K 型 分 級 機 の 性 能

吉 江 建 一・菅 沼 彰
山 本 英 夫・青 木 隆 一

東京大学工学部 化学工学科[†]

著者らは、迅速分級原理に基づいた新しい型の風力分級機の性能を実験的に検討した結果、次のことがわかった。

- 1) ミクロンオーダーのカットサイズで、高分離精度 ($\lambda = D_{p75}/D_{p25} \leq 1.5$) を達成できる。
- 2) クリーンエアの一部を微粉側に吸引することにより粗粉側への微粉混入量が減少する。
- 3) 入口粉体供給濃度を 0.3 kg/m^3 程度まで高くとっても、カットサイズや分級精度にその影響は現れない。

緒 言

微粉体の風力分級を高精度で行うためには、分級ゾーンに粒子が入る前に、凝集粒子が一次粒子にまで分散されていること、および、分級装置内で再凝集が起きないようにすることが重要である。それは凝集粒子が含まれていると、これが粗粉として回収され、凝集粒子を構成している微粒子が粗粉側に混入するからである。著者らは、分級ゾーンでの粒子滞留時間を極度に短くして、再凝集の起こる前にすばやく分級を行う方法を「迅速分級原理」と名付けて、これに基づいた装置の開発を行ってきた¹⁾。既報^{2),4),6)}において、ヴァーチュアル・インパクトを応用した装置の性能を示した。本報では、さらにカットサイズを小さくすることと、分離精度の向上を目的として、新たに開発した装置について、その性能を実験的に検討した。その結果ミクロンオーダーのカットサイズで、既報の装置より高い分離精度を達成でき、かつ、入口粉体供給濃度を 0.3 kg/m^3 まで高くとっても分級精度やカットサイズを維持できることがわかった。

1. 装置の概要および実験方法

1・1 実験装置

Fig. 1 に実験装置断面図を示す。奥行きは 30 mm である。含塵気流は円弧状の固体壁に沿って曲げられ、ここで粒子に遠心力が働く。気流から受ける粘性抵抗に比べると大粒子ほど遠心力が大きくなるから、粒径に応じて分級が行われることになる。粒子が分級作用を受けている時間は、きわめて短く、ミリ秒のオーダーであ

り、迅速分級原理を満たしている。気流は装置形状によっては、また、流量条件によっては、円弧壁から剥離するため、精度の良い分級が望めなくなる*。本報で用いた装置の形状は、模型を用いて流れ場の可視化を行い、剥離のないものを探索していった結果、決定したものである²⁾。Fig. 2 に、入口流速 $u_0 = 40 \text{ m/s}$ 後述するパラメータ $\alpha = 0.5$ に相当する流れを可視化した写真を示す。白く写っている部分が入口気流に相当し、これが円弧壁に沿って剥離を起さず流れていることがわかる。

Fig. 3 に実験装置のフローチャートを示す。分散器として、市販のサンドブラスター（厚地鉄工 TB-1 型）を 5 気圧 (G) において 105 Nl/min で運転して用いた^{2),3)}。また、クリーンエアの線速度 u_{cl} を入口含塵気流速度 u_0 と等しくとった。分級された粉体はそれぞれ胴径 10 cm のサイクロンでほぼ完全に捕集し、秤量後、沈降天秤（島津 SA-2 型）によって粒径分布を測定した。用いた粉体はタルクで、真密度 $\rho_p = 2.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、中位径は $9.5 \mu\text{m}$ 。空気透過法による比表面積は、 $1.47 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{kg}$ である。

