出口構造改良型遠心分離機による微粒子の分級

Experimental and Computational Study of Classification of Particles by Improved Centrifugal Separator

山本 徹也, 小谷 俊枝, 福井 国博, 吉田 英人

Tetsuya Yamamoto, Toshie Kotani, Kunihiro Fukui, Hideto Yoshida

Received 27 June 2007 ; Accepted 4 October 2007

This study investigated the particle classification performance of an improved centrifugal separator. The improvements made in the centrifugal separator were the installation of another outlet near the wall of the conventional centrifugal separator and a ring partition in the outlet tube. As a result, it was found that 95% cut size of the centrifugal separator was lowered by reducing the ratio of fine particle's flow rate to the total flow rate because large fraction of coarse particles were collected into the outlet tube near the wall. The ring partition improved the particle classification performance because it prevented the mixing between fine and coarse particles. These experimental results were qualitatively in agreement with the predictions by the computational simulation.

Keywords : Centrifugation, Particle size classification, Partition, Computational simulation

1. 緒 言

近年、粉体工学の分野では計算機シミュレーションによる研究が盛んに行われている。筆者らは、これまでサイクロンを始め様々な分級装置内における流体及び微粒子の挙動について数値シミュレーションを行い、その結果と実験結果を比較検討してきた。その結果、両者は少なくとも定性的に一致しており、相互の妥当性を示すことに成功している^{1~5)}。

遠心分離機に関する数値シミュレーションについては、筆者らは前報においてその内部流体解析を行い、実験結果との整合性について議論した⁶⁾。本研究では、遠心分離機部内部における流体のみならず微粒子の挙動についても数値シミュレーションを行い、その分級性能について検討した。今回扱った遠心分離機部では、前報の装置⁶⁾と比べて出口構造について下記に示す改良を加えた。

① 従来の中心軸側出口に加え、外壁面側に新たな

出口を設置

② ①に関連して二つの出口を仕切るリング状の仕切板の設置

以上の改良の結果、分級性能の向上を図る場合、二つの出口流量の比とリング状仕切板径をパラメーターに設定し、その最適値について検討することが重要な課題となる。本報では遠心分離機に関して、これらのパラメーターが分級性能に与える影響について数値シミュレーションを行い、得られた結果に対して実験的検証を行い興味ある知見を得たので報告する。

2. 実験装置及び方法

実験に用いた遠心分離機（関西遠心分離機製作所（株）製）の装置全体概略図を Fig. 1 に示す。遠心分離機部塔頂部に設置された回転機構によって、遠心分離機部全体が回転する構造になっている。

試験粉体には密度 2300 kg/m^3 の真球状微粒子であるシリカ粒子（アドマテック（株）製、SO-C2）を用いた。この粉体を温度 30°C に保たれた水で満たされているスラリータンク内に投入し、粒子濃度が 0.5wt % になるよう調製し、超音波分散機によって分散させ原料液とし、ポンプにて遠心分離機部塔底部から塔

広島大学大学院 工学研究科 物質化学システム専攻
(〒739-8527 東広島市鏡山一丁目4-1) TEL 082-424-7853
Department of Chemical Engineering, Hiroshima University
(1-4-1, Kagamiyama, Higashi-hiroshima 739-8527, Japan)

Fig. 1 Experimental apparatus

頂部に向けて供給した。このときの原料スラリー液の粒度分布を Fig. 2 に示す。

遠心分離機部の全長及び内径はそれぞれ 302mm, 44.4mm であり、各部の寸法を Fig. 3 (a) に示す。遠心分離機部内部には、流体に剛体回転に近い回転を与えるため、Fig. 3 (b) に示す 4 枚羽根を挿入した⁶⁾。また、羽根の塔頂部側に Fig. 3 (c) に示す肉厚 1mm, 外径 $2r_p$ のリング状仕切板を装着して分級性能の向上を図る実験についても検討した。この 4 枚羽根にリング状仕切板を装着した模式図を Fig. 3 (d) に示す。

