気中攪拌型微粒子分散機の分散性能に対する 粉体供給流量およびインペラー回転数の影響

増田 弘 昭*, 川口 哲 司**, 後藤 邦 彰*

Effect of Powder Feed Rate and Rotational Speed of Impeller on the Performance of a Mixer-type Disperser

by

Hiroaki MASUDA[†] Satoshi KAWAGUCHI^{††} and Kuniaki GOTOH[†]

An experimental study of the performance of a mixer-type particle disperser was carried out with particular attention to the effect of the rotational speed of the impeller and powder feed rate. The operational ranges for obtaining fully dispersed aerosol flow were also investigated.

The aerosol flow discharged from the disperser was classified into three modes; homogeneous, degenerate, and slug-flow depending on the operational conditions. It was found that fully dispersed aerosol was obtained only when the flow was homogeneous. It was also found that the amount of particles deposited on the inside wall increased with decrease in the impeller's rotational speed and/or increase in the powder feed rate, and the mode of the deposition gradually changed from speckled to layered deposition through wavy deposition. The disperser should be operated under the speckled deposition-mode so as to obtain fully dispersed aerosol flow.

Key Words : Dispersion, Mixer-type Disperser, Fine Particle, Particle Deposition, Mass Median Diameter

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、気相中で十分よく分散された微粒子が必要になることが多い。しかし、微粒子を気流中で一次粒子にまで分散させることは困難であり、種々の分散法が検討されている。

たとえば、気流と粒子の相互作用を利用する方法がある。気流中に浮遊する凝集粒子は気流の速度勾配、

渦、急激な加速・減速などによって生じる種々の力を受ける。球形粒子(凝集粒子)に作用する力はBagsterら¹⁾によって解析され、粒子が流れの中に入る瞬間に粒子に作用する力が最大になることが示された。二つの球から成る凝集粒子に作用する力も検討されている^{2,3)}。これらの力を利用する分散機には、細管、オリフィス、エジェクター等があり、その実験的検討は筆者ら⁴⁾、吉田ら⁵⁾、山本ら⁶⁻⁸⁾によって報告されている。

凝集粒子を他の物体と衝突させる方法では、衝撃力によって分散・破壊される。衝突を利用する分散機にはターゲット、ワイヤーメッシュスクリーン、螺旋管等がある。これらについては、吉田ら⁵⁾、Fuchsら⁹⁾、Zahradnicekら¹⁰⁾が実験的な検討を行い、分散効果は高いが1次粒子を破壊する場合もあることを報告している。

筆者らは攪拌型(改良ミキサー型、機械式ともいわれる)、流動層型、細管型¹¹⁾の性能比較試験を行った。

平成2年1月8日受付

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

** (株)東ソー(〒746 新南陽市大学富田 4560)
TEL 0834-63-9902

† Dept. of Chem. Eng., Kyoto University, Yoshidahonmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606

†† TOSOH Co., Ltd. 4560, Tomita,
Shinnanyou, Yamaguchi 746

この3種類の分散機の中で、分散粒子の濃度をコントロールするには攪拌型が最も適しており、その他の分散機では流量が分散性能と独立には選べないという問題がある。現在、攪拌型分散機は各種粉体実験装置での粉塵発生装置として広く実用されている。ところが、完全分散の可能な操作領域や吐出流量など、分散機を有効に利用する上で必要とされる特性についてはほとんど分かっていない。

そこで本研究では、攪拌型分散機の分散性能に及ぼすインペラー回転数および粉体供給量の影響を実験的に検討した。また、完全分散状態が得られる分散機操作範囲についても考察を加えた。

2. 実験装置および方法

Fig.1 に実験装置の概略を示す。試料粉体（フライアッシュ、JIS 10種、比重 = 2.37、M.M.D. = $3.3\mu\text{m}$ ）は、微量供給用テーブル・フィーダーにより連続的に分散機に供給される。分散機からの吐出流は実験のスタートアップ時の分散状態および分散機内の粒子付着状態が定常になるまでの間はダクト2に吸引し、その後ダクト1に切り換えて吸引した。

分散した粒子の粒度分布は等速サンプリングにより、カスケード・インパクターに導いて測定した。このとき、サンプリング・プローブ内の付着粒子に対するデータの補正¹²⁾も行った。ダクト内の気体流量は粒子をバグフィルターで捕集後、オリフィス流量計により測定した。また、分散機インペラーの回転数は非接触式回転計によって測定した。

