遠心力利用強制渦方式分級機の 分級メカニズムに関する基礎的研究(第3報)

— 風量および羽根形状の分級径に及ぼす影響 —

佐藤 勇一^{*1} 長嶺 拓夫^{*2} 山田 幸良^{*3}

Classification Mechanism of an Air Classifier Using Centrifugal Force(Pat 3) — Effects of Air Flow Rate and Blade Attitude Angle on Cut Size —

by

Yuichi SATO^{†1}, Takuo NAGAMINE^{†2} and Yukiyooshi YAMADA^{†3}

The trajectories of particles thrown into a forced vortex type centrifugal air classifier are calculated numerically. The effects of the air flow rate and the blade attitude angle on the cut size are verified. The cut size is determined by the blade attitude angle as well as by the radial air flow rate. The lowest cut size can be reduced by increasing the blade attitude angle.

Key Words : Air Classifier, Centrifugal Force, Inclined Blade, Classification Mechanism, Numerical Analysis

1. まえがき

遠心力利用強制渦方式分級機は、高精度でサブミクロン分級の可能性を有することから多くの注目を集めている。しかし、その分級メカニズムについては、十分明らかにされているとは言えない。本論文では前報^{1,2)}に引き続き分級機の精度向上を図る上で不可欠な、粒子の運動を検討し、分級精度にかかわる要因とその影響を明らかにすることを目的としている。

第1および第2報では風量を一定として、そのとき

の分級径におよぼす分級室形状、捕集条件などについて考察した。本報では、前報までに考察の対象とした半径方向羽根を有するロータに加えて、傾斜羽根を有する分級ロータの分級径と風量の関係も考察している。また、実機による分級結果との比較を行い計算結果との一致を確認したので報告する。

2. 計算結果および考察

前報では、分級機内の流れ場をポテンシャル流れとして、粒子が投入されたときの軌跡を数値計算により求め、その挙動について考察した。**Fig. 1** および **2** に

平成元年5月22日受付

*1 埼玉大学工学部(〒338 浦和市下大久保 255)
TEL 0488-52-2111 内線 2362

*2 日本鋼管(株)エンジニアリング事業部
(〒230 横浜市鶴見区末広町 2-1)
TEL 045-505-3399

*3 日清製粉(株)生産技術研究所
(〒354 埼玉県入間郡大井町鶴ヶ岡 5-3-1)
TEL 0492-64-6211

†1 Dept. of Mech. Eng., Faculty of Eng., Saitama Univ.,
255 Shimo-Okubo, Urawa 338

†2 NKK Corp., Mechanical Design Sect., 2-1,
2-1, Suehiro-cho, Tsurumi-ku, Yokohama 230

†3 Nissin Flour Milling Co. Ltd., Technical Research
Center, 5-3-1 Tsurugaoka, Ooimachi, Iruma-gum,
Saitama 354

Fig. 1 Blade configurations of classification rotors

Fig. 2 Classification chamber ($\phi_0 > 0$)

本論文の解析の対象とした分級ロータの概略およびその一部を拡大した分級室の概略を示す。本報では、前報の解析に基づき個々の粒子の軌跡を計算し、その粒子が粗粉・微粉のいずれに分級されるのかを調べ、分級の特性に及ぼす羽根傾斜角 ϕ_0 、無次元風量 Q 等の影響について考察している。なお、空気流の流れ場に関する条件は、第1報と同じで回転軸方向に一樣な二次元非圧縮性流れとしている。分級羽根先端 (Fig. 2 のBあるいはD) の描く円周上における半径方向流速の平均値 $v_{ra} = r_{out}\omega$ で除した無次元風量 Q で、分級機へ流入する空気の流量(風量)を表す。粒子は球形とし、流体に対する体積混合比(粉塵濃度)は十分小さく、衝突等の粒子相互の干渉はないとしている。また、流体から粒子に作用する力は流体の粘性力のみとし、簡単のため粘性力はストークスの抵抗法則に従うものとした。翼と粒子の衝突は完全弾性衝突と仮定する。粒子を投入する位置はFig. 1および2に一点鎖線で表される円周上で、半径方向位置は $R_0 = (R_{in} + R_{out})/2$ 、また、角度位置 θ_0 は $0 < \theta_0 < \theta$ としている。微粉および粗粉の捕集半径位置をそれぞれ R_n および R_o としている。前報で述べたように R_n の大きさによる分級への影響はほとんどない。特に断わらない限り $R_n = 0.624$ 、 $R_o = 1.1$ 、そして、予旋回速度については前報同様 $\Gamma_2/(2\pi) = 0.7$ としている。