遠心分離機部塔頂部出口付近での流路の断面模式図を Fig. 4 に示す。本研究で用いた遠心分離機部は、従来型⁶⁾とは異なり遠心分離機部外壁面側に粒度の大きいスラリー液（重液）を排出する重液孔と中心軸側にそれに比べて粒度の小さいスラリー液（軽液）を排出する軽液孔の 2 種類の孔がある構造になっている。 Q_t を遠心分離機部へ塔底部から原料を供給する流

Fig. 2 Particle size distribution of the silica particles

Fig. 3 Schematic diagrams of centrifugal separator, blade, ring partition and blade with ring partition

量、 Q_t を塔頂部から排出される軽液流量と定義する。軽液と原料液の流量比 Q_l/Q_t を α と定義し、この α を Fig. 4 に示す内径サイズ可変のスペーサーリングにより重液孔の大きさを変化させることで制御した。 $\alpha=1.0$ の場合は重液孔がスペーサーリングによ

Fig. 4 Schematic representation of outlet structure of the centrifugal separator

りふさがることになるので、この改良型遠心分離機は従来型遠心分離機⁶⁾と同じ出口構造をとることになる。

遠心分離機の運転条件については、回転速度 $\omega = 6000\text{rpm}$ 、原料供給流量 $Q_i = 600\text{ml/min}$ とし、微粒子の分級実験を行った。遠心分離機部へスラリー供給後、滞留時間の1.5～2倍程度の間供給し続け、遠心分離機部塔頂部から排出される微粉を含む軽液を採取した。その質量及び粒度分布を測定し、Eq. (1) で定める部分分離効率 $\Delta\eta$ を算出した。なお、重液に含まれる粉体及び遠心分離機部壁面に沈着した粉体は粗粉として扱った。算出した $\Delta\eta$ を縦軸に粒子径 D_p を横軸に取り部分分離効率曲線を描き、分級性能について評価した。Eq. (1) において、 m_o 、 m_i は、それぞれ単位時間あたりに遠心分離機部へ供給される原料粉及び遠心分離機部から排出される軽液に含まれる微粉の質量を、 $f_o(D_p)$ 、 $f_i(D_p)$ は原料粉、微粉の体積基準頻度分布関数を表す。粒子径分布の測定には粒子径が100nm以上のシリカ粒子を検知することのできるレーザ回折式測定装置（日機装（株）製、MT3300EXII）を用いたが、必ずしも定量的に正しいデータが得られるわけではないので、本報では定量的な議論は避け、定性的な議論を導くことにした。

$$\Delta\eta = \frac{m_o f_o(D_p) \Delta D_p - m_i f_i(D_p) \Delta D_p}{m_o f_o(D_p) \Delta D_p} \quad (1)$$

3. 数値シミュレーション方法

遠心分離機において、回転速度 $\omega = 6000\text{rpm}$ 、原料供給流量 $Q_i = 600\text{ml/min}$ の条件下における粒子の部分分離効率を以下の手法を用いて数値シミュレーションにより算出した。

まず、遠心分離機部内部流体の速度場の決定については、簡略化のため、遠心分離機部内部の流動を2次元軸対称であると仮定し、Eqs. (2)～(5)に示す連続の式、円柱座標における z 、 r 方向 Navier-Stokes 式、粒子に関する拡散方程式⁷⁾を離散化し、コントロールボリューム法を用いて計算した⁸⁾。また、圧力場の算出には SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) 法を用いた。 z 、 r 方向の格子分割数は、50及び51とした。Fig. 5に境界条件を示す。物体壁面での流体速度 u_z 、 u_r を0とした。 u_θ については遠心分離機部壁面及び羽根が挿入されている区間、すなわち Fig. 5の斜線領域については、流体が剛体回転していることを仮定するため $r\omega$

(a) Without ring partition (b) With ring partition

Fig. 5 Schematic representation of boundary conditions for numerical simulation

とした。

$$\frac{\partial r u_r}{\partial r} + \frac{\partial r u_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u_z}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] + \rho g \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left(\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_\theta^2}{r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial r u_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial r C}{\partial t} + \frac{\partial r C v_r}{\partial r} + \frac{\partial r C v_z}{\partial z} \\ &= D \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

次に、上記の計算で得られた z 、 r 方向の流体速度分布を利用して、Eqs. (6)、(7)に示す z 、 r 方向の粒子運動方程式を数値積分することにより遠心分離機部内での粒子軌跡を求めた。なお、粒子速度については、 z 方向の入口速度で無次元化を行った。

