回転容器内粒子偏析現象に及ぼす粒子流下角特性*

杉 本 益 規** 山 本 健 市***

Effect of Cascading Angle of Particles on Segregation of Solid Mixture in a Rotating Vessel

by

Masunori SUGIMOTO and Kenichi YAMAMOTO

(Faculty of Engineering, Toyama University, Takaoka)

In order to investigate the axial segregation characteristics of binary solid mixture in a horizontal rotating conical vessel, experiments were carried out by using binary mixtures of particles having various sizes, densities and shapes.

On a basis of the assumption that the axial segregation in a conical vessel is controlled by two factors; one is the radial segregation of binary mixture in the vessel and the other is the cascading angle difference between particles of the mixture, each of these factors was measured in a horizontal rotating cylinder.

As a result, it was obtained that the final axial segregation can be estimated by the segregation characteristics given by the above factors.

(Received Feb. 10, 1977)

1 緒 言

特性の異なる混合粒子の偏析特性は、多くの粉体プロセスにおいて観測され、その現象の機構等を検討した研究報告はいくつか見当る。田中は“push-away”モデルにより密度偏析を、Bridgwater⁴⁾や三輪は“percolation”（あるいは“フルイ効果”）によって粒度偏析を解明しようと試みている。

筆者らは、先に水平回転円すい型容器内に装填された混合粒子の密度差、粒度差、形状差による容器軸方向偏析特性について観測してきた。その結果、容器内の軸方向粒子偏析は、上述の push-away 現象や percolation 等を含む粒子浸透現象（本報ではまとめて“粒子浸透(permeation)効果”とよぶ）による偏析特性（要因(1)）、および動的特性値の一つと思われる2粒子間の流下角の差異に基づく偏析特性（要因(2)）によって与えられるものと推定できる。これら2要因のうち、要因(1)の粒子浸透効果による容器断面方向偏析特性に関しては、前報にて検討した。

本報では、球状および非球状粒子を含む2成分混合粒子を対象に、粒子が cascading 流動を示す範囲($N_c \approx 0.05 \sim 0.3$)にある水平回転円すい型容器内軸方向

偏析特性を支配している上述の2要因を分離して考えるを試み、要因(2)の粒子流下角特性と偏析特性との関係について実験的に検討したのでここに報告する。

2 実 験

2・1 実験装置

(1) 本実験に使用された水平回転円すい型容器（以下、容器とよぶ）の概略を Fig.1 に示す。容器の長さは 30 cm、小口径端内径は 12.5 cm ϕ 、大口径端内径は 24.5 cm ϕ の截頭された円すい型容器である。その両端はアクリル板にて封じられた。大口径端側壁は2分割され、試料の装填、採取が容易にできるように

① Horizontal rotary drum
② Conical vessel ③ Roller

Fig. 1. Experimental apparatus.

* 原稿受理 昭和52年2月10日

** 正 会 員 富山大学工学部 高岡市中川園町

*** 富山大学工学部 高岡市中川園町

工夫された。同容器は、長さ 30 cm、内径 25.4 cm ϕ の水平回転円筒内に図示のごとく固定され、所定の回転速度で回転できる。

(2) 粒子の流下角特性値と回転円筒断面方向偏析特性値を測定するために、前報⁸⁾にて使用されたものと同一の薄型水平回転円筒（長さ 5 cm、内径 34.0 cm ϕ ）を採用した。側壁には透明なアクリル板が使用され、その一方の側壁は試料の装填と断面方向偏析特性の測定のために 2 分割できるように工夫された。

2・2 実験試料

本実験に使用された試料は、破碎珪砂および前報⁸⁾の円筒断面方向偏析特性実験に使用された各球状粒子群である。これらの各 2 成分混合粒子を Table I に示す。

Table I. Experimental materials and properties.

