粒子転がり摩擦特性に基づく傘型回転円板の
粒子形状分離性能の検討
— 分離効率に及ぼす処理量の影響 —

山本健市*, 牧野学*, 杉本益規*

Investigation of the Shape Separation Performance
of a Rotating Conical Disk based on the Rolling
Frictional Characteristics of Irregular Particles
— The Effect of the Feed Rate on Separation Efficiency —

by

Kenichi YAMAMOTO[†], Manabu MAKINO[†]
and Masunori SUGIMOTO[†]

To investigate the effect of feed rate F on shape separation efficiency η of the rotating conical disk with a spiral scraper for irregular particles, the shapes of particles separated on the disk were evaluated by an index $\rho_{(w)}$ of rolling frictional characteristics of a particle closely related to its three-dimensional shape. The results obtained were as follows:

1. The separation efficiency η_m^* under hindered traveling conditions along the scraper (at larger F) depends on the separation characteristics of individual particles under the unhindered traveling condition (at $F \div 0$), and on the number of particles arranged normal to the spiral scraper.
2. Optimal operating conditions could be derived from the above correlation.

Key Words : Rotating Conical Disk, Shape Separation, Feed Rate, Rolling Frictional Characteristics, Separation Efficiency

1. 緒言

最近の各種製品の開発においては、従来より更に高品質で操作性に優れた粉粒体が要求されている。粒子形状分離操作はこれに対応する一つの手段として重要性を増しているものと考えられる¹⁾。筆者らはこれまでに、傾斜回転円板法^{2,3)}および傘型回転円板法⁴⁻⁶⁾による粒子形状分離特性を基礎的に検討し、その有効性について報告した。

形状分布を有する不規則形状粒子群を多量に連続的に処理する場合の分離特性および最適操作条件を検討することは形状分離装置の実用上重要である。しかし、このような分離機構は複雑であり、これまでこれに関する系統的な検討はほとんどされていない。

一方、装置の形状分離性能はできるだけ粒子の3次元形状の特徴を表現できる指標に基づいて評価されることが望ましい。粒子の力学的特性の一つである転がり摩擦特性は、その3次元形状と密接な関係があり、同特性をもとに粒子形状を評価することは有効であることを前報で報告した⁷⁾。

本報では、形状分布を有する不規則形状粒子群の連続形状分離操作を傘型回転円板を用いて行い、その分離特性に及ぼす処理量の影響および最適操作条件について粒子転がり摩擦特性に基づいて検討した。

平成4年2月26日受付
第29回粉体に関する討論会(1991年10月、姫路)にて発表

*富山大学工学部物質工学科
(〒930富山市五福3190)
TEL 0764-41-1271

† Dept. of Mat. Sci. and Eng., Toyama University, Toyama 930

Fig. 1 Experimental apparatus

2. 実験装置および方法

Fig. 1に実験装置の概略を示す。傘型円板①は一定速度 n_d (s^{-1})で時計方向に回転し、円板上のスクレーパ②は架台に固定され静止している。円板およびスクレーパは前報⁴⁻⁶⁾と同一である。スクレーパの点A～Eは次式を満足する対数うず巻曲線である。

$$r_s = a_0 \exp(p\theta_s); (p = \tan 10^\circ, a_0 = 0.0475m) \quad (1)$$

ここで、 θ_s (rad)は点Aからの偏角、 r_s (m)は動径である。なお、本報ではスクレーパの内側に助走壁⑨を取り付け、円板上Aに供給された全粒子群をスクレーパのA～Bに沿わせて配列できるようにした。

また、粒子供給量を連続的に記録するため、原料供給速度調節用電磁フィーダ⑥と輸送用電磁フィーダ③との間にインパクトライン流量計⑦、⑦(三協電業(株)製、ILK-30, 記録計付)を設置した。

実験試料M1, M2は粒子径が異なり、いずれも形状分布を有する不規則形状粒子群(苦土肥料)である。Table 1に各試料の物性を示す。ここで、 d_p (m)はふるい目開平均径、 δ ($kg \cdot m^{-3}$)は粒子見かけ密度、 ϕ (—)は体積形状係数である。なお、 ϕ は100個の粒子を対象に測定した単一粒子の平均質量 M (kg)を δd_p^3 で除して得られた値である。

