

# 流動層へのファジィ制御の適用

森元 映治\*・西堀 弘人\*\*・早野 延男\*

## Application of Fuzzy Control to Fluidized Bed

Eiji MORIMOTO, Hiroto NISHIBORI and Nobuo HAYANO

### Abstract

Fuzzy algorithms were applied to the fluidized bed control system which regulated the bed mode to be maintained in a bubbling condition under the alteration of particle properties and/or the deviation of bed hold-up.

Variance of the pressure drop fluctuations through the bed was adopted successfully so as to identify the fluidizing mode and its intensity. Four controllers were compared experimentally employing the reasonings deduced from the combinations of four control rules and three membership functions, which were designed in consideration of the fluidization characteristics studied preliminarily. The rule, whose variable of the premise was the deviation of superficial gas velocity, controlled the system satisfactorily both in the transient state and steady state, compared to the rule with the variable of the deviation of pressure fluctuations variance for the change of setpoint fluidizing intensity. For the increment of the bed hold-up, the system was also controlled smoothly by the algorithm with the variables of the deviation of pressure fluctuations and the deviation of superficial gas velocity.

### 1 緒 論

流動層の連続運転中、粒度分布の変化、充填粒子質量の変動など種々の要因により流動化状態が気泡流動層から固定層または乱流流動層へと変化するとき、送風機の回転数を調整することにより気泡流動化状態を保持するためにファジィ制御の適用について検討した。

ファジィの概念は1965年にカリフォルニア大学のZadehによって提唱された。現在、ファジィの工学的応用の中心は制御の分野であり、最も早くから着目され成功をおさめている<sup>1)2)</sup>。ファジィ制御は人間の判断などのようにあいまいさを含む制御アルゴリズムをif～then形式で表現し、ファジィ推論を用いて計算機に実行させるものである。最初にファジィ制御を手がけたのはロンドン大学のMamdaniであり、彼の研究は計

算機シミュレーションではなく、研究室で作ったスチームエンジンの模型を対象とした実証的なものであった<sup>3)4)</sup>。

ファジィ制御の最大の特徴は、数学モデルを作ることの難しい複雑なプロセスに対して、人間のオペレータならばうまく成し得るであろう制御を計算機で実現させることである。したがって、流動層のように気泡の発生、層の振動による激しい変動のあるプロセスには適した制御方法であると考えられる。

### 2 ファジィ制御

#### 2.1 ファジィ制御のしくみ

ファジィ制御規則は、if “前件部”～then “後件部”の形で表わされる。例えば、プラント制御に必要なプラントの状態に関する情報を  $x_1$ ,  $x_2$ , プラントへの入力を  $y$  とすると、制御アルゴリズムは  
if  $x_1$  is small and  $x_2$  is big then  $y$  is medium  
if  $x_1$  is big and  $x_2$  is small then  $y$  is medium

\* 生産機械工学科

\*\* 大学院生産機械工学専攻

のように記述される。ここで、 $x_1, x_2$ は前件部変数、 $y$ は後件部変数、small, big, medium, etc ...はファジィ変数である。

ファジィ制御器は複数個のファジィ制御規則の集合とファジィ推論部から構成されている。制御規則の前件部変数はファジィ制御器への入力、後件部変数は出力と呼ばれている。ファジィ推論部では実際の入力を与えたとき適用可能な制御規則を用いてファジィ推論を行うことにより出力を計算する。

2.2 ファジィ推論<sup>9)</sup>

規則の前件部の条件に入力がどの程度適合するか、その適合度を求める。例えば、 $[X \text{ is } A \dots]$ に対する入力 $[X \text{ is } X^0]$ の適合度  $A(X)$ をファジィ集合  $A$  の  $X^0$  におけるメンバーシップ値とする。適合度  $\omega_i$ は次のように表わされる。

$$\omega_i = A_{i,n}(X_n) \cdot A_{i,n+1}(X_{n+1}) \quad (1)$$

$i$ : 規則の番号

$n$ : 前件部変数の番号

次に、 $i$  番目の規則による推論結果  $y_i$ を次のように書く。

$$y_i = \omega_i \cdot B_i \quad (2)$$

規則数だけの全体の推論結果  $B$ は次式で表わされる。

$$B = \omega_1 \cdot B_1 \cup \omega_2 \cdot B_2 \cup \dots \cup \omega_n \cdot B_n \quad (3)$$

最終的に出力  $y^0$ は  $B$ のメンバーシップ関数の重み付き重心として求められる。

$$y^0 = \frac{\int B(y) \cdot y \, dy}{\int B(y) \, dy} \quad (4)$$

以上を簡単にまとめると、

- ① 前提  $X_i^0$ を与えられて適合度  $\omega_i$ を計算する。
- ② 規則ごとの推論結果  $B_i$ を求める。
- ③ これらの結果を総合して  $B$ を求める。
- ④  $B$ の重心として規則全体の推論結果  $y^0$ を計算する。

2.3 流動層へのファジィ制御の適用

2.3.1 流動層の制御規則

流動化の状態は、固定層、気泡流動層、乱流流動層に分けられ、各状態によって圧力損失の変動が大きく異なる。固定層では層の振動がなく気泡の発生もない。そのため層の圧力損失の変動は小さくその分散値も小さい。気泡流動層では層の上下振動は生じないが、底部で発生した気泡が層を通過する際に気泡の成長、合体を繰り返し上部層表面で破裂する。このため、圧力損失が変動し固定層の場合よりも分散値が大きくなる。さらに、乱流流動層では、塔径方向全体に気泡が成長