Mixture No.	Materials*		Diameter (cm)	Density (g/cm ³)	Key**
	B	T			
1	Al-C1	—	0.376	1.72	◎
		GB-2	0.447	2.52	■
		GB-1	0.525	2.52	●
		GB-3	0.319	2.52	×
4	Al-D1	—	0.461	1.11	▲
		—	—	—	—
		—	—	—	—
		—	—	—	—
5	Al-D2	—	0.329	1.18	◎
		GB-5	0.228	2.52	●
		GB-4	0.259	2.52	◇
		Al-D1	0.461	1.11	□
8	Al-D1	—	0.461	1.11	◎
		Al-D4	0.277	1.20	+
9	SS-2	—	# 6/8	2.65	◎
		Al-D3	0.293	1.17	○
10	SS-1	—	# 6/7	2.65	◎
		SS-4	# 8/9	2.65	▼
		SS-5	# 9/10	2.65	△
12	SS-3	—	# 7/8	2.65	◎
		SS-5	# 9/10	2.65	●

* Al: Spherical alumina particles, GB: Glass beads, SS: Angular silica sands

** Same keys were used throughout all figures.

Sieving range in mesh

2・3 実験方法

(1) 水平回転円すい型容器内軸方向粒子偏析特性の測定: Table I に示す各 2 成分混合粒子を、各成分粒子につき 1.5 l（嵩容積）ずつ計 3 l を混合装填（装填率 36%）したのち、容器を所定の回転速度で 60~90 分間回転させた。偏析特性が定常値に達したのち、前報⁸⁾にて採用された Sampler により容器内粒子を採取

した。この Sampler は容器内粒子層を軸方向に 6 分割 (Fig.1 の I~VI) し、全粒子を採取できるようになっている。分割採取された各 section の粒子についてその嵩容積 V_i (cm³) とこれに含まれる着目粒子の嵩容積濃度 C_i (—) を測定した。

本実験では、回転速度 n は 5~25 [rpm] の範囲に変えられた。この回転速度範囲では、大口径端の臨界回転速度比 N_c (—) は 0.06~0.3 に相当し、容器内全粒子は十分な cascading 流動を示すことが確かめられた。

また、偏析特性の安定性と定常値を確かめるために、混合装填による偏析特性の経時変化も観測された。

(2) 粒子最大流下角 β_c の測定: Table I に示す各単一成分粒子 1.5 l（嵩容積）を薄型回転円筒に装填（装填率 33%）したのち、円筒を所定の回転速度で回転させ、円筒内の粒子最大流下角 β_c (°) を円筒断面より測定した。回転速度 n は 5~20 (rpm) ($N_c = 0.07 \sim 0.28$) の範囲にて種々に変えられた。

(3) 円筒断面方向粒子偏析特性値の測定: これに関しては前報⁸⁾と全く同様であり、詳細は省略する。2 成分混合粒子 1.5 l（各成分粒子 0.75 l ずつ）を薄型回転円筒内に装填し、所定の回転速度で回転させた。粒子の挙動が定常に達したのち、これを止め、前報にて採用された Sampler によって粒子層を断面方向に採取し、この中に含まれる着目粒子の嵩容積濃度 C (—) を求めた。回転速度範囲は(2)の場合と同様である。

3 実験結果と整理

3・1 円すい型容器内粒子偏析現象と経時変化

Fig.2 は容器内偏析特性が定常に達したのちの、着目粒子の嵩容積濃度 C_i (—) と軸方向位置 l/L (—)（小口径端にて $l=0$ ）の関係の実測例を示したものである。断面方向偏析特性の代表値 Y をパラメータに示

Fig. 2. Axial segregation of binary solid mixtures in a horizontal rotating conical vessel; concentration of B-particles C_i vs. axial distance (l/L).

してある. 同図より明らかなように, 球状混合粒子 (Mixt. 1, 5, 7) は $Y > 0.5$ では着目粒子は大口径側に, $Y < 0.5$ では小口径側に多く偏析し, $Y = 0.5$ に近い混合粒子 (Mixt. 1) では偏析の度合は小さくなっている.

