

〈論文〉

セメント仕上げプロセスのファジィモデルに基づく
極配置制御系の設計Design of pole placement control system based on fuzzy model
in the multivariable cement grinding process

松尾誠治

東京大学 大学院工学系研究科 地球システム工学専攻

SEIJI MATSUO

Geosystem Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656 Japan

Abstract

Cement grinding process is well-known to require a high energy consumption. In this paper, we introduce the control system based on fuzzy model into a multivariable closed grinding circuit. The grinding process considered here is characterized by its dynamics in relation to the changes of the operating variables and the mill grinding characteristics. The aim was to ensure that the system shows stability as well as good control quality against the process dynamics variation induced by the mill grinding characteristics change. The authors have already constructed the simplified model based on population balance model for the control purpose. The system equations were approximated by fuzzy models. The variation of coefficient k_s of the proposed simplified model was taken into account in the fuzzy partition. Nonlinear state feedback controller was computed on the basis of the so-called pole placement method. The results have been compared with conventional controls, showing that the transient characteristics could be improved by this method. Furthermore, the matrix, which satisfies the stable conditions, was obtained by Tanaka's method with the help of MATLAB and the control systems could maintain plant stability against the mill grinding characteristics change.

Key Words : fuzzy model, pole placement, closed grinding circuit, multivariable control, nonlinear control

1 はじめに

セメント産業は、生産コスト中のエネルギー費の割合が高いエネルギー多消費型産業であり、なかでも、セメント仕上げ工程では総電力消費量の約70%もの電力が消費されている¹⁾。一般に、粉砕プロセスは、投入されたエネルギーのうち粉砕エネルギーとして有効に寄与する部分はわずか1%にもみたく大部分は熱エネルギーとして放出される工程でもあり、

限りあるエネルギーの節約と地球環境保全の両面からもこれまで以上の省電力化が望まれている²⁾。これを改善する手段としては、ボールミル・分級機の改善、予備粉砕機の導入など個々の装置に対する改良が検討されており、例えば予粉砕機の導入は、粉砕能力を50%以上増産し粉砕消費電力を約20%以上のセーブを可能とした³⁾。その一方、プロセス制御の観点から適切な制御方法の改善に対する検討も行われている。

本論文では、プロセス制御の観点からの仕上げミル閉回路多変数システムに対する制御の改善を検討した。すなわち、常時発生する原料の被粉碎性の変化に対し、システムの安定及びエネルギー原単位(kwh/t)の維持を考慮した設計を検討した。これを実現するため、ここではプロセス変動に対しシステムの極を常に維持するファジィモデルを用いた極配置制御を実施した。この系に対しては、既に著者らは制御系設計のための簡略化モデルを提案しており、ファジィモデル構築にはこれらのモデルを利用した。また、安定性の解析に重要な複雑なマトリクス解析には制御支援ソフト MATLAB を用いた。最後に、設計した制御系の有効性をシミュレーションにより検証した。

2 ファジィモデルの概要

ここで示すファジィモデルは、後件部に線形関数または状態方程式を用いる「高木、菅野タイプ」のモデルである⁴⁾。このモデルでは、多入力1出力のファジィモデルは次式で記述される。

Rule L^i : IF

$$x_1(t) = A_1^i, x_2(t) = A_2^i \cdots, x_m(t) = A_m^i$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{THEN } y^i(t) = C_0^i + C_1^i x_1(t) + C_2^i x_2(t) \\ \quad + \cdots + C_m^i x_m(t) \\ \dot{x}_i(t) = A_i x(t) + b_i u(t) \end{array} \right\} \quad (1)$$

ここで L^i は i 番目の規則、 $x_j(t)$ は入力変数 (状態変数)、 A_j^i はファジィ集合、 $y^i(t)$ は i 番目規則からの出力、 C_j^i 、 A_i 、 b_i は後件部パラメータである。

この場合、ファジィモデルの推論値 $\hat{y}(t)$ (または状態量 $x(t)$) は、次式で示す重みつき平均により表される。ここで、 r は規則数、 w_i は入力に対する i 番目規則の適合度である。すなわち、ファジィモデルは、局所的に構築された幾つかの線形モデルを前件部ファジィ集合の適合度に応じ結合する形式のものである。Fig.1 にファジィモデルの概念図を示す。