し粒子群を持ち上げるため上下振動がおり、層上部表面の形状がわからないほど粒子が飛散したりする。したがって、圧力損失変動の分散値はさらに大きくなる。Fig. 1は塔内流速と圧力損失の分散値の関係を示したもので、圧力損失変動の分散値により流動化状態を判断することが可能であることがわかる。

以上のことから第一の方法として前件部変数に圧力損失  $\Delta P(k)$ の分散値  $\sigma(k)$ と、その目標値  $R_a$ との偏差  $E(k)$ を用い、後件部変数に送風機への入力電圧の変化量を  $\Delta U(k)$ とする制御則について検討した。  $E(k)$ は次式で定義した。

$$E(k) = \sigma(k) - R_a \quad (5)$$

流動層の制御規則  $C_1$ として次の3つが考えられる。ファジィ変数には NB(Negative-Big), ZO(Zero), PB(Positive-Big)の3種類を用いた。

- $R_1$  if  $E(k)$  is PB then  $\Delta U(k)$  is NB
- $R_2$  if  $E(k)$  is ZO then  $\Delta U(k)$  is ZO
- $R_3$  if  $E(k)$  is NB then  $\Delta U(k)$  is PB

ここで、規則  $R_1$ は“もし現在の圧力損失の分散値が目標値より大きければ、送風機の入力電圧の変化量を負に大きくせよ；すなわち乱流流動層状態であれば、送風機の回転数を減少させ流速を下げて気泡流動層の状態にせよ”ということの意味している。

第二の方法として、前件部変数に塔内流速  $V_o(k)$ と、その目標値との偏差  $E_v(k)$ を用いた、 $E_v(k)$ は次式で定義する。

$$E_v(k) = V_o(k) - R_b \quad (6)$$

制御規則  $C_2$ として次の3つが考えられる。

- $R_1$  if  $E(k)$  is PB then  $\Delta U(k)$  is NB
- $R_2$  if  $E(k)$  is ZO then  $\Delta U(k)$  is ZO

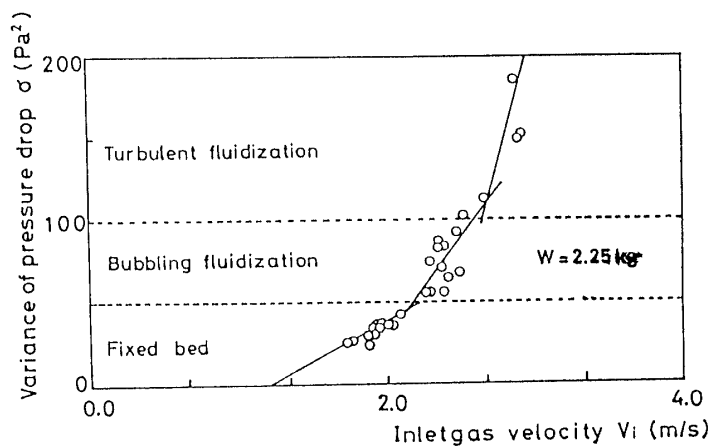


Fig. 1 Relationship between variance of pressure drop  $\sigma$  and inlet gas velocity  $V_i$

$R_3$  if  $E(k)$  is NB then  $\Delta U(k)$  is PB

第三の方法として、前件部変数に  $E_v(k)$  と圧力損失  $\Delta P$  の変化量  $E_p(k)$  を用いた、 $E_p(k)$  は次式で定義する、

$$E_p(k) = \Delta P(k) - \Delta P(k-1) \quad (7)$$

制御規則  $C_3$  として以下の6つが考えられる、

$R_1$  if  $E_p(k)$  is NB and  $E_v(k)$  is PB then  $\Delta U(k)$  is NB

$R_2$  if  $E_p(k)$  is ZO and  $E_v(k)$  is NB then  $\Delta U(k)$  is PB

$R_3$  if  $E_p(k)$  is ZO and  $E_v(k)$  is ZO then  $\Delta U(k)$  is ZO

$R_4$  if  $E_p(k)$  is ZO and  $E_v(k)$  is PB then  $\Delta U(k)$  is NB

$R_5$  if  $E_p(k)$  is PB and  $E_v(k)$  is NB then  $\Delta U(k)$  is PB

$R_6$  if  $E_p(k)$  is PB and  $E_v(k)$  is ZO then  $\Delta U(k)$  is ZO

ここで、規則  $R_1$  は“もし圧力損失の変化量が負の値、すなわち充填粒子質量が減少し、塔内流速が目標値よ

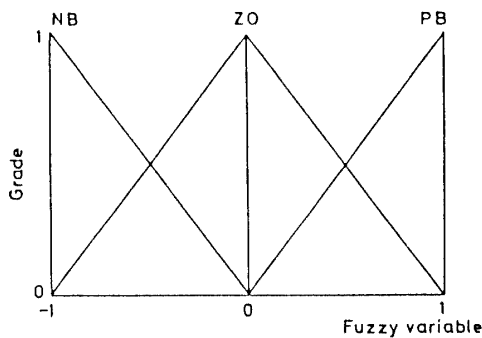
り大きい、すなわち乱流流動層の状態であれば、送風機への入力電圧を小さくして回転数を下げ、流速を小さくすることにより気泡流動層の状態にせよ”ということの意味している、

