うず巻スクレーパ付傘型回転円板による異形粒子混合物の連続分離*

—分離性能に及ぼす2, 3の要因—

山本健市**, 杉本益規**

Continuous Separation of Spherical and Non-spherical Particles

by a Rotating Conical Disk with a Spiral Scraper

—Effect of Some Factors on Separation Performance—

by

Kenichi YAMAMOTO† and Masunori SUGIMOTO†

Continuous separation of spherical and non-spherical particles was carried out using a rotating conical disk with a logarithmic spiral scraper under various operating conditions, and the separation characteristics of the device were investigated.

It was concluded that effective separation was observed by the device developed in the present work, and that under lower rotational speeds of the disk the separation efficiency was mainly controlled by the following factors:

- (1) the number of non-spherical particles hindering the separation of spherical particles at the end point of the separating zone along the scraper (N_{0c})
- (2) the length of the separating zone (s)
- (3) the sliding characteristics of non-spherical particles on the surface of the disk (m).

緒言

粉粒体プロセスにおいて、形状の異なる混合粒子群を一定の形状別に連続的に選別することは困難な操作の一つである。異形粒子混合物の連続分離法として、これまでに傾斜回転円板法¹⁻³⁾、傾斜振動板法⁴⁾等が報告されている。これらの方法は形状の異なる粒子間の壁面上での主としてころがり特性の差異を利用したものである。

筆者らは先にうず巻型スクレーパを有する傾斜回転円板(平板)²⁻⁴⁾を試作し、異形粒子群の連続分離が比較的有效になされ得ることを報告した。なお、同装置で

は円板が一方向のみに傾斜しているため、球状粒子が分離作用を受ける区間(分離領域と呼ぶ)が限られ、また、製品および非製品の回収位置も斜面底部に限定されている。

本報では、同装置のこのような欠点を改良し、分離領域の拡張と有効な分離を可能にするため、対数うず巻型スクレーパを有する傘型回転円板を試作し、球状粒子と非球状粒子からなる各種2成分混合粒子の連続分離操作を行った。これより、本装置の分離器としての有効性を確かめると共に、本装置の分離性能に及ぼす各種操作条件の影響について2, 3の要因に着目して検討を加えた。

1. 実験装置および方法

実験装置の概略をFig. 1に示す。装置本体である軟鋼製の傘型円板①(以下円板と呼ぶ)は表面の傾斜角 $\beta = 6^\circ$ であり、図示の方向に n [rpm] で水平に回転でき

昭和60年3月11日受付

*第22回粉体に関する討論会にて発表(1984.10, 秋田)

**富山大学工学部化学工学科(〒930 富山県富山市五福3190)

TEL 0764-41-1271 内線782, 784

†Dept. of Chem. Eng., Toyama Univ., Toyama 930

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Materials used

Mixture	Material	Sieve range [m]	Mean diameter d_p (m)	Volume shape factor ϕ_v (-)	Density ρ_p [kg/m ³]
		$\times 10^{-3}$	$\times 10^{-3}$		
A	(s) spherical silica gel	2.38-3.36	2.87	0.543	1,550*
	(i) crushed silica sand			0.471	2,660
B	(s) spherical silica gel	2.38-3.36	2.87	0.543	1,550*
	(i) crushed silica gel			0.524	1,660*
C	(s) glass bead	1.19-1.68	1.44	0.511	2,510
	(i) crushed silica sand			0.605	2,660
D	(s) spherical alumina	2.38-3.36	2.87	0.553	1,200*
	(i) crushed silica sand			0.403	2,650

(s) spherical particle

(i) non-spherical particle

* apparent density

る。円板表面には、残留粒子群を連続的に排除するため、前報²⁻⁴⁾と同様にうず巻型スクレーパ②が設置され、円板と共に回転しないように架台③によって固定されている。なお、使用されたスクレーパは、アルミニウムでうず巻状に鋳造された原型を更にエポキシ系樹脂(アラルダイト)でスクレーパの外周壁ABCDE部(以下この部分をスクレーパと呼ぶ)を成型することにより作製された。これにより、スクレーパと円板表面(曲面)との密着性が改善された。スクレーパ(外周ABCDE部)は次式で与えられる対数うず巻曲線を満足している。

$$r = a \cdot \exp(p\theta) \quad (p = \tan \alpha) \quad (1)$$

ここで、 r [m]は動径、 θ [rad]はA点からの右回りの偏角、 α は動径 $=r$ の対数うず巻曲線と半径 $=r$ の円周との交点における両接線のなす角であり、本報では $\alpha = 10^\circ$ 、また、 $a = 4.75 \times 10^{-2}$ mである。

