかるのであれば実際のプロセスへの導入は困難

となる。

そこで，動作生成を数値解ではなく，既知となっている取鍋・障害物の幾何学的外形形状と1バッチ中の注湯情報に基づいた，解析的アプローチにより動作を一意的に導くことを考えた．以降では，まず取鍋と障害物の位置関係の定義を行うことから始め，流出液体の落下位置制御の実施に必要となる，注湯取鍋の出湯口高さの幾何学的解析方法について提案手法を示し，この方法の実験・シミュレーション検証，そして実プロセスへ導入するための追加提案を行うこととする．

3.3 取鍋と障害物の位置関係

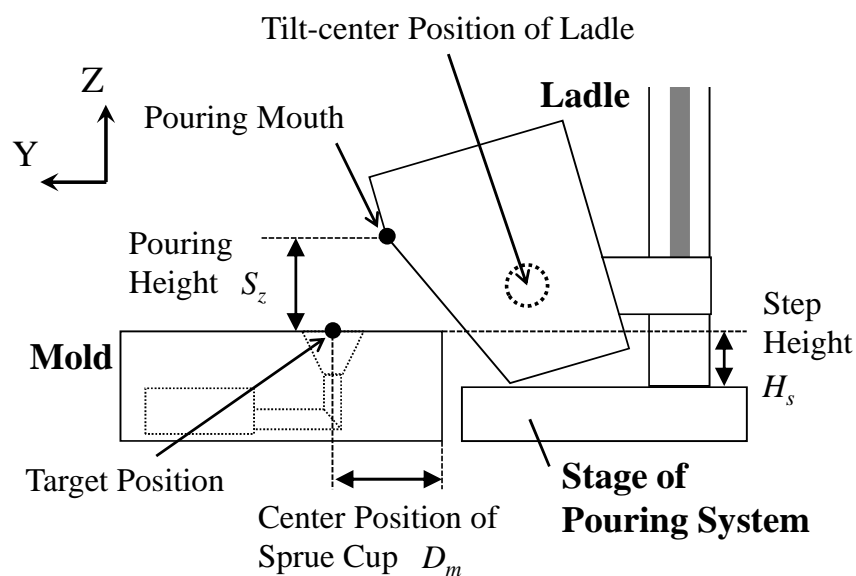


Fig. 3.3 Positional Relation of Pouring System

Fig. 3.3 に本章で定義する，側面から見た取鍋と障害物の位置関係を示す．取鍋の周囲には鋳型と注湯システム下側のステージ部があることを想定しており，この2つが取鍋動作時に考慮すべき障害物となる．障害物の側面形状は長方形として考えており，形状の特徴として，鋳型の端点から湯口カップ中心までの長さ D_m ，鋳型上面とステージ上面の段差 H_s を定義する．また，取鍋動作の生成の際，流出液体の落下目標位置は鋳型の湯口カップ中心とした．

3.4 取鍋動作の解析的生成

出湯口の位置が最も低くなり、障害物と衝突しない取鍋の位置は、障害物の境界面と取鍋が沿う位置となる．ここで、取鍋出湯口から鋳型湯口カップ内の目標位置へ液体が落下に要する時間が十分に短く、取鍋が障害物の境界面に常に沿って動作できるものと仮定すると、注ぎ高さが最も低くなる注ぎ方は以降で示すような3つが挙げられる^[56]．各注湯動作をモード1, 2, 3と定義し、注ぎ高さ S_z を取鍋と障害物の位置関係、流出液体の流線に基づき求める．以降で台形取鍋を対象として各注湯モードでの S_z の求め方・定義を示す．なお、液体落下位置制御を行う際の取鍋の水平位置 S_y は、注湯高さを導出した後に求めるものとする．

3.4.1 モード1: 鋳型の上面を滑る動作

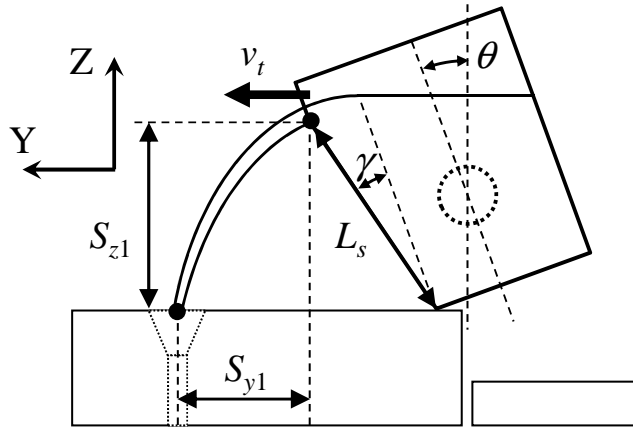


Fig. 3.4 Positional Relation on Mode 1

動作の一つとして、取鍋が鋳型の上面に接しながら注湯を行うことを考える．このとき、鋳型上面は高さ0の部分であり、取鍋底部の高さも0である．このことから、注湯高さ S_{z1} は次のように求められる．

$$S_{z1} = L_s \cos(\theta + \gamma) \quad (3.1)$$

L_s は取鍋側面の長さ、 γ は側面の傾き角である．式からも明らかなように、モード1における注ぎ高さは取鍋の形状・姿勢のみから決定することができる．

3.4.2 モード 2: 鋳型の角に沿う動作

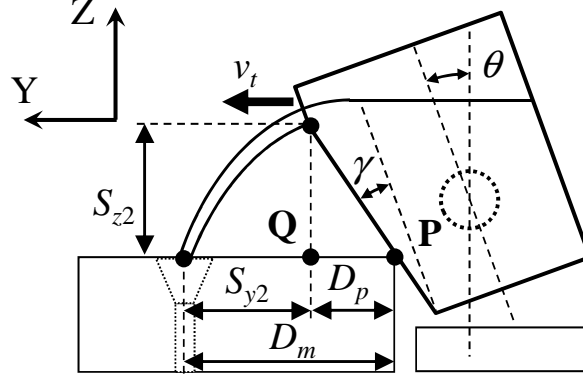


Fig. 3.5 Positional Relation on Mode 2

モード 2 では常に取鍋の側面を鋳型の端点 P に沿わせながら注湯を行う．Fig. 3.29 で示すように，点 P と取鍋先端から伸ばした垂線によって得られる点 Q の間の距離を D_p とすると，湯口カップの位置 D_m ，液体落下距離 S_{y2} と次のような関係が成り立つ．

$$D_m = S_{y2}(t) + D_p(t) \quad (3.2)$$

ここで， S_{y2} ， D_p は次式で表される S_{z2} の関数である．

$$S_{y2}(t) = v_t(t) \sqrt{\frac{2}{g} S_{z2}(t)} \quad (3.3)$$

$$D_p(t) = S_{z2}(t) \tan(\theta(t) + \gamma) \quad (3.4)$$

式 (3.3)，(3.4) を式 (3.2) へ代入すると， S_{z2} についての二次方程式として整理できる．

$$\tan(\theta(t) + \gamma) \cdot \sqrt{S_{z2}(t)}^2 + v_t(t) \sqrt{\frac{2}{g}} \cdot \sqrt{S_{z2}(t)} - D_m = 0 \quad (3.5)$$

この式 (3.5) から解を求め，注湯高さが S_{z2} となることを考慮すると，モード 2 での注湯高さ S_{z2} は次式のように求められる．

$$S_{z2}(t) = \frac{\left(-\sqrt{v_t(t)^2 \frac{2}{g}} + \sqrt{v_t(t)^2 \frac{2}{g} + 4D_m \tan(\theta(t))}\right)}{4 \tan^2(\theta(t) + \gamma)} \quad (3.6)$$

3.4.3 モード3: 降下限界の上面を滑る動作

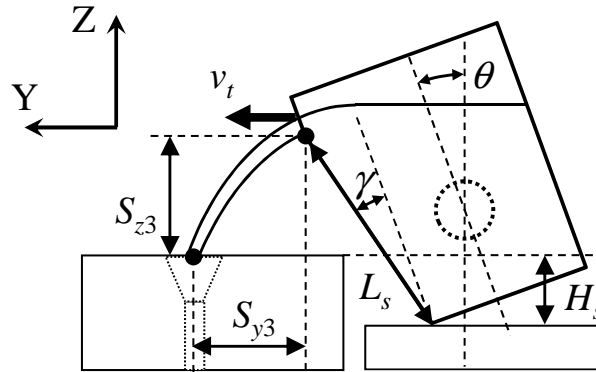


Fig. 3.6 Positional Relation on Mode 3

最後に注湯機下部に設定した降下限界上面で取鍋で滑らせる動作を考える．水平面を滑る動作となるため，基本的にはモード1と同じような動作となる．ただし，高さは鋳型上面と降下限界上面との段差 H_s の分だけ低くなり，注ぎ高さ S_{z3} は次式から求めることとなる．

$$S_{z3} = L_s \cos(\theta + \gamma) - H_s \quad (3.7)$$

3.5 動作の切り替え

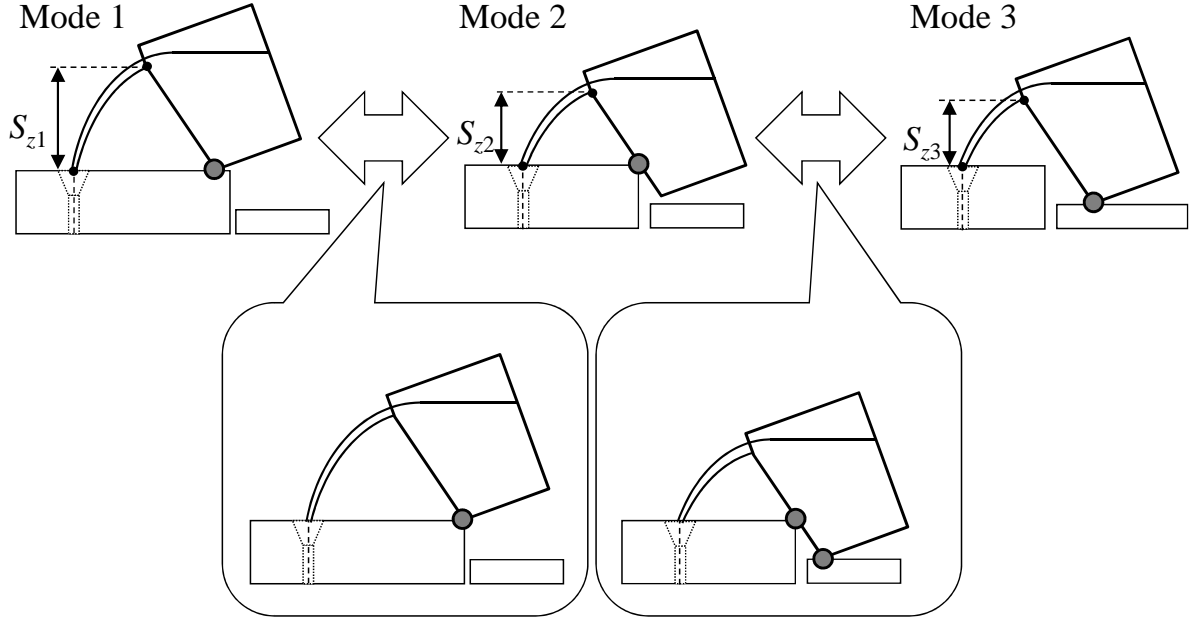


Fig. 3.7 Timing of Motion Switching

各動作モードはそれぞれの拘束条件に従い取鍋搬送動作を決定するが、目標流量や取鍋の姿勢によっては目標の動作を実現できず、高い位置からの注湯を行ってしまう場合がある．そこで、Fig. 3.7で示す取鍋の状態を境に動作モードの切り替えを行う．

切り替えのタイミングは2つある．まず、Mode1とMode2の切り替えはFig. 3.7左側に示すような取鍋の底部と鋳型の右端点が一致するときに行う．Mode2-Mode3間の切り替えは、取鍋の底部が降下限界の上面と接しており、更に取鍋の側面が鋳型の端点に接している状態で行う．

この切り替えの判断はMode2における取鍋底部の鉛直方向位置 z_{b2} により行い、実際に搬送で適用する注ぎ高さ z_f を次のように選択する．なお、 $z_{b2} < 0$ である場合は、取鍋の底部が鋳型上面よりも下側にあることを意味する．

$$S_z(t) = \begin{cases} S_{z1}(t) & (S_{z1}(t) < S_{z2}(t)) \\ S_{z2}(t) & (S_{z1}(t) \geq S_{z2}(t), S_{z2}(t) < S_{z3}(t)) \\ S_{z3}(t) & (S_{z1}(t) \geq S_{z2}(t), S_{z2}(t) \geq S_{z3}(t)) \end{cases} \quad (3.8)$$

一連の動作生成の流れを Fig. 3.8 に示す．

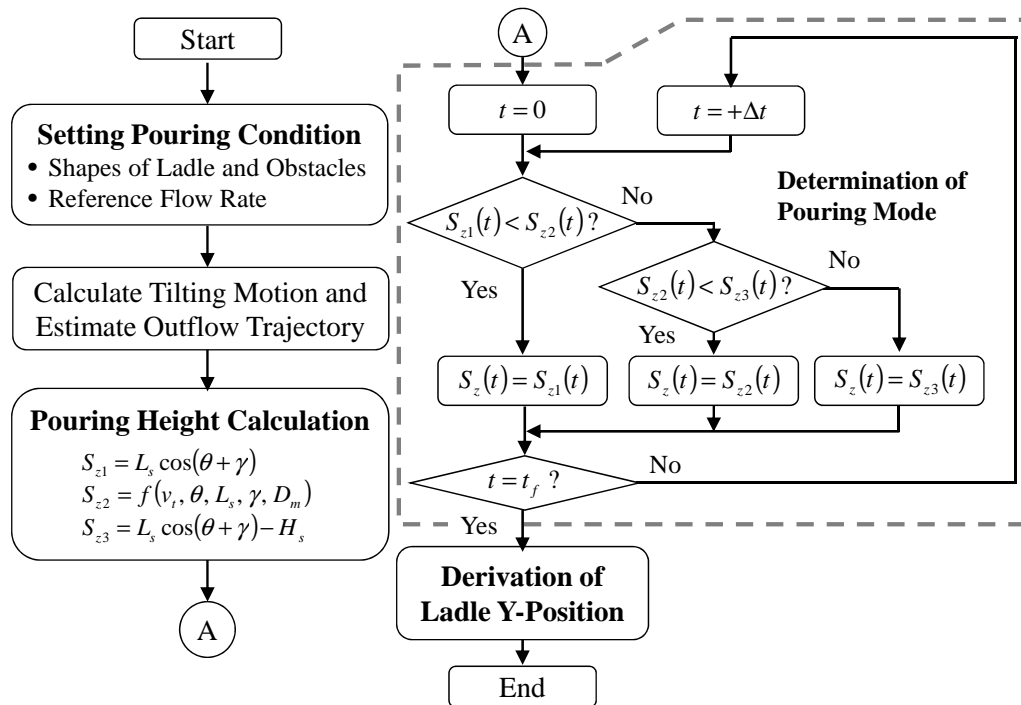


Fig. 3.8 Flow Chart of Ladle Motion Generation

3.6 制御実験による評価

3.6.1 目標流量を変化させる場合

提案した取鍋軌道生成法の有用性を示すため、自動注湯機による注湯実験を行った。本実験では、(I-1) 落下位置制御を行わない定点注湯、(I-2) 注湯高さを変えない液体落下位置制御（従来法）、(I-3) 提案する低位置注湯、の3つの場合について検証を行った。実験では取鍋の初期姿勢を $\theta(0) = 20 \text{ deg}$ とし、注湯開始前の注湯高さを注湯目標位置に対して 0.238 m とした。これは前章で提案した式 (3.1)-(3.8) より、取鍋の初期姿勢・初期条件から求まる注湯高さである。また、注湯流量が $q = 0$ のとき、推定液体落下位置は $S_y = 0$ であるため、注湯開始前の出湯口先端の水平位置を注湯目標位置の真上とした。障害物の形状パラメータは、 $D_m = 0.2 \text{ m}$ 、 $H_s = 0.05 \text{ m}$ とした。目標注湯流量については、 $5.0 \text{ s} \sim 7.0 \text{ s}$ 間で定常流量 $3 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 、 $9 \text{ s} \sim 11 \text{ s}$ 間で定常流量 $4.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ とした。シミュレーションと注湯実験の結果を、Figs. 3.9-3.16 に描画する。Fig. 3.9 は目標注湯流量である。Fig. 3.10 は傾動用サーボモータに印加される電圧、Fig. 3.11 は取鍋の傾動角度である。Figs. 3.12, 3.13 はそれぞれ Y, Z 軸上の出湯口位置である。(f) はロードセルで計測された流出液体重量である。Fig. 3.15 はカメラシステムによって計測した全体座標系における液体落下位置 S_{y0} であり、 $S_{y0} = 0 \text{ m}$ が目標落下位置である。最後に Fig. 3.16 は提案法 (I-3) について動作切り替えの推移を示したものである。各グラフ上で示す記号は黒の丸印が (I-1)、灰色の十字印が (I-2)、薄灰色の星印が (I-3) の結果を表している。Fig. 3.11 では、シミュレーション結果と実験結果がよく一致しており、傾動角度・傾動角速度を目標通り制御できたことがわかる。Fig. 3.14 についてもシミュレーション結果と実験結果が概ね一致している。ただし (I-3) では、注湯開始直後に計測重量に大きな変動が生じており、これは注湯動作モード切り替えに起因する慣性力の影響だと考えられる。この問題は上下動による慣性力を推定し補償すること、もしくは滑らかな動作切り替えを行うことで解決が見込める。Fig. 3.15、液体落下位置の計測結果については、(I-2)、(I-3) の場合に $5 \text{ s} \sim 11 \text{ s}$ の範囲では注湯流量の変化があっても $\pm 0.01 \text{ m}$ の精度を達成した。このことから液体落下位置制御について、提案法が従来法と同等の制御性能を有することが示された。次に注湯中の取鍋と障害物の位置関係を Figs. 3.17, 3.18, 3.19 に示す。これらはそれぞれ、(I-1), (I-2), (I-3) の結果に対応する。各図の黒の点線は出湯口先端と取鍋傾動モータ軸の軌跡を示している。取鍋外形の軌跡は、計測された Y, Z 軸の位置や取鍋の傾動角度に基づき描画した。ここでは注湯開始時・終了時と目標流量が一定となるタイミングを選び、 0 s 、 8 s 、 10 s 、 16 s の時の取鍋外形とその位置を描画した。Figs. 3.17, 3.18 より、(I-1), (I-2) の場合には出湯口の高さを一定に保つように取鍋を動作させるため、注湯が進むに従って取鍋下側の障害物との間隔が広がっていく。対して Fig. 3.19, 提案法 (I-3) では、取鍋が常に障害物の境界面に沿う動作となっている。取鍋の領域が障害物の領域へ入り込んでいないため、取鍋の障害物との衝突は発生していないと言える。

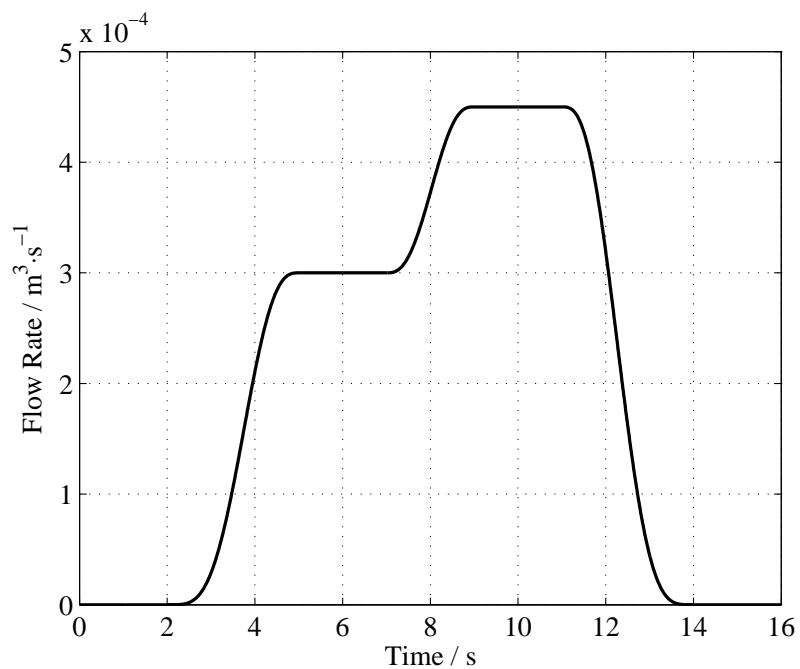
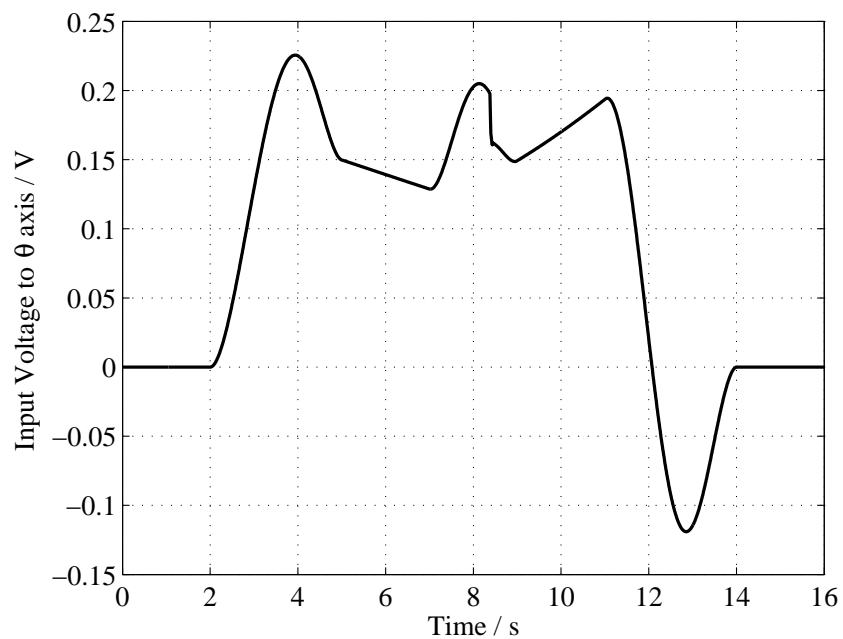


Fig. 3.9 Reference Flow Rate (Trapezoidal Ladle, One Batch)

Fig. 3.10 Input Voltage to Motor on Θ -axis (Trapezoidal Ladle, One Batch)

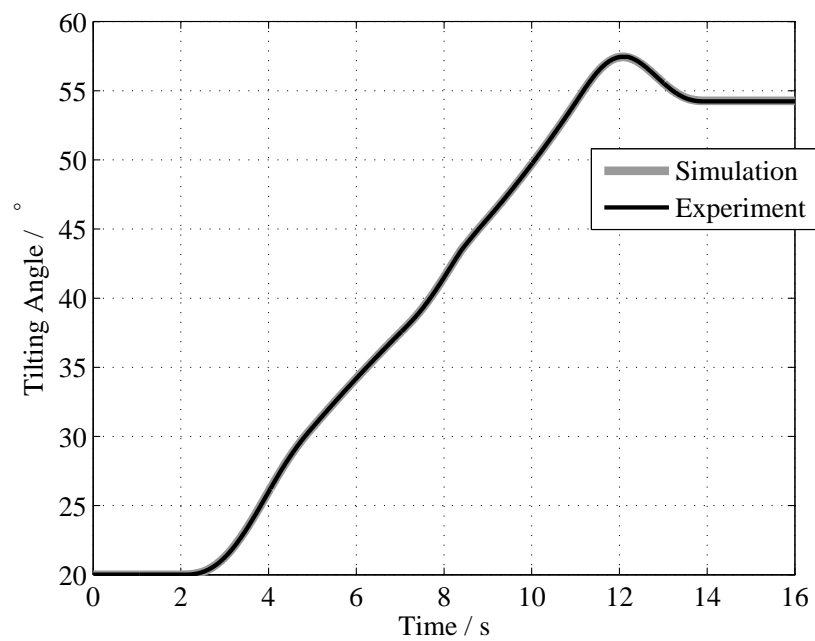


Fig. 3.11 Tilting Angle of Ladle (Trapezoidal Ladle, One Batch)

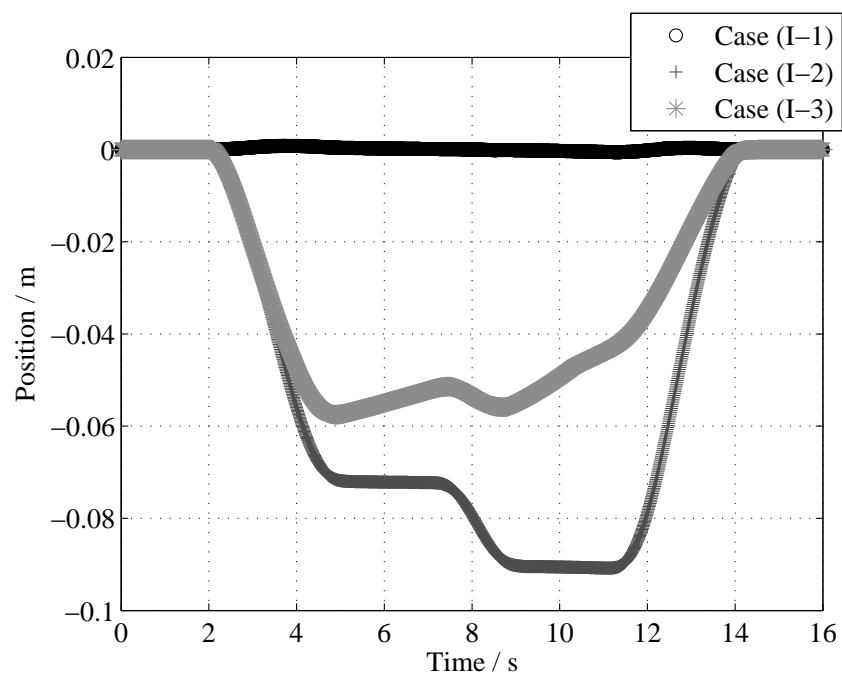


Fig. 3.12 Pouring Mouth Position on Y-axis (Trapezoidal Ladle, One Batch)