実験に用いた分散機の概略を **Fig.2** に示す。円筒形容器の底にセットしたパドル型インペラー(4)は可変速モーターによって回転させる。粉体は、容器の上部中央に取り付けた供給管(2)を通して周囲の空気とともに分散機内に吸引され、旋回剪断流、インペラー周囲の端から生じる渦、インペラーとの衝突などによって分散される。分散された粒子は固・気二相流となっ

Fig.1 Experimental apparatus

Fig.2 Tested mixer-type disperser

て吐出口(3)から接線方向に吐出される。

3. 実験結果および考察

3.1 分散機吐出流量

分散機からの吐出空気流量とインペラー回転数の関係を **Fig.3** に示す。流量 Q はインペラー回転数 n に正比例し、次式で表される；

$$Q = 3.70 \times 10^{-6} n \quad (1)$$

したがって、吐出口での平均空気流速 u_0 は 20°C 、 1atm として次式で与えられる。

$$u_0 = 1.95 \times 10^{-2} n \quad (2)$$

3.2 吐出口での粒子の流れの状態

吐出する粒子の流れの状態は、操作条件に依存する。実験で観察された流れの状態の模式図を **Fig.4** に示す。(a) は粒子が空気と完全に混合した状態の流れで、均一流れと呼ぶことにする。インペラー回転数を減少させるか、粉体供給流量を増加させるにしたがって、流れの状態は均一流れから、(b) に示すように粒子の一部が吐出管下部に沿って流れる下部堆積流れへと変化

Fig.3 Air flow rate discharged from the disperser as a function of impeller rotational speed

Fig. 4 Three modes of discharged suspension flow

する。さらにインペラー回転数を減少させるか、粉体供給流量を大きくすると、堆積流れの量が増加してスラグ流れの状態になる。

下部堆積流れ(b)やスラグ流れ(c)の状態では、粉体が完全分散していないのは明らかである。すなわち、完全分散状態のエアロゾルを得るためには、少なくとも、吐出流が均一流れの状態であることが必要である。

3.3 分散筒内の粒子の付着

インペラー回転数が大きく、粉体供給流量が小さい

とき、定常状態における分散筒内壁への粒子付着量は少ない。しかし、回転数の減少、あるいは粉体供給流量の増加につれて付着粒子量が増加し、内壁には付着粉体層が形成される。最初、斑点状に付着していた粒子は、付着量が増加すると、Fig.5-a)に示すようにインペラー回転方向に対して垂直な方向に波状の沈着層を形成する。さらにインペラー回転数が減少するか、粉体供給流量が増加すると、付着粉体層は分散筒内壁の全面に広がり(Fig.5-b)、厚みを持った層状の付着粉体層へと変化する(Fig.5-c)。さらにインペラー回転数を減少させるか、粉体供給流量を増加させると、分散機から吐出される粉体流量よりも供給流量の方が多くなり、分散筒の下部に多量の粉体が堆積する。このような粒子付着状態の変化は、模式的に Fig.6 の(1)~(5)の5段階に大別できる。内壁に多量の粒子が付着した状態では、付着粒子層から凝集粒子が再飛散

Fig. 5 Deposited particles on the inside wall

Fig. 6 Schematic diagram showing deposited particles on the inside wall of disperser vessel

Fig. 7 Experimental results showing boundaries of outlet flow modes and deposition modes

Table 1 Lowest rotational speed n_s for stable operation

Powder	Specific gravity [-]	M. M. D. [μm]	n_s [rad/s]
JIS Z8901			
No. 8 (Loam)	3.0	8.0	1350
No. 9 (Talc)	2.8	4.2	830
No. 10 (Fly ash)	2.37	3.3	1100
No. S-2 (CaCO_3)	2.71	2.0	> 1880

するため完全分散状態のエアロゾルを得ることはできない。

Fig. 7に筒内粒子付着状態と吐出流れの状態を表す領域図を示す。均一流れを得るためには、粉体供給流量は破線以下に設定しなければならない。この均一流れ域は斑点状均一付着域と波状付着域を含んでいる。このうち、波状付着域での分散状態は、凝集粒子を多く含むため、長時間の運転では不十分であることがわかった。したがって、安定した分散状態を得るためには、斑点状均一付着域で分散機を操作しなければならない。インペラーの最小必要回転数 n_s は斑点状均一付着域の境界を示す実線と横軸の交点から求められる。種々の粉体に対して同様の実験を行って求めたインペラー最小必要回転数 n_s を**Table 1**に示す。

3.4 分散した粒子の粒度分布

Fig. 8にインペラー回転数1570rad/s(=15000rpm)の条件で得られた分散粉体の粒度分布を示す。破線は液中分散後、顕微鏡法によって求めた完全分散状態での粒度分布を質量基準に変換したものである。粉体供給流量 W が $0.77 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ よりも小さいときには、