異形粒子混合物を円板上に連続的に供給するために電磁フィーダ④が、また、分離された粒子群を円板外周で採取するために大きさの等しい8個のサンプラー⑤(S1-S8)が各々設置されている。また、後述の円板上での球状粒子のとりがり特性測定実験では、各サンプラーを更に5分割した別のサンプラー⑤が使用された。

実験方法：球状粒子(供給速度 F_s [kg/min]) と非球状粒子(供給速度 F_i [kg/min]) との混合粒子群 (Ta-

ble 1)を回転円板上のスクレーパ沿い $\theta = \theta_f$ に電磁フィーダ④によって連続的に供給する。粒子群は円板の回転に伴ってスクレーパに沿って移動する間に粒子形状差に基づく粒子間のこすり特性の違いによりスクレーパ沿い全域にわたって分粒される。定常状態に達した後、円板外周のサンプラー⑤(S1～S8)で一定時間粒子群を採取し、各サンプラー中の全粒子を分析することにより、各サンプラー中の球状および非球状粒子質量を測定した。また、円板上の非球状粒子の滞留量 H_i [kg]を測定した。

なお、本実験で使用した実験試料(Table 1)は同一フルイ目範囲の球状および非球状粒子からなる4種類の2成分混合粒子である。ここで、混合粒子A、B、C中の各成分粒子は予め本傘型回転円板上で整粒されたものである。即ち、球状粒子は $n = 2$ rpm, $\theta_f = 0$ rad, 非球状粒子は $n = 16$ rpm, $\theta_f = 0$ radのもとの2回ずつの整粒操作において、2回ともそれぞれS1およびS8で採取された粒子群である。これより、少なくとも $2 \leq n \leq 16$ rpmでは球状粒子は回転円板上を容易に転落でき、一方、非球状粒子は殆んど転落することなくスクレーパ沿いの最終点E点の近傍で採取される粒子である。また、混合粒子Dは前報⁹⁾の傾斜回転円板法による分粒実験で用いられたものと同一試料である。

本報では、分離性能に及ぼす各種操作条件の影響を検討するため、円板回転速度 $n = 2 \sim 32$ rpm, 球状粒子供給速度 $F_s = 0.014 \sim 0.189$ kg/min, 非球状粒子供給速度 $F_i = 0.011 \sim 0.308$ kg/min, 混合粒子中の球状粒子の分率 $F_s/(F_s + F_i) = 0.15 \sim 0.71$ の範囲で種々に変え、更に混合粒子の供給位置 $\theta_f = 0, 1.25\pi, 2\pi$ radに変え、各混合粒子について分粒実験を行った。

なお、以下では、混合粒子群が移動するスクレーパ沿い位置の偏角を θ [rad], 円板外周の粒子採取位置の偏角を θ_m [rad]とし、いずれもA点からの偏角で表わす。スクレーパと円板外周が交わるE点では $\theta = \theta_m = 8.95$ rad ($= \theta_E$ とする)である。

2. 実験結果

本分粒器は、分離粒子の採取がほぼ円板周囲全体($\pi \leq \theta_m \leq \theta_E$)で可能であり、また、採取される粒子群を任意の仕切位置 $\theta_m = \theta_{mc}$ で製品側($\pi \leq \theta_m \leq \theta_{mc}$)と非製品側($\theta_{mc} < \theta_m \leq \theta_E$)とに2分できる特徴をもっている。これより、本報では製品側と非製品側との仕切位置 θ_{mc} を $1.25\pi \sim 2.75\pi$ radの範囲で種々に設定し、球状粒子を有用成分、非球状粒子を不用成分とし