### 2.3.2 流動層におけるファジィ推論

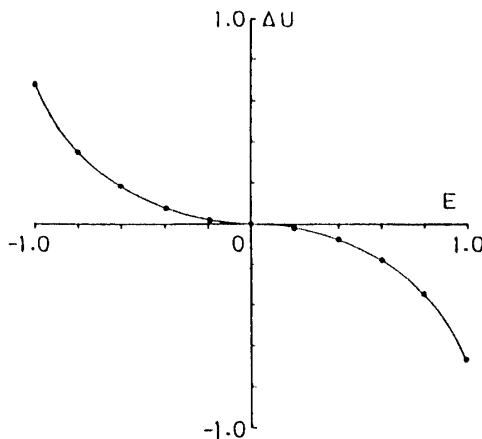
3種類のメンバーシップ関数を考え、制御規則  $C_1, C_2, C_3$  を用いてファジィ推論を行なった。メンバーシップ関数および入出力関係を Fig. 2 ~ Fig. 5 に示す。Fig. 2 は制御規則  $C_1$  と三角型メンバーシップ関数を用いたもので、これを推論 I とする。Fig. 3 は制御規則  $C_2$  と三角型メンバーシップ関数を用いたもので推論 II、Fig. 4 は制御規則  $C_3$  と台形型と三角型を組み合わせたメン

(a) Control rules  $C_1$

	E ( k )		
	N B	Z O	P B
$\Delta U ( k )$	P B	Z O	N B



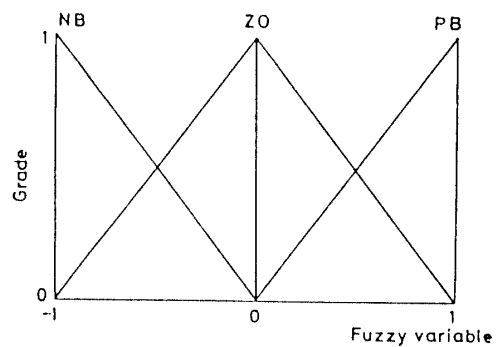
(b) Membership function



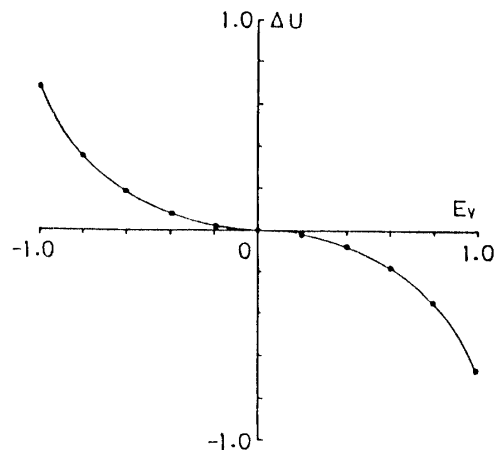
(c) Relationship between manipulated variable  $\Delta U$  and controlled variable E

(a) Control rules  $C_2$

	$E_v ( k )$		
	N B	Z O	P B
$\Delta U ( k )$	P B	Z O	N B



(b) Membership function



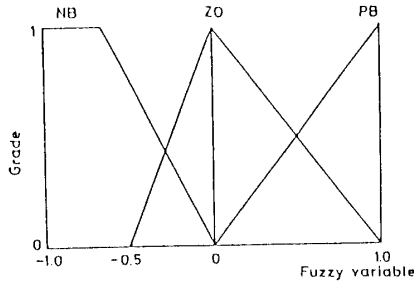
(c) Relationship between manipulated variable  $\Delta U$  and controlled variable  $E_v$

Fig. 2 Reasoning I

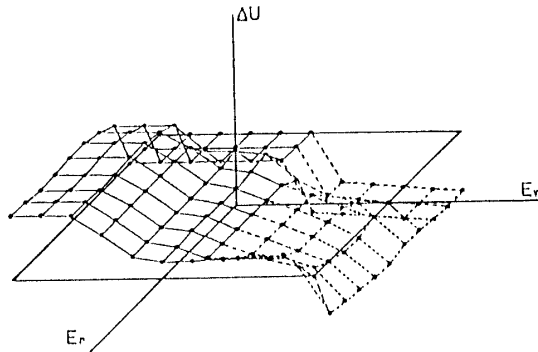
Fig. 3 Reasoning II

(a) Control rules  $C_3$

$\Delta U (k)$		$E_v (k)$		
		NB	ZO	PB
$E_p (k)$	NB			NB
	ZO	PB	ZO	NB
	PB	PB	ZO	



(b) Membership function



(c) Relationship between manipulated variable  $\Delta U$  and controlled variables  $E_v, E_p$

Fig. 4 Reasoning III

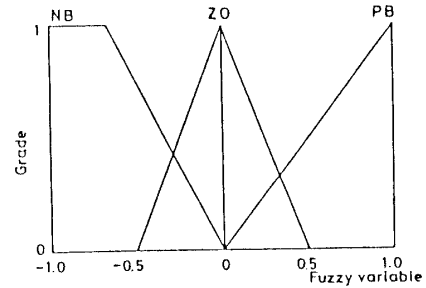
メンバーシップ関数を用いたもので推論III, また Fig. 5 は制御規則  $C_3$  と台形型と三角型を組み合わせたメンバーシップ関数を用いたもので推論IVとする。推論IVで用いたメンバーシップ関数は推論IIIのものに比べてファジィ変数 ZO の範囲が狭くなっているが, これは流動層の特性として偏差または変化量が小さいときに操作量の応答が速いという予測のもとに用いた。流動層では目標値付近での小さな変動でも操作量の応答が速くなり変動が大きくなって乱流流動層あるいは固定層の状態になっては困るので, ある程度ゆるやかな応答が望ましく比較のためにファジィ変数 ZO の範囲が狭いものを用いた。

