

新 碎

THE MICROMERITICS

編集委員会制発足記念号

NO. 17 AUTUMN 1972

細川粉体工学研究所

“粉 碎” 17号 昭和47年 秋 季 号 目 次

〔巻 頭 言〕	「粉碎」編集委員会の発足…………… 大阪府立大学工学部	矢野 武夫…………(1)
	編集委員会の発足に当って……………	(2)
〔報 文〕	誘電特性を利用した粉体の水分測定…………… 北海道大学工学部	中島 裕夫…………(3)
		倉前 正志
		田中 達夫
〔報 文〕	攪拌型粉体混合機内の粉体の流動と…………… 大阪府立大学工学部	矢野 武夫…………(10)
	混合に関する実験的研究……………	佐藤 宗武
〔報 文〕	二次元水平円筒型混合機を用いた粒体混合に…………… 大阪府立大学工学部	矢野 武夫…………(22)
	おける密度に分離偏析の研究……………	寺下敬次郎
		細川粉体工学研究所 武者 孝敏
〔報 文〕	色素吸着法による表面積測定…………… 富山大学工学部	諸橋 昭一…………(34)
		川口 初男
〔報 文〕	空気圧による粒子充填層の体積変動…………… 信州大学繊維学部	佐納 良樹…………(40)
		矢ヶ崎孝彦
〔報 文〕	粉末と包装材質—包装材質面における…………… 東京大学病院薬剤部	篠崎 勲…………(46)
	粉末の滑り易さの検討……………	
〔報 文〕	水ガラス系硬化体における白華の検討…………… 菊水化学工業㈱中研	長谷川 勝…………(50)
		山内 史朗
〔報 文〕	モデルビン壁面における粉体圧の測定…………… 細川粉体工学研究所	中川 文雄…………(57)
		島谷 敏久
		鈴木 昭明
		横山 藤平
〔寄 書〕	圧縮における Bockstiegel 式と川北式について…………… 法政大学工学部	川北 公夫…………(66)
		池田 正明…………
〔随 筆〕	倉敷にて—新湊園の石臼群…………… 富山大学工学部	沢 島 恭…………(67)
〔技術報告〕	ビクトリーミルの汎用化…………… 細川粉体工学研究所	鈴木 昭明…………(68)
	—スリットライナーの適用について—……………	安芸 良明
〔解 説〕	粒度に関する試論 (第 1 回)…………… 東京大学工学部	菅沼 彰…………(76)
〔総 説〕	粉粒体の密度測定…………… 法政大学工学部	川北 公夫…………(81)
		池田 正明
〔文献紹介〕	石炭粉碎過程…………… 九州工業大学	上 瀧 具貞…………(86)
		富田 侑嗣
〔技術ニュース〕	ジャンボパルスエアー、ホソカワ／マイクロエレクトロ…………… 細川鉄工所 集塵機事業部…………(100)	
	フィル・マリタイム……………	
〔新製品紹介〕	湿潤粉体の供給機…………… 細川鉄工所 化学機器事業本部…………(109)	
	ホソカワニュース……………	(112)

フ ン タ イ ス リ ラ —……………(80)

試験室用湿式篩分機 (新製品紹介)……………(108)

粉 の 話……………(39)(56)(111)

「粉砕」編集委員会の発足

大阪府立大学工学部

矢 野 武 夫

「粉砕」という雑誌の編集について、兼ねてから相談を受けていたので、改善策について数年来考えてきました。一応全般的な構想は固まりつつありますが、本日はその一部について意見を述べさせていただきます。

この雑誌の創刊号（1957年秋）と第2号（1958年冬）に述べられております先代社長細川永一氏（現社長の実父）の巻頭言が原点となります。粉砕機（ミクロンミル）の発明、改良研究、その成果を基にしたスーパーミクロンミルの完成と製造など、長年の業績によって紫綬褒賞の榮譽（昭和32年10月23日）をになわれ、それを記念して粉体工学研究の場を提供したい。その場として、雑誌「粉砕」を発行し、さらに細川粉体工学研究所を設立する、という意味の言葉であります。

当時、微粉砕工業は勿論、粉体工業全般にわたり、学問的、技術的に未解決な問題が多く、さすがに時機を得た適当な事業の発足であったと思います。発刊当時、この雑誌はわが国唯一の粉体工学に関する専門雑誌でした。

その後、雑誌「粉砕」は粉体工学の分野において、学問的、技術的、しかもやや気楽な雑誌として成長してきました。その経過で一番注目すべき点は、常に細川粉体工学研究所の事業と表裏一体となって活躍してきたことであると思います。すなわち、細川粉体工学研究所の機関紙として研究所の成果を発表すると同時に、粉体工学の分野における国内外の学問的、技術的進歩の紹介を行ってきました。

このような雑誌発行の事業を15年間継続し、特に年と共に雑誌の内容を充実させることができたのは前社長の遺志をついだ現社長はじめ細川鉄工所幹部の熱意と細川粉体工学研究所員の努力の成果であったと確信します。

さて、最近の雑誌「粉砕」の傾向を見ますと、学界および工業界からの学問的、あるいは技術的論文の寄稿が増加しています。もっとも発刊当初から研究所と関係の深かった研究者からの寄稿論文は根本方針として歓迎し

ていましたが、近年は特にこの傾向が強くなり、わが国の粉体工学の研究者全体に広く門戸を開放して寄稿を求めるようになりました。そして寄稿論文の中には各著者のオリジナルな研究論文が多くなり、さらにその論文の内容も年々向上しつつあります。その上編集者の努力によって、有名な先生方の執筆になった立派な論文は一流学会誌、商業誌などと比較して全然見劣りしません。このような傾向は雑誌「粉砕」発刊の主旨に沿ったものであり、まことに結構なことでもあります。

このようにオリジナルな学術研究論文の寄稿が増加してまいりますと、この雑誌の編集は一考する必要があると思います。編集の事務局的仕事は従来通り、細川粉体工学研究所の編集者におまかせしておくとしても、正式な編集委員は学界、業界の適当な方々に御依頼する必要があります。そして編集委員会を発足させ、一応研究論文査読、オリジナリティの有無、論文の学術的価値および工業に対する応用的可能性などの審査も、寄稿者の研究論文の権利を保証するという立場から必要になってくると考えます。このようにして寄稿論文の学術的価値が認められるようになれば、益々立派な論文が沢山投稿されるようになり雑誌「粉砕」の評価が向上し、引いては細川粉体工学研究所の研究自体も進歩発展すると信じます。しかし、このことによって従来からの気軽に、気楽に寄稿されていた雰囲気が固苦しい気分になってしまつては角を矯めて牛を殺す結果となり十分に気を付けなければなりません。

そして、細川益男所長が「化学工学」第33巻第3号（1969年）の巻頭言“研究所の柱は屋根を支えるためにあらず”、あるいは「粉砕」第13号“細川粉体工学研究所の使命”に述べておられるようになりたいと願います。特に“魂の入った細川粉体工学研究所”の落成披露パーティに招待していただける目を楽しみにしています。

編集委員会制の発足に当って

本「粉碎」誌は今号より編集委員会制を採らせていただくことになり、オリジナルな研究論文については次の諸先生方に査読を御委嘱することになりました。

編集委員会査読委員長	大阪府立大学工学部教授	矢野武夫氏
“ 査読委員	京都大学名誉教授	中川有三氏
“ “	大阪府立大学工学部教授	吉田哲夫氏
“ “	京都大学工学部教授	井伊谷鋼一氏
“ “	京都大学工学部教授	吉岡直哉氏

(御年令順)

「粉碎」誌は、昭和32年創刊以来本号で17号を迎えました。号を重ねるに従って、その内容が質量共に充実して参り、読者の方々から高く評価されておりますことは、誠によろこばしく、これも一重に本誌のために御協力いただきました、学界、産業界の諸先生方のお蔭と深く感謝いたしております。

今回、更に編集委員会制の実現によりまして、本誌が名実共に広く認められることとなり、ひいては御寄稿者の貴重な研究報告の学術的価値が保証されることとなりましたことは、発行者として一端の責任を果たした思いで、誠に喜びに耐えません。ここに編集委員会制の実現に御尽力いただき、またお忙しい中を査読の御承諾をいただきました上記先生方に厚く御礼申し上げます。

「粉碎」誌は、本号巻頭言の矢野先生のお言葉にもありますように、創刊以来粉体工学の分野における専門の技術誌として独自の性格を保ち今日に至りました。その性格は学協会誌のものでもなく、商業誌でもなく、また一企業のPR雑誌でもありません。発行のための費用は全額細川鉄工所から支出されておりますが、そのために特に内容についての圧力を受けたこともなく、かなり自由な編集がわれわれに任せられております。われわれも本誌が、斯界発展のためにお役に立てることのみを念願に、研究業務の傍らこの仕事を続けてまいりました。

学術、技術誌としての品格を保ちつつ、かみしもを着ずに気軽に投稿でき、また親しんで読んでいただけるこのユニークな性格が、「粉碎」誌の大きな特徴であるといえます。

今回の編集委員会制の発足によりまして、査読審査という固苦しい感じのする手順がとられることになりましたが、決して従来の「粉碎」誌のもつ性格が変わったわけではありません。やはり「粉碎」誌は気楽に投稿していただき、親しんで読んでいただける従来のままの技術雑誌であり、またそうでなければならぬと思っております。

年一回発行というハンディがあり、御寄稿者ならびに読者の方々には何かと御迷惑をかけておりますが、このハンディをカバーするためにも、この独自の持味を十分に生かして、今後も編集に当ってはできるだけ実際と密接に結びついたお役に立つ記事を盛りたく、新しい企画をねってゆきたい所存です。

何卒、今後共変らぬ御指導御鞭撻をお願い申し上げます。

編集発行責任者	細川粉体工学研究所	横山藤平
編集事務局	“	鈴木昭明
“	“	中川文雄
“	細川鉄工所企画課長	竹内史幸

誘電特性を利用した粉体の水分測定

北海道大学工学部

中島 裕夫, 倉前 正志, 田中 達夫

1. 緒 言

水の誘電率は一般の固体物質(2~10)と比較して約80とかなり大きい。え、わずかに電解質を溶解しても高い電導性を示すために、粒子の含有水分がその分散系の誘電特性に及ぼす効果はきわめて大きいと考えられる。

したがって、この粒子分散系の誘電特性に及ぼす水分の影響を定量的に明らかにすれば、粉体の水分を連続的に測定できる可能性がある。

粉体の水分測定は工業的にとくに重要であるために、これまでにa) 全乾法、b) 抽出法¹⁾、c) 電導度法²⁾、d) 中性子法³⁾など数多くの方法が考案されているが、a) b) は原理的に連続測定は不可能であり、c) d) は測定可能な水分範囲や物質がかなり限定されていて、いずれも十分満足できる方法とは言えない。

さて、粒子が水を吸着すると、水の高い電導性のために、その分散系は界面分極を生じるが、界面分極の機構は吸着水分の分布状態によって異なるので、分散系の総合的な誘電率に及ぼす水分の影響の度合いもまた、粒子が吸湿性か非吸湿性かによって異なる。

吸湿性粉体については、アルミナゲルに関するM.G. Baldwinらの研究⁴⁾、シリカゲルに関する黒崎らの研究⁵⁾など多くの研究があり^{6,7,8,9,10,11)}、ある特定の物質については、誘電率測定による水分測定が実用化されているが^{12,13)}、測定周波数の影響などについては十分な検討は行なわれていない。