てNewton分離効率 $\eta_{\theta m}$ を次式で算出した。

$$\eta_{\theta m} = \frac{W_{\theta ms}}{F_s} - \frac{W_{\theta mi}}{F_i} \quad (2)$$

ここで、 $W_{\theta ms}$ [kg/min], $W_{\theta mi}$ [kg/min]は、それぞれ $\theta_m = \pi$ から $\theta_m = \theta_{mc}$ の範囲で採取される製品中の球状、および非球状粒子量である。

Fig. 2は $\eta_{\theta m}$ と θ_{mc} との実験的關係を n をパラメータとして示した代表例である。同図では、 n が小さい範囲($n = 4 \sim 12$ rpm)では製品側と非製品側との仕切位置 θ_{mc} の増大に伴い $\eta_{\theta m}$ も増大し、 $\eta_{\theta m} = 1.0$ に漸近している。一方、 n が大きい場合($n = 24, 30$ rpm)には θ_{mc} が一定の値以上の範囲(n によって異なる)において $\eta_{\theta m}$ は θ_{mc} の増加と共に $\eta_{\theta m} \approx 1.0$ から徐々に減少している。これは高回転速度のもとでは θ_{mc} の増大につれて製品側への非球状粒子混入率 $W_{\theta mi}/F_i$ が増加することによるものである。

Fig. 3は混合粒子供給速度を種々に変えた場合の $\eta_{\theta m}$ と θ_{mc} の実験的關係を $n = 8$ rpmについて示した代表例であり、 $\eta_{\theta m}$ は F_s の値にほぼ無関係に F_i が小さ

Fig. 2 Experimental relationships between Newton's separation efficiency, $\eta_{\theta m}$, and the position of boundary between product and reject, θ_{mc} , under various rotational speeds of the disk

Fig. 3 Effect of feed rate of spherical and non-spherical particles on relationships between $\eta_{\theta m}$ and θ_{mc} at $n = 8$ rpm ($W_{\theta mi}/F_i < 0.005$)

い程高い値を示すことが分かる。なお、本実験条件下では製品側への不用成分の混入率 $W_{\theta mi}/F_i$ が極めて小さな値(< 0.005)であることから、(2)式より、Newton分離効率 $\eta_{\theta m}$ は製品側への球状粒子の回収率 $W_{\theta ms}/F_s$ に近似的に等しくなる。

Figs. 2, 3の実験結果から、本装置を適切な操作条件のもとで操作すれば十分高い分離効率($\eta_{\theta m} \approx 1.0$)を得ることが可能であることが推測できる。

Table 2は、筆者らが既に報告したうず巻スクレーパを有する傾斜回転円板^①(傾斜角 $= 5^\circ$)による分離性能と、 $\theta_{mc} = 2.75 \pi$ radのもとで得られる本傘型回転円板によるそれとをMixt. Dについて比較したものである。なお、両装置のスクレーパ外周壁の特性(Eq.(1))は殆んど同じである。同表より、本実験範囲では、いずれの円板回転速度においても傘型回転円板の分離効率は傾斜回転円板のそれよりも比較的高い値を示しており、本傘型回転円板による分離操作が有効であることが分かる。

本報では、本分粒器の分離機構を基礎的に確かめるため、製品側への不用成分の混入がない($W_{\theta mi} = 0$)操作条件下、即ち、分離性能が球状粒子の回収率 $W_{\theta ms}/F_s$ によってのみ与えられる比較的低回転速度領域における本分粒器の分離特性について検討する。

なお、本装置上での粒子群の挙動の観察結果によれば、 $\theta = \theta_f$ に連続的に供給される球状粒子と非球状粒子の混合粒子は、円板の回転に伴いスクレーパに沿って帯状の粒子層を形成しつつ移動する。この間に球状粒子群は混合粒子層から分離する。即ち、混合粒子層中では球状粒子は非球状粒子群の間隙を転がり(あるいは滑り)あるいは非球状粒子を押しつけて粒子層外周部へ移動する。最外周部へ移動してきた球状粒子は混合粒子群より分離される。

ここで、スクレーパ沿いを移動する混合粒子層の高さおよび幅はいずれも θ の増大と共に減少する。これは θ の増大に伴って混合粒子のスクレーパ接線方向の移動速度が増大するためである。この粒子層の高さお