### 3 実験装置

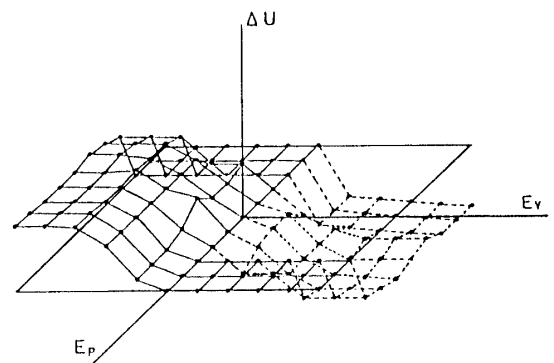
装置の概要を Fig. 6 に示す。実験装置本体は高さ

(a) Control rules  $C_3$

$\Delta U (k)$		$E_v (k)$		
		NB	ZO	PB
$E_p (k)$	NB			NB
	ZO	PB	ZO	NB
	PB	PB	ZO	



(b) Membership function



(c) Relationship between manipulated variable  $\Delta U$  and controlled variables  $E_v, E_p$

Fig. 5 Reasoning IV

2000mm, 内径105mm の透明アクリル円筒管を使用し, 空気が均一に層内を通過するように下部にガス溜めを設けてある。塔底部には平均穴径40 $\mu$ m の多孔質焼結金属板を分散板として使用し, 金網で補強支持してある。なお, 塔上部は開放してあり, 粒子の供給ができるようにしてある。

層の圧力損失  $\Delta P$  は, 塔側壁およびガス溜めに圧力タップ設け, 半導体型差圧変換器により測定する。塔内流入流速  $V_i$  はピトー管により測定され半導体型差圧変換器によって電圧値として検出する。測定データはマイクロコンピュータによりオンラインで演算処理され, インバータを介して送風機の回転数を変化させ流量を調整して流動化状態を制御している。また, 粒子には砂を使用した。その物性値は, かさ密度1.461 g/cm<sup>3</sup>, 粒子径0.358mm である。かさ密度は, Powder-Tester (細川ミクロン (株) 製) により測定した。また,

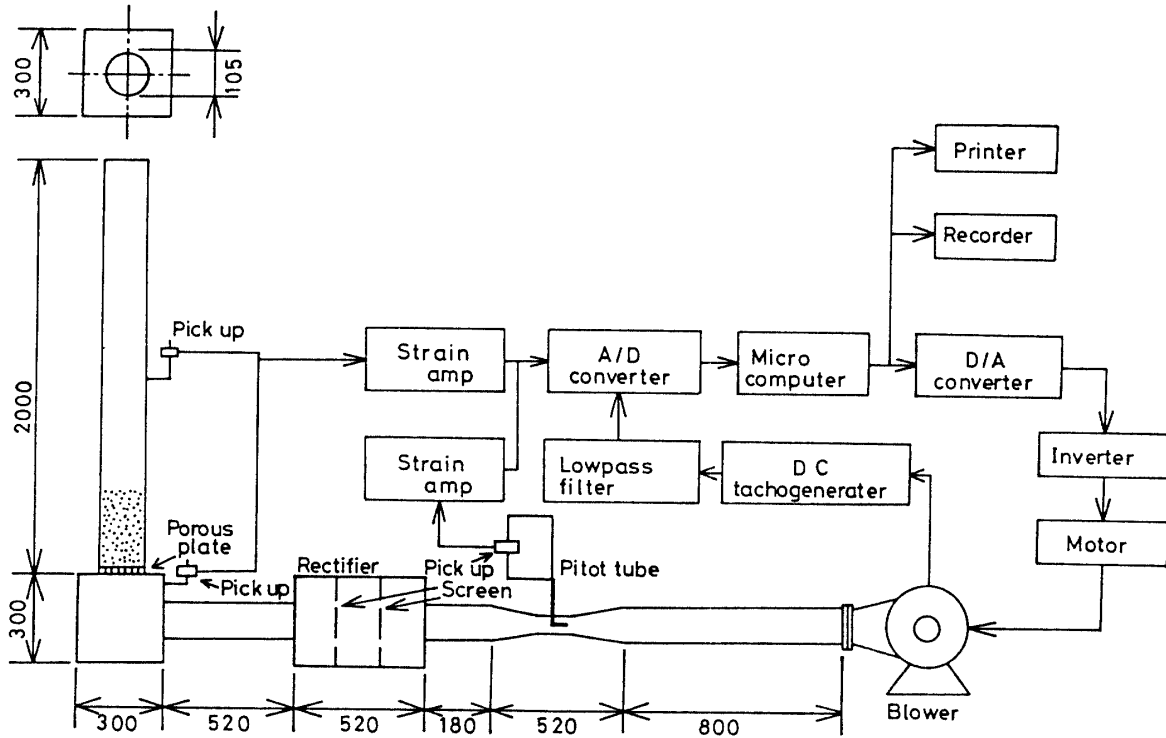


Fig. 6 Experimental apparatus

粒径は顕微鏡写真により粒子の等方向最大径を測定した<sup>6)</sup>。

4 実験結果および考察

4.1 流動化特性

塔本体に粒子  $W$  kg を充填し、送風機の回転数  $N$  を一定に保ち定常状態になったのち、圧力損失  $\Delta P$ 、塔内流速  $V_0$  の値ををそれぞれ200回サンプルし、その平均値をデータとした。実験方法は固定層の状態から開始し流動層状態になるまで送風機の回転数を一定回転数ずつ増加させながら  $\Delta P$ 、 $V_0$  を測定した。また、設定した回転数に到達したのち、逆に同じ回転数ずつ下げながら  $\Delta P$ 、 $V_0$  を測定した。以上の測定を充填粒子質量  $W = 2.25, 2.50, 2.75, 3.00$  kg について行った。粒子質量と静止充填層高の値を Table 1 に示す。結果は Fig. 7 に示すように、固定層状態では圧力損失  $\Delta P$  は塔内流速  $V_0$  に比例して増加し、流動層状態では  $V_0$  に関係なく  $\Delta P$  は各充填粒子質量で一定である。最小流動化速度  $V_{mf}$  と充填粒子質量  $W$  の関係を Fig. 8 に示す。図より  $W$  に関係なく  $V_{mf}$  はほぼ一定の値 ( $V_{mf} = 0.3$  m/s) であることがわかる。最小流動化圧力損失  $\Delta P_{mf}$  と充填粒子質量  $W$  の関係は Fig. 9 に示すように  $\Delta P_{mf}$  は  $W$  に比

