流動層による粉粒体冷却プロセスのオンライン制御[†]

寺 嶋 一 彦*・野 村 宏 之*・坂 野 武 男*・野 村 貞 夫**

On-Line Control of Particle Cooling Process by Fluidised Bed

Kazuhiko TERASHIMA*, Hiroyuki NOMURA*, Takeo BANNO* and Sadao NOMURA**

This paper presents an on-line optimal control system of particles cooling process in fluidised bed. First, the characteristics of on-line electric-resistent type moisture sensor has been investigated for the direct feedback of controlled variables. Second, the multivariable control systems were constructed for the case that measured variables are coincident with the output ones to be controlled and the sampling interval is long. LQI and decoupling PID control approaches are applied to both temperature and moisture control of the foundry sand discharged from fluidised bed. Thirdly, the observer theory was applied to multivariable control systems for the case that measured variables are not coincident with the controlled variables and the sampling interval is short. Finally, a series of control experiments have been conducted to compare the usefulness of several control system used in this paper, and an optimal on-line control system has been proposed.

Key Words: multivariable control, LQI control, decoupling PID, observer, electric-resistent type moisture sensor

1. 緒 言

高品質な铸造製品を得るには、それに対応した最適な鑄型が用意される必要がある。そのためには型砂の管理が重要であり、型砂冷却工程で回収型砂（ホットサンド）を適正な温度および含有水分率に制御する必要がある。従来、鑄物用型砂の冷却機構については、かなり研究されてきている^{1)~6)}が、プロセスモデルに

基づいた鑄物砂最適冷却制御の研究は未確立である。そのため実ラインでは経験則に頼ることが多く、一般性のある制御方式の開発が望まれている。前報^{7),8)}では、冷却モデルを確立し、制御変数の一つである砂温の観測による LQI フィードバック制御系を構成した。その結果、砂温制御は良好であったのに対し、水分率制御は不十分で問題を残した⁸⁾。

本報では、制御精度の向上をめざし、ハードとソフトの両面を考慮することにより、オンライン最適冷却システムの基礎を確立することを目的とする。まず、前報で行えなかった型砂水分率のオンライン計測を、電気抵抗式水分計を用いて実現することにした。市販の装置⁹⁾を、実験室用ミニプラントで使用できるように測定法の変更を行い、測定精度を調査した。つぎに、観測変数が制御変数に一致し測定サンプリング周期が長い場合、および、観測変数が制御変数に一致せず測定サンプリング周期が短い場合の両者に対して、オブザーバ併合の LQI 制御や非干渉化 PID 制御により多変数制御の考察を行った。最後に、実験によりそれら制御系の評価を行い、最適なオンライン制御系について検討を行った。

2. 実験装置および方法

用いた実験装置は前報⁹⁾に示した流動層熱交換装置と同じであり、Fig. 1 に装置の概略を示す。実験は、連続冷却により行う。実ラインでの回収砂を想定し、高温湿り砂は、前報と同様にウエットサンドフィーダ（wet sand feeder）部で適当な砂温 T_{si} 、と含有水分率 M_{i1} に調整し、一定の供給速度 q_s で冷却塔に供給される。型砂は、塔下部から、流量 q_a 、温度 T_{ai} の流入空気によって流動化される。一定の滞留時間の後、型砂は砂温 T_s 、含有水分率 M となり、砂供給速度と同速度で排出される。また、流動層での流動状態は定常として考察するため、実験開始と同時に供給砂量と排出砂量が等しくなるように、本実験開始前に塔

† 第 30 回自動制御連合講演会で発表（昭 62・10）

* 豊橋技術科学大学工学部 豊橋市天伯町字雲雀ヶ丘 1-1

** NKK 横浜市鶴見区末広町 2-1

* Faculty of Engineering, Toyohashi University of Technology, Toyohashi

** NKK, Yokohama

(Received December 5, 1987)

(Revised March 16, 1988)