Fig. 1(a)が前報までに考察した羽根形状で、直線羽根が半径方向に取り付けられている。一方、Fig. 1(b)は羽根が半径方向と ϕ_0 だけ傾いて取り付けられている。傾斜角 ϕ_0 は、半径方向を基準として時計回りにはかる。Fig. 1(a)の羽根形状を半径方向羽根、Fig. 1(b)の羽根形状を傾斜羽根と呼ぶことにする。考察の対象とした分級ロータは羽根間隔が 12° 、すなわち、羽根数30枚である。羽根間隔 6° (羽根数60)の分級ロータについて計算を行ったところ、分級径については羽根間隔 12° のときとほとんど同じ結果を得たが、羽根間隔が狭くなると分級点付近で粒子の軌跡計算時間が極端に長くなることから、ここでは羽根間隔 $\theta = 12^\circ$

のロータについて計算を行った。

2.1 無次元風量 Q と分級径における慣性パラメータ Ψ_{50} の関係

前報同様粒子に作用する流体力がストークスの抵抗法則に従うものと考えれば、粒子の運動を支配する方程式は線形であり無次元化して扱うことができる。風量は無次元風量 $Q = v_{ra}/(r_{out}\omega)$ 、また、分級径 d_{p50} は慣性パラメータ

$$\Psi_{50} = \frac{\rho d_{p50}^2 \omega}{18\mu} \quad (1)$$

を用いて表すことにする。

Fig. 3に無次元風量 Q に対する Ψ_{50} の変化を示す。

(1) 半径方向羽根($\phi_0 = 0^\circ$) 図中破線が前報までに考察した羽根形状、すなわち、Fig. 1(a)に示す羽根が半径方向となす角 $\phi_0 = 0^\circ$ の場合の結果である。無次元風量 $Q > 0.3$ のときは、 Q が減少するにつれて Ψ_{50} は単調に減少する。しかし、 $Q < 0.3$ となると Q の減少に対して Ψ_{50} はあまり減少しなくなる。これは Q が小さくなると周方向に流れの偏りが生じるためと考えられる (Fig. 4, 5 参照)。これから、半径方向羽根では Ψ_{50} の下限はおおむね0.1~0.2であることが予想される。

図中一点鎖線は、通常行われている遠心力と粘性力が等しいとするもっとも近似的な取り扱いから得られる関係式である。この関係式は次のような考えから導かれる。すなわち、粘性力および遠心力は近似的に次のように表せる。

$$f_{vis} = 3\pi d_p \mu v_{ra} \quad (2)$$

$$f_{cent} = \pi \rho_p d_p^3 r_{out} \omega^2 / 6 \quad (3)$$

粒径が d_{p50} のとき遠心力と粘性力が等しいと考えれば、

Fig. 3 Dependence of nondimensional cut size Ψ_{50} on nondimensional radial air flow rate Q (Calculated results)

Fig. 4 Calculated relative velocity vectors in a classification chamber with radial blades
 $(\phi_0=0^\circ, \Gamma_2/(2\pi)=0.7)$

Fig. 5 Calculated relative velocity vectors in a classification chamber with inclined blades
 $(\phi_0=30^\circ, \Gamma_2/(2\pi)=0.7)$

$$\frac{f_{cent}}{f_{vis}} = \frac{\Psi_{50}}{Q} = 1$$

すなわち、

$$\Psi_{50} = Q \quad (4)$$

を得る。このような考え方では Ψ_{50} と Q の関係は簡単であり、 Q を減少させると Ψ_{50} はそれに比例して減少する。

この式は、向心流が周方向に一樣で、かつ半径方向にも変化しない流れ場内で、分級を行ったときの Q と Ψ_{50} の関係を表している。 Ψ_{50} が粒径の2乗に比例することから、同一回転速度において分級径における粒径は、風量の2乗根に比例することが分かる。すなわち、風量が20%変化すると、分級径は約10%変化する。

$\Psi_{50} = Q$ の関係式と図中の破線を比較すると、分級径が大きい範囲では風量の減少にともなって分級径も減少し、両者はかなり良くあっている。しかし、数値計算では $Q < 0.3$ の風量では、 Q が減少しても Ψ_{50} はあまり減少しない傾向が現れている。