非吸湿性粉体は、水分によって凝集が起こり、粒子の分散状態も変化するため、その分散系の誘電挙動はきわめて複雑になるが、これまで理論的な検討は全く行なわれておらず、わずかにA. PANDE¹⁴⁾、新井ら¹⁵⁾による実験結果が報告されているにすぎない。

ここでは吸湿性粉体と非吸湿性粉体の場合にわけて、我々が先に開発した誘電特性を用いた粉体の流量測定¹⁶⁾に及ぼす水分の影響を実験によって調べ、その実験結果に対して簡単なモデルによる理論的な考察を加えて、粉体の水分測定の可能性を検討する。

2. 測定原理

誘電特性を利用した粉体流量の測定において、粒子が水分Wを含有しているとき、その誘電率を $\bar{\epsilon}_P(W)$ で表わせば、凝集を起こさないときには次式が成立する。

$$K_2 \frac{dC}{F} = \frac{\bar{\epsilon}_P(W) - 1}{\bar{\epsilon}_P(W) + 2} \quad (1)$$

K_2 は電極定数である。

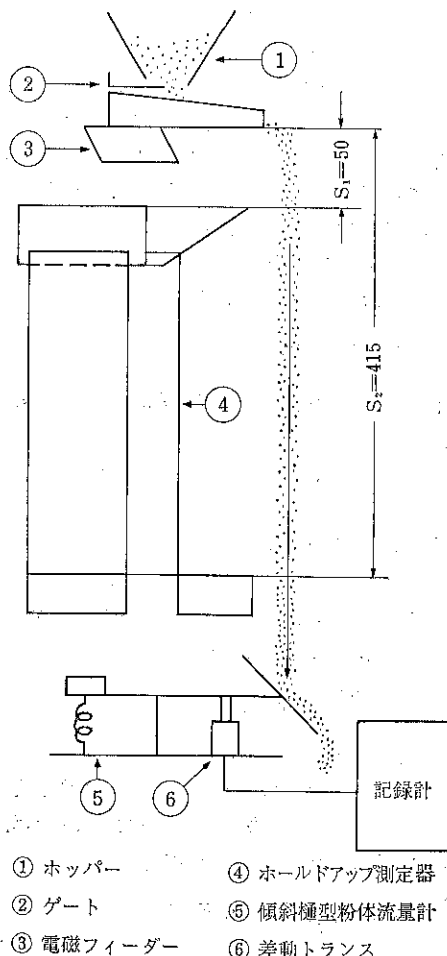


図1 ホールドアップ測定装置

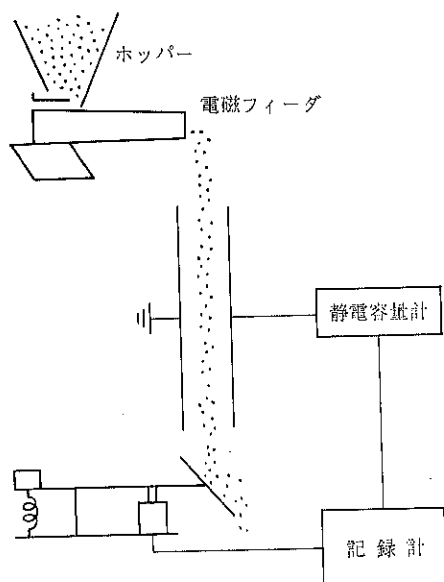


図2 水分測定装置

したがって、水分 W と $\overline{\epsilon}_P(W)$ との関係が明らかになれば、流量 F を他の方法、例えば図1に示すような傾斜樋式流量計などで測定し、同時に測定電極の静電容量変化 ΔC を検出することによって(図2)、上式から水分 W を連続的に求めることができる。

水分によって粒子が凝集を起こす場合でも、次の $f(W)$ が明らかになれば、同様な方法で水分測定が可能である。

$$K_2 \frac{\Delta C}{F} = f(W) \quad (2)$$

ただし、 $f(W)$ は流量 F に無関係な水分 W の関数である。

また、次のような方法によっても水分測定が可能である。

粒子に水分が存在すると、水の高い電導性のために界面分極を生じるが、そのために $\overline{\epsilon}_P(W)$ および $f(W)$ は周波数依存性がある。したがって式(1)~(2)は一般的に次式のように表わすことができる。

$$K_2 \frac{\Delta C}{F} = f(W, \omega) \quad (3)$$

ここで、 ω は角周波数である。

そこで、いま電極定数の等しい二つの平行極板を図3のように配置し、各々の測定周波数を変えておけば、各電極の静電容量変化 ΔC_1 、 ΔC_2 は

$$\left. \begin{aligned} \Delta C_1 &= \frac{1}{K_2} f(W, \omega_1) F \\ \Delta C_2 &= \frac{1}{K_2} f(W, \omega_2) F \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

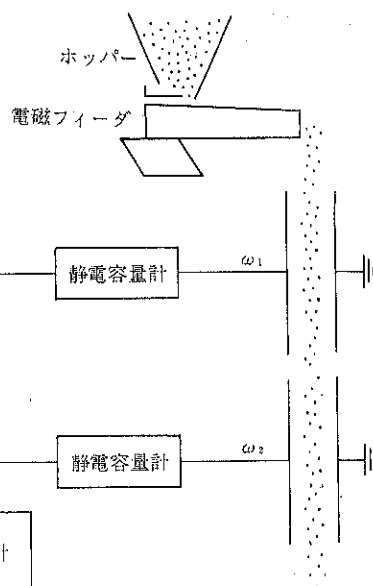


図3 水分測定装置

したがって、この ΔC_1 、 ΔC_2 の比をとれば、次式のように流量には無関係に水分を求めることができる。

$$\frac{\Delta C_1}{\Delta C_2} = \frac{f(W, \omega_1)}{f(W, \omega_2)} \quad (5)$$

3. 吸湿性粉体に関する実験結果および考察

吸湿性粉体の場合には、水分は粒子内部に吸着されるために、水分による凝集は起こらない。したがって、1個の粒子の誘電率 $\overline{\epsilon}_P(W)$ の水分による変化を検討すれば(1式)によって水分測定が可能になる。

そこで、その変化の様子を調べるために、試料として代表的な吸湿性粉体であるシリカゲル($d_p = 0.32$ cm, $\rho_p = 1.14$, $\overline{\epsilon}_P(0) = 3.5$)を使用し、図1、図4の装置を用いて $\Delta C/F$ と水分 W との関係を実測した。なお、流量 F は30秒間のサンプリングによって、また水分 W は全乾法によって求めた。その実験結果を図5に示す。

いま図5の $\Delta C/F$ の測定値を(1式)に代入して $\overline{\epsilon}_P(W)$ を計算によって求め、水分 W に対してプロットすると図6のようになった。

図からわかるように、 $\overline{\epsilon}_P(W) - W$ 曲線は水分1.0%と4.0%を境にして、勾配の異なる3つの直線部分からなっている。以下では、各部分を水分の少ない方から順に第1、第2、第3段階とよび、各変曲点の水分を W_{12} 、 W_{23} で表わすことにする。

このような結果は、すでに黒崎がシリカゲル粉体層に対する同様な実験から得ており、かなり詳細な検討が加

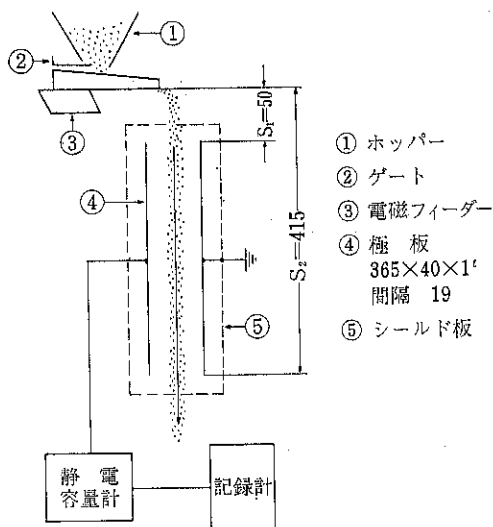


図4 粉体流量測定装置

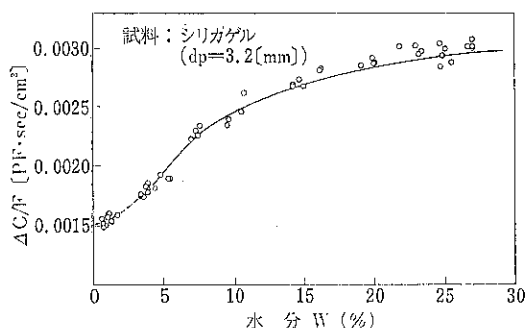


図5 実験結果

えられているので、ここでは黒崎らの考察に従って、水定測定の立場から $\epsilon_P(W) - W$ 曲線を検討する。

さて、第1、第2段階では、水分子は若干会合した気相分子としてシリカゲル表面に吸着されていると考えられる。そこで、このような吸着を、シリカゲル内への水分子の溶解拡散と見なせば、これらの段階における吸着水の比分配 P_w は分子混合系の比分配に関する Foss-Kirkwood の理論¹⁷⁾ から導いた次式によって与えられる。

$$P_w = 100 \frac{2\epsilon_P(W)^2 + 1}{9\epsilon_P(W)^2 \rho_r} \cdot \frac{2\epsilon_P(W)}{2W} \\ \approx \frac{200}{9\rho_r} \cdot \frac{2\epsilon_P(W)}{2W} \quad (6)$$

各段階では P_w は一定であるとし、各段階の吸着水の比分配を P_{w1} , P_{w2} で表わせば、第1段階における $\epsilon_P(W)$ は次式で表わすことができる。

$$\epsilon_P(W) = \frac{9\rho_r}{200} P_{w1} W + \epsilon_P(0) \quad (W \leq W_{12}) \quad (7)$$

しかし、一般に第1段階は単分子層吸着の段階であると考えられ、吸着した水分はシリカゲル表面と強く結合して、水双極子の回転はかなり拘束されている。したがって、吸着水の比分配はきわめて小さく、($P_{w1} \approx 0$) (7)式は(8)式で近似されるので、この段階では、本測定方法による水分測定はほとんど不可能である。

$$\epsilon_P(W) = \epsilon_P(0) \quad (W \leq W_{12}) \quad (8)$$

第2段階における $\epsilon_P(W)$ は次式で表わされる。

$$\epsilon_P(W) = \frac{9\rho_r}{200} P_{w2} (W - W_{12}) + \epsilon_P(W_{12}) \quad (W_{12} < W < W_{23}) \quad (9)$$

吸湿性粉体の場合には、一般に図6のような段階的な変化を示すが、物質によって W_{12} , W_{23} , P_{w2} の値は異なり、第1段階が観察されない場合 ($W_{12} = 0$) も多い。しかし、文献^{6,7)} などによってこれらの値を知れば、 $W_{12} < W < W_{23}$ では、上式を(1)式に代入した式によって水分を測定することができる。

