Athy's.

$$V_* = 1 - V^* = \frac{V - V_\infty}{V_0 - V_\infty} = \int_0^\infty h(t) \exp(-tP) dt \quad \left(\int_0^\infty h(t) dt = 1 \right) \quad (\text{III})$$

After some considerations, it was pointed out that a constant k in Eq. (II) should be comprehended as an apparent stress barrier and a constant t in Eq. (III) as an apparent elastic compliance.

List of Figures and Tables

- Fig. 1** Weibull distributions as m , distribution parameter, changes from 0.5 to 10
- Fig. 2** $V^* - \log P$ curves when $f(k) = \text{Weibull distributions}$
- Fig. 3** $V^* - \log P$ curves from several compression equations
- Fig. 4** $h(t)$ determined by the use of an inverse Laplace transformation formulae
- Fig. 5** $h(t)$ determined by a graphic method for an inverse Laplace transformation

Fig. 6 Qualitative conception of a constant k

Table 1 V^* when $f(k) = \text{Weibull distribution function}$

Table 2 Relationship between original forms of several compression equations and reformed V^* ones

Table 3 Relationship between V_* and $h(t)$

Table 4 Laplace transform pairs used in this study

研究報告

スターテバント型エアセパレータの部分分離 効率曲線の検討*

Fractional Recovery Curves of Sturtevant-type Air Classifier

神保 元二**
Genji JIMBO

徐 胎洙**
Tae-Soo SUH

椿 淳一郎**
Jun-ichiro TSUBAKI

山崎 昌男**
Masao YAMAZAKI

1. 緒言

スターテバント型エアセパレータは、セメント工業において閉回路粉碎系の一構成要素として古くから用いられている分級機であるが、その分級特性および分級機構については充分に知られていない面が多い。スターテバント型エアセパレータにおいては、空気の流動機構が複雑であって、実際の分級部分は広い範囲にひろがり明確に指摘することができないことが一因であると考えら

れる。分級精度に関与する因子は、機内における気流の乱れ、粒子の拡散、粒子同志の衝突並びに粒子の付着・凝集など多くのものがあげられる。また、これらの分級精度に及ぼす影響を詳細に解析するためには、現在のところ部分分離効率曲線で表わす方法が広く利用されている。この曲線の数式化について、湿式分級では種々の方法が提案されているが、乾式分級では報告がきわめて少ないようである。乾式分級における数式化の一つの試みとして、Molerus ら¹⁾ による確率モデル、およびそれに基づく小沼²⁾ による修正モデルなどがある。

そこで、本研究においては、スターテバント型エアセパレータの分級機構の解明の一つのアプローチとして、

昭和56年11月13日受付

*粉体工学会春期研究発表会にて発表 (1980.5 大阪)

**名古屋大学工学部化学工学科 (〒464 名古屋市千種区不老町)

TEL 052-781-5111

- ① inside drum
- ② outside casing
- ③ main blades
- ④ control valve
- ⑤ auxiliary blades
- ⑥ distribution plate
- ⑦ air vane
- ⑧ inlet of feed
- ⑨ outlet of coarser products
- ⑩ outlet of fine products

Fig. 1 スターペバント型エアセパレータの概略

粒子運動が気流に影響しない供給量の少ない条件のもとで観察を行ない、また部分分離効率曲線を用いて Molerus らの式に基づいて分級結果の数式化を試みた。

2. 実験装置および実験方法

実験装置は小型のスターペバント型エアセパレータ（外径 0.4 m ϕ ）であり、その概略を Fig. 1 に示した。本体は内筒①外筒②からなっており、主翼③、補助翼⑤並びに分散板⑥はギアシャフトによって同軸回転をする。供給口⑧より投入された供給粉はギアシャフトに沿って分散板に至り、内筒内に切線方向に放出分散される。主翼の回転によって生じた循環気流は内筒内で旋回気流となり、分散された粉体を上方に運び、補助翼を通過する際粉体は補助翼によって遠心力を受け粗粉と微粉に分離され、遠心力の小さい微粉のみ主翼に吸い込まれ外筒に運ばれる。

操作条件として、セパレータの回転数と供給量を選定した。

Table 1 JIS 2種の標準粉体（ケイ砂、 $\bar{d}_p \approx 30 \mu\text{m}$ ）の粒度分布

μm	125	105	88	74	63	53	44	32	20	10
篩上積算率	0.2	0.6	1.6	4.3	9.4	14.9	22.0	43.9	58.8	76.2