実験方法：回転円板上A点に試料粒子群を連続供給

Table 1 Properties of materials

Materials	Mean diameter d_p (m) (Sieve range)	Apparent density δ ($kg \cdot m^{-3}$)	Volume shape factor ϕ (—)
Fertilizer (M1)	1.84×10^{-3} (-9/+10 mesh)	2060	0.631
Fertilizer (M2)	2.61×10^{-3} (-7/+8 mesh)	2060	0.582

した。粒子はスクレーパに沿ってB($\theta_s = \theta_{se} = 0.5\pi$)からE($\theta_s = \theta_{se} = 8.95$)の方向に移動し、この間に種々の位置でスクレーパ沿いの粒子群から離脱し、円板外周方向に転落することが観測された。先ず原料供給速度が一定であることを流量計で確認した。円板上での粒子群の挙動が定常状態に達した後^{*}、スクレーパから離脱した瞬間の粒子群をスクレーパ沿いの各区分 S_j (1～8)で、また円板から転落した粒子群を円板外周のサンプラー④(S_{m1} ～8)で各々採取し、各区分の粒子採取量 w_j ($j=1$ ～8) ($kg \cdot s^{-1}$)および原料供給速度 F ($= \sum w_j$) ($kg \cdot s^{-1}$)を測定した。なお、上記のサンプリング時間は以下の粒子転がり摩擦特性の測定に必要な粒子数(少なくとも1区分当り約50個以上)を得るのに十分な時間とした。

円板外周で採取された各区分の粒子群から各々25個の粒子(計200個)を任意に抽出し、後述の方法で各粒子の静止転がり摩擦角を測定した。

一方、スクレーパ沿いを移動する粒子群を偏角 θ_s の異なる4箇所ビデオカメラにより撮影し、その静止画像より、偏角 θ_s を中心にスクレーパ接線方向の微小幅 Δl (m)に存在する粒子個数 n を計数した。これより、粒子径 d_p の均一粒子群がスクレーパに沿って立方最疎配列の状態移動するものと仮定した場合のスクレーパ法線方向の粒子配列個数 N を次式で算出した。

$$N = nd_p / \Delta l \quad (2)$$

本報では、種々の円板表面傾斜角 β ($= 0 \sim 6^\circ$)および円板回転速度 n_d ($= 0.083 \sim 1.00 s^{-1}$)の組合せのもとで、原料供給速度 F を $(0.0013 \sim 23) \times 10^{-3} kg \cdot s^{-1}$ の範囲で変え、各試料について実験を行った。

単一粒子の静止転がり摩擦特性の測定：前報⁷⁾と同様に、先ず単一粒子が振動平板上の側壁に沿って移動する際の最も安定な姿勢を観測し、この姿勢を基準と

^{*} 本報では、原料供給速度(F)および円板外周の各区分での粒子回収速度(w_j)が各々長時間にわたって一定である場合を定常状態とみなした。なお、予備実験において原料の供給開始後 w_j がほぼ一定値に達するに要する時間を各操作条件について事前に確かめ、この時間を考慮しサンプリング開始時間を決定した。

して粒子の3軸(長軸 t , 中軸 u , 短軸 v)の方向を決定した。次に粒子の t , u 各軸を回転軸として粒子が傾斜平板(平板表面素材: 耐水研磨紙#1000)上を転がり始める各臨界平板傾斜角, すなわち, 粒子の静止転がり摩擦角 α_{crlv} および α_{cru} を測定した。本報では, 各粒子の転がり摩擦特性の代表値として前報で定義した次式の $\rho_{(tu)}$ を採用した。

$$\rho_{(tu)} = \sqrt{(\tan^2 \alpha_{crlv} + \tan^2 \alpha_{cru})} / 2 \quad (3)$$

なお, $\rho_{(tu)}$ は各粒子の3次元形状を表わす一つの指標であり($\rho_{(tu)}$ が0に近いほど粒子形状は球に近い), $\rho_{(tu)}$ に基づく粒子形状特性の評価は有効であることが前報⁷⁾で確かめられている。