一方, 非球状粒子を含む混合粒子 (Mixt. 9, 11) の偏析特性と Y との間には明白な関係は認められない.

Fig. 3 は容器内粒子偏析特性の経時変化の代表例を示したものである. なお, 容器内粒子の偏析特性の代表値 σ^2 は, Fig. 2 の結果をもとに次式にて定義された.

$$\sigma^2 = \sum V_i (C_i - C_0)^2 / \sum V_i \quad (1)$$

ここで, $C_0(-)$ は着目粒子の仕込濃度である.

Fig. 3. Segregation curve for binary mixtures.

同図より明らかなように, 容器内の偏析特性は60~90分後に定常値に達し, しかもこのときの特性値 $\sigma^2(-)$ はかなり安定した値であるといえよう. なお, σ^2 の値は容器の回転速度 n , 混合粒子の種類等によって異なるが, Fig. 3 と同様な偏析特性曲線が観測された.

なお, 本報では容器内軸方向の偏析特性の大きさの定量化と偏析の方向性を代表する値として, 前報と同様に(1)式をもとに標準偏差 σ を次式のごとく定義する.

$$\sigma = \pm \sqrt{\sigma^2} \quad (2)$$

上式において, 着目粒子 (表中に示すB粒子) が大口径側に偏析した場合を $[\sigma]$ とし, 逆に小口径側に偏析した場合を $[-\sigma]$ で表すことにする.

3・2 粒子最大流下角 β_r の測定結果と定量化

筆者らはすでに粒子の cascading 流動を伴う回転円筒内粒子の最大流下角 β_r を実測し, これが粒子の動的特性値の一つとして有効であることを示唆した⁹⁾.

本報では, 水平回転円すい型容器内軸方向の粒子偏析特性に, 2粒子間の流下角の差異が要因(2)として大きく関与しているものと考え, 各単一成分粒子の流下角を実測した. その結果の代表例を Fig. 4 に示す. いずれも β_r は cascading 流動範囲 ($N_c \leq 0.3$) では N_c の増加に伴って増加している. この関係は粒子の

Fig. 4. Maximum cascading angle β_r of particles in a horizontal rotating cylinder with various critical speed ratios N_c .

形状, 粒径によって異なることが認められることから, β_r は2次の物性値の一つといえよう. したがって, β_r と粒子の一次物性との関係を検討することは今後の課題ではあるが, ここでは, 2粒子間の流下角の差異を定量化 (無次元化) するために, 次式により代表値 $X(-)$ を定義する.

$$X = \frac{\beta_{rB} - \beta_{rT}}{\bar{\beta}_r} \quad \left(\bar{\beta}_r = \frac{\beta_{rB} + \beta_{rT}}{2} \right) \quad (3)$$

ここで, β_{rB} , β_{rT} は着目粒子 (B粒子) と他の粒子 (T粒子) の各粒子最大流下角を示す.

同式より, 2成分混合粒子において, $X=0$ のとき, 2粒子は同一流下特性を示す. $X < 0$ ならば, B粒子がT粒子より小なる流下角で流下を始め, $X > 0$ では

Fig. 5. Cascading angle difference of binary mixture in a horizontal rotating cylinder with various critical speed ratios N_c .

T粒子が流下しやすいことを示す。

Fig. 5 は, Fig. 4 の各単一成分粒子の結果をもとに, 各2成分混合粒子の場合の X と N_c との関係を算出したものである。なお, この X と N_c との関係は, 軸方向に粒子流動条件の連続変化をもつ水平回転円すい型容器では, 軸方向偏析特性と密接な関係があるものと推定される。

3・3 円筒断面方向偏析特性(Y)と N_c

Fig. 6 は薄型水平回転円筒内の2成分混合粒子の断面方向偏析特性の代表値 Y と N_c との関係の代表例を示したものである。代表値 Y は移動層内粒子浸透効果と密接な関係があることはすでに前報にて報告したとおりであり, 本報では前報と同様に, 粒子浸透効果による円筒断面方向偏析特性の代表値として次式で定義された Y を採用する。

$$Y = \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}} \quad (4)$$

Fig. 6. Radial segregation index (Y) of binary mixture in a horizontal cylinder with various critical speed ratios N_c .