Fig. 1 Sand cooling model

内に室内温度と同程度の約 200 g の湿り砂を充填させている。

供給型砂の砂量, 含有水分率, 砂温に関する実験条件は前報と同様に $q_s = 180 \sim 200$ (g/min), $M_{s1} = 0.5 \sim 1.5$ (%), $T_{s1} = 50 \sim 90^\circ\text{C}$ とした。操作量である流入空気量 q_a , 添加水分率 M_{i2} の操作は, おおの空気量制御アクチュエータのバルブ調節, および添加水分器の水頭調節により行った。なお, 操作量の大きさは, 流動化条件と, 用いるアクチュエータの規模により制約を受け, 前報と同様 $q_a = 65 \sim 200$ (Nl/min), $M_{i2} = 0 \sim 2.5$ (%) である。

供給型砂と排出型砂の温度は, 流動層の入口と出口に取り付けられた熱電対により, 連続的に測定する。排出型砂の水分率測定は電気抵抗式水分センサにより間欠的にオンライン測定する。また同時に熱風式迅速乾燥器によりオフライン測定する。コントローラ部の演算装置としては, YHP 9816 コンピュータ (16 ビット) を用いた。なお, 用いた砂は前報と同じ 6 号けい砂であり, 砂の平均直径 (重量平均径¹⁰⁾) は 0.20 mm である。

3. 水分センサについて

オンライン用の水分センサとして, 電気伝導度, 電気容量, マイクロ波, 赤外線, 超音波などの特性を利用したものがある。本研究では計測原理上, 簡便で安価な電気抵抗式を用いることにし, その特性を調べた。

Fig. 2 は, 使用水分センサの概略図を表わす。なおここで, 水分センサのアンプ部は市販⁹⁾のものである。測定原理は電極間に介在する型砂の, 含有水分率に伴う電気抵抗変化 (電流変化) を整流器を通して, 直流電圧として検出するものである。

電極部は長方形ステンレス電極板とし, 電極板の大きさは, 60×90 mm とした。本研究の流動層実験装置

Fig. 2 Electric-resistant type moisture sensor

では, 排出砂量は 200 g/min と少ないため, 文献 9) の図 2 に示されたように平板電極の砂層への垂直挿入方式では検出力が弱く, つぎのように測定法を変更した。

(1) 流動層出口でサンプルした型砂 30 g を下部電極板の上に, 高さをほぼ均一にして置く。

(2) 重量 400 g の絶縁性錘 (ベークライト) を取り付けた上部電極板を, ベークライト容器の枠上端から落下させることにより一定の衝撃力を加え, 型砂の充填密度を高くする。

(1), (2) の手順で測定した場合の出力電圧の時間応答を調べた結果, 出力電圧は上部電極板が落下してから約 5 秒までは急激に立ち上がり, その後はコンデンサ効果のため徐々に大きくなることがわかった。したがって, 出力電圧の変化が小さくなる 10 秒後の値を測定値とした。

上の手順に従って目標値近傍の砂温 $16 \sim 28^\circ\text{C}$, 水分率 $0.5 \sim 2.0$ % の実験条件のもとで, 型砂の水分率 M (%) と水分センサの出力電圧 E (V) の関係を調べた。ただし, 型砂の水分率は, 電圧測定した型砂を直ちに乾燥器に入れ重量変化を測定して求めたものである。測定結果からつぎの相関式が得られた。

$$M = 0.57 \times E - 1.45 - 0.50 \times 10^{-1} \times (T_s - 22) \quad (1)$$

ただし, 右辺第 3 項は温度補正項である。なお, 本センサの測定精度は約 $\pm 0.2\%$ であった。

4. プロセスモデル

著者らは, 流動層を用いた湿り砂の冷却プロセスに対する数学モデルをすでに確立している⁹⁾。詳細については省略し, モデル式を付録に記述しておく。

付録の非線形方程式 (A. 1) ~ (A. 5) を, 基準点 ($T_s = 20^\circ\text{C}$, $M = 1\%$, $T_{s1} = 70^\circ\text{C}$, $q_s = 0.2$ kg/min, $M_{i1} = 1\%$) で線形化し, 離散化するとつぎの離散時間線形方程式が得られる。

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Dv(k) \quad (2)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (3)$$

