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)

勝 部 展 生^{*1}, 永 井 正 夫^{*2}Study of Liquid Surface Wave Control of an Incline-Type
Automatic Pouring Machine
(2nd Report, Proposal of Preview Control by Rotation on Transfer)Hiroo KATSUBE^{*3} and Masao NAGAI^{*3} Hitachi Metals, Ltd., 6010 Mikajiri, Kumagaya-shi, Saitama, 360-0843 Japan

This second report is studies on the methods of the controls of liquid surface wave in the case of an incline-type automatic pouring machine. The incline-type automatic pouring machine has two inputs, transfer for going to pouring place and rotation for pouring into the molds. The model is linear state equation model. When rotation and transfer generate waves, we made a one-mode model. First wave model parameters generated by rotations and transfers are identified by using frequency distribution data and the curve fitting approach, which is the least square method, by using the steepest gradient method. When rotation and transfer generate waves and the transfer pattern is previously known, a preview control method can be applied. The transfer pattern is fixed, so the transfer pattern can be used to reduce waves. The method is calculating the feed forward preview coefficients for rotation by using the optimal partial differential equation. Finally we demonstrated the usefulness of the approach presented in this paper through several control simulations and experiments.

Key Words: Vibration Control, Sloshing, Automatic Pouring Machine, Preview Control, Wave Control

1. 緒 言

鑄造工場における鑄物製品の製造は、鉄の溶けたものである溶湯を満した取鍋を傾け、鑄型に溶湯を流し込むことにより行われている。従来では人により取鍋を傾け、鑄型の湯面を見ながら注湯をしたり、傾動式自動注湯機などが開発され自動化が行われてきた。自動化を行う際、注湯時のタクトの高速化を行い、製造効率を上げる必要がある。高速化を行うことにより、取鍋内の溶湯の波立ちが大きくなりひどいときには溶湯飛散を起こすこととなる。また 1 回の注湯を終了した後、波立ちが残ったまま次の注湯を行うと、溶湯の供給が間欠的になったり、注湯を行う際の供給速度のばらつきが生じる。それらの問題は、鑄物製品の品質に影響を及ぼす。

容器内に入った液体の液面振動制御については、いろいろな方面で研究がされている。耐震設計では、液体の入った容器に対し、地震などの振動が加わったときに、最適制御を用いて揺動により液面の振動を抑え

る研究が行われている⁽¹⁰⁾。また、液体の入ったコンテナ、タンクなどの容器の搬送では、搬送により発生する液面の波立ちを、搬送加速度・速度を制御することにより抑制する研究が行われている⁽²⁾⁽⁷⁾⁽¹¹⁾。さらに搬送と傾動の 2 入力を利用して、搬送時に発生する波立ちの抑制を行う研究も行われている⁽¹⁾⁽⁹⁾。自動注湯の分野では、傾動時に発生する波立ちを、傾動の角加速度を制御することにより波立ちを抑制しながら注湯する研究も行われている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

本報は自動注湯において、搬送と傾動の 2 入力がかかる場合について、ある決められた搬送パターンで搬送される際に、その事前情報を利用した予見制御による傾動入力を用いて、波立ちを抑制する制御方法を提案し、シミュレーションと実験を行い、その有効性を確認した。

2. 傾 動 式 注 湯

注湯機の役割について説明する。鑄型に溶湯を注湯する際、簡単な場合は並べられた鑄型が間欠的に動き、溶湯が入った容器を傾けることにより注湯する方法がある。また鑄型も動きかつ溶湯の入った注湯機が、搬送と傾動の両方が可能な場合もある。注湯機が搬送と傾動の二軸を持っている場合について、図 1 のモデル

* 原稿受付 2000 年 11 月 14 日。

^{*1} 正員, 日立金属(株) (☎ 360-0843 熊谷市三ヶ尻 6010)。^{*2} 正員, 東京農工大学工学部 (☎ 184-8588 小金井市中町 2-24-16)。

E-mail: Hiroo_Katsube@po.hitachi-metals.co.jp

装置により説明をする。

図1下のグラフ中 u_1 は搬送のための加速度入力, u_2 は傾動のための角加速度入力を表し, 横軸が時間とする。図1①が最初の状態では u_1 により②の注湯目標位置に搬送される。その後傾動のための角加速度入力 u_2 により傾動を開始し注湯を行う。