よび幅の減少は球状粒子の層外周部への移動を容易にする。即ち、球状粒子の転落(あるいは滑り)を妨害するスクレーパ法線方向の非球状粒子個数が θ の増大に伴い減少することにより、球状粒子の分離の度合も θ の増大に伴って増加することになる。

また、分粒器外周の製品側($\pi \leq \theta_m \leq \theta_{mc}$)で回収される球状粒子は、巨視的には、スクレーパ沿いの混合粒子の供給点 $\theta = \theta_f$ から1つの境界 $\theta = \theta_c$ までの領域(以下分離領域と呼ぶ)中を移動する混合粒子群から分離した球状粒子に相当するものと考えられる。これより、製品側の範囲に対応する分離領域内で、球状粒子が混合粒子から分離し易い程製品側への球状粒子の回収率も高くなることになる。

3. 考 察

3.1 回収率 $W_{\theta ms}/F_s$ を支配する要因

3.1.1 各要因の定式化

前述の観測結果より、ここでは製品側への球状粒子の回収率 $W_{\theta ms}/F_s$ に及ぼす各種操作条件の影響を分離領域での以下の3つの要因に着目して考察する。

(1) 分離領域最終点 $\theta = \theta_c$ でのスクレーパ法線方向の非球状粒子個数($N_{\theta c}$)

前節の観察結果のごとく、スクレーパ沿いを移動する混合粒子層からの球状粒子の分離は、非球状粒子に対する球状粒子の移動方向(ほぼスクレーパ法線方向)にある非球状粒子個数が少ない程容易であることが認められた。これより、本報では球状粒子の回収率を支配する要因の一つとして、スクレーパ法線方向の非球状粒子個数に着目する。

スクレーパ沿いの任意の点 $\theta = \theta$ におけるスクレーパ法線方向の非球状粒子の個数 N_{θ} ($\theta = \theta$ の点を中心としてスクレーパ法線方向に非球状粒子の粒径 d_{pi} [m]の幅の空間にある非球状粒子個数をいう)は次のように求められる。

スクレーパ沿いの点 $\theta = \theta$ を非球状粒子群(法線方向に N_{θ} 個配列)が速度 u_{θ} [m/min]で移動するものとする。定常状態においては、 $\theta = \theta$ を通過する非球状粒子の単位時間当たり質量 $[(\text{単位時間当りに}\theta = \theta\text{を通過する非球状粒子個数 } N_{\theta} u_{\theta} / d_{pi}) \times (\text{非球状粒子1個の質量 } \phi_{oi} d_{pi}^3 \rho_{pi})]$ は、物質収支より、非球状粒子の供給速度 F_i に等しい。これより、 N_{θ} は次式で与えられる。

$$N_{\theta} = \frac{1}{\phi_{oi} d_{pi}^3 \rho_{pi}} \cdot \frac{F_i}{u_{\theta}} \quad (3)$$

なお、 ϕ_{oi} [-]、 ρ_{pi} [kg/m³]はそれぞれ、非球状粒子の体積形状係数、および密度である。

Table 2 Comparison of Newton's separation efficiency $\eta_{\theta m}$ between rotating inclined disk(RID) and rotating conical disk(RCD)($F_s:F_i \approx 0.105 : 0.105$ kg/min, $\theta_f = 0$ rad, Mixt. D, $W_{\theta mi}/F_i < 0.005$)

n [rpm]		2	4	6	8
$\eta_{\theta m}$ [-]	RID	0.467	0.718	0.823	0.896
	RCD*	0.633	0.928	0.981	0.998

* at $\theta_{mc} = 2.75 \pi$ rad

Eq.(3)中の u_θ はスクレーパ沿いの $\theta = \theta$ を横切る非球状粒子群(N_θ 個)の平均速度であるが、ここでは簡単化のため、 u_θ はEq.(1)の動径 r 上の粒子移動速度に近似的に等しいものとする。非球状粒子の角速度 ω_i [rad/min]が θ に対して一定と仮定すれば、スクレーパの特性(Eq.(1))より、 u_θ は次式で与えられる。

$$u_\theta = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} \\ = a\omega_i \sqrt{1 + p^2 \sec^2 \beta} \cdot \exp(p\omega_i t) \quad (4)$$