ただし、状態変数 $x(k+1)=[\Delta T_s, \Delta T_a, \Delta T_r, \Delta M, \Delta X_a]^T$, 操作変数 $u(k)=[\Delta q_a, \Delta M_{12}]^T$, 外乱変数 $v(k)=[\Delta T_{si}, \Delta q_s, \Delta M_{11}]$, 観測変数 (制御変数) $y(k)=[\Delta T_s, \Delta M]^T$ とし、 Δ は基準値からの偏差を表す。また、行列 A, B, C, D は (A.1)~(A.5) 式の線形化により一意的に決まる。なお、 T_s : 排出砂温, T_a : 層内空気温度, T_r : 攪はんロッド温度, M : 排出砂水分率, X_a : 層内空気絶対湿度であり, q_a : 供給空気量, M_{12} : 制御用添加水分率, T_{si} : 流入砂温度, q_s : 流入砂量, M_{11} : 流入砂水分率である。

5. LQI と非干渉化 PID 制御による制御設計

本研究では、まず観測変数が制御変数 T_s, M と一致する場合の制御設計を行う。制御変数が連続的 (サンプリング周期が短い) に測定できることが望ましいが、現実にはセンサの問題上必ずしも実現できず間欠的な測定 (サンプリング周期が長い) になる場合も多い。その場合について、時間遅れを考慮し、5.1 節では LQI により、5.2 節では非干渉化 PID により考察を行う。つぎに、5.3 節において、制御変数の一部がやむをえず測定できない場合や、測定できてもちろ長いサンプリング周期になる場合について、オブザーバ理論を駆使し上記と別の観点から考察を行う。

5.1 オブザーバ併合の LQI 制御 (観測変数が制御変数と一致し、サンプリング周期が長い場合)

まず、オブザーバ併合の LQI 制御について簡単に述べ、つぎに測定時間遅れを考慮した場合について述べる。評価関数をつぎのとおり与える。

$$J = \sum_{k=0}^{\infty} \{e(k+1)^T Q e(k+1) + (\Delta u(k))^T R (\Delta u(k))\} \quad (4)$$

ただし、 $e(k+1)=r(k+1)-y(k+1)$, $\Delta u(k)=u(k)-u(k-1)$ であり、 $r(k+1)$ は、制御変数 (観測変数) $y(k+1)$ の目標値である。また重み行列 Q, R は 2 行 2 列の正行列である。LQI 制御方式^{11), 12)}により、最適操作量は次式によって与えられる。

$$u(k) = -K_I \sum_{i=0}^k e(i) - Kx(k) \quad (5)$$

フィードバックゲイン (K_I, K) は、リカッチ方程式の定常解を求めることによって得られる。測定できない状態変数は、次式で与えられるオブザーバによって推定する。

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}^0(k+1) + F(y(k+1) - \hat{y}^0(k+1)) \quad (6)$$

ただし、

$$\hat{x}^0(k+1) = A\hat{x}(k) + Bu(k) \quad (7)$$

$$\hat{y}^0(k+1) = C\hat{x}^0(k+1) \quad (8)$$

ここで、変数に “0” をつけた記号は、暫定値を表す。なお、 $\hat{x}^0(0)=0$ とする。

本研究では、有限整数オブザーバ¹²⁾を用いる。(6) 式中のオブザーバゲイン F は通常の方法で求める。ただし、外乱の情報は未知であるとし、オブザーバの (7) 式中には外乱の項を付加しない。

なお、重み行列 Q, R は前報⁸⁾にならう、 Q は単位行列、 $R = \text{diag}(10^{-2}, 10^{-6})$ とした。

さて、試作した水分センサでは間欠的にしか測定できない。型砂のサンプリング時間 20 秒、試作水分測定器への型砂のセッティング時間 20 秒、測定時間 10 秒であり、制御演算時間は瞬時になされるものの、制御則 (5) 式が実現不可能であり、約 1 分の時間遅れを考慮しなければならない。すなわち、時刻 kT において $y(k)$ が未知であるので $y(k-1)$ を用いて制御しなければならない。そこで、 $(k-1)T$ 時刻での $y(k-1)$ を時刻 $(k-1)T \leq t < kT$ 区間において測定し、その実測値 $y(k-1)$ からオブザーバ (6)~(8) 式を用いて $\hat{x}(k-1)$ を求める。さらに、プラントモデル (7) 式に基づき 1 時点を進める。この予測された $\hat{x}^0(k), \hat{y}^0(k)$ を用いて入力 $u(k)$ をつぎのように決定する。

