

新 碑

THE MICROMERITICS

NO. 16 AUTUMN 1971

細川粉体工学研究所

ヨーロッパの粉体工学の新しい動き

名古屋大学工学部

神保元二



この5・6月にわたって、多くの方のご好意によってヨーロッパの粉体工学、粉体技術の現状をみてくることができた。その印象はまだ十分に整理できてはいないが、大ざっぱにいうと日本の粉体工学はこれから大変難しい、危機的局面に直面する恐れがあるのではないかと、ということである。これは別段ヨーロッパで画期的な粉体工学の新分野が開けたとか、粉体機器で何か原理的に新しいものが次々出現しているとかいうことではない。その点でいえばわが国はむしろ現在のところヨーロッパの粉体工学・技術の一般の国とほぼ肩を並べているとみていいように思う。問題は研究・開発の体制とそれが招来するであろう近い将来における成果である。

つまり現在ヨーロッパ、とくに英国において、実規模実験による実用データの蓄積と、基礎物性測定手法の確立およびそれによるデータの蓄積と、それらの情報を蓄積しかつ交流する情報センターの確立という、三つの柱をもった粉体技術・工学の研究開発体制ができあがりつつあるのである。とくに第一の“実規模実験による実用データの蓄積”がわが国との対比で一番印象づけられたところであった。粉体現象でスケール効果が大きいこと

はいうまでもないが、それだけに小さいモデル実験からえた結果を実規模に適用する上では危険が多い。だからできるだけ実規模に近いデータがほしいし、また小さい基礎実験はむしろスケールダウンしてしっかり実際の問題点を把握してやるのが粉体研究の不可欠の条件なのである。それなくしていくら沢山の基礎データを積み上げても、もうどうにもならない段階にきているのではないだろうか。そう考えて、私はかねがねデータを共有のものとしてある範囲で自由に使える共同の大規模実験を行う体制をつくる必要があるのではないかと、主張してきた。ところがイギリスでは政府研究機関である Warren Spring Laboratory が、高さが恐らく10mを越える大貯槽に各種の排出装置をつけたものを少なくとも2つは設置し、貯槽とそれからの排出方法の設計のデータをとって、そのような体制をつくりあげていたのである。会社もどしどし粉体をもちこんで実験をしてくれ、というわけで、これらの装置の宣伝をかねて粉体貯槽設計の重要性をPRする映画までつくっていた。いろいろな会社がいろいろな粉体をもちこんで実験をすれば、そのデータはこの政府研究所に蓄積されていくであろう。

“粉 碎” 第 16 号 昭 和 46 年 秋 季 号 目 次

【巻頭言】	ヨーロッパの粉体工学の新しい動き	名古屋大学工学部	神保元二	(1)
【報文】	風力分級器のシミュレーション	北海道大学工学部	中島 耀二	(2)
			田中 達夫	
【報文】	ZrOCl ₂ ・8H ₂ O, ZrOH ₄ の熱処理による ZrO ₂ 粒成長と相転移	菊水化学株式会社	山内 史郎	(8)
【報文】	回分式堅型リボン混合機の混合特性	大阪府立大学工学部	矢野 武夫	(18)
			佐藤 宗武	
			立石 享司	
【報文】	エジェクターフィーダによる粉体の分散	静岡大学工学部	渡辺 始	(24)
			中田 好洋	
			高橋 和士	
【報文】	閉回路粉碎プロセスの解析	大阪府立大学工学部	宮南 啓	(26)
			矢野 武夫	
【報文】	流動層からの小粒子の飛び出し	九州大学工学部	篠原 久	(33)
			田中 勇武	
			中原 俊輔	
		帝人株式会社	鶴 泰	
【総説】	有機粉末の機械化学的变化	昭和大学薬学部	池川 昭子	(40)
			金庭 延慶	

それ自体貴重でかつ高価な情報源となるであろうが、同時にそのデータから抽出されてきた問題点は、新しい理論的研究の出発点となるであろう。それが重要なポイントだと思う。

このほか建設会社はやはり連合してホッパーの強度上の設計基準を目的にした共同研究を行っていた。この方の試験装置はたかだか2m位の貯槽だったが、今後は実際の貯槽に圧力検出端を埋めこんで、大貯槽での測定もやる準備を進めていた。東ドイツの科学アカデミーの選鉱研究所では10種類ほどの各種粉砕機を含む選鉱の実際の工場をもち、いろいろな組みあわせでプロセスシステムを検討してみられるようになっていたが、これも単なる国立研究所のサービス設備以上の意味をもっているように感じた。また民間会社でもスイスの Böhler 社のように高さ42mの試験設備に貯槽や空気輸送装置一式をセットして、どういう粉体でも実際に扱ってみることができる体制をとっているところが印象に残った。

この程度のことはわが国でも各社で或る程度はおやりになっているかと思うが、やはりまだ粉体の取扱いはこういう面で十分に力が入れられていないのではないか。とくに政府研究所の研究や業界の共同研究のように、実規模装置でのデータをある範囲内で交流しあい基礎研究と結びつけられる体制は、わが国で欠けているように思われる。

次に情報センターの方であるが、これはこの5月に POW TECH '71 という国際会議と展示会を開催した Powder Advisory Centre、昨年来日された Heywood 教授がおられる Loughborough 工科大学の粉体情報センターが相競いあって情報蒐集と交流のセンターとなっ

ているが、このほかにも Welwyn Hall Research Association という半分位政府にサポートされている研究所も、情報センターとともに粒度などの測定サービスを行なっているようである。以上がイギリスであるが、東ドイツの例の Freiberg の選鉱研究所は文献情報のかなり完備したセンターの役割をはたしていた。いずれにしてもヨーロッパの技術・工学系の情報センターは、専門の研究機関と結びついた形で分化していく傾向をもっているように感じた。

そのように情報センターは基礎的研究機関と結びついているが、このような全体的な研究・開発・情報の交流体制の変化は、当然大学や政府研究所の研究の内容に影響を与えずにはおかない。私は粉体工学研究に関する限り、現在のところむしろ理学的側面が強い基礎研究と、基礎的測定技術の検討の方に重心が移っていつているように思ったが、ここでは紙数に限りもありあらためて別に論じたいと思う。

いずれにしてもこの3本の柱がしっかり確立しつつあってやがてその成果がいろいろな形であらわれてくるのではないかと期待される。その際もしわが国の研究開発が今後も古い体制で進められるとすれば、やがて再び大きくおくれをとる恐れがあるのではないかと案じられる。その点、政府研究所や大学それぞれで体制を整備する努力が望まれるが、ここではとくに産業界に対して共同研究体制への一層の努力をお願いしたい。粉体工学研究会で考えている、粉体工業懇話会なども何とかこのような線に沿って今後一層強力に推進していただきたいものだと、痛感しながらヨーロッパをまわってきた次第である。

【報 文】	貯槽内の粉粒体の流下現象	九州工業大学 上滝 具貞	(50)
		山口大学工学部 早野 延男	
		山中 久人	
		日本電気株式会社 河内山 茂	
【随 筆】	公害問題の一面	日本電池株式会社 岡田 辰三	(67)
【解 説】	粉 砕 理 論	徳島大学工学部 松居 国夫	(68)
【報 文】	粉体および粉体混合物の流動性指数の 測定とそれらの粉体混合への応用	大阪府立大学工学部 矢野 武夫	(96)
		寺下敬次郎	
		山崎 利夫	
【報 文】	粉体の動的流動性指数の測定法(続)	同志社大学工学部 三輪 茂雄	(103)
【報 文】	スクリーコンベアの輸送量について	信州大学繊維学部 清水 慎一	(112)
【報 文】	低融点物質の粉砕機ビクトリーミルの 開発とその性能	細川粉体工学研究所 鈴木 昭明	(117)
【報 文】	送噴射圧からみたパルスエアコレクターの特性	細川鉄工所 谷口 浩	(124)
		細川粉体工学研究所 鈴木 昭明	
		豊立 勝二	
【新製品紹介】	ホソカワ/マイクロ エアトロン	細川鉄工所 谷口 浩	(127)
	ホソカワニュース		(137)

風力分級器のシミュレーション

——気流の乱れと帯電の効果——

北海道大学工学部

中 島 耀 二

田 中 達 夫

ま え が き

分級器は工業的に重要な装置であって、種々の粉体プロセスに広く利用されている。周知のように、いかなる分級器を使っても理想的な clean cut は不可能であるが、分離が鋭いことによる利点は極めて大きい。たとえば分級器が本質的に重要な機能をはたしている閉回路粉碎システムでは、分離が鋭いほど同じ効果をあげるための循環比は小さくてすみ¹⁻³⁾、設備経費や運転経費が節約できる。したがって分級器の改良は、たとえその結果構造が複雑になりコストが多少上るとしても、全体的に見れば十分採算がとれるであろう。

さて、現在工業的に使用されている分級器は、重力場または遠心場によって粒子に働らく外力と粒子のまわりを流れる流体による抗力との釣り合いを利用するものが多く、原理的には大差ない。しかし分級性能をできるだけ改善するために、あるものは粒子の分散がよくなるように、またあるものは流速分布が望ましい形になるように、さらに凝ったものでは分級帯を設け、その中では分離限界粒子径がどの場所でも等しくなるようにするなど、機構的にはいろいろふうされており多種多様の型式が考案されている。それらのふうは個々の装置についてはそれなりの効果を発揮しているようであるが、分級器の分離性能を劣化させる根本原因の追求があまりなされていない現状では、分級器の大型化や新設計の際に、そのようなふうがはたして有効であるのか否かの目安さえ立てることができず、もっぱら勘と経験にたよっているのが実状ではなからうか。以前に筆者らは簡単な分級器を含んだ粒度測定装置を試作したことがあり、それ以来なぜ鋭い分級ができないのか、またなぜ処理量を増加するとさらに分離が鈍くなるのかという点に疑問をもち、おりにふれシミュレーションによってどのような原因が分級性能にどの程度影響するかを検討してきた。本報ではそれらのうち、ある程度明確な結論がえられたものを紹介する。

1. 気流の乱れの効果

通常の風力分級器の分級室内では、気流は乱流状態で流れており、しかも助走区間も短いので、分級性能を検討するには時間的にならされた流速分布は一様とみなしてさしつかえない。事実、井伊谷らの報告⁴⁾にしたがって流速分布だけに着目して部分回収率曲線を計算してみると乱流の場合には極めて鋭く立った曲線がえられる。しかし乱流場においては Fig. 1 に示すとうり、瞬間的な気流速度は u は平均風速 $\bar{u}$ のまわりで細かく変動している。本節では Fig. 2 に示すように $-L_f$ から $+L_c$ までの分級帯をもつ風力分級器を想定し、上記の気流の乱れが部分回収率曲線に与える影響と分級帯の効果をあわせて考察する。

分級室に流入する 1 つ 1 つの粒子の運動を追跡すれば部分回収率曲線が求められることは明らかである。そこでまず分級室内の粒子の運動方程式を立てれば、流体抗力に Stokes の法則が適用できる範囲において次式がえられる

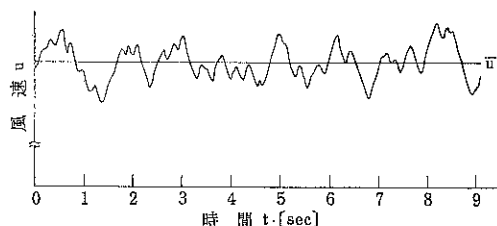


Fig. 1 円管中の気流の乱れ

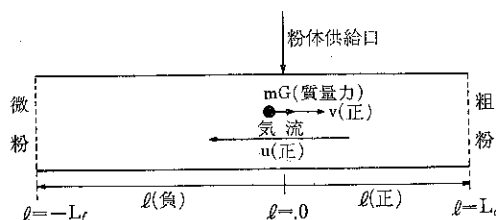


Fig. 2 分級器の簡単なモデル

$$m \frac{dv}{dt} = mG - m \frac{18\mu}{\rho_p x^2} (u+v) \quad (1)$$

ここで m は粒子の質量, t は時間, ρ_p は粒子の密度, x は粒子の Stokes 径, μ は流体の粘度, u および v はそれぞれ気流および粒子の管壁に対する速度である。(u と v の方向は逆にとつてあることに注意。) つぎに力の場によって粒子に作用する外力 (重力や遠心力) mG は分級室内の位置 l には無関係と仮定すれば, 時刻 t_m に初速 0 で $l=0$ (粉体供給口) に流入した粒子の τ 秒後の位置 l_p は (1) 式から容易に計算でき

$$l_p = \int_{t_m}^{t_m+\tau} v dt = \int_{t_m}^{t_m+\tau} e^{-S(t-t_m)} \int_{t_m}^{t_m+T} \{ G - S \cdot u(t) \} dt dT \quad (2)$$

となる。ただしパラメータ S は粒子径の関数で

$$S = -\frac{18\mu}{\rho_p x^2} \quad (3)$$

(2) 式によって粒子の運動を追跡できるが, そのためには瞬間風速 u を時間の関数として与えなければならない。ここでは乱れの成分の平均風速 $\bar{u}$ に対する相対的な強度を示すパラメータ A と乱れの時間的変動の形を表わす関数 $D(t)$ を用いて $u(t)$ を表現する。

$$u(t) = \bar{u} \{ 1 + A \cdot D(t) \} \quad (4)$$

なお A は乱流度と呼ばれるものであり, 次式で定義する。

$$A = \lim_{T \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\int_0^T (\bar{u} - \bar{u})^2 dt}{\bar{u} \cdot T}} \quad (5)$$

この乱流度の値は円管内の乱流でおよそ 0.1 のオーダーである。また $D(t)$ に関してはこれを一義的に定めることは本質的に不可能なので, 通常は統計的な処理をほどこして波数スペクトルというような形で表現している。しかしシミュレーションのためには $D(t)$ を具体的に与える必要がある。そこで少々乱暴であることは承知のうえで, 風力分級器内の乱流場では $D(t)$ が統計的にほぼ同等なものと考え, 筆者らが円管内の気流について測定したデータ (Fig. 1) からこれを決定し, 0.05 秒間隔で 400 点を数値的に与えた。したがって実際の計算では $u(t)$ を与えるパラメータは $\bar{u}$ と A だけになり, 多少一般性を欠くことにはなるが, 本報の目的には十分である。

部分回収率は 1 つの粒子径に対し約 400 個の粒子を想定して, 供給時間 t_m を少しずつずらして l_p を追跡し, その大きさの粒子が粗粉側へ流出する割合, つまり l_p が $-L_f$ を一度も越えないで $+L_c$ を越える割合を計算して求めた。 Fig. 3 は部分回収率曲線に与える乱れの影響を示している。図からわかるように乱流度 A によって曲線の形はかなり変化するものの, A が極端に大きな場合

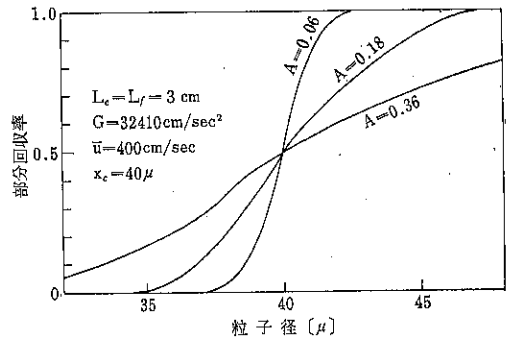


Fig. 3 気流の乱れの効果

($A=0.36$) でさえ工業的な分級器に比較してみれば分離が鋭い。したがって工業的な分級器の問題点は別のところにあり, 乱れを少なくするようなくふうはむだではないにしても, あまり大きな効果は期待できないと思われる。 Fig. 4 には分級帯の効果を示したが, 50% 分級点が変わらずに変化することを除いて全長 20cm の分級帯ですらほとんど何の影響も示していない。とくに A が大きな場合ではこの傾向が顕著であり, 工業的な分級器では気流の乱れに対する対策として分級帯を設けることはあまり意味がなく, むしろ粒子の衝突や凝集による性能の劣化を防止するための手段として分級帯を考えるべきである。このような観点からすれば, 分級帯を設けるとしても, 分離限界径よりも大きな粒子が凝集や衝突のために微粉側へ紛れこむことはほとんどないので, 粗粉側の分級帯 L_c を主体にして設計すべきである。

上述のように, 気流の乱れに着目する限り分級帯はあまり効果を発揮せず, あってもなくてもほぼ同じということになる。そこで以下では分級帯がない場合 ($L_c=L_c=0$) について考察を進める。この場合には粒子の初速を 0 と考えれば粒子が流入した瞬間での粒子の加速度が正か負かで粗粉側へ出るか微粉側へ出るかが定まる。すなわち (1) 式を参照すれば $\{ G - S \cdot u(t) \}$ が正になる時間の割合を種々の粒子径について計算すれば部分回

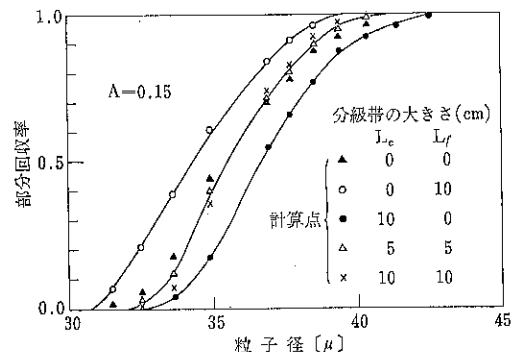


Fig. 4 分級帯の効果

収率曲線が求まる。この加速度の項を理論分離径 $x_c = G\rho_p/18\mu\bar{u}$ を用いて整理すると

$$\frac{dv}{dt} = G \left[1 - \left(\frac{x_c}{x} \right)^2 \{ 1 + A \cdot D(t) \} \right] \quad (6)$$

となる。上式から部分回収率曲線は無次元化粒子径 x/x_c の関数として表現できること、またそれは乱流度 A によって定まることがわかるであろう。したがって $G=32410\text{cm/sec}^2$, $x_c=40\mu$ に対する計算例 (Fig. 3) は横軸を x/x_c に書き改めるだけで一般的なものに拡張できる。さらに A が主に装置の構造によって定まるものと考えれば、 G は気流の乱れによる分級性能の劣化には関係せず、その他の原因に対する対策手段として自由に選択できることもわかる。

本節では抵抗係数が Stokes 域の場合に限って考察してきた。それ以外の場合については1式が v に関して非線形になるため、計算はやや複雑になるがシミュレーションは可能であり、Stokes域の場合とほぼ同様な結論を与えるものと思う。

2. 粒子の帯電の影響

粉体粒子が帯電する現象はあらゆる乾式の粉体プロセスで観察されており、粉体が動けば帯電すると言ってもよいぐらいの不偏的な現象である。とくに風力分級器のように粒子を気流に乗せて供給する場合には、粒子のもつ電荷は想像以上に大きくなる。帯電した粒子が分級室に流入すると粒子はそれ自身が作る電場によって互に反発し、分級室の周辺部 (壁) へ向う力を受けるので、分級室内の粒子の濃度分布は壁に向かって増加する傾向をもつ。もしこの傾向を緩和するような現象が何もないならば、すべての粒子は壁に付着することになる。しかし実際には気流の乱れなどに起因する粒子のランダムな運動によって粒子は濃度の高い周辺部から濃度の低い中心部へ拡散するため、分級室内には動的にバランスした濃度分布が生じるものと考えられる。さらにこの濃度分布は気流の速度分布に大きく影響するはずである。このように考えてみると、粒子の帯電のために引き起こされる現象が分級器の性能を著しく左右する可能性に気づくであろう。

この可能性を裏づけるために、筆者らは次のような予備的実験を行なった。実験装置は内径 $64\text{mm}\phi$ 、全長 60cm の金属製連続風篩器の中心に風篩器本体と電気的に絶縁した直径 $2\text{mm}\phi$ の線状電極をとりつけたものである。この風篩器に粒度範囲 $200\mu\sim 600\mu$ のガラス球を一定流量で供給、理論分離径 400μ の条件 ($\bar{u}=2.95\text{m/sec}$) で分級したところ、中心電極を本体に接続するかしないかによって分級器からの排出流量がはっきり変化した。この変化の原因は明らかに風篩器内の電場の変化である

から、粒子の帯電が分級性能に影響することを明瞭に示している。

さて、前記の着想にしたがって分級器内の現象をそのまま数学的に表現しようとする、非常に複雑な連立偏微分方程式になってしまい、数値解を求めることでさえ困難である。そこでここでは極めて単純な円管状の連続風篩器を想定し、いくつかの仮定のもとでシミュレーションを行なう。まず粒子の濃度分布を基本的には $Soo^5)$ の報告にしたがい、一部をより合理的に改めて計算する。

前述のように、粒子が作る電場の効果と粒子の拡散の効果の間に動的な平衡関係が成立し、分級室内に粒子の濃度分布が生じる。この濃度分布は、一般的にはある平均的な分布のまわりで周期的に変化するものと考えられるが、透明な風篩器で分級状態を観察したところ、風篩器の一部に管軸方向にかなり広がりをもつ粒子濃度の高い部分 (分級ゾーン) ができ、供給流量が過大でないかぎりその部分での濃度のゆらぎは僅かであることがわかった。したがって分級室内の濃度分布は定常的なものであって、管の半径方向だけに変化すると仮定してもよいであろう。このような仮定のもとでは数学的表現が大巾に簡単化できる。

風篩器の中心から半径 r の位置の電場の強さの半径方向の成分 E_r (その他の成分は仮定により 0) は円筒座標を用いて表わすと

$$E_r = \frac{q_0}{r} \frac{\rho_p}{\epsilon} \int_0^r x \cdot C dx \quad (7)$$

ここで C は粒子の容積濃度、 q_0 は粒子の比電荷 (粒径によらず一定と仮定)、 ϵ は媒質の誘電率であって空気に対しては $8.85 \times 10^{-12} \text{Coulomb}^2 \text{sec}^2 / \text{kgm}^3$ 、 ρ_p は粒子の密度である。さらに電場によって移動する粒子の位置 r における平均移動速度 (半径方向) を $\bar{v}_r$ とおけば、定常状態を考えて物質収支をとると

$$D \frac{dC}{dr} = \bar{v}_r \cdot C \quad (8)$$

と書ける。なお D は粒子の拡散係数であるが分級室内の位置や粒子径に無関係と仮定する。

$\bar{v}_r$ の計算は少々込入る。 Soo は中心におかれた初速 0 の帯電粒子が電場 E_r によって半径方向に加速され、 r の位置に達したときの速度を $\bar{v}_r$ とした。このような取り扱いでは拡散による粒子のわき出し点が管の中心だけであると仮定することになり、 $C\bar{v}_r$ が r によらず一定という意味につながる。さらに $\bar{v}_r$ は r に関して増加関数であることを考慮すると C は r の減少関数であるという結論になり、 Soo 自身の実験結果と矛盾する。この矛盾を避けるため、ここでは次のように取り扱う。すなわ

ち、円筒座標の拡散方程式を調べてみれば容易にわかるように、分級器内の任意の半径位置 y に単位時間単位体積あたり

$$C^* = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(Dr \frac{dC}{dr} \right) \Big|_{r=y} \quad (9)$$

の体積の粒子がわき出す。この粒子が $r = y$ から初速 0 で管壁方向に加速され、 $\bar{v}_r$ はこのような粒子が r に達したときの平均速度であると考え、この場合には

$$\bar{v}_r = \int_0^r \sqrt{2q_0 \int_y^r E_r dx} \cdot y \cdot C^* dy / \int_0^r y C^* dy \quad (10)$$

となる。なお上式を誘導する際に電場による粒子の移動速度は遅いので流体抵抗は無視した。(7)~(10)式を組み合わせて濃度分布に関して次式がえられる。

$$\left(\frac{dC}{dr} \right)^2 = \alpha \frac{C}{r} \int_0^r \int_y^r \frac{1}{x y} \int_0^r z C dz dy \cdot \frac{d}{dx} \left(x \frac{dC}{dx} \right) dx \quad (11)$$

ただしパラメータ α は

$$\alpha = (2q_0^2 \rho_p / D^2 \epsilon)^{1/2} \quad (12)$$

なお(7)、(10)、(11)式に現われる x 、 y 、 z は半径位置 r に対応する単なる積分変数である。(11)式に風篩器の中心濃度 C_0 とパラメータ α を与えて数値計算すれば濃度 C の分布が求まるし、必要に応じて平均粒子濃度 $\bar{C}$ を求めることもできる。

つぎに粒子の濃度分布が気流の流速分布に与える影響を概算してみる。固気二相流の一般的取り扱い是非常に複雑で、現在でもまだ未完成な分野である。そこでここではやや独断的かも知れないが、古典的な乱流理論 (Prandtl の混合理論⁶⁾) にさらに仮定をおいて考察を進める。

混合理論にしたがえば、乱流剪断応力 τ は混合距離 λ と流体の密度 ρ を用いて

$$\tau = \rho \lambda^2 \left| \frac{du}{dr} \right| \cdot \frac{du}{dr} \quad (13)$$

と表現できる。なお λ は定数でなく r の関数である。いま円管内の乱流の速度分布が $1/7$ 乗則にしたがうものとして du/dr を求め、さらに τ を単位管長あたりの圧力損失 G_f を用いて消去すると

$$\lambda^2 = \frac{49 \times (0.817)^2}{2 \times \bar{u} \rho} \cdot R^2 G_f r \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{12/7} \quad (14)$$

がえられる。ここで $\bar{u}$ は平均風速、 R は管の半径である。上式は粒子を含まない流れに対して成立するものであるが、風篩器内の粒子濃度はただだか 1% 程度であるから、風篩器内の二相流に対しても(14)式の混合距離が近似的に適用できると仮定すれば

$$\tau = 16.35 \frac{R^2}{\bar{u}} G_f r \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{12/7} \cdot \left| \frac{du}{dr} \right| \cdot \frac{du}{dr} \quad (15)$$

が円筒状の風篩器内の乱流剪断応力を与える式になる。

また分級ゾーンでの粒子の加速や壁との衝突の効果は上下方向で相殺し合うし量的にも僅かなものであろうからこれを見捨て管軸方向の力のバランスをとれば次式がえられる。

$$\pi r^2 G_{sus} + 2 \pi r \tau = 2 \pi \rho_p g \int_0^r x C dx \quad (16)$$

ここで g は重力加速度、 G_{sus} は二相流での単位管長あたりの圧力損失である。(15)式を(16)式に代入し、 du/dr が負であることに注意して整理すれば

$$\frac{du}{dr} = \frac{-\bar{u}}{5.719 R \sqrt{G_f}} \cdot \frac{\sqrt{r^2 G_{sus} - 2 \rho_p g \int_0^r x C dx}}{r \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{6/7}} \quad (17)$$

上式の G_f は Fanning の式を用いて求めればよいが、 G_{sus} にはまず次のような近似的な関係によって近似値を与え、

$$G_{sus} = G_f + \rho_p g \bar{C} = G_f + 2 \frac{\rho_p g}{R^2} \int_0^R r C dr \quad (18)$$

(17)式から近似的な流速分布を計算する。つぎにこの分布から平均風速を求め、 $\bar{u}$ と比較し、差がなくなるまで G_{sus} を修正していく。このような試行法によって流速分布を求めることができる。なお(17)式は $r = R$ に特異点をもつので数値計算にあたり若干の技巧を要すがここでは触れない。また濃度分布が一樣な場合には(17)式は粒子を含まない場合と同一の流速分布を与える。

以上のようにして粒子の濃度分布と風速分布が決定されると部分回収率は容易に計算できる。すなわち半径位置 r にある粒子径 x の粒子の壁に対する沈降速度を $v_x(r)$ とおけば部分回収率の定義から

$$\eta(x) = \frac{\int_{R_0}^R r C |v_x| dr}{\int_0^R r C |v_x| dr} \quad (19)$$

ただし R_0 は $v_x(r)$ が 0 になる半径位置であるが、気流速度が最も大きい管の中心部においても落下するような粗い粒子に対しては 0 とする。また $v_x(r)$ については修正 Allen 式⁷⁾を用いて終末沈降速度を計算し、Richardson ら⁸⁾の報告にしたがって空開率の効果を補正した上で、半径位置 r の気流速度 $u(r)$ をさし引いて求めた。

Fig. 5 に $R = 3.2 \text{ cm}$ 、 $\alpha = 5.94 \times 10^4 \text{ m}^{-2}$ ($q_0/D = 2.5 \times 10^{-3} \text{ Coulomb} \cdot \text{sec} / \text{kg} \cdot \text{m}^2$ 、 $\rho_p = 2.5 \times 10^3 \text{ kg} / \text{m}^3$ 、 $\epsilon = 8.854 \times 10^{-12} \text{ Coulomb}^2 \cdot \text{sec}^2 / \text{kg} \cdot \text{m}^3$) および $\bar{u} = 2.95 \text{ m} / \text{sec}$ ($x_0 = 400 \mu$) の場合の濃度分布と速度分布の計算例を示した。また **Fig. 6** は **Fig. 5** に示した濃度と速度の分布から計算した部分回収率曲線である。これらの図では風篩器の中心濃度 C_0 のかわりに、処理量にほぼ比例

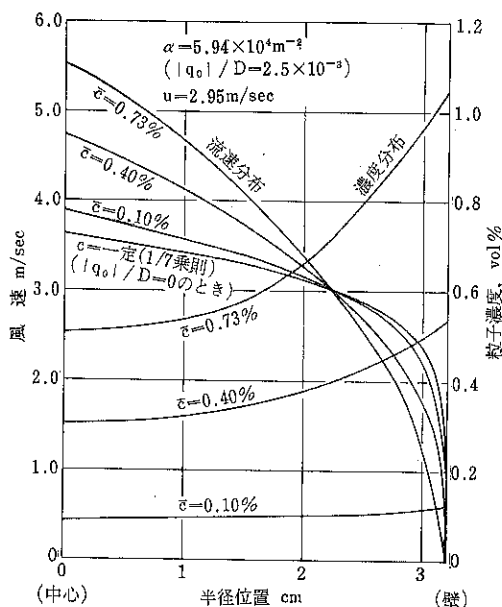


Fig. 5 濃度分布と速度分布の計算例

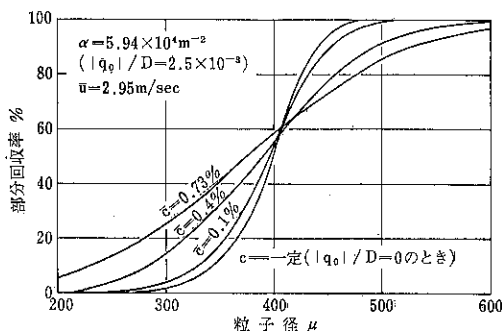


Fig. 6 部分回収曲線の計算結果

する平均濃度 $\bar{C}$ をパラメータにしてある。なお $|q_0|/D$ の値は現在のところ明確ではないが、後に示す筆者らの実験結果などから判断すると上記の数値はまず妥当なものと思われる。

Fig. 5 からわかるように、 $\bar{C}$ が大きくなるにしたがって、換言すれば処理量を増加するにつれて濃度分布は風篩器の壁付近で急増し、流速分布は中央部へ鋭く立ち上がるようになる。その結果 Fig. 6 に示すように $\bar{C}$ の増加とともに部分回収率曲線は急激に悪化する。逆に $\bar{C}$ を小さくすれば分離を鋭くすることができる。したがって遠心場を利用して粒子の移動速度を大きくし、 $\bar{C}$ を小さくすることはかなりの効果がある。

つぎに処理量と分級性能（ここでは Newton 効率 η_N を例にとる）の関連性を実験と理論の両面から調べてみる。Fig. 7 に粒子径範囲が 200 μ から 600 μ の間にはば

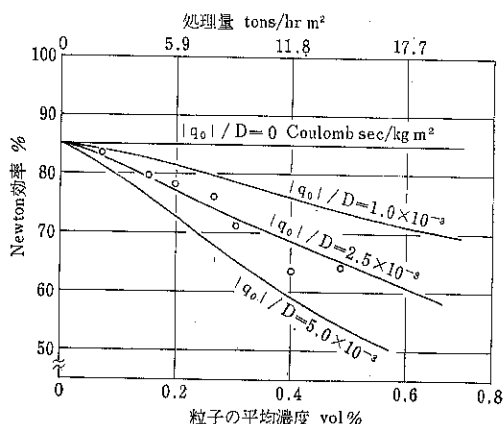


Fig. 7 Newton 効率と処理量の関係

一様に分布したガラス球を試料にして、 $R=3.2$ cm、長さ 80 cm の連続風篩器の Newton 効率（分級点 400 μ ）を種々の処理量で実験的に求めた結果と、前述の方法で計算した部分回収率曲線および試料の粒度分布から理論的に求めた結果を対比して示した。なおこの図の横軸に示してある処理量と $\bar{C}$ の関係は(8)式を用いて上記の実験条件に対して実験的に求めたものであって、一般性は全くない。この図から処理量の増加による分級性能の劣化は $|q_0|/D$ が大きいほど著しいことがわかる。またこの実験結果は $|q_0|/D=2.5 \times 10^{-3}$ Coulomb sec/kg m² の理論曲線にかなりよく乗っている。したがって理論的な誘導の際に用いた多くの独断的ともいえるような仮定はおおむね妥当であったと思われる。Fig. 6 に示した部分回収率曲線もある程度信頼してよからう。本来、実験的な確認は Fig. 6 に対して行なうべきであろうが、そのためには粒径頻度分布曲線を極めて高精度で求めねばならず、筆者らは実施できなかった。また供給流量をさらに増加すると分級器からの排出流量に激しい脈動がみられ、分級性能が著しく劣化することが観察できた。このような現象は濃度分布を与える基礎式が本来時間項を含むものであるから当然の現象ではあるが、これを定量的に評価することは数学的な複雑さのためほとんど不可能であり、本研究では扱っていない。

Fig. 6 から処理量を増大すると 50% 分級点小さい方へ移動することがわかる。この現象は以前から実験的に気がついており、筆者らはいろいろと説明を試みてきたのであるが、粒子の帯電の効果を考えることによって始めて説明できた。このことも帯電現象が分級性能に強く影響することの検証になろう。

最後に分級器の大きさの効果を検討してみる。分級室内の濃度分布を与える(1)式を r の関数ではなく、無次元化半径 (r/R) の関数として表現しても R は消去できな

い、つまり濃度分布の形にRが直接関係するわけで、たとえCや α などが同一でもRが異なれば部分回収率曲線も異なる。結論的に言えば、幾何的に相似な分級器を同一のCで稼働させた場合、大型のものの方が分級性能はるかに劣ることになり、分級器を相似的に大型化したのでは処理量は期待するほど増加できない。したがってスケールアップに際しては、帯電粒子によって生じる電場をできるだけ弱めるように十分配慮することが必要である。

む す び

本報では分級室内の気流の乱れや粒子の帯電の効果が分級性能にどのように関連しているかをシミュレーションによって検討した。その結果、気流の乱れの効果よりも帯電粒子の効果の方がはるかに強くあらわれることがわかった。本報で扱った分級器は極端に単純化されたものであるから、ここに得られた定量的な関係式をそのまま工業的な分級器に適用することはできない。しかしここに展開した考え方そのものはあらゆる型式の風力分級器に適用できると信じる。なお分級性能に影響する重要な要因として粒子の凝集があるが、現在のところ何らの手がかりも得ておらず、本報では言及できなかった。

以下に上述の検討でえられた知見のうち、分級器の設計などの参考になりそうなものを列挙しておく。

- 1) 気流の乱れによる分級性能の劣化は意外に少なく、むしろ粒子の拡散を助長する効果があるので、ある程度の乱れはかえって好ましい場合さえ考えられる。ただし波数の小さな乱れ(低周波成分)はできるだけ少ない方がよい。
- 2) 分級帯は凝集粒子を分散させる目的に対して有効である。したがって粒子の供給口は分級帯の微粉側に近寄せて設けるべきである。
- 3) 分級室内の粒子濃度は帯電粒子が作る電場を媒介にして分級性能に強く影響する。もちろん粒子濃度は低い方がよく、遠心場の利用はかなりの効果があろう。また

何らかの手段(たとえば放射線の利用)によって分級室内の気流をイオン化し粒子の電荷を中和することも効果があるかも知れない。また湿式の分級器では帯電粒子の放電が容易であるし媒質の誘電率も高いので電場はほとんどできず、粒子の凝集や流れの流速分布、乱れなどに注意すれば鋭い分級ができるであろう。

4) 風力分級器のスケールアップに際して電場の効果を十分配慮すべきである。その際簡単な相似則が成立しないことをとくに留意しておく必要がある。

(付 記)

本報は当研究室の昭和42年度および44年度の卒業研究の一部をまとめ、さらに検討を加えたものであって、それぞれの研究を担当した卒業生、古谷勝昭君および高橋良一君の努力によるところが大きい。また細川粉体工学研究所から貴重なデータをいただいたことを付記して謝意を表する。

(参 考 文 献)

- 1) 古谷, 中島, 田中: 化学工学協会第35年会要旨集, 第2分冊 p.277 (1970. 4, 東京).
- 2) 中島, 田中: 化学工学協会第36年会要旨集, 第2分冊 p.333 (1971. 4, 東京).
- 3) 古谷, 中島, 田中: I & EC, Process Design & Develop., 印刷中.
- 4) 井伊谷, 田中, 瑞本: 化学工学, **32**, 1110 (1968).
- 5) S.L. Soo: I & EC, Fundams., **3**, 75 (1964) および "Fluid Dynamics of Multiphase Systems", Blaisdell Pub. Co. (1967).
- 6) たとえば谷: "流れ学", 岩波全書および H. Schlichting: "Boundary Layer Theory", McGraw-Hill (1955) など
- 7) 井伊谷: 粉体工学研究会誌, **3**, 420 (1966).
- 8) J.E. Richardson and R.A. Meikle: Trans. Instn. Chem. Engrs., **39**, 348 (1961).

(17頁よりの続き)

- 2) F.P. Venabl: J. Am. Chem. Soc., **20**, 118 (1898).
- 3) J. Missender: Chem. News, **124**, 326 (1922).
- 4) 高木貞恵: 日化誌, **75**, 673 (1954).
- 5) たとえば
R.C. Garvie: J. Phy. Chem., **69**, 1238 (1965).
F. W., Vahldiek, L.B. Robinson. and C.T. Lynch: Science, **142**, 1059 (1963).

- R. Cypres, R. Wollast, und J. Raucq: Ber. Dtsch. Keram. Ges., **40**, 527 (1963).
- K. S. Mazdizyasn, C.T. Lynch, and J.S. Smith: J. Am. Ceram. Soc., **49**, 286 (1966).
- 6) R. Cypres, R. Wollast, und J. Raucq: 前出
- 7) R. C. Garvie: 前出
(この実験は筆者が名古屋工業技術試験所に在職中行なったものである.)

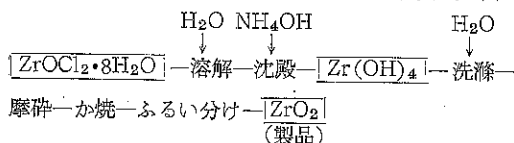
ZrOCl₂ · 8H₂O, Zr(OH)₄ の熱処理 による ZrO₂ の粒成長と相転移

菊水化学工業株式会社 技術部

山 内 史 朗

1. ま え が き

ZrO₂を製造するには、一般に原料としてZrSiO₄を使用し、その方法は数多くあるが、大別して乾式法と湿式法に分けられる。湿式法の一方法として、ZrSiO₄にNa₂CO₃を加えて電気炉で熔融し、HCl処理などにより脱珪、脱鉄を行ない、ZrOCl₂ · 8H₂Oを作り、以下、



の工程にしたがって製造する方法がある、筆者は、この一連の工程中に中間物として造られる、ZrOCl₂ · 8H₂OおよびZr(OH)₄を熱分解してZrO₂とし、これらとの製造方法によって最終的に得られたZrO₂との、加熱温度と保持時間の相違による粒子の成長および相転移について比較検討したので報告する。

2. 実験および結果

2.1 試料および熱処理

2.1.1 試料

試料は重金属工業KK製の高純度の、ZrOCl₂ · 8H₂Oを用い、これを4等分し、1/4を保存試料として除き、1/4をそのままZrOCl₂ · 8H₂O試料として用い、残りをZr(OH)₄にし、さらにこの1/2を現場で行なわれている方法に準じてZrO₂とした。(以下このZrO₂試料をS-ZrO₂と略記する。)

なおZr(OH)₄の合成に当たっては、ZrOCl₂ · 8H₂Oを水に溶解させた後、NH₄OHを加えてZr(OH)₄を沈殿させ、水によって洗滌をくりかえした後、ろ過した。この際、沈殿物は部分的に、粒状に凝集をおこすので、高速回転ミキサを用いて、30~60秒間、撹拌を与えて均一な分散状態にして洗滌した。さらに吸引ろ過した後乾燥した。採用した乾燥方法はつぎの4方法である。

(1)凍結乾燥—試料を結晶皿に入れ、電気冷凍機において、15日間凍結を保持した状態で水分を除去した。

(2)塩化カルシウムによる脱水乾燥—15~20°Cの室温において、ビーカに入れた試料を、デシケータ中に静置し、15日間放置した。なお脱水を促進するため、途中で数回、固化した部分を指先でほぐした。

(3)真空乾燥—試料をビーカに入れ真空乾燥器中で、8mmHgの減圧のもとで、32時間保持した。

(4)赤外線乾燥—試料を結晶皿に入れ、赤外線乾燥器中で、24時間保持した。温度範囲は130~140°Cである。

以下の実験では、おもに凍結乾燥の試料を用いた。S-ZrO₂試料の作製は、なるべく現場において用いられている方法に準じて行なった。前記のように、ZrOCl₂ · 8H₂Oより、十分水洗したZr(OH)₄懸濁液をつくり、これを放置してZr(OH)₄の沈殿後上澄液を除去した試料を、結晶皿に移して自然乾燥した。これを磁製するつばに入れ、実験室用ガスバーナを用いて撹拌しながら加熱処理した。磁製するつば中の温度は、900~950°Cである。

2.1.2 熱処理条件

試料は15φ×45mmのジルコニア質のつばに入れ、図1に示したエレマ炉を用いて350~1,200°Cの温度範囲で、熱処理を行なった。温度上昇は、250°C/hrであり、所定温度での保持時間は、15分間である。なお比較のため、30, 45および60分保持を部分的に行なった。

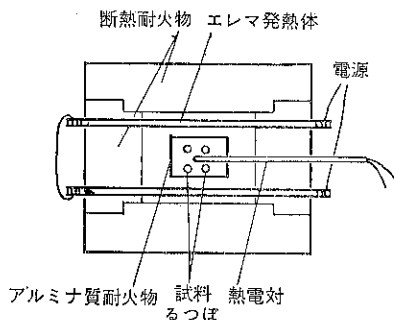
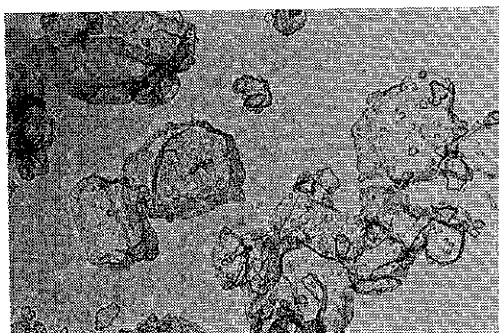


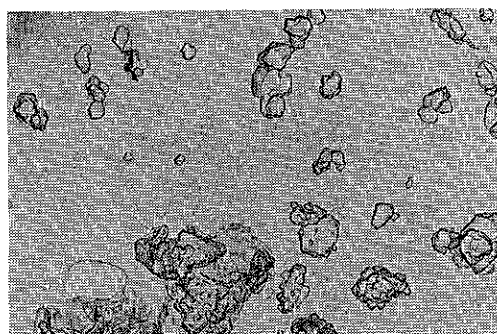
図1. 熱処理用エレマ炉

2.2 電子顕微鏡観察

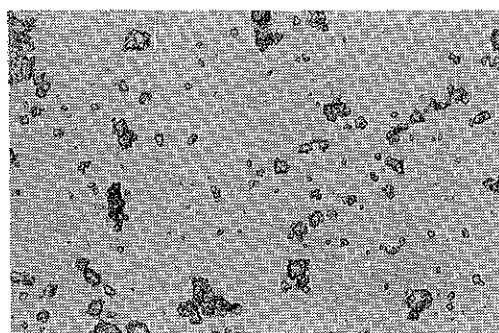
ZrOCl₂ · 8H₂OおよびZr(OH)₄の各段階の温度で熱処理した試料および、S-ZrO₂試料の電子顕微鏡写真を、



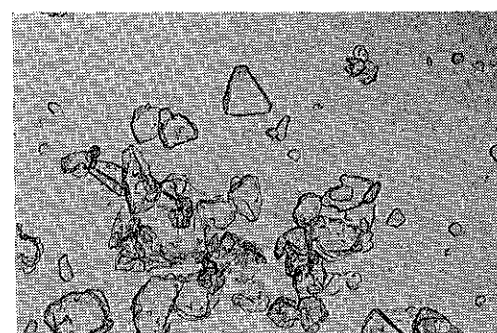
a-1



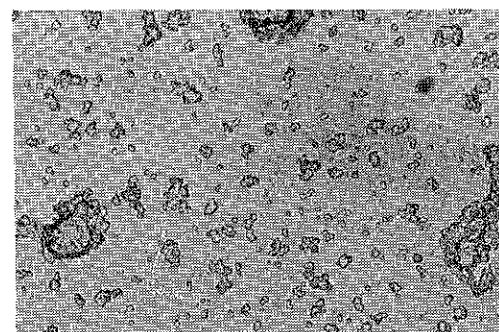
a-5



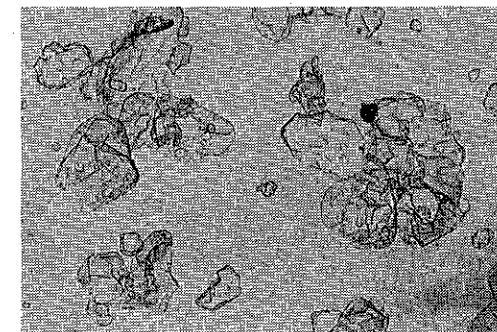
a-2



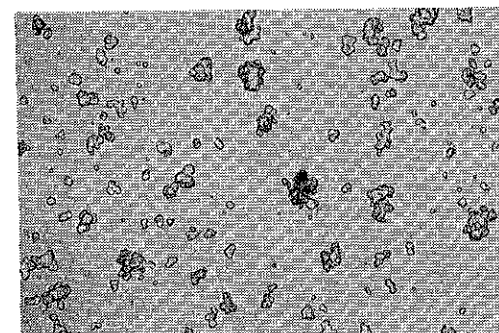
a-6



a-3



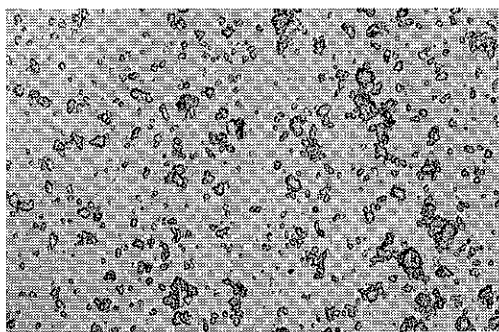
a-7



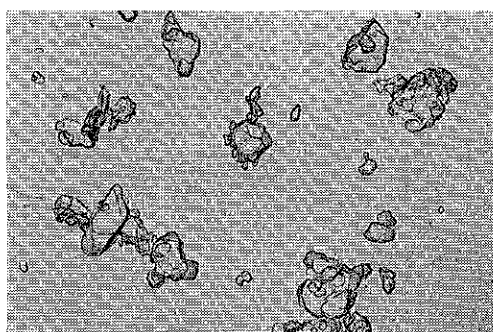
a-4

a-1 400°C 処理	a-5 1,200°C 処理
a-2 600°C "	(30分) "
a-3 800°C "	a-6 1,200°C "
a-4 1,000°C "	(60分) "
	a-7 1,200°C "
	(90分) "
	() 内は保持時間

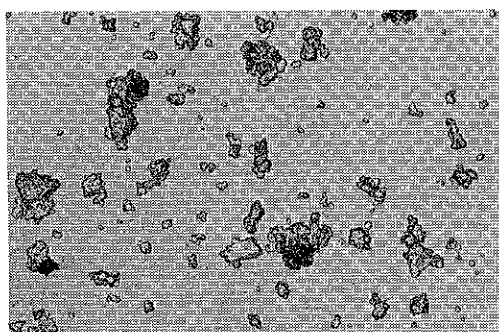
写真 1-(a). $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ の加熱処理試料
の電子顕微鏡写真 ($\times 10,000$)



b-2



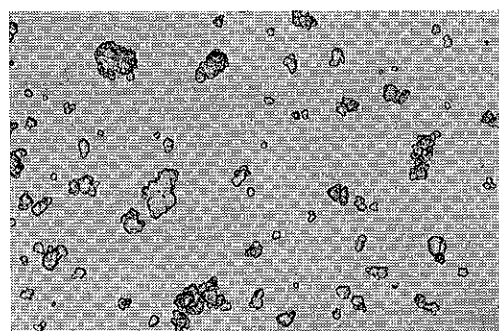
b-5



b-3



b-6



b-4

b-2 600°C 処理

b-3 800°C //

b-4 1,000°C //

b-5 1,200°C //
(30分)

b-6 1,200°C //
(60分)

() 内は保持時間

写真 1-(b). $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ を 400°C で熱処理後、摩砕し、
再加熱した試料の電子顕微鏡写真 ($\times 10,000$)

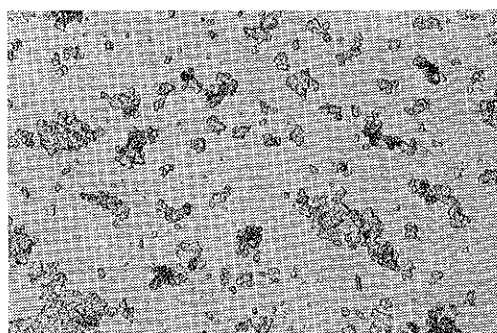
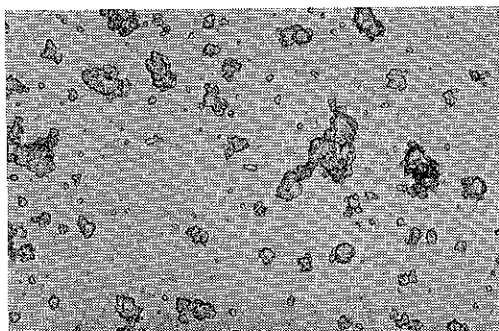
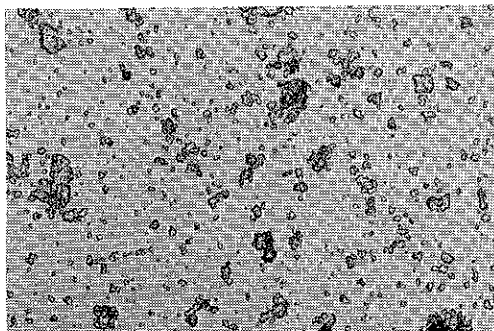


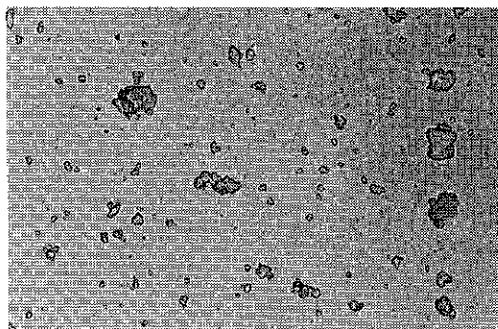
写真 3. ZrO_2 (最終製品) の電子
顕微鏡写真 ($\times 10,000$)



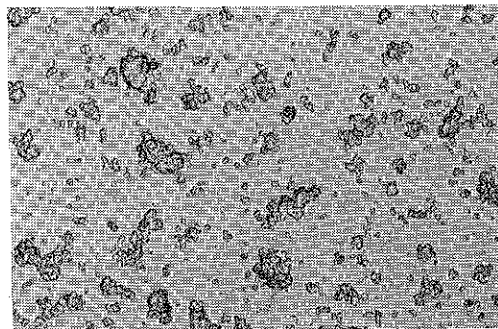
c-1



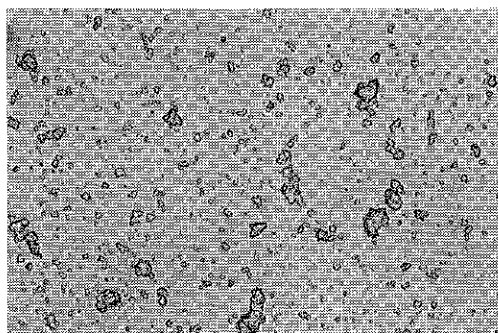
c-5



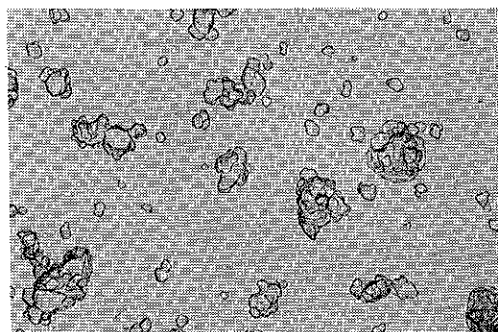
c-2



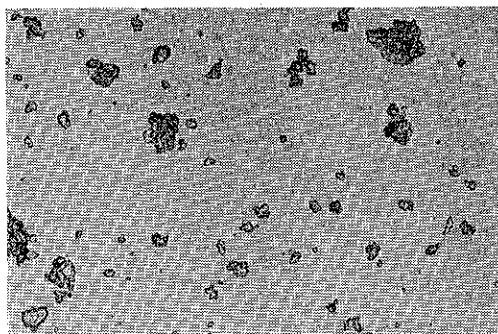
c-6



c-3



c-7



c-4

- c-1 凍結乾燥試料
- c-2 350°C 処理
- c-3 500°C //
- c-4 700°C //
- c-5 900°C //
- c-6 1,000°C //
- c-7 1,200°C //

写真 2. $\text{Zr}(\text{OH})_4$ の加熱処理試料の
電子顕微鏡写真 ($\times 10,000$)

写真1～3に示した、直接倍率×2,500、写真焼付倍率×4である。写真1-(a)の、a-1～a-4は $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ をそれぞれ、400、600、800および1,000°Cの温度で熱処理したものであり、a-5～a-7は、1,200°Cにおいて30、60および90分と保持時間を変えたものである。a-1は、400°C加熱処理試料であるが、後に述べる熱天秤、およびX線回折結果を考慮すれば、熱分解による氯化物の脱離が行なわれていることは明らかである。しかし写真では $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ の原結晶の外形が残存することが認められる。a-2～a-7は、熱処理後、個々の粒子の状態を明らかにするため、メノウ乳鉢で、ごく軽く摩砕したものである。写真1-(b)のb-2～b-6は、a-1試料すなわち、 $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ を400°Cで熱処理したものを、メノウ乳鉢で摩砕後、600～1,200°Cで再び加熱処理したもので、a-2～a-6にそれぞれ対応するものである。写真2に示したc-1～c-7は $\text{Zr}(\text{OH})_4$ を、350°、500°、700°、900°、1,000°および1,200°Cのそれぞれの温度で熱処理したものである。写真3は S-ZrO_2 試料である。

これらの写真について、各試料ごとに、明らかに単一粒子と見なされるもの100個ずつの粒子の定方向径をくさび形ゲージを用いて測定した。これらの結果を、積算個数分布として図2に、また各試料の分布曲線の50%径値と、各試料ごとの全測定個数の算術平均値を表1に示した。なお粒度分布測定として各試料ごとに、100個ずつの測定は少ないが、1,200°Cの処理の試料では、1視野に含まれる個数が少なく、多数の測定は困難である。

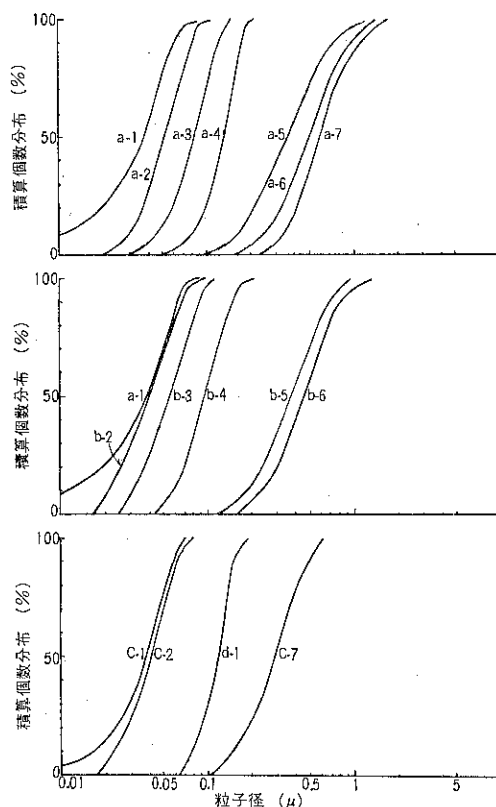


図2. 顕微鏡写真より求めた各試料積算個数分布曲線

表1. 各試料の熱処理による生成粉体の粒子径

試料	処理温度 (°C)	測定粒子径 平均値 (μ)	粒度分布曲線, 50%径値, (μ)
$\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	400	0.042	0.037
	600	0.056	0.051
	800	0.088	0.083
	1000	0.132	0.133
	1200(30)	0.422	0.36
	1200(60)	0.589	0.51
	1200(90)	0.644	0.60
$\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 400°C熱処理後 摩砕	400	0.045	0.041
	600	0.058	0.055
	800	0.108	0.097
	1000	0.414	0.37
	1200(30)	0.511	0.47
	1200(60)		
$\text{Zr}(\text{OH})_4$	0	0.042	0.037
	350	0.046	0.041
	1200	0.312	0.28
ZrO_2		0.12	0.117

【注】 処理温度中()内数値は保持時間(分)

以上の結果から、 $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 400~1,000°C の範囲内では多少の粒度の変化は見られるが1,200°Cにおいて粒成長が顕著に現われることが認められる。1,200°Cにおいては、保持時間を長くすることにより、さらに成長が進む。

一般に金属塩の分解による酸化物の生成過程については、初期加熱によって気化物が脱離して構造が破壊され、その中に反応生成物として、金属酸化物の核が生じ、その周囲に生成分子が拡散して、粒成長が起こるが、このときの反応系の温度が高いと、生成した粒子が焼結して二次粒子を作り、さらに高温に進むと、全体が単一に見られる粒子となり、粒子成長が起こるといわれている¹⁾。したがってこの場合には、約80~400°Cの範囲が、構造破壊の段階であり、400~1,000°C範囲で、生成した粒子の結合による二次粒子の形成段階、1,200°C前後ではこれらの二次粒子が単結晶粒子に成長しようとする傾向を示しているのが認められる。

$\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ を400°Cで加熱処理後、メノウ乳鉢で摩砕した試料を、さらに600~1,200°Cで、再加熱処理したものは、 $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ を600~1,200°Cで熱処理したものに比べて、粒度分布曲線が微粒側に片寄る傾向がみられる。粒子径平均値はa-2~a-6に対して、b-2~b-6ではそれぞれ対応する処理温度で小さい値を示しているが、粒度分布曲線から求めた50%径値では、逆になるものもある。これは測定値を図上に点綴するときの誤差によるものであろう。弱い外力による摩砕後、再加熱したものが、摩砕を行なわなかったものに比較して小さい値を示すことについては、メノウ乳鉢による、軽くほぐす程度の処理が、個々の形がい粒子を本質的に粉砕するとは考えられないが、粒子と粒子の間が、弱い力で結ばれている形がい粒子、たとえば見かけ上、8字形状をとっている粒子を想定すれば、これは弱い外力によって分離され単独の粒子に分けられ、粒成長の条件が少なくなるとして説明される。逆にいえば、このような弱い結合状態でも、加熱による粒成長には影響を与えることがわかる。

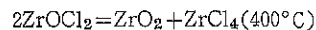
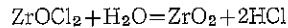
$\text{Zr}(\text{OH})_4$ の熱処理試料については、0~800°Cの範囲で、粒子径の変化は判然とは認められず、1,000°Cにおいて単一粒子が判別できるようになり、1,200°Cにおいて粒成長が認められる、しかし $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ の場合に比べて成長の程度は小さい。図2、表1に示した値は測定値としてであるが、ここでくさび形ゲージによる測定においては、印画紙上で、0.3~0.5mmが最小測定限界と考えられる。したがって×10,000の顕微鏡写真では、0.03~0.05μが測定下限値であり、それ以下の粒子は写真の鮮明度の関係もあり、ほとんど大きめに測定される

ため、特に微粒域での分布曲線は、さらに細い分布を示すはずである。また、図2における、S- ZrO_2 の分布の傾向が、 $\text{Zr}(\text{OH})_4$ 処理のものに比べて異なっていることが認められる。

2.3 熱天秤測定および化学分析

$\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ および $\text{Zr}(\text{OH})_4$ の熱天秤測定の結果を、図3に示した。装置は図4に示したような、スプリング式の装置で感量は0.5mgである。昇温速度は、300°C/hrである。

$\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ の熱分解についての報告^{2,3)}は、いろいろあり無水塩あるいは2水塩になる温度について異なった値が報告されている。高木⁴⁾は、無水塩になる温度は、140~160°Cとして、さらに大気ふん囲気中でも、水分の影響により、それぞれ



の反応が行なわれると報告しているが、湿った空気中における反応温度は明らかでない。

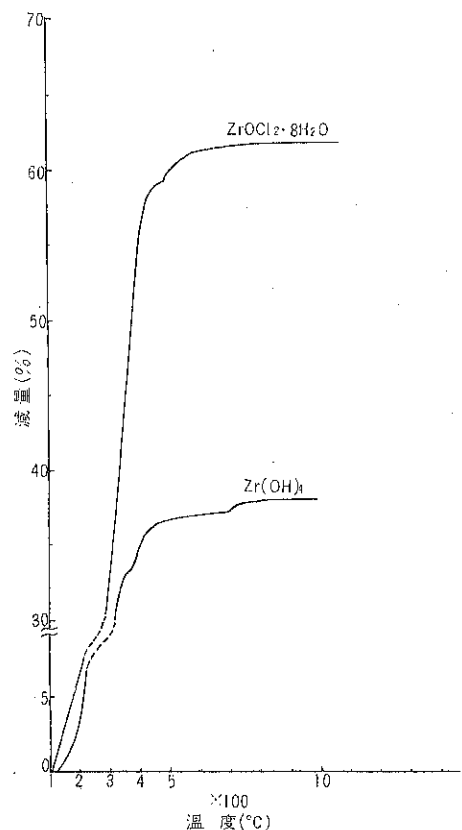


図3. $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ および $\text{Zr}(\text{OH})_4$ の熱天秤測定曲線

表 2. 各試料の化学組成

組成(%)→ 試料↓	ZrO ₂	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃
ZrOCl ₂ ・8H ₂ O 800°C 処理	99.9 以上	0.01 以下	0.01 以下	0.007
Zr(OH) ₄ 800°C 処理	99.9 以上	0.01 以下	0.01 以下	0.002
ZrO ₂ (製品)	99.9 以上	0.01 以下	0.01 以下	0.007

【注】 ジルコニア中のハフニアについては未測定である。

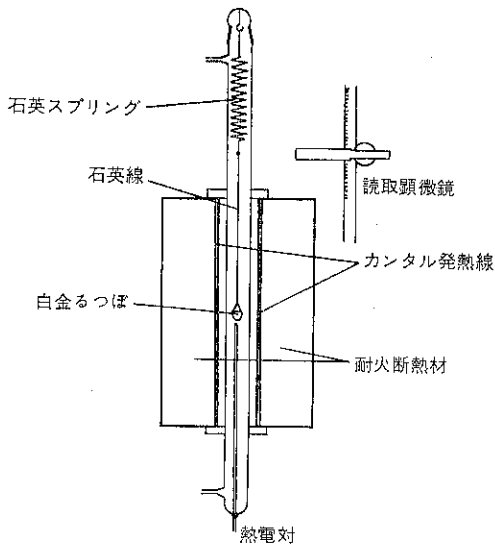


図 4. 熱天秤測定装置

ZrOCl₂・8H₂O の理論減量値は、61.76%であり、実験値は61.85%で比較的理論値に近く、また0.09%の差は付着水の影響によるものと考えられる。したがって、ZrCl₄ としての揮発は無いものと考えられる。

本研究において、ほぼ恒量に達する点は 390~400°C であることが認められた。しかし 8 水塩から無水塩になる過程については、なお不明である。

Zr(OH)₄ の場合には、理論減量値は 22.63 %である

が、凍結乾燥試料を用いたときの実測値は38.1%であった。また、この試料だけでなく、他の乾燥方法による試料の場合も、大きな実測値を示すが、各乾燥法とも、少量の試料を別にとり、適時秤量を行ない恒量になった後、乾燥を中止したので、Zr(OH)₄+xH₂Oの状態では平衡状態に達し過剰の水分が粒子の間に残存したものと考えられる。各種の乾燥方法で処理した場合の x の値を比較すると、凍結乾燥では、x=2.2 となるが、赤外乾燥の場合には x=8.69 となり、凍結乾燥<真空乾燥<デシケータ乾燥<赤外乾燥の順にその値が大きくなる傾向を示した。

Zr(OH)₄ 試料の熱天秤曲線で、恒量に達する温度は、680~720°C であった。

また、ZrCl₂・8H₂O および Zr(OH)₄ をそれぞれ 800°C にて処理した試料と、S-ZrO₂ 試料の化学分析結果を表 2 に示した。いずれの場合もその組成には、ほとんど相違がないことが認められた。

2.4 X線回折

ZrOCl₂・8H₂O および Zr(OH)₄ の未処理試料および 350~1,100°C の各温度で熱処理した試料の X 線回折図形を、図 5~10 に示した。

一般に ZrO₂ は低温においては不純物の混入、あるいは CaO, MgO などの安定剤を添加しない限り、単結晶が安定相であるとされているが、近時、低温において、正方晶の生成することが認められ⁵⁾、metastable tetra-

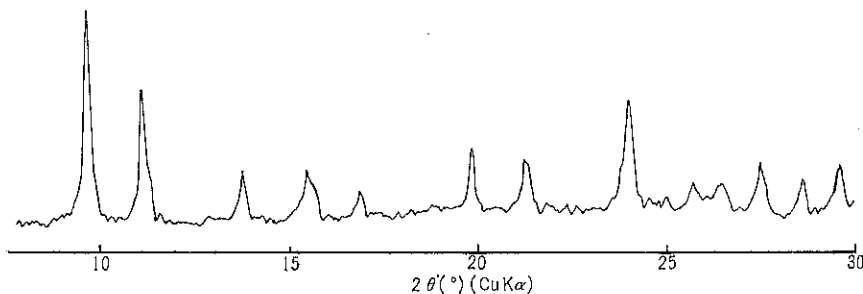


図 5. 常温における ZrOCl₂・8H₂O の X 線回折図

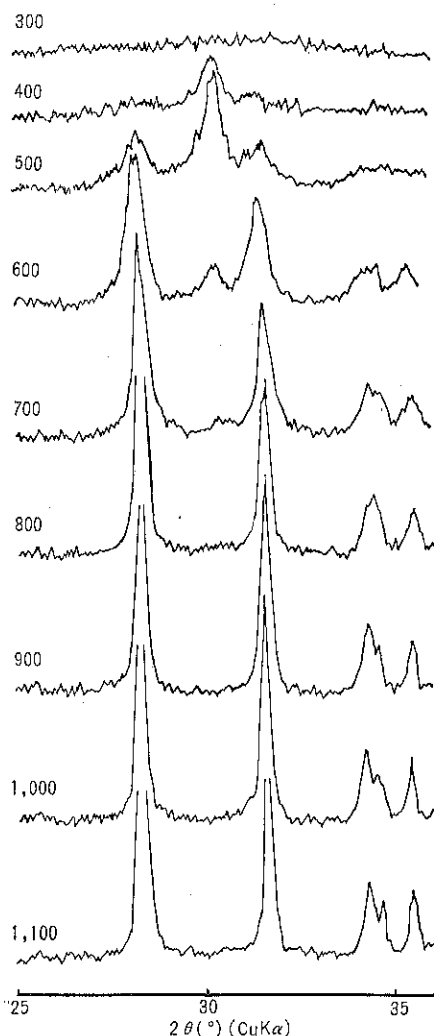


図 6. $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ を加熱処理した試料の X 線回折図
数字は熱処理温度 (°C)

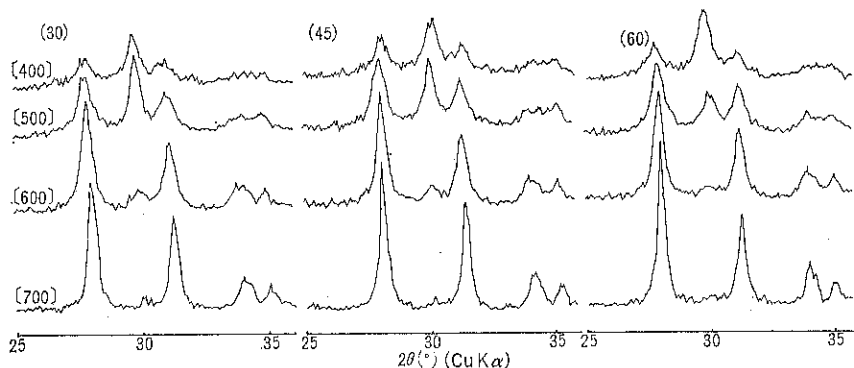


図 7. $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ の加熱保持時間を変化させた試料の X 線回折図
〔 〕 内数字は熱処理温度 (°C), () 内数字は保持時間 (分)

gonal phase と呼ばれている。しかしこれらは X 線回折図型としては、高温安定相の立方晶によるものと酷似しており X 線的に、正方晶として判然とした区別のある報告は見られない。したがってここでは、ほぼ立方晶の回折角に担当する図形を正方晶とみなすこととした。測定は、 $2\theta = 20 \sim 70^\circ$ の範囲で行なったが、図には、 $25 \sim 36^\circ$ の範囲の正方晶、単斜晶の最も特徴の出やすい範囲についてのみ記した。すなわち

正方晶 $2\theta = 30.6^\circ [111]$, $35.5^\circ [200]$

単斜晶 $2\theta = 28.3^\circ [11\bar{1}]$, $31.6^\circ [111]$, $34.3^\circ [002]$, $35.4^\circ [200]$

$\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ は常温では、図 5 の回折線を示す。これを $300 \sim 1,100^\circ\text{C}$ で熱処理した試料の回折線を、図 6 に示した。なお、図 7 に所定温度で保持時間の異なる試料を比較のために加えた。

この結果から 300°C 程度までの加熱段階では、無定形を示し、 400°C で無定形中に正方晶が現われ、 500°C において正方晶の回折線強度が強くなると同時に、単斜晶の回折線が生ずる。 600°C においては正方晶がわずかに残り、単斜晶の回折線強度が強くなり、 700°C 以上では単斜晶のみとなる。なお保持時間が長くなるにしたがい、図 8 から生成結晶相の相対量の変化が認められる。たとえば 500°C 加熱においては、時間の経過とともに、正方晶は減少し、単斜晶が増加していく。また 400°C 、60 分間保持の試料は 500°C 、15 分間保持の試料に対応する。これは保持時間による結晶相の消長を示すものと考えられる。さらに二、三の試料について、保持時間を 60 分以上で行なったが、結果は、60 分保持のものとあまり変化が認められなかった。

次に図 8 の $\text{Zr}(\text{OH})_4$ の場合には、 350°C 以下では無定形、 500°C で正方晶の回折線が強く現われ、 $900 \sim 950^\circ\text{C}$ で単斜晶が生じ、 $1,000^\circ\text{C}$ において、ほとんど単斜晶となる。しかし、注目しなければならない点は沈殿生成物

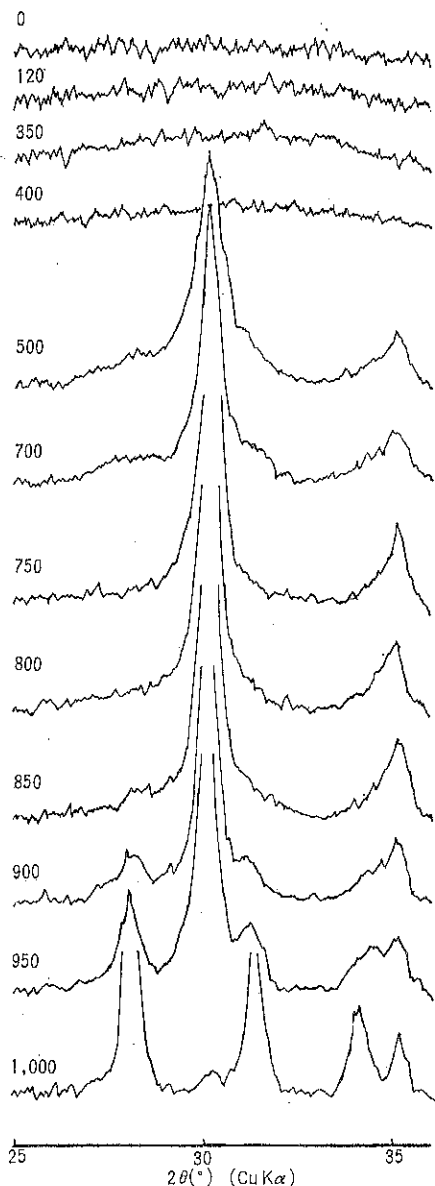


図 8. $\text{Zr}(\text{OH})_4$ を加熱処理した試料の X 線回折図
数字は熱処理温度 (°C)

からの乾燥条件によって大きな差が認められたことである。図 9 真空乾燥によるものは、凍結乾燥によるものに類似し、デシケータ乾燥と赤外線乾燥とが同じような傾向を示して、900°C において、ほとんど単斜晶のみ認められるようになる。1,000°C 以上では、ほとんど単斜晶になるが、真空乾燥による試料では、1,050°C 以上で単斜晶となる。Cypres⁶⁾ らによれば、低温型正方晶は 500°C から連続的に単斜晶に移り、800°C において、完全に転移すると報告しているが、この実験では、800°C に

おいて明らかに正方晶であり、900°C においても、大部分が正方晶である。

なお、これらの正方晶を示す試料の径時変化について、凍結乾燥による $\text{Zr}(\text{OH})_4$ を 950°C に熱処理した試料の、30日間放置後の X 線回折を、図 10 に示したが、径時変化は認められなかった。

3. 結果の考察

$\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ および $\text{Zr}(\text{OH})_4$ は熱処理温度によって生成する粒子の大きさが異なり、 $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ の場合は 400°C で約 0.01~0.04 μ のものが、1,000°C 程度まで徐々に大きくなり、1,200°C で粒成長が顕著になり 0.5~1 μ 、さらに保持時間が増えるにしたがって、粒成長は促進し、1~2 μ 程度までになる。

$\text{Zr}(\text{OH})_4$ の場合、電子顕微鏡写真による微粒子部分の判別測定は非常に困難であり、測定方法の下限值以下の微粒が多く含まれるので、誤差が大きく、数値として示すことは無理であると考えられるが、350~700°C の加熱処理では、だいたい <0.01~0.03 μ であると思われる。1,000°C 前後で、単一粒子の判別ができるようになり、0.1 μ 程度、1,200°C で 0.3~1 μ までに成長する。 S-ZrO_2 試料の場合も、積算個数分布曲線は、 $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Zr}(\text{OH})_4$ のものと比較して、粒度分布の範囲が狭いが、これは熱処理中、かきまぜながら加熱されるので、温度分布が均一状態になり、さらに粒成長が、さまたげられるためと考えられる。化学分析の結果は、いずれも差が認められず、高純度のものが得られたが、この場合の 3 試料を粉体性状的に比較した場合、流動性、安息角などに相違が認められた。これは結晶系、粒子径などの相違によるものと考えられる。

結晶系については、保持時間の影響も考えられるが、比較的短時間の保持による加熱について観察すれば、 $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ では、約 80~350°C の間は無定形であり、400~450°C で正方晶、550~600°C 以上単斜晶となる。

$\text{Zr}(\text{OH})_4$ では、0~350°C で無定形、400~850°C で正方晶、1,000°C 以上で単斜晶となる。Cypres⁶⁾ らは、 $\text{Zr}(\text{OH})_4$ の加熱分解によって得られる、正方晶の安定の原因を、 OH^- イオンの存在の影響としている。熱天秤測定の結果では、700°C 以上の温度で恒量になり、この恒量状態で、正方晶がさらに単斜晶となるが、700°C 以上の正方晶存在の温度範囲でなお OH^- イオンが存在するか、否かについては十分検討する必要がある。

一方 Garvie⁷⁾ は正方晶の低温における安定要因を、粉体の粒子径効果にあるとしている。この低温型正方晶が存在するときの粒子は、常に数 10~数 100 Å の範囲の超微粒子で、この場合きわめて大きな比表面積を持って

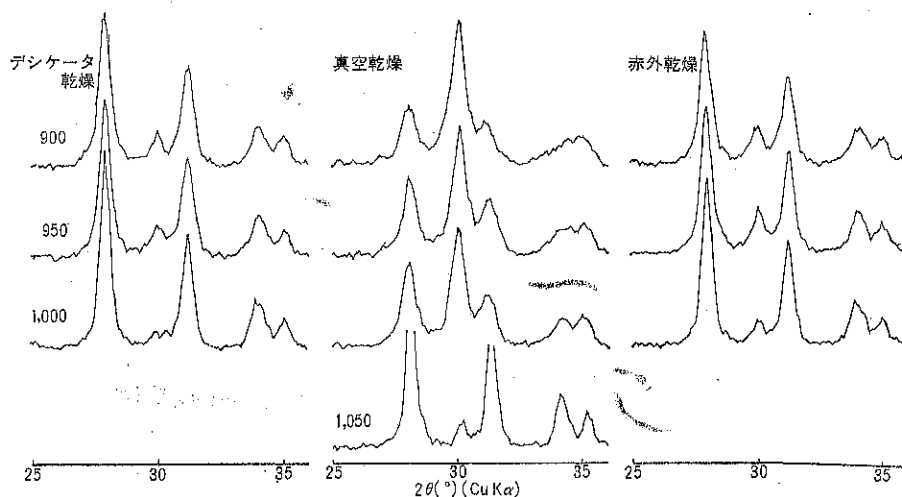


図 9. 乾燥方法の異なる $Zr(OH)_4$ の相転移温度の変化
数字は熱処理温度 (°C)

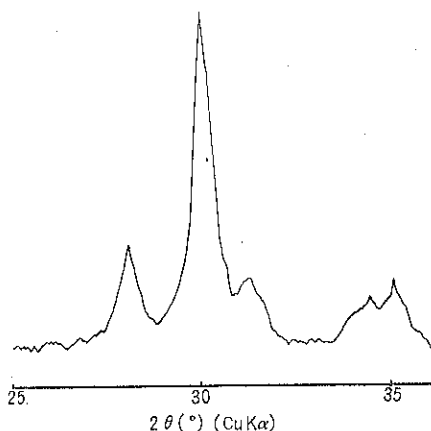


図 10. $Zr(OH)_4$ 凍結乾燥後 950°C に熱処理した試料 30 日後の X 線回折図

いるため、表面エネルギーが、格子エネルギーに比べて無視できない大きさとなり、これが正方晶を安定させているものと述べている。本研究では、 $Zr(OH)_4$ 沈殿物の乾燥方法の相違によって、加熱による正方相と、単斜相の相対量が異なり、また転移温度も変化する傾向を示した。凍結乾燥と真空乾燥の両方法および、デシケータ乾燥と赤外線乾燥の両方法は、それぞれ傾向が類似し、前の二方法は、後二方法に比較して正方晶が高温域でも安定であることが認められる。凍結乾燥あるいは真空乾燥では、ゲル状粒子が固定され、粒子内の移動がさまたげられて凝結が進みがたい傾向を持ち、他方デシケータ乾燥あるいは赤外線乾燥によると、比較的高い温度で乾燥されることになり、ゲル状粒子が固定されがたく、水分の表面張力などの影響により凝結が進み、粒成長の可

能性の条件が多くなると考えられる。したがって以後の加熱においても、これらの結果が粒成長に影響すると考えられる。

これらの結果を総合すると、低温正方晶の存在の領域は微粒子の大きさに関係があると考えられる。

4. ま と め

ジルコンを出発原料とし、一連の製造工程中の中間物として造られる、 $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ 、 $Zr(OH)_4$ および最終製品として得られる ZrO_2 について、原料処理および熱処理の相違による粒度の変化、粒成長および相転移などについて検討を加えた。

1) $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ および $Zr(OH)_4$ は熱処理によって、生成粒子の大きさが異なり、 $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ では、400°C で 0.01~0.04 μ 、1,200°C で 0.5~1 μ 、また保持時間 90 分で 1~2 μ までになる。 $Zr(OH)_4$ は 350~700°C で <0.01~0.03 μ 、1,200°C で 0.3~1 μ までになる。

2) $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ および $Zr(OH)_4$ はいずれも熱処理によって低温型正方晶の存在が認められた。 $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ では正方晶の存在する温度範囲は、400~450°C である。

$Zr(OH)_4$ では 400~1,050°C であるがこの場合は乾燥方法によって正方晶の存在する温度領域が変化する。

3) 低温型正方晶の存在領域は微粒子の大きさに関係があると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 荒川正文：粉体工学研究会誌，4，No. 3，54 (1967). (7頁へ続く)

回分式堅型リボン混合機の混合特性

大阪府立大学工学部

矢 野 武 夫

佐 藤 宗 武

立 石 享 司

1. はじめに

スクリューやリボン羽根による攪拌式固定型混合機は水平円筒型やV型など回転型混合機と共に広く用いられており、微粉体や湿潤粉体あるいは物性の異なった粉体同志間の混合に対しても有効であるとされている。

回転型混合機については従来から多くの研究者らにより種々の型式、操作条件に対する混合性能やフローパターンなどの報告があるのに対して、固定型混合機については研究が少なく、横型のリボン混合機¹⁾および回分式スクリュー型混合機²⁾の混合特性の実験的検討などが最近報告されたにすぎない。

ここでは固定型混合機の基礎実験として形式が簡単でしかも連続化が容易な堅型リボン羽根攪拌混合機を用いて二成分の粉体の回分混合実験を行なった。そしてリボン形状、回転速度、粉体仕込み方法などが混合曲線および混合速度係数、最終混合度などに及ぼす影響を検討した。また、これまで行なわれた他のいくつかの形式の混合機の混合性能との比較も行なった。

2. 実験装置および実験方法

本実験に使用した装置の概略を図1に示した。図に見るよう混合機は円筒内にリボン羽根を垂直に取りつけた攪拌槽である。攪拌槽本体は内径140mm、高さ270mmのアクリル樹脂製円筒で、槽底中央部に攪拌羽根軸受を取りつけ、槽全体を可動式の台上に固定した。