①から②, ②から③の動作中に容器の運動に伴い容器内の液体表面に波立ちが発生する。そこで①から②, ②から③の動作速度を抑え, 安全かつ品質上問題ない範囲内に動作速度を保ったり, ②終了後少し時間

Fig. 1 Conventional method of pouring

Fig. 2 Preview control method

において③の動作に移る方法が実用上取られることが多い。

前回報告では, 傾動により発生する波面の波立ちを, 傾動動作を制御することにより抑制する方法について扱った⁽⁶⁾。図1の③における動作中の波立ちの抑制方法である。

本報では, ①から②までの搬送により発生する液面の波立ちを, 傾動により抑制する方法について扱うこととする。

図2に示すように, ①から②と容器が搬送されることにより液面に波立ちが発生する。その際, 容器搬送のパターンはあらかじめ決めておき, その事前情報を既知の外乱として利用し, 予見フィードフォワードによる傾動を用いた最適予見制御の適用を行う。図2の下図内の搬送加速度 u_1 により搬送が開始する時間よりも t_p 前に, 予見制御に基づき傾動入力加速度 u_2 により容器の傾動を開始する。搬送パターンを考慮してあらかじめ傾動することにより, 搬送により発生する波立ちを打ち消したり, 容器が目標角度に収束しやすい傾きとし, 予見制御とフィードバックを行い波立ちを抑制する。容器の最終目標位置は, 水平位置とする。①で水平角度で開始し, ②に搬送され波立ちが減少するとともに容器が水平角度で静止することとする。

この方法により, 容器の搬送加速度 u_1 を高速で搬送可能にすることができ, 予見制御を用いた傾動角加速度 u_2 により波立ちを抑制することにより, 図2下のグラフに示すように待ち時間が少なく注湯動作に速く移ることができる。

3. モデリングと予見制御方法

図3に示すように記号を定義する。水平軸と容器内の液面となす角度を θ とし, 容器の角度は垂直軸とな

Fig. 3 Definition of wave angle and container

す角 φ とする。また容器の搬送方向を x とする。搬送または傾動により発生する波を、一次モードだけに注目し、式(1)のモデルと仮定する。

$$I_\theta \ddot{\theta} + C_\theta \dot{\theta} + k_\theta \theta = b_{1x} \ddot{x} + b_{2x} \dot{x} + b_{1\varphi} \dot{\varphi} + b_{2\varphi} \ddot{\varphi} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし

I_θ : 波の回転に関する慣性モーメント

C_θ : 波の回転に関する粘性抵抗係数

k_θ : 波の回転に関するばね定数

$b_{1\theta}, b_{2\theta}$: 容器搬送速度, 搬送加速度による波の回転に関する比例係数

$b_{1\varphi}, b_{2\varphi}$: 容器回転速度, 回転角加速度による波の回転に関する比例係数

式(1)左辺は、液面波の波立ちを一次の振子モデルとして取扱っている。

式(1)全体を I_θ で割り整理すると

$$\ddot{\theta} + 2\zeta\omega_1\dot{\theta} + \omega_1^2\theta = b_0\ddot{x} + b_1\dot{x} + b_2\dot{\varphi} + b_3\ddot{\varphi} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし ζ は減衰比, ω_1 は一次モード固有角振動数, b_0, b_1, b_2, b_3 は波の回転に関するモーメントを発生させる比例係数となる。

また容器に関する運動方程式は

$$I_\varphi \ddot{\varphi} = h_2 u_2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし I_φ は容器の回転中心に関する慣性モーメント, u_2 は角加速度入力, h_2 は入力の係数である。

式(2)と同様に变形すると

$$\ddot{\varphi} = b_4 u_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし b_4 は比例係数である。容器と容器内の液体を含めた搬送に関する運動方程式は、

$$(M_c + M_w) \ddot{x} = h_1 u_1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし h_1 は比例係数, M_c は容器質量, M_w は液体質量となる。搬送に関する $\dot{x}, \ddot{x}$ はあらかじめ決められたパターンで、既知の外乱として扱う。式(2), (4)を状態方程式に表すため