また、部分分離効率を算出する上で十分な総粒子数200の粒子を塔底部入口から投入し、重液孔及び遠心分離機部壁面へ移動した粒子数を算出し、これらが粗粉として回収されると仮定し部分分離効率 $\Delta\eta$ を求め

Fig. 6 Partial separation efficiency curves derived by simulation and experiment

Fig. 7 Computational relationships between flow ratio and 95% cut size

た。

$$\frac{dz}{dt} = u_z - \frac{(\rho_p - \rho) D_p^2 g}{18\mu} \frac{1}{u_{z0}} \quad (6)$$

$$\frac{dr}{dt} = u_r + \frac{(\rho_p - \rho) D_p^2 r \omega^2 R_o}{18\mu} \frac{1}{u_{r0}} \quad (7)$$

4. 結果と考察

4.1 数値シミュレーション結果と考察

4.1.1 流量比が分離径に与える影響

回転速度 $\omega = 6000 \text{ rpm}$ ，原料液供給流量 $Q_t = 600 \text{ ml/min}$ ，原料液供給流量と軽液流量の比 $\alpha = 1$ の場合の数値シミュレーションより算出した部分分離効率曲線を Fig. 6 に示す。数値シミュレーション結果の妥当性を検証するために、同条件における実験結果も併記した。この図より、数値シミュレーション結果の方が実験結果より分離径は小さいことが分かる。これは、数値シミュレーションでは羽根の挿入区間における流体について完全剛体回転を仮定しているのに対し、実験では羽根挿入区間の全流体に完全剛体回転を与えることができなかったことや、3次元で取り扱うべき流体について2次元軸対称で解析していること等が原因であると考えられる。しかし、 $\Delta\eta = 0.5$ 付近では両者の差は狭まり、数値シミュレーション結果に妥当性があるものと考えられ、更に数値シミュレーションにより分級性能について検討を行うことにした。

数値シミュレーションによって求めた部分分離効率曲線上で $\Delta\eta = 0.95$ を示す場合の粒子径 D_p を D_{p95} と定義し、 α と D_{p95} の関係をグラフにしたものを Fig. 7 に示す。ここで、Fig. 5 に図示したように、出口にリング状仕切板を設ける場合と設けない場合の2条件の場合について数値シミュレーションを行った。

仕切板を遠心分離機部出口部分に設けない場合については、 α の値が減少するにつれて、分離径 D_{p95} が小さくなっていることが分かる。これは重液流量を多くすることで、粗粉が微粉を含む軽液側へ混入することを抑制できたためだと考えられる。この傾向は、液体サイクロンにおいて、アンダーフローの流量を増加させることで粗粉中の微粉の混入量を低減させることができることと同様の傾向を示している^{1, 2)}。

次に、Fig. 5 (b) に示すように、出口部分に外径 $2r_p = 36.0 \text{ mm}$ の仕切板を設けた場合の数値シミュレーション結果について検討を行った。流量比 α の値が同じ場合、仕切板を設けた場合と設けない場合について比較すると、 $\alpha < 0.5$ の条件では仕切板を設けることで分離径 D_{p95} が小さくなっていることが分かる。このことについて、詳細な検討を4.1.2節で行うことにする。

4.1.2 遠心分離機部出口構造が粒子軌跡に与える影響

Fig. 7 に示した結果について、それぞれの出口構造における数値シミュレーションにより得られた粒子軌跡を用いて詳細な検討を行う。Fig. 8 に、 $D_p = 1.0 \mu\text{m}$ の単分散粒子の遠心分離機部内部における粒子軌跡を示す。Fig. 8 (a) は流量比 $\alpha = 1.0$ の場合、Figs. 8 (b), (c) は、それぞれ $\alpha = 0.37$ での遠心分離機部出口部において外径 $2r_p = 36.0 \text{ mm}$ のリング状仕切板を設けた場合と設けない場合の粒子軌跡を示している。いずれの条件においても粒子は塔底からほぼ同じ高さの外壁面位置において捕集されており、顕著な差を見出すことはできなかった。

