



Title	混合粒子系噴流層の流動特性
Author(s)	上牧, 修; 山田, 隆一; 久郷, 昌夫
Citation	北海道大學工學部研究報告, 109, 21-28
Issue Date	1982-07-30
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/41731
Type	bulletin (article)
File Information	109_21-28.pdf



[Instructions for use](#)

混合粒子系噴流層の流動特性

上 牧 修 山 田 隆 一 久 郷 昌 夫
(昭和57年3月31日受理)

Flow Characteristics of Solid Particles in Mixed Particle-Size Spouted Beds

Osamu UEMAKI, Ryuichi YAMADA and Masao KUGO
(Received March 31, 1982)

Abstract

The minimum spouting velocity and segregation behaviour of binary mixtures of particles differing in size were studied in this paper. Experiments were done in a bed of 20cm diameter at superficial gas velocities up to $1.3 U_{ms}$, using silica sand of four different particle sizes from 0.655 to 2.23mm. An empirical equation of the minimum spouting velocity for binary mixtures was proposed.

Axial and radial concentration profiles of the coarser particles in the bed were obtained and the effects of the particle size ratio and the superficial gas velocity on segregation were investigated. It was found that radial segregation of the solids as well as axial segregation occurred markedly at the particles size ratios above 2. However, the radial concentration gradients gradually decreased by increasing the gas velocity.

The results obtained in this study are useful in analysing the performance as well as the position of the outlet pipes for a continuously operated spouted bed reactor of mixed particles.

1. 緒 言

噴流層は穀類の乾燥や肥料の造粒などの工業装置として広く用いられているが、近年噴流層を石炭のガス化や重質油の熱分解などの化学的操作のための装置に応用することが試みられるようになってきた^{1,2,3)}。この噴流層の技術を応用した石炭のガス化装置は、現在普通ガス化法や高カロリーガス製造法に対して開発されている流動層方式に比較して、ガス分配器を使用しないことによる種々の利点のほか、層内粒子が強制循環流を形成しているため流動層より粘結性の高い石炭を処理できること⁴⁾や比較的粗い粒子(1~4 mm)を流動化できるため原料石炭の粉碎コストが安価となることなどの利点を有している。

一般に工業規模の石炭ガス化装置では広い粒径分布を有する原料石炭を処理しなければならない。層内にはこれと粒子径や密度を異にする反応残渣粒子（灰分）が混在することになる。したがってガス化装置の円滑な操作には、混合粒子系の流動特性を明らかにすることは重要であり、石炭のガス化に噴流層を応用する場合もやはり同様となる。しかし噴流層の場合、混合粒子系の挙動に関する研究は極めて少なく、最小噴流化速度に関しては Brunello ら⁴⁾と石蔵ら⁵⁾の研究が、また粒子の偏析分級現象に関しては Piccinini ら⁶⁾と Cook ら⁷⁾の研究が速報などのかたちで報告されているのみで、操作変数を系統的にかえておこなわれた研究は見当たらない。

本研究は、石炭のガス化に噴流層を適用する場合の以上の観点から、混合粒子系の噴流層の流動特性を明らかにすることを目的とし、まず研究の第一段階として同一密度で粒子径のみが異なる2成分系の噴流層について、その最小噴流化速度と層内に生ずる粒子の偏析分級現象について実験的に検討した。

2. 実験装置および方法

実験に使用した噴流層装置は内径 200 mm、高さ 1000 mm、円錐部角度 60 度の透明塩ビ製である。噴流化粒子としては狭い粒径範囲で篩分した同一密度 ($\rho_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$) で、粒子径の異なる ($\bar{d}_p = 0.655, 0.961, 1.52, 2.23 \text{ mm}$) 4 種類の珪砂（三栄銀砂鉱業(株)製）を使用した。

粒子の最小噴流化速度は、粒径比を 3 種類 ($d_B/d_s = 1.47, 2.32, 3.40$) 変えた二成分混合粒子系について、ガス流速と層の圧力損失の関係から決定する通常の方法⁸⁾により、下記の操作条件下で測定した。