ここで、時間 $t = 0$ において $\theta = 0$ であり、また、 x 、 y 、 z (Fig. 1参照)は、

$$\left. \begin{aligned} x &= r \cos \theta = a \cdot \exp(p\omega_i t) \cdot \cos \omega_i t \\ y &= -r \sin \theta = -a \cdot \exp(p\omega_i t) \cdot \sin \omega_i t \\ z &= -r \tan \beta = -a \cdot \tan \beta \cdot \exp(p\omega_i t) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

なお、本装置では β が小さい($\beta = 6^\circ$)ことより、Eq.(4)の u_θ を次式で近似する。

$$u_\theta = \frac{a\omega_i}{\cos \alpha} \cdot \exp(p\theta) \quad (6)$$

Eqs.(3)および(6)の関係より、 N_θ は θ の増大に伴い減少する。従って、 $\theta = \theta_f$ から $\theta = \theta_c$ までの分離領域内では、 $\theta = \theta_c$ において N_θ は最小となることが分かる。一方、球状粒子の分離の度合は、観察結果より、 N_θ に依存しており、 N_θ が小さい程その分離は容易である。これらより、混合粒子群がスクレーパ沿いに分離領域の各点を通過する時、球状粒子の分離は N_θ が最小値となる $\theta = \theta_c$ において最も容易となる。これより、次式で与えられる $\theta = \theta_c$ におけるスクレーパ法線方向の非球状粒子個数 $N_{\theta c}$ は、分離領域での球状粒子の分離の難易性を支配する重要な因子であると考えられる。

$$N_{\theta c} = \frac{1}{\phi_{pi} d_{pi}^2 \rho_{pi}} \cdot \frac{F_i}{\omega_i} \cdot \frac{\cos \alpha}{a \cdot \exp(p\theta_c)} \quad (7)$$

(2) 分離領域の長さ

球状粒子が分離作用を受ける機会の多少に関する因子として、分離領域の長さ($\theta = \theta_f$ から $\theta = \theta_c$ までのスクレーパ沿いの長さ) s [m]を採用する。 s はスクレーパの特性(Eq.(1))より次式で与えられる。

$$s = \int_{t_f}^{t_c} \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2} dt \\ = \frac{a}{p} \sqrt{1 + p^2 \sec^2 \beta} \{ \exp(p\theta_c) - \exp(p\theta_f) \} \quad (8)$$

ここで、 $\theta = 0$ 、 $\theta = \theta_f$ 、 $\theta = \theta_c$ において、それぞれ $t = 0$ 、 $t = t_f$ 、 $t = t_c$ 、また、 $\theta_f = \omega_i t_f$ 、 $\theta_c = \omega_i t_c$ 。

本装置では $\beta = 6^\circ$ であることより、Eq.(8)の s を次

式で近似する。

$$s = \frac{a}{p} \sqrt{1 + p^2} \{ \exp(p\theta_c) - \exp(p\theta_f) \} \quad (9)$$

(3) 非球状粒子の円板表面上でのすべり特性

球状粒子がスクレーパ沿いの粒子層の内周部から外周部に向かって移動しようとする際、球状粒子の移動を妨害する非球状粒子個数が同一の場合には、非球状粒子が円板表面で滑り易い程球状粒子は非球状粒子を押しつけ易くなり、球状粒子の分離の度合も大きくなることが予想される。

本報では、非球状粒子の円板表面上での滑り特性の代表値として、次式のごとく、非球状粒子の角速度 ω_i [rad/min]と円板角速度 ω_d [rad/min]の比 m を採用する。 m が1.0より小さい程非球状粒子は滑り易いことを示す。

$$m = \frac{\omega_i}{\omega_d} = \frac{\omega_i}{2\pi n} (\leq 1.0) \quad (10)$$

3.1.2 各要因の実験的推算

前項の各要因に対するEqs.(7)、(9)、および(10)中には測定の困難な変数 θ_c および ω_i が含まれている。本項では θ_c および ω_i についてそれぞれ実験的に検討し、これをもとに各要因の推算化を行う。

