準剛体回転流による高精度湿式遠心分級

— 連続方式の分級原理と性能 —

Accurate Wet-type Centrifugal Classification Using an Almost Rigidly Rotating Flow — Classification Principle and Performance of the Continuous-type Classification —

中 林 功 一*, 土 田 陽 一*

Koichi NAKABAYASHI, Yoichi TSUCHIDA

In this paper, we studied the performance of continuous wet-type centrifugal classification system which was developed based on the batch-type system with an almost rigidly rotating flow proposed in our previous paper. The continuous operation was achieved by extracting the coarse product from the equator of housing. We have experimentally investigated the influence of extraction on the classification performance and the critical extraction rate. We obtained the following conclusions; (1) extraction affects neither the stably-rotating flow nor the rotating stratified flow structure, although the rigid-rotation region of the batch-type shifted into an interior region and Ekman layers, (2) when the extraction rate is below the threshold value (critical extraction rate), the cut size and fine yield decrease with increasing extraction rate, but the sharpness index is almost as high as that for the batch-type, (3) the critical extraction rate is reduced with decreasing Ekman and Rossby numbers.

Key Words : Wet-type Centrifugal Classification, Almost Rigid Rotation, Continuous-type Classification, Ekman Layer, Partial Fractional Efficiency

1. 緒 言

著者らは本論文に先立ち、従来にない新しい原理にもとづく精密微粉分級方式として、準剛体回転流を応用する湿式遠心分級方式を提案した¹⁾。この方式は、原理的に精密微粉分級を達成するために必要な4条件²⁾すなわち、持続的に働く強力な分離力、乱れの無い流れ、良好な粒子分散、分級産物（粗粉産物と微粉産物）の混合阻止の4条件のすべてを満足している。

この方式を工業的に実用化するためには、バッチ式¹⁾から連続方式へと発展させることが望ましい。連続方式へ発展させる方法として、ここではバッチ式の場合の粗粉産物の捕集領域（剛体回転領域）から液を抽出する方法を考察する。バッチ式での流れの構造は、エクマン層、スチュワートソン層、内部領域および剛体回転領域からなる回転成層流である。したがっ

て、この基本的な流れ構造を損なわないように抽出を行えば、バッチ式での高性能を維持しつつ連続処理が可能となるはずである。そこで本論文では、抽出による連続方式の分級性能評価、ならびにその抽出限界について明らかにする。

2. 抽出による流れ構造の変化と粒子運動

Fig. 1の右半分は連続方式における流れ構造を、また左半分はその流れの流線と粒子軌道の概略を示している。ハウジングは球形状で、コア部は外面が球面と円柱面からなっており、両者が角速度 Ω で一体回転している。この回転容器内へフィードパイプから原料粉体分散液（流量 Q_0 ）、流入口から水（流量 $Q-Q_0$ ）がそれぞれ供給される。これらはバッチ式¹⁾の場合と同じであるが、ハウジングの赤道部から粗粉産物の分散液を抽出（抽出流量 Q_c ）している点が相違する。したがって、流出側の微粉産物の分散液流量は $Q-Q_c$ となる。流れの支配パラメータのエクマン数 E とロスビー数 R_s は、バッチ式と同じ定義式 $E=\nu/(\Omega a^2)$, $R_s=U_E/(\Omega a)$ を用い、抽出流量比 k_c は次のように定義する。

1999年6月21日受付

粉体工学会1998年度秋期研究発表会（1998年11月、東京）にて発表

*名古屋工業大学機械工学科

（〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町）TEL 052-735-5323

Department of Mechanical Engineering

Nagoya Institute of Technology

(Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555)

Fig. 1 Schematic of the almost rigidly rotating flow structure and particle path within a rotating double-walled container for the continuous-type classification (k, l, t, k', l', t' : Ekman layers; m, n, n' : Stewartson layers; i, i', j' : interior regions; hatching: Ekman extensions of Stewartson layers; $\circ$: coarse particles $\bullet$: fine particles; F_c, F_d : centrifugal and drag forces)

$$k_c = Q_c / Q (< 1) \quad (1)$$

いま、ハウジング赤道位置から Q_c の抽出を行えば、ハウジング壁形状が赤道面に対称であるので、上、下壁近傍に生じるエクマン層 t, t' 内のエクマン輸送量¹⁾はそれぞれ $0.5Q_c$ となる。もしもこのエクマン輸送量が領域 j' から補われるものとすれば、エクマンサクションとして内部領域 j' から供給されなければならない。しかし、テイラー・プラウドマンの定理¹⁾が成立すること、ならびにこの流れ領域の赤道対称性のゆえに、軸方向の流速成分が零になる。もしも、壁が平板であれば、内部領域 j' の軸方向渦度成分が軸方向速度成分に比例するのでエクマン適合条件より零となるが、壁が球面の場合には、その曲率の影響により軸方向渦度成分が零ではなく、 r のみの関数になる³⁾、したがって、内部領域 j' の方位角方向速度成分が z に無関係で r によってのみ変化する値をもつ。以上のようにバッチ式では剛体回転領域であった領域が、抽出により上述のような内部領域 j' とエクマン層 t および t' へと変化する。