- 噴流層の層高（6 点）

$$H = 25, 30, 35, 40, 45, 50 \text{ [cm]}$$

- 噴流層のノズル径（3 点）

$$D_i = 2.2, 2.5, 3.0 \text{ [cm]}$$

- 着目粒子濃度（大粒子の濃度）（11 点）

$$C_{Bo} = 0, 12.5, 25.0, 37.5, 50.0, 62.5, 75.0, 85.0, 90.0, 95.0, 100 \text{ [wt\%]}$$

粒子の偏析分級に関する実験では、安定な噴流層が形成される条件下でノズル径 ($D_i = 22 \text{ mm}$) と層高 ($H = 50 \text{ cm}$) を一定に保ち、大粒子濃度 (C_{Bo}) 75 wt % で、粒径比を 3 点 ($d_B/d_s = 1.47, 2.32, 3.40$)、ガス流速を 4 点 ($U/U_{ms} = 1.04, 1.10, 1.20, 1.30$) 変化させて、着目粒子の濃度分布を測定し、粒子の偏析分級に及ぼすこれら操作条件の影響をしらべた。

3. 実験結果および解析

3.1 最小噴流化速度

装置の設計、運転上重要な最小噴流化速度を推算するための実験式はすでにくつか報告されているが⁹⁾、均一粒子径に関するものが多い。また均一粒子系と若干の混合粒子系の実験データから得られた Mathur らの最も一般的な最小噴流化速度 (U_{ms}) の推算式⁹⁾

$$U_{ms} = \left(\frac{\bar{d}_p}{D_c} \right) \left(\frac{D_i}{D_c} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

を用いて 2 成分系噴流層の種々の粒子濃度における U_{ms} を求めた場合、計算値と実測値とはあまり良く一致しないことが指摘されている⁹⁾

そこで本研究でも実験条件を代入して得られた Eq. (1) からの計算値と実測値との比較を試み、

混合粒子系に対する Eq. (1) の妥当性をしらべた。その結果を Fig. 1 に示す。なお U_{ms} の計算値を求めるにあたり、混合粒子の平均粒子径 (\bar{d}_p) として、次式による調和平均径を使用した。

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum(x_i/d_{pi})} \tag{2}$$

Fig. 1 から U_{ms} の小さい領域では実測値の方が大きく、 U_{ms} の大きい領域では逆に計算値が大きくなり、計算値と実測値の間にはかなりの差異が認められる。そこで同一密度で粒子径のみが異なる 2 成分系噴流層の最小噴流化速度を与える本実験データを使用して Eq. (1) の修正を試みた。

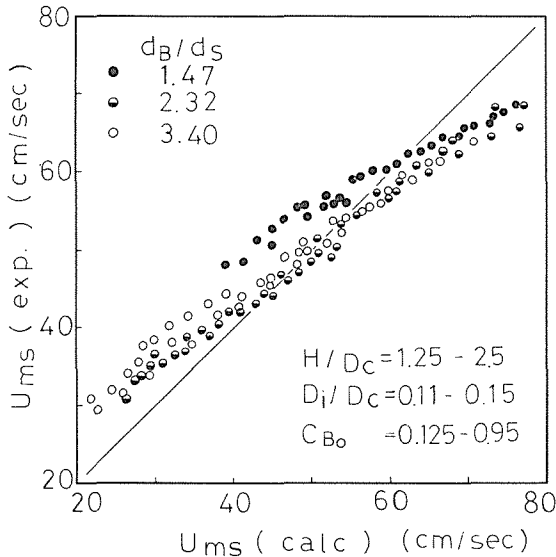


Fig. 1 Comparison of measured U_{ms} with calculated values by Eq. (1).

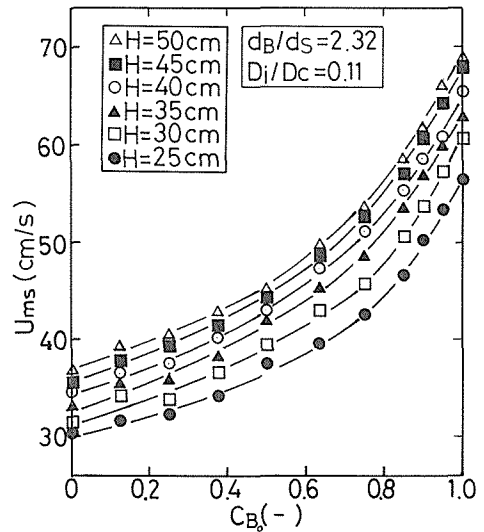


Fig. 2 Effect of bigger particle fraction on minimum spouting velocity.

