

# 付着性微粉粒子の流動化特性

甲斐 敬美・井元 和弘・高橋 武重

## FLUIDIZATION BEHAVIOR OF COHESIVE FINE POWDERS

Takami KAI, Kazuhiro IMOTO  
and Takeshige TAKAHASHI

The powders used in a fluidized bed have been classified into four groups by Geldart. The group C powder is adhesive, and it is difficult to establish good fluidization. The fluidization of the C powder has been recently studied as the fluidized beds are applied in various fields of industry. In the present study, the fluidization quality of the C powder was investigated. The powders used in the experiments were alumina, aluminum hydrate and sodium carbonate, and the average diameter of them was below 15  $\mu\text{m}$ . It was found from the relationship between gas velocity and fluidization behavior that the fluidization quality of the C powder was strongly influenced by the bulk density of powder. Low density powder tended to agglomerate, and high density powder tended to cause gas channeling. It is known that the maximum extent of the expansion of the emulsion phase increases with decreasing particle diameter for the A powder. However, the expansion ratio decreased when the characteristic of the C powder was dominant. The boundary between the group C and A powders was estimated from the maximum point of the bed expansion.

### 緒 言

流動層に使用される粒子はその平均粒子径および粒子密度を基にして Geldart<sup>4)</sup>によって A, B, C, D の4つのグループに分類されている。これらの粒子で Cグループに属する粒子は付着性が強く、良好な流動化状態が得られないため、その研究も少ない。しかし近年、流動層の応用分野が広がるにともない、C粒子の流動化現象についても注目されるようになった<sup>2,3,5,6,9,10)</sup>。本研究においては、C粒子の流動化状態について調べ、Geldart のマップ<sup>4)</sup>における A粒子との境界について考察を行った。そのため、A粒子について最小流動化速度と最小気泡化速度との間において層圧力損失、層高さ、層空隙率を測定し、C粒子については流動化状態の流動化ガス速度による変化を調べた。次に A粒子と C粒子の混合粒子について同様に層膨脹特性を調べた。

### 1. 実験装置および方法

実験装置の概略を図1に示す。流動層本体は内径54mm、分散板から拡大部までの高さが1200mmの透明アクリル樹脂製である。分散板には銅製の多孔質焼結板を使用した。塔頂部から飛出す粒子は外部サイクロンによって捕集した。

A粒子については最小流動化速度および最小気泡化速度の測定を行った。これらは流動化ガス速度と圧力損失および層高の測定からそれぞれ求めた。C粒子については流動化ガス速度を変化させて、流動化状態を写真撮影などにより観察した。

実験に使用したC粒子の物性を表1に示す。またA粒子は図2の Geldart のマップの (○) で示されるように粒子径が30~80 $\mu\text{m}$ 、粒子密度が600~2400 $\text{kg m}^{-3}$ の範囲にある粒子を使用した。またこの図において一部のC粒子は (●) で示している。

2. 実験結果および考察

2.1 A粒子の膨張特性

図3はAグループに属するAL-1粒子についてのガス速度と層高の関係を示す。この粒子の径は $55\mu\text{m}$ で密度は $770\text{kg m}^{-3}$ である。ガス速度が最小流動化速度を越えると層は膨張を始める。層高はあるガス速度において極大値となり、このあたりのガス速度で気泡が発生し始める。この時のガス速度を最小気泡化速度 $U_{mb}$ とした<sup>1)</sup>。また層高が極大となったときのエマルジョン相の空隙率 $\epsilon_{mb}$ を次式によって求めた。