Table 1 Initial condition of the bed

Total mass of the bed $W$ (kg)	Static bed height $H$ (mm)	$H/D$ (—)
2.00	168	1.60
2.25	191	1.82
2.50	217	2.07
2.75	240	2.29
3.00	262	2.50

$D$  : diameter of the column  
例して増加していることがわかる<sup>7,8)</sup>。

4.2 制御結果

塔内の充填粒子質量  $W$  を 2.25, 2.50, 2.75 kg とし以下の実験を行った。

- ①推論 I, II を適用し、粒子質量を一定として固定層状態から気泡流動層状態へと設定流動化状態を変更した。
- ②推論 III, IV を適用し、一定粒子質量として設定流動化状態の変更を行った。
- ③さらに気泡流動層状態で運行中に粒子を投入し、もとの流動化状態を維持させる。

①の実験による制御結果を Fig. 10, 11 に示す。充填

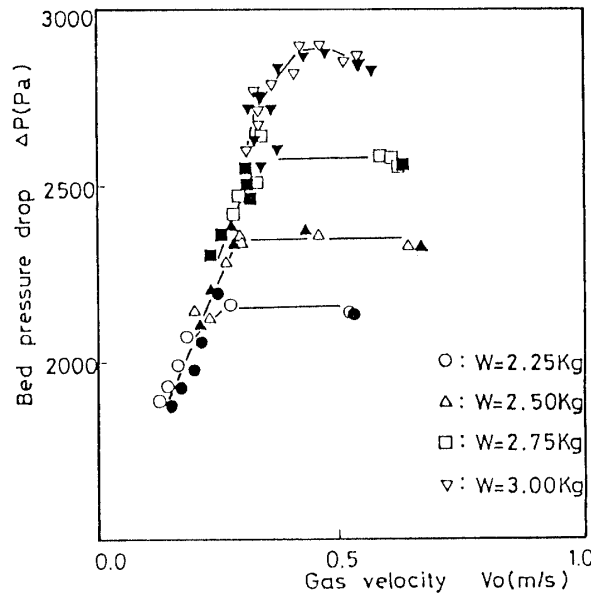


Fig. 7 Characteristics of fluidization

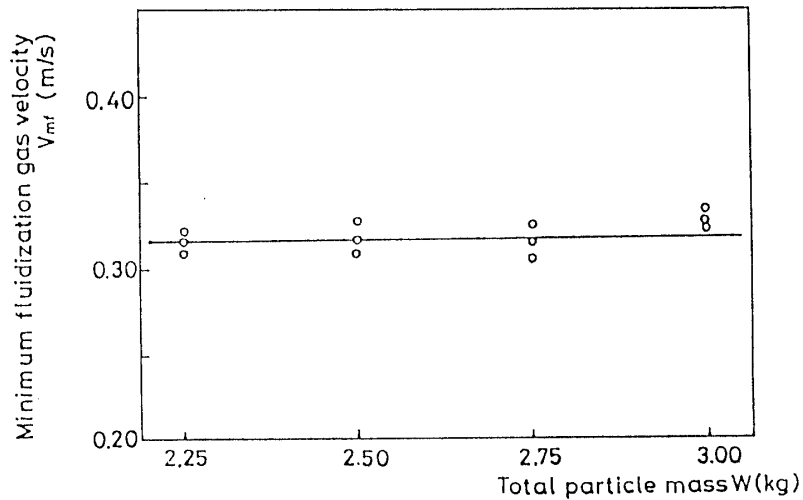


Fig. 8 Effect of total mass of the bed  $W$  on minimum fluidization gas velocity  $V_{mf}$

粒子質量  $W$  はともに  $2.5\text{kg}$  である。Fig.10は推論 I によるもので、Fig.10の(a)は送風機への入力電圧  $U$  (Volt)、(b)は圧力損失  $\Delta P$  (Pa)、(c)は圧力損失の分散値  $\sigma$  ( $\text{Pa}^2$ )の時間的変化を示している。図中(c)の破線が目標値で、上下に引かれた一点鎖線の間が気泡流動層状態である。10ステップめで設定値の変更 ( $\sigma = 40 \rightarrow \sigma = 80 \text{ Pa}^2$ )を行ない、その後16ステップで整定している。整定後の状態は気泡流動層の状態の範囲で変動していることから安定した状態であることがわかる。

Fig.11は推論IIによるもので、Fig.11の(c)は塔内流速  $V_o$  (m/s)の動きを示し、破線が目標値、一点鎖線が気泡流動層と固定層状態の境界である。10ステップめで設定値の変更 ( $V_o = 0.3 \rightarrow V_o = 0.34 \text{ m/s}$ )を行ない、その後9ステップで整定している。整定後は目標値付近で変動しており、圧力損失  $\Delta P$  の値が一定であることより、安定な状態であることがわかる。同一粒子質量について推論 I、IIによる結果を比較すると、推論IIの方が整定時間が速いことがわかった。

