論文

鉱物処理プロセスにおける双線形濃度調節 システムのファジィ制御*

定 木 淳¹ 岡 野 靖 彦²

Fuzzy Control of a Bilinear Concentration Regulation System in Mineral Processing

by Jun SADAOKI¹ and Yasuhiko OKANO²

1. Nippon Steel Corporation, 20-1 Shintomi, Futtsu-shi, Chiba 293-8511

2. School of Engineering, The University of Tokyo

This paper describes applicability of fuzzy control to a bilinear (nonlinear) concentration regulation system, which is typically found in mineral processing, focusing on nonlinearity and deadtime. These bring difficulties in realizing control systems.

To express plant characteristics in linguistic form, at first, the authors have carried out a series of plant operating simulations. Consequently, the key features in designing a fuzzy control system are pointed out. The results are summarized as follows:

1. Nonlinearity
 - (a) The concept of gain-scheduling is indispensable, because the process gain and the time constant (mean residence time) depend on equilibrium points.
 - (b) In order to deal with inverse-response which can be found at times, special control rules should be designed.
2. Normalized deadtime L/T (ratio of apparent deadtime to time constant)
 - (a) As a number of cells becomes larger or back-mixing ratio becomes smaller, the ratio L/T becomes larger, where control gain cannot be set large enough.
 - (b) The fact that the magnitude of inverse-response is well characterized by the ratio L/T can be utilized in designing a control system.

The authors have designed a fuzzy control system for the bilinear plant, taking accounts of the points mentioned above. The control rules of the obtained fuzzy controller has a structure satisfying the above features of the term "Nonlinearity." And, the output gain is set suitable for L/T . The fuzzy controller is better than that of conventional PID controller in that the former is applicable to wider ranges of process variable changes. In addition, the fuzzy controller is applicable to various deadtime with one rule table, because distinct relation exists between normalized deadtime L/T and magnitude of inverse-response.

KEY WORDS: Bilinear, Fuzzy Control, Nonlinear Control, Inverse-response, Concentration Regulation, Flow Characteristics

1. は じ め に

制御対象としての鉱物処理プロセスを考えた場合、種々の特徴があげられるが、筆者らは、とくに非線形性に着目し、種々の制御理論を適用した制御系設計法を研究してきた(松尾・岡野, 1996 a, 1996 b)。これらの研究で対象とした非線形システムは、双線形システムと呼ばれるクラスに属し、鉱物処理プロセスの分野で遭遇する濃度調節システムをモデル化したものである。このシステムは、比較的単純な構造をしているにもかかわらず、本質

的な非線形性とそれに起因する逆応答という不安定化要因をもっており、制御が困難になりやすい対象といえる。

一方、制御を困難にする別の要因として、むだ時間の存在があげられる。浮選機や粉砕機などを対象とする鉱物処理プロセスにおいては、物質移動によるむだ時間が存在することが多い。また、流れ特性によって見かけ上のむだ時間が現れることも多い。これらのむだ時間は、線形システムであっても、制御性(制御のしやすさ)に重大な影響を与える。

本報では、鉱物処理プロセスにおける双線形濃度調節システムに対して、制御上の困難をもたらす非線形性とむだ時間に焦点を当て、ファジィ制御の適用性を検討する。筆者らは、これまでにファジィ制御に関して、2槽完全混合槽直列モデルへの適用(定木, 1990)、パラメータ調整へのGAの適用(荻谷・岡野, 1998)を行っており、PID制御などと比較して、対象の非線形性に対し

* 1999年4月2日受付 7月7日受理

1. 正会員 工博 新日本製鉄(株)技術開発本部 主任研究員

2. 正会員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科地球システム工学専攻

(著者連絡先) FAX 0439-80-2741 (新日鉄・技術開発本部)

