乾式分散機の性能評価

増田 弘 昭*, 後藤 邦 彰*

Performance Evaluation of Dry Dispersers

by

Hiroaki MASUDA[†] and Kuniaki GOTOH[†]

Several kinds of powders were dispersed into the air by use of mixer type and nozzle-jet type dry dispersers, and the size distributions of the dispersed aerosol particles were measured. In the data analysis, a newly defined dispersion efficiency was introduced in order to represent the dispersion state of aerosols. On the other hand, the adhesion characteristic value representing the inter-particle adhesive force was obtained through the particle-reentrainment test developed in our laboratory. The data treatment made it possible to quantitatively evaluate the disperser performance for different kinds of powders. It was found that the dispersion efficiency was well correlated with the adhesion characteristic value if the mass flow ratio between particles and air was kept constant. Therefore, the dispersion efficiency of an arbitrary powder can be estimated by the particle-reentrainment test.

Key Words : Dry Dispersion, Disperser Performance, Mixer Type Disperser, Nozzle-jet Type Disperser, Reentrainment Characteristics

1. 緒 言

乾式分級操作における分級効率の測定や集塵装置の性能試験など、気相中で分散、エアロゾル化した微粒子が必要となることが多い。このため、種々の分散法や分散機が考案され、その性能が検討されている¹⁻⁶⁾。

筆者らは、高速回転翼をもつ機械式分散機(気中攪はん型、ミキサー型とも呼ばれる)に関して分散性能に及ぼす操作条件の影響を検討し⁷⁾、内壁への微粒子の付着状態など微粒子分散における基本的特性を明らかにした。また、吐出粉塵の粒度分布を解析することにより、この分散機の分散機構の推定も行った⁸⁾。分散性能

の検討⁷⁾では試料粉体としてフライアッシュのみを用い、吐出粉塵の質量中位径に基づいて、操作条件に対する安定操作領域を求めた。吐出粉塵の分散状態を質量中位径で表しているため、ここで得られた安定操作領域は直接他の粉体に適用することができない。分散性能を、より一般的に表すためには質量中位径以外の評価法が必要である。また、安定操作領域は粉体の一次粒子径だけではなく、粉体の分散のしやすさ(分散性)にも依存するはずである。すなわち、フライアッシュよりも分散しやすい粉体に対する安定操作領域は広くなり、分散しにくい粉体では狭くなる。このことから、分散機の性能を表わすには粉体の分散性も含める必要がある。

そこで、本研究では数種の粉体を用いて分散実験を行い、その結果を粉体種によらない分散性能曲線として評価する方法を検討した。また、構造の異なる2種類の分散機の性能に関してもあわせて検討した。

1993年 3月 5日 受付

化学工学会第22回秋季大会(1989年10月、東京)にて一部発表

• 京都大学工学部化学工学教室(〒606-01 京都市左京区吉田本町)
TEL. 075-753-5565

[†] Dept. of Chem. Eng., Kyoto Univ.,
(Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-01)

2. 実験装置および方法

本実験で用いた分散機の断面構造図をFig. 1に示す。Fig. 1(a)は機械式分散機であり、インペラーとその駆動部、分散筒、分散筒上部に取り付けた供給管、および分散筒接線方向に取り付けた吐出管で構成される。分散筒内でインペラーを高速回転させることにより高速旋回気流が生じ、インペラー中心部は負圧になって供給管上部から周囲の空気が吸引される。吸引空気と共に粉体を供給すると、筒内部で旋回気流により分散され、粒子は吐出管よりエアロゾル状態で吐出される。この分散機では、インペラー回転数により空気吐出流量 Q_a が決定される。また、吐出エアロゾルの分散状態はインペラー回転数 n および粉体供給流量 Q_p により変化する⁷⁾。

Fig. 1(b)はノズル式分散機⁹⁾(日清エンジニアリング製、DN-153)であり、粉体供給口(二次エア吸入口)をもつ上部リングと、吐出口を持つ下部リングにより構成されている。上部リングと下部リングはねじ込み式となっており、両リングにより形成される環状の一次空気流路(リング状ノズル)にコンプレッサーから圧縮空気を導入して、高速気流を発生させる。この高速気流によって生じる負圧により、上部の粉体供給口から二次エアを吸引する。二次エアと共に粉体を供給すると、高速気流により分散されてエアロゾル化し、同図下方へ吐出される。一次空気流量と二次空気流量を合わせた吐出空気流量 Q_a は、一次空気圧およびノズル開度に依存する(ノズル開度は上部リングと下部リングのねじ込み量を変えることにより調節で