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_c &= \begin{bmatrix} \varphi \\ \dot{\varphi} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_c = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & b_2 & -\omega_1^2 & -2\zeta\omega_1 \end{bmatrix} \\ b_c &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ b_3 \end{bmatrix}, \quad b_{cd} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ b_0 & b_1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_{cd} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

とおくと、状態方程式は

$$\dot{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_c \mathbf{x}_c + b_c u_2 + b_{cd} \mathbf{u}_{cd} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ただし $b_4=1$ とし、角加速度 u_2 を直接入力

とした。

次に今回適用した制御方法について述べる。あらかじめ外乱としてわかっている情報を利用して、予見制御をする方法はいろいろ提案されているが、今回は離散化することによる偏微分最適化法⁽⁶⁾を用いることとした。この方法について以下簡単に説明する。式(7)を離散化し

$$\mathbf{x}(i+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(i) + \mathbf{G}u_2(i) + \mathbf{G}_d u_d(i) \quad \dots\dots\dots (8)$$

とする。ただし、 i はサンプリング時刻, $u_2(i)$ は角加速度入力, $\mathbf{G}$ は b_c を離散化したもの, $\mathbf{G}_d$ は b_{cd} を離散化したもの, $u_d(i)$ は u_{cd} を離散化したものである。文献(6)ではエラーシステムによる拡大系を用いているが、本報ではエラーシステムによる差分を減らすため式(8)をそのまま利用する。

評価関数 J を式(9)とする。

$$J = \sum_{k=-M+1}^{\infty} [x^T(k)Qx(k) + u_2^T(k)Hu_2(k)] \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 Q は状態変数の重み, H は入力の重み, M は考慮する既知な未来の外乱のステップ数である。式(9)に対し偏微分最適化法を用いると、サンプル時刻 i における傾動の角加速度入力 $u_2(i)$ は、

$$u_2(i) = F_0 \mathbf{x}(i) + \sum_{j=0}^M F_d(j) u_d(i+j) \quad \dots\dots\dots (10)$$

と計算される。ただし $F_d(j)$ は予見フィードフォワード係数, F_0 はフィードバック係数, $u_d(i+j)$ はサンプル時刻 i での j サンプル未来の外乱で、 $i+j$ 時刻での搬送加速度と速度に相当し、あらかじめ決められている容器の搬送速度・加速度であり、本報の場合は予見可能な外乱となる。式(10)中の各係数は式(11・a)～(11・d)より計算される。

$$F_d(j) = -[H + G^T P G]^{-1} G^T (\xi^T)^j P G_d \quad \dots\dots\dots (11 \cdot a)$$

$$F_0 = -[H + G^T P G]^{-1} G^T P A \quad \dots\dots\dots (11 \cdot b)$$

$$\xi = A + G F_0 \quad \dots\dots\dots (11 \cdot c)$$

$$P = Q + A^T P A - A P G [H + G^T P G]^{-1} G^T P A \quad \dots\dots\dots (11 \cdot d)$$

ただし式(11・d)は離散値系の Riccati 方程式である。

4. 実験装置

図4に今回使用した実験装置の構造を示す。容器の搬送は、ボールネジ式のリニアガイドにサーボモータ1を取付けたもので行い、ストロークは1180 mm、傾動は減速機を備えたサーボモータ2に直接容器を取付けて行った。注ぎ口に近いところを容器の回転中心にするため、回転軸の中心は液体の外側にありかつ容器の中心より離れた位置にある。また搬送は、容器傾動

のための回転系と容器に対し行う。容器は透明の亚克力製で、高さ 400 mm, 幅 300 mm, 奥行き 50 mm である。

水面の波立ちの計測は、容器とともに搬送され傾動に対しては動かない超音波センサにより行った。容器の傾動角度ごとに水面の静止した状態での距離をあらかじめ求めておき、実験時に計測した水面の高さと比較し、波角度 θ に換算をする。使用した超音波センサは、応答速度 38 ms で分解能 1 mm (波角度換算で約 0.6°) であった。図 5 に実験装置の外観写真を示す。