一方、スチュワートソン層 m の流量は抽出により $Q - 0.5Q_c$ となるが、そのうちの $0.5Q_c$ は m の下流部においてエクマン層 t' へエクマン輸送量として運ば

れるので、残りの $Q - Q_c$ がエクマン層 k' と l' へ分かれて流れ、最終的には流出口より流れ去る。したがって、バッチ式で明らかにした安定な回転成層流れの E と R_s に対する条件は、領域 n, k, l, i については不変であり、 n', k', l', i' ではエクマン数は不変でロスビー数のみが減少するので流れが安定側に移行する⁴⁾。よって、上述の流れの流線は Fig. 1 の左半分に示したようになる。

上述のような抽出による流れの変化によって、スチュワートソン層 m 以降の粉体粒子の運動はバッチ式の場合と相違する。 R_s, E の値がバッチ式と同じ場合、スチュワートソン層 m 内の軸方向の流速は、バッチ式と比較して上述のように減少する。したがって、粒子の m 内での滞留時間が増し、遠心力が時間的に長く作用するので、粒子軌道がバッチ式に比して外方へそれる。この傾向は Q_c の増大につれて増す。

3. 分級試験による性能評価

3.1 実験装置および方法

Fig. 2 (a) は分級試験に用いた実験装置、Fig. 2 (b) はハウジングとコアからなる回転容器ならびにスリップリングの詳細を示す。これらは、前報 (Figs. 2 (a), (b))¹⁾ のバッチ式の装置に、上述の抽出のための機構を加えたものである。すなわち、回転ハウジングの赤道部に抽出口をあけ、スリップリングにこの抽出口からの流れを受けて静止系へ排出する機構を加えた。なお、ハウジング内面は球面 (半径 94.49mm)、コア外面は円柱面 (半径 $a = 72.64\text{mm}$) と球面 (半径 87.90mm) からなる。

原料粉体分散液は前報¹⁾と同じで、原料粉体は真比重 (密度比 $\gamma = \rho_p / \rho_f$) が 1.19 のポリメタクリル酸メチルの球形粒子 (粒子直径 $D_p \approx 1 \sim 12 \mu\text{m}$) であり、分散液に対する原料粉体の質量濃度 C_0 は 0.5 % である。

分級試験方法は、以下に述べるように、前報¹⁾ のバッチ式の方法に抽出の操作を加えて行った。まず、原料粉体分散液の代わりに水を供給して、回転数 n 、貫流量 Q 、原料粉体分散液の流量 Q_0 、抽出流量 Q_c を設定する。次に、水を原料粉体分散液に切り換えることにより分級試験を開始し、再び水に戻すことによって終了する。ここで原料粉体分散液の流量比 $k_0 (= Q_0 / Q)$ は、前報¹⁾と同じ 0.15 の一定値とした。なお、本実験装置において 20 °C の水の場合、エクマン数 E 、ロスビー数 R_s と回転数 n (rpm)、貫流量 Q (m^3/s) との間に次式の関係がある。

(a) Total system (C : rotating container ; D : driving system, T_o , T_w : tanks for the feed suspension and water ; O_o , O_w , O_c : overflow tanks for the feed suspension, water and coarse product ; N_o : dispersion nozzle)

(b) Rotating container C and slip ring (dimensions (units mm) : housing : $R_{II} = 94.49$; core : $a = 72.64$; $R_R = 87.90$; inlet : $d = \phi 21.8$, $l = 179.5$; extraction : $d_c = 4 - \phi 4$; outlet : $d_F = 4 - \phi 4$, $d_s = \phi 34$)

Fig. 2 Experimental apparatus

$$E = 1.82 \times 10^{-3} / n, \quad R_s = 4.65 \times 10^4 Q / n^{0.5} \quad (2)$$

$$n = 1.82 \times 10^{-3} / E, \quad Q = 9.16 \times 10^{-7} R_s / E^{0.5} \quad (3)$$