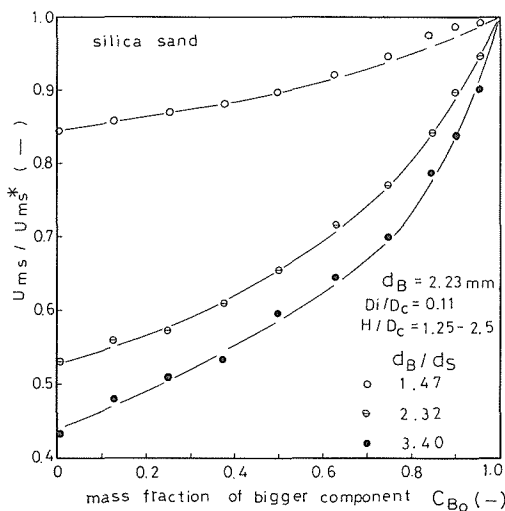


Fig. 3 Effect of particle size ratio on minimum spouting velocity.

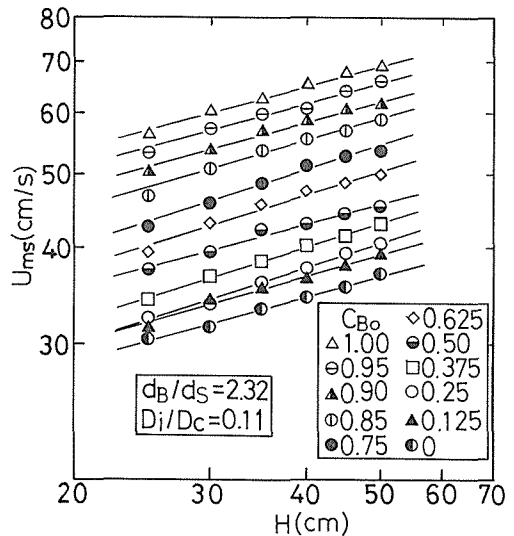


Fig. 4 Effect of bed height on minimum spouting velocity.

Fig. 2 は 2 成分系の最小噴流化速度に及ぼす大粒子濃度 (C_{B0} = 混合粒子中の大粒子の重量 / 混合粒子の全量) の影響の一例を示したものである。この図から層高および大粒子濃度が大きいほど U_{ms} が増加すること, 大粒子の噴流層に小粒子が少量混入すると U_{ms} が急激に低下することが認められる。この最小噴流化速度の減少割合は Fig. 3 に示されるように, 当然のことながら大粒子と小粒子の粒径比 (d_B/d_s) が大きいほど大きくなるので, 使用する混合粒子系の粒径比と粒子濃度の選択によって最小噴流化速度を調節できることがわかる。

Fig. 4 および Fig. 5 は粒径比が 2.32 の場合の U_{ms} 対 H (層高) および U_{ms} 対 \bar{d}_p (平均粒子径) の関係を, それぞれ粒子濃度と層高をパラメータとして示したもので, これらの図から $U_{ms} \propto H^{0.324}$ および $U_{ms} \propto \bar{d}_p^{0.651}$ なる関係が得られる。同様の結果は粒径比が 1.47 と 3.40 の場合にも得られ, さらに U_{ms} に及ぼすノズル径の影響をしらべた結果 $U_{ms} \propto D_i^{0.274}$ を用いることにより, 混合粒子系の最小噴流化速度を与える式として次の Eq. (3) の関係を求めた。

$$U_{ms} \propto \left(\frac{d_p}{D_c}\right)^{0.651} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0.274} \left[\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{0.324} \quad (3)$$