キーワード: 双線形, ファジィ制御, 非線形制御, 逆応答, 濃度調節, 流れ特性

図1 逆混合モデル

図2 見かけ上のむだ時間Lと時定数T

て効果を発揮することを確認している。本報では、見かけ上のむだ時間が大きい対象にもファジィ制御を適用する。

ファジィ制御研究の最近の動向の一つには、モデルに基づくファジィ制御(田中, 1994)があり、ファジィ制御システムの解析法、設計法に、いわゆる古典制御理論、現代制御理論を利用しようとするものである。もう一つの動向として、本来のファジィ制御である高度知識制御を実現するための研究がある。高度知識制御には、当然のことながら、その実現結果としての非線形制御も含まれる。筆者らは、ファジィ制御の特徴の一つは、非線形制御にあると考えており、本報では、この特徴を積極的に活かすため、プラント運転シミュレーションを実施して、ファジィ制御システムの設計を行う。

2. 双線形濃度調節システム

ここでは、浮選プロセスや粉砕プロセスに見られる双線形濃度調節システム(定木・岡野, 1999)について、その数学モデルを簡単に記述し、非線形効果が顕著に現れている逆応答の例を示す。

2・1 数学モデル^{a)}

図1は、 n 個の混合槽からなる逆混合モデルである。各混合槽の容積は等しく、 V [m^3] とする。1 番目の混合槽には、一定フィードレート $F(\geq 0)$ [kg/s] の粉体と、流量 $Q(t)(\geq 0)$ [m^3/s] の水が供給されている。ただし、近似として、粉体の添加によって流体の体積は変化しないものとする。各混合槽でのバルブ濃度を $c_i(t)$ [kg/m^3] とし、 n 番目の混合槽からは、濃度 $c(t)$ [kg/m^3] のバルブが排出されており、仮定より、その流量は $Q(t)$ である。各混合槽での濃度は一様で、出口での濃度と等しいものとし、粉体粒子の滞留時間に粒度依存性はないものと仮定する。また、逆混合割合を一定値 $\alpha(\geq 0)$ とする。なお、 $\alpha = 0$ で完全混合槽直列モデルと一致する。

このとき

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{1}{V} Q(t) A c(t) + \frac{1}{V} b F \quad (1)$$

$$c(t) = c_n(t) \quad (2)$$

が成り立つ。ここで、行列 A は

$$A = \begin{bmatrix} -1-\alpha & \alpha & 0 & \cdots & 0 \\ 1+\alpha & -1-2\alpha & \alpha & \cdots & 0 \\ 0 & 1+\alpha & -1-2\alpha & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1+\alpha & -1-\alpha \end{bmatrix}$$

ベクトル $c(t)$ は $c_i(t)$ を i 番目の成分とするベクトル、ベクトル b は

$$b = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

である。式(1)は状態方程式、式(2)は出力方程式である。

このシステムは、 $F = Q_0 c_0$ をみたす Q_0, c_0 を用いて

$$\tau = \frac{Q_0}{V} t, u(\tau) = \frac{Q(t)}{Q_0}, x(\tau) = \frac{c(t)}{c_0}, y(\tau) = \frac{c(t)}{c_0}$$

とおくと、次のように無次元化される(ベクトル $x(\tau)$ の i 番目の成分を $x_i(\tau)$ とする)。

$$\frac{dx(\tau)}{d\tau} = u(\tau) A x(\tau) + b \quad (3)$$

$$y(\tau) = x_n(\tau) \quad (4)$$

さらに、 $u_0 A x_0 + b = 0$ をみたす u_0, x_0 を用いて

$$\tilde{u}(\tau) = u(\tau) - u_0, \tilde{x}(\tau) = x(\tau) - x_0$$

とおくと、式(3)は

$$\frac{d\tilde{x}(\tau)}{d\tau} = u_0 A \tilde{x}(\tau) + \tilde{u}(\tau) A \tilde{x}(\tau) - \frac{1}{u_0} b \tilde{u}(\tau) \quad (5)$$

と書ける。ここで、式(5)の右辺第2項は双線形項(非線形項)であり、操作量の変化幅が大きい(したがって状態の変化幅も大きい)場合には、後述するように、右辺第2項による非線形効果が現れる。運転開始、終了など非定常時のように操作量変動が大きい場合、また、定常時でも大きな外乱を補償するために大きな操作量変動が必要とされる場合には、双線形システムの非線形効果が現れ、通常の線形制御では制御困難となる。

