

# 堅型ミル内の流動化と圧力損失に関する研究

森元 映治\*・早野 延男\*・上滝 具貞\*\*

## A Study on the Fluidization of the Granular Materials and the Pressure Drop in Vertical Type Mill

Eiji MORIMOTO, Nobuo HAYANO and Tomosada JOTAKI

### Abstract

To improve the pressure drop characteristics of vertical type mill, the fundamental relationship between the fluidization of raw materials in the mill and some parameters such as initial bed height, gas velocity, particle diameter, blade configuration, and mixing ratio was studied experimentally in the case of miscellaneous kind of granules. The results showed that both minimum fluidization velocity and minimum fluidization pressure drop increased as bed height and particle diameter increased, and that the fluidization characteristics were influenced considerably by blade configuration when the blade opening ratio was less than 0.25. Experiments indicated that the effective energy consumed for fluidization decreased as the mean diameter of granular particle increased. To estimate the minimum fluidization velocity for multicomponent particles, correlation of minimum fluidization velocity with the mixing ratio was given. Furthermore, control algorithm for driving the system at minimum fluidization velocity was investigated, and test runs showed a remarkable control characteristics.

### 1. 緒 論

堅型ミルでは粉碎と風力分級が同時におこなわれる。粒子はブレード部より流入する気流により流動化され、製品となる微粒子とそれ以外の粗粒子に分級される。製品粒子は気流により塔外へ搬送され、一方粗粒子は粉碎工程へ還流され再度処理される。原料の供給と製品の取り出しは連続的におこなわれるが、粗粒子は製品粒径に達するまで塔内に滞留し循環処理される。このため塔内の粒子は広範な粒度分布を持つが、堅型ミル実機では特に大粒径の粒子までも流動化させるため塔内空気の流速を大きくとる必要がある。したがって装置全体の圧力損失中、ブレード部での圧力損失の占める割合がきわめて大きく、その低減が望まれている。

本研究は上記の問題に対し、塔内粒子の流動化現象とブレード部圧力損失に関する基礎的特性を解明する

ことにより改善策を求めようとするものである。このため堅型ミルのブレード部付近の2次元流れモデル機を用い、粒子の種類、初期充填層高、ブレード部の形状、空塔流速などを広範囲に変化させて実験的検討をおこなった。また粒度分布をモデル化した2成分系および3成分系粒子層を用いて、その影響因子について考察した。これらの結果をもとにブレード部と粒子層部のそれぞれで消費されるエネルギーの割合を粒子径との関係において検討し、堅型ミルの運転方法についての一改善策を提示した。さらに粒子層の状態の変化に対して、送風機所要動力を最小とする経済的運転状態を維持するために最小流動化流速で自動運転をおこなう制御システムのアルゴリズムを示すとともに、制御特性について実験的検討をおこなった。

### 記 号

$D_p$	: 粒子径
$E_r$	: 相対誤差
$G$	: 粒子重量
$g$	: 重力加速度
$g_c$	: 重力換算係数

\* 生産機械工学科

\*\* 九州共立大学

- K : ブレード開口比
- L : 初期充填層高
- N : モータ回転数
- $\Delta P_a$  :  $\Delta P^*$  の許容値
- $\Delta P_b$  : ブレード部圧力損失
- $\Delta P_c$  : 粒子層部圧力損失
- $\Delta P^*$  : 圧力損失変動幅
- $\Delta P_{mf}$  : 最小流動化圧力損失
- Q : 送風量
- $R_{mix}$  : 混合率
- $S_b$  : ブレード開口面積
- $S_c$  : 塔断面積
- V : マイクロコンピュータ出力電圧
- $V_{in}$  : インバータ出力電圧
- $v_c$  : 塔内流速
- $v_{mf}$  : 最小流動化流速
- $W_b$  : ブレード部消費エネルギー (単位時間当たり)
- $W_c$  : 粒子層部消費エネルギー (単位時間当たり)
- $\epsilon$  : 空隙率
- $\mu$  : 空気の粘度
- $\nu$  : 空気の動粘度
- $\rho_b$  : 粒子のかさ密度
- $\rho_F$  : 空気の密度
- $\rho_s$  : 粒子の真密度
- 添字
- A, B, C : 石灰石 A, B, C
- 1, 2 : 小粒径粒子, 大粒径粒子
- mix : 多成分系
- max, min : 最大値, 最小値

2. 最小流動化流速  $v_{mf}$  と最小流動化圧力損失

$\Delta P_{mf}$

塔内に粒子を充填し底部より送風するとき粒子層部における圧力損失  $\Delta P_c$  と塔内平均空気流量  $v_c$  は Fig. 1(a) のような特性を示す。A~B 間を固定層, B~E 間を流動層という。初期充填状態から  $v_c$  の増加につれて層が一度流動化を起すと C~E 間のように  $\Delta P_c$  は  $v_c$  の値に対してあまり変化しない<sup>1)~4)</sup>。本研究では流動化状態を特性化する量として点 B における流速を最小流動化流速  $v_{mf}$ , 点 C における粒子層部圧力損失を最小流動化圧力損失  $\Delta P_{mf}$  と定義した。

Ergun の経験式<sup>1)</sup>と釣りの式から  $v_{mf}$  を求めた。

$$\frac{\Delta P_c}{\rho_F L} = f_k \frac{v_c^2}{g_c D_p} \cdot \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \quad (1)$$