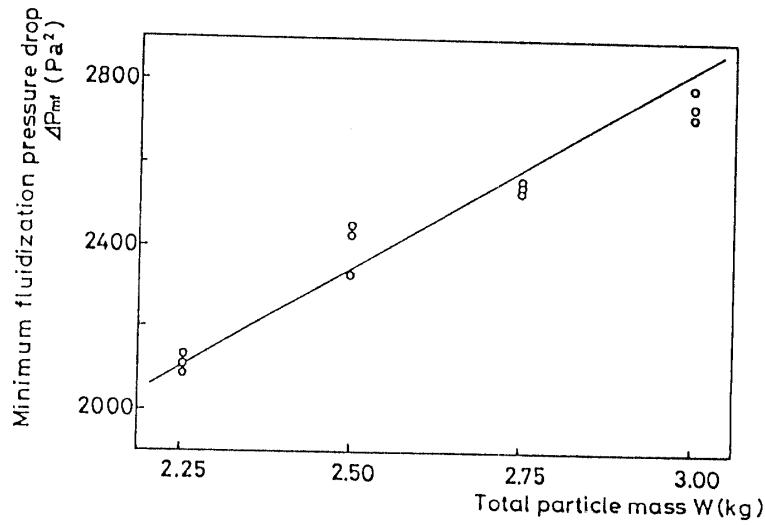


Fig. 9 Effect of total mass of the bed  $W$  on pressure drop at minimum fluidization  $\Delta P_{mf}$

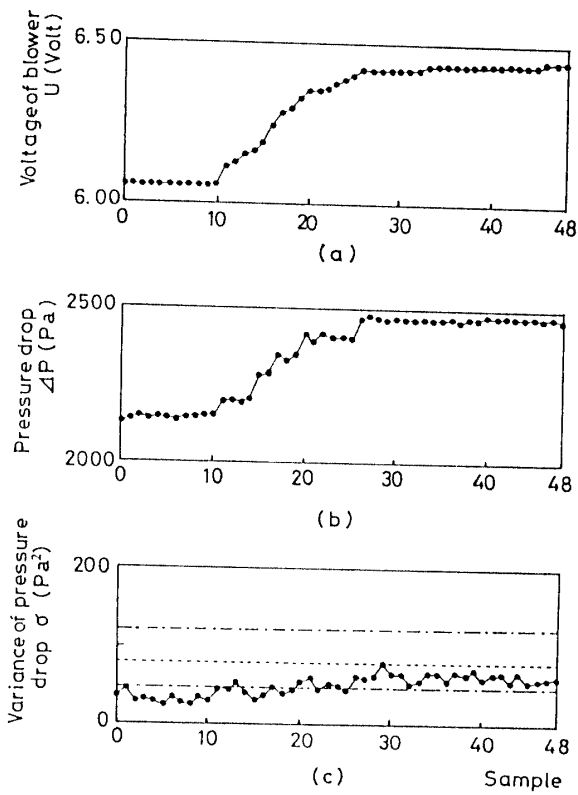


Fig.10 Response of the system controlled by the reasoning I to the step change of  $\sigma$

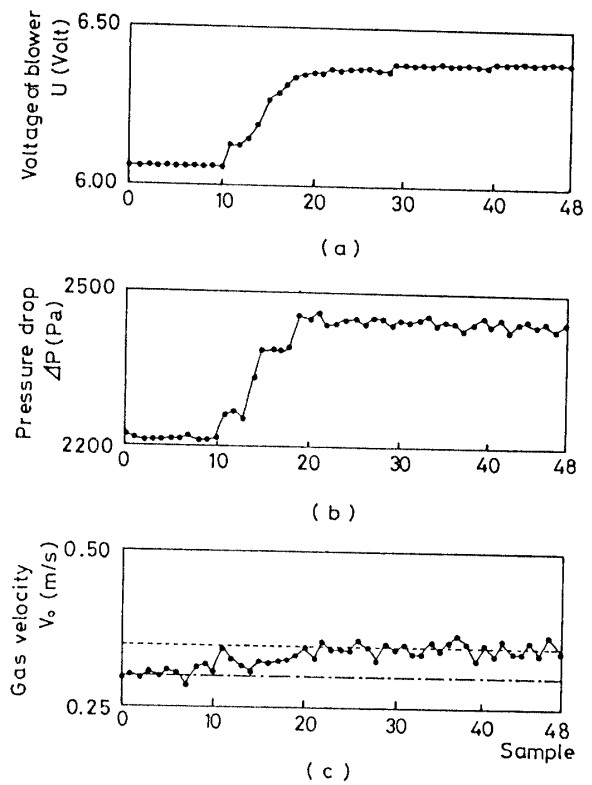


Fig.11 Response of the system controlled by the reasoning II to the step change of  $V$ .