1・2 実験条件

すべての実験は、入口クリーンエア速度 u_{cl} と入口含塵気流速度 u_0 とを等しくして行った。 u_0 の範囲は 30 m/s から 85 m/s である。また、 u_0 を固定した状態で微粉側流量 Q_f および、粗粉側流量 Q_c の流量バランスを変化させて、その影響を調べた。これは Eq. (1) で定義したパラメータ α によって整理を行った。

$$\alpha = \frac{Q_f - Q_c}{Q_f} = \frac{Q_{cl} - Q_c}{Q_f} \quad (1)$$

α は微粉側にとりこむクリーンエアの流量の割合を表すパラメータである。本報では $0 \leq \alpha \leq 0.5$ の間で変化させてその影響を調べた。 α を大きくすると以下に示す理由により、粗粉側に混入する微粉量が減少すると期待さ

[†] 〒113 文京区本郷 7-3-1

* 剥離流が存在すると、主流に振動が生じたり、剥離渦内に粒子を巻きこんだりして、分離精度が悪くなるものと思われる。

Fig. 1 Schematic view of the classifier

Fig. 2 Photograph of flow pattern in K-type classifier by flow visualization

れる。\$\alpha=0\$ の場合 (Fig. 4(a)), 気流導入口の壁 \$A\$ のごく近傍を通ってきた粒子は、非常に小さくても、有限の粒子径を持つ限り、遠心力を受けて粗粉側に回収される。つまり粗粉側に微粉が混入することになる。この場合、部分分級効率曲線は Fig. 4(a') に示すように、\$D_p\$ が 0 にならない限り \$\eta=0\$ とならない形になると予想される。しかし、\$\alpha>0\$ にすると (Fig. 4 (b)) 壁 \$A\$ のごく近傍を通ってきた粒子でも、ある \$D_{p1}\$ より大きい

* \$\alpha\$ を変化させるとフローパターンが変わり、カットサイズは変化すると予想される。

Fig. 3 Schematic view of experimental system

粒径を持たない限り、粗粉側に回収されなくなる。このとき、Fig. 4 (b') のように、\$D_{p1}\$ で部分分級効率 \$\eta=0\$ となり、微粉の粗粉側混入が減少し、鋭い分級が望める*。また、入口粉体供給濃度 \$M\$ の影響は 40 m/s, \$\alpha=0.5\$ の条件で \$0.036 \text{ kg/m}^3 \sim 0.31 \text{ kg/m}^3\$ の範囲で調べた。その他の流量条件においては、\$M\$ を \$0.03 \text{ kg/m}^3 \sim 0.06 \text{ kg/m}^3\$ の範囲で実験を行った。

2. 実験結果および考察

Fig. 5 に \$\alpha=0.5\$, \$u_0=85 \text{ m/s}\$ で分級を行った結果得られた、粗粉側、微粉側それぞれの回収粉と、原料粉体の積算粒径分布を示す。図中 (●) の key は、原料粉体を直接、沈降天秤法で測定したもの (\$R_{w0}\$) である。また、(△) の key は、Eq. (2) で算出したもの (\$R_{w0}^*\$) である。

$$R_{w0}^* = R_{wc} \times R_c + R_{wf} \times (1 - R_c) \quad (2)$$

ここで \$R_{wc}\$, \$R_{wf}\$ は、それぞれ、粗粉側、微粉側回収粉の積算粒径分布であり、\$R_c\$ は粗粉側回収率であり、Fig. 5 に示した結果の実験条件では 0.59 であった。\$R_{w0}^*\$ は \$R_{w0}\$ とよく一致しており、サイクロンでの回収は、ほぼ完全であると考えられる。部分分級効率 \$\eta\$ は、\$R_{wc}\$ および \$R_{wf}\$ をそれぞれ図微分して、\$\partial R_{wc} / \partial D_p\$, \$\partial R_{wf} / \partial D_p\$ を求めて、Eq. (3) の定義式に従って計算した。

$$\eta = \left[\frac{\partial R_{wc}}{\partial D_p} \times R_c \left/ \left\{ \frac{\partial R_{wc}}{\partial D_p} \times R_c + \frac{\partial R_{wf}}{\partial D_p} \times (1 - R_c) \right\} \right. \right] \times 100 \quad (3)$$