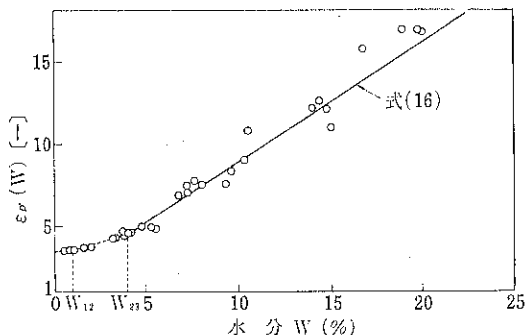


図6 ϵ_P の水分による変化

シリカゲルの場合には、 $P_{w2} = 8.5$, $W_{12} = 1.0\%$, $\epsilon_P(W_{12}) = 3.5$ であるから

$$K_2 \frac{\Delta C}{F} = \frac{0.44(W-1)-3.5}{0.44(W-1)+6.5} \quad (1\% < W < 4\%) \quad (10)$$

となる。

つぎに、第3段階では吸着した水分子は細孔内において毛管凝縮を起こし、自由水として粒子内に分散していると考えられる。そこで、毛管凝縮水を回転楕円体とみなして、Sillars の理論¹⁸⁾ によって $\epsilon_P(W)$ を検討する。

Sillars にれば、一般に誘電率 ϵ_2^* の媒体中に誘電率 ϵ_1^* の回転楕円体が濃度 $(1-\phi)$ で分散しているとき、その総括的な誘電率 ϵ^* は次式で与えられる。

$$\epsilon^* = \epsilon_1^* \left\{ 1 + (1-\phi) \frac{n(\epsilon_2^* - \epsilon_1^*)}{(n-1)\epsilon_1^* + \epsilon_2^*} \right\} \quad (11)$$

ただし、 n は回転楕円体の軸比によってきまる定数で次式で与えられる。

$$n = 8\pi^2 l_a l_b^2 \left[\int_0^\infty \frac{dU}{(l_a^2 + U)(l_b^2 + U)} \right]^{-1} \quad (12)$$

ここで、 l_a は回転軸の長さ、 l_b はもう一方の軸の長さである。なお、球形のときは $n=3$ で、 l_a/l_b が大きくなると n も大きくなる。III式から第3段階の $\overline{\epsilon_P}(W)$ は複素誘電率として次式のように表わすことができる。

$$\overline{\epsilon_P}(W) = \overline{\epsilon_P'}(W_{23}) \left\{ 1 + \frac{(W - W_{23})}{100} \frac{n(\epsilon_W^* - \overline{\epsilon_P'}(W_{23}))}{(n-1)\overline{\epsilon_P'}(W_{23}) + \epsilon_W^*} \right\} \quad (13)$$

ただし

$$\epsilon_W^* = \epsilon_W' - i \frac{4\pi}{\omega} \sigma_W \quad (14)$$

ここで、 ϵ_W^* 、 ϵ_W' 、 σ_W はそれぞれ毛管凝縮水の複素誘電率、比誘電率および電導度である。

式(13)を書き直すと

$$\overline{\epsilon_P}(W) = \overline{\epsilon_P'}(W) - i \overline{\epsilon_P''}(W) \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} \overline{\epsilon_P'}(W) &= \overline{\epsilon_P'_{\infty}}(W) + \overline{\epsilon_P'}(W_{23}) \frac{k}{1 + \omega^2 \tau^2} \\ \overline{\epsilon_P''}(W) &= \overline{\epsilon_P''}(W) \frac{k \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

ただし

$$\overline{\epsilon_P'_{\infty}} = \overline{\epsilon_P'}(W_{23}) \left\{ 1 + \frac{(W - W_{23})}{100} \frac{n(\epsilon_W' - \overline{\epsilon_P'}(W_{23}))}{(n-1)\overline{\epsilon_P'}(W_{23}) + \epsilon_W'} \right\} \quad (17)$$

$$k = n^2 \frac{W - W_{23}}{100} \frac{\overline{\epsilon_P'}(W_{23})}{(n-1)\overline{\epsilon_P'}(W_{23}) + \epsilon_W'} \quad (18)$$

$$\tau = \frac{(n-1)\overline{\epsilon_P'}(W_{23}) + \epsilon_W'}{4\pi\sigma_W} \quad (19)$$

上式の $\overline{\epsilon_P}(W)$ を式(1)に代入したとき、右辺は複素形になるが、分散系の誘電損失に相当する虚数部は非常に小さく、 ΔC の測定には影響を与えないから、実数部 R_E だけをとって次式のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} K_2 \frac{\Delta C}{F} &= R_E \left[\frac{\overline{\epsilon_P}(W) - 1}{\overline{\epsilon_P}(W) + 2} \right] \\ &= \frac{(\overline{\epsilon_P'_{\infty}}(W) - 1 + k\overline{\epsilon_P'}(W_{23}))(\overline{\epsilon_P'_{\infty}}(W) + 2 + k\overline{\epsilon_P'}(W_{23}))}{(\overline{\epsilon_P'_{\infty}}(W) + 2 + k\overline{\epsilon_P'}(W_{23}))^2 + (\overline{\epsilon_P''}(W) + 2)^2 \omega^2 \tau^2} \end{aligned} \quad (20)$$

いま、シリカゲルの場合について、黒崎らが $\overline{\epsilon_P}(W)$ の周波数特性の測定から求めた $n=500$ を使って上式を計算し $(\overline{\epsilon_P'}(W_{23}) = 4.5, W_{23} = 4.5\%, \sigma_W = 1 \times 10^7 \text{ cgsesu})$ $\Delta C/F$ と W との関係を求め、先の実測結果と比較したところ、図6に示すようによく一致しており、回転楕円体モデルの妥当性を示している。

したがって、一般の吸湿性粉体について、 $\overline{\epsilon_P'}(W_{23})$ 、 n 、 σ_W などがわかれば、第3段階における水分領域では、先に述べた(1)式による水分測定が可能である。

4. 非吸湿性粉体に関する実験結果および考察

試料として、非吸着性粉体であるカルサイトを使用して、シリカゲルの場合と同様の実験を行なった。

その実験結果を図7に示すが、以下ではこの結果に考察を加え、非吸湿性粉体の水分測定の可能性を検討する。

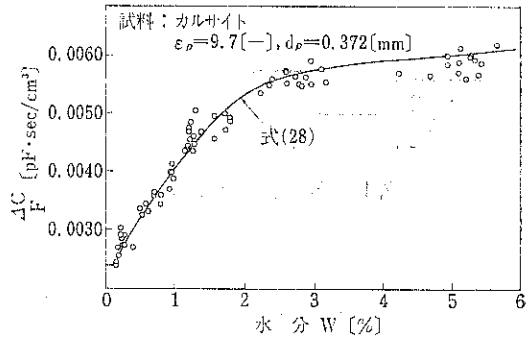


図7 実験結果

いま、水を吸着した非吸湿性粒子に対して、球形粒子の表面が水の同心殻で覆われているようなモデルを考え、誘電体論に関する Miles-Robertson の式¹⁹⁾を適用すれば、この粒子の誘電率 $\overline{\epsilon_P}^*$ は次式のように表わすことができる。

$$\overline{\epsilon_P}^* = \epsilon_P' + 4 \frac{\delta W}{d_P} \epsilon_W^* \quad (21)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta W}{d_P} &\ll 1 \\ \left| \frac{\epsilon_P'}{\epsilon_W^*} \right| &\ll 1 \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

ここで、 δW は水膜の厚さ、 d_P は粒径である。

また、 $\delta W/d_P$ は水分 W と次の関係がある。

$$\frac{\delta W}{d_P} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{W}{100} + 1} - 1 \right) \quad (23)$$

上式から、水分 W のときの粒子の誘電率 $\overline{\epsilon_P}^*(W)$ は次式のようになる。

$$\epsilon_P^*(W) = \epsilon_P' + 2\epsilon_W^* \left(\sqrt{\frac{W}{100} + 1} - 1 \right) \quad (24)$$

$$\left. \begin{aligned} \overline{\epsilon_P'}(W) &= \epsilon_P' + 2\epsilon_W' \left(\sqrt{\frac{W}{100} + 1} - 1 \right) \\ \overline{\epsilon_P''}(W) &= \frac{8\pi}{\omega} \sigma_W \left(\sqrt{\frac{W}{100} + 1} - 1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

したがって、もしこの粒子が測定電極間を一様に分散して落下するならば、(1)式に上式を代入することにより、水分 W と $\Delta C/F$ との関係が得られる。

すなわち、右辺の計算結果の虚数部を無視して

$$K_2 \frac{\Delta C}{F} = \frac{(\overline{\epsilon_p}(W)^2 - 1)(\epsilon_p'(W) + 2) + \overline{\epsilon_p}''(W)^2}{(\epsilon_p' + 2)^2 + \epsilon_p''(W)^2} \quad (26)$$

しかし、非吸湿性粉体の場合には吸湿性粉体と違って、電極間において一部の粒子は凝集しているから、(26)式をそのまま適用することはできない。実際に、(26)式の計算結果と先の実測結果とは大きくずれる。

そこで、いま凝集粒を誘電率が ϵ_{agg} なる単一粒子（非球形）と見なすならば、 ΔC は凝集粒による静電容量変化 ΔC_{agg} とパラパラの粒子による静電容量変化 ΔC_P との和として、次式のように表わすことができる。

$$\Delta C = \Delta C_{agg} + \Delta C_P \quad (27)$$

$$K_2 \frac{\Delta C}{F} = \left\{ \frac{f_{agg} \epsilon_{agg}'(W) - 1}{1 - \phi \epsilon_{agg}'(W) + 2} P(W) + \frac{\overline{\epsilon_p}'(W) - 1}{\epsilon_p'(W) + 2} (1 - P(W)) \right\} \quad (28)$$

ただし、高周波領域を考慮して、 $\epsilon_{agg}''(W)$ 、 $\overline{\epsilon_p}''(W)$ は無視した。

ここで、

I) $P(W)$ は全流量のうち凝集状態で流れる割合であり、粒子間の付着力 H に比例する値であると考えられる。篠原ら²⁰⁾によれば、この付着力 H と W との関係は図式で与えられるから、一般に $P(W)$ は図式のように表わすことができる。

$$H \propto \sqrt{\frac{W}{100} \left(1 + \frac{W}{100} \right)} \approx \sqrt{\frac{W}{100}} \quad (29)$$

$$P(W) \propto \sqrt{W} \quad (30)$$

カルサイトの場合には、観察から、水分が 0.1% までは粒子内部に吸着されて凝集せず、2.3% 以上では全粒子が凝集状態となるので、結局 $P(W)$ は図式のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} P(W) &= 0 & W &\leq 0.1 \\ P(W) &= 0.67\sqrt{W-0.1} & 0.1 < W \leq 2.3 \\ P(W) &= 1 & W > 2.3 \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

II) ϕ_{agg} は凝集粒の空間率であり、水分に無関係に自然充填状態における試料粉体層の空間率とほぼ等しい値をとると考えられる。

したがって

$$\phi_{agg} \approx 0.4 \quad (32)$$

III) $\epsilon_{agg}(W)$ は理論的な計算によって求めることが現在のところ困難なので、同じ試料の粉体層に対する

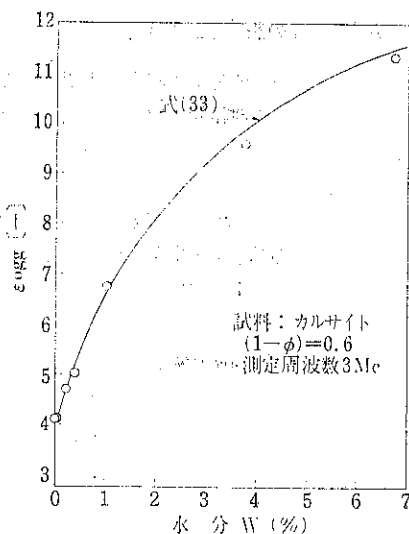


図 8 $\epsilon_{agg}(W)$ の実測結果

$\overline{\epsilon_{ov}}'(W)$ の実測値をもってあてる。(図 8)