粒度測定は、前報¹⁾と同様、光透過式の遠心沈降式粒度分布測定装置（島津製作所、SA-CP4L）により行い、ふるい上積算分布（質量基準） $R(D_p)$ を求めた。微粉収率 η_F は、流量 Q_c の抽出があるので、

$$\begin{aligned} \eta_F &= \text{微粉産物の質量流量} / \text{原料粉体の質量流量} \\ &= \rho_f (Q - Q_c) C_F / (\rho_f Q_o C_o) \\ &= (1 - k_c) C_F / (k_o C_o) \end{aligned} \quad (4)$$

となるが、 k_c , k_o , C_o は上述のように設定値となるので、 η_F は微粉産物の質量濃度 C_F を前報¹⁾と同様に測定することにより求められる。なお分級性能の評価方法は、前報¹⁾と同じである。

3. 2 分級試験結果および考察

最初に、エクマン数 E およびロスビー数 R_s が一定の場合において、分級性能に及ぼす抽出流量比 k_c の影響について考察する。

Fig. 3は、 $E = 5.0 \times 10^{-6}$, $R_s = 1.2 \times 10^{-2}$ (Eq. (3) より $n = 363 \text{ rpm}$, $Q = 4.92 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$) の場合において、抽出流量比 k_c を変化させたときに得られるふる

Fig. 3 Oversize distribution for $k_c = 0.4$, $E = 5.0 \times 10^{-6}$ and $R_s = 1.2 \times 10^{-2}$

い上積算分布 $R(D_p)$ の一例 ($k_c = 0.4$) を示す。なお下付き添字の O, F, C は、それぞれ原料粉体、微粉産物、粗粉産物に関する量であることを示す。図中の各曲線は、分級性能をより正確に評価するため前報 (Eqs. (8), (11))¹⁾と同様に求めた測定データの近似関数の曲線である。

Fig. 4は、Fig. 3の近似曲線の関数から求めた頻度分布 $f(D_p)$ の抽出流量比 k_c による変化を示す。前報¹⁾で得た $k_c = 0$ の無抽出の場合より $k_c = 0.4$ (Fig. 4 (a)) へと抽出流量比を増大させると、微粉産物 (f_F) における粒径 D_p の小さなところ ($2 \mu\text{m}$ 付近) で

Fig. 4 Change of the frequency distribution by the extraction ratio k_c for $E=5.0 \times 10^{-6}$ and $R_s=1.2 \times 10^{-2}$

頻度が増大し、それよりも大きな粒径では頻度が減少して、微粉産物に占める粗粒子の割合が k_c の増大によって減少することが知られる。 k_c の増大によるこの微粉産物での粗粒子の減少は、前述したようにエクマン層 t (Fig. 1) の無次元エクマン輸送量 ($0.5k_c$) が k_c とともに増大するため、分級場であるシュワートソン層 m の無次元流量 ($1-0.5k_c$) が減少し、m の軸方向の流速は小さくなって、粒子が遠心力の作用を受ける時間が k_c とともに増大することによって引き起こされる。上述の k_c の増大に伴う f_F の粒径による増減およびこれに対応した $f_C (=1-f_F)$ の粒径による増減のゆえに、 $f_F=f_C$ となる粒径（分級径 D_{P50} ）ならびに f_F 曲線と横軸で囲まれた面積（微粉収率 η_F ）は k_c の増大によって減少する。抽出流量比を $k_c=0.6$ (Fig. 4 (b)) へとさらに増大させると、微粉産物において粒径の大きなところのみならず粒径の小さなところでも頻度が減少（粗粉産物では増大）し、分級径ならびに微粉収率はさらに減少する。

Fig. 5 は、Fig. 4 の頻度分布から求めた微粉産物の部分分級効率 $\Delta\eta(D_p) (=f_F/f_0)$ の抽出流量比 k_c による変化を示す。Fig. 6 は、Fig. 5 から求めた分級の鋭さ $S (=D_{P25}/D_{P75})$ および分級径 D_{P50} の抽出流量比 k_c への依存性を示す。Fig. 6 から知られるように、分級の鋭さ S （完全分級時の 1 の値に近いほど精度がよい）は、 $k_c=0.5$ 以下ではほぼ 1.39 の一定値を示し、バツ

Fig. 5 Change of the partial fractional efficiency by the extraction ratio k_c for $E=5.0 \times 10^{-6}$ and $R_s=1.2 \times 10^{-2}$

Fig. 6 Dependence of the sharpness index and cut size on the extraction ratio for $E=5.0 \times 10^{-6}$ and $R_s=1.2 \times 10^{-2}$