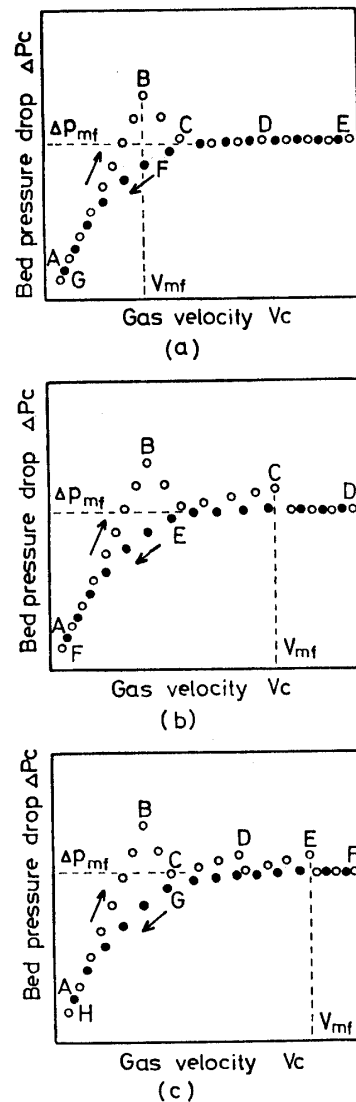


Fig. 1 Relationships between bed pressure drop and gas velocity

ここに

$$f_k = 1.75 + 1.50 \frac{1-\epsilon}{R_{cp}}$$

$$R_{cp} = \frac{v_c D_p}{\nu}$$

また

$$\frac{\Delta P_c g_c}{L(1-\epsilon)g} = \rho_s - \rho_F \quad (2)$$

式(1)と(2)を等置して  $v_c = v_{mf}$  として解けば次式を得る<sup>5)</sup>。

$$v_{mf} = \frac{\mu}{\rho_F D_p} \left\{ \left( 25.46^2 + 0.038 \frac{g D_p^3 (\rho_s - \rho_F) \rho_F}{\mu^2} \right)^{1/2} - 25.46 \right\} \quad (3)$$

流動化状態では粒子層部の圧力損失は流速によらずほぼ一定となるという実験事実により次式で表わさ

れる。

$$\Delta P_{mf} = L(1 - \epsilon)(\rho_s - \rho_F) \frac{g}{g_c} \quad (4)$$

### 3. 実験装置および実験方法

#### 3.1 実験装置

装置の概要を Fig. 2 に示す。モデル機本体は高さ 1000 mm (塔部 800 mm) × 幅 300 mm × 奥行 100 mm で内部状態が観察できるように透明アクリル製である。塔の底部にはブレードがありその開口部の間隔と開口面積は任意に設定できるようになっている。ブレードの上面には粒子の落下を防ぐために 20 mesh の金網を置いた。

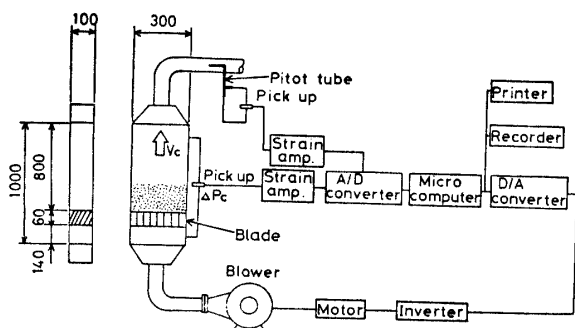


Fig. 2 Experimental apparatus

送風機より送られた空気はブレード部より入り粒子層を通過して上部より系外へ放出される。送風機の運転はマイクロコンピュータに設定回転数を入力することによってインバータでコントロールされる。粒子層部の圧力損失は塔側壁に設けられた静圧タップ間の差圧として測定する。塔内の風量は出口ダクトに挿入されたピトー管の差圧より測定する。これらの差圧はいずれも半導体型圧力センサーによって電氣的に検出しマイクロコンピュータによってオンラインで演算処理される。また本システムではマイクロコンピュータに制御アルゴリズムをプログラムすることにより自動運転システムを実現することができる。

#### 3.2 実験方法

塔内に一定量の粒子を充填する。送風機回転数を一定として塔内空気流速を一定に保ち粒子層部およびピトー管の差圧を計測し層部圧力損失  $\Delta P_c$  および塔内流速  $v_c$  を得る。初期充填状態から  $v_c$  を次第に増加させて流動化に到る場合と、逆に流動化している状態から  $v_c$  を減少させていく場合とで  $\Delta P_c \sim v_c$  特性曲線を求めた。

以上を試験粒子の種類、初期充填層高  $L$ 、ブレード部の開口比  $K$ 、混合率  $R_{mix}$  を変化させて系統的に実験をおこなった。

#### 3.3 試験粒子

実験に使用した粒子はナイロンチップ、なたね、ムールライト、チャコール、石灰石 A, B, C の 7 種類でそれらの物性値を Table 1 に示す。堅型ミル実機との関連から特に石灰石については粒径の異なる 3 種類のものを用いた。

Table 1 Physical properties of the particles

	$D_p$ (mm)	$\rho_s$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\rho_b$ (gr/cm <sup>3</sup> )
Nylon-chip	2.90	1.10	0.73
Rape-seed	1.40	1.53	0.65
Moolight	3.50	2.40	1.38
Charcoal	4.31	1.22	0.91
Limestone A	3.26	2.70	1.43
Limestone B	7.07	2.70	1.45
Limestone C	14.14	2.70	1.46

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 初期充填層高 $L$ の影響

ナイロンチップの  $\Delta P_c \sim v_c$  特性を Fig. 3 に示す。他の試験粒子についても同様の特性が得られ、これら

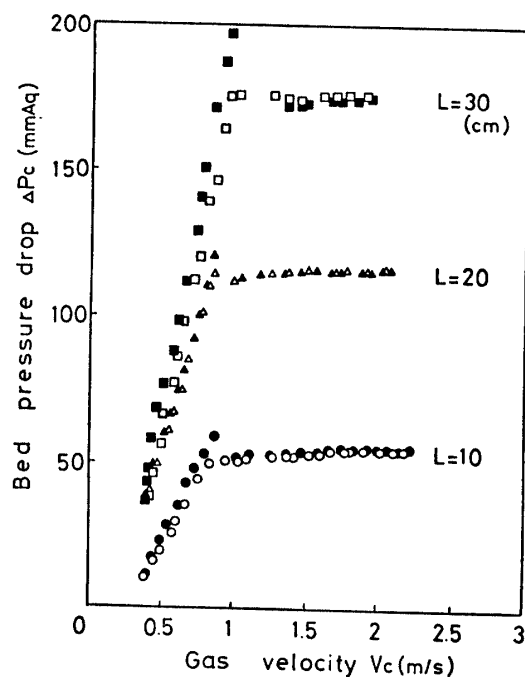


Fig. 3 Characteristics of bed pressure drop (Nylonchip)