Fig. 9 は、先程より粒子径の小さい $D_p = 0.35 \mu\text{m}$ の単分散粒子の遠心分離機部内部における粒子軌跡である。Fig. 9 (a) より、 $\alpha = 1.0$ の条件では粒子の一部

Fig. 8 Simulated trajectories of particles, $D_p = 1.0 \mu\text{m}$, for various conditions

Fig. 9 Simulated trajectories of particles, $D_p = 0.35 \mu\text{m}$, for various conditions

が壁面で捕集されているものの、そのほとんどが軽液孔へ排出されている。Fig. 9 (b) と比較すると、重液孔を設けることで、部分分離効率が0.39から0.95に向上することが分かる。これは、出口水平壁面に最接近した粒子の一部が重液孔で回収されたためである。よって α の値が下がるとつれて、出口水平壁面に接近した粒子が重液孔で回収されやすくなるので、分離径は小さくなると考えられる。一方、出口に仕切板を設けた Fig. 9 (c) の場合は、Fig. 9 (b) では軽液孔へと向かっていた粒子が出口水平壁面手前で重液孔へ回

収され、部分分離効率が1.0にまで上昇している。これは仕切板により粒子が出口部水平壁面へ接近及び衝突することなく、よりスムーズに粒子が重液孔へと運ばれているためだと考えられる。以上の考察から、粒子が遠心分離機部塔底から流入し遠心分離機部壁面近傍を通過し軽液孔へと排出される軌跡を描く場合には、軽液孔へと向かう粒子をよりスムーズに重液孔へと接近させるために、仕切板は重液孔に近い場所に設置することが分離径を小さくすることに最も効果的であると推察される。

Fig. 10 Experimental and computational relationships between flow ratio and 95 % cut size

4. 2 実験結果と考察

4. 1 節では、数値シミュレーションにより流量比 α の値を小さくし、遠心分離機部出口部にリング状仕切板を設けることで分離径が小さくなるという知見が得られた。本節では、この数値シミュレーションにより得られた知見を実験により検証した。

4. 2. 1 仕切板が分離径に与える影響

Fig. 10 は、遠心分離機部出口に外径 $2r_p = 36.0$ mm のリング状仕切板を設けた場合と設けない場合についての、分離径 D_{p95} と流量比 α との関係を実験により検討した結果であり、4. 1. 1 節で数値シミュレーションにより検討した結果についても併記した。両者は定性的に一致していることが分かる。

重液孔のない場合の実験では、実験条件によっては遠心分離機部内部に空隙が発生するため、遠心分離機部壁面での捕集効率が低下する現象が見られた⁶⁾。しかし、 $\alpha < 1$ の条件では重液孔からも粗粉が回収されるため、壁面での捕集効率の低下を抑制することができる。よって、分級性能を向上させるためには、出口に重液孔を設けることが必要であると考えられる。また、遠心分離機部出口部に仕切板を設けることで、数値シミュレーション結果同様に分離径を小さくすることができることが分かる。実験結果は数値シミュレーション結果を上回るが、これは4. 1. 1 節でも述べたように、実験では羽根と羽根で挟まれた全空間で数値シミュレーションにおいて仮定した完全剛体回転を与えることができないことや、粒子径分布測定について必ずしも定量的に正しい結果が得られないこと等に起因していると考えられる。また、原料液の分散方法としての超音波照射法だけでは本実験系において必ずしも十分ではない可能性があり、原料液を十分に分散す

Fig. 11 Dependence of external radius of ring partition on relationships between flow ratio and 95 % cut size

ることにより、より微粉側での部分分離効率に関するデータが得られることになれば、実験データはより計算結果に近づくものと予想される。

4. 2. 2 仕切板径が分離径に与える影響

4. 2. 1 節では、数値シミュレーション結果と実験結果は定性的に一致していることを明らかにした。本節では、4. 1. 2 節で推察した遠心分離機部出口部に設けるリング状仕切板の設置位置、すなわち仕切板外径 $2r_p$ の変化が分級性能に及ぼす影響について実験的に検討した。