$$u(k) = -K_I \left\{ \sum_{i=0}^{k-1} e(i) \right\} + [\hat{y}^0(k) - r(k)] \} - K[A\hat{x}(k-1) + Bu(k-1)] \quad (9)$$

Fig. 3 において (a) は、サンプリング周期 1 分で、測定遅れのない理想の場合における LQI 制御のシミュレーション結果である。外乱 (T_{si}, q_s, M_{11}) の介入に対して、2, 3 ステップで制御変数が目標値に安定している。それに対して試作水分センサの 1 分間の測定遅れを考慮して (9) 式に基づいて行ったオブザーバ併

Fig. 3 LQI control simulation with and without time-delay for observation

合の LQI 制御シミュレーションの結果が、同図の (b) である。(a) と比べて速応性が 1 ステップ遅れているが良好な安定性が得られた。

5.2 非干渉化 PID による制御

非干渉化を行った PID 制御系の構成を Fig. 4 に示す。 $G_p(s)$ が制御対象の伝達関数行列で、 $G_c(s)$ が $G_p(s)$ の相互干渉を取り除く前置補償器である。 $G(s)$ は、主制御器からみた見かけ上の制御対象である。本研究では逆ナイキスト配列法により、操作量 v と出力 y 間の非干渉化¹³⁾をはかった。前置補償器 $G_c(s)$ とし

$$G_c(s) = G_p(0)^{-1} = \begin{bmatrix} -0.0134 & -0.06993 \\ -1.965 \times 10^{-4} & 0.9960 \end{bmatrix}$$

とおいた。

非干渉度をみるため、流動層冷却システムの伝達関数行列 $G_p(s)$ と $G(s)$ について、逆ナイキスト線図とゲリシュゴリン帯¹³⁾を調べ、その結果を Fig. 5, 6 に示す。 $G_p(s)$, $G(s)$ の逆行列を $\hat{G}_p(s)$, $\hat{G}(s)$ と表わすと、Fig. 5 より $\hat{G}_p(s)$ は対角列優勢であり、もともとのシステムの相互干渉は小さいことがわかる。ただし、 z_{ii} は $G_p(s)$ の対角成分であり、 $d_i \triangleq \sum_{j \neq i}^2 |z_{ji}|$ は対角成分以外の列要素の和である。したがって、 $d_i(j\omega)/|z_{ii}(j\omega)|$ ($i=1, 2$) で各 ω に対する相互干渉度を表わす。また Fig. 6 から、前置補償器を用いること

Fig. 4 Decoupling PID control system

Fig. 5 Inverse Nyquist array and Gershgorin band for transfer function matrix ($G_p(s)$)

Fig. 6 Inverse Nyquist array and Gershgorin band for transfer function matrix ($G(s) = G_p(s)G_c(s)$)

によりほぼ全周波数にわたって相互干渉が小さくなっていることがわかる。たとえば、 $\omega=6$ のとき Fig. 5 の (a) では相互干渉の度合いが $d_1/|z_{11}| = \hat{\theta}_{221}/|\hat{\theta}_{p11}| = 0.47$ であるが、Fig. 6 (a) では、前置補償器により 0.21 となり干渉度が減少している。なお、 $\hat{\theta}_{pij}$ は行列 $\hat{G}_p$ の (i, j) 要素を表わす。したがって、 $\hat{G}(s)$ の対角優勢が保証されたので、各ループ独立に単一ループ制御系の理論を用いる。主制御器は、次式で示される位置型 PID¹²⁾とする。

$$v_i(k) = K_{Pi}e_i(k) + K_{Ii} \left[\sum_{j=-\infty}^{k-1} \{ (1/2)(e_i(j-1) + e_i(j)) \} + (1/2)(e_i(k-1) + e_i(k)) \right] + K_{Di}(e_i(k) - e_i(k-1)), \quad (i=1, 2) \quad (10)$$