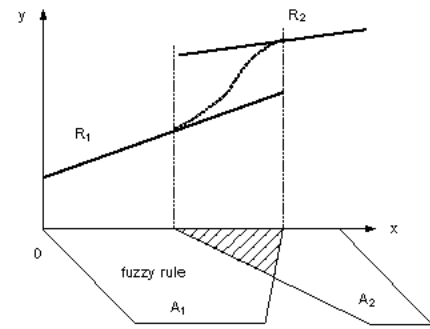


Fig.1 Takagi-Sugeno fuzzy model

$$\left. \begin{array}{l} \hat{y} = \frac{\sum_{i=1}^r w_i y^i}{\sum_{i=1}^r w_i} \\ \dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i \{A_i x(t) + b_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i} \end{array} \right\} \quad (2)$$

$$w_i = \prod_{j=1}^m A_j^i(x_j^0) \quad (w_i \geq 0, \sum_{i=1}^r w_i > 0) \quad (3)$$

3 セメント仕上げ工程の概要

Fig.2 にセメント仕上げ工程の概要を示す。

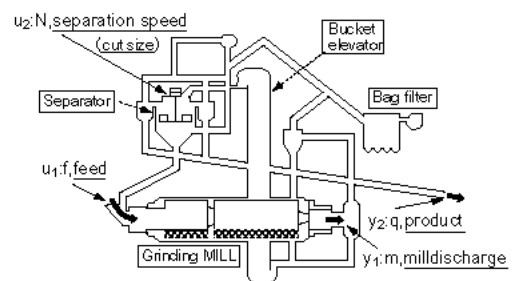


Fig.2 A Schematic diagram of the multivariable cement grinding process

セメント仕上げ工程では、キルンで焼成されたクリンカーと少量の石膏が同時に粉碎され、比表面積が $3,200 \sim 3,300 \text{ cm}^2/\text{g}$ 程度のセメント精粉を作り上げる。このシステムは、主としてミル本体、エアーセパレータ、集塵機、パケットエレベータから構成され閉回路粉碎が行われている。近年は、予備粉碎機がこの閉回路の前に設置され粉碎エネルギーの低

減に用いられる。この系の制御には、これまで設備面の簡便さからバケットエレベータ電力定値制御が採用されていたが、現在は原料の被粉碎性の変化に伴う精粉品質の変化を補償できないなど問題点も指摘されこれを改善する様々な制御方法が検討されている⁶⁾。今回の設計では、操作量にフィード量と分級機回転数(カットサイズ変更のため)、制御量にミル排出量と精粉量をもつ2入力2出力多変数系に対する制御を検討する。

4 対象の数学モデル

1) 物質収支モデルに基づいた厳密な数学モデル

粉碎閉回路のダイナミクスの解析には、従来より物質収支に基づく粉碎マトリックスモデルが用いられており⁵⁾ その概要を Fig.3 に示す。

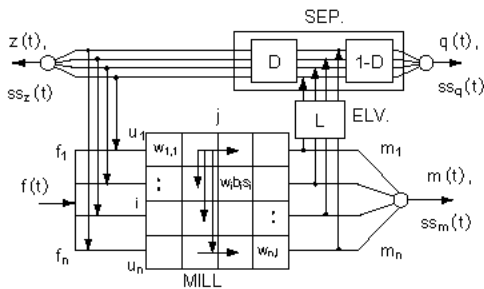


Fig.3 Population balance model in closed grinding circuit

このモデルでは、ミル通過産物 $m(t)$ はバケットエレベータによる遅れ要素 L を通り、分級特性を示すアンダーフローへの配分率 D_i に従って戻り粉量 $Z(t)$ と精粉量 $q(t)$ に分離される。また、ミル内の j 槽における i 区分粒子 $w_{i,j}(t)$ に対する物質収支式は以下のとおりである。

$$\frac{dw_{i,j}(t)}{dt} = u_i(t) - Kw_{i,j}(t) - B_{i+1,i}S_iw_{i,j}(t) + \sum_{k=1}^{i-1} b_{i,k}S_kw_{k,j}(t)$$

$$\begin{cases} u_i(t) = f_i(t) + m_i(t-L) \cdot D_i & (j = 1) \\ u_i(t) = Kw_{i,j-1}(t) & (j > 1) \end{cases}$$