②の実験による制御結果を Fig.12, 13に示す。  
 充填質量  $W$  はともに2.25 kgである。Fig.12, Fig.13  
 はそれぞれ推論III, 推論IVによるもので、Fig.12, Fig.13  
 の(a)は送風機への入力電圧  $U$  (Volt), (b)は圧力損失  
 $\Delta P$  (Pa), (c)は塔内流速  $V_0$  (m/s)の動きを示している。  
 図中(c)の破線が目標値, 一点鎖線が気泡流動層と固定  
 層状態の境界である。推論IIIでは6ステップめで設定値  
 の変更を行ない, その後6ステップで整定している。推  
 論IVによるものは6ステップめで設定値の変更を行ない,  
 その後8ステップで整定している。

推論III, IVは, メンバシップ関数のファジィ変数  
 $ZO$ の範囲が異なり, この両者を比較してみても整定時  
 間, 整定後の状態に大差はなかった。

③の実験による制御結果を Fig.14, 15に示す。い  
 ずれも充填粒子質量  $W$  を2.375kg から2.500kg に変化さ  
 せている。Fig.14は推論IIIによるもの, Fig.15は推論  
 IVによるものである。推論IIIによるものは, 8ステップ  
 めで粒子を投入し, その後8ステップで整定している。  
 推論IVによるものは14ステップめで粒子を投入し, そ  
 の後6ステップで整定している。いずれも粒子投入後  
 は充填粒子質量が増加するため圧力損失  $\Delta P$  は上昇し,  
 塔内流速  $V_0$  は一旦下がっているが, 送風機の回転数を

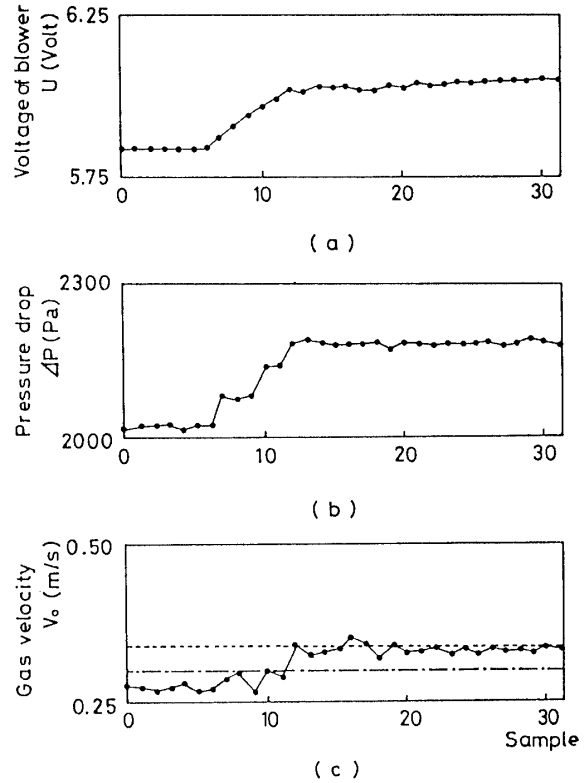


Fig.12 Response of the system controlled by the reasoning III to the step change of  $V_0$ .

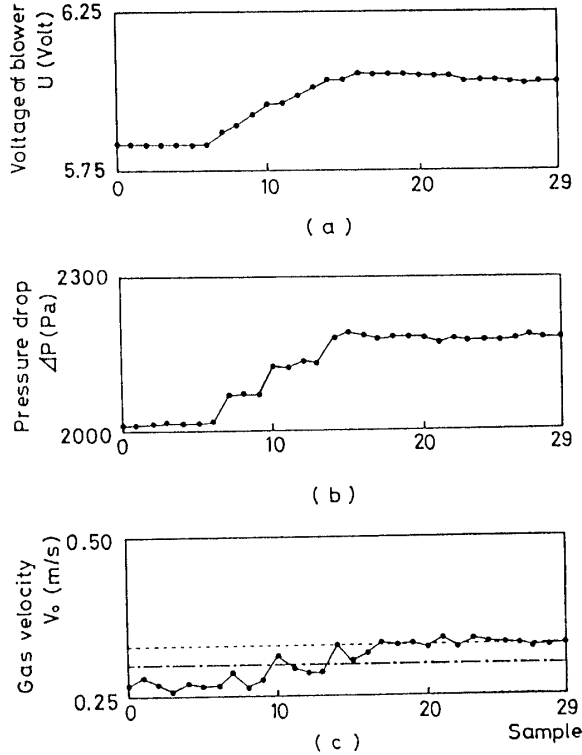


Fig.13 Response of the system controlled by the reasoning IV to the step change of  $V_0$ .

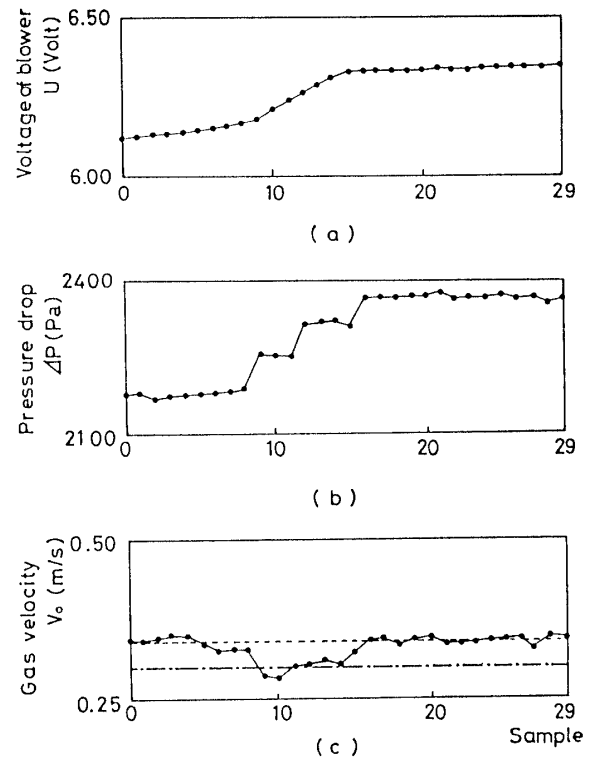


Fig.14 Response of the system controlled by the reasoning III to the step wise increment of the bed hold up



