円錐台型回転ドラム内軸方向偏析パターンと流動モードの関係

Relation between Axial Segregation Pattern and Flow Mode in Conical Rotating Drum

川口 寿裕, 矢田 大貴, 田中 敏嗣

Toshihiro Kawaguchi, Hirotaka Yada, Toshitsugu Tanaka

Received 15 May 2009; Accepted 16 June 2009

It is generally difficult to measure the particle motion inside of dense granular flows. An MRI (Magnetic Resonance Imaging) is one of the non-contacting and non-destructive measurement tools for such flows. In the present paper, the size segregation in the conical rotating drum is studied experimentally by use of the MRI. The segregation pattern in the axial direction of the drum depends on the rotational speed and can be classified into three types for the present experimental conditions. The MRI visualization of the particles suggests that the three types of the axial segregation pattern is closely related to the different types of the flow modes; cascading, cataracting and hybrid of them.

Keywords: MRI, Conical rotating drum, Segregation, Cascading, Cataracting

1. 緒 言

回転ドラムは、粉粒体の混合、粉碎、造粒、コーティングなど様々な工業プロセスに利用されている装置である。回転ドラム内に大きさや密度など特性の異なる粒子を混在させると、それぞれの成分が半径方向や軸方向に分離する偏析現象が起きることが知られている。特に大小2種類の粒子を混在させたときに発生する偏析現象については、実験的にも数値的にも多くの研究が行われてきた^{1,2)}。

側壁が傾斜した円錐台型回転ドラムでは、半径方向偏析に加えて軸方向偏析も生じることが報告されている³⁾。軸方向粒度偏析を利用して、円錐台型回転ドラムは粒子造粒の連続運転に用いられている。Kawaguchi ら⁴⁾は、円錐台型回転ドラム内の軸方向偏析パターンが、ドラムサイズと粒子サイズの関係により、大きく異なることを示している。

一般に、回転ドラムを含め、粒子が高濃度に存在する流れでは、その内部の粒子流動を直接観察すること

ができない。このような流れに対しては、2次元装置や半円筒装置を用いて、透明な平板壁を通して粒子挙動を観察する手法や、プローブを挿入して速度や濃度などの情報を得る計測手法がしばしば用いられる。しかし、これらの手法では壁面やプローブが流れに及ぼす影響を無視できない。また、凝固剤で粒子層を固めて切断することにより、充填構造などを調べる手法もあるが、煩雑であるだけでなく、流動中の状態を調べることはできない。

このような流れに対して、非接触・非破壊による可視化および計測も数多く試みられている⁵⁾。MRI (Magnetic Resonance Imaging : 磁気共鳴画像法) もそのような手法の一つである。MRI の通常の撮像法であるスピネコー法では時間分解能が低く、数十秒間の時間平均の情報しか得られない⁶⁾が、人体に無害である、透過画像ではなく断面画像が得られる、速度計測が可能である、などの利点を持つため、回転ドラム⁷⁾、粒子振動層⁸⁾、混合機⁹⁾、流動層¹⁰⁾などの内部粒子流れに適用されてきた。

本研究では、円錐台型回転ドラム内における軸方向偏析について、MRI を用いて定量的に調べることを試みた。回転速度が軸方向偏析パターンに及ぼす影響について調べ、偏析パターンと粒子流動モードとの関

大阪大学大学院 工学研究科 機械工学専攻
(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1) TEL 06-6879-7318
Department of Mechanical Engineering, School of Engineering,
Osaka University
(2-1 Yamada-Oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan)

Fig. 1 Experimental setup

連について調べた。

2. 実験条件および方法

2. 1 実験装置および条件

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。本実験で用いた MRI 装置（(株)MR テクノロジー）では、1.0 T の永久磁石を用いて静磁場を発生させている。装置中央の直径 50 mm の球形領域が測定領域であり、この領域内における磁場均一度は 50 ppm である。測定領域内に設置された円錐台型容器は直径 25 mm、長さ 710 mm のステンレス鋼シャフトと接続され、モーター（Panasonic, M91Z60GV4Y）によって回転させられる。回転速度はコントローラー（Panasonic, DV1204）によって調節される。