(4)

$$B_{i,j} = \frac{1 - \exp(-x_i/x_j)}{1 - \exp(-1)} \tag{5}$$

$$S_i = k_0(x_i/x_1)^{n_s}, k_0 = f(w, g_f, a_m) \tag{6}$$

$$D_i(x) = \int_{-\infty}^u \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(u_i - \hat{u})^2}{2\sigma^2}\right) du$$

$$u_i = \log x_i \tag{7}$$

ここで S_i は区分粒子が粉碎される確率(選択関数) $B_{i,j}$ は j 区分粒子が粉碎されて i 区分粒子より小さくなる確率(破碎関数)、 $b_{i,k}$ はその密度関数(分配関数)、そして、 D_i は分級特性を表す対数正規分布関数を示す。最終的に求めるミル排出量 $m(t)$ は、これらの各区分の足し合わせにより得られる。また、ミル粉碎特性は、ミル内のホールドアップ量 w 、原料の被粉碎性 g_f 、粉碎助剤 a_m などに変化するが、これらは選択関数 S_i の係数 k_0 の変動により表される。

2) 制御系設計を考慮した簡略化モデル

先のモデルはシステムの解析には有効であるが、制御系設計にはその煩雑さにより適用が難しい。これに対し、著者らは既にこれら物質収支モデルに基づいた制御系設計のための簡略化モデルを提案している⁵⁾ (Fig.4)。

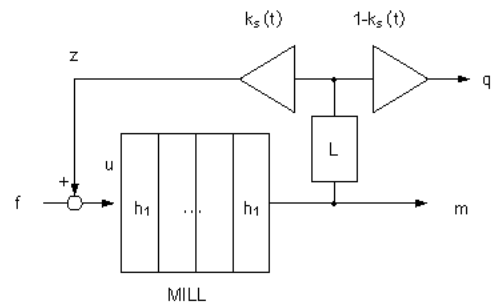


Fig.4 Simplified closed grinding circuit model

このモデルでは、以下に示すように次数低減のため各粒度区分項を省略し、さらにミル排出量から戻り粉量への割合を示す変数 $k_s(t)$ の導入を行った。これにより、ミル粉碎特性 k_0 及び分級機カットサイズ d_0 の変化などに伴う対象の動特性の変動は全てこの変数 $k_s(t)$ の変化に置き換えられる。 $h_j(t)$ は j 槽のホールドアップ量を示す。

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Delta h_1(t)}{dt} &= \Delta f(t) + \Delta z(t) - K\Delta h_1(t) \\ &\vdots \\ \frac{d\Delta h_i(t)}{dt} &= K\Delta h_{i-1}(t) - K\Delta h_i(t) \\ \Delta m(t) &= K \cdot \Delta h_m(t) \\ \Delta z(t) &= K_s(t) \cdot \Delta m(t - L) \\ \Delta q(t) &= (1 - K_s(t)) \cdot \Delta m(t - L) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} K_s(t) &= f(d_0(t), k_0) \cong K(k_0, N)N(t) \\ (N(t) &\propto 1/d_0) \end{aligned} \quad (9)$$

導入した変数値 $k_s(t)$ は、先の物質収支モデルとこの簡略化モデルの定常値の対応から求められる。Fig.5 には、後述する Table.1 のシミュレーション条件のもとミル粉碎特性 (選択関数 S_i の係数 k_0) と分級機カットサイズ d_0 の様々な変更に対する変数 k_s の変化を求めた結果を示す。

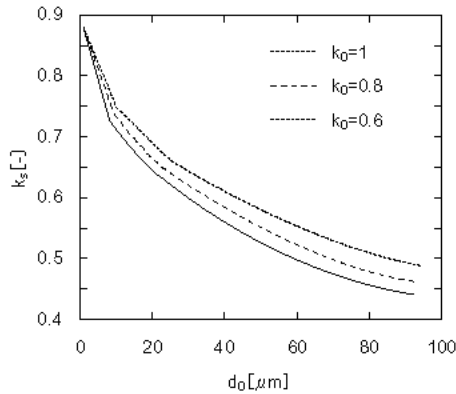


Fig.5 Relation between k_s and separator cut size d_0 for various mill grinding characteristics k_0

5 制御系の設計指針

今回設計を検討するシステムは、操作量にフィード量 f とカットサイズ変更のための分級機回転数 N 、そして、制御量にミル排出量 m と精粉量 q をもつ 2 入力 2 出力多変数閉回路システムである (Fig.2)。操作量に分級機回転数 (カットサイズ変更) が加わることで、原料の被粉碎性変化に対する精粉量変動の改善が可能となるが、操作量自体の変化は系の動

