

減圧法によるサブミクロン粒子の乾式分級

Pneumatic Classification of Sub-micron Particles under Low Pressure

山本 英夫*・町田 雅志**・菅 沼 彰***

Hideo YAMAMOTO, Masashi MACHIDA and Akira SUGANUMA

1. はじめに

近年、ニューセラミックス原料をはじめとする粉体材料のファイン化の中で、数ミクロンからサブミクロン領域での高度な分級技術の開発が切望されている。現在、使用されている工業用風力分級機のなかにはこの領域の分級が可能と思われる機種がいくつかある。しかし、その性能を十分発揮させるためには解決すべき課題が多々ある。

筆者らはかねてから、風力分級の前処理技術である微粉体の気相分散法¹⁾、再凝集対策としての迅速分級原理の開発²⁾とその実用化など、微粉体風力分級の研究を進めてきた。その一環として、VI (Virtual Impactor) 型およびK型分級機を試作しその性能を検討し、改良を重ねてきた³⁻⁶⁾。その結果、1~2ミクロンで精度の良い分級が可能になり、現在、サブミクロン分級の可能性を検討している。その一つの方法として減圧下での分級操作がある。50Torr程度の減圧下では、カニンガム効果によりサブミクロン粒子は常圧下に比べてはるかに動きやすくなり、慣性沈降速度が大きくなるので分級点が小さくなると期待される。また、気体の粘性係数は圧力に依存しないが密度は圧力に比例して小さくなるので、100m/s程度的高速気流の場であっても層流かそれに近い、乱れの少ない流れが実現でき、分級性能が向上すると期待される。そこでVI型およびK型分級器を50~70Torr前後の低圧力下で運転した場合どの程度の分級点・分級性能が得られるか実験的に検討した。

2. 理論的背景

Cunningham補正係数

粒子が流体中を運動している場合、粒子レイノルズ数が小さい ($Re_p \leq 1 \sim 2$) 領域で粒子が受ける抵抗力 F は

次式で表される。

$$F = 3\pi\mu Dp u \quad (1)$$

ここで、 μ は気体粘度、 Dp は粒子径、 u は粒子・流体間の相対速度である。

ところが粒子の大きさが流体の分子の平均自由行程と同程度以下になると、粒子・流体間に滑りが生じ実際に粒子が流体から受ける抵抗力は(1)式で表される値よりも小さくなる。カニンガムは理論的考察により粒子が実際に受ける抵抗力を補正項を導入して次式で表せることを示した。

$$F = 3\pi\mu Dp u / Cc \quad (2)$$

ここで、 $Cc (\geq 1)$ はカニンガムの補正係数と呼ばれ、カニンガムによる理論式があるが、現在では次式で表されるミリカンのデータによる経験式がよく用いられている。ただし、 $Kn (= 2\lambda/Dp)$ はKnudsen数である。

$$Cc = 1 + \{1.23 + 0.41 \times \exp(-0.88/Kn)\} \times Kn \quad (3)$$

20°Cの空気の平均自由行程 λ は近似的に次式で表される。ここで、 P は空気の圧力 [Torr] である。

$$\lambda_{air} = 49.6/P [\mu\text{m}] \quad (4)$$

(3)式、(4)式により計算した補正係数 Cc と粒径・圧力の関係をFig. 1に示した。図からわかるように、圧力が低くなるほどカニンガム効果は大きくなり、粒子は動きやすくなる。

慣性パラメータ

分級器の性能が次式で示される慣性パラメータで、整理できるとすると、減圧下における分級点は以下のように予測される。 ρ_p は粒子密度、 u_0 は気流速度、 D_i は装置代表長さである。

$$\psi = \frac{Cc \rho_p u_0 Dp^2}{18\mu D_i} \quad (5)$$

(5)式で表される慣性パラメータが等しい粒子同士は装置内で同じ挙動を示すので、圧力 P_1 (Torr) における Dp_1 の粒子の運動は P_2 (Torr) 圧力下では次式で示される粒径 Dp_2 の粒子と同等の挙動を示す。