カルサイトについては、次項で述べる実験結果から次式のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{agg}'(W) &= 4.12 & W &\leq 0.1 \\ \epsilon_{agg}'(W) &= 3.59\sqrt{W} + 2.92 & W > 0.1 \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

IV) f_{agg} は凝集粒が球形でないための補正係数で、凝集粒を回転楕円体と見なしたときは、式(1)からわかるように、その軸比がわかれば次式によって計算できる。

$$f_{agg} = \frac{n(\epsilon_{agg}'(W) + 2)}{3(\epsilon_{agg}'(W) - 1 + n)} \quad (34)$$

しかし、ここで行なった実験の範囲では、 f_{agg} は大体一定であると考えてよいので、簡単のために任意の一実験点を図式に代入して求めた

すなわち図 7 から $W = 5\%$ のとき $P(W) = 1$ 、 $\Delta C/F = 0.00589$ [PF·sec/cm²] であるから

$$f_{agg} = 1.21 \quad (35)$$

I)~IV) 項までの考察に基づいて (28) 式を計算し、先の実験結果と比較したところ、図 7 のようにほぼ一致しており、上述の考察の妥当性は確かめられた。

したがって (28) 式によって水分測定が可能であるが $P(W)$ 、 $\epsilon_{agg}(W)$ などは物質によって異なるので、結局検定を必要とするが、電極入口に振動を加えた網篩いなどを設けて凝集粒をこし、(26)式が適用できるような状態で測定できれば、その必要はなくなる。

なお、凝集粒の存在は測定値にばらつきを生みやすく、誤差の原因ともなるので、これらの点からも上述のような測定が望ましい。

5. 測定周波数の影響について

吸湿性粉体の水分測定に及ぼす測定周波数の影響を、第1, 第2段階について理論的に検討することは現在のところ困難であるので、ここでは第3段階についてだけ簡単に検討する。

一例として、試料がシリカゲルの場合について、 $\Delta C/F$ と W との関係を角周波数 ω を変えて(20)式の計算から求めたところ、図9に示すような結果を得た。

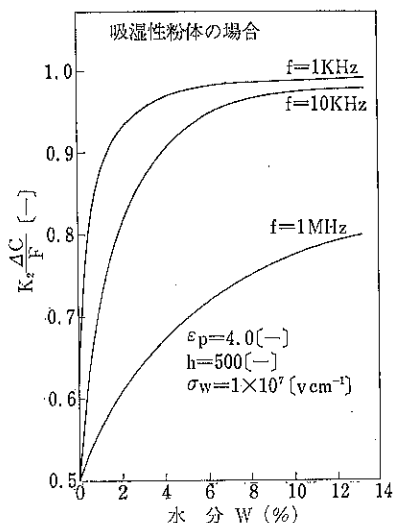


図9 測定周波数の影響

すなわち、 $\Delta C/F-W$ 曲線の様子は、測定周波数が低い程、わずかな水分によって $\Delta C/F$ は大きく変化するが、すぐに $\Delta C/F$ は一定値に近づき、測定可能な水分範囲はせまくなる。したがって、測定周波数は所望の測定範囲や感度との兼ね合いによって選定する必要がある。

なお $\omega \rightarrow \infty$ のときには、(25)式は次のようになる。

$$\overline{\epsilon_p'}(W) \doteq \overline{\epsilon_p'}(W) \doteq \overline{\epsilon_{p\infty}}(W) \quad (36)$$

そして、一般に n はかなり大きな値をとるから $\overline{\epsilon_p'}(W)$ は次式で近似できる。

$$\overline{\epsilon_{p\infty}}(W) = \overline{\epsilon_p'}(W_{23}) + \frac{W - W_{23}}{100} (\epsilon_w' - \overline{\epsilon_p'}(W_{23})) \quad (37)$$

このとき、(20)式は次式のようにになる。

$$K_2 \frac{\Delta C}{F} = \frac{\overline{\epsilon_{p\infty}}(W) - 1}{\overline{\epsilon_{p\infty}}(W) + 2} \quad (38)$$

したがって、測定周波数を十分高くとれば、 n, σ_w に無関係に上式によって水分を測定することが可能である。

非吸湿性粉体の場合には、とくに凝集をおこさないと

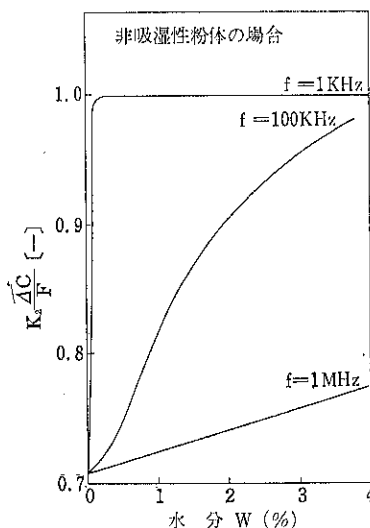


図10 測定周波数の影響

き、(20)式を計算して $\Delta C/F$ と W との関係に及ぼす測定周波数の影響を調べたところ、図10に示すような結果を得た。

この図からわかるように、非吸湿性粉体の場合も第3段階に対する吸湿性粉体の場合と同様な傾向をもっており、測定周波数の選定の目安などについても吸湿性粉体の場合と全く同じである。

6. 結 言

誘電特性を用いた粉体の流量測定を利用して、粉体の水分を測定できることを示した。

しかし、本測定を実用化するためには、今後検討を要する問題は少なくない。

とくに、非吸湿性粉体の場合における凝集現象および凝集粒の誘電特性などに関しては、さらに詳細な検討を加えることが是非とも必要である。

なお、分散系の誘電特性の水分による変化は、本論で述べたような水分測定に利用できるばかりでなく、その測定は粉体-水系に関する種々の物理現象を解析するうえで、有効な手段になると思われる。

例えば、凝集粒界面の分極に関連した誘電挙動は、粉体層の微視的な構造や水分分布に関連しており、水分による粒子の付着、凝集に関する研究分野、例えば造粒のメカニズムの研究などに対しては、新しい知見を与えることが期待できる。

また、吸湿性粉体の場合に見られるような水分による誘電率の段階的な変化は、水分子の吸着の強さに対応しており、粉体の乾燥機構などと密接な関係にあることが予測される。

記 号

AC : 静電容量変化 [pF]
 d_p : 粒 径 [cm]
 F : 粉体流量 [cm³/sec]
 f_{agg} : 凝集粒の形状に関する補正係数 [-]
 H : 粒子間の付着力 [dyne]
 K_2 : 電極定数 [-]
 k : 式(18)で定義される定数 [-]
 l_a, l_b : 回転楕円体の回転軸およびもう一方の軸の長さ [cm]
 n : 回転楕円体の軸比の関数 [-]
 P_w : 吸着水の比分極
 W : 水 分 (容量%)
 δ_w : 水膜の厚さ [cm]
 ϵ^* : 複素誘電率 [-]
 ϵ' : 比誘電率 [-]
 ϵ'' : 損失率 [-]
 ϵ_∞ : $\omega \rightarrow \infty$ のときの誘電率 [-]
 ϕ : 空間率 [-]
 ρ_p : 粒子の密度 [g/cm³]
 σ : 電気伝導度 [1/Ωcm]
 τ : 式(19)で定義される定数 [-]

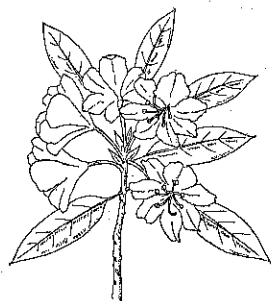
添 字

agg : 凝集粒
 P : 粒 子
 W : 水

参 考 文 献

1) Fischer, K., Angew. Chem., 48, 394 (1935)

- 2) Smith-Rose, R.L., Proc. Roy. Soc., A 140, 359 (1933)
- 3) 松代正三, 工業技術大系, 10, 166 (1964), 日刊工業新聞社
- 4) Baldwin, M. G., J. Chem. Phys., 36, 1951 (1962)
- 5) Kurosaki, S., J. Phys. Chem., 58, 320 (1954)
- 6) 黒崎重彦, 日本化学雑誌, 71, 522 (1950)
- 7) 黒崎重彦, 日本化学雑誌, 72, 688 (1951)
- 8) 黒崎重彦, 日本化学雑誌, 72, 990 (1951)
- 9) 梅屋薫, 菅野隆志, 材料, 17, 285 (1969)
- 10) 牧野輝男, 曾根敏磨, 応用物理, 30, 476 (1961)
- 11) Shimizu, M. and Higuti, I., J. Phys. Chem., 56, 198 (1952)
- 12) 松代正三, 工業技術体系, 10, 263 (1964) 日刊工業新聞社
- 13) 星合正治編, 電気水分計, 427 (1959), 日刊工業新聞社
- 14) Pande, A., Instrument. Practise, October 915 (1965)
- 15) 新井智一, 電気学会誌, 90, 449 (1970)
- 16) 中島裕夫, 後藤圭司, 田中達夫; 化学工学, 31, 504 (1967)
- 17) Fouss, R.M. and Kirkwood, J. G., J. Am. Chem. Soc., 63, 385 (1941)
- 18) Sillars, R. W., J.I.E.E., 80, 378 (1937)
- 19) Miles, J.B. and Robertson, H.P., Phys. Rev., 40, 583 (1932)
- 20) 篠原邦夫, 小林 仁, 粉体工学研究会誌, 2, 352 (1965)



攪拌型粉体混合機内の粉体の流動と混合 に関する実験的研究

大阪府立大学工学部

矢 野 武 夫

佐 藤 宗 武

1. 緒 言

粉体混合機内の粒子の運動状態および混合に関する研究は回転型、特に水平円筒型およびV型混合機について多く検討されている。これに対して攪拌型混合機の場合については、混合槽内部の運動が混合機種や扱う粉体によってそれぞれ異なり、取り扱いが困難なためあまり報告がなされていない。Novosad¹⁾は平板による粉体の攪拌トルクの解析を行なう目的で羽根まわりの粉体の流動を槽壁面から観察し、すべり線を用いて多くの運動領域に分けた。また粉体中を水平に平板を移動させた場合の板の受ける力の解析例²⁾などがあるが、いずれも粉体の動きを二次元的に取り扱い、直接混合過程に結びつけてはいない。

これまで著者らは攪拌型混合機についての混合過程および混合に対して有効な粉体の運動および混合領域を検討するために垂直円筒型攪拌槽を用いて種々の混合実験を行ない、槽内の流動を濃度分布ならびに混合速度係数などから推測してきた。またガラス球粒子による槽内部流動に伴う粒子通過などについても検討を加えた³⁾。本報では攪拌による槽内部の粉体の流動状態と混合領域ならびに混合過程を槽内粉体断面についての観察と液浸ガラス球を用いて着目粒子の仕込み位置を変えた場合の混合の進行過程を写真によって観察した。そして前報³⁾の結果と比較してさらに詳しく粉体の流動と混合過程の考察を行なった。