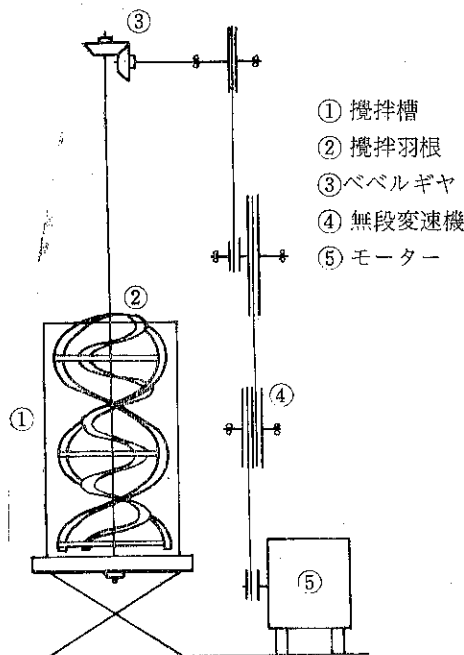


図1 実験装置

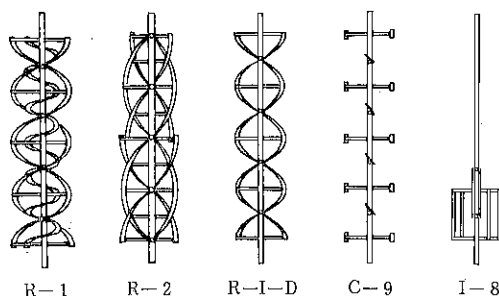


図2 リボン型式

攪拌羽根は、モーターおよび無段変速プーリー、ベベルギヤにより30~100 r. p. m. の回転速度に調節できるようにした。攪拌羽根の形状は図2にその概略を示したが、内外両巻きの二重巻きリボン (R-1, R-2型)、外巻きのみのリボン (R-I-D型)、先端に掻き取り翼のついた櫛型 (C-9型) および櫛状 (I-8) などを使用した。R-1型についてはピッチの異なった二種を用いた。これらのリボン羽根の代表寸法を表1に示し

表1 攪拌羽根寸法 (mm)

リボン型式	外 巻 リ ボ ン				内 巻 リ ボ ン			
	外径	内径	幅	ピッチ	外径	内径	幅	ピッチ
R-1-18	118	104	7	180	79	59	10	60
R-1-6	118	104	7	60	79	59	10	20
R-2	118	98	10	360	98	78	10	360
R-I-D-18	118	104	7	180	—	—	—	—
C-9	118	78	20	—	—	—	—	—
I-8	118	102	8	—	—	—	8	—

表2 粉体物性値

粉体試料	粒径範囲 (メッシュ)	真密度 (g/cm ³)	見掛け密度		安息角 (度)
			最大	最小	
豊 浦 砂	-42/+150	2.67	1.50	1.34	32.3
炭酸ソーダ	-42/+150	2.61	0.956	0.816	38.3

た。

混合実験に使用した粉体試料は42~150メッシュに篩分けた豊浦標準砂および粒状炭酸ソーダで、それらの代表的物性値を表2に示した。

混合実験では攪拌リボンを取りつけた混合槽に予め粉体を攪拌槽内を高さ方向に上からI~V層に区別し豊浦砂2250gと炭酸ソーダ250g(重量比9:1)の合計2500gを図3に示すような方法で炭酸ソーダをいずれかの一層に水平に挿入し、粉体層高さを約120mmにした後、リ

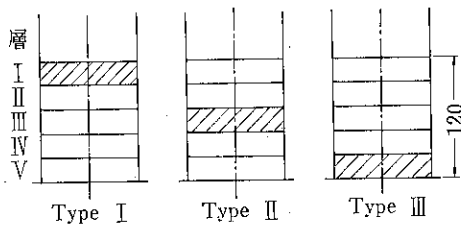


図3 炭酸ソーダ仕込み位置

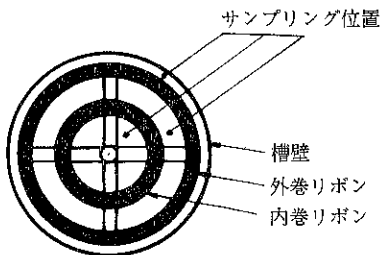


図4-a サンプリング位置



図4-b 5点用サンプラー

ボンの回転を開始した。

槽内のサンプリングは図4-bに示すような5点用サンプラーを用いて各層からと図4-aに示した半径方向に中心軸付近、リボンの間隙および槽壁面近くの3箇所合計15点を1時点について行なった。一点のサンプルは約70mgで、これを正確に秤量した後、温水で炭酸ソーダを溶解してメチルオレンジを指示薬として約0.25規定の塩酸で滴定しサンプル濃度 C_i (wt%) を求めた。なお、回転速度は30, 60, 100 r. p. m. の3種類に変化させた。

3. 混合曲線および混合速度係数、最終混合度

各混合時刻における槽内の炭酸ソーダの局所的濃度 C_i の平均濃度(仕込み濃度) C_0 に対する標準偏差 σ は次式から求めた。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - C_0)^2} \quad (1)$$

ただし、 n : サンプル数 (15個)

C_i : サンプル濃度 (wt%)

C_0 : 平均濃度 (仕込み濃度)

(1) 式で算出した σ を混合時間 θ または総回転数 $N\theta$ に対して片対数点綴して得た混合曲線 $\sigma-\theta$ (または $N\theta$) から近似的に混合開始初期の σ が直線的に減少すると見做し、その部分の勾配から直接混合速度係数 φ (1/min) を求めた。すなわち混合速度が近似的に標準偏差 σ の値の大きさに比例するという速度式(2)式が得られた。

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = -\varphi\sigma \quad \varphi: \text{混合速度係数} \quad (2)$$

次に、十分に混合した後到達し得る最終混合度 M_∞ の算出には、次の(3)式の混合度表示法を用い、

$$M = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (3)$$

ただし、 $\sigma_0 = \sqrt{C_0(100 - C_0)}$

混合度 M の値がほぼ定常値になった後の値を平均して M_∞ の値を求めた。さらに標準偏差の最小値 $\sigma_{\min}$ 、および最終混合度 M_∞ に到達するに要する総回転数 $N\theta_{\min}$ 、 $N\theta_\infty$ もグラフ上から求めた。

4. 実験結果と考察

4.1 混合速度、混合度に及ぼす攪拌速度および仕込み位置の影響

壁型リボン混合機の混合性能を調べるに当たり、まずこ

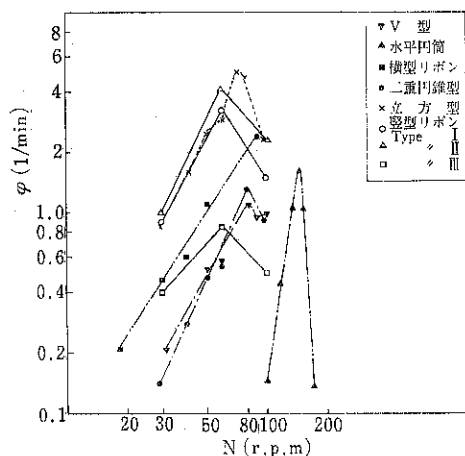


図8-a ϕ 対N

立方型と同じ位であった。回転速度については 60 r. p. m. の時に最も大きく、次いで 100, 30 r. p. m. の順であった。同じリボンを横型として使用した場合には約 100 r. p. m. で縦型と一致した。V層仕込みでは、30, 60 r. p. m. の場合V型および二重円錐型より混合速度は大きい、それ以上では小さくなった。このことから縦型リボン混合機では比較的低速度でも初期の混合速度を大にすることができることがわかった。

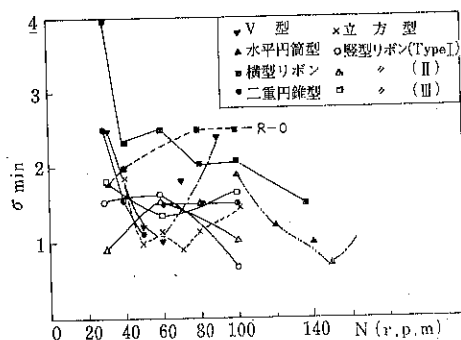


図8-b $\sigma_{\min}$ 対N

次に最小混合度 $\sigma_{\min}$ を図8-bに示したが、 $\sigma_{\min}$ は他の混合機とほぼ同じようにNの増加と共に減少し60 r. p. m. では仕込み位置によってあまり変化がなかった。リボンを横型として使用した場合には縦型の場合に比べてやや大きい値であった。 $\sigma_{\min}$ に到達する $N\theta_{\min}$ については図8-cのように正立方型を除けば他の型式の混合機より低回転速度で小さく、また各攪拌速度共にⅢ層仕込みⅠ層、V層仕込みの順に増大した。横型リボンとは60 r. p. m. 以上でⅠ層仕込みの時に $N\theta_{\min}$ がほぼ同一値であった。最終混合度 M_{∞} については図8-dに示

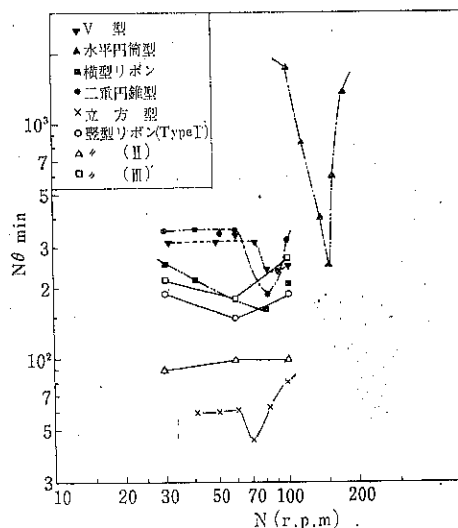


図8-c $N\theta_{\min}$ 対N

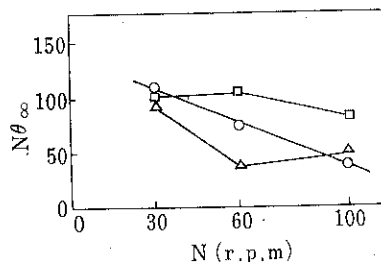


図8-e $N\theta_{\infty}$ 対N

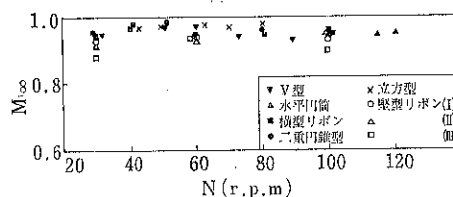


図8-d M_{∞} 対N

したように低回転速度30 r. p. m. では他の型式の混合機よりやや小さい値を示したが、V層仕込みを除くといずれの場合にも 0.9 以上の値で良好な混合状態を得、混合機型式の間の差はあまり認められなかった。最後に M_{∞} に到達する $N\theta_{\infty}$ は図8-eに示したように攪拌速度の大きい場合には早く良い混合状態になる傾向を得た。

4.2 リボン形状の影響

前節において二重巻きリボンのR-1-18について攪拌速度および炭酸ソーダ仕込み位置のちがいによる混合状態の変化を検討したが、ここではさらに攪拌羽根の形状を変えた場合について検討した。

リボン羽根による混合槽内の混合進行過程は、外壁面での粉体の上昇流と中心部における下降流による効果が大きいと考えられるので各々の搅拌羽根の特徴が最も現われやすい仕込み方法の場合として第Ⅶ層 (Type Ⅲ) に炭酸ソーダを仕込み、搅拌速度を 30 r. p. m. 一定として実験を行なった。使用した搅拌羽根は二重巻きリボン、外巻きのみのリボンまたピッチの大きいリボンさらに極端に羽根面の小さい掻き取り羽根状のものなどである。これらの搅拌羽根による混合曲線の例を図 9 に σ - $N\theta$ 曲線として示した。

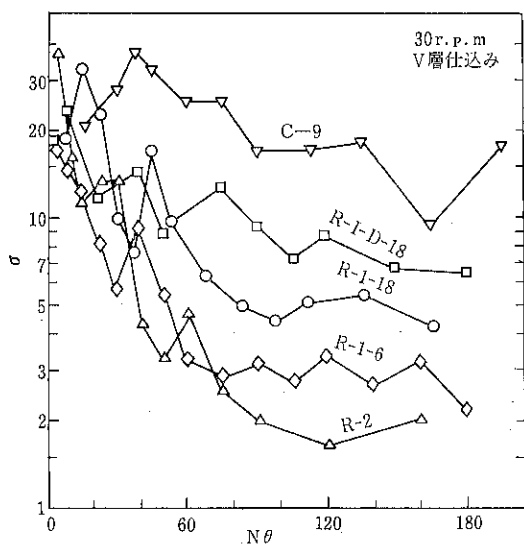


図 9 σ 対 $N\theta$

図から R-2, R-1-6, R-1-18 の二重巻きリボンの場合には混合速度は比較的大きく $\sigma_{\min}$ も小さかったが外巻きリボンのみの R-I-D-18 の混合速度はかなり小さくしかも σ が定常になるのに相当に時間がかかった。また、羽根の先端部のみが有効な C-9 の場合には搅拌開始からほとんど壁面の循環流が認められず σ はわずかに減少するのみで定常値にはならなかった。

これらの羽根について仕込み位置を I, Ⅲ 層とした場合も同様の傾向を示したが、二重巻きリボンのうち、リボンピッチの大きい R-1-18 の方がピッチの小さい密に巻かれた R-1-6 に比較して混合速度および $\sigma_{\min}$ が良好な値を示した。なおリボン羽根と比較のため、ねじれのない櫛状の羽根を用いて 30 r. p. m. Ⅲ 層仕込みの条件で実験をしたところ混合速度はかなり大きくなり、羽根によるかき上げおよび粉体層の剪断が混合に有効であることを示した。

次に最終混合度 M_{∞} について各々の搅拌羽根を比較して図 10 に示した。二重巻きリボンについては $N\theta_{\infty}$ は異

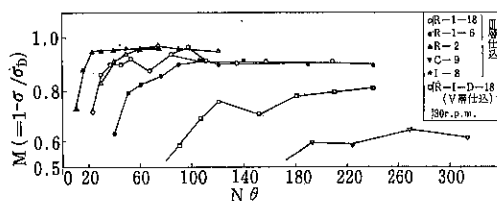


図 10 各搅拌羽根に対する M 対 $N\theta$

なっても M_{∞} はほぼ一定の 0.9 に近づいたが一重巻きおよび櫛型では M_{∞} は一定にならず従って $N\theta_{\infty}$ も大になった。またリボンピッチの大きい場合 M_{∞} は大きく、また $N\theta_{\infty}$ は小さく、良好の混合状態が得られた。

以上の実験結果からリボン羽根の形状が混合の良否に影響することがわかったので、各リボンの形状を代表するものとして外巻きと内巻きのリボンピッチの平均値 P_m (mm) を概略値として計算し、この値と φ , $\sigma_{\min}$, M_{∞} について図 11 に示した。ピッチの大きい場合には

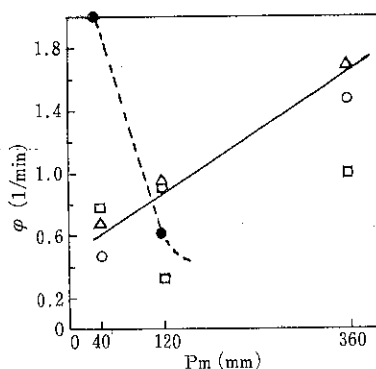


図 11-a φ 対 P_m

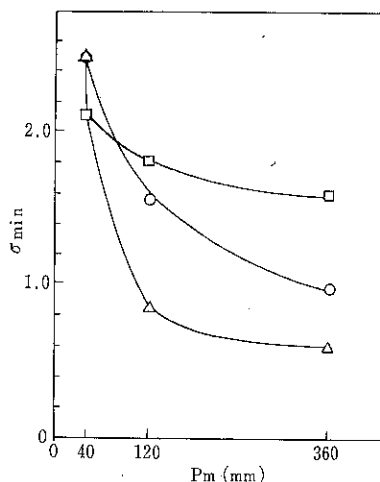


図 11-b $\sigma_{\min}$ 対 P_m

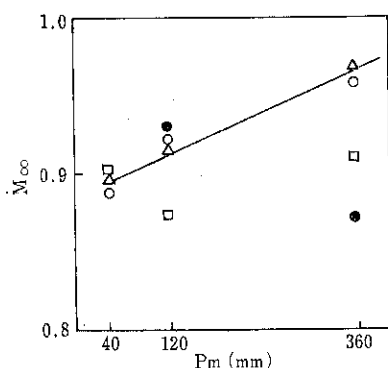


図11-c M_{∞} 対 P_m

図11 a～c の記号

30r.p.m.			
○	I	層仕込み	Type I
△	III	〃	〃 II
□	V	〃	〃 III
●	横型リボン (40r.p.m.)		

リボンの1回転当りの上下に輸送される距離が大きくなると予想され、図11-aに示すように槽全体としての ϕ が大きくなり、このリボンを横型で使った場合の実験結果であるピッチの小さい時に ϕ が大きくなったという事とは異なった結果を得た。またリボンピッチの大きい場合は羽根面上での粉体のたまりが少なく、粉体層に対する剪断効果が大きくなり $\sigma_{\min}$ および M_{∞} 共に良好な結果を得ることができた(図11-b, 図11-c)。

5. おわりに

堅型リボン混合機の混合特性を豊浦砂と炭酸ソーダの二成分系粉体を使用して検討した。その結果、次のような事がわかった。

- i) R-1-18型リボンによる混合曲線は回分式スクリュ-型混合機の混合曲線に類似していた。また、横型リボン混合機より混合速度も速く、堅型の方が優れていると予想された。
 - ii) 各攪拌羽根ともに攪拌速度は60 r. p. m. のときに良好な混合状態が得られた。
 - iii) リボン形状としては、単純なものより二重巻きリボンの方が良好であり、リボンピッチは大きい程性能が良かった。
 - iv) 回転型および横型リボンなど他の型式の混合機と比較すると堅型リボン混合機の混合速度はかなり大きく、 $\sigma_{\min}$ および $N\theta_{\min}$ は小さく、 M_{∞} も大きく、60 r. p. m. 以下の低攪拌速度でもかなり良好な混合性能が期待できた。
 - v) 堅型リボン混合機内の粉体の運動を実験結果から推定すると、羽根面による粉体の押し出しと剪断効果が主な混合機構となることを示し、羽根またはリボン取り付け角度の大きいものほどこの効果が期待できた。
- なお、このような羽根は当然攪拌トルクが大となることが予想され、剪断面を増加させる目的で羽根を極端に大きく、また複雑化すると、粉体層全体が羽根と共に回転するという現象も起ってくることも推測された。

参考文献

- 1), 4) 佐納: 学位論文 (1965)
- 2) 矢野ら: 粉体工学研究会誌投稿中 (1971)
- 3) 蟹瀬: 学位論文 (1959)

(25頁よりの続き)

謝辞:

本研究に当りミクロンセパレーター (MS-0型) の借用を許可された細川粉体工学研究所に対して謝意を表します。

参考文献

- 1) N. F. Fuchs: The Mechanics of aerosols (Perg-

amon) 353 (1964)

- 2) Orr: Particulate Technology (Macmillan) 106 (1966)
- 3) 神保, 藤田: 日本機械学会誌 72 1652 (1969)
- 4) 神保, 藤田: 日本機械学会誌 72 1731 (1969)

エジェクターフィーダーによる粉体の分散 (速報)

静岡大学工学部

渡辺 始, 中田 好洋, 高橋 和士

1. は し が き

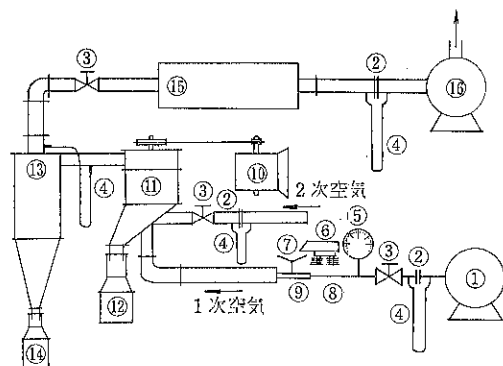
ここで分散 (Dispersion) とは凝集粒子が何らかの外力によって破壊され、単一粒子に近づいて行く過程をいう。乾式 (風力) 分級を行う時、粗粉の分級効率の低下の原因の1つとして、原料が分級帯に入る前に十分単一粒子に迄分散されず、微粉の一部が凝集したままで見掛け上粗粉として分級され、粗粉側に出ることがあげられる。

分散の研究は若干の人々によって研究されてきたがまだ定量的研究は不十分と思われる¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。

筆者等はエジェクターフィーダーの吸引力と加速力を利用して、供給と分散を同時に行なわせる方法について研究を行なっているのでその結果を速報する。

2. 実験装置及び方法

実験装置の概略を図1に示す。エジェクターフィーダー



- | | |
|----------------|----------------------|
| ① コンプレッサー | ⑨ エジェクターフィーダー |
| ② オリフィス | ⑩ モーター |
| ③ 仕切弁 | ⑪ ミクロンセパレーター (MS-O型) |
| ④ マノメーター | ⑫ 粗粉ボックス |
| ⑤ 圧力計 | ⑬ サイクロン |
| ⑥ マグネティックフィーダー | ⑭ 微粉ボックス |
| ⑦ 供給口 | ⑮ バッグフィルター |
| ⑧ ノズル | ⑯ ブロワー |

図1 実験装置

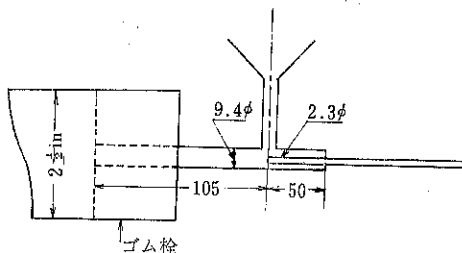


図2 エジェクターフィーダー

一の詳細図は図2に示す。エジェクターフィーダーの本体は硝子製である。ノズルの内径は2.3mmで先端を粉体供給ホッパーの真下に固定した。

試料は工業用炭酸カルシウムで密度 $2.72\text{cm}^3/\text{g}$ 、比表面積平均径 4.1μ 、粒度分布は光透過法で測定したものを図3に示す。

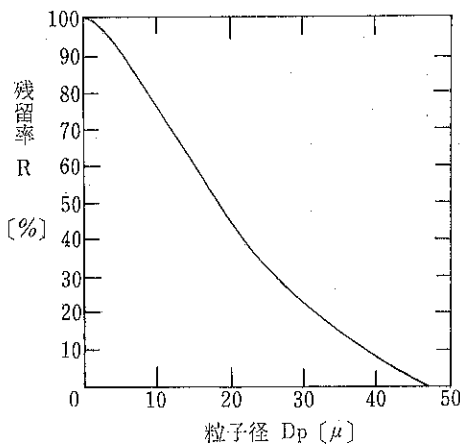


図3 試料炭酸カルシウムの粒度分布

実験はこの炭酸カルシウム 100g を電磁フィーダーからエジェクターフィーダーのホッパーに約2~3分で供給した。エジェクターフィーダーのノズル流速は0から220m/sまで変化させた。分散された供給粉体は1次空気と共にミクロンセパレーター (MS-O型) に入り分級される。ミクロンセパレーターの操作条件はローターの回転数1,050 r. p. m., 1次空気量 $3.6\text{m}^3/\text{min}$, 2

次空気量 $2.4\text{m}^3/\text{min}$ で行なった。分級された粗粉と微粉は夫々重量を計測したが、回収率は約90~95%で微粉の1部がサイクロンで捕集されず、にげていることがわかった。

粗粉の1部をとって比表面積を測定し、比表面積平均径を求めた。ふん囲気はすべて室内のそれで、相対湿度は約60~80%であった。

又供給粉体が1次空気と共にミクロンセパレーターに入る迄管底、管壁に沈積、付着するのを防止するために外部から管をハンマーで実験中たいた。

3. 実験結果及びその検討

比表面積平均径 $\bar{D}_a$ とノズル流速の関係を図4に示す。実線は4回の実験値の算術平均値をプロットしたも

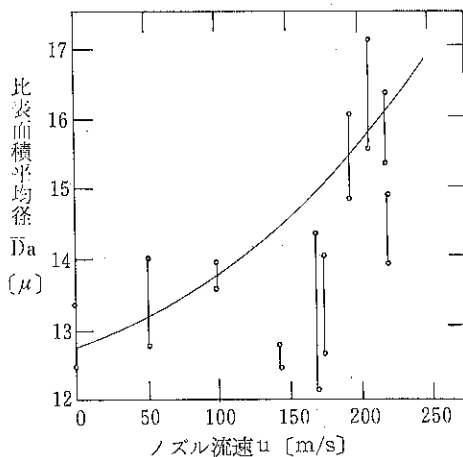


図4 $\bar{D}_a$ vs u

のである。これらのデータはばらついてはいるが、ノズル流速が大になるにつれて $\bar{D}_a$ が大きくなる。すなわち粗粉中に混在する微粉が少なくなっていることを示している。

次に分散度 η を次の様に定義した。

$$\eta = \frac{\bar{D}_{aj} - \bar{D}_{ao}}{\bar{D}_{ao}} \times 100 \dots \dots (1)$$

$\bar{D}_{aj}$: エジェクターフィーダーを使った時の粗粉の比表面積平均径 $[\mu]$

$\bar{D}_{ao}$: エジェクターフィーダーを使わぬ時の粗粉の比表面積平均径 $[\mu]$

η とノズル流速との関係を両対数グラフにプロットしたのが図5である。これから求めた実験式は次の様になった。

$$\eta = 2.6 \times 10^{-2} u^{1.2} \dots \dots (2)$$

以上の結果を総括して考察を加えると、一応ノズル流速による比表面積平均径の変化は出ているが、この時の

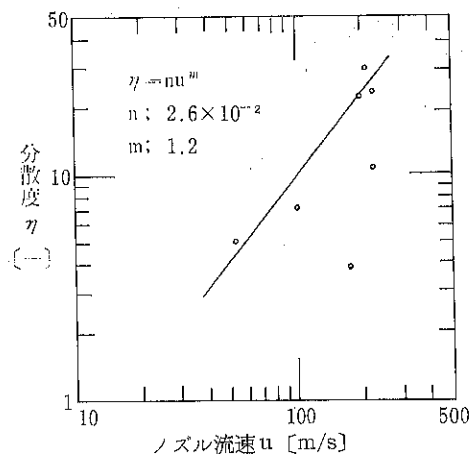


図5 η vs u

データのばらつきを考えるとはっきり結論を出すには問題がある。理由はこの分級機ミクロンセパレーターはローターを回転させて、その遠心力と気流による求心方向の粉体抵抗のバランスによって、その理論限界粒径が求められるのであるが、このローターの回転が凝集粉体の破壊に効果をあらわす。特に凝集力、付着力の大きな微粉の分級の場合にはローターの回転数を大にしなければならない。例えば予備実験で行なった沈降性炭酸カルシウム $D_{p50} = 8.2\mu$ の分級では回転数を2,000 r. p. m. 以上にあげなければならなかったが、この場合にはこのノズル流速範囲での分散効果はローターの回転力による破壊作用に消されてしまうことが判明したので、この研究ではローターの回転数を1,050 r. p. m. におとして行なったのであるが、まだ相当破壊作用ははたらいて、データがばらついたのではないかと考えている。

次に気流中の凝集粒子の分散は気流が粉体に及ぼす力によるが、これをこの研究の場合にあてはめると次の3つがあげられる。

- (1) 粉体と流体の速度差による抵抗力 F_R ³⁾: これは $F_R \propto (u - u_p)^2$ となる。
 - (2) エジェクターフィーダーによる吸引力による分散作用
 - (3) 乱流せん断場における応力による分散作用³⁾
- これらの3つのうち特に効果があるのは(1), (2)であろう。

結果を見ると $\eta \propto u^{1.2}$ で u^2 には比例しないから(2)の効果があるのではないかと考えられる。

今後ノズルの位置を変えたり、流速を変えたりして実験的研究及び理論的研究を続ける予定である。

(25頁へ続く)

閉回路粉砕プロセスの解析

大阪府立大学・工学部

宮 南 啓

矢 野 武 夫

1. 緒 言

粉粒体製造工程において広く用いられている閉回路粉砕プロセスは、製品（精粉）の粒度分布の調整がある程度まで自由に行なえること、処理量当りの動力費が閉回路粉砕プロセスよりも少なく経済的に運転できること、および過粉砕を避けることにより粉砕能力を増加させ得るという特長を持っている。他方、その実施にあたっては、分級機や輸送設備などの経費が余分に必要となってくる。閉回路粉砕プロセスにおいては、製品の粒度分布を一定にしたとしても、粉体の粉砕機通過量をどうするか、あるいは分級機の精粉回収率をどう設定するかによって単位時間当りに得られる製品の量（挽上量）が変化する。一方、粉砕機の所要動力は媒体投入量などの内部条件を変えない限り粉体通過量によってほとんど変化しない。したがって、挽上量が動力原単位すなわちプロセスの経済性にもっとも大きな影響を与えるといわれている。

閉回路粉砕プロセスにおけるこれら諸変数の間の基本的な関係については、系の行列表示に基づく解析がすでに小沼^{1,2)}によって行なわれているが、その対象は粉砕機と分級機が各一個のプロセスに限られている。そこで、われわれは複数個の粉砕機と分級機によって構成されている閉回路粉砕プロセスの行列表示による解析を試み、粉砕機および分級機が各一個から成る粉砕機前置式基本プロセスへの等価変換法を導出した。また、電子計算機の使用を前提としたプロセスの行列表示式の解法および実際の操業データからの各行列要素の決定法を与えた。さらに、この方法を用いて挽上量対粉砕機通過量比の設定可能範囲について検討を加えるとともに、プロセスの最適設計に関する若干の考察を行なった。それらの結果について報告する。

2. 閉回路粉砕プロセスの行列表示—記号の定義

いま、Fig. 1 に示すような粉砕機および分級機が各一個から構成される基本的な閉回路粉砕プロセスを考え、各変数の記号をつぎのように定義する：

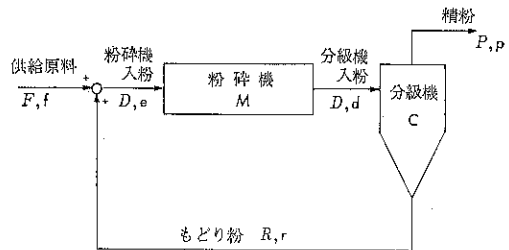


Fig. 1 基本閉回路粉砕プロセス

F : プロセスへの原料供給速度 [tons/hr]

D : 粉砕機あるいは分級機に入る粉体の供給速度 [tons/hr]

R : 分級機で分離された粗粉（もどり粉）が粉砕機にもどされる速度 [tons/hr]

P : 精粉（製品）の生産速度 [tons/hr]

f : 供給原料の粒度分布を表す擬似ベクトル。たとえば、供給原料 W gr. 中に [—]

h_1 mesh 以上が w_1 gr.

$h_1 \sim h_2$ mesh が w_2 gr.

$\vdots$

$h_{j-1} \sim h_j$ mesh が w_j gr.

$\vdots$

h_{n-1} mesh 以下が w_n gr.

(ただし、 $h_1 < h_2 < \dots < h_{n-1}$)

あったとすれば、 $f_j = w_j / W$ として

$$f = (f_1, f_2, \dots, f_j, \dots, f_n)^T, \quad \sum_{j=1}^n f_j = 1$$

で表わす。すなわち、粉体の粒径分布を適当な粒径区間における割合で表わし、その割合を粗い方から順にならべたものである。各 f_j ($j=1, 2, \dots, n$) がすべて互いに独立ではなく、 $\sum f_j = 1$ であるから f は厳密な意味でのベクトルではない。したがって、以下の数式上の取り扱いにおいては十分に注意しなければならない。

e : 粉砕機入粉の粒度分布を表わす擬似ベクトル

[—]

d : 分級機入粉の粒度分布を表わす擬似ベクトル

[—]

r : もどり粉の粒度分布を表わす擬似ベクトル

[—]

p : 精粉の粒度分布を表わす擬似ベクトル [—]

これら f , e , d , r および p はすべて同一の粒径範囲に基づくものでなければならない。

M : 粒度分布 e の粉体が粉砕機で粉砕されて分布 d になる操作を表現するマトリックスであって、粉砕マトリックスと呼ぶ。粉砕機入粉中の第 j 番目の粒群 De_j のうち、粉砕されて分級機入粉の第 i 番目の粒群に入ったものの量を Dd'_{ij} とすると、 M の要素 M_{ij} は

$$M_{ij} = Dd'_{ij}/De_j, \text{ あるいは } d = M \cdot e$$

で定義される。 $i < j$ では $M_{ij} = 0$ であるから M は三角行列である。また、物質収支より

$$\sum_{i=1}^n M_{ij} = \frac{1}{e_j} \sum_{i=1}^n d'_{ij} = 1$$

が成立する。 M_{ij} は主として粉砕機通過量の関数であり、入粉の粒度分布にも多少影響を受けることが予想される。

C : M と同様にして、分級機入粉の第 j 番目の粒群 Pd_j のうち分離されて精粉の第 i 番目の粒群に入ったものを Pp'_{ij} とすると

$$C_{ij} = Pp'_{ij}/Pd_j \text{ あるいは } Pp = DC \cdot d$$

で定義される分級マトリックス。分級機内で粉化がないとすれば、 $i < j$ で $C_{ij} = 0$ となり、 C は対角行列となる。 C_{ij} も主として入粉量の関数であると考えられる。

3. 基本閉回路粉砕プロセスの解析

Fig. 1 に示す基本的な閉回路粉砕プロセスについて、各粒群に対する物質収支をとると定常状態では(1)式から(4)式が成立する:

$$Dd = Pp + Rr \quad (1)$$

$$De = Ff + Rr, F = P \quad (2)$$

$$d = M \cdot e \quad (3)$$

$$Pp = DC \cdot d \quad (4)$$

これらの式から R , r , e および d を消去して整理すると

$$(I - M) \cdot C^{-1} \cdot p = M \cdot (f - p) \quad (5)$$

あるいは

$$\{(I - M) \cdot C^{-1} + M\} \cdot p = M \cdot f \quad (6)$$

を得る。ここで、 I は単位行列である。

(5)式あるいは(6)式を解くにあたっては、つぎの二つの場合が考えられる。

3.1 M , f および p が与えられていて C を求める場合
この場合には(5)式から

$$(I - M) \cdot \begin{pmatrix} p_1/C_{11} \\ \vdots \\ p_j/C_{jj} \\ \vdots \\ p_n/C_{nn} \end{pmatrix} = M \cdot (f - p) \quad (7)$$

となり、形式的には (p_j/C_{jj}) を未知数とする連立一次方程式が得られる。したがって(7)式を (p_j/C_{jj}) について解けば各 C_{jj} を決定することができる。しかしながら、行列 $(I - M)$ の階数は n ではなくて $(n - 1)$ であり、また、 (p_j/C_{jj}) , f および p の各要素がすべて独立ではないから(7)式を形式的な行列演算で解くことはできない。そこで、いま(7)式を各要素ごとに展開した形にすると(8)式ようになる。

$$-\sum_{i=1}^{j-1} M_{ji} \frac{p_i}{C_{ii}} + (1 - M_{jj}) \frac{p_j}{C_{jj}} = \sum_{i=1}^j M_{ji} (f_i - p_i) \quad (8)$$

$$j = 1, 2, \dots, n - 1$$

(8)式は $j = 1$ から順次 p_j/C_{jj} について漸次的に解くことができ

$$\frac{p_j}{C_{jj}} = \frac{1}{1 - M_{jj}} \left\{ \sum_{i=1}^{j-1} M_{ji} \frac{p_i}{C_{ii}} + \sum_{i=1}^j M_{ji} (f_i - p_i) \right\} \quad (9)$$

$$j = 1, 2, \dots, n - 1$$

となる。 p_n/C_{nn} は、定義から $M_{nn} = 1$ となるので(8)式から定めることはできず、(4)式を変形した

$$\frac{D}{P} = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{p_i}{C_{ii}} + \frac{p_n}{C_{nn}} \quad (10)$$

から相対的に与えられる。すなわち、(9)式から(10)式右辺第1項の値が定められるから、粉砕機通過量 D に対する挽上量 P の割合 $x (= P/D)$ と、分級機の性能を表わす細粒回収率 C_{nn} との関係が(11)式のように与えられる。

$$x = \frac{P}{D} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n-1} (p_i/C_{ii}) + p_n/C_{nn}} \quad (11)$$

この関係はすでに小沼が与えているもの¹⁾と全く等価である。

さて、 C_{nn} の最小値は0、最大値は1であるから、 x のとりうる値には制限があり、定性的には Fig. 2 のようになる。

一方、(4)式から

$$P \cdot \sum_{i=1}^n p_i = P = D \sum_{i=1}^n C_{ii} d_i \quad (12)$$

であるが、 $\sum_{i=1}^n d_i \equiv 1$ より

$$d_1 = 1 - \sum_{i=2}^n d_i$$

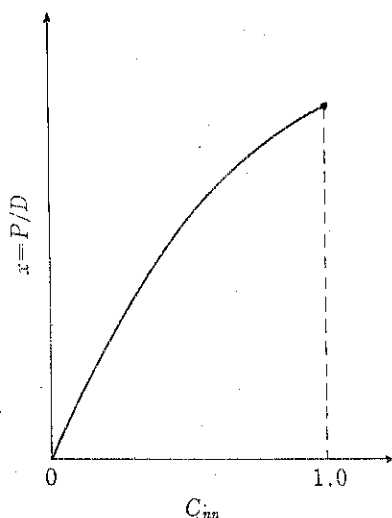


Fig. 2 最細粒回収率と挽上量との関係

を(12)式に代入すると

$$x - C_{11} = \sum_{i=2}^n (C_{ii} - C_{11}) d_i \quad (13)$$

が得られる。一般に大抵の分級機では

$$C_{11} < C_{22} < \dots < C_{nn}$$

が成立するから(13)式は

$$x > C_{11} \quad (14)$$

であることを示している。同様にして

$$d_n = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} d_i$$

を(12)式に代入すると

$$x < C_{nn} \quad (15)$$

が示される。(14)式と(15)式を総合すると、相対挽上量 x は無制限に勝手な値をとることはできず、

$$C_{11} < x < C_{nn} \quad (16)$$

の範囲内で可変であることがわかる。

3.2 M , f および C が与えられていて p を求める場合

この場合にも 3.1 で述べたのと全く同じ理由により(6)式から形式的に p を求めることはできない。3.1 と同様にして(6)式を各要素についての展開形に書き直すと

$$\sum_{i=1}^{j-1} \left(-\frac{M_{ji}}{C_{ii}} + M_{ji} \right) p_i + \left(\frac{1 - M_{jj}}{C_{jj}} + M_{jj} \right) p_j = \sum_{i=1}^j M_{ji} f_i \quad (17)$$

$$j=1, 2, \dots, n-1$$

となる。したがって、 p_j は漸化式

$$p_j = \frac{1}{\frac{1 - M_{jj}}{C_{jj}} + M_{jj}} \left\{ \sum_{i=1}^{j-1} \left(\frac{M_{ji}}{C_{ii}} - M_{ji} \right) p_i + \sum_{i=1}^j M_{ji} f_i \right\}$$

$$\left. \sum_{i=1}^j M_{ji} f_i \right\} \quad (18)$$

$$j=1, 2, \dots, n-1$$

で与えられる。また、 p_n は

$$p_n = 1 - \sum_{i=1}^{n-1} p_i$$

となる。一方、相対挽上量 x は(11)式からただちに

$$x = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (p_i / C_{ii})} \quad (19)$$

として求められる。すなわち、粉砕マトリックス、分級マトリックスおよび供給原料の粒度分布が与えられている場合の精粉の粒度分布は(18)式で与えられ、また、挽上量は(19)式によって一義的に定められてしまう。

4. 粉砕マトリックスおよび分級マトリックスの一決定法

いままでの取り扱いにおいては M および C が一応既知であると仮定して解析を進めてきたが、実際には M や C の各要素の値は操業データから定めなければならない。測定できる量としては D , P , e , d および p が考えられるから、これらの値から M や C の各要素を計算する方法について検討する。

まず、 C は対角行列であるから全く問題がなく、その要素 C_{ii} は(20)式によって与えられる。

$$C_{ii} = \frac{D}{P} \cdot \frac{d_i}{p_i} \quad (20)$$

一方、 M の場合には原理的には連立方程式

$$\left. \begin{aligned} d &= M \cdot e \\ \sum_{i=1}^n M_{ij} &= 1, \quad j=1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

から各 M_{ij} を求めればよいのであるが、 M が三角行列であるにしても未知数は $n(n+1)/2$ 個ある。それに対して方程式(21)式の数は $2n$ 個となる。したがって、 $n \geq 4$ では M_{ij} は不定となる。また、仮に $n=3$ であっても未知数と方程式の数は一致するが、行列式が 0 になるので、ある M_{ij} は任意となる。すなわち、粉砕機の入出口における粉体の粒度分布の測定結果のみから粉砕マトリックス M を定めようとするならば、その要素 M_{ij} にさらに制限を加えなければならない。そこで、ここでは「ある粒度範囲 e_i にある砕料はその範囲と、その一つ下の範囲 e_{i+1} までしか粉砕されない」ものと仮定することにした。この場合には M の形は

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & \cdots & 0 \\ M_{21} & M_{22} & 0 & \\ 0 & M_{32} & M_{33} & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & M_{nn-1} & M_{nn} \end{bmatrix} \quad (22)$$

となる。(22)式を(21)式に代入すると

$$\left. \begin{aligned} d_1 &= M_{11} e_1 \\ d_j &= M_{jj-1} e_{j-1} + M_{jj} e_j \\ j &= 2, 3, \dots, n \\ M_{ij} + M_{i+1j} &= 1, \quad \left\{ \begin{array}{l} i=1, 2, \dots, n-1 \\ j=1, 2, \dots, n-1 \\ i \geq j \end{array} \right\} \\ M_{nn} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

を得る。(23)式から、ただちに M の各要素が

$$\left. \begin{aligned} M_{ii-1} &= \frac{\sum_{j=1}^{i-1} e_j - \sum_{j=1}^{i-1} d_j}{e_{i-1}}, \quad i=2, 3, \dots, n \\ M_{ii} &= \frac{\sum_{j=1}^i d_j - \sum_{j=1}^{i-1} e_j}{e_i}, \quad i=1, 2, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

として求められる。

5. 複数個の粉砕機および分級機で構成されている閉回路粉砕プロセスの解析法

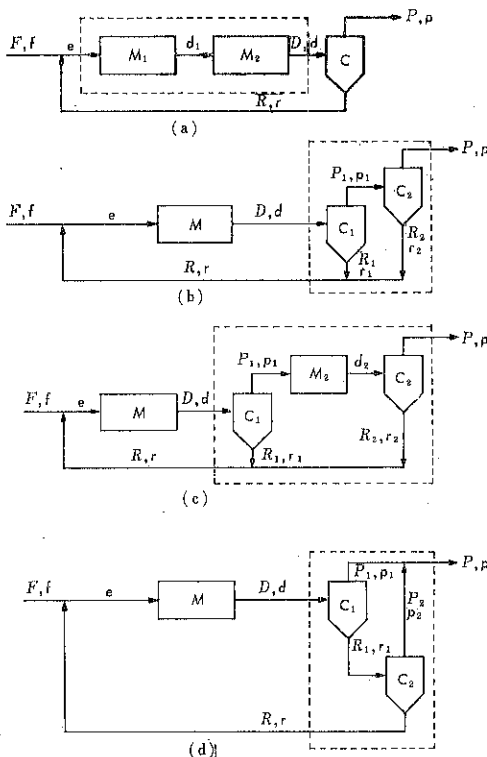


Fig. 3 複数個の粉砕機および分級機で構成されている閉回路粉砕プロセス

実際の閉回路粉砕プロセスでは分級性能を高めるために複数個の分級機を適当に接続したものをを用いることが多い。そこで、ここではより一般的に粉砕機も複数個用いられているプロセスに関して考察することにした。

いま、Fig. 3 (a), (b), (c)および(d)に示すようなプロセスをとりあげてみることにする。(a)の場合は点線で囲まれた部分が

$$d = M_2 \cdot d_1 \quad (25)$$

$$d_1 = M_1 \cdot e \quad (26)$$

となり、したがって

$$d = M_2 \cdot M_1 \cdot e \quad (27)$$

となるから

$$M = M_2 \cdot M_1 \quad (28)$$

とおけば、先述の基本プロセスに帰着する。また、この様子をシグナル・フロー線図で描くとFig. 4(a)のようになる。

つぎに、Fig. 3 (b)のプロセスでは点線で囲まれた部分

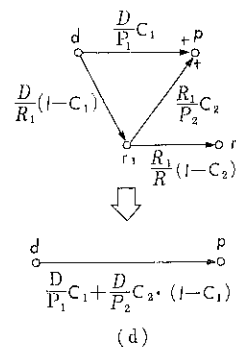
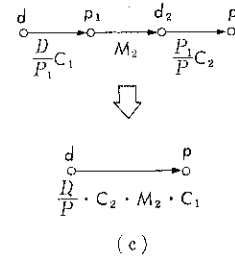
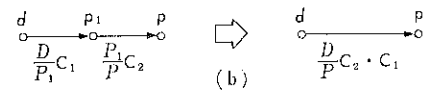
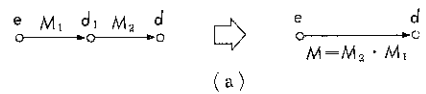


Fig. 4 Fig. 3 の中で点線によって囲まれた部分のシグナル・フロー線

の物質収支をとると

$$\left. \begin{aligned} Dd &= P_1 p_1 + R_1 r_1, & P_1 p_1 &= DC_1 \cdot d_1 \\ P_1 p_1 &= Pp + R_2 r_2, & Pp &= P_1 C_2 \cdot p_1 \\ D &= P_1 + P_2, & P_1 &= P + R_2, & R &= R_1 + R_2 \\ Rr &= R_1 r_1 + R_2 r_2 \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

となる。これらの各式から p_1, r_1, r_2, P_1, R_1 および R_2 を消去すると

$$\left. \begin{aligned} Dd &= Pp + Rr, & x &= \frac{P}{D} = x_1 \cdot x_2 \\ D &= P + R & x_1 &= P_1/D \\ Pp &= DC_2 \cdot C_1 \cdot d, & x_2 &= P/P_1 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

を得る。したがって

$$\left. \begin{aligned} C &= C_2 \cdot C_1 \\ x &= x_1 x_2 \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

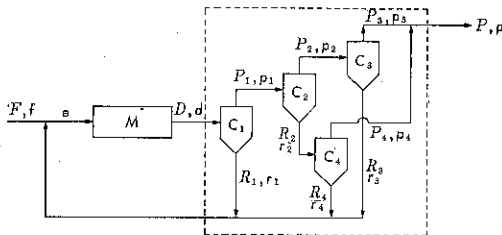
とおけば、これも基本プロセスに帰着させることができる。Fig. 4(b)はこれらの様子をシグナル・フロー線図に表わしたものである。同様にして、Fig. 3(c)のプロセスをシグナル・フロー線図で表わすとFig. 4(c)のようになり、これから直ちに、

$$\left. \begin{aligned} C &= C_2 \cdot M_2 \cdot C_1 \\ x &= \frac{P}{D} = \frac{P_1}{D} \cdot \frac{P}{P_1} = x_1 x_2 \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

とすれば基本プロセスに変換できることがわかる。また、Fig. 3(d)のプロセスはFig. 4(d)のように表わすことができるから、結局

$$\left. \begin{aligned} C &= C_1 + C_2 \cdot (I - C_1) \\ x &= x_1 + x_2 (1 - x_1) \\ x_1 &= P_1/D, & x_2 &= P_2/R_1 \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

とおけばよいことがわかる。



図Fig. 5 複数個の分級機で構成された閉回路粉砕プロセスの実例

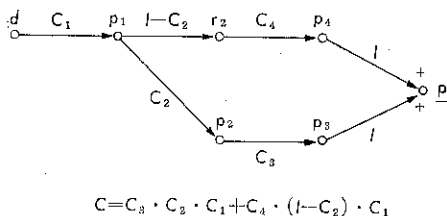


Fig. 6 Fig. 5 主要部のシグナル・フロー線図

以上に述べた手法の応用として、Fig. 5 に示すようなある実在の閉回路粉砕プロセスについて解析してみることにする。Fig. 5 の中で点線で囲まれた部分の主要部をシグナル・フロー線図で表現すると Fig. 6 のようになる。この図から、基本プロセスに帰着させるためには

$$\left. \begin{aligned} C &= C_3 \cdot C_2 \cdot C_1 + C_4 \cdot (I - C_2) \cdot C_1 \\ x &= x_1 x_2 x_3 + x_1 (1 - x_2) x_4 \\ x &= P/D, & x_1 &= P_1/D, & x_2 &= P_2/P_1 \\ x_3 &= P_3/P_2, & x_4 &= P_4/R_2 \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

とおけばよいことがわかる。実際に Fig. 5 のプロセスについての物質収支式を整理することにより同じ結果が得られるが、その計算はかなり複雑なものとなる。

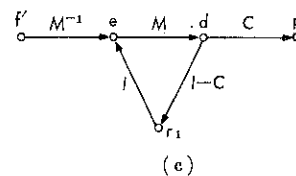
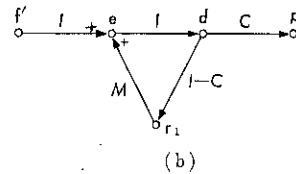
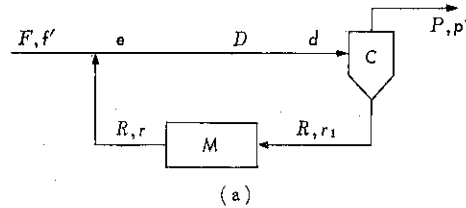


Fig. 7 粉砕機後置式閉回路粉砕プロセスの等価変換

さらに、もう一つの応用例として Fig. 7(a) のような基本プロセスの一変形である粉砕機後置式プロセスをシグナル・フロー線図に描いてみると同図(b)のようになる。これを等価変換したのが同図(c)であり

$$f = M^{-1} \cdot f' \quad (35)$$

とおけば粉砕機前置方式の基本プロセスに対する式をそのまま適用できることがわかる。すなわち、(5)式に相当して

$$(I-M) \cdot C^{-1} \cdot p = f' - M \cdot p \quad (36)$$

が得られる。これはすでに小沼¹⁾がもとの質物収支式に基づいて誘導した式と全く同じものである。

6. 計算結果ならびに考察

前節においてあきらかにしたように、Fig. 1の基本プロセスに対する解析用の電子計算機プログラムを準備しておけばそれを複数の粉碎機および分級機によって構成されているプロセスに対しても、その入力ルーチンをくふうすることによって適用することができる。したがって、ここでは二、三の例題について基本プロセスに対する解析用プログラムを用いた結果を示すことにする。

6.1 精粉の粒度分布の計算

いま、供給原料の粒度分布を

$$f = [0.66, 0.33, 0.01]^T,$$

粉碎マトリックスおよび分級マトリックスをそれぞれ

$$M = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.15 & 0 \\ 0 & 0.85 & 1 \end{pmatrix} \text{ および } C = \begin{pmatrix} 0.06 & 0 & 0 \\ 0 & 0.192 & 0 \\ 0 & 0 & 0.436 \end{pmatrix}$$

としたときの精粉の粒度分布 p は(18)式を適用することにより

$$p = [0.037, 0.147, 0.816]^T$$

となる。したがって、相対挽上量 x は(19)式より

$$x = \frac{1}{\sum_{i=1}^3 (p_i / C_{3i})} = \frac{1}{\frac{0.037}{0.06} + \frac{0.147}{0.192} + \frac{0.816}{0.436}} = 0.307$$

となる。

6.2 分級マトリックスの決定

供給原料および粉碎マトリックスは6.1の場合と同じであるとして、精粉の粒度分布が

$$p = [0.04, 0.16, 0.80]^T$$

と規定されたときの分級機に分級マトリックスを求めてみる。(9)式より

$$C = \begin{pmatrix} 0.057 & 0 & 0 \\ 0 & 0.176 & 0 \\ 0 & 0 & C_{33} \end{pmatrix}$$

を得る。したがって、(11)式から相対挽上量 x と C_{33} の関係が求められ

$$x = \frac{1}{\frac{0.04}{0.057} + \frac{0.16}{0.176} + \frac{0.80}{C_{33}}} = \frac{1}{1.611 + 0.80 / C_{33}}$$

となる。この x と C_{33} の関係を図示したのが Fig. 8 である。

6.3 原料粒度分布の変化がおよぼす精粉粒度分布への影響

粉碎マトリックスおよび分級マトリックスは6.1の場合と同じであるとして、原料の粒度分布 f が

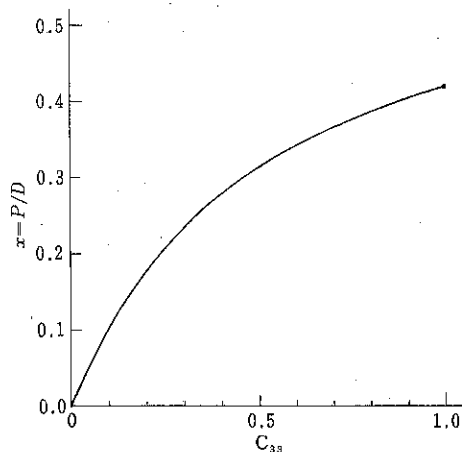


Fig. 8 最細粒回収率と相対挽上量との関係 (計算例)

$$f_1 = [0.897, 0.093, 0.010]^T$$

$$f_2 = [0.717, 0.273, 0.010]^T$$

$$f_3 = [0.559, 0.431, 0.010]^T$$

$$f_4 = [0.419, 0.571, 0.010]^T$$

$$f_5 = [0.295, 0.695, 0.010]^T$$

と変化するとき、精粉の粒度分布 p にはどのように影響するかを調べてみると、つぎようになる。

f	p	x
f_1	$[0.051, 0.188, 0.761]^T$	0.280
f_2	$[0.041, 0.157, 0.803]^T$	0.299
f_3	$[0.032, 0.147, 0.839]^T$	0.310
f_4	$[0.024, 0.105, 0.871]^T$	0.340
f_5	$[0.018, 0.084, 0.900]^T$	0.357

いまの場合、(16)式によれば x の可変範囲は

$$0.06 < x < 0.436$$

であり、供給原料の粒度分布が大幅に変動しても x をこの範囲内で変化すれば(すなわち、生産量を変化することにより)製品の粒度分布をほぼ一定に保ちうることがわかる。

6.4 プロセスの最適化に関する考察

砕機および分級機の各々については単体としての最適装置設計がなされているものとすれば、プロセスの最適化は与えられた原料および装置のもとに要求された品質 p を満足する製品の挽上量をできる限り多くすることになるものと思われる。そのために容易に操作できるのは分級機性能であると考えられ、これはこれまでの解析結果によると分級マトリックスの (n, n) 要素 C_{nn} すなわち最細粒回収率に大きく依存していることがわかる。分級機が通常単体で用いられることはまれであ

り、複数個のものを組み合わせて用いるのが普通であるから、結局、最適化というものはプロセスのフロー・シートそのものに対して行なう必要がある。たとえば、Fig. 3(b)と(d)の両プロセスについて、合成分級マトリックスの C_{mn} 要素を比較してみると、同じ分級機を用いる限りにおいてあきらかに(d)のプロセスの方が大きくなり、したがって挽上量も大きくとれるから、プロセスとしては(a)の方がすぐれているといえる。したがって、閉回路粉砕プロセスの最適化計算には電子計算機を駆使した種々の標準的なプロセス・フロー・シートに対するケース・スタディが必要になってくるものと思われる。

7. 結 言

粉砕機および分級機が各一基で構成されている基本的な閉回路粉砕プロセスを、粉砕マトリックスおよび分級マトリックスによる行列表示法を用いて解析し、電子計算機プログラムが容易な形で解を与えた。また、複数個の粉砕機および分級機によって構成されている閉回路粉砕プロセスが、シグナル・フロー線図に基づく等価変

換によって基本プロセスに帰着されうることをあきらかにした。したがって、複雑な形式のプロセスに対してもその都度物質収支式を解く必要がなく、基本プロセスに関する結果がそのまま適用できることになる。さらに、粉砕機出入口における粉体の粒度分布の測定結果のみから巨視的に決定可能な粉砕マトリックスの一般形を示した。

ここで述べた方法がどの程度実際の装置において適用可能であるかは、粉砕マトリックスおよび分級マトリックスが実質的に装置内の通過粉体量のみの関数として決定できるかどうかにかかっている。粉砕・分級プロセスの解析法に未だ決定的なものがない現状では、多くの実際の操業データを分析し粉砕および分級マトリックスを求めてみる必要があるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 小沼：粉体工学研究会誌, 3, 487 (1966).
- 2) 小沼：化学工学協会第35年会, No. E 114 (1970).

(95頁よりの続き)

- 79) 山口昇：材料強弱並に土圧論, 岩波講座物理学及び化学, 物理学Ⅲ, D. (1931).
- 80) Andreasen, A. H. M.: Kolloid-Z, 78, 148 (1937).
- 81) 赤沢常雄：土木学会誌, 29, 777 (1943).
- 82) 大野恭秀, 兵藤申一：材料科学, 6, 42 (1969).
- 83) Piret, E. L. et al.: Chem. Eng. Progress, 45, 708 (1949).
- 84) Piret, E. L. et al.: A. I. Ch. E. Journal 7, 199 (1961).
- 85) Zeisel, H. G.: VDI-Z, 101, 483 (1959).
- 86) Baier, U.: Aufber. Tech. 9, 294 (1969).
- 87) 松居国夫, 関口岳男：化学工学, 32, 811 (1968).
- 88) 松居国夫, 関口岳男, 五十畑仁：化学工学, 35, 788 (1971).
- 89) Gross, J., Zimmerley, S. R.: Trans. AIME, 37, 7 (1930), 87, 27 (1930), 87, 35 (1930), 112, 116 (1934).
- 90) Piret, E. L. et al.: Chem. Eng. Progress, 45, 508 (1949).
- 91) 中川有三, 奥田聰：化学工学, 20, 240 (1956).
- 92) 佐々木和郎, 山門憲雄, 庄子富夫, 塩原善一：日本鉱業会誌, 71, 53 (1955).
- 93) Behrens, D.: Chem. Ing. Tech., 37, 473 (1965).
- 94) 堀素夫：化学工学, 29, 631 (1965).
- 95) 神保元二：化学工学, 29, 636 (1965).
- 96) 田中達夫, 宮脇猪之介, 藤崎一裕：化学工学, 35, 276 (1971).

流動層からの小粒子の飛び出し

—飛び出し速度の定義式について—

九州大学 工学部 篠 原 久
田 中 勇 武
中 原 俊 輔
柳 帝 人 鶴 泰

緒 論

流動層を分級装置、乾燥装置または反応装置として用いる場合に、流動層から小粒子が飛び出すと、それが滞留時間や、反応率に影響をおよぼすと考えられるので、その飛び出し機構の解明は、はなはだ重要である。Leva¹⁾, Osberg ら²⁾は、大小2粒子群からなる回分式流動層からの小粒子飛び出し速度について研究し、また Wen ら⁴⁾も回分式で同様な実験を行なって、±100%の精度をもつ無次元整理式をえている。

さらに Yagi, Kunii ら⁵⁾は、連続式、回分式流動層について、±50%の精度をもつ無次元式をえている。しかし、連続式流動層における粒子供給速度 F が飛び出し速度に与える影響は考慮されていない。また彼ら⁶⁾は、修正飛び出し速度係数 K^* を、 C_t を流動層最上部における小粒子濃度として、 $V = K^* A C_t$ で定義しているが、 C_t を溢流中の小粒子濃度 C_0 に等しいとしている。

筆者らは、まず連続式流動層における F が修正飛び出し速度係数におよぼす影響について検討した。

また、小粒子の飛び出し現象は、回分式、連続式を問わず、原理的には同一であるはずであるから、連続式において F の影響が現われることは、飛び出し速度の定義式に疑問があるとして、種々の飛び出し速度の定義式を検討した。ここではその経過を報告する。

1. 実験装置と実験方法

連続式流動層の実験装置の概略図を Fig. 1 に示す。回分式の実験には、Fig. 1 中の 8, 9, 10 を除いたものを使用した。ブロウから送入された空気は、脈動止めタンクを通り、四分円ノズルによってその流量を測定されたのち、流量調節バルブを経て、粒径 1~3 mm のガラス球と鉛球とが充填されている整流部へ入る。分散板としては、多孔板の上に 200 メッシュの金網を重ねたも

のを使用した。連続式の場合には、所定の小粒子濃度 C_t に混合された粒体をホッパーに入れ、これをスクリ

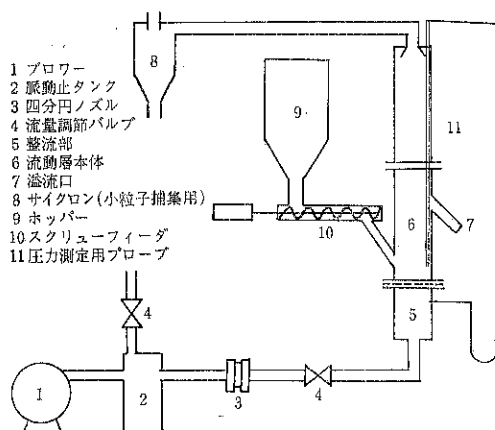


Fig. 1 連続式流動層概略図

Table 1 Fluidized Particles

Particles	No.	ρ_s [g/cm ³]	u_t [cm/sec]	D_p [μ]
Toyoura sand	1	2.67	93	139
Soma sand		2.67	588	718
Toyoura sand	2	2.67	113	158
Soma sand		2.67	588	718
Toyoura sand	3	2.67	122	168
Soma sand		2.67	588	718
Toyoura sand	4	2.67	127	178
Soma sand		2.67	588	718
Toyoura sand	5	2.67	157	206
Soma sand		2.67	588	718
Toyoura sand	6	2.67	161	211
Soma sand		2.67	588	718
Crashed Soma sand	7	2.67		70 ~400

ューフィードにより層内に供給した。なおFを、スクリーフィードの回転数を変えて4～6段階変化させた。

回分式では、これらの粒体を流動層頂部より投入した。試料とした粒体をTable 1に示す。粒体1～6は、ほぼ粒度の均一な大粒子と小粒子とを混合したものであるが、粒体7は、広い粒度分布を持ったものである。

2. 飛び出しに関する定義式 (脚注1)

2.1 回分式流動層 大小2粒子群からなる小粒子の飛び出しについては、次式が成立するとされている¹⁾。

$$dC/d\theta = -kC \quad (1)$$

飛び出し速度係数 k と修正飛び出し速度係数 k^* の関係は、Wen⁴⁾、Yagiら⁵⁾により

$$k = k^*A/W \quad (2)$$

筆者らは、Eq. (2)のかわりに次式で k^* を定義することを試みた。

$$k = \bar{k}^*/L(\rho_s - \rho) = \bar{k}^*(1 - \epsilon_0)A/W \quad (3)$$

ただし $(1 - \epsilon_0)[-]$ 、 $L[\text{cm}]$ は、流動層の有効充填率および層高さである。

小粒子の飛び出し速度 V は、全物質収支より

$$V = -dW/d\theta \quad (4)$$

また、小粒子に着目した物質収支より

$$V = -d(CW)/d\theta \quad (5)$$

Eqs. (1), (4), (5)より

$$V = kWC/(1 - C) \quad (6)$$

Eq. (6)にEq. (2)を代入して

$$V = k^*AC/(1 - C) \quad (7)$$

Eq. (6)にEq. (3)を代入して

$$V = k^*(1 - \epsilon_0)AC/(1 - C) \quad (8)$$

2.2 連続式流動層 Eqs. (7), (8)中の C のかわりに溢流小粒子濃度 C_0 を用いる場合には、それぞれ次式で、 k_0^* 、 $\bar{k}_0^*$ を定義する。

$$V = k_0^*AC_0/(1 - C_0) \quad (9)$$

$$V = \bar{k}_0^*(1 - \epsilon_0)AC_0/(1 - C_0) \quad (10)$$

また前述したような K^* の定義式もある⁶⁾。

$$V = K_0^*AC_0 \quad (11-a)$$

ここで、Eq. (2)の関係をつぎのように書きかえると

$$K_0 = K_0^*A/W \quad (11-b)$$

これをEq. (11-a)に代入すれば

(脚注1) 以下の諸式において、修正飛び出し速度係数を表わす場合には、 k^* 、 K^* のように文字の右肩に*をつけ、飛び出し速度 V が、溢流小粒子濃度 C_0 に比例するとしてえられた係数には K_0^* 、 $C_0/(1 - C_0)$ に比例するとしてえられた係数には k_0^* のように、文字の右下に0を添え、さらに流動層内の有効充填率をも考慮してえられた係数には、 k^* 、 k_0^* 、 K_0^* のように文字の上部に一を付した。

$$V = K_0WC_0 \quad (11-c)$$

また、Eq. (3)に準じて

$$K_0 = \bar{K}_0^*(1 - \epsilon_0)A/W \quad (11-d)$$

これをEq. (11-c)に代入して

$$V = \bar{K}_0^*(1 - \epsilon_0)AC_0 \quad (12)$$

3. 有効充填率 $(1 - \epsilon_0)$

3.1 測定装置および測定方法 流動層内の静圧差 $\Delta P[\text{G/cm}^2]$ と $(1 - \epsilon_0)$ との関係は、次式で示される。

$$\Delta P g_c = \Delta W \cdot g/A = \Delta L(1 - \epsilon_0)(\rho_s - \rho)g \quad (13-a)$$

ただし $\Delta W[\text{g}]$ は層高 $\Delta L[\text{cm}]$ 間に存在する保有量したがって、静圧差を測定すれば $(1 - \epsilon_0)$ がえられる。静圧差を測定するために使用した2種類の装置の概略図をFig. 1およびFig. 2に示す。

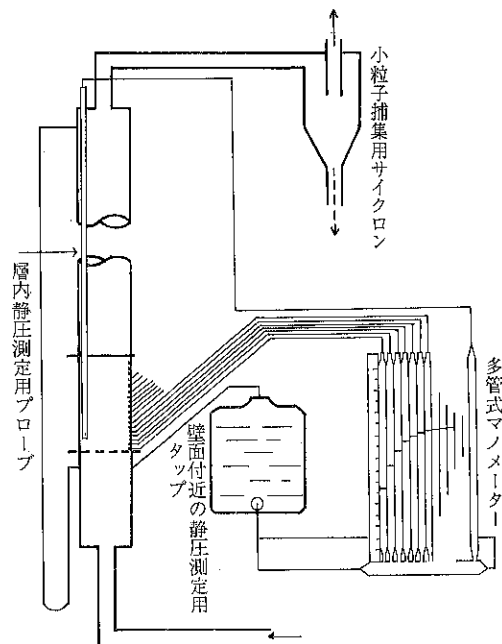


Fig. 2 回分式流動層における静圧測定装置

Fig. 1の装置では、圧力測定用のプローブを軸方向に移動させることにより、各高さにおける静圧を測定することができる。しかしこの装置は、定常状態がえられやすい連続式流動層では、安定した測定値を与えるが、回分式流動層におけるように、小粒子が飛び出して時々刻々に層保有量が変化する状態、すなわち非定常状態には適用しがたい。それでこのような非定常状態における静圧の測定にはFig. 2の装置を用いた。この装置では、流動層壁面上に軸方向に1 cmごとに圧力タップが設けられているので、それから壁面近くの静圧が取り出される。それらを多管式マンノメーターへ導き、これらのマンノメーター内の水柱高さを、ある時間間隔で写真撮影

すると、各時間、各高さにおける壁面付近の静圧が測定される。

3.2 $(1-\epsilon_0)$ の決定方法 Eqs.(8), (10), (12)中の $(1-\epsilon_0)$ としては、流動層最上部の値をとるべきである

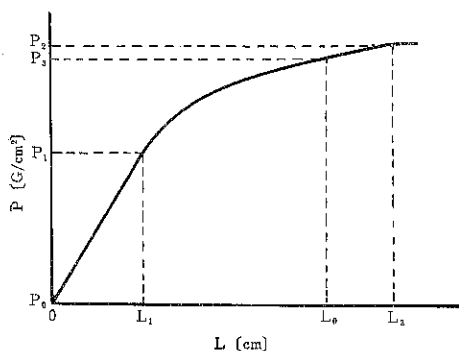


Fig. 3-a 層内軸方向静圧分布の定性図
 L_0 : 溢流口高さ (cm)

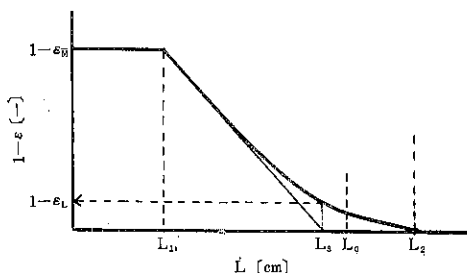


Fig. 3-b 層内軸方向充填率分布の定性図

う。しかし層最上部の判定が困難であるから、以下の4つの方法により $(1-\epsilon_0)$ を定義した。(Fig. 3 参照)

(1) 次式によってえられる、溢流口までの平均の充填率 $(1-\bar{\epsilon})$ を $(1-\epsilon_0)$ とする方法。

$$(1-\bar{\epsilon}) = (P_2 - P_0)g_c / L_0(\rho_s - \rho)g \quad (13-b)$$

(2) Fig. 3-b において、 $(1-\epsilon)$ が急激に減少しはじめるまでの高さ L_1 における $(1-\epsilon_M)$ を、次式により求めて、これを $(1-\epsilon_0)$ とする方法。

$$(1-\epsilon_M) = (P_1 - P_0)g_c / L_1(\rho_s - \rho)g \quad (13-c)$$

(3) Fig. 3-b において $(1-\epsilon)$ が急激に減少しはじめる高さ L_1 とほぼ減少が終了した高さ L_2 における圧力差、すなわち Fig. 3-a における $(P_2 - P_1)$ と、次式とを用いて算出される $(1-\epsilon_N)$ を $(1-\epsilon_0)$ とする方法

$$(1-\epsilon_N) = (P_2 - P_1)g_c / (L_2 - L_1)(\rho_s - \rho)g \quad (13-d)$$

(4) Fig. 3-b において、 $(1-\epsilon)$ が急激に減少する線を直線として近似し、その延長が横軸と交わる点の高さ L_3 における $(1-\epsilon_L)$ を $(1-\epsilon_0)$ とする方法。

4. 実験結果と考察

まず、Eqs.(9), (11-a) により求めた k_0^* , K_0^* を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。これらはともに F の影響を顕著に受けている。そのために、回分式の場合と同一の整理ができない。

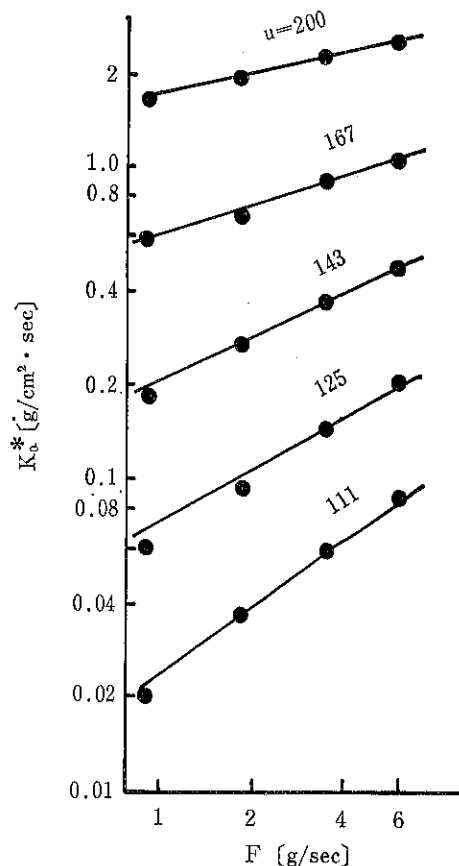


Fig. 4 K_0^* に対する F の影響 (粒体1)

よって、つぎに F の影響を受けない飛び出し速度係数をみいだすために、前述した4つの有効充填率による整理を試みる。

まず3-2の(1)の方法を用いて、Eq.(12)によりえられた $\bar{K}_0^*$ を Fig. 6 に示す。すなわち、 $(1-\bar{\epsilon})$ を用いた場合にも、なお F の影響が残っていることがわかる。

つぎに3-2の(2)の方法を用いて、同様にしてえられた K_0^* を Fig. 7 に示す。ここでは粒体7についての結果が直線よりずれている。それで横軸を $1/(u-u_0)$ にかえて整理し、その結果として Fig. 8 をえた。ここに使用した粒体7は、粒度分布をもつ試料である。この場合には、着目した粒子径までの通過累積曲線からえられる50%通過粒子径を代表粒子径とし、その径に相当する

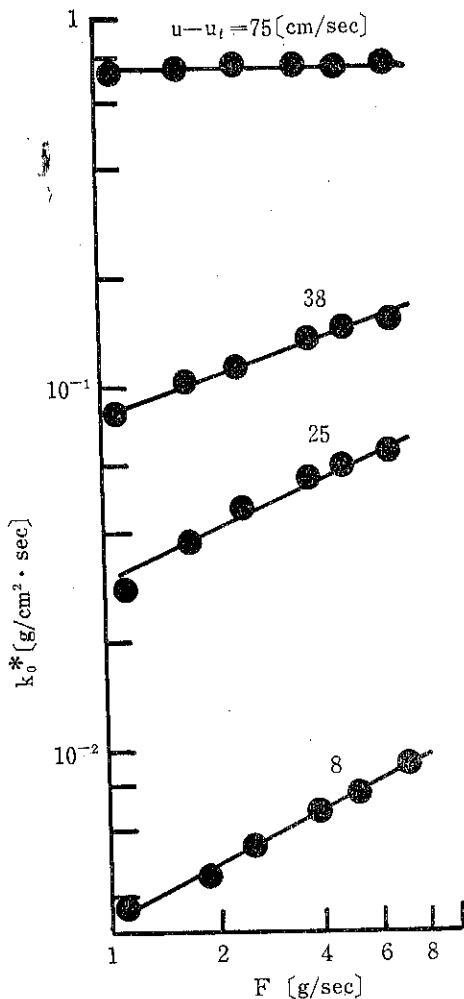


Fig. 5 k_0^* に対する F の影響 (粒子4)

終末速度を u_t として使用した。図では、粒体の種類の区別なく、すべてのデータが直線性を示しているが、まだ F の影響が認められる。

つぎに3-2の(3)の方法による $(1-\epsilon_N)$ と、Eq. (10) を用いてえられた $\overline{k_0^*}$ を Fig. 9 に示す。図では、 $\overline{k_0^*}$ に対する F の影響はほとんどみとめられないが、この $\overline{k_0^*}$ と、Eq. (8)を用いてえられた回分式流動層による実験値 $\overline{k_0^*}$ との一致は十分でないようにみえる。これは、回分式における $(1-\epsilon_N)$ の推定値に問題があったためと考えられる。すなわち、回分式流動層においても定常状態を保つために、小粒子が飛び出さない範囲の流速で、Fig. 1の装置を用いて $(1-\epsilon_N)$ を測定し、この値を、小粒子の飛び出しがある場合にもそのまま推定値として使用したからであろう。

つぎに3-2の(4)の方法による連続式流動層の有効充填率、すなわち $(1-\epsilon_L)$ の実験結果を示す Fig. 10 お

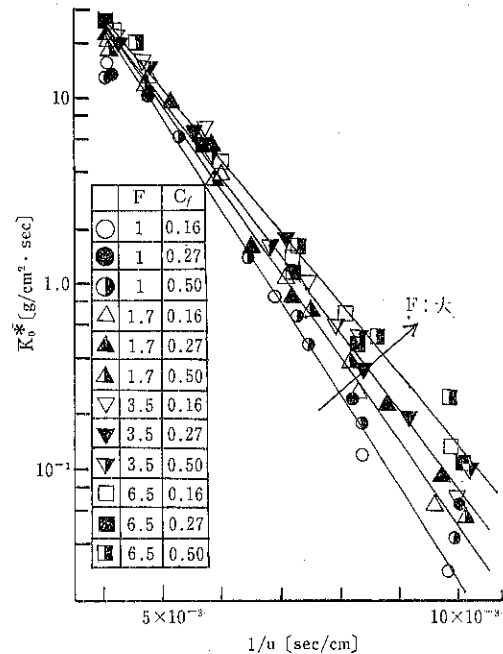


Fig. 6 (1)の方法によってえられた $\overline{K_0^*}$ に対する F の影響 (粒子1)

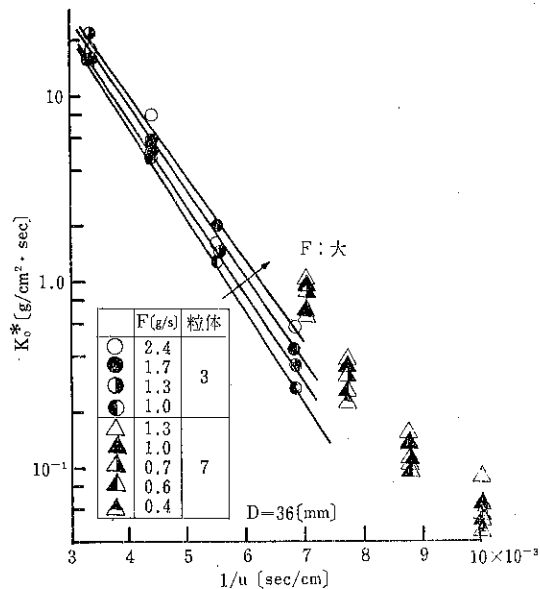


Fig. 7 (2)の方法によってえられた $\overline{K_0^*}$ を $1/u$ との関係

よび Fig. 11 についてのべる。Fig. 11は、Fig. 10においてえられた $(1-\epsilon_L)$ が、粒体の種類や空気流速に関係なく、 F の増加とともに直線的に増大することを示している。

回分式流動層の $(1-\epsilon_L)$ を測定するために、連続式において用いられた Fig. 1 の装置を用いることは、前

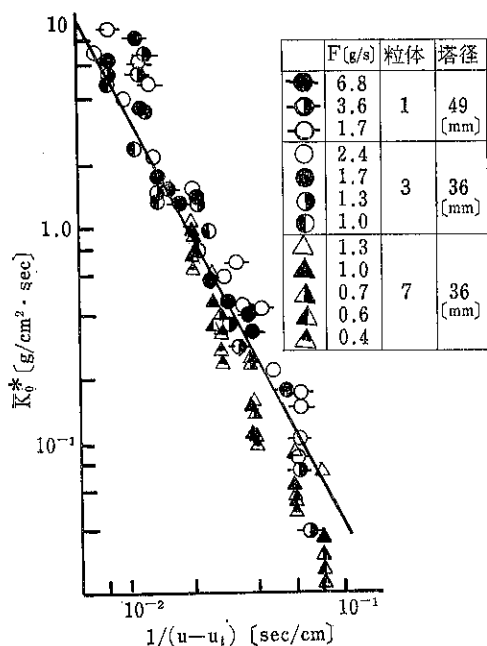


Fig. 8 (2)の方法によってえられた $\bar{K}_0^*$ と $1/(u-u_t)$ との関係

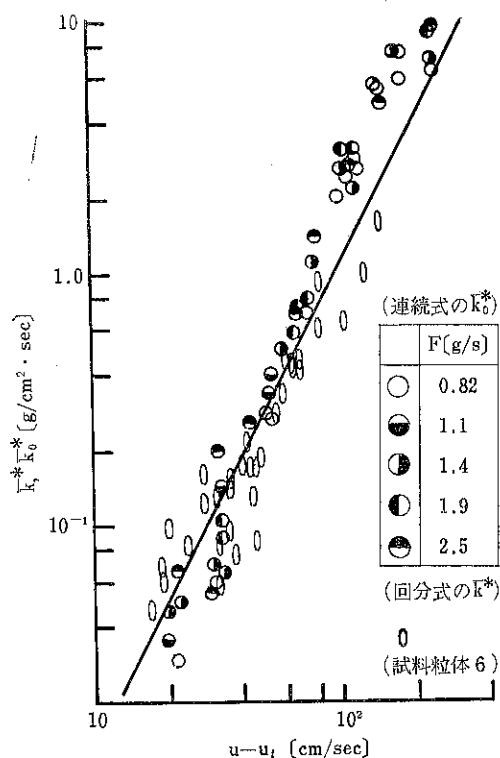


Fig. 9 (3)の方法によってえられた $\bar{K}^*$, $\bar{K}_0^*$ と $u-u_t$ との関係

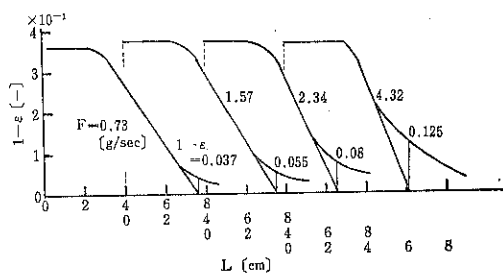


Fig. 10 連続式流動層における $(1-\epsilon_L)$ への F の影響

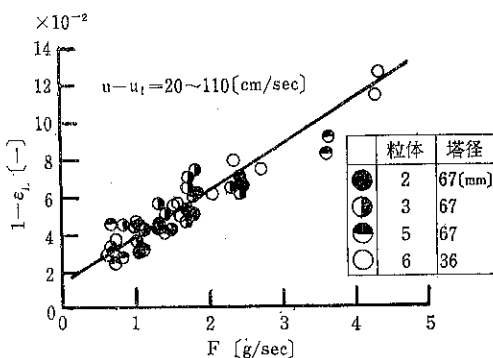


Fig. 11 連続式流動層における $1-\epsilon_L$ と F との関係

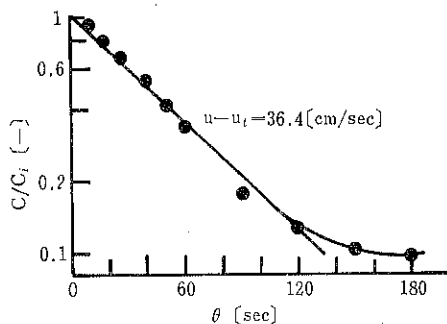


Fig. 12 回分式流動層における実験値の一例

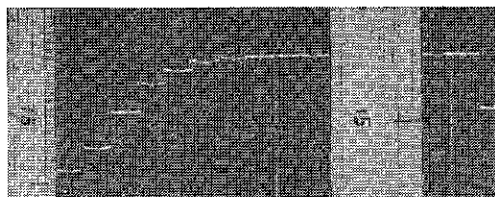


Fig. 13 回分式流動層の壁面付近における軸方向静圧分布

述したように適当ではない。そこで前者の $(1-\epsilon_L)$ を測定するためには、Fig. 2 の装置を用いた。測定された $(1-\epsilon_L)$ は、時間が経過するにつれて変化するが、

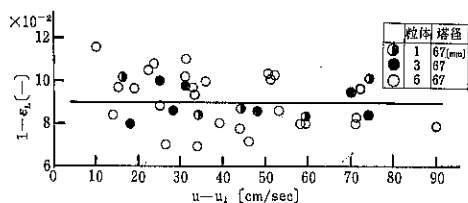


Fig. 14 回分式流動層における $(1 - \epsilon_L)$ と $(u - u_t)$ との関係

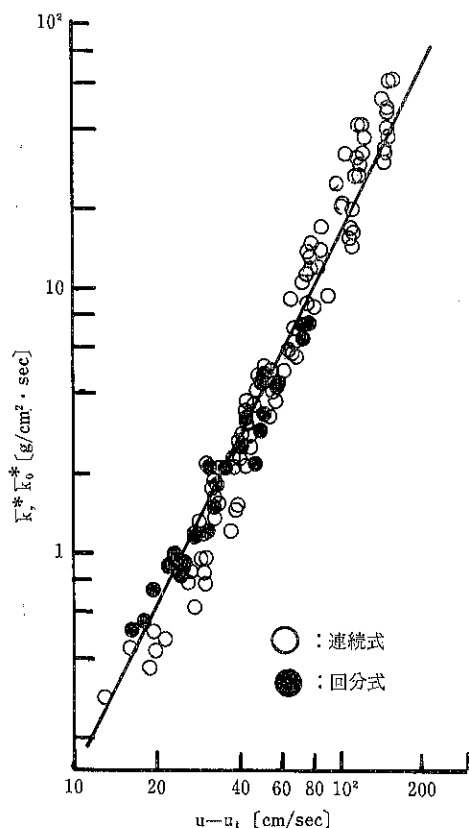


Fig. 15 (4)の方法によってえられた $\bar{k}^*$, $\bar{k}_0^*$ と $u - u_t$ との関係

Fig. 12に示した k の算出に必要な一定勾配の範囲内では、 $(1 - \epsilon_L)$ の変動は、ほとんど認められなかった。そこで、この範囲における $(1 - \epsilon_L)$ を測定値として用いた。多管式マノメーターによりえられた圧力測定例をFig. 13に示す。また層内における充填率は、壁面近くにおける充填率とは異なると考えられるので、Fig. 2の装置を用いてえられる壁面における静圧と、層内静圧測定用プローブによりえられる静圧とを同時に写真撮影して、壁面付近の充填率から層内充填率をえるための補正係数を求めた。その結果、壁面付近の充填率に乗ずべき補正係数として、粒体1, 3 および6について各々

1.12, 1.19 および 1.39 という値をえた。補正された $(1 - \epsilon_L)$ を Fig. 14 に示す。図は、層内の充填率に対する $(u - u_t)$ の影響は顕著でないことを示している。

上述の Fig. 11 および Fig. 14 に示されている $(1 - \epsilon_2)$ の測定値、すなわち前述の(4)の方法による $(1 - \epsilon_0)$ と、回分式の場合には、Eq. (8)、連続式の場合には、Eq. (10) を用いてえられた $\bar{k}^*$ および $\bar{k}_0^*$ を Fig. 15 に示す。この図より回分式、連続式流動層を問わず、精度 $\pm 70\%$ 以内で $\bar{k}^*$, $\bar{k}_0^*$ がともに整理できることが認められる。しかし、有効充填率の精度ある測定がかなり困難であるから、この整理方法もまだ決定的なものとはいえない。

なお、その後の研究によって、層内の軸方向においては、小粒子濃度が一定値を示す範囲があること、この層内一定小粒子濃度を用いれば $\pm 25\%$ の精度をもつ整理方法がえられることが判明したが、これについての報告は、別の機会にゆずる。

結 論

連続式流動層では、層内最上部における小粒子濃度 C_t を用いて、小粒子の飛び出し速度を整理することが提案されているが、 C_t の測定が困難であるため、 C_t の代わりに、溢流小粒子濃度 C_0 が代用されている。しかし、 C_0 に基づく修正飛び出し速度係数には、供給速度 F の影響があらわれるので、連続式における修正飛び出し速度係数を、回分式のそれと同一方法で整理することができない。

本報では、連続式および回分式流動層内の有効充填率を考慮に入れた、修正飛び出し速度係数の整理法を種々検討した。すなわち3-2に述べた4種の有効充填率を導入した結果、3-2の(4)の方法による有効充填率、すなわち $(1 - \epsilon_L)$ を用いれば、連続式、回分式をとわず、その修正飛び出し速度係数が、同一の方法で一応まとめられることがわかった。しかし有効充填率の決定法、測定方法に難点があるので、この整理方法の精度は、 $\pm 70\%$ にすぎなかった。

〔謝辞〕 本研究の実験に際し、御協力をいただいた金井田英雄、深谷誠市、浜中道人、新延和久の各氏に謝意を表します。また有益な助言を賜った宗像健氏（九州大学工学部助教授）、田中安彦氏（鹿児島大学工学部教授）に対し厚くお礼申し上げます。

使用記号

- | | |
|---------------------|-----------------|
| A : 塔断面積 | $[\text{cm}^2]$ |
| C : 層内小粒子濃度 | $[-]$ |
| C_t : 供給粒体中の小粒子濃度 | $[-]$ |

C_i : 回分式流動層における初期小粒子濃度	[—]	P, P_0, P_1, P_2, P_3 : 静圧 (Fig. 3-a 参照)	
C_0 : 溢流小粒子濃度	[—]		[G/cm ²]
C_t : 層最上部小粒子濃度	[—]	ΔP : 差圧	[G/cm ²]
D : 塔 径	[cm]	u : 空塔速度	[cm/sec]
D_p : 粒子径	[μ]	u_t : 小粒子終末速度	[cm/sec]
F : 供給速度	[g/sec]	V : 小粒子飛び出し速度	[g/sec]
g : 重力加速度	[cm/sec ²]	W : 粒子保有量	[g]
g_0 : 重力換算係数	[g·cm/G·sec ²]	$1-\varepsilon$: 充填率	[—]
k : Eq.(1)による飛び出し速度係数	[1/sec]	$1-\bar{\varepsilon}, 1-\varepsilon_M, 1-\varepsilon_N, 1-\varepsilon_L$: 有効充填率	
K_0 : Eq.(11-b)による飛び出し速度係数	[1/sec]		(Fig. 3 参照) [—]
k^* : Eq.(7)による修正飛び出し速度係数(回分式)		$1-\varepsilon_0$: 有効充填率	[—]
	[g/cm ² ·sec]	ρ : 空気密度	[g/cm ³]
$\bar{k}^*$: Eq.(8)による修正飛び出し速度係数(回分式)		ρ_s : 粒子密度	[g/cm ³]
	[g/cm ² ·sec]	θ : 時 間	[sec]
k_0^* : Eq.(9)による修正飛び出し速度係数(連続式)			
	[g/cm ² ·sec]		
$\bar{k}_0^*$: Eq.(10)による修正飛び出し速度係数(連続式)			
	[g/cm ² ·sec]		
K^* : V/AC_t で示される修正飛び出し速度係数(連続式)			
	[g/cm ² ·sec]		
K_0^* : Eq.(11-a)による修正飛び出し速度係数(連続式)			
	[g/cm ² ·sec]		
$\bar{K}_0^*$: Eq.(12)による修正飛び出し速度係数(連続式)			
	[g/cm ² ·sec]		
$L ; L_0, L_1, L_2, L_3$: 層高 (Fig. 3-a 参照)	[cm]		
L : 層高	[cm]		

引 用 文 献

- 1) Leva, M.: Chem. Eng. Progr., **47**, 39 (1951).
- 2) Osberg, G. and D. H. Chalesworth: Chem. Eng. Progr., **47**, 566 (1951).
- 3) 篠原久, 田中安彦, 新延和久: 第28年会講演要旨集 (化学工学協会), 203 (1963).
- 4) Wen, C. Y. and R. F. Hashinger: A. I. Ch. E. Journal, **6**, 220 (1960).
- 5) Yagi, S. and D. Kunii; Chem. Eng. Sci., **16**, 364, 372, 380 (1961).
- 6) 矢木栄, 国井大蔵: 化学機械, **16**, 283 (1952).

