



Title	混合粒子から成る気固系流動層の粒子混合と分級
Author(s)	千葉, 繁生; Chiba, S; 千葉, 忠俊 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 102, 23-31
Issue Date	1981-01-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41662
Type	departmental bulletin paper
File Information	102_23-32.pdf



混合粒子から成る気固系流動層の粒子混合と分級

千葉繁生 千葉忠俊 小林晴夫

(昭和 55 年 8 月 30 日受理)

Solid Mixing and Segregation in Gas Fluidized Beds of Solid Mixtures

S. CHIBA T. CHIBA H. KOBAYASHI

(Received August 30, 1980)

Abstract

In order to elucidate the effects of particle properties and operating conditions upon the minimum fluidization velocity and mixing-segregation phenomena in the fluidized bed of binary particle systems, the pressure drop across the bed, mean voidage in the bed and axial distributions of jetsam concentration were measured in the bed with various combinations of different particles under various gas velocities and mean compositions of particles. Apparent minimum fluidization velocity u_{mf} of the bed of binary particle systems which tends to segregate was defined relevant to the extent of segregation in the bed. It was demonstrated that the values of the apparent u_{mf} are dependent upon the mode of gas velocity change prior to the measurements. It was also shown that the operating conditions such as gas velocity, bed height, average concentration ratio of particles in binary systems are important parameters which affect the extent of the segregation of particles which is due to the difference in size and density. A concept of segregation map which facilitates the mixing state of particle systems was proposed.

1. 緒 言

従来、気固系流動層では主に、密度が同じで粒径分布のみをもつ粒子が対象であった。その場合、層内軸方向の粒子混合は良好で、均一層として扱うことができた。しかし、最近では流動層を固体廃棄物の燃焼、焼却処理装置として、さらに石炭のガス化装置や流動燃焼装置として適用することが考えられているが、流動層をこれらの目的に利用する場合、層内は燃料粒子や燃焼残渣粒子などの粒径、密度、さらに形状の異なる多成分粒子から成る。このような混合粒子から成る流動層では、粒子物性の差、殊に密度の差やガス流速などの操作条件によって顕著な分級 (*segregation*) が起こる¹⁾。

多成分粒子から成る流動層の粒子挙動は、二成分粒子の結果を拡張することによって理解できる^{1,2)}。粒径、密度、さらにそれらによって決まる流動化開始速度の異なる二成分粒子をある組成割合で混合し、これを流動化すると、層内は混合、分級の動的平衡状態になり、軸方向で着目成分の濃度分布を示す。粒子の混合と分級はともに気泡の運動によって引き起こされるので、濃度分布を決定するガス流量は、層内を気泡として流れるガス流量であり、二相説から簡単に層断面

積 A 当り)

$$\frac{Q_B}{A} = u_o - u_{mf}$$

と表わされる。ここで、 Q_B は気泡体積流量、 u_o は流動化ガス空筒速度で、 u_{mf} は流動化開始速度である。二成分粒子の u_{mf} ^{3,4,5,6)} は、両成分の粒子物性や層平均の組成割合の関数であり、さらに測定方法にも依存する。

本研究では、まず、このような分級を伴う粒子系の u_{mf} の定義を明確にし、 u_{mf} と層内混合、分級状態との関連について検討する。次に、混合、分級状態に対するガス流速、層高、および層平均の組成割合などの操作条件の影響について検討する。さらに、着目成分が層内で良好な混合状態にあるか、または層上部か層下部のいずれに多く偏在するかをそれら影響因子をパラメータとしてまとめた *segregation map* の概念を示す。

2. 二成分粒子の流動化開始速度

u_{mf} の異なる二成分粒子を流動化すると、まず、 u_{mf} の小さな粒子が u_F のガス流速で流動化し、次に、 u_F よりも大きい u_{mf} をもつ粒子が u_F で流動化する。一般に両粒子の密度が異なる場合、重い粒子 (ρ_H) は層底部に多く偏在し、沈降性粒子 (*Jetsam*) となる。一方、軽い粒子 (ρ_L) は層上部に多く偏在し、浮上性粒子 (*Flotsam*) となる。もし、密度が同じで粒径だけが異なる粒子系では、大粒子 (d_B) が *Jetsam* になり、小粒子 (d_S) は *Flotsam* となる²⁾。

このような分級系では、分級速度や分級の傾向が粒子物性やガス流速によって異なるので、実測から u_{mf} を求める場合には、測定方法と層内の流動化状態および分級状態の関連を明確にする必要がある。