から求めた最小流動化流速  $v_{mf}$  と初期充填層高  $L$  の関係を Fig. 4 に示す.  $L$  の増加につれ  $v_{mf}$  はわずかながら増加する傾向にあると思われる.

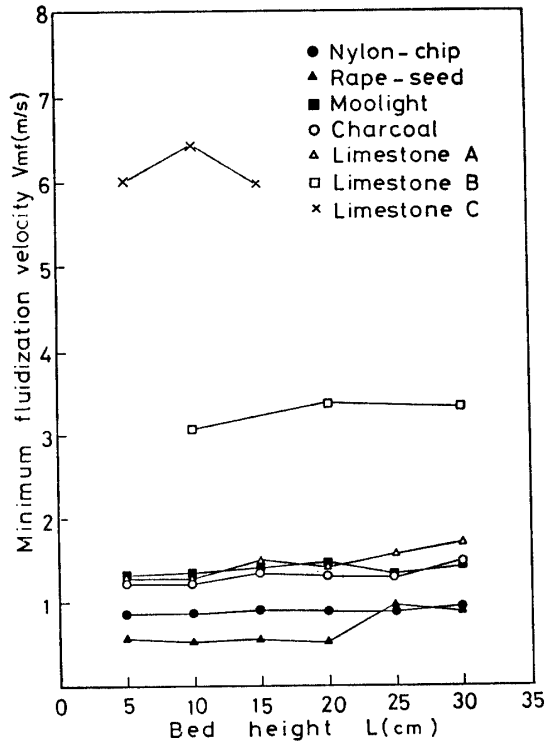


Fig. 4 Effect of bed height on the minimum fluidization velocity

また最小流動化圧力損失  $\Delta P_{mf}$  と  $L$  との関係を Fig. 5 に示す. いずれの粒子においても  $\Delta P_{mf}$  は  $L$  に比例して増加する傾向を示している.

#### 4.2. 粒子径 $D_p$ の影響

石灰石A, B, Cを用いて  $v_{mf}$  と粒子径  $D_p$  の関係を求めた結果を Fig. 6 に示す. これより  $v_{mf}$  は  $D_p$  にほぼ比例することがわかる.