ここで, $C(-)$ は Fig. 6 に示すように粒子層断面方向に採取された Sample 中の着目粒子嵩容積濃度であり, $C_{\max}$ は着目粒子が層中央部 (core 部) に完全偏析した場合 (Fig. 6(a)), $C_{\min}$ は層外周部 (wall 側) に完全偏析した場合 (Fig. 6 (b)) の C の値である。 $C_{\max}$, $C_{\min}$ は円筒の直径, 粒子層断面積, 着目粒子仕込濃度 $C_0(-)$ がわかれば幾何学的に偏析モデルより算出できる。本実験では, $C_0=0.5$, $C_{\max}=0.68$, $C_{\min}=0.32$ となる。(4)式より, $Y=1.0$ に近いほど着目粒子は層中央部に, $Y=0$ に近いほど層外周部に偏析していることを示す。 $Y=0.5$ では, 2粒子は円筒断面方向に均一混合を示している。

4 実験結果と考察

4・1 円すい型容器軸方向粒子偏析特性と2要因

特性の異なる2成分混合粒子の回転円すい型容器内軸

方向偏析特性は主として上述の2要因によって与えられるものと考えうる。すなわち, (1)2粒子間の粒子浸透効果による回転容器断面方向偏析特性, (2)2粒子間の粒子流下角差による特性の2要因である。

円すい型容器の形状特性により, 容器内径は軸方向に連続的に変化している。これにより, 一定の回転速度 n においても, 容器内粒子の流動特性を支配する臨界回転速度比 N_c は次式のごとく軸方向に分布を示す。

$$N_c = \frac{n}{423} \sqrt{D} \quad (5)$$

ここで, $D(\text{cm})$ は軸方向距離 $l=l$ における容器内径である。これより, N_c は小口径端から大口径端に向かって増加する結果となる。一方, N_c の軸方向分布は粒子流下角 β_r の軸方向分布を生ぜしめる。このことは, Fig. 4の実験結果からも明らかである。すなわち, N_c の小なる小口径側では流下角 β_r は小さく, 大口径側では大となる。このことは, 円すい型容器内の粒子層において, 小口径側の粒子流下開始位置は大口径側のそれよりも低いことになる。これは, 粒子層自由表面の一部(粒子流下開始付近)のレベルが大口径側から小口径側に向かって低く, 粒子層自由表面は半径方向と軸方向に傾斜を有していることになる。このような粒子層流動条件下に置かれた2成分混合粒子においては, 次のような偏析挙動が推定できよう。

要因(1)による容器断面方向偏析特性によれば, 容器層外周部に偏析している粒子は, 粒子の循環運動に際してより自由表面近くを流下することになる。このことは, 層外周部に位置する粒子をして, より小なる β_r を示す N_c の小なる小口径側に近い流下面にて流下することを容易(優位)にならしめる結果となるものと推定される。また, 層中央部に偏析している粒子は β_r の大なる大口径側に残留することになる。

一方, 要因(2)の粒子流下角の差異に基づく偏析特性によれば, 同一 N_c において流下角の異なる2粒子が同時に流下するとき, β_r の小なる粒子は β_r の大なる粒子に比べて, より小なる傾斜角で流下を始めるであろう。このことは, 粒子層流下面の傾斜角(流下角 β_r)の軸方向分布を有する円すい型容器内では, β_r の小なる粒子は大なる粒子に比較して, 小なる流下角を示す小口径側により近い流下面を流下することを容易(優位)にならしめるものと推定できる。とくに, 粒子の流下開始時にはその効果は大きいものと考えられる。その結果, 2成分混合粒子のうち, β_r の小なる粒子は小口径側に, β_r の大なる粒子は大口径側に偏析するものと推定される。