(126頁よりの続き)

った。

これらのことから、極端に長いパイプ (9.6 m) に適当に孔をあけ、逆噴射の圧が同じで逆風量を汙過面積に比例させて増したベンチュリーを用いて、その長さ方向の圧力測定を行なった。Fig. 7 にそれを示す。これより汉筒が長くなっても汉布下端にも十分圧力が伝わり汉筒全体にわたりほぼ均一な洗浄効果が期待できると思われる。なお同パイプを短くして2.4 m とし、ベンチュリーもその汉過面積に相当するものを使用した結果、ほぼ Fig. 7 の P_1 と同波形を得ている。($P_1 \sim P_3$ は Fig. 2 参照のこと)

6. おわりに

汉布で含塵気流を汉過する方向とは逆の方向に瞬間的に空気を逆流させて汉布についた粉塵を払い落す本装置の汉布洗浄機構は汉筒内圧測定によると、汉筒全体を均一にすみやか (0.15秒以内) に洗浄しかつ接続機械への圧力の影響がほとんどない (一回の逆噴射で汉筒全体の $\frac{1}{8}$ を洗浄する型 P 12A8 はその $\frac{1}{6}$ を洗浄する型 P 1 C 1 より圧力変動は大きくなる)。

また瞬間的な逆噴射によって汉布から粉塵が剝離すると考えられる過程や、逆噴射圧波形が同じであれば、ほぼ同様の汉布圧損特性が得られることが判明し、また、汉筒長さの寸法をかえる場合には汉筒面積に対する逆噴射エネルギーを基準に考えればよいであろうと推測される。

有機粉末の機械化学的变化

昭和大学薬学部

池川 昭子

金庭 延慶

高分子には蛋白、核酸のように薬学上重要な物質が多い。寒天、カルボキシメチルセルロースナトリウムは緩下剤として、ポリビニルピロリドン解毒剤として、ゼラチンなどは止血剤として用いられ、その他賦形薬、錠剤などの結合剤、軟膏基剤、血漿増量剤、効力延長剤、増粘剤などとして薬学において広く用いられている。近年 β -ヘミセルロースのようなある種の多糖類は制癌作用があり、しかも毒性が無視出来ることが報告され、従来と異ったタイプの新薬の源として注目されている¹⁾。

一方、機械的処理によって高分子の分子量が低下し、化学構造が変化することが報告されている²⁾。堀越らは日本薬学会91年会において蛋白質分解酵素は圧縮によって活性が低下することを報告した³⁾。薬剤は錠剤として投与されることが非常に多く、この現象は製剤学上無視出来ない。また最近プラスチック公害が大きな社会問題となっているが、もし機械的エネルギーによってモノマーあるいはかなり低分子になるまで高分子の分子鎖切断が可能であればプラスチック公害は解決されるはずである。上記の観点から、物質の機械化学的变化を検討する意義は大きいと考えられる。そこで有機物質についての従来の研究結果を整理し、簡単にまとめた。

1. 結晶性変化

Nelson などは cotton fiber のセルロースの結晶性が粉碎によって低下することを酸加水分解法で確認した⁴⁾。Bacon は粉碎によるグラファイトの結晶性低下を見出した⁵⁾。Miles は orthovanillic acid の粉末 X 線回折図形は粉碎によって変化すること、またその変化の仕方は粉碎方法に依存することを報告している⁶⁾。

番匠などは stable 型銅フタロシアニンと metastable 型銅フタロシアニンをそれぞれ臭化カリで希釈混合後錠剤成型した場合と、Nujol に分散した場合との赤外線吸収スペクトルを比較した結果、stable 型を KBr disk にして測定した場合には stable 型特有の 730cm^{-1} の強い吸収は消失し、同時に metastable 型特有の 720cm^{-1} の強い吸収と 865cm^{-1} の弱い吸収をみとめた。stable 型銅フタロシアニンは機械的プレスによって metastable

型に転移するものと考えられる。Table I は stable 型銅フタロシアニンを食塩と混合し、各種の条件で油圧プレスを行った後、試料を X 線回折によって定量した場合の metastable 型銅フタロシアニンの量を示している。ボールミル粉碎によっても同様の現象がみられ、stable 型結晶に特徴的な 30.20° , 8.90° , 12.35° , 18.00° , 25.90° などの回折ピークは摩砕時間の経過とともに次第に小さくなり、逆に metastable 型に特徴的な 13.50° ~ 17.50° , 9.80° , 23.80° , 27.35° などの回折ピークは次第に大きくなった。ボールミル粉碎による結晶性転移反

Table I 機械的圧力による銅フタロシアニンの結晶転移

st-PC : NaCl	条 件		meta (%)
	圧力 (t/cm^2)	時間 (min)	
1 : 0	3.1	40	16.67
1 : 6	3.1	50	23.08
1 : 1	8.8	2	28.57
1 : 1	10.0	45	29.08

st-PC : stable 型銅フタロシアニン

meta : metastable 型銅フタロシアニン

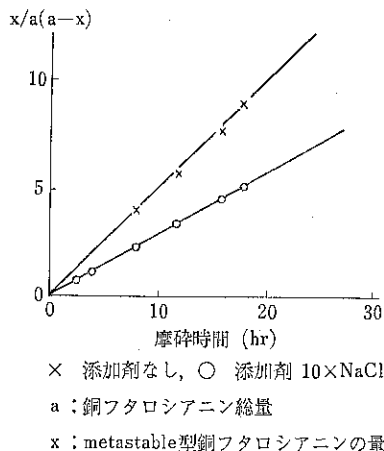


Fig. 1 摩砕による stable 型銅フタロシアニンの metastable 型への転移速度

Table II 銅フタロシアニン粉砕に対する添加剤の硬度の影響

添加剤	硬 度			k	8 hrs (cm)	16hrs (cm)
	Mohs	Ritzhärte (g)	Brinell (kg/cm ²)			
H ₃ BO ₃	1	1.0		0.033	20.0	18
KBr		1.8	5.40	0.087	12.8	11.4
NaCl	2.5	3.5	9~13.1	0.074	7.0	6.5
CuSO ₄ ·5H ₂ O	2.5~3 2~2.5	7.8~8.1		0.129	6.6	4.8

応は Fig. 1 に示すように見掛け上2次反応の経過をたどった。添加剤の影響を検討した結果、添加剤の硬度が小さい程二次反応速度定数kは小さく、粉砕能率も低いことがわかった。Table II において、l は $2\theta=6.80^\circ$ の回折ピークの長さであり、stable 型、metastable 型に共通して存在し、転移には無関係で粒度すなわち粉砕能率を示す尺度と考えられる⁷⁾。

2. 化学構造の変化

2.1 モノマーの変化

SiO₂, TiO₂, グラファイトなどを機械的に処理すると共有結合が切断され、固体表面にラジカルタイプの活性点が生成される⁸⁾。一方、金属、金属酸化物、無機塩類などの機械的処理によって電子放出が生ずることが報告されている⁹⁾。近年、これらの機械的に活性化された物質によってモノマーの化学構造が変化することが見出され、熱あるいは光によっては不可能な化学反応の可能性も暗示されている。

Richard は砂、C₁₂H₂₅COOH あるいは C₁₆H₃₃COOH、水、Na₂S の混合物を窒素中で 26°C でボールミル粉砕し、生成物を検討した結果、C₁₂H₂₆ あるいは C₁₆H₃₄ がそれぞれ生成していることを gas-liquid-chromatography によって確認した¹⁰⁾。Grohn らは benzylchloride と錫の混合物を振動ミルで処理すると dibenzyltin dichloride が35%の収率で生成することを見出した。これは dibenzyltin dihalide の直接的合成法として成功したはじめての方法であるという点で注目し値する¹¹⁾。Grohn らはさらに $\phi\cdot\text{CH}_2\text{X}$, $\phi\cdot\text{CHX}_2$, $\phi\cdot\text{CX}_3$ (X=Cl, Br, I) と第IV, 第V族元素との機械化学的反応を検討し、Table III に示すような現象を見出した¹²⁾。さらに Grohn らはモノクロルメタン、ビニルクロライド、ベンデルクロライド、ブタノールなどの有機化合物と石英との振動ミル処理によって石英の破砕面での有機化合物との結合が生じ、50~60°C で真空乾燥した後の石英は0.4~2.9%のCあるいはClを含むことを見出した¹³⁾。

Kargin らはメチルアクリルアミド (MAA, mp 104

°C) を NaCl, BaSO₄ あるいは SiO₂ の存在下で MAA の融点以下の温度で振動ミル処理すると MAA ポリマーが生成することを見出した。(Fig. 2 参照) 重合効率にはモノマーと添加物との比に依存し、NaCl, BaSO₄ では0.5%, SiO₂ では5%で最大となった。(Fig. 3 参照) 反応生成物は18°C での水溶液の固有粘度が0.15の等しい分子量を持つポリマーとダイマーあるいはトリマーで

Table III ベンデルハライドおよび類似化合物と第IV, 第V族元素との機械化学的反応

試料	元 素	生成物
$\phi\cdot\text{CH}_2\text{X}$	Sn	$(\phi\cdot\text{CH}_2)_2\text{SnX}_2$
$\phi\cdot\text{CHCl}_2$	Sn	$(\phi\cdot\text{CHCl})_2$, SnCl_2
$\phi\cdot\text{CCl}_3$	Sn	$(\phi\cdot\text{CCl}_2)_2$, SnCl_2 , ポリジクロルベンチル化合物
$\text{X}_1-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2\text{X}_2$	Sn	$(\text{X}_1-\text{C}_6\text{H}_4-\text{CH}_2)_2\text{Sn}(\text{X}_2)_2$
$\phi\cdot\text{CH}_2\cdot\text{CH}_2\text{X}$	Sn	$(\phi\cdot\text{CH}_2\text{CH}_2)_2$, SnX_2
$\phi\cdot\text{CH}_2\text{X}$	Si, Ge	ポリベンチル化合物
$\phi\cdot\text{CH}_2\text{X}$	Pb	ポリベンチル化合物, $\text{Pb}(\text{CH}_2\phi)_4$
$\phi\cdot\text{CH}_2\text{Cl}$	As, red P	反応しない
$\phi\cdot\text{CH}_2\text{Cl}$	Sb	$(\phi\cdot\text{CH}_2)_3\cdot\text{SbCl}_2$
$\phi\cdot\text{CHCl}_2$	Sb	樹脂状化合物
$\phi\cdot\text{CCl}_3$	Sb, As, P, Bi	$\begin{array}{c} \text{Cl} \quad \text{Cl} \\ \quad \\ \phi-\text{C}-\text{C}-\phi \\ \quad \\ \text{Cl} \quad \text{Cl} \end{array}$

(X, X₁, X₂=Cl, Br, I)

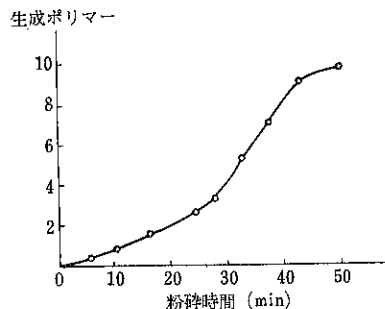


Fig. 2 振動ミル粉砕によるメタクリルアミドの重合 (0.5%NaCl, 20°C)

ポリマー、オリゴマーの収率 %

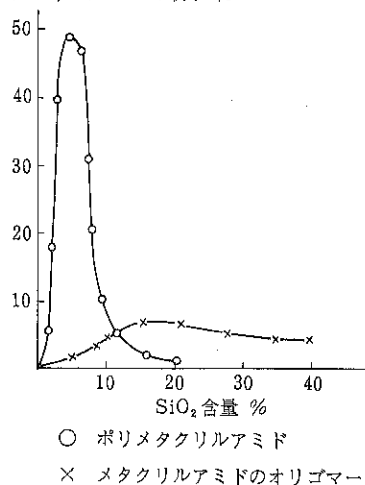


Fig. 3 メタクリルアミドの機械化学的重合に対する SiO_2 含量の影響

あった。この反応は固体状態でおこり、MAAの融点より $220\sim 270^\circ\text{C}$ 低い温度でも進行したが、水溶液やベンゼン溶液では重合反応はおこらなかった。アクリルアミ

ド (AA, mp 84°C) でも同様の現象がみられたが、メタクリル酸メチル (MME, mp -50°C) は液体状態でも固体状態でも反応は進行した。(Table IV 参照) これらの反応はラジカルアクセプターであるハイドロキノンの添加によって阻害された。NaCl, BaSO_4 を用いた場合には機械的処理による電子放出によってモノマーのアニオンラジカルが生成され、これが重合反応に関与していると考えられる。AAとMMEとの共重合を均一系, crystal-liquid 系, crystal-crystal 系の三つの状態について重合反応に対する phase の影響を検討した結果, Table V に示すように反応系が不均一になる程各々の phase で重合反応がそれぞれ独立に進行する傾向がつかよまることがわかった。固体状態では機械的処理によって光照射によるよりもはるかに速く重合反応が進行するが、これは反応がモノマー結晶表面の格子欠かん部分で開始され, crystal-polymer 境界で進行するため、ポリマー鎖の生成の際に生ずるストレスが最小となること、また重合の際におこる収縮によって常に新しい構造欠かんが生成されることなどによるものと思われる。AAの塩類は添加物の無い状態で粉碎によって重合した。ナトリウム塩とカリウム塩の混合物を粉碎した場合にはナト

Table IV メタクリルアミド、アクリルアミド、メタクリル酸メチルの機械化学的重合に対する温度の影響

モノマー	NaClwt. %	粉碎方法	粉碎時間 (min)	($^\circ\text{C}$) 温度	ポリマーの生成率 (重量%)	ポリマーの固有粘度	ポリマーの分子量
メタクリルアミド	0.5	振動ミル	45	20	10.4 10.6 10.3	0.155	
メタクリルアミド	0.5	振動ミル	45	-110	6.1 6.3	0.172	
アクリルアミド	1	エレクトロマグネティック バイブレーター	360	20	10.8 10.2 10.5	6.4	2.5×10^6
アクリルアミド	1	"	360	-65	7.4 6.05 6.3	6.1	2.4×10^6
アクリルアミド	1	"	360	-190	0.8 1.2 0.9		
メタクリル酸メチル	1	"	360	20	4.7 4.7 4.5		
"	1	"	360	-65	0.7 0.8 0.7		
"	1	"	360	-190	0.5 0.4 0.5		

Table V アクリルアミド (AA) とメタクリル酸メチル (MMA) の共重合に対する Phase の影響

温度 (°C)	共 重 合 条 件	初期の重量比 AA : MME	共重合体中の N 含量 (wt. %)	共重合体の組成化 AA : MME (重 量)	r ₁	r ₂
70	ベンゼン溶液 0.15% AIBN 均一系	20 : 80	12.1	62 : 38	4.2	0.12
		30 : 70	13.8	71 : 29		
20	溶媒無し 1% NaCl crystal-liquid	10 : 90	0.6	3 : 97	7.5	7.0
		30 : 70	4.5	23 : 77		
-65	溶媒無し 1% NaCl crystal-crystal	20 : 80	8.5	43 : 57	36.6	4.2
		40 : 60	16.1	82 : 18		

$$r_1 = k_{AA-AA} / k_{AA-MME}$$

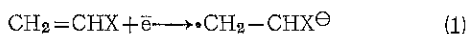
$$r_2 = k_{MME-MME} / k_{MME-AA}$$

Table VI メタクリル酸メチルの機械化学的
重合におよぼす金属の影響

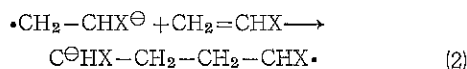
金 属	Ca	Mg	Al	Fe	Cr	Bi	Sn
粉碎時間 (min)	15~20	30	180	180	180	180	180
ポリマー収率 (%)	75	75	64	8	8	5	1

リウム塩のみが重合した。Table IV から求めた固体状態での重合反応の活性化エネルギーは 0.4~0.7 kcal/mole であり、照射によって誘起される AA の固体状態での値、3~10 kcal/mole、と比較して著しく小さかった¹⁴⁾。

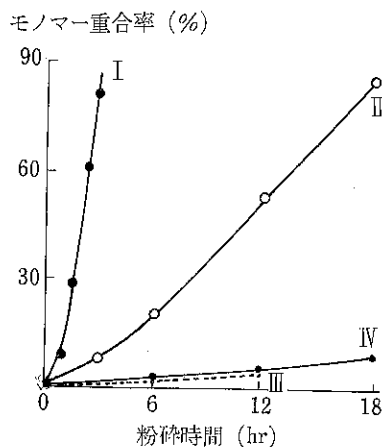
Grohn らは一定条件で MME あるいはスチレンと金属との混合物を振動ミル処理し、重合速度に対する金属の種類の影響を検討した。Table VI は MME についての結果を示している。Lohff らは鋼製ブラシで高真空中で金属を処理したところ、Ni, Cu, Ag, Zn, Pt, Au では電子放出は検出出来ないが、出来てもごくわずかであったが、Fe, Pb, Be, Al, Mg, Ca, Sr, Na ではこの順に電子放出活性は増大することを見出した¹⁵⁾。Table VI の結果と比較すると、電子放出活性と MME の重合開始活性との間には平行関係がみられた。MME と Mg との混合物にラジカルアクセプターであるヒドロキノンやヒドラゾベンゼンを加えても重合反応に影響はなかった。一方、スチレンは Mg によっては重合せず、Mg より弱いエレクトロンドナーである Fe によっては重合した。強力なエレクトロンドナーである Na を用いた場合、MME は重合したが、スチレンではテトラマーしか生成しなかった。機械的に活性化された無機物表面に化学吸着しているモノマーへの電子の移行によりアニオンラジカルが生成する。



このアニオンラジカルはモノマーと(2)式のように反応する。

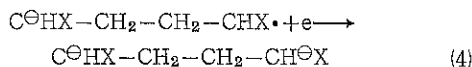


イオン化ポテンシアルの小さい金属を用いた場合にはさらに(3)、(4)式の反応がおこる。



- I $S_n/\phi \cdot \text{CH}_2\text{Cl}/\text{MME}$
- II $S_n/\phi \cdot \text{CH}_2\text{Cl}/\text{スチレン}$
- III S_n/MME
- IV $S_n/\text{スチレン}$

Fig. 4 Sn- ベンチルクロライドの存在下でのメタクリル酸メチル、スチレンの機械化学的重合



示すように粉碎時間がふえるにつれて 6.9×10^5 のピークが減少し、 10^5 以下のピークが増大することがわかった。 10^5 以下の分子量を単位としてはしから切断される確率が高いと考えられる²²⁾。

2.2.2 分子量と粒径の相関性

Baramboim らはポリスチレン (PS), ポリメタクリル酸メチル (PMMA) の粉碎物を分級し、各フラクションの分子量を測定して粒度との関係を検討し、粒径が大きい程分子量も大きいことを見出した。(Fig. 7 参照)²⁴⁾ゼラチンなどの粉碎物についても同様の関係を報告している²⁵⁾。

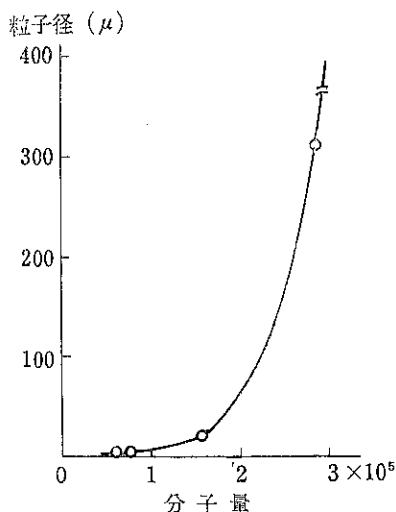


Fig. 7 粉碎されたポリメタクリル酸メチルの粒子径と分子量の関係

2.2.3 分子量低下速度式

Baramboim らは合成ポリマーを用いて -10°C での窒素中でのボールミル粉碎による分子量減少速度式を検討し、(5)式の成立することを見出した。

$$M_t = A e^{-k_m t} + M_\infty \quad (5)$$

M_t : t 時間粉碎した時の試料の分子量

A, k_m : 定数

M_∞ はボールミル粉碎によつてはこれ以下には低下し得ない限界分子量を示しており、分子量 M_t の分子は $(M_t - M_\infty)/M_\infty$ の切断点を持つことになる。切断点数の変化という観点から(5)式は(6)式であらわされる。

$$-\frac{d}{dt} \left(\frac{M_t - M_\infty}{M_\infty} \right) = k_m \left(\frac{M_t - M_\infty}{M_\infty} \right) \quad (6)$$

(6)式は分子鎖切断速度は切断点の数に比例することを示している。各試料について求めた k_m と M_∞ の値をTable VIIに示す²⁶⁾。

Table VII k_m と M_∞ の値

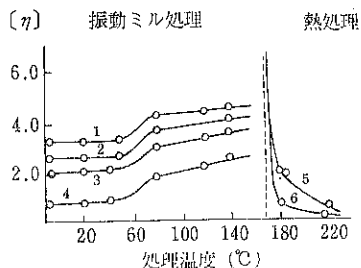
	$k_m (\text{hr}^{-1})$	M_∞
ポリメチルメタクリレート	0.12	9,000
ポリスチレン	0.0945	7,000
ポリビニルアセテート	0.0468	11,000
ポリビニルアルコール	0.0237	4,000
セルロースアセテート		10,000

2.2.4 温度依存性

Grohn らはPS, ポリビニルクロライド (PVC), ポリアクリロニトリル (PAN) の振動ミル粉碎による分子量低下速度は低温の方が速く、2時間のボールミル粉碎による分子量低下に対する温度勾配は 0.0016 であ

Table VIII ポリメタクリル酸メチルの熱処理による分子量低下に対する温度の影響

処理温度	処理時間	固有粘度 (ベンゼン溶液, 20°C)	粘度減少率
-75°C	25hrs	7.40	0%
0	25	7.40	0
25	25	7.40	0
80	25	7.30	1
120	25	6.40	14
160	25	6.35	14
180	3	1.86	75
	14	0.65	91
	25	0.50	93
220	3	0.42	94
	14	0.15	98
	20		Ca. 100



$[\eta]$: ベンゼン溶液, 20°C

反応時間 1, 2 hrs. 5, 3 hrs.
2, 4 6, 14
3, 6
4, 12

Fig. 8 ポリメタクリル酸メチルの振動ミル粉碎による分子量低下速度の温度依存性と熱処理による場合の温度依存性の比較

Table IX ポリメタクリル酸メチルの固有粘度
減少速度の温度係数 $\Delta\left(\frac{d[\eta]}{dt}\right)/\Delta T$ に
対する処理方法の影響
(固有粘度; 20°C, ベンゼン溶液)
(処理時間: 2時間)

振動ミル処理		熱処理	
処理温度	$\Delta\left(\frac{d[\eta]}{dt}\right)$	処理温度	$\Delta\left(\frac{d[\eta]}{dt}\right)$
T(°C)	ΔT	T(°C)	ΔT
10—50	0	-75—+170	0
50—80	-0.0016	170—180	0.003
80—120	-0.0014	180—220	0.012
120—140	-0.0018		

ることを見出した²⁷⁾。また -75°C~220°C の温度範囲で PMME の熱処理による分子量低下速度の温度依存性を検討し, glassy state (-75~80°C) では粘度の減少はみられなかったが, elastic state (80~160°C) では粘度は明らかに減少し, plastic state (170°C以上) ではこの傾向が著しくなることを見出した。(Table VIII 参照) これに対して振動ミル処理による分子量低下速度は, Fig. 8, Table IX に示すように -75~50°C では温度に無関係に一定で, 50°C以上になると減少する傾向がみられた²⁸⁾。Baramboim らもゼラチン, ポリイソブチレン (PIB), ポリビニルアルコール (PVA) などのボールミル粉碎による分子量低下速度に対する温度依存性を検討し, 温度勾配は glassy state では小さくガラス転移点以上では大きいことを報告している²⁹⁾。

Kargin らは平均分子量 5×10^6 の PMME を 25°C および -85°C で 45 時間振動ミル処理した。25°C で処理した場合には分子量約 3.3×10^4 のポリマーが生成され, 低分子の生成物は検出出来なかった。一方, -85°C で処理した場合には分子量 5.5×10^4 のポリマーと 10% 程度の有機液体が生成された。この液体は元素分析, IR, 質量分析によって MME であることが確認された¹⁴⁾。

2.2.5 粉碎条件の影響

室温での窒素中での振動ミル処理による分子量低下速度は PMME > PS > ポリビニルクロライド (PVC) > PAN > ポリエチレン (PE) の順に減少した。同一試料の場合には分子量低下速度は振巾に比例して増加し, 8 時間後の粘度は試料充てん率と直線関係がみられた。

(Fig. 9 参照) また Fig. 10 に示すように大きなボールがより有効であった^{27,28)}。Butyagin は PMME の振動ミル粉碎による分子量低下速度は供給されたエネルギーに対して指数函数的に増大し, さらに化学結合切断のエネルギーは 10^4 cal/mole 以下であり, 化学結合の強さよりはるかに少なかったと報告している³⁰⁾。

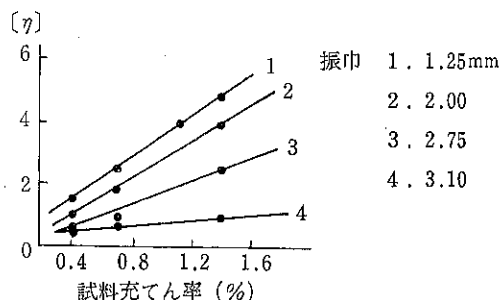
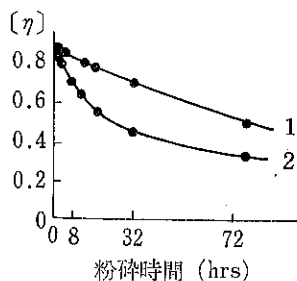


Fig. 9 ポリメタクリル酸メチルの振動ミル粉碎による分子量低下速度に対する振巾および試料充てん率の影響(粉碎時間 8 時間)



ボール径 1: 9 mm
2: 16 mm

Fig. 10 ポリビニルクロライドの振動ミル粉碎による分子量低下速度に対するボール径の影響

2.2.6 雰囲気の影響

Baramboim はゼラチン, PVA, PVC のボールミル粉碎による分子鎖切断速度は酸素中の方が窒素中より大であり, 酸素中での粉碎物は窒素中での粉碎物とは物理的性質や機械的性質に差のあることを見出した³¹⁾。

Grohn らは平均分子量 1.7×10^5 の PS を一酸化窒素あるいは窒素中で振動ミル処理し, 分子量が $10^4 \sim 2 \times 10^4$ に低下すること, また分子鎖切断速度は一酸化窒素中の方が速いことを見出した。一酸化窒素はラジカルアクセプターとして作用し, ラジカルの再結合による termination step を阻止すると考えられる。(Fig. 11 参照) 粉碎物から過剰の一酸化窒素や窒素を除去した後, 窒素についてのベンジジン-硫酸銅テストを行なったところ, 一酸化窒素中の粉碎物からだけ窒素が検出された。融点は分子量が低下するにつれて 182°C から 117°C まで低下したが, 一酸化窒素中での粉碎物と窒素中での粉碎物との融点には明らかな差がみられた。粉碎試料のベンゼン, 四塩化炭素あるいはシクロヘキサン溶液の UV 吸収スペクトルを比較すると一酸化窒素中の粉碎物の方が吸光度が大きく, 300 mμ 付近に新しい吸収極大がみられ

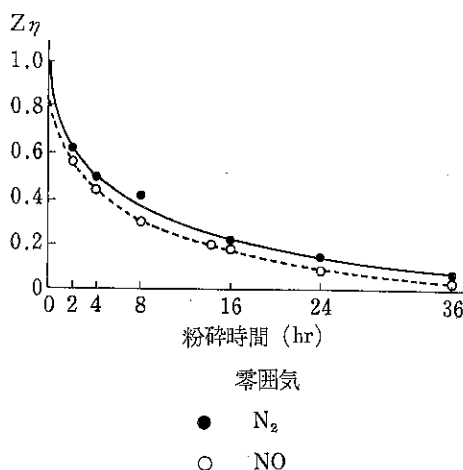


Fig. 11 粉碎によるポリスチレンの粘度数 Z_E の減少に対する雰囲気の影響

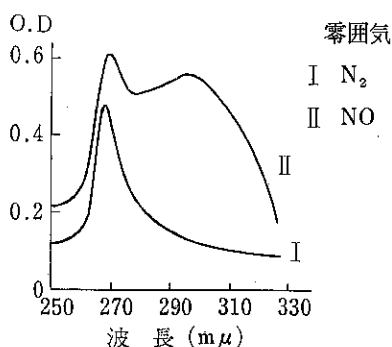


Fig. 12 ポリスチレン粉碎物の0.05%マイクロヘキサン溶液のUV吸収スペクトリに対する雰囲気の影響

た。(Fig.12 参照) さらに一酸化窒素中での粉碎物の場合にはIRスペクトルにも aliphatic group と結合した NO_2 に基づくと思われる 7.82μ の吸収とリング中のNの振動によると思われる 6.4μ の吸収との二つの新しい吸収帯がみられ、一酸化窒素は高分子ラジカルと化学的に結合することが確かめられた³²⁾。PMMEを一酸化窒素中で粉碎した場合にも、 $1,380, 1,493, 1,587\text{cm}^{-1}$ に新しい吸収帯が生じ、PVCについても同様の現象が報告されている^{27,28)}。Grohn らはさらにPMME, PANの分子鎖切断速度は一酸化窒素中で最も大きく、酸素、窒素の順におそくなることを見出した^{22,28)}。

振動ミル処理によるセルロースおよびセルローストリアセテートの分子量減少速度は湿った状態の方が乾燥状態より速かった。水分が分子鎖切断によって生じた高分子ラジカルの再結合を阻止すると考えられる³³⁾。ポリカプロラクタム (PCR) の振動ミル処理の場合、

水分が存在するとC-C結合切断の他に hydrolysis が生ずることが見出され、メタノールが存在する場合には methanolysis が生じ、メタノール濃度が高い程 OMe group の生成は著くなった³⁴⁾。

2.2.7 添加物の影響

Grohn らは窒素中で室温で NaCl の存在下でPEを振動ミル処理する場合、粘度減少速度はNaClの添加率が増大するにつれて大きくなることを見出した。(Table X参照)²⁸⁾。

Table X ポリエチレンの振動ミル粉碎による分子量低下速度に対する塩化ナトリウムの添加率の影響
粉碎時間：24時間

ポリエチレン：塩化ナトリウム	2 : 1	1 : 1	1 : 2
比粘度 (0.5% キシレン溶液, 100°C)	0.302	0.128	0.062

Butyagin らはPS, PMMEなどのポリマーを振動ミル処理するとフリーラジカルが生成することをESRによって確認した^{8,35)}。ラジカルアクセプターである diphenyl picryl hydrazyl やヨウ素を添加した場合には、これらは30~50%程度ポリマーに吸収されることをUV吸収スペクトルで確認したが、いずれの場合にも分子鎖切断速度は増大した²⁸⁾。

Baramboim は Porofor N, NH_4I , Pyridine-HBr, CBr_4 らのラジカルアクセプターの存在下でPS, PMME, PVAを振動ミル処理した場合、PSはこれらのアクセプターと共有結合で結合し、PMMEは種々のタイプの結合方式で結合したが、PVAはアクセプターと結合しないことを見出した。Baramboim はこの事実から分子鎖切断はPSの場合にはフリーラジカルメカニズムで進行し、PMMEの場合にはionicなポリマーが生成するが、PVAの場合には活性な chain segments は生成されず、intramolecular regrouping によって進行すると述べている³⁶⁾。

2.2.8 共重合

PANを1気圧のビニルクロライド (VC) あるいはブタジエン (BT) の存在下で振動ミル処理するとそれぞれブロック共重合あるいはグラフト共重合がおこることがわかった³⁷⁾。VCの存在下でセルローストリアセテートを振動ミル処理した場合にも、大部分のVCはホモポリメリゼーションによってPVCに変化し、同時にブロック共重合体、グラフト共重合体も得られたが、純粋なセルローストリアセテートは確認出来なかった³⁸⁾。

VCの存在下でPCRを振動ミル処理した場合にも、V

CのホモポリメリゼーションとPCRへのグラフティン
グが同時におこり、両者の収率の比は4:1程度であ
った。10~40°Cの範囲ではホモポリメリゼーション速度
は温度に無関係であったが、グラフティング速度は温度
が上昇するにつれて減少した³⁹⁾。VCとPMMEとの
振動ミル処理によって3~14%のPVCを含む共重合
体が得られた。重合速度は2時間で最大に達した。この
反応の温度依存性は粉砕時間によって変化し、12時間粉
砕した場合には重合速度は反応温度の増加に対して直
線的に減少したが、4時間の粉砕では10°Cで最大とな
った。ラジカルアクセプターである α -ベンゾキノンを加
えた場合には、PMMEに対して添加率を0%から3.33
%に変化させるにつれて共重合体中のCl含量は1.86%
から0.6%に減少した。機械的処理による分子鎖切断に
よって生ずる高分子ラジカルへのラジカルアクセプター
の付加はVCの付加より速いと考えられる。分子鎖切断
によって生ずる高分子ラジカルによって共重合反応が開
始されると考えられる⁴⁰⁾。

共重合反応はモノマー溶液中で高分子を粉砕する場
合にもみられた。Baramboimらはポリアミドをアクリル
酸中に溶解してドライアイスで氷らせて振動ミル粉砕を
行くと三次元の共重合体が生成することを見出した⁴¹⁾。
PCRをアクリロニトリルやスチレンのメタノール、ジ
オキサン、あるいはアセトン溶液中で振動ミル処理す
ることによってグラフト重合反応がおこることがIRによ
って確認されたが、ホモポリメリゼーションはおこらな
かった。アクリロニトリルのグラフティングによってP
CR中の窒素含量が粉砕時間とともに増大したが、モノ
マーの挿入量や溶液のモノマー濃度は最終的な窒素含量
にはほとんど影響しなかった。また共重合体の性質は溶
媒に依存することも見出されている^{39,42)}。

参考文献

- 1) 中原和郎, 福岡文子, 前田由美子, 青木健: GANN, **55**, 283 (1964). 中原和郎, 徳善玲子, 福岡文子, R. L. Whistler: Nature, **216**, 374 (1967).
- 2) 高橋浩, 堤和男: “粉体の物性と工学” 化学増刊31, p. 55 (1967) 化学同人
- 3) 佐野明美, 森井孫俊, 竹口紀晃, 堀越勇: 日本薬学会第91年会講演要旨集, p. 316 (1971).
- 4) M. L. Nelson, C. M. Conrad: Textile Research J., **18**, 155 (1948).
- 5) G. E. Bacon: Acta. Cryst., **5**, 392 (1952).
- 6) N. M. Miles: Anal. Chim. Acta **33**, (2), 223 (1965).
- 7) 番匠吉衛, 鈴木茂, 斉藤イホ, 関口辰夫: 工業化学

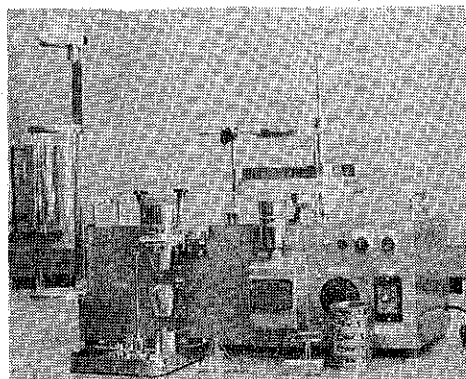
雑誌, **67**, 168 (1964).

- 8) P. Yu. Butyagin, A. A. Berlin, A. E. Kalmanson, L. A. Blyumenfel'd: Vysokomolekulyarnye Soedineniya, **1**, 865 (1959). S.W. Mrozowski, J.F. Andrew: Proc. Confs. Carbon, 4th, Buffalo 207 (1959).
- 9) V. A. Kargin, N. A. Plate: J. Polymer Sci., **52**, 155 (1961). V. A. Kargin, N. A. Plate, I. A. Litvinov, V. P. Shibaev, E. G. Lurie: Vysokomol. Soedin, **3**, 1091 (1961).
- 10) Scalan Richard S.: U.S. 3, 391, 211 (Cl. 260-676) 02 Jul. 1968.
- 11) H. Grohn, R. Paudert: Chem. Tech. (Belrin) **12**, 430 (1960).
- 12) H. Grohn, R. Paudert: Z. Chem., **3**, 89 (1963). H. Grohn, R. Paudert: Wiss. Z. Tech. Hechsch. Chem. Leuna-Merseburg, **3**, 203 (1960). H. Grohn, H. Friedrich, R. Paudert: Z. Chem., **2**, 24 (1962).
- 13) H. Grohn, R. Paudert: J. Prakt. Chem., **11**, 63 (1960).
- 14) N. A. Plate, V. A. Kargin: Journal of Polymer Science, Part C No. 4, 1027 (1963).
- 15) J. Lohff, H. Raether: Naturwissenschaften, **Bd**, **42**, 66 (1955).
- 16) H. Grohn, R. Paudert, B. Hösselbarth: Plaste Kautschuk, **13**, 1 (1966).
- 17) S. A. Parlo, N. K. Baramboim: Kolloid zhur., **11**, 420 (1949).
- 18) N. K. Baramboim: Legkaya. Prom., **10**, No. 4, 22 (1950).
- 19) N. K. Baramboim: Nauch. Trudy Moskow Tekhnol. Inst. Legkoi Prom., **6**, 45 (1955).
- 20) Augustat S.: Ernahrungs Forshung, **13**, (2), 475 (1968).
- 21) S. A. Komissarov, N. K. Baramboim: Vysokomol. Soedin. **B10**, (9), 683 (1968).
- 22) 金庭延慶, 池川昭子: 薬剤学投稿中.
- 23) 金庭延慶, 池川昭子: 日本薬学会第91年会で講演.
- 24) N. K. Baramboim, V. N. Gorodilov: Vysokomolekulyarnye Soedineniya, **2**, 197 (1960).
- 25) N. K. Baramboim, M. A. Sakharova: Nauch. Trudy Moskow Tekhnol. Inst. Legkoi Prom. Sbornik, **16**, 78 (1960). P. Tamas, T. Ferenc, D. Miklas: Magy. Kem. Foly, **74**, (11), 559 (1968).

- 26) N. K. Baramboim: Doklady Akad. Nauk. SSSR, 114, 568 (1957). N. K. Baramboim: Zhur. Fiz. Khim., 32, 433 (1958).
- 27) H. Grohn, K. Bischof: Wiss. Z. Tech. Hochsch. Chem. Leuna. Merburg, 4, 153 (1961/2).
- 28) H. Grohn, K. Bischof, M. Loesche, K. Moeckel: Plaste Kautschuk, 8, 593 (1961).
- 29) N. K. Baramboim: Zhur. Fiz. Khim., 32, 1248 (1958).
- 30) P. Yu. Butyagin: Vysokomol. Soedin. A9, (1), 136 (1967).
- 31) N. K. Baramboim: Zhur. Fiz. Khim., 32, 1049 (1958).
- 32) H. Grohn, K. Bischof: Plaste Kautschuk, 6, 361 (1959).
- 33) H. Grohn, W. Deters: Faserforsch. Textil. tech. 13, 544 (1962).
- 34) H. Grohn, C.V. Oprea: Rev. Roumaine Chim., 9, (11), 757 (1964), Plaste Kautschuk, 13, (7), 385 (1966).
- 35) P. Yu. Butyagin: Doklady. Akad. Nauk SSSR, 140, 145 (1961), 148, 129 (1963), 165, (1) 103 (1965).
P. Yu. Butyagin, I. V. Kolbanev, V. A. Radtsig: Fiz. Trerd. Teld, 5, (8), 2257 (1963).
A. M. Dubinskaya, P. Yu. Butyagin, A. A. Berlin: Dokl. Akad. Nauk. SSSR, 159, (3), 595. (1964). G. A. Abagyan, P. Yu. Butyagin: Biofizika, 9 (2) 180 (1964).
P. Yu. Butyagin: Abhandl. Deut. Akad. Wiss. Berlin. Kl. Med., 6, 161 (1964).
P. Yu. Butyagin, A. M. Dubinskaya, I. V. Kolbanev, V. A. Radtsig: Radiospektrosk. Trerd. Tela. Dokl. Vses. Soveshch. Krasnoyarsk. USSR, 414 (1964).
A. M. Dubinskaya, P. Yu. Butyagin: Vyso-
komol. Soedin. B9, (7), 525 (1967).
- 36) N. K. Baramboim: Nauchn. Tr. Mosk. Tekhnol. Inst. Legkoi Prom., 29, 127 (1964).
- 37) H. Grohn, K. Bischof: Chem. Tech. (Belrin), 11, 384 (1959).
H. Grohn, K. Bischof, H. Heusinger: Plaste Kautschuk, 8, 311 (1961), 9, 222 (1962).
- 38) W. Deters, Dehja-Chian Huang: Faserforsch. Textiltech., 14 (5) 183 (1963).
- 39) H. Grohn, Cl. V. Oprea: Analelc. Univ. Buc-
urest: Ser. Stiint. Nat., 14 (1) 27 (1965).
- 40) K. Bischoff, R. Korn: Plaste Kautschuk, 10 (11) 28 (1963), 8, 311 (1961).
- 41) N. K. Baramboim, Yu. S. Simakov: Nauchn. Tr. Mosk. Tekhnol. Inst. Legkoi Prom. No. 30, 188 (1964).
- 42) H. Grohn, Cl. V. Oprea: Rev. Roumaine Chim. 11 (11) 1297 (1966).

パウダーテスター海外へ進出!!

粉粒体の流動特性を数値的に評価する新しい試みとして、Carr の指数は最近粉粒体を取扱う現場、試験室、研究所等で大きな関心が寄せられています。この測定器としてのパウダーテスターは、一昨年発売以来既に 200 台を納入しました。また、米国マイクロメリテックス・インストルメント社と業務提携が行なわれ、米国においても活発な販売活動が開始されました。デュボン社では米国、スイス、オランダの研究所へ計 4 台が納入されたことをみてもパウダーテスターの効用が認められたものといえましょう。



貯槽内の粉粒体の流下現象

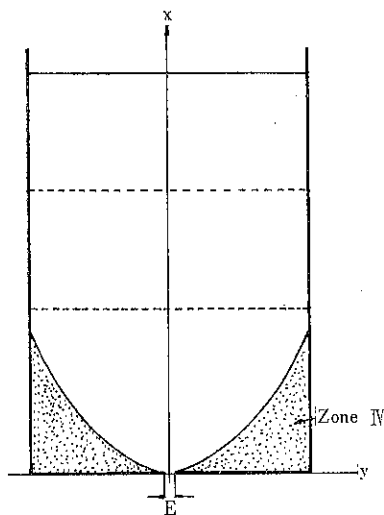
—コア・フローからマス・フローへの転移について—

九州工業大学	上	滝	具	貞
山口大学工学部	早	野	延	男
	山	中	久	人
日本電気株式会社	河	内	山	茂

§1. は し が き

ホッパーの設計に当って、最初に考慮すべき事柄は流出口で発生する閉塞を防止する問題と考えられる。この問題については、主として実用的な立場からの研究がこれまでにも数多く行なわれているようである¹⁾。とくに閉塞防止に焦点を絞って1935年より30年間に亘る文献を分類した三輪の報告²⁾は有意義なものと思われる。

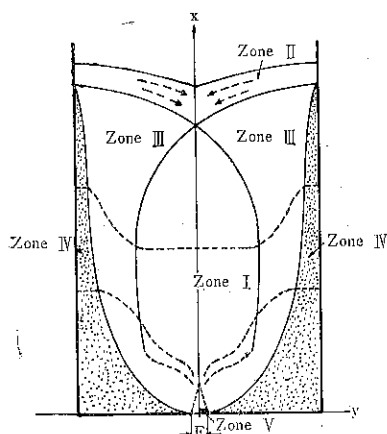
閉塞の問題が一応解決されたとして、つぎに問題となるのは貯槽内の粉粒体の流動状態³⁾⁴⁾に関するものである。一般に、ホッパー内の粉粒体の流動状態はコア・フロー (core flow, plug flow または funnel flow) とマス・フロー (mass flow) のいずれかに分けられる。(図-1, 参照) 図-1(a)の Zone IV は dead-space と呼ばれており、ホッパーへの粉粒体の供給とホッパー底部からの排出が連続的に行なわれている場合、常時内部に滞留している部分であり、貯槽内のスペースの利用度から見ても、また品質管理の面からも望ましい流動型式



(b) マス・フロー

Zone I : 乱流的流動領域
 Zone II : 表面層
 Zone III : 層流的流動領域
 Zone IV : デッドスペース
 Zone V : 重力による自然落下に近い部分

図1 ホッパー内の2つの流動領域

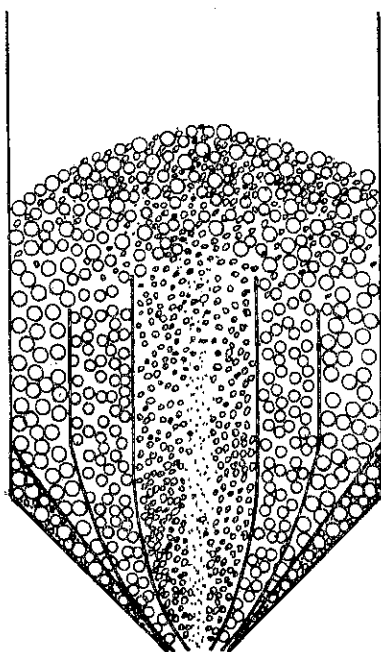


(a) コア・フロー

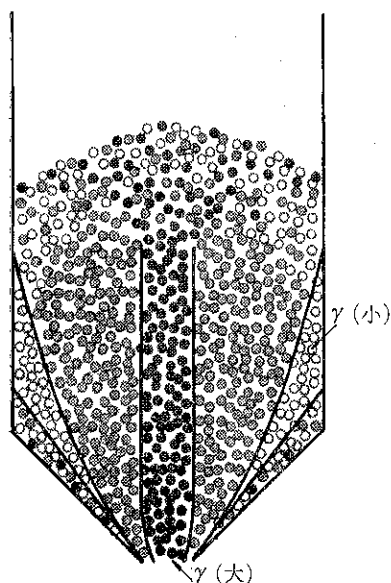
ではない。

さらに、コア・フローのもう一つの欠点として、材料の粒度分布が一樣でない場合、また比重の異った混合粒体層の場合には、いわゆる粒径偏析、比重偏析現象が発生し易いことが指摘されており¹⁷⁾ (図-2 参照)、ホッパー以後の工程に対して好ましい状態とはいえない、また内部に空気を含み易い粉体層に対しては、コア・フローの場合、いわゆるフラッシング現象発生確率の大きいといわれている⁵⁾。

一方、ホッパー内部の流動状態がマス・フロー (first



(a) 粒径偏析
細粒：中心部
粗粒：周辺部



(b) 比重偏析
比重の大なる粒子：中心部
比重の小なる粒子：周辺部
 γ ：粒子の比重量

図2 ホッパー内での偏析現象

in-first out の状態とも呼ばれている) となる場合には、コア・フローの場合の欠点は大部分消滅し、さらに大きな利点として回分流出操作においても、流出開始後かなりの期間粉粒体層の表面は水平を保ったまま降下するので、いわゆる表面の高さ(液面、液位と対比して)なる量が明確に定義できて、貯槽を粉粒体プロセス制御系⁶⁾の一つの要素と考える場合、制御が容易となるなどの利点が考えられる。

上述のようにホッパー内の流動型式としてはマス・フロー型が望ましいのは明らかなので、本報告では流出状態が円滑であるとして、マス・フロー実現のためにホッパーの具備すべき幾何学的な条件(形状・寸法など)を調べることにする。

ホッパーの容量、形状、寸法およびホッパーへの粉粒体の供給、ホッパーからの排出方法などについては前段及び次段の要素(工程)から決められるのが普通である。ホッパーの形状としては、対称ホッパーに限定しても円筒形ホッパー、逆円錐ホッパー、ピラミダル・ホッパー及び角型平底ホッパーなどが考えられるが、ここでは形状として最も基本的であり、また内部の流動状態(フロー・パターン)の観察が容易でもあるので、平底角型ホッパーについて実験を行った(図-3参照)。

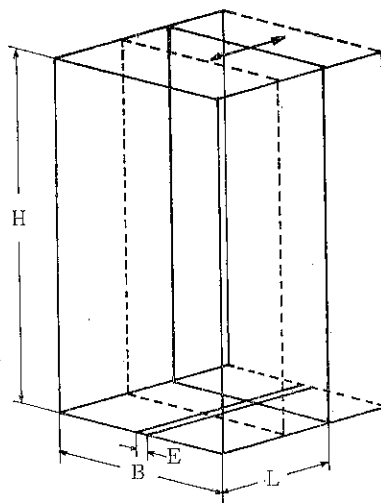


図3 角型平底ホッパー(背面板は前後に移動)

図-3では、背面の仕切板は前後に移動可能であり、いま前面のガラス面を通して、フロー・パターンを観察すると、あるスリット巾Eの値で、奥行きLを徐々に増加して行くと、あるLの値を境にして流動様式はコア・フローからマス・フローへ転移する。すなわち、特定のスリット巾に対して、マス・フローとなる最小のLの値(L_m)が存在する。そして、この最小のLの値 L_m は

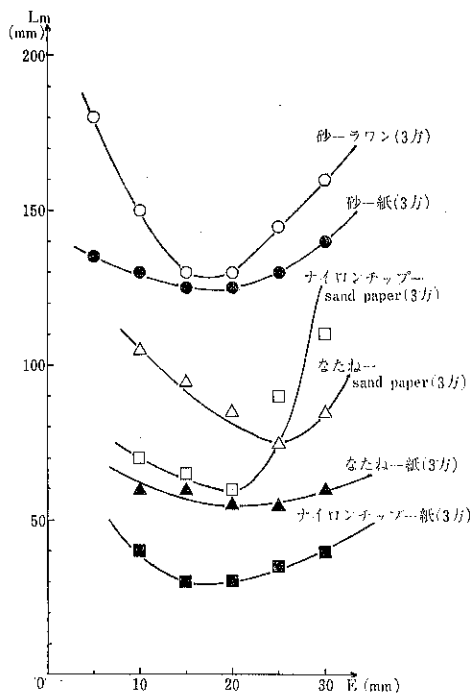


図4 コア・フローとマス・フローの境界曲線
(曲線の上部はマス・フロー領域)

容器の巾 B ，スリット巾 E が一定であっても粒子径，粒子の形状及び粒体と容器壁との摩擦係数などによって変化するが，その変化の状況は図-4のようなものとなる．図-4の各 $E \sim L_m$ 曲線の上部 ($L_m < L$ なる領域) はマス・フローとなる領域を示している．この図は，奥行き L の変化によるフロー・パターン(二次元)の推移を調べることににより導かれたものなので，結局マス・フローへの転移条件を調べることは，ホッパー内の流動状態の三次元的な検討を行うことに相当する．

図-4は，流動状態がマス・フローとなる容器の幾何学的条件を示したものであるが，定常的なマス・フロー(またはコア・フロー)状態が出来上がるまでの過程を考察する場合には鉛直方向(x 方向)及び水平方向(y 方向)の粒子の移動速度の時間的経過を調べることが必要となる．§5.では流動境界線(デッド・スペースの形状を示す曲線)の移動速度からマス・フローの発生条件を検討する．マス・フローの発生条件と流動境界線の移動状況との相互関係を最初に採り上げた五十嵐の報告⁷⁾は価値あるものと思われる．

以上より，コア・フローからマス・フローへの転移状況はフロー・パターンの三次元的な考察を必要とし，またこの問題はスリットを開いた瞬間からの過渡的な速度分布をも併せて検討することが必要となる．すなわち，

コア・フローとなるか，マス・フローとなるかは定常的な速度分布が確立されるまでの過渡状態によって決定されるものである．

実験に使用された材料は比重，形状及び壁との摩擦係数(μ_w)などの差異による効果を調べるために砂，なたね及びナイロン・チップの三種類を用いた．

§2. マス・フローについて

本実験では流動性の良好な粉粒体を用いて容器の形状(B ， L 及び H)とスリット巾 E との相互関係よりマス・フローが発生する状況を調べるわけであるが，この節では，いわゆるマス・フローの定義及び関連した事柄について，二，三検討を行うことにする．

(i) 慣用されている定義としては(内部の状態はさておき)ホッパー内の粉粒体の表面が水平のまま降下する流動状態がマス・フローであるといわれている．

(ii) また，first in-first outなる表現も貯槽の目的から考えて望ましい流動型式なので，マス・フローの別名として用いられているようである．

(iii) 表面が水平に降下する場合では，内部の(実は前面のガラス面上での)フロー・パターン中の流動境界線は必ず側壁に到達しているのが観察される(写真-1及び2参照)．いま，この場合を理想化して描けば図-5のようになり， $x = x_s$ 以上では流線は平行となっている．(x_s 以上では，粒子の水平方向の速度は0となる)いま，容器巾 $B = 30\text{cm}$ ，奥行き $L = 150\text{mm}$ ，スリット巾 $E = 10\text{mm}$ とした場合(材料，砂， $250 \sim 500\mu$ ；60%，三方の壁；ラワン材)，流出開始後，30秒経過時の状態は図-6の(b)のようになり，水平の標線(目印のための着色砂)4～6間の面積 $ABCD$ の部分は消失(流出)し，表面層(10番目の標線)は30秒後も水平のまま標線8の

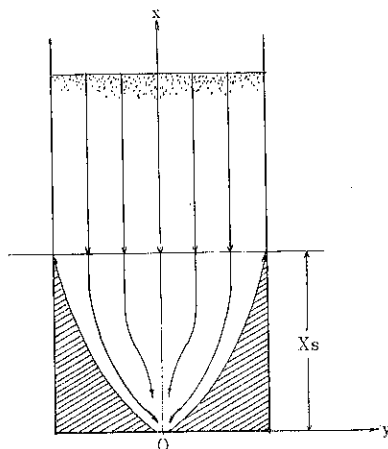
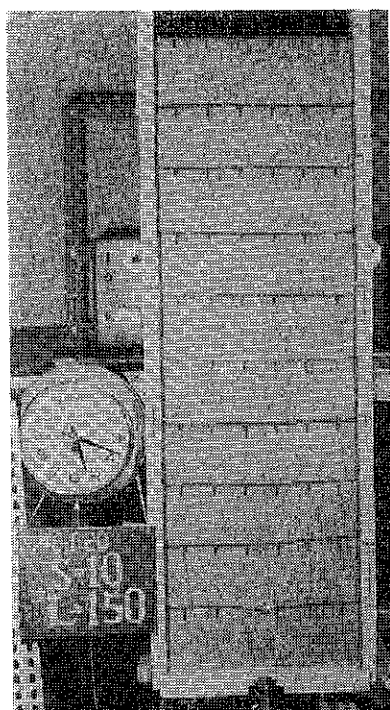
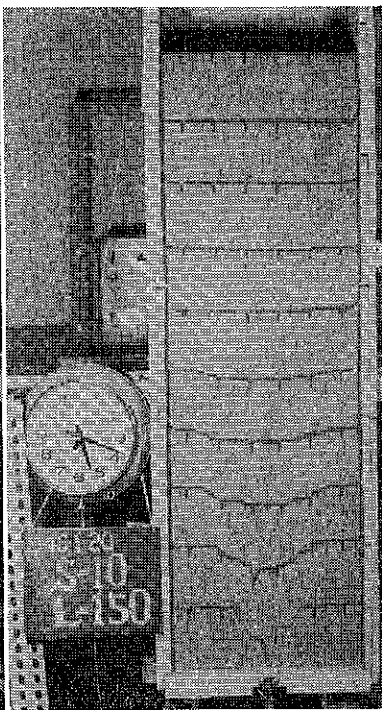


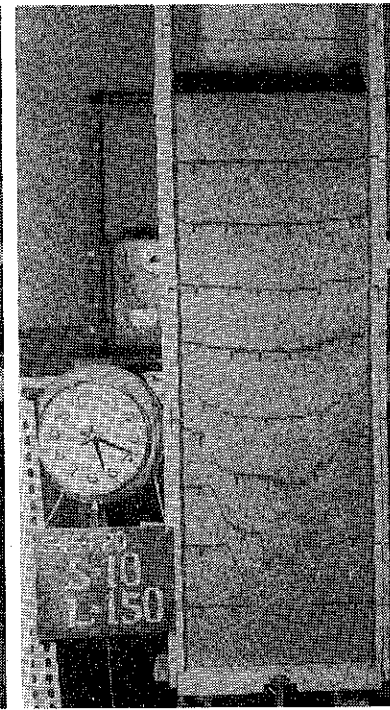
図5 マス・フローの場合の流線



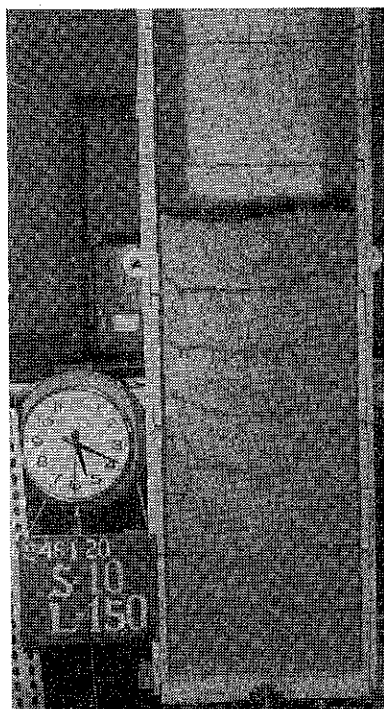
$t = 0.5$ 秒



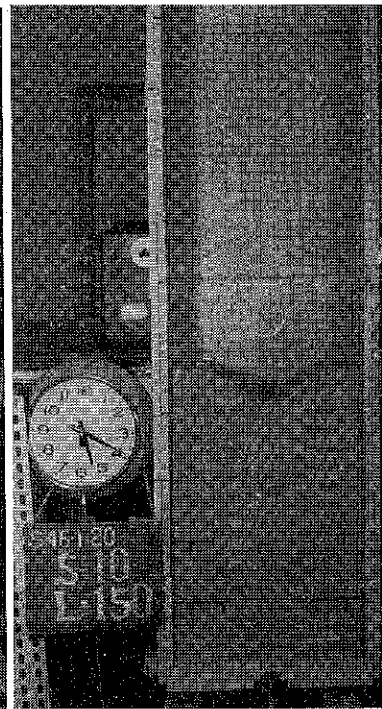
$t = 3.5$ 秒



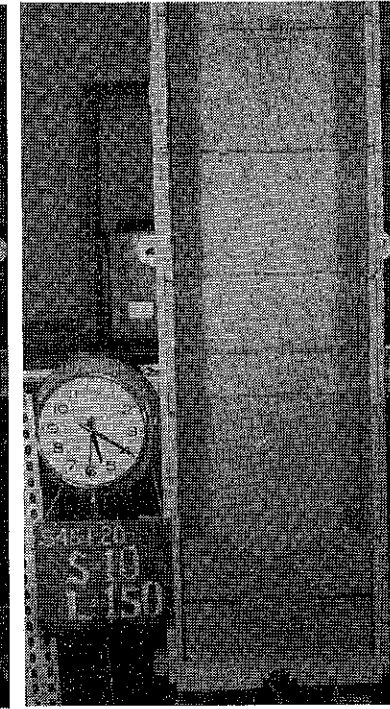
$t = 10.3$ 秒



$t = 30.1$ 秒

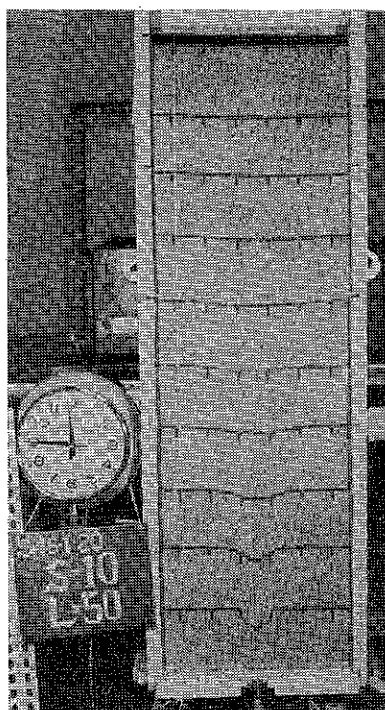


$t = 60.0$ 秒

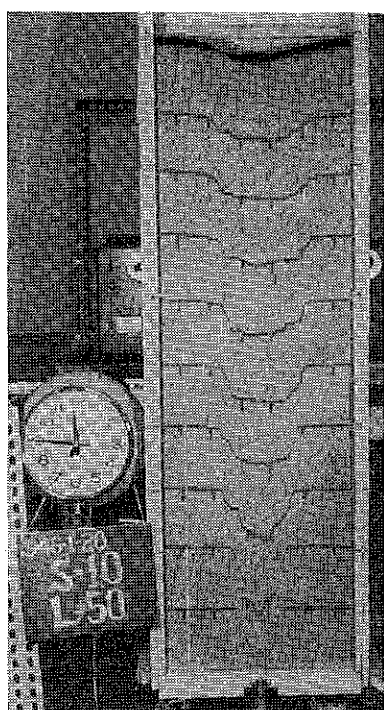


$t = 90.4$ 秒

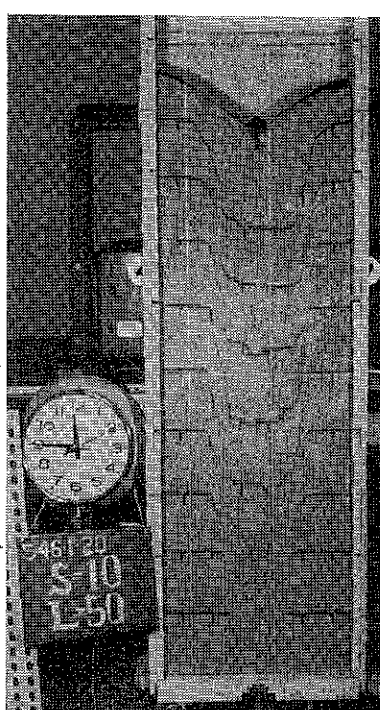
写真1 マス・フローの流動状態 (砂, 三方ラワン材)



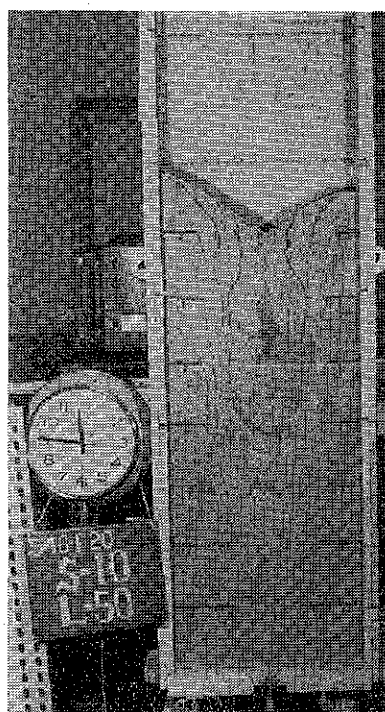
$t = 0.7$ 秒



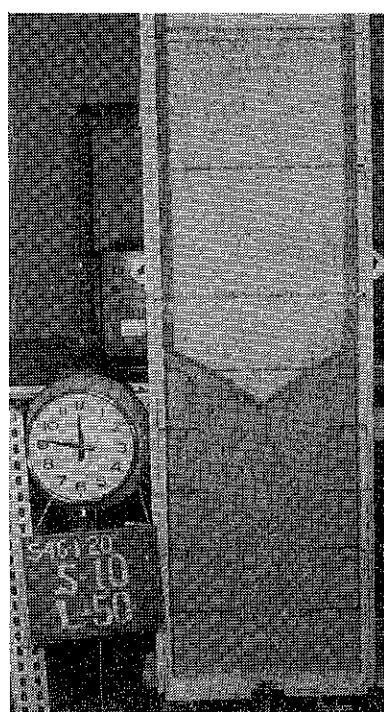
$t = 3.0$ 秒



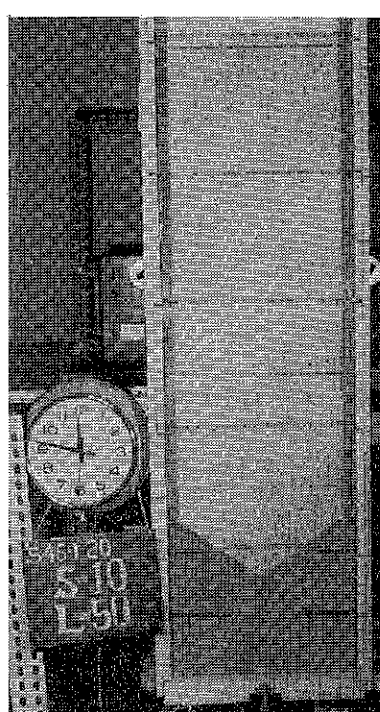
$t = 10.4$ 秒



$t = 29.9$ 秒



$t = 60.0$ 秒



$t = 90.4$ 秒

写真2 コア・フローの流動状態（砂，三方ラワン材）

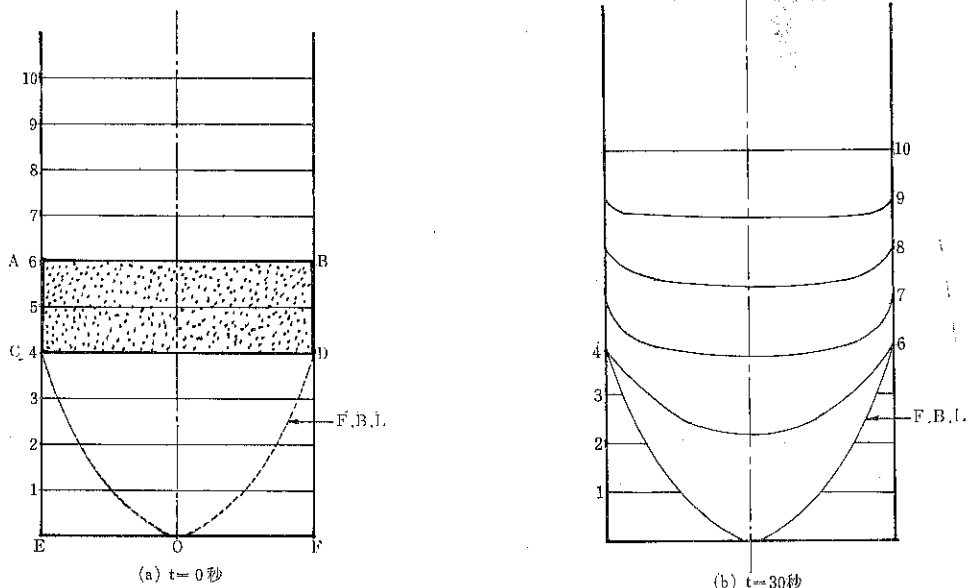


図6 マス・フロー状態が発生するまでの経過 F. B. L. (流動境界線)

位置まで降下して来ている。すなわち、この場合は理想的なマス・フロー状態と考えられる。いまの場合、奥行 L とスリット巾の比は $\frac{L}{E} = \frac{150}{10} = 15$ となっているが、後述するように、 $E=10\text{mm}$ の場合、 L が 50mm 程度ではマス・フローとはならないので、特定の粉粒体材料に対して、 E と L の値を広い範囲に亘って変化させ、各場合に対するフロー・パターンを調べることが必要となって来る。また、同時に側壁の粗滑の度合いの影響についても検討が必要である。図-6の水平の標線の間隔は 10cm となっており、したがって初期充填高さは

1m である。また図中 F. B. L. と記した曲線 (flow boundary line; 流動境界線) に囲まれた部分は流下する部分であり、両側の CEO, DFO (dead-space) などの形状は 60 秒後も殆んど変らない。(全部流出する迄に約 90 秒を要する)

(iv) 図-7(a), (b), (c) は E は同じ 10mm で、 L が 50mm の場合を示したものである。(他の条件は図-6と全く同じ) 流出開始後 10 秒で F. B. L. の上端は標線 9 の所まで達しており、その形状は逆釣鐘型で、以前に図-5に示したような流線の平行な部分は存在せず、した

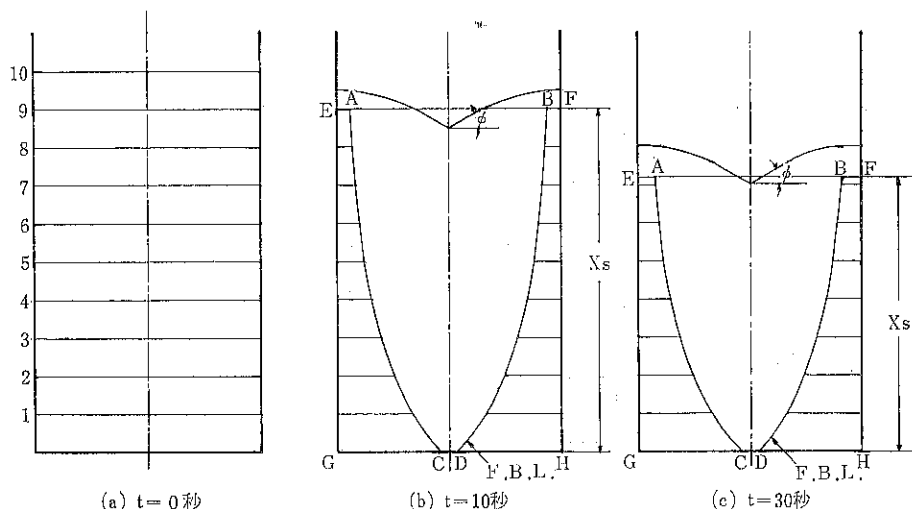


図7 コア・フロー状態となるまでの経過

がつて、表面は水平に降下しない（コア・フロー）。図一7(c)は30秒後の状態を示したものであるが、表面のV字型の形状は殆んど変らず水平線と角度 ϕ （安息角に近い値）をなしている。この実験は回分流出の場合であるが、もし流出開始後、10秒後に上部より粉粒体が供給された場合を考えると、図一7(b)の両側のEACG及びBFHDなどの部分（dead-space）は容器内に残留し、last in-first outの状態となり、ホッパーデザインの立場からは、最も不経済な流動型式のものとなる。

(v) 図一6及び図一7の特徴を要約すると、図一6では流出開始後、10秒以下で流動境界線（F. B. L.）は側壁に到達し、30秒位でこの形状は確定したものとなり、その間、表面は水平に下降して来るが、一方図一7では約3秒で表面は若干凹み始め、10秒後には表面のV型の形状は一定となり、また両側のデッドスペースの形状も確定したものとなっている。すなわち、マス・フロー（図一6）ではF. B. L.の側壁方向（y方向）の移動は極めて速く、コア・フロー（図一7）の場合にはF. B. L.の移動速度は遅いといえる。

以上よりF. B. L.の（または水平の標線のx及びy方向の）移動速度を定量的に考察することはマス・フロー

発生条件を調べる上に極めて有用と考えられる。

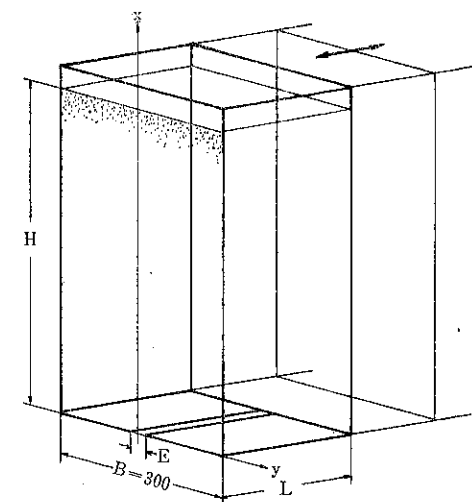
(vi) この実験では、マス・フロー状態の目安として、表面が水平のまま10cm（標線間隔に等しい）以上降下した場合をマス・フローと見做している。

§ 3. 実験装置及び方法

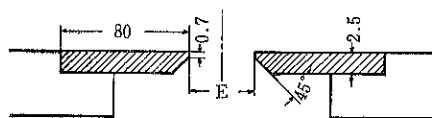
装置は図一8のような角型のものである。前面はガラス板で、背面は前後に移動可能で、Lを200mmまで移動することができる。（L=50, 100, 150及び200mmの4種類）スリット巾Eは5mm毎に最大30mm迄変化させて実験を行ったので、組合せはLが4段階、Eが6段階（5, 10, 15, 20, 25, 30）で、一つの材料について24通りの実験（回分流出）が必要である。（容器巾Bは一定（300mm））材料は砂（多面体）、なたね（球）及

表1 試料の物性値

	砂(多面体)	なたね(球)	ナイロンチップ (円筒d, h)
平均粒径(d)		1.78mm	d=2.61mm h=2.43mm
見掛け密度(ρ)	1.385g/cm ³	0.656g/cm ³	0.717g/cm ³
安息角(ϕ)	34°19'	26°12'	29°06'
摩擦係数 (μ_w)			
サンドペーパー No.40	0.675	0.438	0.460
紙	0.559	0.274	0.286
ラワン板	0.621	0.306	0.385
ガラス	0.423	0.148	0.286

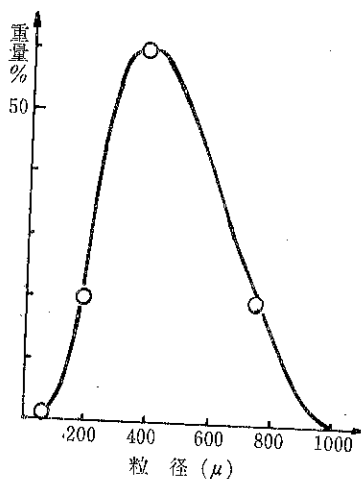


(ホッパーの形状と寸法)



(スリット部の形状と寸法)

図8 実験装置（奥行きLの変化範囲：50, 100, 150, 200, 250, 300mm）



粒径(μ)	0~125	125~250	250~500	500~1000
重量(%)	0.82	19.65	59.59	19.94

図9 砂の粒度分布

びナイロンチップ（円筒形）の三種類で、それぞれの物性値は表一に示されている。（図一に砂の粒度分布を示す）初期充填高さは凡て1 m とし、10cm 間隔に水平の標線（着色砂、石灰などを使用）を入れ、流出開始

後の標線の変化状態を約3秒間隔で撮影する方法を採っている。貯槽への粉粒体の充填は少量ずつ均等に撒布する方法を用いた。

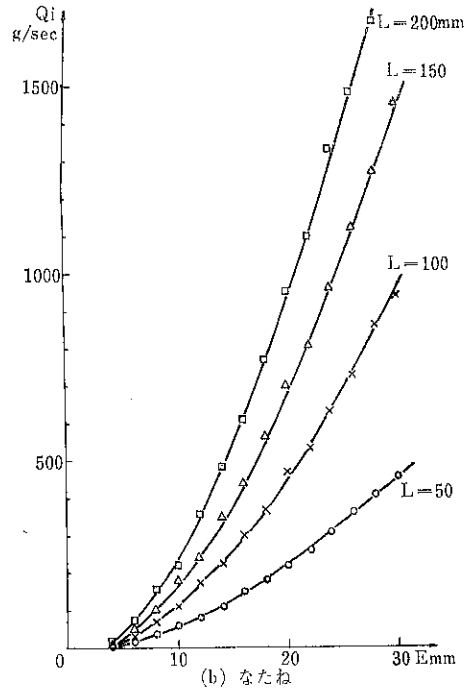
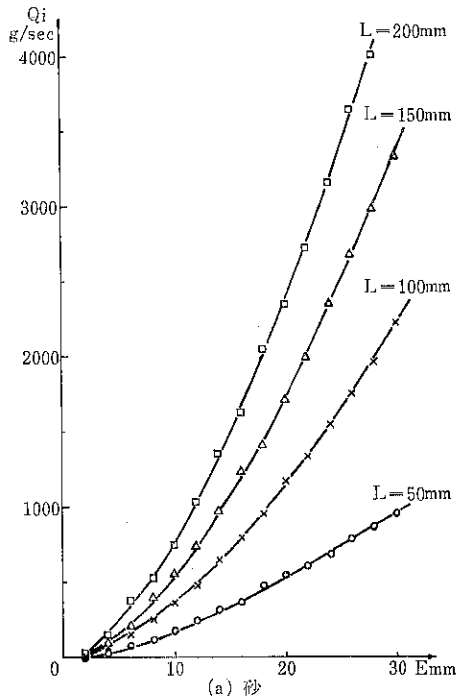