また  $\Delta P_{mf}$  と  $D_p$  の関係を Fig. 7 に示した.  $L$  が

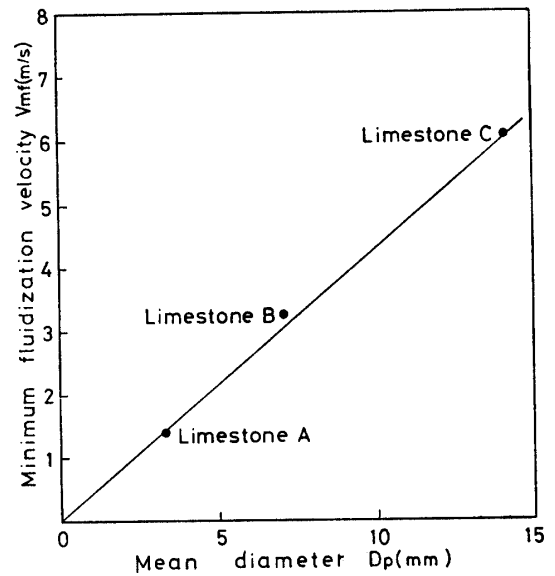


Fig. 6 Relationship between minimum fluidization velocity and particle diameter

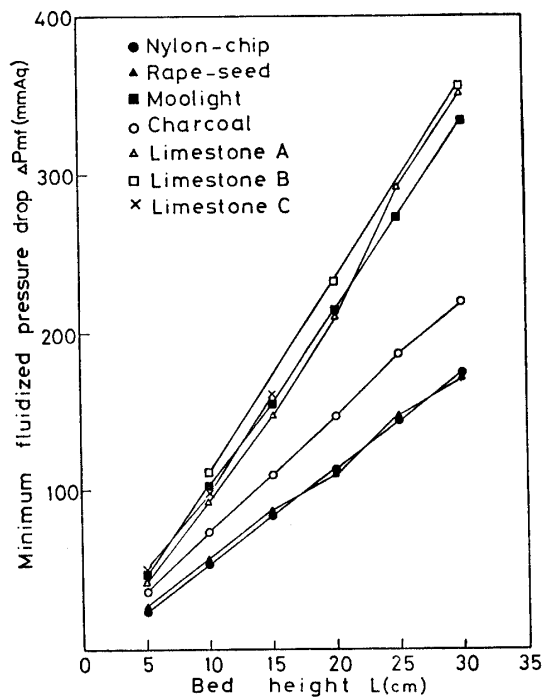


Fig. 5 Effect of bed height on the minimum fluidized pressure drop

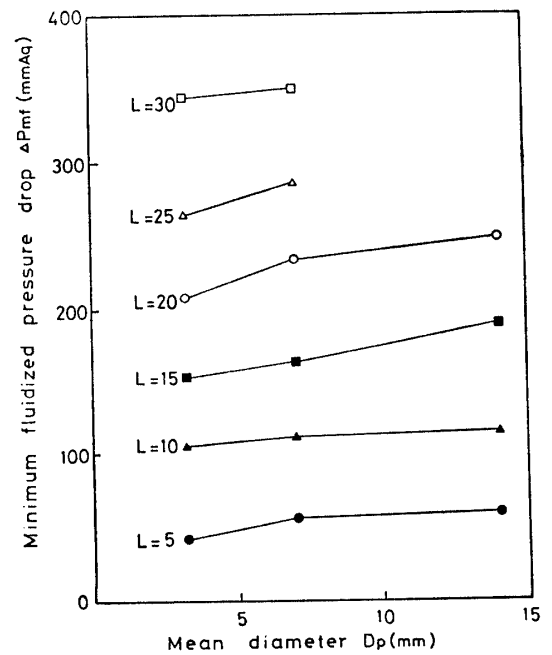


Fig. 7 Effect of particle diameter on the minimum fluidized pressure drop

一定のとき  $D_p$  とともに  $\Delta P_{mf}$  も増大する傾向を示す。しかし実験範囲内で  $D_p$  の約4.3倍の変化に対し

$\Delta P_{mf}$  の増加は約1.3倍であることから、 $D_p$  の  $\Delta P_{mf}$  に対する感度はあまり高くないと考えられる。

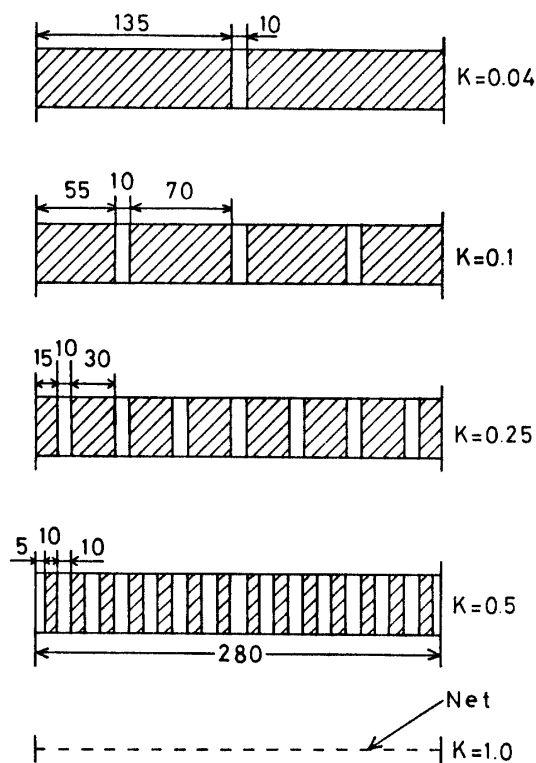


Fig. 8 Blade configuration

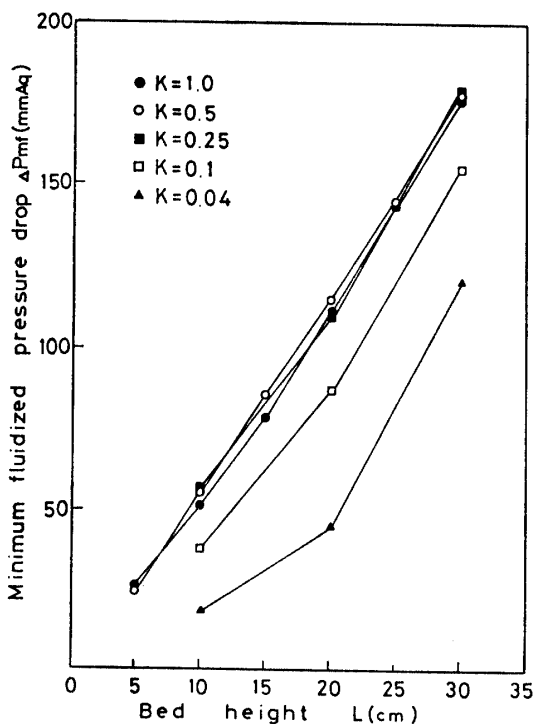


Fig. 9 Effect of blade opening ratio on characteristics of fluidization

### 4.3 ブレード開口比 $K$ の影響

ブレード部の開口状態の流動化特性におよぼす影響をみるため開口部の間隔を Fig. 8 に示すように5種類に変えて実験した。塔の高さ方向に垂直な断面内での開口部面積の塔断面積に対する割合を便宜上  $K$  の値によって示した。ただし  $K=1.0$  とはブレードがなく 20 mesh の網だけの場合である。

$K$  をパラメータとして、 $\Delta P_{mf}$  と  $L$  の関係を Fig. 9 に示す。それぞれの  $K$  において  $\Delta P_{mf}$  は  $L$  にほぼ比例して増加する。 $K=0.25$  以上では有意な差は認められなくなる。また  $K$  が極端に小さいときは局所的エアレイションのため開口部側方に粒子が高く堆積し、実際に流動化を起している粒子層は初期充填層高に比較してかなり低くなる。このため  $\Delta P_{mf}$  は他の場合より小さくなる。

### 4.4 2成分粒子系の流動化

#### 4.4.1 流動化特性

堅型ミル実機では粒子は粉碎過程にあるため広範な粒度分布を持っている。本研究ではこれをモデル化し2種類の相異なる粒径粒子が混合した層の流動化特性について検討した。

2成分粒子系の  $\Delta P_c \sim v_c$  特性を Fig. 1(b) に示した。流速  $v_c$  を増してゆくと小粒径粒子のみが上部へ移動し流動化を開始する。さらに  $v_c$  を増すと点 C で層底部側の大粒径粒子も流動化を始め、層全体が流動化状態となる。逆に  $v_c$  を減じてゆくと点 E で底部の大粒径粒子がまず静止し、次に上部の小粒径粒子が静止し2層に分離した状態となる。