2.1 実験

流動塔には、多孔質分散板を取り付けた内径 50 mm の透明アクリル製円筒を用いた。使用粒子

Table 1 Properties of particles

Particle	ρ (kg/m ³)	ρ_{mf} (kg/m ³)	d (μ m)	u_{mf} (m/s)	Re_{mf}	Shape
Copper shot (CS)	8900	5270	163	0.092	1.00	spherical
			194	0.122	1.58	
			254	0.182	3.08	
Copper powder (CP)	8390	2760	163	0.115	1.25	irregular
Glass beads (GB)	2520	1450	115	0.016	0.12	spherical
			163	0.023	0.25	
			194	0.032	0.41	
			274	0.071	1.30	
			385	0.115	2.95	
Hollow char* (HC)	1080	590	650	0.170	7.60	spherical
			775	0.225	11.60	
			359	0.0079	0.18	
Silica bolloons** (SB)	190	89	359	0.0079	0.18	spherical

* Hollow carbon particles produced from the cracking fuel oil residue.

** Hollow thin-walled silica particles produced from volcanic ash.

の物性を **Table 1** に示す。 u_{mf} の測定には、これら粒径、密度の異なる粒子を組合わせた 22 種類の二成分粒子を用いた。層全体の圧損失測定は、まず、 $u_0 \sim 2u_P$ の流速で 5 分間層を流動化した後、次の二つの流速変化の仕方によって行なった。一つは、良好な混合層における u_{mf} を求めることを目的としたもので、流速を $u_0 < u_F$ に瞬時に下げた後、徐々に $u_0 = 0$ まで流速を下げる方法であり、他の一つは、最も顕著に分級を起こす場合で、約 30 分間に流速を $u_0 = 0$ まで徐々に下げながら圧損失を測定する方法である。各流速における圧損失データの $\log\text{-}\log$ プロットから二成分粒子の見掛けの流動化開始速度 u_{mf} を求めた。また、層平均の空隙率は、静止層 ($u_0 \rightarrow 0$) における層高から計算した。

2.2 実験結果および考察

種々の二成分粒子を $u_0 > u_P$ の流速で流動化した後、一定の速さで流速を徐々に下げていくと ($u_0 \rightarrow 0$)、一般に層内は **Fig. 1** に示すような三つの典型的な混合、分級状態のいずれかの場合を示す。

層全体の流動化状態における圧損失 $\Delta p_{u_0 \rightarrow \infty}$ で正規化した $\Delta p / \Delta p_{u_0 \rightarrow \infty}$ と u_0 の関係の実測結果をまとめると **Fig. 2** のようになる。密度が同じで、わずかに粒径が異なる粒子系 (例えば GB 194/GB 115 系) の場合には、流速の変化の仕方によらず層全体が良好な混合状態になり (**Fig. 1(a)**)、ガス流速に対する $\Delta p / \Delta p_{u_0 \rightarrow \infty}$ の変化は **Fig. 2(a)** のようになる。この場合の u_{mf} は u_M で示される。(図中の u_F 、および u_P はそれぞれの粒子の u_{mf} を示す。)

次に、粒径も密度も異なり、特に密度差の大きい粒子系 (例えば CS 163/SB 359 系) の場合には、**Fig. 1(b)** のようなほぼ完全分級に近い層を形成し、圧損失と u_0 の関係は流速の変化の仕方によらず、**Fig. 2(b)** に示すような折れ線となる。このような層全体の圧損失の変化は、各々の成分の各流速における圧損失の総和になることを示している。この場合の層の流動化状態は、 $u_F < u_0 < u_P$ の流速域で層上部は流動化し、一方、層底部は固定層になっているので、層全体が流動化する流速域 ($u_0 > u_P$) と固定層になる流速域 ($u_0 < u_F$) における圧損失データの外挿から求めた u_{mf} は、見掛けの流動化開始速度 u_S である。

最後に、多くの実測結果は **Fig. 1(c)** のような部分的混合層の場合に相当し、圧損失の変化は **Fig. 2(c)** のようになる。流速を u_P から u_F に徐々に減少していくと、層底部から固定層を形成しながら混合、分級状態が変化していく。流速の減少速度が遅くて、密度の異なる粒子系の場合には、層の状態が **Fig. 1(c)** から **Fig. 1(b)** に変化する。また、密度が等しくて粒径のみが異なる粒子系

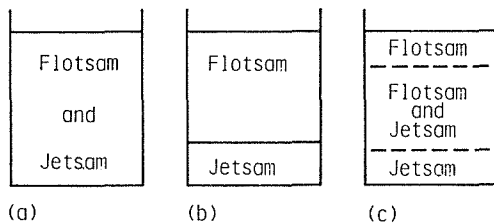


Fig. 1 Typical mixing/segregation states.
(a) Completely mixed,
(b) Completely segregated,
(c) Partial mixing