2・2 逆応答の例

式(3)を状態方程式、式(4)を出力方程式とする双線形濃度調節システムについて、非線形効果が顕著に現れている逆応答の例を示す。以下では、表1の各モデルを使用する^{b)}。逆混合モデルの各 α は、ステップ応答の誤差の2乗が最小の意味で、 $n = 2$ の完全混合槽直列モデルを $n = 5$ および $n = 10$ の逆混合モデルが近似するように、 $n = 5$ の完全混合槽直列モデルを $n = 10$ の逆混合モデルが近似するように、シミュレーションで探索して選んだ。また、平衡点 $u(\tau) = y(\tau) = 1$ での平均滞留時間が、槽数によらず1となるように正規化してある。

いわゆるプロセス制御などで見られるステップ応答がS字形を示すプラントでは、図2に示すように、応答の形を見かけ上のむだ時間 L と時定数 T で特徴づけることができる。表1の6種類のプラントに対して、操作量を $u(\tau) = 1 \rightarrow 0.5$ と0.5減少させたとき、 L, T を求めると表2のようになる。 L/T は流れ特性を表す指標で、 L/T が大きいほどピストンフローに近づく。また、 L/T は線形プラントでは制御性(制御のしやすさ)を表す指標でもあり、 L/T が大きいほど制御が困難になる。

使用するモデル1~6は、完全混合槽直列モデルからは、 L/T

表1 使用するモデル

	完全混合槽直列モデル			逆混合モデル		
	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4	モデル5	モデル6
槽数 n	2	5	10	5	10	10
逆混合割合 α	0	0	0	1.58	3.95	0.63

a) 本節2・1は、文献(定木・岡野, 1999)からの引用である。

b) 文献(定木・岡野, 1999)とはパラメータ設定が異なる。

表2 見かけ上のむだ時間 L と時定数 T

	完全混合槽直列モデル			逆混合モデル		
	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4	モデル5	モデル6
むだ時間 L	0.28	0.84	1.17	0.40	0.41	0.88
時定数 T	2.72	2.05	1.52	2.28	2.22	1.88
L/T	0.10	0.41	0.77	0.18	0.19	0.47

が小さいもの(モデル1), 比較的大きいもの(モデル3), 中間のもの(モデル2)を選んだ。また, 逆混合モデルからは, 次数(=槽数)は異なるが, 応答(ステップ応答)の形がモデル1, 2と似ているものを選び, L/T の値, 逆応答および制御性の関係を見ることとした。

図3は, モデル1(実線1), モデル2(同2), モデル3(同3)の逆応答の例, 図4は, モデル4, 5(同1), モデル6(同2)の逆応答の例である。制御量 $y(\tau)$ が過渡的に増加しているときに, 操作量 $u(\tau)$ を増加すると逆応答が起きている。また, L/T と逆応答の大きさとは比較的良好な相関を示し, L/T が大きいほど逆応答が大きいことがわかる。逆応答は, 槽数 n が2以上のときに起き, $n=1$ のときには起きない(定木, 1990)。

逆応答が起きた場合, 制御システムからは操作量が不足しているように見えることになり, その結果, 過大な操作を行ってしまう。このように, 逆応答があるシステムは, 不安定になりやすい制御の難しい対象といえる。

3. ファジィ制御システムの設計と制御シミュレーション

ここでは, 無次元化されたプラント(3), (4)に対して, ファジィ制御システムを設計し, 制御シミュレーションを行う。

3・1 ファジィ制御システムの設計方針

設計するファジィ制御システムの仕様として, 次の条件をみたすようにしたい。

- ・与えられた目標値にできるだけ速く追従し, また, 外乱に対してもできるだけ速く補償が行われるようにする(即応性と定常特性の確保)。

- ・その際, オーバershootが大きくなりすぎるなどの好ましくない状況がなるべく起きないようにする(安定性の確保)。

設計に当たっては, プラントのシミュレータを作成し, プラント運転シミュレーションを行って得られた経験と知識を設計に利用した。

3・2 プラントの特性, とくに動特性の言語的表現

図3, 4は, 前述の運転シミュレーション中に得られた結果の一部であるが, その他の結果も合わせて, プラントの特性, とくに動特性に関して得られた知識を言語的に表現すると以下の通りである。