チ式 ($k_c=0$) と同等の高い分級精度を示す。しかし、 $k_c=0.6$ では 1.84 に増大し、急激に精度が悪化する。他方、分級径 D_{P50} は、 $k_c=0.5$ 以下では k_c の増大に対しほぼ一定の割合で減少するが、 $k_c=0.6$ では急減する。これらの結果は、Fig. 5 において、部分分級効率曲線（完全分級では横軸に垂直な分布形状となる）が、 $k_c=0.5$ 以下では k_c の増大に伴いバッチ式の高精度の分布形状をほぼ維持しながら粒径の小さい方向へシフトするのにに対し、 $k_c=0.6$ では約 $2 \mu\text{m}$ 以下の粒径での部分分級効率の減少のため上記のシフトがくずれることに対応する。

上述の $k_c=0.6$ での急激な分級径の減少（すなわち粗粉産物として捕集される微粒子の割合の急増）ならびに分級精度の急激な悪化の原因は、原料粉体分散液が供給される回転コア上のエクマン層 k (Fig.1) を通過する流れの一部（内部領域 i 寄りの部分）が、 $k_c=0.6$ の場合には抽出されるからであると推測される。したがって、連続方式においても高い分級精度を維持するためには、抽出流量比 k_c をあるしきい値

(a) Relationship between the sharpness index and the extraction ratio

(b) Relationship between the cut size and the extraction ratio

Fig. 7 Relationship between the classification performance and the extraction ratio for three conditions of Ekman and Rossby numbers, A ($E=5.0 \times 10^{-6}$, $R_s=1.0 \times 10^{-2}$), B ($E=7.0 \times 10^{-6}$, $R_s=1.0 \times 10^{-2}$) and C ($E=5.0 \times 10^{-6}$, $R_s=1.2 \times 10^{-2}$)

(分級の鋭さに関する限界抽出流量比 k_{CS} と呼ぶ値) 以下に抑える必要がある。なお、上記の場合の k_{CS} の値は約 0.5 である。

次に、上記の分級性能と抽出流量比との関係に及ぼすエクマン数 E 、ロスビー数 R_s の影響 (回転数 n 、貫流量 Q の影響) について考察する。

Fig. 7 (a) は、3通りの E 、 R_s の条件 A ($E=5.0 \times 10^{-6}$, $R_s=1.0 \times 10^{-2}$), B ($E=7.0 \times 10^{-6}$, $R_s=1.0 \times 10^{-2}$), C ($E=5.0 \times 10^{-6}$, $R_s=1.2 \times 10^{-2}$) に対して、分級の鋭さ S と k_c との関係を示す。ここで条件 C は前述の E 、 R_s の条件 ($n=363\text{rpm}$, $Q=4.92 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$) であり、条件 A は C よりも R_s を小さく (貫流量 Q を小さく) した条件 ($n=363\text{rpm}$, $Q=4.10 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$)、条件 B は A よりも E を大きく ($Q/n^{0.5}$ を一定に保ったまま回転数 n を小さく) した条件 ($n=260\text{rpm}$, $Q=3.46 \times 10^{-6}\text{m}^3/\text{s}$) である。図から明らかなように、条件 A、B においても、前述した条件 C の場合と同様の S と k_c の関係が見られる。ただし、限界抽出流量比 k_{CS} の値は、A $\rightarrow$ B へのエクマン数の増大 (回転数 n の減少) あるいは A $\rightarrow$ C へのロスビー数の増

Fig. 8 Critical extraction ratio k_{CS} concerning the sharpness index in the E - R_s parameter plane (A, B and C show the same E - R_s conditions as in Fig. 7)

大 (貫流量の増大) とともに大きくなる ($k_{CS} \approx 0.4 \rightarrow 0.5$)。前者の k_{CS} の増大は、回転数の減少に伴う遠心力の減少により微粒子が粗粉産物として抽出されにくくなった結果であり、後者のそれは、貫流量の増大に伴って粒子が分級場を通過する速度が増大するため、粒子が遠心力を受ける時間が減少し、微粒子が抽出されにくくなった結果である。Fig. 7 (b) は、上記の E 、 R_s の 3 条件に対して、分級径 D_{p50} と k_c との関係を示す。この関係においても上述の E 、 R_s の条件による k_{CS} の変化に対応した変化が見られる。

Fig. 8 は、Fig. 7 (a) から得られる限界抽出流量比 k_{CS} をエクマン数 E とロスビー数 R_s のパラメータ平面上で表したものである。 k_{CS} の値は上述のようにエクマン数の減少 (回転数 n の増大) およびロスビー数の減少 (貫流量の減少) とともに小さくなる。