Fig. 2 Total air flow rate of nozzle-type disperser (Fig. 1-b)

きる)。ノズル開度および一次空気圧を変えて、吐出空気流量 Q_a を測定した結果をFig. 2に示す。当然ながら、 Q_a はノズル開度が広く、一次空気圧が高いほど多くなる。本実験ではコンプレッサーの容量(タンク60 l, ポンプ85 l/min)から連続的に安定して供給できる空気量を考慮し、一次空気圧300kPa(ゲージ圧)、ノズル開度0.75mmとした。このときの吐出空気流量は、機械式分散機のインペラー回転数 $n=800\text{rad/s}$ ($=7600\text{rpm}$)における値とほぼ等しくなる。

その他、主な実験条件をTable 1に示す。試料粉体には粒子径の異なる5種類の炭化珪素(SiC, 昭和電工製)を主として用い、その他、フライアッシュ(JIS Z8901 No.10)、タルク(JIS Z8901 No.9)および重質炭酸カルシウム(CaCO_3 , JIS K6223)の計8種類を用いた。粒子径の異なる5種類の炭化珪素は粒子径の小さい順にNo.1~No.5とする。分散剤(ヘキサメタリン酸ナトリウム)0.2wt%を含む水中で、ミキサーを用いて分散後、遠心沈降式粒度分布測定装置(島津製 SACP-2)を

Fig. 1 Schematic diagram of tested dispersers (unit, mm)

Table 1 Experimental conditions

Tested powders	SiC No.1, 2, 3, 4, 5 Fly ash (JIS Z8901 No.10) Talc (JIS Z8901 No.9) CaCO ₃ (JIS K6223)
Powder feed rate	Q_p 0.4, 0.5, 7.7, 10 (g/min)
Mixer type disperser	
Impeller rotational speed	n 800, 1050 (rad/s)
Nozzle-jet type disperser	
Nozzle opening	0.75 (mm)
Primary air pressure	300 (kPa)

Fig. 3 Tested powders

用いて各試料粉体の粒度分布を測定した結果を**Fig. 3**に示す。ここでは、この粒度分布を完全分散状態の粒度分布(一次粒子径分布)とした。また、分散後のエアロゾルの粒子径分布の測定には前報⁷⁾と同様、カスケード・インパクターを用いた。なお、分散実験装置は前報⁷⁾と同じものを用いたので、ここでは省略する。

3. 実験結果および考察

3.1 分散度の定義

先に述べたように分散状態を中位径で表すと、異なる粉体での分散状態を比較するときに問題となり、したがって、エアロゾルの状態だけでなく一次粒子の大きさも考慮する必要がある。供給粉体の一次粒子径を考慮するという点では、エアロゾルの中位径と一次粒子の中位径の比⁵⁾なども考えられるが、ここでは、一次粒子の粒度分布と分散機から吐出されたエアロゾルの粒度分布を比較し、分散状態をひとつの数値で表す評価法を考えた。すなわち、**Fig. 4**に示すように一次粒子の頻度分布 f_0 とエアロゾルの頻度分布 f_d が重なった部分、 $f_0 \cap f_d$ (図中斜線部)の面積を分散度 β と定義する。 $f_0 \cap f_d$ は吐出エアロゾル中に含まれる見かけ上分散している粒子の割合である。いま、一次粒子の頻度分布 f_0 とエアロゾル粒子の頻度分布 f_d の交点の粒径を D_p^* とすると、

Fig. 4 Definition of dispersion efficiency

$$\beta = \int_0^{D_p^*} f_d dD_p + \int_{D_p^*}^{\infty} f_0 dD_p \\ = 1 + F_d(D_p^*) - F_0(D_p^*) \quad (1)$$

