高速粉体混合装置の羽根形状が混合に及ぼす影響

Influence of the Blades Geometry on the Mixing Phenomena in an Agitating Mixer

山本 通典^{a*, b}, 石原 真吾^b, 加納 純也^c

Michinori Yamamoto, Shingo Ishihara, Junya Kano

Received 11 October 2013; Accepted 11 November 2013

The mixing behavior of particles in an agitating mixer was simulated by Discrete Element Method (DEM) in order to discuss the particle mixing mechanism. First of all, mixing behavior of alumina and SUS particles in the agitating mixer with a wedge-shaped blade was experimentally observed. Most of the alumina particles existed around the rotational center of the blade, and most of SUS particles were near the mixer wall. The segregation of alumina and SUS particles was obviously observed. The similar mixing behavior of particles was also observed in the DEM simulation, and it was confirmed that DEM simulation has high reliability. Two different types of blades, which are comb-shaped and twisted rectangular prism, were prepared in order to investigate the effect of the blades geometry on the particle mixing phenomena via DEM simulation. The DEM simulation indicated that the mixing state is strongly influenced by the blade geometry. In case of comb-shaped blade, most of SUS particles are at the bottom in the mixer, and most of alumina particles are on and near the surface of particle bed. On the other hand, SUS and alumina particles are uniformly mixed in the mixer with twisted rectangular prism blade promptly. This would be due to reciprocating motion of particles in the depth and the radial direction.

Keywords: DEM simulation, Segregation, Design, Powder mixing, Mixing index

1. 緒 言

工業プロセスに使用されている粉体混合装置には、容器回転式や機械攪拌式、流動攪拌式など様々な形式がある¹⁾。その中でも機械攪拌式に分類される高速粉体混合装置は代表的な混合機の一つである。高速粉体

混合装置は容器中心に設置された羽根を高速に回転させることで粉体の混合を行っており、短時間で混合できる、操作および洗浄が容易である、原料の完全排出が可能であるなどの特徴を有している。

しかしながら、高速粉体混合装置内の操作条件と混合特性の関係について明らかではない点があることから、寺下ら²⁾は混合過程における原料の運動についてDEMシミュレーションを用いて解析している。この結果、原料は羽根の高速回転による遠心力を受けて容器壁面に沿って上昇し循環流が形成されるが、この傾向は高回転速度において顕著に表れることを報告している。また、須貝ら³⁾は炭酸カルシウムと酸化鉄の二成分粉体系を用いた原料の投入率と分散・混合について、ある一定の原料装入率の範囲で装入率と所要動力は比例関係にあり、この範囲では全体的な循環流が形成され、混合・分散作用を効果的に発揮するような適度な装入率範囲があることを報告している。

これらの報告は装置がある定められた形状における

粉体工学会2013年度春期研究発表会 BP 賞受賞研究

a 住友ベークライト株式会社

(〒426-0014 静岡県藤枝市高柳2100番地)

SUMITOMO BAKELITE CO., LTD

(2100 Takayanagi, Fujieda, Shizuoka 426-0041, Japan)

b 東北大学大学院 環境科学研究科

(〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1-1)

Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

(1-1 Katahira, 2-chome, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan)

c 東北大学 多元物質科学研究所

(〒980-8577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1-1)

Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University

(1-1 Katahira, 2-chome, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8577, Japan)

* 責任著者連絡先 myama@sumibe.co.jp

Fig. 1 Schematic diagram of high speed mixer
(a) perspective view (b) side view

内容であるが、実際には容器中心に設置されている羽根の形状は様々に存在し、例えば回転軸に放射状に複数枚の羽根が取り付けられているものや、スクリー羽根が上下方向に複数枚設置されているもの、ブレード状の羽根が複数枚設置されている装置などが存在する。そのため、羽根の形状によって原料の運動が異なり、原料との組み合わせによって混合状態が均一にはならず偏析することも想定される。

原料にせん断が作用すると、粒子のサイズ、形状、密度や表面状態などの影響を受けつつ偏析が引き起こされる⁴⁾。そのため、羽根の選定には理論的な解釈が求められているが、その形状が混合に及ぼす影響を調べている研究は少なく^{5, 6)}、結局のところ勘と経験に依存しているのが現状である⁷⁾。

そこで本研究では高速粉体混合装置の羽根形状が混合に及ぼす影響を明らかにするため実験とシミュレーションを行った。Lemieux ら⁸⁾はVブレンダーとビンブレンダーを使った乾式の粉体混合について、DEMシミュレーションの結果が実験と一致することを示しており、本研究においても乾式の粉体混合プロセスを扱うためシミュレーションにはDEMを使用した。まず、混合装置内の粒子運動をDEMシミュレーションで再現し、DEMシミュレーションにおいて羽根の形状が混合に及ぼす影響を明らかにするとともに、均一混合に効果的な形状を探索する。