ただし、 K_{Pi} , K_{Ii} , K_{Di} (比例、積分、微分) の制御パラメータはシミュレーションによって求めた。

観測変数は排出砂温 (y_1)、水分率 (y_2) である。5.1 節と同様に、水分測定の流れのため、制御則に遅れを考慮する必要がある。そこで、 $y_i(k-1)$ の観測値から (7), (8) 式のモデル式を用い 1 ステップ先の $y_i(k)$ を予測し、その値より $e_i(k) = r_i(k) - y_i(k)$ を求め (10) 式に代入する。Fig. 7 に時間遅れを考慮した PID 制

Fig. 7 PID control simulation with time-delay for observation

御のシミュレーション結果を示す。ただし外乱はFig. 3とまったく同一にしている。PIDによるものも、5.1節のLQI制御とほぼ同等の成果をおさめているが、若干安定性が悪いようである。これは、PIDの最適なパラメータが、LQIのように一意的に決められず、決定することがむずかしいことと、状態変数に基づいて設計するLQIと比べ、きめ細かさに劣るものと考えられる。しかし、特に差異が大きいとはいえない。

5.3 オブザーバ併合のLQI制御（観測変数が制御変数と一致せず、サンプリング周期が短い場合）

二つの制御変数のうち、排出砂温は観測できるが、排出砂水分が観測できない場合を考察する。外乱が変動する場合に、前報のようにオブザーバのモデルに外乱を付加させなければ状態変数の推定値は偏差を生じ、さらに制御変数が測定されなければLQI制御によっても定常偏差を生じる⁸⁾。この改善策として、ここでは測定しやすい変数の連続的測定を利用して制御変数の推定精度の向上を考える。

まず外乱 v を、熱電対により容易に測定できる外乱と測定できない外乱に分け(2)式をつぎのようにする¹³⁾。

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + D_1v_1(k) + D_2v_2(k) \quad (11)$$

ただし、 $v_1 \in R^1$: 測定できる外乱 (T_{si}), $v_2 \in R^2$: 測定できない外乱 (q_s, M_{i1}), $x \in R^5$ 。

外乱を状態変数に組み込み、新しい変数として

$$x_e = [x, v_1, v_2]^T; x_e \in R^7$$

とすると、(11)式は

$$x_e(k+1) = A_e x_e(k) + B_e u(k) \quad (12)$$

ただし、

$$A_e = \begin{bmatrix} A & D_1 & D_2 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, B_e = \begin{bmatrix} B \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

また、観測変数 $y(k)$ を $y_e = (y, v_1)^T$ の新しい変数を用いて表わすと

$$y_e(k) = C_e x_e(k), C_e = \begin{bmatrix} C & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

となる。外乱を状態変数に組み込んだ拡張された状態空間モデル¹⁴⁾ (12), (13)に対して(6)から(8)と同様に、容易にオブザーバを構成できる。

オブザーバを構成できる必要十分条件である (C_e, A_e) の可観測性を満たすためには、観測変数 y_e として、状態変数である排出砂温 T_s , 層内空気温度 T_a , また測定できる外乱である流入砂温 T_{si} とすれば良いことがわかった。さて、本研究ではオブザーバゲイン

Fig. 8 LQI control simulation with observer, in case that observed variables are different from controlled variables

F_e を、固有ベクトル配置法¹⁵⁾によって求めた。測定できない未知外乱 (q_s, M_{i1}) がステップ状に変化しても5, 6ステップで状態変数の推定値と真値が一致することがシミュレーションによりわかった。ただし、外乱が変化すると真値に収束するまでにかなり推定値が変動する。したがって、この収束前の推定値を用い(5)式のLQIにより制御すると不安定になる。そこで、制御のサンプリング周期 T_e に対し、観測のサンプリング周期 T_s を小さくとり、推定値が制御サンプリング周期の間に真値に収束させるようにした。 T_e を1.5分, T_s を0.15分(9秒)とした制御シミュレーション結果をFig. 8に示す。ただし、本プロセスの場合、砂温の時定数が約30秒⁸⁾に対して観測の周期が9秒であることから、演算時間などの遅れは無視した。図よりわかるように、5.1節で行った制御変数の直接フィードバックによるものと同程度の制御性能が得られている。 T_e, T_s の周期をもっと短くすることは可能であり、その場合には、さらに制御性能が向上するものと推定される。