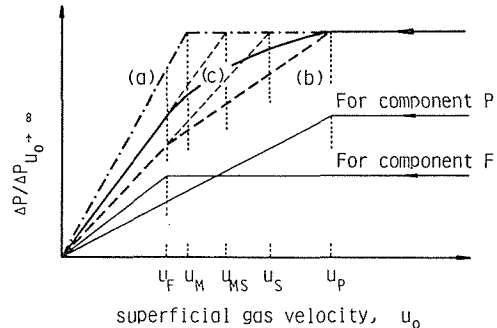


Fig. 2 Effect of the mixing/segregation state on the relationship between bed pressure drop and superficial gas velocity (idealised)—·— Completely mixed (a), — — — Completely segregated (b), ——— partial mixing (c).

で、流速を急激に減少した場合には、Fig. 1(a) の良好な混合状態に変化する。このように部分的混合層の場合には、圧損失の変化および u_{mf} ($=u_{MS}$) の値が流速の変化の仕方によって異なる。Fig. 3 に GB385+/GB163 系 (BP/SF) の層平均の組成割合 \bar{x}_F に対する u_M の変化 (Fig. 3(a))、と静止層における空隙率 ε_s の変化 (Fig. 3(b)) の例を示す。この場合、良好な混合層を得るための流速変化の仕方によって求めた u_{MS} の値は、一般に徐々に流速を下げて求めた値よりも小さく、これは ε_s の違いと関係している (Fig. 3(b))。一般に、混合粒子の空隙率は⁷⁾、単一成分のそれよりも小さくなるので圧損失は高くなり、その結果 u_{mf} の値は小さくなると考えられる。

以上の多くの二成分粒子の流動化開始速度の実測から、混合粒子の見掛けの u_{mf} は、 u_{mf} の小さな粒子 (u_F) の \bar{x}_F の増加によって減少し (Fig. 3(a))、さらに、それぞれの層内混合、分級状態と u_{mf} の関係は、広義に

$$u_F < u_M < u_{MS} < u_s < u_P$$

のようになると考えられる。完全分級層の状態から流速を徐々に増加していくと、低流速 (u_0)_s では $u_{mf} \sim u_s$ の層が顕著な分級状態で流動化し、さらに部分混合層となる (u_0)_{MS} の流速以上では、混合が良好になるので u_{mf} は u_{MS} に変化する。従ってこの流速の範囲では、気泡流束が

$$\frac{Q_B}{A} = (u_0)_{MS} - u_{MS}$$

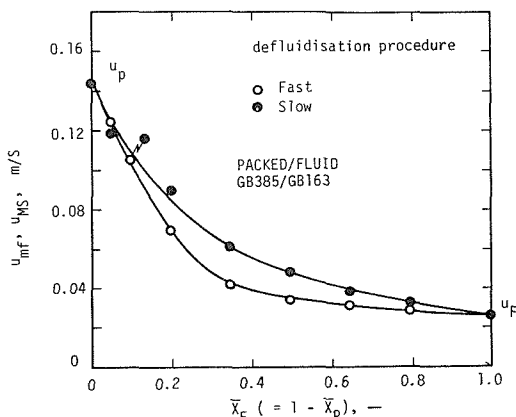
に比例して増加する。そして、(u_0)_{MS} の増大とともに層の混合状態が良好になるので u_{MS} は減少し、完全混合層になるに従って $u_{MS} \sim u_M$ に漸近する。

分級を伴う流動層のガス流速による粒子混合状態の変化は、このように u_{mf} と気泡流束の変化によると考えられる。このことから u_0 が u_F に近い流速域 ($u_0 \sim u_F$) では混合がゆっくり進むが、ある流速になると急激に混合が増加し、それ以上の高流速ではその変化の度合は小さくなり、 u_0 の増加とともに徐々に良好な混合状態に近づくことになる⁸⁾。

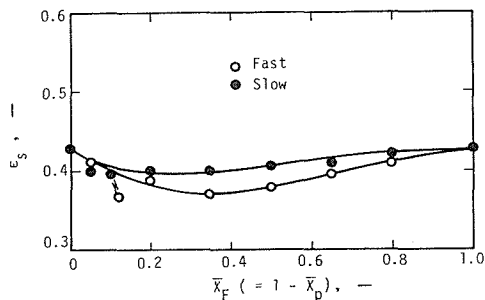
3. 二成分流動化粒子の混合分級

二成分粒子から成る流動層では、混合と分級の競争的な速度過程によって動的平衡状態が得られる。着目成分の層内軸方向の濃度分布は^{2,9)} そうした平衡状態を示すもので、粒径や密度、さらにガス流速や層平均の組成割合などの操作因子によって異なってくる。