Fig. 8 Size distribution of dispersed particles (Fly ash, JIS No.10)

分散粉体の粒度分布は完全分散状態の粒度分布とほぼ一致する。しかし、粉体供給流量が増加すると粒度分布は粒径の大きい方にずれていく。

種々の条件で行った実験結果から質量中位径を求め、**Fig. 9**に示す。図中に垂直に立てた線分が各実験条件に対して得られた質量中位径の大きさを表す。粉体供給流量の減少、またはインペラー回転数の増加につれて質量中位径は小さくなる。一点鎖線は斑点状均一付着域の境界を、二点鎖線は波状付着域の境界をそれぞれ表す。図中の斜線部は、本実験において完全分散状態の得られた操作領域を表す。粉体供給流量が小さい場合には、斑点状均一付着域内で分散機を操作することは必ずしも必要ではなく、10分程度の短時間であればより低い回転数でも十分である。しかし、分散機を長時間使用する場合には、沈着粒子が凝集成長し、再飛散する危険性がある¹³⁾ので斑点状均一付着域の最小回転数 n_s 以上で操作する方が望ましい。

図中の実線は安定操作領域外において粉体濃度 c を一定値 0.4 kg/m^3 に保った場合の実験結果を表す。この場合、分散粒子の質量中位径が最小になる最適回

Fig. 9 Mass median diameters of dispersed particles as a function of rotational speed of impeller and powder feed rate (Fly ash, JIS No.10)

転数があることが分かる。

4. 結 言

パドル型のインペラーを持つ攪拌型分散機を試作し、微粒子に対する分散特性を実験的に検討した。得られた結果の主なものを以下に示す。

1) 分散機からの吐出空気流量は、インペラーの回転数に正比例する。

2) 吐出流れの状態は均一流れ、下部堆積流れ、スラグ流れに分けることができる。これらの流れの状態は、インペラー回転数と、粉体供給流量に依存する。

完全分散状態のエアロゾルを得るためには均一流れの状態で作動しなければならない。

3) 分散機内壁には粒子が付着し、付着量はインペラー回転数の減少または粉体供給流量の増加とともに多くなる。また、これに伴って付着の状態は、斑点状均一付着、波状付着、層状付着、分散機底部への粉体層形成へと変化する。

4) 分散粒子の質量中位径は、インペラー回転数が増加、または粉体供給流量が減少すると、完全分散粒子の質量中位径に漸近し、斑点状均一付着域内で操作すれば、ほぼ完全な分散状態が得られる。

Nomenclatures

c	: particle concentration	[kg/m ³]	n_s	: lowest impeller rotational speed for stable operation	[rad/s]
D	: inside diameter of disperser vessel	[m]	Q	: discharged air flow rate	[m ³ /s]
D_{p50}	: mass median diameter of dispersed powder	[m]	u_o	: mean air velocity in the outlet tube	[m/s]
d	: length of impeller	[m]	W	: powder mass flow rate	[kg/s]
n	: impeller rotational speed	[rad/s]			

References

- 1) Bagster, D. F. and D. Tomi : *Chem. Eng. Sci.*, **29**, 1773 (1974)
- 2) Kousaka, Y. et al. : *J. Chem. Eng. Japan*, **12**, 152 (1979)
- 3) Yuu, S. and T. Oda : *A. I. Ch. E. Journal*, **29**, 191 (1983)
- 4) Masuda, H., S. Fushiro and K. Iinoya : *J. Res. Assoc. Powder Tech. Japan*, **14**, 3 (1977)
- 5) Yoshida, T., Y. Kousaka and K. Okuyama : "Aerosol Science for Engineers" p. 159, Power Co., Ltd., Tokyo (1979)
- 6) Yamamoto, H., A. Suganuma and T. Kunii : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **3**, 12 (1977)
- 7) Yamamoto, H., A. Suganuma and T. Kunii : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **6**, 103 (1980)
- 8) Yamamoto, H. and A. Suganuma : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **9**, 183 (1983)
- 9) Fuchs, N. A. and F. L. Murashkevich : *Staub Reinhalt. Luft*, **30**, 1 (1977)
- 10) Zahradnicek, A. and F. Löffler : *Verfahrens Technik*, **11**, 229 (1977)
- 11) Iinoya, K. and H. Masuda : "Generation of Aerosols and Facilities for Exposure Experiments(ed. by K. Willeke)" Ann Arbor Sci., Mich. (1980)
- 12) Yeh, H. C. : *Bulletin of Math. Biology*, **36**, 105 (1974)
- 13) Ikumi, S., H. Wakayama and H. Masuda : *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **11**, 589 (1986)