$$\epsilon_{mb} = 1 - \frac{L_{mf}}{L_{mb}} (1 - \epsilon_{mf}) \quad (1)$$

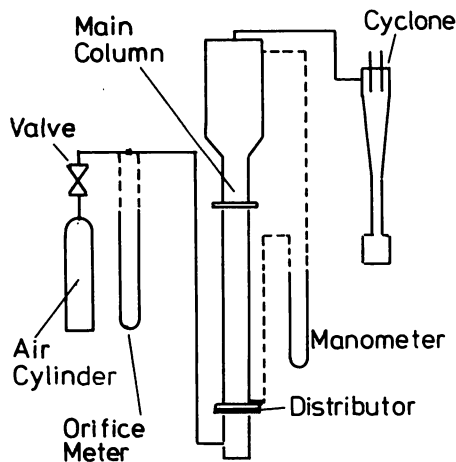


図1 実験装置の概略図

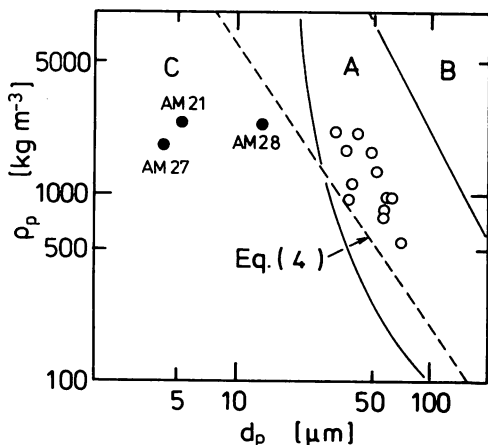


図2 粒子径と粒子密度による粒子の分類

ここで、 $\epsilon_{mf}$ ,  $L_{mf}$ は最小流動化速度における空隙率と層高であり、 $L_{mb}$ は最小気泡化速度における層高である。

気泡流動化域にある層のエマルジョン相膨張率については膨張率の差 $\epsilon_e - \epsilon_{mf}$ が次式で示すパラメータ $N$ によって整理できることが報告されている<sup>7)</sup>。そこで $\epsilon_{mb}$ についても $\epsilon_{mb} - \epsilon_{mf}$ とパラメータ $N$ との関係を図4に示す。

$$N = \sqrt{d_p^3 g (\rho_p - \rho) / \mu} \quad (2)$$

図からわかるように $\epsilon_{mb} - \epsilon_{mf}$ は $1/N$ とほぼ比例関係にある。しかし $100/N$ の値が3のあたり、つまり $N = 30$ 付近では直線から予測される値よりもかなり小さな値となる。この粒子は粒子径が $36\mu\text{m}$ 、粒子密度が $920\text{kg m}^{-3}$ とAグループの中では粒子径および密度の比較的小さい粒子であり、その性質はかなりCグループの粒子に近いと考えられる。

表1 C粒子の物性

粒 子	$d_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\rho_b$ [ $\text{kg m}^{-3}$ ]
アルミナ AM-21	5	890
アルミナ AM-27	4	510
アルミナ AM-28	13	850
水酸化アルミニウム	0.7	280
炭酸カルシウム	9.6	650

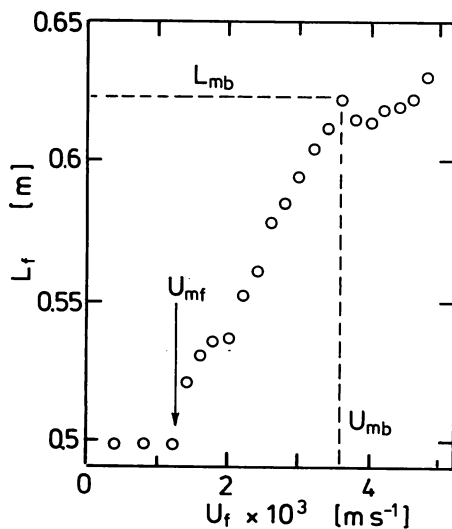


図3 A粒子の層膨張特性

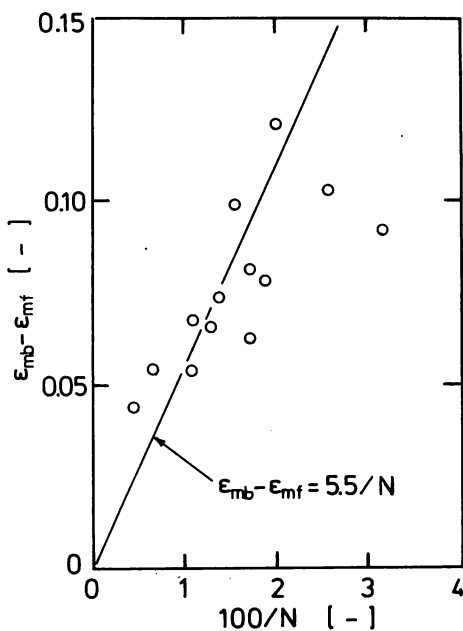


図4 空隙率の差とパラメータNとの関係

### 2.2 C粒子の流動化状態

C粒子を流動化させるとその流動化状態が大きく二つに分けられることがわかった。図5にはその様子を示す。第一のタイプでは粒子が凝集を起こしやすく、層下部に大きく凝集した粒子が存在し、上方になるにしたがって凝集体の大きさは小さくなる。凝集体の大きさは大きなもので5~8mmで、小さなものでも1~2mmである。ガス速度を上げていくと層上部より徐々に流動化していく。このタイプにはAM-27(図5-

a)と水酸化アルミニウムが当てはまる。第二のタイプはガス速度を上げると層上部よりクラックが生じて層全体にチャンネルングを起こす。さらにガス速度を上げると層の上部が急激に流動化する。このタイプにはAM-21とAM-28(図5-b)が相当する。