Fig. 6 に \$\alpha=0.5\$ で \$u_0\$ を変化させた場合の部分分級効率曲線を示す。流速 \$u_0\$ が増すにつれカットサイズは

Fig. 4 a), a'): Schematic view of the classifier and its partial classification efficiency at $\alpha=0$

Fig. 4 b), b'): Method to improve the recovery of fine particles and its predicting partial classification efficiency at $\alpha>0$

小さくなっていることがわかる。また、分離精度もほぼ維持されていることがわかる。分級の鋭さは、Eq. (4)で示すパラメータ χ によって比較を行った。

$$\chi = D_{p75}/D_{p25} \quad (4)$$

Fig. 7 は、Fig. 6 の各点を各条件におけるカットサイズ D_{p50} で規格化した図である。5つの条件での実験点はほぼ一つの線に重なっていることがわかる。Fig. 7中の点線は、既報⁶⁾の装置の性能のうち最も分離精度の良いものの実験点である。点線から $\chi=2.0$ と読みとれるのに対し、本報の装置の性能は $\chi=1.5$ 前後となって

Fig. 5 Cumulative particle diameter distribution of feed powder, fine side product and of coarse side product

Fig. 6 Effect of u_0 on partial classification efficiency at $\alpha=0.5$

Fig. 7 Normalized partial classification efficiency at $\alpha=0.5$

Fig. 8 Effect of α on partial classification efficiency at $u_0 = 30$ m/s

Fig. 10 Effect of α on partial classification efficiency at $u_0 = 50$ m/s

Fig. 9 Effect of α on partial classification efficiency at $u_0 = 40$ m/s

いて、分離が著しく鋭く行われていることがわかる。Figs. 8~10 は、 u_0 を 30 m/s, 40 m/s, 50 m/s で α を変化した時の部分分級効率曲線である。いずれの風速でも α を大きくとっていくと粗粉側に混入する微粉量が減少して分離精度が良くなっていることがわかる。例えば、40 m/s においては、 $\alpha=0$ で $\lambda=2.3$ であるのに対し、 $\alpha=0.5$ では $\lambda=1.4$ となっている。 $\alpha=0$ の場合は、Fig. 4 (a') に、また、 $\alpha=0.5$ の場合は Fig. 4 (b') にそれぞれ、ほぼ類似した部分分級効率曲線となっている。^{*}

Fig. 11 は流速 u_0 とカットサイズ D_{p50} の関係をそれぞれの α について整理した図である。流速 u_0 を上げていくと、いずれの α においてもカットサイズが減少していることがわかる。また、流速が増加するにつれ、

Fig. 11 Relation between inlet air flow velocity u_0 and cut size D_{p50}

その傾きは徐々に緩くなっているように見える。この傾向は次にあげる二つの説明で解釈できるとと思われる。流速をあげていくと、粒子に働く遠心力が大きくなり、粒子が流れからはずれていく速度が増す。つまり粒子流体間の相対速度が大きくなり、粒子に働く抵抗はやがてストークス域からはずれて、より大きくなる。そのため流速をあげていっても、 D_{p50} があまり小さくならないものと思われる。これが一つの理由である。いま一つは、粒子を流れからはずれる方向に加速するのに要する時間の問題である。流速が大きくなると、粒子の慣性パラメータが大きくなって加速しにくくなる。一方では分級ゾーン内粒子滞留時間が流速に逆比例して短くなるので、大流速の領域では、加速区間の影響が無視できなくなるとと思われる。上記の両者とも定性的な説明でしかないが、前者については、その理解を助けるため、モデル的な分級機を考えて、それについて考察した。これは Appendix に示したので参照されたい。

^{*} 但し実験結果では、 $\alpha>0$ の場合粒径の小さいところで完全に $\eta=0$ とはなっていない。これは気流の乱れの効果によると考えられる。