3. 実験結果および考察

3.1 分離効率 η^* に基づく巨視的分離特性の評価

観測結果によれば, 原料供給速度 F がかなり小さい($F \approx 0$)範囲では, 粒子群はスクレーバ沿いの点B~E間(分離領域)を粒子間に全く干渉がない程度の距離を保ちつつ移動することが認められた。このような粒子移動形態を示す F の範囲をここでは非干渉域と呼ぶ。これに対し, F がある値以上の範囲では, 分離領域において粒子間の接触および多粒子層の形成が観測された。このような F の範囲を干渉域と呼ぶ。以下, 非干渉域および干渉域における実験結果を示す。

Fig. 2は非干渉域における実験結果の代表例であり, 円板外周の各区分で回収された粒子群, および原料の

Key	Sect.	θ_m (rad) ($\times \pi/4$)	$w_s / \sum w_s$ (-)
▲	1	4 - 5	0.042
□	2	5 - 6	0.121
▼	3	6 - 7	0.143
◇	4	7 - 8	0.099
△	5	8 - 9	0.078
■	6	9 - 10	0.054
○	7	10 - 11	0.101
◆	8	11 - 12	0.362
●	Feed		

Fig. 2 Cumulative $\rho_{(tu)}$ distributions of particles fed, and separated (: unhindered condition)

$\rho_{(tu)}$ 分布を示している。ここで, θ_m (rad)は円板外周の試料回収位置である(Fig. 1参照)。 θ_m が小さいほど $\rho_{(tu)}$ の小さな(転がり易い, すなわち球形の)粒子群が回収される傾向が認められ, 本装置によって形状分離が行われていることが定性的に分かる。なお, Fig. 2と同一操作条件で F のみを増大した場合の, すなわち, 干渉域での分離特性は, Fig. 2に示した非干渉域でのそれとかなり異なることが認められた。

本報では, 各操作条件下で得られる非干渉域および干渉域での形状分離特性を以下のようにNewton分離効率をもとに定量的に検討した。

まず, 転がり摩擦特性値 $\rho_{(tu)}$ を有する各粒子を, 任意に設定した $\rho_{(tu)}$ の境界値 $\rho_{(tu)c}$ を基準として, 有用成分($0 \leq \rho_{(tu)} \leq \rho_{(tu)c}$)と不用成分($\rho_{(tu)} > \rho_{(tu)c}$)に区分した。また円板外周で回収された全粒子群を任意の偏角 $\theta_m = \theta_{mc}$ を境界として, 製品側($\theta_m \leq \theta_{mc}$) P (kg·s⁻¹)と非製品側($\theta_m > \theta_{mc}$) R (kg·s⁻¹)の2群に分割し, 次式で与えられるNewton分離効率 η を算出した(添字 s , i はそれぞれ有用および不用成分)。

$$\eta = \frac{P_s}{P_s + R_s} - \frac{P_i}{P_i + R_i} \quad (4)$$

以下では, 非干渉域および干渉域での分離効率を各々 η_o , η_m と区別した。

Fig. 3はFig. 2(非干渉域)の実験結果をもとに, Newton分離効率 η_o と, 有用成分と不用成分の境界値 $\rho_{(tu)c}$ との関係を製品側と非製品側の仕切位置 θ_{mc} をパラメータとして求めたものである。 θ_{mc} が変われば η_o と $\rho_{(tu)c}$ との関係がかなり変化することが認められる。また, 本報で用いた試料採取法では仕切位置 θ_{mc} を1.25 $\pi \sim 2.75\pi$ の範囲で $\pi/4$ 毎に任意の値に設定できることから, この操作条件下で各 $\rho_{(tu)c}$ に対して得られる η_o の最大値 η_o^* は図中の実線(曲線)で与えられる。

Fig. 3 Experimental relation between $\rho_{(tu)c}$ and η_o for various θ_{mc} , and η_o^* curve determined graphically (: unhindered condition)

Fig. 4 Effects of n_d and β on $\bar{\eta}_m^*$ and determination of optimal operating conditions (: unhindered condition)

同様の手順で、干渉域での分離効率 η_m の最大値 η_m^* と $\rho_{(tu)c}$ との関係を求めた。その結果、非干渉域および干渉域のいずれにおいても η^* と $\rho_{(tu)c}$ との関係は操作条件によって種々に変化することが確かめられた。