2. 槽内の攪拌羽根周辺の粉体の流動状態

さきに豊浦砂と炭酸ソーダによる混合実験で得た濃度分布や混合速度係数から推測した循環流および羽根面によって攪拌効果のおよぶ領域ならびに不動部などを確かめるために着色した粉体を使用して攪拌後の粉体層断面の写真撮影を行なった。

実験はまず Photo. 1-1 のように白と黒の砂（いずれも $105\mu\sim 350\mu$ ）を交互に水平に仕込み、槽底から15~20mm 上方に取り付けた幅 80mm、高さ 40mm の平板羽根で 3 r.p.m. で攪拌した。そして所定の回転数のところで攪拌を停止し、粉体層に内径 3mm のガラス管を槽底部まで挿入し、水を徐々に添加して粉体層を固定化した後、垂直方向に注意深く粉体を切断して槽内の縦断面を露出させた。Photo. 1-2 は3回転目の状態で羽根

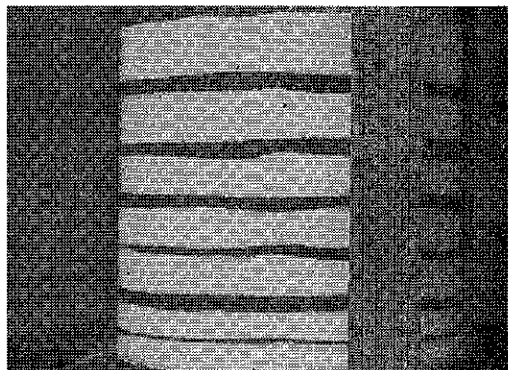


Photo. 1-1 仕込み状態



Photo. 1-2 3回転目上面

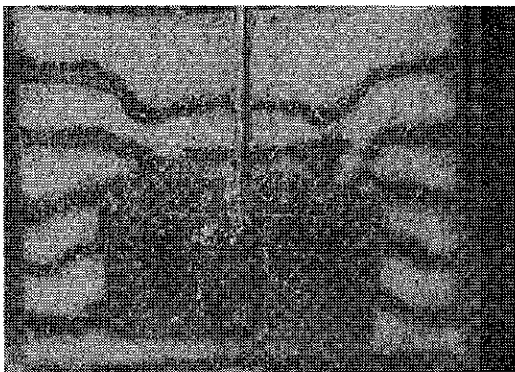


Photo. 1-3 3回転目縦断面

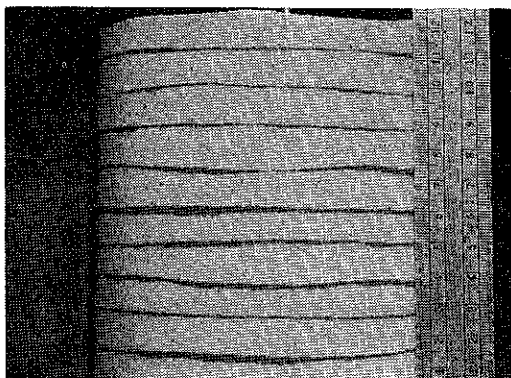


Photo. 2-1 仕込み状態

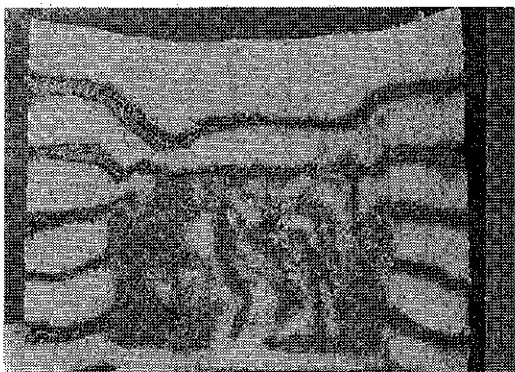


Photo. 1-4

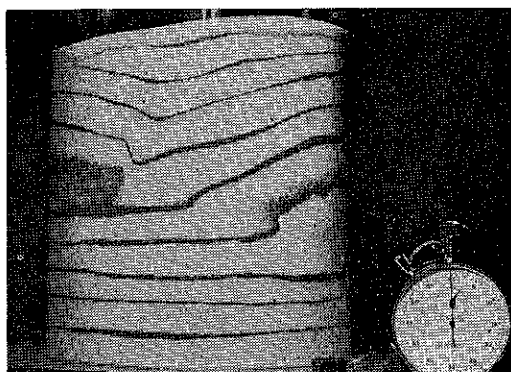


Photo. 2-2 15回転目

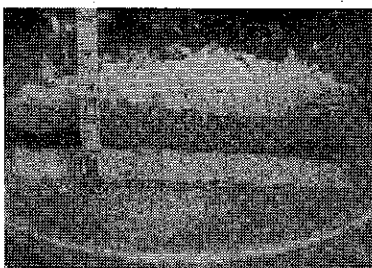


Photo. 1-5 槽底不動部

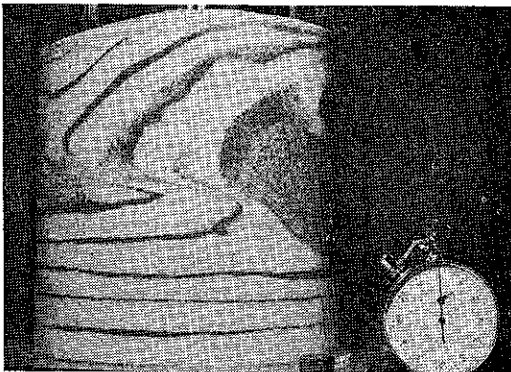


Photo. 2-3 30回転目

に平行に切った状態を上層面から写したもので粉体上層は少し落ち込んでいるが攪拌の影響は少なかった。Photo. 1-3 は槽の側面から見た縦断面と羽根の位置を示した。Photo. 1-4 は羽根を取り除いて断面全体の状態を示したが、これらの写真から混合はまず羽根面の通過する領域、特に羽根外周部から進行してゆくことがわかった。また羽根周辺の粉体の移動は、羽根下端から30 mm 付近までは上昇流となっており、これに対し羽根上端部から上層は下降していることが認められ、豊浦砂と炭酸ソーダとの混合実験で示した羽根半径の $\frac{2}{3}$ 付近のところに下降流が特に大きいということがこのことに

よってわかった。羽根面の中央付近は縦方向に粉体が移動しているがほとんど混合されない領域であった。なお、羽根下端以下の粉体は Photo.1-5 に示すように全く移動しなかった。

つぎに同じ羽根を用いて前と同じく Photo. 2-1 のように粉体を仕込み、30回転目まで攪拌を行なった。攪拌を続けるに従って内部の粉体の流動が壁面におよび Photo. 2-2 は15回転目の状態で粉体の波立が側面に現



Photo. 2-4 90度断面

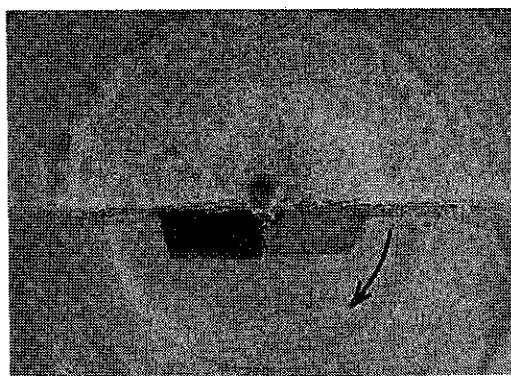


Photo. 3-1 45度羽根 3回転目上面

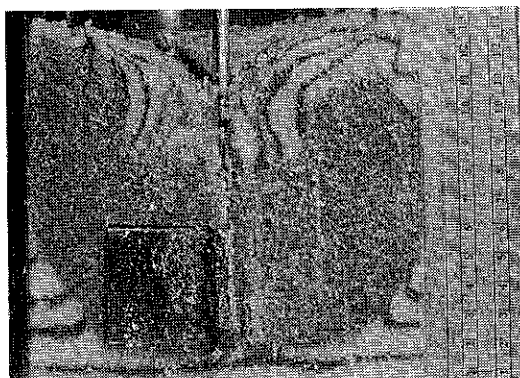


Photo. 2-5 槽縦断面 30回転目

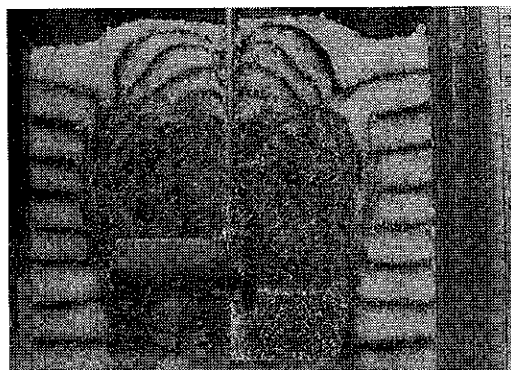


Photo. 3-2 3回転目縦断面

われ、また上面も少し傾斜した。Photo. 2-3 は30回転目のもので壁面での波立ちと混合された領域が不規則に現われた。Photo. 2-4 は30回転目の羽根面に直角な縦断面を示した。羽根下端近くでは羽根の通過する部分だけが混合されており、羽根上部に行くに従って混合領域が拡大し上端部で壁面に到達していることがわかる。また粉体の流れは羽根上端の槽壁から約 30 mm 内側の谷に向っており、表面層では中心軸付近に向う流れが認められた。Photo. 2-5 は槽全面の状態が羽根により吐出された粉体が壁面に向って斜めに上昇し羽根の上方にまわり込んで循環し、ほぼ軸対称の心臓形の混合領域を形成した。表面および槽底部は未混合のまま残った。

この平板羽根による粉体の流動と混合領域を羽根形状が異なる場合と比較してみるために、羽根の取り付け角度が45度のものを用いて同様の実験を行なった（回転方向は時計まわり）。Photo. 3-1 は3回転目の層上部と粉体層の断面位置を示した。Photo. 3-2 に垂直断面をまた Photo. 3-3 に90度回転した位置の断面を示した。まず、角度のついた羽根では、羽根の回転によって粉体が上方へ押し上げられ、上面が凸になり、前述の平板羽根とは異なった。また半径方向への粉体の動きは少ないが

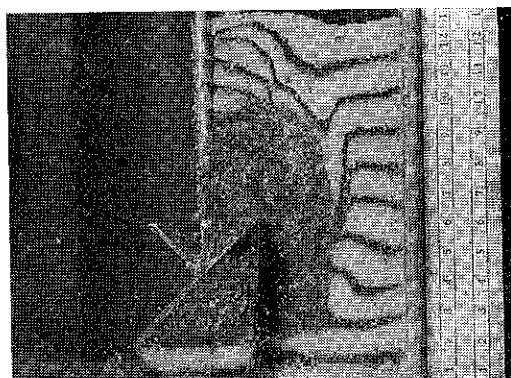


Photo. 3-3 90度断面

高さ方向には大きく、羽根高さの約2倍のところまですでに混合された。粉体の流動についてはほとんど羽根幅内の円筒内に限られ、羽根下端から約 30 mm 上方までは羽根先端で上昇流が認められ、上部から羽根の進行の後方にかけて下層からと上層からの流れが合流して羽根の中心付近で上昇しているのが認められた。さらに攪拌を続けても平板羽根の場合とは異なり Photo. 4-1 のように壁面は全く移動せず静止したままであった。これに