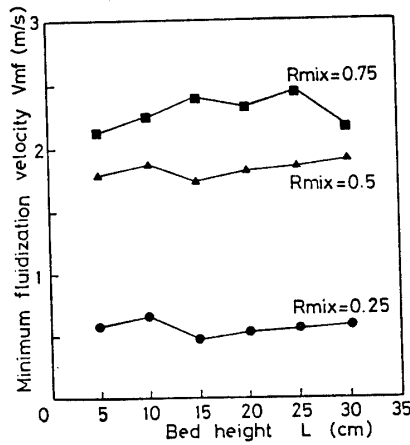
混合粒子中の大粒径粒子の全体に対する重量割合を  $R_{mix}$  で表わす。

$$R_{mix} = \frac{G_2}{G_1 + G_2} \quad (5)$$

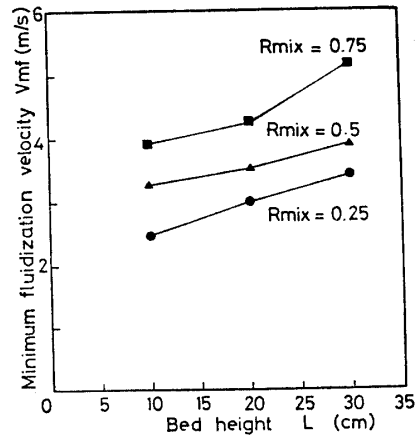
石灰石AとB、BとCの各混合系の最小流動化流速  $v_{mf}$  と初期充填層高  $L$  の関係を混合率  $R_{mix}$  をパラメータにしてそれぞれ Fig. 10(a), 10(b) に示した。 $R_{mix}$  が一定のとき  $L$  の増加にともない  $v_{mf}$  は増加する傾向を示す。

最小流動化圧力損失  $\Delta P_{mf}$  と  $L$  の関係を Fig. 11(a), 11(b) に示す。 $L$  の増加につれて  $\Delta P_{mf}$  は増加するが  $R_{mix}$  の影響はほとんどみられない。

$v_{mf}$  と  $R_{mix}$  の関係を  $L$  をパラメータにして Fig. 12(a), 12(b) に示す。 $R_{mix}$  の  $v_{mf}$  に対する感度が高いことがわかる。

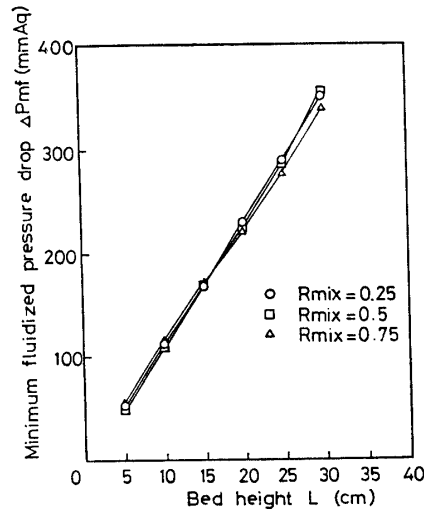


(a) Limestone A and B

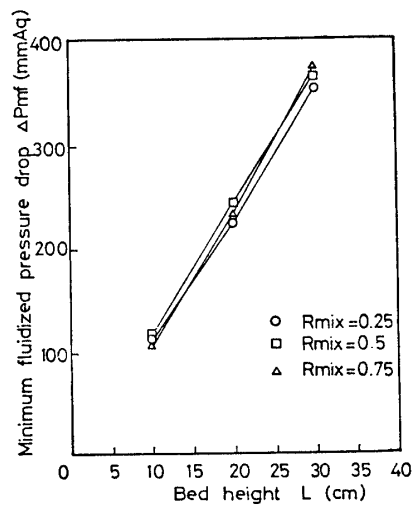


(b) Limestone B and C

Fig. 10 Effect of mixing ratio on the minimum fluidization velocity

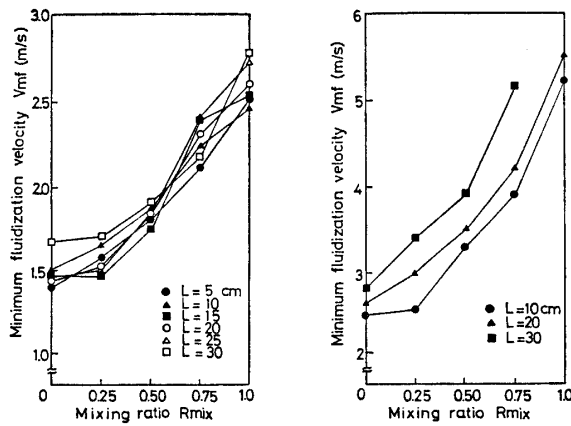


(a) Limestone A and B



(b) Limestone B and C

Fig. 11 Effect of mixing ratio on the minimum fluidized pressure drop



(a) Limestone A and B (b) Limestone B and C

Fig. 12 Relationships between minimum fluidization velocity and mixing ratio

4.4.2  $v_{mf, mix}$  の相関式 ある混合状態での最小流動化流速を成分粒子の単一層での流動化流速によって推定するための実験式を求めた。評価関数を開平自乗誤差とするシプレックス法を用いたパラメータ探索によって以下のような相関式を得た<sup>6), 7)</sup>。

石灰石AとBの混合系；

$$v_{mf, mix} = v_{mf, A} \left( \frac{v_{mf, B}}{v_{mf, A}} \right)^{R_{mix}^{1.34}} \quad (6)$$

石灰石BとCの混合系；

$$v_{mf, mix} = v_{mf, B} \left( \frac{v_{mf, C}}{v_{mf, B}} \right)^{R_{mix}^{1.18}} \quad (7)$$