これら粒子物性と操作条件から着目粒子が沈降性 (*Jetsam*) または浮上性 (*Flotsam*) のいずれの性質をもつかを Table 2 のように簡単にまとめることができる。密度の等しい粒子系の場合には、大粒子 (d_B) が常に *Jetsam* になる (Case 1 a)。粒径も密度も異なる粒子系の場合には、一般



(a) Apparent minimum fluidisation velocity.



(b) Bed voidage.

Fig. 3 u_{MS} and voidage as a function of composition (BP/SF system)

に密度の大きい、重い粒子 (ρ_H) が *Jetsam* になるが、Case 3 のような密度は大きいが大粒子で u_{mf} より小さな粒子から成る *HSP/LBP* 系²⁾ で組成割合 (\bar{x}_F) が小さい場合には、重い粒子が *Flotsam* になる場合がある。

このように分級系の粒子挙動は非常に複雑である。この章では、ガス流速、層高、層平均の組成割合などの混合、分級状態に対する影響について実験的に検討し、粒子の分級特性を *Segregation map* (分級状態図) に整理してみる。

Table 2 Which component is jetsam?

Case 1	Size ratio of order 1 [ref. 2]
1a.	Density ratio=1; bigger component is jetsam
1b.	Density ratio≠1; heavier component is jetsam
Case 2	Bigger component ≫ smaller component : %smaller → 100% [ref.8]
2a.	Bigger component denser than bulk density of smaller; bigger is jetsam
2b.	Bigger component less dense than bulk density of smaller; smaller is jetsam
Case 3	Bigger component ≫ smaller component : %bigger → 100% (present work)
3a.	Bigger component denser than smaller; elutriation of smaller
3b.	Bigger component less dense than smaller; either may be jetsam

3.1 実験

流動塔および使用粒子は前章と同様である。濃度分布は、層を $u_0 \sim > 2u_F$ の流速で5分間流動化した後に流速を所定の u_0 まで減少し、その流速から層を瞬時に静止して層上部から粒子を吸引、捕集、篩分して重量分析から求めた。

濃度分布から混合の度合を定量化するための混合度 M を次式で計算した。

$$M = \frac{\int_{h_{x_H=\bar{x}_H}}^{h=H} x_H dh}{\bar{x}_H (H - h_{x_H=\bar{x}_H})}$$

ここで、 x_H は分散板からの高さ h における着目成分の重量割合であり、 \bar{x}_H は層平均の重量割合である。この定義から、濃度分布が Fig. 4 (a) のようなパターンを示すならば着目成分は *Jetsam* で、 M の値は $0 \leq M \leq 1$ となる。もし、Fig. 4 (b) のような濃度分布ならば *Flotsam* で、 $1 \leq M \leq 1/\bar{x}_H$ である。ここで、 $M=1$ は完全混合を、 $M=0$ および $M=1/\bar{x}_H$ は完全分級を示す。

3.2 実験結果および考察

ガス流速の影響：Figure 5 に密度の大きい銅球 (CS194) の層高さ方向における層断面平均濃度 (x_H) の変化を示す。この粒子系 (*HSP/LBF*) の場合、銅球が *Jetsam* であり (Case 1b), 流速 u_0 の増加とともに濃度分布は図のように

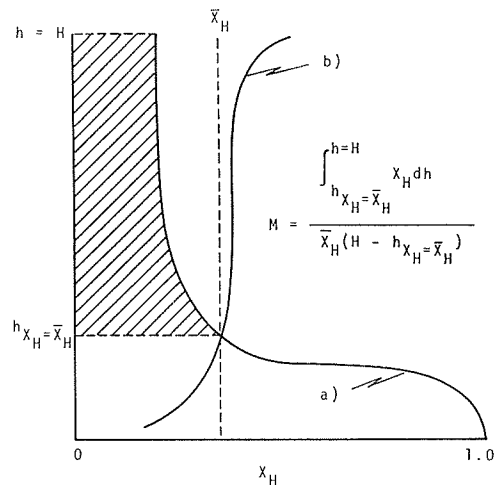


Fig. 4 Definition of mixing index, (a) x_H as jetsam, $0 < M < 1$; (b) x_H as flotsam $1 < M < 1/\bar{x}_H$

