移動層内での粒子浸透効果について*

杉 本 益 規** 山 本 健 市**

On the Permeation Effects of Particles in a Moving Bed

by

Masunori SUGIMOTO and Kenichi YAMAMOTO

(Faculty of Engineering, Toyama University, Takaoka)

In order to clarify the effects of particle size and density on the segregation of the particles, some experiments on the permeation of the particles having different size and density from those of the bed were carried out in a moving bed by using glass beads and spherical particles of alumina with various sizes and densities.

The results indicate that a simple flowing pattern of the particles exists in the moving bed and the degree of permeation can be represented by the following empirical equation.

$$\frac{x_T}{x_B} = 0.8 \left(\frac{\rho_T}{\rho_B} \right) + 1.2 \left(\frac{D_B}{D_T} \right)^n - 1$$

where $n=1$ at $D_T \leq D_B$ or $n=2$ at $D_T > D_B$, and x_T/x_B is the quantity defined as an index of the permeation degree of the particles in a moving bed, which is independent of the moving distance of the bed. It is suggested that the segregation characteristic of the solid mixtures of particles having two different sizes and densities in a horizontal rotating conical vessel is closely related to the value of x_T/x_B obtained in the moving bed.

(Received Mar. 1, 1973)

1 緒 論

回転容器，移動層，ホッパー，ビンおよび振動容器等に装てんされた特性の異なる粒子群は，粒子の流動化に伴って混合および偏析現象を示す．混合粒子群の流動化は，特性の異なる粒子間の易動性の差異を促がし，粒子群の偏析特性をより著しくするものと考えうる．同一混合粒子においても，流動化の方法により混合または偏析の度合が異なる^{1)~3)}．したがって，装置内の混合粒子の偏析現象は，粒子のもつ特性（粒子径，密度，形状等）に起因する偏析特性の他に，装置内の粒子層全体としての流動条件（流動化法）によっても支配されるものと考えうる．上述の理由から，粒子のもつ特性値と偏析特性の関係を知るには，粒子の挙動をできるだけ単純な粒子流動条件のもとで観測することが必要であると考えられる．また，これらの関係を知ることが装置内の混合および偏析特性を解析する上での基本的課題の一つであると思われる．

筆者らは，すでに報告したごとく水平回転円すい型容器内の粒子偏析を生ぜしめる一要因に，粒子間の浸

透効果があることを示唆した¹⁾．本報では，装置内の全粒子群が主として重力方向に移動し，かつ層内全粒子が流動状態にあり，比較的単純な流動化が得られる移動層を用いて，粒子径，密度の異なる球状粒子の粒子間の浸透効果について実験を試み，これをもとに，粒子特性と浸透効果の大きさとの関係を実験的に検討した．さらに，得られた浸透効果の大きさと水平回転円すい型容器内粒子偏析特性との間に密接な関係があることを認め得たのでここに報告する．

2 実 験

2.1 実験装置

使用された実験装置の概略はFig. 1に示すとおりである．装置は厚さ 10 mm の透明なアクリル板にて作られた小型移動層である．

装置は移動層部A，試料採取部Bおよび粒子排出部Cよりできている．移動層部では定常流下運動状態において，特性の異なる粒子間の浸透現象が観測され，B部では，A部で得られた結果をそのまま保存し，試料採取することができる．すなわち，B部はA部とは独立して回転し，水平に保つことができ（Fig. 1-b），B部およびC部の一部を水平にしたまま装置より取り

* 原稿受理 昭和48年3月1日

** 富山大学工学部 高岡市中川園町

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus (Section B and C were turned to the horizontal position for sampling).

はずすることができるように工夫した。C部下部には小さなホッパーと電磁フィーダーを取り付け、粒子の連続定量排出ができるようになっている。

2・2 実験試料

本実験に使用した各球状粒子は Table I に示すとおりである。移動層内を移動する被浸透粒子（以下、Bed 粒子と呼ぶ）層には、球状アルミナ粒子 C (Al-C 5~6 mesh) および球状アルミナ粒子 D (Al-D 6~7 mesh) を使用した。浸透粒子として使用した粒子群（以下、Tracer 粒子と呼ぶ）は同表に示すごとく特性の異なる各種球状粒子を用いた。

Table I. Materials and properties.