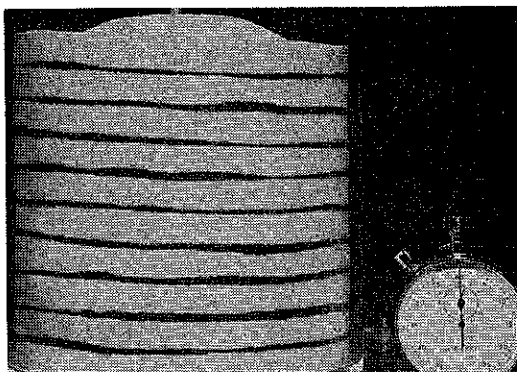


Photo. 4-1 45度羽根 9回転目

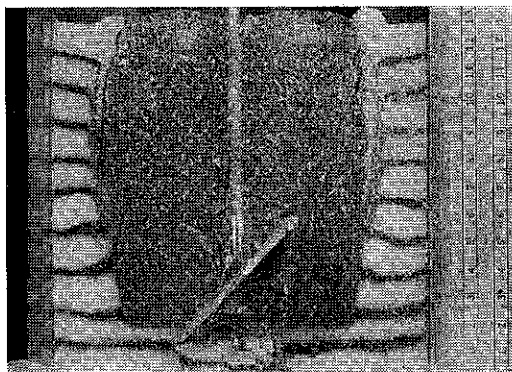


Photo. 4-3 縦断面

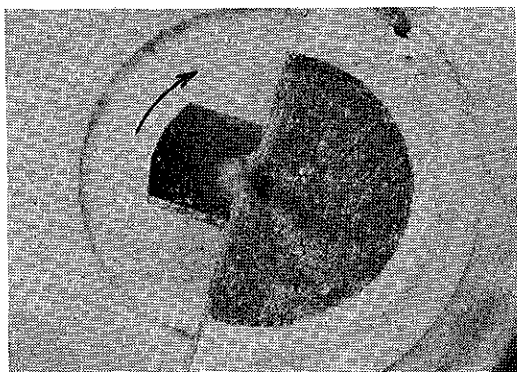


Photo. 4-2 30回転目上面

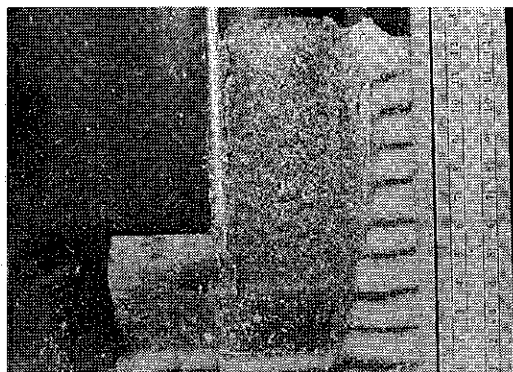


Photo. 4-4 90度断面

対し粉体層上面では Photo. 4-2 に示すように混合粉体が羽根幅の円筒状部を上昇して表面に現われた。Photo. 4-3 は縦断面を、また Photo. 4-4 はこの面に対して 90度の位置にある面を示したが、いずれの断面も混合領域は羽根下端からやや膨みのある円筒形で粉体層表面に達しており、羽根面による上方への流動が促進され、半径方向は不動部として残った。槽底部はいずれの羽根の場合にも混合されなかった。

3. 攪拌中における粉体の流動と混合過程の追跡

これまで行なった攪拌槽内の観察は所定の混合時間または回転数のところで攪拌を停止し、サンプリングや粉体層を固定するなどして行なってきた。ここでは攪拌状態のまま連続的に内部の流動状態を観察するために透明ガラス球粒子にガラスと等しい屈折率の液を添加して内部を可視化した模擬粉体攪拌槽を用いて混合過程の写真撮影を行なった。

Photo. 5 に使用した装置を示した。攪拌槽は内径 98.5 mm、高さ 130 mm のガラス円筒で、周囲を矩形ガラス箱で囲んだ。攪拌羽根は幅 83 mm、高さ 42 mm

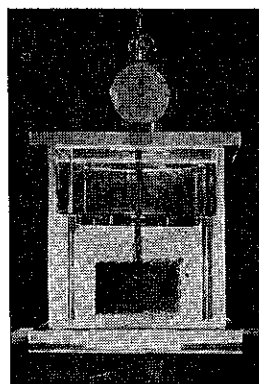


Photo. 5 内部可視化
模擬攪拌装置

で槽底から 17 mm 上に取り付けた。用いたガラス球は平均直径 2.6 mm、屈折率 1.515 で、ガラス粒子充填層に屈折率 1.518 の安息香酸メチル液を注入した。また円筒と矩形箱の間にも同液を満たした。観測用の着目粒子は同粒径の乳白色ガラス球を用いた。着目粒子は豊浦砂と炭酸ソーダの混合実験で行なった各層別の仕込み方法に準じて、槽内の透明ガラス球の I～III 層のいずれか一層

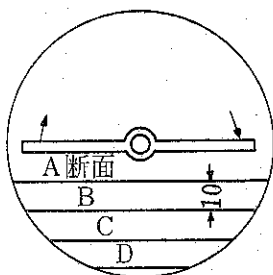


Fig. 1 スリット光照射位置

の上面に水平に100個配置した。搅拌は 3 r.p.m. で行ない羽根の $\frac{1}{4}$ 回転ごとに側面および上面から内部を撮影した。

3.1 第I層仕込みの場合

着目粒子を粒子層の上面に置き羽根の回転とともに槽内部に混合されてゆく過程を観察した。

Photo. 6-1: 搅拌開始前の着目粒子の仕込み状態。

Photo. 6-2: $\frac{1}{4}$ 回転目…羽根後方に形成される谷に向かって表面層が移動し始める。

Photo. 6-3: $\frac{1}{2}$ 回転目…粒子が谷に向かって楔状に下降し着目粒子は羽根によって二分割された形になる。

この状態をさらに詳しく調べるために搅拌槽の上方から幅10mm 幅のスリット光を羽根と平行にA, B, C, Dの順に投射して各垂直断面 (Fig. 1) の状態を Photo. 6-3A~6-3Dに示した。