次いで Fig. 6 に示す Eq. (3) と実測値との点線から比例定数を求め, 最終的に U_{ms} の推算式 Eq. (4) を得た。

$$U_{ms} = 4.94 \left(\frac{\bar{d}_p}{D_c}\right)^{0.651} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0.274} \left[\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{0.324} \quad (4)$$

Eq. (4) と Mathur らの Eq. (1) とを比較すると Eq. (4) における各べき数は Eq. (1) の値より

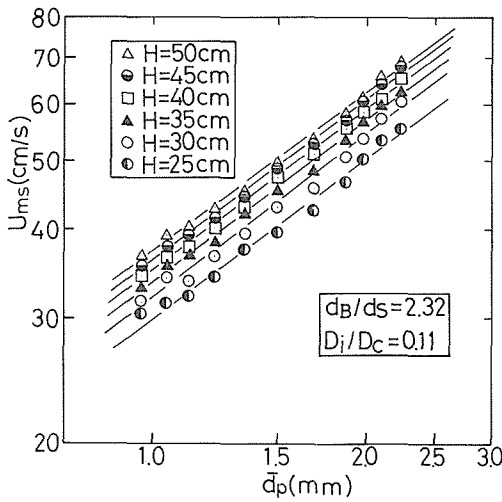


Fig. 5 Effect of mean particle diameter on minimum spouting velocity.

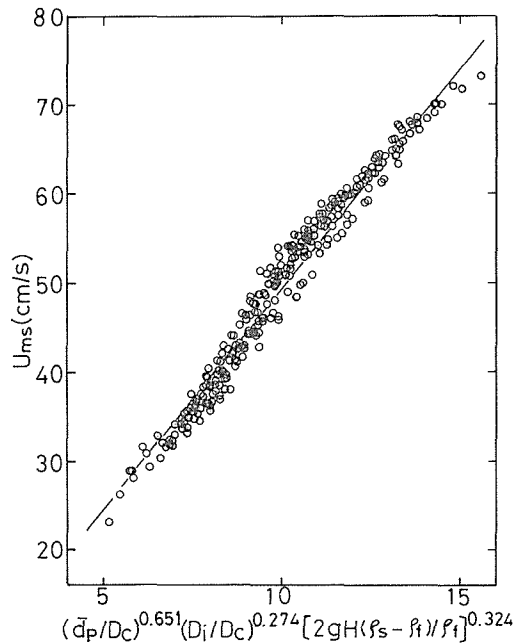


Fig. 6 Relation between U_{ms} and

$$\left(\frac{d_p}{D_c}\right)^{0.651} \left(\frac{D_i}{D_c}\right)^{0.274} \left[\frac{2gH(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}\right]^{0.324}$$

いずれも小さく、混合粒子系では U_{ms} に及ぼす粒子径、ノズル径、層高の影響は均一粒子系の場合より小さくなる傾向を示すことが明らかとなった。

3.2 粒子の偏析分級

混合粒子系の流動層における粒子の偏析分級現象に関してはすでに多くの研究がおこなわれ、種々の成果が報告されている^{10,11,12,13}。しかし、噴流層内の粒子の偏析分級に関してはガラス球($\bar{d}_p=3.0\text{ mm}$, $\rho_s=2.97\text{ g/cm}^3$)とからし種($\bar{d}_p=2.2\text{ mm}$, $\rho_s=1.17\text{ g/cm}^3$)の2成分系噴流層で実験をおこなったCookら⁷⁾の研究が報告されているだけである。そこで本研究では同一密度で粒子径の異なる2成分系の噴流層内の粒子の偏析分級状態に及ぼす粒径比とガス流速の影響を実験的にしらべた。

Fig. 7 ~ Fig. 9はガス流速 $U/U_{ms}=1.04$ 、ノズル径 $D_t=0.11 D_c$ 、大粒子の層平均濃度 $C_{Bo}=0.75$ の条件下における着目粒子(大粒子)の層の半径方向の濃度分布を層の高さ方向の位置をパラメータとして示したものである。なおFig. 7は粒径比が1.47($d_b=2.23\text{ mm}$, $d_s=1.52\text{ mm}$)、Fig. 8は粒径比が2.32($d_b=2.23\text{ mm}$, $d_s=0.961\text{ mm}$)、Fig. 9は粒径比が3.40($d_b=2.23\text{ mm}$, $d_s=0.655\text{ mm}$)の場合のものである。