図10 平均流出量 Q_i のスリット巾 E による変化

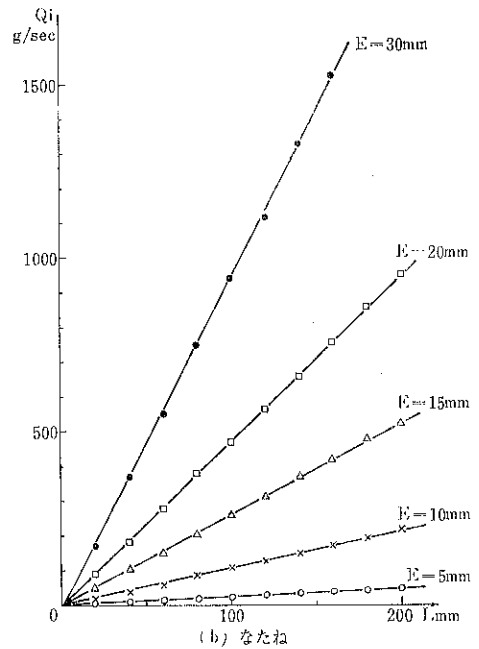
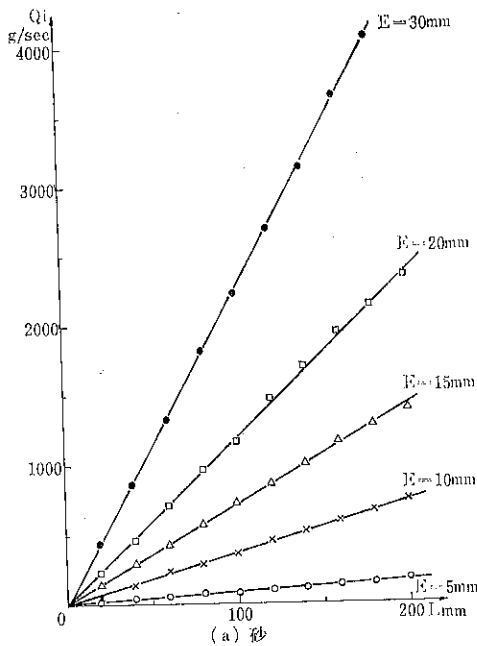


図11 平均流出量 Q_i の奥行き L による変化

§ 4. 平均流出量 Q_i の E 及び L による変化について

(a) 平均流出量 Q_i の測定 $Q_i \sim E$ 及び $Q_i \sim L$ の関係を図-10及び図-11に示す。これらの図面より Q_i は L に比例し、またスリット巾 E については E^n ($1 < n < 2$) で変化しているので、 Q_i を

$$Q_i = Q_0 L (E - k)^n \quad \dots\dots(1)$$

で表わし (k は empty annule と呼ばれる量⁹⁾ で、液体での縮流効果に相当) 式(1)の両辺の対数を取り、 Q_0 及び n , k などを決定する。(図-12, 13参照)

砂の場合

$$Q_i = 0.994 \rho \sqrt{g} L (E - 0.11)^{1.560} \quad \dots\dots(2)$$

なたねの場合

$$Q_i = 0.896 \rho \sqrt{g} L (E - 0.22)^{1.541} \quad \dots\dots(3)$$

となる。式中の ρ は見掛密度を示し、 ρ , g , L , E などの単位は C. G. S 単位を用いている。

(b) ガラス面上のフロー・パターンと内部(奥行き方向)での流動状態との関係

§ 1., § 2 で述べたようにフロン・パターンはガラ

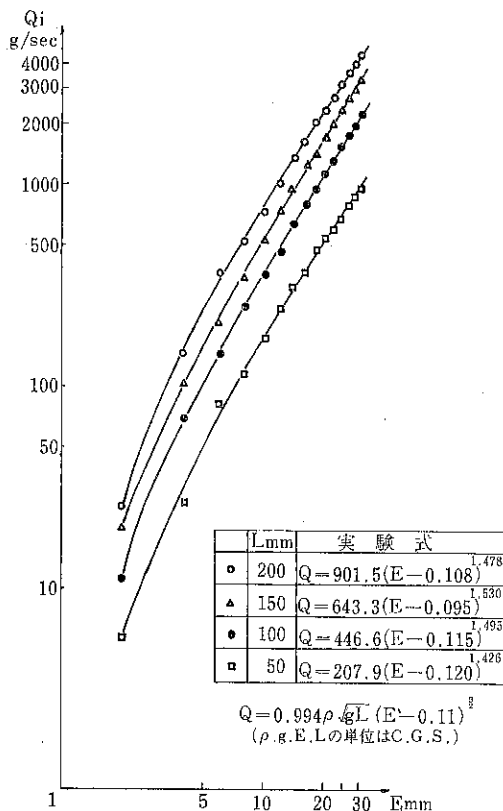


図12 砂の平均流出量 Q_i の実験式
(式中の ρ は見掛密度)

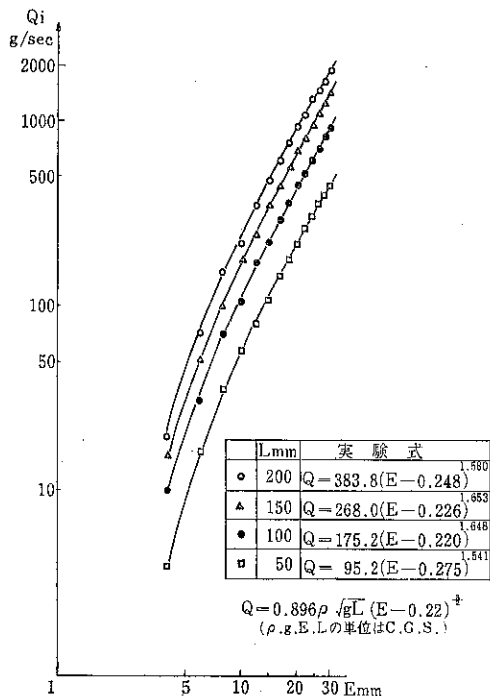


図13 なたねの平均流出量 Q_i の実験式
(式中の ρ は見掛密度)

ス面上の標線の移動そのものであるが、本実験のように奥行き L がスリット巾 E に比し充分大きい場合には、ガラス面上の速度分布がそのまま奥行き方向の速度分布と完全に一致するかどうかは検討を要する所と考えられる。

図-14の斜線の部分は標線が $dt = t_1 - t_2$ 秒間(約3秒)に移動する面積 S_1 を表わし、これより

$$Q_s = \rho L \frac{S_1}{dt} \quad \text{gr/sec} \quad \dots\dots(4)$$

なる式で表わされる量をガラス面上での瞬間流出量と考え、すでに求めた Q_i と比較すれば図-15が得られる。図中の一点鎖線は対応する平均流出量 Q_i の値を示したものであり H の小さい所(流出口に近い所)では、奥行き L の増加と共に Q_i と Q_s の差は大きくなっている。すなわち L が大きい場合、ガラス面上の流下速度は内部(奥行き方向)より小さいものと考えられる。この状況を模型的に示したのが図-16である。これは $Q_i \sim L$ 曲線が直線関係にある(図-11参照)ことから予想される。

§ 5. 流動境界線 (F. B. L.) の移動について

すでに § 2. の所で述べたように、マス・フローの発生は F. B. L. が側壁に達することが必要条件となってい

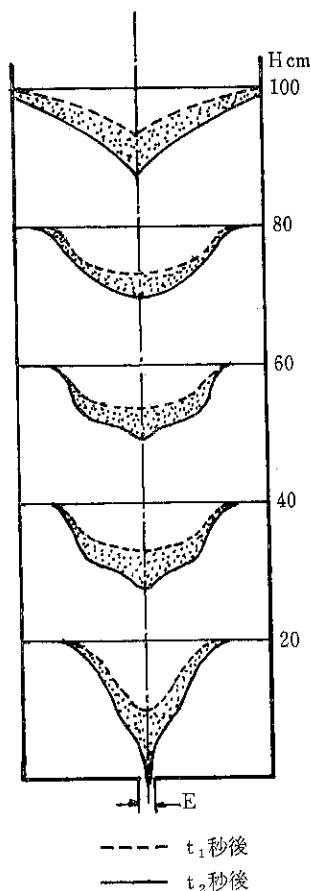


図14 ガラス面上の速度分布

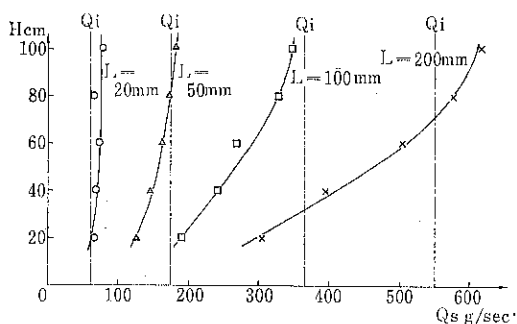


図15 平均流出量 Q_i と表面上（ガラス面）での瞬間流出量 Q_s との奥行き L による変化（砂 $E=10\text{mm}$ ）

る。この節では F. B. L. の水平方向（ y 方向）の移動状況を時間的に追跡し、奥行き L によって移動速度がどのように変化するかについて考察する。

図—17(a), (b), (c)に砂の場合の F. B. L. の移動状況が示されている。(a), (b), (c)共に F. B. L. の流出初期

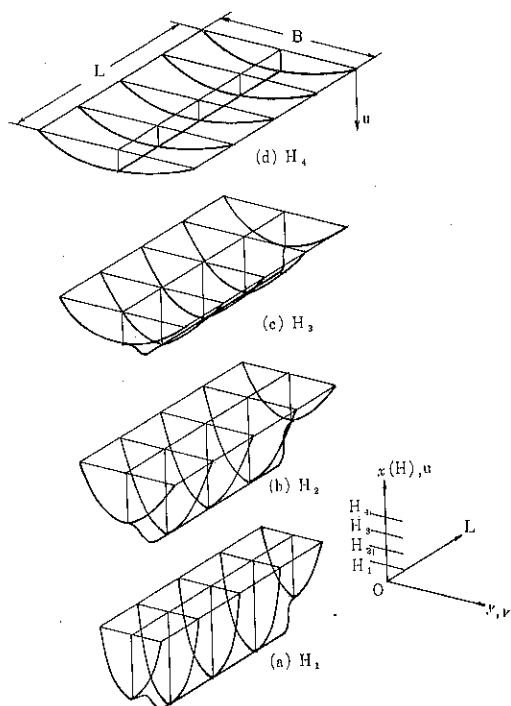


図16 三次元的速度分布曲線の概形

の移動は極めて早く、時間の経過と共に緩やかになり、遂には一定の形状に落付く状況が観察される。(a)は典型的なマス・フロー型であり、(c)はコア・フローの場合である。いま、これらの図を横軸に F. B. L. の y 方向の速度 v (mm/sec) を、縦軸に層高 H (mm) を取り、流出開始後の経過時間をパラメーターとして描けば、図—18, 19, 20となり F. B. L. の移動速度の推移が一層明瞭となる。すなわち、同じスリット巾であっても奥行きの変化により流動境界線の移動は大きく変化することが判る。

さらに横軸に経過時間、縦軸に v を取れば、図—21(a), (b), (c)のようになり、コア・フローの場合（図—21(c)）では、流出開始後7秒程度で F. B. L. の水平方向の移動速度は殆んど0となるが、マス・フローでは（図—21(a)） v は50秒を經過して漸く0に近づいている。すなわち、奥行き L が小さい場合には F. B. L. は短時間に移動し終り、ある決った形状となるが（この定常的な流動境界線上を粒子が流下する。したがって F. B. L. の y 方向の移動速度が0となっても粒子の y 方向の速度は0とはならない。過渡状態では F. B. L. は $+y$ 方向に動き、一方粒子は $-y$ 方向（中心軸方向）に向って動く）、一方、 L が大きい場合には F. B. L. は $+y$ 方向へ動き続け、定常状態（F. B. L. の y 方向への速度が

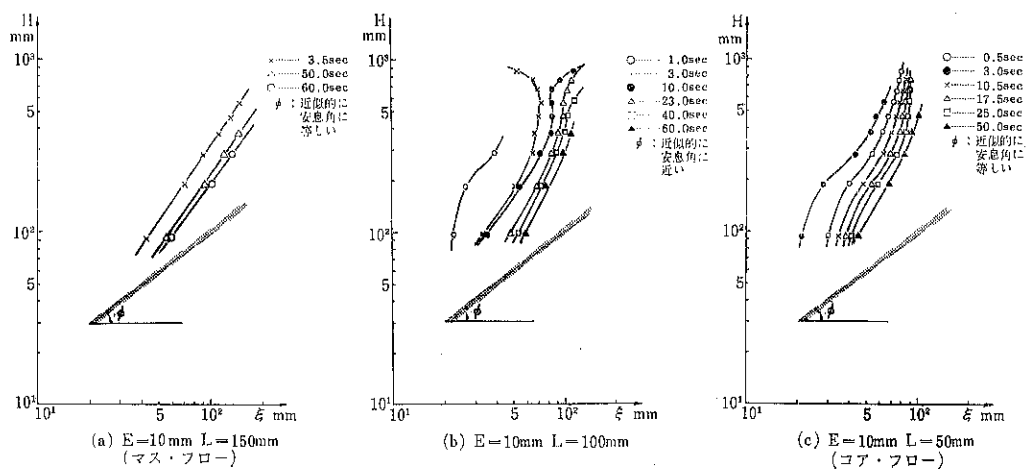


図17 砂の流動境界線 (F. B. L.) の移動状況

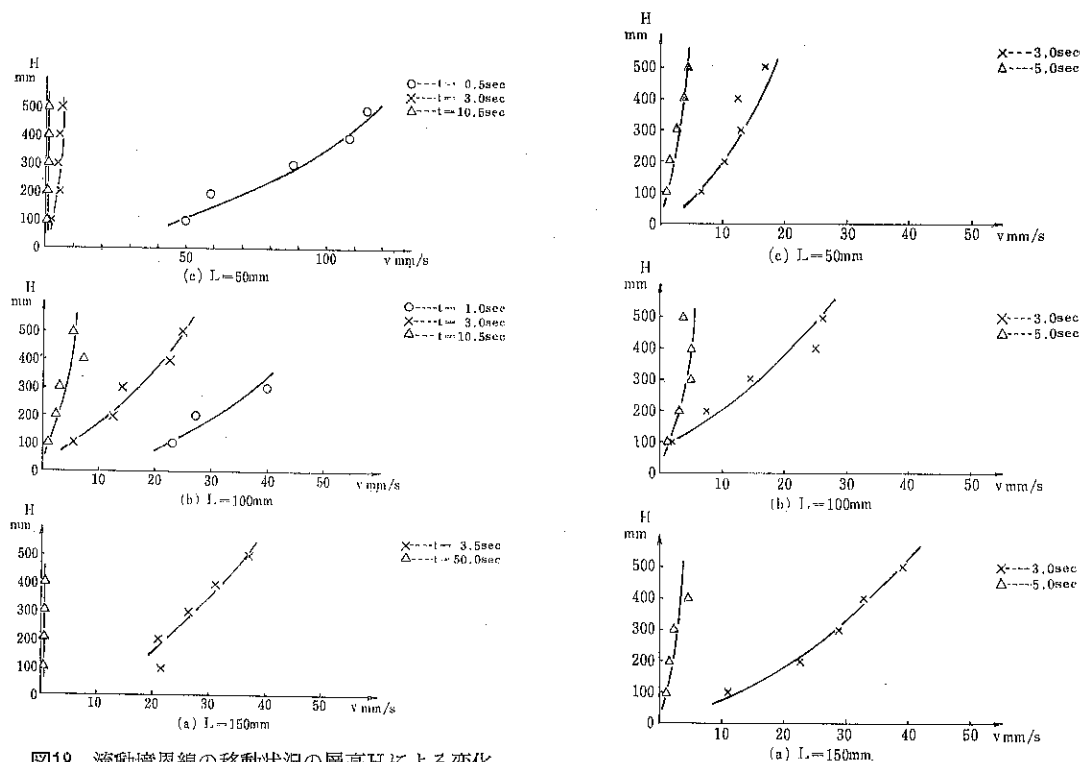


図18 流動境界線の移動状況の層高Hによる変化
(砂, $E=10\text{mm}$)

図19 流動境界線の移動状況の層高Hによる変化
(砂, $E=20\text{mm}$)

0) に達するまでに長時間を要することになる。

図-22は鉛直方向 (x 方向) の速度の時間的経過を示したものである (砂, $E=10\text{mm}$)。回分流出の実験では鉛直方向の速度 u を長時間に亘って追跡することは困難であるが (下層部分の粉粒体層は流出してしまうので)、図-22では u は流出開始後 3~5 秒で大体定常状態に入っている (u が時間軸に水平)。したがって 図-21(c) と

図-22(c) とを結びつけて見れば、過渡状態では (流出開始後、約 10 秒) 平均的に見て $u \gg v$ であり、F. B. L. が側壁に到達する前に粒体層表面の粒子は降下し始め、表面は V 字型となり、コア・フロー状態となる。また、図-21(a) と 図-22(a) とを同時に考慮すると、出口より上方 $x=400\text{mm}$ 程度の所では $t=3\sim 6$ 秒の間で v は $30\text{mm/s} \sim 10\text{mm/s}$ に減少するが、 u の方は大体 10mm/s

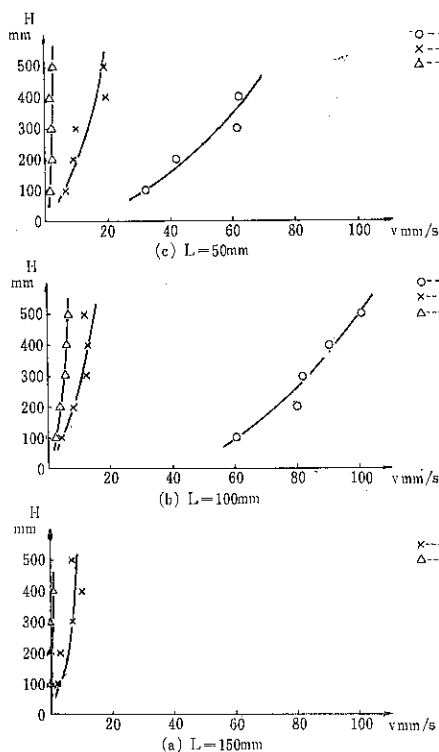


図20 流動境界線の移動状況の層高Hによる変化 (砂, E=30mm)

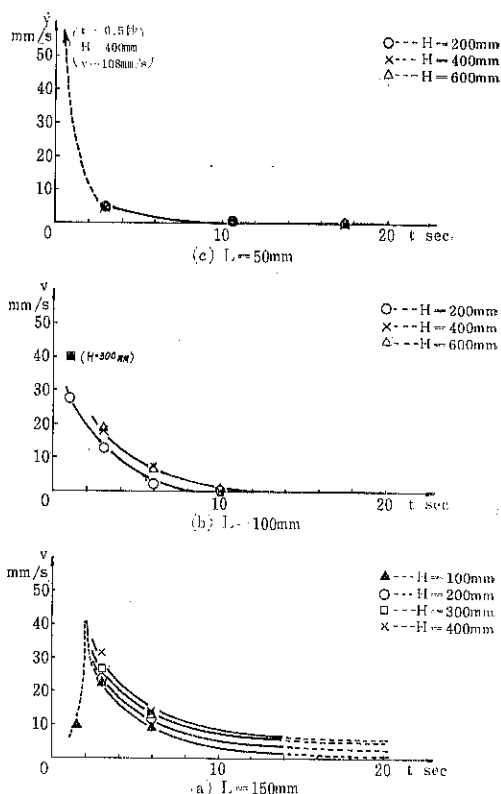


図21 流動境界線の時間の経過による変化 (砂, E=10mm)

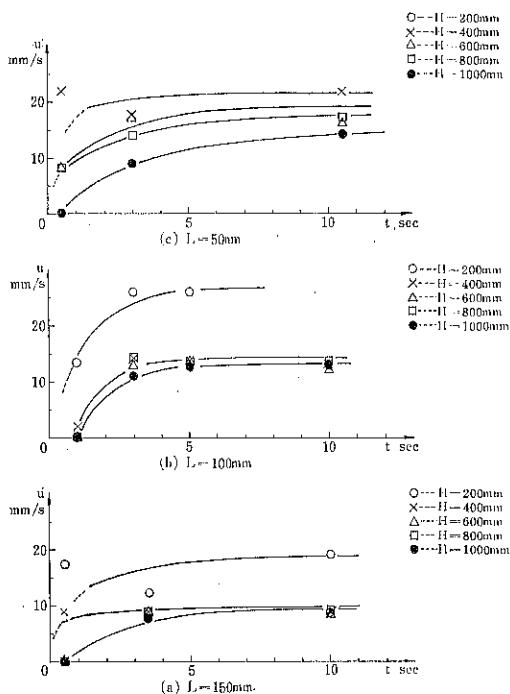


図22 鉛直方向の速度の時間的経過 (砂, E=10mm)

程度であり、粒子のx及びy方向の移動距離

$$x_{3 \sim 6} = \int_{t=3}^6 u \cdot dt \text{ 及び } y_{3 \sim 6} = \int_{t=3}^6 v \cdot dt$$

を比較すれば、 $x_{3 \sim 6} < y_{3 \sim 6}$ となり、粒体層表面が凹む前に F. B. L. は側壁に到達してしまうので (容器の巾は有限) マス・フローが実現することになる。

(この報告では“表面が水平のまま降下する場合”をマス・フローの定義としているが、表面が幾分凹んだ状態であっても容器の巾全域に亘って粉粒体層が定常的に流下すれば first in-first out なる状態となり、目的は達せられる。したがって、この場合を含めてマス・フローと定義しても良いと考えられるが、結局この問題は容器の巾Bの大小に関係して来る訳で、スリット巾、初期充填高さに比してBが過大な場合には、コア・フローの場合は勿論、マス・フローにおいてもデッド・スペースの全体に占める割合は大となり、Bを余り大きくすることは、ホッパー設計上得策とは考えられない。)

§ 6. コア・フロー～マス・フロー転移曲線について

以上では、主として材料を砂とし、スリット巾Eを

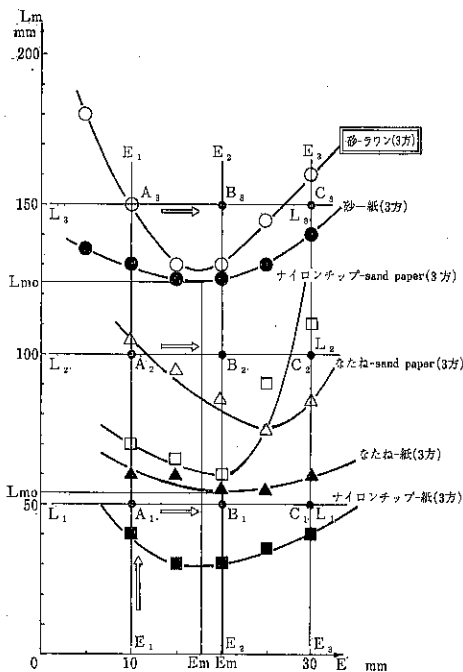


図23 コア・フローとマス・フローの境界曲線

10mmとした場合の実験結果について述べているが、吾々の主なる目的は種々のスリット巾に対して、また各種の側壁の状況に対して、マス・フローが実現する最小の奥行きを見出すことにある。図-23には三種類の材料に対する $E \sim L_m$ 曲線が示されている (L_m ; マス・フローが発生する最小の奥行き)。この図では、ある E の値に対して奥行きが L_m では流動型がマス・フローとなることを示している。マス・フローさえ実現出来れば良いというのであれば L を L_m 以上にする必要はないわけである。また図より $E \sim L_m$ 曲線は凹形であり、特定の材料と壁面の状態に対しては、 E の増加と共に L_m に最小値 (これを L_{m0} と記す) が存在する。

これらの曲線の特徴を列記すれば

- (i) 同じ材料であっても、 μ_w が小さい程マス・フローとなり易い。($E \sim L_m$ 曲線が下側に出る)
- (ii) μ_w (壁摩擦係数) が大きい程、最小点 L_{m0} の

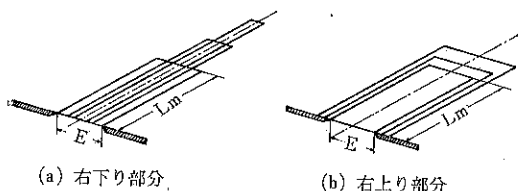


図24 $E \sim L_m$ 曲線 (図-23) のスリット幅と奥行きとの関係

両側での曲線の傾斜は甚しい。

(iii) L_{m0} となる E の値、 E_m は μ_w が大きい場合の方が幾分大きい傾向が見られる。(砂の場合は明瞭ではない) などが観察される。

図-24は $E \sim L_m$ 曲線の '右下り' の部分と '右上り' の部分について、 E と L_m の状態を模式的に示したものである。図-25は L_m とスリット巾の割合を横軸をスリット巾として示したもので、ホッパーの容量が定まっている場合、その形状の決定に対して有用なものと考えられる。

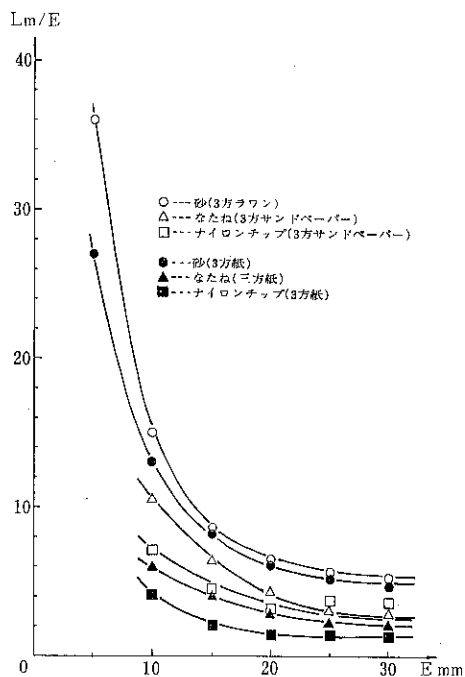


図25 角型ホッパーのスリット巾 E とマス・フローとなる奥行き L_m との割合

§7. u, v の比較によるコア～マス転移曲線の解釈

前節でマス・フローとなるための貯槽のスリット巾と最小の奥行きとの関係 ($E \sim L_m$ 曲線) が求められたので、吾々の目的は一応達せられた訳であるが、§5, §6で示したように過渡状態及び定常状態での速度分布 u, v が求められているので、この節では u, v の値及びその変化の傾向とコア・フロー及びマス・フローとの関係について考察する。すでに §1. で述べたように

- (i) 速度分布の状態から考えて、コア・フローとなるかマス・フローとなるかは定常的な速度分布が確定するまでの過渡状態 ($v \sim t, u \sim t$ 曲線) によって決まるものであり、

(ii) また貯槽の形状、寸法とマス・フロー及びコア・フローとの関係を考える場合には、E, L, H及びBなどの量を考察の対象とすることが必要となる。(三次元的考察が必要)

(iii) どの量を変数とし、またはパラメーターとするかは順次検討を行うとして考慮すべき変数は全部で (u, v, t), (E, L, H, B), (μ_w) の8個である。

(iv) μ_w は材料と容器より決まるのでパラメーターと考えられる。H及びBは実用的な立場から、一応パラメーターと見るのが適当と思われる。

(v) 残るのはu, v, t, E, Lの5ケであるが、u, vを

$$\begin{cases} u \equiv u(E, L, t) \\ v \equiv v(E, L, t) \end{cases} \quad \dots\dots(5)$$

と表わすのが自然であり、このように置けば上記の項目(i)と(ii)は上式によって結ばれたことになる。

(vi) ここで式(5)中のtであるがこれはu~t曲線(図-22(a), (b), (c))を見るとt≒3秒程度で、各種のHに対して鉛直方向の速度uは殆んど定常(u~t曲線は

水平)となっている。また図-21のv~t曲線ではvは流出開始直後に大きな値を取るが、約3~6秒で飽和する傾向にある。v~t曲線はLによって変化の様子が異なるが、ここでは一応の目安としてt=3秒でのvの値をもって過渡状態のvを代表させることにする。以上より式(5)は

$$\begin{cases} u \equiv u(E, L) \\ v \equiv v(E, L) \end{cases} \quad \dots\dots(6)$$

となり、パラメーターは μ_w , B, H及びt=3秒の4ケとなる。(正しくは、 $\bar{v} = \frac{1}{t_s} \int_0^{t_s} v \cdot dt$ で過渡状態のvを表わすか、またはu~t及びv~t曲線下の面積(それぞれ鉛直及び水平方向の移動距離)の大小を比較することによって、コア・フロー、マス・フローの判定基準とすべきものと考えられるが、t=0近傍でのu, vの値を正確に測定することは困難でもあり、また測定値は二次元的な速度(ガラス面上の速度)でもあるので上記の近似を用いた)

(vii) 図-26はu, vが流出口よりの距離Hによって、どのように変るかを示したものであり、t=3秒でu, v共L=150mmの場合を除いて、一応定常状態に近づいているのが観察される。L=150mmの場合については後述する。

(viii) 図-27はt=3秒でのv~Eの関係を示したものであり、

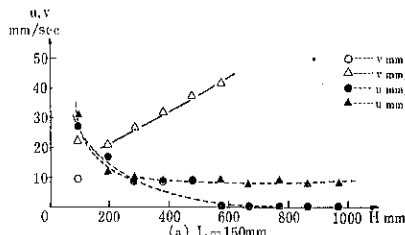
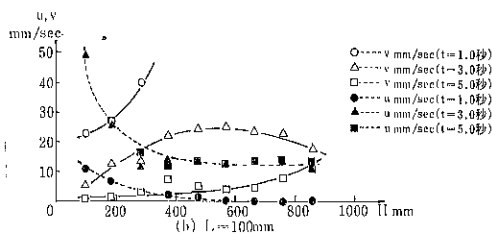
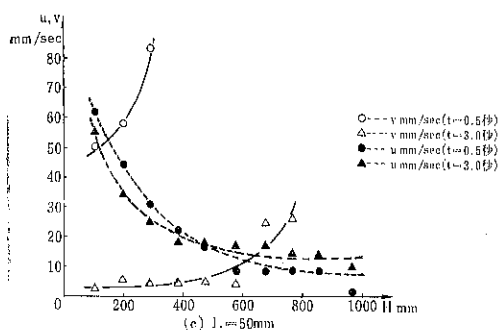


図26 u (鉛直方向速度), v (横方向速度) の層高Hによる変化 (砂, E=10mm)

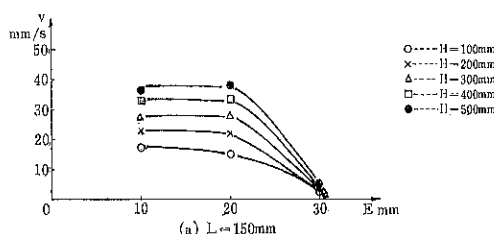
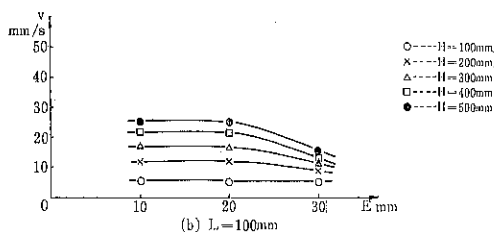
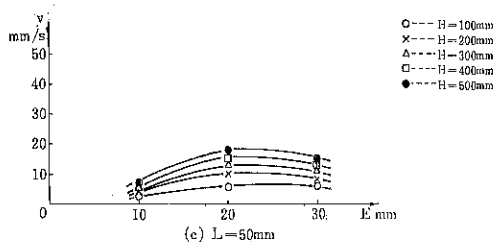


図27 v~E曲線 (砂, t=3秒)

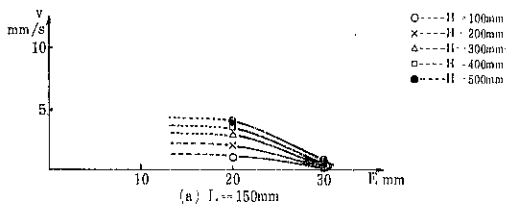
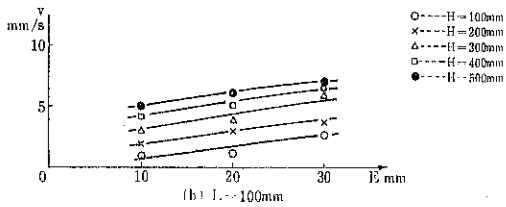
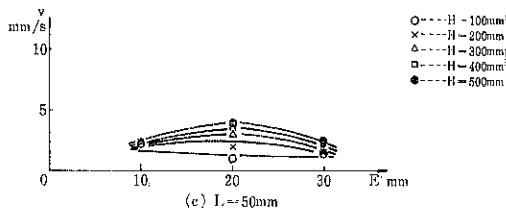


図28 $v \sim E$ 曲線 (砂, $t = 5$ 秒)

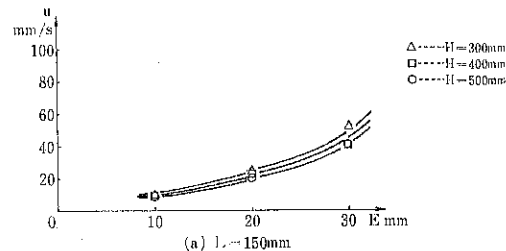
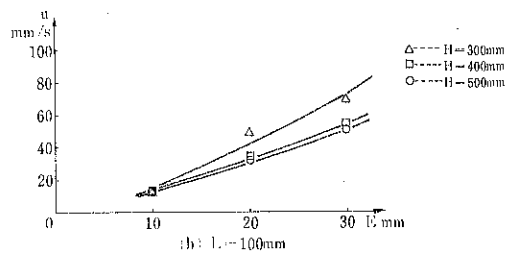
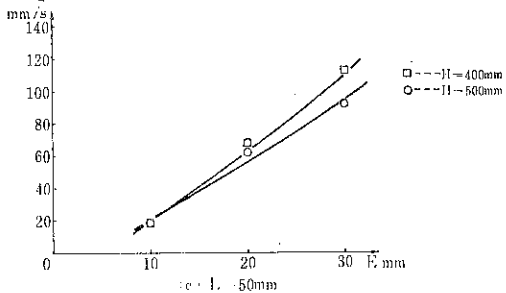


図29 $u \sim E$ 曲線 (砂, $t = 3$ 秒)

のであり, $L=50\text{mm}$, $L=100\text{mm}$ では $v \sim E$ 曲線は大体平坦であるが, $L=150\text{mm}$ では $E=30\text{mm}$ で v は殆んど 0 となっており, ' $t=3$ 秒程度で v は飽和する ' という (vi) の近似はこの場合, それ程粗い近似ではない. (図-28は参考までに $t=5$ 秒での $v \sim E$ 曲線を示したものであるが, 傾向は $t=3$ 秒のものと類似しており, また v の値は各 L , 各 E に対して 5mm/sec 以下となっており, やはり近似 (vi) が一応の目安となるものと考えられる)

(ix) u と E との関係 ($t=3$ 秒) が図-29に示されている. 図より鉛直方向の速度 u は E と共に増加するが, u の値そのものは奥行き増加によって減少している. これは平均流出量 Q_i が L と共に直線的に増加する傾向 (図-11) と一見矛盾するが, このことは図-30の $v \sim L$ 曲線を見れば, $L \rightarrow$ 大と共に v は激しく増加しており, 流出量が単位時間内に Zone V (図-1(a)参照) に流入する粉粒体の量によるものと考えれば (u と v との合ベクトルが流出量を支配するものと考えれば), 上記の $u \sim E$ 曲線の傾向は理解される.

(x) 図-30(a)及び(b)は $t=3$ 秒での $v \sim L$ 及び $u \sim L$ 曲線を示したものである.

(xi) この節の主題は速度分布 u , v からコアへマス・フローの転移を説明することにある. これは具体的に

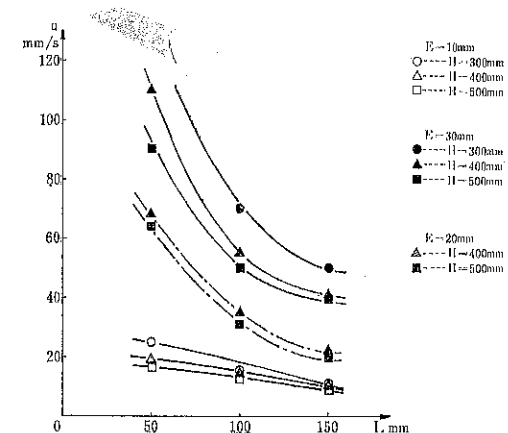
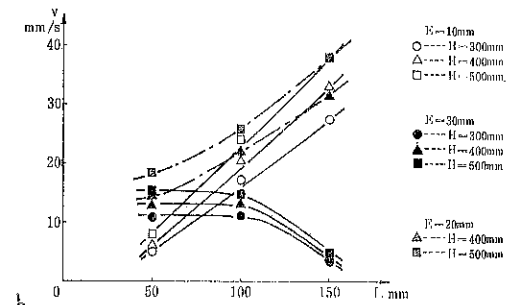


図30 $v \sim L$, 及び $u \sim L$ 曲線 (砂, $t = 3$ 秒)

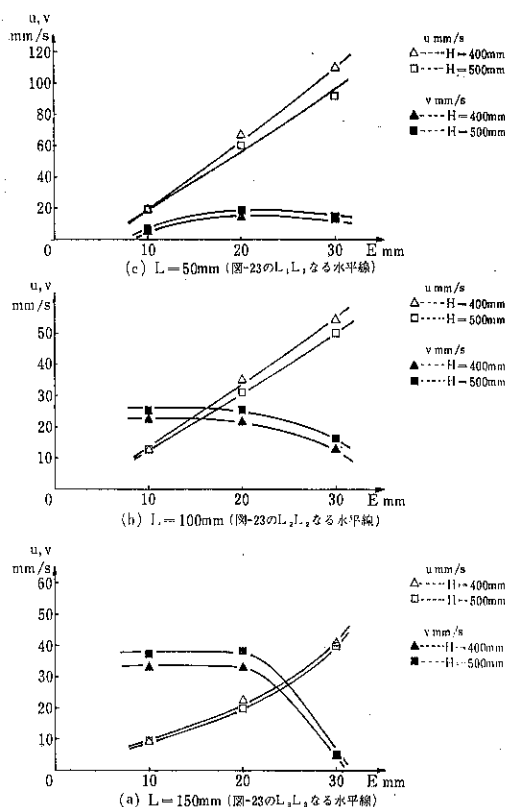


図31 $u, v \sim E$ 曲線 (砂, $t = 3$ 秒)

は (vi) で示した u, v の代表値の競合の状態 (大小関係) と E, L の関係を調べることによって可能と考えられる。

(xii) 図-31(a), (b), (c)は縦軸に u, v を横軸に E を採ったものである。図より(c)→(b)→(a)の順に u 曲線の絶対値は減少し、 $L = 100$ 及び $L = 150$ mm で u と v との大小関係の逆転が見られる。(c), (b), (a)はそれぞれ $L = 50, 100$ 及び 150 mm の場合を示すので、これは丁度図-23 ($E \sim L_m$ 曲線) で、それぞれ三本の水平線 $L_1 L_1, L_2 L_2$ 及び $L_3 L_3$ 上で、 $[u, v]$ の E による変化を考えることに相当している。

いまは材料として砂、側壁はラワン材の場合を採り上げているので図-23の曲線群の中で最上部のものが考察の対象となっている。(この曲線より下方ではコア・フロー、上部ではマス・フロー)

図-31(c)では凡ての E に対して $u > v$ である。すなわち、鉛直方向の代表速度 u の方が水平方向の代表速度 v より常に大きいので、流れは鉛直方向により早く発達し、コア・フローになることが予想される。図-23では $L_1 L_1$ 直線上の点 A_1, B_1, C_1 は (砂, 三方ラワン材の $E \sim L_m$ 曲線の下にあるので) コア・フロー領域に存

在しており、 u, v からの判定と矛盾はない。

図-31(b)では $E = 10$ mm の場合を除いて $u > v$ であり、これは図-23の $L_2 L_2$ 直線上の点 B_2, C_2 がコア・フロー領域にあることと一致している。問題は $E = 10$ mm の場合であるが、これについては図-16 (速度分布の三次元モデル) で示されているように、 L が 100 mm で観測点の高さ H がこの程度では、内部の流速はガラス面上の流速よりもかなり大きいものと考えられ、図-31(b)中の u 曲線はもう少し上昇するものと考えれば、 $E = 10$ mm の場合についても $u > v$ となり、やはりコア・フローの条件は満され、図-23からの判定と一致する。

つぎに、図-31(a)では $E = 10, 20$ mm では $u < v$ 、 $E = 30$ mm では $u > v$ となっており、これは $L_3 L_3$ 直線上で A_3, B_3 がマス・フロー領域に、点 C_3 がコア・フロー領域に存在することに対応している。

(xiii) 以上、 $L_1 L_1, L_2 L_2$ 直線など、奥行き L を一定として、 $[u, v] \sim E$ の関係を考察して来たが、つぎに図-23でスリット巾 E が一定の鉛直線、 $E_1 E_1, E_2 E_2$ 及び $E_3 E_3$ 上での $[u, v] \sim L$ の関係について検討することにする。

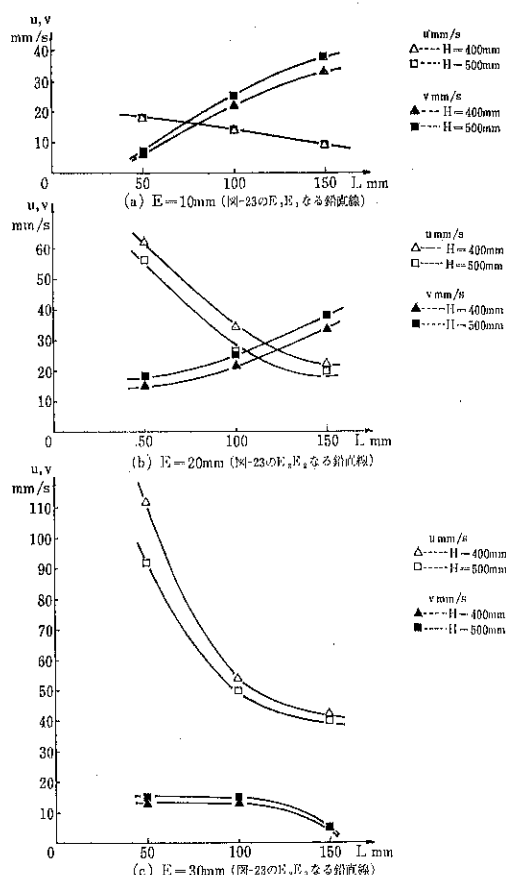


図32 $u, v \sim L$ 曲線 (砂, $t = 3$ 秒)

図-32(a)は $E=10\text{mm}$ の場合なので、図-23では直線 E_1E_1 の状態に対応している。 E_1E_1 上で $A_1 \rightarrow A_2 \rightarrow A_3$ と L が変化すれば、図-32(a)でも (コア) $\rightarrow$ (コア) $\rightarrow$ (マス) となる筈である。しかるに、 $L=100\text{mm}$ の所で $v > u$ となっているが、これは前述した理由 (図-16の三次元モデル及び図-15も参照) から u 曲線はもう少し上昇するものと考えられるので、そのように考えれば、(コア) $\rightarrow$ (コア) $\rightarrow$ (マス) の順序は両者で (図-23と図-32(a)とで) 一致する。

図-32(b) ($E=20\text{mm}$) の傾向と E_2E_2 直線上の各点 B_1, B_2, B_3 の状態 (コア) $\rightarrow$ (コア) $\rightarrow$ (マス)) については矛盾はない。

また図-32(c) ($E=30\text{mm}$) では圧倒的に $u > v$ となっており、 E_3E_3 上の各点 (C_1, C_2, C_3) の状態と一致している。

§ 8. む す び

(i) 本報告では現象論的な立場から、角型平底ホッパーを用いて、コア・フローからマス・フローへの転移状態を検討したが、問題の一般化を可能とする三次元的な速度分布の解析解が望まれる。

(ii) F.B.L (流動境界曲線) の形状と流動時の粉体圧 (とくに側圧)¹⁰⁾¹¹⁾ の変化との関係などもマス・フロー発生現象の解明に対して重要な手掛りを与えるものと思われる。

(iii) 同じ角型ホッパーでも、底部が絞られ、所謂ピラミダル・ホッパー及び各種の円筒形ホッパーなどに対するコア～マス・フローの問題についても検討が必要と考えられる。

(iv) 非対称は形状のホッパーについては、実際には多用されているにも拘らず、未だ流動の基本的な性質についての報告¹²⁾ が少ないように思われる。

(v) その他、粒子の個々の性質が流動現象の表面に現れて来る粉体材料¹³⁾¹⁴⁾ に対するコア～マス・フローの問題なども、種々の補助的な排出手段¹⁾¹⁵⁾¹⁶⁾ との関連において検討を要する問題と考えられる。

記 号 表

B	容器の巾
E	スリット巾
H	充填高さ (観測点の位置の表示に用いている。これに対して x は鉛直方向の流通座標として使用)
L	奥行き
d	粒子の直径
h	円筒の高さ (例、ナイロンチップの直径 d , h)
u	x 方向の速度
v	y 方向の速度
x	鉛直軸
y	水平軸
μ_w	粉粒体と容器壁との摩擦係数

引 用 文 献

- 1) 粉体工学研究会誌, 4, No. 1 (1967) '閉塞現象特集号'
- 2) 三輪; 粉体工学研究会誌, 4, No. 1, 694 (1967)
- 3) 上滝, 早野, 新納, 本松; 機械学会論文集, 28, No. 195, 1462 (1962)
- 4) 上滝, 早野; 機械学会論文集, 32, No. 242, 1509 (1966)
- 5) 横山; 粉体工学研究会誌, 4, No. 1, 677 (1967)
- 6) 田中; '粉体プロセス入門', 工学図書 (1968)
- 7) 五十嵐; 粉体工学研究会誌, 6, No. 3, 176 (1969)
- 8) 五十嵐; 粉体工学研究会誌, 6, No. 5, 331 (1969)
- 9) Brown & Richards; Trans. Inst. Chem. Engrs. 38, 243 (1960)
- 10) Jaky; 2nd Int. Conf. Soil Mec. & Found. Eng., 1f-103 (1948)
- 11) 上滝, 安達, 桑原; 粉体工学研究会誌, 5, No. 4, 1218 (1968)
- 12) 田中; セメント・コンクリート技術協会, 2月号, 20 (1956), 3月号, 34 (1956)
- 13) Carr; Chem. Eng. Jan. 18 (1965), Feb. 1 (1965)
- 14) 鈴木; 第3回粉体工学講演討論会資料, p.19 (1969)
- 15) Johanson; Trans. ASME, May, 224 (1966)
- 16) Myers; Mec. Eng. Mar. (1970) p. 27
- 17) Matthée; Powder Tech. 1 (1967/68) 265



公害問題の一面

日本電池株式会社

岡 田 辰 三

古い言葉でいえば、適者生存とか、環境順応とかいうようにも述べられます。永年の地球の運行により地上に適者なるものが、生物でも、植物でも、存在して、環境に不適当なものは、亡びるということです。

たとえば、南方の太陽光線の強いところでは、ゴムの木が繁茂しています。それは厳しい自然の環境に対し、脈管で水分を地下から吸い上げる途中で蒸発するのを防ぐために、樹皮の下層にゴム液を貯えるという機能を持ち、生存している。またこの種の防御を、樹脂類の固体でやっている南方特産のリグナンナイトという植物もある。これは、船のスクリューの軸受けに不可欠の重宝な材料です。この外に鉄の木という植物もある。これは樹脂を持ち、しかも水よりも重い組織をもっている。

これらと反対に、北方では白樺の木がある、皮下にパラヒンを持ち、寒気で水管の凍るのを防いでいる。人々はこの木をよく暖炉に燃やす薪木にしている。また、われわれの住む温帯地方では、どうでしょうか。日本は竹やぶが多く、よく丘陵地帯に繁っている。竹はよく根を張り、一度庭に植えると、床下から芽が出る。それは、中空で節々に堅い構造を持っていて、その組織のために溶解性の珪酸が必要となり、それを求めて根を遠方に張りめぐらすのだと考える。さらに珪酸は茎をじょうぶにするため、禾本科植物には一つの必要な元素である。日本で米の産地の河を調べると、その地方の河の水には珪酸分が多いとのことである。新潟県、滋賀県はその例です。

さて最近生態学では、次のような研究がされている。たとえば、100m²の土地に100個の種をまくと、1,000個の種をまくと、その収穫をある時期がたってから計量すると、初めは1,000個の種をまいた方の収穫が多いようですが、結局は、同量であるとの結論になる。

また、あづきぞう虫と、それを餌にする混虫のはちを一つの箱にあづきを入れて飼って置く。あづきぞう虫がはちに食われて少数になると、次にはちが、繁殖が減少して少数になる。そうなるとあづきぞう虫がふえて来

る。このような両者の盛衰が繰り返されて数10代はつづく。

前述のことは、素人の私が植物の生態学を述べたのですが、植物や動物の事例を見て、人間も自己保存の自然性に人間の理性を働かせ、人間として子孫の幸福を計っている。しかもこの自然性と理性との苦悩の内にある。そして何千年といった限った年月ではいいきれない永年の人間の頭脳の発育で、人間らしくなった。

そうして、ついに道義心を身につけるようになり、そのまた上の次元として、宗教を持つようになった。

以上公害問題の一面というテーマで、結論的に道徳の問題を引きだしたが、古い言葉で新しい今一つの言葉を使えば、人道問題だといえる。ということは、今日までわれわれが成しとげた、多くの技術革新の成果が、あまりにも大きかったので、種々の方面に歪をしでかしてきた。そこで、今や技術革新を社会的、人道的に今一度考える必要がある。くりかえしていえば技術を呪う代りに、むしろ反対に公害という歪を取り除くための新しい技術の誕生に努力すべきだと考える。これが米国で試みられ、国家の一つのプロジェクト問題として発足している、別名のテクノロジー、アセスメント (Technology Assessment) である。

要するに、科学技術の進歩で生じた歪を救うものは、科学技術以外にはないと堅い信念でやっていかねばならないということです。特に米国とか欧州の先進国では、今までに内生的技術革新を経験している。しかし日本はもっぱら外から輸入した技術、外生的技術革新でやってきた。それがために公害を起している事も数が多いと考える。この意味から、外国で、この矯正を数年前から実施していたに係わらず、公害除去の科学的解決の問題に着手する事が遅れていた。国土が狭い、それに河川は多い、島国日本では特にこの公害問題に対して、技術的除去の科学研究と、その努力をすべきだと痛感する。

粉 碎 理 論

徳島大学工学部

松 居 国 夫

1. 粉碎, 粉碎仕事量および粉砕量

1.1 粉 碎

材料に作用する外力が増大し, これによって生じた応力が高まり, その弾性限度をこえたと永久変形が生じ, 塑性変形状態に入る. これを弾性破損とよんでいる. しかし材料の破断は生じていない. 一定のひずみに達すると材料は硬化し, ついには材料の破断が起こる. この破断は, 破面となる面を境として, その両側の材料をひきはなすのであるから, その両側の材料の間に作用する応力, すなわち外力に対する抵抗の最大値において起こる. したがって破断, すなわち粉碎開始は力によって起こる. 破断の量は, 面をひきはなすに要する力, または抵抗の最大値である材料の破壊強さ σ_t と, 破断を起こすまでにその力の働いた距離との積である仕事量によって定まる. よって粉碎は力によって起こり, 粉砕量は仕事によって定まるといことができる.

均質で欠陥を含まない材料の理想的破壊強さは, 微視的には原子間結合力として, 巨視的には破面を形成するために必要な表面エネルギーの関数として表わされよう. 破断直前まで弾性法則が成立すると, エネルギーの平衡関係より理想的破壊強さを求めたのが Polanyi, Oro-
wan らである¹⁻³⁾. この種の理想的破壊強さに比べて, 実際の破壊強さがはるかに小さいことについては種々の説明がなされているが, Griffith クラックの存在に基づくものが現実的であり, 理解しやすく, 多数の説がこれを前提としている¹⁻⁹⁾.

Griffith (1921) は, ガラス系の引張試験で, ガラス径 $d[\text{mm}]$ ($1.02 \geq d \geq 0.0033$) とそれに対応する引張強さ $\sigma_t[\text{Kg/mm}^2]$ との間に次の実験式¹⁰⁾

$$\sigma_t = 15.75 (11.2 + d) / (0.15 + d) \quad (1)$$

を作成した. この関係が d の分子大にいたるまで成立するとすれば, σ_t の極限値は 1176Kg/mm^2 となり, 理論的評価値と同じ程度になることを示した. 実際の固体は微小疵, 割れ目が表面に存在し, その切欠き効果により既存の割れ目がしだいに進展して破断すると考えた. 割れ目がさらに拡がれば, その表面積と表面エネルギーとに

比例するエネルギーがそこにあらわれることになり, このエネルギーは外力によって物体に与えられたエネルギーから供給される. よってエネルギー転換がほかにないとすれば, 新しく生じた割れ目の表面エネルギーの増加は, 物体の弾性エネルギーの減少に等しい. この関係から, 割れ目が拡がるさいの引張応力 σ_t が求められると考えて次式

$$\sigma_t = \sqrt{2 E \cdot \epsilon / (\pi a)} \quad (2)$$

を薄板に対して導いた. ここで E は縦弾性係数, ϵ は表面エネルギー, $2a$ は割れ目長さを表わす. 等方性物質の一定材料にて次式

$$\sigma_t \cdot \sqrt{a} = \text{const} \quad (3)$$

を示し, 種々の長さのきずをつけたガラス管で, 上式の関係が成立することを実証した.

破断は全断面にわたり, 同時に一瞬に生ずるものではなく, 応力集中により割れ目のような構造欠陥のところから開始し, しだいに進展して行なわれる. 普通に観測する値は平均値であって, 局部的には, はるかに大きい値が作用し, その値は理論値に等しいと考えようとするのが Griffith の説である.

Smekal¹¹⁾ (1937) は, Griffith 説が主として試験体の表面条件を重視したのに対し, さらに試験体内部にも, 異物質, 不純物の介在, 蓄積する欠陥 (これを弛緩個所とよんでいる) が存在することを述べた.

破壊強さは弾性的性質とは異なり, 構造敏感性であり, クラック, 空孔, 異物質の介在, 転位など構造欠陥によって全体の性質が決定されてしまう. しかもこれらの欠陥のうち, 最も弱いものによって破壊強さが定まる. 最弱リンクの理論として知られている考えかたである. したがってクラックの強度の分布を確率的に示らば, 空間的統計現象として処理する必要が生じてくる. Epstein によって代表される破壊の確率論である^{12,9)}.

一定荷重をかけてから, 破壊が起こるまでに時間的遅れがあり, その遅れ時間に散らばりがある現象がみられる. これが時間の統計現象, あるいは時間の確率過程であることを見出したのが平田^{13,7)}であり, その後, 横堀²⁾, Coleman, 堀¹⁴⁻¹⁷⁾によって, ガラスだけでなく金属, 高分子物質, コンクリートのような不均一な混

合材料の破壊現象にまで適用されうる破壊の確率過程理論に拡張された。

一般に粉碎の対象となる、脆い材料から $10\phi \times 20\text{mm}$ 円柱体試験片を成形し、負荷両端面の平行度と、両端面の粗さが数 μ 程度以下になるように特に注意して精密仕上げをする。この試験片を電子管自動平衡式万能材料試験機で圧縮した場合、圧縮強さを示す限界において、試験片は荷重方向に沿って縦の方向に割れる。このさい、荷重、変形量線図をXYレコーダで自記させると、圧縮荷重が急激に減少することが認められる。この瞬間において荷重を取り除くと、破壊が生じたことは認められるが、破碎および粉碎はまだ生じていないことを認める。続けて外力を加えて行くと破碎、つづいて粉碎が行なわれる。破断、破壊、粉碎開始は力によって起こり、破断の量、粉碎量は仕事によって定まることとなる。

粉碎という操作は、単一の固体の破壊または破碎の現象のみを意味するものではない。大きさや、形状の異なった多数の固体粒子から成る集団に対する破碎作用を指している。同一集団に属する個々の固体は、異なった条件のもとで粉碎され、それを個々に追跡究明して行くことはきわめて困難である。しかし粉碎操作の理想的条件として、すなわち粉碎に要する仕事量が最小となるごとき理想条件として、単一固体の破断について考慮する必要がある。

粉碎現象に関与する個々の固体粒子は、小さく、軽く、比表面積が大きく、すなわち微粒子としての特性を考慮せねばならぬ。さらにこれら微粒子の集まりとしての集合体特性を考えねばならぬ。このため流動性、付着性、凝集性、飛散性、吸湿性、粘着性、反応性、さらに粒子間隙に気体あるいは液体が存在するための不連続性などが影響してくる。粉碎理論を確立することが困難な原因をなしている。粉碎理論は、化学工学、鉱山資源工学の分野だけでなく、材料強度学、機械工学、物理学、土木工学、粉末冶金学、薬学、農学、食品工学そのほか広汎な学問分野にわたっての研究促進によって、しだいに解明されて行くものであろう。

粉碎の対象となる、固体粒子の集団に加えられるエネ

ルギの大きさが、この集団の粉碎の総量に関係することは明らかであろう。この考えかたで以下述べて行くこととするが、粉碎はあくまでも個々の固体粒子の破碎が基礎となっている。

1.2 粉碎仕事量

固体粒子の集団全体の粉碎に費やされた仕事量と、それによって生じた粉碎量との関係を求めようとする試みが、多数の研究者によって行なわれ、これを粉碎仕事法則、あるいは粉碎理論に関する研究と称している。しかし、このさい用いられる粉碎仕事量なるものが正確に明示されていない場合が多く、すこぶる漠然としている。粉碎仕事法則の提案者も、またこれを実証、あるいは批判、論議しようとした研究者も、小は粉碎正味仕事量から、大は粉碎機を運転する電動機の消費仕事量までの数百、数千倍の差違のある粉碎仕事量をそれぞれ採用している。粉碎正味仕事量と称していても、研究者相互の間で著しい相違がある。

材料の粉碎には、純粋な意味での粉碎正味仕事量のほかに一連の付加仕事を必要とする。この付加仕事は粉碎正味仕事に対して損失仕事と考えられる。粉碎正味仕事量の工業的全粉碎仕事量に対する比率は一般にきわめて小さい。しかし粉碎量は粉碎正味仕事量によって定まる性質のものであると考えれば、粉碎の研究を進めるためには、粉碎正味仕事量を求めることが必要な先決問題であり、また最も重要な問題である。

1.3 粉碎正味仕事量

粉碎正味仕事量を求める研究の進めかたに、つぎの8種の方法が用いられている。

その第1は、比表面エネルギーを理論的または実験的に求めようとする Polanyi, Orowan らによって代表される方法である¹⁻³⁾。物体を粉碎するには、分子力あるいは凝集力の作用範囲外に分子を遠ざけねばならず、分子力はその比表面エネルギーであり、新しく生成した単位表面積に対する粉碎正味仕事量を直接に表わしていると考えられる方法である。理想的な最小粉碎仕事であるといえよう。Sodium chloride, 石英についての表面エネルギーの理論的計算値と実測値を表1, 2に示す^{18,19)}。Smekal

表1 Sodium Chloride の比表面エネルギー
kg.-cm./sq.cm.

Theoretical Values—100 plane	Experimental Values
Madelung..... 6.7×10^{-4}	Saal and Blott from data of Jaeger (surface tension of molten sodium chloride)..... 1.94×10^{-4}
Born and Stern..... 1.53×10^{-4}	Lipsett, Johnson and Maass (heat of solution)..... 3.88×10^{-4}
Lennard-Jones and Taylor 0.98×10^{-4}	Gross (crushing)..... 404.0×10^{-4}
Dent..... 0.79×10^{-4}	Present work (crushing)..... 900.0×10^{-4}
Biemüller..... 0.89×10^{-4}	

表2 石英の比表面エネルギー

Investigator	Year	Surface Energy, Ergs/Sq. cm.	Method of Evaluation
Edser	1922	920	van der Waals equation, density, and cubical expansion of quartz
Martin	1926	510	Energy to convert silica to a gas
Fahrenwald et al.	1931	995	Modification of Martin's method above
White	1943	2300	Breaking strength, distance between planes, specific heat, and coefficient of expansion

11)は多くの材料では、この値が $10^{-8} \sim 10^{-4} \text{Kgc/cm}^2$ の程度であると述べている。

その第2は、全粉碎仕事量のうちから、明らかに損失仕事と認められる仕事量を1つつ差し引いてゆく方法である。粉碎正味仕事量を求める正攻法とも考えられよう。しかし、粉碎正味仕事量が元来きわめて小さい値であるため、損失仕事の測定の誤差のなかにかくれてしまう場合がある。

その第3は、落重および落高がそれぞれ一定の落重式衝撃圧縮粉碎試験機や、毎回転の外力による仕事量が一定とみなされるボールミルや、ハードグローブ粉碎性試験機における粉碎正味仕事量を、打撃回数やミル総回転数に正比例する量と仮定する方法である。従来、多数の研究によって採用されてきた方法である。これについては5.1項で検討する。

その第4は、ボールミルやハンマーミル、またハードグローブ試験機など、種々の粉碎機で、材料を粉碎した場合の全消費仕事量から、材料を装入しないで粉碎機を運転した場合、すなわち空転時の全消費仕事量を差し引いたものを、粉碎正味仕事量と定義する方法である。従来、多数の研究によって、しばしば用いられている。

Rosin (1925) が褐炭を試料にして、 $4,900 \text{目数/cm}^2$ 篩、80%通過、 1.5ton/h の実測値では、空転時の全動力と粉碎時の全動力との比が、ボールミルでは98%、ハンマーミルでは60%、スプリングローラミルで50%、遠心力ミルで35%の値を示している²⁰⁾。

この方法を進めたものとして、ボールミルを熱量測定の可能な液槽中に装入して、粉碎時と空転時の熱量の差から、粉碎正味仕事量を求めた Schellinger²¹⁾の方法がある。

これらの方法では、粉碎される材料の運動エネルギーも粉碎正味仕事量のなかに含まれることとなる場合が多い。粉碎時と空転時の消費仕事量の差は、主として粉碎

される材料を装入したための内容物の運動エネルギーの増加によるものである。

長時間粉碎した後は、粉碎量の増加度がしだいに減少し、ついには粉碎量の増加が認められなくなることは広く知られている経験的事実である。ところが、粉碎時も空転時も、それぞれの消費仕事量は、粉碎機の総回転数にはほぼ比例して増加する。したがって両者の差に相当する仕事量も、粉碎機の総回転数にはほぼ比例して増加する。この方法は第3の方法に類似する結果となる。

その第5は、単一柱体試験片を徐々に圧縮粉碎した場合の、圧縮荷重、変位量線図を描き、最大荷重までの負荷曲線と、最大荷重点からの垂線と、荷重零線とによって囲まれる線図面積に相当する仕事量を粉碎正味仕事量と定義する方法である。あるいは最大荷重点における材料内部に貯えられた最大弾性ひずみエネルギーを粉碎正味仕事量と仮定する方法も用いられている。粉碎開始直後に、このエネルギーが瞬間的に粉碎エネルギーに転換すると考える方法である。5.3項で詳細に検討する。

その第6は、鋼製白内の粉体層試料を徐々に圧縮粉碎した場合、負荷曲線と除荷曲線と荷重零線とによって囲まれる全線図面積に相当する変形仕事量を、粉体層に加えた粉碎正味仕事量と定義する方法である。5.4項で検討する。

その第7は Gross-Zimmerley (1930) および Piret (1949) によって用いられた落球衝撃圧縮粉碎実験装置による粉碎正味仕事量の測定方法である。この方法については5.5項で詳細に述べることとする。

その第8は、松居らが用いてきた方法である。松居らは、粉碎量は粉碎正味仕事量によって定まる性質のものであると考え、粉碎量を粉碎による表面積増加量で表わした場合、これと粉碎正味仕事量との間に正比例関係が成立し、さらに両者の間の比例係数が材料固有の粉碎性指数であると考えた。

粉碎正味仕事量を求めることは至難な問題であるが、粉碎による表面積増加量を求めることは比較的容易である。両者の間の比例係数が材料固有の値であり、粉碎における荷重条件や、試料の寸法、質量などの条件にも無関係な一定値であると考えることにより、粉碎正味仕事量の値が定まってくる。このさい、この値が正確には粉碎正味仕事量の絶対値を表わすものでなくとも、これに正比例する仕事量が明確に定義、かつ測定できれば、表面積増加量との比較が可能となり、比例係数としての材料固有の粉碎性指数の値を求めることができるので、ほぼその目的を達すると考えた。このような考えのもとで、表面積増加量に正比例する粉碎仕事量を定めようとした。これと外から与えた仕事量、あるいは落重、落高、打撃回数、総回転数、または圧縮荷重、繰返し荷重回数、さらにボールミル内粉碎媒体球の質量、個数、ミル直径などの荷重条件、試料の寸法、質量、真密度、縦弾性係数などの試料条件との間の関数関係を確立しようと試みた。また単一柱体試験片や、粉体層試料を圧縮粉碎する場合、または衝撃圧縮粉碎する場合における粉碎正味仕事量をそれぞれ実測しようと試みた。前述の第3、第4の方法におけるような、粉碎正味仕事量が打撃回数やミル総回転数に正比例すると仮定する方法を採用していない。また前述の第5、第6、第7に相当する場合における粉碎正味仕事量を、従来の研究者とは異なった観点から検討し、従来の研究者が定義した量とは異なる量を粉碎正味仕事量として定義した。

1.4 粉碎量

材料が粉碎されるとき、その粉碎量あるいは粉碎効果は何によって表示するか、粉碎産物の個々の粒子は一般に不規則な形状をなしており、しかもその大きさ、すなわち粒子径はそろって同じ大きさである場合はほとんどなく、その程度の差はあるが、幅のある各種の大きさの粒子の混合物である。

粒子径分布の状態は、材料の種類、物性または成因、粉碎外力の作用のしかたによって異なる場合がある。しかし多くの場合には、確率的な現象の結果として生じたものであるから、その分布をある種の分布関数で近似的に表わすことができる。破壊現象が本質的に空間的、時間的統計現象である以上、粉碎過程の表示は、粉碎産物の粒度と粉碎時間の関数の形となり、粒度分布の研究が不可欠となってくる。この粒度分布関数式をいかに粉碎機構に関連させるか、粉碎仕事量の増加とともに、粉碎産物の粒度分布がどのように変化してゆくか、これは重要な研究問題である。

粉碎量を粒度分布で表わすかわりに、粉碎によって生じた表面積の増加量で示すことは、粉碎量が一義的に表

示できることとなり、もっとも便利であり、またもっとも適切である場合が多い。

一般に固相を対象とする反応は表面反応であり、この反応の速度は接触表面が重要な因子となる。粒子群の単位質量あたり、または単位体積あたりの表面積、すなわち比表面積量の測定方法として、透過法、溶解法、吸着法などがある。粒度分布の測定に比べて簡便な場合が多い。しかし測定方法の相違により、すなわち粒子内部の細隙や細孔の内面積をどの程度考慮するかで、比表面積の測定値にかなりの差が生じる。比表面積量の絶対値を正確に表わすことは容易ではない。

かりに粒子径 x_0 のもの n_0 個よりなる立方体状の材料が、粒子径 x のもの n 個よりなる立方体状の粉碎産物になるまで粉碎されたとすると、これによる表面積の増加量 $\Delta S'$ は、総体積 $V = n \cdot x^3 = n_0 \cdot x_0^3$ の関係を用いて

$$\begin{aligned}\Delta S' &= 6nx^2 - 6n_0x_0^2 = 6n \cdot x^3(1/x - 1/x_0) \\ &= 6V(1/x - 1/x_0)\end{aligned}\quad (4)$$

となる。つぎに立方体状と限定せずに、相似形状の粒子であると仮定する。粒子径 x の粒子の表面積を s 、その体積を v 、真密度を ρ 、表面積形状係数を ϕ_s 、容積形状係数を ϕ_v 、比表面積形状係数を $\phi = \phi_s/\phi_v$ 、単位質量あたりの粒子の個数を N 、単位質量あたりの表面積、すなわち比表面積を S で表わすと

$$\begin{aligned}s &= \phi_s \cdot x^2, \quad v = \phi_v \cdot x^3 \\ N &= 1/(\phi_v \cdot x^3 \cdot \rho)\end{aligned}\quad (5)$$

$$S = N \cdot s = (\phi_s/\phi_v)/(x \cdot \rho) = \phi/(x \cdot \rho)\quad (6)$$

となる。最初の粒子径 x_0 より、粉碎産物の粒子径 x までの比表面積増加量 ΔS は次式

$$\Delta S = S - S_0 = (\phi/\rho) \cdot (1/x - 1/x_0)\quad (7)$$

で表わすことができる。比表面積増加量は粉碎前後の粒子径の逆数の差に正比例する。

粒度分布より比表面積量を算出する方法については、Rammner²²⁾、中条²³⁾、田中²⁴⁾、井伊谷^{26,27)}、Rose²⁸⁾、Langemann²⁹⁾、Bull³⁰⁾、藤野³¹⁾、宮脇⁶⁸⁾らの研究がある。

ところで、粉碎の目的にはいろいろあり、表面積増加量のみで粉碎量を表示するのでは不十分な場合がある。目的とする製品の性質、形態、寸法などに応じた、もっとも効果的、かつ能率的な粉碎効果の表示法を選定すべきである。粉碎産物の最大粒子径だけが制限されて、最小粒子径はどれほど細かくても差しつかえない場合もある。しかし粉碎製品の用途についての研究が進むにつれて、粉碎産物に対する要求は時とともにきびしくなっていく傾向がある。高炉作業における鉄鉱石の破碎では、高炉装入時に炉頂から出るガスによって飛散されないように、また炉内の空隙率の点からも、最小粒子径を

10mm程度に制限している。希望粒子径範囲内の粉碎産物なるべく多量にえて、不必要な過度の微粒子の生成を防止しようとする傾向にある。さらに粉碎産物の粒子形状を球状に、または扁平状に、あるいは鋭角状にと、一定形状にそろえようとする要求がある。たとえば、塗料用金属粉では、光沢と被覆力の点から扁平状が望ましい。研削材の研磨布用では、鋭角部に富んだ塊状が望ましいであろう。薬剤関係で球状が要求される場合もある。

以下、粉碎産物の粒度分布法則と、粉碎仕事法則のそれぞれについて述べ、つづいて両者の間の関連法則について述べる。

2. 粉碎産物の粒度分布法則

実際の粉碎産物では、一定粒子径にそろったものはほとんどなく、かなり広い粒子径の分布をもっている。この分布を表わす場合、横軸に粒子径をとり、縦軸にその存在する割合をとるのが普通である。その存在割合として、ある粒子径 x より大きいものが全体の何%あるか示すものを残滓分布あるいは篩上分布という。これを $R\%$ で表わすこととする。その反対に、ある粒子径 x より小さいものの存在割合で示すとき、通過分布あるいは篩下分布という。これを $D\%$ で表わすこととする。これらはいずれも累積分布である。

一方、ある粒子径 x に相当する粒子の存在割合を度数分布あるいは頻度分布とよぶ。実際には、ある粒子径 x の前後にある範囲 Δx をとって、柱状分布としたり、滑かな曲線で表わしたりする。これを $f[\%/\Delta x]$ の記号で表わすこととする。 Δx は粒子径を分割した幅を表わす。

$$f = -(dR/dx) \cdot \Delta x = (dD/dx) \cdot \Delta x \quad (8)$$

以上で述べた、その存在割合を個数で考えるか、重量で考えるかによって、個数分布と重量分布の区別がある。

累積分布の場合、その分布曲線が直線で表現できるような線図用紙があると、内挿、外挿に便利であり、以下に述べるような粒度分布式がしばしば用いられている。

粒度分布の研究は、帰納的方向と演繹的方向の2面からなされてきており、前者による経験的法則が、後者によって理論的に基礎づけられる方向に進んできている。

2.1 対数確率分布則

頻度曲線が最大値に対して左右対称であって Gauss の正規分布の法則がそのままあてはまる場合は特殊な場合であって、一般には粒子径の小さい側に山がかたよっている場合が多い。

Hatch および Choate は、粒子径の対数をとって頻度分布曲線を描くと、ほぼ正規分布に従うことを見いだ

した。この関係を対数確率分布則、あるいは対数正規分布則とよんでいる。すなわち

$$y = -\frac{dR}{d(\ln x)} = \frac{1}{\sigma_{\xi} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \ln x_2)^2}{2\sigma_{\xi}^2}} \quad (9)$$

ここで x_2 は頻度曲線 $y=f(x)$ の最高頻度値の粒子径、 σ_{ξ} は対数標準偏差である。篩上 R は次式

$$R = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sigma_{\xi} \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \ln x_2)^2}{2\sigma_{\xi}^2}} d(\ln x) \quad (10)$$

で表わすことができる。対数標準偏差は

$$\sigma_{\xi} = -\frac{1}{2} \ln \frac{x_2}{x_1} \quad (11)$$

であり、 x_2 , x_1 は頻度分布曲線の変曲点の粒径で、 x_1 は $R_1=84.1\%$, x_2 は $R_2=15.9\%$ に相当する。なお σ_{ξ} が小さいほど、分布の散らばりが小さく、粉粒体が均一であることを意味する。

Epstein¹²⁾, Kolmogorov⁹⁴⁾ らは、統計理論を用いて定性的に対数確率分布式が成立することを証明した。この分布式の応用については Gebelein⁸²⁾ らの研究がある。この分布則を用いると、平均粒径や分散などの観測が容易であり、また個数分布と重量分布との相互変換に便利である。かつ実際の粉碎産物に対しては、微粒域で比較的適合するなど種々の特長をもっている。しかし式の形が複雑であり、しかも実際の粉碎機構との関連づけの実績数が少ない。かつ粗粒域に対する適合性は良くない。

実際に、ある粉粒体がこの分布則にあてはまるか否かは、対数確率紙に点綴した実測値が直線関係にあるか否かで判定する。粉体比表面積量を算出するための特殊目盛を周辺座標として付記した対数確率紙図1が粉体工学研究会（〒462名古屋市中北区平手町1名古屋工業技術試験所内）で入手できることを付記する。

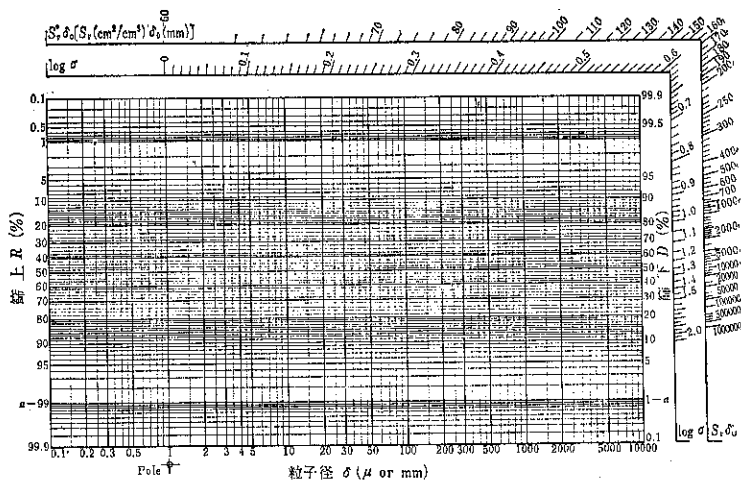
実測値が図1で1直線で示される場合には、図の左下の極 Pole を通って、これに平行線を描き、この平行線の示す周辺座標 $S_0[\text{cm}^2/\text{cm}^3] \cdot \delta_0[\text{mm}]$ の値を読みとる。つぎに実測値を通る1直線上より50%粒子径 $\delta_0[\text{mm}]$ の値を読みとる。比表面積量 $S[\text{cm}^2/\text{g}]$ を次式で算出する。

$$S = \frac{S_0[\text{cm}^2/\text{cm}^3] \cdot \delta_0[\text{mm}]}{\delta_0[\text{mm}]} \cdot \frac{1}{\rho[\text{g}/\text{cm}^3]} \cdot \frac{\phi}{6} \quad (12)$$

ここで ϕ は前に述べた比表面積形状係数である。実測値が2本の折線で表わされる場合の比表面積量の算出方法も報告されている⁸¹⁾。

2.2 Rosin-Rammler 分布則

Rosin, Rammler, Sperling, Bennett によって提案された分布則である⁸³⁾。その後、ドイツ規格に採用



対数確率紙 (粉体比表面積計算用)

図1 粉体比表面積計算用対数確率紙

され、各国の研究者によって広く用いられている。

ある粒子径 x より大きい粒子の全粒子に対する質量比、すなわち篩上累積比、あるいは残滓比を R として、次式

$$R = e^{-b \cdot x^n} = e^{-(x/\bar{x})^n} \quad (13)$$

で Rosin-Rammler 分布則を表わす。 x としては使用篩の篩目開きの寸法を用いる場合が多い。

ここで n を粒度分布指数 Verteilungsmodul, $\bar{x}$ を粒度の細かさの指数 Feinheitsmodul とよび、いずれも実測値を線図上に点綴することによって求めている。上式の対数を2度とると

$$\log(-\log R) = n \log x + \log(b \cdot \log e) \quad (14)$$

となる。実際に、ある粉粒体がこの分布則にあてはまるか否かは、 $\log R$ と x との実測値を両対数方眼紙上に点綴したものが直線上にのるか否かで判定する。その直線の傾斜

の正切が n の値を表わし、直線の位置から b あるいは $\bar{x}$ の値を求める。比表面積量を算出するための特殊目盛を周辺座標として付記した RRS 粒度線図用紙図2が粉体工学研究会で入手できる。

篩目開き D_F [mm] に対する篩上累積質量比 $R\%$ の実

RRS 粒度線図

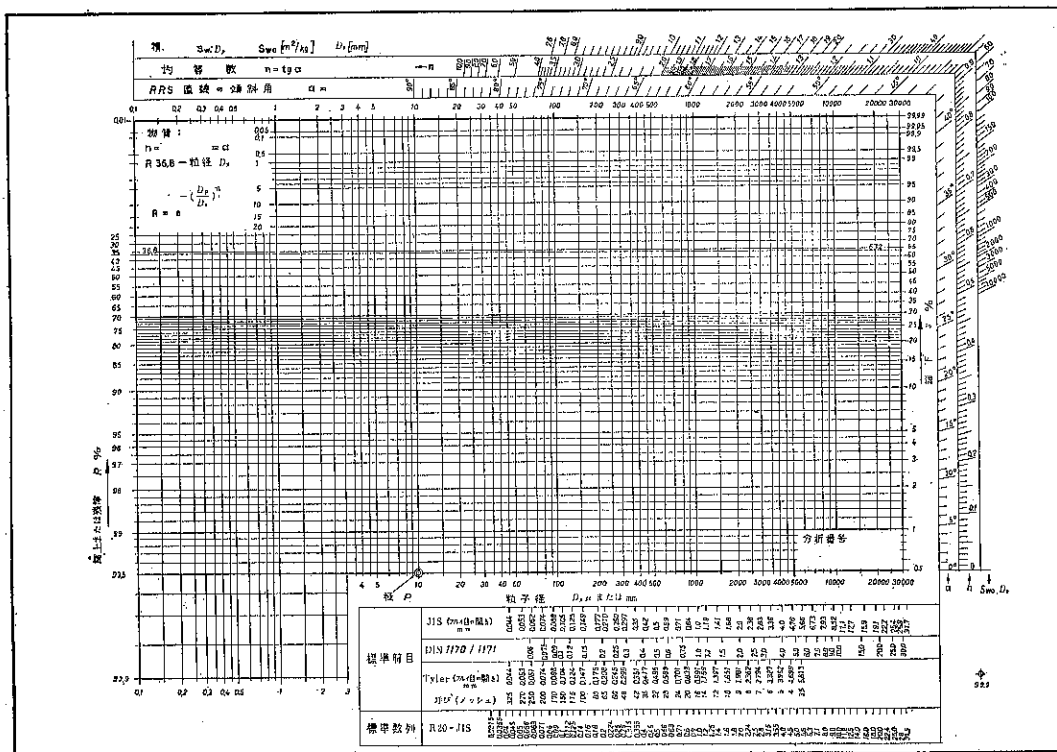


図2 RRS 粒度線図

測値を図2の上に点綴したものが1直線であらわされる場合、この直線と $R=36.8$ の水平線との交点の横座標として $D_0[\text{mm}]$ の値を読みとる。つぎに図の左下の極Pを通して上述の粒度分布直線に平行線を描き、この平行線の示す周辺座標 $S_{w0}[\text{m}^2/\text{kg}] \cdot D_0[\text{mm}]$ の値を読みとる。比表面積 $S[\text{cm}^2/\text{g}]$ を次式

$$S = \frac{S_{w0}[\text{m}^2/\text{kg}] \cdot D_0[\text{mm}]}{D_0[\text{mm}]} \cdot \frac{10}{\rho[\text{g}/\text{cm}^3]} \cdot \frac{\phi}{6} \quad (15)$$

で算出する。ここで ρ は粉体試料の真密度、 ϕ は比表面積形状係数を表わす。また式中の10は $10^4[\text{cm}^2/\text{m}^2] \cdot 10^{-8}[\text{kg}/\text{g}] \cdot 1[\text{g}/\text{cm}^3]$ を表わすものである。

Rosin-Rammler 分布式は比較的広い範囲の粉砕産物に対する実測値に適合し、また多数の研究者によって実際の粉砕機構との関連づけが行なわれているのが特長である^{22,23,26,27}。この分布式は元来、経験的に求められた実験式であるが、Rammler は確率に関するポアソン分布の近似的表現として説明できるとした。Bennett は、粉砕を確率的現象として考え、その繰返し現象の結果として理論的基礎づけを試みた^{84,85}。その後、Taylor⁸⁶、Theimer⁸⁷、Brenner⁸⁸、Filippov⁸⁴、Gilvarry^{39,40}らによって、それぞれ理論的検討が行なわれ、厳密解の近似的表現あるいは特殊解としてRosin-Rammler式が導かれた。

2.3 中川・松居による修飾 Rosin-Rammler 分布則

Rosin-Rammler 分布式は $x/\bar{x} \rightarrow \infty$ にて、はじめて $R=0$ となる。しかし実際の粉砕産物は、粉砕前の原材料の粒子径 x_0 以下であり、 $x/\bar{x} = x_0/\bar{x} < \infty$ にて $R=0$ となるのが合理的である。すなわち Rosin-Rammler 分布式が極端な粗粒域で実測値に適合しないのは、式の性質上当然である。

粉砕前の試料は近接した目開き x_1, x_2 をもつ2個の篩の間にあるものとして、この幾何平均径を $x_0 = \sqrt{x_1 \cdot x_2}$ で表わす。粉砕産物の篩目開き x の篩上累積比を R で表わした場合、中川・松居は次式

$$1/\bar{x}' = 1/x - 1/x_0 \quad (16)$$

で定義する相当粒子径 $\bar{x}'$ を用いて、Rosin-Rammler 式のかわりに次式

$$R = e^{-(x/\bar{x}')^n} \quad (17)$$

を採用することとして、これを粉砕産物の粒度分布則として1959年提案した⁴¹。

この式は $x = x_0$ のとき $\bar{x}' = \infty$ 、 $R=0$ となり、極端な粗粒域での前述の不合理な点は是正されている。 $x \ll x_0$ のときは $\bar{x}' \approx x$ となり、微粒域に対してはRosinらの式とほぼ一致することとなる。 $x_0 = \infty$ とおいた場合にはRosinらの式に一致する。