2. 実験

2. 1 高速粉体混合装置

実験には深江パウテック（株）のハイスピードミキサーを使用した。その概略および寸法を**Fig. 1**に示す。容器中心に羽根が取り付けられており、図(a)を正面から見て反時計回りに回転し原料を混合する。容器壁面には直径6.8 mmと直径9.0 mmのSUS製の棒が2本設置されており、容器に固定されている。なお、装置の材質はシャフト、羽根、容器すべてSUS

Fig. 2 Schematic diagram of Blade 1

Fig. 3 Initial configuration of SUS particles and alumina particles

製である。

2. 2 実験方法

実験で用いたくさび形の羽根をBlade 1とし、**Fig. 2**に示す。原料は粒子径3.0 mmの単分散であるSUS製の球形粒子（アズワン 1-9762-01）とアルミナ製の球形粒子（ニッカトー HD-3）を使用した。**Fig. 3**にこれら粒子の初期配置を示す。容器を2分割するように白色のアルミナ粒子と黒色のSUS粒子をそれぞれ7500個配置した。羽根の回転速度は100 rpm、混合時間は30, 60, 300 sとして実験を行った。ハイスピードミキサーに所定の原料を投入した後、各混合時間において回転を停止後にサンプリングし混合状態を測定した。**Table 1**に混合条件を示す。

Table 1 Operational parameters in the experiment

Parameter	Value	
Rotational speed	[rpm]	100
Particle density	[g/cm ³]	3.6 (Alumina) 7.69 (SUS)
Particle diameter	[mm]	3.0
Number of particles	[—]	7500 (Alumina) 7500 (SUS)

3. 離散要素法 (DEM) シミュレーション

本研究では離散要素法 (DEM) を用いて混合処理時における粒子の 3 次元運動の解析を行った。DEM は個々の粒子に作用する力をすべて計算し、その合力に基づいて微小時間 Δt 秒ごとに各粒子の位置を計算する手法である。

個々の粒子に働く接触力はバネとダッシュポットを並列に並べたフォークトモデル⁹⁾に基づいて計算を行った。**Fig. 4** にフォークトモデルの概念図を示す。ここで、法線方向の接触力はバネとダッシュポットだけから計算されるが、接線方向にかかる接触力の計算は粒子間に作用する摩擦力を表わすために摩擦スライダーが挿入されている。粒子間の法線方向および接線方向の接触力 F_n 、 F_t はそれぞれ以下の式で表すことができる。

Fig. 4 Simulation model for interactive forces between two particles

Table 2 Parameters used in the simulation

Parameter		Value
Rotational speed	[rpm]	100
Particle density	[g/cm ³]	3.6 (Alumina) 7.69 (SUS)
Particle diameter	[mm]	3.0
Number of particles	[—]	7500 (Alumina) 7500 (SUS)
Young's modulus	[GPa]	0.05 (Alumina) 0.05 (SUS)
Restitution coefficient	[—]	0.0 (Alumina) 0.0 (SUS)
Poisson's ratio	[—]	0.3 (Alumina) 0.3 (SUS)
Time step	[s]	7.1×10^{-6}
Frictional coefficient (Particle-Particle)/ (Particle-Wall)	[—]	0.175/0.175

$$F_n = k_n u_n + \eta_n \frac{du_n}{dt} \quad (1)$$

$$F_t = \min \left\{ \mu F_n, k_t (u_t + r\phi) + \eta_t \frac{d(u_t + r\phi)}{dt} \right\} \quad (2)$$

ここで、 u 、 ϕ 、 r はそれぞれ着目 2 粒子間の相対変位、相対回転変位、相対位置ベクトル、 k 、 η 、 μ は、ばね定数、粘性係数、摩擦係数である。摩擦係数は、転動容器内に SUS 粒子とアルミナ粒子を同数個投入し 50rpm で回転させたときの粒子の持ちあがり高さが実測とよく一致するように決定した。DEM に使用したパラメータを **Table 2** に示す。

アルミナおよび SUS 粒子のヤング率および反発係数は予備検討において混合に及ぼす影響が小さいことを確認している。さらにヤング率と反発係数は低い値ほど時間刻みを大きくすることができるため、実際の値よりも低く設定している。また、羽根の形状は 3 次元 CAD で作成したデータを読み込み、粒子との接触判定や接触力については境界壁と同様に取り扱っている。粒子は実験と同様、容器を 2 分割するようにアルミナ粒子と SUS 粒子を初期配置した。

4. 混合の評価方法

4. 1 容器周方向の評価指標

Brenda¹⁰⁾ らは高速粉体混合装置に関する混合の評価指標として算術平均を求め実験と DEM シミュレーションの結果を比較している。このことから、本研究においても算術平均を用いて混合状態を評価した。