これらの図から明らかなように噴流化ガス速度の小さい噴流層では($U=1.04 U_{ms}$)層の高さ方向のみならず層の半径方向にも粒子の偏析分級が著しく起きており、粒子層の高さ方向のみに偏析分級が生ずる流動層とは異った現象が認められる。またFig. 7 ~ Fig. 9からガス流速とノズル径が一定の条件下では2成分粒子の粒径比が大きくなるにしたがい、層の高さ及び半径方向の偏

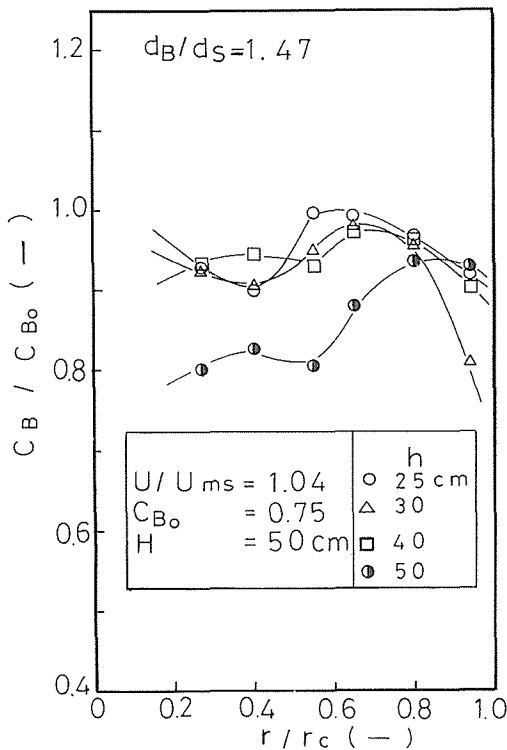


Fig. 7 Radial concentration distribution vs. dimensionless radius ($d_b/d_s=1.47$).

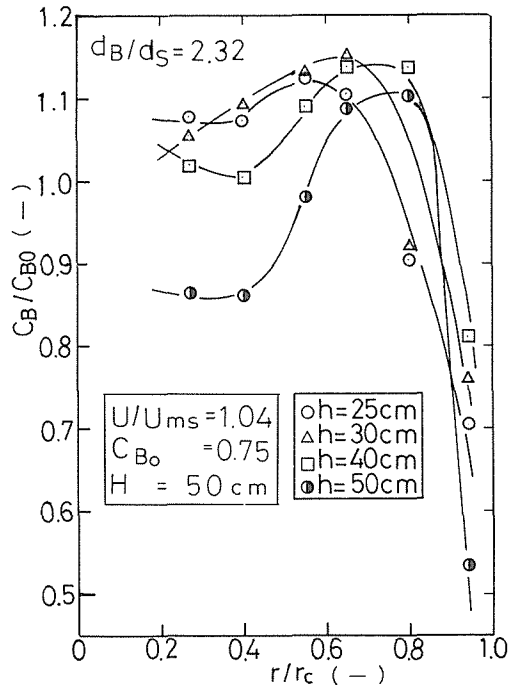


Fig. 8 Radial concentration distribution vs. dimensionless radius ($d_b/d_s=2.32$).

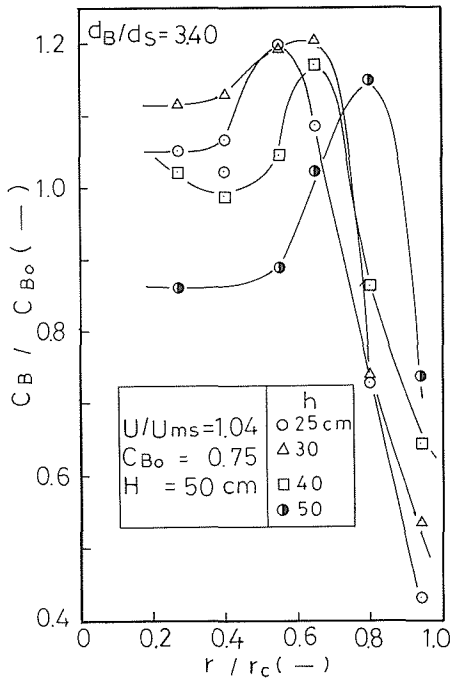


Fig. 9 Radial concentration distribution vs. dimensionless radius ($d_B/d_s=3.40$).