分級に用いた試料は試験用ダスト 2 種（JIS Z 8901）で、その粒度分布を Table 1 に示した。粒度分布の測定は乾式フルイ、湿式フルイ、JIS 比重計およびマイクロ・トラックの 4 種の測定方法を使用し、その結果乾式フルイ以外においてはほぼ等しい測定結果が得られた。ここではすでに使用経験が長く、分級操作の評価に適している湿式フルイを用いた。フルイの目開きは 125—10 μm で、44 μm 以上は試験用フルイ（飯田製作所）、32 μm 以下ではマイクロ・シープ（粉体工業協会）を用いた。

本実験においては回転数を 750—1300 rpm の間で変えた。供給量の適用範囲は 60—400 g/min である。供給量について北浦³⁾ のデータから見てみれば、この型のエアセパレータの場合装置単位断面面積当りの処理量が約 7,000 g/min と推定される。このことから、本実験で用いた供給量は実操業範囲よりもかなり少なくなっている。

3. 実験結果と結果の整理

実験結果の代表例として、Fig. 2 に供給量を一定にして回転数をパラメータとした場合の部分分離効率曲線を示した。図に示されるように分級径 X_{50} は、回転数に対してすべて増加傾向が得られた。分級径にはいくつかの定義があるが、ここでは部分分離効率 $\eta = 0.5$ の粒子径 X_{50} と後述する補正分級径 X_c を用いた。

部分分離効率において、Molerus らは粒子運動を確率事象としてとらえ、微粉側への部分分離効率 $\phi(X)$ と

Fig. 2 部分分離効率曲線

Fig. 3 分級モデル

粒子径 X , 分級径 X_{50} および分級の鋭さを表わすパラメータ S の間の関係式として次式を導いた¹⁾。

$$1 - \Phi(X) = \frac{1}{1 + (X_{50}/X)^2 \exp[S\{1 - (X/X_{50})^2\}]} \quad \dots\dots(1)$$

ここで,
$$S = \frac{\bar{V}L}{2D_u} \quad \dots\dots(2)$$

ただし, $\bar{V}$ は平均流速, L は分級室の代表長さ, D_u は拡散係数である。部分分離効率曲線は真の分級作用を受けた部分と分級作用をまったく受けない部分, つまり分

Fig. 4 部分分離効率曲線の実測値と計算値の比較

Fig. 5 N と S および D_u の関係

割された部分に分けて評価されるものと考えることができる。小沼は, [Molerus らの考えにさらに分割の考えを入れより実際のモデルを提案している²⁾。しかし, 小沼の式では微粉側への分割率 α は考慮されていないが, 本実験からみると α は無視できない値を持つため, 従来の式によっては実験結果を表わすことができない。そこで, 分級機内における分級過程を今泉⁴⁾, 臼井⁵⁾ に従い分割率 α と β を考慮した場合の重量分配関係を Fig. 3 に示した。このとき, 微粉側部分分離効率 $\Phi'(X)$ は次式で表わされる。

$$\Phi'(X) = \frac{(1 - \alpha - \beta)(X_c/X)^2 \exp[S\{1 - (X/X_c)^2\}]}{1 + (X_c/X)^2 \exp[S\{1 - (X/X_c)^2\}]} + \alpha \quad \dots\dots(3)$$

これは, 小沼の式に対し微粉側への分割率 α の補正を加えた形となっている。(3)式の計算に必要な分割率 α は部分分離効率曲線 (Fig. 2) の粗粉側における最小値として求め, 分割率 β は 1.0 からこの曲線の微粉側における最大値を差し引いて求めた。補正分級径 X_c は, 次式により分割率 α , β をゼロとみなした場合の部分分離効率 η' を求め, $\eta' = 0.5$ の粒子径として与えた。

$$\eta' = \frac{\eta}{1 - (\alpha + \beta)} - \alpha \quad \dots\dots(4)$$

さらに, 分級の鋭さを表わすパラメータ S は, (3)式を用いカーブフィッティングによって求めた。

以上のごとく, これらの特性値をそれぞれ決定し, (3)式による計算結果と実測結果を比較して Fig. 4 に示した。両者は良好な一致を示しており, これによって(3)式の妥当性が検証された。ただし, Fig. 2 において部分分離効率の最小値 α を取る粒子径より大きな粒度範囲, 最大値を取る粒子径より小さな粒度範囲は考慮に入らなかった。