よって、 D_p^* が求めれば積算粒度分布 F_0 , F_d から分散度 β が算出できる。エアロゾルが完全分散状態のときは、頻度分布 f_d は f_0 と重なり、分散度 $\beta=100\%$ である。交点 D_p^* を求めるために、遠心沈降式粒度分布測定機およびカスケード・インパクターから得られた積算粒度分布を、部分的に次式で表される多項式で近似し、その微分値から頻度を求めた。

$$F(D_p) = \sum_{i=0}^{n_u} K_i (\log D_p)^i \quad (2) \\ 3 \leq n_u \leq 5$$

分散実験結果から分散度 β を算出した一例を**Fig. 5**に示す。用いた分散機は機械式であり、試料粒子は炭化珪素(SiC)No.1と5である。分散後の質量中位径は一次粒子径の小さいNo.1の方が小さい。しかし、No.5の方がエアロゾルの粒子径分布は一次粒子径分布に近く、分散状態は良い。これらの実験結果を分散度 β で表すと、SiC No.1では $\beta=32.5\%$ 、No.5では $\beta=82\%$ となり、No.5の方が分散状態が良いことを定量的に表すことができる。

なお、エアロゾル中で完全分散している一次粒子量割合である真の分散度 β^* は、前報⁸⁾で導入した部分分散度 β_p を基に次式によって定義される。

Fig. 5 Cumulative undersize distribution for dispersed powders (β : dispersion efficiency)

$$\beta^* = \int_0^\infty \beta_p(D_p) f_0 dD_p \quad (3)$$

しかし、部分分散度 β_p を求めるにはカスケード・インパクトの各段に捕集された粒子の粒子径分布を解析する必要があるので測定と計算に時間がかかり、現在のところ実用的ではない。分散度 β は定義式(1)より、一部凝集粒子も含むので真の分散度 β^* 以上の値をとる。

3.2 粉体の分散性の評価

粉体の分散のしやすさは、粒子間付着力と気流から与えられる分散力に依存すると考えられる。粒子間付着力には、van der Waals力、液架橋力、静電気力などがある。それぞれ理論式が提案されているが、物性定数が含まれており、この定数はすべての物質に対して求められてはいない。そこで、分散にかかわる粒子間付着力を実験的に求める方法を考える。付着力測定装置としては引張り破断試験機、せん断試験機などがあるが、機械的に単一方向の力をかけることから乾式分散で粒子が気流から受ける力とは異なると考えられる。ここでは、凝集粒子が気流によって崩壊する現象を定量化できる筆者らの粒子飛散実験装置¹⁰⁾を利用する。装置の概略をFig. 6に示す。テスト部は石英ガラス製の矩形断面(3×10mm²)の流路で、内部に粉体充填セルを設置できる。セルには深さ3mm、幅7mm、長さ20mmの溝が彫っており、そこに試料粉体を充填して、飛散させる。流路には乾燥空気を流し、流路内断面平均流速を1分間に1m/sずつ増加させた。断面平均流速がある値を越えると、粉体層から(凝集)粒子が飛散し始める。飛散状態は、テスト部上部からの顕微鏡による観察と、下流に設けた接触帯電を利用した検出器で確認した。飛散実験結果の一例をFig. 7に示す。横軸は、粉体層を充填したときの平均充填率 ϕ で、充填した粉体の重量、真密度および充填溝の体積より算出した。縦軸は、飛散開始時の壁面せん断応力 τ_c で、矩形流路の相当直径を代表長さとした Re 数から次式を用いて計算した。

Fig. 6 Apparatus for particle reentrainment test

Fig. 7 Critical shear stress obtained by reentrainment tests

$$\tau_c = C_f \frac{\rho_a u^2}{2} \quad (3)$$

$$C_f = 16 / Re \quad (Re < 2300)$$

$$C_f = 0.0791 Re^{-1/4} \quad (Re \geq 2300)$$

実験結果は粉体種毎にほぼ一本の曲線で表すことができる。飛散開始時の壁面せん断応力 τ_c は充填率 ϕ が大きくなるに従い大きくなる。図に示した炭化珪素No. 3とNo.5を比較すると、No.3の方が飛散開始せん断応力はどの充填率でも大きく、飛散しにくいことがわかる。また、試料粉体の違いによる飛散開始せん断応力の差は充填率が高いほど顕著になる。フライアッシュ(JIS Z8901 No.10)ではこの気流せん断応力 τ_c と粉体引張破断強度 σ との間に次式が成立している⁹⁾。