混合粒子供給位置 θ_f 、および製品と非製品との仕切位置 θ_{mc} が各々設定された場合、その製品回収区間($\pi \leq \theta_m \leq \theta_{mc}$)とそれに対応する分離領域の範囲($\theta_f \leq \theta \leq \theta_c$)との関係を導出することが必要である。この θ_{mc} と θ_c との相互関係を求めるため、スクレーパ沿いを移動する混合粒子層の任意の $\theta = \theta_c$ から円板上を転落し始める球状粒子の円板外周での回収位置 θ_{mc} をサンプラー⑨を用い各実験試料について測定した。なお、各 θ_c に対する θ_{mc} には分布があることが観測されたことにより、 θ_{mc} の代表値には θ_{mc} の平均値を採用した。

Fig. 4は混合粒子Aにおける球状粒子のころがり特性の測定結果である。これより、 θ_c vs. θ_{mc} はほぼ n に無関係に、 (θ_E, θ_E) を通る次式で近似できる。

$$\theta_c = \theta_E^{1-b} \theta_{mc}^b = 0.645 \theta_{mc}^{1.2} (\pi \leq \theta_{mc} \leq \theta_E) \\ (b = 1.2) \quad (11)$$

Eq. (11)の関係は本実験で用いられたいずれの球状粒子においても同様に成立することが確かめられた。

Eq. (11)により、製品と非製品との仕切位置 θ_{mc} から分離領域の最終点 θ_c を推定できる。

次に、Fig. 5は非球状粒子の角速度 ω_i と円板回転速度 n との実験的關係を示したものである。ここで、 ω_i は、スクレーパ沿いを非球状粒子が移動した区間の偏角の差($\theta_E - \theta_f$)を、非球状粒子の円板上での平均滞留

Fig. 4 Experimental relationships between θ_c and θ_{mc} from the rolling test of spherical particles on the rotating conical disk

Fig. 5 Relationships between angular velocity of non-spherical particles ω_i and speed of rotation of the disk n

時間(H_i/F_i)で除した値である。同図より、 ω_i は次式で近似できる。

$$\omega_i = k_1 n \quad (12)$$

ここで、 k_1 は非球状粒子と円板表面との間のスクレーパ接線方向の滑り特性を示す定数であり、本実験結果より非球状粒子の種類により異なった値となることが確かめられた。

なお、スクレーパ沿いの $\theta = \theta$ での非球状粒子の角速度 ω_i をトレーサ粒子を用いた別の実験により測定した結果、3.1.1で仮定したごとく、 ω_i は θ に対して一定であることが確かめられた。

Eqs. (11)および(12)を前述のEqs.(7), (9)および(10)に適用すれば、各種操作条件下での $N_{\theta c}$, s , および m を測定可能な操作変数をもとに次式で推算できる。

$$N_{\theta c} = \frac{1}{\phi_{vi} d_{pi}^2 \rho_{pi}} \cdot \frac{F_i}{k_1 n} \cdot \frac{\cos \alpha}{a \cdot \exp(p \theta_E^{1-b} \theta_{mc}^b)} \quad (7')$$

$$s = \frac{a}{p} \sqrt{1 + p^2} \{ \exp(p \theta_E^{1-b} \theta_{mc}^b) - \exp(p \theta_f) \} \quad (9')$$

$$m = k_1 / 2\pi \quad (10')$$

3.2 実験結果の整理

以下、各種操作条件のもとで得られた球状粒子の回収率 $W_{\theta ms}/F_i$ の実験値と、Eqs.(7'), (9'), および(10')で与えられる $N_{\theta c}$, s , および m の各要因との相関関係について検討した。

Fig. 6は $1 - (W_{\theta ms}/F_i)$ と $1/N_{\theta c}$ との実験的関係を示した代表例である。ここで、図中の分離領域の長さ s は設定された θ_f および θ_{mc} の値をもとにEq.(9')により推算された値である。これより、回収率 $W_{\theta ms}/F_i$ はいずれの s においても次式のごとく $N_{\theta c}$ の関数として近似できる。

$$\frac{W_{\theta ms}}{F_i} = 1 - \exp(-K N_{\theta c}^{-1}) \quad (13)$$

ここで、直線の勾配 K は s によって異なる定数である。同図より、 $W_{\theta ms}/F_i$ は $\theta = \theta_c$ におけるスクレーパ法線方向の非球状粒子個数 $N_{\theta c}$ の減少に伴い増加することが分かる。