以下では, パラメータ S と分割率 α , β および分級径 X_{50} , X_c に着目して結果を整理する。

Fig. 5 は分級の鋭さを表わすパラメータ S と回転数 N の関係を示す。パラメータ S は回転数の増加にともない若干減小傾向が認められる。グラフの右縦軸は, Molerus らの(2)式より求めた拡散係数 D_u である。ここで, 分級室の代表長さとして補助翼から内筒壁までの距離を取っている。拡散係数 D_u はセパレータの回転数に対して直線的な関係を表わす。

Fig. 6 は微粉側への分割率 α と回転数 N の関係を示したものである。いずれの供給量においても分割率 α は, 回転数の増加にともない増加傾向が認められる。

Fig. 6 N と α の関係

Fig. 7 Q_f と α の関係

Fig. 8 N と X_{50} および X_c の関係

Fig. 7は微粉側への分割率 α と供給量 Q_f の関係を示す。Fig. 6に示した回転数 N の影響と比較してみると、図から明らかなように回転数よりも供給量の影響が顕著である。分割率 α は、それぞれの回転数から見てみると、供給量に対して減小傾向が認められる。また、供給量 $Q_f=250$ g/min の近傍で極小値を持つ傾向にある。

次に、分級操作上最も重要な分級径 X_{50} 、 X_c について見てみる。分級径として、ここでは前述のごとく部分分離効率 $\eta=0.5$ の粒子径 X_{50} と補正分級径 X_c を用いたが、Fig. 8に示したように両者の回転数 N の変化に対する傾向が等しい反面、それぞれの供給量に対して見てみると、供給量が少ないほど両者の差が大きい。

Fig. 9は分級径 X_{50} および X_c と供給量 Q_f の関係を示す。分級径 X_{50} は、それぞれの回転数から見てみると、供給量に対して減小傾向が認められる。しかし、供給量が多い場合 X_{50} は一定の値を持つ。

以上、(3)式 of 分級特性値 S 、 α 、 X_{50} および X_c について実験結果を示してきた。最後に粗粉側への分割率 β について触れると、 β はFig. 2より明かなように、その値が非常に小さく操作条件に対する一定の傾向が認め難い。したがって、分割率 β については考察の所で述べることにする。

4. 考 察

以上のように、実験結果を部分分離効率曲線で表わし、また従来の式を用いてその曲線の数式化を試みると共に、数式化に必要な諸パラメータについて操作条件との関係を求めてきた。以下では、その結果に基づいて考察を行なう。

パラメータ S はFig. 5に示されるように、回転数 N に対して若干減少傾向が認められたが、供給量 Q_f について見てみると、 S は供給量に対してバラツキが大きく一定の関係が見られなかった。本実験の範囲においては、回転数および供給量の変化に対してパラメータ S は、ほぼ一定の値を持って分級機の操作条件による影響は無視できると考えられる。

微粉側への分割率 α と操作条件の関係について、Fig. 7の供給量 250 g/min 近傍において分割率 α が極小値を持つ原因の一つとしては、粒度測定範囲も考えられる。先に述べたように、分割率 α は部分分離効率曲線の粗粉側における最小値から求められるが、本実験では供給量が少ない場合粒度測定

Fig. 9 Q_f と X_{50} および X_c の関係

の範囲が狭く極小値が表われていない場合があった。しかし、実験データから検証してみると分割率 α は、回転数 $N=1300$ rpm および供給量 $Q_f=60$ g/min 以外の操作範囲においては、部分分離効率曲線の粗粉側の曲線の形から見てみれば、ほぼ極小値を持つことが認められた。この事実から、Fig. 7 において分割率 α が供給量 Q_f に対して極小値を持つといえる。

通常の分級条件において、粗粉側への分割率 β は大きく、微粉側への分割率 α は無視できる程の小さい値であるという報告があるが^{2,4,5)}、本実験においては、分割率 β に比べて分割率 α の影響が大きい。したがって、供給量 Q_f が少ない本実験範囲においては、微粉側への分割率 α が分級性能にかなりの影響を及ぼすものと推定される。また、供給量が少なく回転数が高いほど分割率 α の値が大きくなる原因としては、供給量が少なく回転数が高い場合は、機内における粒子の分散効果が大きくなって付着・凝集している粒子の割合が減少し、さらに粗粒子の分散板ないし内筒壁等への反発現象が大きくなって、旋回気流に乗る粒子の割合（微粉回収率）が増大し、それにともない分割率 α が増大するものと考えられる。