また石灰石AとBおよびBとCの両実験結果を統合して探索をおこなった結果次式を得た。

$$v_{mf, mix} = v_{mf, 1} \left( \frac{v_{mf, 2}}{v_{mf, 1}} \right)^{R_{mix}^{1.20}} \quad (8)$$

Table 2 Comparison of experimental  $v_{mf,mix,exp}$  with calculated  $v_{mf,mix,cal}$  (Limestone A and B)

$R_{mix}$	$D_{p,mix}$ (mm)	$v_{mf,mix,exp}$ (m/s)	$v_{mf,mix,cal}$ (m/s)	$E_r$
0.25	4.213	1.565	1.865	0.161
0.50	5.165	1.851	2.068	0.105
0.75	6.118	2.294	2.253	0.182

Table 3 Comparison of experimental  $v_{mf,mix,exp}$  with calculated  $v_{mf,mix,cal}$  (Limestone B and C)

$R_{mix}$	$D_{p,mix}$ (mm)	$v_{mf,mix,exp}$ (m/s)	$v_{mf,mix,cal}$ (m/s)	$E_r$
0.25	8.838	2.978	2.711	0.098
0.50	10.605	3.602	2.970	0.213
0.75	12.373	4.475	3.209	0.395

2成分系の平均粒径  $D_{p,mix}$  を次式より求め、式(3)より  $v_{mf,mix}$  を計算した。

$$D_{p,mix} = (1 - R_{mix}) \cdot D_{p,1} + R_{mix} \cdot D_{p,2} \quad (9)$$

石灰石AとB、BとCの混合系についての計算値と実験値をそれぞれ Table 2, 3 に示した。

#### 4.5 3成分粒子系の流動化

3成分系の  $\Delta P_c \sim v_c$  特性を Fig. 1(c) に示した。点Aから流速  $v_c$  を増加させてゆくと最も粒径の小さい粒子が層の上部に移動し点Bで流動化を開始する。このとき他の2種類の粒径の粒子は固定層状態を保つ。さらに  $v_c$  を増加させると点Dにおいて次に粒径の小さい粒子が層の中間部で流動化する。点Eで最も粒径の大きい粒子も流動化を始める。E~F間では層上部から下部へ粒径の小さい順番に大旨3層に分離した状態で流動化する。流動化状態から  $v_c$  を減少してゆくと以上とは逆に粒径の大きい粒子から固定層状態となり  $F \rightarrow G \rightarrow H$  の特性曲線に従って変化する。

3成分系の平均粒子径  $D_{p,mix}$  を次式(10)により求め、式(3)より最小流動化流速  $v_{mf,mix}$  を求め、Table 4 に計算値と実験値を比較した。

$$D_{p,mix} = R_{mix,A} \cdot D_{p,A} + R_{mix,B} \cdot D_{p,B} + R_{mix,C} \cdot D_{p,C} \quad (10)$$

ここに

$$R_{mix,A} = \frac{G_A}{G_A + G_B + G_C}$$

$$R_{mix,B} = \frac{G_B}{G_A + G_B + G_C}$$

$$R_{mix,C} = \frac{G_C}{G_A + G_B + G_C}$$

Table 4 Comparison of experimental  $v_{mf,mix,exp}$  with calculated  $v_{mf,mix,cal}$  (Limestone A, B and C)

$G_A : G_B : G_C$	$D_{p,mix}$ (mm)	$v_{mf,mix,exp}$ (m/s)	$v_{mf,mix,cal}$ (m/s)	$E_r$
1 : 1 : 1	8.075	2.243	2.590	0.134
1 : 2 : 1	7.885	2.296	2.560	0.103
2 : 1 : 1	6.933	1.544	2.399	0.356

#### 4.6 堅型ミルの運転方法に関する考察

堅型ミル実機における問題点はミル内で流動化されている粒子群の中で特に大粒径粒子がブレード開口部から落下することのないように送風量を大きくして運転するため、ブレード部での圧力損失がきわめて大きくなるということにある。Fig. 6 によれば  $D_p$  の約4.3倍の増加に対し  $v_{mf}$  は約4.4倍の増加を示している。Fig. 7 においては  $D_p$  の同様の増加に対し初期充填層高  $L$  によっても異なるが平均して約1.25倍の増加を示している。したがって  $D_p$  の影響は  $\Delta P_{mf}$  に比較して  $v_{mf}$  に大きいことがわかる。このため小粒径粒子層と大粒径粒子層をそれぞれ流動化させるとき、粒子層部で圧力損失として消費されるエネルギーは両粒径の粒子で大差がないのに対し、流動化させるに要する流速は前者に比較して後者ではかなり大きくとらねばならないと予想される。

いま粒子層とブレード部のそれぞれで消費されるエネルギーの単位時間当りの量を  $W_c, W_b$  として次式により概算する。

$$W_c = v_{mf} \cdot \Delta P_{mf} \cdot S_c \quad (11)$$

$$W_b = v_b \cdot \Delta P_b \cdot S_b \quad (12)$$

粒子層部で消費されるエネルギーの塔内で消費されるエネルギー中に占める割合と粒子径の関係を Fig. 13 に示す。同図の縦軸は装置における送風エネルギーのうち粒子流動化に利用された量の割合を表わし、

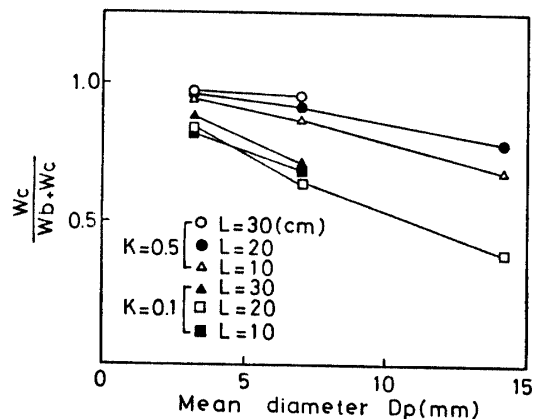


Fig. 13 Energy consumed for fluidization

したがってこの値が高いほど効率のよい運転状態が達成されていると考えることができる。すなわち  $D_p$  が小さいほど効率がよいことがわかる。

以上のことから堅型ミル実機での運転においては流動化させるための粒子の平均径は小さいことが望ましく、このためには大粒径粒子は流動化の対象とせず積極的に塔外へ排出し再度塔内へ投入する方法が効率向上の面から好ましいと考えられる。