1. 定常状態における操作量 $u(\tau) = u_0$ と制御量 $y(\tau) = y_0$ は反比例する。

2. 操作量 $u(\tau)$ の動作範囲により, また, 応答の方向により, 応答の速さが変化する。操作量が大きいたまは応答が速く, 小さいときは応答が遅い。また, 操作量を増大させるときは応答が速く, 減少させるときは応答が遅い。

3. ある定常状態から, 制御量 $y(\tau)$ のより大きな別の定常状態へ移行する際の応答の速さには, それぞれの元の定常状態に対応した限界がある。

4. 逆応答が起きる場合があり, 制御を著しく困難にする。

1.は, 実際の物理量では, 定常状態の流量と濃度が反比例す

図3 逆応答の例(完全混合槽直列モデル)
 実線1はモデル1, 実線2はモデル2, 実線3はモデル3,
 破線4は操作量

図4 逆応答の例(逆混合モデル)
 実線1はモデル4, 5, 実線2はモデル6, 破線1はモデル1,
 破線2はモデル2, 破線3は操作量

ることを述べており, 式(3), (4)からも示すことができる(定木・岡野, 1999)。したがって, プロセスゲインを(制御量の変化幅)/(操作量の変化幅)で定義すると, 定常状態により, また, 同じ定常状態からでも応答の方向により, プロセスゲインが異なる。

2.は, 定常状態により, また, 同じ定常状態からでも応答の方向により, 時定数(平均滞留時間)が異なることを述べており, 式(5)からも示すことができる(定木・岡野, 1999)。

3.は, 線形プラントでは, フィードバック制御により理論的には応答を任意に速くできるのに対して, この双線形プラントでは, それができないことを述べている。これは, 操作量 $u(\tau)$ には $u(\tau) \geq 0$ という物理的な制約があり, 操作量 $u(\tau)$ を負にできないためと考えられる。

4.の逆応答に対しては, 次のような定性的な説明が可能と思われる(定木・岡野, 1999)。過渡的に濃度が上昇しているときは, 上流の混合槽の濃度は下流の混合槽の濃度より大きい。このとき, 流量を急激に増加させると, 濃度の高い流体が上流から下流に押し出され, 結果として逆応答が起きる。

3・3 ファジィ制御システムの詳細

ファジィ制御でよく用いられる制御ルール R_i は, 誤差 $e(\tau) = (\text{制御量 } y(\tau) - \text{目標値 } r(\tau))$ を制御入力とし, 2項の前件部からなる次のようなものである(i は第 i 番目のルールであることを

図5 本設計におけるファジィ制御システムの構造

図6 メンバシップ関数

NB: negative big, PB: positive big, NM: negative medium, PM: positive medium, NS: negative small, PS: positive small, ZR: zero

示す)。

R_i : if E is G_i and D is H_i then V is P_i

ここで、 G_i, H_i, P_i は、それぞれ E, D, V の状態を表すファジィ集合、 E, D, V は、それぞれ誤差、誤差の時間変化、制御出力の変化分の状態を表すファジィ集合である。この双線形プラントの制御には、前述の議論から、制御量または操作量の動作範囲に応じて制御ゲインが変化するゲインスケジューリングの考え方が不可欠である。したがって、制御ルールを3項の前件部からなる次のように与える必要がある。

R_i : if Y is F_i and E is G_i and D is H_i then V is P_i

ここで、 F_i は、 Y の状態を表すファジィ集合、 Y は、制御量の状態を表すファジィ集合であり、 F_i, Y によるルール (if Y is F_i) が前件部に追加されている。したがって、本設計では、図5に示すように、(誤差ではなく) 目標値と制御量を制御入力とする構造の制御システムを採用した。なお、図5には外乱入力の位置も示してある。