Fig. 11 は、仕切板外径 $2r_p$ を変化させたときの流量比 α と分離径 D_{p95} の関係について実験的に検討した結果を表したものである。各 α において、出口部に仕切板を設けることで分離径が小さくなっていることが分かる。また、 $2r_p = 36.0$ mm、すなわち、本実験で扱った最も外径の大きい仕切板が分離径を小さくすることに効果的であることが分かる。これは4. 1. 2 節で推察したように、仕切板を重液孔に近い場所に設置することで、粒子をより効果的に重液孔へ接近させることができたためだと予想され、仕切板の設置位置の選定も分離径を小さくすることに重要な因子になると考えられる。

以上の知見により、遠心分離機による分離径 D_{p95} を小さくするには、流量比 α を小さく、出口仕切板を重液孔近くに設置することが効果的であることが分かった。

今後、更に数値シミュレーションの精度を向上させることにより、操作条件により分級に最も効果的な仕切板外径の予測が可能になると期待される。

5. 結 言

従来の中心軸側出口に加え、新たに外壁面側に出口を設置し、更に二つの出口を仕切るリング状の仕切板

を設置することにより、改良した遠心分離機による微粒子の分級ついて、数値シミュレーション及び実験により分級性能評価を行い、以下の知見を得た。

- 1) 原料液供給流量に対して軽液流量の割合を減少させると、分離径は小さくなる。
- 2) 遠心分離機部出口にリング状仕切板を設けることで分離径を更に小さくすることが可能である。

- 3) 上記1) 及び2) の事項について、数値シミュレーション結果と実験結果は定性的に一致した。
- 4) 分離径は肉厚一定のリング状仕切板の設置位置に依存し、重液孔近くに仕切板を設置することが分離径を小さくすることに最も効果的であることを実験的に明らかにした。

Nomenclature

C : dimensionless particle concentration	(-)	t : dimensionless time	(-)
D : particle diffusion coefficient	(m^2/s)	r, z : dimensionless radial and axial coordinates	(-)
D_p : particle diameter	(μm)	r_p : external radius of ring partition	(mm)
D_{p95} : 95 % cut size of centrifugal separator	(μm)	u_z, u_r, u_θ : dimensionless axial, radial and tangential fluid velocities	(-)
$f_o(D_p), f_f(D_p)$: particle size distributions of feed and classified fine sides, respectively	(-/ μm)	u_{z0} : axial inlet velocity	(m/s)
g : gravity acceleration	(m/s^2)	α : ratio of fine particle's flow rate to total flow rate	(-)
m_o, m_f : mass of the collected particles for feed and classified fine sides, respectively	(g/s)	$\Delta\eta$: partial separation efficiency	(-)
p : dimensionless pressure	(-)	θ : circumferential coordinate	(-)
Q_i, Q_f : total inlet flow rate and fine side flow rate	(ml/min)	μ : fluid viscosity	($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
R_o : inside radius of centrifugal separator	(mm)	ρ, ρ_p : fluid and particle density	(kg/m^3)
		ω : rotational speed of centrifugal separator	(rpm)

References

- 1) Yoshida, H., K. Fukui and Y. Isshiki : "Control of Particle Size Separation by Use of Hydrocyclone", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **34**, 690-696 (1997)
- 2) Yoshida, H., S. Akiyama, K. Fukui and A. Kumagaya : "Particle Classification with Improved Hydro-cyclone Separator", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **38**, 626-632 (2001)
- 3) Norimoto, Y., K. Fukui and H. Yoshida : "Particle Classification Performance of Hydro-cyclone with Forced-vortex Type", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **43**, 666-675 (2006)
- 4) Yoshida, H., K. Fukui, T. Yamamoto, A. Hashida and N. Michitani : "Continuous Fine Particle Classification by Water-Elutriator with Applied Electro-potential", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **43**, 550-558 (2006)
- 5) Yoshida, H., U. Norimoto and K. Fukui : "Effect of blade rotation on particle classification performance of hydro-cyclones", *Powder Technol.*, **164**, 103-110 (2006)
- 6) Yamamoto, T., T. Shinya, K. Fukui and H. Yoshida : "Centrifugal Classification of Particles and Analysis of the Fluid Dynamics", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **44**, 345-352 (2007)
- 7) Takahashi, K. : "Kiso Erozoru Kogaku", pp. 41-42, Yokendo (1982)
- 8) Patankar, S.V. : "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", pp. 113-137, Hemisphere Pub. (1980)