4.7. 最小流動化流速  $v_{mf}$  で運転するため制御

4.7.1 制御の目的 送風機の駆動動力を最小にして塔内の粒子を流動化させるためには最小流動化流速  $v_{mf}$  で運転することが望ましい。粒子層状態が一定であるならばあらかじめ知られた  $v_{mf}$  値を実現するように送風機の条件を設定し保てばよい。しかし何らかの原因によって塔内粒子のホールドアップ量あるいは粒度分布に変化を生じると層の圧力損失が変化するため送風機の回転数が一定の下では  $v_{mf}$  状態を維持できなくなる。このため送風量をバイパスによって変化させたり、あるいは送風機回転数を変化させるなどの操作が必要となる。上記の目的から本研究では層内の圧力損失を検出して送風機の回転数を変化させて  $v_{mf}$  状態で自動運転するための制御系を構成しその特性について検討をおこなった。

4.7.2 制御アルゴリズム 本システムでは粒子層部の圧力損失のみを検出量としている。いま Fig. 14 に示す  $\Delta p_c \sim v_c$  特性曲線において  $\Delta P_{c1}$  が検出されているとする。層高が  $L_1$  または  $L_2$  ならば  $v_{mf}$  の状態を達成するには送風機回転数  $N$  を増し流速  $v_c$  を増せばよい。層高が  $L_3$  で  $v_c > v_{mf}$  ならば  $N$  を減少させ  $v_c$  を小さくする必要がある。すなわち固定層状態と流動層状態で  $N$  の変化の方向が異なる。Fig. 15 は固定層状態と流動層状態での  $\Delta P_c$  の時間的変動をみたもので流動層状態ではバブリング等の影響により固定層状態に比較して変動が激しい。本システムでは層状態の判断に上記の  $\Delta P_c$  の時間的変動の大きさを利用した。制御アルゴリズムのフローチャートを Fig. 16 に示した。手順を以下に述べる。