本設計では、ファジィ集合として、図6に示すメンバシップ関数(定義域は $[-6, 6]$) による NB, NM, NS, ZR, PS, PM, PB を用いた。ここで、メンバシップ関数の定義域と実測値の対応をとるゲインが定義される。

$$e(kT) = G_E \cdot \varepsilon(kT), d(kT) = G_D \cdot \frac{\varepsilon(kT) - \varepsilon((k-1)T)}{T},$$

$$\xi(kT) = G_Y \cdot y(kT) \quad \dots\dots\dots (6)$$

として $e(kT), d(kT), \xi(kT)$ をファジィ推論の入力とした。ゲイン G_E, G_D, G_Y は、シミュレーション実験によりそれぞれ 5.0, 5.0, 3.0 とした。 k は時刻ステップ、 T はサンプリング周期で、サンプリング周期 T は 0.05 とした。

ファジィ推論法は次式の方法を用いた(制御ルールを N とする)。

$$P(v, kT) = \bigvee_{i=1}^N \{F_i(e(kT)) \cdot G_i(d(kT)) \cdot H_i(\xi(kT)) \cdot P_i(v)\} \quad \dots\dots\dots (7)$$

すなわち、まず、確定値 $e(kT), d(kT), \xi(kT)$ が各ルールにおける前件部のファジィ集合 F_i, G_i, H_i に属する度合(グレード)を計算する。ついで、それらの積を後件部のファジィ集合 P_i に掛けて、第 i 番目の制御ルールの推論結果とする。全体の推論結果は、各推論結果の OR すなわち max により計算する。 v はメ

ンバシップ関数の定義域に属する変数である。推論結果であるファジィ集合 $P(v, kT)$ から確定値 $v(kT)$ への変換(defuzzification)には、ファジィ集合の重心を用いた。推論結果が空集合の場合は、確定値を 0 とした。

得られた確定値から制御出力 $u(kT)$ への変換には

$$u(kT) = u((k-1)T) + G_O \cdot v(kT) \cdot T \quad \dots\dots\dots (8)$$

の形のものが用いられることが多いが、シミュレーション実験からは、十分満足な性能が得られなかったので、本設計では次式を用いた。

$$u(kT) = u((k-1)T) + G_O \cdot u((k-1)T) \cdot v(kT) \cdot T \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)は、ゲイン G_O に制御出力の前回値 $u((k-1)T)$ が掛けられており、これによっても操作量 $u(\tau)$ の動作範囲に応じて可変ゲインとなる構造になっている。また、この式の形により、操作量 $u(\tau)$ の物理的な制約 $u(\tau) \geq 0$ がみたされやすい。推論結果が空集合の場合は、ファジィ制御出力は不定と考えられるが、制御出力への変換方法である式(9)によると、前回制御出力が保持される。出力ゲイン G_O は、設計者が決定する重要なパラメータの一つである。本設計では、試行錯誤によりモデルごとに G_O を決定した。

3・4 ルールテーブルの設計

制御ルールは、プラント運転シミュレーションで得た知識により以下のように設計した。

1. 制御量 $y(\tau)$ の値によりプロセスゲインおよび時定数(平均滞留時間)が異なるので、制御ゲインが変わるようにする。すなわち、制御量が大きいときにはゲインを小さくし、小さいときにはゲインを大きくする。

2. 応答の方向によりプロセスゲインおよび時定数(平均滞留時間)が異なるので、絶対値が等しい誤差 $\varepsilon(\tau)$ に対して、操作量はその符号により絶対値が異なるようにする。すなわち、誤差が正のときは負のときより絶対値の大きな操作量を出力するよう

表4 設計されたルールテーブル1

Y		PS						
		E						
		NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
D	NB	NB						
	NM	NM						
	NS	NM						
	ZR	NB	NM	NM	ZR	PM	PB	PB
	PS	PM						
	PM	PB						
	PB	PB						
Y		PM						
		E						
		NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
D	NB	NM						
	NM	NS						
	NS	NS						
	ZR	NM	NS	NS	ZR	PS	PM	PB
	PS	PS						
	PM	PM						
	PB	PB						
Y		PB						
		E						
		NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
D	NB	NS						
	NM	ZR						
	NS	ZR						
	ZR	NS	ZR	ZR	ZR	ZR	PS	PM
	PS	ZR						
	PM	PS						
	PB	PM