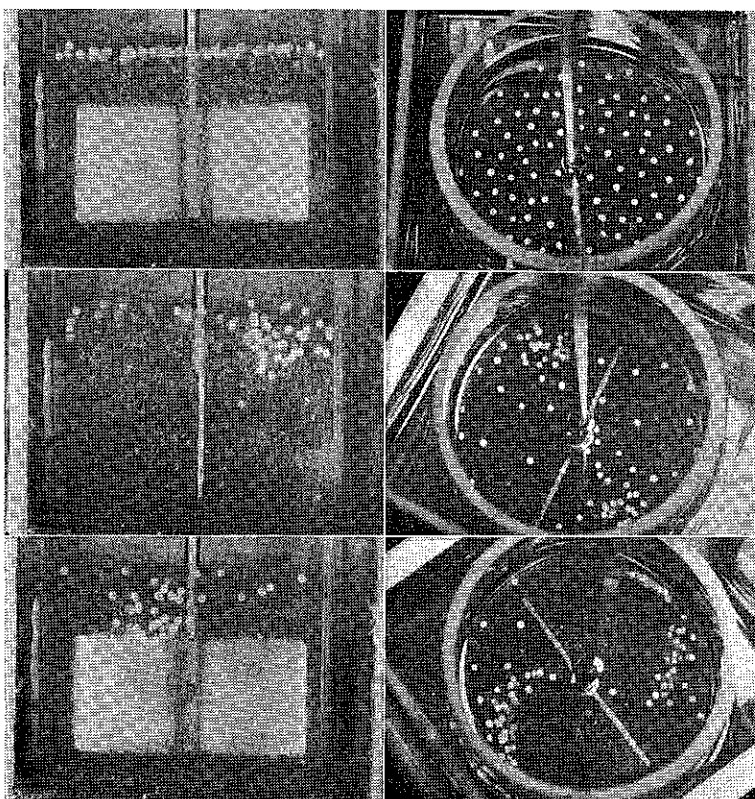


Photo. 6-1
第I層仕込み

Photo. 6-2
 $\frac{1}{4}$ 回転目

Photo. 6-3
 $\frac{1}{2}$ 回転目

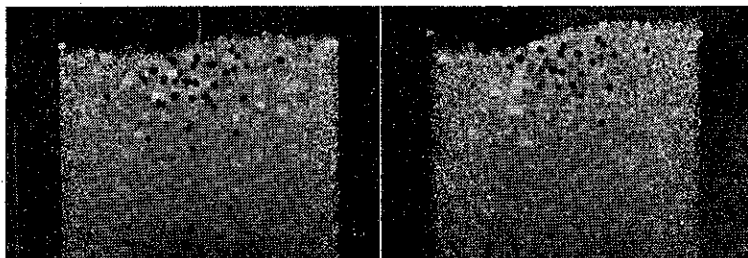


Photo. 6-3A A断面

Photo. 6-3B B断面

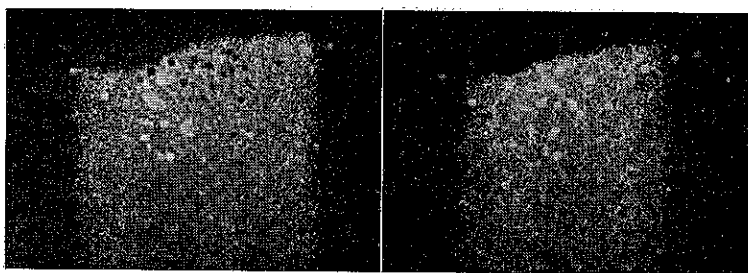


Photo. 6-3C C 断面

Photo. 6-3D D 断面

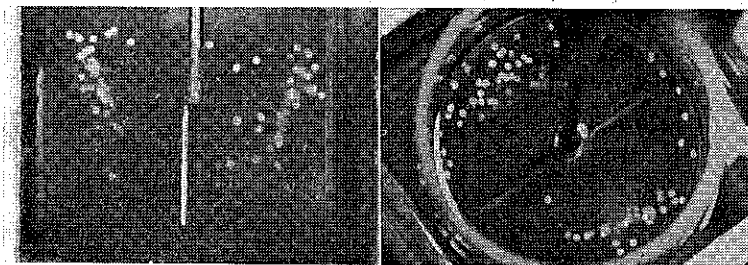


Photo. 6-4
3/4 回転目

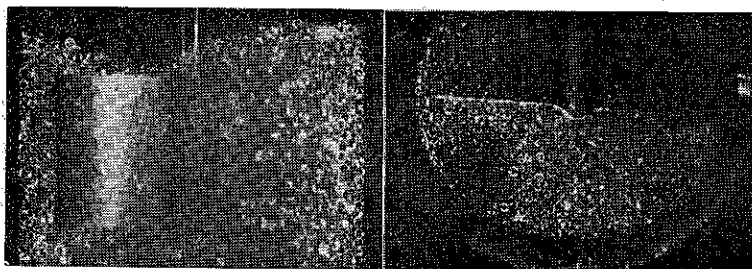


Photo. 6-4A 下降部

Photo. 6-4B

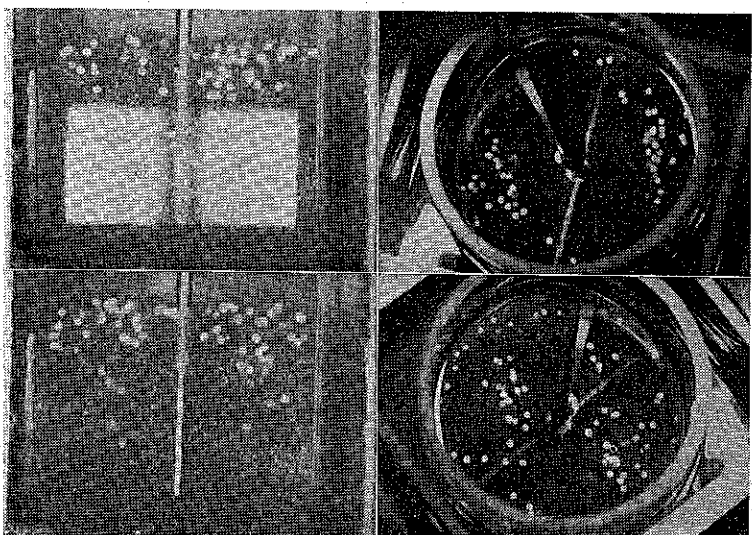


Photo. 6-5
1 回転目

Photo. 6-6
1 1/4 回転目

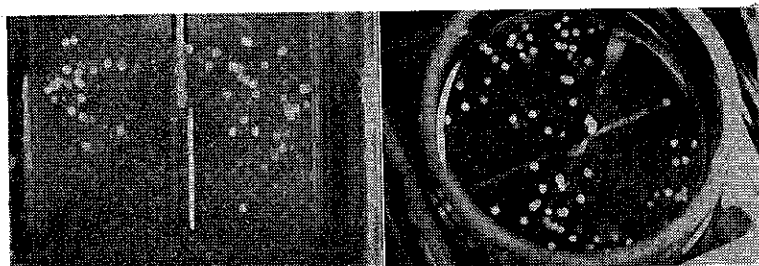


Photo. 6-7
1 $\frac{1}{4}$ 回転目

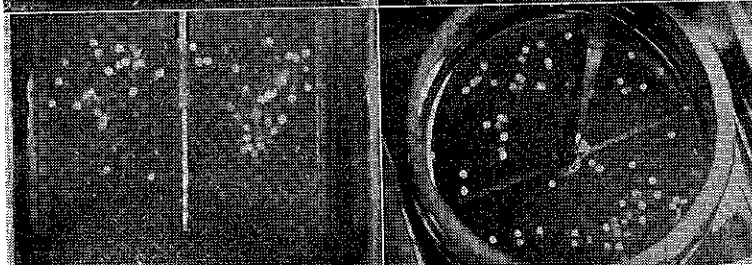


Photo. 6-8
2 $\frac{1}{4}$ 回転目

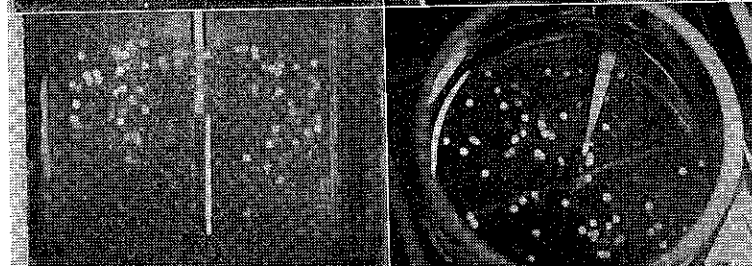


Photo. 6-9
2 $\frac{3}{4}$ 回転目

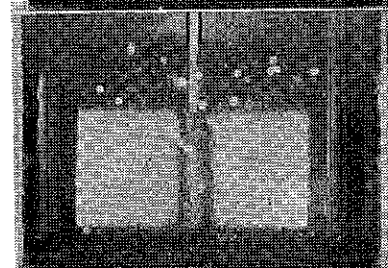


Photo. 6-10
8 回転目

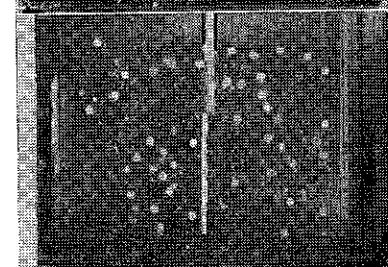


Photo. 6-11
10 $\frac{3}{4}$ 回転目

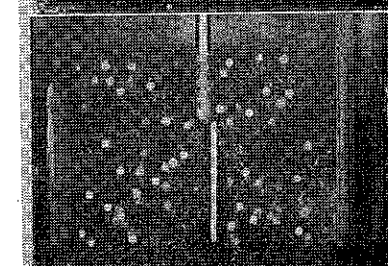


Photo. 6-12
15 $\frac{1}{4}$ 回転目

Photo. 6-3A : 槽の中心を通る断面で着目粒子 (白) は羽根回転方向に進み少し下降している。

Photo. 6-3B } : 羽根の後方での落込みが見られ、粒
6-3C } 子先端は羽根通過域に達している。

Photo. 6-3D : この付近に最も多く粒子が存在し、下降流となっているのが認められた。

Photo. 6-4 : $\frac{3}{4}$ 回転目…分割された粒子が羽根の内側の帯を下降し羽根下端部に向う。このときの表面の粒子層の吸い込み点は Photo. 6-4A, 6-4B に示すように、羽根の進行方向の後方45度で羽根の外周の内側よりであった。

Photo. 6-5~6-9 : 攪拌とともに高さ方向および半径方向への混合が進むが、回転軸付近および羽根下端から槽底の間には着目粒子が入り込まず、粉体の混合結果と一致した傾向を示した。