$$\tau_c = k \sigma \quad (4)$$

ここで、 k は比例定数で、フライアッシュでは0.38である。引張破断強度 σ は、Rumpf¹¹⁾により次のように表されている。

$$\sigma = \frac{\phi k_n F}{\pi D_p^2} \quad (5)$$

上式中の k_n は粒子の配位数であり充填率 ϕ に依存する。配位数 k_n の推定にはRidgway-Tarbackの実験式¹²⁾を書き換えた次式を用いる。

$$k_n = 13.8 - \sqrt{175 - 232 \phi} \quad (6)$$

Eq.(5)の F は粒子間付着力、 D_p は粒子径であり、両者とも試料粉体に依存する。いま、Eq.(5)をEq.(4)に代入し、まとめると次式が得られる。

$$\frac{k F}{\pi D_p^2} = \frac{\tau_c}{\phi k_n} \quad (\equiv F_p) \quad (7)$$

上式の右辺は飛散実験のみから決まりこれを F_p と定義する。一方、左辺は見かけ上飛散実験の条件である充填率には依存しない。飛散実験の結果得られたせん断応力 τ_c を実験条件である充填率 ϕ と、Eq.(6)を用いて

Fig. 8 Characteristic value of reentrainment F_p as a function of packing fraction

計算した配位数 k_n で割って F_p を求め、Fig. 8 に示す。同図には、Fig. 7 に示した炭化珪素 No. 3, 5 および前報¹⁰⁾ の実験結果から算出したフライアッシュ 10 種の結果を示した。フライアッシュの F_p は、充填率によらずほぼ一定値を示す。これに対し、炭化珪素 No. 3 および No. 5 の F_p は共に充填率の増加に従い増加し、一定値に漸近する傾向を持つ。そのほかの試料粒子 (炭化珪素 No. 1, 2, 4, CaCO_3 , タルク) についても、充填率の増加に伴い一定値に漸近する傾向が見られた。なお、 F_p が充填率により変化するのは、粒子間の距離や接触面積が充填率によって変化し、したがって粒子間付着力 F が変化するためと考えられる。また、低充填率で粉体層の充填構造が一樣ではないことも一因であると思われる。

3.3 分散機の性能曲線

3.1 節において、異なる試料粉体を用いた分散実験の結果を比較するために分散度 β を定義した。また、乾式分散にかかわる粉体物性値として、3.2 節の結果より、 F_p の漸近値 F_p^0 を代表値 (付着特性値と呼ぶ) として用いる。Fig. 9 はこれらを用いて機械式分散機の性

Fig. 9 Relationship between dispersion efficiency β and characteristic value of inter-particle adhesion F_p^0

能を種々の粉体について比較した結果である。プロット点は、図が煩雑になることを避けるため、同一種の粉体は実験条件毎に同じ記号とした。図中にある5つの同一記号のプロット点 (例えば●) はそれぞれ粒径の異なる炭化珪素での実験結果を表し、図中右から炭化珪素 No. 1, 2, 3, 4, 5 の結果に対応する。

実験結果は、ばらつきはあるが、粉体供給流量 Q_p と分散機吐出空気質量流量 $\rho_a Q_a$ の比である混合比 m 毎にほぼ一本の曲線で表される。このことから、任意の粉体の分散状態は、飛散実験によって付着特性値 F_p^0 を測定し分散条件である混合比 m を決定することにより、予測できると考えられる。また、種々の混合比で実験を行い性能曲線を求めておけば、任意の粉体で完全分散に近い分散状態を得るための分散機操作条件を決定することもできる。なお、前報⁶⁾ で示したように、機械式分散機では吐出容積流量 Q_a は回転数 n に比例し、本実験に用いた分散機では次式で表される。

$$Q_a = 3.70 \times 10^{-6} n \quad (8)$$

次に、分散前に常温のエタノール雰囲気中で12時間保持した炭化珪素 No. 2 および重質炭酸カルシウムを用い、分散実験および飛散実験を行い分散度 β および付着特性値 F_p^0 を求めた。飛散実験の試料はセルに充填後、エタノール雰囲気中で保持した。この結果を Fig. 9 の混合比 $m=0.04$ の結果と比較した図が Fig. 10 である。図中では、エタノール処理をした粉体は△、エタノール処理する前の粉体を▲、処理していない Fig. 9 に示した結果は●で表した。また、処理前後の違いを分かりやすくするため、同じ試料粉体での処理前後の結果を→で結んだ。付着特性値 F_p^0 は処理を行った3種の粉体とも処理前と比べると低くなり、付着力が低下していることが分かる。また、分散度 β は処理前と比べると高くなり、分散状態が良くなることが分かる。しかし、エタノール処理による付着力の低下に対して分散度の向上は低く、プロット点は Fig. 9 で示した実