Fig. 7は K と s との関係を混合粒子の種類および θ_f を種々に変えた場合について示したものである。同図より、いずれの混合粒子においても K は次式のごとく s の関数で近似できる。

Fig. 6 Effect of the number of non-spherical particles at $\theta = \theta_c$ on $[1 - (W_{\theta ms}/F_i)]$

Fig. 7 Effect of the length of the separating zone on K in Eq. (13)

$$K = k_2 s^{0.28} \quad (14)$$

ここで、 k_2 は混合粒子の種類によって異なっている。これは、球状粒子が非球状粒子を押しつけながら移動する際の非球状粒子の易動性(押しのけられ易さ)の差違に基づくものと考えられる。即ち、非球状粒子の易動性が高い程、球状粒子と非球状粒子の位置の交換は容易となり、従って球状粒子の粒子層外周部への移動も容易となるものと推察される。

この非球状粒子の易動性は、非球状粒子の円板表面での滑り特性や、球状粒子と非球状粒子との間の物性差(密度差、形状差等)等に依存するものと考えられる。本報では、円板上でより重要な要因と考えられる非球状粒子の円板表面での滑り特性に着目し、これをもとに k_2 との関係を整理することを試みた。

Fig. 8は各混合粒子の k_2 と非球状粒子の滑り特性の代表値 m (Eq. (10'))の関係を示したものである。本報では k_2 と m の関係を次式で近似した。

$$k_2 = 3.3 m^{-3} \quad (15)$$

Fig. 8 Effect of index defined by Eq. (10') on k_2 in Eq. (14)

なお、同図においてデータにバラツキが認められる。これは、上述のごとく、 k_2 には球状粒子と非球状粒子間の物性差も関与しているためと思われるが、これらの定量化は目下困難である。従って、非球状粒子の易動性に及ぼす各粒子間の物性差の影響については今後更に検討する必要がある。

Eqs. (14) および (15) の関係を Eq. (13) に代入すれば $W_{\theta ms}/F_s$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \frac{W_{\theta ms}}{F_s} &= 1 - \exp(-3.3 m^{-3} s^{0.28} N_{\theta c}^{-1}) \\ &= 1 - \exp \left[-K' \left\{ \frac{s^{0.28} n \phi_i d_{pi}^2 \rho_{pi}}{k_1^2 F_i} \cdot \frac{a}{\cos \alpha} \exp \right. \right. \\ &\quad \left. \left. (0.645 p \theta_{mc}^{1.2}) \right\} \right] \quad (K' = 819) \quad (16) \end{aligned}$$

Fig. 9 は Eq. (16) と全実験結果とを比較したものであり、両者は比較的良好一致を示している。なお、同図では製品側への非球状粒子の混入率 $W_{\theta mi}/F_i < 0.005$ であることより、Eq. (16) の $W_{\theta ms}/F_s$ は Newton 分離効率 $\eta_{\theta m}$ に近似的に等しい。

以上より、製品側への非球状粒子の混入が無視できる程に小となる実験範囲では、製品側への球状粒子の回収率 $W_{\theta ms}/F_s$ ($\approx \eta_{\theta m}$) は $N_{\theta c}$ および m の減少に伴い、また s の増大に伴って増加することが分かる。

なお、前述の Table 2 で認められるように、傘型回転円板では傾斜回転円板に比較して分離性能が高くなっている。これは、傘型回転円板法では円板上のスクレーパ沿い全域で粒子群が分離され得ると共に、採取される粒子群の製品側と非製品側との仕切位置を広い範囲で任意の値に設定できるのに対し、傾斜回転円板法では円板(平板)が一方方向のみに傾斜していることからスクレーパ沿いの分離領域は限定された狭い範囲