特性の変動を促す。今回の設計では、常時発生する原料の被粉碎性の変化に対しシステムの安定性及び精粉量の維持、すなわちエネルギー原単位を維持すること目的とした。これを実現するため、ここではファジィモデルに基づく極配置制御系の設計を実施した。極配置制御は、本来対象のシステムの極 (固有値) を指定した極に一致させるようにフィードバック制御則を決定するものである。ここでは、さらにファジィモデルが付加されたことで、対象の動特性変化に対しても指定した極が常に維持されることになり制御性能の改善が期待できる。また、この設計はファジィ制御を用いているにも拘らず、系の安定性の解析が可能なのも特徴の一つである⁹⁾。ただし、それには煩雑なシンボリック行列の計算が必要であり解の導出にはこれらの計算を可能とする計算機能力が前提となる。

6 ファジィモデルを用いた制御系設計

設計は、まず 1) 前章で示した簡略化モデルに基づいたファジィモデルを構築した。次に、構築したファジィモデルをもと 2) 極配置を用いたコントローラの設計、及び、3) システムの安定性の解析をそれぞれ行った。

6.1 対象のファジィモデルの構築

ファジィモデルの構築では、入力空間のファジィ分割が重要となる。このプロセスは、原料被粉碎性、ミルホールドアップ量、分級器回転数 (カットサイズ) などの変化により対象の動特性が変化し、本来ならばこれらの状態量変化ごとに多次元の入力空間分割を行わなければならない。しかし、今回は先の簡略化モデルによりこれらの変動を全てミル排出量から戻り粉量への割合を示す変数 $k_s(t)$ に置き換えることが可能なため、入力空間は変数 k_s の変動範囲を応じた一次元空間の分割となる。Fig.6 は、先の Fig.5 をもとに実施した入力空間の分割結果を示す。

このように、今回の分割は変数 k_s の変動範囲に同じ 5 つ空間に分割したシンプルなものとなった。ここで、 A_i は前件部ファジィ集合、 L_i は適用される

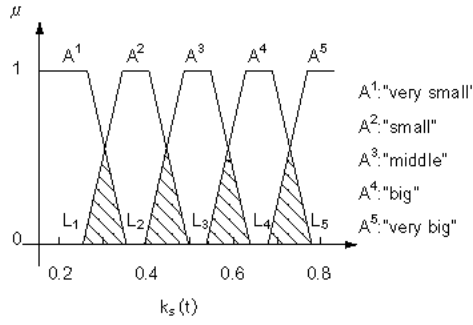


Fig.6 Membership function of each fuzzy set A

ルール, そして, 斜線部は前件部の適合度に応じファジィモデルが構築される部分である. また, Fig.7 は今回の変数 $k_s(t)$ に基づいた分割結果をカットサイズ d_0 及びミル粉碎特性 k_0 の2次元平面に置き換えたものである.

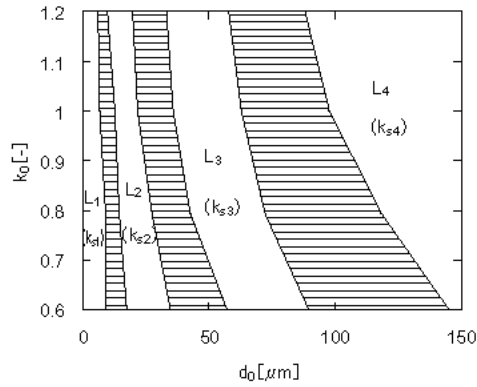


Fig.7 Fuzzy partition of $L_i(k_{s_i})$ on the plane of two inputs k_0, d_0

このような2変数で入力空間を分割することも理論的には可能であるが, 分割数の増大や粉碎特性 k_0 の定量的検出が困難などの理由により実際には難しい. これにより, 今回の変数 k_s を用いた入力空間分割がカットサイズ d_0 及びミル粉碎特性 k_0 の様々な変化に対しわずかなルールで効率よく行われている様子が窺える.

このような入力空間のもと, 最終的に構築されるファジィモデルは以下のようなシンプルなものとなる. ここで, 各ルールにおける局所的線形モデルは, (8), (9) 式の簡略化モデルを k_{s_i} 近傍で Taylor 展開し高次項を無視することで導出された. また, むだ

時間項 L に関しては, (11) 式に示す多項式で近似した.