流動化の状態が二つのタイプに分れる原因は明かでないが、表1の粒子物性を参考すると、粒子径はあまり関係なく、粒子かさ密度が影響していることがわかる。つまり、かさ密度が小さいと凝集を起こしやすく、大きくなるとチャンネルングを起こしやすくなると思われる。図6は炭酸カルシウムの流動化状態を表したものであるが、先に述べた二つの流動化状態の中間的な挙動を示す。このことから炭酸カルシウムのかさ密度650kg m<sup>-3</sup>あたりが二つの流動化状態の境界と考えられる。

二つの流動化状態は流動化部および未流動化部の高さを測定することからも判別できる。図7には凝集しやすいAM-27、図8にはチャンネルングを起こしやすいAM-28の層高の変化を示す。凝集しやすい粒子の場合には流動化部は徐々に下方へ広がっていくが、チャンネルングを起こしやすい粒子の場合には流動化部が層上部に突然出現する。またチャンネルングを起こしやすい粒子の場合には未流動化部および流動化部の高さが大きく変動している。これはチャンネルングを起こしたり、流動化したり変動しているためである。

### 2.3 A-Cグループの境界

図9はA粒子にC粒子を混合した粒子の最大膨張率

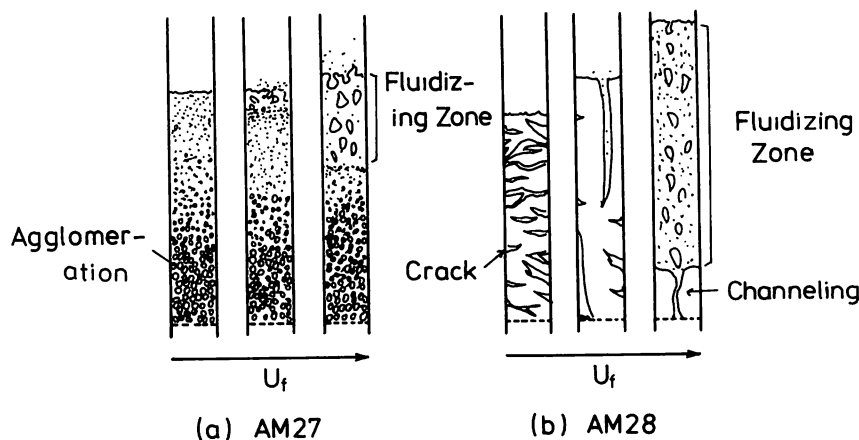


図5 C粒子(アルミナ)の流動化状態のガス速度にともなう遷移

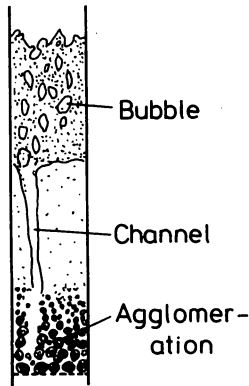


図6 C粒子(炭酸カルシウム)の流動化状態

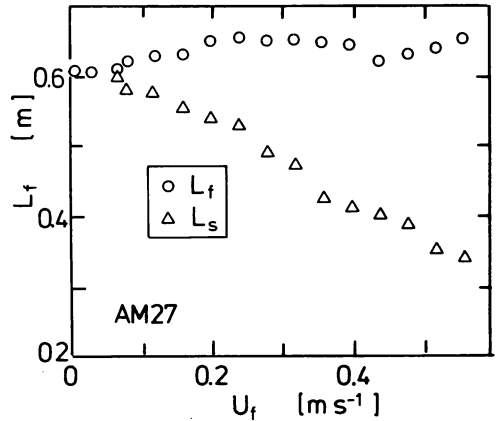


図7 アルミナ AM27 の流動層高のガス速度による変化

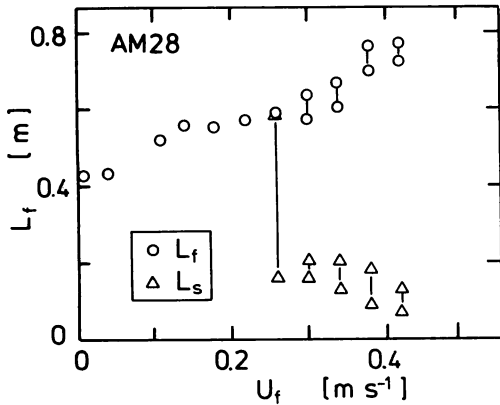


図8 アルミナ AM28 の流動層高のガス速度による変化

$\alpha_{max}$  とパラメータ  $100/N$  に対する C 粒子の混合割合を表したものである。 $\alpha_{max}$  は次式で求めた。