一定の材料を、一定の粉砕機、あるいは一定の粉砕試験機で粉砕する場合、操作条件を変えて、粉砕機内で消費される仕事量を変えても、(17)式中の $\bar{x}'$ の値だけが変化し、式中の n の値は不変とみて差しつかえない場合が多い。

(7)、(16)式より(18)式で定義した相当粒子径 $\bar{x}'$ が、 x_0 より x までの比表面積増加量の逆数に正比例する量であることは明らかである。 $\bar{x}'$ は $R=1/e=0.368$ に相当する相当粒子径 $\bar{x}'$ の値を示す。粉砕程度を表わす、粒度分布の細かさの指数であり、 $\bar{x}'$ は $x = \bar{x}$ における $\bar{x}'$ の値を示し、次式

$$1/\bar{x}' = 1/\bar{x} - 1/x_0 \quad (18)$$

で表わすことができる。 $\bar{x}$ は x_0 の材料を粉砕して、代表粒子径 $\bar{x}$ で表わされる一定の粒度分布をえるまでの比表面積増加量 ΔS の逆数に正比例する値である。すなわち次式

$$1/\bar{x}' = K \cdot \Delta S \quad (19)$$

をえる。ここで(7)式を用い

$$1/\bar{x}' = k \cdot \rho \cdot \Delta S \quad (20)$$

が成立する。ここで ρ は真密度、 k は無次元の係数で、比表面積形状係数 ϕ に逆比例するものである。(20)式を中川・松居による修飾 Rosin-Rammler 分布式(17)に代入すると次式

$$R = e^{-(k \cdot \rho \cdot x' \cdot \Delta S)^n} \quad (21)$$

をえる。この式は粉砕産物の粒度分布と、比表面積増加量との間の関係を示している。比表面積増加量と粉砕仕事量との間に、一定の関係式が成立するならば、この関係を上式に代入することにより、粉砕産物の粒度分布則と粉砕仕事則とを結合づけることができる。

Kellerwessel⁴²は近ごろ(1966年)Rosin-Rammler 分布則の修飾式として(16)、(17)式に一致する形の関係式を提案した。ただし粉砕前の粒子径 x_0 の代りに粉砕産物の最大粒子径 $x_{\max}$ を採用した点でやや異なっている。

2.4 Gaudin-Schuhmann 分布則

ある粒子径 x より小さい粒子の全粒子に対する質量比、すなわち篩下累積比、通過比を D として次式

$$D = 1 - R = (x/\bar{x})^n \quad (22)$$

でGaudin-Schuhmann 分布則を表わす⁴³。そこで n を粒度分布指数、 $\bar{x}$ を粒度の細かさの指数あるいはSize-modulus とよび、いずれも実験的に決定される。この式は Rosin-Rammler 分布式(13)を級数展開した第1近似式に相当している。 $0 < D < 0.3$ の範囲では(22)式が成立する場合には(13)式もほぼ適合する⁴⁴。(22)式における $\bar{x}$ は100%通過粒子径であり、(13)式における $\bar{x}$ は63.2%通過粒子径であることからすれば、両式における $\bar{x}$ の意味はやや異なっている。

Gaudin-Schuhmann式は、粒子径 x に対する篩下 D をそのまま両対数方眼紙に点綴した場合、粗粒域を除く範囲では、ほとんど直線で近似できる場合が多いものとして提案された実験式である。式の形が簡単であり、特殊な線図用紙を必要としない。米英はじめ各国の研究者によってしばしば用いられている。また粉砕機構との関連づけが行なわれている。ただし前に述べた粒度分布式に比べ、実測値に対する適合性において劣っている。

2.5 Gaudin-Meloy 分布則

Gaudin-Meloy⁴⁵⁾は、等方性で均一な固体の単一破壊のモデルを考え、 x_0 の大きさの粒子が任意の大きさ x に破壊される random な確率から次式

$$R = 1 - D = \{1 - (x/x_0)^r\}^r \quad (23)$$

を導いた。ここで r は粉砕比である。 $x/x_0 \ll 1$ の場合、上式を級数展開した第1近似式

$$R \approx 1 - r(x/x_0) \quad (24)$$

は Gaudin-Schuhmann 式、Rosin-Rammler 式にも似ている。

2.6 Gilvarry 分布則

Gilvarry^{39,40)}は、脆い固体の単一破壊に関する理論的および実験的研究の結果から次式

$$R = e^{-\{(1-x/x_0) - (x/x_0)^2 - (x/x_0)^3\}} \quad (25)$$

を提案した。この式は無限に大きくて割れ目の分布が全体にわたり均一な場合に対するものである。条件により各項の利きかたが変わってくる。Rosinらの式で $n=1$ とおいた場合を含んだ形となっている。

2.7 マトリックス解析法

Broadbent と Callcott⁴⁶⁾は、試料の粒度分布をベクトルで表わし、これに選択関数、破壊関数および分級関数を用い、マトリックス操作によって、粉砕産物の粒度分布を計算する方法を提案した。

2.8 その他の粒度分布則

棚沢^{47,48)}は、液体噴霧粒群の粒子径分布について検討し、粒数分布に対して次式

$$f_n(x) = n \cdot A \cdot x^\alpha \cdot e^{-B \cdot x^\beta}$$

を、重量分布に対し次式

$$dw/w = a' (x/\bar{x})^{\alpha+3} \cdot e^{-b'(x/\bar{x})^\beta} \cdot d(x/\bar{x})$$

を提案した。この式で $\alpha+4=\beta$ とおくことにより Rosin-Rammler 式を導くことができ、Rosinらの式をも特殊な場合として含む一般的分布式であるとされている。

Heywood⁴⁹⁾は、頻度分布に2つの山があり、小さい粒径成分の山は Persistent component とよぶ材料固有のものであり、大きい粒径成分の山は Transient component とよぶ粉砕機条件によって支配されるもので、粉砕の進行につれて小さい粒径に移動すると考えた。最後には1つの山に落着くものとして図3を示した。

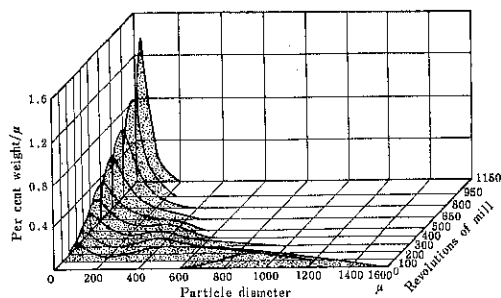


図3 粉砕進行につれての頻度分布曲線の変化

森・神保は、力を加えても全体的には破壊を受けないで、表面をけずって、いきなりほぼ一定の粒径の微粉が生じる形式を表面粉砕とよんだ。また粒子が大きく割れてゆく形式を体積粉砕とよんだ。中川・松居の摩擦粉砕は表面粉砕に、中川・松居の静圧縮粉砕や衝撃圧縮粉砕は体積粉砕の場合に相当している。

3. 粉砕仕事法則

3.1 Rittinger 則

Rittinger (1867年)は、粉砕に要する仕事量 A [Kgc·cm]が、粉砕による比表面積増加量 ΔS [cm²/kg]に正比例することを述べた²⁰⁾。(7)式を用いて表わすと

$$A/W_0 = C_R \cdot \Delta S = C_R \cdot (\phi/\rho) \cdot (1/x - 1/x_0) \quad (26)$$

となる。ここで W_0 [kg]は材料の質量であり、 x_0 , x [cm]は粉砕前後の粒子径、 ρ [kg/cm³]は材料の真密度、 ϕ [—]は比表面積形状係数である。

C_R [Kgc·cm/cm²]は Rittinger 法則における比例係数であり、Rittinger の粉砕抵抗、あるいは Rittinger の単位粉砕仕事とよばれている。また $1/C_R$ [cm²/Kgc·cm]は Rittinger Number または効率係数 Efficiency coefficient とよばれている。

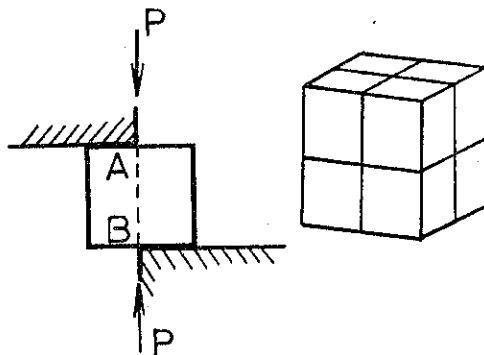


図4 Rittinger 法則の説明図

Rittinger 法則の説明図として図4が引用される場合が多い²⁰⁾。ある均質材料からなる1辺が1 cmの正六面体に図示のように1つの面に平行な断面A Bに沿って、

これを2つに剪断するに要する仕事を $a[\text{Kgcm}]$ とすれば、同一の正六面体を1辺が $1/n[\text{cm}]$ の n^3 個の正六面体に剪断するに要する仕事は、断面ABについてなしたと同様な仕事を $3(n-1)$ の断面に沿って行なうことに相当するので $3(n-1) \cdot a$ である。1辺が $1/n, 1/m[\text{cm}]$ の両者の場合における剪断に要する仕事量の比は

$$\frac{3(n-1) \cdot a}{3(m-1) \cdot a} = \frac{n-1}{m-1} \cdot \frac{n}{m} \quad (27)$$

となる。すなわち剪断による産物の辺長の逆数にはほぼ比例することとなる。1つの正六面体を剪断により破断し、水平、垂直ずれも一定の大きさの面を生成するには、すべて一定量の仕事が必要であると説明していることからみれば、このような仕事量を工業的粉砕仕事量であると解釈するのは妥当でない。面の剪断、あるいは面の分離破断のみに要した粉砕正味仕事量と解釈するのが合理的であろう。この法則を提案し、実証したとされている Rittinger はこの法則中の粉砕仕事として明確な指示を与えていない。Rittinger をはじめ、Hersam, Gates, Richards, Rosin など、この法則を支持する多数の研究者は²⁰⁾、この法則における粉砕仕事量として、実際の粉砕にさいして加えた工業的粉砕仕事量か、またはこれにほぼ比例する若干のエネルギー損失を差し引いた外的仕事量をあてはめて Rittinger 法則を実証している。さらにこの結果から、後に述べる意味での粉砕正味仕事法則を実証したと考えている向きがあるが、これは明らかに両者を混同した誤りである¹¹⁾。

工業的粉砕仕事量と粉砕正味仕事量とは明らかに異なり、両者の間における正比例関係は一般には存在しない。工業的粉砕仕事量を用いた場合の Rittinger 法則の実測値に対する適合性は、粉砕の初期あるいは中期のある範囲内でのみ成立する^{11,50)}。またこの場合の Rittinger 法則の比例係数 $1/C_R$ すなわち Rittinger Number $[\text{cm}^2/\text{Kgcm}]$ は、同一材料においても、粉砕機の種類によって、また同一粉砕機においても粉砕条件の変化によって、著しく異なる値をとる^{75,93)}。このため、この値は効率係数とよばれている。また比較的エネルギー損失の少ない落球衝撃圧縮粉砕実験装置によって測定したこの値と、同一材料を任意の粉砕機で粉砕して測定したこの値との比を粉砕有効度とよんでいる。

3.2 Kick 則

Kick (1885年) は、Rittinger 法則に反対し、Rittinger は力と仕事との意味を混同したため誤ったものであると述べ、つぎの比例抵抗説、すなわち Kick の法則を提案した²⁰⁾。

幾何学的に相似な形状の、同質の2個の物体が相似の変形をなす場合に要する仕事量は、両物体の体積に正比

例する。またこの場合に必要力は、対応する断面積に正比例する。ある材料の一定量を粉砕するに要する仕事量は、同一の粉砕比においては同一の値を示す、すなわち一般に次式

$$A = C_K \cdot \log(x/x_0) \quad (28)$$

で Kick 則を表わしている。粉砕前の粒子径 x_0 から粉砕産物粒子径 x をえるまでの粉砕仕事量を A で表わす。 $C_K[\text{Kgcm}]$ は粉砕機の構造や、材料性質によって実験的に定める比例係数である。Andreassen⁵¹⁾ もこれに類似する関係式を提案している。

完全弾性体としての立方体、あるいは柱体試験片に外力が作用し、弾性限界に達し、材料内部に弾性ひずみエネルギーとして貯えられた外力仕事の解放によって破断が起こると考えると、このような粉砕開始段階において粉砕開始に必要な仕事量に対する粉砕仕事法則として理論的基礎をもつといえることができる。実際に粗砕に対して適合する傾向を示している。しかし粉砕開始以後の粉砕進行段階、すなわち粉砕による表面積の増加量を問題とする粉砕仕事法則としては用いがたい。

3.3 Bond 則

Bond (1952年) は Rittinger, Kick の2つの法則に続くものとして、次に述べる第3法則 Third Theory を提唱した⁵²⁻⁵⁷⁾。

辺長 x の立方体を粉砕する仕事量は、粉砕開始段階においては体積 x^3 に比例し (これは Kick 則に該当する)、亀裂発生後の粉砕進行段階においては表面積 x^2 に比例する (これは Rittinger 則に該当する)。両者の中間値として、Bond は粉砕仕事量は辺長 x の2.5乗に比例すると考えた。これから単位体積の材料を粉砕するに要する仕事量は $x^{2.5}/x^3 = 1/\sqrt{x}$ に比例するとした。さらに粉砕における有用仕事量は、生成された新しい亀裂の長さ、すなわち生成新表面積の平方根に比例し、生成粒子径の平方根に逆比例することを提案した。すなわち次式

$$A = C_B \cdot (1/\sqrt{x} - 1/\sqrt{x_0}) \quad (29)$$

が成立するとしたことになる。

さらに上式における粉砕仕事量 A を、工業的粉砕仕事量 $W[\text{kwh/ton}]$ で置き換え、 x_0 を $F/100$ で、 x を $P/100$ で置き換えた場合に相当する比例係数 C_B を $W_i[\text{kwh/ton}]$ で表わし、次式

$$\begin{aligned} W &= W_i (10/\sqrt{P} - 10/\sqrt{F}) \\ &= W_i \{ (\sqrt{F} - 1)/\sqrt{F} \} 10/\sqrt{P} \end{aligned} \quad (30)$$

を第3法則として提唱した。式中の $F[\mu]$, $P[\mu]$ は粉砕前後の粒子径を80%篩通過粒子径で表わしたものであり、 $r=F/P$ は粉砕比である。 $W[\text{kwh/ton}]$ は F から P をえるに要する工業的粉砕仕事量であり、 $W_i[\text{kwh/ton}]$ は $F=\infty$ から $P=100\mu$ まで粉砕するに要する工

業的粉砕仕事量である。 W_i [kwh/ton] を粉砕仕事指数 Work Index とよんだ。

Bond は上式中の W_i の値を実測する方法を規定し、かつきわめて広汎な材料について W_i の実測値を表示した⁵³⁾。この W_i の値を上式に代入することにより、F から P までの工業的粉砕仕事量 W の値を算出することができる。さらにこの値に粉砕処理量 [ton/h] を乗ずることによって、粉砕に必要な粉砕機駆動動力 [kW] の値が算出できることとなる。このように粉砕機駆動用所要動力や、工業的粉砕仕事量の算出を主眼とした粉砕仕事法則として独自のものであり、粉砕機のメーカーや、オペレータに貢献した功績は大きい。前述の Rittinger, Kick の法則における粉砕仕事量が明確に指示されていないため、種々の混乱および誤用が生じているのに比べ、Bond 則では粉砕機駆動の工業的粉砕仕事量を用いていることは注目すべき特徴である。

しかし Bond 則の基礎とする式(2)の理論的基礎は薄弱である。式中の粉砕仕事量 A は、問題とする粉砕の範囲が、粉砕進行段階のどの付近に位置するかによって、 x^3 と x^2 との間値としても、冪指数が変化するわけで、 $x^{2.5}$ に限定される基礎づけはない。仕事量 A は材料性質ばかりでなく、粉砕機のパフォーマンス、荷重条件にも関係する。式(2)中の A の理論的意味は明瞭ではない。さらに式(2)より式(3)に転じた場合、 W が工業的粉砕仕事量を表わすと定めたことには理論的飛躍がある。式(2)中の A を工業的粉砕仕事量と考えているようである。

Bond 則を実証するために行なった各個それぞれの実験範囲はせまい。また同一材料についての W_i の実測値は、実験条件によりかなり異なった値となっている。また異種類の粉砕機の機械的損失、あるいは機械効率のちがいが W_i の中に含まれている。このため機械効率を一定と仮定できない場合に適合性が良くないのは当然である。Bond 則は、実地からえた経験法則と考えるのが妥当である。

3.4 Lewis の一般式

Lewis らは、粉砕仕事量 A と粒子径 x の変化との間の関係式として次式²⁰⁾

$$dA = -C dx / x^m \quad (31)$$

を示した。また $m > 1$ の場合、上式を積分して

$$A = \{C / (m - 1)\} (1/x^{m-1} - 1/x_0^{m-1}) \quad (32)$$

をえる。これらの式をかりて前述の諸法則を比較すると式(2)で $m = 2$ とおいた場合が Rittinger 則の式(2)に、 $m = 1.5$ とおいた場合が Bond 則の式(2)に、また $m = 1$ とおいて式(2)を積分した場合が Kick 則の式(2)に相当している。

これらの法則中における粉砕仕事量 A が同一のものを

意味しているならば、これらの法則が同一の場で並立できないのは明らかである。

3.5 Lewis 式中の冪指数 m を変数と考える説

Holmes⁵⁸⁾ (1957年) は Rittinger, Kick, Bond の3法則をそれぞれ支持する実測値が引用できることと、しかもいずれも単独では実測値に適合しがたい場合があることから、この矛盾を調和させるため、Lewis 式中の粒子径の冪指数 m が定数でなく、変数であると考えた。

Holmes は、弾性法則的な考えかたから、Kick 則を出発点にして Kick 則を修飾し、辺長 x の立方体から単位新表面積をつくるに必要な仕事量が辺長 x の $(1-r)$ 乗に比例すると考えた。すなわち $r = 0$ のとき Kick 則、 $r = 0.5$ のとき Bond 則、 $r = 1$ のとき Rittinger 則に相当するような次式

$$A = W_i \{1 - (x_2/x_1)^r\} (100/x_2)^r \quad (33)$$

を提案した。これを従来の諸法則に対する一般化理論であると述べた。Kick 則が理想的な均質材を仮定したものであるとしている。しかし Kick 則からのかたよりを表わす係数として導入された上式中の r は経験的、実験的係数であり、理論的意味は不明確である。Holmes は、Kick 則からのかたより係数 r は、粉砕材料と粉砕力との作用条件によって変化すると述べ、Gaudin-Schuhmann の粒度分布式(2)中の粒度分布指数 n の値と密接な関係をもつことを示し、次の実測結果をえた。

$$0.73 \geq r \geq 0.25 \quad (34)$$

さらに Bond 則(30)中の $1/2$ 乗の冪指数を変数 r で置き換えた場合に相当する式(33)中の W_i の値が、Bond 則(30)式によるものよりも、はるかによく一定値に収束することを示した。たとえば石灰石で $r = 0.32$ 、石英で $r = 0.68$ を用いている。Holmes の提案式は、Lewis の形で述べると

$$dA = -C \cdot dx / x^{1+r} \quad (35)$$

$$A \propto (1/x^r - 1/x_0^r) \quad (36)$$

となり、Lewis 式(31)、(32)中の冪指数 m として $1.73 \geq m \geq 1.25$ の変数を採用したこととなる。

Bond は、Holmes, Svensson, Charles らの説に対して、Bond 則中における冪指数は $1/2$ 乗の一定値であるべきで、むしろ Bond 則中における粉砕仕事指数 W_i を変数と考えたいと反論している^{59,60)}。

Svensson⁶⁰⁾ (1957年) は石英のボールミル粉砕の実測値が Rittinger, Kick, Bond の3法則のいずれにも適合しないことを示し、Lewis 式中の冪指数 m として

$$2.3 \geq m \geq 1.8 \quad (37)$$

をえて、やはり Bond 式における $1/2$ 乗の指数を変数として、仕事指数を定数と考えようとした。

Charles⁶¹⁾ (1957) は脆性材の衝撃圧縮粉碎の実測値から

$$2.38 \geq m \geq 1.32 \quad (38)$$

をえて、 $m=2, 1.5$ に相当する Rittinger, Bond 式はいずれも上記の範囲内にあると述べた。さらに Lewis 式中の冪指数 m は定数でなく、材料や粉碎方法に関係する変数と考えるべきであるとして、1, 1.5, 2 のような特定の値をもつ必要はなく、連続的に変化するものであると述べた。

以上の3者の研究は工業的粉碎仕事法則としての著名な3法則がいずれも単独では実測値に適合しがたいことを述べ、 m を変数と考え、粉碎仕事則と粒度分布則とを結合づけようと試みた点で類似している。

しかし Lewis 式中の冪指数 m を変数と考えて導いた関係式は本質上、理論的基礎づけは困難である。実地からえた経験法則と考えるのが妥当である。

松居は、Rittinger, Kick, Bond の3法則をそれぞれ支持できる実測値があることも、またそのいずれも単独では実測値に適合しがたい場合があることも、これらの矛盾は、主としてこれらの法則中の粉碎仕事量の定義が不明確なことに由来すると考えた。これらの法則中における粉碎仕事量を、一般の解釈にしたがって工業的粉碎仕事量であると定義するならば、これらの法則は場を同じくして並立している法則ではなく、それぞれ異なる場で、その適用範囲を限定して成立する法則であると考えた。

3.6 田中の粉碎限界式

微粉碎の領域では、粒子内に生じる応力がその粒子を破壊するに十分な値に達しなくなり、粉碎が停止するはずである。この限界を示す比表面積を S_∞ で表わし、 S_∞ に近づくほど粉碎効率が落ちるので、粉碎仕事量 A に対する比表面積量 S の増加率が次式

$$dS/dA = K(S_\infty - S) \quad (39)$$

で表わされるとしたのが、田中 (1954年) の粉碎限界式である⁶²⁾。

上式を積分すると

$$\begin{aligned} \log\{(S_\infty - S_2)/(S_\infty - S_1)\} \\ = -K(A_2 - A_1) = -KA \end{aligned} \quad (40)$$

となる。 $S_\infty \gg S_1$ のときには近似的表現として次式

$$S_2 = S = S_\infty(1 - e^{-K \cdot A}) \quad (41)$$

をえる。式中の係数 K を粉碎係数とよび、材料の種類や粉碎力の方角などによって定まると述べている。 S と A との関係は、直線からそれで S_∞ に漸近する曲線となる。

粉碎の限界という概念は Mittag の著書 (1925年) 中にも述べられているように以前からあるものであるが、

田中は上掲の粉碎限界式として明示した。この説は従来の諸法則に比べて微粉碎の領域において適合する傾向をもっており、従来の諸法則が粒子径と粉碎仕事量との関係について述べたのと異なり、比較的測定が容易となった比表面積量と粉碎仕事量との関係を述べている点に特長がある。田中式は Lewis 式³¹⁾にて $m > 2$ の場合に近似している。粉碎限界値 S_∞ は実験によって定められるものとして、摩擦粉碎と衝撃圧縮粉碎における実測値を示した。最近、Harris⁶³⁾ (1967年) は田中式⁴¹⁾の拡張式として次式を提案した。

$$S = S_\infty(1 - e^{-KA^n}) \quad (42)$$

田中は⁴¹⁾式における A を粉碎正味仕事量と定義しているが、毎回の外的仕事量を一定にとり、エネルギー吸収率をこれに乗じている。結局、回数に比例する仕事量を採用している。粉碎限界式中の A を粉碎正味仕事量と考えずに、工業的粉碎仕事に比例する量と解釈するほうが、粉碎限界説としての意義がむしろ生きてくると考える。

3.7 松居による修飾 Kick 則 (粉碎開始仕事法則)

松居⁶⁴⁾ (1968年) は、粉碎仕事法則を材料の破断時、すなわち粉碎開始段階における粉碎仕事法則と、材料の破断以後の粉碎進行段階における粉碎仕事法則との2つに分けて考えることを提案した。

幾何学的に相似な柱体試験片の破断、すなわち粉碎開始に必要な力は対応する断面積に正比例し、破断すなわち粉碎開始までに要する仕事量 U_0 [Kgc] は体積 V [cm³] に正比例することを提案した。すなわち前述の Kick 則中の“相似変形”の字句を“粉碎開始”の字句に置き換えた場合に相当する。次式

$$V/U_0 = CII \quad (43)$$

$$U_0/V = CIR \quad (44)$$

で表わすものを粉碎開始仕事法則とよび、比例係数 CII [cm³/Kgc] を粉碎開始指数 Crushing Initiation Index とよび、 CIR [Kgc/cm³] を粉碎開始抵抗 Crushing Initiation Resistance とよび、材料固有の粉碎性指数として提案した。

粉碎開始以後の粉碎進行段階、すなわち粉碎による表面積の増加量を問題とする場合の粉碎仕事法則や、材料の粉碎性指数としては用いがたいものである。

3.8 松居による修飾 Rittinger 則 (粉碎正味仕事法則)

松居⁶⁴⁾ (1968年) は、破断以後の粉碎進行段階における粉碎仕事法則として、Rittinger 則中の粉碎仕事量 A を粉碎正味仕事量 A_r で置き換えた次式を提案した。

質量 W_0 [kg] の材料の粉碎正味仕事量を A_r [Kgc]、比表面積増加量を ΔS [cm²/kg] で表わした場合、両者の間に正比例関係が成立し、

$$\Delta S/(A_r/w_0)=CEI \quad (45)$$

$$(A_r/W_0)/\Delta S=CER \quad (46)$$

で表わすものを、粉碎正味仕事法則あるいは粉碎進行仕事法則とよぶ。比例係数 $CEI [cm^2/Kgcm]$ を粉碎進行指数 $Crushing\ Extension\ Index$ とよび、 $CER [Kg \cdot cm/cm^2]$ を粉碎進行抵抗 $Crushing\ Extension\ Resistance$ とよび、材料固有の粉碎性指数として提案した。

材料の粉碎には、3.7項で述べた粉碎開始仕事量が必要不可欠であるが、これを差し引かねば、粉碎正味仕事量を求めることができない。

粉碎正味仕事量は工業的粉碎仕事量とは明らかに異なるもので、両者の間には正比例関係が一般には存在しない。

粉碎正味仕事法則中の粉碎正味仕事量を定義し、測定し、算出する方法を明示しない限り、粉碎正味仕事法則は単なる仮説に過ぎず、実用的価値はなくなる。松居らは静圧縮粉碎、衝撃圧縮粉碎、ボールミル粉碎、ハードグロブ試験機粉碎において、荷重条件と試料条件とから粉碎正味仕事量 A_r を実測する方法や、また算出する方法について明らかにした。かつ各種の鉱物、岩石、人工岩石について(43)、(45)式中の CII 、 CEI の値を測定し、これらの粉碎性指数の値が、粉碎条件や測定方法に無関係に、材料固有の粉碎性指数であること認めた。

4. 粉碎仕事法則と粉碎産物の粒度分布法則との結合法則

4.1 中条の指数法則

中条²⁸⁾ (1949年) は、セメントのチューブミル粉碎の広汎な実験結果から、粉碎産物の粒度分布法則として Rosin-Rammler 分布式(13)が実測値に適合することを確かめた。また粉碎産物の $10 \sim 100\mu$ 範囲のセメント粒子が統計的に相似形状となることを明らかにした。さらに(13)式中の b がミル総回転数 n およびミル粉碎仕事量 A に正比例するとして次式

$$R = e^{-b \cdot x^n} = e^{-\lambda \cdot z \cdot x^n} = e^{-k \cdot A \cdot x^n} \quad (47)$$

をチューブミルの指数法則として提案した。

さらに $n=1$ の場合(47)式を x で偏微分してえる次式

$$-\partial R = b \cdot R \cdot \partial x \quad (48)$$

より、粒子径が x から $x+\partial x$ へ変化した場合、残滓量の減り高 $(-\partial R)$ 、すなわち $x \sim (x+\partial x)$ 間に存在する粒子量 ∂D は、粒子径 x より大きい粒子の群 R に比例することを述べ、この関係を累加分布の法則とよんだ。

また(47)式を $n=1$ の場合について z で偏微分して

$$-\partial R = \lambda \cdot x \cdot R \cdot \partial z \quad (49)$$

をえ、ミル総回転数 z だけ粉碎した状態から、さらに ∂z

だけ粉碎したためにできる x より小さい粒子の量 $(-\partial R)$ は、そのときミル内にある x より大きい粒子の量 R に比例することを述べ、この関係を累加粉碎の法則とよんだ。

4.2 アンドレーエフの粉碎速度と粒度分布の統一式

アンドレーエフ⁶⁵⁾ は、ある粒子径 x 以上の粒子の割合、すなわち篩上累積 R の粉碎時間 t による変化を粉碎速度とよび、ボールミル粉碎過程の法則性について検討し、次式

$$R_t = R_0 \cdot e^{-a \cdot t^\alpha \cdot x^n} \quad (50)$$

を粉碎速度と粒度分布の統一式として提唱した。式中の α は実験定数であり、粉碎条件などに関係するものとしている。石炭粉碎の初期段階では

$$\alpha = 1.5 \quad (51)$$

であり、後期段階では α の値が変化することを認めた。

全ソ燃料研究所法の石炭粉碎性指数測定法では(50)、(51)式を採用している。

4.3 Charles の実験式

Charles⁶⁶⁾ (1957) は Lewis 式(11)と Gaudin-Schuhmann 式(22)を結合し、3.5項で述べた Holmes と同様に、Lewis 式中の累指数 m を変数と考える立場から次式

$$A = K \cdot \bar{x}^{1-m} - \frac{C}{m-1} \cdot x_0^{1-m} \quad (52)$$

$$K = \frac{C \cdot n}{(m-1) \cdot (n-m+1)} \quad (53)$$

を導いた。さらに脆性材の衝撃圧縮粉碎における実験結果から、次の実験式

$$m = n + 1 \quad (54)$$

$$A = K \cdot (1/\bar{x})^{m-1} = K \cdot (1/\bar{x})^n \quad (55)$$

$$1.40 \leq n \leq 0.35 \quad (56)$$

$$2.38 \geq m \geq 1.32 \quad (57)$$

をえた。式中の K を機械定数 $Machine\ constant$ とよび、実験結果から定めている。粉碎産物の粒度分布を両対数方眼紙に点綴することによって、 $\bar{x}$ および n の値を定め、上式によって A/K の値を求めることができる。簡単のため粉碎現場で重宝視されているようである。

Charles は、上掲の式中の粉碎仕事量 A を粉碎時間 t および打撃回数に正比例する量として、落重衝撃圧縮粉碎における落高が2倍になれば A も2倍になると述べている。なお、一定試験機では入力仕事とともに上掲の式中の $\bar{x}$ の値が変化し、 n の値は変化しないものと考えた。

宮脇⁶⁷⁾ は Charles 式中の機械定数 K を ∞ の粒子から $\bar{x}=1$ までの粉碎所要エネルギーあるいは粉碎所要時間と解釈した。また粉碎条件を変えても n 、 m の値はそれぞれ一定で、機械定数 K の値のみが変化することを認めた。

Gaudin-Schuhmann 分布式を用いた場合 $n=0.77$ 、

Rosin-Rammler 分布式を用いた場合 $n=0.81$ の値をえ、 m の値として $m=1.72$ をえた。さらに宮脇⁶⁸⁾はアンドレーエフの(50)式について検討し、その有用性を認め、かつ次式

$$\partial R / \partial t = -K \cdot R + C \quad (58)$$

$$\partial R / \partial t = -K_1 \cdot R(1 - K_2 \cdot R) \quad (59)$$

を提案し、(50)、(53)、(55)式などの諸式を特別な場合の近似式として包括する関係式であると述べている。

4.4 中川・松居による修飾 Rosin-Rammler 分布則と修飾 Rittinger 則との結合法則

中川・松居による粉砕産物の粒度分布則

$$R = e^{-(x'/\bar{x})^n} \quad (17)$$

ただし

$$1/x' = 1/x - 1/x_0 \quad (16)$$

より、粉砕産物の粒度分布と、比表面積増加量との間の関係式として次式

$$R = e^{-(k \cdot \rho \cdot x' \Delta S)^n} \quad (21)$$

を導いた。

さらに修飾 Rittinger 則あるいは粉砕正味仕事法則として次式

$$\Delta S / (A_r / W_0) = CEI \quad (45)$$

を提案した。両者を結合することにより次式

$$R = e^{-(x'/\bar{x})^n} = e^{-(k \cdot \rho \cdot x' \cdot CEI \cdot A_r / W_0)^n} \quad (60)$$

をえる。粉砕の対象となる種々の鉱物、岩石、人工岩石の粉砕実験結果から、上式中の k および n の値として

$$k = 6.00 \times 10^{-3} \quad (61)$$

$$n = 0.8 \quad (62)$$

を用いることができることを認めた。図5に衝撃圧縮粉砕実験結果⁶⁹⁾を、図6にボールミル粉砕実験結果⁷⁰⁾を、図7にハードグロブ粉砕性試験機による粉砕実験結果⁷¹⁾を示す。

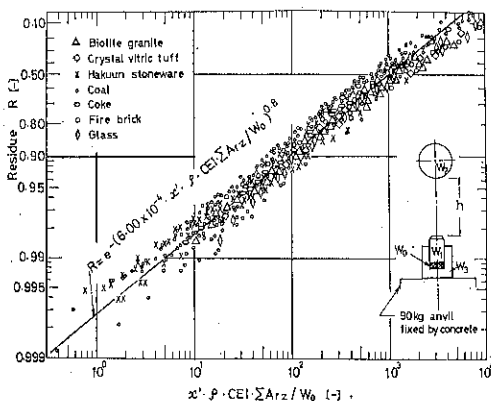


図5 衝撃圧縮粉砕による粉砕産物の粒度分布

$$R = e^{-(x'/\bar{x})^n} = e^{-(k \cdot \rho \cdot x' \cdot CEI \cdot A_r / W_0)^n}$$

$$k = 6.00 \times 10^{-3}, n = 0.8$$

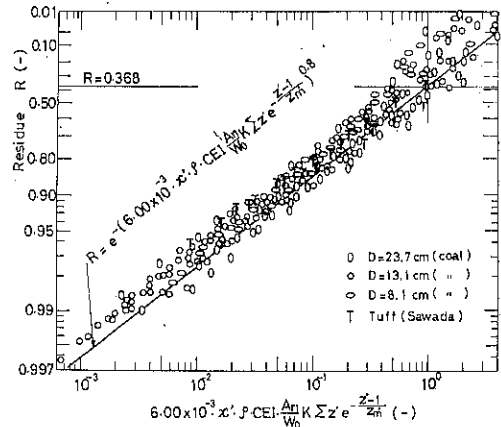


図6 定常運転ボールミル回分粉砕による粉砕産物の粒度分布

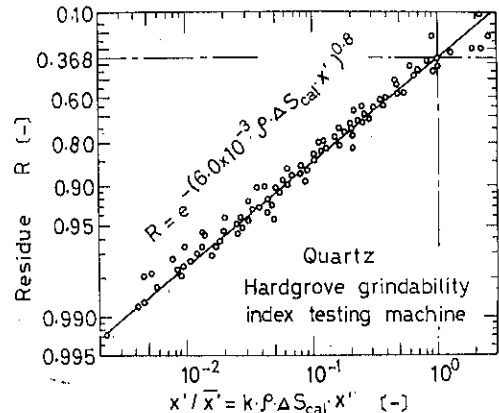


図7 ハードグロブ粉砕性試験機による粉砕産物の粒度分布

他の研究者の提案式との比較対照を便利にするために(16)~(20)式を書きあらためると

$$\Delta S = 1 / (k \cdot \rho \cdot \bar{x}) \quad (63)$$

$$= \frac{1}{k \cdot \rho} \cdot \left(\frac{1}{\bar{x}} - \frac{1}{x_0} \right) \quad (64)$$

となる。これに類似する形式の提案式を次に列挙する。

$$\Delta S = \frac{36.8 \times 10^4}{n \cdot \rho} \left(\frac{1}{\bar{x}_p} - \frac{1}{\bar{x}_f} \right) \quad \dots \text{Anselm}^{74)} (1950) \quad (65)$$

$$S_v = \frac{6}{\bar{x}_{\max} \cdot (1 - n)} \left\{ \left(\frac{\bar{x}_{\max}}{\bar{x}_{\min}} \right)^{1-n} - 1 \right\} \quad \dots \text{Bond}^{78)} (1961) \quad (66)$$

$$A_t = \frac{k_1}{1 - k_2 \cdot k_3} \cdot \frac{36.8 \times 10^4}{n \cdot \rho} \left(\frac{1}{\bar{x}_p} - \frac{1}{\bar{x}_f} \right) \quad \dots \text{Hiorns}^{74)} (1966) \quad (67)$$

$$S = \frac{1.5 \times 6 \times 10^4}{\rho \cdot \bar{x}_{\text{mean}}} \dots \text{Hukki \& Reddy}^{75)} (1966) \quad (68)$$

Rosin-Rammler 粒度分布線図用紙 (2.2 項の図2)

の周辺座標を用いて比表面積量を算出する方法をすでに述べたが、粉碎による比表面積増加量 ΔS を③～④式を用いて比較的簡単に算出することができることを付記する。ただし Rosin-Rammler 粒度線図上に点綴した実測値のうち 100μ 以下の微粒域を重視した $n=0.8$ の 1 直線を描くことが肝要である。これと $R=0.368$ の水平線との交点の横座標として x_0 の値を定める。微粒域の実測値を重視する理由は 2.3 項の修飾 Rosin-Rammler 分布則で述べたように粗粒域での適合性がよくないこと、数十 μ 付近以下での適合性が良好であることに基いている。なお k の値は無次元項である。 $\Delta S[\text{cm}^2/\text{kg}]$ 、 $\rho[\text{kg}/\text{cm}^3]$ の単位を採用した場合 x_0 、 x_0 いずれも $[\text{cm}]$ を採用することに留意せねばならぬ。材料種類によっては篩分可能の領域で $n \approx 0.8$ の実測結果がえられる場合でも、湿式沈降法でかつ比重天秤法を用いた自動粒度分布測定装置 RS 50 による測定結果によれば、数 μ 付近までの微粒域においては $n=0.8$ の直線上にのることを認めた。ただし n の値は修飾 Rosin-Rammler 分布則⑦式における値であるが、 $x \ll x_0$ の場合には $x' \approx x$ となるので、Rosin-Rammler 分布則③式における値とみなしてもさしつかえない場合が多い。

5. 粉碎正味仕事法則と工業的粉碎仕事法則との関係

Rittinger, Kick, Bond の法則中における粉碎仕事量は、いずれも工業的粉碎仕事量あるいはこれに比例する仕事量と解釈するのが一般通念である。このように解釈すれば、これらの法則は場を同じくして並立できる法則ではない。それぞれ異なる場で、その適用範囲を限定して成立する工業的粉碎仕事法則である。

粉碎正味仕事法則の成立と、これらの工業的粉碎仕事法則の近似的成立とは矛盾するものではない。粉碎正味仕事法則は粉碎全域に対して成立し、そのうちのある範囲を限定して Rittinger 則が、また別のある範囲を限定して Bond 則が、また田中の粉碎限界式が成立することを述べる。

5.1 多数回衝撃圧縮粉碎、また定常運転ボールミル回分粉碎における粉碎正味仕事法則と、工業的粉碎仕事法則との関係

粉碎正味仕事量を求める研究の進めかた (1.3 項) の第 3、第 4 として述べたように、落重および落高がそれぞれ一定の落重式衝撃圧縮粉碎試験機で、各回の 1 打に加えられる外力仕事量を一定にして打撃回数を重ねる。また定常運転ボールミル回分粉碎で、毎回転の外力による仕事量を一定としてミル総回転数を増加させる。これらの場合、工業的粉碎仕事量は、打撃回数あるいはミル

総回転数 z に正比例する。しかし粉碎正味仕事量 A_r との間には正比例関係は存在しない。

ここで定常運転ボールミル粉碎とは、臨界速度 $N_{crit} [\text{rpm}] = 42.3/\sqrt{D[\text{m}]}$ の 70% 付近で運転し、粉碎媒体ボールをミル内容の約 50% のみかけ比率で先填し、ボールの隙間容積を満たす程度の試料を装入した場合をいう。この場合最大効率を示す場合が多く、現場で実用されている条件である。またこの場合、粉碎媒体ボールの落下による衝撃圧縮粉碎機構が主であることを認めた。

この場合、粉碎正味仕事法則として提案した次式

$$\Delta S/(A_r/W_0) = \text{CEI} \quad (45)$$

における粉碎正味仕事量 A_r は中川・松居によって提案された次式

$$A_r = \sum_{i=1}^z A_{rz} = A_{r1} \cdot \frac{z}{1} z e^{-(z-1)/z_m} \quad (69)$$

で表わすことができる⁶⁹⁾。ここで A_{r1} は最初の第 1 回打撃時、またはミルの第 1 回転目の粉碎正味仕事量を表わす。 A_{rz} は第 z 回目のただ 1 回あるいは 1 回転による粉碎正味仕事量、 $A_r = \sum_{i=1}^z A_{rz}$ は $z=1$ 回から第 z 回までの粉碎正味仕事量の総和を表わす。 A_{rz}/A_{r1} および $A_r(z+1)/A_{rz}$ の比はそれぞれ

$$A_{rz}/A_{r1} = z \cdot e^{-(z-1)/z_m} \quad (70)$$

$$A_r(z+1)/A_{rz} = \left(1 + \frac{1}{z}\right) \cdot e^{-1/z_m} \quad (71)$$

で表わされる。 $A_{rz}/A_{r1} \sim z$ の関係を表わす理論曲線

69) を図 8 に、 $\sum_{i=1}^z A_{rz}/A_{r1} \sim z$ の関係を表わす理論曲線

69) を図 9 に示す。両者いずれも z とともに変化し、かつ粉碎特性値 z_m の値によって変わる。第 z 回目のただ 1 回による粉碎正味仕事量 A_{rz} の値が、 z の値に無関

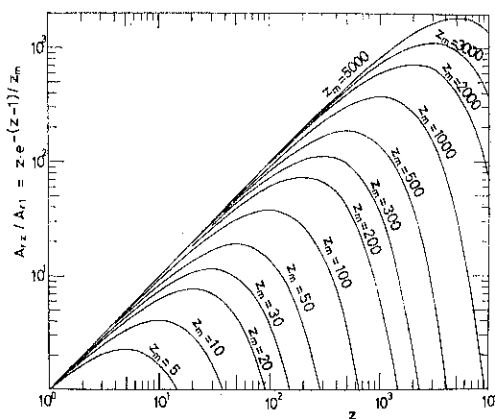


図 8 多数回衝撃圧縮粉碎または定常運転ボールミル回分粉碎における第 z 回目のただ 1 回による粉碎正味仕事量 A_{rz} をあらわす理論曲線

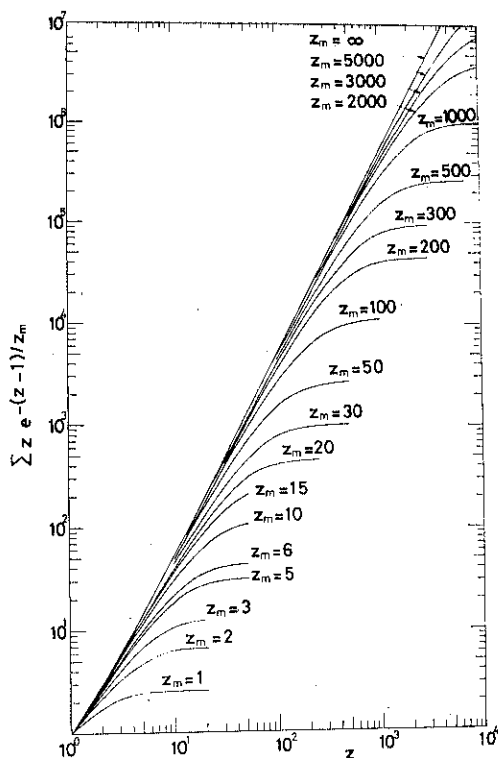


図9 打撃回数 \$z\$ またはミル総回転数 \$z\$ までの粉碎正味仕事量の総和 \$\sum_1^z A_{rz}\$ をあらわす理論曲線

係でないこと、 $\sum_1^z A_{rz}$ の値が \$z\$ に正比例する値ではないことに留意したい。1 回目との粉碎正味仕事量 \$A_{rz}\$ が極大値をとる打撃回数が \$z_m\$ である。この \$z_m\$ の値は粉碎条件からつぎのようにして求めることができる。

\$z = 1\$ 回から \$z = i\$ 回までの比表面積増加量を \$\Delta S_i\$ とすると、最初の第 1 回打撃による比表面積増加量 \$\Delta S_1\$ との比は、(45)、(49)式から次式

$$\Delta S_i / \Delta S_1 = \sum_{j=1}^i z e^{-(z-1)/z_m} \quad (72)$$

で表わすことができる。\$\Delta S_i / \Delta S_1 \sim z_m\$ の関係を表わす理論曲線⁽⁶⁹⁾を \$i = 3 \sim \infty\$ の場合について図10に示した。これによって次式が成立することを認めた。

$$z_m - 1 = \left\{ \sum_{j=1}^{\infty} z e^{-(z-1)/z_m} \right\}^{0.5} = (\Delta S_{\infty} / \Delta S_1)^{0.5} \quad (73)$$

式中の \$\Delta S_{\infty}\$ は無限に打撃回数を重ねた場合、すなわち \$z = \infty\$ に相当する比表面積増加量である。\$\Delta S_{\infty}\$ の値が材料固有の一定値をとることを認めた。さらに \$\Delta S_{\infty}\$ の値と材料の真密度 \$\rho\$ との積が、材料の種類に無関係にはば一定値となることを認めた。

\$\rho \cdot \Delta S_{\infty}\$ の平均値として次の値をえた⁽⁶⁹⁾。

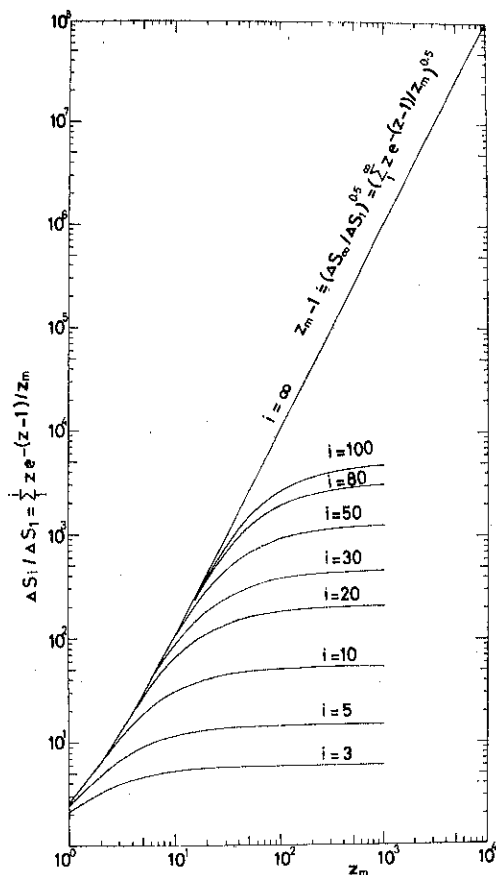


図10 \$\sum_1^z A_{rz}\$ をあらわす理論式中の粉碎特性値 \$Z_m\$ と第 \$i\$ 回目までの比表面積増加量 \$\Delta S_i\$ との関係を示す理論曲線

$$\rho \cdot \Delta S_{\infty} = 2.0 \times 10^4 [1/\text{cm}] \quad (74)$$

これは比表面積径の限界値を

$$d_{sp\infty} = 3.0 \times 10^{-4} \text{cm} = 3.0 \mu \quad (75)$$

とした場合に相当している。粉碎前の最初粒子径がこれに比べて十分大きい場合

$$\rho \cdot \Delta S_{\infty} \approx \rho \cdot S_{\infty} = 6/d_{sp\infty} = 2.0 \times 10^4 [1/\text{cm}] \quad (76)$$

となる。この関係は、落重衝撃圧縮粉碎⁽⁶⁹⁾、定常運転ボールミル粉碎⁽⁷⁰⁾、ハードグロブ粉碎性試験機⁽⁷¹⁾による粉碎のいずれの場合にも、普通の岩、鉱石を対象とした場合、成立することを認めた。

(74)式を(73)式に代入することから

$$z_m - 1 = \{ (2.0 \times 10^4 / \rho) / (CEI \cdot A_{r1} / W_0) \}^{0.5} \quad (77)$$

をえる⁽⁶⁹⁾。粉碎における荷重条件と試料条件とから \$\rho\$、\$W_0\$、\$CEI\$、\$A_{r1}\$ の値をあらかじめ定めうるので、上式

から z_m の値を求めることができる。 $z = 1$ の場合に対応する次式

$$\Delta S_1 = CEI \cdot A_{r1} / W_0 \quad (78)$$

の式中の A_{r1} を荷重条件と 試料条件とより 表わす関係式については後に述べる。

ここで粉砕正味仕事法則と工業的粉砕仕事法則との相互関係を簡単に述べるために次式

$$\sum_1^z ze^{-(z-1)/z_m} = K_1 \cdot z^\beta \quad (79)$$

を仮定してみる。図9より $z_m = \infty$ の場合には

$$\begin{aligned} \beta &\approx 1.9 \\ K_1 &\approx 1.0 \end{aligned} \quad (80)$$

をえる。 $z_m < \infty$ の場合でも $z \ll z_m$ の領域では上式の関係が成立する。

$1 \leq z/z_m \leq 2$ の領域では

$$\beta \approx 1.0 \quad (81)$$

をえ、 z/z_m の比が増加するとともに β の値は減少して $z/z_m \geq 10$ の領域では $\beta \approx 0$ をえる。

粉砕正味仕事法則(45)式中の粉砕正味仕事 A_r に(79)式を用いた次式

$$\Delta S = CEI \cdot (A_{r1} / W_0) \cdot \sum_1^z ze^{-(z-1)/z_m} \quad (82)$$

にて(79)式を用いると、近似関係式として次式

$$\Delta S = CEI \cdot (A_{r1} / W_0) \cdot K_1 \cdot z^\beta \quad (83)$$

をえる。これを変形して

$$z = K_2 \cdot (\Delta S)^{1/\beta} \quad (84)$$

をえる。ここで(84)、(88)式を用い

$$z = K_3 \cdot (1/\bar{x} - 1/x_0)^{1/\beta} \quad (85)$$

をえる。 $\bar{x} \ll x_0$ の場合には

$$z = K_3 \cdot (1/\bar{x})^{1/\beta} \quad (86)$$

となり、 $z \ll z_m$ の領域では(86)式を用い次式をえる。

$$z = K_3 \cdot (1/\bar{x})^{0.5} \quad (87)$$

$1 \leq z/z_m \leq 2$ の領域では(85)式に(81)式を用い

$$z = K_3 \cdot (1/\bar{x} - 1/x_0) \quad (88)$$

が成立する。

工業的粉砕仕事法則では、打撃回数、あるいはミル総回転数 z に正比例する粉砕仕事量を用いている場合が多い。 $z \ll z_m$ の粉砕初期の領域では Bond 則(30)式に類似する(87)式が成立し、 $1 \leq z/z_m \leq 2$ の粉砕中期の領域では Rittinger 則(86)式に相当する(88)式が成立する。 z/z_m の値がこれより大きい領域では田中の粉砕限界式に類似する関係を認める。

また Charles の実験式(55)中の冪指数 $(m-1)$ および Holmes の(33)~(36)式中の係数 r は(86)式の冪指数 $1/\beta$ に相当する係数として、また(86)式中の Charles の機械定数 K は、(86)式中の係数 K_3 に相当するものとしてはば説

明することができる。

Bond, Rittinger 則のいずれれもがそれぞれ成立する領域があり、そのいずれれかの法則を全領域に対して適用しようと試みても妥当性を欠くこととなる。粉砕正味仕事法則の成立と、ある範囲を限定しての工業的粉砕仕事法則としての Rittinger, Bond 則の成立とは矛盾するものではない。また、このような工業的粉砕仕事法則における粉砕仕事量と粉砕量との比を示す係数は、材料固有の粉砕性指数となることができず、粉砕条件によって著しく変化する係数となる。

つぎに中川・松居による粉砕産物の粒度分布則と粉砕正味仕事法則との結合法則(80)式中の粉砕正味仕事量 A_r を(89)、(90)式を用いて書きあらため

$$\begin{aligned} R &= e^{-\left\{k \cdot \rho \cdot x^1 \cdot (CEI/W_0) \cdot A_{r1} \cdot \sum_1^z ze^{-(z-1)/z_m}\right\}^n} \\ &\approx e^{-\left\{k \cdot \rho \cdot x^1 \cdot (CEI/W_0) \cdot A_{r1} \cdot K_1 \cdot z^\beta\right\}^n} \\ &= e^{-K_4 \cdot x^1 \cdot z^{\beta \cdot n}} \end{aligned} \quad (89)$$

の近似的関係式をえる。 $z \ll z_m$ の粉砕初期段階では、 β として(80)式を、 n として(82)式の値を用いると

$$\beta \cdot n = 1.9 \times 0.8 \approx 1.5 \quad (90)$$

となる。(89)、(90)式はアンドレーエフが粉砕速度と粒度分布の統一式として提唱した(50)、(51)式に相当している。粉砕の後期段階では $\beta \cdot n$ の値は 1.5 よりしだいに減少して 0 に近づくことが明らかである。

5.2 多数静圧縮粉砕、またはハードグローブ粉砕性試験機による粉砕、または超低速ボールミル粉砕における粉砕正味仕事法則と工業的粉砕仕事法則との関係

この場合も、毎回の外力による仕事量を一定として、総回数 z に正比例する工業的粉砕仕事量を用いて、工業的粉砕仕事法則の妥当性を論じている場合が多い。

この場合、粉砕正味仕事法則として提案した(45)式における粉砕正味仕事量 A_r は松居・関口らによって提案された次式⁷¹⁾

$$\begin{aligned} A_r &= \sum_1^z A_{rz} = A_{r1} \cdot \sum_1^z e^{-(z-1)/z} \\ &= A_{r1} \cdot (1 - e^{-z/z}) / (1 - e^{-1/z}) \end{aligned} \quad (91)$$

で表わすことができる。ここで A_{r1} は最初の第1回目の粉砕正味仕事量、 A_{rz} は第 z 回目のただ1回による粉砕正味仕事量、 $A_r = \sum_1^z A_{rz}$ は $z = 1$ 回から第 z 回までの粉砕正味仕事量の総和を表わす。 A_{rz}/A_{r1} および $A_{r(z+1)}/A_{rz}$ の比はそれぞれ

$$A_{rz}/A_{r1} = e^{-(z-1)/z} \quad (92)$$

$$A_{r(z+1)}/A_{rz} = e^{-1/z} \quad (93)$$

で表わされる。 $A_{rz}/A_{r1} \sim z$ および $\sum_1^z A_{rz}/A_{r1} \sim z$ の関係を表わす理論曲線⁷¹⁾ を図11に示す。 (83)式で明らか

なとおり、第 z 回目のただ1回による粉碎正味仕事量 A_{rz} は、一定の公比をもって等比級数的に減少する。

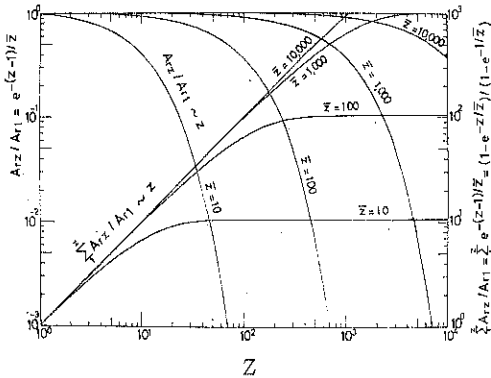


図11 多数回静圧縮粉碎またはハードグロブ粉碎性試験機粉碎または超低速ボール回分粉碎における第 z 回目のただ1回による粉碎正味仕事量 A_{rz} をあらわす理論曲線、および第 z 回までの粉碎正味仕事量の総和 $\sum_1^z A_{rz}$ をあらわす理論曲線

(45)式中の粉碎正味仕事量 A_r に(44)式を用いて変形すると

$$\Delta S_z = (CEI \cdot A_{r1} / W_0) \cdot (1 - e^{-z/\bar{z}}) / (1 - e^{-1/\bar{z}}) \quad (94)$$

$$\Delta S_z = \Delta S_\infty \cdot (1 - e^{-z/\bar{z}}) \quad (95)$$

$$\Delta S_\infty / \Delta S_1 = 1 / (1 - e^{-1/\bar{z}}) \quad (96)$$

をえる。 ΔS_∞ の値として前項で述べた(94)式を、 ΔS_1 に $\Delta S_1 = CEI \cdot A_{r1} / W_0$ の関係を用いると

$$(2.0 \times 10^4 / \rho) / (CEI \cdot A_{r1} / W_0) = 1 / (1 - e^{-1/\bar{z}}) \quad (97)$$

$$\bar{z} = \bar{z}$$

となる。粉碎における最初の荷重条件と試料条件とから粉碎特性値 $\bar{z}$ の値は定まる。また $\bar{z}$ は ΔS_z が z に正比例して増加すると仮想した場合、 ΔS_∞ に到達するまでの総回転数であるともいえる。

粉碎正味仕事法則と工業的粉碎仕事法則との相互関係を簡単に述べるため次式

$$\sum_1^z e^{-(z-1)/\bar{z}} = (1 - e^{-z/\bar{z}}) / (1 - e^{-1/\bar{z}}) = K_5 \cdot z^\gamma \quad (98)$$

を仮定してみる。 $\bar{z} = \infty$ の場合には

$$r = 1.0, K_5 = 1.0 \quad (99)$$

をえる。 $\bar{z} < \infty$ の場合にも、 $z < \bar{z}$ の領域では上式の関係が成立する。 $z/\bar{z}$ の比が増加するとともに r の値は1.0より減少して $z/\bar{z} > 4$ の領域では $r = 0$ となる。 $0 \leq r \leq 1.0$, $\infty \geq 1/r \geq 1$

(44)式に(98)式を用いると

$$\Delta S_z = CEI \cdot (A_{r1} / W_0) \cdot K_5 \cdot z^\gamma \quad (100)$$

をえる。前項と同様にして

$$z = K_6 \cdot (1/x - 1/x_0)^{1/\gamma} \quad (101)$$

をえる。静圧縮粉碎における負荷回数、またはハードグロブ粉碎性試験機や超低速ボールミルの総回転数 z に正比例する工業的粉碎仕事量と粉碎量との間には、 $z < \bar{z}$ の粉碎初期および中期のかなり広範囲の領域にわたって Rittinger 法則を適用することができる。

Bond 則に相当する関係はここでは認めがたい。なお、(44)式は田中の粉碎限界式に相当している。

5.3 単一柱体の静圧縮粉碎における粉碎正味仕事法則と工業的粉碎仕事法則との関係

粉碎正味仕事量を求める研究の進めかた (1.3項) の第5として述べた方法で、圧縮荷重・変位置量曲線を描き、最大荷重までの負荷曲線と、最大荷重点からの垂線と、荷重零線によって囲まれる線図面積に相当する仕事量を粉碎正味仕事量と定義する方法が Piret (1950) によって採用されている¹⁹⁾。また最大荷重点における材料内部に貯えられた最大弾性ひずみエネルギーを粉碎仕事量と仮定する方法が八嶋 (1970) によって用いられている^{76,77)}。Piret の測定結果¹⁹⁾の1例を図12に示す。Piret は単一の六面体石英結晶についての $\Delta S / (A/W_0)$ の値が17~265 cm²/Kgcmの間に分布する結果をえた。

中川・松居⁷⁸⁾ (1955) はガラス、陶器などの15mm 立方体試験片の静圧縮粉碎で圧縮ひずみ速度の影響をし

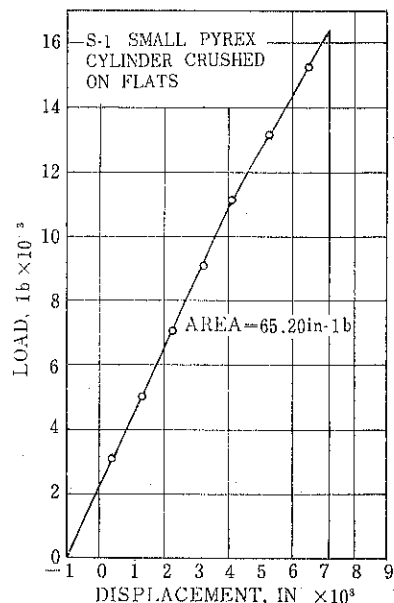


図12 単一柱体試験片の静圧縮粉碎における Piret の粉碎正味仕事量をあらわす荷重・変位置量曲線

らべた。それぞれの実験におけるひずみ速度をそれぞれ一定にとり、加圧開始より破壊までの所要時間が 18sec ~149.5min, ひずみ速度が0.0005~0.1%/secの相当に広範囲にわたる変化に関係なく、破壊荷重、破壊までのひずみ、縦弾性係数、破壊までのひずみエネルギーの値がそれぞれほぼ一定値をとることを認めた。またほぼ弾性変形のみで破壊にいたることを認めた。

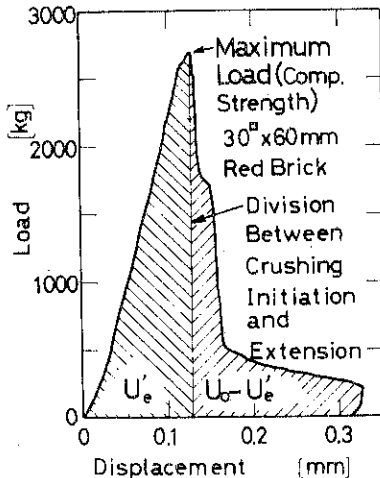


図13 単一柱体試験片の静圧縮粉砕における松居の粉砕開始仕事量 U_e' と粉砕正味仕事量 $U_o - U_e'$ をあらわす荷重・変位量曲線

松居 (1968) が単一の柱体試験片を静圧縮粉砕した場合の圧縮荷重・変位量曲線の 1 例⁶⁴⁾ を図13に示す。電子管平衡式万能材料試験機を用い、試験片の破断以後の荷重・変位量曲線をしらべるため、上下圧盤間の変位量を差動トランスで測定した。試験片は焼入鋼製円筒形臼と焼入鋼製プランジャの間で圧縮されるもので、あらかじめ試験片を装入しない場合の上下圧盤間の変位量と圧縮荷重との間の較正曲線を描き、これを差し引くことにより試験片の変位量を求めた。10 ϕ ×20mm 円柱体を標準試験片として用いたが、30°×60mm などの角柱体をも用いた。荷重を受ける両端面の平行度ができるように、また両端面の粗さが数 μ 程度以下になるように特に注意して精密に成形した。なお荷重履歴をできるだけもない試験片をえるため、高速度回転ダイヤモンドカッターと破磨布を並用して成形した。

図13にて、破断までがほぼ弾性変形であること、最大荷重以後、碎片を生じ受圧面積が減少し、荷重が急減すること、1,700kg 付近でしばらく荷重を支えたのち、ふたたび荷重が急減し、500kg 付近から変位量の進みにつれて荷重がゆるやかに減少することが認められる。右下のかどのところで油圧バルブを閉じ、逆方向に回し、上

下圧盤間の距離を開く方向に作動させると、荷重・変位量曲線は最初の負荷曲線にほぼ平行の形で除荷曲線を描く。最初から右下のかどのところまでの圧縮ひずみ速度はほぼ一定である。

縦座標は 200mm が、50, 25, 10, 5, 2.5ton を、横座標は 250mm が 1, 4 mm を表わす。

最大荷重点に到達し、荷重の急減を認めた直後に、すなわち破断後すみやかに (この場合破断音をきくことができるが)、油圧バルブを閉じ、逆方向に回し、上下圧盤間の距離を開く方向に作動させると図14に示すような荷重・変位量曲線を記録する。図の右方のかどのところが油圧バルブを閉じた個所を表わしている。除荷曲線は

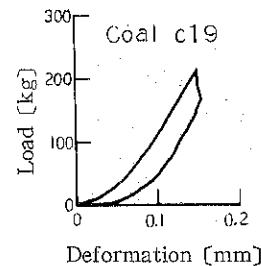
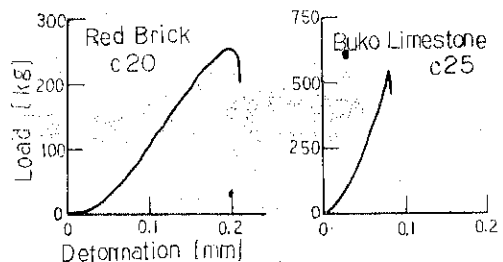
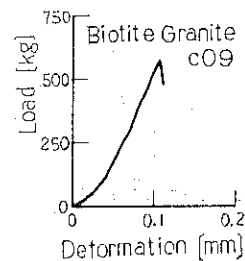
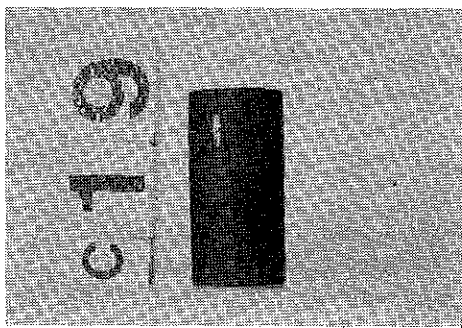


図14 単一円柱体 10 ϕ ×20mm 試験片の静圧縮粉砕において、破断後すみやかに除荷した場合の荷重・変位量曲線

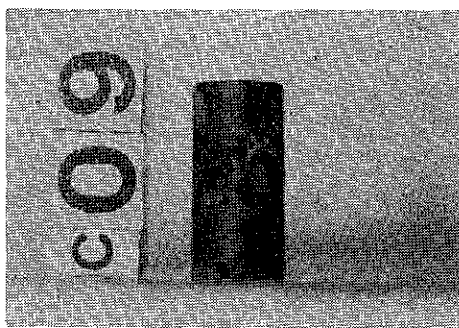


Load Deformation Curve
10 ϕ × 20 mm Prismatic Specimens

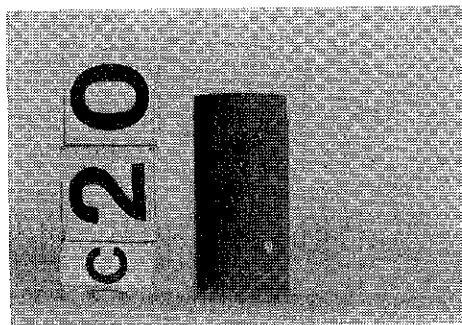
図15 単一柱体試験片の静圧縮粉砕における破断までの荷重・変位量曲線 (10 ϕ ×20mm 円柱体試験片)



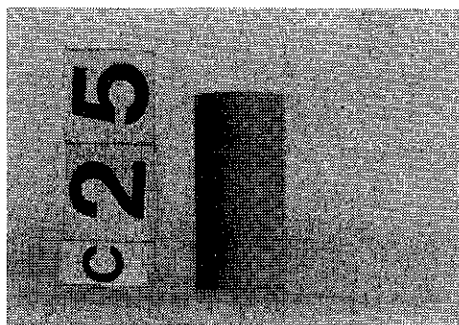
a) 石炭C19



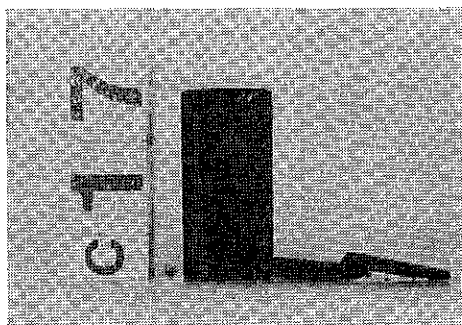
b) 黒雲母花崗岩



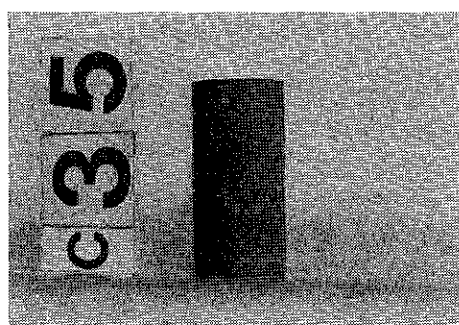
c) 赤レンガ



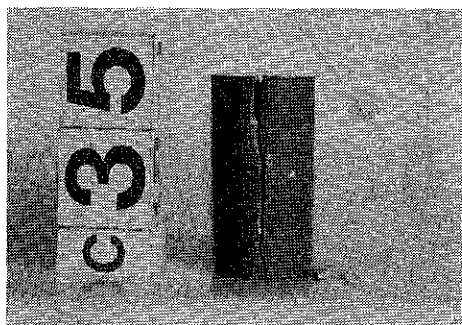
d) 武甲石灰岩



e) 石炭



f) 伊豆小松石
(破断直後を示す.)



g) 伊豆小松石 (前のf図にさらにエネルギーを加えた場合の破断面を示す)

図16 図14, 15に対応する試験片の破断と亀裂状況をあらわす写真
(10φ×20mm 円柱体試験片)

最初の負荷曲線にほぼ平行である。これに類似する実験結果の数例を図15に示す。いずれも破壊直後に、XYレコーダ上の記録ペンをあげ、除荷している。荷重を0にした後の試験片の写真を図16に示す。試験片の中央部に、荷重方向に沿った縦の亀裂を肉眼で明らかに認めることができる。しかし、破砕片すなわち粉碎産物の生成にまで進行しない亀裂である。

このような履歴をもった試験片にふたたび圧縮荷重を加えると、第1回試験時に油圧バルブを閉じた荷重付近まで、除荷曲線に沿って荷重が増加し、その後、荷重が減少し、第1回試験時の荷重・変位量曲線にほぼ連続する曲線をたどることを認めた。

荷重方向に沿った縦の割れ目は、Roš が提唱した引裂破壊 Trennungsbruch である⁷⁹⁾。Mesnager は、この引裂破壊を、球形気泡の内在によって説明している⁷⁹⁾。

粉碎の対象となる脆性材では、最大引張力のために破壊が起こる。脆性材の内部には多くの球形の気泡を蔵していて、気泡上下の両極に相当する点で引張応力 σ_2 が生じる。等分布圧縮力 σ で加圧すると

$$\sigma_2 = (3/2) \cdot \sigma \cdot (1 + 5/m) / (7 - 5/m) \quad (102)$$

となる。説明図を図17に示す。式中の $1/m$ はポアソン比である。脆性材ではポアソン比が一般にきわめて小さいので、いまこれを0と仮定すると

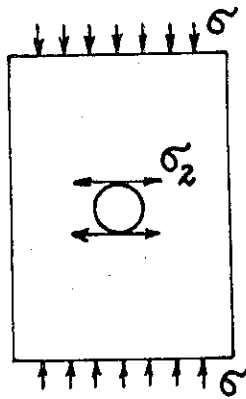


図17 Roš, Mesnager の球形気泡の内圧による引裂破壊、すなわち圧縮荷重方向に沿った縦割れの説明図

$$\sigma_2 = (3/2) \cdot \sigma \cdot (1/7) \quad (103)$$

となる。すなわち圧縮力 σ の $3/14$ の引張応力が気泡の上下両極にはたらく。このために脆性材の柱体試験片は圧縮試験にて縦割れを生じる。

同一の柱体試験片を等分布引張力 σ_1 で引張ると、気泡の左右の赤道に相当する点において次式

$$\sigma_1 = (3/2) \cdot \sigma_1 \cdot (9 - 5/m) / (7 - 5/m) \quad (104)$$

の引張応力を生じる。ポアソン比を0とおくと

$$\sigma_1 = (3/2) \cdot \sigma_1 \cdot (9/7) \quad (105)$$

となり、引張力 σ_1 の $27/14$ の引張応力が、気泡の左右にはたらく。

この圧縮試験および引張試験の両者における、破壊を起こす引張応力 σ_1 と σ_2 との値が等しくなるためには、圧縮のさいの σ と、引張りのさいの σ_1 との比が

$$\sigma/\sigma_1 = 9/11 \quad (106)$$

の値をとらねばならぬ。岩、鉱石ではこれに近い値をとり、上述の Mesnager の説がかなりよくあてはまる。

試験片の負荷両端面が粗く、端面摩擦が無視できなくなると、縦割れが起こらず、斜の面で破壊し、いわゆる鼓形の破断を生じることを認めた。Andreasen⁸⁰⁾ (1937) のガラス、長石、陶磁器15mm立方体の圧縮粉砕試験でも認められている。この場合の試験片の負荷端面はきわめて粗である。

$10^4 \times 20$ mm 円柱体試験片を直径方向に圧縮して、破壊最大荷重 P [Kg], $d=1.0$ cm, $l=2.0$ cm から圧裂強さ、あるいは引張強さ係数 σ_1 [Kg/cm²] を、赤沢 (1943) が提案した次式⁸¹⁾

$$\sigma_1 = 2P / (\pi \cdot d \cdot l) \quad (107)$$

で求めた値と、長さ方向に圧縮して圧縮強さ σ_c を次式

$$\sigma_c = P / (d^2 \cdot \pi / 4) \quad (108)$$

で求めた値との比較を図18に示した。 $\sigma_1/\sigma_c = 1/10$ の値をとる場合が多い。108式に近似している。圧裂強さの値は、引張強さの値にほぼ等しいことが認められている。

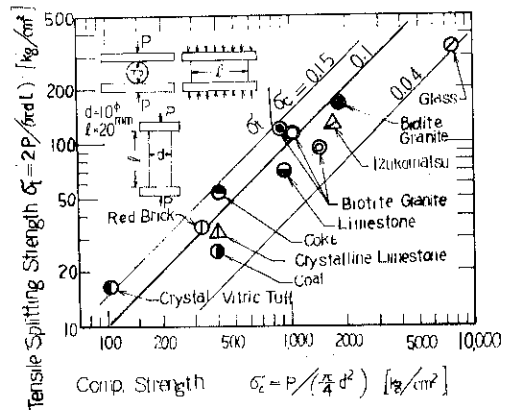


図18 引張強さ係数 σ_1 と圧縮強さ σ_c との関係

圧縮荷重が作用する場合でも、脆性材料は引張応力で破断するわけであるから、直接引張荷重を作用させれば好都合である。大野ら⁸²⁾ (1969) は、ソーダ石灰系処女ガラス繊維の引張強度試験を行ない、引張られた処女ガラス繊維が切断でなく粉碎してしまうことを認めた。単軸引張りによって起こる粉碎は単一破壊であって、きわめてめずらしい現象である。しかもこのさい生じる粉

砕産物が Rosin-Rammler 分布則には従うことを認めた。しかし現実の粉碎機における粉碎外力の機構は圧縮荷重形式のものである。破壊は最大引張応力の値で定まるが、荷重形式は圧縮である。松居らが圧縮荷重による粉碎正味仕事量を採用した理由はここにある。

引張と圧縮との縦弾性係数が等しいと仮定し、粉碎開始まで応力・ひずみ間の線型関係が成立すると仮定すると、粉碎開始までの所要仕事量の比は、引張と圧縮とは $(\sigma_t/\sigma_c)^2 \approx 1/100$ となる。これから類推すれば、引張荷重による粉碎正味仕事量は、圧縮荷重によるものの $1/100$ となる。松居の提唱による粉碎正味仕事法則(43)式中の粉碎進行指数 $CEI[\text{cm}^2/\text{Kgcm}]$ の値を圧縮荷重による粉碎正味仕事量を基準として測定したものは後に一覧表としてかかげるが、鋳鉄球殻 cast iron shot の $CEI \approx 2$ 、雪花石膏の $CEI = 290 \text{cm}^2/\text{Kgcm}$ の場合を除き、ガラス、ミロナイト、磁鉄鉱、石墨、赤鉄鉱、万成花崗岩などの $CEI = 8 \sim 12 \text{cm}^2/\text{Kgcm}$ から、東城石灰岩、那須硫黄、市販レンガなどの $CEI = 100 \sim 150 \text{cm}^2/\text{Kgcm}$ の間に分布するものが多い。これらの CEI の実測値の100倍を用いれば $10^3 \sim 10^4 \text{cm}^2/\text{Kgcm}$ 、あるいは $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{Kgcm}/\text{cm}^2$ となる。1.3項で述べた、比表面エネルギーなどからの粉碎正味仕事量の理論値として Smekal⁽¹¹⁾ の示した値に等しい。

松居は図13の最大荷重点に粉碎開始点を置き、粉碎開始点における比表面積増加量を0とみなした。粉碎開始、すなわち破断までの所要仕事量を図中に示す U_0 で表わし、粉碎開始以後、すなわち粉碎進行段階の所要仕事量を $U_0 - U_e$ で表わした。両者を面積計で測定し、 $U_e[\text{Kgcm}]$ を粉碎開始仕事量と定義し、 $U_0 - U_e = A_r[\text{Kgcm}]$ を柱体試験片の静圧縮粉碎における粉碎正味仕事量と定義して測定した。(ただし粉碎産物によって形成された粉体層が荷重を支えるような粉体層の圧密粉碎が生じると、荷重がふたたび増加しはじめる。試験片体積と粉碎臼の内容積とに関係するものであるが、粉体層の圧密粉碎が生じると $U_0 - U_e \approx A_r$ となる。これについては5.4項で述べる。) この場合、粉碎開始仕事法則および粉碎正味仕事法則はそれぞれ次式で表わすことができる。

$$V/U_e = CII \quad (43)$$

$$\Delta S/(A_r/W_0) = \Delta S\{(U_0 - U_e)/W_0\} = CEI \quad (44)$$

材料の粉碎開始までの仕事量 U_0 の値によって、圧縮粉碎時の粉碎量が定まると考えようとする向きがある。 U_0 は粉碎開始点において材料内部に貯えられた最大弾性ひずみエネルギーにほぼ等しい。粉碎開始の直後に、このエネルギーが瞬間的に粉碎進行エネルギーに転換すると一般的に考えようとするのは、これまで述べてきた実験事

実からみて妥当性を欠く。材料の粉碎のためには、粉碎開始までの仕事量 U_0 は必要不可欠であるが、粉碎による表面積増加量と U_0 との間には正比例関係はもちろんのこと、直接の関係は存在しない。

これまで材料の破断以後の荷重・変位量曲線はほとんど測定されていなかった。また電子管自動平衡式万能試験機を用いても、荷重速度を一定に保ち、記録用紙を一定に送り、荷重・時間曲線を記録した場合には、破断直後の荷重・変位量曲線を正しく判断することが困難であることを付記する。

粉碎正味仕事法則と工業的粉碎仕事法則との比較を述べるため、圧縮粉碎時の全ひずみエネルギー U_0 を工業的粉碎仕事量に正比例すると仮定する。

$$U_0/W_0 = U_e/W_0 + (U_0 - U_e)/W_0 \\ = \{1/(\rho \cdot CEI)\} \cdot \{(CEI/CII) + \Delta S_v\} \quad (45)$$

にて体積基準の比表面積増加量 $\Delta S_v[\text{cm}^2/\text{cm}^3]$ の値が

$$\Delta S_v \ll CEI/CII \quad (46)$$

の場合には

$$U_0/W_0 \approx 1/(\rho \cdot CII) = U_e/W_0$$

となり、 $U_0 \approx U_e$ にして、Kick 則が近似的に成立することとなる。また

$$\Delta S_v \gg CEI/CII \quad (47)$$

の場合には

$$U_0/W_0 \approx \Delta S_v/(\rho \cdot CEI) = (U_0 - U_e)/W_0$$

となり、 $U_0 \approx U_0 - U_e$ にて Rittinger 則が近似的に成立することとなる。

$CEI/CII[\text{cm}^2/\text{cm}^3]$ の値は材料種類によって著しく異なっていて、石灰石、ガラス、赤レンガ、黒雲母花崗岩などでは $CEI/CII \approx 600[\text{cm}^2/\text{cm}^3]$ であるが、コークス、大谷石などでは $CEI/CII = 15[\text{cm}^2/\text{cm}^3]$ である。粉碎開始が生じやすいものほど、粉碎進行が容易であるとは一般にはいえない。材料固有の CEI/CII の値に比べての、目的とする圧縮粉碎産物の ΔS_v の目標値との大小関係をしらべることによって、微粉碎か粗砕か、また Rittinger 則か Kick 則かの適用範囲を定める基準となる。Kick 則の適用範囲がせまいことが明らかである。

5.4 粉体層の静圧縮粉碎における粉碎正味仕事法則と工業的粉碎仕事法則との関係

粉碎正味仕事量を求めようとする研究の進めかたの第6(1.3項)として述べたように、鋼製臼内の粉体層試料を静圧縮粉碎した場合、負荷曲線と除荷曲線と荷重零線とによって囲まれる全線図面積に相当する変形仕事量を、粉体層に加えた粉碎正味仕事量と定義する方法が、Piret^(19,83,84)、Papadakis⁽⁸⁵⁾、Zeisel^(85,86) などによって採用されている。図19に Piret による実験結果⁽⁸³⁾

を、図20に Zeisel による実験結果⁸⁵⁾を示す。全線図面積に相当する全変形仕事量は工業的粉砕仕事量に正比例するものと仮定できる。

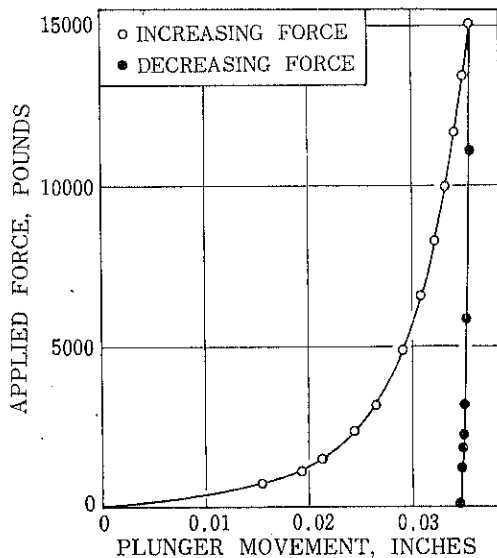


図19 鋼製円筒容器内の粉体層試料の静圧縮粉砕における Piret らの粉砕正味仕事量をあらわす荷重・変位置曲線

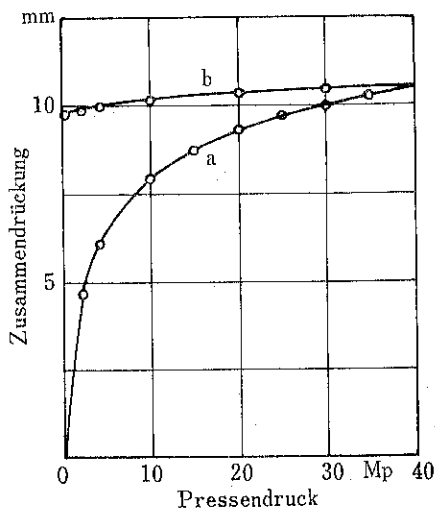


図20 鋼製円筒容器内の粉体層試料の静圧縮粉砕における Zeisel の粉砕正味仕事量をあらわす荷重・変位置曲線

松居⁸⁷⁾ (1968) は、粉体層の静圧縮粉砕においても、粉体粒子の個々の破断、すなわち粉砕開始までの所要仕事量を差し引かねば粉砕正味仕事量を求めることができないと考えた。