Spherical particles		Sieving range (Mesh)	Mean** diameter D (cm)	Mean*** density (g/cm ³)
Alumina C	Al-C	3.5/4	0.521	1.70
	Al-C	4/5	0.461	1.64
	Al-C*	5/6	0.376	1.72
	Al-C	6/7	0.351	1.76
	Al-C	7/8	0.299	1.57
Alumina D	Al-D	4/5	0.461	1.11
	Al-D	5/6	0.389	1.24
	Al-D*	6/7	0.329	1.18
	Al-D	7/8	0.287	1.11
Glass beads	GB	3.5/4	0.525	2.52
	GB	4/5	0.447	2.52
	GB	5/6	0.394	2.52
	GB	6/7	0.319	2.52
	GB	7/8	0.259	2.52
	GB	8/9	0.228	2.52
Silica gel	SB	5/6	0.377	1.85

* Al-C (5/6) and Al-D (6/7) were used as bed and tracer particles.

** Mean diameter was obtained by measuring diameters of about 200 particles with micrometer.

*** Mean density was obtained by measuring weights and diameters of about 200 particles.

なお、各種粒子の粒径に関しては、あらかじめフルイにて分級したのち、各粒子とも約 200 個を任意抽出し、マイクロメータにより直径を実測した。これらを同表の平均粒径 D に示す。また、粒子一個の平均見掛け密度は、約 200 個の粒子を対象に粒径の実測値と重量より算出した平均値であり、これを ρ にて示す。なお、球状アルミナ粒子群はあらかじめ傾斜円板法により、球状粒子を選別して使用した。

2・3 実験方法

装置 A, B, C 各部を Fig. 1 のごとく垂直に設置したのち、被浸透粒子である Bed 粒子を装てんし、A の上部より Bed 粒子を連続供給しつつ、C 下部に設置した電磁フィーダーより定量連続排出を繰り返した。層内粒子の下降流動が定常に達したのち、Bed 粒子層最上表面が上限基準レベル ($H=H_0$) より 30 mm 下部に位置するように粒子層を調節し、移動を止めた。つぎに、浸透すべき粒子である Tracer 粒子を Bed 粒子層上に 30 mm の厚さに静かに上積みし、全粒子層上表面を $H=H_0$ に合わせた。

実験開始と同時に電磁フィーダーにより粒子を連続排出させ、粒子層最上表面が 10 cm 下降する毎にその間の平均下降速度 u (cm/sec) と粒子平均排出速度 P (g/sec) を測定した。粒子層表面が下限レベル ($H=H_f$) に達すると同時に電磁フィーダーの作動を止め、粒子の排出を止めた。 $H=H_f$ は常に本装置の B 部上端とした。 $H=H_f$ に達した粒子層をそのまま保存するため、B 部上端および C 部下端を素早く封じ、粒子の下降を防ぎつつ、静かに B, C 部を回転し、水平に保った。つぎに、B 部を装置より取りはずし、さらに B 部の側壁を取り除いた。試料の採取には、B 部上端部に位置する粒子層最上部より 30 mm 間隔にて全粒子層を採取した。採取された試料より、着目 Tracer 粒子を選別し、各採取試料中の Tracer 粒子の体積濃度を測定し、Tracer 粒子の浸透深さとその分布を求めた。なお、本実験では、 $H=H_0$ を変えることにより、移動層下降距離 $\Delta H (=H_0-H_f)$ を 10~140 cm に変え、また、 $u=0.67$ (cm/sec) について行なった。本実験では、粒子下降速度および排出速度はともに $\pm 5\%$ 以内に一定値を示すことが確かめられた。これより、移動層を通じて空隙率が一定であることを確かめ得た。なお、 $\rho_T/\rho_B=0.64\sim 2.14$, $D_B/D_T=0.71\sim 1.45$ の範囲に変えた。

3 結果

3・1 移動層内粒子の挙動

本実験に使用された移動層内での粒子流下運動は、粒子層表面が移動層内を常に水平に保たれつつ下降現象を示した。一方、粒子個々については、各粒子は重力方向の力を受けつつ相互に位置を換えたり、回転運

動を示しつつ下降運動を示すことが観測され、移動層内を粒子が下降運動することにより、粒子層全体が易動性に富み、一種の流動化現象を示していることが認められた。したがって、易動性に富む移動層上に置かれた比較的密度の大なる粒子 (Bed 粒子層に比較して) は層内部により没しやすく、また、粒径の小なる粒子は層内流動化に伴う瞬間的な局部空間の発生により、粒子間隙にはまり込みやすくなっているものと推定できる。

本報では、このような粒子間の押しのけ、はまり込み等の割込み現象を浸透現象 (Permeation) と呼び、これによって生じた効果の大きさを定量的に検討することを試みた。

3・2 粒子浸透効果の大きさと定量化

Bed 粒子層上部 30 mm に上積みされた Tracer 粒子はいずれも移動層の下降運動を通じて高さ方向 (軸方向) に分布することが認められた。Bed 粒子と同一 Tracer 粒子においても同様な分布が認められ、Bed 粒子層内部がかなり流動的になっているものと推定できる。本実験では、これらの分布をもとに Tracer 粒子の粒子層最上部からの軸方向位置 x_{ap} に関する算術平均値 $\bar{x}_{ap}$ (cm) を算出した。Fig. 2 は $\bar{x}_{ap}$ と移動層下降距離 ΔH との関係を各 Tracer 粒子別に示したものである。

Fig. 2. Experimental relations between the mean depth of permeation of tracer particles from the top of the bed, $\bar{x}_{ap}$ and the moving distance of the bed, ΔH .