容器周方向の混合状態を評価するため、**Fig. 5** に示す容器中心から 36mm の距離にある円形部 3 か所に円筒状の筒を差し込み、内部に含まれる原料を回収した。サンプリングには直径 28mm の筒を使用した。

Fig. 5 Sampling point for Index 1

回収した原料は各箇所においてそれぞれ全粒子の個数 N_t と SUS 粒子の個数 N_s から SUS 粒子の割合を求め、さらにこの割合について 3 か所の平均値を計算し、その値を指標 1 とした。

$$Index\ 1 = \frac{\sum N_s / N_t}{3} \times 100 \quad (3)$$

なお、指標 1 が 50% より大きい場合はサンプリング箇所に SUS 粒子が多数存在することを示している。

4. 2 容器深さ方向の評価指標

容器底面から 1cm の距離に存在する粒子数 N_{tb} に対し SUS 粒子の個数 N_{sb} を求め、Eq. (4) からこの比率を算出し指標 2 とした。

$$Index\ 2 = \frac{N_{sb}}{N_{tb}} \times 100 \quad (4)$$

ここで、指標 2 が 50% より小さい場合は SUS 粒子が容器上面に、50% より大きい場合は容器底面に多数存在していることを示している。また、実験では容器深さ方向の混合状態を評価することは難しいため、指標 2 はシミュレーション間の比較において使用している。

5. 結果と考察

5. 1 シミュレーションの信頼性

Blade 1 において回転速度 100 rpm における 30 s 後の容器上面からのスナップショットを Fig. 6 に示す。なお、(a) は実験、(b) は DEM シミュレーションの結果である。実験、シミュレーションともに白色のアルミナ粒子が容器中心に多数存在し、黒色の SUS 粒子は容器壁面に多数存在していることがわかる。Fig. 7 に Blade 1 における指標 1 の時間変化を示す。また、図のエラーバーは指標 1 のレンジを示している。実験とシミュレーションともに指標 1 は 30 s 以降ほとん

Fig. 6 Top view images at 30 seconds
(a) experimental (b) DEM simulation results

Fig. 7 Variation of Index 1 as a function of mixing time for experiment and DEM simulation

ど変化していない。指標 1 について各時間において約 10% の差は見られるが、ともに 40% 以下の値であり、DEM シミュレーションはアルミナと SUS 粒子の混合状態を再現しているといえる。以上の結果より、DEM シミュレーションはアルミナと SUS 粒子の混合状態を再現しているといえる。

5. 2 羽根の形状が混合に及ぼす影響

羽根の形状が混合に及ぼす影響を調べるため、楕形の羽根 Blade 2 と長方柱を 180° ねじった羽根 Blade 3 を考案した。その形状を Fig. 8 に示す。Blade 2 は羽根の表面に 4 つの突起を形成しており、Blade 3 は角棒をシャフトの根元から容器半径方向に 180° 時計回りにねじった形状となっている。DEM シミュレーションは、Blade 2 と Blade 3 について回転速度 100 rpm、計算時間は 60 s までとし、その他のパラメータは Table 2 に示す値とした。

Blade 1, Blade 2, Blade 3 における 30 s 後の上面および底面からみたスナップショットを Fig. 9 に示す。Blade 1 では容器壁面に、Blade 2 では容器底面に黒色の SUS 粒子が多数存在していることがわかる。一方、Blade 3 は容器上面および底面からみても他の羽根に比べて原料が均一に混合している様子が観察される。

Fig. 8 Schematic diagram
(a) Blade 2 (b) Blade 3

Fig. 9 Top and bottom view of DEM simulation results at 30 seconds
(a), (b) Blade 1 (c), (d) Blade 2 (e), (f) Blade 3

Fig. 10 Variation of *Index 1* as a function of mixing time for Blade 1, Blade 2 and Blade 3

Fig. 11 Variation of *Index 2* as a function of mixing time for Blade 1, Blade 2 and Blade 3

Fig. 10 に Blade 1, Blade 2, Blade 3 における指標 1 の時間変化を示す。指標 1 は 3 種類の羽根において 30 s 以降ほとんど変化していないことがわかる。また、指標 1 は Blade 2 で約 60%、Blade 3 で約 55% となっており、Blade 1 に比べて高い値を示している。これより、羽根の形状が混合に大きな影響を及ぼすことがわかる。

Fig. 11 に Blade 1, Blade 2, Blade 3 の指標 2 における時間変化を示す。指標 2 は 10 s 以降ほとんど変化しないが、Blade 1 と Blade 3 はともに約 50% と容器底面にアルミナ粒子と SUS 粒子はほぼ同数個存在している。一方、Blade 2 では約 60% と約 10% の差が生じており、容器底面に SUS 粒子が多く存在していることを示している。以上のことから、Blade 2 では容器底面付近に SUS 粒子が偏析しているが、Blade 3 では指標 1 および指標 2 がともに約 50% となっていることから、Blade 1 と Blade 2 に比べ均一な混合状態