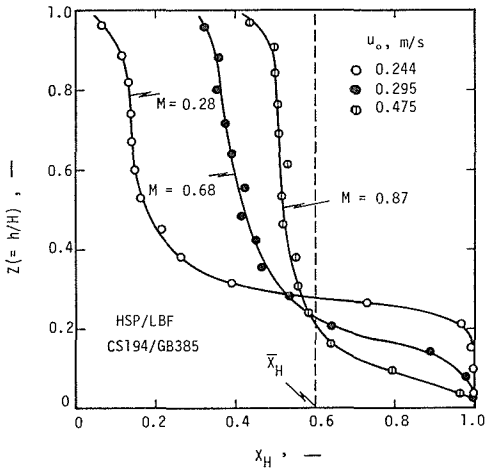


Fig. 5 Segregation pattern for fast defluidisation ; effect of gas velocity

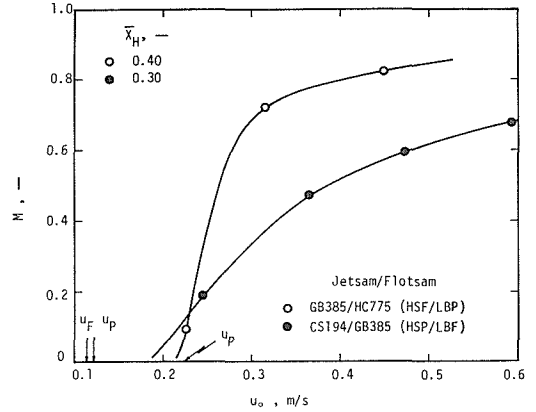


Fig. 6 Variation of mixing index with gas velocity

良好な混合状態に変化している ($M \rightarrow 1$)。この粒子系と、 u_{mf} の小さい重い粒子 (GB385) が *Jetsam* となる GB385/HC775 系との u_0 に対する M の変化を示すと Fig. 6 のようになる。両粒子の u_{mf} (u_F, u_P) がほぼ同じで、密度比 $\rho_R (= \rho_H / \rho_L)$ が 3.5 の CS194/GB385 系の場合には、 $u_0 \sim 2 u_P$ から徐々に M が増加しているのに対し、これよりも ρ_R の小さい ($\rho_R = 2.3$) GB385/HC775 系の場合には、HC775 粒子の u_{mf} ($u_P = 0.225$ m/s) の流速から急激に M が増加している。両粒子系のこのような流速の依存性の違いは、密度比が小さい程混合が良好であることと、流速の増加による混合系の見掛けの u_{mf} (u_{MS}) の減少による気泡流束 ($(u_0)_{MS} - u_{MS}$) の増加によると考えられる。

層高の影響： Figure 7 に示すように層高の増加 ($H/D_T = 1.5 \rightarrow 2.8$) によって混合は良好になっている。軸方向の粒子混合が、気泡の上昇に伴うウェイク粒子の移動による循環 $w^{(10)}$ と、ウェイク粒子とその周りのエマルジョン粒子との交換^{11,12)} q とから成ると考えると、まず、 w は気泡上昇速度 u_B ($\propto D_B^{1/2}$) と気泡ホールドアップ δ_B ($\simeq (u_0 - u_{mf}) / u_B$) に比例するので、

$$w \propto u_B \delta_B \simeq u_0 - u_{mf}$$

となり、層高によらない。 q に関しては、

$$q \propto \delta_B / D_B \propto 1 / D_B^{3/2}$$

となり、層高の増加と共に気泡の合体により気泡径 D_B が大きくなるので q は減少し、従って層上部に移動する *Jetsam* 粒子量が増加するので混合が良好になる。さらに、それによって u_{MS} は減少して気泡流束が増加するので混合が進むことになる。一方、分級¹³⁾ については、軸方向の粒子混合と同様に気泡の運動によって起こるので、分級速度 v_s は u_B と δ_B の積に比例すると考えられる。

$$v_s \propto u_B \delta_B \simeq u_0 - u_{mf}$$

従って、 v_s は層高によらないと考えられる。

層平均の組成割合の影響： 二成分粒子 (または多成分粒子) の見掛けの u_{mf} は、 u_{mf} の小さい粒子 (u_F) の添加によって減少する (Fig. 3)。ある一定の u_0 で層平均の組成割合 (\bar{x}_H) を増加していった場合、 u_{MS} の減少とともに気泡流束 ($u_0 - u_{MS}$) は増加して混合は良好になる。もし、両粒子の u_{mf} が $u_P \simeq u_F$ ならば $u_F \simeq u_{MS} \simeq u_P$ で、($u_0 - u_{MS}$) は \bar{x}_H によらずほぼ一定となり、混合に対