Fig. 10 Effect of powder treatment with ethanol vapor

験線と比較すると若干低くなり、異なる曲線となる。エタノール処理によって変化した接触電位差が処理後大気中に放置すると次第に処理前の値に戻る¹³⁾ことから、これは2つの実験における処理から操作までの時間経過の違いによると考えられる。すなわち、セルに充填後エタノール処理した飛散実験では、処理後直ちに実験を行うのでエタノール処理による効果が大きく、これに対し、処理後大気中で供給機のホッパーに充填する等、実験までに時間のかかる分散実験(約20分)では効果が小さかったためと考えられる。

Fig. 11は機械式分散機とノズル式分散機の性能を比較した結果であり、混合比 m を一定にしている。実験データはTable 1に示した種々の試料粉体を用いた結果であるが、分散機の性能を比較しやすくするため、機械式を○、ノズル式を△で表した。両分散機とも実験結果はほぼ同じ曲線で表され、したがって、混合比一定での分散性能に大差はないと言える。

4. 結 言

数種の粉体を用いて分散実験を行い、その結果を粉

Fig. 11 Comparison of disperser characteristics between mixer type and nozzle-jet type

体の種類によらない分散機の性能曲線として評価する方法を検討した。まず、異なる粉体の分散状態を表すために、分散度を新たに定義した。一方、粉体の分散性を表す特性値として、粉体層からの粒子飛散実験結果を基に粒子付着特性値に対して分散度をプロットすると、分散機操作条件である固気混合比毎に1本の曲線が得られた。したがって、任意の粉体について、その粉体の付着特性値を求めれば、分散状態を推定できる可能性がある。

Nomenclature

C_f : friction factor	(-)	k : constant in Eq.(4)	(-)
F : adhesive force	(N)	K_i : constant in Eq.(2)	(-)
F_0 : cumulative size distribution of primary particles (fully dispersed)	(-)	k_n : coordination number of particles	(-)
F_d : cumulative size distribution of dispersed powder	(-)	$m=Q_p/\rho_a Q_a$: mass flow ratio	(-)
F_p : characteristic value of reentrainment	(Pa)	n : impeller rotational speed	(rad/s)
F_p^0 : characteristic value of inter-particle adhesive force	(Pa)	Q_a : air flow rate	(m ³ /s)
f_0 : frequency of size distribution of primary particles (fully dispersed)	(m ⁻¹)	Q_p : powder mass flow rate	(kg/s)
f_d : frequency of size distribution of dispersed powder	(m ⁻¹)	Re : Reynolds number	(-)
		u : air velocity	(m/s)
		β : dispersion efficiency	(-)
		ρ_a : air density	(kg/m ³)
		τ_c : critical shear stress	(Pa)
		ϕ : packing fraction	(-)

References

- Masuda, H., S. Fushiro and K. Iinoya : *J. Res. Assoc. Powder Tech., Japan*, 14, 3 (1977)
- Tsubaki, J., K. Kato, Y. Nagahiro and G. Jimbo : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 9, 189 (1983)
- Yamamoto, H., A. Suganuma and T. Kunii : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 3, 12 (1977)
- Yamamoto, H., A. Suganuma and T. Kunii : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 6, 103 (1980)
- Yamamoto, H. and A. Suganuma : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 9, 183 (1983)
- Kousaka, Y., Y. Endo, T. Horiuchi and T. Niida : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 18, 233 (1992)
- Masuda, H., S. Kawaguchi and K. Gotoh : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 27, 515 (1990)
- Gotoh, K., M. Takahashi and H. Masuda : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 29, 11 (1992)
- Yamada, Y., M. Yasuguchi and K. Iinoya : *Powder Tech.*, 50, 275 (1987)
- Masuda, H., S. Matsusaka and S. Ikumi : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 11, 48 (1985)
- Rumpf, H. : *Chemie Ing. Techn.*, 42, 538 (1970)
- Ridgway, K. and K. J. Tarbuck : *Brit. Chem. Eng.*, 12, 384 (1967)
- Yoshida, H., T. Fukuzono and H. Masuda : *J. Soc. Powder Technol., Japan*, 28, 226 (1991)