になっていることが示されている。

5. 3 混合のメカニズム

Fig. 12 に Blade 1, Blade 2, Blade 3 における代表的な SUS 粒子 1 つを選択し、その粒子の 30 s 間における軌跡を示す。粒子のコンターは時間を示しており、青から赤に変化するにつれ時間が進行することを示している。

Blade 1 では 0 s において容器中心付近にある粒子が時間の経過とともに容器壁面に周回しながら移動していることがわかる。これより、アルミナ粒子よりも密度が大きい SUS 粒子が羽根の回転によって生じる遠心力の影響を受け、容器壁面に偏析したと考えられる。

Blade 2 では容器中心からの距離を大きく変えずに周回運動をしている時間帯がある。高速粉体混合装置では羽根が通過直後の粒子運動は篩と同様の現象が生じることが知られており¹⁰⁾、Blade 2 では密度の大き

Fig. 12 Particle trajectories during 30 seconds
(a) Blade 1 (b) Blade 2 (c) Blade 3

い SUS 粒子が粒子間隙を通過し容器底面に偏析したと考えられる。

Blade 3 では容器半径方向と容器深さ方向への往復運動が頻繁に観察される。この運動は、まず、容器壁面にある粒子が羽根によって容器中心の底面付近に引き寄せられる。その際、粒子は羽根と底面の間隙を通過し容器中心へと向かう。その後、中心に引き寄せられた粒子は羽根の根元から粒子層の表面付近に持ちあげられ、容器壁面に向かって移動する。このように 3 次元的な容器半径方向と深さ方向の運動によりアルミナ粒子と SUS 粒子が運動の偏りを生じることなく、均一な混合を可能にしたものと考えられる。

7. 結 論

本研究では高速粉体混合機における羽根形状が混合に及ぼす影響を解析することを目的とし、実験と

DEM シミュレーションを行った。まず、DEM シミュレーションと実験の比較を行いシミュレーションの信頼性を確認した。その上で、DEM シミュレーションにおいて羽根が混合に及ぼす影響について検討し、以下の知見を得た。

1. 形状の異なる 3 種類の羽根について DEM シミュレーションを行い、形状によって偏析のパターンが変化することがわかった。
2. くさび形の羽根 Blade 1 は粒子に働く遠心力によって密度が大きい SUS 粒子が容器壁面に偏析し、櫛形の羽根 Blade 2 では羽根の通過直後に生じる篩の現象によって密度の大きい SUS 粒子が容器底面に偏析することがわかった。一方、長方柱を 180° ねじった羽根 Blade 3 は 3 次元的な容器半径方向および容器深さ方向への往復運動により均一な混合状態になることがわかった。

References

- 1) Soc. Powder Technol., Japan : “Funtakougaku binran, 2nd Edition”, p. 388, Nikkan Kogyo (1998)
- 2) Terashita, K., S. Natsuyama, T. Nishimura and H. Kojima : “DEM Analysis of Agitating Granulation Process and Operation (in Japanese)”, *J. Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, **47** (12), 1300-1305 (2000)
- 3) Sugai, Y., S. Munetake and M. Kobayashi : “The Mixing and Deagglomeration Characteristics of an Agitating-type Mixer”, *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **34**, 767-772 (1997)
- 4) Porion, P., N. Sommier, A.-M. Faugere and P. Evesque : “Dynamics of segregation and mixing of granular materials in a 3D-blender by NMR imaging investigation”, *Powder Technology*, **141**, 55-68 (2004)
- 5) Cleary, P. W. and M. D. Sinnott : “Assessing mixing characteristics of particle-mixing and granulation devices”, *Particuology*, **6**, 419-444 (2008)
- 6) Jiang, Maoqiang, Y. Zhao, G. Liu, and J. Zheng : “Enhancing mixing of particles by baffles in a rotating drum mixer”, *Particuology*, **9**, 270-278 (2011)
- 7) John, B. : “Mixing of powders and granular materials by mechanical means - A perspective”, *Particuology*, **10**, 397-427 (2012)
- 8) Lemieux, M., F. Bertrand, J. Chaouki and P. Gosselin : “Comparative study of the mixing of free-flowing particles in a V-blender and a bin-blender”, *Chemical Engineering Science*, **62**, 1783-1802 (2007)
- 9) Soc. Powder Technol., Japan : “Funtai simulation nyumon”, pp. 29-33, Sangyo Tosho (1998)
- 10) Brenda, R., J. G. Khinast and B. J. Glasser : “Polydisperse granular flows in a bladed mixer : Experiments and simulations of cohesionless spheres”, *Chemical Engineering Science*, **66**, 1811-1824 (2011)