鋼製白内の粉体層に静圧縮荷重を加えた場合の荷重・変位置線図⁸⁷⁾の1例を図21に示す。ある荷重 P_1 まで負

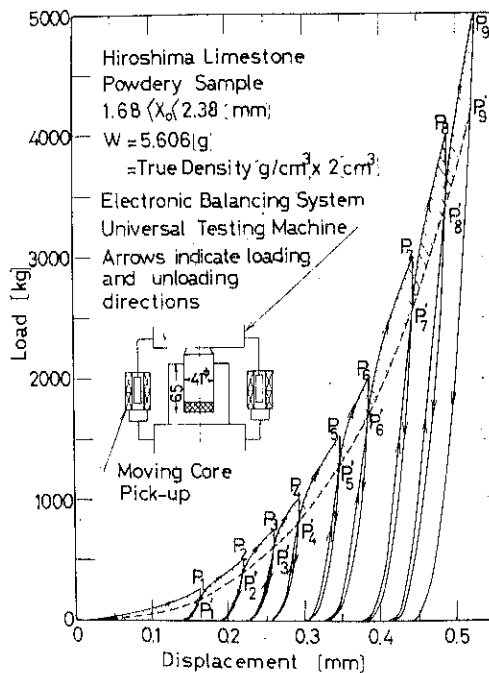


図21 鋼製円筒容器内の粉体層試料の静圧縮粉砕における松居らの粉砕正味仕事量 A_r をあらわす荷重・変位置曲線

荷した後、除荷してさらに再負荷し、 P_1 を越える P_2 から除荷する。このように繰返し荷重をかけた場合、図示のように除荷曲線と負荷曲線とが一致せず、ヒステリシス・ループを描く。繰返しの各段階における最大荷重点 $P_1, P_2, \dots$ を連結する、これらの曲線に対する包絡線は、荷重履歴をもたない試料に対する荷重・変位置線図に一致する。ヒステリシス・ループの交点 $P_1', P_2', \dots$ を結ぶ破線より上部の影線を施した面積に相当する仕事量を、粉体層の静圧縮粉砕における粉砕正味仕事量 A_r として測定した。ヒステリシス・ループの囲む面積に相当するエネルギーは除荷および再負荷の過程にて散逸された熱エネルギーを表わし、粉砕正味仕事量としては用いられない。また粉砕開始までの所要エネルギーを表わし、圧粉成形体の圧密エネルギーである。ヒステリシス・ループの交点 P' を越えるところから、それまでに聴取されなかった破壊音の発生を認めることができる。

図21における $P \sim \Delta l$ および $P' \sim \Delta l$ 曲線は次の関係式を用いることにより、荷重条件と試料条件とから求めることができる⁸⁸⁾。

$$P/F = \alpha \cdot \phi \quad (11)$$

$$\phi = \Delta l / (\Delta l_{\infty} - \Delta l) \quad (12)$$

$$P'/P = 1 - \epsilon \quad (13)$$

これらの関係式を用いると、前述の粉体層の静圧縮粉

砕正味仕事量 A_r は、荷重条件と試料条件とから次式で算出することができる。

$$A_r = \int_0^{\Delta l} P d(\Delta l) - \int_0^{\Delta l} P' d(\Delta l) \\ = \frac{\alpha \cdot V_{\infty}}{1 - \varepsilon_0} \left[\log_e \left(\frac{1 + \frac{\alpha F}{P}}{1 - \varepsilon_0 + \frac{\alpha F}{P}} \right) - \frac{\varepsilon_0}{1 + \frac{\alpha F}{P}} \right] \quad (10)$$

ただし α は次式で表わすことができる。

$$\alpha = \frac{\rho \cdot \Delta S_{P=\infty}}{CEI} \cdot \frac{1 - \varepsilon_0}{\log_e \frac{1}{1 - \varepsilon_0} - \varepsilon_0} \quad (11)$$

ここで $\Delta S_{P=\infty}$ は鋼製臼内の試料をかきまぜることなく、圧縮荷重 P を ∞ まで増大させた場合の比表面積増加量の限界値を表わす。ジョークラッシャ粉碎産物中より採取したほぼ等粒径の粉体層試料を鋼製円筒容器内で圧縮粉碎した場合

$$\rho \cdot \Delta S_{P=\infty} = 3.0 \times 10^8 \quad (12)$$

が成立する。また荷重・変位量曲線における荷重立ち上り点の粉体層試料の空隙率 ε_0 は

$$\varepsilon_0 = 0.5 \quad (13)$$

の値を用いてさしつかえない。

これらの関係式を用いることによって(10)、(11)式は次のように書きあらためられる。

$$\alpha = 7.77 \times 10^8 / CEI \quad (14)$$

$$A_r = 1.55 \times 10^4 \cdot V_{\infty} \cdot y / CEI \quad (15)$$

ただし式中の y は次式で定義するものである。

$$y = \log_e \frac{1 + \frac{\alpha F}{P}}{0.5 + \frac{\alpha F}{P}} - \frac{0.5}{1 + \frac{\alpha F}{P}} \quad (16)$$

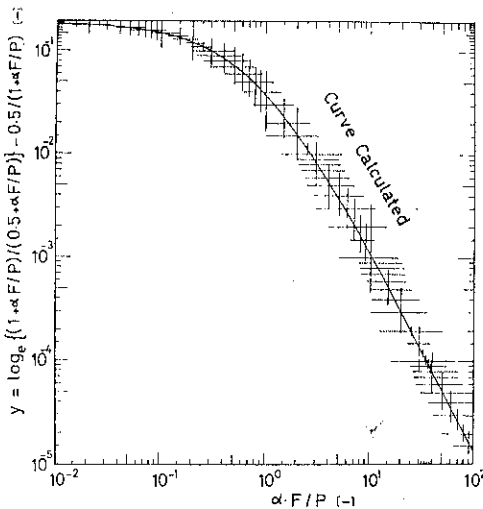


図22 粉体層試料の静圧縮粉碎正味仕事量 A_r に比例する係数 y と $\alpha F/P$ の関係をあらわす理論曲線 (P/F はみかけの単位面積あたりの圧縮荷重をあらわす)

以上の諸式中の V_{∞} は粉体層試料の真体積、 ρ は真密度、 F は鋼製臼の内部断面積、 CEI は材料固有の粉碎進行指数、 ε は空隙率である。

粉碎正味仕事法則(4)式中の粉碎正味仕事 A_r に(15)式を用いると

$$\Delta S = CEI \cdot (A_r / W_0) = 1.55 \times 10^4 \cdot y / \rho \quad (17)$$

をえる。材料固有の CEI によって α の値が定まり、荷重条件によって定まる単位面積あたりの圧縮荷重 P/F と α との比によって y の値が決定する。粉碎正味仕事量および比表面積増加量は y に正比例している。 $y \sim \alpha F/P$ の関係を示す理論曲線⁸⁸⁾を図22に描いた。

$\alpha F/P \geq 10$ の低荷重領域では

$$\Delta S \propto y \propto (P/F)^2 \quad (18)$$

の近似的関係が成立し、荷重の増大とともにほぼ2乗に比例して比表面積は増す。低荷重領域では

$$P'/P = 1 - \varepsilon = \text{const} \quad (19)$$

とみなすことができ、粉碎正味仕事量 A_r と、全線図面積に相当する全変形仕事量との比はほぼ一定とみなすことができる。すなわち全変形仕事量、工業的粉碎仕事量と比表面積増加量との間には、圧縮粉碎の初期および中期段階において Rittinger 則が近似的に成立する。

$$\alpha F/P \leq 0.8 \quad (20)$$

の大荷重領域では

$$\Delta S \propto y \propto (P/F)^{\beta}, \beta \leq 1.0 \quad (21)$$

の近似的関係が成立し、荷重の1乗に比例してすら比表面積は増加しなくなる。このことは、荷重が大きくなるとヒステリシス・ループ交点が最大荷重点にほとんど一致し、荷重を増しても粉碎正味仕事量 A_r がほとんど増加しなくなることによっても認められる。すなわち粉碎限界値が存在することとなる。全変形仕事量と比表面積増加量との間には、圧縮粉碎の後期段階における Rittinger 則よりのずれ、曲線関係と粉碎限界値に対する漸次関係とが成立することとなる。

5.5 衝撃圧縮粉碎における粉碎正味仕事法則と工業的粉碎仕事法則との関係

各回の1打に加えられる外力仕事量を一定にして打撃回数を重ねた多数回衝撃圧縮粉碎についての研究は5.1項で述べたように多くの研究者によって行なわれている。しかし、本項で述べようとする落重、落高などを変数として用いた粉碎仕事量と粉碎量との関係について検討した研究結果は比較的少ない。

Gross と Zimmerley⁸⁹⁾ (1930) は、3"φ×3"の鋼製円筒の端面中央部に1"φ×1/2"または1 1/2"φ×3/4"の円筒形凹みを作り、これにはめ合う鋼製プランジヤを用い、凹みのなかの試料をプランジヤを介して落球1.360, 2.050, 2.935kg、落高60cmで衝撃圧縮粉碎した。鋼製

円筒の底部と基礎台との間にアルミ線3.232φ×10mm 3本を放射状に置いた。

Piret ら^{18,90)} (1949) は 3.94"φ×3.25" の円筒に 2.46"φ×2.50" の凹みを作り、これにはめ合うプランジヤを用い、落球 2.521, 3.646kg, 落高 60, 50, 40, 35, 20cm, アルミ線2.06φ×10mmで衝撃圧縮粉碎実験を行った。次式

$$A = W_2 \cdot h - W_2 \cdot h' \quad (20)$$

で粉碎正味仕事量 A を定義し、測定した。ここで W_2 [Kg] は落球重量, h [cm] は落高である。あらかじめ試料を装入しない空打ちの場合のアルミ線変形量の実測値と $W_2 \cdot h$ との関係線図を描く。ただし $W_2 = 2.521$ Kg 一定の場合についてのみ成立する線図 図23 を描いている。つぎに試料を装入して落球衝撃により試料を粉碎すると同時にアルミ線を圧縮する。この場合のアルミ線変

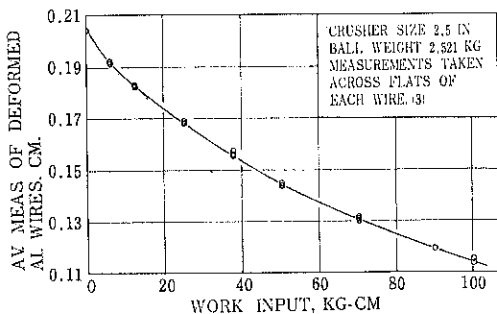


図23 Piret の落球衝撃圧縮粉碎実験にて、試料を装入しない空打ちの場合のアルミ線変形量の実測値と落球の位置エネルギー $W_2 \cdot h$ との関係線図

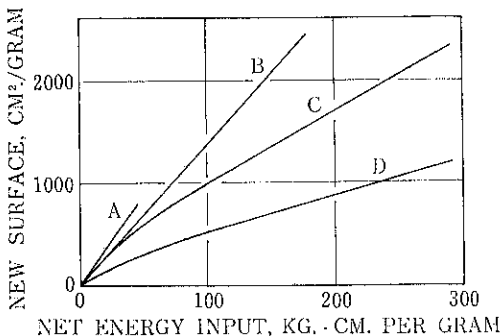


図24 Gross-Zimmerley および Piret らの落球衝撃圧縮粉碎と静圧縮粉碎における粉碎正味仕事量の実測値と比表面積増加量の実測値との間の関係曲線 (試料はいずれも石英, A は Gross-Zimmerley の落球衝撃, HF 溶解法による比表面積測定, B は Piret の静圧縮粉碎, ガス吸着法による比表面積測定, C, D は Piret の落球衝撃, C はガス吸着法, D は空気透過法による比表面積測定)

形量の実測値から前述の関係線図を用いて求めたものが上式中の $W_2 \cdot h'$ である。すなわち h' は試料粉碎時のアルミ線変形量を空打ちによってえる所要落高である。よって落球の位置エネルギーの差で粉碎正味仕事量を定義したこととなる。また 1 部で 5~16 回の繰返し打撃を行っているが打撃回数に乗じたものを粉碎正味仕事量として用いることになっている。

図24に、Piret の落球衝撃と粉体層の静圧縮、Gross らの落球衝撃の石英に対する実験結果の概略を示す線図⁸⁸⁾をかかげる。Piret が静圧縮粉碎で全線図面積に相当する工業的粉碎仕事量を粉碎正味仕事量として用いた結果の B 曲線における $\Delta S / (A / W_0)$ [cm²/Kgcm] の値が、衝撃時の C 曲線におけるその値よりも大きいことに注目したい。Piret の衝撃時の粉碎正味仕事量は、静圧縮時の粉碎正味仕事量よりも付加仕事を多く含んでおり、厳密な意味での粉碎正味仕事量からへだたっていることとなる。粉碎に必要な落球の位置エネルギー、すなわち粉碎に必要な工業的粉碎仕事量を測定したわけであるから、衝撃時と静圧縮粉碎時の差がこのように出てきたのであろう。

Gross⁸⁹⁾ は Rittinger Number が破壊時に力の作用する距離、破断面の性質、粉碎速度、粉碎形式で変化すると述べた。Piret^{83,84)} は広い範囲では Rittinger 則が成立しないことを示した。

松居 (1968) は Gross, Piret らに類似する装置を用いたが、これらとやや異なった方法を用いた⁶⁴⁾。鋼製円筒容器 (臼) 内に粉碎試料を充填せず、プランジヤを挿入し、臼の下部に 3 本の銅線 2.000φ×10.0mm を放射状に置き、電子管自動平衡式万能材料試験機にて静圧縮したときの圧縮荷重・変位量曲線を描く。銅線の変形に要した変形仕事量と、3 本の銅線の直径の永久変形量の平均値との関係線図⁶⁴⁾、図25を描いた。つぎにやはり粉碎試料を充填せず、落球衝撃時の銅線の永久変形量を実測し、この実測値を上図の横座標として用い、曲線上の点の縦座標から求める銅線の変形仕事量を A_{sc} [Kgcm] とする。

粉碎試料を充填せず、落高 h , 重量 W_2 の鋼球がプランジヤ W_1 に衝突する場合、鋼球はプランジヤおよび臼 W_3 とともに v の速度で動き、重量 W_c の銅線の上面の速度を v , 底面の速度を 0 とすると、衝突瞬間前後での運動量が等しいとして

$$v = W_2 \sqrt{2gh} / (W_1 + W_2 + W_3 + \alpha W_c) \quad (21)$$

となる。衝突により銅線が受取りうる最大エネルギー A は

$$A = v^2 \cdot (W_1 + W_2 + W_3) / (2g) + \beta \cdot v^2 \cdot W_c / g \quad (22)$$

で表わすことができる。この実験では $\alpha \cdot W_c$, $\beta \cdot W_c$ が比較的小さいので無視し、次式

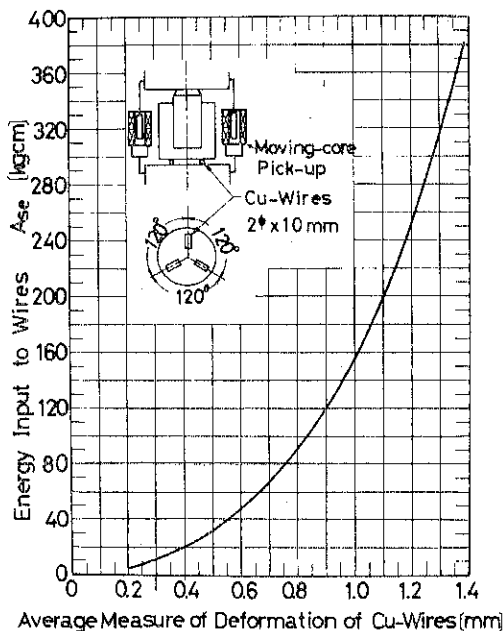


図25 松居の落球衝撃圧縮粉碎実験における、銅線の永久変形量による、衝撃エネルギーの校正線図（銅線の静圧縮変形仕事量と銅線直径の永久変形量との関係線図）

$$A = v^2(W_1 + W_2 + W_3) / (2g) \\ = h \cdot W_2^2 / (W_1 + W_2 + W_3) \quad (13)$$

で表わすこととした。

前述の銅線の永久変形量の実測値から図25より求めた A_{se} と (13)式による A の比較を図26に示した⁶⁴⁾。落重、落高を変化してもこれに無関係に $A_{se}/A = 70\%$ が成立する。工業的粉碎仕事量に比例する $W_2 \cdot h$ と A また

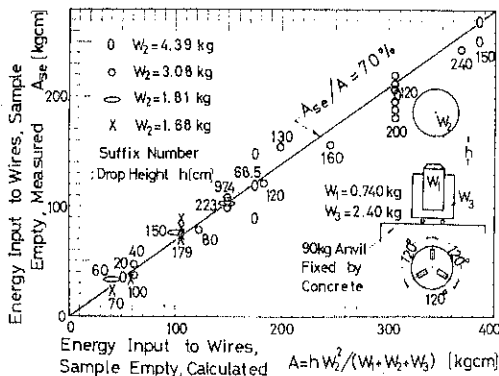


図26 松居の落球衝撃圧縮粉碎実験にて、試料を装入しない空打ちの場合の銅線変形量の実測値を前図25の横座標として用い、曲線上の点の縦座標から求まる仕事量 A_{se} と、衝突により銅線が受取りうる理論的最大エネルギー A との比較線図

は A_{se} との間に一般には正比例関係が成立しない。

以上の準備操作を行なった後に、はじめて臼内に粉碎試料を装入し、同一の落重、落高条件で衝撃圧縮粉碎すると同時に、臼下部の銅線を圧縮する。このときの銅線の永久変形量を実測し、この実測値を図25の横座標として用い、縦座標から求まる銅線の変形仕事量を A_{se} [Kgc] とする。次式

$$A_r = A_{se} - A_{sc} - A_i \quad (13)$$

で衝撃圧縮粉碎における粉碎正味仕事量 A_r [Kgc] を定義し、測定した。ここで A_i は衝撃圧縮粉碎開始までの所要仕事量である。 $A_{se} - A_{sc}$ の値は、試料が吸収、あるいは消費したエネルギーを示す。この値が静圧縮粉碎開始までの所要エネルギー U の値に等しいところで、柱体試験片の衝撃圧縮粉碎が開始する。粉碎開始時の破断面は静圧縮時と同様な、荷重方向の縦割れである。粉体層試料の場合にはこの値を定めることが困難なので、この値に比べて $A_{se} - A_{sc}$ の値がかなり大きくなる荷重条件を選んで

$$CEI = \Delta S / \{(A_{se} - A_{sc} - A_i) / W_0\} \quad (13)$$

$$= \Delta S / \{(A_{se} - A_{sc}) / W_0\} \quad (13)$$

の値を衝撃圧縮粉碎における CEI の値とした。

中川・奥田⁹¹⁾ (1956) は落重衝撃圧縮にて硬質白墨、白雲陶器柱体試験片の完全破砕時の抵抗力は落重、落高にほとんど関係なく、静圧縮破壊抵抗にほぼ等しいことを認めた。また佐々木⁹²⁾ はPage落球型衝撃試験機の1回打撃時の衝撃仕事量が破砕に要する最小仕事量に等しいとき、円柱体試験片のほぼ中心線を通る平面に沿って2つに破断することを認めた。Heywood⁴⁹⁾ も圧縮試験で定められる限界ひずみエネルギーより小さい衝撃エネルギーを加えても表面積増加が生じないことを述べている。

実際の粉碎機において衝撃圧縮粉碎機構を採用しているものが多い。この場合の工業的粉碎仕事量と粉碎正味仕事量との関係を究明するため、図25、26の落球衝撃圧縮粉碎実験装置にて、鋼製円筒容器（臼）と台との間の銅線を除いた場合について臼内の試料の衝撃圧縮粉碎実験を行なった。この結果、荷重条件と試料条件とから衝撃圧縮粉碎正味仕事量 A_r を算出する関係式をえた。

衝撃圧縮粉碎にて外からのエネルギー、すなわち(13)式にて $W_3 = 0$ とおいたエネルギー A が、全部弾性エネルギーとして材料に伝わると仮想した場合、これによって材料内に生ずる仮定の応力を σ で表わす。粉碎正味仕事量 A_r と、外から伝えた仕事量 A との比が、この仮定の応力 σ に比例すると考えた。すなわち中川・松居⁴¹⁾ (1959) は次式

$$A_r = A \{ 1 - e^{-(\sigma/\sigma_0)} / (c\sigma_0) \}$$

$$\bar{\sigma} = A(\sigma - \bar{\sigma}) / (C\sigma_0) = A\sigma / (C\sigma_0)$$

(33)

を提案した。ここで σ_0 は荷重が静的に作用するときの静圧縮時の応力、 $\bar{\sigma}$ は材料が粉砕を起すか、起さないかの境のところでの応力、すなわちその条件での最小破壊応力である。 A_r/A の値は 1 より小さい値であり、 $\sigma = \bar{\sigma}$

の場合、 $A_r = 0$ となる。 $0 \ll (\sigma - \bar{\sigma}) \ll C\sigma_0$ の場合、上の近似式が成立する。 A_r/A が前述の仮定の応力 σ に正比例すると考え、荷重が静的に作用するときの応力 σ_0 を基準にとり、 σ_0 と係数 C との積の逆数を比例係数と考えた式に相当している。係数 C は無次元の係数であり、2よ

表 3 材 料 の 粉 砕 性 指 数

大 別	細 別	名 称	産 地	モー ス かたさ	真比重 ρ kg/cm ³	圧縮強さ σ_c Kg/cm ²	引張強さ 係 σ_t Kg/cm ²	縦 弾 性 係 数 E Kg/cm ²	粉砕開始 指数 CII cm ³ /Kgcm	粉砕進行 指数 CEI cm ² /Kgcm
鉱 物	元 素 鉱 物	石 墨	富山県高清水	2	2.39×10^{-3}	350	44	1.08×10^5	0.67	10
	"	硫 黄	栃木県那須	1	1.95 "	550	30	1.30 "	0.50	100
	"	閃 亜 鉛	宮城県細倉	4	3.33 "					40
	"	黄 鉄 鉱	秋田県小坂	6	4.95 "	510	55	1.97 "	0.31	30
	酸 化 鉱 物	赤 鉄 鉱	イ ン ド	5.5	4.59 "	1230	210	2.82 "	0.063	12
	"	磁 鉄 鉱	岩手県釜石	6	4.55 "	1800	95	2.94 "	0.152	11
	"	クローム鉄鉱	兵庫県関宮	5.5	3.60 "	610		1.45 "	0.222	13
	ハロゲン 化鉱物	螢 石	浙 江 省	4	3.14 "	730		1.65 "	0.41	80
	炭酸塩鉱物	苦 灰 石	栃木県葛生	4	2.49 "	940		0.78 "	0.22	13
	硫酸塩鉱物	雪 花 石 膏	岩手県岩沢	2	2.36 "				3.50	290
	珪 酸 鉱 物	石 英	福島県石川	7	2.85 "	3800		2.95 "	0.096	20
	珪酸塩鉱物	正 長 石	福島県石川	6	2.37 "	2200		2.62 "	0.205	19
岩	火成岩	深 成 岩	黒雲母花崗岩							
		"	"							
		"	"							
		"	"							
		"	複雲母花崗岩							
	噴 出 岩	カンラン石 玄武岩	兵庫県玄武洞	6	3.05 "	870	104	1.75 "	0.109	46
		安 山 岩	伊豆小松石	6	3.04 "	1700	130	2.0 "	0.15	12
		流 紋 岩	新潟県赤谷	4	2.39 "	1620	110	4.5 "	0.15	12
	堆積岩	火成砕屑岩	結晶ガラス 質凝灰岩							
		"	凝 灰 岩							
		水成砕屑岩	石灰質頁岩							
		"	砂 岩							
		有機沈澱岩	石灰 岩							
		"	石 炭							
石	変成岩	熱 変 成 岩	晶質石灰岩							
		"	石 灰 岩							
		動力変成岩	ミロナイト							
	人工岩石	陶 磁 器	白雲陶器							
		"	衛生陶器							
		ガ ラ ス	磨板ガラス							
		レ ン ガ	普通レンガ							
		"	耐火レンガ							
石	燃 料	コ ー ク ス	東京ガス							
	人工岩石	陶 磁 器	国立陶磁器 試験所							
		"	東 洋 陶 器							
		ガ ラ ス	日本板ガラス							
		レ ン ガ	市 販							
		"	市 販							
石	燃 料	コ ー ク ス	東京ガス							
	人工岩石	陶 磁 器	国立陶磁器 試験所							
		"	東 洋 陶 器							
		ガ ラ ス	日本板ガラス							
		レ ン ガ	市 販							
		"	市 販							

り相当大きい数値であることが推定でき、一定の材料については、かなり広い実験範囲で一定値を示すことを認めた。

その後、松居ら⁶⁹⁾ (1970) は、種々の材料について検討した結果、次の実験式

$$C = 0.017 [\text{cm}^2/\text{Kg}] \cdot E [\text{Kg}/\text{cm}^2] \quad (36)$$

をえた。この関係を(35)式に用いることにより、鋼球 W_2 [Kg] を高さ h [cm] から落下させ、鋼製プランジャ W_1 [Kg] を経て鋼製白内の柱体試験片 W_0 [Kg] を粉砕する場合、試験片の受圧断面積を f [cm²]、高さを l [cm]、縦弾性係数を E [Kg/cm²] とすると次式

$$A_r = 83 [\text{Kg}/\text{cm}^2] \cdot h^{1.5} \cdot W_2^3 \cdot (W_1 + W_2)^{-2.5} \cdot f^{0.5} \cdot (E \cdot l)^{-0.5} \quad (37)$$

で第1回目打撃による粉砕正味仕事量を表わすことができる。粉体層試料の場合は次式で表わすことができる。

$$A_r = 16.6 [\text{Kg}/\text{cm}^2] \cdot h^{1.5} \cdot W_2^3 \cdot (W_1 + W_2)^{-2.5} \cdot F \cdot \rho^{0.5} \cdot (W_0 \cdot E)^{-0.5} \quad (38)$$

ここで F [cm²] はプランジャの断面積、 ρ [kg/cm³] は試料の真密度である。

上式を応用して定常運転ボールミルの第1回転目の粉砕正味仕事量 A_r の関係式を導きだすことができる⁷⁰⁾。これらの関係式で表わされる A_r の値を5.1項(35)式の A_{r1} の値として代入することにより、多数回衝撃圧縮時の粉砕正味仕事量の値を荷重条件と試料条件とから算出することができる。

以上、5.1～5.5項にわたっていろいろな場合における粉砕正味仕事量 A_r を定義し、これらの値を荷重条件と試料条件とから算出し、実測する方法を述べた。これらの粉砕正味仕事量 A_r と比表面積増加量 ΔS との間に、松居による修飾 Rittinger 則、すなわち粉砕正味仕事法則として次式

$$\Delta S / (A_r / W_0) = \text{CEI} \quad (45)$$

が成立することを認めた。またこれらのいずれの方法によっても粉砕条件に無関係に CEI [cm²/Kgcm] が材料固有の粉砕性指数として一定値をとることを認めた。

表3に鉄物、鉄石、岩石、人工岩石より代表的な材料をとりあげて、材料名、産地名、モースかたさ、真密度、圧縮強さ、引張強さ係数、縦弾性係数、 CEI 、 CEI の実測値を示した。

以上、粉砕理論を粉砕仕事法則の観点より解説した。物性論的研究を中心として固体の破壊現象を解説したものに堀⁶⁴⁾ の展望がある。物理化学的研究を中心に解説したものに神保⁶⁵⁾ の展望がある。粉砕産物の粒度分布則と関連づけられる粉砕速度論の最近の展望については田中、宮脇、藤崎⁶⁶⁾ が解説している。

文 献

- 1) 日本金属学会 強度 委員会編：金属材料の強度と破壊，丸善 (1964)。
- 2) 横堀武夫：材料強度学，技報堂 (1957)。
- 3) 横堀武夫：材料強度学，岩波書店 (1964)。
- 4) Averbach, B.L.: "Fracture", John Wiley and Sons, Inc., New York (1959)。
- 5) Haward, R.N.: The Strength of Plastics and Glass, London (1949)。
- 6) 原守久：材料科学，1，21 (1964)。
- 7) 平田森三：成長と破壊，山内恭彦編，物理学の本質 裳華房 (1955)。
- 8) 日本物理学会編：物理学論文選集46，破壊の物理 (1952)。
- 9) 谷口紀男：硬脆材料の衝撃破砕加工法，誠文堂新光社 (1959)。
- 10) Griffith: Proc. Inter. Cong. Appl. Mech. 55 (1924)。
- 11) Smekal, A.: VDI-Z, Beih. Verf. Nr. 1, 1 (1937), Nr. 5, 159 (1937), Nr. 6, 159 (1938)。
- 12) Epstein, B.: Ind. Eng. Chem. 40, 2289 (1948), J. Appl. Phys., 19, 140 (1948)。
- 13) 平田森三：機械の研究1, 231 (1949)。
- 14) 堀素夫：小野田研究彙報，11，第2冊，40号，99 (1959)。
- 15) 堀素夫：Proceedings of the Second Japan Congress on Testing Materials, March (1959)。
- 16) 堀素夫：J. Phys. Soc. Japan 14, 1444 (1959), 17, 228 (1962)。
- 17) 堀素夫：窯協，70, 54 (1962)。
- 18) J. T. Adams, J. F. Johnson, and Piret, E.L.: Chem. Eng. Prog., 45, 655 (1949)。
- 19) J. W. Axelson and Piret, E.L.: Ind. Eng. Chem. 42, 665 (1950)。
- 20) 亀井三郎：粉砕，産業図書 (1943)。
- 21) Schellinger, A. K.: Min. Engng., 3, 518 (1951)。
- 22) Rammler, E.: VDI-Z, Beih. Verf. Nr. 5, 150 (1940)。
- 23) 中條金兵衛：化学工学と化学機械 (化学工学協会年報) 7, 1 (1949)。
- 24) 田中達夫：化学工学，19, 152 (1955)。
- 25) 井伊谷鋼一：化学工学，18, 380 (1954)。
- 26) 井伊谷鋼一：集塵装置，日刊工業 (1963)。
- 27) 森・吉田編：詳論化学工学，単位操作 I，朝倉書店 (1962)。

- 28) Rose, H. E.: The Measurement of Particle Size in Very Fine Powders, London (1954).
- 29) Langemann, H.: Chem. Ing. Tech. **27**, 27 (1955).
- 30) Bull, F.A.: J. Inst. Fuel, **28**, 163 (1955).
- 31) 藤野清: 化学工学, **24**, 121 (1960).
- 32) Gebelein, H.: Chem. Ing. Tech., **28**, 773 (1956).
- 33) Rosin, P. O., Rammler, E.: Kolloid-Z., **67**, 16 (1934), Zement, **16**, No.35 (1927).
- 34) Bennett, J.G.: J. Inst. Fuel, **15**, (1936).
- 35) Rammler, E.: VDI-Z, Beih. Verf., Nr. 5, 161 (1937).
- 36) Taylor, J.: J. Inst. Fuel, **27**, 249 (1954).
- 37) Theimer, O.: Kolloid-Z., **128**, 1, 68 (1952), **132**, 134 (1953), **133**, 44 (1953).
- 38) Brenner, R.: Kolloid -Z, **143**, 154 (1955).
- 39) Gilvarry, J.J.: J. Appl. Phys., **32**, 391, 400 (1961), **33**, 3211, 3214, 3218 (1962), **35**, 1644 (1964).
- 40) Gilvarry, J. J.: Wear, **7**, 227 (1964).
- 41) 中川有三・松居国夫: 化学工学, **23**, 694 (1959).
- 42) Kellervessel, : Aufber. Tech. Nr. 8, p.453 (1966).
- 43) Schuhmann, R: Min. Tech. **4**, 1 (1940).
- 44) 宮脇猪之介, 塩田莞爾, 藤崎一裕: 九州鉱山学会誌, **35**, 238 (1967).
- 45) Gaudin, A. M., Meloy, T.P.: Trans. AIME, **223**, 40 (1962).
- 46) Broadbent, S. R., Callcott, T.G.: J. Inst. Fuel., **29**, 524 (1956), **30**, 13, 21 (1957).
- 47) 棚沢泰: 機械の研究, **15**, 505, 759 (1963).
- 48) 棚沢泰: 日本機械学会誌, **66**, 542 (1963).
- 49) Heywood, H.: Principles of Crushing and Grinding in "Chem. Eng. Practice" edited by Cremer, H. W., Davies, T., Vol. **3**, London (1957).
- 50) Rose, H.E.: A Treatise on the Internal Mechanics of Ball, Tube & Rod Mills, London (1958).
- 51) Andreasen, A. H.M.: Trans. Inst. Chem. Eng., **35**, 104 (1957).
- 52) Bond, F.C.: Min. Eng., May, 1 (1952), 1372 (1957).
- 53) Bond, F. C.: Allis-Chalmers Bulletin, Milwaukee, Wis. U.S.A. 07R 7995A (1953), 07 R9235 A (1956).
- 54) Bond, F.C.: AIME Winter Meeting, Feb. (1957).
- 55) Bond, F. C.: Mining Congress Journal, Aug. (1960).
- 56) Bond, F. C.: Brit. Chem. Eng. **8**, 631 (1963).
- 57) Bond, F. C.: Trans AIME Min. Eng., **193**, 313 (1949), Trans. AIMME, **193**, 484 (1952).
- 58) Holmes, J. A.: Trans. Inst. Chem. Engrs., **35**, 125 (1957).
- 59) Charles, R. J.: Min. Eng. Trans. AIME. April, 481 (1958).
- 60) Svensson, J.: "Progress in Mineral Dressing" p. 37 (1958), Trans. of the International Mineral Dressing Congress, Stockholm (1957).
- 61) Charles, R.J.: Min. Eng. Trans. AIME, Jan., 47 (1956), Oct., 1028 (1956).
- 62) 田中達夫: 化学工学, **18**, 160 (1954).
- 63) Harris, C. C.: Trans. S. M. E. **238**, 17 (1967).
- 64) 松居国夫: 化学工学, **32**, 807 (1968).
- 65) Анареев, С. Е.: 粉体工学研究会文献紹介 No. 131, 132, 157, 158; 細川粉体工学研究所, 粉碎 No. 7, 30 (1961) (三輪茂雄訳).
- 66) Charles, R. J.: Min. Eng. Trans. AIME, Jan., 80 (1957).
- 67) 宮脇猪之介, 塩田莞爾: 九州鉱山学会誌 **30**, 73 (1962).
- 68) 宮脇猪之介: ボールミル粉碎の速度過程に関する基礎的研究 (1969).
- 69) 松居国夫, 栗原利夫, 関口岳男: 化学工学, **34**, 881 (1970).
- 70) 松居国夫, 栗原利夫, 関口岳男: 化学工学, **34**, 888 (1970).
- 71) 松居国夫, 関口岳男, 栗原利夫: 化学工学, **34**, 875 (1970).
- 73) Bond, F. C.: Aufber. Tech. **5**, 211 (1964).
- 74) Hiorns, F. J.: 2nd European Symp. on Comminution, Amsterdam, p. 113 (1966), Summary in Aufber. Tech. **7**, 657 (1966).
- 75) Hukki, R. T., Reddy, I.G.: 2nd Europ. Symp. on Comminution, Amsterdam, p. 249 (1966); Summary in Aufber. Tech., **7**, 659 (1966).
- 76) 神田良照, 八嶋三郎, 下飯坂潤三: 日本鉱業会誌, **85**, 551 (1969).
- 77) 八嶋三郎, 諸橋昭一, 栗野修, 神田良照: 化学工学, **34**, 210 (1970).
- 78) 中川有三, 松居国夫, 徳永淳次: 化学工学, **19**, 349 (1955).

(32頁へ続く)

粉体および粉体混合物の流動性指数の測定と それらの粉体混合への応用

大阪府立大学工学部

矢野 武夫, 寺下敬次郎, 山崎 利夫

1. 緒 言

粉体混合プロセスの最適設計や粉体混合機の合理的な選択には、粉体の物性と流動性の知識は不可欠である。

ホッパー、フィーダーや粉体輸送機などでは、粉粒体の物性および流動性を考慮した研究が行なわれてきたが、粉体混合の分野では従来よりほとんど行なわれていないようである。

粉体の流動性については Carr¹⁾、三輪²⁾、久野³⁾、杉本⁴⁾、林⁵⁾および中島⁶⁾らの研究がある。まず三輪らは、節を無数のオリフィスと考え、これを通過する粉粒体の流動状態から粉体の流動性を求めた。久野および杉本らは、粉粒体を水平円筒型混合機内に装入し、混合機を回転させた状態における粒子の傾斜角や流下角から粉体の流動性を調べた。これ以外に粉体の安息角や摩擦角などから流動性を求めた林および中島らの研究がある。しかしこれらの研究のように単独の粉体物性から流動性を検討することには問題があると考えられる。粉体の流動性には粒径・粒径分布、角特性および見掛け比重などの静力学的因子も関係し複雑であると思われる。現在までのところ多くの因子を総合的に考慮した粉体の流動性の考え方としては Carr の研究がある。

本実験では、R.L.Carr の流動性の考え方を採用し、まず基準として混合実験に使用する粉体試料の流動性指数を測定した。しかしわれわれは、粉体混合プロセスの研究を目的としているので、Carr の流動性指数を粉体混合物に拡張する必要がある。そこで数種の粉体混合物について混合比率を変化させて流動性指数を測定した。つぎに粉体混合物の流動性指数の混合比率による変化を調べると共に、流動性指数と粉体物性の関係についても検討を加えた。

さらに水平円筒型混合機を用いた粉体混合の研究に流動性指数を応用し、混合速度および混合度との関係を考察した。これらの結果について報告する。

2. 粉体および粉体混合物の流動性指数ならびに粉体物性の測定結果と考察

2.1 流動性指数とその測定方法

粉体および粉体混合物の流動性の測定には、Carr の説にもとずいて製作された細川粉体工学研究所製のパウダーテスター⁷⁾を用いた。この流動性指数（以下FWと略称する）は安息角、スパチュラ角、圧縮度および均一度（粘着度）の4因子からなる。

まず安息角は注入角法によって測定した。すなわち口径 5.90mm の振動するロートから供給された粉粒体が 8cm 下方にある直径 8cm の鋼製円板上に堆積した山の傾斜角を直読し、5回の測定結果の平均値を安息角とした。

圧縮度 C は、100cc の鋼製容器に 30~40 cc/min の流量でふわっと充填した時の“ゆるみ見掛け比重” ρ_a とタッピング装置で 5 分間タッピングした後の“固め見掛け比重” ρ_p を測定し、次式から算出した。

$$C = 100(\rho_p - \rho_a) / \rho_p \quad \dots\dots\dots(1)$$

またスパチュラ角は、粉体層の中に水平に位置させてある 2.1×1.30 (cm) のスパチュラを 8cm 上昇させ粉体層から取り出した時、スパチュラの上に堆積した粉体の傾斜角と、そのスパチュラを 0.5cm 振動を与え粉体を落下させた後の傾斜角の平均値とした。この角度も 5 回の測定結果の平均値であらわした。

さらに均一度は、粉体試料の 60% が通過する節目の一辺の長さを、試料の 10% が通過する一辺の長さで割った値であるが、本実験では粉体試料の粒度分布曲線を求め、その異積値が 60% と 10% を示す粒子径の数値を用いて均一度を求めた。

それぞれの粉体物性の測定値を求め、表 1 にもとずいて点数に換算し流動性指数を算出した。なお流動性指数は、構成する各因子をそれぞれ 25 点満点とし加成性を仮定して合計 100 点で表わされ、点数の大きいほど流動性

表1 流動性指数の算出表¹⁾

流動性指数 F W	安息角		圧縮度		スパチュラ角		均一度	
	Deg.	Points	%	Points	Deg.	Points	Units	Points
Excellent 90~100 pts	25	25	5	25	25	25	1	25
	26~29	24	6~9	23	26~30	24	2~4	23
	30	22.5	10	22.5	31	22.5	5	22.5
Good 80~89 pts	31	22	11	22	32	22	6	22
	32~34	21	12~14	21	33~37	21	7	21
	35	20	15	20	38	20	8	20
Fair 70~79 pts	36	19.5	16	19.5	39	19.5	9	19
	37~39	18	17~19	18	40~44	18	10~11	18
	40	17.5	20	17.5	45	17.5	12	17.5
Passble 60~69 pts	41	17	21	17	46	17	13	17
	42~44	16	22~24	16	47~59	16	15~16	16
	45	15	25	15	60	15	17	15

表2 粉粒体の流動性指数

粒 範 径 囲	略記 称号	粉 粒 体 名	安息角		圧縮度		スパチュラ角		均一度		流動性 指 数 FW
			Deg.	Points	%	Points	Deg.	Points	Unit	Points	
-42/+150 メ ッ シ ユ	N	炭 酸 ソ ー ダ	37.5	18	1.89	25	33.8	21	1.83	24	88
	S	豊 浦 標 準 砂	32.0	21	0	25	29.5	24	1.40	24	94
	P	重合塩化ビニール	36.4	19.5	6.30	23	31.1	22.5	1.40	24	89
	W	ホワイトアランダム	39.0	18	2.78	25	37.1	21	1.34	24	88
	G	ガ ラ ス 粉	34.3	21	4.18	25	31.0	22.5	1.36	24	92.5
	F	鉄 粉	38.5	18	8.28	23	49.6	16	1.34	24	81
	C	窯 業 砂	36.0	19.5	2.67	25	30.4	23.5	1.68	24	92
未 篩	N ₁	炭 酸 ソ ー ダ	39.6	18	3.27	25	40.3	18	1.97	24	85
	P ₁	重合塩化ビニール	40.2	17.5	11.3	22	39.5	19.5	5.61	22.5	80.5
	G ₁	ガ ラ ス 粉	41.3	17	10.5	22.5	38.2	20	6.5	22	81.5
	F ₁	鉄 粉	42.5	16	10.7	22.5	41.0	18	5.3	22.5	79.0
-14/+20	N ₂	炭 酸 ソ ー ダ	34.4	21	7.14	23	37.1	21	2.24	23	88
-20/+24	"	"	35.6	19.5	1.55	25	24.6	25	1.81	24	93.5
-35/+42	"	"	34.1	21	1.34	25	22.9	25	1.31	24	95
-42/+48	"	"	34.9	20	3.42	25	29.2	24	1.61	24	93
-48/+60	"	"	35.3	20	2.52	25	34.0	21	1.32	24	90
-60/+65	"	"	38.2	18	7.36	23	46.2	17	1.18	24	82
-65/+80	"	"	39.4	18	12.15	21	51.8	16	1.18	24	79
-80/+100	"	"	36.0	19.5	11.24	22	51.6	16	1.19	24	81.5
-35/+42	C ₂	窯 業 砂	35.9	19.5	0.88	25	28.2	24	1.18	24	92.5
-80/+100	"	"	33.7	21	5.56	23	28.3	24	1.78	24	92
-150	"	"	34.7	20	7.93	23	46.1	17	1.67	24	84

のよいことを示す。

2.2 単一粉体の流動性指数

Tyler 標準篩で -42/+150 メッシュおよび任意のせまい粒径範囲に篩分けした粉体と、市販品そのまま（未篩）の粉体試料について安息角、スパチュラ角、圧縮度および均一度を測定し表 1 にもとずいて流動性指数 FW を算出して、それらの結果を表 2 に示した。表 2 から、未篩および任意のせまい粒径範囲に篩分けした一部の粉体では、流動性指数 FW はいずれの粉体でも 80 点以上の数字を示し、Carr の表現によれば流動性の良好あるいはもっとも良好な粉体に属していることがわかった。一方、未篩粉体は -42/+150 メッシュに篩分けされた同じ粉体に比較して FW がやや小さい数字を示した。

2.3 粉体混合物の粉体物性と混合比率

二成分混合粉体試料には、表 2 に示した -42/+150 メッシュに篩分けした粉体を任意に組合せ水平円筒型混合機で十分混合して使用した。また粉体混合物の表示には、表 2 に示した略称記号（たとえば炭酸ソーダー・豊浦砂の混合粉体は N-S）を用いて代表させた。なお混合物の混合比率を、見掛容積分率で 6 種類かえて流動性指数を測定した。

まずいろいろな粉体系について、安息角におよぼす混合比率の関係を図 1 に示した。なお図の右側の縦軸に

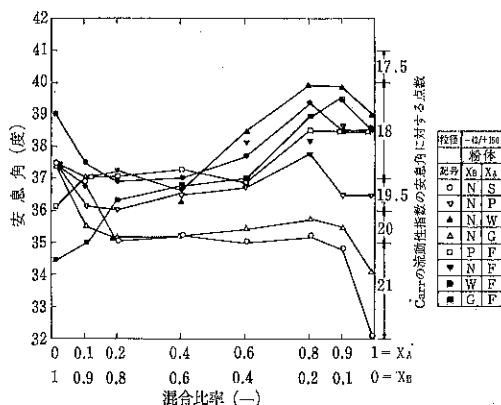


図 1 安息角と混合比率の関係

は、Carr の流動性指数の算出の基準となる安息角の点数もあわせて示した。図 1 より N-S（炭酸ソーダー・豊浦砂）および N-G（炭酸ソーダー・ガラス粉）系の混合物では、安息角は混合比率の影響をほとんど受けていないことがわかった。しかし他の粉体混合物では、混合比率がことなると安息角は変化した。つぎに N-W（炭酸ソーダー・ホワイト・アラシダム）系の安息角は、混合比率が異なると他の粉体系に比較してやや大きく影響を受けていることもわかった。また粉体混合物の安息角は、

混合比率が 0.2 から 0.8 の間ではかなり規則的に変化した。それぞれの単一粉体とそれらの粉体混合物との間には規則的な変化は見られなかった。さらにそれぞれの粉体混合物の安息角を Carr の点数に換算すると 21 から 18 点の範囲内で変化していることもわかった。

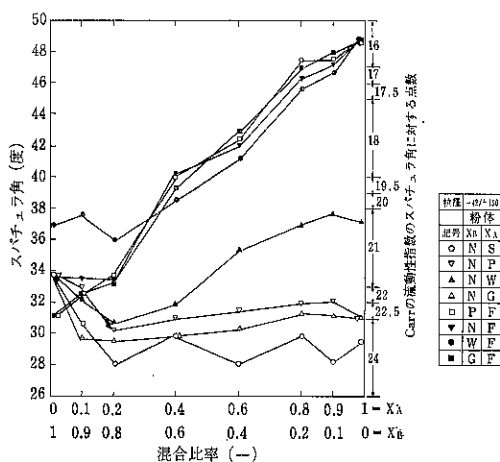


図 2 スパチュラ角と混合比率の関係

図 2 にはスパチュラ角におよぼす混合比率の結果を示した。図から N-S、N-P（炭酸ソーダー・塩化ビニール）および N-G 系の粉体混合物は、混合比率が 0.1 から 0.9 の間ではその影響をほとんど受けなかった。したがって流動性指数 FW に対する点数は 24 から 22 点でほとんど変化しなかった。しかし他の粉体混合物ではスパチュラ角は混合比率の変化と共に変化した。なかでも N-F（炭酸ソーダー・鉄粉）、P-F（塩化ビニール・鉄粉）および G-F（ガラス粉・鉄粉）系の混合物では、スパチュラ角は混合比率の変化に従って 31 から 50 度附近まではほぼ直線的に変化した。さらにそれぞれの混合物のスパ

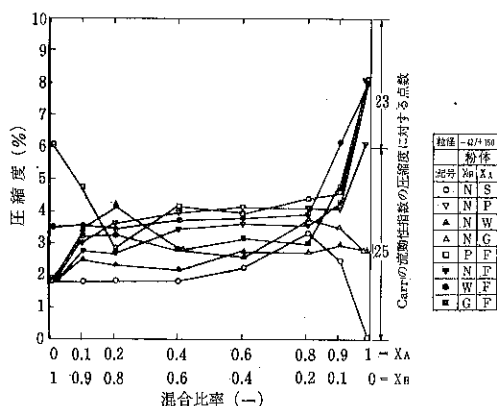


図 3 圧縮度と混合比率の関係

チュラ角の点数は、混合比率が変化するにしたがって24から16点の範囲内で大きく変化した。

つぎに圧縮度対混合比率の結果を図3に示した。図に見るようにデータがばらつき正確なことはいえないが、圧縮度は混合比率によってほとんど影響を受けないといってもよい。また一部の結果をのぞけば混合物の圧縮度の点数は25点であり、この範囲の圧縮度の変化では、Carrの流動性の評価には影響をあたえなかった。

さらに均一度と混合比率の結果は、本実験範囲では明らかな関係は得られなかった。

2. 4 粉体混合物の流動性指数

以上、得られた流動性指数を構成する4因子の測定結果から流動性指数を算出して、これにおよぼす混合比率の影響を図4に示した。図から粉体混合物の流動性指数は、これを構成する4つの因子と比較してすべての粉体混合物および混合比率の場合について非常に規則性よくまとまり、ほとんど直線の関係が得られた。さらにN-S、N-G、N-P、N-W、G-F、N-F、P-FおよびW-F系の順に小さい流動性指数の値と大きな混合比率による変化を示し

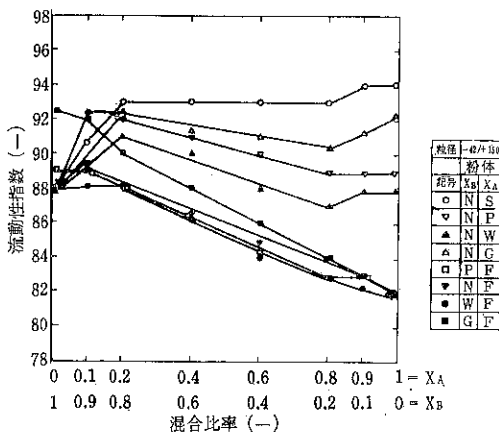
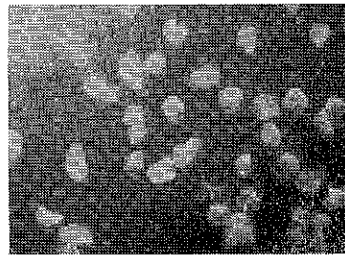


図4 流動性指数と混合比率の関係



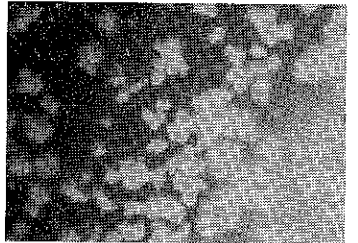
S (豊浦砂)



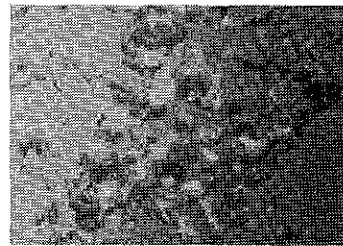
N (炭酸ソーダ)



W (ホワイト・アランダム)



P (塩化ビニル)



F (鉄粉)

図5 粉体の形状

表3 粉体の形状と流動性指数および圧縮度

粉	体	形	状	FW
小	S (豊浦砂)	やや丸味のおびた塊状		94
縮	N (炭酸ソーダ)	やや鋭がった塊状		88
度	W (ホワイト・アランダム)	鋭角状		88
の	G (ガラス粉)	鋭角状で不規則		92.5
順	P (塩化ビニル)	球状のあつまった形		89
序	大 F (鉄粉)	針状で偏平		81

た。これらの中でG-F、P-F、およびW-F系の混合物では、流動性指数FWは全範囲で混合比率はほぼ比例して変化した。しかし他の粉体系では純粋な両成分粉体とそれらの混合物の間には簡単な比例関係が成立しない場合が多いこともわかった。

この原因を解明する方法として粉体の形状の写真観察結果を図5に示した。またそれぞれの形状と流動性指数および圧縮度は表3のごとくである。

粉体の形状が塊状であらわされる豊浦砂と炭酸ソーダ

は、他の粉体に比べて圧縮度は小さく、それらの混合物であるN-S系の圧縮度も一部をのぞいて粉体混合物の中でもっとも小さい数値を示した。また針状で扁平な鉄粉は、もっとも大きな圧縮度を示したが混合物の圧縮度は他の粉体系とくらべて大差がなかった。

したがって粉体試料と混合物の流動性指数の間に加成性が成立しなかったのは、粉体試料の形状の考慮の仕方が不十分であるためと考えられる。

2.5 粉体混合物の流動性指数とそれを構成する4因子の関係

前節の結果から粉体混合物の安息角およびスパチュラ角の混合比率による変化は、他の粉体物性の変化に比較して大きいので、Carrの流動性の流動性指数にはこれらの因子が大きく影響することが予想された。

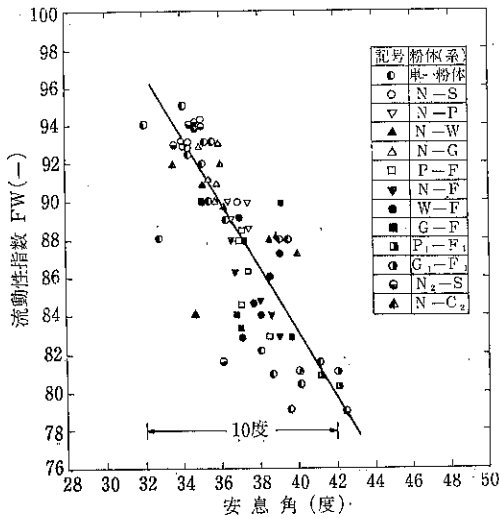


図6 流動性指数FWと安息角

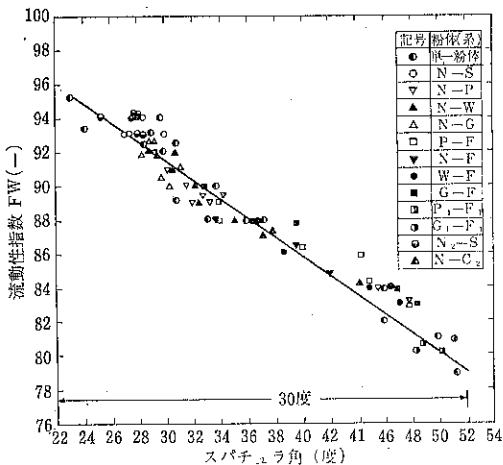


図7 流動性指数FWとスパチュラ角

そこで実測したすべての粉体および粉体混合物の流動性指数FWと安息角およびスパチュラ角の関係を、それぞれ図6および図7に示した。図6および図7よりデータにばらつきが見られるが、流動性指数は安息角およびスパチュラ角が小さいと大きい数字を示した。また安息角が32度から42度まで約10度増大すると流動性指数は95から78まで減少した。一方、スパチュラ角は22度から52度まで約30度変化する間に流動性指数が95から78に減少した。このことは従来より安息角で流動性の難易を表現しようとしていることとも一致した。

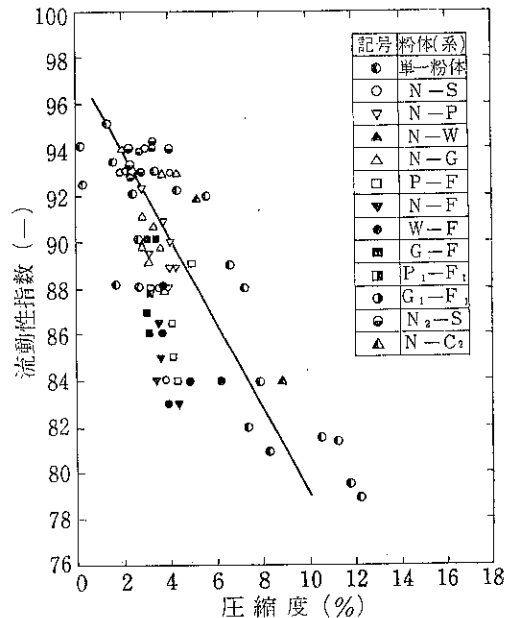


図8 流動性指数FWと圧縮度

さらに流動性指数と圧縮度の関係を図8に示した。図からデータにばらつきが見られ正確な結論は得られなかった。しいていえば流動性指数FWは、圧縮度が小さい場合大きい数字を持つ傾向を示した。

以上Carrの説にもとずいて製作されたパウダーテスターを用いて粉体および粉体混合物の物性を混合比率をいろいろ変えて測定し流動性指数を算出し、FWと混合比率あるいはFWと粉体物性の関係を調べた結果、つぎのような結論が得られた。

流動性指数FWは粉体混合物にも適用できる。すなわち流動性指数を構成する各物性と混合比率との関係よりも流動性指数と混合比率の関係の方が規則性があることがわかった。したがって、もし粉体の流動性の良否を判定する尺度としてCarrの流動性指数が粉体の単一物性たとえば安息角などよりも適当であるとするならば、粉体混合物においても同様な結論が得られるであろう。

3. 混合実験

3.1 実験装置および方法

実験装置には、回転型混合機の中でもっとも代表的な内容積 6,088cc のアクリル樹脂製の水平円筒型混合機を使用した。実験試料には 2.2 の表 2 に示した粉粒体を用いた。

実験は、まず粉体装入率を見掛容積で最適とされている範囲すなわち $F+V=30\%$ ⁸⁾ で一定に保ち、比重の大きい粉体を上にして半径方向に装入した。また回転速度は 50 r. p. m. の一定で行なった。

混合実験は一定の条件下で、所定の混合時間あるいは回転数だけ混合機を回転させた後、混合機内の 15 カ所からそれぞれ 0.25g 前後のサンプルを採取した。サンプル中の着目成分の分析方法は、サンプルを秤量し、炭酸ソーダを含む粉体系では塩酸溶液で滴定し、また鉄を含む粉体系については磁石で鉄を取りのぞき着目成分の濃度 C_i を分析した。つぎに全測定点のサンプル中の濃度 C_i から標準偏差 σ あるいは混合度 M を計算し、混合速度係数 ϕ および最終混合度 M_∞ を算出して、混合性能におよぼす流動性指数の影響を評価した。

3.1.1 混合性能の求め方

まず、混合機内より採取したサンプル中の着目成分の濃度 C_i は次式より求めた。

$$C_i = \frac{W_A/\rho_A}{W_A/\rho_A + W_B/\rho_B} \times 100 \quad \dots\dots(2)$$

つぎに混合機内の全体的な混合度を知るために、完全混合状態における濃度 C_0 に対する任意の混合時間後のサンプル中の標準偏差 σ は次式から求めた。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C_i - C_0)^2} \quad [n: \text{サンプル数 (15)}] \quad \dots\dots(3)$$

また混合度 M には次式を用いた

$$M = 1 - \sigma/\sigma_0 \quad \dots\dots(4)$$

ここで

$$\sigma_0 = \sqrt{C_0(100 - C_0)} \quad \dots\dots(5)$$

$$C_0 = \frac{W_A/\rho_A}{W_A/\rho_A + W_B/\rho_B} \quad \dots\dots(6)$$

混合実験の結果は、標準偏差 σ の対数対混合時間 θ で表示し、得られた混合曲線の初期においては、すべての粉体系について近似的に直線とみなすことができ次式が成立した⁹⁾。

$$\log \sigma = \log \sigma_0 - \phi \theta \quad \dots\dots(7)$$

実験結果の一例を図 9 に示した。つぎに混合曲線の近似的に直線とみなせる部分の勾配から(7)式中の ϕ すなわち混合速度係数を求めた。また混合度 $M (=1 - \sigma/\sigma_0)$ 対

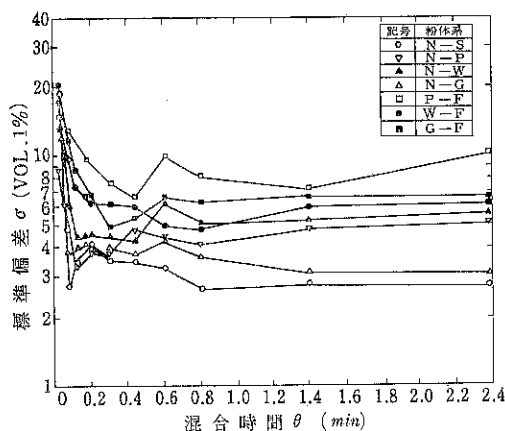


図9 標準偏差 σ と混合時間 θ の表示による混合曲線

総回転数 $N\theta$ の表示による混合曲線の後期では、混合度 M はある回転数以後ほとんど一定の値を示した。図10に実験結果の一例を示した。図に示すように、このほとんど一定になった M の値を算術平均して最終混合度 M_∞ を求めた。

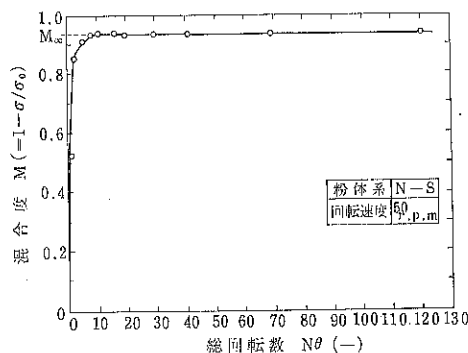


図10 混合度 M と総回転数 $N\theta$ の表示による混合曲線

3.2 結果および考察

3.2.1 混合速度係数 ϕ および最終混合度 M_∞ におよぼす流動性指数の影響

混合速度係数 ϕ に対する粉体混合物の流動性指数 FW の影響を図11に示した。図からデータに少しのばらつきが見られるが、混合速度係数 ϕ は粉体混合物の流動性指数 FW の増加と共に大きくなった。したがって粉体混合過程の初期を代表する混合速度係数 ϕ は、粉体系の流動性指数と関連があることがわかった。

さらに最終混合度 M_∞ と粉体混合物の流動性指数 FW の関係を図12に示した。図からデータはある程度ばらついているが、最終混合度 M_∞ も流動性指数が大きくなるほど大きくなるような結果を示した。

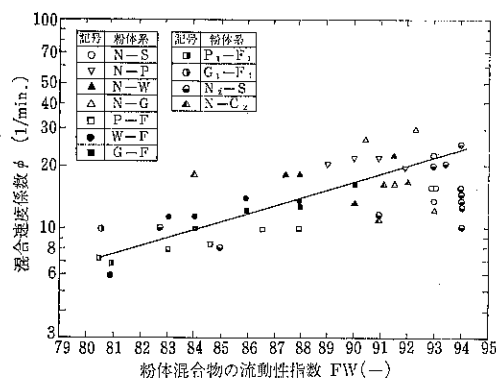


図11 混合速度係数 ϕ におよぼす流動性指数の影響

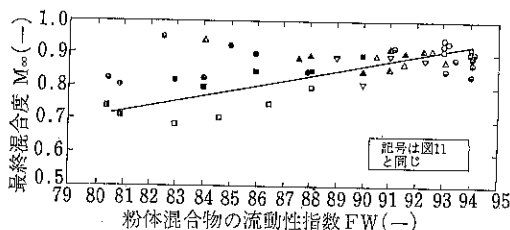


図12 最終混合度 M_{∞} におよぼす流動性指数の影響

4. 結 論

数種の粉体の流動性指数を実測すると共に、それらの組合せで作られる粉体混合物の流動性指数を測定し、粉体物性ならびに流動性指数の相互関係およびこれらにおよぼす混合比率の関係を調べた。

さらに水平円筒型混合機で二成分系の混合実験を行い、混合速度係数 ϕ および最終混合度 M_{∞} におよぼす流動性指数の影響について検討した。その結果、つぎの結論を得た。

1) 従来単一成分の粉体の流動性の指標として用いられてきた Carr の流動性は、粉体混合物にも適用しうることを見出した。

2) 粉体混合物の流動性指数は安息角、スパチュラ角および圧縮度が小さくなると大きくなる傾向を示した。また混合比率が変化すると G-F, P-F および W-F 系の混合物では、流動性指数は混合比率の変化にはほぼ比例して変化した。しかし純粋な両成分粉体とそれらの混合物との間には簡単な比例関係が成立しない場合が多いこともわかった。

3) 粉体混合物の混合比率を変化させると安息角およびスパチュラ角の変化が他の粉体物性に比較して大きいので、Carr の流動性指数に対するこれらの影響が大きくなり、従来から流動性の評価をこれらの物性で行なってい

たことは妥当であることがわかった。

4) 混合速度係数 ϕ は、粉体混合物の流動性指数 FW が大きくなると増大し、粉体の流動性が増大すれば混合速度が大きくなることがわかった。したがってここで用いた流動性指数は、粉体混合において粉体の混合速度を検討する場合、適当な物差しであると結論できた。また最終混合度 M_{∞} は、しいていえば粉体混合物の流動性指数が増大すれば大きな値を示し良好な混合状態を示す傾向が見られたが、しかし混合速度係数と流動性指数の関係ほど明白な結果はえられなかった。

〔付記〕 本研究には、細川粉体工学研究所の御協力を受けた。ここに記して謝意を表す。

使用記号

C_i : サンプル中の着目成分の濃度	(Vol. %)
C_0 : 完全混合時の着目成分の濃度	(Vol. %)
σ_0 : 混合前の標準偏差	(Vol. %)
σ : 標準偏差	(Vol. %)
M : 混合度	(—)
ϕ : 混合速度係数	(1/min)
M_{∞} : 最終混合度	(—)
$N\theta$: 総回転数	(—)
F^+/V : 粉体装入率 (見掛容積基準)	(%)
FW : 流動性指数	(—)
C : 圧縮度	(%)
ρ_a : ゆるみの見掛比重	(g/cm ³)
ρ_p : かための見掛比重	(g/cm ³)
W_A, W_B : サンプル中の A および B 成分の重量 (g)	
W_A, W_B : A および B 成分の粉体装入重量 (g)	
ρ_A, ρ_B : A および B 成分の真比重	(g/cm ³)

引用文献

- 1) R. L. Carr: *Chem. Engg.*, **72** Jan. 18, 163 (1965)
- 2) 三輪ら: 化工第 9 回総合シンポジウム講演前刷集 **22** (1970)
- 3) 久野・栗原: 応用物理 **34** 727 (1965)
- 4) 杉本益規: 化工第 9 回総合シンポジウム講演前刷集 **31** (1970)
- 5) 林ら: 薬学雑誌 **84** 229 (1964)
- 6) 中島ら: 薬学雑誌 **81** 712 (1962)
- 7) 横山・浦山: 粉体工学研究会誌 **6** 264 (1969)
- 8) 矢野・蟹瀬: 化学工学 **23** 9 (1959)
- 9) 矢野・佐納ら: 化学工学 **24** 219 (1960)

粉体の動的流動性指数の測定法 (続)

同志社大学工学部

三 輪 茂 雄

清 水 慎 一

1. は し が き

粉体の流動には、ガラスビーズのようにサラサラしたものから、タルクのようにボソボソとしたものまで、さまざまな形態がある。このようなサラサラからボソボソまでの流れやすさの度合つまり流動性は、粉体の種類によって異なることはもちろんであるが、同一の粉体について常に一定しているとは限らない。たとえばでんぷんではホッパーから流出する場合はボソボソと流れるが、フルイ分けのような粒子運動の激しい流動では、比較的サラサラと流れるというように、粉体の流動現象によって相違するものである。このような流動現象は、ホッパーからの流出、かくはん、フルイ分け、流動層等々千差万別であり、これらの現象を考慮に入れないままに、粉体の流動性を考えようとするれば、非常に難しいものとなり、また装置設計等にこの流動性を応用することが出来なくなる。

前報¹⁾では、上記の考え方に基づいて、種々の流動現象を粒子の運動速度によって整理することを試み、粒子の運動速度の大きいフルイ分け流動現象に基づいた流動性指数すなわちフルイ流動性指数の意味とその測定法について述べた。本報では、これを発展させて基本となる流動現象がフルイ流動性指数とは全く異なる Carr の流動性指数をとりあげ、種々の粉体について、両指数の測定を行ない、両者の関連性および Carr の流動性指数を構成している流動特性と流動性指数との関連性について検討を試みたので報告する。

2. 流 動 現 象

前報では、種々の流動現象を粒子の運動速度に基づいて整理したが、ここではさらに静的流動現象と動的流動現象に大別して考えることにする。

まず静的流動現象とは、簡単に言えば、粉体が静止状態から運動状態に移る際の現象であり、この現象における粉体の流動性は粉体層がまさに動き始めようとする限

界応力状態での粉体の性質に関係するものであり、粉体がすでに動いている場合とでは非常に異った流動性を示すものと考えられ、特に静的流動性と名づける。ホッパー内で見られるような静止している粉体が動き始めたり、あるいは動いている粉体が静止したりするような現象は静的流動現象と考えられる。

動的流動現象とは、粒子がつねに運動しているような現象のことであり、さきに述べたように静的な場合とでは、その流動性は全く異なると考えられる。さらに粒子の運動速度の大小によって種々の現象が考えられるが、その運動速度が大きくなれば、静的な場合とはさらに異なった現象となると考えられる。この動的流動現象での粉体の流動性を動的流動性と呼ぶ。実際の粉体プロセスでは、動的な場合が非常に多いわけであるが、両者は別々に起るのみならず、交互にまた同時に起ることが非常に多い。

・両指数の基本となる流動現象

フルイ流動性指数の基本となっている流動現象は、前報で述べたように粒子の運動速度が非常に大きく (Rotap シェーカーを使用した場合、フルイ網面に対する相対運動速度は、38cm/secあるいはそれ以上である。)、また粒子は静止することなく、つねに運動しており、典型的な動的流動現象と言うことができる。

Carr の流動性指数の基本となっている流動現象は、フルイ流動性指数の場合のように簡単に決定することは難しい。これは Carr の流動性指数が、種々の流動特性を総合的に評価したものであるからである。この流動特性とは、安息角、スパチュラ角、圧縮度、均一度あるいは凝集度である。これらの流動特性が総合的にどのような現象を表わそうとするものであるかを考えるために、各々の特性の意味について考えてみる。安息角は、一般に粉体の山の堆積方法によって、その測定値は異なり、その意味するものを一概に決定することは難しい。本報では、7 cm の高さからロートを通して円形ベース (80 mmφ) に堆積させる注入法をとっており、しかも山が

ほとんど形成されてからは、出来る限り静かに堆積させる方法をとったので、内部摩擦特性を十分に表現出来るものであると考えられる。スパチュラ角は、スパチュラ上に堆積した粉体の崩壊前後の一種の安息角の平均をとったものであるから、衝撃を与えた時の静的状態から動的状态への流動性（静的流動性）を示すものであると考えられる。この意味においてさきの安息角は衝撃を全く与えない時の静的流動性を示すものであると考えられる。圧縮度は、粉体の詰まりやすさを示すものであるが、粉体層がせん断を受けた時、この充填の度合によって大きくせん断力が異なることから、圧縮度によって密に充填された粉体層の限界応力状態からの流れやすさに対する充填度の影響を反映させていると考えられる。粗粒粉体に対して使われる均一度は、粒度分布の幅、粒子形状の均一性を示す特性である。また、微粉体に対して使われる凝集度は、凝集したままの粉体を、フルイ分けによって分散させた時のフルイ上に残った凝集塊の全試料に対する割合である。したがって凝集度は、粉体の凝

集の強さを示すものであり、微粉体が流動する場合の塊りとなって流れる傾向を示すものである。上記のことから安息角、スパチュラ角、圧縮度、均一度あるいは凝集度によって、Carrの流動性指数は、ホッパー出口のように粉体層がある程度密に充填された状態からの静的流動性を示すものであると考えられる。

3. 実験方法

フルイ流動性指数については、前報で詳しく述べたのでここでは省略する。Carr流動性指数の測定には、細川粉体工学研究所で開発されたパウダーテスターを使用しまた測定法については、現在まで種々の機会に報告されているので詳細は文献²⁻⁸⁾を参照していただきたい。

4. 実験結果および検討

フルイ流動性指数の測定結果を表1に、またCarrの流動性指数の測定結果を表2に示した。

表1 フルイ流動性指数測定結果

$$r = \frac{31.8}{\rho_P (D_{s1}/D_P)^2 D_{s1}^{0.7}}$$

試料粉体名	真密度 ρ_P [ton/m ³]	平均粒子径 D_P [mm]	(W=1[ton/hr]のときの) オリフィス径 D_{o1} [mm]	フルイ網目開き D_{s1} [mm]	D_{o1} D_{s1}	D_{s1} D_P	$D_{s1}^{0.7}$	フルイ 流動性指数 r
炭化ケイ素 (SiC) #20	3.20	1.000	28.5	1.900	15.0	1.90	1.57	1.76
#30	"	0.590	27.0	1.580	16.1	2.68	1.38	1.01
#46	"	0.350	26.5	0.940	28.2	2.69	0.958	1.44
#60	"	0.250	25.0	0.640	39.1	2.56	0.732	2.07
#70	"	0.210	26.5	0.650	48.2	2.62	0.658	2.20
#90	"	0.149	25.5	0.435	58.6	2.92	0.558	2.09
#100	"	0.125	24.8	0.350	70.3	2.80	0.480	2.65
ケイ砂 GG 58 下	2.50	0.200	29.5	0.460	64.2	2.30	0.581	4.14
5号	"	0.300	26.8	0.970	27.6	3.24	0.979	1.24
6号	"	0.150	26.1	0.530	49.3	3.53	0.642	1.59
7号	"	0.105	26.6	0.395	67.4	3.76	0.522	1.41
1190~1410 μ	"	1.300	29.5	2.23	13.2	1.71	1.75	2.49
1000~1190 μ	"	1.095	29.0	1.77	16.4	1.62	1.49	3.25
840~1000 μ	"	0.920	28.5	1.63	17.5	1.77	1.41	2.88
710~840 μ	"	0.775	28.0	1.44	19.5	1.86	1.29	2.85
590~710 μ	"	0.650	27.5	1.24	22.1	1.91	1.16	3.00
590 μ 下	"	0.502	28.5	0.980	29.1	1.95	0.986	3.99
ポリスチレンビーズ 1190~1410 μ	0.90	1.300	37.0	1.96	18.9	1.51	1.202	12.5
1000~1190 μ	"	1.095	38.0	1.80	21.1	1.75	1.031	10.9
840~1000 μ	"	0.920	35.0	1.54	22.7	1.68	1.350	9.10
ポリエチレンビーズ -710 μ	0.93	1.100	36.0	2.35	15.3	2.14	1.82	4.11
	"	0.550	32.0	0.990	32.3	1.80	1.073	9.83

試料粉体名	真密度 ρ_P [ton/m ³]	平均粒子径 D_P [mm]	(W=1[ton/hr]のときの)		$\frac{D_{0.1}}{D_{0.1}}$	$\frac{D_{0.1}}{D_P}$	$D_{0.7}$ $D_{0.1}$	フルイ 流動性指数 γ
			オリフィス径 $D_{0.1}$ [mm]	フルイ網目開き $D_{0.1}$ [mm]				
ガラスビーズ 201M	2.50	0.725	25.0	1.02	24.5	1.41	1.014	6.32
粒状尿素	1.34	0.120	24.3	1.65	14.7	1.38	1.42	8.76
粒状ブドウ糖	1.60	0.268	34.0	0.970	35.1	3.66	0.979	1.52
マイロ	1.56	0.693	39.0	2.20	17.7	3.18	1.74	1.16
トウモロコシ粉	1.59	0.187	41.2	1.16	35.5	6.20	1.09	0.477
大豆カス	1.38	0.299	43.5	1.26	34.5	4.22	1.18	1.10
アルファルファ	1.50	0.370	41.8	2.50	16.7	6.76	1.90	0.244
塩化ビニール粉	1.00	0.180	29.6	0.950	31.2	5.28	0.965	1.18
馬鈴薯でんぷん	1.40	0.030	45.0	0.265	170	8.35	0.395	0.790
石膏	2.90	0.0763	71.0	2.65	26.8	34.7	1.98	0.175
重質炭酸カルシウム	2.80	0.0913	34.0	3.10	11.0	34.0	2.21	0.00445
亜鉛華	5.60	0.134	47.0	1.20	39.2	8.96	1.136	0.0624
フェライト	6.11	0.0775	38.5	2.00	25.0	25.8	9.75	0.000803
タルク	2.75	0.143	50.0	5.10	7.55	35.7	12.2	0.000745

表2 Carrの流動性指数測定結果

試料粉体名	真密度 ρ_P [g/cm ³]	平均 粒子径 D_P [μ]	Carr の流動 性指数	Carr の噴流 性指数	フルイ 流動性 指 数 γ	流 動 特 性									
						安息角 [度]	崩壊角 [度]	差 角 [度]	平均 スパチ ュラ角 [度]	平均 密度 [g/cm ³]	平均 密度 [g/cm ³]	動的 密度 [g/cm ³]	圧縮度 [%]	凝集 度 [%]	均一度 [単位]
炭化ケイ素 (SiC) #16	3.20	1150	80	64	—	41	31	10	41.5	1.679	1.592	13.1	—	1.32	15
#20	"	1000	83	69	1.76	43	31	12	35	1.575	1.502	11.3	—	1.48	20
#30	"	590	84	60	1.01	40	32	8	34	1.659	1.566	14.5	—	1.53	16
#46	"	350	86	64	1.44	42	28	14	35	1.809	1.799	1.10	—	1.46	7
#60	"	250	87	60	2.07	41	31	10	36.5	1.791	1.766	2.76	—	1.49	8
#70	"	210	86	57	2.20	42	32	10	35.5	1.794	1.782	1.33	—	1.41	7.3
#90	"	149	87	67	2.09	38	27	11	34.8	1.718	1.663	7.2	—	1.41	11
#100	"	129	83	59	2.65	39	32	7	36	1.653	1.557	15.4	—	1.37	18
ケイ砂GG58下	2.50	200	78	50	4.14	41.5	36	5.5	55.6	1.550	1.480	9.26	—	4.18	5.3
1140~1410 μ	"	1300	82	80	2.49	42	28	14	40	1.398	1.340	9.9	—	1.09	42
710~ 840 μ	"	775	82	63	2.85	37	29	8	40	1.414	1.344	12.3	—	1.09	14
590 μ 下	"	500	80	70	3.39	41	27	14	39	1.414	1.332	15.4	—	1.80	11
5号	"	300	79	59	1.24	38	28	10	39	1.424	1.338	16.5	—	1.32	7
6号	"	150	80	64	1.59	34	24	15	40	1.434	1.348	16.4	—	1.62	5
7号	"	105	81	58	1.41	36	24	10	40	1.409	1.320	17.8	—	1.67	4
ポリスチレン ビーズ	0.90	1300	99	87.5	12.5	25.5	12.0	13.5	11.5	0.637	0.623	4.6	—	1.09	45
1190~1410 μ	"	1095	98	86	10.9	25.0	12.5	12.5	6.4	0.620	0.621	8.05	—	1.10	50
840~1000 μ	"	920	99	84.5	9.15	26.0	12.5	13.5	8.0	0.627	0.613	4.68	—	1.09	40

試料粉体名	真密度 ρ_p [g/cm ³]	平均 粒子径 D_p [μ]	Carr の流動 性指数	Carr の噴流 性指数	フルイ 流動性 指数 r	流動特性								均一度 [単位]	分散 度 [%]
						安息角 [度]	崩壊角 [度]	差角 [度]	平均 スパチ ュラ角 [度]	平均 高密度 [g/cm ³]	動的 高密度 [g/cm ³]	圧縮度 [%]	凝集 度 [%]		
ポリエチレン ビーズ	0.93	1100	99	79	14.11	18.5	13.0	5.5	7.75	0.644	0.675	2.45	—	1.78	>50
ガラスビーズ 201M	2.50	725	99	92	6.32	28.5	10.5	18.0	11.0	1.533	1.506	3.66	—	1.26	>50
705K (105~297 μ)	"	219	99	81	—	27.8	17.3	10.5	22.0	1.540	1.521	2.57	—	1.29	35
703K (53~210 μ)	"	120	88	73	—	31.0	23.8	7.2	43.6	1.450	1.41	6.04	—	1.44	36
733K (44~88 μ)	"	61	81	77	—	39.5	23.0	16.5	43.4	1.390	1.33	9.58	—	1.66	19
粒 状 尿 素	1.34	120	95	77	8.76	29	22	7	29.5	0.776	0.747	8.63	—	1.25	>50
塩化ビニール粉	1.00	180	81	67	1.18	39	27	12	37.5	0.567	0.530	18.4	—	1.53	17
トウモロコシ粉	1.59	187	39	41	0.477	48	40	8	92.5	0.624	0.620	42.5	—	2.96	4
マ イ ロ	1.56	693	59	62	1.16	52	40	12	61.0	0.728	0.676	29.1	—	7.5	11
大 豆 カ ス	1.38	299	72	63	1.10	49	39	10	56.0	0.748	0.711	12.3	—	3.72	14
アルファルファ	1.50	370	67	53	0.244	42	36	6	64.5	0.580	0.546	22.1	—	3.50	6
馬鈴薯でんぷん	1.40	30	60	85	0.790	40	16	24	75.5	0.784	0.731	20.1	0	—	22
ニッカリコ (シリ コンコーティ ングデンプン)	—	—	73	86	—	29	17	12	43.5	0.716	0.666	23.0	2	—	>50
重質炭酸 カルシウム	—	91.3	28	51	0.0045	48	31	17	53	0.940	0.940	50	93.5	—	16
閃電 フライアッシュ	2.27	—	46	74	—	47	32	15	61	0.928	0.867	34.0	12.5	—	63
W A 微 粉	—	—	52	71	—	52	33	19	59	1.506	1.400	29.9	23	—	23
石 膏	—	76.3	28	59	0.175	49	32	17	69	0.937	0.905	43.3	72.6	—	36
ケ イ 石 粉	2.5	91	59	71	0.044	49	30	19	67.5	1.433	1.332	30.2	—	2.11	18
塩化ビニール マーストレジン	1.00	—	39	39	—	30	28	2	62.5	0.371	0.354	40.8	59.0	—	5
消 石 灰 (上田石灰フル イ上堆積粉)	2.0	49	41	86	0.037	49	18.5	30.5	70	0.594	0.561	38.5	5.73	—	39
"	"	—	38	57	—	52	43	9	72.3	0.604	0.585	44.5	17.6	—	36
(1次サイクロン)	"	—	41	72	—	54	37	17	63.0	0.632	0.584	39.5	4.5	—	44
(2次サイクロン)	"	—	39	61	—	49	36	13	60	0.506	0.500	48.1	19.5	—	33
フ ェ ラ イ ト	6.11	77.5	55	54	0.00803	49	38	11	63.3	2.037	1.913	36.2	—	1.68	5
石 松 子	1.05	—	70	87	—	39	20	14	44	0.392	0.314	24.4	0	—	>50
亜 鉛 華	5.60	134	26	28	0.0624	55	46	9	63	0.662	0.639	43.7	63.5	—	1.7
陶 石 粉	—	60	56	76	—	51.5	37.0	14.5	58.5	1.041	0.981	37.8	—	1.58	40
タ ル ク	2.75	143	29	55	0.00745	48	34	14	65	0.841	0.841	50	56	—	23
小 豆	—	4900	93	90	—	34.5	17.5	17	25	0.822	0.798	6.36	—	1.15	>50