Rule $L_i : i = 1 \dots 5 :$

$$\text{IF } k_s(t) = A^i$$

$$\text{THEN } \begin{cases} \frac{d\Delta\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{A}(k_{s_i})\Delta\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(k_{s_i})\Delta\mathbf{u}(t) \\ \Delta\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(k_{s_i})\Delta\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(k_{s_i})\Delta\mathbf{u}(t) \end{cases}$$

$$\Delta\mathbf{u} = [\Delta f \Delta N], \Delta\mathbf{y} = [\Delta m \Delta q],$$

$$\Delta\mathbf{x}(t) = [\Delta h_{1'}(t) \dots \Delta h_{i'}(t) \Delta o_1(t) \dots \Delta o_M(t)]^T \quad (10)$$

ただし,

$$\mathbf{A}(k_{s_i}) = \begin{bmatrix} -K & \dots & 0 & 0 & \dots & (\frac{M}{L})^M k_{s_i} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & K & -K & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & K & -M(\frac{M}{L}) & \dots & -(\frac{M}{L})^M \\ \vdots & \ddots & \vdots & 1 & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}(k_{s_i}) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{f_s}{1-k_{s_i}} \\ 0 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}(k_{s_i}) = \begin{bmatrix} 0 & \dots & K & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & (\frac{M}{L})^M (1 - k_{s_i}) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}(k_{s_i}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{f_s}{1-k_{s_i}} \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} & \mathbf{A}(k_{s_1}), \mathbf{B}(k_{s_1}), \mathbf{C}(k_{s_1}), \mathbf{D}(k_{s_1}), k_{s_1} = 0.27 \\ & \mathbf{A}(k_{s_2}), \mathbf{B}(k_{s_2}), \mathbf{C}(k_{s_2}), \mathbf{D}(k_{s_2}), k_{s_2} = 0.39 \\ & \mathbf{A}(k_{s_3}), \mathbf{B}(k_{s_3}), \mathbf{C}(k_{s_3}), \mathbf{D}(k_{s_3}), k_{s_3} = 0.53 \\ & \mathbf{A}(k_{s_4}), \mathbf{B}(k_{s_4}), \mathbf{C}(k_{s_4}), \mathbf{D}(k_{s_4}), k_{s_4} = 0.66 \\ & \mathbf{A}(k_{s_5}), \mathbf{B}(k_{s_5}), \mathbf{C}(k_{s_5}), \mathbf{D}(k_{s_5}), k_{s_5} = 0.80 \\ & K = 0.2, l = 4, f_s = 0.67, M = 4, L = 2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

$$L(s) \cong \left(\frac{1}{1 + \frac{L}{M}s} \right)^M \cong \frac{16}{s^4 + 8s^3 + 24s^2 + 32s + 16} \quad (M = 4, L = 2) \quad (12)$$

6.2 フィードバックコントローラーの設計

1) 極配置を用いたコントローラーの設計

極配置を用いたコントローラーの設計では、始めに定常偏差をなくすためシステムを (13), (14) 式に示すような出力偏差に積分器を付加した系に拡大した。そして、各動作点 (規則) における制御パラメータ F_i は、極配置法⁹⁾ に準じ閉ループシステム $\tilde{A}_i - \tilde{B}_i F_i$ の極が全て指定した極 (この場合 $[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]$) と一致するようパラメータ F_1, \dots, F_5 をそれぞれ決定した。なお、 $[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]$ は $k_s = 0.53$ (規則 L_3) における閉ループシステムを LQ 制御した際の極を採用した。

この結果、最終的に得られるファジィモデルを用いたフィードバック制御器 u は (16) 式のようになる。制御出力は、局所的に求めた5つのフィードバック則を変数値 k_s の前件部ファジィ集合の適合度に応じ結合することで決定される。

$$\frac{d\tilde{x}(t)}{dt} = [\tilde{A}_i - \tilde{B}_i F_i] \tilde{x}(t) + U_i r \quad (13)$$

ここで

$$\begin{aligned} \tilde{A}_i &= \begin{bmatrix} A_i & 0 \\ -C_i & 0 \end{bmatrix}, \tilde{B}_i = \begin{bmatrix} B_i \\ -D_i \end{bmatrix}, \\ \tilde{x}(t) &= \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix}, \quad U_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \\ z(t) &= \int_0^t (r - y(t)) dt, u = -F_i \tilde{x} \end{aligned} \quad (14)$$

Pole placement method

$$F_i : [\tilde{A}_i - \tilde{B}_i F_i] \rightarrow [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]$$