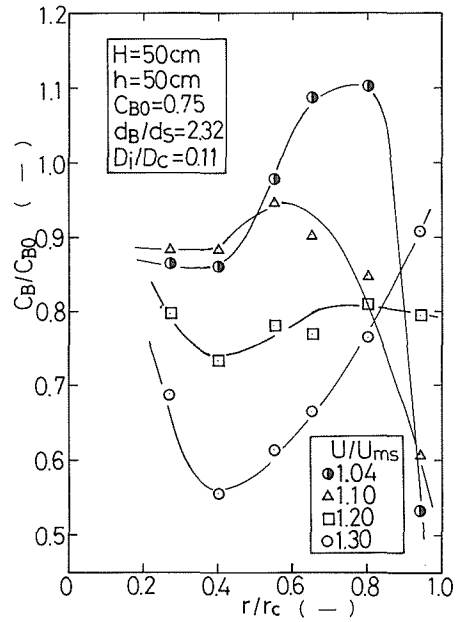


Fig.10 Effect of gas velocity on radial concentration distribution at the top of the bed.

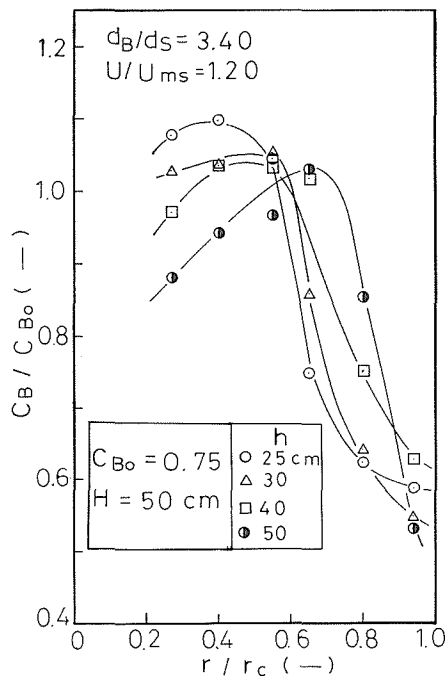


Fig.11 Radial concentration distribution vs. dimensionless radius ($d_B/d_s=3.40$, $U/U_{ms}=1.20$).

析分級の度合が増加すること、塔壁付近には小粒子が、また層環状部の中央付近には大粒子が集りやすいことが示される。層頂部に認められる半径方向の大きな濃度分布は層下部では次第に減少しており、このガス流速 ($U=1.04 U_{ms}$) が生ずる層頂部のスパウトによる偏析分級は、粒子が環状部を下方へ移動する間に起る粒子の半径方向の混合によって減少していくことが認められる。この結果は噴流層内の循環粒子の軌跡を研究した Robinson ら¹⁴⁾の報告とも一致する。

Fig. 10 にはスパウトの形状 (underdeveloped, developed, overdeveloped) が著しい影響を及ぼす層頂部における着目粒子の濃度分布とガス流速の関係を示した。この図から層中心部のスパウトによって層頂部へと運ばれる大粒子は、ガス流速の増加とともに管壁付近にまで飛ばされる結果(いわゆる overdeveloped spouts)、管壁付近における大粒子の濃度が増加し、その分だけ環状部内側での濃度が低下していくことが観察される。このようにガス流速の増加とともに層頂部でのスパウト部が発達する結果、半径方向の粒子の偏析分級の度合は減少するが、しかし Fig. 11 に示すように混合粒子の粒径比が大きい場合 ($d_b/d_s=3.40$) にはガス流速が比較的大きい ($U=1.20 U_{ms}$) 場合でも粒子の偏析分級は顕著に起きることが認められる。