4. 1 フルイ流動性指数と Carr の流動性指数の関連性

両指数の関連性を考えるために、まず縦軸にフルイ流動性指数、横軸に Carr の流動性指数をとり、図1のよ

うに測定結果をプロットしてみた。

ポリスチレンビーズ、ケイ砂、炭化ケイ素等の粗粒粉体については、縦軸のフルイ流動性指数が大きく変化し

表 3 試料粉体記号表

記号	粉体名	記号	粉体名
○	炭化ケイ素 (SiC)	▲	重質炭酸カルシウム
●	ケイ砂	◎	石膏
●	ポリスチレンビーズ	×	関電フライアッシュ
●	ポリエチレンビーズ	+	W A 微粉
○	ガラスビーズ	◎	ケイ石粉
●	尿素	◎	塩化ビニルペーストレジン
◎	マイロ	▼	消石灰
◎	トウモロコシ粉	▽	フェライト
◎	大豆カス	◎	ニッカリコ (シリコンコーティングダンプ)
◎	アルファルファ	*	石松子
□	塩化ビニル粉	○	亜鉛華
■	馬鈴薯でんぷん	△	陶石粉
△	タルク	◇	小豆

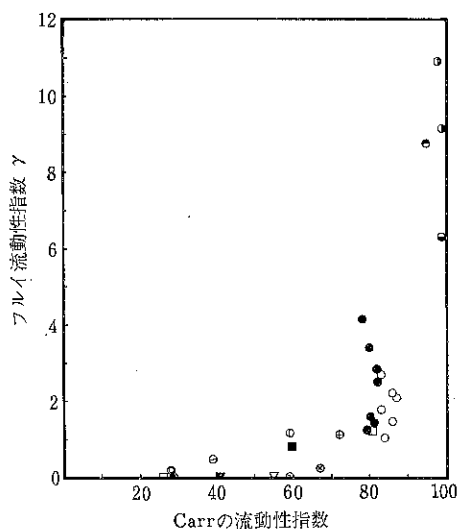


図 1 フルイ流動性指数と Carr の流動性指数の関係

ている。これに対してタルク、馬鈴薯でんぷん、重質炭酸カルシウム等の微粉体はその変化が小さい。これは実際のフルイ分けにおいては、微粉体の流出速度が粗粒粉体に比して非常に小さく、図 1 のように両者を比較する場合には、微粉体のフルイ流動性指数の変化が小さくなるからである。

この微粉体に対するフルイ流動性指数の変化をより詳しく調べるために、図 1 の縦軸を log-scale に書き換えてみた (図 2)。この図から粗粒粉体に対しては両者にはよい関連性のあることがわかる。このことは両指数の基本となっている流動現象では、粗粒粉体の流動性の傾向は、ほとんど同一であることを示している。しかし微粉体に対しては、図 1 に示したようにフルイ流動性指数の変化が Carr の流動性指数に比して小さいことから、微粉体の流動性は、これら 2 種の流動現象では異ったも

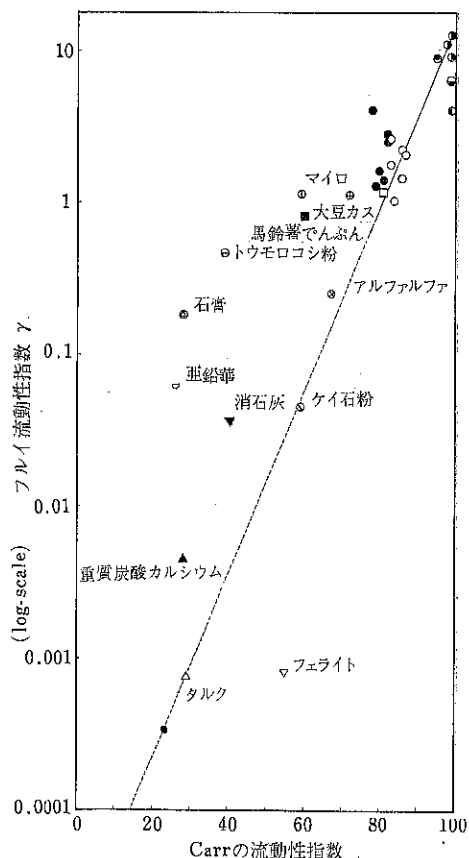


図 2 Carr の流動性指数とフルイ流動性指数の関係

のになると考えられる。両指数が同じ流動現象に基づいていてと仮定すれば、両者には粗粒粉体のようなほとんど直線的関連性が見出されるべきである。このことから粗粒粉体に対して適合した直線を延長して図 2 に示されているように破線を描いた。しかしながら実際には微粉体に対して、このような関連性は見られず、ほとんどこの破線よりも上にプロットされている。両流動現象が同一と仮定した時に成り立つこの破線よりも上にプロットされているということは、フルイ流動性指数が Carr の流動性指数よりも大きいということである。すなわち微粉体に対しては動的流動現象の方が静的流動現象よりも流動性が良好であるということの意味している。したがって微粉体の流動性は、その基本となっている流動現象によって著しく相違すると言うことができる。

4. 2 Carr の流動性指数と種々の流動特性との関連性 ・安息角との関連性

さきに述べたように一応一定した堆積方法によって測定を行なったが、ベース径が小さいため、その精度はかならずしもよいものではなかった。この測定結果と Carr

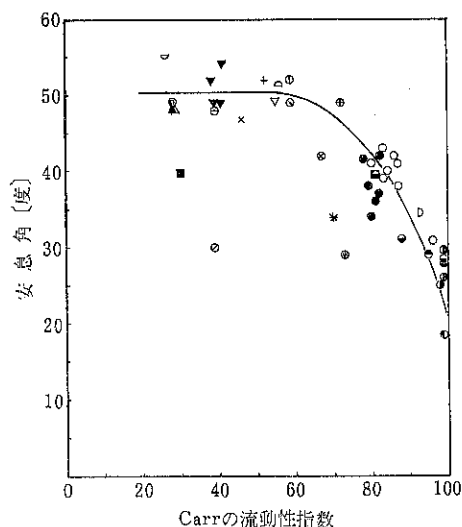


図3 Carrの流動性指数と安息角の関係

の流動性指数との関連性を図3に示した。この図から粗粒粉体については流動性を安息角によって大体判断することが出来るが、微粉体についてはかなり難しいことがわかる。すなわち安息角の流動現象では、微粉体の流動

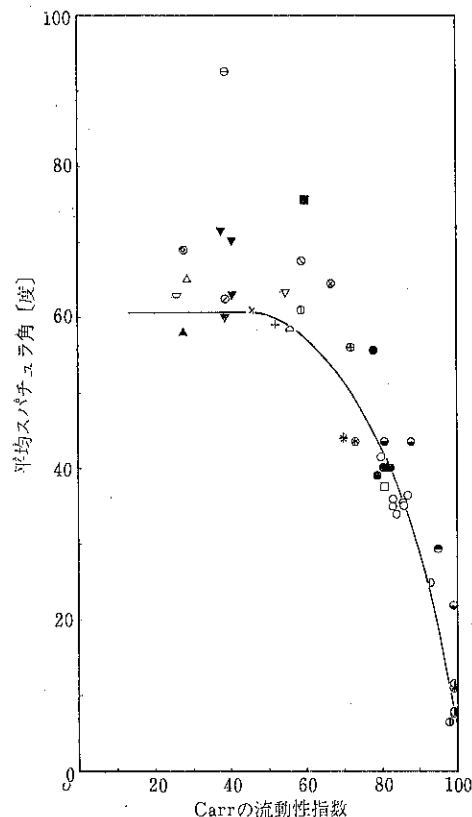


図4 Carrの流動性指数と平均スパチュラ角の関係

性はほとんど変わらないと考えられる。一般に安息角は再現性が悪く流動性の尺度としては適当ではないと考えられがちであったが、粗粒粉体については十分に利用出来ると考えられる。

・スパチュラ角との関連性

スパチュラ角と Carr の流動性指数との関係を図4に示した。傾向はほとんど安息角の場合と同様であるが、微粉体に対しては安息角よりもバラツキが大きい。これはスパチュラ角が、堆積させた粉体の山に一定の衝撃を与えて崩壊させ、その崩壊前後の平均値をとっていることから、精度が悪くなっているためであると考えられる。安息角と同様に粗粒粉体の流動性を考える場合には、十分にその尺度となり得る。

・均一度との関連性

均一度は粗粒粉体に対して適用されるものであり、この関係を図5に示した。この図から粉体の粒度分布の

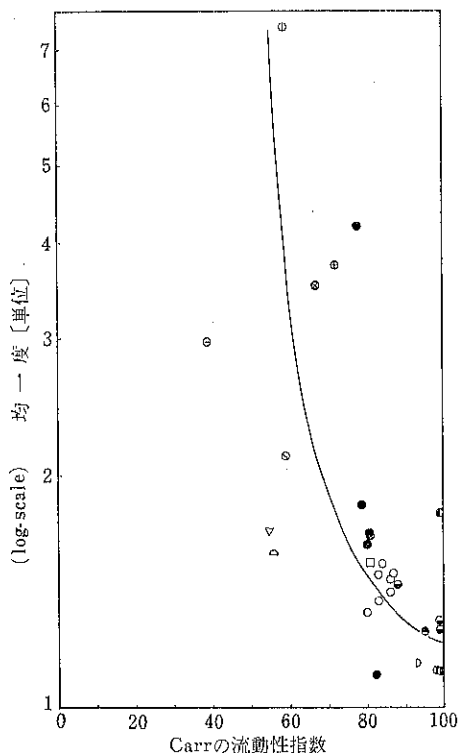


図5 Carrの流動性指数と均一度の関係

幅、粒子形状の均一性の流動性に対する影響は大体の傾向はあるが、バラツキが大きく、強い関連性は見出されない。すなわち均一度によって直接的に流動性を示すことはできず、ただ粉体の流動性の大体の傾向がわかるだけである。

・凝集度との関連性

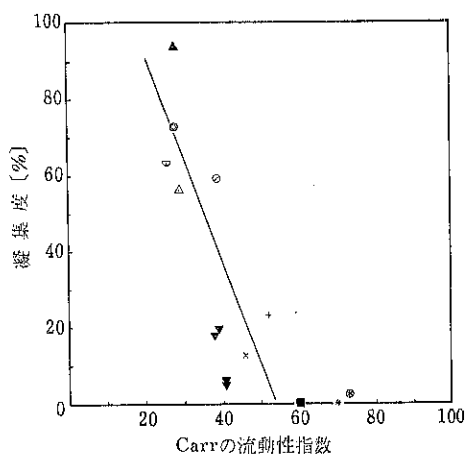


図6 凝集度と Carr の流動性指数の関係

この関係を図6に示したが、微粉体の流動性と比較的に強い関連性があり、凝集度によって十分に流動性を判断できると思われる。また重質炭酸カルシウム、石膏、亜鉛華、タルクの Carr の流動性指数は、ほとんど同じであるが、これらの粉体に対しても凝集度の相違が大きく現われており、Carr の流動性指数では表わせなかった非常に流動性の悪い微粉体の流動性の差をこの凝集度によって表わせると考えられる。

・圧縮度との関連性

この関係を図7に示したが、両者には直線的な非常に

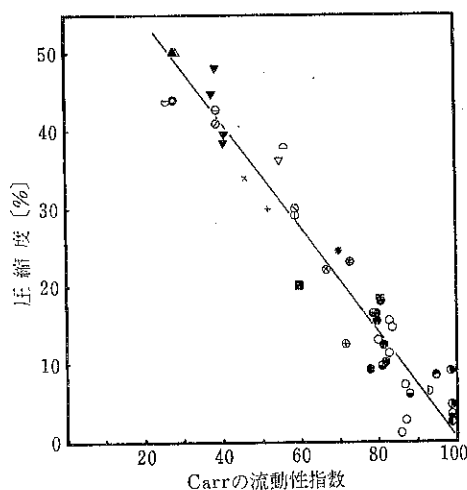


図7 圧縮度と Carr の流動性指数の関係

強い関連性のあることがわかる。微粉体に対しては、これまで調べたように安息角、スパチュラ角との関連性はほとんどなかったが、凝集度、圧縮度は両者に強い関連性があった。このことから、微粉体の静的流動性には、内部摩擦特性はあまり影響せず、凝集特性、充填特性が非

常に強い影響を及ぼすと考えられる。この充填特性は、図7の様に圧縮度が粗粒粉体、微粉体の全体に対して非常によく流動性を表わしており、静的流動性には最も重要な特性であると考えられる。

4.3 フルイ流動性指数と種々の流動特性との関連性

流動特性として安息角、スパチュラ角、崩壊角、圧縮度、凝集度、均一度を選び、フルイ流動性指数との関係を図8～13に示した。

まず安息角、スパチュラ角、崩壊角の摩擦特性との関係について考えてみると、崩壊角、スパチュラ角には、その測定の再現性が悪いためかなりバラツキがあり、この関連性は見出されない。安息角は図8からわかるよう

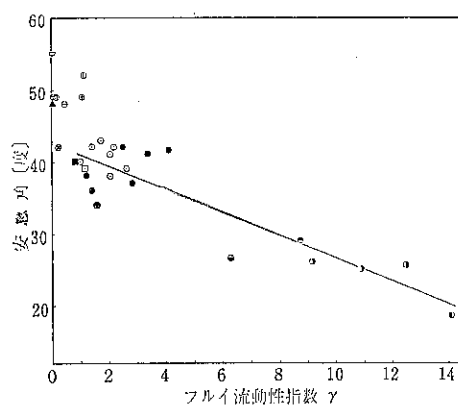


図8 安息角とフルイ流動性指数との関係

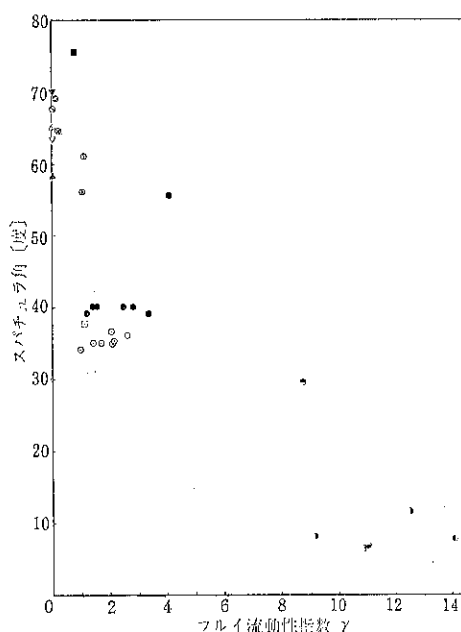


図9 スパチュラ角とフルイ流動性指数の関係

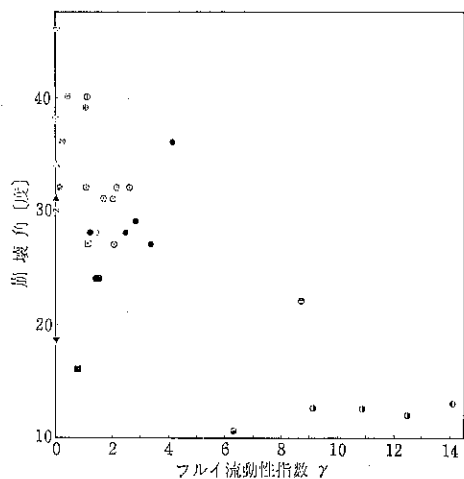


図10 崩壊角とフルイ流動性指数の関係

に粗粒粉体については、かなりよい関連性があり、粗粒粉体のフルイ流動性を安息角によって十分判断出来る。しかし微粉体にはさきの Carr の流動性指数との関係と同様に関連性はなく、フルイ流動性の尺度には適していない。圧縮度との関係(図11)を見るとよい関連性がある。

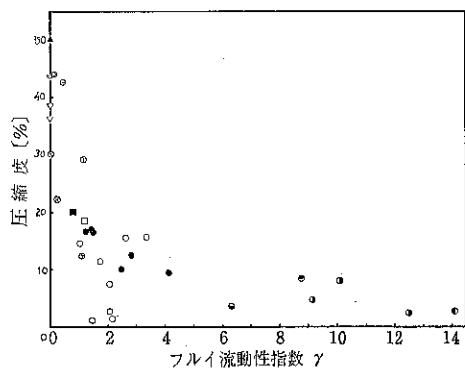


図11 圧縮度とフルイ流動性指数の関係

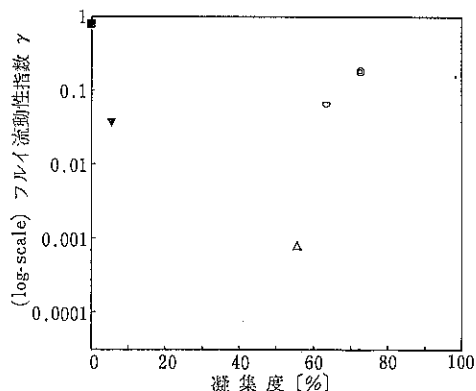


図12 凝集度とフルイ流動性指数の関係

り、図1の Carr の流動性指数とフルイ流動性指数の関係に非常に類似している。凝集度との関係では、微粉体に対するデータ数が少ないためこれを考えることは難しいが両者にはあまり関連性はないようである。均一度との関係(図13)を見ると、ほとんどの粉体は均一度1～

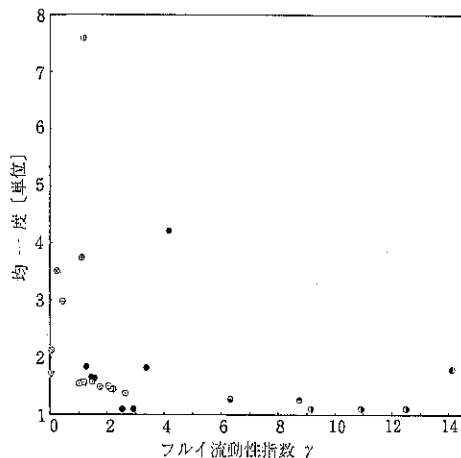


図13 均一度とフルイ流動性指数との関係

2に属しており、またこれに対してフルイ流動性指数が大きく変化している。したがってフルイ流動性は均一度1～2程度の変化では全く影響を及ぼされず、この流動性の尺度には、全く適していないと考えられる。上記のことからフルイ流動性に直接影響を及ぼす流動特性には、摩擦特性、充填特性が最も重要であると考えられる。

4. 4 噴流性指数と種々の流動特性との関連性

粉体のフラッシング現象に対する種々の流動特性の関係を調べてみる。特性値として Carr の流動性指数、崩壊角、差角、分散度、安息角、凝集度を選び、噴流性指数との関係を図14～19に示した。これらの図を見ると、

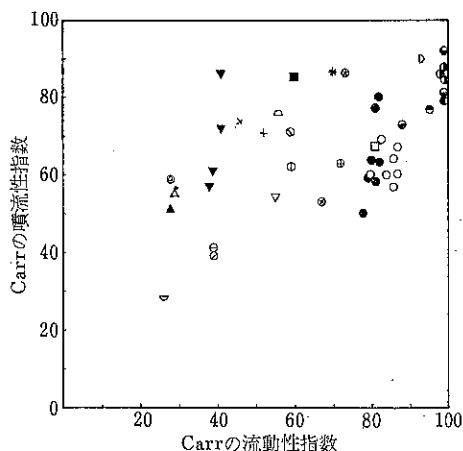


図14 Carr の流動性指数と噴流性指数の関係

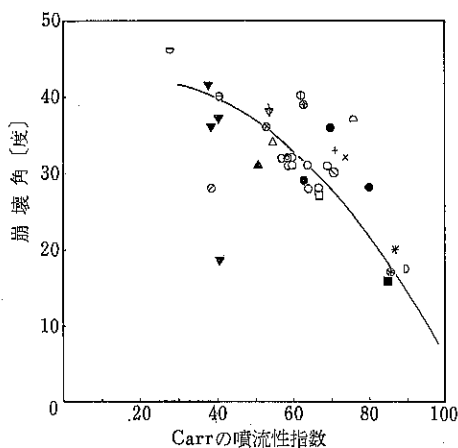


図15 Carrの噴流性指数と崩壊角の関係

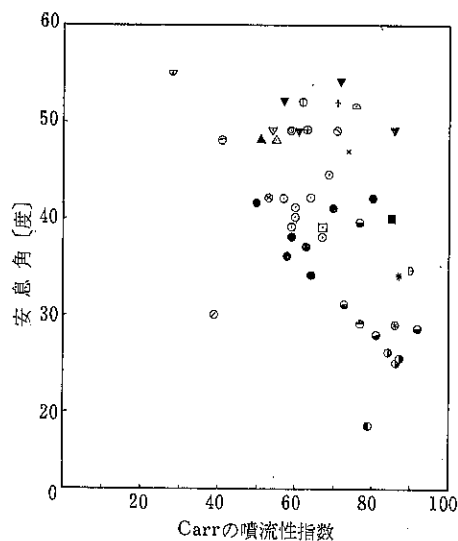


図18 Carrの噴流性指数と安息角の関係

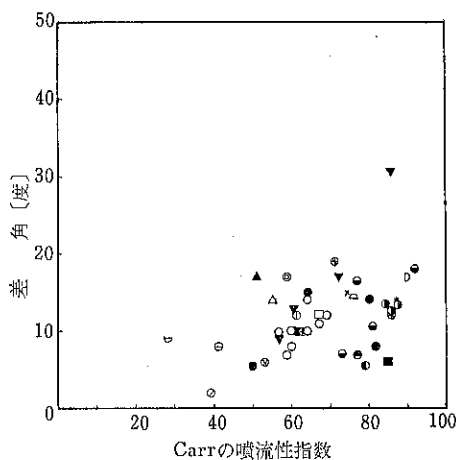


図16 Carrの噴流性指数と差角の関係

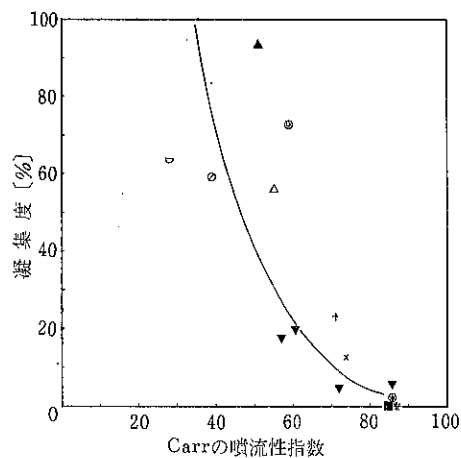


図19 Carrの噴流性指数と凝集度の関係

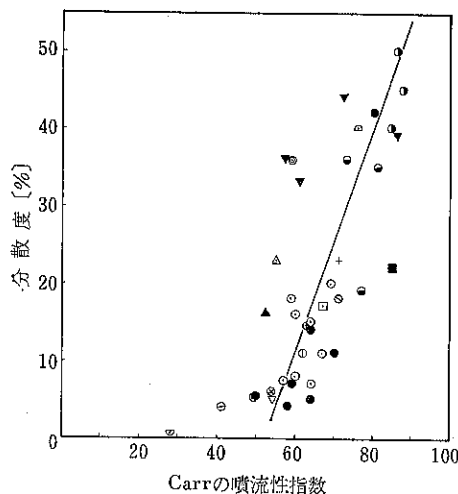


図17 Carrの噴流性指数と分散度の関係

どれもバラツキが大きく大体の傾向を示しているにすぎない。この噴流性指数が粉体のフラッシング現象に対する傾向を正しく示しているならば、噴流性と直接的に関係する流動特性は、これらの図のうち分散度と噴流性指数との関係には、比較的關係性が見出されることから分散度がもっとも適していると考えられる。

5. 結 言

前報では、フルイ流動性指数（動的流動性指数）の意味とその測定法について述べたが、本報では、動的流動性とは全く異った静的流動性（Carrの流動性指数）を考え、両者の関係について調べてみた。その結果動的および静的流動性の相違は微粉体に対して顕著に現われる

（116頁へ続く）

スクリーコンベアの輸送量について

信州大学繊維学部

佐 納 良 樹

1. 緒 言

スクリーコンベアの輸送量および輸送動力については主として機械工学分野で調べられているようであるが、それらに関する研究はあまり多くなく、真島の総説¹⁾、Vierlingらのスクリーによる垂直輸送に関する研究²⁾およびOwenの動力計算³⁾などが主なものである。

真島によれば、水平に置かれた標準型スクリーコンベアの輸送量(重量基準)は次式で与えられる。

$$Q = 60 \phi \frac{\pi}{4} D^2 a N r \quad (\text{kg/hr}) \quad (1)$$

(1)式は1ピッチ内の空間に存在する粉体重量にもとづいて輸送量を算出するものであり、粉体とスクリー面間の摩擦、すべりなどの因子は考慮されていない。

本報では、(1)式に対する疑問から出発してスクリーコンベアの輸送特性をあきらかにするために、いろいろな条件でコンベア内での粉体輸送状況を観察するとともに、粉体ホールドアップの大きい場合については、スクリー押し出しと類似の機構が成り立つと仮定して計算値と実測値の比較をおこなった。

2. 実験装置

輸送実験にもちいた装置の概略ならびにスクリーの寸法をそれぞれFig.1およびTable1に示した。

コンベア本体(スクリー外筒)は透明のメタアクリル樹脂製円筒である。コンベアへの粉体の連続供給には精度が比較的良好で供給速度の調節の容易な電磁フィーダーを使用した。

スクリーは軟鋼製でピッチ比が0.5~3.0の範囲のもの6種類をもちいた。

供試粉体は豊浦標準珪砂(147~297 μ)および粒状食塩(104~208 μ)である。

なお、コンベア内に保留されている粉体量(粉体ホールドアップ)を表わすために粉体ホールドアップ比 ϕ を次のように定義した。

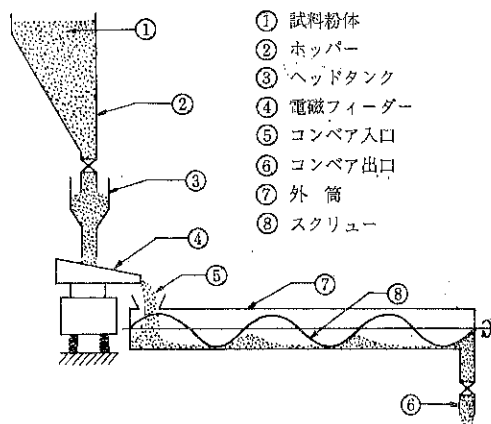


Fig.1 実験装置

Table 1 スクリーおよび外筒の寸法

スクリー番号		1	2	3	4	5	6
寸 法							
スクリー	有効長さ (cm)	58	58	58	58	58	58
	直 径 (cm)	5	5	5	5	5	5
	ピ ッ チ (cm)	2.2	3.4	5.0	7.4	10	15
	ピ ッ チ 比 (—)	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0
	シャフト直径 (cm)	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8
	クリアランス (cm)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
外 筒	内 径 (cm)	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2

$$\phi = \frac{(\text{コンベア内粉体重量, kg}) - (\text{死空間の粉体重量, kg})}{\left\{ \left(\frac{\text{粉体見掛け密度, kg/cm}^3}{\text{コンベア外筒の}} \right) \times (\text{正味容積, cm}^3) - (\text{死空間の容積, cm}^3) + (\text{スクリュウの体積, cm}^3) \right\}} \quad (2)$$

3. 実験結果

3.1 粉体粒子群の運動

コンベア内での粉体の運動を透明なコンベア外筒越しに観察した結果、コンベア内容物の運動は粉体ホールドアップの大小により3つの類型に大別できた。

まず、スクリュウの回転が比較的低速で、かつ粉体ホールドアップ比が小さい範囲 ($\phi < 0.3$) では、粉体は次のようにしてコンベア出口方向へ運ばれた。すなわち、粉体群は各ピッチに小分けされ (Fig. 1), かつそれぞれの粉体面はスクリュウ軸方向ならびにそれに直角な方向へ安息角に近い角度で傾斜した。

つぎに、ホールドアップ比 ϕ が中程度では粒子の動きは、より顕著になるのが見られた。スクリュウの回転につれて粒子の一部はスクリュウと共廻りし、シャフトを越えて流下した。したがってその粉体塊はもとの位置に止まることになる。これを仮りに“シャフト洩れ”と名付けておく。このようにして粉体はシャフトからの流下をともしつつスクリュウ軸に沿って出口の方へ押し出されていった。

さらに ϕ が増大してほぼ1に近づく、すなわちスクリュウ外筒内がほとんど粉体で満たされた状態では粒子個々の運動は僅少となり、大部分の粒子はスクリュウ回転よりやや遅い速度で回転した。したがって粉体塊は軸の周りをラセン状に回転しつつ軸方向へ移動するという状況が観察された。

3.2 Qと ϕ の関係

輸送量Qとホールドアップ比 ϕ との関係を両対数点描した結果の一例をFig. 2およびFig. 3に示した。logQ対log ϕ の関係は ϕ の増加とともに2本または3本の折れ線から成り立つと見させた。すなわちピッチ比が比較的小さいときは3本の折れ線で表わされるようであり、ピッチ比の大きいときは2本になるようである。これらのことは他の回転速度およびピッチ比でも見られた。いずれにせよ、Q対 ϕ の関係の勾配は約1であり、Qは ϕ に比例するといえる。

3.3 QとNの関係

粉体輸送量Qにおよぼすスクリュウ回転速度Nの影響をしらべた実験結果の一部を Fig. 4 および Fig. 5 に例示した。logQとlogNの関係は、すべて勾配が約1の直線で表わされた。このことは粉体ホールドアップ比、ピッチ比および粉体の種類が違う場合にも成り立った。

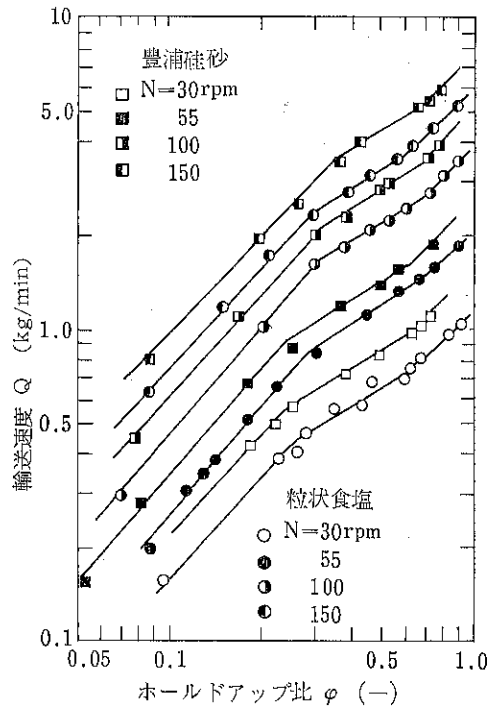


Fig. 2 Q対 ϕ ($a/D=0.5$)

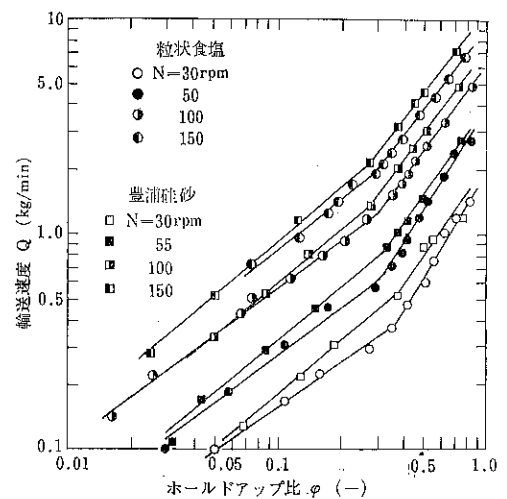


Fig. 3 Q対 ϕ ($a/D=3.0$)

3.4 Qと a/D の関係

輸送速度Qとピッチ比 a/D の関係を回転速度32, 64, 95, 127および159rpmについて両対数点描したもののうち、32rpmの結果をFig. 6に示した。これらの点描から、次のようにいえる。

- (i) Qの値を最大にするピッチ比が存在する。
- (ii) $a/D < 1 \sim 1.5$ の範囲では ϕ の値にかかわらずQは a/D の増加とともに増大する。その際、 ϕ が大き

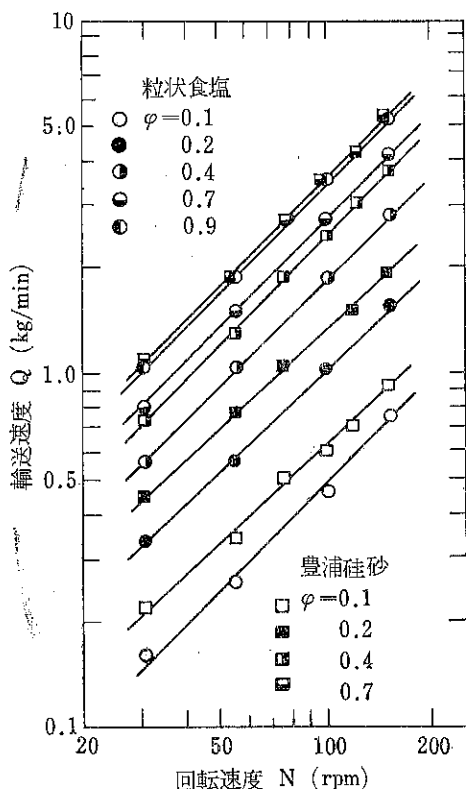


Fig. 4 QとNの関係 ($a/D=0.5$)

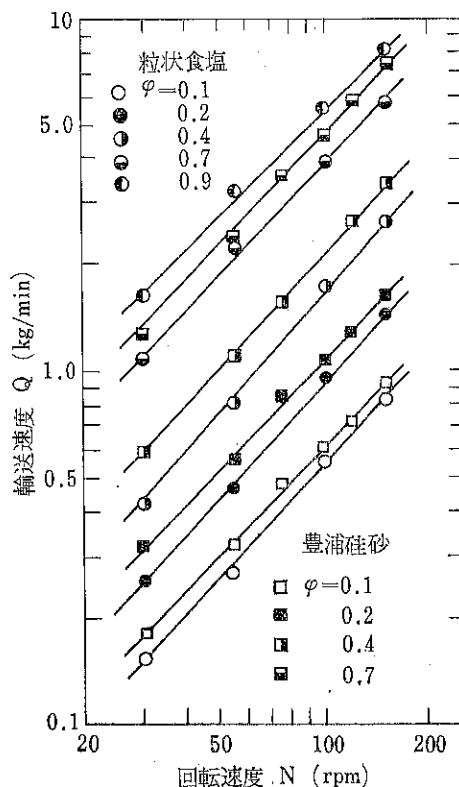


Fig. 5 QとNの関係 ($a/D=3.0$)

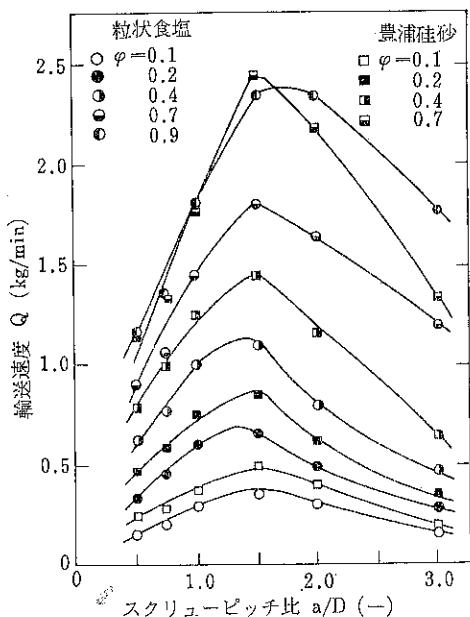


Fig. 6 Qと a/D の関係 ($N=32\text{rpm}$)

いときの方が、ピッチ比の影響も大きい。

4. 考 察

スクリーコンベア内での粉粒体の運動の様子は§3.1での観察でもわかるように極めて複雑である。

従来、植松⁴⁾がねじコンベア内での粒体1個の運動について考察し、また著者⁵⁾がねじコンベアで鋸屑を輸送した際の運動を観察した結果があるが、粉体群の運動の解析は理論および実験ともに十分とはいえない。ここでは粉体群としての巨視的な動きと輸送特性の関連について考察をすすめることにする。

4.1 粉体ホールドアップ

Fig. 2およびFig. 3に見られるように、ある特定の ϕ の値において屈折点ができるということはその値を境にしてコンベアの輸送状況が異なると考えてよいであろう。

事実、§3.1の観察でも $\phi < 0.3$ の範囲では“シャフト洩れ”を起さないが、 $\phi \geq 0.3$ 程度になると“シャフト洩れ”が起り始めていることから、Fig. 2にける屈折点は“シャフト洩れ”の開始に対応しているとみてよいであろう。

4.2 スクリューピッチ比

ピッチ比が0または無限大では理論上、輸送速度は0になる。したがってピッチ比が0と ∞ の間に、輸送速度

を最大にするピッチ比が存在するはずであり本研究においても Fig. 6 で確かめられている。ここでは、コンベア内での粉体の動きが最も単純と考えられる、 ϕ が 1 に近い場合に限って輸送速度とピッチ比の関係を考察することにする。

§3.1 で述べたように ϕ が 1 に近づくと粉体の輸送状況は見掛上、エクストルーダーの押し出しに類似して来る。そこで、エクストルーダーの押し出しの解析を参考にしつつコンベアの輸送速度の算出を試みる。

Darnell & Mol⁶⁾ によれば、エクストルーダーによる輸送量 Q (容積基準) は次式で与えられる。

$$Q_v/N = \frac{\pi^2 D h (D-h) \tan \theta \cdot \tan \psi_B}{\tan \theta + \tan \psi_B} \quad (3)$$

ここに θ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \cos \theta = & K \cdot \sin \theta + C (K \sin \psi_s + C \cos \psi_s) \\ & + \frac{2h}{a} (KC \cdot \tan \psi_s + E^2) \\ & + \frac{hE}{L \mu_B} \cdot \sin \psi_a (E \cos \psi_a + K \sin \psi_a) \ln \frac{P_2}{P_1} \end{aligned} \quad (4)$$

ここに

$$K = E (\tan \psi_a + \mu_s) / (1 - \mu_s \cdot \tan \psi_a) \quad (5)$$

(4) 式において右辺第 2 項以下を M とおけば

$$\cos \theta = K \sin \theta + M \quad (6)$$

すなわち粉体がスクリー面と完全に同一な動きをするときは $\cos \theta = 1$, $\sin \theta = 0$ であるからしたがって $M = 1$ 。つまり M の最大値は 1 である。

(3)~(6) 式をスクリーコンベアに適用するため次の仮定をおく。

- i) スクリューの入口および出口の間に圧力差はない (したがって (4) 式右辺第 4 項を省略しうる)
- ii) スクリューの厚味は他の寸法に比べて小さいので (4) 式右辺第 3 項を無視する。

以上によりスクリーコンベアの輸送式 (重量基準) として次式をうる。

$$Q = \left\{ \frac{\pi^2 D h (D-h) \tan \theta \tan \psi_B}{\tan \theta + \tan \psi_B} \cdot N \cdot \phi \cdot r \right\} \quad (7)$$

$$\cos \theta = K \sin \theta + C (K \sin \psi_s + C \cos \psi_s)$$

ただし、 ϕ は 1 にかなり近いものとし、 K は (5) 式で与えられる。

(計算 1) μ_s として安息角の正接をもちいた場合

(7) 式および安息角をもちいて輸送速度 Q を算出した結果を Fig. 7 に示した。 $Q_{\max}$ を与える a/D の値は計算値の方が実測よりかなり小さいばかりでなく、 Q の値自身、計算と実測が合うのは $a/D < 0.7$ に限られ、さらに当然のことながら ϕ が大きい場合に限られる。

(計算 2) μ_s として動摩擦係数をもちいた場合

(計算 1) では粉体の摩擦性質を安息角で代表せしめ

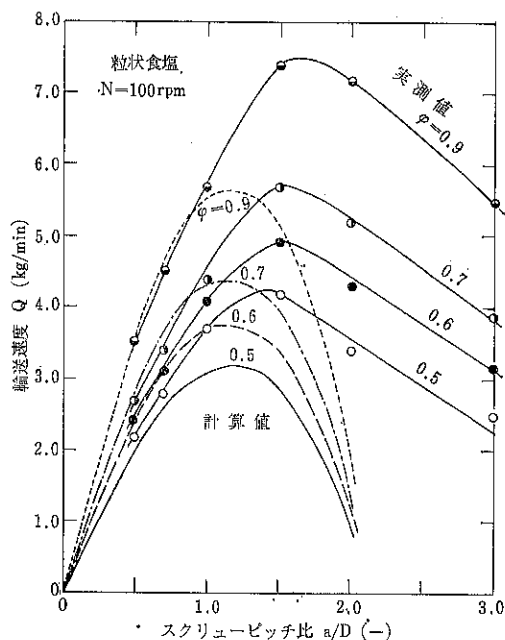


Fig. 7 (計算方法 1) による計算結果と実測値の比較

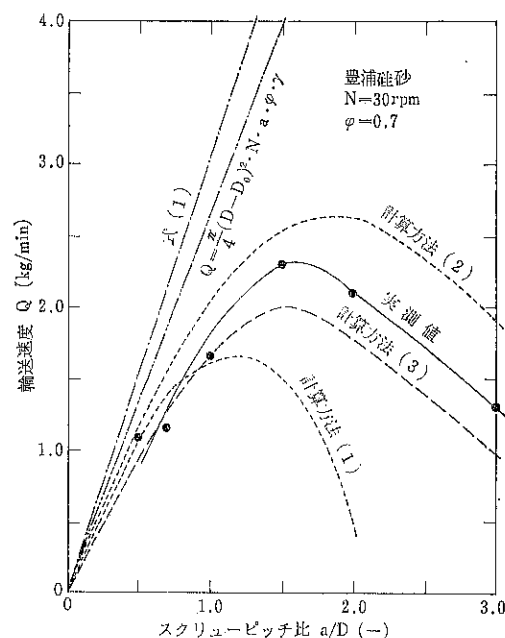


Fig. 8 輸送速度計算法の比較

て輸送量の算出をおこなった。しかし、コンベア内での粒子間ならびに粒子—スクリー面間の摩擦挙動は、すべて粒子が運動している状態下のものである。したがって μ_s としては安息角にもとづく値よりも、動摩擦係数の方がより適当と考えられる。二重円筒法によって実測

された動摩擦係数⁷⁾をもちいておこなった計算結果をFig.8に示す。Qの値はa/Dの全域にわたり実測値より大きくなっているが、(計算1)よりは、かなり実測値に近い値を与える。

(計算3) 計算(2)において、スクリューによる粉体のtrailを考慮した場合

本研究でもちいたスクリューの厚みは薄いけどもスクリュー外周と外筒内面の間の粉体がスクリューの回転によって引きずられる量は無視できない。したがってその効果を考慮に入れ(4式右辺第3項を入れる)てQの計算をおこなった。その結果をFig.8に示した。なおFig.8には(1)式ならびに(1)式においてシャフト軸の太さを考慮に入れた修正式

$$Q = \frac{\pi}{4} (D - D_0)^2 a \cdot N \cdot \phi \cdot \gamma \quad (\text{kg/min}) \quad (8)$$

D_0 : スクリューのシャフト径

も付記した。図に見るごとく(計算3)によればa/D < 1.0では実測値と極めてよい一致を示したが、a/D > 1.5では実測値とのへだたりはかなり大きくなった。しかし(計算3)以外のどの計算値よりも、もっともよく実測値と合うといえる。

5. 結 論

スクリューコンベアの輸送状況を観察し、特に粉体ホールドアップ比の大きい場合については、エクストルーダーの粉体押し出し理論の適用を試みた。その結果、同一のスクリューであっても粉体ホールドアップの大小により大別して3つの種類の輸送機構があるといえる。さらにφの大きい場合については、その輸送量を厳密に求めることは難しいが、a/D > 1の範囲を含めて考えると、(計算法3)がもっとも実測に近い値を与える。

使用記号

a : スクリューのピッチ [cm]
C : (D - 2h)/D [-]

D : スクリュー直径 [cm]
E : (D - h)/D [-]
h : スクリュー巾 [cm]
K : (5)式によって定義される量 [-]
L : スクリューの長さ [cm]
N : スクリュー回転速度 [rpm]
P₁, P₂: スクリュー入口および出口での粉体圧 [kg/cm²]
Q : スクリュー輸送速度(重量基準) [kg/hr], [kg/min]
Q_v : スクリュー輸送速度(容積基準) [cm³/min]
γ : 粉体の見掛け密度 [kg/cm³]
θ : 粒子の移動角 [°]
μ_B : コンベア外筒壁と粉体間の摩擦係数 [-]
μ_S : スクリュー面と粉体間の摩擦係数 [-]
φ : (2)式で定義される粉体ホールドアップ比 [-]
φ_a : スクリューのねじれ角 [°]
φ_B : スクリュー外周での平均ねじれ角 [°]
φ_S : スクリュー軸面でのスクリューの平均ねじれ角 [°]

引用文献

- 1) 真島卯太郎: 続新化学工学講座, 18. “コンベア”, 日刊工業新聞社(1960).
- 2) A. Vierling & Y.L. Sinha: *Förd und Heben*, 8, 587 (1960).
- 3) J.H. Owen: *Engg.* 142, 291 (1936).
- 4) 植松時雄: 化学機械技術, 第5集, p.187 (1953).
- 5) 佐納良樹, 中野敏, 矢野武夫: 本誌, No.6, 8 (1961).
- 6) W.H. Darnell & E. A. J. Mol: *SPE Journal*, 12, Apr., 20 (1956).
- 7) 新井親夫, 早川誠, 佐納良樹: 化学工学協会第1回秋季大会前刷集, p. 141 (1967).

(111頁よりの続き)

ことがわかった。また、Carrの流動性指数とそれを構成している流動特性との関連性の考察から、Carrの流動性指数は、実際には圧縮度によって粗粒、微粉体を問わず完全に表現されるものであり、この指数を構成している他の特性つまり摩擦特性、凝集特性は充填特性ほど重要なものでないことがわかった。この圧縮度はすでに現場においては、非常に実用的な流動性測定法として知られているが、このことは上記のことから十分に説明さ

れうる。

参考文献

- 1) 三輪, 竹内: “粉砕” No. 15, 8~11 (1970)
- 2) 横山, 浦山: 粉体工学研究会誌, 6, 264~272 (1969)
- 3) Carr, R. L.: *Chem. Eng.*, Jan., 18 (1965)

低融点物質の粉碎機

ビクトリーミルの開発とその性能

細川粉体工学研究所

鈴木 昭 明

§1. 緒 言

近年プラスチック材料の発展はめざましく、その用途の拡大、又加工法の発展にともないプラスチック原料を粉碎する要求も多い、しかるに多くの合成樹脂はその熱に対して弱い点、靱性に富む点がわざわざして粉碎困難なものが多い。更に材料自身の研究も当然のことながら強度の大なものへと進んでおり、だんだん粉碎しにくくなることもあって、合成樹脂を粉碎できる粉碎機は数少ない。

当社においてもこのような状況の中で、プラスチック用粉碎機の開発に1968年11月より着手、1970年9月には開発された粉碎機をビクトリーミルと名づけて化学プラントショーに出品するまでにいたったので、ここにその開発の簡単な経過と開発粉碎機の性能についてのべる。

§2. 開発の経過

プラスチックも非常に広い範囲にあるが、ここでは熱可塑性の一般的なものとして第一目標の原料にポリエチレンのペレットを選んだ、しかも粉碎機は常温で運転でき、原料あるいは、取入れ空気の冷却はしないという条件をつけた。

ポリエチレンのような柔軟性、靱性に富む材料は従来粉碎力として圧縮、衝撃よりも剪断力を用いる方がよいと云われている。しかしながら衝撃力を用いた粉碎機の方が、特に細かい粉を得るためにはよく用いられているし、ごくふつうの衝撃式粉碎機でも、短時間、小量であれば、即ち温度上昇が生じる前であればポリエチレンのようなものでも粉碎可能であることは経験的に知られていた。もちろんこのような靱性、柔軟性のあるものが普通の鉱物のような脆性体と同じような粉碎機構をとるとは考えられないが、とにかく衝撃力で粉碎できることは明らかである。したがってここでも原料に出来るだけ単

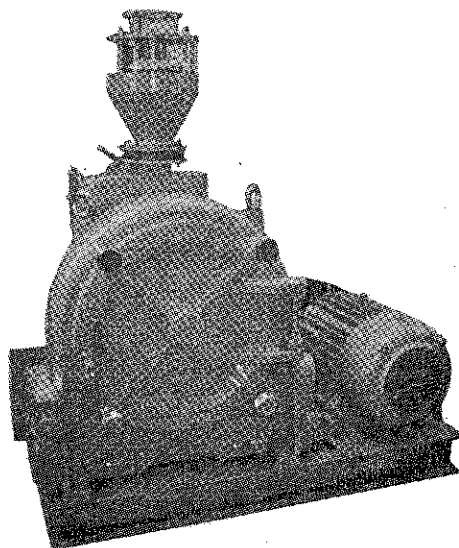


Photo. 1 ビクトリーミル VP-3

じゅんな衝撃力だけが加わる構造を目標とした。

この問題は温度上昇による熔融をどうふせぐかということであるが、この場合、粉碎操作に熱の発生はさけがたいが、次の点に留意して常温空気の流入による冷却作用のみで粉碎可能となるように心がけた。即ち、(イ)粉碎のために必要な衝撃力以外の摩擦、圧縮の力が碎料に出来るだけ加わらないようにして無駄な熱の発生を防ぐ。(ロ)粉碎機内、特に粉碎ゾーンでの温度の分布が少なくなるようにし、局部的に高温にならないようにする。(ハ)粉碎されたものはすみやかに機外にとり出せる形とする。

以上のような構造を目標に試作機を作り開発研究にとりかかった。

色々な試行錯誤があった後、目標とする粉碎機のだいたいの形が見つかり、まず1馬力のテスト機を試作して、粉碎の可能性の確認、製品粒子形状などに関する予備試験を行なった。そのデータをもとに5馬力のテスト

機を作り、定量的な粉碎データをとった。更に大型化のためのスケールアップデータをとるために30馬力の試験機も製作した。試作ごとに改良が加えられたがいずれも研究のための機械であり、工業的な生産機としては、新たに製作上、及び作業性を考慮しての設計を必要とした。最初に30馬力のものを新たに設計製作し、ビクトリーミル VP-3 と名づけて、化学プラントショーに出品した、1970年の9月である。その後、小規模生産用、試験用として VP-1 型5馬力のものを商品化した。

§ 3. ビクトリーミルの構造

開発の過程において、1馬力、5馬力、30馬力とテスト機が試作され、その都度、構造的な検討が加えられたが、最終的に商品化されたビクトリーミルの構造は Fig 1 の如きものである。簡単に説明を加えると、

1. ロータのブレード

ロータは単純な衝撃のみがくりかえし加えられるようにした。ブレードの枚数を多くして衝撃回数を増すと共に熱の発生を均一にした、一枚のブレードの前に多くの碎料が滞留して、摩擦、圧縮、剪断等の力が加わってむだな熱が発生しないようにした。

スイングハンマーでなく固定ブレードとしたのは、周速を小さくした時も、有効に衝撃力が作用するためである。

2. 中央からの供給

新しく供給された碎料が、ライナー全面に分散されて温度分布がバラつかないようにした。ライナーとロータよりなる粉碎面において、全面的に同じ条件で粉碎が行

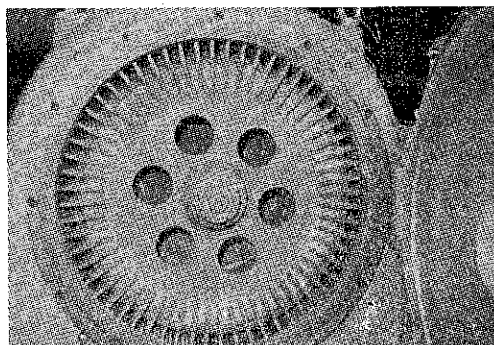


Photo. 2 ビクトリーミル VP-3 のロータ

なわれるようにして、粉碎箇所による温度差ができないようにした。

3. ライナーとスクリーンの小分割しての配置

普通、この型のミルでは全円周スクリーン又は上半周ライナーと下半周スクリーンの配置が普通であるが、ビクトリーミルではライナーとスクリーンを交互に配列してある。これはライナー部で粉碎された微粉をすみやかに機外に排出して熱の発生をおさえるのと、空気の流れをロータの中心から円周方向に出来るだけ均一に流して温度分布のできるのを防ぐ役割をする。

更にライナー部とスクリーン部の面積の比率を碎料の粉碎性の難易により、変更することによって、粉碎の能力と排出の能力のバランスがとれたところを最適効率として適用できるようにした。

4. ライナーとロータのクリアランス

特に熱に対して敏感な物質では、碎料がロータにより

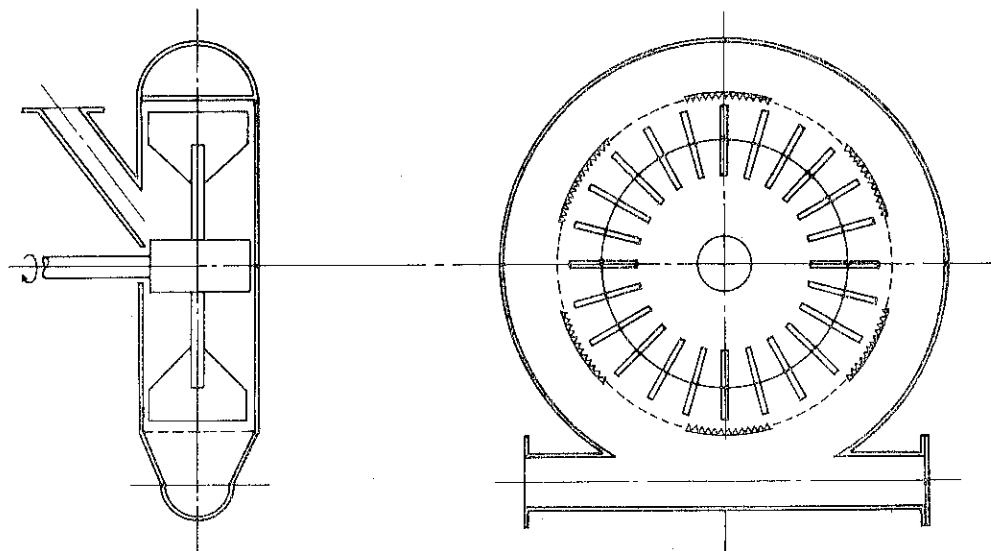


Fig. 1 ビクトリーミルの構造の概略

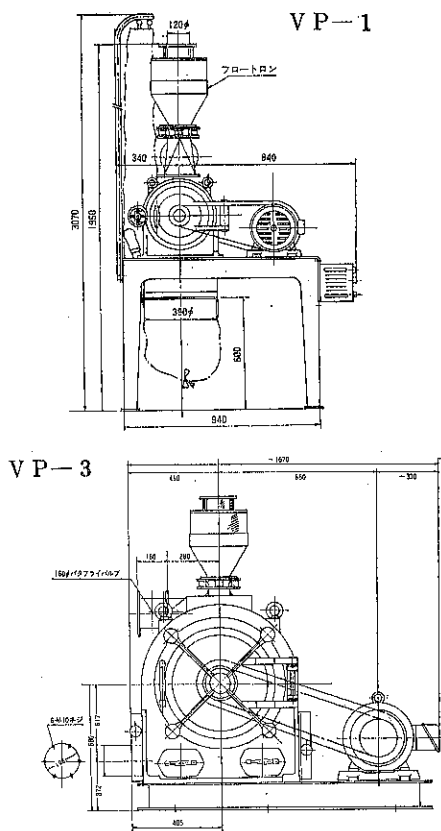


Fig. 2 ビクトリーミルの外型

ライナーにおしつけられて摩擦を受けて発熱することのないように、ライナーとロータのクリアランスは一般の粉碎機より大きくとった方がよい。ビクトリーミルでは径のことなるロータが用意され、砕料に適したものを選ぶようにしている。

以上の4点が、他の衝撃粉碎機とことなる特徴である。操作上は一般のものと変わらず、フィーダから供給された砕料は粉碎され空気の流れによって運ばれ捕集される。VP-3型では排出口から空気輸送される。VP-1では小規模であるので粉碎機出口で直接、バッグで製品を捕集することが多い。ミル内を通過する空気量は冷却を目的とするので他の粉碎機よりも多い。又運転中は排出空気温度をチェックしながら操作することも多い。

§ 4. ビクトリーミルによるポリエチレンペレットの粉碎

原料としてまず第一にポリエチレンのペレットを選んだので開発の段階でいろいろな条件でのテストは多いが、ここでは開発されたビクトリーミルの特性とポリエチレンの物性とが関連しているデータを選んで紹介す

る。

1. ロータ周速の影響

Fig. 3 にテスト結果の1例を示した。ロータ周速 40 m/sec 以下では衝撃力不足で粉碎不可能である。ロータ周速を上げて行くと、処理能力が最大値を示す点があり、その点を越すと能力が減少する。粉碎品の粒度はロータ周速上昇と共に若干細い方へ移る、この傾向は一般の脆性物質の粉碎と同じであるが、この場合、ある周速をこすと粒度はほとんど変らなくなる。又80メッシュ以下の微粉はほとんどとれない点に特徴がある。

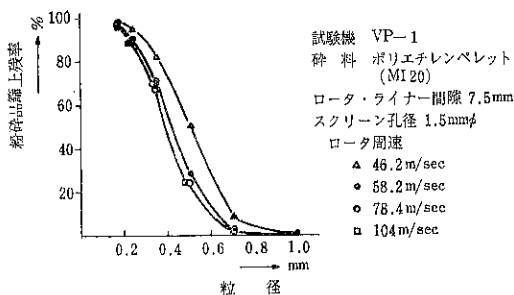
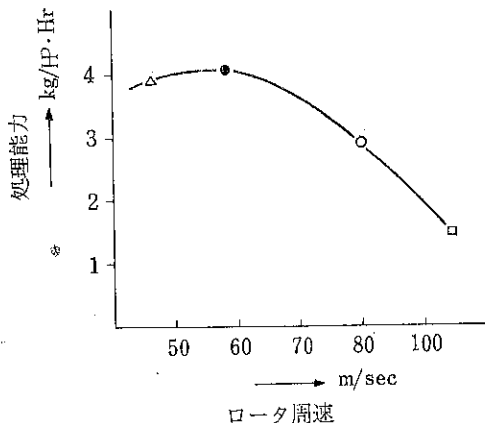


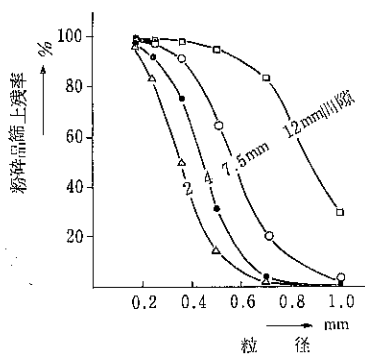
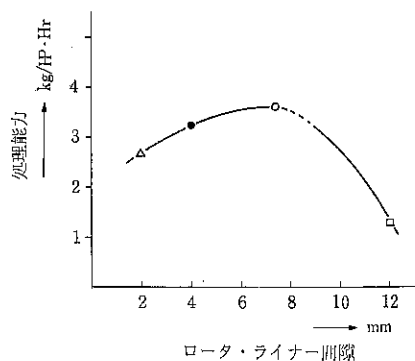
Fig. 3 ポリエチレン粉碎におけるロータ周速の影響

2. ロータ・ライナー間隙の影響

ロータのブレードの先端とライナーの山との距離を変えると粉碎性能に大きく影響をおよぼす。

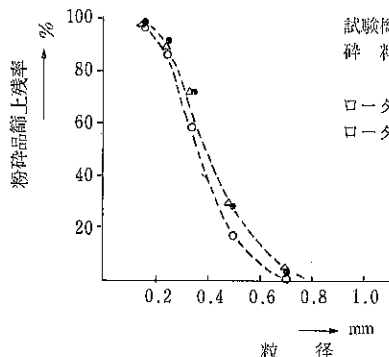
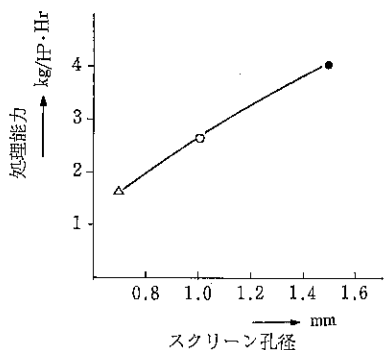
テスト結果を Fig' 4 に示した。

ロータ・ライナー間隙も変化させるとロータ周速と同様に処理能力を最大にする点がある。この間隙がある点より大きくなると、ブレードと砕料との衝突効率が急げきに悪くなると考えられる。粉碎品粒度は間隙が小さくなるほど細くなる。先にロータ周速の影響の項で、周速がある程度以上になると粉碎品粒度はほとんど細くなることはないと言明したが、これはロータ・ライナー間隙にも関係がある。Fig. 5 に示す如くロータ・ライ



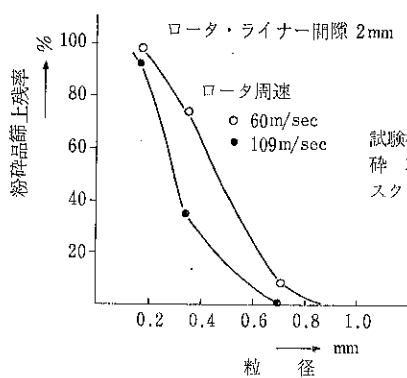
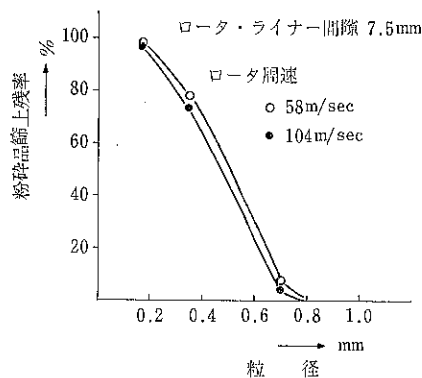
試験機 VP-1
 砕料 スミカセン
 G801
 ロータ周速 約60m/sec
 スクリーン孔径 1.5mmφ

Fig. 4 ポリエチレン粉砕におけるロータ・ライナー間隙の影響



試験機 VP-1
 砕料 スミカセン
 G801
 ロータ周速 58m/sec
 ロータ・ライナー間隙 7.5mm

Fig. 5 ポリエチレン粉砕におけるロータ・ライナー間隙とロータ周速の影響



試験機 VP-1
 砕料 ノバテック F155
 スクリーン孔径

Fig. 6 ポリエチレン粉砕におけるスクリーン孔径の影響

ロータ間隙 7.5mm の場合はロータ周速 58m/sec と 104 m/sec では粉砕品の粒度にそれほど差は無いが、間隙 2mm ではロータ周速 60m/sec と 109m/sec では大きな差がある。

ブレードの衝撃力は単にロータスピードだけでなく、ロータ・ライナー間隙にも関係あると思われる。

3. スクリーン孔径の影響

孔径のことなるスクリーンを用いた場合についてFig.

6 に示した。処理能力はスクリーン孔径を小さくするにつれて減小するが、粉砕品の粒度はあまり細くならない逆にあまりスクリーン孔径を小さくするとかえって熱の発生が大となり、熱による凝集粒が混入する。

粉砕品の粒度は衝撃力の大きさで定まり、スクリーンは分級すると言うより単に未粉砕の砕料を粉砕室内に保持する役割をなすと考えられる。

4. 粉砕温度の影響

Table 1 ポリエチレン粉碎における排気温度の影響

粉碎室出口 排気温度		40°C	50°C	60°C	62°C	65°C	68°C*
粉篩上 残品率	24mesh	6.4%	5.0%	4.8%	4.9%	4.9%	6.7%
	42mesh	84.0%	79.5%	76.5%	75.5%	74.0%	73.7%
流動性指数		67.0	70.0	71.0	72.0	73.0	72.5

(試験機 VP-3 砕料, スミカセン G801)
(* 粉碎品中に熱による凝集粒が少し混入す.)

ポリエチレンのような温度に対して敏感な物性をもつものの粉碎には当然温度の影響が大きいと思われる各種のテストを行った。

まず粉碎機に流入する空気の温度をかえて、排気の温度を段階的に変化させた場合の結果を Table 1 に示した、粉碎品の粒度は粉碎温度が上昇すると共に細くなる、又粉碎品の粒形も角が少なくなったり、ヒゲの混入も少なくなったりして流動性がよくなる、粉碎能力も若干ではあるが温度が高い方が上昇する。この結果から見るとポリエチレンの粉碎は溶融しない程度で出来るだけ高い温度で行なった方が良くいえる。

Table 2 は温度の影響を見るためのもう一つのテストの結果である。原料のポリエチレンのペレットの温度を変えてテストして見たものである。特に No. 4 ではドライアイスとペレットを混ぜて冷却した後、ドライアイスと共に供給して粉碎したものである。粉碎品の粒度と温度の関係の傾向が先の Table 1 の結果とことなるが、原因は明らかでない。しかし従来、一般に言われている合成樹脂の粉碎の場合、冷却することが能率を上げると言うことはポリエチレンの粉碎の場合は必ずしも適当ではない。冷却するならば少なくとも脆化温度以下の低温まで冷却する必要がある。

5. スケールアップについて

5HP の VP-1 と 30HP の VP-3 の間でのスケールアップの基準はロータの周速を同じとしライナー、スクリーンの面積は馬力に比例させ、径と幅の比はほぼ同

Table 3 VP-1 と VP-3 の比較

		No. 1	No. 2	No. 3
機 種		VP-1	VP-3	VP-3
条 件	スクリーンの割合	全円周の1/2	全円周の1/2	全円周の1/2
	スクリーンの径	1.5mmφ	1.5mmφ	2.0mmφ
	ロータ・ライナー間隙	2.0mm	2.0mm	7.5mm
	ロータ周速	58.2 m/sec	62.3 m/sec	59.5 m/sec
粉篩上 残品率	24mesh	16%	5.5%	8.0%
	42mesh	87%	78.5%	84%
	60mesh	96.4%	86.5%	94%
馬力当りの処理能力		3.12kg/Hp・Hr	2.47kg/Hp・Hr	3.26kg/Hp・Hr

じである。ブレードの数はピッチを同じに即ち径の比に合わせている。即ち衝撃力を同じとし、ライナー、スクリーン面積当りの負荷、ブレード先端の線長さ当りの負荷を同じにするように相似させた。しかし実際に同じ機械条件で運転すると VP-3 は VP-1 に較べ製品粒度が細かくなって、処理能力が減少する、条件を変えて同程度の粒度の粉碎品を得るようにすると、VP-1 も VP-3 も同じ馬力当りの処理能力が得られる。その1例を Table 3 に示した、原因は色々あると思うが、そのひとつは遠心力の差にあると思われる、周速を一定とし径を大にしているのでその分だけ遠心力は少ない、これが粉碎品の排出速度に影響を及ぼしていると考えられる。

6. 高速度撮影による粉碎機構の観察

5馬力のビクトリーミル VP-1 とほぼ同形のテスト機を作りその側壁を透明板とし、側面から高速度カメラで撮影することにより、機内での砕料の運動、粉碎される様子などを観察した。

ポリエチレンのペレットはロータのブレードの衝撃一度では粉碎されることはない、投入されたペレットはブレードの先端近くに当り、回転している接線方向にとば

Table 2 ポリエチレン粉碎における原料温度の影響

		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
温度変化の方法		温水中にて加温	常 温	ドライアイスに冷却	ドライアイスと混合して粉碎
粉 碎 品 篩上残率	24mesh	25.5%	18.5%	10.9%	9.7%
	42mesh	94.5%	90.0%	87.9%	82.7%
流 動 性 指 数		76.0	74.5	74	69.5
1馬力当りの能力		3.22kg/Hp・Hr	3.75kg/Hp・Hr	2.89kg/Hp・Hr	2.19kg/Hp・Hr
原 料 温 度		80°C	30°C	0°C	—

Table 5 ビクトリールミル テストデータ

原 料 名	所要動力 (HP)	回転数 (r.p.m)	クリ ア ランス (%)	スク リ ン (%)	原 料 粒 度	製 品 粒 度	供給能力 (kg/H)	備 考
高圧ポリエチレン (MS-30)	30	1,420	7.5	2		+ 16M 1.6%, 16~42M89.6%	99.5	フアン付 31.5m ³ /min
高圧ポリエチレン (EVA-290)	30	1,420	7.5	2		+ 16M 2%, 16~42M92.4%	21.7	
低圧ポリエチレン (F208-1)	30	1,320		2		+ 16M 0.7%, 16~42M76.5%	90.5	
A B S 樹 脂	5	5,940	2	1		- 42M 96%	61.2	{スクリーン4枚 フアン使用 31m ³ /min
エポキシ樹脂	30	1,800		2		+ 20M 4.5%, 20~80M86.5%	80	
硬質塩ビ (P.V.C)	5	5,940	2	0.3	max 2%	-100M 96%	140	
カーボン+樹脂	5	5,940	2	0.7	3~10%	+ 40M 8.2%, 40~80M 87%	5.8	軟化点 70°C, 融点 130°C
コーヒ豆粕	5	5,940	2	0.3	0.5~1%	-250M 65%	9.15	{ミル出口温度 43°Cを超えますと メルトする
C. M. C	5	5,940	7.5	1.5	1~2%	+ 16M 3.5%, 16~42M68.7%	160	水分 95%, 脂肪 20%含む
ナイロン-6	5	5,940	2	0.3	48~200M	+ 32M 1.8%, -42M64.7%	75	
ナイロン-66	5	5,940	5	0.7	2.5%ベレット	+ 20M12.5%, 20~48M87.9%	5.2	
パラフィン+ホワイトカーボン	5	5,940	7.5	1	3φ×5	{パライソンのみ +100M 51%, 100~200M99%	103	原料重量比 1:1
ポリマー (エステル系)	5	5,940	2	0.7	1~2%	+ 24M 4.7%, 24~80M91.2%	39.2	
ポリスチレン	5	5,940	2	1	5~0.5%	+ 32M 1.2%, 32~60M 93%	11	
メチルセルロース	5	5,940	2	1.7	3φ×4	+ 32M 18%, 32~60M 63%	78.5	
洗 剤	5	5,940	2	0.7	16~60M	-100M 52%	5.2	{フアン使用すれば能力アップの見込み。
ユリヤ樹脂	5	8,050	2	0.3	0.2~1%	{最大粒徑 40~45μ 最小粒徑 2~3μ	127.7	
合成タンパク	5	8,050	2	1.3	{0.5×0.5~7%の フレック状	40mesh 99%pass	124	
デフロソ切屑	5	5,940	2	0.3	5~10%	-100M 94%	264.1	
メチルセルロース	5	8,050	2	1.5	2~3%フレック状	- 20M 97%	13	
フェノール樹脂	5	8,050	2	0.3	2~6%	-200M 85%	5.6	
サラン系樹脂	5	8,050	2	2	8~30M	-115M 83%	202	
合成糊剤	5	8,050	2	2	8~30M	24~80M 82%	34	
乾燥肉	5	5,940	7~8	1.5	-100M57.5%	16~80M 82%	18	
合成糊剤	5	8,050	2	0.3	-100M5.5%	-100M99.2%	8	
合成糊剤	5	3,550	7~8	1.5	8~32M	16~80M 86%	146	

される。このときの速度はブレードの回転速度よりも速くなっているのが観察された、接

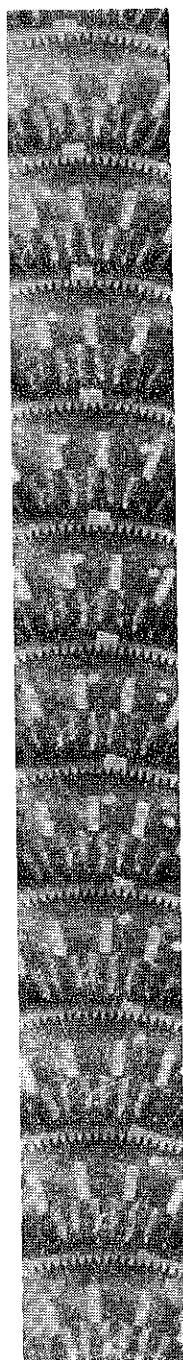


Photo. 3
高速度撮影によるミル内部の観察

線方向にとばされた碎料はライナーの波形に当て方向を変えられ再びブレードに衝突する。ロータが1回転する間になん回かブレードに衝突する。この衝突の回数はライナーとロータのブレードとの間隙の大きさにより大きく影響を受ける。特にこの間隙が12mmのものは衝突の効率が非常に悪く、粉碎試験の結果と一致する。

粉碎の様子は脆性物質が一度の衝撃で全体が破碎される体積粉碎ではなく、ポリエチレンのペレットの場合は表面から小さな粒がだんだんはがれて行くような粉碎のされかたをしているのが観察された。

何回かの打撃を受けているうちに表面に多くのきれつあるいはキズが入り、これがつながって表面からむしりとられるようにして粉碎されて行くのではなからうか。

勿論、この間には他の要因、例えば打撃による融点に近い、あるいは融点以上の局所的な温度上昇、機内での碎料の運動の状態などが作用して複雑な粉碎をしているものと考えられる。

§ 5. ビクトリーミルにおける合成樹脂の粉碎

前章ではポリエチレンペレットの粉碎について色々な傾向について説明したが、合成樹脂にも色々なものがある、熱可塑性、熱硬化性、ガラス化点が常温以上のものあるいは非常に低いものなど、夫々粉碎の機械条件、操作条件による傾向はちがって来ると思われる。

例えばポリエチレン粉碎における温度の影響にみられる傾向はポ

リエチレン、又は熱的な性質がポリエチレンに近い樹脂にのみあてはまるもので、他の樹脂ではこの傾向は表われない。

最近、目ざましい発展をしているエポキシ系樹脂の粉末塗料の粉碎においては、この原料が非常に破けやすい物性であることから、粉碎温度をあまり上げてはいけない点をのぞけば、普通の脆性の鉱物と同じような粉碎の傾向を示す。

例えばスクリーンの孔径の影響、ロータスピードの影響等はポリエチレンの場合よりも顕著にあらわれる。粉碎で得られる粒度もポリエチレンよりもはるかに細かい。Table 4 にビクトリーミルによるエポキシ系粉末塗料の粉碎のテスト例を示した。原料は同じエポキシ系樹脂のものだが、3種類とも多少性質のことなる別のものである。

最後に各種原料に対するビクトリーミルでの粉碎データを示した。

Table 4 エポキシ樹脂の粉碎テスト例

原 料		No. 1	No. 2	No. 3
ローター周速 m/sec		109	109	109
クリアランス mm		2	2	2
スクリーン孔径 mmφ		0.3	0.3	0.3
空 転 電 流 Amp		8	8	8
実 運 転 電 流 Amp		12	11.5	12
供 給 能 力 kg/Hr		109.6	55.4	87.9
製 品 粒 度	100mesh pass	%	%	%
	150mesh pass		99.9	98.0
	200mesh pass	90	96.6	93.0
	250mesh pass		89.0	75.0
			81.0	61.0

§ 6. おわりに

開発したビクトリーミルについて、主にポリエチレンペレットを粉碎した場合の状況について説明して来た。衝撃式粉碎機ではあるが、このような物性のものに対しては、脆性物質とはことなる様子が各所で見受けられた。

粉碎の対象となる原料も、以前のタルク、石灰石などの鉱物中心から、最近では化学工業薬品、合成樹脂関係と広くなり、低融点の有機物の粉碎も要求が非常に多くなっている。ビクトリーミルも、商品化されてまだ日は浅いが、すでに十数台が稼動している。今後この方面での発展を願うものである。

Table. 2 にそれらの性能, Fig. 2 に測定部の一例を示す。

2-3) 実装置でのテスト条件

使用粉体; タルク JIS 四種 7 μ 平均

F 値; 1, 1.5, 2 m³/m²/min,

集塵機入口含塵濃度

F = 1 に対し 約120 g/m³

F = 1.5 " " 90 "

F = 2 " " 60 "

使用圧空; 5, 7 kg/cm²

3. 逆噴射圧力波形

3-1) 逆噴射固有圧力波

逆噴射時に汚筒上端部のベンチュリーから送りこまれる圧力波形はパルスエアコレクターの洗浄機構上基本となるものであるが、それは決して特殊な波動ではなく、単純なパルス形である。Fig. 3 にその一例を示す。この図は実験装置として Fig. 2 のものを用い、汚布ではなくパイプに適当に孔をあけたもの (600 mm 毎に 18 ϕ 孔) である。Fig. 3 で大切なことはパイプ内の瞬間圧の大きさではなく、その圧力上昇速度が極めて速いことと圧力がある高さになると以後平衡を保ち、その後急速に低下することであり、これがブローチューブ圧とよい近似をなしており、こういった圧力の急激な変化が洗浄効果に有効と思われる。さらにパイプにけられた孔を少なくしていくとそのパイプの固有気柱振動が発生する。図中(A), (B)がパイプの場合を示す。

3-2) 汚筒内外面瞬間差圧

パルスエアコレクター運転中の汚筒内の圧力変化は、ベンチュリーからの固有圧力波形からかなり異った形を示す。Fig. 3 にパルスエアコレクター P1C1 で測定

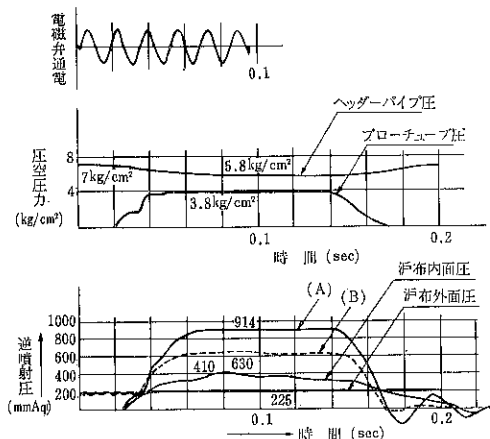


Fig. 3 パルス発生における圧力変動

した圧力変動も図示してある。この図よりみると、圧力のピークまでかなりの時間がかかり、その後平衡にはならず降下していく点がベンチュリーからの圧力波形と異なる。この両者の圧力波形の差が、粉体層の付着した汚布から粉が振り落され汚布内部と外部の圧力差のピーク時にはほぼそれが達成されると思われる過程を示している。また汚布外面圧 (集塵機内圧) は汚布圧損が 200 mm Aq の時わずか 25 mmAq の上昇で約 0.15 秒間ほど続くにすぎず、接続機械への影響がほとんどないことを示している。

4. 逆噴射の変動と汚布圧損の相関性

4-1) 逆噴射時間の短縮

逆噴射のためのバルブへの通電時間を少なくすることにより汚布洗浄のための圧縮空気量を減らすことが出来る。しかし洗浄効果が弱くなれば、汚布の圧損が上昇し使用できなくなる。その限界点がどの辺にあるかについて考察するに Fig. 3 においてちょうど逆噴射時に汚筒内外面差圧が最大になる点に注目し、この時間にバルブを閉じるような通電時間が可能最少時間と考えられ、そのような時間は約 0.05 秒くらいであることがこの図より推測される。

通電時間として標準の 0.1 秒、最少と考えられる 0.05 秒、大きい値で 0.2 秒の 3 点につき、汚布内外面差圧と汚布圧損をパルスエアコレクター P1C1 と P12A8 にてテストした。Fig. 4 は汚筒内圧変化の一例を示すが、これは P1C1 にて測定したもので汚布内最大圧は通電時間が 0.05 秒でも 0.1 秒でも同じであり、また Fig.