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \begin{bmatrix} f_{111} & \cdots & f_{1n1} & k_{111} & k_{121} \\ f_{211} & \cdots & f_{2n1} & k_{211} & k_{221} \\ \vdots & & \vdots & & \end{bmatrix} \\ F_3 &= \begin{bmatrix} f_{113} & \cdots & f_{1n3} & k_{113} & k_{123} \\ f_{213} & \cdots & f_{2n3} & k_{213} & k_{223} \\ \vdots & & \vdots & & \end{bmatrix} \\ F_5 &= \begin{bmatrix} f_{115} & \cdots & f_{1n5} & k_{115} & k_{125} \\ f_{215} & \cdots & f_{2n5} & k_{215} & k_{225} \\ \vdots & & \vdots & & \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} L^i : i = 1 \dots 5 \quad : \text{IF} \quad k_s = A^i \\ \text{THEN} \quad u(t) = F_i \tilde{x}(t) \end{aligned}$$

$$u(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(t) F_i \tilde{x}_i(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(t)},$$

$$F_i = \begin{bmatrix} f_{11i} & \cdots & f_{1ni} & k_{11i} & k_{12i} \\ f_{21i} & \cdots & f_{2ni} & k_{21i} & k_{22i} \end{bmatrix} \quad (16)$$

2) システムの安定性の解析

非線形対象に対する安定性の解析では、適切なリアプノフ関数をいかに見つけるかが常に問題となる。今回は、田中らにより提案された方法を用い対象の変動を考慮した安定性の解析を行った⁹⁾。これによると、以下に示す条件を満足するような共通の正定対称行列 P が存在するならばファジィシステムは大域的漸近安定となる。

$$\begin{cases} G^T P + P G < 0 & i = j \\ (G + \Delta G_{ij}) P + P (G + \Delta G_{ij}) < 0 & i < j \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} G &= \tilde{A}_i + \tilde{B}_i F_j, \\ \Delta G_{ij} &= \frac{1}{2} (\tilde{b}_i - \tilde{b}_j) (F_j - F_i) \end{aligned} \quad (18)$$

正定対称行列 P は以下のように決定する¹⁰⁾。

Step1) $G_i G_j$ が安定行列であるか否かを計算し正定対象行列 P の非存在性をチェックする。

Step2) (19) 式を二つの写像 η, θ を使うことで (20) 式のように表現する。これにより、正定対称行列 P は (21) 式で求められ、この行列が (22) 式を満足する場合その P_j が求める正定行列 P となる。

$$G^T P G - P = -Q \quad (19)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_{11} & \cdots & g_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n1} & \cdots & g_{nn} \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{1n} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & \cdots & q_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{1n} & \cdots & q_{nn} \end{bmatrix}$$

$$\eta(G)\theta(P) = \theta(Q) \quad (20)$$

$$\eta G = \begin{bmatrix} g_{11}^n - 1 & \cdots & g_{1n}^n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{n1}^n & \cdots & g_{nn}^n - 1 \end{bmatrix},$$

$$\theta(P) = \begin{bmatrix} p_{11} \\ \vdots \\ p_{1n} \end{bmatrix}, \theta(Q) = \begin{bmatrix} q_{11} \\ \vdots \\ q_{1n} \end{bmatrix}$$

$$P = \theta^{-1}(-(\eta(G))^{-1}\theta(Q)) \quad (21)$$

$$G_i^T P_j G_i - P_j < 0 \quad (22)$$

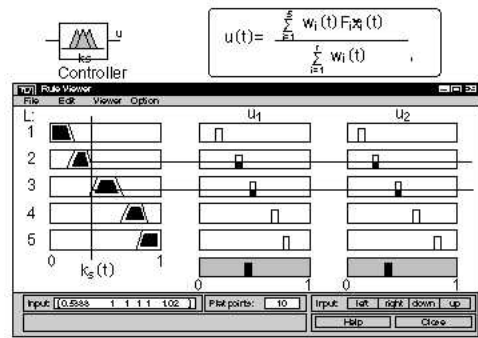
実際にこれらの解析を行う場合、対象が複雑になるに従い (20) 式の数式処理を用いたマトリックス計算に多大な計算能力を必要とする。そのため、これらの計算が可能なのが解導出の前提となる。ここでは、制御支援ソフト MATLAB の数式処理機能を有効に利用することでこれらの計算を試みた。

7 シミュレーション及び結果の考察

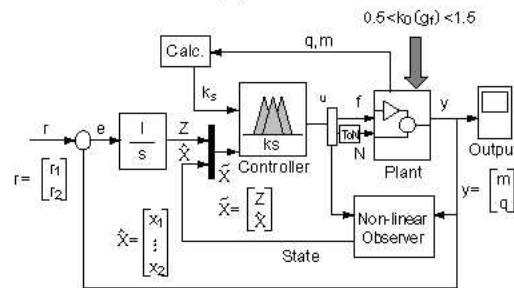
7.1 シミュレーション内容

Fig.8 に最終的な制御系の構成図を示す。

実装においては、入力ファジィ分割を行う変数値 k_s 、決定のためのミル排出量 m 及び精粉量 q の検出 (戻り粉量 z は検出していないため) と、モデルの各状態量を推定する状態推定器が必要となる。制御器内では、変数値 k_s 、推定した状態量 \hat{x} 、出力偏差に積分値 z が入力され、Fig.8(a) が示すように変数値 k_s の各ルールとの適合度に応じ (16) 式に基づいた操作量 $u(f, N)$ が決定される。なお、実際に分級機操作量となる回転数 N は、今回用いる分級機の