そこで、各操作条件下での分離性能を比較するため、以下のように、 $\rho_{(tu)c}=0.3\sim0.6$ (0.1毎)に対する η^* の平均値 $\bar{\eta}^*$ (非干渉域では $\bar{\eta}_m^*$ 、干渉域では $\bar{\eta}_m$)を求め、これを各操作条件に対する巨視的な分離性能の代表値として採用することを試みた。ここで、 $\bar{\eta}^*$ を求める場合、本来ならば $\rho_{(tu)c}$ の全範囲を対象とする η^* の平均値を採用すべきであるが、本報では $\bar{\eta}^*$ の信頼性の低下を避けるため、原料中の有用成分の比率が約0.2~0.8の場合に相当する $\rho_{(tu)c}=0.3\sim0.6$ の範囲(Fig. 2参照)を対象とする η^* の平均値を採用した。

Fig. 4は非干渉域における形状分離特性値 $\bar{\eta}_m^*$ と円板回転速度 n_d の関係を円板表面傾斜角 β をパラメータとして試料M2について示したものである。 β および n_d の違いによって $\bar{\eta}_m^*$ はかなり異なり、また、各 β に対して $\bar{\eta}_m^*$ が最大となる回転速度が存在することが分かる。各 β に対する $\bar{\eta}_m^*$ の最大値を比較すれば、この試料では $\beta=4^\circ$ 、 $n_d \approx 0.50\text{s}^{-1}$ において非干渉域での最大分離効率を得られることが分かる。

Fig. 5は干渉域での分離特性値 $\bar{\eta}_m$ に及ぼす原料供給速度 F の影響を円板回転速度 n_d をパラメータとして各試料(M1: $d_p=1.84\text{mm}$, M2: $d_p=2.61\text{mm}$)について示した代表例である。同図には非干渉域($F \approx 0$)の分離効率 $\bar{\eta}_m^*$ もプロットした。 n_d および試料の特性の差異により、 $\bar{\eta}_m$ と F との関係がかなり異なることが認められる。すなわち、 $n_d=0.083\text{s}^{-1}$ における F の小さい範囲、および試料M1に関する $n_d=0.58\text{s}^{-1}$ の場合(□印)を除けば、いずれも F の増大に伴って $\bar{\eta}_m$ が減少する傾向を示している。これは F の増大に伴いスクレーパ沿いを移動する粒子群のスクレーパ法線方向配列個数 N 、すなわち、粒子間干渉の度合いが大きくなり、このために

Fig. 5 Effect of F on $\bar{\eta}_m^*$ under various operating conditions (: hindered condition)

各粒子の分離挙動が低下したことによるものと考えられる。この F の増大に伴う $\bar{\eta}_m^*$ の減少の度合いは n_d および試料の特性により異なることが分かる。

なお、試料M1に関する $n_d=0.58\text{s}^{-1}$ の場合では $\bar{\eta}_m^*$ がほぼ一定値を示している。これは n_d が比較的大きいために図示の $F \approx 0\sim0.006\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲では N が小さく(スクレーパ沿いでの粒子間干渉の度合いが少なく)、したがって $\bar{\eta}_m^*$ の低下が表れなかったことによるものと推測される。

また、円板回転速度がかなり小さい $n_d=0.083\text{s}^{-1}$ の場合、 F が小さい範囲では両試料共に F の増大に伴って $\bar{\eta}_m$ が増大しており、上述の他の傾向と異なっている。これは、主としてやや扁平な球状粒子の分離特性の違いに基づくものと考えられる。すなわち、スクレーパ沿いでの粒子の挙動を観測した結果、粒子に働く遠心力が小さい $n_d=0.083\text{s}^{-1}$ の場合、(1)非干渉域($F \approx 0$)においては、やや扁平な球形粒子はスクレーパ壁との摩擦の影響が大きいため粒子の短軸を回転軸としていわゆるコマのように回転(自転)しつつスクレーパに沿って比較的長い距離を移動し、この球状粒子のスクレーパからの離脱位置は非球状粒子のそれと大差がないことが認められた。したがって、 $F \approx 0$ では自転する球状粒子が多いために形状分離が有効に行われなかったものと考えられる。これに対し(2)干渉域においては、 F の増大に伴い非球状粒子が球状粒子の自転を阻止する割合が増加し、このため分離効率も増大したものと推測される。なお、比較的大きな遠心力が粒子に作用する $n_d=0.58\text{s}^{-1}$ では、いずれの F においてもスクレーパに沿って自転する球状粒子はほとんどないことが確かめられた。