*東京大学生産技術研究所 第4部

**榊出光石油化学 (元大学院学生)

***東京理科大学 理工学部

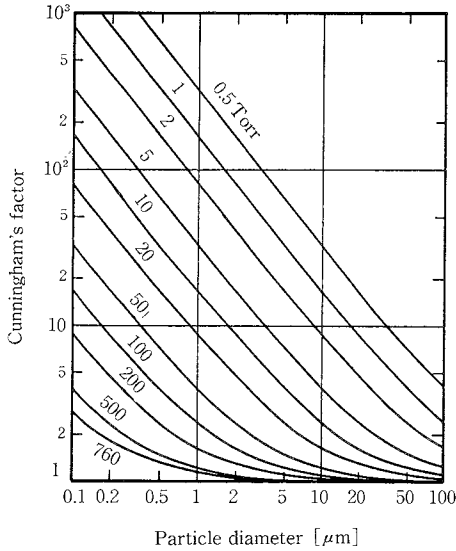


Fig. 1 カニングガムの補正係数

$$C_{C_1}^{1/2} D_{p_1} = C_{C_2}^{1/2} D_{p_2} \quad (6)$$

ただし、 C_{C_1} 、 C_{C_2} はそれぞれ P_1 における D_{p_1} 、 P_2 における D_{p_2} の粒子に対するカニングガムの補正係数である。この関係をFig. 2に示した。たとえば、50Torrにおける0.33ミクロンの粒子の挙動は常圧における1ミクロンの粒子と同等である。すなわち、常圧で1ミクロンの分級点を持つ分級器を50Torrで運転したら0.33ミクロンの分級点になると期待される。

3. 実験装置および方法

Fig. 3に試作したVI型とK型分級器の分級ゾーン付近の概略図を示した(詳しい構造および分級原理は文献4)、5)を参照されたい。分級ゾーンは減圧タンク等を用いて所定の圧力に設定した。前処理としての粒子の分散には1mmφのオリフィスを1段または2段用いた。分級後の粒子は粗粒側、微粒側とも0.2μmのメンブランフィルターで回収した。

試料粉体は試験用ダスト11種(JIS Z 8901) 関東ローム粉(中位径:2.0μm)とそれを分級して得た微粉(中位径:1.1μm)の2種類を用いた。粒度分布は沈降速度径を光透過式粒度測定装置SKA-5000(セイシン企業)を用いて測定し、部分分級効率を粗粒側回収率で表した。なお、入口における粒子濃度は15~25g/Nm³にした。

4. 実験結果および考察

Fig. 4にVI型分級機の場合の結果を示す。試料として関東ローム11種を用いた。○印は常圧(760Torr)で気流

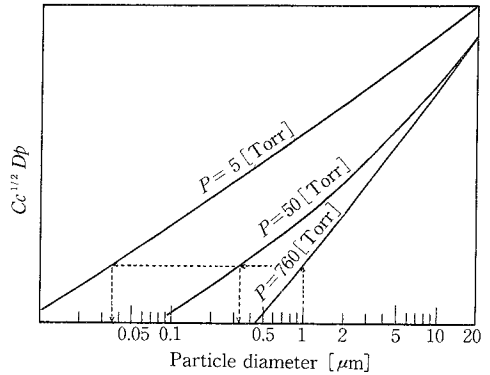


Fig. 2 減圧法によるカニングガム効果

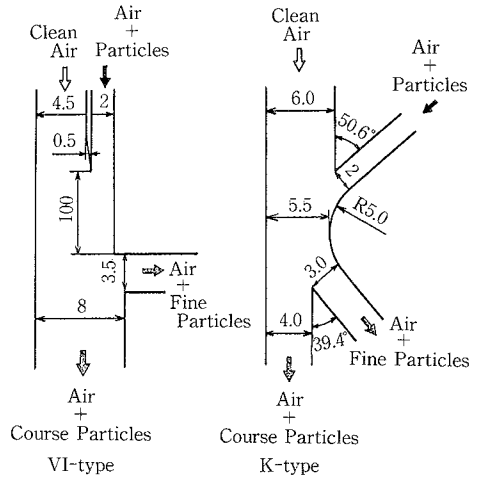
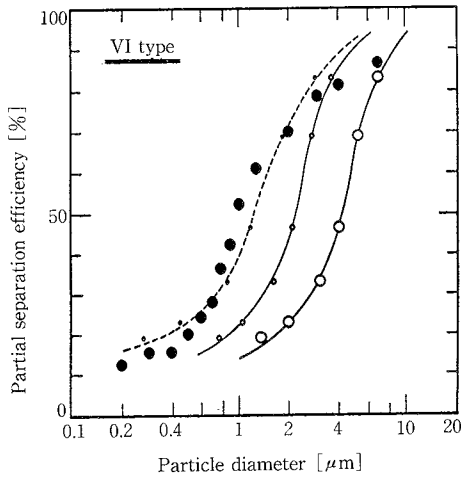