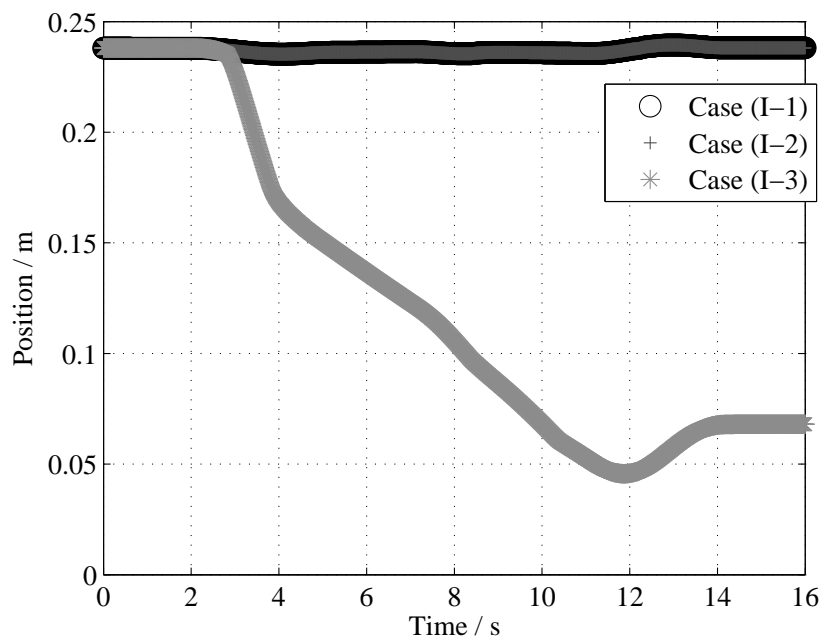


Fig. 3.13 Pouring Mouth Position on Z-axis (Trapezoidal Ladle, One Batch)

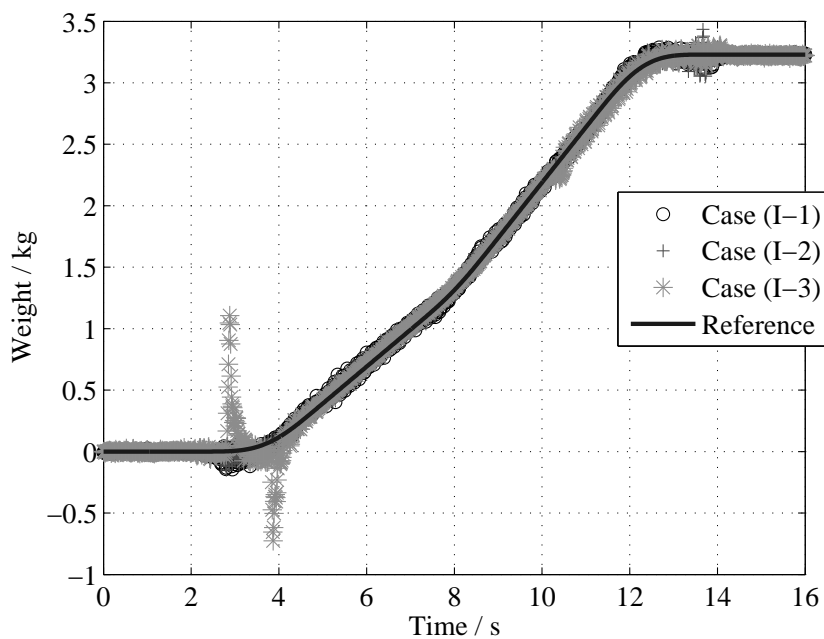


Fig. 3.14 Weight of Outflow Liquid (Trapezoidal Ladle, One Batch)

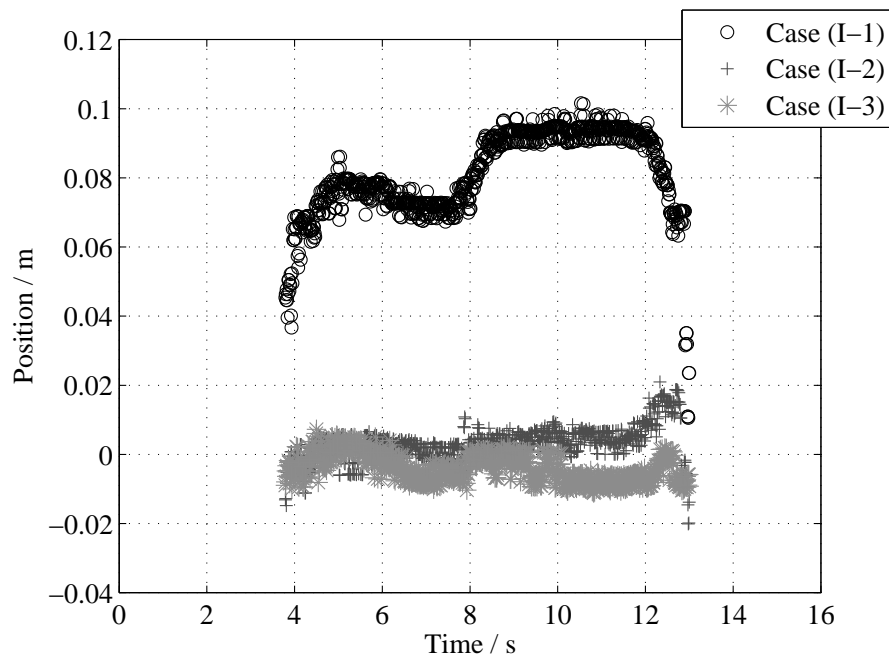


Fig. 3.15 Falling Position of Outflow Liquid (Trapezoidal Ladle, One Batch)

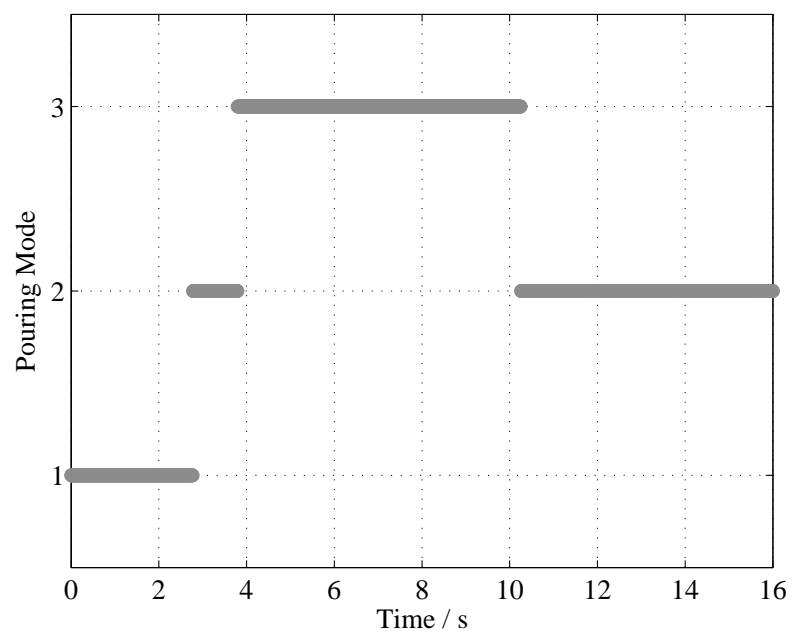


Fig. 3.16 Pouring Mode Transition (Case I-3) (Trapezoidal Ladle, One Batch)

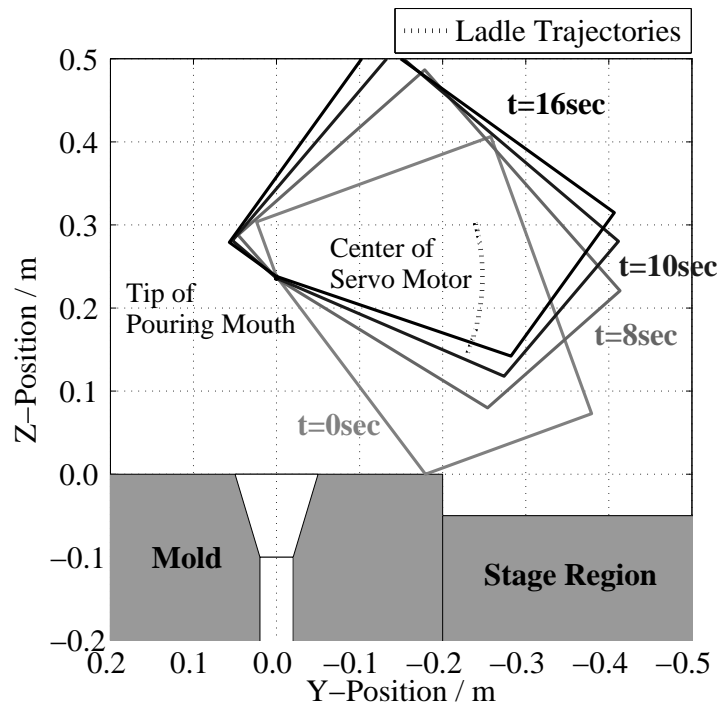


Fig. 3.17 Ladle Motion in Case (I-1) (Trapezoidal Ladle, One Batch)

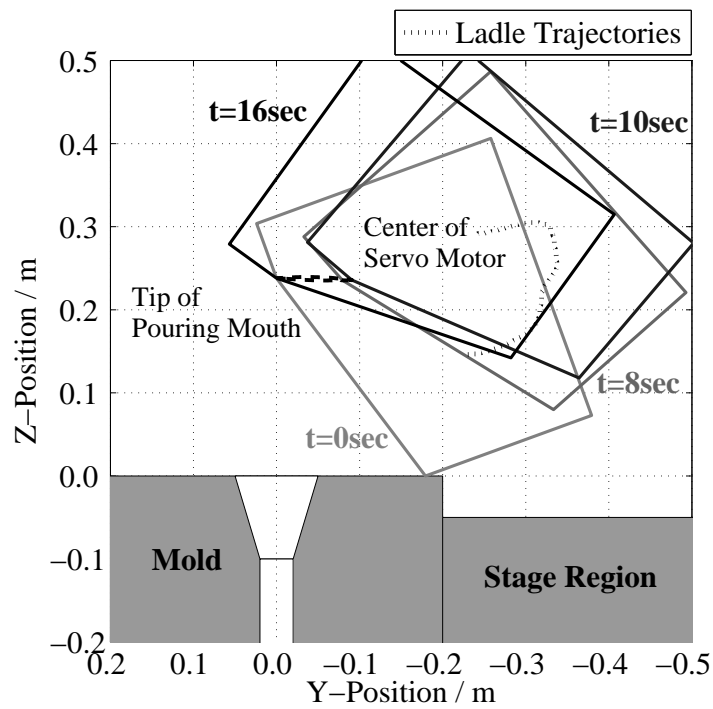


Fig. 3.18 Ladle Motion in Case (I-2) (Trapezoidal Ladle, One Batch)

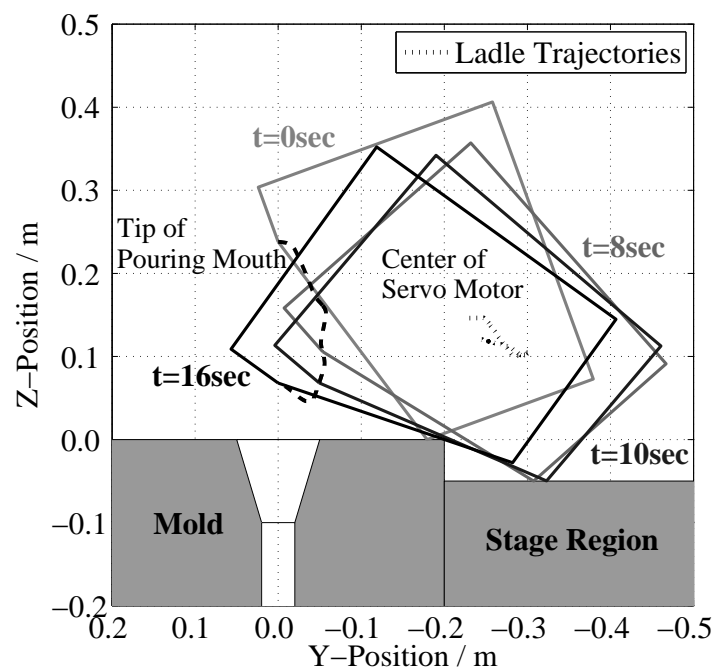


Fig. 3.19 Ladle Motion in Case (I-3) (Trapezoidal Ladle, One Batch)

3.6.2 注湯を複数回行う場合

複数バッチの注湯を想定した実験について示す．この実験では，(II-1) 注湯高さ一定の液体落下位置制御による動作（従来法），(II-2) 低位置注湯動作（提案法）の2つについて3回連続の注湯を行い比較した．

実験条件は，障害物について $D_m = 0.2\text{m}$ ， $H_s = 0.05\text{m}$ と定め，取鍋の初期姿勢を $\theta(0) = 15\text{deg}$ とした．目標注湯流量は Fig. 3.20 のように同じ目標注湯流量を3回連続で与えており，1バッチ目の目標流量が3sから13sまで，2バッチ目が15sから25sまで，3バッチ目が27sから37sまでの区間で与えられている．各バッチで与える目標注湯流量には，3sの立上り・立下り部と2sの平坦部を与え，平坦部の目標流量は $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ とした．なお，湯切り動作による液面振動の影響を排するため，注湯前後の前傾動作・後傾動作は取鍋動作に含めていない．初期取鍋高さについては，1バッチ目では，前節と同様に，注湯流量 $q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ かつ取鍋初期姿勢 $\theta(0)$ の条件で提案法により最低高さを求め，(II-1)，(II-2) それぞれに設定した．本稿の場合，初期の注湯高さは $S_z(0) = 0.253\text{m}$ である．2バッチ目以降の注湯開始高さは前バッチ終了後の位置とし，その取鍋位置・姿勢は注湯を始められる状態である．

実験結果の比較を示す．Fig. 3.21 はロードセルによる流出重量推移，Figs. 3.22, 3.23 はそれぞれ Y, Z 軸上の出湯口位置，Fig. 3.24 は液体落下位置制御の計測結果，3.25 は提案法 (II-2) における注湯モードの遷移を示している．各グラフで示す記号は黒の丸印が (II-1)，薄灰色の十字印が (II-2) の結果を表している．Fig. 3.24 より，各バッチそれぞれで同程度の精度で落下位置制御が実現されていることがわかる．加えて目標流量が一定となるタイミングでは， $\pm 0.015\text{m}$ の範囲に誤差が収まっている．

Figs. 3.26, 3.27 に (II-1), (II-2) での各バッチごとの取鍋動作と障害物との位置関係を示す．注湯高さは Fig. 3.26 に示すように，従来法 (II-1) では開始時の注湯高さを保持しているため，プロセスが進むほどに取鍋-障害物間の間隔が大きくなる．取鍋-障害物間の間隔はバッチ間に取鍋位置の修正動作を含めることである程度小さくできるが，新たな動作を入れる分，サイクルタイムは大きくなる．一方，Fig. 3.27 より，提案法 (II-2) ではプロセスが進捗しても低い取鍋位置で注湯が行われ，さらにどのバッチでも障害物との衝突がない取鍋動作が実施された．

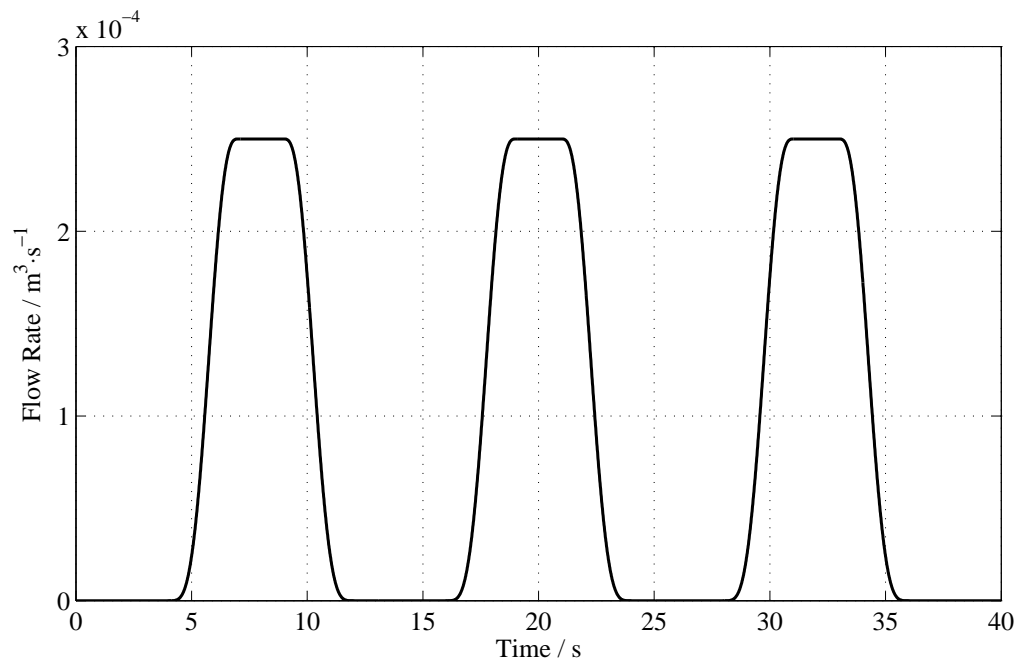


Fig. 3.20 Reference Flow Rate (Trapezoidal Ladle, Multi Batch)

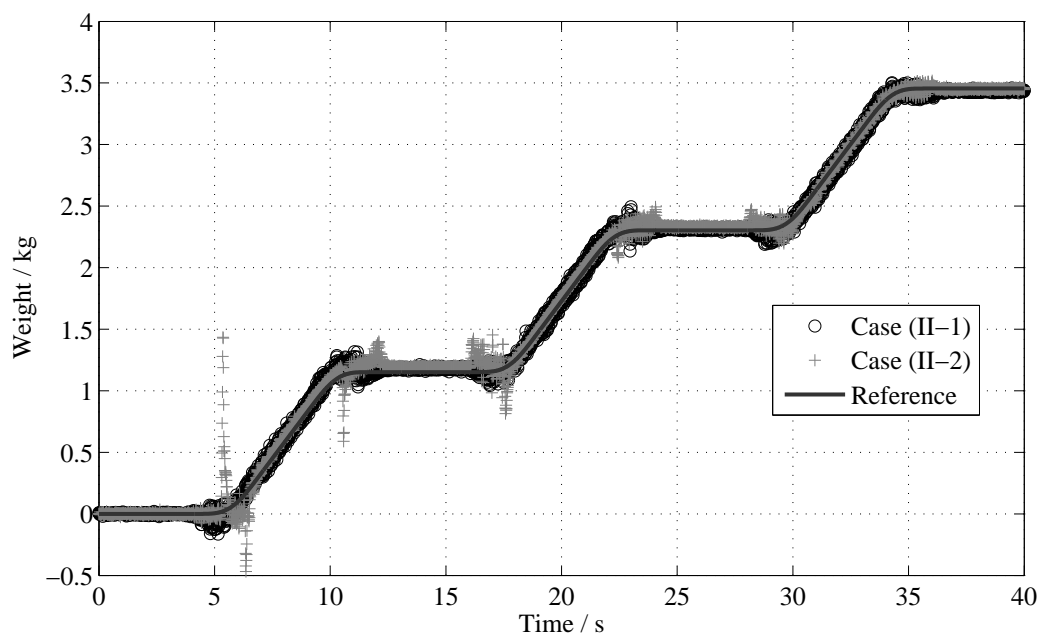


Fig. 3.21 Weight of Outflow Liquid (Trapezoidal Ladle, Multi Batch)

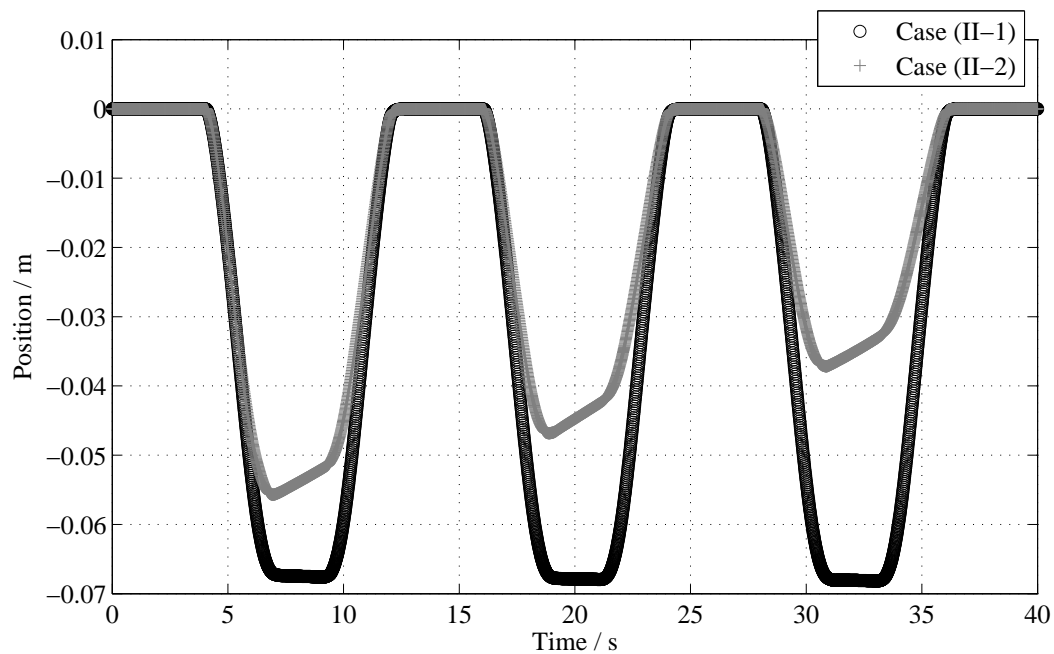


Fig. 3.22 Pouring Mouth Position on Y-axis (Trapezoidal Ladle, Multi Batch)

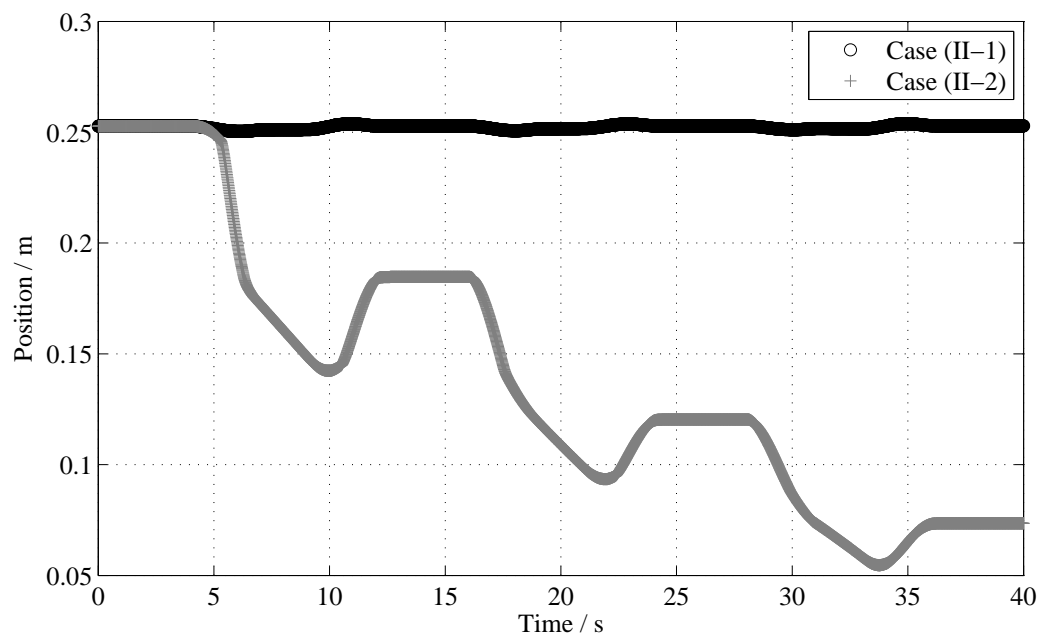


Fig. 3.23 Pouring Mouth Position on Z-axis (Trapezoidal Ladle, Multi Batch)

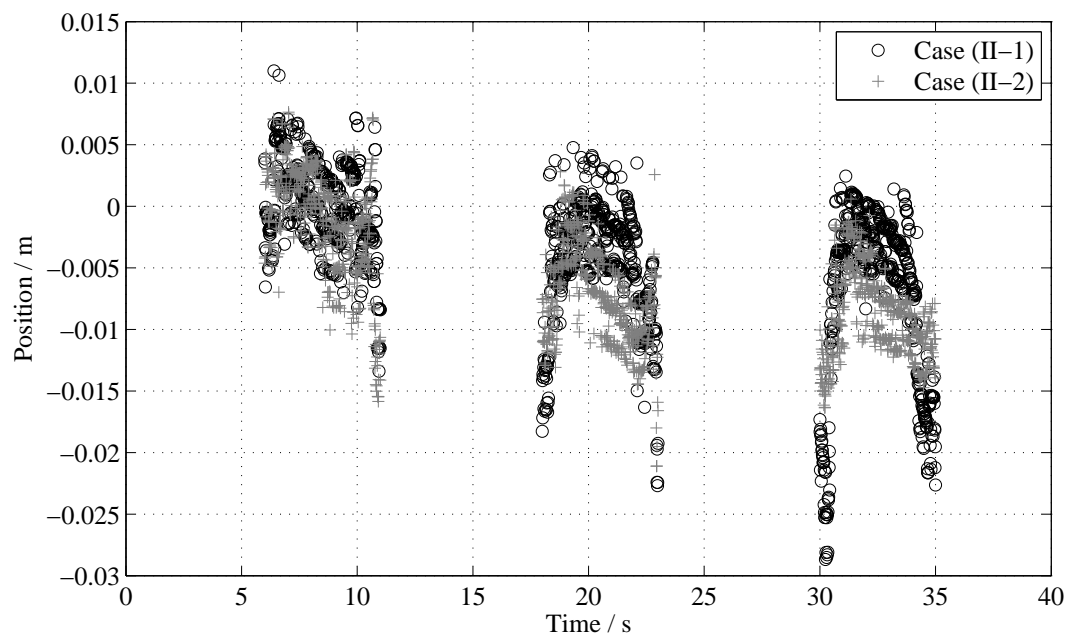


Fig. 3.24 Falling Position of Outflow Liquid (Trapezoidal Ladle, Multi Batch)