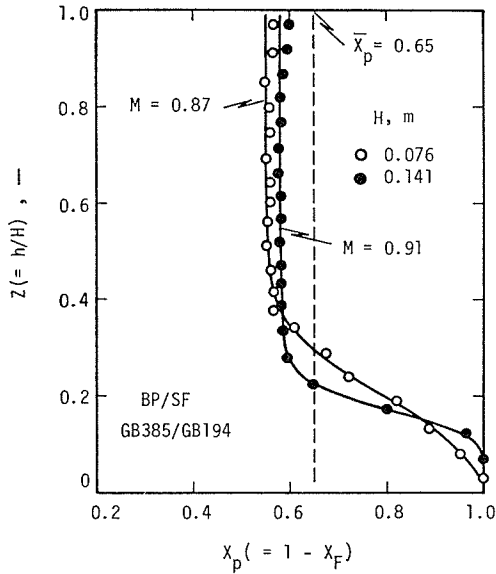


Fig. 7 Segregation pattern for fast defluidisation (from $u_0 = u_P$); effect of bed height

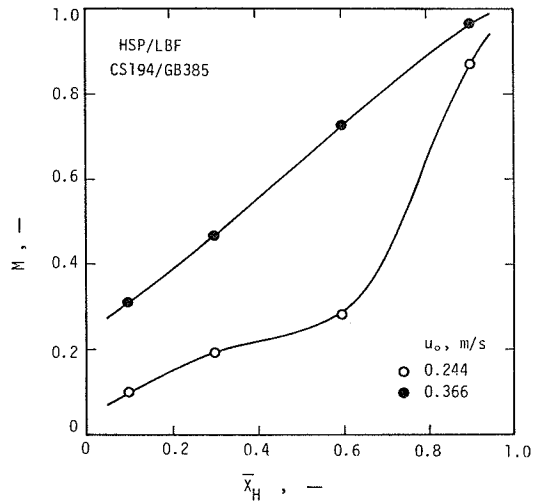


Fig. 8 The mixing index as a function of bed composition ($u_P/u_F = 1.06$)

する気泡流束の変化による影響はないはずである。これに相当する CS 194/GB 385 系 ($u_F = 0.115$ m/s, $u_P = 0.122$ m/s) の \bar{x}_H に対する M の変化を示すと Fig. 8 のようになる。 \bar{x}_H の増加とともに M は増加し ($M \rightarrow 1$), 良好な混合状態になることを示している。これは、低濃度では気泡ウェイクによって運ばれた *Jetsam* が *Flotsam* から成るバルク層内で気泡によって分級を起こすのに対し、高濃度では⁹⁾, *Jetsam* がバルク層粒子となるので、層上部の *Flotsam* はバルク循環流によって層底部へ下降して、*Jetsam* と混合されるためと考えられる。以上のことから、混合、分級に対する組成割合の影響は、 u_{MS} の変化による気泡流束の変化と、上に記した機構の違いにとも関係すると考えられる。

次に、密度が大きくて (ρ_H), u_{mf} の小さな粒子 (*HSF*) と密度が小さくて (ρ_L), u_{mf} の大きな粒子 (*LBP*) とから成る *HSF/LBP* 系の場合について、ガラス球 (*GB*)/チャー (*HC*) 粒子系を例に \bar{x}_H の影響をさらに詳しく検討した結果について述べる。Figure 9 に *GB 194/HC 650* ($\alpha = d_S/d_B = 0.30$) 系の $u_0 = u_P$ における濃度分布を示す。 $\bar{x}_H = 0.10$ では、重い小粒子 (*GB 194*) が層上部に多く偏在して *Flotsam* になっている ($M = 1.42$) が、 \bar{x}_H が増加すると *Flotsam* から *Jetsam* の濃度分布に変化している。このような \bar{x}_H による分級状態の変化の様子を M で示すと Fig. 10 のようになる。 $\bar{x}_H < \sim 0.20$ では、流速の増加とともに *Flotsam* から良好な混合状態に変化し ($M \rightarrow 1$), $0.20 < \bar{x}_H < 0.30$ では、低流速においても良好な混合状態になっている。さらに、 $\bar{x}_H \sim 0.30$ では、流速の増加とともに *Jetsam* から良好な混合状態に変化している。