3.2 粒子配列個数に基づく形状分離特性および最適操作条件の検討

3.2.1 形状分離特性

円板外周で得られる干渉域での形状分離特性は、主として非干渉域での粒子の分離挙動(分離性能)およびスクレーパ沿いでの粒子間相互干渉の度合に依存しているものと推測される。筆者らは前報⁴⁾において、球状・非球状の2成分混合粒子を用いて本装置の分離機構を粒子移動モデルをもとに基礎的に検討した。その結果、スクレーパ沿いの任意の偏角 θ_s における粒子間干渉の度合はスクレーパ法線方向の粒子配列個数 N と密接な関係があることを確かめた。本報ではこの移動モデルを連続的形状分布粒子群に対して適用し、分離特性に及ぼす N の影響を検討することを試みた。

いま、スクレーパ沿いの任意の偏角 θ_s を粒子群が平均速度 $v_p(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ で通過する場合、粒子移動量 $Q(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$ と N との関係は、 Q が単位時間当りの粒子通過個数 $(=Nv_p/d_p)$ (s^{-1})と単一粒子質量 $(=\delta\phi d_p^3)$ (kg)の積に等しいことから次式で与えられる。

$$Q = \delta\phi d_p^2 v_p N \quad (5)$$

v_p がうず巻曲線上での粒子速度に近似的に等しいものと仮定すれば、上式の v_p は粒子の円板原点O回りの角速度 $\omega_p(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$ をもとに次式で与えられる⁴⁾。

$$v_p = a_0 \omega_p \sqrt{1 + p^2 \sec^2 \beta} \exp(p\theta_s) \quad (6)$$

粒子がスクレーパに沿って移動する際に、粒子は円板上でスクレーパ接線方向に多少の滑りがあるものと考えられる。この滑りの度合 m_s をEq. (7)で定義し、 m_s が θ_s に無関係に一定と仮定すれば、Eq. (6)中の ω_p はEq. (8)で与えられる($\omega_d(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$ は円板角速度)。

$$m_s = \omega_p / \omega_d (\leq 1.0) \quad (7)$$

$$\omega_p = m_s \omega_d = 2\pi m_s n_d \quad (8)$$

Eqs. (5)~(8)より、偏角 θ_s におけるスクレーパ法線方向の粒子配列個数 N は次式によって得られる。

$$\begin{aligned} N &= \frac{Q}{v_p \delta\phi d_p^2} \\ &= \frac{1}{2\pi a_0 \sqrt{1 + p^2 \sec^2 \beta} \exp(p\theta_s)} \\ &\quad \times \frac{Q}{m_s n_d \delta\phi d_p^2} \end{aligned} \quad (9)$$

また、分離領域($\theta_s = \theta_{sb} \sim \theta_{se}$)における N の平均値 $\bar{N}$ は次式で求められる。

$$\bar{N} = \frac{1}{\theta_{se} - \theta_{sb}} \int_{\theta_{sb}}^{\theta_{se}} N d\theta_s \quad (10)$$

なお、 ω_p をトレーサ粒子によって測定した結果、本実験範囲ではいずれの操作条件下でもEq. (7)で定義した m_s は一定(≈ 0.88)であることが確かめられた。以

Fig. 6 (a) Experimental relation between Q and θ_s , (b) Comparison of experimental relation between N and θ_s with the model's one (: hindered condition)

下、 N および $\bar{N}$ に関して実験結果をもとに検討した。

Fig. 6(a)はスクレーパ沿い偏角 θ_s と粒子移動量 Q との関係を示した実験結果の一例である。 Q は θ_s の増大に伴って減少している。これは粒子がスクレーパ沿いを移動する間に粒子群中から離脱したことによる。 θ_s の増大に伴う Q の減少の度合は操作条件によって異なることが種々の実験結果から確かめられた。

また、Fig. 6(b)の曲線はスクレーパ法線方向の粒子配列個数 N と θ_s との関係を前述のモデル式(Eq. (9))に基づいて求めたものである(ここで、Eq. (9)中の Q と θ_s との関係には(a)図の曲線を適用した)。また、(b)図の各プロットはカメラ観測による N の実測値である。 N に関する実測値とモデルによる計算値はほぼ一致しており、したがって Q と θ_s の関係が既知ならばモデル式によって任意の θ_s における N を推算できることが分かる。このモデル式による N 対 θ_s の曲線をEq. (10)に基づいて図積分した値 $\bar{N}$ を図中に示す。