以上、噴流層における粒子の偏析分級現象に関し、実験結果に基づいて定性的な考察を試み、偏析分級に及ぼす粒子径とガス流速の影響を明らかにした。なお、さらに実験条件をかえた実験データを収集し、噴流層の偏析分級現象を定量的に解析する予定であり、その結果は次の機会に報告したい。

4. 総 括

本研究では広い粒径分布をもつ粒子を扱う気固接触装置に噴流層を応用する場合に問題となる混合粒子系から成る噴流層の流動特性を、最小噴流化速度と粒子の偏析分級現象を中心に実験的に検討した。

その結果、最小噴流化速度に関しては現在最も広く利用されている Mathur らの推算式からの計算値は実測値とあまり良い一致を示さないことを認め、本実験結果を用いて、同一密度で粒子径のみの異なる2成分系の最小噴流化速度を与える式を提出した。また、混合粒子系の噴流層の偏析分級現象に及ぼす粒径比とガス流速の影響をしらべ、噴流層では流動層と異なり、層の高さ方向のみならず層の半径方向にも偏析分級が起きていることを明らかにした。

これらの実験結果は噴流層内で起こる混合粒子系の気固間の反応の粒子運動と反応モデルの解析や装置設計の際に重要な問題となる粒子の供給、排出法の決定などの基礎データとして有効に利用できるものと考えられる。

使 用 記 号

C_B	: concentration of bigger particle at any position in bed	(wt %)
C_{Bo}	: mean concentration of bigger particle in bed	(wt %)
D_c	: column diameter	(cm)
D_i	: nozzle diameter (fluid inlet diameter)	(cm)
d_b	: bigger particle diameter	(cm)
d_s	: smaller particle diameter	(cm)
\bar{d}_p	: mean diameter of mixed particles	(cm)

H	: bed height	(cm)
r	: radial distance from axis	(cm)
r_c	: column radius	(cm)
U	: superficial gas velocity	(cm/sec)
U_{ms}	: minimum superficial gas velocity for spouting	(cm/sec)
x_i	: mass fraction of i component in mixed particles	(—)
ρ_f	: fluid density	(g/cm ³)
ρ_s	: particle density	(g/cm ³)

引用文献

- 1) Foong, S. K., Lim, C. J. and Watkinson, A. P.: *Can. J. Chem. Eng.*, **58** (1980), p. 84
- 2) Foong, S. K., Cheng, G. and Watkinson, A. P.: *Can. J. Chem. Eng.*, **59** (1981), p. 625
- 3) 上牧 修, 藤川昌久, 久郷昌夫: 石油学会誌, **20** (1977), p. 410
- 4) Brunello, G., Nina, G. D., Nunes, F. C. S. and Nascimento, C. A. O.: *Can. J. Chem. Eng.*, **52** (1974), p. 170
- 5) 石蔵利文, 後藤憲司, 篠原 久ら: 化学工学協会第15回秋季大会講演要旨集(II) p. 311 (1981)
- 6) Piccinini, N., Bernhard, a., Campagna, P. and Vallana, F.: *Can. J. Chem. Eng.*, **55** (1977), p. 122
- 7) Cook, H. H. and Bridgwater, J.: *Can. J. Chem. Eng.*, **56** (1978), p. 636
- 8) Mathur, K. B. and Epstein, N.: *Spouted Beds*, (1974) p. 15, Academic Press
- 9) Mathur, K. B. and Gishler, P. E.: *A. I. Ch. E. J.*, **1** (1955), p. 157
- 10) Nienow, A. W., Rowe, P. N. and Cheung, L. Y. L.: *Powder Technol.*, **20** (1978), p. 89
- 11) Gibilora, L. G. and Rowe, P. N.: *Chem. Eng. Sci.*, **29** (1974), p. 1403
- 12) 小林晴夫, 千葉繁生: 化学工場, **25** (1981), 8, p. 69
- 13) Geldart, D., Baeyens, J., Pope, D. J. and Wijer, P. V., *Powder Technol.*, **30** (1981), p. 195
- 14) Robinson, T. and Waldie, B., *Can. J. Chem. Eng.*, **56** (1978), p. 632