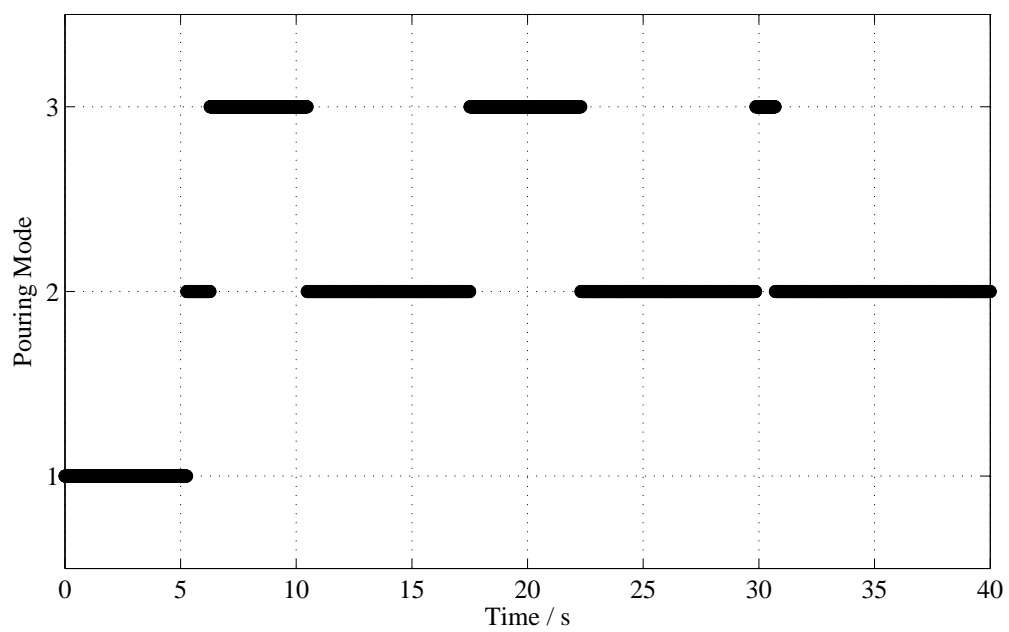
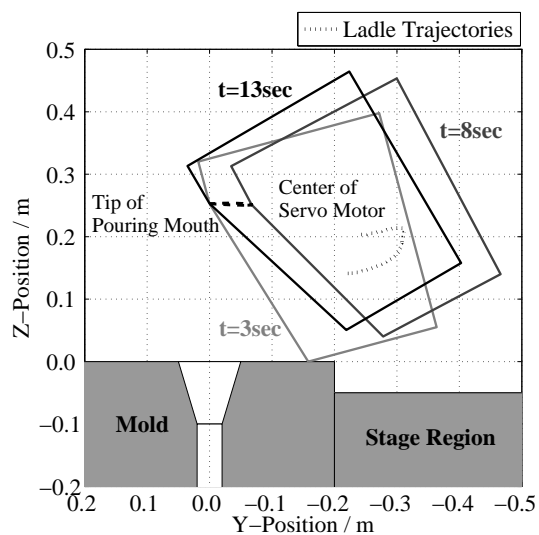
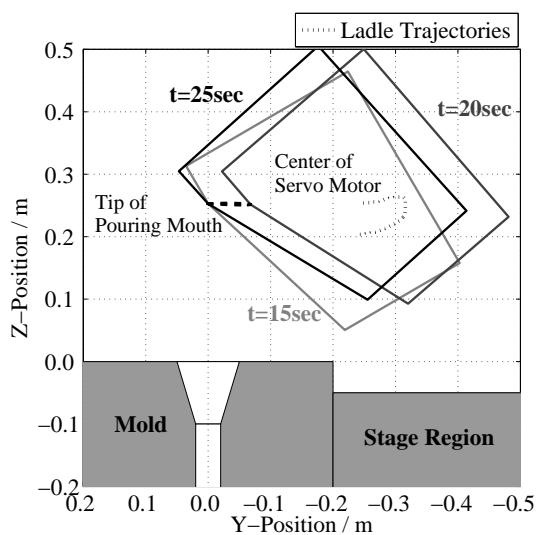


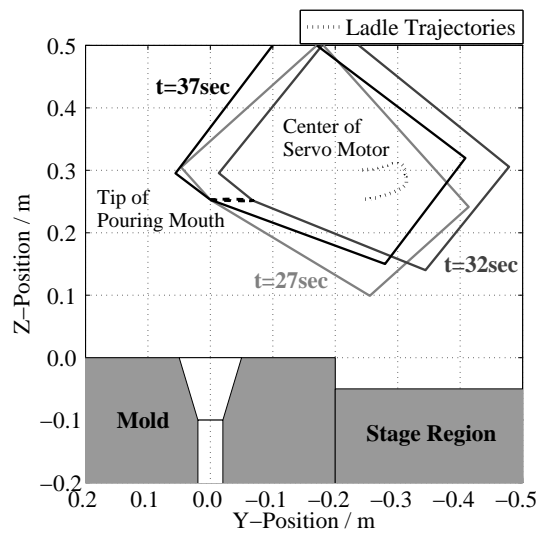
Fig. 3.25 Pouring Mode Transition (Case II-2) (Trapezoidal Ladle, Multi Batch)



(a) 1st Batch

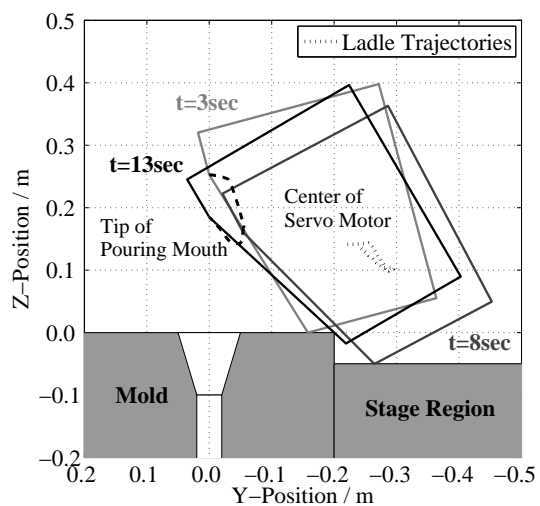


(b) 2nd Batch

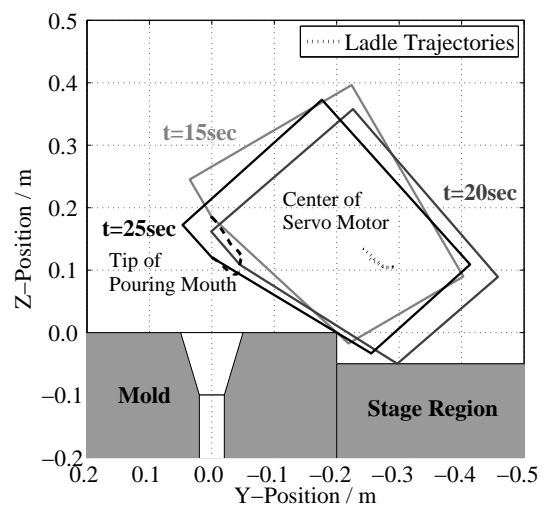


(c) 3rd Batch

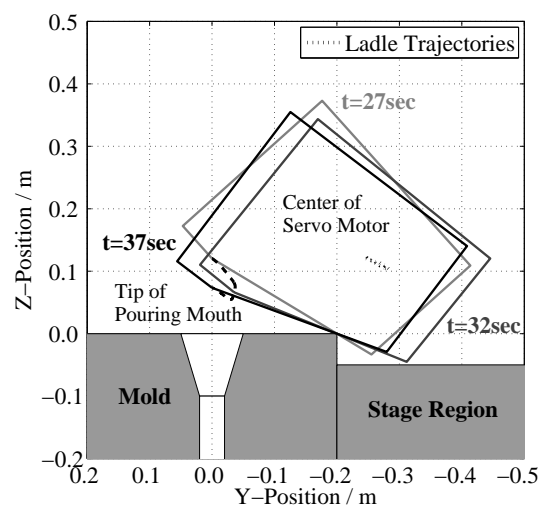
Fig. 3.26 Ladle Trajectories of Conventional Approach (Multi Batch)



(a) 1st Batch



(b) 2nd Batch



(c) 3rd Batch

Fig. 3.27 Ladle Trajectories of Proposed Approach (Multi Batch)

3.7 ノズルあり取鍋への適用

流出後の落下液体の軌跡が異なる，ノズルあり取鍋についても低位置注湯動作の解析式を導出する．

3.7.1 取鍋・障害物の位置関係，外形形状の修正

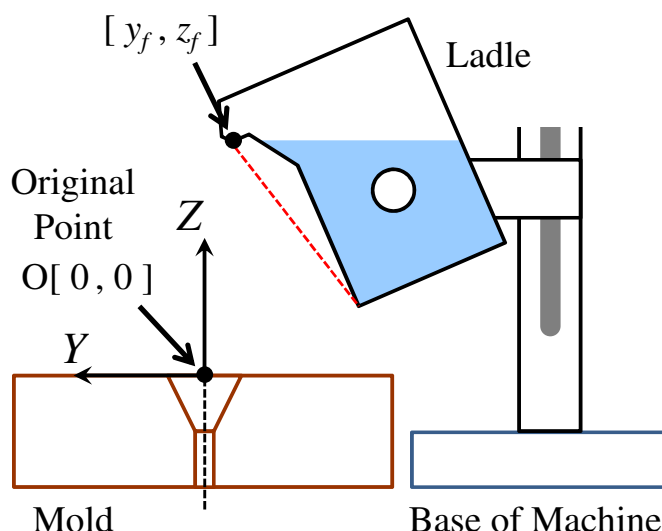


Fig. 3.28 Positional Relation of Pouring System (with ladle nozzle)

ノズルあり取鍋と鋳型の位置関係を Fig. 3.28 に示す．液体の目標落下位置および座標原点は鋳型湯口の中心位置として定義する．実用形状の取鍋の側面形状が台形に近いこと，多角形状における境界線の定義が難しいことから，取鍋先端と下端を結び仮の外形とした．これにより，台形状取鍋の場合と同様に取鍋-障害物間の境界線を定義できるようにした．

3.7.2 ノズルありの場合の動作生成（モード2）

ノズルありを使う場合の取鍋動作について，モード1，3については台形取鍋と同様に取鍋姿勢と外形形状から動作を導けるが，モード2は液体落下軌跡も含めた動作生成であるため，計算方法を修正する必要がある．解析解として導く場合、次のように行う．

Fig. 3.29 において， D_m は鋳型端点から湯口中心までの距離， D_p は出湯口を鋳型上面に投影した点と鋳型端点までの距離， S_{y2} は液体落下距離である．ここで，各距離について常に次が成り立つ．

$$D_m = S_{y2} + D_p \quad (3.9)$$

なお， S_{y2} ， D_p は次式で表される．

$$S_{y2} = v_h \cdot T_{fg} = \sqrt{v_t^2 + 2L_g g \sin \phi} \cdot \cos \phi \cdot \frac{-v_n \sin \phi + \sqrt{(v_n \sin \phi)^2 + 2S_{z2}g}}{g} \quad (3.10)$$

$$D_p = S_{z2} \tan (\theta + \gamma) \quad (3.11)$$

S_{y2} , D_p はどちらも注湯高さ S_{z2} の関数である．式 (3.9) へ S_{y2} , D_p を代入すると,

$$D_m = v_n \cos \phi \left(\frac{-v_n \sin \phi}{g} + \frac{\sqrt{(v_n \sin \phi)^2 + 2S_{z2}g}}{g} \right) + S_{z2} \tan (\theta + \gamma) \quad (3.12)$$

これを整理すると,

$$D_m - \frac{-v_n^2 \cos \phi \sin \phi}{g} - \tan (\theta + \gamma) \cdot S_{z2} = v_n \cos \phi \cdot \frac{\sqrt{(v_n \sin \phi)^2 + 2S_{z2}g}}{g} \quad (3.13)$$

$$\left(D_m - \frac{-v_n^2 \cos \phi \sin \phi}{g} - \tan (\theta + \gamma) \cdot S_{z2} \right)^2 = \frac{v_n^2 \cos^2 \phi}{g^2} \cdot \{ (v_n \sin \phi)^2 + 2S_{z2}g \} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} & \left(D_m - \frac{-v_n^2 \cos \phi \sin \phi}{g} \right)^2 + 2 \left(D_m - \frac{-v_n^2 \cos \phi \sin \phi}{g} \right) \tan (\theta + \gamma) \cdot S_{z2} \\ & + \tan^2 (\theta + \gamma) \cdot S_{z2}^2 = \frac{v_n^2 \cos^2 \phi}{g^2} \cdot \{ (v_n \sin \phi)^2 + 2S_{z2}g \} \end{aligned} \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} & \tan^2(\theta + \gamma) \cdot S_{z2}^2 + \left\{ 2 \left(D_m - \frac{-v_n^2 \cos \phi \sin \phi}{g} \right) \tan(\theta + \gamma) - \frac{2v_n^2 \cos^2 \phi}{g} \right\} \cdot S_{z2} \\ & + \left(D_m - \frac{-v_n^2 \cos \phi \sin \phi}{g} \right)^2 + \left(\frac{v_n^2 \cos \phi \sin \phi}{g^2} \right)^2 = 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

式(3.16)は S_{z2} についての二次方程式である．このため，解 S_{z2} は二次方程式の解の公式より，次式で求められる．

$$S_{z2} = \frac{-A_1 \pm \sqrt{A_1^2 - 4A_2A_0}}{2A_2} \quad (3.17)$$

$$\text{where} \quad A_2 = \tan^2(\theta + \gamma) \quad (3.18)$$

$$A_1 = 2 \left(D_m - \frac{-v_n^2 \cos \phi \sin \phi}{g} \right) \tan(\theta + \gamma) - \frac{2v_n^2 \cos^2 \phi}{g} \quad (3.19)$$

$$A_0 = \left(D_m - \frac{-v_n^2 \cos \phi \sin \phi}{g} \right)^2 + \left(\frac{v_n^2 \cos \phi \sin \phi}{g^2} \right)^2 \quad (3.20)$$

なお，取鍋にノズルのない場合には $L_g = 0$ ， $\phi = 0$ となるため，解 S_{z2} の係数 A_2 ， A_1 ， A_0 はそれぞれ次のようになり，3.4.2節で求めた式と一致する．

$$A_2 = \tan^2(\theta + \gamma) \quad (3.21)$$

$$A_1 = 2D_m \tan(\theta + \gamma) \quad (3.22)$$

$$A_0 = D_m^2 \quad (3.23)$$

3.8 数値解による低位置注湯動作の検証

前節までは注ぎ高さが最も低くなるような取鍋動作考案し，その方法を解析的に導いた．しかしながら，導出された解析解が最も低位置となるような取鍋動作であるかを証明する必要がある．そこで，解析解の場合と同じ境界条件において，最適化手法を用いて取鍋動作を生成することを行い，その動作を解析解のものと比較することで，提案手法の妥当性を明らかにする．

3.8.1 評価関数とペナルティ項目の定義

低位置注湯動作を目的として導出した解析解は，注湯高さが各サンプル時間で考えうる限りもっとも低くなり，なおかつ障害物との衝突を回避するものであった．そのことを考慮し，以下のような評価関数を設定する．

$$\min_{S_z} J(t) = S_z(t)^2 + J_p \quad (3.24)$$

第1項は注湯高さの二乗，第2項はペナルティ項である．評価関数は各サンプル時間ごとにもなっており，1点1点の注湯高さを決定していく．

ペナルティ項において考慮する動作の設計要件とは，取鍋・障害物の衝突の有無であり，衝突する場合には 10^8 のペナルティを課すことになる．次節において衝突の判定方法を示す．

3.8.2 取鍋・鋳型の衝突判定

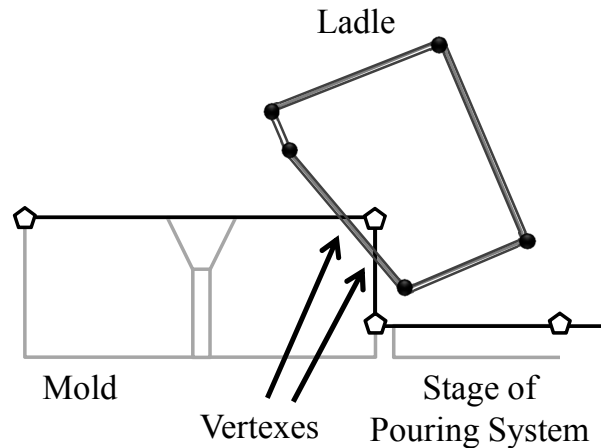


Fig. 3.30 Collision Calculation Approach

取鍋と障害物の衝突の有無を判定するにあたり，まず Fig. 3.30 で示すように，取鍋と鋳型の形状から角の部分，もしくは形状の特徴を表す部分に点を割り当て，隣接する点との間に直線を引く．鋳型側，障害物側の直線を比較して，交点の有無を確かめることによって取鍋が衝突しているかどうか判断する．互いの線の比較の際には線ごとで偏角 ϕ_1, ϕ_2 を計算しておく，これらの偏角の値に応じて交点の有無を次のように判定する．

$\phi_1 \neq \phi_2$ の場合

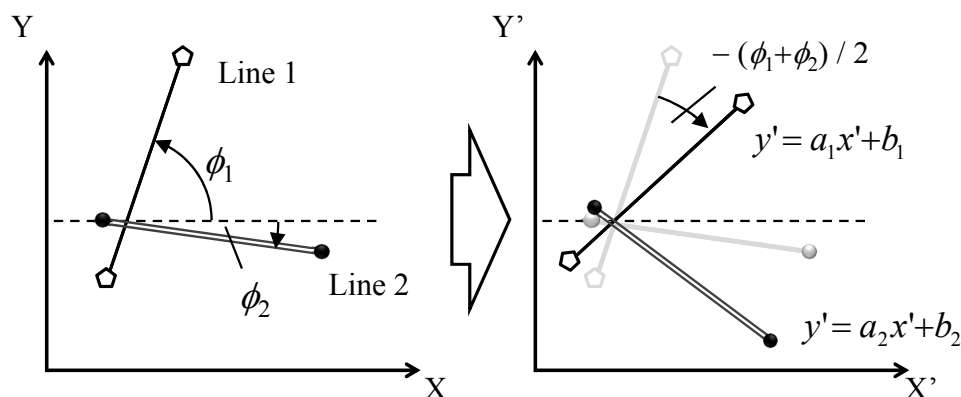


Fig. 3.31 Vertex Calculation ($\phi_1 \neq \phi_2$)

この場合には直線の1次方程式を用いて交点の計算とその位置の確認を行う。1次方程式を用いて計算する際、直線の偏角が0 degや90 degとなっている場合、直線の傾きが0もしくは ∞ となってしまう。このことを防ぐため、Fig. 3.31で示すように、交点の計算前にあらかじめ $-(\phi_1 + \phi_2)/2$ だけ座標系を回転させておく。

次に計算して得た交点の位置がそれぞれの直線上に存在するかどうかを確認する。平行でない2つの直線について連立方程式を解けば $X'Y'$ 平面上のどこかに交点は存在する。ただし、その交点が直線の存在している範囲内になれば線分が実際に交わっているとはみなせない。

以上の計算プロセスを経て線分上に交点が認められた場合、衝突しているものと見なす。

$\phi_1 = \phi_2$ の場合

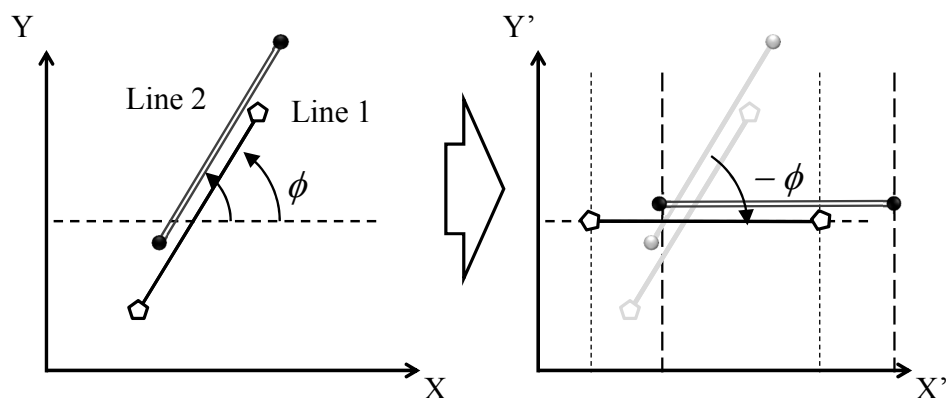


Fig. 3.32 Vertex Calculation ($\phi_1 = \phi_2$)

偏角が同じとき、2つの直線は平行となる。この場合前述のように交点から衝突の有無を判断することはできないが、2直線が重なる場合には取鍋が衝突していると判断できる。2直線が

重なっていることを確かめるため、まず Fig. 3.32 で示すように、 $-\phi$ だけ座標を回転させる。座標変換後の2直線について、 Y' 位置が一致しており、 X' の範囲が重なるのであれば直線が重なっているものとして考え、取鍋が衝突しているものとみなす。そのため、Fig. 3.32 右側のような場合には取鍋の衝突がないこととなる。

3.8.3 最小値の探索アルゴリズム

今回評価対象としているのは注湯高さ $S_z(t)$ のみであるため、関数の最小値を探索することに適した1次元探索アルゴリズムを選択する。本研究では、探索アルゴリズムとして黄金分割法を選択することとする^[97]。

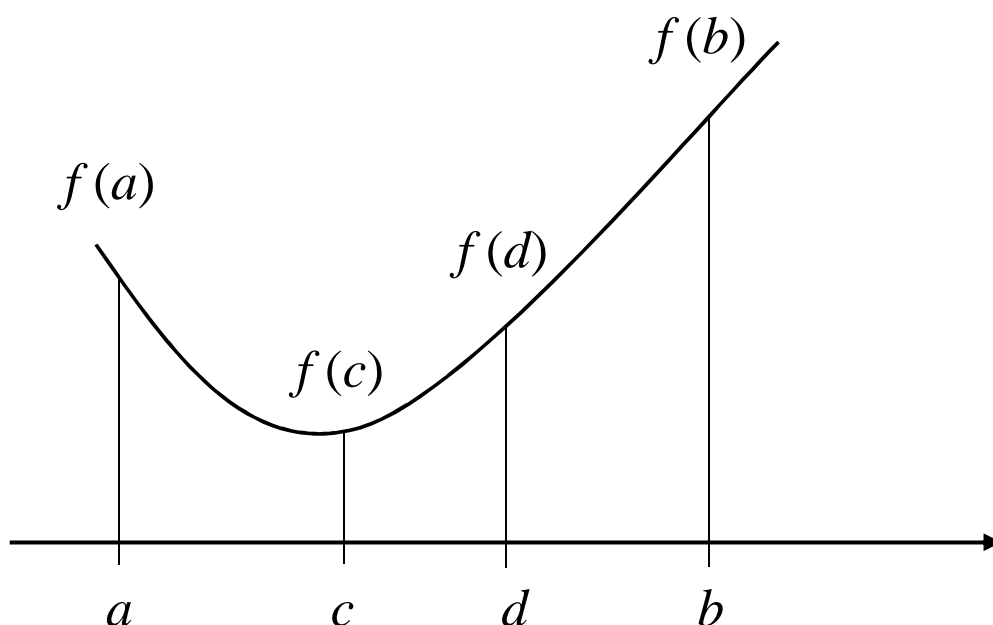


Fig. 3.33 Golden Section Method

例えば、Fig. 3.33 で示すような曲線において最小値を取るような解を導くことを考える。このとき、黄金分割法では、任意の範囲 $[a, b]$ に探索範囲を限定して、内側に新たな点 c, d を定める。

Fig. 3.34 で示すように、新たな点 c, d はある長さの比 r に基づいて定め、それ故、次のような式から導くこととなる。

$$c = r(b - a) + a \quad (3.25)$$

$$d = b - r(b - a) \quad (3.26)$$

値の評価後に, c のほうが小さければ Fig. 3.34 と同じように, $[a, c]$ を, d の方が関数値が小さければ $[d, b]$ を新たな評価範囲と位置づけ, 同じ計算を繰り返していく. この繰り返しの計算が成立するためには, 長さの比 r が繰り返し成立する適切な値であることが必要であり, 計算プロセスから導くと名前の由来でもある黄金比が r の値となる.