(2) 傾斜羽根 ($\phi_0 > 0^\circ$) 次に、羽根を **Fig. 1 (b)** のように $\phi_0 = 15^\circ$ と 30° 傾けた場合の計算結果が **Fig. 3** の実線である。 Q に対する Ψ_{50} の定性的な傾向は半径方向羽根の場合と同じである。しかし、 $\phi_0 = 0^\circ$ に比べて同じ Q に対し $\phi_0 > 0^\circ$ における Ψ_{50} の値は小さく、さらに、翼角度 ϕ_0 が大きいほど分級径は小さくなる。これは粒子と羽根との衝突角度が ϕ_0 に依存しているため、結果として粒子の軌跡に羽根角度が影響するためと考

Fig. 6 Calculated particle trajectories

えられる (**Fig. 6** 参照)。半径方向羽根と同様 Q が小さくなると Ψ_{50} の減少が鈍くなっている。図から $\phi_0 = 30^\circ$ の場合には分級径の下限は $0.01 \sim 0.02$ 付近と予想される。

傾斜羽根と半径方向羽根の分級できる Ψ_{50} の下限を比較すると傾斜羽根の方が明らかに小さい。たとえば、 $\phi_0 = 30^\circ$ の傾斜羽根では $\phi_0 = 0^\circ$ の半径方向羽根に比べおよそ $1/10$ 小さな $\Psi_{50} (d_{P50})$ を得ることができる。また、傾斜羽根では Ψ_{50} と Q の関係は、先に導いた粒子に作用する力の静的つり合い関係式 $\Psi_{50} = Q$ からかなり外れている。これは後に述べるように、分級のメカニズムが $\phi_0 = 0^\circ$ のときとやや異なっているためと考えられる。

(3) 捕集位置の影響 粒子の周方向初期投入速度がゼロの場合、第2報で述べたように R_{50} を大きくすると分級精度が上がり、分級径は大きくなる傾向がみられた。しかし、図示していないが、 R_{50} の分級径に及ぼす影響は無視できる程度に小さい。特に、 $Q \leq 0.5$

では一度外へ飛び出した粒子は内側へ分級されることが少なくなるため、 R_{10} の影響はほとんどなくなる。 $\phi_0 = 15^\circ, 30^\circ$ のときも同様な結果を示した。本報では捕集位置が分級径に及ぼす影響が小さいことから $R_{10} = 1.1$ として計算を行った。

2.2 流速分布と無次元風量 Q

Q は通常 $Q < 2$ であり分級径が小さい程、 Q も小さい。**Fig. 4**および**5**は Q が比較的小さいときの流れ場の様子を示す。矢印が流れの方向を表し、長さが速さを示している。**Fig. 4**は半径方向羽根の場合で、 $Q = 0.5$ ではコリオリの力によって、流速に偏りが生じ下側の流速が速くなっている。分級径が小さくなってくると分級径付近の粒子は分級室の下側の壁面付近で運動することが多くなる。 Q を減少させると分級径は一般に減少する。しかし、 Q がかなり小さい領域では**Fig. 4**で示したように翼内部の流速に偏りが生じるために、分級室下側の流速は Q に伴って減少しなくなり、分級径もあまり下らない。**Fig. 5**は傾斜羽根の場合で、 $\phi_0 = 30^\circ$ のときの流れ場を示している。分級室へ流れ込む領域で半径方向羽根($\phi_0 = 0^\circ$)と比べて乱れは大きい、図に示した $Q = 0.5$ においては、流れの偏りはほとんど生じていない。このことから、傾斜羽根では流速の偏りが生じにくいことが分かる。したがって、半径方向羽根に比べて Q の減少にともなって分級室下側の向心流速を減少させることができ、分級径をより小さくすることができる。

2.3 粒子の軌跡

Fig. 6は羽根角度 ϕ_0 と粒子の軌跡の関係を示したものである。慣性パラメータ Ψ が増加すると粒子が分級ロータの内側(微粉側)から外側(粗粉側)へ分級されていくのが分かる。 $\phi_0 = 0^\circ$ の軌跡と比べて $\phi_0 = 30^\circ$ の場合には、羽根が傾いているために下側の壁面と衝突した後粒子は外側へ向かう運動量を与えられる。このため粒子は外側へ出やすい。さらに、 $\phi_0 = 30^\circ$ のロータでは一度分級室の外側へ出た粒子は再度分級室へ入ろうとしても、下側の壁面と衝突して再度外側へはじかれる可能性が高い。すなわち、傾斜羽根では一度翼の外側へ出ると粗粉として回収される確率が高いといえる。