Fig. 3 分級ゾーンの概略

速度15m/sの条件下で実測した部分分級効率である。○印は上記実測値をもとに(5)式の慣性パラメータを介して推測した常圧で気流速度を53m/sにした場合の効率曲線である*。この条件で50%分離粒径(この報告ではこれを分級点と呼ぶことにする)は2.2μmと予測される。さらに、この曲線をもとに、VI型分級器を50Torrの減圧下で同じ気流速度(53m/s)で運転した場合の効率曲線をFig. 2から予測したものが点線の曲線である。すなわち、減圧(50Torr)することにより分級点は1.2μm程度になると期待される。●印は実際に50Torr、53m/sで運転して得られた効率曲線である。結果は予測曲線(点線)とほぼ一致しており分級点は1μmとなった。

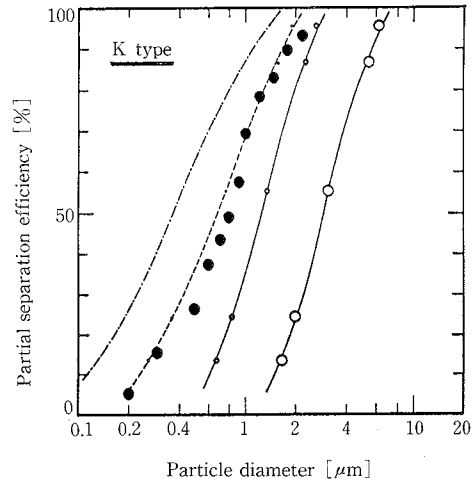
Fig. 5はK型分級器の結果である。減圧下での分級性能試験はFig. 3に示した寸法の分級器を試作して行った

*排気系の能力不足のため常圧で53m/sの流速が出せなかったのをやむをえずこのような比較法をとった。



- 760 Torr, 15m/s (result)
- 760 Torr, 53m/s (estimated)
- 50 Torr, 53m/s (estimated)
- 50 Torr, 53m/s (result)

Fig. 4 VI型分級器の部分分離効率曲線



- 760 Torr, 50m/s (result)
- 760 Torr, 98m/s (estimated)
- 70 Torr, 98m/s (estimated)
- 70 Torr, 98m/s (result)
- 30 Torr, 98m/s (estimated)

Fig. 5 K型分級器の部分分離効率曲線

が、装置系全体を減圧運転用に組み上げてあるためポンプの特性をはじめとした排気系の制約があり、この分級器を常圧で運転することが困難であった。そこで常圧下での分級実験は以前から使用していた寸法比が3倍の分級器を用いた⁵⁾。両者の性能の比較は装置形状が相似であることからVI型の場合と同様に慣性パラメータを介して行うことができる。図中の○印が常圧(760Torr)で気流速度が50m/sの場合に実測された部分分離効率である。このデータから減圧用K型分級器(Fig. 3)を常圧(760Torr), 98m/sで運転した場合を推測したのが○印の曲線であり、分級点は1.2 μm 程度である。これを70Torrの減圧下で運転すると分級特性は点線のようになり分級点は0.7 μm 前後になると期待される。実際にこの条件下(70Torr, 98m/s)で運転した結果が●印である。実験結果と予測値はよく一致しており、分級点は0.8 μm である。

今回は排気系の能力の問題でこれ以下の低圧力下での実験は出来なかったが、たとえば30Torr, 98m/sの条件下におけるこの寸法(Fig. 3)のK型分級器は図中の一点鎖線で示した性能となり分級点0.4 μm が期待される。

5. おわりに

以上、数ミクロンの分級点を持つ分級器を50Torr程度

の低圧下で運転するとカニングム効果によりサブミクロン分級が可能になることを実験的に確かめた。

K型分級器はFig. 5に示したように常圧でシャープな分級性能を有するが減圧下でもその性能を維持することができることが期待された。ただし、カニングム効果は粒径が小さいほど大きくなるので分級曲線はなだらかになる(分級精度が低下)のはやむをえない。しかし、K型分級器の特徴として、微粒回収側に吸引するクリーンエアの流量比を大きくすることにより分級精度を改善することができるので⁶⁾、分級精度を維持しながら分級点をサブミクロンにすることは可能である。現在、この点の検討を進めているところである。

(1987年12月7日受理)

参 考 文 献

- 1) Yamamoto, H. et. al: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 9, 183 (1983)
- 2) Yoshie, K. et. al: *ibid.* 9, 530 (1983)
- 3) Yamamoto, H. et. al: *ibid.* 8, 753 (1982)
- 4) Yamamoto, H. et. al: *ibid.* 9, 346 (1983)
- 5) Yoshie, K. et. al: *ibid.* 10, 323 (1984)
- 6) Yoshie, K. et. al: *J. Soc. of Powder Tech., Japan*, 19, 699 (1982)