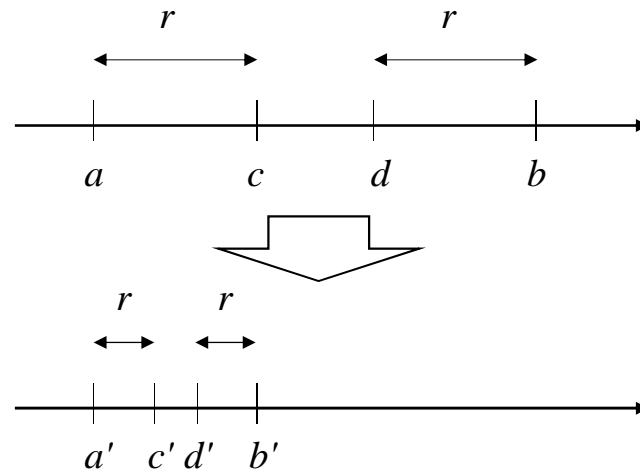


Fig. 3.34 New Point Definition in Golden Section Method

3.8.4 シミュレーションでの検証結果

前節までで提案した手法を用いて、解析解で得た低位置注湯動作を評価する。

台形状取鍋を用いるケースについて検証する。Fig. 3.35b にシミュレーション条件を、Fig. 3.35, Fig. 3.36 に取鍋動作生成の結果を示す。台形状取鍋では、従来法による軌道と提案法による軌道がよく一致している。このことから、解析解による手法を用いることで、短時間で低位置動作を得られること、得られた取鍋軌道が可能な限り低くできていることが示せた。

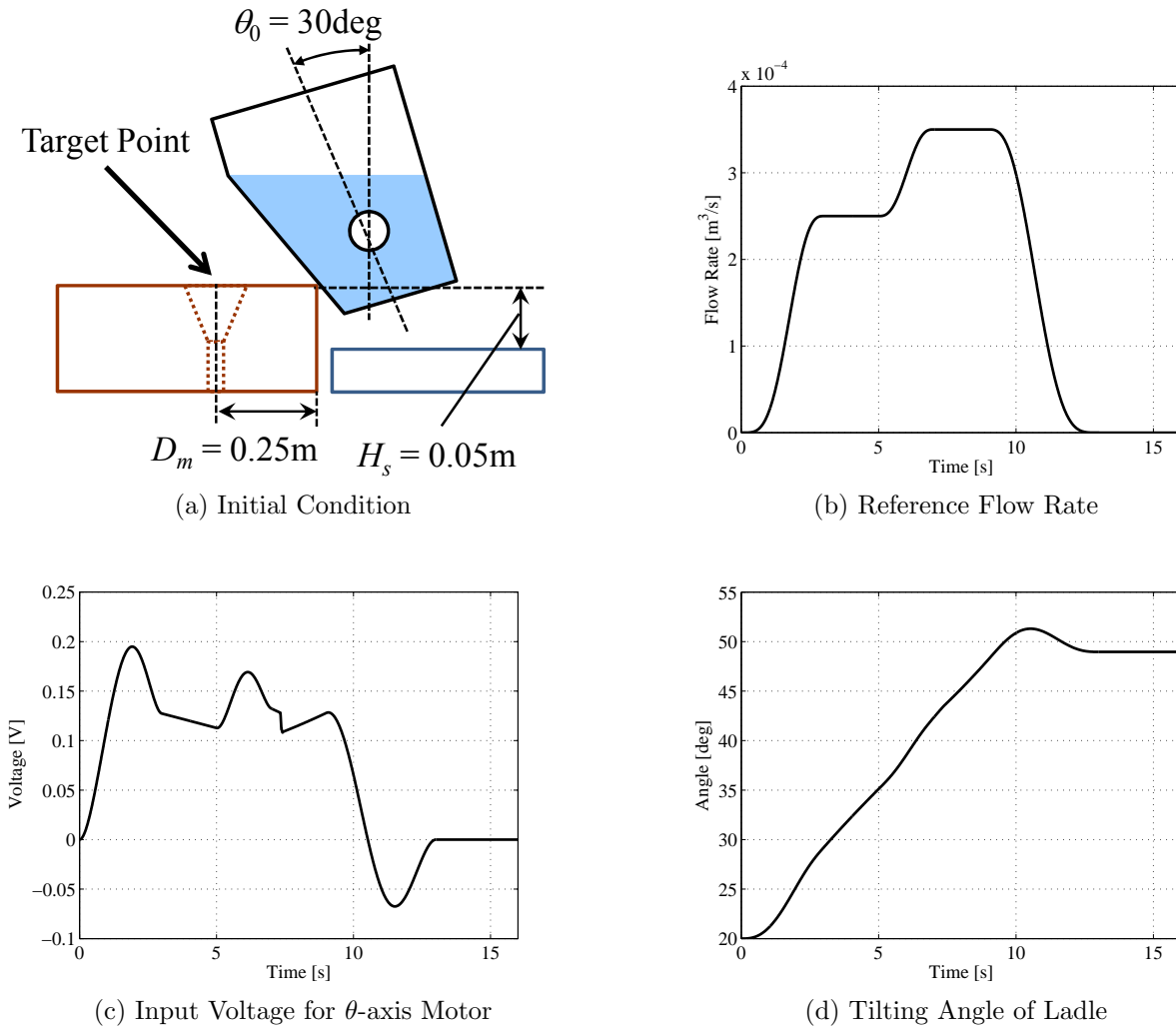


Fig. 3.35 Simulation Result using Simple Shape Ladle

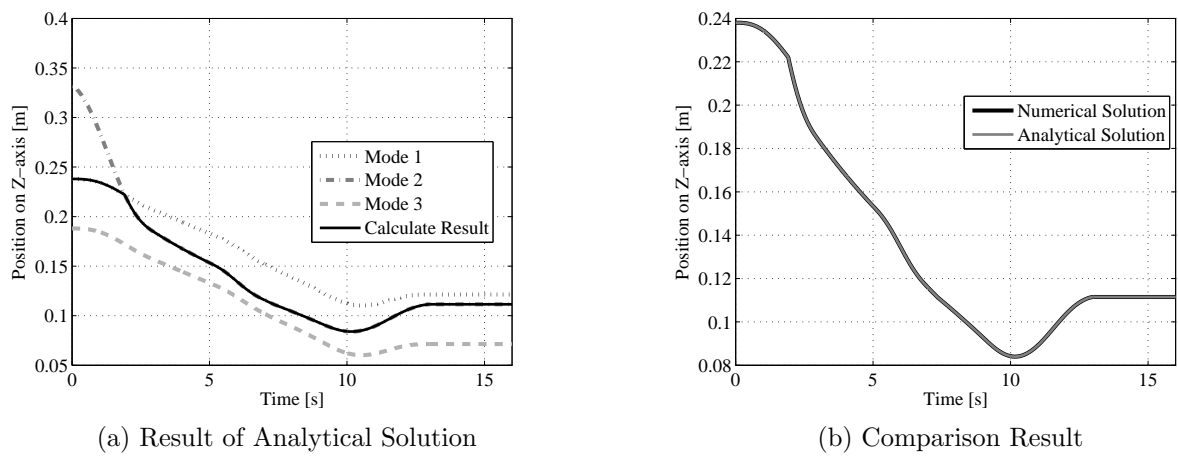


Fig. 3.36 Pouring Mouth Position on Z-axis

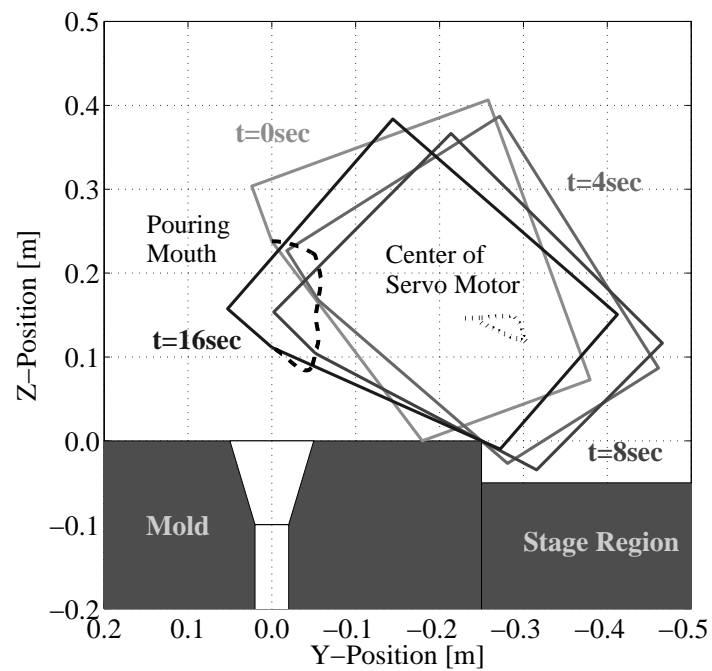


Fig. 3.37 Simulation Result of Optimization for Pouring Height (Rectangle-Shaped Ladle)

3.9 初期位置を考慮した取鍋動作の生成

ここまでに説明した注湯動作生成法は、前述の通り、常に取鍋が鋳型と接することを前提としているため、取鍋が鋳型から離れた位置から注湯プロセスを開始することができない。本章では、取鍋が障害物から離れた状態から注湯を開始することを想定し、取鍋が障害物と接するまでの下降動作を設計する。

3.9.1 取鍋下降動作（モード0）の設計手順

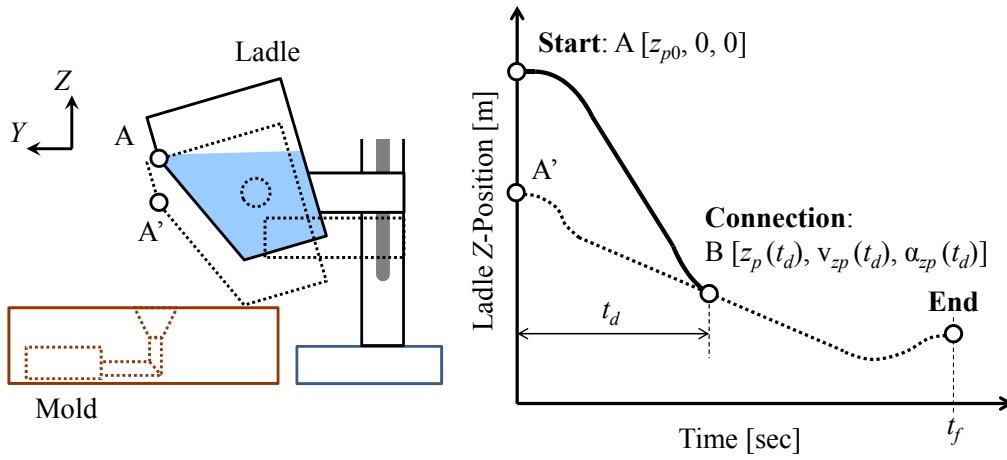


Fig. 3.38 Motion Connection

注ぎ高さ S_z を時間多項式によって設計し下降動作を生成する。なお、液体落下位置の推定式より、水平方向の液体落下距離 S_y が鉛直位置 S_z から従属的に求まるものとする。

$$S_z(t) = a_5 t^5 + a_4 t^4 + a_3 t^3 + a_2 t^2 + a_1 t + a_0 \quad (3.27)$$

$$\text{where } A = [z_{p0}, 0, 0], \quad (3.28)$$

$$B = [z_p(t_f), v_{zp}(t_f), \alpha_{zp}(t_f)] \quad (3.29)$$

ここで a_5, \dots, a_0 は時間多項式における各項の定数係数、 t_{m0} は下降動作に要する時間であり、点 A は開始時の注湯高さ、点 B は下降動作軌道と解析解軌道の接続点に相当する。また、 $[\]$ 内の値は開始点 A と接続点 B における位置、速度、加速度である。Fig. 3.41 から明らかだが、解析解軌道は時間的に変化しているため、点 B の値は t_d によって決定される。

本研究においては極力低位置からの注湯動作を目的としており、適切な t_{m0} を決めるため注湯動作に関する評価関数 J を次のように定める。

$$\min_{t_{m0}} J = \int_0^{t_{m0}} S_{z0}(t)^2 dt + J_{p1} + J_{p2} + J_{p3} \quad (3.30)$$

ここで, t_f は注湯の終了時間, J_{p1} , J_{p2} , J_{p3} はペナルティ項である.

最適化にあたっては以下の設計要件を考慮する. 第1に生成される下降動作によって取鍋搬送加速度, 速度が一定範囲内に収まることが挙げられる. これは, 装置の性能制約を満たすと共に, 取鍋内の液面で振動や波が励起させないためである. 条件が満たされない場合には, 加速度については J_{p1} に, 速度については J_{p2} にペナルティ値 10^8 を与えることとする.

第2の条項は生成した下降動作軌道が $t = 0$ から $t = t_d$ の範囲で解析解軌道を下回らないことである. 従来研究で提案した解析解軌道は鋳型・障害物の境界面を取鍋がなぞるように移動したものであり, これよりも下に取鍋が配置されることは取鍋と鋳型の衝突が生じることを意味する. もしも下降動作軌道が下回る場合には, $J_{p3} = 10^8$ としてペナルティを与えることとする.

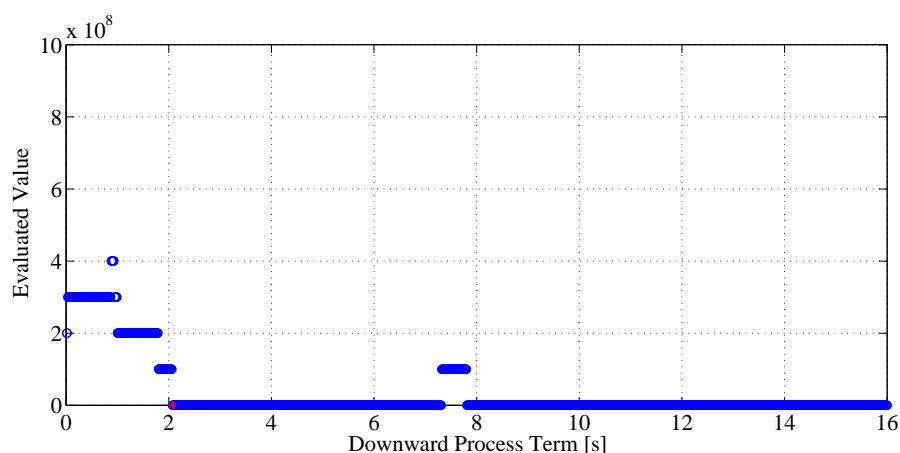


Fig. 3.39 Evaluation Function J

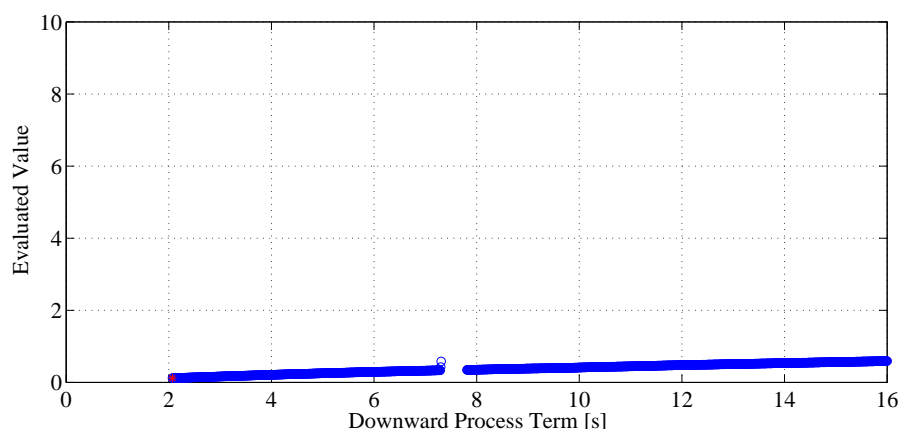


Fig. 3.40 Evaluation Function J

式 (3.30) の評価関数が対象としているのは1つの変数 t_{m0} のみであるため, グラフ上に描画しその特徴を確認することができる. 評価関数をグラフに描画すると, Fig. 3.39, 3.40 のようになる. この例では, 円筒形状取鍋を用い, 取鍋の初期傾動角度を 30 deg, 障害物形状の特徴を $D_m = 0.25$ m, $H_s = 0.05$ m, 注湯前の取鍋出湯口の高さを注湯目標位置に対して 0.3 m と

している．関数の形状がわかるよう，Fig. 3.39 では0 から 10^9 までの範囲で，Fig. 3.39 では0 から 10 までの範囲でグラフを描画している．

3.9.2 台形状取鍋を対象とした注湯実験による評価

この提案法を実験検証を行う．実験では取鍋の初期姿勢を $\theta_0 = 20$ [deg]，取鍋と鋳型の鉛直方向のクリアランスを 0.1[m] とし，目標注湯流量パターンを Fig. 3.42 で示すような2段の定常流量部を持つベル形状とした．また，取鍋上下動作の加速度上限を $0.3[\text{m/s}^2]$ ，速度上限を $0.2[\text{m/s}]$ とした．本実験では，提案した下降しながらの低位置注湯 (optimal) と，一度所定の位置まで注湯なしで下降させた後解析解軌道により低位置注湯を行うケース (analytical) を比較する．Fig. 3.41 に取鍋動作軌道を，Fig. 3.42 に液体落下位置の計測結果を示す．

取鍋動作軌道を見てみると，解析解のケースでは一旦取鍋を降ろしきった状態から注湯を始めており，下降に 0.5[sec] かかっている．対して下降しながら注湯を行うケースでは，解析解の曲線に滑らかに動作を接続できており，なおかつ Fig. 3.42 より解析解のみのケースと同じ精度で液体落下位置制御を実現できていることがわかる．

以上のことから下降動作を時間多項式で構成することによって，鋳型から離れた位置からも注湯を開始でき，鋳型との接点から開始するよりも速くプロセスを完了できることが示された．

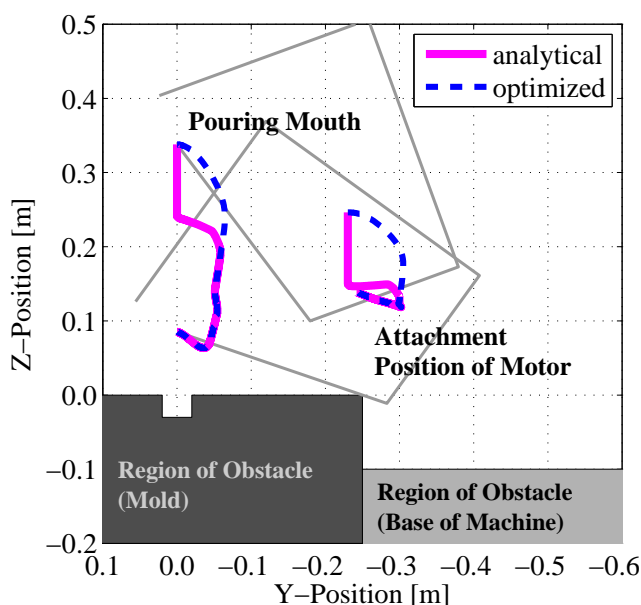


Fig. 3.41 Comparison of Ladle Trajectories

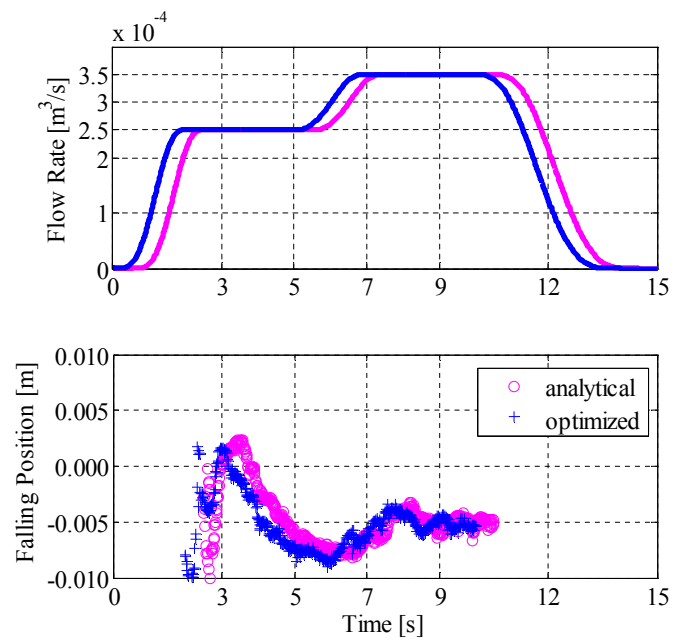


Fig. 3.42 Comparison of Liquid Falling Position

3.10 まとめ

本章ではまず、台形状取鍋を対象として、障害物を回避しつつ、注湯高さを低くする、液体落下位置制御を行うための取鍋動作軌道の生成法を提案した。取鍋と障害物の位置関係、流出液体の流線に基づき、最も注湯高さが低くなる取鍋動作の生成式を、3つの場合について導出した。3つの動作モードを注湯工程の状況に応じて適宜切り替える方法を示した。この提案法の評価のために、水を対象流体とした注湯実験を行い、提案法でも高精度を維持したまま液体落下位置制御を実現できることを確認した。

また、落下流線の特性が異なる、ノズル付きの円筒形状取鍋についても、低位置注湯動作の生成が可能であることを示した。生成した動作は、台形状取鍋の場合と同様に、注湯実験のを通じてその有用性を確認した。

そして、本章で提案する、解析的なアプローチによる取鍋動作の妥当性について、最適化手法を用いて最も取鍋高さが低くなるような数値解を求めることにより検証した。結果として、提案法で得られた解析解は数値解とよく一致しており、一意的に導いていることから計算処理も短く済み、実プロセスでも有用であることが確認できた。

最後に、解析解による理想的な取鍋軌道上から取鍋の初期位置が離れているケースについて、低位置注湯取鍋軌道へ滑らかに動作を接続するための動作生成法を二点境界値問題と最適化手法を用いて提案した。この提案法を注湯実験により検証し、初期位置が理想位置から離れている場合でも、注湯制御性能は保持しつつ、低位置注湯動作へスムーズに移行できることを示した。

第4章 堰付き取鍋に対する溶湯振動のCFD解析と制振制御

本章では，内部に堰を有する自動注湯機用の取鍋を対象として，湯切り動作時に生じる液面振動や流動挙動をCFDを用いて解析し，取鍋の回転位置や堰の位置，堰の開口部の大きさの影響を明らかにする．また，制振制御手法を用いて，液面振動抑制の方法を検討する．

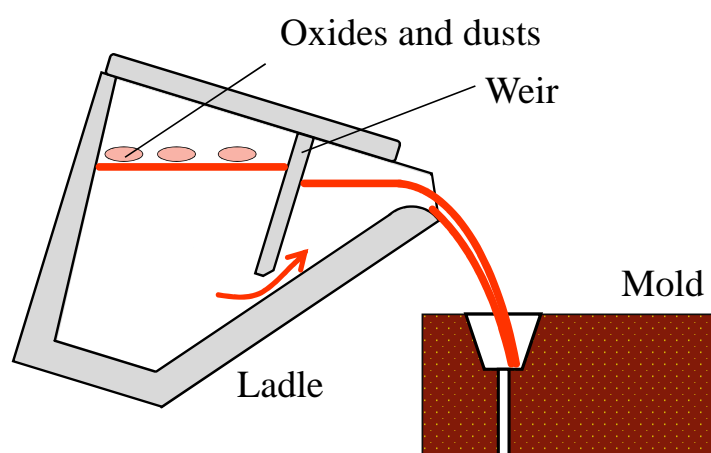


Fig. 4.1 Teapot Shape Ladle

従来行われてきた鋳造工程における制振制御は比較的簡易な形状の容器を対象としている．実際に自動注湯機で用いられる取鍋の多くは，Fig. 4.1 で示すような，内部に堰を有する形状となっている^[98]．この堰は，溶解炉から溶湯を供給した際に入った介在物や表面にできる酸化膜を鋳型内へ巻き込まないようにする役目を持っている．このような，多液面を有する液体容器について液面振動の研究を行った事例はあるが^[21]，得られている解析式は複雑であり，制御に用いるのには適さない．また，傾動式自動注湯機においては，傾動動作に前後方向，昇降方向の動作を同期させることにより，仮想回転軸を任意に設定することが可能である^[51]．後傾させる際の回転中心位置は注湯機のユーザによって異なり，これまでに回転中心の違いによる容器内の液体挙動の比較を行った例はない．加えて，堰の設置は手作業により行われる上，バッチプロセスが進むにつれて堰の開口部が介在物や酸化物が付着することで閉塞してゆくため，堰の位置・開口部の大きさの操業への影響を明らかにすることは重要である．

4.1 CFDを用いた堰あり取鍋の液体挙動解析と取鍋構造の最適化の検討

本研究で解析対象とする取鍋の内部形状を Fig. 4.2 に示す．取鍋の内部形状，寸法は実際の自動注湯機で用いられているものであり，円筒状のボディ部と細口のノズル部を有し，700kgの溶湯を保持することができる．また，自動注湯機では，溶湯の入った取鍋の重心位置付近に傾動モータが取り付けられているため，本節では Fig. 4.2 で取鍋のボディ部の中心付近を軸として傾動動作を行うこととする．

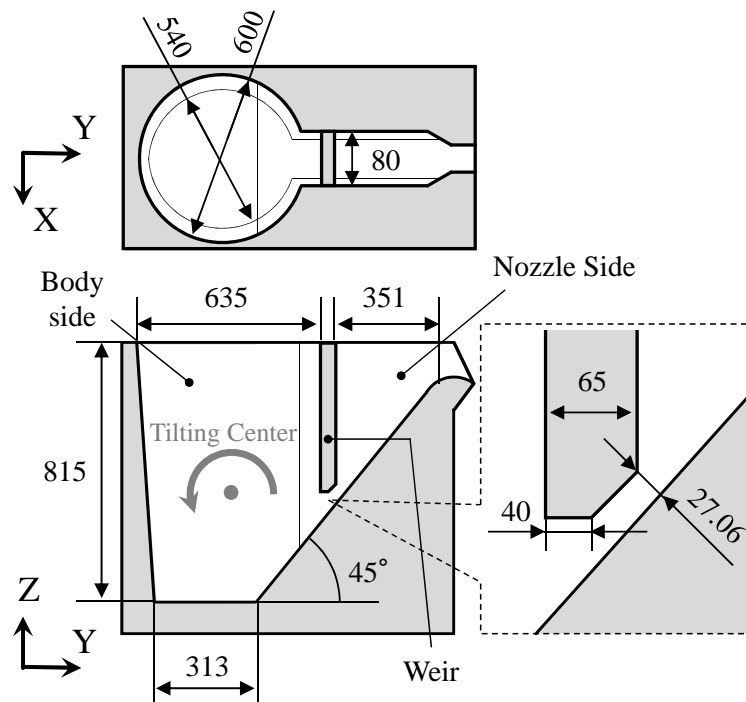


Fig. 4.2 Solid Model of Automatic Pouring Ladle with Weir

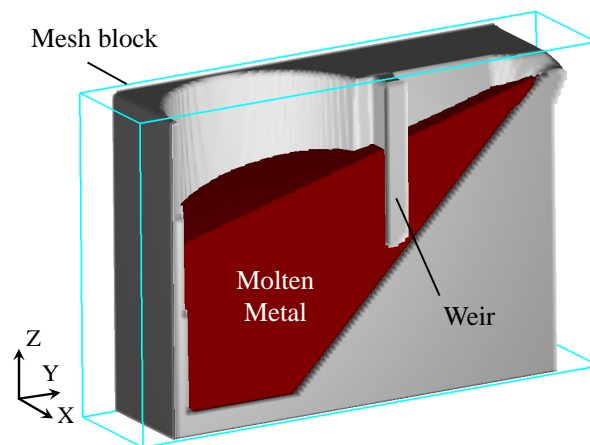


Fig. 4.3 3D Ladle Model and Mesh Setting

次に CFD 解析の設定条件を示す．本研究では Flow Science 社の FLOW-3D を用いて取鍋内部の液体の流動を解析する^{[99]–[100]}．計算負荷を軽くするため，Fig. 4.3 に示すように，X 軸方向で半分にした取鍋の 3D モデルを用いることにした．計算メッシュはこの半分の取鍋に合わせるように設置し，取鍋の中心断面に相当するメッシュ面に対称境界条件を，そのほかの 5 面には連続境界条件を設定する．対称境界条件を設定した境界面では鏡像のように，固体壁や流体の状態が境界面で面对称となるように取り扱われる．一方，連続境界条件を設定した場合には，境界面から先が無限遠で何もない状態であり，例えば流体が接する場合には，境界面から流体が流出してゆく．Table 4.1 に計算に用いたセルサイズ・メッシュ数を示す．

Table 4.1 Mesh Parameters

Block	Cell size [m]	Number of cells
X-direction	0.01	32
Y-direction	0.01	140
Z-direction	0.01	90
Total number of cells		403,200