羽根角度 ϕ_0 と投入位置 θ_0 の分級精度に及ぼす関係を**Fig. 7**に示す。図中太い線は粒子が微粉側へ、細い線は粒子が粗粉側へ分級されたことを示し、四角枠で囲まれた部分は投入された粒子が一度投入された分級室から飛び出し、再び他の分級室に入ってから分級されたことを示す。 ϕ_0 が大きくなるにしたがって一度外へ飛び出した粒子は、粗粉として回収される確率が高く、

Fig. 7 Effect of initial position θ_0 on classification accuracy ($\Gamma_2/(2\pi) = 0.7, Q = 1$)

また、初期投入角度 θ_0 の影響が大きくなっている。すなわち、初期投入角度 θ_0 が大きいくほど、粒子は内側(微粉側)へ入りやすい。 ϕ_0 が大きくなると分級精度は若干悪化することが分かる。**Fig. 7**(c)中のKで示した点($\theta_0 = 8^\circ, \Psi = 0.48$)は、分級ロータの内側へ入った後、微粉側へ分級されずにいつまでも旋回することを示している。

Fig. 8は初期投入角度位置 θ_0 が比較的大きいために、大きい粒子が分級室の内側へ入ったときの軌跡の一例である。粒子は分級室の内側へ入ってから旋回し、羽根内側に衝突した後、微粉側へ分級される。この理由は次のように考えられる。傾斜羽根では流れが分級室から内側へ流出する際、半径方向羽根に比べてより大

($\phi_0 = 30^\circ, \theta_0 = 8^\circ, Q = 1, \Psi = 0.49$)

Fig. 8 Calculated particle trajectory

きい周方向速度を持つ(Kuttaの条件*)ため、分級室より内側の速い周方向速度によって粒子は加速され、遠心力が増加し内側(微粉側)へ向かうことができずに分級室内側を旋回する。そして、図に示すように大きく加速された場合には分級羽根の内側に衝突する。分級ロータ内側へ入った粒子が旋回したり羽根内側に衝突する現象は傾斜羽根に特有の現象といえる。

傾斜羽根を持つ分級ロータでは、Fig. 8で粒子が衝突している上側の壁の内側に粒子が付着する現象が観察されている。これは図に示すような現象が実際に起きているためと考えられる。

$\phi_0=0^\circ$ のときは、粘性力と遠心力が一直線上でつり合うとした静的な平衡関係式(4)によってもある程度分級点を予測できることが、Fig. 3の破線と一点鎖線との比較から分かる。しかし、傾斜羽根では流れが半径方向から傾いているため粘性力と遠心力は同一一直線上にない。したがって、上側の壁面上以外に分級室内でその合力が釣り合うことはない。別な見方をすると、上側壁面では粒子を壁に押し付ける力が作用する。分級径付近の粒子では、壁面に沿う力がほとんどないので、粒子が上側の壁面へ付着しやすくなると考えられる。

第2報で、半径方向羽根($\phi_0=0^\circ$)を有する分級ロータでは、粒子が分級室の外側でいつまでも浮遊する現象について報告した。これは分級径付近の粒子が壁面との衝突によって外側へ一度出た後、粒径が十分に大きくないために粘性力に打ち勝って外側にも出ることができず、分級室に再度入っても羽根との衝突によって分級室内側へはじき出されてしまい、微粉として内側にも入れず、分級室の外側を旋回する現象である。この現象は傾斜羽根分級ロータにおいて計算された粒子の軌跡に対してもみられる。

3. 実験

Fig. 9は実験値と計算値との比較を示したものである。実験には日清エンジニアリング(株)製ターボクラシファイアTC-15Nを用いた。半径方向羽根を有する分級ロータ($\phi_0=0^\circ$)の回転数域は1500~3500 rpm、風量は1.2~2.3 m³/min、また、傾斜羽根を有する分級ロータ($\phi_0=30^\circ$)の回転数域は5000~9000 rpm、風量は1.1~2.1 m³/minである。両ロータともに常用されている回転域である。羽根枚数は半径方向羽根が60枚、傾斜羽根が50枚である。供試粉体として重質炭酸

カルシウム、普通セメント、アルミナ、ガラス、フェライト、ポリエステル、トナー、でんぶんおよびシリカを用いて実験を行い、その結果をまとめて図示した。なお、粒度測定はマイクロトラック、コールターカウンタおよびセディグラフによって行った。したがって、これらの測定結果によっても実験結果はある程度ばらつきをもつことになる。