前述の干渉域における巨視的な分離特性値 $\bar{\eta}_m^*$ は、主として(b)図の曲線に示すような関数 $N(\theta_s)$ の平均値 $\bar{N}$ およびその形に依存するものと推測される。以下では簡単のため、2つの要素のうち、 $\bar{\eta}_m^*$ への影響の度合がより大きいと考えられる $\bar{N}$ に着目し、 $\bar{\eta}_m^*$ との関係を検討することを試みた。しかし、 $\bar{N}$ に関するEq. (10)中の N (Eq. (9))には、あらかじめ測定不可能な変数 Q を含んでいるため、 $\bar{N}$ を各操作変数をもとに予測することは困難である。そこで本報では N の予測が可能なB点($\theta_s = \pi/2$)に着目した。すなわち、本装置では助走壁がB点まで設置されているため、B点では $Q = F$ となる。したがって、これらの条件をEq. (9)に代入すればB点における粒子配列個数 $N = N_B$ は次式となる。

$$\begin{aligned} N_B &= \frac{1}{2\pi a_0 \sqrt{1 + p^2 \sec^2 \beta} \exp(p\pi/2)} \\ &\quad \times \frac{F}{m_s n_d \delta\phi d_p^2} \end{aligned} \quad (11)$$

Fig. 7 Correlation between $\bar{N}$ and N_B estimated by Eqs. (10) and (11), respectively

Fig. 7は各操作条件について、前述の手順で求めた $\bar{N}$ (Eq. (10)) と Eq. (11) によって推算した N_B との関係を実験結果を両対数紙上にプロットしたものである。その結果、同図の直線に示す次の近似式を得た。

$$\bar{N} = 0.26 N_B^{1.2} \quad (12)$$

$\ln \bar{N}$ と $\ln N_B$ との間の相関係数は0.98であり、 N_B と $\bar{N}$ とは密接な関係があることが分かる。そこで、本報では、 N_B を $\bar{N}$ の代表値として採用し、 N_B に基づいて干渉域での分離特性を検討した。

Fig. 8は、縦軸に干渉域での分離効率 $\bar{\eta}_m^*$ と非干渉域でのそれ $\bar{\eta}_0^*$ との比 (F 以外の操作条件が全く同一なもの) を相互に比較したもの) をとり、横軸には Eq. (11) で算出された粒子配列個数 N_B をとって全実験結果をプロットしたものである。 $\bar{\eta}_m^* / \bar{\eta}_0^*$ と N_B との関係は多少ばらつきはあるが、いずれの操作条件においても N_B の一つの境界値 N_B^* (≈ 7) で屈曲した図示の各直線で近似できるものと考えられる。各直線を $\bar{\eta}_m^*$ について表わせば

$$\bar{\eta}_m^* = \bar{\eta}_0^* \quad (0 \leq N_B \leq N_B^*) \quad (13-1)$$

$$\bar{\eta}_m^* = \{-0.057(N_B - N_B^*) + 1\} \bar{\eta}_0^* \quad (N_B \geq N_B^*) \quad (13-2)$$

となる。上式より、干渉域での分離効率 $\bar{\eta}_m^*$ は N_B および $\bar{\eta}_0^*$ の関数で与えられ、 N_B が N_B^* までの範囲では $\bar{\eta}_m^*$

Fig. 8 Final correlation (effects of N_B and $\bar{\eta}_0^*$ on $\bar{\eta}_m^*$)

に等しい値を得ることができるのに対し、 N_B が N_B^* を超える範囲では N_B の増大に伴って低下することが分かる。

3.2.2 最適操作条件

Eq. (13) の関係およびその成立条件に基づけば、干渉域における最適操作条件は次の2つで与えられることになる。(1) $\bar{\eta}_0^*$ が最大となる操作条件 (β , n_d)、および(2) 操作条件(1)の下で $N_B = N_B^*$ (≈ 7) を満足する処理量 F (Eq. (11))。すなわち、この操作条件下では $\bar{\eta}_m^*$ が最大となり、かつできるだけ多くの処理量 F を得ることができる。例えばM2粒子においては、(1)の条件はFig. 4の実験結果より $\beta = 4^\circ$ 、 $n_d \approx 0.50 \text{ s}^{-1}$ となり、(2)の条件はEq. (11)に $\beta = 4^\circ$ 、 $n_d \approx 0.50 \text{ s}^{-1}$ 、 $N_B = 7$ を適用することにより $F \approx 0.010 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ となることを得た。