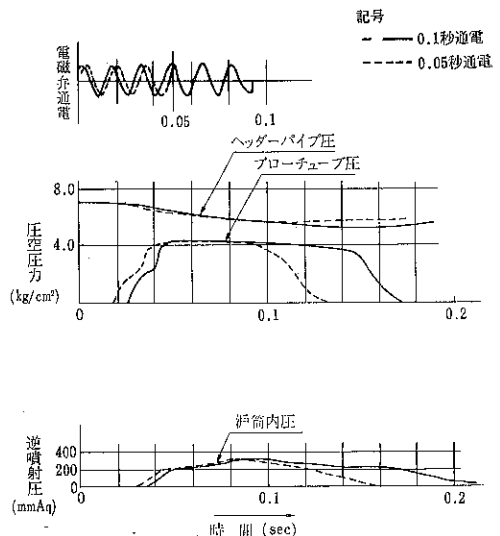


Fig. 4 逆噴射通電時間の短縮

5はその時の汚布圧損の変化状態を示しており両通電時間の間に差がなかった。またP12A8にて0.1秒と0.2秒のテストを行なったがほぼ同様の結果を得た。

以上の結果より通電時間が0.05秒～0.2秒の間では逆噴射による洗浄効果は実用的には差異がないと考えられ、0.05秒以下では洗浄効果が低下する恐れがあり通電時間の限界値と考えられる。通電時間が0.05秒の場合の圧空消費量は0.1秒の場合の68%であった。

4-2) 波動型逆噴射圧波形

汚筒内部にある種の振動波形を起し、また振動による干渉圧力波形を、そして汚布の洗浄効果を増加せしめるため、逆噴射を短時間に二度くりかえした。

Fig. 6 に波動の状態を示す。バルブへの通電時間は0.1秒、逆噴射の間隔は0.15～0.3秒とした。機種としてP12A8を用いた。しかしながらこの図より汚筒上部のベンチュリーから二度逆噴射が行なわれているが汚筒内圧変動は通常の逆噴射の繰り返しであった。汚布圧損は標準の逆噴射型に比べやや低くなるが圧縮空気消費量が2倍必要となりこの意味で標準逆噴射のくりかえし間隔

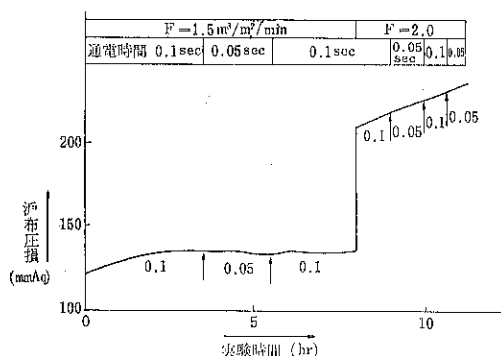


Fig. 5 逆噴射通電時間の短縮による圧損変化の一例

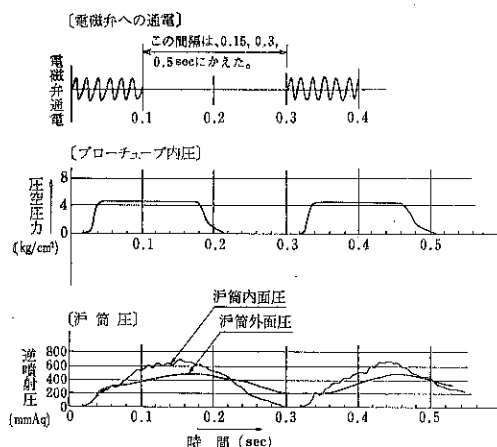


Fig. 6 波動型逆噴射圧波形

を半分にしたものと比べるとむしろ不利となり、結局逆噴射圧波形が同じ場合には圧損に対してほぼ同じ性質を有することがわかる。

4-3) 圧縮空気源が 5 kg/cm² になった場合

逆噴射のための圧縮空気を 7 kg/cm² から 5 kg/cm² に低下させると汚布洗浄のエネルギーは67%くらいにさがると、パルスエアコレクターの圧損が極めて不安定となる。汚筒内圧変動を測定すると圧力が低下しこれと汚布圧損とを対比させると 7 kg/cm² の場合 200 mm Aq 以上でも十分安定運転が出来るが 5 kg/cm² に低下すると 200 mm Aq 以上ではいくら噴射回数を増しても運転不能におちいりやすい。圧損が 100 mm Aq 以下ではほとんど差異はなかった。このことからある圧損のもとで十分な洗浄効果を期するためには、それに相当する瞬間的なエネルギーが必要であり、汚筒上部からの圧力および風量はそのエネルギーに相当する点で、安定運転、不安定運転のわかれ目となることが考えられる。したがって 5 kg/cm² の場合には不足分のエネルギーはバルブ個数を増やすことが必要となる。

5. 逆噴射圧の汚布長さ方向の伝達

汚筒上部より汚布内へ逆噴射された圧力波は十分汚布下端まで達しているか、途中で汚布に吸収されないか、逆噴射された空気が汚布上部で全部ぬけてしまうことはないか等をみるため汚布の長さ方向に関し圧力測定をおこなった。汚布直径は 114φ であり長さとして 1.8 m, 2.4 m, 3 m の3種につき測定したところ、汚布の長さ(汚過面積ともなる)に比例して汚筒内圧力は低下したが、汚布の上端と下端のあいだでは圧力波が伝達する時間的ずれはあるがその大きさと波形はほとんど同じである (39頁へ続く)

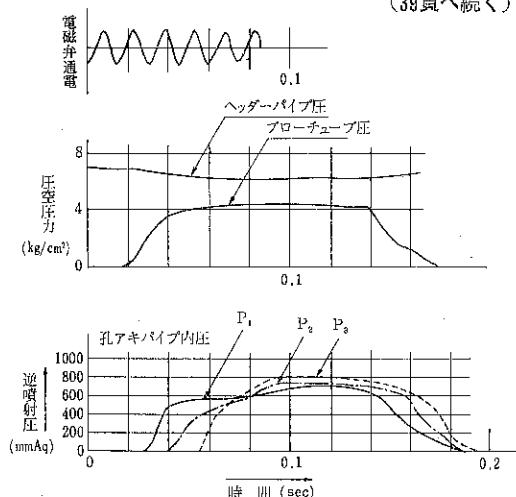


Fig. 7 孔アキパイプ全長 9.6 m の内圧変動

ホソカワ／マイクロ エアトロン

—エアトロン製品の展望—

細川鉄工所

谷口 浩

§1. 初めに

昭和37年、細川鉄工所は米国 MIKROPUL 社と技術提携を行い、集塵機マイクロ パルスエア他を導入したが、昭和43年に MIKROPUL 社は湿式集塵機等の専門エンジニアリング会社である AIRETRON ENGINEERING 社の吸収合併を行った。ここにエアトロン製品について紹介する。

エアトロン製品は米国に於て、肥料工業、化学工業、製鉄工業その他で多くの経験と技術を持っており、既に数千の納入例を持ち、我が国においても既に数例の機器が輸入され稼動している。

細川鉄工所もエアトロン製品を加え、ここに乾式、湿式を含めて広い分野の大気汚染防止装置機器を持つことになり、我が国のブルスカイの実現に強力な推進力となることとなった。

§2. エアトロン製品の概略

エアトロン製品には湿式集塵機を主体として下記のような機種がある。

1. エアトロン ベンチュリー スクラバー
2. エアトロン サイクロニック スクラバー
3. エアトロン パックド タワー
4. エアトロン VWD バッフル インピンジメント スクラバー
5. エアトロン ベンチュリー インピンジメント スクラバー
6. エアトロン 電気集塵機
7. エアトロン サイクロン コレクター

上記の内、1から5までは湿式集塵機であり、6は乾式、湿式両用で使用され、7は標準の乾式サイクロンである。

各機種はそれぞれ容量、仕様に応じて多くの標準型式が用意されているが、特に湿式集塵機については適用条件に対応して部分的な構造変更を行うこともある。また適用、捕集効率については、湿式集塵システムにおいて

は、乾式にくらべて複雑であるから、条件を詳細に調査して、過去の経験、データーにより慎重に立案の要がある。

§3. 各機種の説明

1. エアトロン ベンチュリー スクラバー

(1) 概要と特色

第1図に示すように、構造が簡単で低圧、中圧、高圧の広い範囲に使用されるが、特に高圧に於て1ミクロンあるいは1ミクロン以下の粒子を含むガスの除塵に高い捕集効率を示す。またガスの洗条、冷却、中和、吸収等を主体に附加的に除塵を行う場合には、中圧、低圧で利用されることが多い。従って高温の燃焼ガス、生成ガスの処理のように、冷却、吸収を伴う除塵装置には最も効果をあげる。

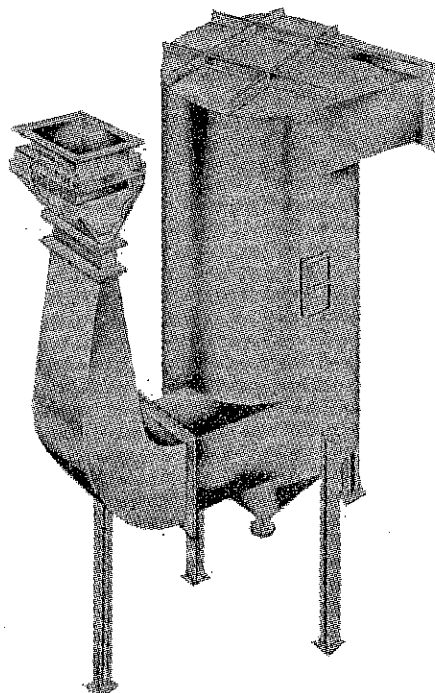


Fig. 1

ベンチュリー部に吸引された含塵ガスはスロートで急激に増速され、洗滌水を微細な水滴に分散させ、ガスと水滴の激しい衝突により、塵埃、ガスを水滴に附着、吸収させ、その水滴はセパレーター部でガスより取除かれる。

(イ) ベンチュリー部 洗滌水は大口径のパイプより流下方式で供給されるので閉塞の恐れがなく、そのままリサイクル使用が可能で、循環水中の塵埃量は重量で10%まで許容出来る。従って用水の節約が可能で、ガス吸収に使用する際は高度の濃縮が可能となる。

標準スロートは長方形断面の固定型であるが、負荷の変動の多い場合には、特許調節スロートが用いられる。これには可変ブレード型(第2図)とゴム製のフレキシブル型(第3図)がある。

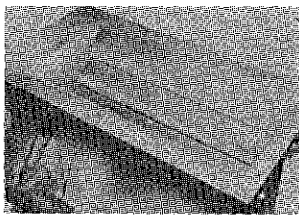


Fig. 2

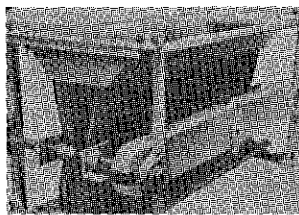


Fig. 3

(ロ) セパレーター部 構造は単純な円筒型で、ガスは下部より接線方向に流入し、旋回しながら上昇し、サイクロン効果で、ダストを含んだ水滴を確実に捕集する為に十分な高さと容積を持っている。

(ハ) 圧力損失 ガス、ダストの性質、粒度分布、含塵濃度、排出ガス中の許容含塵量により選定され、一般に125mmAqより1,000mmAqの範囲で使用される。

(ニ) 洗滌水量 通常は1 m³の処理ガスに対して0.7~1 lの循環洗滌水が必要である。所要水圧は0.5~2 kg/cm²である。洗滌水をリサイクルして使用する場合、補充水量は蒸発水量と、循環水を規定濃度以下に保つための追加水量の和となる。中和、吸収の為に洗滌水に酸またはアルカリを使用することが多い。

表1 エアトロシベンチュリースクラバー標準型式

型式	飽和 ガス量	ベンチュリー		セパレーター			
		入口 (I)	高さ (T)	直径 (D)	高さ (H)	出口 (O)	排水口 (S)
401	m ³ /min 30	mm□ 178	mm 1,540	mmφ 710	mm 1,770	mm□ 178	mmφ 50
402	55	250	1,820	910	2,280	250	70
403	85	300	1,980	1,060	2,660	300	70
405	140	390	2,200	1,210	3,040	390	100
410	285	550	3,090	1,670	4,190	550	100
415	425	680	3,530	1,930	4,820	680	160
420	565	780	3,910	2,130	5,330	780	160
430	850	960	4,460	2,510	6,290	960	200
440	1,135	1,110	5,000	2,740	6,850	1,110	200
450	1,415	1,240	5,400	2,970	7,440	1,240	260
460	1,700	1,370	5,780	3,100	7,990	1,370	260
470	1,985	1,470	6,170	3,350	8,370	1,470	260

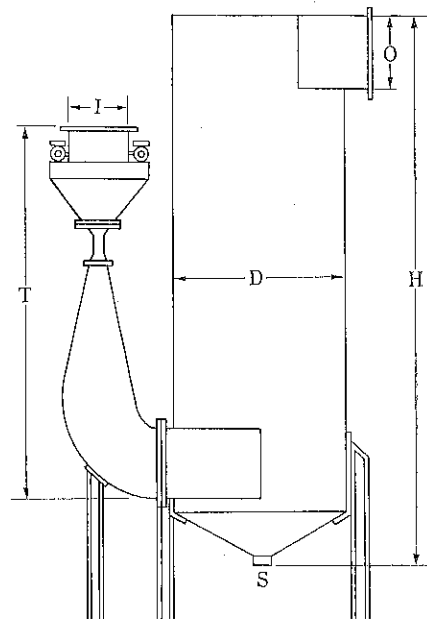


Fig. 4 ベンチュリースクラバー

(ホ) 使用材料 標準は軟鋼板製であるが、使用条件によりゴムライニングまたは煉瓦ライニングを行ったり、ステンレス鋼、各種合成樹脂、FRP等も用いられる。特にベンチュリー部、セパレーター部は材質を変えて保護する場合がある。

(2) 標準型式

処理するガスの飽和ガス量により第1表および第4図に示すような型式が準備されている。

表2 エアトロン ベンチュリースクラバーの適用例

機種名	材質	用途	風量 m ³ /min	洗滌水 l/min	圧損 %Aq	備考
ベンチュリー スクラバー	ゴムライニング	混合肥料中の 塩化アンモニウム 蒸気	830	720	760~820	入口 1.1 g/m ³ 出口 0.01 g/m ³
ベンチュリー スクラバー	ゴムライニング	アンモニア 塩化アンモニウム 粉塵	250	190	210	
ベンチュリー スクラバー	ステンレス鋼 304	炉のガス	120	170	230	
ベンチュリー スクラバー	ステンレス鋼 304	石灰混用 横型ロータリーキ ルン	1220	1360	380	
自動調節口付 ベンチュリー スクラバー	軟銅 カーボフラックス レンガ付	炉から発生する酸 化鉄粉塵	4570	3780	1520	出口濃度 0.039 g/m ³ at 762%Aq 0.016 g/m ³ at 1016%Aq 0.01 g/m ³ at 1270%Aq 0.007 g/m ³ at 1524%Aq
ベンチュリー スクラバー	ステンレス鋼 316 ELC	燐鉱石の乾燥と焙 焼銅反射炉からの 粉塵	① 1780 ② 2000	① 1620 ② 1110 38	260~300 320	
ベンチュリー スクラバー	ステンレス鋼 炭素鋼	焙焼炉からの発生 ガス	400	600	880	
ベンチュリー スクラバー	ゴムライニング	マンガン電気・ アーク灯からの 弗化物の洗滌	960	790	460	
ベンチュリー スクラバー	軟銅	Bowen スプレー ドライヤーの回収 及び洗滌装置	440	460	640	

(3) 適用例

適用例の一部を第2表に示す。

2. エアトロン サイクロニック スクラバー

(1) 概要と特色

第5図に示すように、円筒型の容器内にスプレー装置を持つ湿式サイクロン集塵機であって、含塵ガスは下部より接線方向に流入し、旋回しながら上昇するのに、器壁に取付けられたスプレージェットアセンブリーより微細な水滴を噴霧し、ガス中のダスト、ヒューム、ミストの除去、あるいはガス吸収、中和、冷却に用いられる。

1ミクロン以上のダストの捕集に用いられるが、現在は冷却、ガス吸収と併用して用いられる場合が多い。従って高温燃焼ガス、焼成炉ガスの冷却、除塵装置や、アルカリ液の洗滌により SO₂ ガス等の吸収装置としても使用されることが多い。

表3 サイクロニックスクラバー標準型式

型式	飽和 ガス量 m ³ /min	直径 (D) mmφ	高さ (H) mm	入口 (I) mm□	出口 (O) mmφ	排水口 (S) mmφ
501	30	710	2,480	170	200	50
502	55	910	3,170	250	300	50
503	85	1,060	3,730	300	350	50
505	140	1,210	4,260	390	450	80
510	285	1,670	5,970	550	810	80
515	425	1,930	6,800	680	990	80
520	565	2,130	7,420	780	1,140	100
530	850	2,510	9,050	960	960	200
540	1,135	2,740	9,880	1,110	1,110	200
550	1,415	2,970	10,660	1,240	1,240	260
560	1,700	3,200	11,530	1,370	1,370	260
570	1,985	3,350	12,060	1,470	1,470	260

型式 501~520 は中心排出口型、530~570 は側面排出口型が標準です。

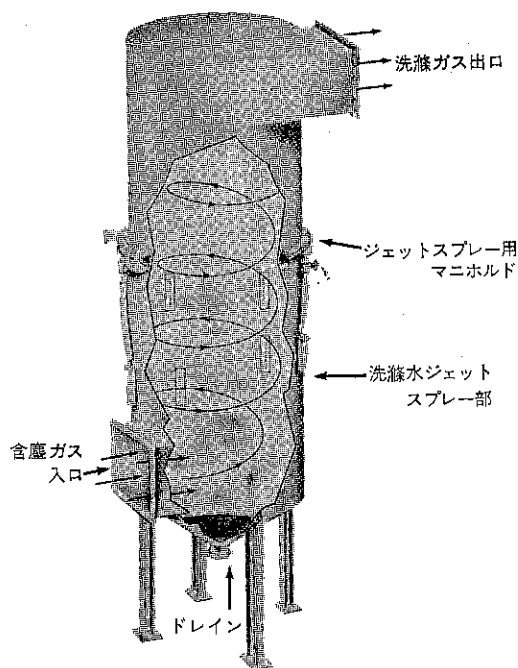


Fig. 5

サイクロニックスクラバー

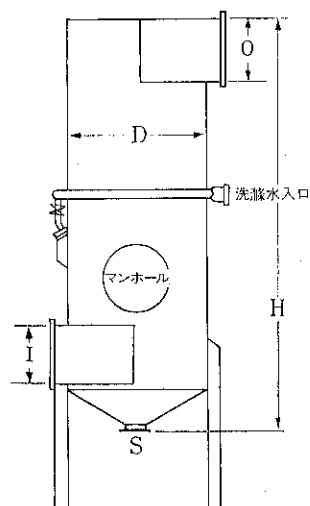


Fig. 6

(イ) スプレージェットアセンブリー ユニットとなっていて、取外し点検が容易である。

(ロ) 圧力損失 通常 25~100mmAq で使用され、圧力損失は大型ほど高くなるよう設計されている。

(ハ) 洗滌水量 処理ガス 1 m³ に対して 0.7~1 l である。使用水圧は 3, 5~10kg/cm² であって、細いダストほど高圧が必要である。

(ニ) 使用材料 ベンチュリースクラバーの場合と同様である。

(2) 標準型式

処理するガスの飽和ガス量により第3表および第6図に示す型式が準備されている。

(3) 適用例

適用例の一部を第4表に示す。

表4 エアトロン サイクロニックスクラバーの適用例

機種名	材質	用途	風量 m ³ /min	洗滌水 l/min	圧損 %Aq	備考
サイクロニックスクラバー	内部特殊塗装を ほどこした軟鋼	燐 鉱 石 F. S ドライヤー後	3,200		65	入口粉塵 6.5~9.2g/m ³ 出口粉塵 0.34g/m ³
サイクロニックスクラバー	炭 素 鋼	ハ ー ス 炉 (フライアッシュ)	895	530	65	
サイクロニックスクラバー	ステンレス鋼	下水汚物灰化 フライアッシュ	3,145	1,360	65	予備クーラー付
サイクロニックスクラバー	炭 素 鋼	流動乾燥機後	2,945	1,700	75	サイクロン 予備クーラー付
サイクロニックスクラバー	ゴムライニング 鋼	化学肥料の反応 タンクから発生 するヒューム	145~170	150	65	

3. エアトロン パックドタワー

1. 概要と特色

第7図に示すように、化学工業等のプロセスより生ずる有毒、有害ガスの除去、有用成分の回収に用いられる充填塔の一種である。塔内には上部にはミスト洗滌ベッド、スプレー装置、中段にコンタクトベッドが設けられ、ガスは下部より流入し、コンタクトベッドより滴下する洗滌液で予備洗滌された上、コンタクトベッド中を上昇し、パッキング材の広い表面で洗滌液と接触し、吸収される。洗滌液の水滴はミスト洗滌ベッドで除去される。含塵量の多い場合はコンタクトベッドに閉塞が生じ使用出来なくなる。

(イ) スプレー装置 全体がユニットのまま機外に取出すことが出来て、保守点検が容易である。またその配置が合理的で、コンタクトベッドの効率がよい。

(ロ) 圧力損失 通常 25~125mmAq で使用され、コンタクトベッドの厚さおよびパッキング材の大きさ、形状で変る。

(ハ) 使用液量 処理ガス量 1 m³ 当り 0.7~5 l を用い、通常 1.5 l を用いる。酸、アルカリを使用すること

が多い。

(ニ) 使用材料 標準はFRPを使用するが、その他、軟鋼、ステンレス鋼のほかゴムライニング等も用いられる。

(2) 標準型式

処理するガスの飽和ガス量により第5表および第8図に示す型式が準備されている。

表5 パックドタワー標準型式

型式	飽和 ガス量	直径 (D)	高さ (H)	入 口			出口 (G)
				(A)	(B)	(C)	
301	m ³ /min 30	mmφ 600	mm 3,350	mm 300	mm 150	mm 940	mm 220
302	55	910	3,500	450	220	970	300
304	115	1,210	3,650	600	300	1,010	450
306	170	1,370	3,800	760	380	1,050	550
308	225	1,670	3,960	910	450	1,090	630
310	285	1,980	4,110	1,060	530	1,130	710
315	425	2,285	4,260	1,210	600	1,160	860
320	565	2,590	4,410	1,370	680	1,200	1,010
325	710	2,890	4,570	1,520	760	1,240	1,110
330	850	3,190	4,720	1,670	830	1,280	1,210

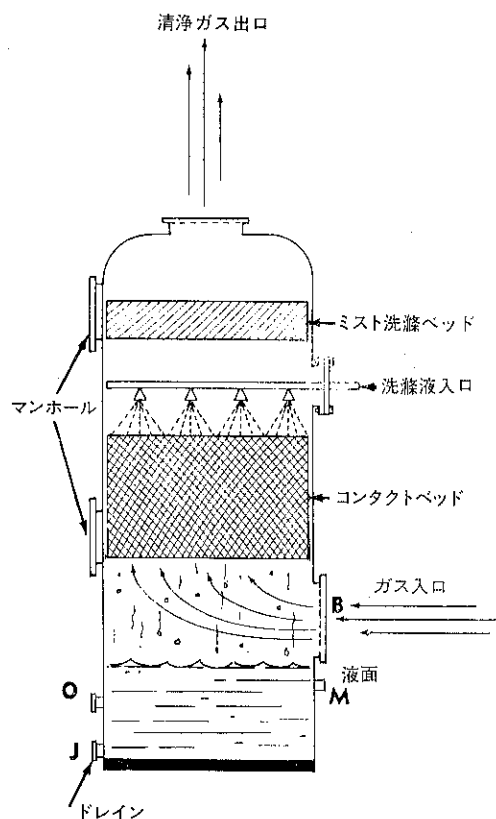


Fig. 7

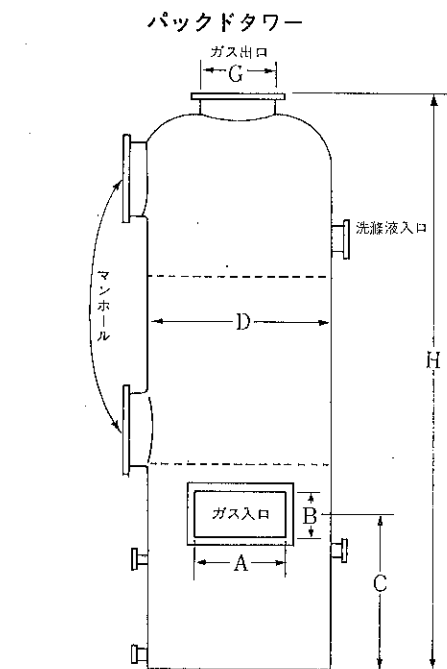


Fig. 8

(3) 適用例

適用例の一部を第6表に示す。

表6 エアトロンパックドタワーの適用例

機種名	材質	用途	風量 m^3/min	洗滌水 l/min	圧損 mmAq	備考
パックドタワー	PVC ライニング	微量の硫酸	28	23	38	充填層厚さ 600mm
パックドタワー	FRP	NO および NO_2 補集	28	95	50	
パックドタワー	FRP	塩素ガス	28	57	114	
パックドタワー	ステンレス鋼	廃水処理プラント から発生する H_2S	26	37	38	
パックドタワー	軟鋼ゴムライニング	HCl や NH_4Cl を 含んだ NH_3	286	567	94	
パックドタワー	ステンレス鋼	焙焼炉からのガス	94	284	50	プレクーラー付き

4. エアトロン VWD スクラバー

(バッフル インピンジメント スクラバー)

(1) 概要と特色

第9図に示すように含塵ガスは下方より器内に流入し、中段に設けられた、オリフィスプレート上の孔より上昇する。オリフィスプレート上には洗滌水がたたえられていて、ガスはその中をくぐりジェット状に水中を吹き上げてターゲットプレートに当たり、水、ガス共に飛散して洗滌水にダスト、ガスの捕集が行われる。オリフィスプレートの下方より洗滌水がプレートの下面に向かって噴霧され、ガスの予備洗滌を行い、プレートの上方にはエリミネーターが設けられ、同伴する水滴を除去する。プレートは2段又は3段まで増設出来る。1ミクロン以上のダストの捕集とガス吸収に利用される。

(イ) プレート部 オリフィスプレートとターゲットプレートの構造が優れていて圧力損失に比して捕集効率が高い。

(ロ) 圧力損失 一段プレートの場合で 75~110mmAq, 2段で 110~150mmAq, 3段で 150~200mmAq が普通である。

(ハ) 洗滌水量 通常洗滌水量は処理ガス量 1 m^3 に対して 0.5% であるが、熱交換器に使用される場合には 5% まで流すことがある。洗滌水のリサイクルは重量で 20% まで許容される。

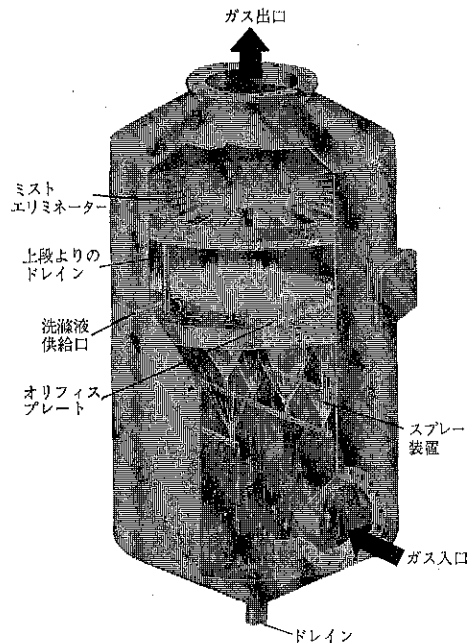


Fig. 9

(2) 標準型式

処理するガスの飽和ガス量により第7表および第10図に示す型式が準備されている。

(3) 適用例

適用例の一部を第8表に示す。

表7 エアトロン VWD スクラバー標準型式

型 式	飽和ガス量 (m^3/min)	入 口 径 (mm)	出 口 径	直 径	高 さ (1段)	高 さ (2段)	高 さ (3段)
VS-020	40	200	200	610	2,180	2,790	3,400
VS-030	85	300	330	920	2,490	3,100	3,710
VS-040	150	400	430	1,220	2,920	3,530	4,140
VS-050	235	480	530	1,520	3,300	3,910	4,520
VS-060	335	610	660	1,830	3,740	4,350	4,960
VS-070	460	710	760	2,130	4,120	4,730	5,340
VS-080	600	810	860	2,440	4,700	5,310	5,920
VS-090	760	910	960	2,740	5,160	5,770	6,380
VS-100	935	610×960	1,090	3,050	5,620	6,230	6,840

表8 エアトロン VWD スクラバー適用例

機 種 名	材 質	用 途	風 量 m^3/min	洗滌水 l/min	圧 損 mmAq	備 考
VWD スクラバー	軟 鋼	アスファルトプラントの排煙処理	200	80	90	捕集効率 96~97%
VWD スクラバー	軟 鋼	クーリングタワーとして	480	1,320	115	2段式とする
VWD スクラバー	ステンレス鋼	石灰燃焼ボイラー排気ガス脱硫	340	130	90	13,600kg/Hのボイラー
VWD スクラバー	ステンレス鋼	燐鉱石ドライヤー排ガス	2,830	2,080	75	捕集効率 98%

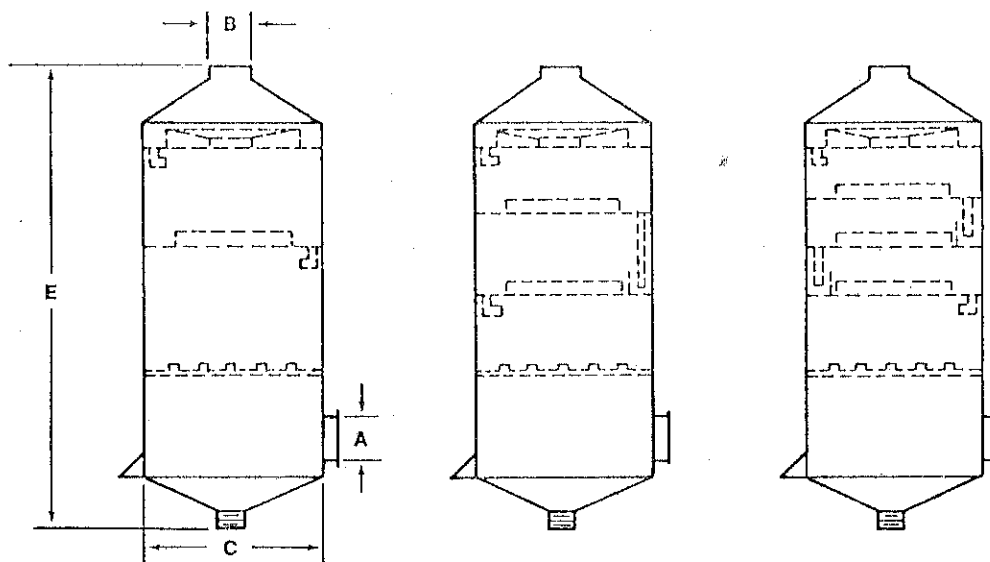


Fig. 10

5. エアトロン ベンチュリー インピンジメント スクラバー

(1) 概要と特色

第11図に示すように洗滌水を定水位まで滴したスクラバー槽内の上方より、含塵空気をベンチュリー筒を通じて液面に吹きつけ、液面への衝突と水滴の飛散によって塵埃を水中に捕集するもので、清浄ガスは2枚の水分除去板をくぐって上方より排出される。中圧損のスクラバーで0.5ミクロン以上の粒子の除塵に用いられる。

(イ) 構造が簡単で、微粒子の捕集効率がよく、保守点検が容易である。

(ロ) 圧力損失は 200~400mmAq の間で使用され、1ミクロンのダストも 0.1gr/m³ まで下げる事が出来、40gr/m³ までの高濃度の含塵ガスもプレダスターなしで使用出来る。

(ハ) 洗滌水量は処理するガスの飽和ガス量 1 m³ に対して 0.5~1 l をベンチュリー筒に循環させるが、実際に消費される水量は 0.1 l/m³ 程度である。またリサイクルは濃度30%まで許容される。

(2) 標準型式

処理するガスの飽和ガス量により第9表および第12図に示す型式が準備されている。

(3) 適用例

適用例の一部を第10表に示す。

表9 エアトロン ベンチュリー インピンジメント スクラバー標準型式

型 式	飽 和 ガス量 m ³ /min	入口径 mm	出口径 mm	直 径 mm	高 さ mm
605	15	100	140	430	860
610	30	140	200	610	1,240
619	55	170	270	760	1,520
625	70	200~220	300	910	1,820
635	100	270	370	1,420	2,840
645	125	280~300	420	1,730	3,450
665	185	320~360	500	2,110	4,210
6,110	310	380~480	640	2,260	4,500
6,150	425	500~550	760	2,410	4,810
6,200	565	640	890	2,570	5,120

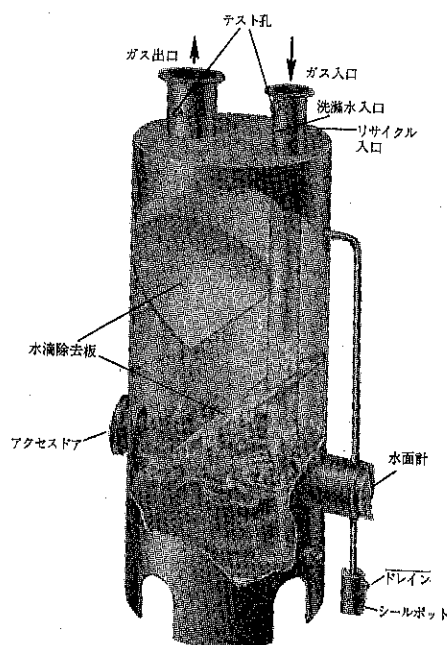


Fig. 11

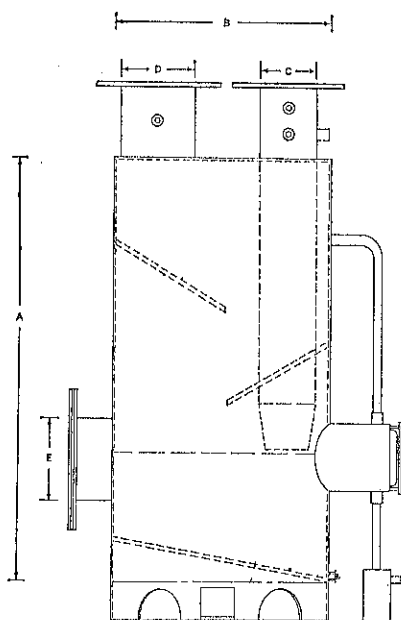


Fig. 12

表10 エアトロン ベンチュリー インピンジメント スクラバーの適用例

機種名	材 質	用 途	風 量 m ³ /min	洗滌水 l/min	圧 損 mmAq	備 考
605	軟 鋼	アスファルトプラント排煙	15	—	—	
610	ステンレス鋼	鉱石ロータリードライヤー排気	30	—	—	
6,110	FRP	FERROUS SULFATE ヒューム	285	—	—	
610	軟 鋼	原石コンベアー除塵	25	—	—	
6,150	軟 鋼	ボーキサイト鉱石除塵	425	—	—	

6. エアトロン 電気集塵機

エアトロン電気集塵機は2種の特許と多くのその他の改良点を持った製品で、乾式および湿式に使用される。

(1) 概要と特色

第13図に示すように、含塵ガスは流入口より入り、入口部バツフルで拡散され均等な流れとなって第一集塵室に入る。集塵室は第一と第二に分けられ、それぞれの室の後にはバツフルが備えられ凝集、捕集が促進される。

(イ) 改良絶縁システム エアトロンは懸垂式の絶縁システムを採用し、破損の恐れがない。また絶縁物の取付けられた空間はリングシールと隙間から乾いた清浄空気を供給することによって塵埃や湿気から保護される。

(ロ) 改良槌打システム ケーシングへの貫通部分が一個所だけの槌打システムで、ハンマーを使用し、ストロークと共に槌打の強さも任意に調節することが出来る。

(ハ) 特許放電極 一般には突起のついた針金やスター

ワイヤーを田いるが、エアトロンはバイポーラー電極と称する薄い平鋼の一方にノッチを附けた電極を使用する。その電極を枠に組んで取付けるため、一般のように重錘の取付けや針金の切断等の面倒がない。また電極間距離が正しくより有効に使用され、高圧でも危険なく運転が出来る(第14図)。

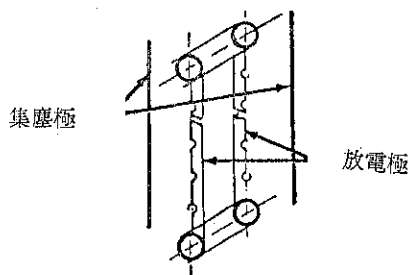
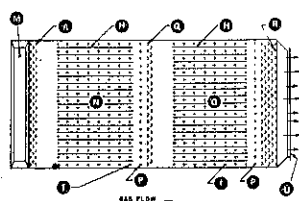
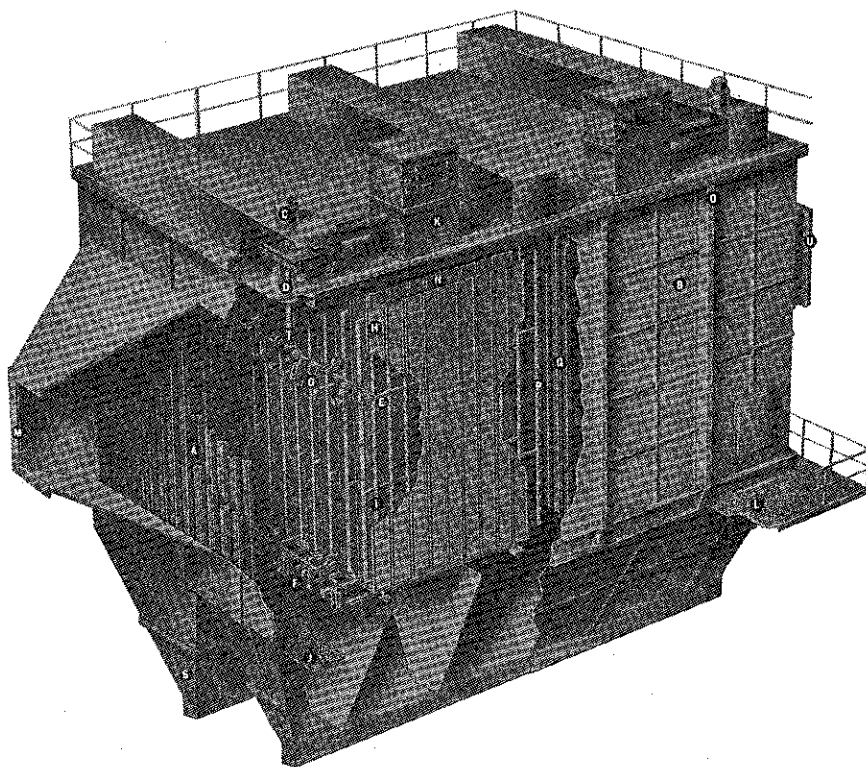


Fig. 14



A 入口トランスバースバツフルシステム
B 接地されたケーシング
C 槌打用モートル
D 懸吊型絶縁装置
E 槌打用リンク
F 集塵極用槌打装置
G 放電極用槌打装置

H 二重面集塵極板
I バイポーラー放電極
J 内部キャツツウオーク
K 変圧器・整流器セット
L 外部キャツツウオーク
M ガス入口
N 第一室
O 第二室

P 二次放電極
Q 電場間トランスバースバツフルシステム
R 出口トランスバースバツフルシステム
S ホツパー
T 槌打用軸
U ガス出口

Fig. 13

(二) 改良された集塵極 エアトロンの集塵極は特別に設計された二面集塵極で、80%以上の捕集開口を持ち、ダストの捕集と再飛散の防止に優れた性能を持つ。(第15図)

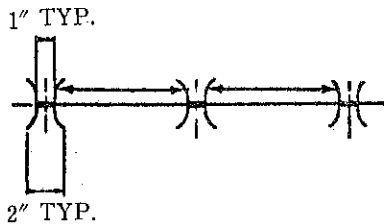


Fig. 15

(四) 特許バッフルシステム それぞれの集塵室の後に電氣的に接地されたバッフルシステムを持ち、機械的には粒子の流れをさまたげ、ガスの流れの移動距離を増大させて粒子の凝集の機会を増大させるとともに、放電極がバッフルの方に延長されていてバッフル自身の上に二次の凝集、捕集が行われ、集塵極の作用も行うことになる

(五) 改良湿式洗滌法 エアトロンの湿式洗滌法は操業中に取付けられた一連のノズルよりガス中に水をスプレーで吹きこむもので、水滴自身がイオン化され、集塵極上に凝集し、ダストを懸濁して、スラッジとして極板を流下し除去されるものである。

(2) 適用例

(イ) 塩基性酸性転炉 圧力損失 250mmAq までの低圧ベンチュリースクラバーとエアatron湿式電気集塵機との組合せにより、99%の集塵効率と出口含塵濃度 0.1 gr/m³ を得た。

(ロ) セメント製造 粒子の選択除去の件で、ロータリーキルンの出口ガスを電気集塵機で捕集し、第一室では高品質のセメントダストを回収し、第二室では高アルカリ成分のダストを捕集する。

(ハ) 発電所ボイラー 灰分の多い石炭を用いる発電用ボイラーの場合も、エアatron電気集塵機は入口含塵濃度 5.5~11gr/m³ に対して出口濃度を 0.1~0.2gr/m³ に下げることが出来た。

(ニ) 硫酸製造装置 硫化物焼成炉の生成ガスを耐酸性のベンチュリースクラバーで約 75°C に冷却し、SO₃ を洗い出す。次にガスを間接冷却で 30~40°C に下げ、鉛ライニングのエアatron電気集塵機によって塵埃を除去し、SO₂ はその後触媒により SO₃ に酸化される。

(ホ) 熔鉱炉設備 ベンチュリースクラバーを冷却およびプレダスターとして使用し、エアatron湿式電気集塵機と組合せ、スクラバー出口含塵濃度 0.4gr/m³ に対して電気集塵機出口濃度を 0.005~0.01gr/m³ に下げた。

(ヘ) コークス炉ガス タール分、油分の除去にベンチュリースクラバーとエアatron電気集塵機を組合せ、残留タール分は 0.04gr/m³ 以下となった。

7. エアatron サイクロン コレクター

粉塵捕集用のサイクロンは従来より使用されている処であるが、エアatron サイクロニックコレクターもA型、B型、C型の3種の標準型式にまとめられて資料、寸法が整理されている。又これを用いてマルチ型に組む事も可能である(第16図)。

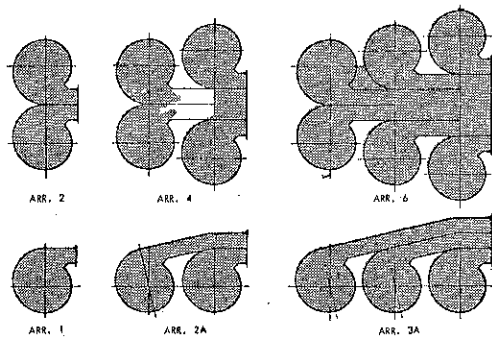
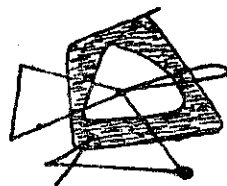


Fig. 16

A型 比重の小さい粉塵、超微粉の粉塵、非常に高い効率。

B型 一般的な適用、所要動力が少い、高い効率。

C型 高い粉塵濃度、所要動力が少い、優れた効率。



ホソカワ ニュース

☆ 厳しく多難な '71 日本経済情勢下に

全力投球で挑戦する営業

—公害、乾燥プロジェクトチーム編成—

昨年下半年からの景気後退—スタグフレーションの影響を受け、設備投資の引締め、金融情勢の悪化等われわれを取り囲む市場客観状況は、「かげり」どころか、まさしく「不況」そのものといわねばなるまい。

年頭に当り、第4次長期計画の第2年度（前期）の目標達成に当って、その情勢の厳しさと共に、事態克服に全社一丸となって思い切った徹底対策を打出す必要性について、副社長より警鐘が打出された。かけて最近のドルショック—円切上問題が、本年度一杯或は数年にかけては景気回復は恐らく見込めない情勢となった。市場（需要家・競争者）と密着し、「刻苦、勤勉し世界のホソカワとしての優位を維持する」（副社長）責務を持つ営業部門では、直ちにその対応策を検討した。すでに、営業部門の強化拡充策の方針が採られると共に、特に本年度は、公害防止プロジェクトチームと、乾燥装置プロジェクトチームを編成、この部門に於けるユーザーの要望に答え、最善のエンジニアリングと受注体制がとれるべく、営業体制を整備した。早急の成果は期待するのは無理としても、やがて年内には、必ずや大きな成果をもたらすであろう。

☆ 熔融亜鉛メッキの発生ヒューム捕集

（公害防止）で、威力を発揮する

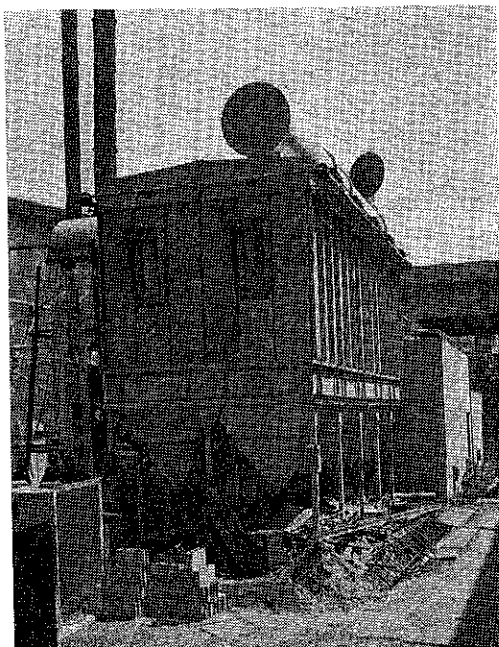
ホソカワ/マイクロ パルスエアー

—労働衛生研、東京都公害部で推せん—

熔融亜鉛メッキは、主として鉄鋼製品が自然界において、腐蝕損傷されるのを防ぐために行なわれている表面処理法である。然るに、その熔融亜鉛メッキを行なう際、フラックス処理したものを熔融亜鉛槽に浸す工程にて、ヒューム（白煙）が発生し、逆に公害と呼ばれる障害を引き起していることは、「皮肉」といわねばならぬ。

この公害防止について、労働省労働衛生研究所（橋爪

技官主担当）、東京都首都整備局公害部（中野技官主担当）で、種々研究が行なわれ、各種集塵機を検討した結果、当社のパルスエアーが捕集効率其の他で、最も優秀な大気汚染防止バグフィルターとして推せんされた。次頁表はその納入例であるが、特にヒューム捕集のフードについて、ホソカワ技術陣の優秀な経験と適用技術によってエンジニアリングされている。今後、さらに数多くの引合、受注決定が期待されている。



（大阪）田中亜鉛鍍金工業所P—2J3型

☆ 米国バイブラ スクリュー

フィーダー社技術提携決まる

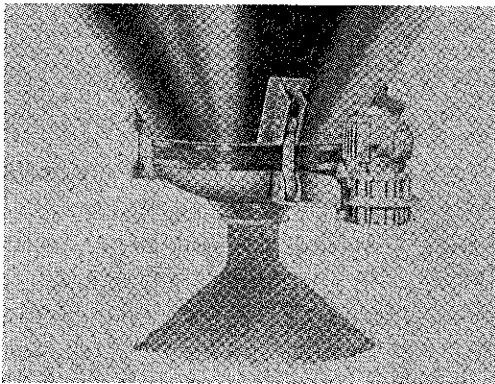
—バイブラ製品ホソカワ内製始まる—

先に、昭和42年4月、Vibra Screw 社と同社製品の販売契約成立により、輸入して国内販売してきたが、ビン アクチベーターを主力に年間約1億円以上の実績を挙げてきたので、当初の方針通り技術提携に踏み切り、昭和46年2月認可申請の許可が通産省、大蔵省（日銀）で決定した。直ちに、図面整備（設計）、内製工程（製造）の準備にかかり、取り敢えずビンアクチベーターのみ価格試算決定（営業）し、内製販売を開始した。輸入販売価格に較べて平均約50%の販売価格減少となり、貯ビン、サイロの粉体架橋防止装置として大きなメリットのあるビンアクチベーターの市場における拡大販売が大きく期待されるであろう。尚、定量供給機としてのライブビンスクリーフィーダー、ヘビィデューティフィーダー

ホソカワ/マイクロ パルスエアー熔融亜鉛ヒューム用集塵機納入実績表

得意先名	風量	ホソカワ/マイクロ パルスエアー型式	濾過面積	濾過率
君津鋼管鍍金株式会社	800m ³ /min	P2G4	498m ²	1.6m ³ /m ² min
東邦シートフレーム株式会社	208	P1F2	124.6	1.67
"	210	P1F3	186.7	1.13
東トタソ株式会社	200	P1F2-24	145.3	1.38
東鋼業株式会社	160	P1F1-48	103.6	1.55
新星鉄板株式会社	160	P1F3	186.7	0.86
三友鍍金工業所	50	P1F1	62.2	0.81
松沢亜鉛鍍金株式会社	70	P1F1-24	83	0.85
高崎亜鉛鍍金株式会社		P1F8	198	
鋼管亜鉛鍍金株式会社	450	P1F5-24	332	1.35
那須電機鉄工株式会社	650	P2G3	373.4	1.74
"	320	P1F4-24	269.5	1.2
大和鍍金株式会社	200	P1F3	186.7	1.07
田中亜鉛鍍金工業所	400	P1F4	249	1.6
"	1,200	P2J-5	720	1.66
"		P2J-3	432	
大阪鉄板株式会社	160	P1F1-48	103.6	1.55
大東鋼業株式会社	160	P1F2	124.6	1.30
南海亜鉛	350	P1F3-24	203.4	1.72
"	80	P1F1	62.2	1.29
日本亜鉛	550	P2G3-48	414.8	1.32
三協化学	430	P1F5	311.2	1.37
"	430	P1F5	311.2	1.37
大阪亜鉛工業	720	P2G3	373.4	1.92

一も早急に内製準備中であり、近く大幅なコストダウンの上、内製販売される予定である。



☆ 共産圏向プラント受注

一ぞくぞく決定 (貿易部)一

現在貿易部では、欧米地域は各クロスライセンスメーカーがあり、直接貿易は主として、東南アジア圏、韓国、台湾、オーストラリア、フィリッピン等が対象とな

っているが、昭和43年の中国との技術交流問題、ソ連、ルーマニアへのプラント輸出を契機に、共産圏諸国との引合受注が活発化しつつある。

最近では、5月ソ連向の石炭乾燥粉砕装置の引合があり、7月田中部長出張の結果、東京貿易を経由して、総額約15万ドルで成約し、11月末船積み予定で、このプラントが現地で成功すれば、引続きリピードオーダーが見込まれている。この成約は、西独、英国の競合メーカーとせり合い、しかもこれら海外メーカーより見積価格が高かったにもかかわらず受注したもので、これまでのソ連向けの実績と技術力が高く評価されたものとして、まさしく「世界のホソカワ」としての自覚を高めつつある。同時にハンガリー向農薬プラントが、住友商事を通じて商談を進めており、ほぼ内定している。チェコスロバキアからも鉱石関係のプラント引合があり、同時に、昨年タルク、ベントナイトプラント輸出の実績を持つルーマニアからも鉱石関係の2億円近い引合もある。いわば、貿易部は、現在共産圏からの引合の花ざかりと云えよう。その成果を期待したい。

☆ 第5回「工場粉じん対策」講習会開催

主催 粉体技術談話会

—昭和46年8月19日～21日（3日間）

於 研究所3階講堂—

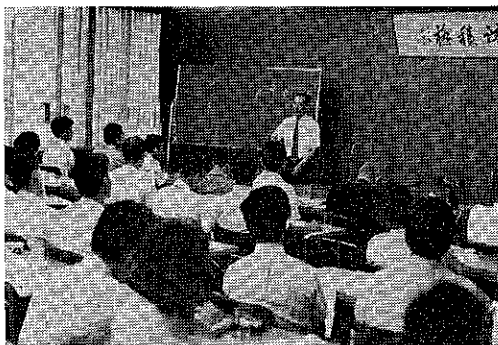
参加人員 80名

内 容 （敬称省略）

1. 粉じんやガスに対してどんな規制があるか。
大阪府公害室大気課計画係長 左子 茂
2. 粉じんの種類・ガスの種類およびこれ等が人体にどんな悪作用を与えるか。
塵肺研究所所長 中村 喜義
3. 空气中、煙道中の粉じん・ガスの量はどのようにして測るか。
大阪市立大学工学部助教授 森島 直正
4. 有害ガスを洗滌するにはどんな方法があるか。
大阪府立大学工学部教授 吉田 哲夫
5. 粉じんをとり除くにはどんな集じん機がよいか。
京都大学工学部教授 井伊谷鋼一
6. 集じん機製品の紹介
細川鉄工所技術部長 丹羽 久雄
7. 局所排気技術（粉じんや有害ガスを集めるにはどんな方法がよいか）
労働衛生研究所労働環境部主任研究官 橋爪 稔
8. 座談会「工場粉じん対策」
司会 大阪府立大学工学部教授 矢野 武夫
京都大学工学部教授 吉岡 直哉

パネルメンバー

大阪府公害室	左子 茂氏
塵肺研究所	中村 喜義氏
大阪市立大学	森島 直正氏
大阪府立大学	吉田 哲夫氏
京都大学	井伊谷鋼一氏
細川鉄工所	丹羽 久雄氏



労働衛生研究所 橋爪 稔氏

今回は、現在最も脚光を浴び社会問題化している企業一産業の公害防止問題の中で、特に「工場粉じん対策」にテーマをしばって開催、特に初心者向けを対象に内容を講師に依頼したため、各方面から申込みが殺到したが、会場人員の制約上、大半ご遠慮をお願いする始末で、紙面をかりてこの際深くお詫び申し上げます。尚、ご辞退いただきました方には、テキストのみ送付させて頂きましたが、まだ50部程残部がありますので、細川鉄工所営業本部室までお申込みあれば、送付致します。

☆ ギラム貿易部長逝去



ギラムさんの愛称で社内外に親しまれ、ホソカワにこの人ありと高く評価されていた貿易部長ミルバノク・チャールズ・ギラム氏が、昭和45年11月7日、心不全のため逝去された。1917年米国シヤトル市で生まれ、アメリカ陸軍軍人と

して第二次大戦に従軍され、沖縄で現地除隊後、大阪、大和物産に入社、昭和35年2月ホソカワに入社され、約10年半勤務されました。享年53才。この間「会社の方針を体得され、顕著な海外活動を展開してくれました。十数件に上る技術輸出、技術輸入の国際契約の締結、それに当社製品の輸出増進に努力されました」（社長）業績は、まことに輝かしいものがありました。日本の風土、気候、人情、食べ物のすべてを愛され、神戸再度山のふもとに静かに安らかな永遠の眠りにつかれたギラムさんに、心から哀悼の意を表したいと思います。

☆ ホソカワニュース（社内報）

毎月1回継続して発行中

前号で発刊の旨、紹介いたしましたが、爾来毎月1回発行し、既に20号（昭和46年9月号）を数えており、全従業員とその家族及び関係業者と、ご希望によりユーザー各位に配送しております。ご希望の方は、総務課社内報係までお申込み下されば、リストアップの上、毎月郵送させていただきます。

☆ ホソカワ出展、各種展示会

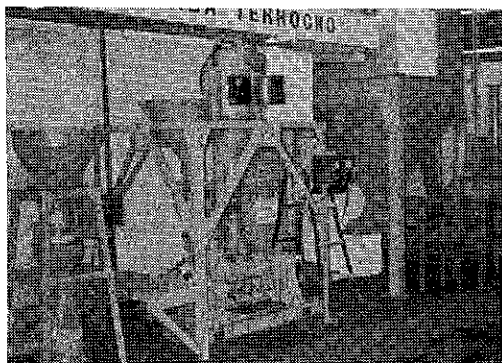
● モスクワ国際化学展

と き 昭和45年9月10日～9月24日

出向者 大阪営業部 森本(大)課長

出品機種

①スーパーミクロンミル ②ミクロン セパレーター



③パルスエアー ④フロートロン

粉碎機・集塵機では、日本・欧米での出品は殆んどなく、ヨーロッパでは単体出品があった程度で、一連の機械をセットして出品したのはホソカワのみで、人気が集まり、PR効果は十分にあった。

● '71 公害防止産業展

と き 昭和46年3月19日～3月24日（6日間）

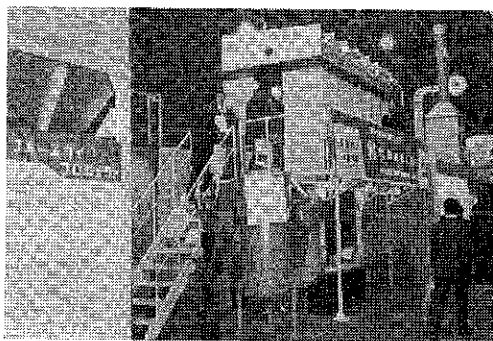
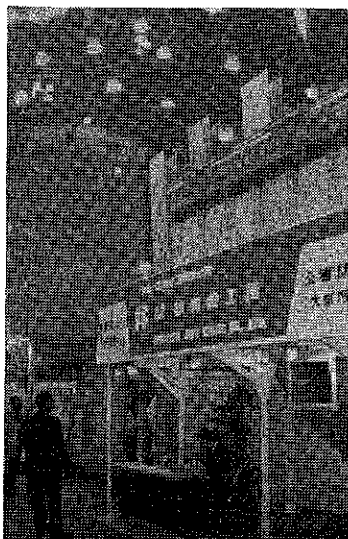
ところ 東京・晴海・見本市会場

出品機種 ①ジェット型集塵機 ホソカワ／マイクロパルスエアーIC2型（内部公開型）
②新開発グラスファイバー集塵機 ホソカワ／ミクロン高温バッグフィルター
③新技術提携一湿式集塵機 ホソカワ／マイクロ エアトロン ベンチュリースクラバー（401型）

小間来場記名者数 約1,000名

展示中引合件数 約50件

なお期間中、日本工業新聞社主催で「公害技術セミナー」が開催され、当社は東門生産本部長が、1時間半に



わたって「バッグフィルター集塵機一般について」の講演を行なった。

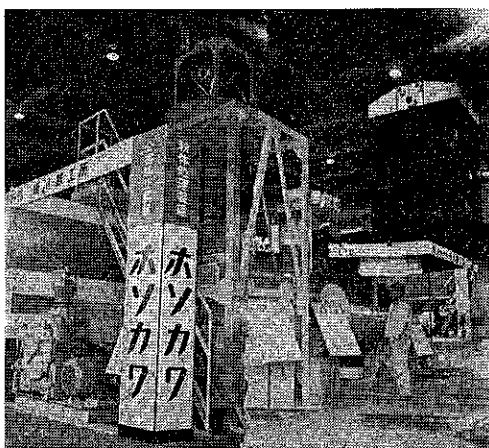
● 第9回東京国際見本市展

と き 昭和46年4月16日～5月5日

ところ 東京・晴海・見本市会場（3号館4小間）

出品機種 ①新開発 高温バッグフィルター
②かくはん型乾燥機 ソリッドエアー
③粉体架橋現象防止機 ビン アクチベーター
④粉体定量供給機 ヘビィビューティフィーダー

特に、ソリッドエアーとビンアクチベーター、ヘビィビューティフィーダーは、パルスエアー小型2基を利用して実演の効果を図った。



● シンガポール日本産業見本市（ジェトロ後援）

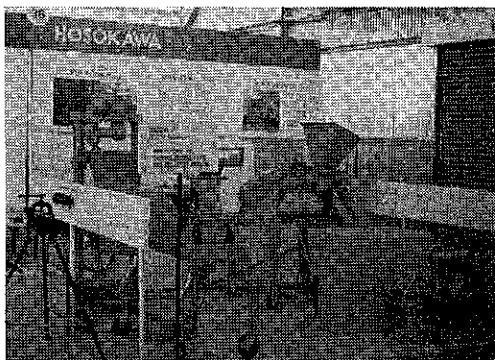
と き 昭和46年2月20日～3月5日

日本企業の出品社数 117社

ホソカワ出品機種

①デイスパーミル ②マイクロ パルペライザー ③
ナウタミキサー ④フェザーミル

入場者数 20万以上（シンガポール人口の約1割）



出向者 貿易部 佐藤主任

東京支店 藤井営業部長（東南アジア マーケット調査を兼ねて）

● 徳島県工業展（公害防止産業展）

と き 昭和46年6月1日～6月3日

ところ 徳島市体育館

出品機種

①湿式集塵機 エアトロン ②ジェット集塵機 パルスエアー ③高温バグフィルター（大型写真パネル）



● その他 鋳物公害防止コーナー（東京・大阪）



海外ニュース

46. 5 太田東京技術係長台湾出張

（裕盛化工試運転他）

7 織田大阪 “ ”

（友誼豊試運転他）

“ タイ国代理店 ユナイテッドビクトリー
チョクチャイ氏・マレーシア代理店 ケ
ョケトレーディング チャン氏 実習の
ため一ヶ月滞在

“ マイクロバル ライナワー社長夫妻来社

“ 田中生産管理部長ソ連出張

（石炭粉砕装置 \$146,000 受注）

“ 森本東京技術課長ハンガリー出張（農薬
混合粉砕装置受注）

編集後記

- 今号“粉砕” No. 16は多数の先生方の御寄稿を頂き、豊富な内容となりました。編集子一同お礼申し上げます。
- 松井先生の「粉砕理論」は今までの粉砕理論を整理されると共に先生の研究の集大成ともいえる大変な労作で、読者諸兄の御参考になるものと確信します。
- その他本号は多くの労作が寄せられ、うれしい悲鳴をあげた次第です。今後其他誌にないユニークな編集をしてみたいと存じますので建設的な御意見および御批判をどしどしお願いいたします。

≡粉 砕≡ No. 16 1971年 秋季号

昭和46年10月20日 印刷

昭和46年10月23日 発行

編集者 鈴木 昭 明

中 川 文 雄

（非売品）発行所 細川粉体工学研究所
大阪府枚方市招提田近1丁目9

印刷所 ナニワ印刷株式会社
大阪市北区川崎町38

ホソカワ

粉体処理機械装置

■【特許】超微粉碎機

スーパーミクロンミル

(特徴)

- (1) 平均粒径 3~5 ミクロンの超々微粉碎。
- (2) 特殊ノズル式分離機により鋭敏な分級効果を示すと共に異物の除去排出をして粒度の均一、製品の純度向上に卓越した性能を示す。
- (3) 粉碎室の2段階合による粉碎効果の増大、その他。

(型式) M52NC, 7.5P

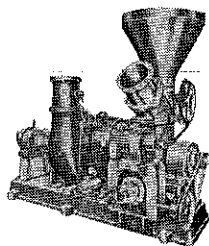
M202NC, 20~30P

M602NC, 50~75P

1957年 紫綬褒章受賞

1955年 發明賞受賞

日、米、英、仏、特許



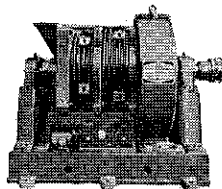
■ 大型超微粉碎機

スーパーミクロンミル

M300型 (300P)

スーパーミクロンミルの超大型化

- (1) 直結駆動型設計
- (2) 異物排出ノズル別駆動
- (3) 分割型ライナーで保守経済性向上
- (4) 耐摩耗性の向上
(替刃 28Cgo 鋼)



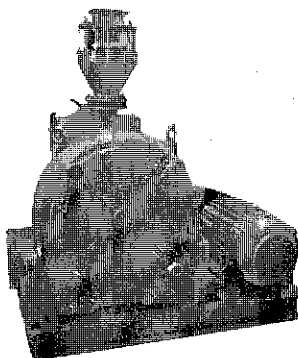
■ 低融点物質微粉碎機

ビクトリーミル

〔新開発製品〕

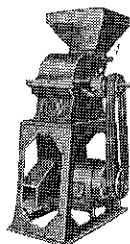
- (1) 合成樹脂などの低融点物質を効率よく粉碎できる。
- (2) 従来の粉碎機の約3倍以上の能力が得られる。
- (3) 繊維状の粒(ヒゲ)の混入が極度に少ない。
- (4) 安定した運転にて均一な製品が得られる。

型式 3.75~22kW



■ 粗・中碎機ハンマーミル

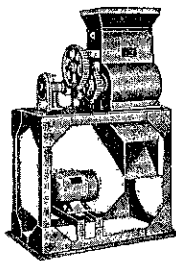
- (1) 粗・中碎を目的とした鉱石、肥料、食糧品、薬品など広い範囲に用いられる。
- (2) 処理能力が大きく、粒度調節可能。
- (3) 構造堅固で取替容易である
(型式) H-8 (1P) H-12 (3P), H-15 (5P)
H-18 (10P) H-24 (20~30P)



■ 粗 碎 機

アイスクラッシャー

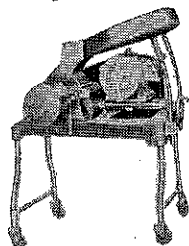
上機ロールミルの機構に鋭利な錐状突起がついている。化学工場の氷の割砕、レダソその他大塊の中砕機として好適。
(型式) 1P~5P



■ 中 碎 機

フェザーミル

- (1) 医薬品、食品の造粒用に最適。
 - (2) 粉体接触部はステンレス製で異物が入らない。
 - (3) 取り扱いと調節が簡単。
 - (4) 処理能力が大きく、所要動力が小さい。
- (型式) 3~5P用

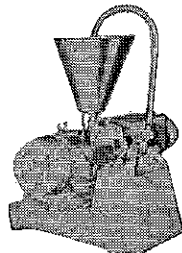


■【特許】湿式ミル

ミクロンニューコロイドミル

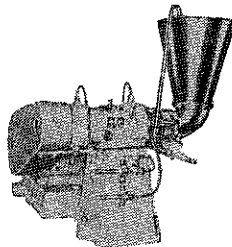
ミクロンミルの機構を取入れた湿式粉碎機で。

- (1) 固体粒子と液体の混合懸濁及び微粉砕。
- (2) 液体と液体の混合懸濁反応の促進。
- (3) ペイント、顔料、飲料、化粧品などの薬品工業用。
- (4) ステンレス製
(型式) NC-1 5P。



■ 乳 化 機 ディスパーミル

- (1) 取扱分解掃除が容易。
- (2) 反復運転可能。
- (3) 発熱気泡少ない、分散乳化機である。
- (4) ステンレス製。
(型式) D-1 (5P)
D-2 (7½~10P)

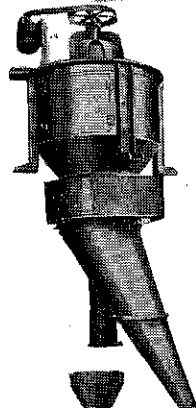


■【特許】分 級 機

日・米・英・仏・特許
独・加・瑞・特許出願中

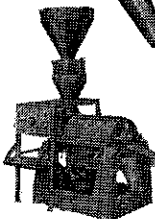
ミクロンセパレーター

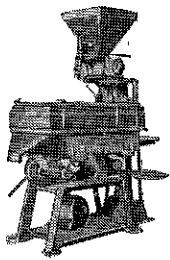
- (1) 分級範囲が広い。0.3mm から2μ迄自由。
- (2) 分級精度がシャープで回収率が高い。
- (3) 構造簡単で運転と調節が容易。
- (4) 各種粉碎機への附設が容易
(型式) MS-0~MS-7 各種



■【特許出願中】微粉用篩機 ミクロンウルトラシフター

- (1) 48~200メッシュの微粉用専用シフター
- (2) 強力な振動と回転拡散翼の効果により従来不可能な粉体のフルイも可能
- (3) 最高の篩分効果で処理能力も従来の数倍以上の高性能発揮、工業用フルイに最適
(型式) US-0, US-1, US-2

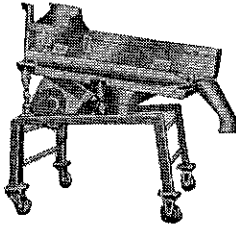




■【特許】篩機

パイプシフター (A型)

- (1) 凝集性大なる粉状、粘着性のものも可能。
- (2) 金網面の閉塞がない。
- (3) 高性能で小型、所要馬力小
- (4) 創意の垂直旋動運動1段式及2段式有り、
(型式) VSA-1 (1/2HP)
VSA-2 (1HP) VSA-3 (2HP)



■【特許】篩機

パイプシフター (B型)

- 1 2 3は上機と同様。
- (4) 振動は本機内部に吸収されるので基礎不要
- (5) 伝導用モートルは不要で可搬型である。
- (型式) VSB 1 (1/4HP)

■造粒機

ミクロン

グラニューライザー

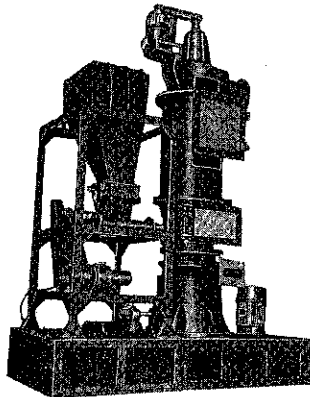
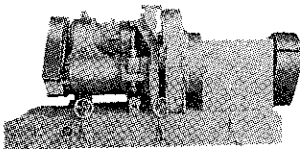
回転する円筒形のダイスの中に回転する押出しロールを配したペレットミルタイプの造粒機です。

- (1) 発熱及び摩耗が少ない
- (2) 異物の混入がない
- (3) 清掃が容易
- (4) 低動力で処理能力が大きい
- (5) 適用範囲が広い

(型式)

MG-1 (5HP) ~

MG-2 (10HP)



■【特許】粉碎乾燥機

マイクロンドライヤー

- (1) 粉碎、分級、乾燥を一工程で処理。
- (2) 卓越した乾燥効率を有し均一な乾燥が出来る。
- (3) 極めて大きい能力を有しながら振付面積が小さく簡潔になっている。

(型式)

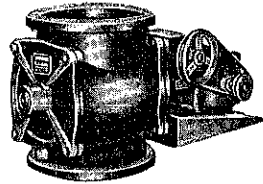
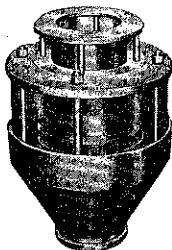
MD-1 ~ MD-5

■粉粒体供給排出装置

フロートロン

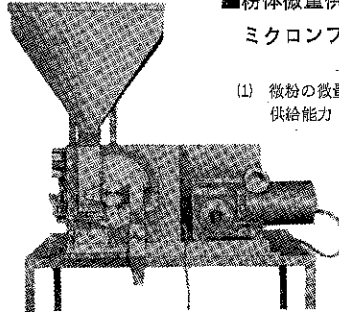
日・英・米・独・仏・特許

- (1) モートルを使用する事なく粉体の供給排出用として珍らしい機構を有している。
- (2) 簡単な機構で巾の広い調節可能。
- (3) 摩擦部分がなく粒体を破壊する事なく排出出来て粘着もなく円滑な排出が出来る
(型式) AV-2 AV-3 2種



■ロータリーエアー ロックバルブ

- (1) 気密を要するホッパー、サイクロンなどの粉粒体の定量の取出し供給用として、用途が広い。
- (2) 空気の漏洩がなく故障が少ない。
- (3) 取扱い簡単。
(型式) 各種あり



■粉体微量供給機

ミクロンフィーダーD型

【特許出願中】

- (1) 微粉の微量供給機
供給能力 0.1 ~ 150g/min
- (2) 供給精度が高い
(±1~2%)
- (3) 供給能力の調整範囲が広い
(1~90)

■ブリッジブリーカー

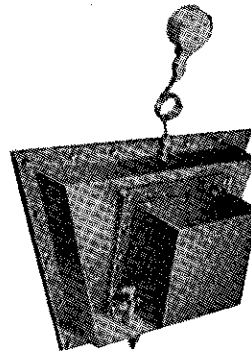
【実用新案出願中】

(粉体架橋現象防止装置)

貯蔵、ホッパー等から粉体を連続的に排出するとき、粉体の架橋現象を防止するためのコンパクトな装置です。特殊多孔質合成樹脂板を分散板として、少量の瞬間的コンプレッサーエアーにて効果的にブリッジを防止します。

(型式) BB-1型

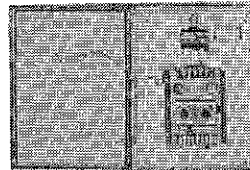
(噴射面積により3種)



■マイクロモニター

この装置はメインモートルのロードに応じてフィードモートルをコントロールし、自動的にオーバーロードを制御する装置です

- (1) 原料の連続的流量を保証
- (2) 自動粉砕による増産への寄与
- (3) コンパクトキャビネットによる取付簡易

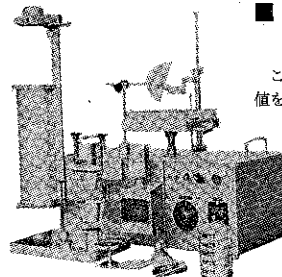


■粉体特性総合測定装置

パウダーテスター

この装置は粉粒体の次の7種の特性値を測定することができます。

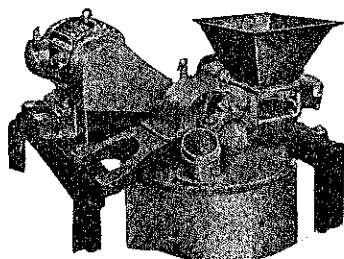
- (1) 安息角 (5) 分散度
 - (2) 圧縮度 (6) 差角
 - (3) 凝集度 (7) スパチ
 - (4) 崩潰角 ニラ角
- 粉体装置設計の基礎資料のために、また粉体製品の品質管理に便利です。



ホソカワ

技術提携製品

米国 MIKRO PUL 社技術提携製品



■ 微粉碎機 バルベライザー

- (1) 据付面積小さく能力大、 (2) 容易に分解組立出来る。
(型式) A P-1 SH A P-2 DH A P-3 TH
A P-4 TH (5HP~75HP)

■ 低融点微粉碎機

バルベライザー S型

- (1) 軟化低融点、靱性物質の微粉碎用、特殊型。
(2) 標準水冷型



■ 小型微粉碎機

ホソカワ/マイクロバタムミル

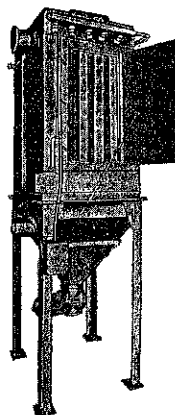
- (1) 粉塵が立たず組立掃除容易
(2) 自動フィーダー
(型式) 1HP (3相)

実験用微粉碎機

ホソカワ/マイクロサンブルミル

研究所、試験室用
(型式) 1HP (3相)

■ 集塵装置 パルスエアーコレクター



P-20A-6型 (小型)

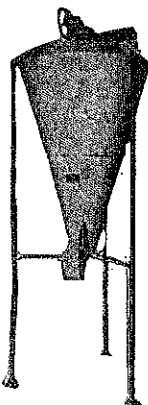
すばらしいジェットアクションによる完璧な自動清掃機構を備えた集塵機です。

- (1) 捕集効率 99.99%
(2) 可動部分なし
(3) 含塵濃度が高くとも使用出来る
(4) 所要濾過面積は他種に比して最少
(型式) 12-A6, 20-A6, 36-A6, 48-A6, 1C1, その他各型式

現在、化学工業、プラスチック工業、ペイント、染料、カーボンブラック、食品工業、砂糖、穀物、精粉飼料、医薬品、工業薬品、化粧品、鉱物、セメント、クレー、炭カル等の有価塵の捕集を始め、特に、近年社会問題化している公害防止等世界のあらゆる分野で使用されております。

オランダNAUTA社技術提携製品

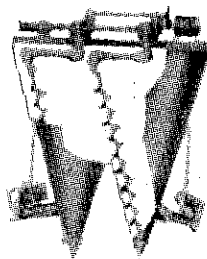
■ 高性能混合機 ナウタミキサー



自転するスクリーが円錐型容器の壁に沿って公転し、ミキサー全体にタテとヨコの流れを生じさせる、いわゆる交叉流混合効果により、極めて完全かつ迅速な混合を行います。

- (1) 交叉流効果により、極めて小さい動力消費で能力が大 (2000l で 5 HP)
(2) 大容量回分混合が可能のため、少ない時間で大量の精密分岐が出来、広い用途を持つ。
(3) 水冷、加熱、液体添加容易
(4) 機構簡單、取扱、掃除容易
(5) 安全運転。
(型式) 30l ~ 10000l

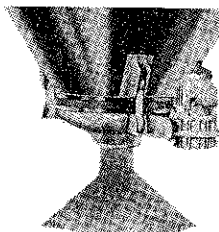
■ 複合型混合機 ナウタコンビミキサー



- (1) 高混合比および混合時間の短縮に最適。
(2) 連続投入方式も可能
(型式) 400l ~ 6000l

米国VIBRA社技術提携製品

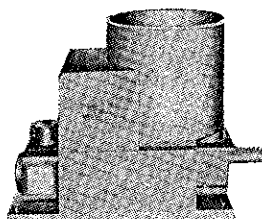
■ 粉粒体連続排出機 ビンアクチベーター



- (1) どんな粉粒体原料でも、どんな貯ビンからでも効果的で安定した排出が可能
(2) 最初に供給された原料が最初に排出される
(3) ブリッジ、アーチング、ラットホール現象を防止し、粉体のつまり、断続排出をなくす
(4) 新設・改設を問わずいかなるビンにも取付可能
(型式) BA-3型~BA-10型

■ 粉粒体定量供給装置 ライプビンスクリー

フィーダー



回転振動スクリーと振動ホッパーとの組み合わせたもので極めて精度の高いフィーダーです。

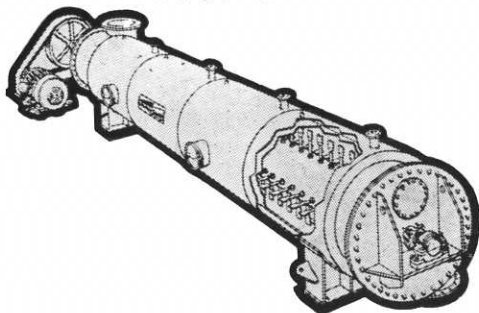
- (1) フィード量の調整が容易
(2) 定量性が極めて高い
($\pm 1 \sim 2\%$ 以下)

(型式) VLS-1~VLS-10
他にヘビードューティフィーダー其他各種大量供給用としてフィーダーがございます。

米国 STRONG SCOTT 社技術提携製品

■ 攪拌型乾燥機

ソリッドエアー



合成樹脂等の弱熱性物質の乾燥または溶剤回収に!!

- (1) 外気遮断が容易である。
 - ・溶剤の回収が容易
 - ・暴気により変質し易いものの乾燥が容易
 - ・加圧または真空操作が容易
- (2) 凝集塊の発生が防止できる
- (3) 最小の熱風量ですむ
- (4) 製品の放散汚染が少ない
- (5) 混合乾燥ができる
(型式) S J 10-6 (2.2 kW) より各種、この他に絶対乾燥に威力を発揮するコンティニューエーターもございます。

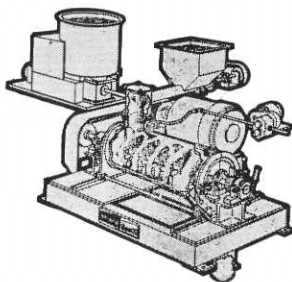
■ 混合分散機

タービュライザー

円筒容器内で多数のパドルをとりつけたシャフトが高速回転し、凝集塊、液体添加の混合分散に威力を発揮します。

- (1) 液体を粉体中へ均一に完全分散
- (2) 原料中の凝集塊を破壊
- (3) ミクロ的な均一混合が可能
- (4) 連続混合

(型式) 各種あり



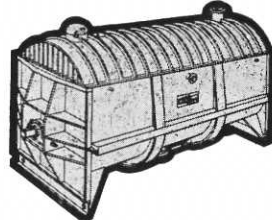
■ 混合機

リボンブレンダー

- (1) 排出時残留粉体は僅少
- (2) 液添可能
- (3) シャフトの脱着が可能
- (4) 低動力で迅速混合が得られる

(型式)

I M9(3HP) ~ I M680(60HP)



仏国 NEYRPIE 社技術提携製品

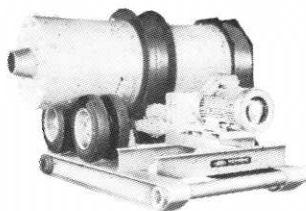
■ 粗 碎 機

グラビコン

いわゆるジャイレトリックラッシュャーで圧壊による旋動式破碎機です

- (1) 鉾石の粗碎に最適
- (2) 運転が簡単で粒度調整容易
- (3) 頑丈且つ分解組立容易

(型式) A 500, A 750



■ 粗 碎 機

ロッドミル

いわゆるロッドミルで自動車の差動装置とタイヤを利用してミルを駆動させる

- (1) 動力が少なく処理量が大である
- (2) ミルの振動を吸収し騒音が少ない
- (3) 据付労力が省け、場所の移動が簡単
- (4) 維持費が安い
(型式) 各種あり

細川粉体工学研究所・試験室の開放!

当社には別に上記研究所を設け、(枚方)学界、業界の権威者を網羅し、粉体工学部門の開拓、研究にわが国最高の智脳を結集して、各位のご相談を承わっております。また技術部では大阪・東京にて多数のテスト機を設備してご遠慮なくご利用を願っております。

絶えずご需要家のご便益に奉仕し、緊密な接触を保てることが当社の念願であります。

“あらゆる粉体処理機械・装置とそのエンジニアリングのご相談はホソカワへ!”



株式会社 細川鉄工所

本 社・工 場	大阪市港区市岡 2 丁目 14 番 5 号	〒 552	TEL 大阪 (572) 5371 (代)
枚 方 工 場	大阪府枚方市招提田近 1 丁目	〒 573	TELEX (525) 3044
東 京 支 店	東京都港区芝罘平町 40 (第 19 森ビル)	〒 105	TEL 枚方 (0720) 56-5545~7
細 川 粉 体 工 学 研 究 所	大阪府枚方市招提田近 1 丁目	〒 573	TEL 東京 (503) 2231 (代)
			TELEX (222) 4568
			TEL 枚方 (0720) 57-3721~2

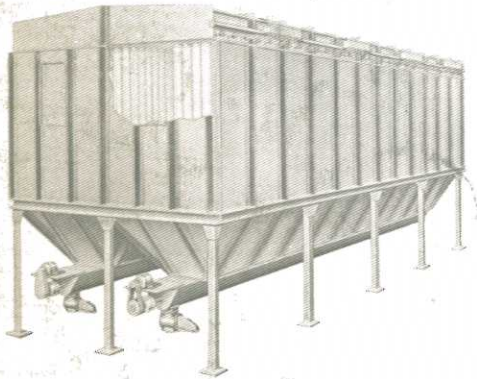
乾式集じん機

ホソカワ / マイクロ

パルスエアークレクター [特許]
(米国MikroPul社技術提携)

- * ジェットパルスによる完全なる自動連続清掃機構である。
- * 99.9%以上の高度の捕集効率。
- * 濾過面積が他機種の $\frac{1}{2}$ ~ $\frac{1}{3}$ ですむため据付場所が節減できる。
- * 機械可動部分がないので故障の心配がない。
- * 逆洗空気による清掃のため濾布の寿命は半永久的である。
- * 圧力損失は常に一定である。

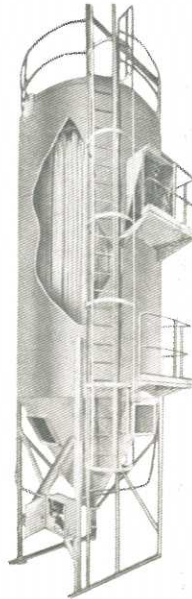
型式 濾過面積 5.1m²
より各種
耐圧型は 3.9m²
より各種



ホソカワ / マイクロ

モジュールアー
(米国MikroPul社技術提携)

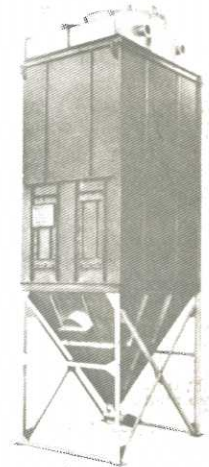
- * 捕集効率 99.9%以上。
- * 維持費が安い。
- * シューキング式清掃機構。
- * 各種濾布が使用できるため用途が広い。
- * 許容温度 280℃。
- * 故障が少ない。
- * 据付費が格安である。



ホソカワ / ミクロン

高温バッグフィルター
(新開発製品)

- * トップインレット方式である。長尺の濾布が使えるため据付面積が僅少ですむ。
- * 合理的なハウジング構造のため経済的である。
- * コラプス式清掃機構である。逆洗空気による清掃のため濾布の寿命が長い。
- * 濾布の取付・取外しが容易である。
- * 特殊なダクト閉閉方式(特許出願中)により、排気中のダスト濃度が少ない。
- * 圧損変動が僅少である。



湿式集じん機

ホソカワ / マイクロ

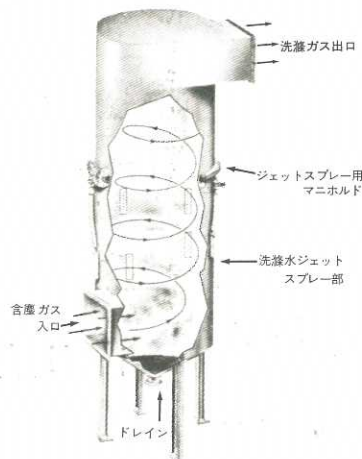
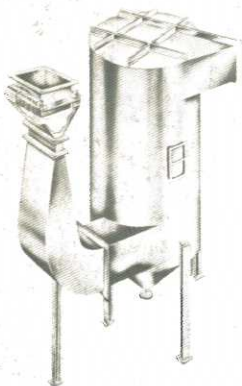
エアートロン製品
(米国MikroPul社技術提携)

ホソカワ / マイクロ

エアートロン ベンチュリー スクラバー [特許]

- * 構造が簡単で建設費が安い。
- * 高温ガスの大量処理が容易である。
- * 集塵とともにガス吸収、中和等のプロセスが可能である。
- * 豊富な適用経験により適確な捕集効率を定めるため、所要動力を節減できる。
- * 可動部分が少く、保守が簡単である。

適用分野
化学工業、肥料工業の集塵、排煙集塵、各種炉の排ガス処理。
型式 容量30m³/minより各種

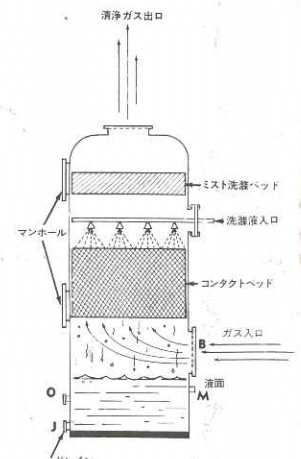


ホソカワ / マイクロ

エアートロン サイクロニック スクラバー

- * 98~99%捕集する除塵装置として。
- * 水に溶けやすいガスの吸収装置として。
- * 中和・反応装置として。
- * 高温燃焼ガスの冷却装置として適する。

型式 容量30m³/minより各種



ホソカワ / マイクロ

エアートロン バックドタワー

- * 有毒・有害ガスの除去、有用成分の回収。
- * 効率のよい吸収が可能である。
- * 圧力損失が少く、動力消費が節減できる。