円錐台型容器の形状を Fig. 2 に示す。容器は塩化ビニル製で、長さ 100 mm の間に直径が 40 mm から 20 mm まで直線的に絞られている。容器内に直径 2 mm および 1 mm の大小 2 種類の粒子を、かさでおよそ半分程度まで充填した。なお、大小粒子の割合は体積比で 1 : 1 とした。本報においては、大径端からの軸方向距離を z と定義する。

MRI はプロトン (^1H) からの磁気共鳴信号 (NMR 信号) を取得することで位置情報を得る。したがって、測定対象物にはプロトンが含まれていなければならず、ガラスやプラスチックなどの粒子は MRI には写らない。そこで本実験においては、大粒子として液体ビタミン E ($\text{C}_{25}\text{H}_{50}\text{O}_2$) をゼラチンでコーティング

Fig. 2 Geometry of conical cylinder

した球形粒子（カプセル粒子：大鵬薬品工業(株)）を用いた。カプセル粒子は体積率で 70% が液体ビタミン E、30% がゼラチンで構成されている。カプセル粒子の平均直径は 1.99 mm、密度は 1056 kg/m^3 である。

一方、偏析を定量的に評価するため、小粒子としては MRI に写らないポリスチレン粒子を用いた。ポリスチレン粒子の平均直径は 1.02 mm、密度は 1050 kg/m^3 である。カプセル粒子とポリスチレン粒子の密度がほぼ同じであるため、密度による偏析の影響は無視できるものとした。

撮像にはスピネコー法を用い、画像は 128×128 ピクセルで取得した。 z 方向に垂直な断面を撮像し、撮像のスライス厚さは 2.7 mm とした。このスライス厚さは本 MRI 装置で設定できる最小の厚さである。撮像断面は $z = 5 \sim 95 \text{ mm}$ の間で 5 mm ずつ移動させた。1 枚の画像を取得するのに要した時間は 51 秒である。ドラムの回転速度 N として、30 rpm から 150 rpm まで 20 rpm ごとに変化させた。

2. 2 偏析の定量評価方法

回転ドラム内に大小 2 種類の粒子を混在させると、小粒子が中心部に、大粒子が周辺部に集中する、半径方向偏析が生じることが知られている。本研究では、半径方向偏析を定量的に評価するため、2.1 節で述べたように、大粒子として MRI に写るカプセル粒子（直径約 2 mm）を用い、小粒子として MRI に写らないポリスチレン粒子（直径約 1 mm）を用いた。

典型的な半径方向偏析が発生した状態の MRI 画像を Fig. 3 (a) に示す。白く写っている部分がカプセル粒子である。カプセル粒子に囲まれた中央部にはポリスチレン粒子が存在しているが、ポリスチレンはプロトンを含まないため MRI には写らない。偏析を画像データから定量的に評価するため、Fig. 3 (a) を二値化したものが Fig. 3 (b) である。このとき、断面内の白点のピクセル数を合計し、その断面における容器断面積で割ることにより、断面に占める大粒子の割合

(a) MRI image

(b) Binarized image

Fig. 3 Binarization of MRI image

Fig. 4 Effect of rotational speed on axial segregation pattern from MRI images

R_p を求めた。

3. 結果および考察

3. 1 軸方向偏析パターンの回転数依存性

円錐台型回転ドラムにおける軸方向偏析に関して、ドラムの回転速度が偏析現象におよぼす影響について調べた。初期状態において、大小粒子はほぼ均一に混合しており、容器を一定時間回転させた後の軸方向偏析パターンを調べた。軸方向偏析が完了し、定常状態に達するまでには比較的長時間かかることが知られている。本研究では、予備実験として様々な初期状態からドラムを回転させ、大粒子の軸方向分布の時間変化を調べた。その結果、本実験装置では、15分程度回転させることで、大粒子の軸方向分布が平衡状態に達することを確認した。そこで、以降の実験においては15分間回転させた後の軸方向偏析パターンを調べた。

各回転数に対して、 $z = 10, 30, 50, 70, 90$ mm における MRI 画像を示したものが Fig. 4 である。すべて15分間回転させた後に容器を静止させた状態で撮像したものである。回転数 110 rpm 以下では、全ての軸方向位置において半径方向偏析が発生していることが確認できる。しかし、 $N = 130$ rpm および 150 rpm においては、半径方向偏析が明確ではない。特に、これら