5. シミュレーションおよび実験結果

5.1 実験によるパラメータ同定 前述した実験装置により、水を透明容器の半分の 200 mm まで満たした条件にて今回はすべて実験を行った。

同定に利用したデータと計算結果を図 6 と図 8 に示す。図 6(a) は、あらかじめ決められたパターンで容器を搬送させたときの実験結果であり、傾動は含んでいない。図 6(a) の実験結果より、式(6)中の $\omega_1, \zeta, b_0, b_1$ の同定を行った。パラメータの値は、適当な初期値をあらかじめ決め、最小二乗法に基づいた最急降下法による繰返し計算する方法により求めた。図 6(b) は図 6(a) の同定結果の値によるシミュレーシ

ョン結果である。図 7 は図 6(a) の後半を FFT 処理した結果である。図 7 の結果より、1.6 Hz の一次モードが支配的であることがわかる。同定結果より一次モードの減衰固有角周波数は 1.56 Hz となった。水深 200 mm で幅 300 mm の理論的なスロッシングの一次モードの値 1.58 Hz⁽¹²⁾ と近い値となった。

図 8(a) は、傾動による波立ちのパラメータ b_2, b_3 の値を求めるため、波立ちからの適度なフィードバックにより傾動を加えた実験結果である。図 8(b) は、図 8(a) の実験結果より同定した値と図 6(a) から同定した値によりシミュレーションをした結果である。シミュレーション結果と実験結果の傾向を良く一致さ

(a) Experimental result

(b) Identification result

Fig. 6 Response without control

Fig. 4 Experimental apparatus

Fig. 5 Photo of experimental apparatus

Fig. 7 FFT analysis of wave

せることができた。式(7)のモデルに基づくパラメータの値は

$$\omega_1=9.81, \quad \zeta=0.00734, \quad b_0=-0.9002$$

$$b_1=-10.63, \quad b_2=-14.28, \quad b_3=-4.49$$

であった。

5.2 搬送制御のみによる波立ち抑制 最初比較のため、搬送時の波立ちの抑制方法として用いられる、搬送制御のみによる波立ちの抑制実験結果を示す。搬送加速度入力 u_1 は最適制御理論より

$$u_1(i) = -k_1(x(i) - x_a) - k_2\dot{\theta}(i) - k_3\ddot{x}(i) - k_4\ddot{\theta}(i) \dots (12)$$

とした。ただし x_a は容器の停止目標位置、 k_1, k_2, k_3, k_4 はフィードバック係数で、 $x_a=0.8$, $k_1=2.19$, $k_2=-0.119$, $k_3=2.21$, $k_4=-0.0659$ として実験を行った。実験では、式(12)のフィードバックに微分値が必要でありノイズが増えるため、実際のフィードバック制御にはオブザーバによる値を用いた。

図9(a)にシミュレーション結果を、図9(b)に実験結果を示す。搬送の最初の頃は、目標位置に行くため速度が上がりそれに伴い波立ちが大きい。しかし容器が目標位置に近づくとき搬送速度が落ち、波立ち抑制を行いながらしだいに最終位置に近づいている。その

ため最終位置に落ち着くのにしばらく時間がかかっている。

5.3 傾動制御を用いた波立ち抑制 傾動を波立ちの抑制制御に用いた実験結果を示す。式(10)中の予見フィードフォワード係数 F_d を用いずに、フィードバック係数 F_0 のみを用いた傾動制御により波立ちの抑制制御の実験結果を図10に示す。容器の搬送は、波立ちの制御には利用しないので、目標位置に速く達することができる。また傾動による波立ちを抑える制御を行っているため、容器が動き出した瞬間に発生す

(a) Experimental result

(b) Identification result

Fig. 8 Response with feedback control

(a) Simulation result

(b) Experimental result

Fig. 9 Feedback control by transfer

Fig. 10 Experimental result of feedback control by rotation without preview control

(a) Simulation result

(b) Experimental result

Fig. 11 Preview control

る波立ちのピーク値も低く抑えることが可能となる。ただし評価関数の重みは式(13)とし、フィードバック係数は式(14)となった。

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix}, \quad H = [5] \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$F_0 = \begin{bmatrix} -4.05 \\ 2.89 \\ -3.18 \\ 1.41 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (14)$$