$$\alpha_{max} = L_{mb}/L_{mf} \quad (3)$$

ここでは A 粒子として AL-1, C 粒子として AM-28 を用いた。この図が示すように C 粒子の含有量が 10 から 15% にかけて  $\alpha_{max}$  は極大値をとり、それ以上では C 粒子の含有量が増えるに従って  $\alpha_{max}$  は小さくなる。これは図 2 が示す結果と本質的には同じ結果である。この図から  $100/N$  の値として 2.5 が A グループと C グループの境界と考えると式(2)より

$$\sqrt{d_p^3 g (p_p - p) / \mu} = 40 \quad (4)$$

の関係が得られる。この関係を常温、常圧で流動化ガ

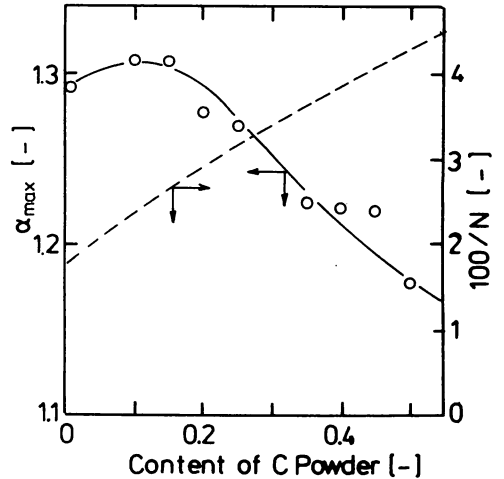


図9 A, C 混合粒子の最大膨張率と C 粒子含有割合との関係

スを空気とした場合に、Geldart のマップ<sup>4)</sup>に加えた。図 2 の破線がその境界である。Geldart によって経験的に引かれた境界(図 2 の実線)とほぼ一致していることがわかる。

### 3. 結 言

Geldart<sup>4)</sup> の C グループに相当する粒子の流動化状態は粒子かさ密度によって二つに分類されることがわかった。かさ密度が小さな粒子は凝集を起こしやすく、かさ密度が大きな粒子ではチャンネルングを起こしやすい。

A, C 粒子の混合粒子の層膨張特性から A, C グループの境界を求め、次式で表すことができた。

$$\sqrt{d_p^3 g (p_p - p)} / \mu = 40 \quad (4)$$

## 使用記号

$d_p$	= Harmonic diameter of particle	[m]
$g$	= Acceleration due to gravity	[m s <sup>-2</sup> ]
$L_f$	= Height of fluidized bed	[m]
$L_{mb}$	= Bed height at minimum bubbling velocity	[m]
$L_{mf}$	= Bed height at minimum fluidization velocity	[m]
$L_s$	= Height of defluidized zone	[m]
$\alpha_{max}$	= $L_{mb}/L_{mf}$	[-]
$\epsilon_{mb}$	= Bed voidage at minimum bubbling velocity	[-]
$\epsilon_{mf}$	= Bed voidage at minimum fluidization velocity	[-]
$\mu$	= Viscosity of fluidizing gas	[Pa s]
$\rho$	= Density of fluidizing gas	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\rho_b$	= Bulk density of bed	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\rho_p$	= Apparent density of particle	[kg m <sup>-3</sup> ]

## 引用文献

- 1) Abrahamsen, A. and D. Geldart: Powder Technol., 26, 35 (1980).
- 2) Chaouki, J., C. Chavarie, D. Klvana and G. Pajonk: Powder Technol., 43, 213 (1985).
- 3) Dry, R. J., M. R. Judd and T. Shingles: Powder Technol., 39, 69 (1984).
- 4) Geldart, D.: Powder Technol., 7, 285 (1973).
- 5) Geldart, D. and A. C. Y. Wong: Chem. Eng. Sci., 39, 1481 (1984).
- 6) Iyer, S. R. and L. T. Drzal: Powder Technol., 57, 127 (1989).
- 7) Kai, T., A. Iwakiri and T. Takahashi: J. Chem. Eng. Japan 20, 282 (1987).
- 8) Morooka, S., M. Nishinaka and Y. Kato: Kagaku Kōgaku, 37, 485 (1973).
- 9) Morooka, S., K. Kusakabe, A. Kobata and Y. Kato: J. Chem. Eng. Japan, 21, 41 (1988).
- 10) Rietema, K.: Powder Technol., 37, 5 (1984).