(a) Controller



(b) System

Fig.8 Pole placement control system based on the fuzzy model (a) Controller (b) System

カットサイズと回転数の関係より換算された N (図中の「ToN」ブロック)。

今回行った設計法の有効性をシミュレーションにより検証した。Table.1 には現場データをもとに決定した今回のシミュレーション条件を示す。

Fig.9 には、ミル電力とミル排出産物粒度との関係より算出したミルホールドアップ量 w と粉碎特性 k_0 の関係を示す。

また、プラントのシミュレーターには厳密な物質収支モデルを用いた。シミュレーションでは、原料の被粉碎性の変化を粉碎特性 k_0 の変動 ($0.5 < k_0(g_f) < 1.5$) とみなし、その変化に対し設計した制御器が各制御量 (ミル排出量及び精粉量) の応答に与える影響を調べた。

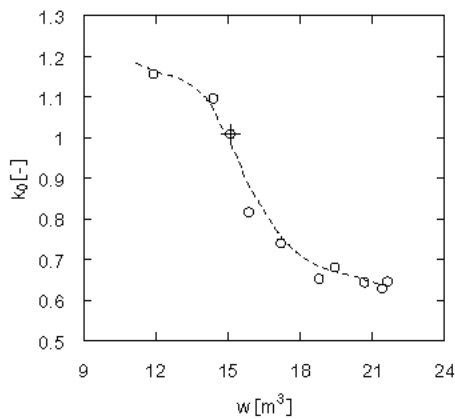
7.2 結果及び考察

1) 制御系の有効性の検証

Fig.10, 11 には、今回のシミュレーション結果の一例を示す。

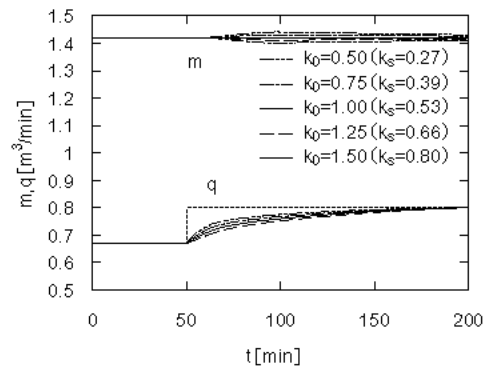
Table 1 Simulation conditions

Mean residence time	: $T = 20$	[min]
Elevator transportation time	: $L = 2$	[min]
Number of divisions, tank	: $n = 12, l = 4$	[-], [-]
Mill size [D*L]	: 3.2×11	[m]
Feed rate f	: 0.67	[m ³ /min]
Particle size density ρ	: $2,750$	[kg/m ³]
Bulk density ρ_0	: $1,130$	[kg/m ³]
Feed size fractions x [μ m]	[9536 4748 2384 1192 596 298 149 74.5 37.3 18.6 9.3 4.7];	
Feed size distribution y [%]	[100 93.37 84.25 71.60 57.57 44.22 32.81 23.72 16.86 11.80 8.20 5.69]	
Cut-size x [μ m]	[125 88 62 44 31 22 16 11 7.8 5.5 3.9 2.8 1.9 1.4 0.9];	
Separation characteristics Zu [-]	[1 0.869 0.742 0.591 0.471 0.358 0.264 0.187 0.130 0.089 0.061 0.043 0.031 0.025 0.022];	
Selection function :	$S_i = k_0(x_i/x_1)^{ns}$ $k_0 = f(w, a_m)$	$x_1 = x(1)$ $ns = 0.4$
Separation characteristics :	$D(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-\frac{(u-\hat{x})^2}{2\sigma^2}) du$ $u = \log x, \sigma = \log \sigma_g$	$x = d_0 = 47$ [μ m] $\sigma = 1$
Severance to underflow :	$D'(x) = (1 - \beta)D(x) + \beta$	$\beta = 0$