これらのことから、実用を考えた場合に、K型分級機においてカットサイズを変化させるためには、何を変化させれば良いかについて考察を行った。まず、 α を固定して u_0 を変化させれば、分離精度を保ったまま、カットサイズを変化させる (Fig. 6, Fig. 11 参照) ことがわかる。しかし、 u_0 が大きい範囲では、 u_0 を変化させることだけでカットサイズを調節することは困難となる。また、 α を変化させれば、確かにカットサイズは大きく変わるが、この場合は分離精度に影響が及ぶことを考慮しなければならない。したがってカットサイズを変化させるには、上記以外の方法も必要となる。例えば、微粉回収口の幅を可変できるようにして、分離するために必要なだけ粒子を気流線から移動させる距離 (例えば、Fig. 4 (b) 中に示した H) を変化させることなどが考えられる。しかしこれについては推測の域を脱していない。

次に入口粉体供給濃度 M が、分離精度、カットサイズに及ぼす影響について述べる。Fig. 12 には、入口流速 u_0 が 40 m/s、 $\alpha=0.5$ で M を 0.036 kg/m³ から 0.31 kg/m³ まで変化させた場合の部分分級効率曲線を示したものである。図より、カットサイズ、分離精度ともこの濃度範囲では変化していないことがわかる。したがって少なくとも、0.3 kg/m³ の濃度域までは迅速分級原理が満たされていて、分級機内での粒子の再凝集の影響が現れていないと言える。

結 言

迅速分級原理に基づいた新型の風力分級機を作成し、その性能を調べたところ、次のことがわかった。

1) ミクロンオーダーのカットサイズで分離精度 $\lambda = D_{p75}/D_{p25}$ を 1.5 程度に保つことができる。

2) クリーンエアの微粉側への取りこみ割合 α を増すと微粉の粗粉側への混入が減少する。

3) 入口粉体供給濃度を 0.3 kg/m³ まで高めても、カットサイズや分離精度を維持したまま分級を行える。

したがって、本報の風力分級機の工業的な実用価値は高く極めて有望であることが明らかとなったと言える。

Appendix

モデル分級機におけるカットサイズと入口気流速の関係

次の仮定を満たすモデル分級機を考えた。

仮定 (1) 気流は円弧状で、円周方向の気流速 u_θ 及び粒子速度 V_θ を

$$u_\theta = V_\theta = u_0 = \text{一定} \quad (\text{A-1})$$

とする

(2) 粒子は半径方向に定常沈降する。

粒子の運動方程式は次式で与えられる。

Fig. 12 Effect of particle concentration on partial classification efficiency

$$m \frac{dV_r}{dt} = -\frac{1}{8} \pi \rho_f C_D D_p^2 V_r^2 + m \frac{u_\theta^2}{r} \quad (\text{A-2})$$

r は粒子の平均的な回転半径として、一定であるとする。定常沈降であるから、左辺は 0 である。

a) ストークス域では、 D_{p50} の粒子について次式が成立

$$C_D = 24/Re_p = 24\mu/(\rho_f D_{p50} V_r) \quad (\text{A-3})$$

を Eq. (A-2) に代入すると、Eq. (A-4) が得られる。

$$V_r = \frac{\rho_p D_{p50}^2}{18\mu} \cdot \frac{u_\theta^2}{r} \quad (\text{A-4})$$