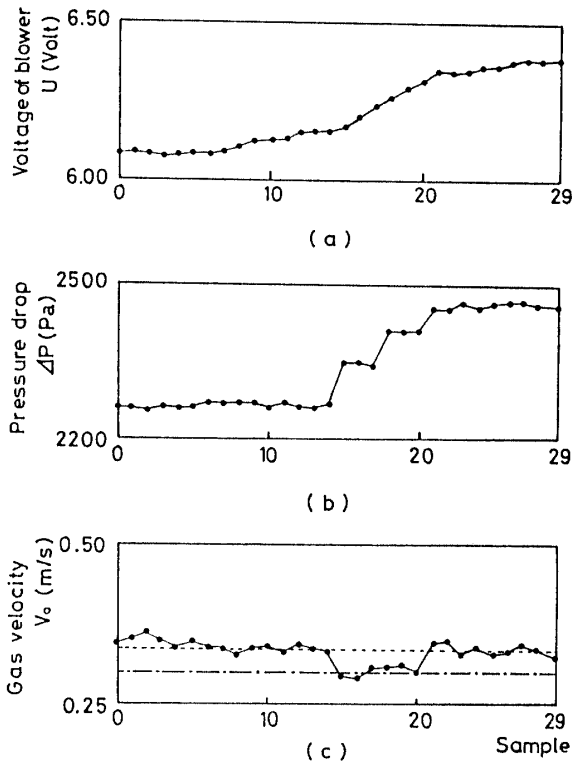


Fig.15 Response of the system controlled by the reasoning IV to the step wise increment of the bed hold up

上げ、流量が制御されることにより再び初期の流速(目標値)に戻っていることがわかる。流動化特性より明らかのように、圧力損失の上昇により充填粒子質量の増加が、塔内流層の減少により流動化状態が気泡流動層から固定層の状態になる傾向があるということが判断できるわけである。さらに、整定後の状態は、 $\Delta P$ 、 $V_0$ が一定となっていることより安定な流動化状態であることがわかる。したがって、前件部変数に圧力損失の変化量  $E_p(k)$  と塔内流速の偏差  $E_v(k)$  を用いることにより充填粒子質量の変化、流動化状態の変化が正確な判断可能となった。

5. 結 論

以上を要約する。

- (1) 層内圧力損失の分散値  $\sigma$  によって流動化状態を判断することができた。しかしながら誤差変動が大きいため特に境界付近では判断精度が低下した。
- (2) 前件部変数に圧力損失の分散値の偏差  $E(k)$  もしくは塔内流速の偏差  $E_v(k)$  を用いたファジィ制御を適用した結果、目標とする流動化状態を変更

する場合良好な応答結果が得られた。

- (3) 前件部変数を1つ用いた制御則の場合、整定に要する時間は  $E_v(k)$  を用いた方が  $E(k)$  の場合に比較して速く、整定後も  $E_v(k)$  を用いた方が変動が小さい。
- (4) 前件部変数に  $E_p(k)$ 、 $E_v(k)$  の2つを用いるとき、充填粒子質量の増加に対し良好な制御結果が得られた。
- (5) 充填粒子質量を変化させたとき、ファジィ変数 ZO の範囲が狭いほど変動は小さくなった。

記号

A	: ファジィ集合	(-)
B	: ファジィ集合	(-)
D	: 塔内径	(mm)
E	: 圧力損失の分散値の偏差	(Pa <sup>2</sup> )
$E_p$	: 圧力損失の変化量	(Pa)
$E_v$	: 塔内流速の偏差	(m/s)
$L_r$	: 充填層高	(mm)
N	: 送風機の回転数	(rpm)
NB	: ファジィ変数 Negative-Big	(-)
PB	: ファジィ変数 Positive-Big	(-)
$\Delta P$	: 層内圧力損失	(Pa)
$\Delta P_{mf}$	: 最小流動化圧力損失	(Pa <sup>2</sup> )
$R_a$	: 圧力損失の分散値の目標値	(Pa <sup>2</sup> )
$R_b$	: 塔内流速の目標値	(m/s)
S	: 塔断面積	(mm <sup>2</sup> )
U	: 送風機への入力電圧	(Volt)
$\Delta U$	: 送風機への入力電圧の変化量	(Volt)
$V_i$	: 塔内流入流速	(m/s)
$V_{mf}$	: 最小流動化速度	(m/s)
x	: 前件部変数	(-)
y	: ファジィ推論の推論結果	(-)
$V_0$	: 塔内流速	(m/s)
W	: 塔内充填粒子質量	(kg)
ZO	: ファジィ変数 Zero	(-)
$\sigma$	: 層内圧力損失の分散値	(Pa <sup>2</sup> )
$\omega$	: 適合度	(-)

参 考 文 献

- 1) 菅野 道夫, 高木 友博: 計測と制御, 22,84(1984)
- 2) 安信 誠二: あいまい制御基礎講習会テキスト, 計測自動制御学会(1986), p.33
- 3) 菅野 道夫: ファジィ制御, 日刊工業新聞社, (1988), p.67
- 4) 寺尾 寿郎, 浅居 喜代治, 菅野 道夫: ファジィシ

- ステム入門, オーム社(1987), p.19
- 5) 水本 雅晴: あいまい制御基礎講習会テキスト, 計測自動制御学会(1986), p.17
- 6) 三輪 茂雄: 粉体工学通論, 日刊工業新聞社 (1981), p.59
- 7) 白井 隆: 流動層, 化学技術社(1973), p.69
- 8) 鞭 巖, 森 滋勝, 堀尾 正毅: 流動層の反応工学, 培風館(1984), p.19

(平成元年4月15日受理)