Fig.9 Relation between hold up and selection function parameter k_0

これらは、原料の被粉碎性の変化に相当するミル粉碎特性 k_0 を変化させた場合の、精粉量の設定値変更に対するミル排出量及び精粉量の応答特性を示している。

Fig.10 は、制御器に従来の極配置法を用いた場合のミル排出量及び精粉量の応答結果を示す。この場合、従来の方法では粉碎特性の変化に伴う対象動特性の変化に対し、系の安定性は維持されているものの制御性能に関してまでは十分に補償されていない

Fig.10 The responses of the product and the mill discharge in with a set point change in q (Conventional pole placement method)

い様子が分かる。

これに対し、Fig.11 は今回の構築したファジィモデルを用いた設計におけるミル排出量及び精粉量の応答結果を示している。このように、今回の設計では動特性の変化に対し応答特性に変動が見られず制御性能が維持されている様子が確認できる。これは、ミル動特性変化に対し設計したコントローラが指定した極を常に維持したためであり、今回の設計が粉碎特性の変化に対する電力原単位の維持に有効であ

8 まとめ

多変数セメント仕上げミル粉碎閉回路に対し、ファジィモデルを用いた制御系の設計を試みた。この設計では、ミル粉碎特性の変化や操作量である分級機回転数(カットサイズ)の変更に伴う対象の動特性変動に対し、系の安定性及び電力原単位の維持を考慮した設計を実施した。今回の結果を要約すると以下ようになる。

- (1) 多変数かつ非線形な制御対象に対し、ファジィモデルを用いた設計はシンプルでかつ適用の行い易さが窺えた。
- (2) ファジィモデルの構築では、提案した簡略化モデルのミル排出量に対する戻り粉量の割合を示す変数値 k_s を用いることで、煩雑な入力空間のファジィ分割が容易に行えた。
- (3) 安定性の解析で重要なリアプノフ関数の計算では、MATLAB を有効に用いることで複雑なシンボリック行列の計算が可能となり、この系の安定性が確かめられた。
- (4) 今回の設計法の有効性をシミュレーションにより検討したところ、ミル粉碎特性が変動しても、構築した制御器によりシステムの極が維持され安定かつ制御性能が変化しない応答が得られ、この手法の有効性が示唆された。

今後は、この手法の実機への適用、さらに対象の正確な数学モデルが存在しない場合でのファジィモデルの構築法などについても検討する所存である。

謝辞

本研究で参考にした現場データはすべて住友大阪セメント(株)により提供していただいたものである。ここに同関係者各位に厚く謝意を表する。

参考文献

- 1) 伊藤光弘：セメント製造プロセス(その1) クリンカー、粉体工学会誌, 33, 288-297 (1996)
- 2) 坂井悦郎・大門正機：21世紀のセメント製造はどうか、セメント製造シンポジウム報告集, 57, 1-9 (2000)
- 3) 八島三郎：最近の破碎機・粉碎機—その分類と幾つかの基礎的考察—, 粉体と工業, 26, 29-43 (1994)
- 4) 鈴木一如・中森義輝・山中猛：ファジィ予測モデルによるプロセス制御, 第6回ファジィシステムシンポジウム, 27-32 (1990)
- 5) 松尾誠治・岡野靖彦：セメント粉碎閉回路の伝達関数モデルの構築(第1報), 資源と素材, 113, 339-344 (1997)
- 6) 松尾誠治・岡野靖彦：セメント粉碎閉回路の静特性に基づく制御系設計指針(第2報), 資源と素材, 114, 189-194 (1998)
- 7) 姜根沢, 菅野道夫：ファジィモデリング, 計測自動制御学会論文集, 23, 650-652 (1987)
- 8) Kang-Geuntaek; Lee-Wonchang et. al.: Design of TSK fuzzy controller based on TSK fuzzy model using pole placement, *IEEE Int. Confer. On Fuzzy Systems*, 1, 246-251 (1998)
- 9) Kazuo Tanaka and Manabu Sano: A robust stabilization problem of fuzzy control systems and its application to backing up control of a truck-trailer, *IEEE transaction on fuzzy systems*, 2, 119-134 (1994)
- 10) 田中一男, 菅野道夫：ファジィシステムの安定解析とリアプノフ関数の構成法, 日本機械学会論文集(C編), 58, 80-86 (1992)
- 11) Ireland Tomas, Schultz George: Operating results of Kosmos cement's O-SEPA separator for raw grinding", *World cement*, 22, 11-19 (1991)

(受付 2002. 5. 23)

(受理 2002. 6. 29)