従来の研究⁶⁾によれば、分級径 X_{50} は回転数の増加と共に減少すると報告されているが、本実験ではそのような傾向は見られず、 X_{50} は回転数の増加にともない増大する結果が得られた。分級径 X_{50} が増大する原因は、微粉側への分割率 α および補正分級径 X_c が考えられ、この2つの分級特性値が増大することによって X_{50} が増大するものと推定される。Fig. 6, Fig. 8 で回転数 N の影響のしかたを見てみると、分割率 α も分級径 X_{50} も

回転数に対して同様の傾向を示している。また、Fig. 7, Fig. 9 で供給量 Q_f の影響のしかたを見ると、分割率 α も分級径 X_{50} も供給量に対して同様の傾向を示している。このことから、分級径 X_{50} が分割率 α によって変化していると思われる。一方、分級径 X_c について見てみると、Fig. 8, Fig. 9 から明らかなように供給量 Q_f の増大と共に減少しており、 X_c も X_{50} の変化に対して寄与していると考えられる。

分級径 X_{50} と X_c の差は、分割率 α と供給量 Q_f の関係より次のように考えることができる。分級径の定義および(3)式から分かるように、分級径 X_{50} と X_c の相違は分割率のみによって左右されるものであって、Fig. 7 および Fig. 9 に示されるごとく供給量 Q_f が少ない程分割率 α の値が大きくなり、その結果両者の差が大きくなると考えられる。しかし、供給量 Q_f が多い場合分割率 α が増大しているにもかかわらず分級径 X_{50} が一定であり、この領域においては分割率 α 、供給量 Q_f 以外のパラメータも分級径 X_{50} と X_c の差に寄与していると思われる。今後、供給量のより多い領域における観察と共に、分割率 α 、 β および分級径 X_c の解析についてより詳細な検討が必要となる。

5. 結 言

スターテバント型エアセパレータについて、供給量が少ない条件のもとで実験を行ない、ついでその結果に基づいて若干の検討を行なったところ、下記のような結論を得た。

- 1) 部分分離効率曲線は、微粉側および粗粉側への分割率 α 、 β を考慮した修正 Molerus の式によって良く表わされる。
- 2) 回転数よりも供給量が分級結果に大きな影響を与え、供給量が少ない条件のもとでは、粗粉側への分割率 β に比べて微粉側への分割率 α の影響が支配的である。
- 3) 分級径 X_{50} と微粉側への分割率 α は互いに相関に有り、さらに α は回転数および供給量と相関がある。
- 4) 分級の鋭さを表わすパラメータ S は、分級機の操作条件に対して一定である。

〔謝辞〕 本研究は、昭和55年度日本板硝子材料工学助成会研究助成金の補助を受けて行なわれた。ここに記して謝意を表する。

使 用 記 号

D_u : Molerus の拡散係数	[m ² /min]	α : 微粉側分割率	[-]
L : 分級室の代表長さ	[m]	β : 粗粉側分割率	[-]
N : セパレータの回転数	[rpm]	η : 実測部分分離効率	[-]
Q_f : 分級機供給量	[g/min]	η' : 部分分離効率 (標準化)	[-]
S : 分級の鋭さを表わすパラメータ	[-]		
$\bar{V}$: 平均流速	[m/min]	$\eta' = \frac{\eta}{1 - (\alpha + \beta)} - \alpha$	
X : 粒子径	[μ m]	$\Phi(X)$: 微粉部分分離効率関数	[-]
X_c : 補正分級径	[μ m]	$\Phi'(X)$: 補正微粉部分分離効率関数	[-]
X_{50} : 部分分離効率 $\eta=0.5$ の粒子径	[μ m]		

引 用 文 献

- 1) Molerus, O. and H. Hoffmann: *Chem-Ing-Tech.*, **41** (5/6), 340 (1969)
- 2) Onuma, E.: *J. Chem. Eng. Japan*, **6**, 527 (1973)
- 3) 北浦嘉之: 化学工学, **23**, 11 (1959)
- 4) 今泉常正: 選炭, **12** (57), 40 (1961)
- 5) 臼井皓司, 福田清隆: 化学工学協会第33年会研究発表講演要旨集, 2—244 (1968)
- 6) 田中達夫, 桑野健, 川合清一: 化学工学, **21**, 798 (1957)

Author's Abstract

Fractional Recovery Curves of Sturtevant-type Air Classifier

by

Genji JIMBO, Tae-Soo SUH, Jun-ichiro TSUBAKI, Masao YAMAZAKI

(Department of Chemical Engineering Nagoya University)

The mechanism of classification in a Sturtevant-type air classifier was investigated experimentally in the range of low feed rate, for making the effect of particle concentration on air stream negligible.