同図でも明らかなように、いずれの Tracer 粒子に関しても $\bar{x}_{ap} = 1.5$ (cm) を原点として $\bar{x}_{ap}$ と ΔH とは直線関係を示している。なお、ここで $\bar{x}_{ap} = 1.5$ (cm) は Tracer 粒子の初期装てん高さ (厚さ) が 30 mm であることに基づく平均値に相当するものである。

本報では、Fig. 2 の結果に基づき、各 Tracer 粒子の $\bar{x}_{ap}$ から Tracer 粒子の初期装てん条件による $\bar{x}_{ap} = 1.5$ を差し引いた浸透深さを有効浸透深さ $\bar{x}$ (cm) とする。

Fig. 2 の関係で明らかなごとく、いずれの Tracer

粒子に関しても、次式の比例関係が得られる。

$$\bar{x} (= \bar{x}_{ap} - 1.5) \propto \Delta H \quad (1)$$

この関係より、移動層単位下降距離当たりの Tracer 粒子有効浸透深さ x は

$$\frac{\bar{x}}{\Delta H} = x \quad (2)$$

となり、 x は Tracer 粒子がきまれば ΔH には無関係に与えられる値となる。

ここで、Bed 粒子と同一粒子を Tracer 粒子とした場合の $\bar{x}$ を $\bar{x}_B$ とし、それ以外の粒子を Tracer 粒子とした場合の $\bar{x}$ を $\bar{x}_T$ とおく。Bed 粒子の乱れを考慮し、 x_B に対する x_T の比をとれば、Fig. 2 の結果より、

$$\frac{x_T}{x_B} = \text{constant} \quad \begin{cases} x_T = \bar{x}_T / \Delta H \\ x_B = \bar{x}_B / \Delta H \end{cases} \quad (3)$$

となる。これより、 x_T/x_B は Tracer 粒子と Bed 粒子の組合せが決まれば、 ΔH に無関係に一定値となる。

本報では、 $\bar{x}_B \neq 0$ となる本移動層内での粒子の浸透効果の大きさを示す一つの目安として、 x_T/x_B を採用し、以下検討する。ここで、 $x_T/x_B = 1$ ならば、Bed 粒子と Tracer 粒子との間に浸透効果の差はなく、浸透効果による偏析は生じにくいものと考ええる。 $x_T/x_B > 1$ ならば、Tracer 粒子は層内に割込み作用を示し、浸透現象があるものと考えうる。一方、 $x_T/x_B < 1$ ならば、層内に浸透現象はほとんどおきず、一種の排斥現象を示しているものと判断できる。したがって、 $x_T/x_B \neq 1$ では、いずれも浸透効果による偏析要因を含んでいるものと考えうる。

3・3 結果と整理

3・3・1 x_T/x_B と密度、粒径との関係 Fig. 3 は、 x_T/x_B と ρ_T/ρ_B の実験的關係を示したものである。

Fig. 3. Effect of particle density ratio (ρ_T/ρ_B) on the permeation effect (x_T/x_B) in a moving bed. Number near the point denotes its size ratio (D_B/D_T).

Fig. 4. Effect of particle size ratio (D_B/D_T) on the permeation effect in a moving bed.

ここで、 ρ_T , ρ_B は Tracer 粒子および Bed 粒子の密度 (g/cm^3) であり、 D_T , D_B は Tracer 粒子および Bed 粒子の平均粒径 (cm) である。Table I に示すような ρ_T , D_T はいずれも同一成分粒子において多少の差異が認められる。このことから、同図では、 D_B/D_T の比較的近い実験データ ($D_B/D_T=1.25\sim1.31$, $0.95\sim1.03$, $0.71\sim0.74$) を抽出し、これをパラメータに示したものである。同図より、いずれも D_B/D_T をパラメータとする平行直線関係が得られ、これにより、

$$\frac{x_T}{x_B} + 1 = a \left(\frac{\rho_T}{\rho_B} \right) + b \quad \begin{cases} a=0.8 \\ b=f(D_B/D_T) \end{cases} \quad (4)$$

の実験的關係が導出された。

さらに、(4)式を変形し、浸透効果に及ぼす D_B/D_T の影響について検討した結果、Fig. 4 の関係を得た。同図では、データの多少の散乱が認められるが、ほぼ次式で近似することができる。

$$\frac{x_T}{x_B} - 0.8 \left(\frac{\rho_T}{\rho_B} \right) + 1 = 1.2 \left(\frac{D_B}{D_T} \right)^n \quad (5)$$

なお、 $D_B \geq D_T$ では $n=1$ 、 $D_B < D_T$ では $n=2$ となる。したがって、これを整理すれば、本実験範囲において (x_T/x_B) と粒径比、密度比の間に次のごとく実

Fig. 5. Comparison of experimental results with the calculated value of (x_T/x_B) from Eq. (6).