6. 制御実験結果と考察

前節で考察した制御方法の有効性について調べるために、実験室用流動層冷却装置を用い制御実験を行った。まず、5.1, 5.2節で行った、制御変数である排出砂温と水分の測定に基づくLQI, PID制御実験を行った。サンプリング周期は前節の理由により1分で行った。なお、空気量および水分量についてのアクチュエータの操作は、現段階での自動操作による実験信頼性の都合により、すべて手動で行った。手動操作に

においては、個人誤差を防ぐため、全実験を通じておのおの同一人物が行った。特に、操作時点では、速やかに、かつ正確にアクチュエータを調節することに注意した。なお今後操作の自動化に際しては、アクチュエータの動作遅れをソフトにより考慮しなければならない。また操作精度のメンテナンスにも注意を払わなければならない。

Fig. 9 は LQI によるものであり、Fig. 10 は非干渉化 PID によるものである。なお、図中の M に関する結果で、○印はオンライン水分センサで測定したものであり、×印は、熱風式迅速乾燥器でオフライン測定したもので実験終了後判明したものである。また、破線は砂温、水分率についての各時刻での目標値を表わす。LQI については、温度制御は、外乱の変動に対しても、目標値変更に対しても安定性のよい良好な結果が得られている。水分制御に関しては、多少の変動はあるものの、目標値に追従している。PID についても、ほぼ良好に目標値近傍に制御できている。Fig. 9, 10 より両者を比較すると、PID では、外乱である流入砂温 T_{si} が、LQI の制御実験条件と比べて変動が小さいにもかかわらず、砂温制御に関して安定性が少

し悪い。これは、シミュレーションでも示したとおりである。一方、水分制御については、Fig. 3, 4 のシミュレーションでは LQI のほうが若干安定性がよかったが、実験では両者とも目標値近傍での収束性についての差異は特にはない。目標値近傍での変動の原因は、オンライン用センサの水分計が 0.2% 程度の誤差をもっていることによる。また両者に大きな差がないのは、測定誤差により緻密なアルゴリズムどおりの制御が発揮されていないことによると思われる。なお定量的に制御精度を比較検討するため、Fig. 9, 10 のような各種の実験をおのおの 5 回ずつ行った。いずれも実験時間は 15 分とし、初期値を除くすべてのデータを制御の評価に用いた。目標値に対する温度、水分率の標準偏差をおのおの σ_T , σ_M と表わすと LQI 制御では、 $\sigma_T = 1.12$ (°C), $\sigma_M = 0.20$ (%)、PID 制御では $\sigma_T = 1.24$ (°C), $\sigma_M = 0.22$ (%) であった。また前報の、オンライン水分センサを用いず温度だけの測定による LQI 制御では、 $\sigma_T = 1.55$ (°C), $\sigma_M = 0.30$ (%) であった。本報で用いた LQI, PID の制御結果には顕著な差異はなかったが、LQI のほうがシミュレーション同様若干良好であった。さらに、水分制御については、前報のように大きな定常偏差を生じることなく、LQI, PID 両者とも前報の結果を向上することができ、オンライン制御の基礎を確立できたといえる。特に、本研究のように状態モデルを得ている場合には、制御設計がシステマチックに確立されている LQI のほうが制御ゲインがきめやすく有用であると思われる。