4. 結 言

傘型回転円板上での粒子形状分離特性に及ぼす処理量の影響について、各不規則形状粒子の転がり摩擦特性の差異に着目して検討した結果、次の結論を得た。

(1) 干渉域(多粒子層状態下)での分離効率 $\bar{\eta}_m^*$ は、非干渉域(分散粒子状態下)で得られる分離効率 $\bar{\eta}_0^*$ および装置上B点におけるスクレーパ法線方向の粒子配列個数 N_B をもとに推算できる。

(2) 最適操作条件は、 $\bar{\eta}_0^*$ が最大となる操作条件 (β , n_d) と $N_B = 7$ を満足する処理量 F によって与えられる。

Nomenclature

a_0	: constant for spiral curve in Eq. (1)	(m)		scraper at θ_s	(-)
d_p	: particle diameter	(m)	N_B	: value of N at point B	(-)
F	: feed rate of particles	(kg · s ⁻¹)	N_B^*	: boundary value of N_B in Eq. (13)	(-)
l	: length along spiral scraper	(m)	$\bar{N}$	: mean of N defined by Eq. (9)	(-)
M	: mass of a particle	(kg)	n	: number of particles in Δl	(-)
m_s	: index defined by Eq. (7)	(-)	n_d	: rotational speed of disk	(s ⁻¹)
N	: number of particles arranged normal to spiral		P, R	: mass of particles in products and residues,	

·	respectively	(kg · s ⁻¹)	η^*	: maximum value of η obtained at $1.25\pi \leq \theta_{mc} \leq 2.75\pi$ for a given $\rho_{(tu)c}$	(-)
p	: constant for spiral curve in Eq. (1)	(-)	$\bar{\eta}^*$	: mean of η^* at $\rho_{(tu)c}=0.3$ to 0.6	(-)
Q	: mass of particles passing θ_s in a unit time	(kg · s ⁻¹)	θ_m	: sampling position around disk	(rad)
R_p	: cumulative fraction	(-)	θ_s	: vectorial angle along scraper	(rad)
t, u, v	: rectangular coordinate system located in a particle	(m)	θ_{sB}, θ_{sE}	: value of θ_s at point B and E, respectively	(rad)
v_p	: velocity of particles at θ_s along scraper (m · s ⁻¹)		$\rho_{(tu)}$	: index of rolling characteristics of a particle defined by Eq. (3)	(-)
w_j	: mass of particles sampled in j -section per unit time	(kg · s ⁻¹)	ϕ	: volume shape factor	(-)
$\alpha_{cr(t)}, \alpha_{cr(u)}$	: critical inclination angle of plate for a particle starting to roll down about t - and u -axis, respectively	(rad)	ω_d	: angular velocity of disk	(rad · s ⁻¹)
β	: inclination angle of surface of disk to the horizon	(deg)	ω_p	: angular velocity of particle around point O	(rad · s ⁻¹)
δ	: apparent density	(kg · m ⁻³)	Subscripts		
η	: Newton's separation efficiency defined by Eq. (4)	(-)	s, i	: useful and useless ingredient, respectively	
			m, o	: feed range for hindered and unhindered traveling, respectively	
			c	: boundary	

References

- 1) Ohya, H : *Powder Sci. & Eng.*, 23, 29(1991)
- 2) Sugimoto, M., K. Yamamoto and J. C. Williams : *J. Chem. Eng., Japan*, 10, 137(1977)
- 3) Yamamoto, K. and M. Sugimoto : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 16, 521(1979)
- 4) Yamamoto, K. and M. Sugimoto : *ibid.*, 22, 626 (1985)
- 5) Yamamoto, K. and M. Sugimoto : *ibid.*, 22, 813 (1985)
- 6) Yamamoto, K., T. Tsukada and M. Sugimoto : *ibid.*, 26, 12(1989)
- 7) Yamamoto, K., T. Hama and M. Sugimoto : *ibid.*, 28, 18(1991)