カットサイズは分級ゾーンでの滞留時間 τ の間に H だけ沈降する粒径である。粒子は気流ののってちょうど 90° だけまわりこんだとき、分級されるとすると

$$\tau = \frac{\pi}{2} \cdot r/u_\theta \quad (\text{A-5})$$

$$H = V_r \tau = \frac{\rho_p D_{p50}^2}{18\mu} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot u_\theta = \text{const.} \quad (\text{A-6})$$

$$\therefore D_{p50}^2 u_\theta = \text{const.} \quad (\text{A-7})$$

$$\therefore D_{p50} \propto u_\theta^{-1/2} \quad (\text{A-8})$$

b) アレン域では

$$C_D = 10/\sqrt{Re_p} \quad (\text{A-9})$$

を Eq. (A-2) に代入して解くと、Eq. (A-10) が得られる。

$$V_r = \left(\frac{2}{15}\right)^{2/3} \rho_p^{2/3} \rho_f^{-1/3} \mu^{-1/3} D_p u_\theta^{4/3} r^{-2/3} \quad (\text{A-10})$$

$$H = V_r \tau = K_1 D_{p50} u_\theta^{1/3} = \text{const.} \quad (\text{A-11})$$

$$\left(\text{但し } K_1 = \left(\frac{2}{15}\right)^{2/3} \cdot \frac{\pi}{2} \rho_p^{2/3} \cdot \rho_f^{-1/3} \mu^{-1/3} r^{1/3} \right)$$

$$\therefore D_{p50} \propto u_\theta^{-1/3} \quad (\text{A-12})$$

c) ニュートン域では

$$C_D = 0.44 = \text{const.} \quad (\text{A-13})$$

を Eq. (A-2) に代入して解くと、Eq. (A-14) が得られる。

$$V_r = K_2 \cdot r^{-1/2} \cdot D_{p50}^{1/2} u_\theta \left(K_2 = \left(\frac{1.56}{3}\right)^{1/2} \left(\frac{\rho_p}{\rho_f}\right)^{1/2} \right) \quad (\text{A-14})$$

$$H = V_r \tau = \frac{\pi}{2} K_2 R^{1/2} D_{p50}^{1/2} = \text{const.} \quad (\text{A-15})$$

$$\therefore D_{p50} \propto u_0^0 \quad (\text{A-16})$$

a)~c) をまとめる

$$D_{p50} \propto u_0^{-1/2+k} \quad \left(0 \leq k \leq \frac{1}{2}\right) \quad (\text{A-17})$$

但し k はストークス域で 0, アレン域で 1/6, ニュートン域で 1/2 となる. Eq. (A-5) と $H=V_r\tau$ の関係から

$$V_r \propto u_0 \quad (\text{A-18})$$

$$\therefore Re_p = \frac{\rho_f D_{p50} V_r}{\mu} \propto u_0^{1/2+k} \quad \left(0 \leq k \leq \frac{1}{2}\right) \quad (\text{A-19})$$

となる. Eq. (A-19) は u_0 が増加すると D_{p50} の粒子のまわりのレイノルズ数は必ず大きくなることを示している. すなわち, u_0 がある程度以上大きくなると, D_{p50} の粒子にかかる抵抗はストークス域からずれて大きくなることを意味する. 従って, Eq. (A-17) から, u_0 が大きくなるときの D_{p50} の減少の仕方が, ストークス域におけるよりもゆるくなることがわかる. K型において, $u_0=85$ m/s, $\alpha=0.5$ の条件で, $D_{p50}(=8 \mu\text{m})$ の粒子の流体に対する相対速度 V_r を概算してみる. 粒子が入口ダクト中央から出発して, ちょうど分離されるには, およそ 7 mm 流れからはずれ必要がある. 又, 粒子の分級ゾーンにおける滞留時間は, 約 0.35×10^{-3} sec 程度である. 従って, V_r は約 20 m/sec となり, 粒子基準レイノルズ数は,

$$Re_p = \frac{\rho_f D_{p50} V_r}{\mu} \approx 12$$

となっていて, 確かにストークス域からずれていることがわかる. なお, ここでは Fig. 11 の傾向を定性的に説明する手段として, モデル分級機を考え, 思いきって簡略化した計算を示したにすぎない. 従って流れ場が実際とはかなり異なっている上, 加速区間を考慮していないことなどのため, カットサイズを推算しても, 実験値とは一致しない.