つぎに、5.3 節で示したサンプリング周期を短くし、流入、流出型砂温度、流出空気温度の観測に基づく制御方法で実験を行った。しかしこの場合、推定値が大きく変動し、制御系が不安定となり成功しなかった。そこで、外乱の制御変数におよぼす感度を状態モデル(2), (3)式に基づきシミュレーションによって求めた。その結果、排出砂水分率 M に最も寄与率の高いものは流入砂水分率 M_{i1} であり、流入砂水分率の排出砂温 T_s , 層内空気温度 T_a への影響は、他の条件が一定の場合、 M_{i1} 0.5% の変化に対して、わずか約 0.4°C であることがわかった。5 章のシミュレーションでは測定誤差を考慮していないため、 T_{si} と T_s , T_a のわずかの数値の変化に対してオブザーバにより M_{i1} , そして M を正確に推定できた。しかし、実験においては、型砂の温度が完全には均一でないことや、測定誤差により 1°C 程度の温度誤差はしばしば生じる。すでに述べたように、排出砂温 T_s の 0.4°C の誤差は、流入砂水分率 M_{i1} の推定に 0.5%、また最終的には排出砂温の推定に約 0.5% の誤差をもたらす

Fig. 9 Experimental result of decoupling PID control

Fig. 10 Experimental result of LQI control with observer

ことになり、制御がうまくいかなかったと思われる。したがって、本研究の目標値近傍では、 M_{i1} の T_s , T_a への感度幅が、観測ノイズの幅よりも小さいため M_{i1} , M の推定ができなかったと考えられる。 M_{i1} に関係の強い変数は M であり、その他の変数 (T_s , T_a , T_r , X_a) は感度が弱く、この手法は、本プロセスの目標値近傍では不適當である。妥協策としては、オブザーバゲインを 0 にし、プラントモデル式に T_s , T_a , T_{si} の観測ができる測定値を代入して制御変数を推定すれば良い。ただしこの場合には、測定できない外乱と、モデルの誤差の影響が定常推定誤差として現れてくるので信頼性が確保できない。

以上の結果より、流動層の多変数制御には、制御変数を間欠的にでも観測し、制御を行ったほうがよいといえる。

6. 結 言

本研究で得られた結果はつぎのとおりである。

(1) 電気抵抗式水分センサを用い制御変数を観測変数とし、測定時間の遅れを考慮した 2 入力 2 出力の LQI 制御実験および非干渉化 PID 制御実験を行った。その結果、目標値に対する排出砂温、排出砂水分率の標準偏差は、LQI では 1.12 (°C), 0.20 (%), PID では、1.24 (°C), 0.22 (%) となり、両制御方式ともに良好な制御結果を得ることができ、特にオンライン水分センサを用いなかった前報の制御結果 1.55 (°C), 0.30 (%) を改善することができた。

(2) LQI, PID の制御性能は、本実験条件のもとではほぼ同じであったが、若干 LQI のほうが良好であった。

(3) 本プロセスの場合、制御変数推定のための入出力感度幅が、測定雑音の感度幅より小さいため、間欠的であっても、制御変数を観測変数とすることが信頼性確保のため必要であることがわかった。

最後に本研究の一部は、文部省科学研究費補助金(奨励研究(A) No. 62750210)の援助によるものである。また、水分測定器のアンプについては、新東工業(株)から借用させていただきご教示願った。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 大中, 上村, 千々岩: 鋳物砂の対向空気流による冷却, 鋳物, **43**-10, 893/901 (1971)
- 2) 大中, 喜多, 千々岩: 振動を付加した流動層による鋳物砂の冷却について, 鋳物, **46**-2 124/130 (1974)
- 3) 志村, 春日井, 鈴木: 鋳物砂の自動コントロール, 鋳物, **46**-5, 462/467 (1974)
- 4) J. Morgan: The Cooling of Sand and Casting, Foundry Trade Journal, June 16, 777/787 (1983)
- 5) H. Nomura, K. Terashima and T. Banno: Modelling on Cooling of Hot Sand for Metal Casting, Proc. of IFAC 9th Triennial World Congress, Budapest, Hungary, 1955/1960 (1984)
- 6) H. Nomura, K. Terashima and T. Banno: Cooling of Wet Foundry Sand Using Fluidised Bed, Particulate Sci. and Tech., International Journal, **5**-2, 207/218 (1987)
- 7) K. Terashima, H. Nomura and T. Banno: Modelling and Multivariable Control of Foundry Sand Cooling Process Using Fluidised Bed, Preprints of IFAC 10th Triennial World Congress, Munich, Germany, **2**, 182/187 (1987)
- 8) 寺嶋, 野村, 坂野, 門田: 流動層を用いた粉粒体冷却プロセスの多変数制御, システムと制御, **31**-7, 537/545 (1987)
- 9) 内村勝次: 電気抵抗式水分計の特性に及ぼす外乱因子の研究, 鋳物, **55**-7, 399/405 (1983)
- 10) 久保, ほか: 粉体—理論と応用—, p. 453, 丸善 (1979)
- 11) 成田誠之助: デジタル制御, p. 242, 昭晃堂 (1980)
- 12) 高橋安人: システムと制御 (下巻), p. 354, 368, 378, 岩波書店 (1981)
- 13) 伊藤, 木村, 細江: 線形制御系の設計理論, p. 186, 計測自動制御学会 (1978)
- 14) 木村英紀: 多変数制御系の理論と応用 VI, システムと制御, **22**-10, 606/615 (1978)
- 15) 木村英紀: 多変数制御系の理論と応用 IV, システムと制御, **22**-8, 485/493 (1978)