4. 結 言

準剛体回転流を分級に応用する湿式遠心分級方式において、ハウジングの赤道から抽出を行うことにより連続処理化をはかる方式 (連続方式) について、分級試験を行って考察した結果、次の結論を得た。

- (1) バッチ式 (無抽出) の場合の剛体回転領域 (粗粒子の捕集領域) は、抽出によりエクマン層と内部領域に変化する。粗粒子はこのエクマン層と内部領域流れによって分級場から速やかに排出されるので、バッチ式の場合と同様、微粉産物への粗粒子の混入は起こり得ない。
- (2) 限界抽出流量比以下では、抽出流量の増大に伴って分級径および微粉収率は減少するが、分級の鋭さはバッチ式の場合と同等の高い精度を示す。しかし限界抽出流量比を超えると、分級の鋭さ S の値が急増し精度が悪化する。
- (3) 限界抽出流量比の値は、エクマン数の減少 (回転数の増大) またロスビー数の減少 (貫流量の減少)

とともに小さくなる。

本研究は、文部省科学研究費補助金・基盤研究 C2

(H7～8 年度 07650200, H9～10 年度 09650185)

の援助を受けた。ここに付記し謝意を表す。

Nomenclature

a : radius of the cylindrical part of the rotating core (characteristic length) (m)	R_s : Rossby number (ratio of the inertial force to the Coriolis force acting on fluid), $U_E/(\Omega a)$ (—)
C : mass concentration of suspension (—)	(r, ϕ, z) : dimensionless rotating cylindrical coordinate system (radial, azimuthal, and axial coordinates) (—)
D_p : diameter of a spherical particle (m)	S : sharpness index, D_{P25}/D_{P75} (—)
$D_{P\Delta}$: particle diameter for $\Delta\eta=N$ (%) (D_{P50} : cut size) (m)	U_E : characteristic velocity (roughly speaking, mean radial velocity component over the Ekman layer), $Q/\{4\pi a(\nu/\Omega)^{0.5}\}$ (m/s)
E : Ekman number (ratio of the viscous force to the Coriolis force acting on fluid), $\nu/(\Omega a^2)$ (—)	γ : ρ_F/ρ_t (—)
$f(D_p)$: frequency distribution (mass base, $f_0 = -dR_0/dD_p$, $f_F = -\eta_F dR_F/dD_p$, $f_c = -(1-\eta_F)dR_c/dD_p = f_0 - f_F$) (m ⁻¹)	η_F : yield of fine product (Eq. (4)) (—)
F_c : centrifugal force acting on the particle (N)	$\Delta\eta(D_p)$: partial fractional efficiency of the fine product, $f_F(D_p)/f_0(D_p)$ (—)
F_d : drag acting on the particle (N)	ν : kinematic viscosity of fluid (m ² /s)
k_c : extraction ratio, Q_c/Q (—)	ρ_t, ρ_F : densities of fluid and particle respectively (kg/m ³)
k_{CS} : critical extraction ratio concerning the sharpness index (—)	Ω : angular velocity of the rotating container (rad/s)
k_0 : feed-suspension ratio, Q_0/Q (—)	Subscripts
n : rotation rate of the rotating container, $30\Omega/\pi$ (rpm)	C, F : concerning the coarse and fine products respectively
Q : through-flow rate (m ³ /s)	O : concerning the feed suspension
Q_c : flow rate of the extraction (m ³ /s)	W : concerning the water supplied
Q_0 : flow rate of the feed suspension (m ³ /s)	
$R(D_p)$: oversize distribution (mass base) (—)	

References

- 1) Nakabayashi, K and Y. Tsuchida : "Accurate Wet-type Centrifugal Classification using an Almost Rigidly Rotating Flow -Classification Principle and Performance of the Batch-type Classification-", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **36**, 881-890 (1999)
- 2) Okuda, S. : "On Accurate Classification of Fine Particles", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **26**, 451-458 (1989)
- 3) Nakabayashi, K and Y. Tsuchida : "Basic Study on Fine Particles in Almost Rigidly Rotating Flow (1st Report, Theoretical Consideration of Flow)", *Trans. Japan Soc. Mech. Eng.*, **591**, 3989-3995 (1995)
- 4) Nakabayashi, K. et al. : "Basic Study on Fine Particles in Almost Rigidly Rotating Flow (3rd Report, Conditions of Occurrence of a Stable Regime of Almost Rigidly Rotating Flow)", *Trans. Japan Soc. Mech. Eng.*, **591**, 4004-4010 (1995)