以上の考察をもとに, 本報では要因(1), (2)が同時に作用する2成分混合粒子の水平回転円すい型容器軸方向最終偏析特性(これを σ にて代表する)は, 要因(1)

による偏析特性 ($\pm\sigma_Y$) と要因(2)による偏析特性 ($\pm\sigma_X$) の和によって与えられるものと考え、次式を仮定する。

$$\sigma = \sigma_X + \sigma_Y \quad (6)$$

したがって、要因(1), (2)ともに同一偏析特性を有する場合には、観測される最終偏析特性値 σ は大きくなり、2 要因が互いに相反する特性を示すならば偏析は相殺され、 σ は小さくなるものと推定される。

4・2 軸方向偏析特性に及ぼす断面方向偏析 (Y)

Fig.7 は、比較的 β_r の類似した球状 2 成分混合粒子(a)および β_r の異なる非球状粒子を含む 2 成分混合粒子(b)に関する容器軸方向偏析特性 σ_{ob} と薄型水平回転円筒内断面方向偏析特性 Y との実験的關係を示したものである。 σ_{ob} 、 Y とともに粒子の流動特性を支配している臨界回転速度比 N_c を基準に対応させたものである。同図の結果からも明かなように、非球状混合粒子および一部の球状混合粒子 (Mixt. 5, 6) を除いて、

Fig. 7. The relationship between radial segregation index (Y) in a cylinder and axial segregation characteristics (σ_{ob}) in a conical vessel for (a) spherical binary mixture and (b) non-spherical binary mixture.

球状 2 成分混合粒子のほとんどは図示の直線のごとく相関関係が認められる。すなわち、円筒断面方向偏析特性において、 $Y=1.0$ に近いほど $\sigma_{ob}=+0.5$ に近く、 $Y=0$ に近いほど $\sigma_{ob}=-0.5$ に近くなる。この結果より、粒子流下角差が小さい場合 ($X \approx 0$) の円すい型容器軸方向偏析特性は断面方向偏析特性と密接な関係をもち、層外周部に偏析する粒子は小口径側に偏析していることになる。この結果は 4・1 にて推定した結果と一致する。これより、 $X \approx 0$ では σ_{ob} は Y のみの関数としてみなされ、近似的に次式が得られる。

$$\sigma_{ob} = \sigma_Y = Y - 0.5 \quad \left(\begin{array}{l} -0.5 \leq \sigma_Y \leq +0.5 \\ 0 \leq Y \leq 1.0 \end{array} \right) \quad (7)$$

なお、上述の直線からはずれた 2 成分混合粒子 (Mixt. 5, 6) に関する σ_{ob} は、粒子流下角特性 X の作用を同

時に受け、 X 、 Y の作用は互いに相反する偏析特性を与えるものと思われる。

一方、非球状粒子を含む混合粒子 (b), (Mixt. 9~12) の場合には、断面方向偏析が小さい ($Y \approx 0.4 \sim 0.5$) にもかかわらず、軸方向偏析の度合は大きい。これらの偏析特性 σ_{ob} は、 Y による効果よりも粒子流下角の差異による特性値 (X) によって支配されているものと思われる。

4・3 軸方向偏析特性に及ぼす流下角特性 (X)

本実験では、軸方向偏析特性に及ぼす X の効果のみを観測することは困難であることから、4・2 で得られた σ_Y と Y の実験結果をもとに、次式より σ_X を算出し、 σ_X と X との関係を検討した。

$$\sigma_X = \sigma_{ob} - \sigma_Y = \sigma_{ob} - (Y - 0.5) \quad (8)$$

Fig.8 は、(8)式より得られた σ_X と X の関係を全実験データについて示したものである。実験値のばらつきは認められるが図示の曲線にて相関されるものとみなしうる。このことは、4・1 で検討した軸方向偏析特性と X との関係を一致することを示している。これより、次式の関係が得られる。