図7 目標値ステップ応答（逆応答により制御困難となる場合）
ルールテーブル1, 応答1, 2, 3, 4はモデル1

表5 設計されたルールテーブル2

Y		PS					
		E					
		NB	NM	NS	ZR	PS	PB
D	NB				NB		PM
	NM				NM		
	NS				NM		
	ZR		NB	NM	NM	ZR	PM
	PS					PM	PB
	PM				ZR	PB	
Y		PB					
		E					
		NB	NM	NS	ZR	PS	PB
D	NB				NM		PS
	NM				NS		
	NS				NS		
	ZR		NM	NS	NS	ZR	PS
	PS					PS	PM
	PM				PS	PM	
Y		PB					
		E					
		NB	NM	NS	ZR	PS	PB
D	NB				NS		ZR
	NM				ZR		
	NS				ZR		
	ZR		NS	ZR	ZR	ZR	PS
	PS					PS	PM
	PM				PM	PS	
Y		ZR					

にする。

3. 逆応答が起きる場合を考慮する。すなわち、大きな逆応答が起きた場合は、それ以上大きくならないような、また、逆応答が起きそうな場合は、あらかじめそれを緩和するような動作をとるようにする。

上記1., 2.の項目に基づき、表4に示すルールテーブル1を得た。ルールテーブル1は、上記の知識を反映するような構造をしている。すなわち、制御量の状態を表すファジィ集合Yに応じて3つのサブテーブルを用意して、ゲインを変化させることに対応している。また、各サブテーブルでは制御出力を正と負で非対称にして、応答の方向によって速さが異なることに対応している。

図7は、ルールテーブル1をモデル1に適用した結果である。

出力ゲイン G_0 は、試行錯誤により $G_0 = 0.4$ とした。図7の応答1, 2, 3は良好な制御結果といえるが、より広い範囲で制御量を大きくしようとする、応答4のように逆応答の問題が生じてくる。

このため、さらに各サブテーブルに3つずつルールを加え、表5に示すルールテーブル2を用いる必要があった。新たに追加した9つのルールは、非常に多くの試行錯誤の結果得られたものであって、その理論的導出は今のところ容易ではない。

3・5 制御シミュレーション

こうして設計されたファジィ制御システムの応答例をいくつか示す。なお、出力ゲイン G_0 は、試行錯誤により表3のように決定した。これらの値は、 L/T とよい相関が認められ、 L/T が大きいときはゲインを大きくできない。また、図7でモデル1は出力ゲインを0.4としていたが、以下のシミュレーションでは0.5とした。これは、新たに追加した9つのルールには、出力ゲインを大きくできる効果があるためと見られる。

表3 出力ゲイン G_0

	完全混合槽直列モデル			逆混合モデル		
	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4	モデル5	モデル6
G_0	0.5	0.15	0.1	0.425	0.425	0.15

図8 目標値ステップ応答その1（完全混合槽直列モデル）
ルールテーブル2, 応答1, 4はモデル1, 応答2, 5はモデル2, 応答3, 6はモデル3

図9 目標値ステップ応答その2（完全混合槽直列モデル）
ルールテーブル2, 応答1, 4はモデル1, 応答2, 5はモデル2, 応答3, 6はモデル3

図10 目標値ステップ応答その3(逆混合モデル)
ルールテーブル2, 応答1, 3はモデル4, 5, 応答2, 4はモデル6

図11 目標値ステップ応答その4(逆混合モデル)
ルールテーブル2, 応答1, 3はモデル4, 5, 応答2, 4はモデル6

図8, 9は完全混合槽直列モデルの目標値ステップ応答, 図10, 11は逆混合モデルの目標値ステップ応答である。各モデルとも同一のルールテーブルにより, 出力ゲインを変えるだけで, 広い範囲にわたって良好に動作していることがわかる。