《付録》 型砂冷却モデルについて

型砂に関する熱収支:

$$C_s(dT_s/dt) = (c_{ps} + c_{pm}M_{i1})q_sT_{si} - (c_{ps} + c_{pm}M) \times q_sT_s + c_{pm}M_{i2}q_sT_{mi} + h_{sa}A_{sa}(T_a - T_s) + Lh_{sa}A_{sa}(X_a - X_s)/c_{pa} \quad (A.1)$$

冷却空気に関する熱収支:

$$C_a(dT_a/dt) = q_a(c_{pa}T_{ai} + LX_{ai} - c_{pa}T_a - LX_a) + h_{sa}A_{sa}(T_s - T_a) + h_{ar}A_{ar}(T_r - T_a) + h_{aw\infty}A_{aw\infty}(T_\infty - T_a) \quad (A.2)$$

攪はんロッドに関する熱収支:

$$C_r(dT_r/dt) = h_{ar}A_{ar}(T_a - T_r) \quad (A.3)$$

型砂に関する物質収支:

$$W_s(dM/dt) = h_{sa}A_{sa}(X_a - X_s)/c_{pa} + (M_{i1} + M_{i2})q_s - Mq_s \quad (A.4)$$

冷却空気に関する物質収支:

$$W_a(dX_a/dt) = q_a(X_{ai} - X_a) + h_{sa}A_{sa}(X_s - X_a)/c_{pa} \quad (A.5)$$

ただし,

$$X_s = 4.4 \times 10^{-3} \times \exp(6.0 \times 10^{-2} \times T_s) \\ h_{aw\infty} = 1/((1/h_{aw})(D_2/D_1) + (D_2/2k_w)\ln(D_2/D_1) + (1/h_{w\infty})) \\ A_{aw\infty} = \pi D_2 l_f$$

ここで、

C ：熱容量 (kcal/°C)

c_p ：比熱 (kcal/kg・°C)

h ：熱伝達係数 (kcal/m²・s・°C)

A ：伝熱面積 (m²)

X_s ：飽和湿度 (kg/kg)

W ：重量 (kg)

L ：蒸発潜熱 (kcal/kg)

k ：熱伝導率 (kcal/m・s・K)

q ：供給速度 (kg/s)

M ：排出砂水分率 (kg/kg)

M_{i1} ：流入砂水分率 (kg/kg)

M_{i2} ：制御用添加水分率 (kg/kg)

T ：温度 (°C)

l_f ：流動層高さ (m)

D_1, D_2 ：冷却塔外径，内径 (m)

であり、添字は、

s ：砂粒子， a ：空気， r ：攪はんロッド，

i ：入口， sa ：砂-空気間，

ar ：空気-攪はんロッド間， $w\infty$ ：壁-外気間，

aw ：空気-壁間， $aw\infty$ ：空気-壁-外気間

を表わす。