二つの回転数では、 $z = 10$ mm の位置において大粒子がほとんど存在していないことが分かる。

2. 2 節の定義に基づき、軸方向の各位置において断面に占める大粒子の割合 R_p を調べ、軸方向の分布を調べた。結果を Fig. 5 に示す。いずれの回転数においても、軸方向位置によって R_p の値が異なっており、軸方向偏析が発生していることが確認できる。しかし、その偏析パターンは回転数によって異なり、本実験条件の範囲内で大きく三つのタイプに分類することができる。

まず、低回転数域 ($N = 30, 50$ rpm) では、単調な右上がりの分布となっている。すなわち、円錐台型容器の大径部ほど大粒子の割合が小さく、逆に小径部ほど大粒子の割合が大きいのを示している。このことは Fig. 4 から確認できる。次に、中間回転数域 ($N = 70, 90, 110$ rpm) では、 z の増加に伴い、 R_p の値がいったん増加した後、減少するといった、山型の分布を示している。最後に、高回転数域 ($N = 130, 150$ rpm) では、 z の増加に伴って、 R_p の値が急激に増加する傾向が見られる。Fig. 4 においてもこのことは確認できる。すなわち、これらの回転数では $z = 10$ mm の位置で大粒子はほとんど確認されず、断面内をほぼ小粒子が占めていることが分かる。これに対して、 $z > 50$ mm では断面内をほぼ大粒子が占めていることが確認できる。

3. 2 回転数にともなう流動モード変化

円筒型回転ドラム内の粒子流動パターンは、回転数によっていくつかのモードに分類されることが知られている。一例として、Mellmann¹¹⁾ による流動モードの分類を Fig. 6 に示す。Fig. 6 において、左のものほど低回転で現れるモードであり、高回転になるにつれて右側の流動モードが観察されるようになる。ただし、(a) sliding および (c) slumping の両モードについては、装填粒子のかさがかなり小さい場合にのみ観察される。流動モードの遷移を表す無次元パラメータとしては、次式で定義されるフルード数 Fr が用いられる。

$$Fr = \frac{r\omega^2}{g} \quad (1)$$

ここで、 r はドラム半径、 ω は回転角速度、 g は重力加速度である。つまり、 Fr は遠心力と重力の比を表す。円筒型ドラムの場合、 Fr は回転数のみに依存するが、円錐台型ドラムの場合、軸方向位置によって半径が異なるため、 Fr は回転数だけでなく、軸方向位

Fig. 5 Distribution of area ratio of larger particles

Fig. 6 Flow mode in rotating drum (redrawn from Mellmann¹¹⁾)

置にも依存することになる。

円筒型回転ドラムに対して、それぞれの粒子流動モードが現れる Fr について、Mellmann¹¹⁾ の表から抜粋したものを Table 1 に示す。本実験条件において現れる Fr を計算すると、およそ 1×10^{-2} から 0.5 程度であり、粒子流動モードとしては、cascading または cataracting のみが現れると予想できる。

以降の議論では、Table 1 に基づき、cascading と

Table 1 Froude number and flow mode (excerpted from Mellmann¹¹⁾)

Flow mode	Froude number
Surging	$0 < Fr < 10^{-4}$
Rolling	$10^{-4} < Fr < 10^{-2}$
Cascading	$10^{-3} < Fr < 10^{-1}$
Cataracting	$0.1 < Fr < 1$
Centrifuging	$Fr \geq 1$

Table 2 Flow mode in conical rotating drum

Rotating speed (rpm)	30	50	70	90	110	130	150
$z = 0$ (mm)	cascading			catacracting			
$z = 100$ (mm)	cascading			catacracting			
flow mode	(A)		(B)		(C)		