【謝 辞】 昭和 56 年度卒業論文において, 野村誠氏に予備実験を担当していただいた. ここに付記して謝意を表する.

Nomenclature

C_D	= drag coefficient	[—]
D_p	= particle diameter	[μm]
D_{p25}	= particle diameter at $\eta=0.25$	[μm]
D_{p50}	= particle diameter at $\eta=0.5$	[μm]
D_{p75}	= particle diameter at $\eta=0.75$	[μm]
g	= gravitational acceleration	[m/sec ²]
H	= centrifugal sedimentation distance	[m]
k	= constant in Eq. (A-17)	[—]
K_1	= constant in Eq. (A-11)	[—]
K_2	= constant in Eq. (A-14)	[—]
m	= mass of particle	[kg]
M	= particle concentration at inlet	[kg/m ³]

Q_c	= outlet air flow rate of coarse side	[m ³ /min]
Q_{c1}	= flow rate of clean air	[m ³ /min]
Q_f	= outlet air flow rate of fine side	[m ³ /min]
Q_0	= inlet air flow rate of particle laden air	[m ³ /min]

r = mean radius of curvature of the particle trajectory [m]

R = radius of curvature of the wall of classifier [m]

R_c = recovery of coarse particles [—]

R_{w0}, R_{w0}^* = cumulative diameter distribution of feed particles and that calculated by Eq. (2) [%]

R_{wf}, R_{wc} = cumulative diameter distribution of particles classified into fine side and coarse side, respectively [%]

Re_p = particle Reynolds number [—]

u_0 = linear velocity of particle laden air through the inlet duct [m/s]

u_{c1} = linear velocity of clean air [m/s]

u_r = radial velocity component of air flow [m/s]

u_θ = circumferential velocity component of air flow [m/s]

V_r = radial velocity component of particle [m/s]

α = parameter defined by Eq. (1) [—]

η = partial classification efficiency [%]

μ = viscosity of air [kg·m⁻¹·sec⁻¹]

ρ_f = density of air [kg/m³]

ρ_p = density of particle [kg/m³]

τ = residence time of particles in classification zone [sec]

χ = sharpness of classification defined by Eq. (4) [—]

Literature cited

- 1) Suganuma, A., H. Yamamoto, K. Yoshie, and R. Aoki: Proceedings of Intern. Sympo. on Powder Techn. '81 (Kyoto) p. 742, (1981)
- 2) Yamamoto, H. and A. Suganuma: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 8, 753 (1982)
- 3) Yamamoto, H. and A. Suganuma: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 9, 183 (1983)
- 4) Yamamoto, H. and A. Suganuma: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 9, 346 (1983)
- 5) Yoshie, K., A. Suganuma, H. Yamamoto and R. Aoki: *J. Soc. of Powder Tech., Japan*, 19, 699 (1982)
- 6) Yoshie, K., H. Yamamoto, A. Suganuma and R. Aoki: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 9, 530 (1983)

(1983 年 6 月 1 日受理; 化学工学協会第 16 回秋季大会 (豊田, 1982 年 10 月), 同第 48 年会 (京都, 1983 年 4 月) にて一部発表)

Performance of K-type Classifier

Ken-ichi Yoshie, Akira Suganuma,
Hideo Yamamoto and Ryuichi Aoki

Dept. of Chem. Eng., Univ. of Tokyo, Tokyo 113

Key Words: Particle Size Classification, Powder, Aerosol, Pneumatic Classifier, Particle Fluid Interaction

This paper describes the performance of a new pneumatic classifier based on the rapid classification principle. The following results were obtained.

- 1) This classifier had a micron order cut size and its sharpness of classification $\chi = D_{p75}/D_{p25}$ was about 1.5.
 - 2) By sucking a portion of clean air into the fine side, the recovery of fine particles was much improved.
 - 3) The cut size and sharpness of classification were not affected by feed concentration up to at least 0.3 kg/m³.
-