湯切り動作時の取鍋内溶湯運動の検証のため，Fig. 4.4 にシミュレーションで用いる後傾速度入力を示す．速度入力は立上り/立下りの加速度を $\pm 40 \text{ deg/s}^2$ ，後傾速度を -7 deg/s ，後傾角度を -5 deg の台形波形として設計した．これらの後傾速度入力の設計値は，実際の注湯機で用いられる後傾動作を参考に決定した．また，取鍋動作は直接取鍋をシミュレーション空間内で動作させるのではなく，重力方向を変化させる非慣性系モデルとして取り扱うことによって計算時間を短縮する．このため，取鍋内溶湯の初期状態は後傾動作を開始する前，Fig. 4.3 で示されるように，液面が傾いている状態となる．本稿においては，取鍋の初期姿勢は 15 deg で，取鍋内部の液体体積はノズルから液体が出ない状態で最大の体積とした．

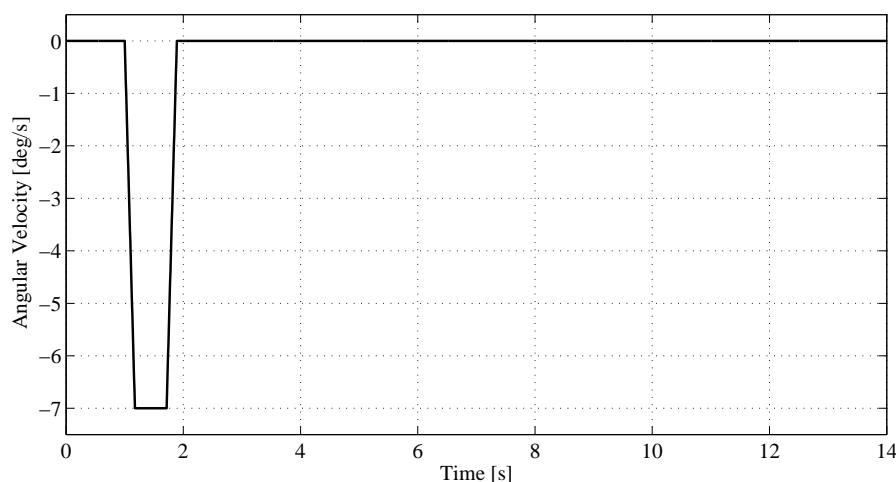


Fig. 4.4 Velocity Input for Backward Tilting Motion

シミュレーションで用いる鑄鉄溶湯の物性値を Table 4.2 に示す．解析時の圧力条件は非圧縮性，粘性特性にはニュートン流体を設定した．今回取り扱う動作は短時間で行われるもののため，解析計算には熱伝導や凝固など温度変化に関わる条件は含めていない．

Table 4.2 Fluid Properties of Compact Graphite Iron

Density of fluid [kg/m^3]	6337
Viscosity of fluid [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	0.003202

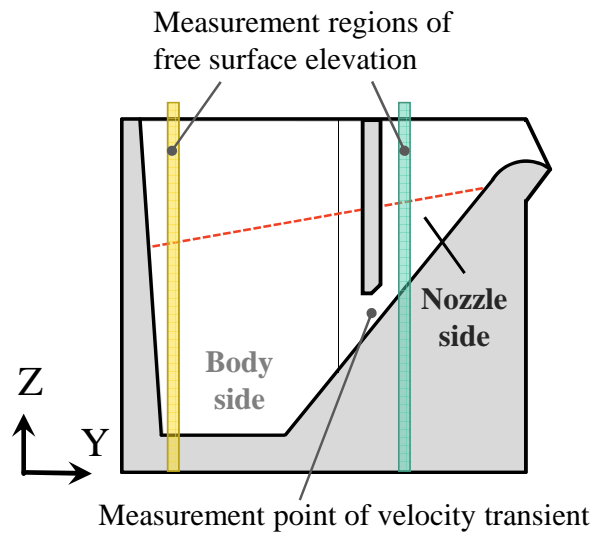


Fig. 4.5 Measurement Regions and Point for Liquid Vibration

取鍋内で生じる液体振動を評価するために Fig. 4.5 のように液面高さの検出領域と流動速度の検出点を設定する．液面高さと流動速度の推移は取鍋の中心位置で検出できるようにするため，これらの検出領域・検出点は X 軸上ではメッシュの対称境界に置くこととした．また，液面高さの検出領域はボディ側の壁面とノズル側の堰のそれぞれ近傍 0.003 m, 0.002 m の位置に配置する．堰あり取鍋では，ボディ-ノズル間での液体移動が起きる際は必ず堰の開口部を通るため，開口部の中心付近に流動速度変動の検出点を設ける．この検出点では，液体流入出を確認しやすい Y 軸方向の速度成分を評価することとした．

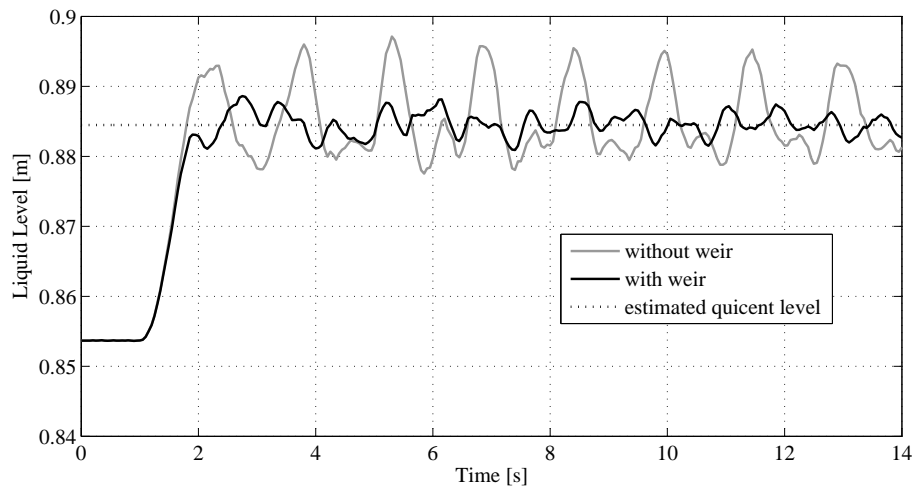
4.1.1 堰の有無による液面振動・速度分布の比較

堰の有無によって、取鍋内の液体流動にどのような差異が生じるのかを明らかにする。この検証を行うため、Fig. 4.2 の取鍋から堰部分を除去した 3D モデルを作成し、CFD 解析で元の取鍋形状との比較を行う。

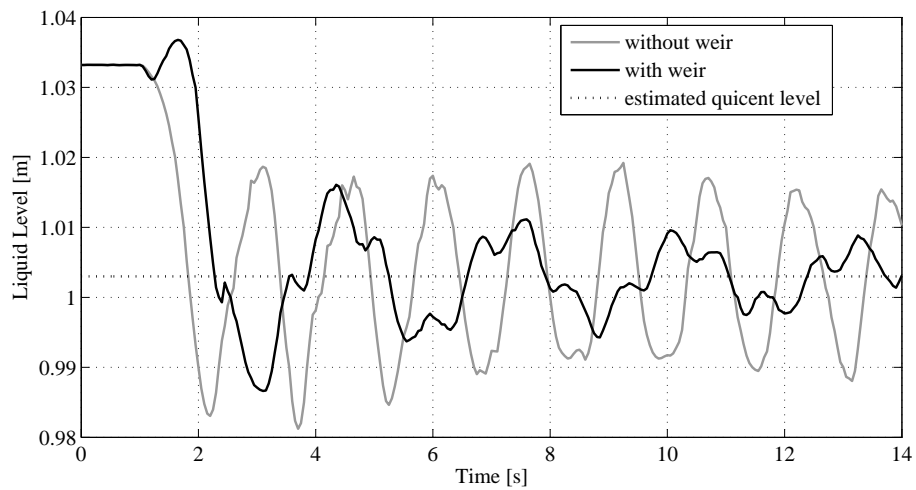
Fig. 4.6 に Fig. 4.5 で設定した検出領域から得た液面高さの推移をシミュレーション空間における絶対座標の値として示す。Fig. 4.7 に Fig. 4.6 の残留振動の FFT 解析結果を示す。Figs. 4.8, 4.9 に後傾を開始する 1 [s] から 4 [s] までの速度分布とベクトルを示す。カラーマップは 0 [m/s] から 4 [m/s] までの範囲で設定しており、赤い領域は 4 [m/s] 以上の速度で流動が起きていることを示す。

まず、堰なしの取鍋について見てみると、Fig. 4.8 の速度分布図と Fig. 4.6 の残留振動から後傾動作の終了後に持続的な液面の振動が生じていることがわかる。速度分布図では、ノズル側で比較的速い流動が生じているが、これは Fig. 4.2 から明らかなようにノズル側の水平断面積がボディ側の水平断面積よりも遥かに小さいことで、速度の式により、液体が移動する際に断面積差によって流速が増加するためである。Fig. 4.7 の FFT 解析の結果にはボディ側・ノズル側のどちらにも液面の 1 次モード振動に起因する 0.64 [Hz] のピークが現れているが、残留振動の振幅と周波数応答のピークがボディ側のものよりもノズル側の方が大きいのもこのことが原因である。また、Fig. 4.8 の速度分布図において、液面振動に節のような部分が現れており、節の位置が取鍋のノズル部の付け根位置に一致している。この振動ピークは FFT 解析の結果では 1.30 [Hz] 近傍に現れている。なお、ボディ側とノズル側でピーク周波数が異なる理由は前述のボディ側・ノズル側の断面積差による流速増加によりボディ側で生じる振動の周期が早まるためであると考えられる。

一方、堰付きの取鍋では、Fig. 4.9 の速度分布図において、堰の開口部で堰なし取鍋では現れなかった強い速度変動が確認できる。Fig. 4.5 で示したように、この開口部における Y 軸方向の速度成分を検出すると、Fig. 4.10 で示す周期的な速度変動が確認できる。これらのことから、後傾動作によって堰の開口部を介する体積移動が起きているといえる。この体積移動によってボディ側・ノズル側の両槽において、液面が全体的に上下することが確認できる。体積移動残留振動の周波数は 0.34 [Hz] であり、FFT 解析で示される低周波のピークとも一致する。体積移動残留振動以外に見られる比較的大きな周波数ピークは 1.22 [Hz] である。このピークは、速度分布図で示す液体領域の運動より、ボディ側で生じる 1 次モードの液面振動であることがわかる。1.22 [Hz] のピークはノズル側でも確認されているが、これは堰の開口部を通じてボディ側の振動が伝播したことによると考えられる。また、ノズル側にも液面振動が励起されることが予想されたが、速度分布図からも残留振動波形からも該当するものが確認されなかった。これはノズル側の壁面と堰との間隔が小さく、特に体積移動によってノズル側の液面高さが下がれば下がるほど間隔も狭まるため、振動が減衰されたものと考えられる。

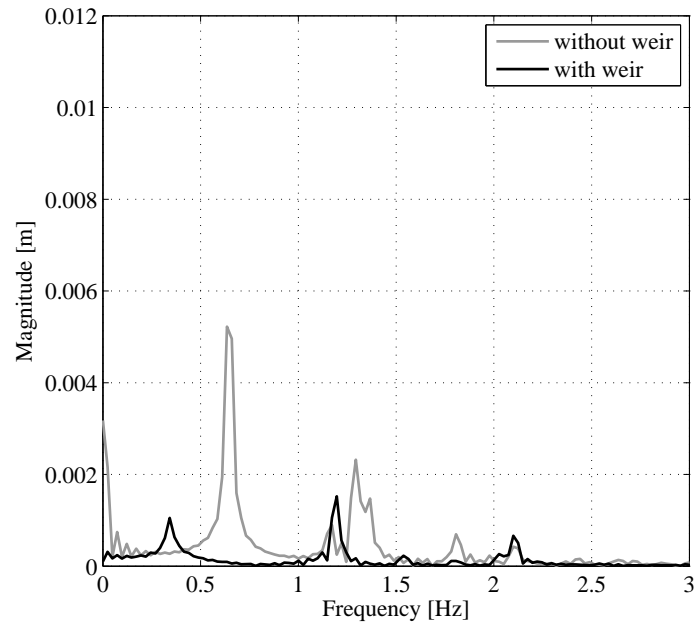


(a) Body side

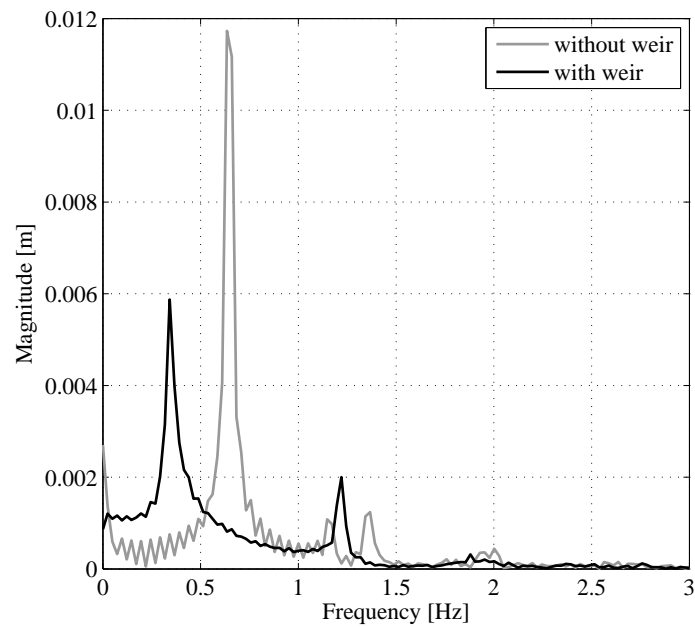


(b) Nozzle side

Fig. 4.6 Residual Vibrations without and with Weir



(a) Body side



(b) Nozzle side

Fig. 4.7 FFT Analysis Results without and with Weir

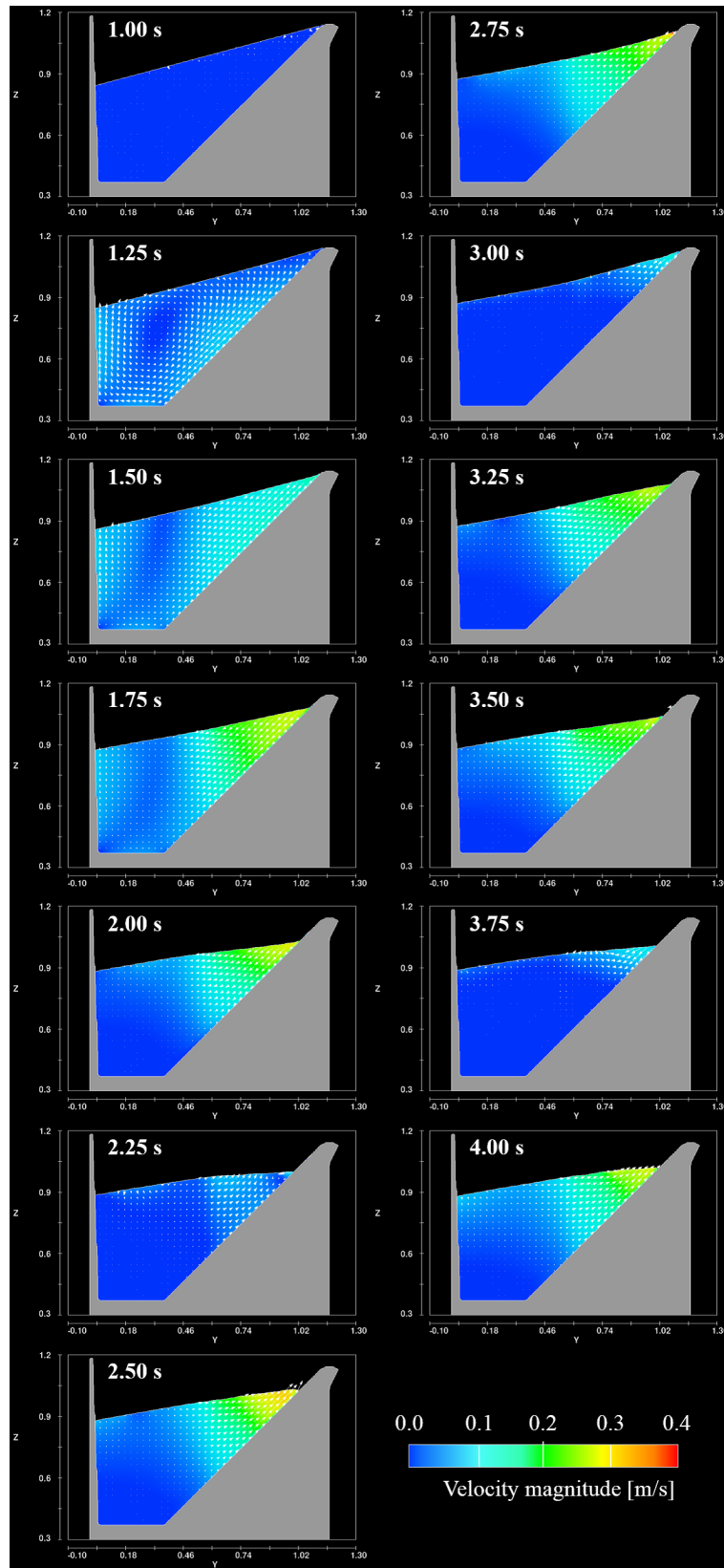


Fig. 4.8 Colormap of Velocity Magnitude (without Weir)

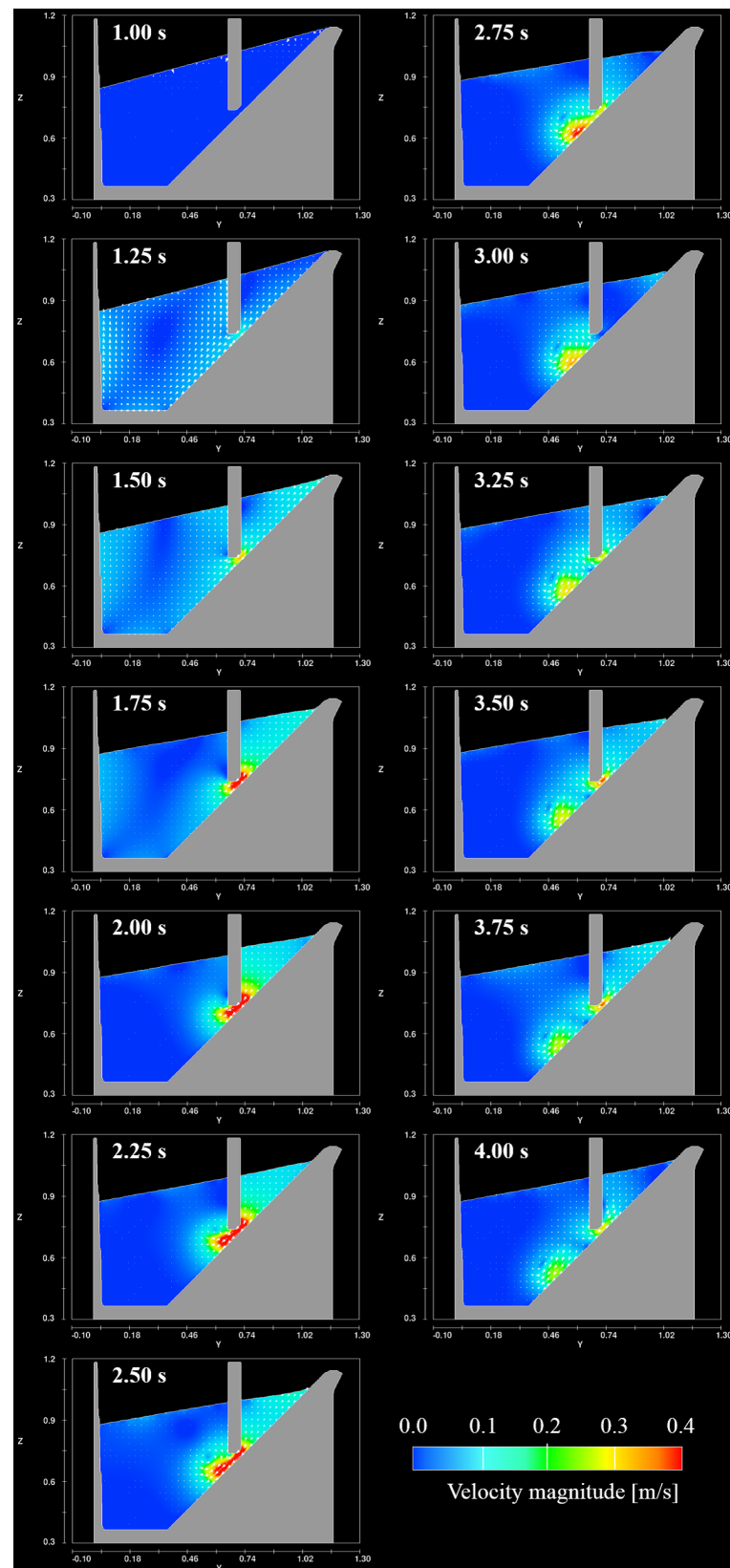


Fig. 4.9 Colormap of Velocity Magnitude (with Weir)

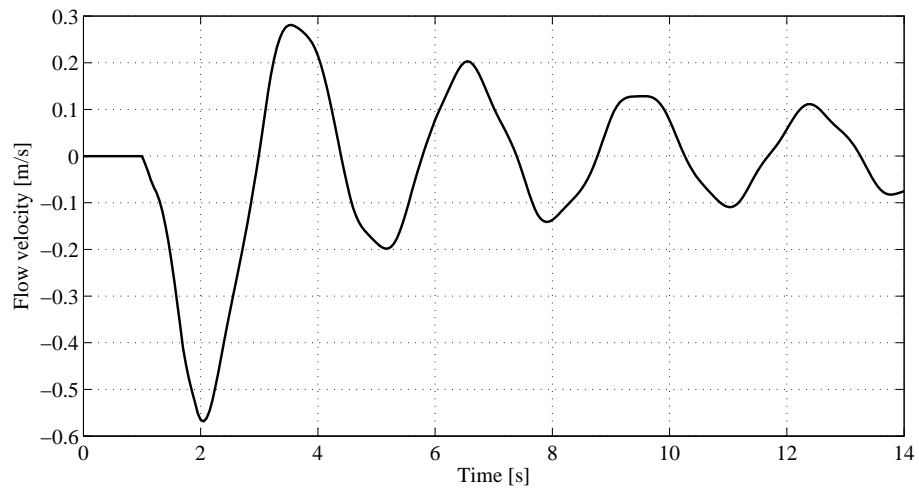


Fig. 4.10 Flow Velocity Transient on Y-axis at the Weir Gate

4.1.2 傾動中心位置の比較

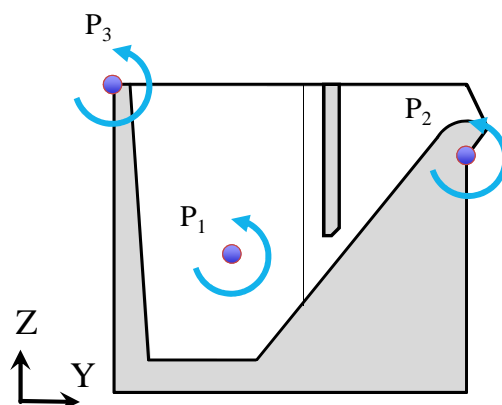
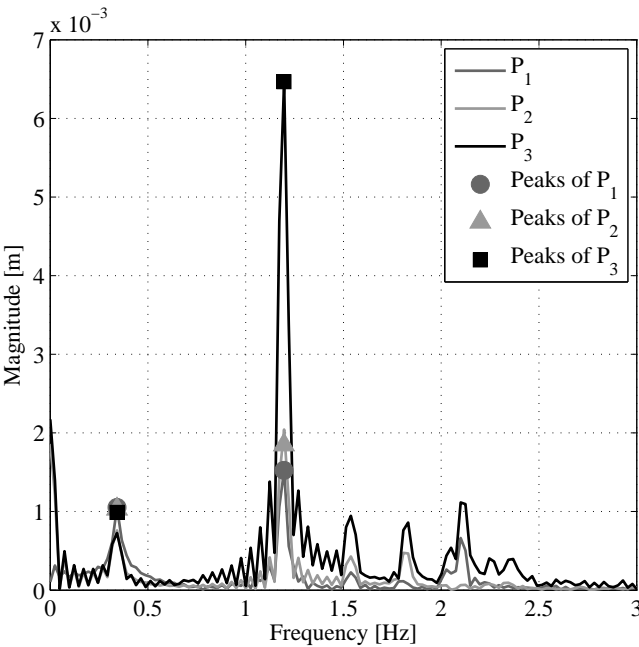


Fig. 4.11 Center Points of Tilting Motion

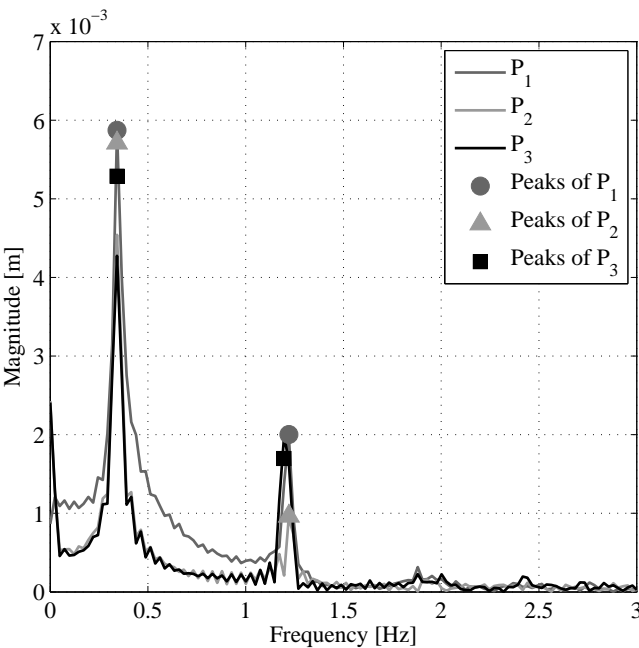
次に、傾動中心位置を異なる場所へ移した場合の流動挙動の差異について明らかにする。検証のため、取鍋の傾動中心位置の候補を Fig. 4.11 のように定めることとする。P₁ は前節でも用いた取鍋中心付近の傾動点、P₂ はノズル出口付近の傾動点、P₃ は取鍋上部に設置する傾動点である。これらのうち、P₁、P₂ は実際の装置制御で用いられる傾動中心位置である。