Step 1 粒子層部圧力損失  $\Delta P_c$  を検出する

Step 2  $\Delta P_c$  の時間的変動幅を  $\Delta P^*$  とする

$$\Delta P^* = \Delta P_{max} - \Delta P_{min}$$

Step 3  $\Delta P^*$  をその許容値  $\Delta P_a$  と比較し、

①  $\Delta P^* > \Delta P_a$  ならば流動層と判断し

Step 4-① へ進む

②  $\Delta P^* < \Delta P_a$  ならば固定層と判断し

Step 4-② へ進む

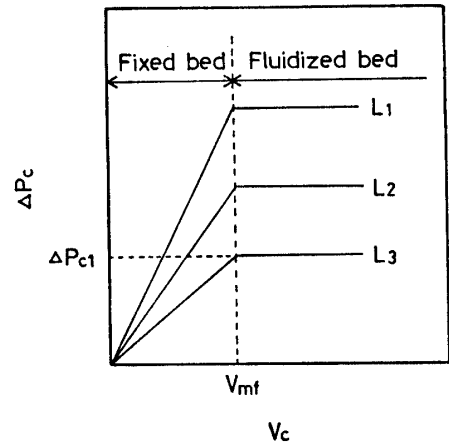


Fig. 14 Schematic of bed pressure drop

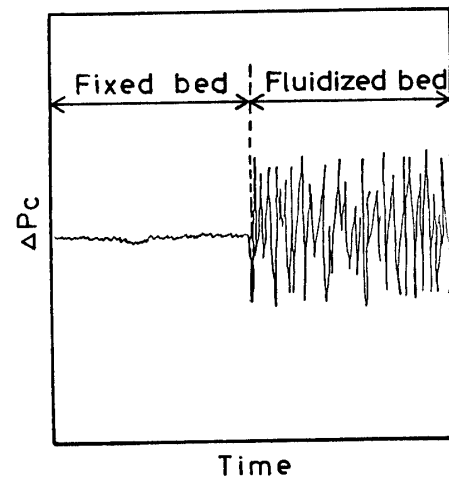


Fig. 15 Fluctuation of bed pressure drop

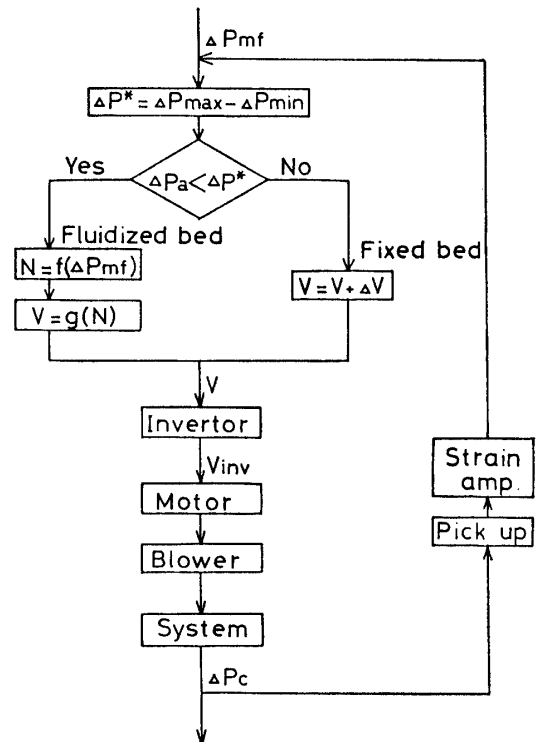


Fig. 16 Control algorithm



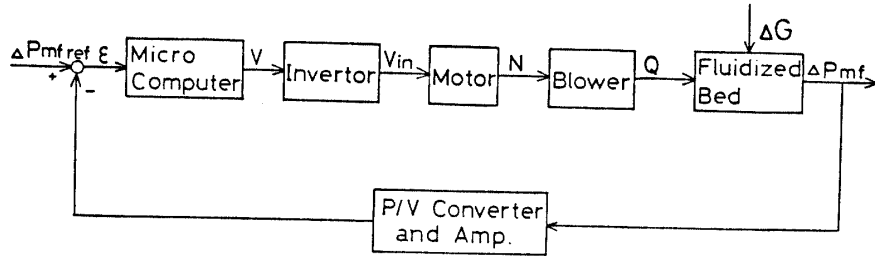


Fig. 17 Block diagram of the system

- Step 4 ① あらかじめプログラムされた  $\Delta P_{mf}$  ~  $N$  の関係式より  $v_{mf}$  を与える  $N$  を計算し,  $N$  を与える出力電圧  $V$  を決定する  
 ② 出力電圧を  $V = V + \Delta V$  とする

Step 5 インバータへ電圧  $V$  を出力し  $N$  を決める

4.7.3 制御特性 実験装置は Fig. 2 に示したものと同一であるが, マイクロコンピュータ内に 4.7.2 に述べたアルゴリズムがプログラムされている. したがって本システムは Fig. 17 に示すフィードバック系を構成している.

実験では塔内粒子のホールドアップ量を一定として流動化させ, 外部より粒子を投入してその応答特性を調べた. 試験粒子には石灰石 A および B の 2 種類を用いた.

応答波形を Fig. 18(a), 18(b) に示した. 装置の制約から粒子の投入はランプ入力状におこなわれ, システムもこれに追従して変化している.

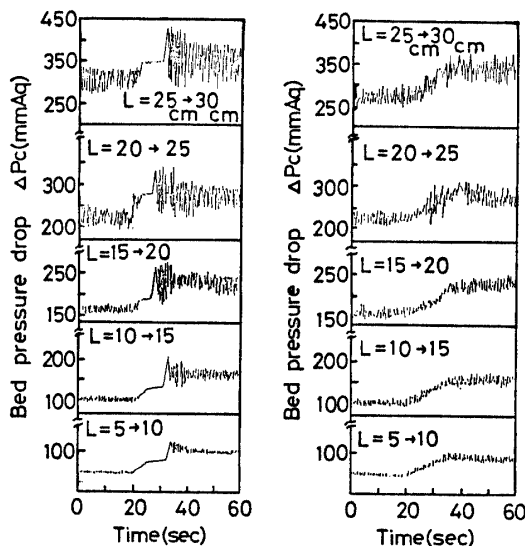
Fig. 18(a) において時間が 0~20 sec の間は入力粒子投入前の流動化状態を示している. 20~30 sec で粒子が投入されホールドアップ量の増加にしたがって送

風機の回転数が増大している. 応答の途中にみられるフラットな波形は一時固定層状態となったもので, この状態を生じるか否かは検出量のサンプリング時間, 演算時間と入力粒子投入時間に関係すると考えられる. 石灰石 A は B に比較して粒径が小さく投入速度が速いためこの状態を生じたと思われる. Fig. 18(b) の場合は固定層状態となることなく入力に追従して  $v_{mf}$  運転をおこなっていることがわかる.

## 5. 結 論

本研究より得られた結果を以下に要約して述べる.

- (1) 最小流動化流速  $v_{mf}$  は初期充填層高  $L$  とともにわずかに増加する傾向があり, 粒子径  $D_p$  にはほぼ比例して増加する. また最小流動化圧力損失  $\Delta P_{mf}$  は  $L$  に比例して増加し,  $D_p$  に対しても同様の傾向を持つがその増加割合は小さい.
- (2) ブレード開口比  $K$  の流動化特性におよぼす影響は  $K$  の小さいとき顕著であるが,  $K=0.25$  以上では有意の差は認められない.
- (3) 多成分系の流動化は小粒子から開始され, 層全体が流動化したときの  $\Delta P_{mf}$  は単成分系と大差ない値を示した.
- (4) 多成分系の最小流動化流速  $v_{mf, mix}$  を混合率  $R_{mix}$  から推定するための相関式を求めた.
- (5) 粒子層の流動化のために消費されるエネルギーの装置全体で消費されるエネルギーに対する割合は粒子径が小さいほど高い.
- (6) 層部圧力損失の時間的変動が流動層状態と固定層状態で著しく異なることを利用して, 塔内粒子のホールドアップ量あるいは粒度分布の変化に対し  $v_{mf}$  運転を維持するための制御アルゴリズムを示した. これをモデル機に適用し実験をおこない良好な制御特性を得た.



(a) Limestons A (b) Limestone B  
 Fig. 18 Response to disturbance input

終わりに, 本研究は宇部興産(株)との共同研究であり装置を製作していただいた同社機械事業本部の山口久

雄、武谷国男、古閑忠之、石川辰郎各氏に深く感謝いたします。また実験の一部を担当してくれた生産機械工学科、有田常美、三角富義両君に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 白井 隆：流動層，科学技術社（1973）
- 2) 早野延男他2名：山口大学工学部研究報告，27，2（1977）
- 3) M.Leva：Chem. Eng., Oct., 289（1957）
- 4) M.Leva：Chem. Eng., Nov., 266（1957）
- 5) 化学工学協会編：流動層工学（1981）
- 6) L.Y.L. Cheung 他2名：Chem. Eng. Sci., 29, 1301（1974）
- 7) S.Chiba 他3名：Powder Technol., 22, 255（1979）

（昭和59年4月16日受理）