実験における平均半径方向流速 v_{ra} の値は、総風量 q を分級ロータの流路断面積で除して求めた。また、 $Q=v_{ra}/(r_{out}\omega)$ より無次元風量 Q を求めた。図から分かるように実験値と計算値はかなり良い一致を示している。実機では供給粒子の分散性などから分級精度は羽根数に依存しているが、計算では羽根数が30枚と60枚では分級径おび精度はほとんど同じであったので、30枚のときの結果をそのまま計算結果として用いている。 $\phi_0=0^\circ$ の分級ロータで計算値からの偏りが大きいのは、この範囲では粒径が大きく流体の粘性力が計算で仮定しているストークスの抵抗法則から外れていることも一つの原因と考えられる。

Table 1に実験より得られた風量 q および分級径 d_{p50} と、それらを無次元化した Q および ψ_{50} の対応の一

Fig. 9 Comparison between experimental and calculated results

Table 1 Examples of experimental data(cut sizes versus air flow rates and their corresponding nondimensional quantities)

Attitude angle ϕ_0 (deg)	Air flow rate		50% cutsize		Rotor speed (rpm)
	q (N m ³ /min)	Q	d_{p50} (μm)	ψ_{50}	
0	1.6	0.71	25	1.0	2500
30	1.4	0.27	4	0.07	7000

注*) 尖った後縁をもつ2次元物体について、流れが後縁に接して離れるという条件。

例を示す。ただし、粒子の密度 $\rho_p = 2000 \text{ kg/m}^3$, $r_{out} = 86.5 \text{ mm}$ としている。表より、実際の風量、分級径の大きさがおおむね分かる。

計算においては第1報で述べたように多くの単純化を行っており、無視した要因による影響についても今後検討する必要があると考えられる。しかし、Fig. 9 からわかるように、実験値と計算値はかなり良い一致を示しており、解析で用いた系のモデル化は現実の状態を良く表現しているものと考えられる。

4. ま と め

本研究で得られた主な結論は次の通りである。

(1) 風量と分級径の関係 風量の減少に伴って分級径も減少する。しかし、風量がある値以下になると分級径はあまり減少しなくなる。これはコリオリ力に

よる流れ場の偏りに起因すると考えられる。半径方向羽根に比べ、傾斜羽根は風量が減少しても流れの偏りが生じにくいいため、分級径をより小さくできる。

(2) 羽根傾斜角と分級径の関係 傾斜角の大きい分級ロータの方が分級径が小さくなる。一方、分級精度は羽根の傾斜角度が小さいほど良い傾向にある。

(3) 粒子の軌跡 傾斜羽根では一度分級室内側に入った粒子が、内側の速い周方向流れによって加速され、分級室内側を旋回する現象が起こる。また、旋回する過程で遠心力のために再度内側から羽根に衝突し、微粉として分級されるものもある。これは粒子が傾斜羽根の内側に付着する原因の一つと考えられる。

(4) 解析の妥当性 本研究の解析結果は実験結果とかなり良い一致が得られ、解析の妥当性が確かめられた。

Nomenclature

d_p : particle diameter	[m]	v_{ra} : mean radial velocity of air	[m/s]
d_{p50} : 50 % cut size	[μm]	Γ_2 : circulation of air flow on flow inlet boundary	
$Q = v_{ra}/(r_{out} \omega)$	[-]		[-]
q : air flow rate	[m^3/min]	θ : blade interval	[deg]
r_{out} : outer radius of blade	[m]	θ_0 : initial angular position	[deg]
r_{ti} : capture radius(fine)	[m]	ϕ_0 : blade attitude angle	[deg]
r_{to} : capture radius(coarse)	[m]	μ : air viscosity	[Pa·s]
R_0 : initial radial position $(= (R_{in} + R_{out})/2)$	[-]	ρ : air density	[kg/m^3]
$R_{in} = r_{in}/r_{out} = 0.724$	[-]	ρ_p : true specific density	[kg/m^3]
$R_{out} \doteq r_{out}/r_{out} = 1$	[-]	ψ : inertial parameter $(= \rho_p d_p^2 \omega / (18 \mu))$	[-]
$R_{ti} = r_{ti}/r_{out}$	[-]	ψ_{50} : defined by equation (1)	[-]
$R_{to} = r_{to}/r_{out}$	[-]	ω : rotor angular speed	[rad/s]

References

- 1) Sato, Y., and Y. Yamada : *J. Soc. Powder Tech., Japan*, **24**, 693 (1987)
- 2) Sato, Y., T. Nagamine and Y. Yamada : *J. Soc. Powder Tech., Japan*, **25**, 443 (1988)