前節と同様に CFD による液体挙動解析を行い、ボディ側・ノズル側で得た残留振動へ FFT 解析を行った結果を Fig. 4.12 にそれぞれ示す。比較しやすいよう、0.34 Hz、1.22 Hz のピークにはマーカを付すことにする。得られた周波数応答を見てみると、前節で確認された、P₁ の場合の体積移動残留振動 0.34 [Hz]、ボディ側の 1 次モード振動 1.22 [Hz] の各ピークは、傾動中心位置 P₂、P₃ が変わった場合にも同じ周波数で現れることがわかる。加えて、体積移動残留振動の 0.34 [Hz] のピークの大きさは P₁、P₂、P₃ のどの場合にも概ね変化がないことがわかる。このことから、体積移動現象については、傾動中心位置の影響がないということが言える。

一方で、1.22 [Hz] の液面振動については、各傾動位置条件でピークの大きさに差異が認められる。取鍋は溶湯も含めた総重量が大きくなるため、傾動モータの位置を P₁ に置くことが多いが、注湯制御を行う際には、流出液体の落下軌道を安定化できる P₂ を傾動中心とする方が良くとされている。そこで、筆者らの従来研究では、傾動姿勢に同期させて Y 軸方向の併進動作、Z 軸方向の上下動作を行うことであたかも P₂ が傾動中心位置であるかのように取鍋を動作させる方法を提案した^[51]。傾動中心位置を変更することは、前述の Y 軸、Z 軸の同期制御を行うことと等価であり、同期制御時の Y 軸方向の搬送動作が影響して、1.22 [Hz] の振動について P₁ に対し、P₂ のピークが半分程度に抑制され、P₃ については液面振動がより大きく励起されたと考えられる。



(a) Body side



(b) Nozzle side

Fig. 4.12 Frequency Peaks of Residual Vibrations Comparing Center Points of Tilting

4.1.3 堰位置の比較

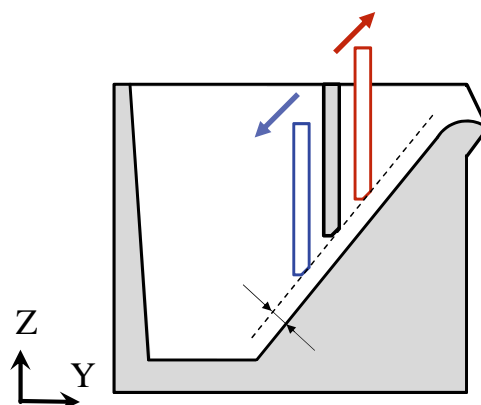


Fig. 4.13 Variation of Weir Position

堰の位置が Fig. 4.13 のように前後に移動した場合について検証した．本稿では最初に定めた位置とそこから -0.05 m 、 $+0.05\text{ m}$ 、 $+0.10\text{ m}$ だけ Y 軸方向に堰がずれた場合について比較した．なお、堰の開口部は同じ広さになるようにした．また、ノズル側のレベル検出位置は堰のずれに合わせて移動させた．残留振動の FFT 解析結果から、体積移動振動と 1 モード液面振動のピーク周波数を堰の位置に対応させて Fig. 4.14 のように示した．

体積移動振動のピーク周波数はボディ側・ノズル側で共通の値であり、堰の位置の変化に伴って周波数が変化した．堰の位置がノズル側へ移動するほど高周波へピークが移動する理由は、ノズル側の体積・断面積が小さくなることが原因でノズル側を押し上げる速度が大きくなるためと考えられる．

次に 1 モード液面振動について、両槽とも槽の幅が Y 軸方向に広がるほど低周波に、狭くなるほど高周波に遷移している．今回の場合、堰の初期位置であればノズル側・ボディ側の 1 次モード液面振動の周波数ピークは概ね一致している．もし減衰比が同程度であれば後述する Input Shaping 制御^{[107],[108]}を用いる場合、1 つの固有周波数をターゲットにすればよいので、各槽の液面振動のピーク周波数が一致するのであれば制振制御を行う点から有利であると言える．

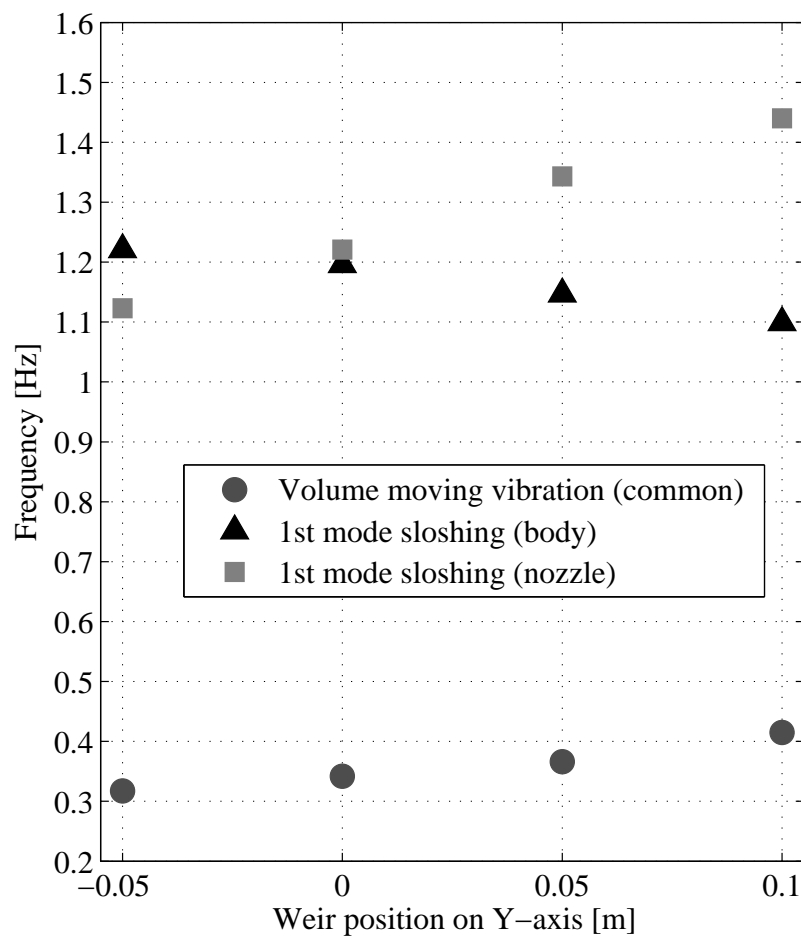


Fig. 4.14 Peak Frequencies Shifted Weir Position on Y-axis

4.1.4 堰開口部の大きさによる比較

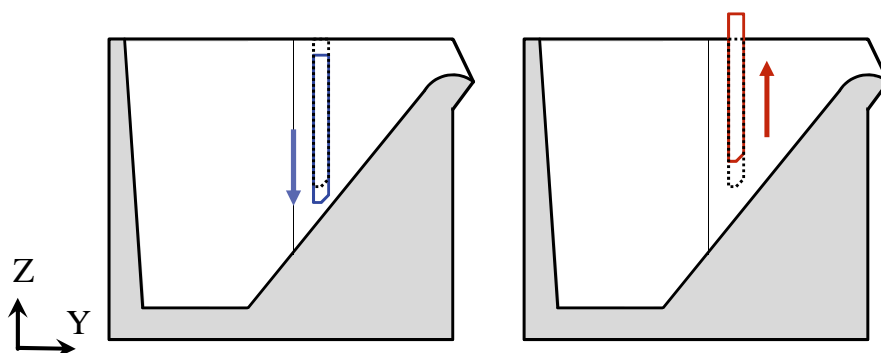


Fig. 4.15 Variation of Weir Opening Area

Fig. 4.15 で示すように堰の上下位置が変化した場合について検証する．堰の開口部の高さが -0.02 m, $+0.02$ m, $+0.04$ m ずれた場合と標準の場合を比較した．前節と同様に，体積移動振動・各槽の1次モード液面振動のピーク周波数の推移を確認し，Fig. 4.16 にまとめた．

まず，1次モードの液面振動のピーク周波数は，ボディ側・ノズル側共に開口部の広さの影響を受けていないことがわかる．一方で，体積移動振動のピーク周波数は開口部が大きいほど高周波に，開口部が小さいほど低周波に遷移した．これは，開口部の大きさで単位時間当たりに流入出できる体積が影響を受けるためと考えられる．なお，条件設定からも明らかなように，開口部の比較は前節の半分程度の範囲・刻みで堰位置を上下に移動させているが，体積移動振動のピーク周波数はFig. 4.14と同程度の範囲で変化している．このことから，取鍋使用中に金属の凝固などにより開口部が狭まると内部液体の運動に影響が出やすいことが予想される．

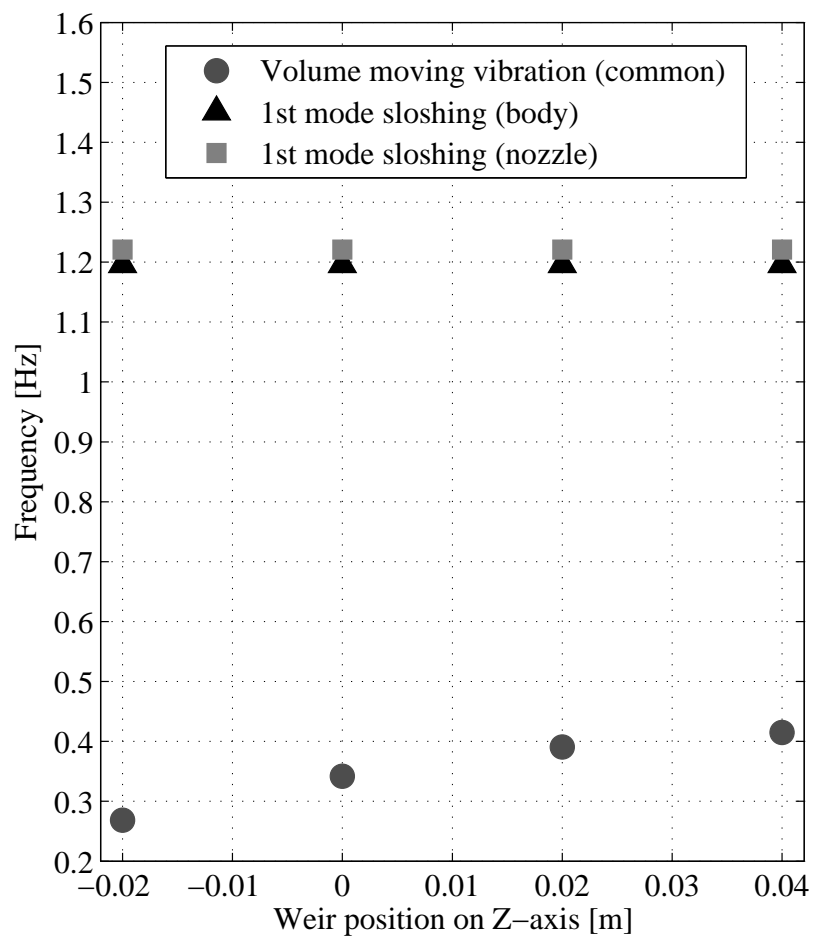


Fig. 4.16 Peak Frequencies Shifted Weir Position on Z-axis

4.1.5 取鍋構造最適化の考察

前節までの結果から、堰の取り付け位置や開口部面積が液面振動と体積移動振動の固有周波数に関わる要素であることが明らかとなった。

溶湯運動の制振制御を行う点から見ると、堰位置の調整によりアクティブ制振のかけやすい取鍋特性を与えることが望ましいかと考える。液面振動については、本稿で定めたの基準位置のケースのように、ボディ側・ノズル側の液面振動固有周波数が同じか近い値を取るのであれば後述する Input Shaping 法などの制振制御手法を適用しやすい。また、堰の開口部面積をなるべく広く取ることができれば、体積移動振動の周波数は比較的高周波側へ遷移するため、より低周期にできれば、制振がかけやすくなるのではないかと考える。

一方で、肝心の注湯制御についても考えてみると、堰の取り付け位置がボディ側に寄り過ぎれば清浄なまま保持できる溶湯の容量が少なくなることが予想される。更に、堰の開口部が広がりすぎれば、鑄型側への酸化物・介在物の流入の可能性が高まるため、残湯として、排出しなければならない溶湯が増えてしまう。

以上のことから、取鍋形状を制振制御・注湯制御両方の面から最適化することが望ましいと考える。

4.2 振動抑制のための取鍋動作制御

後傾動作によって生じる液面振動・体積移動残留振動を低減するため、適切な後傾速度入力を成形することを考える．本稿ではフィードフォワード制振制御の一手法である Input Shaping 法を採用する^{[107],[108]}．

4.2.1 Input Shaping 法を用いた取鍋内液体振動の制振制御

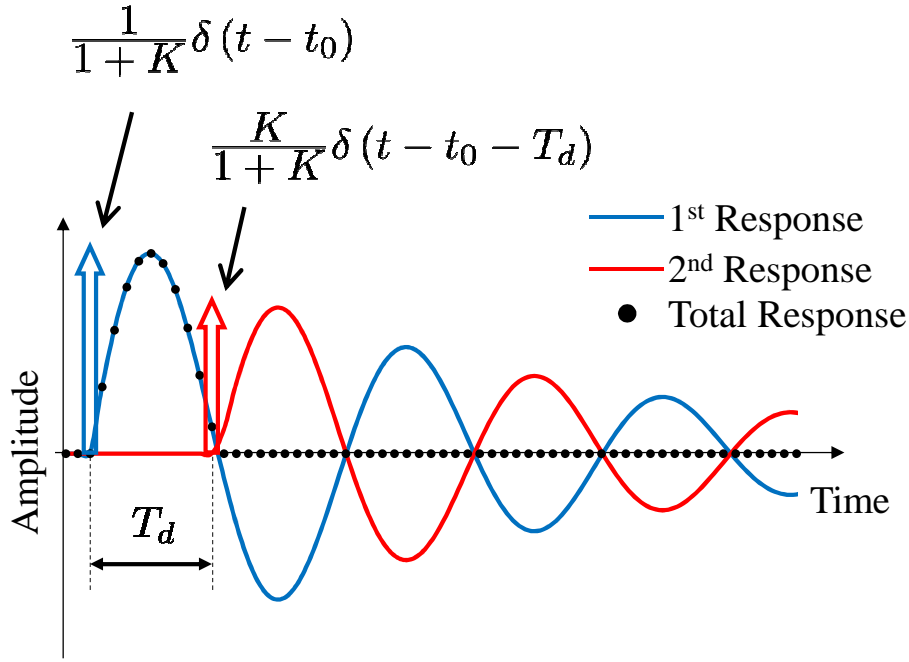


Fig. 4.17 Input Shaping Method for Impulse Input

液面振動・体積移動残留振動を加速度を入力とする線形振動系で表現できるものと仮定する．一般に，二次遅れ系で表現される線形振動系の動特性は次式によって記述される．

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = A\omega_n u \quad (x \equiv x(t), u \equiv u(t)) \quad (4.1)$$

x は振子の角度などの変位， ζ は減衰比， ω_n は非減衰固有角周波数， A は比例ゲイン， u は入力である．時刻 $t = t_0$ にインパルス入力 $u(t) = \delta(t)$ を与える場合，そのインパルス応答は次式で表現できる．

$$x = \frac{A\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} \exp\{-\zeta\omega_n(t-t_0)\} \sin\left\{\sqrt{1-\zeta^2}\omega_n(t-t_0)\right\} \quad (4.2)$$

Fig. 4.17 で示すように，減衰比を考慮した減衰固有周期の半分の時間 T_d だけ遅らせて，ゲイン K をかけた 2 つ目のインパルス振動系に与えると，1 つ目，2 つ目の入力だけで振動が

お互いを打ち消しあうことによって制振が実現される．Input Shaping 法で用いられるゲイン K と遅れ時間 T_d は振動系の特性パラメータから次式となる．

$$K = \exp\left(-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right), \quad T_d = \frac{\pi}{\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (4.3)$$

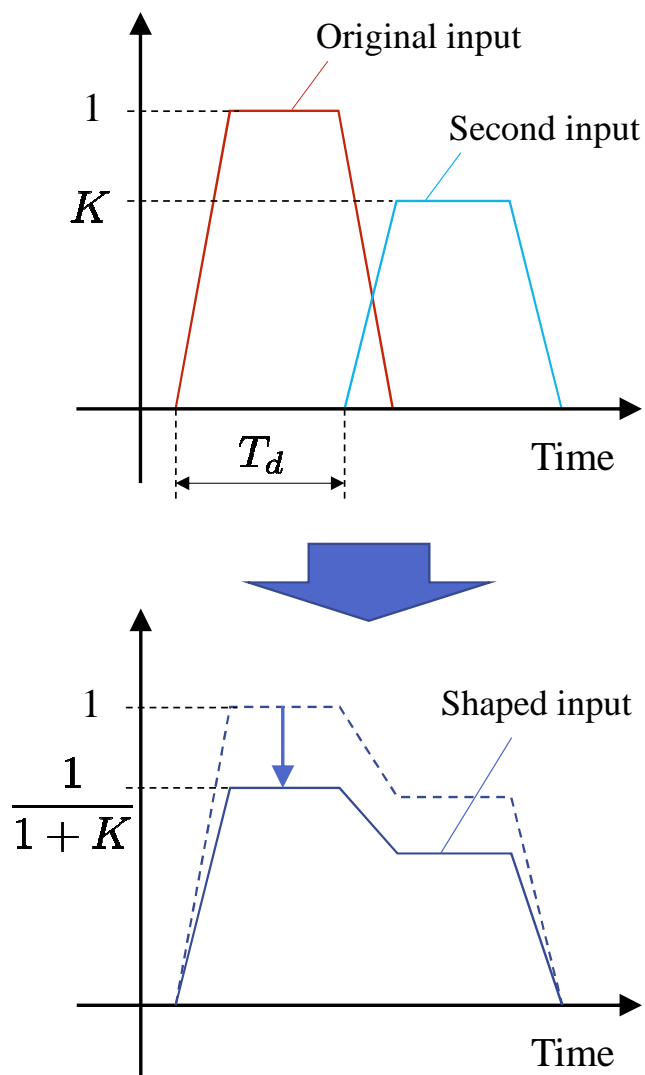


Fig. 4.18 Input Shaping Process for Trapezoidal Shaped Input

所望の入力に対する応答はインパルス応答の重ね合わせで表現できるため，インパルス入力以外にも適用することが可能である．1 モード振動の制振のため台形波形に適用して入力成形を行う方法を Fig. 4.18 に示す．台形波形の場合， T_d だけ遅く，オリジナルの波形を K 倍した 2 つ目の台形波形を作成し，オリジナルの波形と合成する．オリジナルの速度波形に対して，新しい波形を加えているため，制振制御は成り立つものの，位置決めを行うことができなくなる．このため，合成した波形を $(1+K)$ で除すことによって，合成波形の面積をオリジナルの波形と同じ大きさにし，Input Shaping 法による制振制御と位置決め制御を両立する速度入力を成

形する。

本稿では、体積移動振動とボディ側・ノズル側両方の1次モード液面振動を制振することとする。なお、両槽の1次モード液面振動の固有周波数は前節で述べたように近い値をとるため、同じ制振入力で両者を低減できるものとして考えた。2つの振動系の特性を同定するため、Fig. 4.6(b)で示した、堰付き取鍋のノズル側振動に対して、滑降シンプレックス法^[109]を用いて二次遅れ系(4.1)へのパラメータフィッティングを行い、制振制御のための設計パラメータを導いた。Table 4.3に P_1 の液面振動にフィッティングして得られた非減衰固有角周波数 ω_n と減衰比 ζ 、Input Shaping 法による入力整形に用いる K と T_d を示す。

Table 4.3 Parameters of Input Shaping Control

	moving volume vibration	1st mode sloshing
f [Hz]	0.34	1.22
ω_n [rad/s]	2.211	7.672
ζ [-]	0.073	0.009
K [-]	0.788	0.972
T_d [s]	1.476	0.411

4.2.2 個別の1モード振動に対するInput Shaping制御

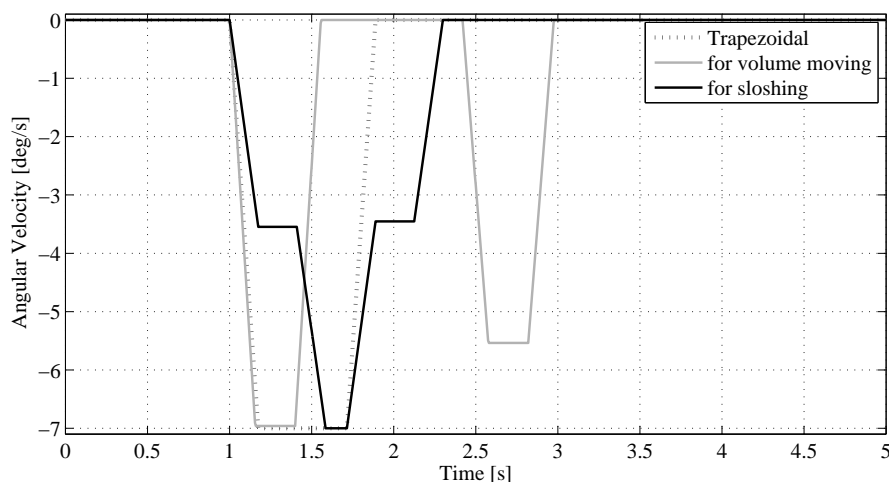


Fig. 4.19 Designed Velocity based on Input Shaping Method for 1 Mode Vibration

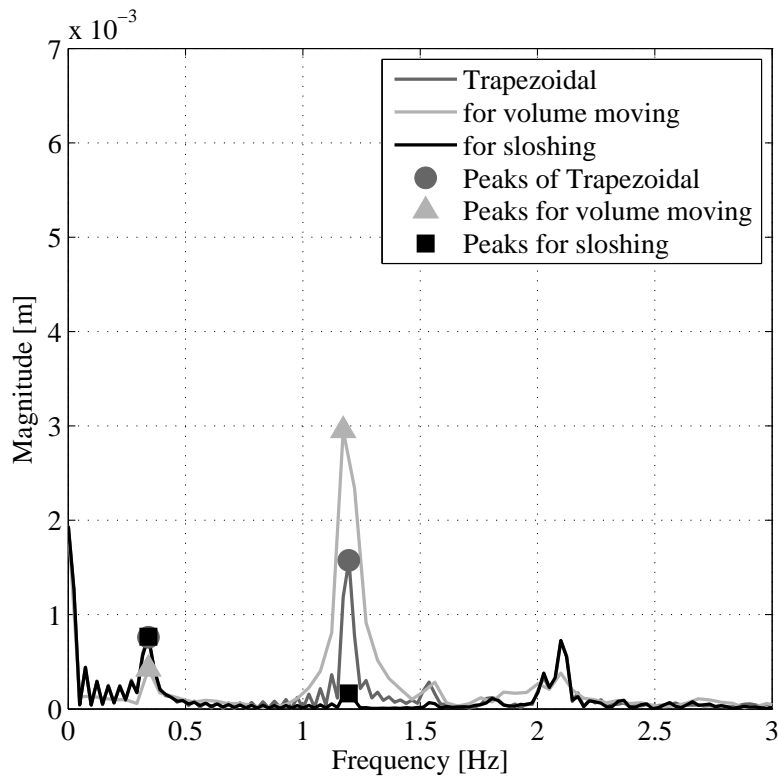
まずは、体積移動振動・1次モード液面振動へ個別に制振入力を与える場合を考える。Fig. 4.19に制御しない場合の台形入力と4.2.1節で得たパラメータを用いて各振動に対して設計した

Input Shaping 入力を示す。Input Shaping 入力は最大速度が制御なしの台形入力と同じ-7 deg となるように設計に使用するオリジナルの台形入力を調整した。

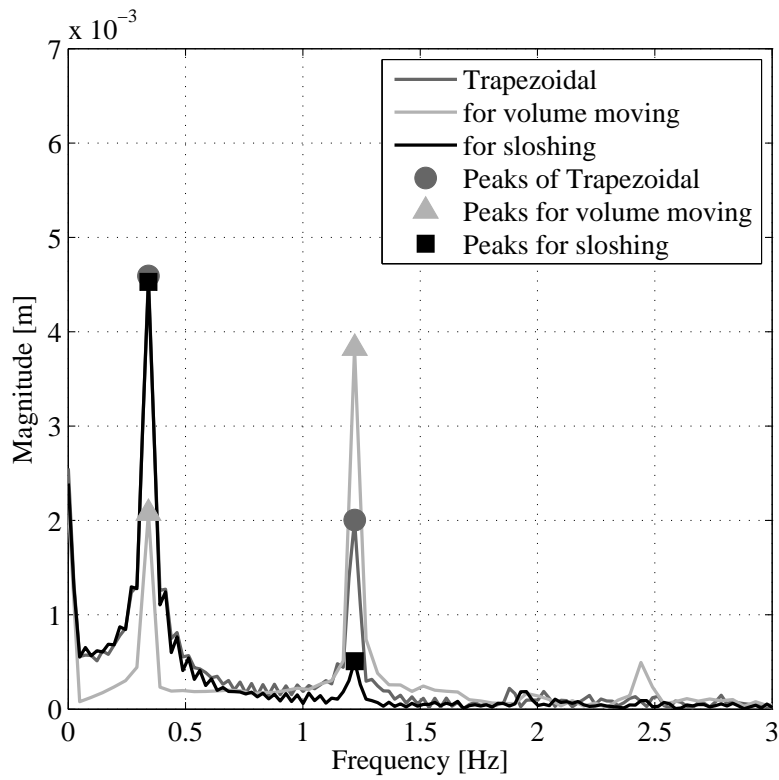
Fig. 4.20 に得られた残留振動を FFT 解析して得られた周波数応答を示す。特に注目している 0.34Hz, 1.22Hz 近傍のピークにはマーカーをつけて表示する。

まず、体積移動振動に対して Input Shaping 制御を行うと、Fig. 4.20(a) ではわかりにくいですが、Fig. 4.20(b) から、0.34Hz のピークが台形入力の場合と比べ、半分以下に低減されていることがわかる。逆に 1.22Hz のピークについては台形速度の 2 倍のピークとなっている。体積移動振動の周期は 1 次モード液面振動の周期のおおよそ整数倍になるため、共振してピーク値が上昇したものと考えられる。

一方、1 次モード液面振動に対して Input Shaping 制御を行った場合には、体積移動振動に相当する 0.34Hz のピークには変化がないものの、1.22Hz のピークについては大幅な低減が実現されることが確認できた。