catacracting の境界の Fr として $Fr = 0.1$ 採用する。ただし、流動モードは回転数のみでなく、粒子充填量や安息角などの粒子物性にも依存するため、 $Fr = 0.1$ が両流動モードの境界として必ずしも普遍的に正しいとは限らない。本実験で用いた円錐台型ドラムにおいて、cascading と catacracting の境界である $Fr = 0.1$ となる回転数を求めると、大径端 ($z = 0$ mm ; $r = 20$ mm) において、約 66.8 rpm、小径端 ($z = 100$ mm ; $r = 10$ mm) において、約 94.5 rpm となる。このことから、 $Fr = 0.1$ を cascading と catacracting の境界値として採用するとすれば、回転数が 66.8 rpm 以下ではドラム全域で粒子流動が cascading となっており、94.5 rpm 以上では全域で catacracting となっていると予想することができる。66.8 rpm と 94.5 rpm の中間の回転数においては、二つの流動モードが混在（大径側で catacracting、小径側で cascading）していると考えることができる。すなわち、円錐台型回転ドラム内の粒子流動モードは、本実験条件の範囲内において、(A) 全域で cascading、(B) cascading と catacracting の両モード共存、(C) 全域で catacracting の三つに分類できると考えられる。これらの結果を **Table 2** にまとめる。

これら三つの粒子流動モードと、Fig. 5 の軸方向偏析パターンの三つのタイプを対比すると、(A) と (B) の流動モードの境界である回転数 66.8 rpm は、ちょうど Fig. 5 から定義した低回転数域と中間回転数域の間であることが分かる。一方、(B) と (C) の流動モードの境界である回転数 94.5 rpm は Fig. 5 での定義による中間回転数域と高回転数域の境界よりも低くなっている。ただし、Table 1 の流動モードのフルード数の関係は円筒型回転ドラムに対して得られたものであり、円錐台型回転ドラムにそのまま当てはまるとは限らないこと、さらに $Fr = 0.1$ が両流動モードの境界値として必ずしも普遍的な値ではないことを考慮する必要がある。

各回転数に対して、異なる軸方向位置における断面内粒子流動モードを、MRI により観察することを試みた。Fig. 4 では偏析を定量的に評価するため、小粒子としてポリスチレン粒子を用いたが、本実験では小粒子にも MRI に写るカプセル粒子を用いた。小

Fig. 7 MRI images of particle flow

粒子のカプセル粒子の平均直径は 0.96 mm、密度は 1056 kg/m³ であった。また、粒子が動いている状態を MRI で撮像すると、静止している状態を撮像する場合に比べて、ノイズの影響が大きくなる。そこで、本実験ではスライス厚さを 4.0 mm とし、撮像範囲内により多くのプロトンが含まれるようにすることでノイズの影響を軽減した。

Fig. 4 で示したのと同じ $N = 30 \sim 150$ rpm の各回転数に対して、 $z = 5, 50, 95$ mm の三つの断面における粒子流動を MRI で撮像したものを **Fig. 7** に示す。本画像から流動モードを判断すると、まず、 $N = 30$

rpm および 50 rpm の場合には、 $z = 5 \text{ mm}$ の大径端に近い断面においても粒子流動が cascading であることが確認できる。 $z = 50, 95 \text{ mm}$ の断面も合わせて、全域で cascading となっており、(A) の流動モードであると言える。一方、 $N = 130 \text{ rpm}$ および 150 rpm の場合には、 $z = 95 \text{ mm}$ の小径端に近い断面においても粒子流動が cataracting となっており、全域で cataracting の (C) の流動モードであることが確認できる。中間回転数域の場合、 $N = 90, 110 \text{ rpm}$ では、 $z = 95 \text{ mm}$ の断面においても粒子流動は cataracting となっており、むしろ (C) の流動モードに見えるが、 $N = 70 \text{ rpm}$ では、 $z = 5, 50 \text{ mm}$ の断面では cataracting であるのに対し、 $z = 95 \text{ mm}$ の断面では cascading となっており、cascading と cataracting の共存である (B) の流動モードであることが確認できる。これらのことから、軸方向偏析パターンと粒子流動モードの間には強い関連があると推測できる。

$N = 90, 110 \text{ rpm}$ で流動モードが (B) ではなく、(C) に見えることについては様々な理由が考えられる。まず、粒子が運動している場合には、粒子濃度が希薄、あるいは粒子が高速で移動しているときには信号の取得は容易でない。このため、MRI で信号を取得できていない領域にも粒子が存在している可能性があり、MRI 画像で cataracting に見えても、直接観察では cascading である場合もあると考えられる。また、前述のように、Fig. 5 と Fig. 7 では小粒子として用い