Fig. 9 Final correlation

($\theta = 0.5\pi \sim 1.5\pi \text{ rad} = \text{const.}$)であると共に、仕切位置も固定($\theta_{mc} = \theta_c = 1.5\pi \text{ rad} = \text{const.}$)されていることによるものと推察される。即ち、同一の操作条件および実験試料のもとでは、傘型回転円板は傾斜回転円板に比較して分離領域の長さ s を大きく、また N_{θ_c} を小さくできることから、その分離性能も向上したものと考えられる。

以上より、本装置は球状粒子と非球状粒子の連続分離器として有効であるものと考えられる。また、本装置を種々の形状を有する混合粒子の連続分離器として用いることも期待される。

結 言

うず巻型スクレーパを有する傘型回転円板上での球状および非球状粒子混合物の分離特性を検討した結果、製品側への非球状粒子の混入が無視できる程に小となる実験範囲では球状粒子の回収率 $W_{\theta ms}/F_s$ ($\approx$ Newton 分離効率 $\eta_{\theta m}$)は、主として(1)球状粒子の転落を妨害する分離領域最終点での非球状粒子個数 N_{θ_c} 、(2)分離領域の長さ s 、(3)非球状粒子の円板表面での滑り特性値 m の各要因によって支配されることを得た。

Nomenclature

a	: constant for the spiral curve in Eq.(1) [m]	y	: coordinate to the direction OD of the disk (in Fig. 1) [m]
b	: constant defined by Eq.(11) [—]	z	: coordinate parallel to the axis of rotation of the disk (in Fig. 1) [m]
d_p	: particle diameter [m]	α	: constant for the spiral curve in Eq.(1) [degree]
F	: feed rate [kg/min]	β	: inclination angle of surface of the disk to the horizon [degree]
H	: holdup [kg]	$\eta_{\theta m}$	: Newton's separation efficiency [—]
K	: constant defined by Eq.(13) [—]	θ	: vectorial angle along the scraper [rad]
K'	: constant in Eq.(16) [$m^{-0.28}$]	θ_E	: vectorial angle at point E [rad]
k_1	: constant defined by Eq.(12) [—]	θ_m	: vectorial angle at the sampling position [rad]
k_2	: constant defined by Eq.(14) [$m^{-0.28}$]	θ_{mc}	: vectorial angle at the boundary between product and rejects [rad]
m	: index defined by Eq.(10) [—]	ρ_p	: particle density [kg/m^3]
N_{θ}, N_{θ_c}	: number of non-spherical particles normal to the spiral curve at $\theta = \theta$ and $\theta = \theta_c$, respectively [—]	ϕ_v	: volume shape factor [—]
n	: speed of rotation [min^{-1}]	ω_d	: angular velocity of the disk [rad/min]
p	: constant for the spiral curve in Eq.(1) [—]	ω_i	: angular velocity of non-spherical particles [rad/min]
r	: radius vector [m]	<Subscripts>	
s	: length of the separating zone along the scraper [m]	i, s	: non-spherical, and spherical particles
t	: time [min]	c, f	: end point of the separating zone, and feed point of mixtures along the scraper
u_{θ}	: velocity of particles at $\theta = \theta$ along the scraper [m/min]		
$W_{\theta m}$	: mass of particles sampled in the section of product per unit time [kg/min]		
x	: coordinate to the direction OA of the disk (in Fig. 1) [m]		

References

- 1) Carpenter, F. G. and V. R. Deitz: *J. Research N. B. S.*, **47**, 139 (1951)
- 2) Sugimoto, M. and K. Yamamoto: *J. Res. Ass. of Powder Technol., Jpn.*, **8**, 426 (1971)
- 3) Sugimoto, M., K. Yamamoto and J. C. Williams: *J. Chem. Eng., Japan*, **10**, 137 (1977)
- 4) Yamamoto, K. and M. Sugimoto: *J. Soc. Powder Technol., Jpn.*, **16**, 521 (1979)
- 5) Koga, J., S. Endoh, M. Sugimoto and K. Yamaguchi: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **8**, 285 (1982)
- 6) Abe, E. and H. Hirose: *J. Chem. Eng., Japan*, **15**, 323 (1982)
- 7) Yamamoto, K. and M. Sugimoto: Preprints of the 20th Symposium on Powder, Kyoto, p.190 (1982)