(a) Body side



(b) Nozzle side

Fig. 4.20 Frequency Responses Applied Input Shaping Control

4.2.3 マルチモード振動に対する Input Shaping 制御と後傾終了時間

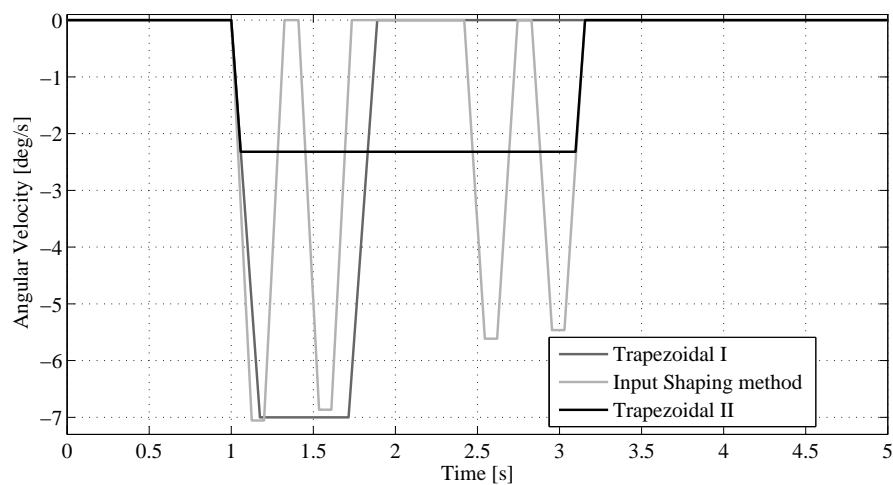
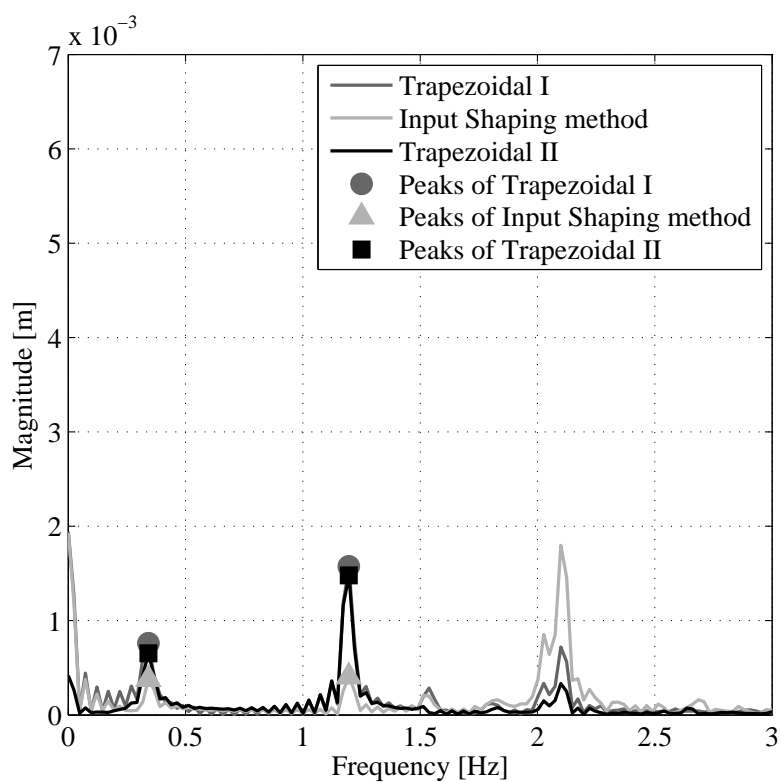


Fig. 4.21 Designed velocity based on Input Shaping method for 2 mode vibrations

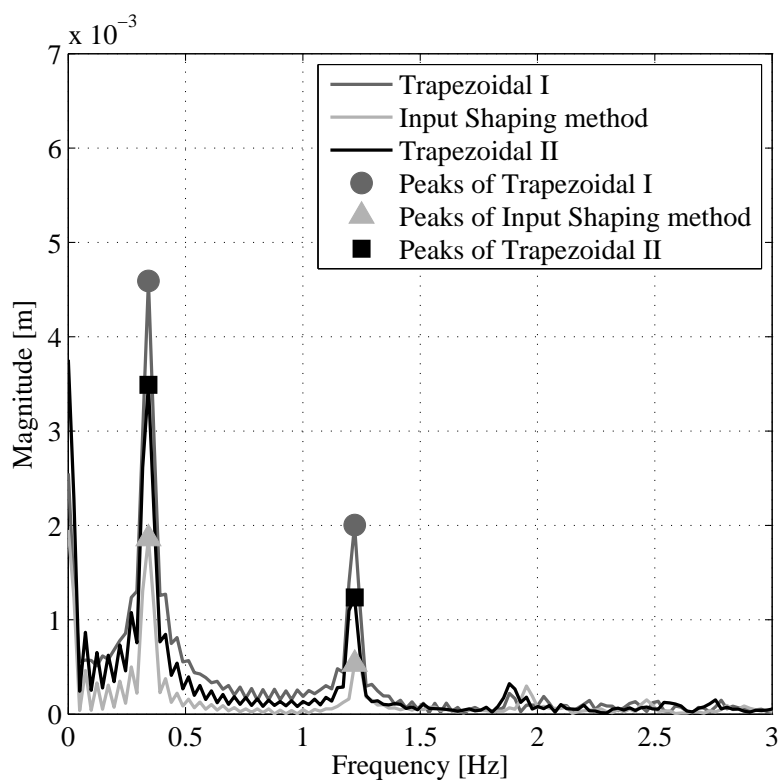
最後に体積移動振動と1次モード液面振動の2つの振動モードを抑制することを考える．Input Shaping 法を用いて n 個の振動モードを制振する場合，各モードの振動数・減衰を考慮した上で， 2^n 回分の入力を合成する必要がある^{[107],[108]}，今回は4つの波形を合成した．Fig. 4.21 に制御なしの台形入力Iと設計した2モード Input Shaping 入力を示す．この入力は，4.2.2 節と同様に，最大速度が概ね-7 deg/s となるようにオリジナルの台形波形を調整した．また，後傾動作にかかる時間の評価のため，2モード Input Shaping 入力と同じ時間で動作を終了する台形入力IIを設計し，比較することとした．

Fig. 4.22 に残留振動のFFT解析から得られた周波数応答を，Figs. 4.23, 4.24 に Input Shaping 入力と台形入力I，台形入力IIをそれぞれ比較した時間応答グラフを示す．個々の振動に対象とした Fig. 4.20 とは異なり，台形入力Iの結果と比べると，0.34Hz, 1.22Hz どちらのピークも2モード Input Shaping 入力の場合には低減されていることが確認できる．また，後傾動作の終了時間を合わせた台形入力IIの結果と比べても，両ピークの大きさは小さくなっており，同じ後傾時間で制振制御が実現できることが示された．

なお，Fig. 4.22(a) の 2.1Hz 近傍にピークが見られるが，これは2次モード液面振動であり，今回制御の範囲外としたため Input Shaping 制御時にピークが上昇したと考えられる．このピークも前述の方法で3モード Input Shaping 入力を整形することにより他の振動と一緒に抑制できると予想される．

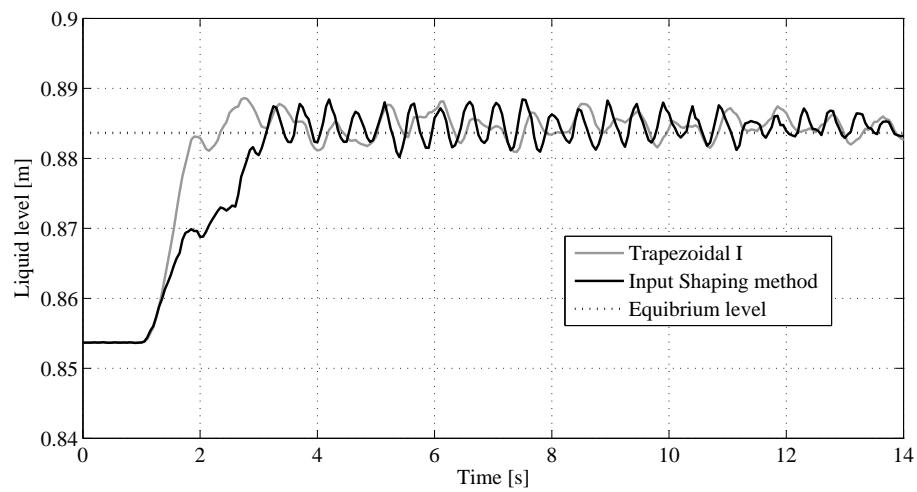


(a) Body side

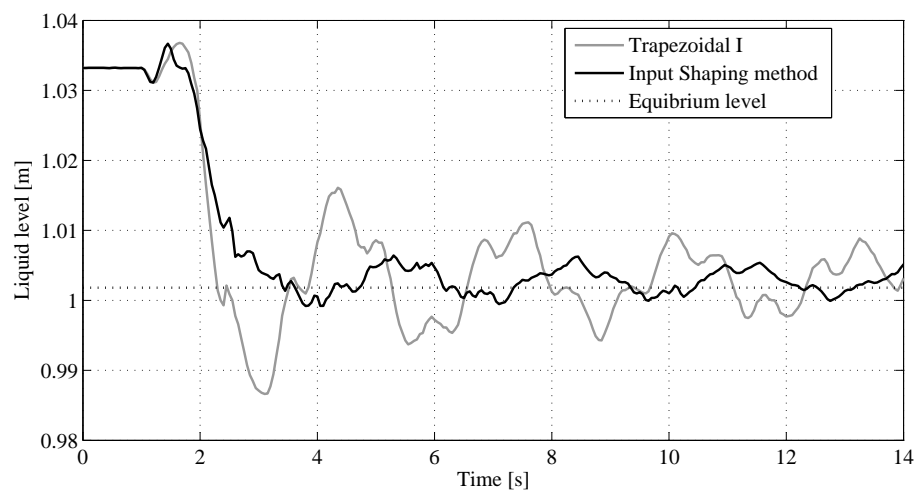


(b) Nozzle side

Fig. 4.22 Frequency Responses Applied Input Shaping Control

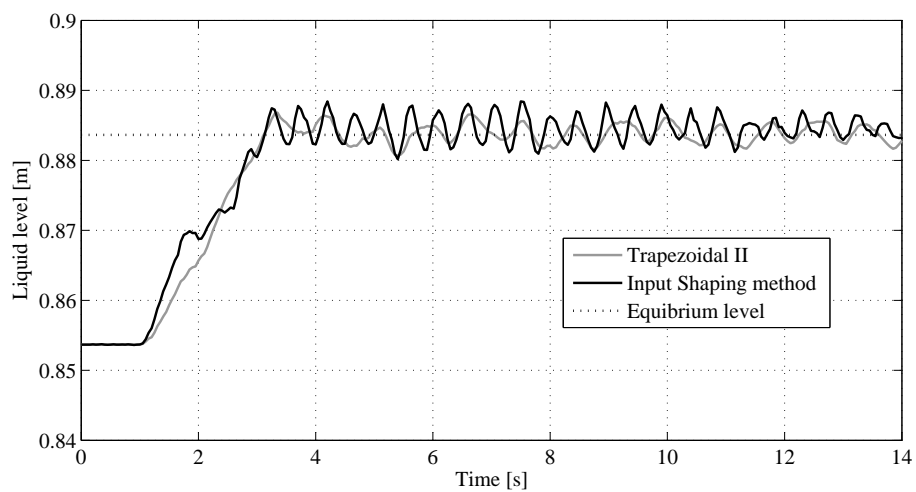


(a) Body side

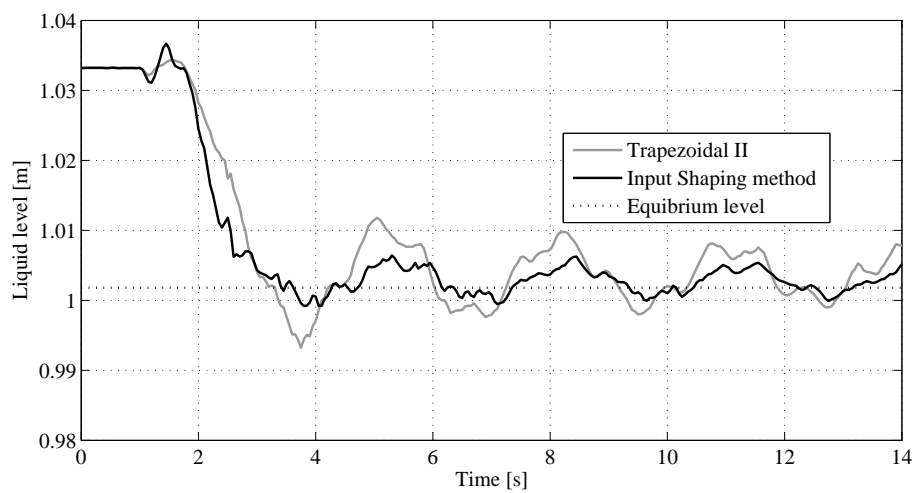


(b) Nozzle side

Fig. 4.23 Residual Vibrations of Trapezoidal I and Input Shaping Method



(a) Body side



(b) Nozzle side

Fig. 4.24 Residual Vibrations of Trapezoidal II and Input Shaping Method

4.3 まとめ

本稿では鋳造産業で用いられる傾動式自動注湯機に関し，実際の注湯工程で用いられる堰付き取鍋について，従来考えられてきた堰なし取鍋と同じ後傾動作により内部で発生する流体挙動や振動について解析を行った．この結果として，堰ありの取鍋では，液面振動のほかに堰の開口部を介した流体の体積移動が原因で生じる残留振動が現れることが確認された．

また，この湯切り動作を，後傾中心位置を変えて行った場合，発生振動のピーク周波数は変わらないものの，振動振幅に違いが現れることを明らかにした．加えてピーク周波数は，堰の位置や開口部の広さの影響を受けることが確認でき，堰の設計により最適な振動特性を与えられることがわかった．

最後に，フィードフォワード制御制御手法の一つである Input Shaping 法を用いて，体積移動残留振動とボディ側の 1 次モード液面振動を対象として後傾速度波形を成形することにより，2 つの振動を大幅に低減できることを示した．

第5章 結言と今後の課題

5.1 結言

本研究では、傾動式自動注湯機に関し、低位置注湯を実現するための取鍋動作の生成法と、堰付き注湯取鍋内の溶湯運動の CFD 解析とその制振制御をターゲットとして研究を行った。以下にそれぞれの要約を示す。

1. 台形状取鍋を対象として、障害物を回避しつつ、注湯高さを低くする、液体落下位置制御を行うための取鍋動作軌道の生成法を提案した。取鍋と障害物の位置関係、流出液体の流線に基づき、最も注湯高さが低くなる取鍋動作の生成式を、3つの場合について導出した。3つの動作モードを注湯工程の状況に応じて適宜切り替える方法を示した。この提案法の評価のために、水を対象流体とした注湯実験を行い、提案法でも高精度を維持したまま液体落下位置制御を実現できることを確認した。また、落下流線の特徴が異なる、ノズル付きの円筒形状取鍋についても、低位置注湯動作の生成が可能であることを示した。そして、解析的なアプローチによる取鍋動作の妥当性について、最適化手法を用いて最も取鍋高さが低くなるような数値解を求めることにより検証した。結果として、提案法で得られた解析解は数値解とよく一致しており、一意的に導いていることから計算処理も短く済み、実プロセスでも有用であることが確認できた。最後に、解析解による理想的な取鍋軌道上から取鍋の初期位置が離れているケースについて、低位置注湯取鍋軌道へ滑らかに動作を接続するための動作生成法を二点境界値問題と最適化手法を用いて提案した。この提案法を注湯実験により検証し、初期位置が理想位置から離れている場合でも、注湯制御性能は保持しつつ、低位置注湯動作へスムーズに移行できることを示した。
2. 内部に堰構造を有する実用的な形状の自動注湯機用取鍋について、湯切り後傾動作時の取鍋内液面振動の解析と制振制御の適用を行った。堰あり取鍋と堰なし取鍋での後傾後残留振動の比較を行った結果、堰の影響として、液面の振動は比較的小さくなる一方で、堰下部の開口部で体積移動振動が生じることが確認された。また、堰あり取鍋で生じる液面振動・体積移動振動は、取鍋の傾動中心位置や堰の前後位置、開口部面積の影響を受けることを確認した。体積移動振動も周期的振動であることから、これを2次遅れ振動系としてみなし、マルチモード Input Shaping 入力を整形することにより、液面振動・体積移動振動両者の振動低減を実現した。

5.2 自動注湯に関する今後の課題と展望

5.2.1 課題 1: 非接触計測システムの構築と注湯流量フィードバック制御

本稿では、フィードフォワード制御でも注湯流量制御が比較的高精度に実現されることを前提として、注湯流量・取鍋姿勢・取鍋外形形状に基づく取鍋の低位置化を行ったが、実際には溶湯の物理特性は自身の温度変化により推移すること、取鍋内側に凝固した金属により形状モデルの誤差が生じることから、より高精度な注湯制御を行うためにはやはりフィードバック制御による補正を行うことが必要である。

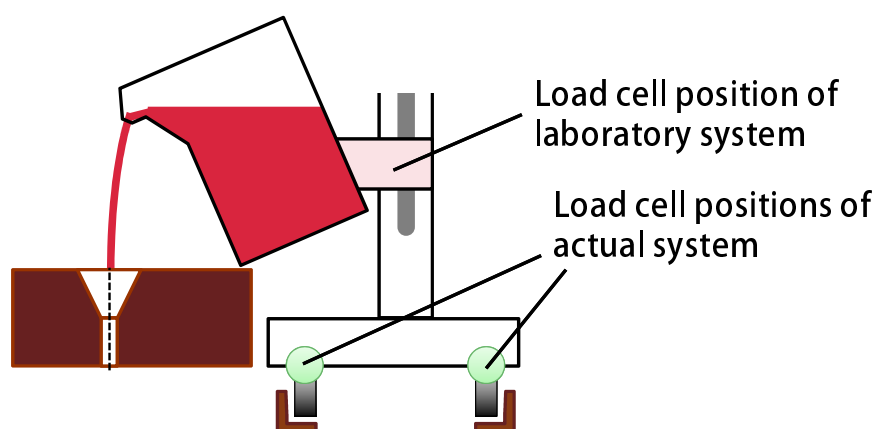


Fig. 5.1 Problem of Weight Measurement by Load Cell Position

これまでも、ロードセル計測値に基づく重量・流量推定が行われているが、Fig. 5.1で示すように取鍋全体の重量変化に基づいて計測を行うため、分解能が大きく、非線形カルマンフィルタを用いても十分な推定精度が得られていない。また、全体の重量変化を計測する都合上、取鍋内の溶湯の重量変化以外にも自動注湯システム上で発生する振動をも情報として取り込んでしまう欠点がある。

解決のためには、分解能に優れ、応答性の高いセンサや計測システムの構築が必要となる。溶湯の状態の直接計測は流れを乱すこと、センサの耐熱性の問題から推奨されないため、Fig. 5.2のようにカメラ撮影を用いた画像計測やレーザセンサを使用するような、非接触式の充填重量・注湯流量の計測方法を適用することが求められる。

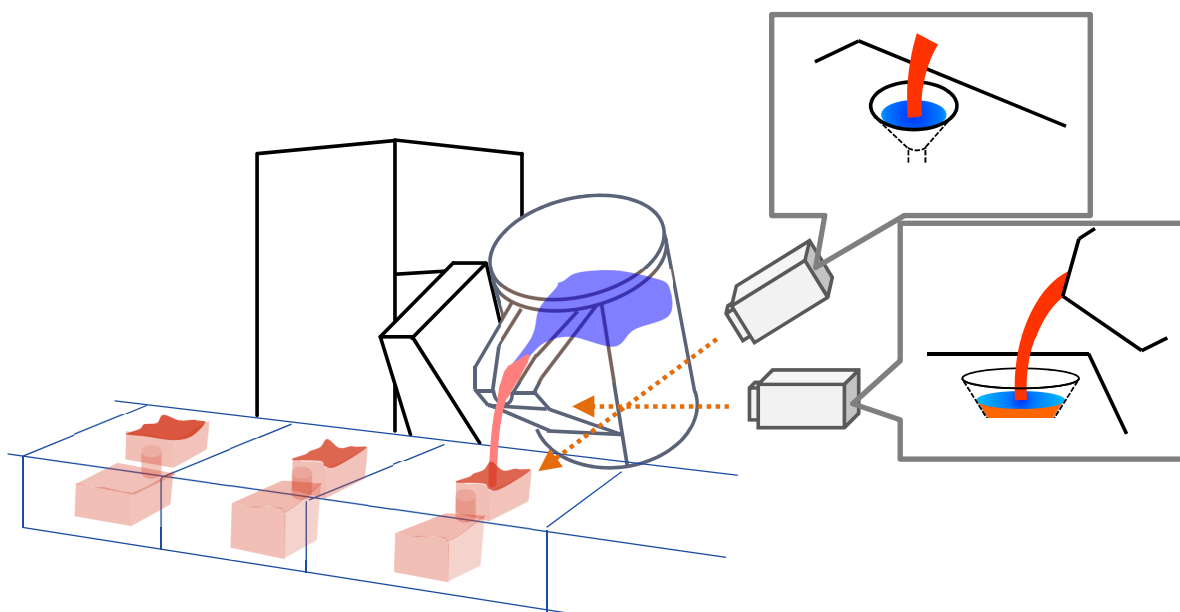


Fig. 5.2 Camera Measurement Approaches in Automatic Pouring

5.2.2 課題2: 取鍋サイズに基づく取鍋内容湯振動の比較

取鍋内液面振動について、本稿では量産向けの自動注湯機で用いる取鍋寸法・形状を対象として、CFD解析による検証を行った。このスケールでのバッチ式自動注湯機は今後ともニーズのある技術ではあるが、一方で、中小企業では導入のしやすいより小型の自動注湯機の開発も求められている。

取鍋サイズが小さくなれば、液面振動の固有振動数が変わると同時に、同じ注湯流量を出湯しようとした際の取鍋の傾動速度や加速度はより大きいものが求められる。

これらのことから、取鍋内容湯振動の問題が小型取鍋では顕著となるため、大型取鍋との比較と注湯制御と連携した制振制御の検討を行う必要があると考える。

5.2.3 今後の展望

傾動式の自動注湯機は、緒言でも述べたように、手動装置を使ってきた職人の熟練技能の応用が可能なメカニズムであり、非常に簡素な構成であるとも言える。取鍋の耐火性の問題を除けば、動作部分だけで見ると取鍋のように溶湯を保持する液体用機とそれを傾ける・搬送するモータや代替となるアクチュエータがあればまずは傾動動作による注湯を実現できる。このため、小型化が容易であり、実際に我々のグループをはじめ、既にいくつかの大学・研究室では、小型注湯機を製作・導入している。また、そもそも傾動式自動注湯のアプローチは、手動注湯で行われる注湯方法とほぼ同じであるため、既存の設備に最低限の搬送・傾動アクチュエータやそれらを同期制御できる制御システムを付与するだけで自動化や運転管理が可能となるこ

とが見込める。これらのことはコストやスペースの問題で大型の自動化設備の導入を断念してきた中小規模の組織にとって大きなメリットである。また、大学で現在導入されている小型自動注湯機の使用目的は、自動注湯プロセスの開発が主となっているが、これまでの研究の積み重ねにより、注湯流量や充填量、液体落下位置の制御などは高精度化が進みつつある。これらのことから、低コスト・省スペースかつ高精度・高性能な鑄造材料用試験装置としても利用の展開の可能性があると考える。

また、前述でカメラやレーザによる注湯状態の非接触計測システムの開発を課題として挙げたが、今後この計測システムが実現すれば、既に自動注湯装置下部に設置されているロードセルや注湯システムの現在位置、鑄型ラインの状態などに加えて、注湯状態に関する情報が増えることとなる。これまでの自動注湯システムの研究においては、計測によって得た情報、もしくはそこから観測器による推定値を用いてフィードバック制御を行ってきた。一方、近年ではディープラーニングを用いて学習・解析した情報を基にロボットの制御を行わせる例が増えつつあり、特に画像処理・画像計測分野においてはその力を発揮している。大学や研究機関の学術研究だけでなく、企業の研究開発においても制御工学へディープラーニングを導入した例がある。自動注湯プロセスは、溶湯の温度変化に伴う物性値変化や凝固による形状モデルパラメータの変動など、注湯制御における制御対象の不確かさのみならず、同じように鑄造プロセスを実施したとしても、製品欠陥が発生することが多い。新たな計測アプローチを構築し、得られる情報を巧みに解析し、鑄造プロセスの制御に取り入れることにより、信頼性の高い、高精度な自動注湯プロセスを達成するシステムの構築を期待する。

掲載論文と国際会議

原著論文

1. 野田善之, 伊藤敦, 寺嶋一彦, 鈴木新雄, 太田和弘: “取鍋傾動式自動注湯機における出湯口ガイドをもつ取鍋からの流出液体の落下位置制御”, 鋳造工学, Vol. 85, No. 9, pp. 574-583, 2013.
2. 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”, 鋳造工学, Vol. 88, No. 1, pp. 27-36, (2016).
3. Atsushi Ito, Yoshiyuki Noda, Ryosuke Tasaki, Kazuhiko Terashima: “Falling Position Control of Outflow Liquid Considering Lower Position of Pouring Mouth with Collision Avoidance for Tilting-type Automatic Pouring Machine”, Material Transactions, Vol. 58, No. 3, pp. 485-493, 2017.
4. Atsushi Ito, Ryosuke Tasaki, Makio Suzuki, Kazuhiro Ohta, Kazuhiko Terashima: “Tilting Motion Control of Automatic Pouring Ladle with Weir for Liquid Vibration Suppression”, International Journal of Automation Technology, Vol.11, No. 4 pp. 645-656, 2017.

査読付きプロシーディングス

1. Atsushi Ito, Yoshiyuki Noda and Kazuhiko Terashima, “Outflow Liquid Falling Position Control by Considering Lower Ladle Position and Clash Avoidance with Mold”, 2012 IFAC Workshop on Automation in the Mining, Mineral and Metal Industries (IFAC MMM 2012), Gifu, Japan, pp. 240-245, 2012.
2. Atsushi Ito, Yoshiyuki Noda and Kazuhiko Terashima, “High-Precision Liquid Pouring Control While Keeping Lower Ladle Position and Avoiding Clash with Mold”, 2012 IEEE Multi-Conference on System and Control (IEEE MSC 2012), Dubrovnik, Croatia, pp. 246-251, 2012.
3. Atsushi Ito, Ryosuke Tasaki, Makio Suzuki, Kazuhiro Ohta and Kazuhiko Terashima, “Optimum Trajectory Generation for Lower Position Pouring and Outflow Liquid Falling Position Control”, the 71st World Foundry Congress, Bilbao, Spain, (7 pages), 2014.
4. Atsushi Ito, Ryosuke Tasaki, Makio Suzuki, Kazuhiro Ohta and Kazuhiko Terashima, “Sloshing Suppression Control during Backward Tilting Motion of Pouring Ladle with Weir”, the 13th Asian Foundry Congress, Hanoi, Vietnam, pp. 347-352, 2015.