Fig. 8. The relationship between axial segregation σ_X controlled by cascading angle difference and X of binary solid mixture. (σ_Y ; axial segregation index controlled by radial segregation and calculated from eq. (7))

$$\sigma_X = 0.5 - 0.0125|X|^{-1} \begin{cases} X > 0.025; \sigma_X > 0 \\ X < -0.025; \sigma_X < 0 \end{cases} \quad (9)$$

なお、(9)式において、 $-0.025 \leq X \leq 0.025$ では、 X が σ_X に及ぼす効果は小さいものと推定される。本報ではこの範囲にある X 効果は無視した。

Fig.9 は、 σ_X と X に関する(9)式および σ_Y と Y に関する(7)式をもとに(6)式より推定した偏析特性 σ_{cal} と実験結果 σ_{ob} を対比したものである。実験値にばらつきはあるが、両者はかなり良い相関関係を示しているといえよう。

5 結 言

Fig. 9. Final correlation between axial segregation σ_{ob} observed and σ_{cal} calculated from eqs. (6), (7) and (9).

回転円すい型容器内粒子の挙動の観測をもとに、粒子流動現象に伴う偏析要因として、(1)粒子浸透効果による容器断面方向偏析特性、(2)粒子流下角の差異による偏析特性の2要因が認められ、各要因と操作条件との関係について検討した。これらの結果より、2成分混合粒子の水平回転円すい型容器内軸方向偏析特性(大きさと方向性)を推定できることを得た。

本研究の一部は昭和51年度科学研究費補助金(奨励研究(A))によるものである。

Nomenclature

- C_i : Volume (bulk) concentration of B-particles in each of axial sampling sections (—)
 C : Concentration of B-particles sampled in the radial direction of a cylinder (—)
 C_0 : Initial concentration of B-particles (—)
 D : Inside diameter of a conical vessel at $l=l$ (cm)
 l : Axial distance (cm)
 L : Length of a conical vessel (cm)
 n : Speed of rotation (rpm)

- N_c : Critical speed ratio of rotation (—)
 V_b : Bulk volume of mixture sampled in each of sections (cm³)
 X : A measure of cascading angle difference between B and T-particles of mixture, defined by eq. (3) (—)
 Y : A radial segregation index defined by eq. (4) (—)
 β_r : Maximum cascading angle of particles in a rotating cylinder (°)
 σ : Standard deviation defined by eq. (2) as an index of axial segregation characteristics in a conical vessel. $\sigma > 0$; B-particles of mixture segregate into $l=L$, $\sigma < 0$; B-particles into $l=0$. (—)
 σ^2 : Variance (—)
 Subscript X and Y denote value given by X and Y ; T and B denote value of T and B-particles respectively.

(昭和51年11月26日 第14回粉体に関する討論会にて講演)

参 考 文 献

- Mathée, H., Powder Tech., **1**, 265 (1968).
- Williams, J.C., and G. Shields, Powder Tech., **1**, 134 (1967).
- Tanaka, T., Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., **10**, 332 (1971).
- Scott, A.M., and J. Bridgwater, Ind. Eng. Chem. Fundam., **14**, 22 (1975).
- 三輪茂雄, “粉粒体工学”, p. 225 (1972) 朝倉書店
- 杉本益規, 材料, **21**, 572 (1972).
- 杉本益規, 山本健市, 材料, **22**, 684 (1973).
- 杉本益規, 山本健市, 材料, **25**, 684 (1976).
- 杉本益規, 化学工学第9回総合シンポジウム前刷, p. 31 (1970) 名古屋