次に、本論文で提案した予見制御を用いた実験結果について述べる。式(10)の予見フィードフォワード係数 F_d を加えた予見制御による波立ちの抑制制御のシミュレーション結果を図 11(a) に、また図 11(b) にその実験結果を示す。予見制御入力 u_1 の値は、 F_d と事前に既知である搬送パターンより計算でき、角加速度入力 u_2 は予見制御入力と式(14)によるフィードバック入力を加えた値となる。図 12 に図 2 下グラフに対応する、あらかじめ決めた搬送加速度入力 u_1 と、図 11(b) に示した実験時における波立ち抑制のための角加速度入力 u_2 を示す。

Table 1 Comparative table

	Feedback control by transfer	Feedback control by rotation without preview	Preview control
Wave peak value (deg)	18	12	7
Settling time(s)	10	5.4	4.7

Fig. 12 Experimental result of input u_2

傾動によるフィードバックだけでなく、さらに予見制御を用いることにより、波立ちのピーク値がフィードバック制御のみに比べさらに抑えられかつ素早い抑制効果が得られることがわかる。表 1 に各方法による波立ちの抑制効果を比較する。表中の制定時間は、容器が傾動開始し $\pm 1^\circ$ 以下になるまでの時間である。波立ちのピーク値、制定時間とも小さく抑制の効果があることが確認された。

6. 結 言

本報では、搬送は希望とする搬送パターンにより高速で行い、傾動のみで液面の波立ちの抑制制御について検討した。特に波立ちの抑制の効果を上げるため、波立ちを容器の傾動角度にフィードバックする傾動制御に加え、搬送の速度、加速度パターンを既知の外乱として扱い、傾動による予見制御を加えることを提案した。さらにこの提案手法についてシミュレーションと実験を行い、その有効性を確認した。最後に、本手法は搬送の高速化と波立ち抑制による品質向上を両立する有効な制御手法と位置付けられれば幸いである。

文 献

- (1) 福田敏男・鈴木明人・柴田碧, 液体容器の液位の振動抑制制御の研究, (第2報, 容器の回転モーメントを考慮した液体搬送時の液位振動制御), 機論, 56-532, C(1990), 3259-3266.
- (2) 浜口雅史・寺嶋一彦・野村宏之, 各種設計条件における液体タンクの最適搬送制御, 機論, 60-573, C(1994), 1668-1675.
- (3) 甲野晃男・寺嶋一彦・前田安郭, 傾動式自動注湯におけ

- る粘性流体の挙動解析と制御, 第39回システム制御情報学会研究発表講演会, (1995-5), 203-204.
- (4) 山浦一人・浜口雅史・寺嶋一彦, 傾動式自動注湯における湯面振動モデリングと制御, 鋳造工学全国講演概要集, (1996-5), 18.
- (5) 勝部展生・永井正夫, 傾動式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), 機論, **65**-634, C(1999), 2345-2351.
- (6) 土谷武士・江上正, デジタル予見制御, (1992), 37-46, 産業図書.
- (7) 浜口雅史・茂木裕彦・寺嶋一彦・野村宏之, 境界要素法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, **31**-9(1995), 1442-1451.
- (8) 兼重明宏・西田真幸・寺嶋一彦, 振動抑制と目標値追従性を考慮したクレーンによる液体コンテナ搬送制御, 機論, **62**-596, C(1996), 1321-1328.
- (9) 竹村茂・矢野賢一・寺嶋一彦, 回転系を加えた液体タンク搬送のロバスト制振制御, 日本機械学会東海支部第45期総会講演会講演論文集, (1996-3), 291-292.
- (10) 小泉孝之・辻内伸好・南力, 揺動制御を用いたタンク液面のスロッシング抑制に関する研究, 日本機械学会講演論文集 No. 974-1(関西支部第72期定時総会講演会), (1997-3), 10-31-10-32.
- (11) 金子成彦・本吉智之・難波宏良, 最適制御理論による液体搬送車の液位振動制御に関する研究, 日本機械学会振動・音響新技術シンポジウム講演論文集, (1995-6), 124-126.
- (12) 日野幹雄, 流体力学, (1967), 92-93, 朝倉書店.