重い小粒子が低濃度域 ($\bar{x}_H < \sim 0.20$) で *Flotsam* になる傾向は、Fig. 11 に示すように粒径比 $\alpha (= d_S/d_B)$ が大きくなるともはや見られず、*GB 385/HC 775* 系 ($\alpha = 0.50$) では重い小粒子 (*GB 385*) が *Jetsam* になっている (Table 2 の Case 1b に相当する)。

$\alpha = 0.15 \sim 0.50$ (または $u_P/u_F = 1.96 \sim 14.1$) の 7 種類の *GB/HC* 粒子系について、Fig. 10 に示したような関係を求め、 M の値が $1.05 < M < 0.95$ の場合には良好な混合状態とし、 $M \leq 0.95$ または $M \geq 1.05$ の場合にはそれぞれ *Jetsam*, *Flotsam* の状態と判定し、 \bar{x}_H に対してその結果を示すと Fig. 12 のような segregation map (分級状態図) を描くことができる。これは、 $u_0 = u_P$ に

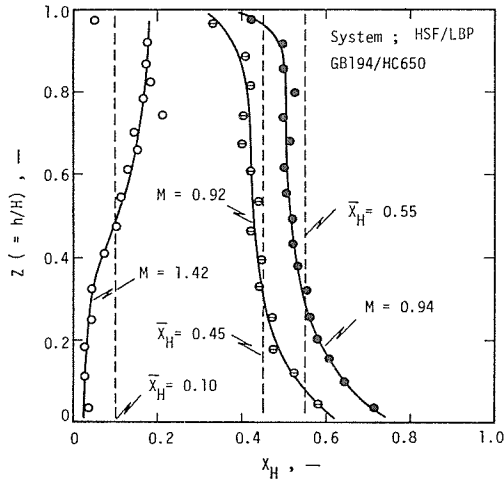


Fig. 9 Segregation pattern for fast defluidisation (from $u_0 = u_p$); effect of \bar{x}_H

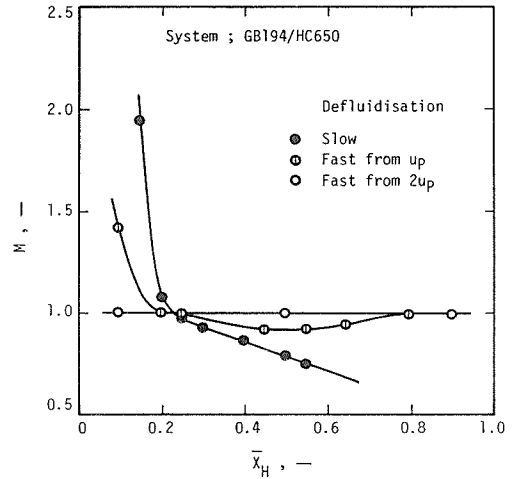


Fig. 10 The mixing index as a function of bed composition ($u_p/u_F = 5.31$)

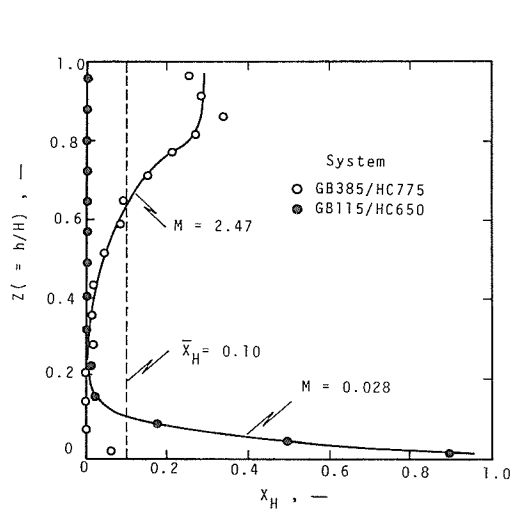


Fig. 11 The effect of size ratio on segregation pattern for fast defluidisation (from $u_0 = u_p$)

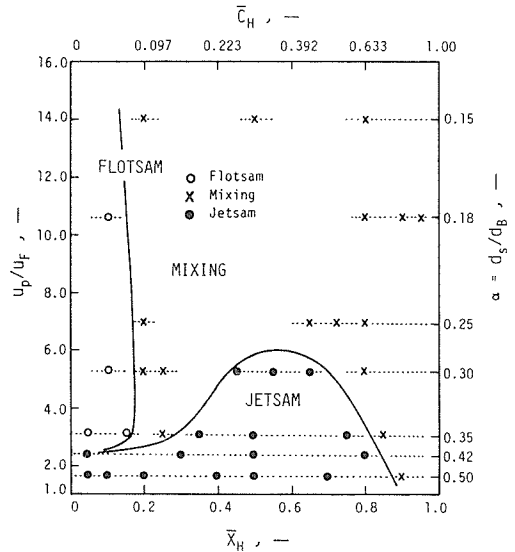


Fig. 12 Segregation map for fast defluidisation (from $u_0 = u_p$)