次に, モデル1でPI制御と比較する。PI制御器の伝達関数を $G_p(s) = (c_0 + c_1 s)/s$ としたとき, 各パラメータは

$$c_0 = -2.88, c_1 = -1.4 \quad (10)$$

とした。これはプラントの伝達関数を

$$G(s) = -\frac{1}{(1+s/2)^2} \quad (11)$$

としたとき, 北森の方法(北森, 1979)による外乱補償の場合の最適パラメータである。式(11)は, プラント(3), (4)を平衡状態 $u = y = 1$ で線形化したもので, 式(10)のパラメータの最適性はこの付近でしか維持されない。

図12に比較結果を示す。目標値ステップ入力 $1 \rightarrow 1.25$, 外乱ステップ入力は $0 \rightarrow -0.75$ とした。いずれもファジィ制御の方が性能がすぐれていることがわかる。なお, 目標値入力 u がもう少し大きい場合には, このPI制御器の出力は物理的な制約 $u(\tau) \geq 0$ に抵触し, 制御できなくなる。

4. おわりに

本報では, 鉱物処理プロセスにおける双線形濃度調節システム

図12 PI制御との比較
応答1, 3はファジィ制御, 応答2, 4はPI制御, 応答1, 2は目標値ステップ応答, 応答3, 4は外乱ステップ応答

に対して, 制御上の困難をもたらす非線形性とむだ時間に焦点を当て, ファジィ制御の適用性を検討した。

まず, プラント運転シミュレーションを実施してプラントの特性を言語的に表現し, ファジィ制御システム設計のための要件を検討した。要約すると以下の通りである。

1. 非線形性

(a) 平衡点, 応答の方向によりプロセスゲイン, 時定数(平均滞留時間)が異なるので, ゲインスケジューリングの考え方が不可欠である。

(b) 逆応答が起きる場合があり, これに対応する制御ルールが必要である。

2. 正規化むだ時間(見かけ上のむだ時間と時定数の比 L/T)

(a) 槽数が大きくなると, また, 逆混合割合が小さくなると L/T が大きくなり, 制御ゲインを大きくできない。

(b) 逆応答の大きさは, 槽数や逆混合割合に関わらず, L/T の大きさを評価できることを設計に利用したい。

次に, 上記を踏まえて, 双線形濃度調節システムを制御するファジィ制御システムを設計した。得られたファジィ制御システムは, まず, 制御ルールが上記「非線形性」の要件を反映した構造になっており, また, 正規化むだ時間 L/T に応じて出力ゲインを設定するようになっている。当該ファジィ制御システムの性能は, とくに広い範囲の非線形性に対応する点でPIDなどの従来の制御よりすぐれている。さらに, 槽数や逆混合割合に関わらず, 同一のルールテーブルで制御が可能という特徴をもつ。これは, 正規化むだ時間 L/T と逆応答の大きさにより相関があるためと考えられる。

ファジィ制御は本来, 非線形制御に最適であるが, この特徴を積極的に活かしたファジィ制御システムの設計を系統的に実施した例は意外に少ない。本報では, 制御ルールおよびゲインの設計に際しては, 試行錯誤に頼らざるを得ないことを容認したが, 同時に, ファジィ制御の非線形制御としての可能性を強調することができたと思う。

引用文献

- 松尾誠治・岡野靖彦(1996a): 資源と素材, Vol. 112, p. 94-98
- 松尾誠治・岡野靖彦(1996b): 化学工学論文集, Vol. 22, p. 770-776
- 定木 淳(1990): 東京大学博士論文
- 刈谷直孝・岡野靖彦(1998): 資源と素材, Vol. 114, p. 704-708
- 田中一男(1994): アドバンストファジィ制御, p. 1-7, 共立出版(東京)
- 定木 淳・岡野靖彦(1999): 資源と素材, Vol. 115, p. 631-635
- 北 森(1979): 計測自動制御学会論文集, Vol. 15, p. 549-555