5. Atsushi Ito, Ryosuke Tasaki, Makio Suzuki, Kazuhiro Ohta and Kazuhiko Terashima, “Tilting Motion Control of Automatic Pouring Ladle with Weir for Liquid Vibration Suppression”, the 72nd World Foundry Congress, Nagoya, Japan, O-162 (2 pages), 2016.

参考文献

- [1] 石川紫, 唐牛聖文, 竹内庸夫, 蓑毛康太郎, 大塚宜寿, 野尻喜好, 柳沢幸雄: "砂型鑄造工場作業場内の臭気性・有害性化学物質", 大気環境学会誌, Vol. 44, No. 3, pp. 166-173, 2009
- [2] W. Lindsay: "Automatic Pouring and Metal Distribution Systems", Foundry Trade Journal, February 10, pp. 151-176, 1983
- [3] 寺嶋 一彦, 浜口 雅史, 兼重 明宏: "鑄物工場自動化のための制御設計技術と応用", 鑄造工学, Vol. 69, No. 3, pp. 257-265, 1997
- [4] 寺嶋一彦: "鑄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
- [5] E. Neuman and D. Trauzeddel: "Pouring Systems for Ferrous Applications", Foundry Trade Journal, July, pp. 23-24, 2002
- [6] Y. S. Lerner: "Ironing Out the Pouring Options", Modern Casting, No. 93, Vol. 11, pp. 44-46, 2003
- [7] 寺嶋一彦, 三好孝典, 野田善之: "21 世紀の鑄造工場に必要な革新的オートメーション技術", 鑄造工学, Vol. 81, No. 8, pp. 400-408, 2009
- [8] E. Tabatabaei: "Automatic Pouring of Molten Metal by Utilizing Real Time Vision Based Control System", Ductile Iron News, Issue No. 1, 2000
- [9] W. Pflug and E. Tabatabaei: "Coffee, Tea, ... or Molten Metal", Foundry Management & Technology, July, 2002
- [10] S. Paranjape and P. D. Chaubal: "Automatic Pouring Systems Boosts Output at Mahindra Hinoday Ind", Metalworld, June, pp. 24-27, 2010.
- [11] H. Yasunaka, K. Taniguchi, M. Kokita, and Takeshi Inoue: "Surface Quality of Stainless Steel Type 304 Cast by Twin-roll Type Strip Caster", ISIJ International, Vol. 35, No. 6, pp. 784-789, 1995
- [12] 南 雄大, 山下 健, 藤原 敏一, 斎藤 元啓, 高橋 啓二, 小川 兼司: "鑄鋼のストッパー注入における流量制御による品質改善事例", 日本鑄造工学会 第 169 回全国講演大会, 東京都市大学 世田谷キャンパス, 東京, p. 123, 2017

- [13] H. Doisy: "Predictive Control: One Step ahead in Automated Pouring with a Stopper", 62nd Indian Foundry Congress, 2014
- [14] G. Lowback: "Combining Vision and Laser Pouring for High Performance", Foundry Management & Technology, January, 2010
- [15] W. R. Pflug: "An Overview of the Automated Pouring Process", 62nd Indian Foundry Congress, 2014
- [16] V. I. Dubodelov, V. K. Pogorsky, and M. S. Goryuk, "Magnetodynamic Mixer-Batcher for Overheating and Pouring of Cast Iron", Proc. 9th International Symposium on Science and Processing of Cast Iron, pp. 481-486, 2009
- [17] 三浦 孝, 杉浦 肇, 松宮 演義: "圧送式自動注湯機の出湯精度について", 鋳物, Vol. 41, No. 9, pp. 745-749, 1969
- [18] 橋本 洋次, 村田 秀明: "水道用銅合金鋳造工場の立上げ", 鋳造工学, Vol. 72, No. 11, pp. 729-732, 2000
- [19] 大中 逸雄, 大山 昌一, 千々岩 健児: "平面誘導型電磁ポンプを利用した注湯機の起動特性とポンプ幅効果について", 鋳物, Vol. 45, No. 2, pp. 112-120, 1973
- [20] M. Grundelius and B. Bernhardsson: "Control of Liquid Slosh in an Industrial Packaging Machine", IEEE International Conference on Control Application, Vol. 2, pp.1654-1659, 1999
- [21] H. Takahara, S. Tamura, J. Fukuda, Y. Hikita, and K. Kimura: "Free Vibration Analysis of Multi-Surface Liquid Motion in a Rectangular Tank with Different Surface Areas", Journal of Environment and Engineering, Vol. 6, No. 2, pp. 340-351, 2011
- [22] H. Takahara, K. Hara, and T. Ishida, "Nonlinear Liquid Oscillation in a Cylindrical Tank with an Eccentric Core Barrel", Journal of Fluids and Structures, Vol. 35, pp. 120-132, 2012
- [23] 勝部展夫, 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
- [24] 勝部展夫, 永井正夫: "傾動式自動注湯機の液面制御に関する研究: 第2報, 搬送中における容器傾動入力による予見制御の提案", 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 67, No. 658, pp. 1792-1798, 2001
- [25] 勝部展夫, 永井正夫: "傾動式自動注湯機の液面制御に関する研究: 第3報, 傾動制御系と液面制御系の協調制御", 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 68, No. 670, pp. 1747-1752, 2002

- [26] M. P. Tzamtzi, F. N. Koumboulis, and M. G. Skarpetis: "On the Controller Design for the Outpouring Phase of the Pouring Process", 6th WSEAS International Conference on CIRCUITS, SYSTEMS, ELECTRONICS, CONTROL & SIGNAL PROCESSING, pp. 270-277, 2007
- [27] M. P. Tzamtzi, F. N. Koumboulis, N. D. Kouvakas, and M. G. Skarpetis: "Robustness in Liquid Transfer Vehicles with Delayed Resonators", WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS, Vol. 7, No. 11, 2008
- [28] 浜口雅史, 茂木裕彦, 寺嶋一彦, 野村宏之: "境界要素解析に基づく液体タンクの最適搬送制御", 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, No. 9, pp. 1442-1451, 1995
- [29] 浜口雅史, 山本正樹, 寺嶋一彦: "曲線軌道における円筒容器内液体搬送のモデリングと制御", 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 62, No. 601, pp. 114-121, 1996
- [30] 浜口雅史, 寺嶋一彦: "バッチ間の静止液位変化を考慮した溶湯タンク搬送制御", 鑄造工学, Vol.69, No.3, pp. 213-220, 1997
- [31] 矢野賢一, 小黒直樹, 寺嶋一彦: "時間, 周波数使用を考慮したハイブリッド整形法による制振起動制御", 計測自動制御学会論文集, Vol. 37, No. 5, 403-410, 2001
- [32] 矢野賢一, 寺嶋一彦, 川岸博伸: "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
- [33] R. Shibuya, H. Okatsuka, Y. Noda, and K. Terashima: "Transferring and Tilt Motion Control of the Liquid Container to Suppress Sloshing by Using Generalized Predictive Control Method", 2011 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, E6-2, 2011
- [34] 岡塚尚, 渋谷涼太, 野田善之, 松尾芳樹, 寺嶋一彦: "液体容器搬送システムにおけるモデル予測制御を用いたスロッシングの抑制", 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 77, No. 783, pp. 108-120, 2011
- [35] 渋谷涼太, 岡塚尚, 野田善之, 寺嶋一彦: "液体容器搬送システムにおける振動予測手法を用いた傾動をともし制振搬送制御", 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 1, 2013
- [36] 篠原一寛, 森本博幸: "自動注湯機の開発", 自動車技術, Vol. 46, No. 11, pp. 79-85, 1992.
- [37] 佐藤二郎, 吉田健逸: "メルポ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
- [38] 松田政夫, 頃安貞利: "注湯機の傾動軸迅速昇降装置による流量最適化の試み", 鑄造工学, Vol. 69, No. 3, pp. 207-212, 1997

- [39] 松田政夫, 頃安貞利: "傾動軸迅速昇降自動注湯機による湯口系溶湯流れの実験的研究", 鑄造工学, Vol. 69, No. 9, pp. 731-736, 1997
- [40] 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
- [41] 松田政夫, 頃安貞利: "自動注湯機の傾動軸 2 段昇降装置による初期流量増大化の試み", 鑄造工学, Vol. 71, No. 7, pp. 443-448, 1999
- [42] 東海茂, 山本邦昭, 橋本義雄: "自動注湯機の開発による注湯改善", 鑄造工学, Vol. 82, No. 1, pp. 47-52, 2010
- [43] 矢野賢一, 杉本祐, 寺嶋一彦: "傾動式自動注湯機における湯口カップ内液面レベル制御", 鑄造工学, Vol. 74, No. 3, pp. 223-229, 2002
- [44] 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", 機械学会論文集 (C 編), Vol. 70, No. 694, pp. 1750-1757, 2004
- [45] 野田善之, 寺嶋一彦: "傾動式自動注湯システムにおける注湯流量モデルと逆モデル", 機械学会論文集 (C 編), Vol. 72, No. 722, pp. 3147-3154, 2006
- [46] Y. Noda, Y. Matsuo, K. Terashima, and Y. Zheng: "A Novel Flow Rate Estimation Method using Extended Kalman Filter and Sensor Dynamics Compensation with Automatic Casting Pouring Process", Preprints of 17th IFAC World Congress, pp. 710-715, 2008
- [47] 栗山嘉文, 前田将宏, 矢野賢一, 道岡裕也: "アルミニウム合金の重力鑄造における多段注湯制御入力最適化", 鑄造工学, Vol. 82, No. 9, pp. 531-537, 2010
- [48] 日下部龍, 山田実: "繰り返し制御による自動注湯機の流量制御", 第 54 回自動制御連合講演会, pp. 1714-1717, (2011).
- [49] 辻 高明, 野田 善之, 寺嶋 一彦, 太田 和弘, 鈴木 新雄: "実用取鍋を有する傾動式自動注湯機へ適用可能なパラメータオンライン同定の開発と注湯高精度化", 日本鑄造工学会 全国講演大会講演概要集, Vol. 164, p.33, 2014
- [50] Y. Noda, M. Suzuki, and K. Ohta: "High-precision Automatic Pouring Machine with Adaptive Control Parameters", Proceedings of World Foundry Congress 2016, O151, 2016
- [51] K. Terashima, K. Yano, Y. Sugimoto, and M. Watanabe: "Position Control of Ladle Tip and Sloshing Suppression during Tilting Motion in Automatic Pouring Machine", 10th IFAC symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, pp. 182-187, 2001

- [52] 福嶋隆輔, ”傾動式自動注湯装置による取鍋流出流体の落下位置制御”, 豊橋技術科学大学 学部論文, (2008).
- [53] 福嶋隆輔, ”ビジュアルフィードバックを用いた注湯落下位置制御”, 豊橋技術科学大学 修士論文, (2010).
- [54] Chim Samnang: ”砂型プレスキャストにおけるスプラッシュ抑制と短時間鑄込みを実現する注湯流量パターンの導出”, 豊橋技術科学大学 学部論文, 2008
- [55] S. Chim, Y. Noda, K. Terashima, and K. Hashimoto: ”Modeling and Analysis of Pouring Flow Rate to Prevent the Splash with Tilting-Type Ladle”, the 12th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, pp. 53-58, 2007
- [56] A. Ito, Y. Noda, and K. Terashima: ”High-Precision Liquid Pouring Control While Keeping Lower Ladle Position and Avoiding Clash with Mold”, 2012 IEEE Multi-Conference on System and Control, pp. 246-251, 2012
- [57] M. Birkhold, C. Friedrich, and A. Lechler: ”Automation of the Casting Process using a model-based NC Architecture”, IFAC-PapersOnLine, Vol. 48, Issue 17, pp. 195-200, 2015
- [58] A. Csiszar, M. Birkhold, K. Terashima, and A. Lechler: ”Generation of Optimal Trajectories for a Pouring Robot Considering Control Ssystem used in Industry”, the 72nd World Foundry Congress, O-162, 2016
- [59] 末木裕太, 野田善之, 鈴木薪雄, 太田和弘: 取鍋傾動式自動注湯機における湯こぼれを最小化する取鍋位置の最適化, 日本鑄造工学会第 168 回全国講演大会概要集, p. 133, 2016
- [60] Y. Sueki, Y. Noda, M. Suzuki, and K. Ohta: ”Optimal Positioning of Ladle in Automatic Pouring Machine in Consideration of Maximum Entry Liquid Volume into Sprue”, Proceedings of The 6th Korea-Japan Conference for Young Foundry Engineers, pp. 38-39, 2016
- [61] Y. Sueki and Y. Noda: ”Optimal Positioning of Ladle in Automatic Pouring Machine in Consideration of Pouring Liquid Accurately into Sprue”, ”Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics”, pp. 897-903, 2017
- [62] R. Shibuya, R. Tasaki and K. Terashima: ”Modeling and Analysis on Stream-Tube of Pouring Flow with a Pair of Multi-Pendulum in Self-Transfer-Type Automatic Pouring Robot”, 71st World Foundry Congress, 2014
- [63] 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

- [64] M. Barron: "Model-based Control of Mold Level in a Continuous Steel Caster under Model Uncertainties", Control Engineering Practice, Vol. 6, Issue 2, pp. 191-196, 1998
- [65] 北田宏: "Q-パラメータアプローチによる連続鋳造機鋳型内湯面レベル周期性変動の制御", 計測自動制御学会論文集, Vol. 39, No. 5, pp.487-493, 2003
- [66] H. Kitada and M. Oka: "Q-Parameter Design Control for Periodic Mold Level Fluctuation of Continuous Caster", Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers, Vol. 39, No. 5, pp. 487-493, 2003
- [67] 浅野一哉, 北田宏: "熱き鉄に挑んだ制御技術者たち", 計測と制御, Vol. 42, No. 4, pp. 336-337, 2003
- [68] T. Watanabe, K. Omura, M. Konishi, S. Watanabe, and K. Furukawa: "Mold Level Control in Continuous Caster by Neural Network Model", ISIJ International, Vol. 39, No. 10, pp. 1053-1060, 1999
- [69] 渡辺俊彦, 大村佳也子, 古川和寛, 渡辺省三, 小西正躬: "スライディングモード制御による連続鋳造機の非定常操業時における湯面レベル制御系の改善", 計測自動制御学会論文集, Vol. 36, No. 10, pp.884-886, 2000
- [70] M. Kim, S. Moon, C. Na, B. You, Y. Kueon, D. Lee, J. Lee, and J. S. Lee: "Molten Steel Level Controller Based on Disturbance Observer with Time-delay Compensation", ISIJ International, Vol. 51, No. 2, pp. 256-261, 2011
- [71] Tan Ling Cheik: "自動注湯プロセスにおける湯口カップ内流動解析による注湯流入条件の最適化", 豊橋技術科学大学 学士論文, 2014
- [72] 金澤賢一, 河内僚, 矢野賢一, 根本泰則, "重力鋳造における溶湯の飛散低減を目的とした湯口カップ形状最適化", 日本鋳造工学会 第167回全国講演大会概要集, 室蘭工業大学, 北海道, p. 105, 2015
- [73] 杉田裕介, 松下左京, 大関隆寛, 並木明夫: "視覚フィードバックを用いたロボットアームによる液体注ぎ動作の研究", 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 in 浜松, 2A1-F02, 2012
- [74] 巻渕有哉, 申富饒, 長谷川修: "実世界における一般問題解決システムの提案とそのヒューマノイドロボットへの実装", 電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J93-D, No.6, pp. 960-977, 2010
- [75] 田崎良佑: "サービスロボットのための液体マニピュレーションと制振搬送", GCOE シンポジウム 東京 2012 「グローバルリーダーを目指した”センシングアーキテクト”の育成」, 2012

- [76] 関啓明, 柴山智志, 神谷好承, 足津正利: "非ホロノミック移動体の形状を考慮した実用的な障害物回避 -ポテンシャル法の長方車体への適用-", 精密工学会誌, Vol. 74, No. 8, pp. 853-858, 2008
- [77] 後藤佑貴, 水野直樹: "遺伝的プログラミングによるポテンシャル関数の自動生成に関する研究 - ロボットの経路計画問題への応用 -", 日本機械学会 東海支部 第 61 期総会講演会講演論文集, 2012
- [78] 鈴木薪雄, 寺嶋一彦: "天井クレーンのポテンシャル法を用いた三次元パスプランニング", 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 5, pp. 728-736, 2000
- [79] 鈴木薪雄, 寺嶋一彦: "障害物回避と振れ止めのためのクレーンのセミオート制御", 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 67, No. 660, pp. 2543-2550, 2001
- [80] 竹本充志: "ハプティック制御による旋回クレーンのオペレータ支援システムの開発", 豊橋技術科学大学 修士論文, 2006
- [81] 河地勇登, 山田学: "車両型移動ロボットの任意形状障害物回避に関する一手法", 第 53 回自動制御連合講演会, pp. 732-737, 2010
- [82] 太田修司, 安井基, 山田学: "三次元空間における任意形状障害物を回避する目標経路の設計法", 日本機械学会 東海支部 第 61 期総会講演会講演論文集, 2012
- [83] 森康夫, 水上雅人, 武士俣健: "剛球または水滴の水面への落下および水流により発生する音の研究 (第 1 報, 剛球と水滴の場合)", 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 53, No. 487, pp. 894-902, 1987
- [84] 森康夫, 水上雅人, 武士俣健: "剛球または水滴の水面への落下および水流により発生する音の研究 (第 2 報, 水流の場合)", 日本機械学会論文集 (B 編), Vol. 53, No. 487, pp. 903-910, 1987
- [85] 高木強治, 後藤眞宏, 波平篤, 関谷明, 峯岸雄一, 長嶺拓夫: "越流堰からの落水によって発生する低周波騒音の特徴と低減工法", 農工研技報, Vol. 211, pp. 171-185, 2011
- [86] E. Sambuco, and J. A. Whitehead: "Hydraulic Control by a Wide Weir in a Rotating Fluid", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 73, Part 3, pp. 521-528, 1976
- [87] 井筒勝彦: "落差工の水理学的特性に関する研究 (その 1)", 香川大学農学部学術報告, Vol. 18, No. 1, pp. 70-76, 1966
- [88] K. Izutsu, K. Fukuda, and T. Maekawa: "Studies on the Hydraulic Characteristics of the Drop Structures (III) The Flow Near the Brink Section", 香川大学農学部学術報告, Vol. 21, pp. 149-155, 1970

- [89] H. C. Pumphrey and P. A. Elmore: "The entrainment of Bubbles by Drop Impacts", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 220, pp. 539-567, 1990
- [90] Y. Zhu, H. N. Oguz, and A. Prosperetti: "On the Mechanism of Air Entrainment by Liquid Jets at a Free Surface", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 404, pp. 151-177, 2000
- [91] J. Vanden-Broeck and J. B. Keller: "Weir Flows", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 176, pp. 238-291, 1987
- [92] 岩田勝吉, 長隆郎, 井上道雄: "溶鋼注入流のガス巻き込みのモデル実験", 鉄と鋼, Vol. 68, No. 14, pp. 1922-1931, 1982
- [93] 長 隆郎, 岩田 勝吉, 井上 道雄: "溶鋼注入流の空気酸化の推算", 鉄と鋼, Vol. 68, No. 16, pp. 2461-2470, 1982
- [94] 井上道雄: "溶鋼のガス吸収に関する二, 三の展望", 鉄と鋼, Vol. 70, No. 10, pp. 1315-1324, 1984
- [95] 岡山 敦, 樋口 善彦: "注入流のガス吸収挙動に関する水モデル実験", 鉄と鋼, Vol. 102, No. 11 p. 607-613, 2016
- [96] 今村信人, 後藤久徳, 千田大樹, 藤井孝洋: "自動注湯装置並びに鋳型に対する注湯方法", 特開 2013-244504(P2013-244504A), 2013
- [97] 嘉納秀明: "システムの最適理論と最適化", コロナ社, 1986
- [98] J. Thielke: "Automatic Pouring Systems", ASM Metals Handbook, Vol. 15, 2002
- [99] C. W. Hirt: "SOLA-A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows", Los Alamos Science Laboratory Report, LA-5852, 1975
- [100] C. W. Hirt: "Identification and Treatment of Stiff Bubble Problems", Technical Note, Vol. 35, 1992
- [101] 伊藤敦, 田崎良佑, 寺嶋一彦, 鈴木薪雄, 太田和弘: "取鍋外形形状を考慮した低位置注湯動作の生成と流出液体の落下位置制御", 日本鋳造工学会 第 164 回全国講演大会, p. 34, 2014
- [102] 伊藤敦, 田崎良佑, 鈴木薪雄, 太田和弘, 寺嶋一彦: "堰付き取鍋を用いた自動注湯機の溶湯振動抑制制御", 日本鋳造工学会 第 167 回全国講演大会, p. 6, 2015
- [103] 伊藤敦, 田崎良佑, 鈴木薪雄, 太田和弘, 寺嶋一彦: "堰付き取鍋の溶湯振動制御を考慮した自動注湯プロセスの湯切り動作設計", 日本鋳造工学会 第 168 回全国講演大会, p. 134, 2016
- [104] A. Ito, R. Tasaki, M. Suzuki, K. Ohta, and K. Terashima: "Optimum Trajectory Generation for Lower Position Pouring and Outflow Liquid Falling Position Control", the 71st World Foundry Congress, 2014

- [105] A. Ito, R. Tasaki, M. Suzuki, K. Ohta, and K. Terashima: "Sloshing Suppression Control during Backward Tilting Motion of Pouring Ladle with Weir", the 13th Asian Foundry Congress, pp. 347-352, 2015
- [106] A. Ito, R. Tasaki, M. Suzuki, K. Ohta, and K. Terashima: "Tilting Motion Control of Automatic Pouring Ladle with Weir for Liquid Vibration Suppression", the 72nd World Foundry Congress, O-162, 2016
- [107] N. C. Singer and W. P. Seering: "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, No. 1, pp. 76-82, 1990
- [108] W. Aribowo and K. Terashima: "Cubic Spline Trajectory Planning and Vibration Suppression of Semiconductor Wafer Transfer Robot Arm", International Journal of Automation Technology, Vol.8, No.2, pp. 265-274, 2014
- [109] J. A. Nelder and R. Mead: "A simplex method for function minimization", Computer Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 308-313, 1965

謝辞

本論文は、2011年4月から2017年1月までに遂行された研究をまとめたものであり、多くの先生方のご指導と多くの方々のご協力の賜物であります。ここに感謝の意を表します。

指導教員である豊橋技術科学大学 工学部 機械工学系 教授 寺嶋一彦先生には、傾動式自動注湯機の研究開発に関わる制御システムの構築という、やりがいのある研究テーマを頂き、プロセス開発に関わる基礎から理論応用までわたる制御工学の知識をご教授いただきました。本テーマの難しさの一つは、学術研究として取り組むべき面と、産学連携として結果を示してゆくべき面の二面性であると感じておりましたが、その上で研究者としてどのように考え、研究に取り組めばよいのかなど、遂行してゆく中で非常に多くのことをご指導いただきました。また、自身が将来研究者としてどのような心構えでいるべきか、どのようにリーダーシップを取るべきかなど、人格面においても様々なことを教えていただきました。そして、十数回にわたる国際会議・国内学会における研究発表、新東工業株式会社におけるMOT研修、テーラメイド・バトンゾーンコースへの参加、制御工学や鋳造工学に関わるセミナーや研究部会、工場見学に至るまで、多くの議論や社交の場、知識を得る場を与えていただき、見聞を広められたことに厚くお礼を申し上げます。

豊橋技術科学大学 工学部 機械工学系 准教授 三好孝典先生、助教 田崎良佑先生、エレクトロニクス先端融合研究所 准教授 真下智昭先生、人間・ロボット共生リサーチセンター 特任准教授 三枝亮先生をはじめとする諸先生方からは、研究だけでなく多方面でご指導をいただいたことに深く感謝の意を表します。

また、本論文の審査委員を務めていただき、有益なご助言をくださいました豊橋技術科学大学 工学部 機械工学系 教授 内山直樹先生、准教授 小林正和先生に厚くお礼を申し上げます。

そして、本研究および成果の実用化の取組みにおいて、多大なるご助言・ご協力をいただいた、新東工業株式会社 太田和弘様、牧野泰育様、鈴木新雄様、戸田貴弘様、藤和電気株式会社 阪野厚一様にお礼を申し上げます。

山梨大学 工学部 機械工学科 准教授 野田善之先生には、学部研究において厚く研究指導をしていただき、その後も学会などの場で自動注湯研究に関して多くの有益なご助言をいただきました。そして今日に至る、博士課程への進学のかっけをくださったことに深く感謝を申し上げます。

母校である沼津工業高等専門学校 本科 電子制御工学科 准教授 大庭勝久先生には、卒業研究時に研究の実施方法の基本や学術研究・工学研究の面白さをご教授いただきました。また卒業後も研究者として、私人として数多くのご助言をくださったことに感謝の意を表します。

また、3年間互いに切磋琢磨し、取り組むテーマは異分野ながらも研究内容に関する議論や研究者としてのモチベーションについて共に討論を交わした博士修了生 Abdul Halim Bin Ismail

氏に感謝の意を表します。

そして、公私の別なくご助言をくださいましたシステム制御研究室の皆様に、特にシステムダイナミクスグループ・鑄造制御班，博士修了生 渋谷涼太氏，修士修了生 杉浦孝典氏，Natalia Restrepo 氏，田代陽平氏，高子貴仁氏，小林達也氏，渡辺勇樹氏，学部卒業生 Tan Ling Cheik 氏，名誉研究員 岡塚尚氏，前研究生 Benjamin Fröhlich 氏，Philipp Oetinger 氏，在校修士学生 岡崎龍登氏，Ho Duc Tho 氏，妹尾秀人氏，Le Anh Dung 氏，東海林新樹氏，学部生 谷口和輝氏，馬場隼祐氏，Leong Choon Yip 氏に心から感謝申し上げます。

最後に，勉学・研究に専念する学生生活を暖かく見守ってくれた家族に深く感謝します。

皆様の多大なるご支援の下，今日まで研究活動を遂行してこられたことに深い感謝の意を表すると共に，今後は私が培ってきた知識と経験を基に社会と多くの方々に貢献してゆく所存です。