における着目成分の平衡状態を示し、 u_0 が増加すると図中に実線で示した境界線は混合領域を増加する方向に変化する。この図から両粒子の u_{mf} の比 u_p/u_F が大きい程、また、高い濃度程 ($\bar{x}_H \rightarrow 1$) 良好な混合状態になることがわかる。このことは前に述べた理由から理解されよう。 $\alpha < 0.42$ の粒子系では、 $\bar{x}_H < \sim 0.20$ で重い小粒子が *Flotsam* になるが、これは小粒子が大粒子の粒子間隙を透過できるためと考えられる¹⁴⁾。このことは目視観察の容易な二次元流動層での流動化実験から確認することができた。もし、ここで大粒子の層が立方充填構造 (空隙率 $\varepsilon = 0.48$) から成るとすれば、小粒子の透過可能な最大粒径比 $\alpha (= d_s/d_B)$ は 0.41 であり、実測結果 ($\alpha < \sim 0.42$) を良く説明することができる。

以上、二成分粒子から成る流動層の混合、分級に対するガス流速、層高、および層平均の組成割合などの操作条件の影響について実験的に検討を行ない、粒径や密度の粒子物性の差によって

起こる分級現象を巨視的な観点から把握することができた。

4. 結 言

二成分（または多成分）粒子から成る気固系流動層の流動化開始速度、および混合分級現象に対する粒子物性や操作条件の影響を明らかにすることを目的として、粒径や密度の異なる種々の粒子を用いて実験的検討を行った。

まず、混合粒子系の見掛けの流動化開始速度 u_{mf} については、その測定方法と定義を明確にしたうえで、混合分級状態と u_{mf} の関係を定性的に理解することができた。

次に、ガス流速、層高、および層平均の組成割合などの操作条件が、粒径や密度の粒子物性の差に起因する分級現象に影響する重要なパラメータであることを明らかにした。さらに、それら主要因子をパラメータとして着目成分の混合分級状態を *segregation map* に総括することができた。

最後に、着目成分が *Jetsam* または *Flotsam* のいずれになるかは、粒子物性と層平均の組成割合との関係からまとめた Table 2 によって容易に判断することができる。

謝 辞

本研究において、多くの助言と討論を頂いた A. W. Nienow 教授（ロンドン大学）に深く感謝いたします。

References

- 1) P. N. Rowe and A. W. Nienow, Powder Technol., 15 (1976) 141.
- 2) P. N. Rowe, A. W. Nienow and A. J. Agbim, Trans. Inst. Chem. Eng., 50 (1972) 310, 324.
- 3) W. R. A. Goossens, G. L. Dumont and G. J. Spaepen, Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., 67 (116) (1971) 38.
- 4) L. Y. -L. Cheung, A. W. Nienow and P. N. Rowe, Chem. Eng. Sci., 29 (1974) 1301.
- 5) P. N. Rowe and A. W. Nienow, Chem. Eng. Sci., 30 (1975) 1365.
- 6) S. Chiba, T. Chiba, A. W. Nienow and H. Kobayashi, Powder Technol., 22 (1979) 255.
- 7) D. Kunii and O. Levenspiel, Fluidisation Engineering, Wiley, New York, 1969.
- 8) A. W. Nienow, P. N. Rowe and L. Y. -L. Cheung, Powder Technol., 17 (1978) 89.
- 9) A. W. Nienow, P. N. Rowe and T. Chiba, AIChE Symp. Ser., 74 (176) (1978) 45.
- 10) T. Chiba and H. Kobayashi, Proc. Int. Symp. on Fluidisation and Its Application, Toulouse, p 468 (1973).
- 11) T. Chiba and H. Kobayashi, J. Chem. Eng. Japan, 10 (1977) 206.
- 12) S. Chiba, H. Tanimoto, T. Chiba and H. Kobayashi, J. Chem. Eng. Japan, 12 (1979) 43.
- 13) H. Tanimoto, S. Chiba, T. Chiba and H. Kobayashi, Proc. Third Eng. Found. Conf. on Fluidisation, Henniker, N. H., p 381 (1980)
- 14) S. Chiba, A. W. Nienow, T. Chiba and H. Kobayashi, Powder Technol., 26 (1980) 1.