験的關係を得ることができる。

$$\frac{x_T}{x_B} = 0.8 \left(\frac{\rho_T}{\rho_B} \right) + 1.2 \left(\frac{D_B}{D_T} \right)^n - 1 \geq 0 \quad (6)$$

ただし、 $x_B \neq 0$ であり、本実験のごとく実験開始時に Tracer 粒子を移動層最上部に上積みしていることから常に $x_T/x_B \geq 0$ である。

Fig. 5 は、(6)式より算出した値 x_T/x_B と全実測値との比較を示したものである。これは、Table I から明らかのごとく、密度、粒径がかなり広い範囲に変化していること等を考慮すればかなり良く一致していると認められる。

4 考 察

一般に装置内粒子の偏析現象は、粒子特性による偏析特性と装置内粒子の流動条件によって与えられるものと考えうる。水平回転円すい型容器内の 2 成分混合粒子偏析特性は、容器の形状およびその回転に伴う粒子流下角特性と粒子間の浸透効果によるものと推定できる。2 成分粒子がともに球状粒子の偏析特性では、流下角特性の差による偏析要因は小さく、主として浸透効果によって支配されるものと考えうる。著者らは別の実験により、Table I に示す Bed 粒子を含む 2 成分混合粒子の円すい型容器内粒子偏析実験を試みた。その結果、本実験の移動層内で得られた浸透効果が $x_T/x_B > 1$ を与える 2 成分混合粒子では、 x_B をもつ粒子はすべて小口径側に偏析し、 $x_T/x_B < 1$ なる混合粒子では、 x_T をもつ粒子が小口径側に偏析することを得た。これらの偏析特性は、前報で推定した結果と一致することを示すと同時に、移動層における浸透効果と容器内偏析特性との間に密接な関係があることを裏付けているものと推定できる。

5 結 言

装置内混合粒子の偏析特性には、粒子特性（粒径および密度）に基づく偏析要因があるものと考え、比較的単純な粒子流動条件が得られる移動層内の粒子浸透効果に着目し、浸透効果と粒子特性との関係について実験的に検討した。

Tracer 粒子と Bed 粒子の組合せが決まれば、移動層下降距離には無関係に一定値をとる x_T/x_B を移動層内粒子の浸透効果の一つの目安とし、採用した。これと粒子特性である二粒子間の密度比および粒径比との関係を与える実験式を導出した。

移動層にて得られた x_T/x_B の値と水平回転円すい型容器内 2 成分混合粒子の偏析特性との関係を比較検討した結果、これらの間に密接な関係があることを示唆した。

Nomenclature

- D ; Particle diameter (cm)
 H ; Height of a moving bed (cm)

H_f ; Final height of a moving bed	(cm)	particles	(cm)
H_o ; Initial height of a moving bed	(cm)	ρ ; Particle density	(g/cm ³)
ΔH ; Moving distance of the bed(= $H_o - H_f$)(cm)		Subscript : T, B ; denote value of tracer particles	
P ; Discharge rate of particles from the bed		differing from particles of the bed and	
	(g/sec)	denote value of particles of the bed and	
u ; Moving speed of the bed	(cm/sec)	its tracer	
x ; Effective permeation depth of tracer particles per unit moving distance of the bed			
(= $\bar{x}/\Delta H$)	(—)		
$\bar{x}$; Mean effective permeation depth of tracer particles in a moving bed(= $\bar{x}_{ap} - 1.5$) (cm)			
x_{ap} ; Apparent permeation depth of tracer particles from the top of a moving bed	(cm)		
$\bar{x}_{ap}$; Mean apparent permeation depth of tracer			

(昭和47年10月31日 第10回粉体に関する討論会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 杉本益規, 材料, **21**, 572 (1972).
- 2) 林 俊孝, 笹野睦雄, 津々見雄文, 川北公夫, 池田千尋, 材料, **19**, 574 (1970).
- 3) 池田千尋, 津々見雄文, 川北公夫, 材料, **19**, 579(1970).
- 4) 杉本益規, 山本健市, 粉体工学研究会誌, **8**, 426(1971).