The number of revolutions of the blades, as well as that of the distribution plate, and the feed rate of the powder were selected as operating variables. JIS No. 2 standard powder (silica sand with average size $\bar{d}_p \doteq 30 \mu\text{m}$) was used as the material to be tested. Experimental results were expressed by fractional recovery (separation) curves, in which partition phenomena, that is to say the simple dividing of feed particles into two parts, in both finer and coarser ranges of curves were recognized in all cases. In particular, the partition on the finer side had a noticeable effect on the cut size of the product by this classifier.

The findings were as follows:

- 1) Modified Molerus equation, which took into account of the partition ratio in both finer and coarser sides (α and β), well represented the results of classification as far as the experimental conditions of this work are concerned.
- 2) It was found that the effect of feed rate on the results of classification was larger than that of the number of revolutions. In the range of low feed rate, the effect of α was also larger than that of β .
- 3) Cut size, X_{50} , was found to be correlated with partition ratio, α , α was then correlated with the number of revolutions and the feed rate.
- 4) The parameter representing the sharpness of classification, S , was constant irrespective of the operating conditions of the classifier.

List of Figures and Table

- Fig. 1** Schematic diagram of Sturtevant-type air classifier
Fig. 2 Fractional recovery curves
Fig. 3 Classification model
Fig. 4 Comparison of observed fractional recovery with calculated values
Fig. 5 Relation among N , S and D_u

- Fig. 6** Relation between N and α
Fig. 7 Relation between Q_f and α
Fig. 8 Relation among N , X_{50} and X_c
Fig. 9 Relation among Q_f , X_{50} and X_c
Table 1 Size distribution of JIS-2 powder (silica sand, $\bar{d}_p \doteq 30 \mu\text{m}$)

研究報告

農産粉じんの最低点火温度に関する 2, 3 の問題の研究

Research for Several Problems Related to the Minimum Ignition Temperature of Agricultural Dusts

滝川 具弘* 吉崎 繁**
 Tomohiro TAKIGAWA Shigeru YOSHIZAKI

1. 緒 言

小麦サイロや飼料工場での農産粉じんの爆発事故のニュースは、年に 1, 2 度、新聞報道されてはいるが、社会的関心は、炭じん爆発に比べ低い。統計¹⁾によれば、農産粉じんの爆発事故は、1952年から1975年までの23年間にわが国で発生した177件の粉じん爆発事故の約2割にあたる33件を占めており、その占める割合は相当大きいといえる。また、米国では最近、穀物が大量に集積するグレイン・エレベータで、大規模な爆発事故が続発しており、農産粉じん爆発への社会的注目が高まってきている。食料、特に穀物が、世界戦略の一環として注目されている昨今、わが国でも、穀物は大量に備蓄される傾向にあり、米国での農産粉じん爆発事故の増加は、対岸の火事と見すごすことのできない問題である。粉じんの爆発性は、多方面から研究が進められてきたが、爆発特性を示す一指標に最低点火温度がある。微粉炭燃焼炉の設計のための粉体の点火過程の理論的解析は、Nusselt²⁾により着手されており研究が続けられているが、同じ手法を用いて粉じんの最低点火温度の理論的研究も行なわれている。最近では、Cassel と Liebman³⁾、Ubhayakar⁴⁾、Bandyopadhyay と Bhadhuri⁵⁾、Thomas ら⁶⁾、Stevenson ら⁷⁾、野村ら⁸⁾、Annamalai と Durbetaki⁹⁾の研究がある。本研究では、石炭および農産粉じんの最低点火温度を測定し、揮発分、粒径と最低点火温度との関係を調べるとともに、最低点火温度の予測理論に若干の考察を加えたので、ここに報告する。

Fig. 1 炉装置の粉じん雲モデル

2. 理 論

前述のとおり、最低点火温度の予測のために、多くの理論が提出されている。Cassel と Liebman³⁾は、金属粉じんの単一粒子に熱爆発理論を適用して、最低点火温度の予測理論を導いた。野村と田中⁸⁾は、単一粒子に関

昭和56年11月13日受付

*筑波大学農学研究科 (〒305 茨城県新治郡桜村天王台)
 TEL 0298-53-4906

**筑波大学農林工学系 (〒305 茨城県新治郡桜村天王台)
 TEL 0298-53-4655