た粒子が異なっている。ポリスチレン粒子とカプセル粒子の密度はほぼ同じであるが、表面の特性など異なる部分も多い。このため、流動モードや偏析パターンが変化している可能性も考えられる。これらの点については、さらなる検討が必要である。また、本論文で述べた現象のメカニズムについてより詳細に調べるには、現象の過渡状態も調べる必要があり、時間分解能の低い MRI から得られる情報のみでは不十分である。数値シミュレーションの利用なども含めて検討していきたい。

4. 結 言

円錐台型回転ドラム内に粒径の異なる 2 種類の粒子を充填した際に発生する軸方向偏析について、MRI を用いて偏析パターンを調べた。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 円錐台型回転ドラム内の軸方向偏析パターンは回転数に伴って変化し、今回行った回転数の範囲内で軸方向偏析パターンは 3 種類に分類できた。
- 2) 定常流動中の粒子を MRI 撮像することで、cascading と cataracting の両流動モードの違いを明確に区別できた。
- 3) 偏析パターンの変化は、流動モード (cascading, cataracting および両者の共存) の変化と強い関連があることが示唆された。

Nomenclature

Fr : Froude number	(-)		(pixel/mm ²)
g : gravitational acceleration	(m/s ²)	r : radius of drum	(m)
N : rotational speed of drum	(rpm)	z : axial distance	(mm)
R_{lp} : area ratio of larger particles per cross sectional area		ω : angular velocity of rotating drum	(rad/s)

References

- 1) Nakagawa, M. : "Axial Segregation of Granular Flows in a Horizontal Rotating Cylinder", *Chem. Eng. Sci.*, **49**, 2540-2544 (1994)
- 2) Yamane, K., M. Nakagawa, S. A. Altobelli, T. Tanaka and Y. Tsuji : "Steady Particulate Flows in a Horizontal Rotating Cylinder", *Physics of Fluids*, **10**, 1419-1427 (1998)
- 3) Sugimoto, M., M. Sugihara and K. Yamamoto : "On the Segregation of Particles in a Horizontal Rotating Conical Vessel-Axial Segregation Mechanism of Particles in a Conical Vessel Rotating at Lower Critical Speed Ratio-", *J. Soc. Materials Sci., Japan*, **40**, 1591-1597 (1991)
- 4) Kawaguchi, T., K. Tsutsumi and Y. Tsuji : "MRI Measurement of Granular Motion in a Rotating Drum", *Particle & Particle Systems Characterization*, **23**, 266-271 (2006)
- 5) Chaouki, J., F. Larachi and M. P. Dudukovic : "Non-invasive Tomographic and Velocimetric Monitoring of Multiphase Flows", *Ind. Eng. Chem. Research*, **36**, 4476-4503 (1997)
- 6) Kawaguchi, T. : "MRI Measurement of Granular Flows and Fluid-Particle Flows", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **44**, 276-282 (2007)
- 7) Nakagawa, M., S. A. Altobelli, A. Caprihan, E. Fukushima and E. -K. Jeong : "Non-Invasive Measurement of Granular Flows by Magnetic Resonance Imaging", *Experi-*

- ments in Fluids*, **16**, 54-60 (1993)
- 8) Huan, C., X. Yang, D. Candela, R. W. Mair and R. L. Walsworth : "NMR Experiments on a Three-Dimensional Vibrofluidized Granular Medium", *Phys. Review E*, **69**, 041302 (2004)
 - 9) Porion, P., N. Sommier, A. -M. Faugere and P. Evesque : "Dynamics of Size Segregation and Mixing of Granular Materials in a 3D-Blender by NMR Imaging Investigation", *Powder Technol.*, **141**, 55-68 (2004)
 - 10) Rees, A. C., J. F. Davidson, J. S. Dennis, P. S. Fennell, L. F. Gladden, A. N. Hayhurst, M. D. Mantle, C. R. Müller and A. J. Sederman : "The Nature of the Flow just above the Perforated Plate Distributor of a Gas-Fluidized Bed, as Imaged Using Magnetic Resonance", *Chem. Eng. Sci.*, **61**, 6002-6015 (2006)
 - 11) Mellmann, J. : "The Transverse Motion of Solids in Rotating Cylinders - Forms of Motion and Transition Behavior", *Powder Technol.*, **118**, 251-270 (2001)