Photo. 6-10, 6-11 : 着目粒子が槽の全体に拡がり、壁面での上昇が見られた。

Photo. 6-12 : 混合が完了した状態で、羽根下端以下に

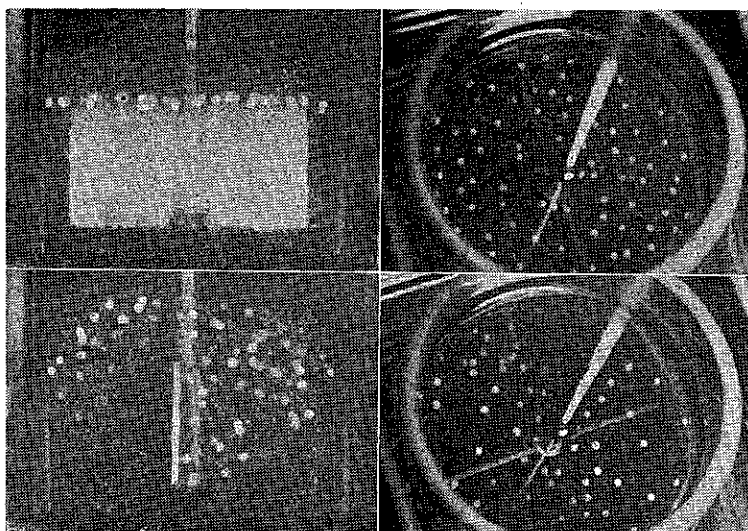


Photo. 7-1
第Ⅱ層仕込み

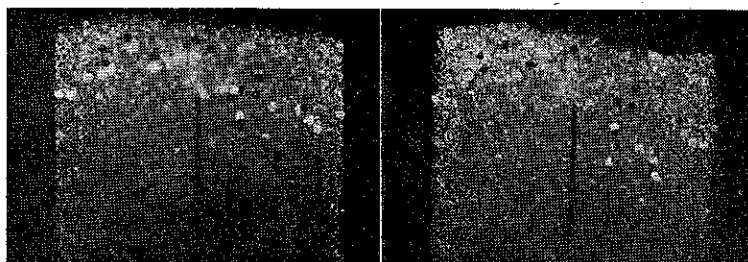


Photo. 7-2A A 断面

Photo. 7-2B B 断面

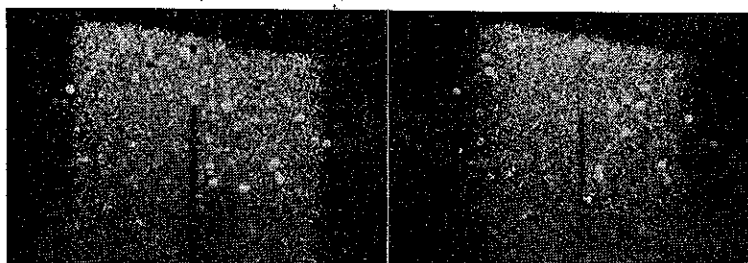


Photo. 7-2C C 断面

Photo. 7-2D D 断面

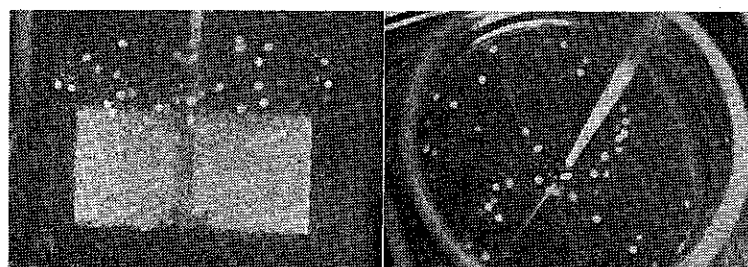


Photo. 7-3
1/2 回転目

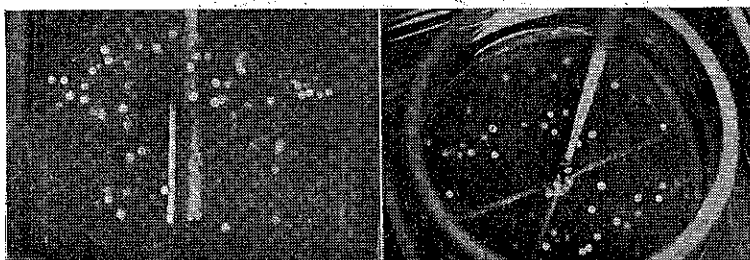


Photo. 7-4
3/4 回転目

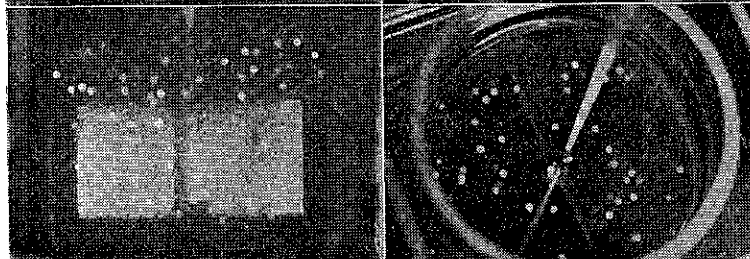


Photo. 7-5
1 回転目

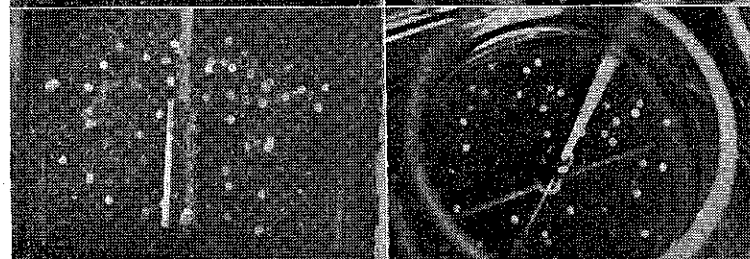


Photo. 7-6
1 1/4 回転目

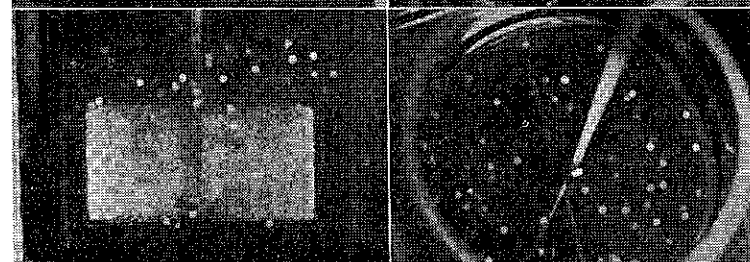


Photo. 7-7
1 1/2 回転目

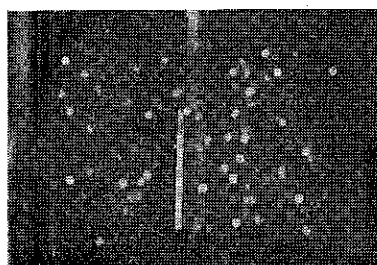


Photo. 7-8
3 1/4 回転目

は不動部が存在し、他の領域はほぼ均一の粒子分布を示した。

3.2 第Ⅱ層仕込みの場合

Photo. 7-1: 着目粒子の仕込み状態を示す。

Photo. 7-2: 1/4 回転目…羽根前面での上昇流および後方での下降流によって粒子は大きく上下

にねじられた形になり、羽根の周囲ではすでに粒子が羽根下端付近まで達した。この状態を各断面で示したのが Photo. 7-2A~7-2D である。

Photo. 7-2A: 槽中央断面で粒子が羽根の位置を境に上下二方向に移動している。

Photo. 7-2B: 上下の移動がさらに大きくなっている。

Photo. 7-2C } 羽根後方ではほとんど粒子が下降し
7-2D } 羽根下端に向かって移動している。

Photo. 7-3: 1/2 回転目…粒子が羽根の中心部を頂点とする逆三角形に落込んでゆくが羽根の周端部にはまだ粒子が到達していない。

Photo. 7-4~7-7: 次第に槽全体に均一に拡がって羽根の下端に達した粒子はほとんど上昇し

てこない。(不動部内の粒子)

Photo. 7-8: $3\frac{1}{4}$ 回転目…ほぼ混合が完了した状態。

以上のように攪拌羽根の上端面が直接通過する第Ⅱ層に着目粒子を仕込むと速やかに槽内に分散され、すでに混合実験によって得られた混合速度係数および混合度の仕込み位置による変化の傾向を説明することができた。

3.3 第Ⅲ層仕込みの場合

着目粒子を羽根面が直接通過する領域の第Ⅲ層に仕込んだ状態で攪拌した。

Photo. 8-1: 仕込み状態を示す。

Photo. 8-2: $\frac{1}{4}$ 回転目…粒子が傘形に変形しⅡ層仕込みと同様上下に大きく拡がったが表面の第Ⅰ層までは達していない。

Photo. 8-3: $\frac{1}{2}$ 回転目…粒子はすでに羽根下端に達し

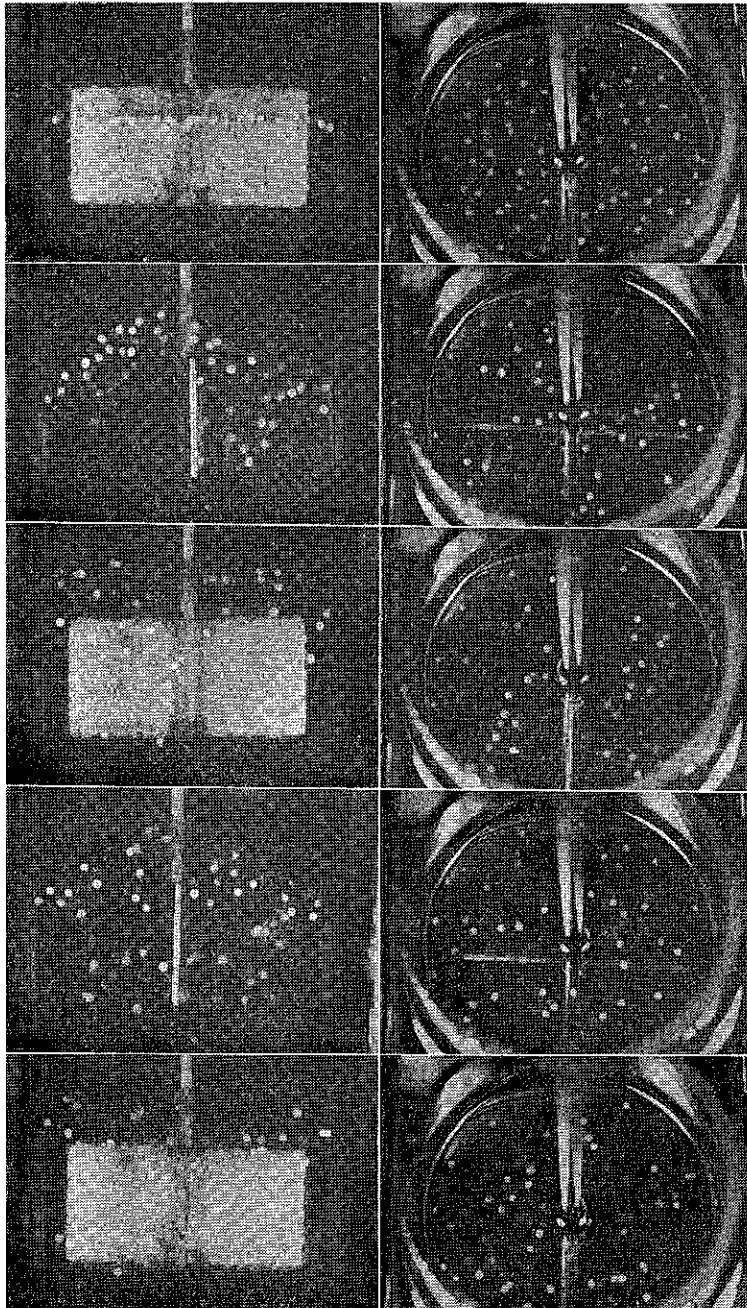


Photo. 8-1
第Ⅲ層仕込み

Photo. 8-2
 $\frac{1}{4}$ 回転目

Photo. 8-3
 $\frac{1}{2}$ 回転目

Photo. 8-4
 $\frac{3}{4}$ 回転目

Photo. 8-5
1回転目

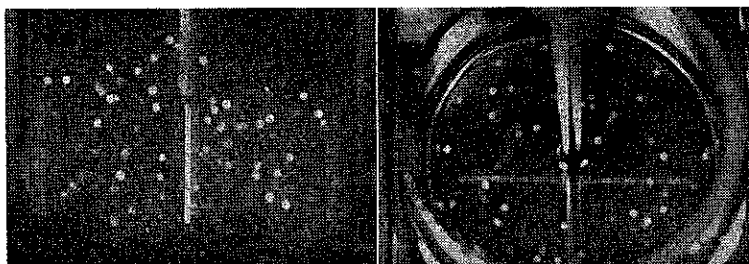


Photo. 8-6
1¼回転目

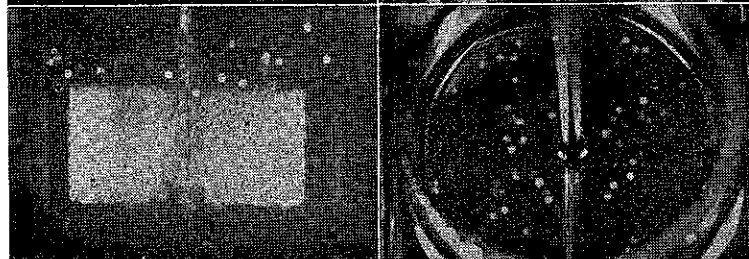


Photo. 8-7
2回転目

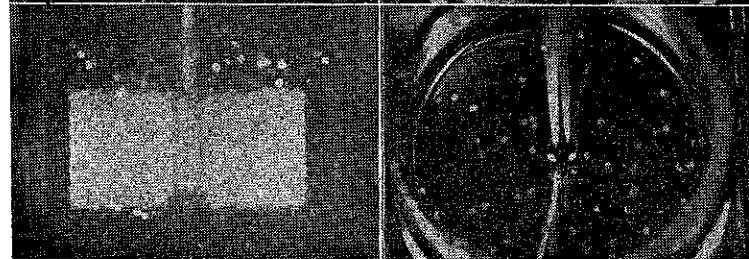


Photo. 8-8
2½回転目

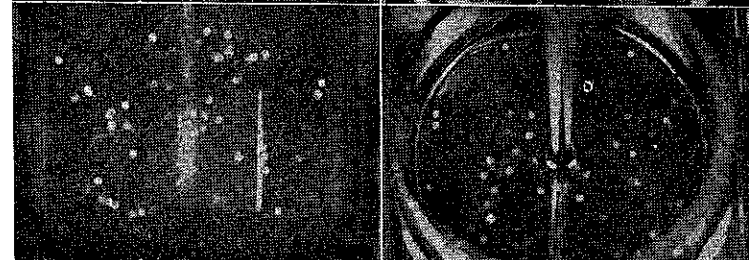


Photo. 8-9
3回転目

第Ⅱ、Ⅲ層で半径方向に広がっている。

Photo. 8-4~8-7: ¾~2回転目…軸を中心に第Ⅲ層から上では円錐形に粒子が存在し、第Ⅰ層の所にはなかなか粒子が入り込まない。

Photo. 8-8, 8-9: ほぼ均一に粒子が分散された状態を示す。

このように第Ⅲ層に仕込んだ場合には第Ⅱ層に仕込んだ場合とほぼ同様な混合過程をたどるが上層(第Ⅰ層)への輸送に時間がかかっていることがわかった。

これらの写真観察をこれまで報告した攪拌槽内の粉体の流動と混合に関する実験結果³⁾すなわち、混合過程における槽内の濃度分布および局所的な混合速度係数の変化から求めた循環流および混合領域に関する知見、攪拌中のガラス球粒子を8ミリシネカメラで連続撮影した結

果から槽内各点の着目粒子の通過ひん度を求め、この値の大きいところが良混合領域であり混合速度係数が大であったなどの結論と比較してさらに詳しく槽内の循環流および混合領域を考察すると Fig. 2 に示すような結果が得られる。

まず粉体の各層での流れおよび混合は1) 第Ⅰ層では羽根による波立ちによって表面粒子が分割される様子が濃度分布測定結果と一致しており、またこの層に着目成分を仕込んだ時には槽全体としての混合速度が遅くなることも確められた。このことは粒子の通過ひん度が小さいことから推察され、実際に第Ⅲ層に着目粒子を仕込んだ時には第Ⅰ層に粒子が入りにくことが観察された。2) 第Ⅱ層は混合速度係数が他の層に比べて大きく、また羽根の上端周辺における粒子通過ひん度が大きかったが、このことは層の縦断面の観察および第Ⅱ層仕

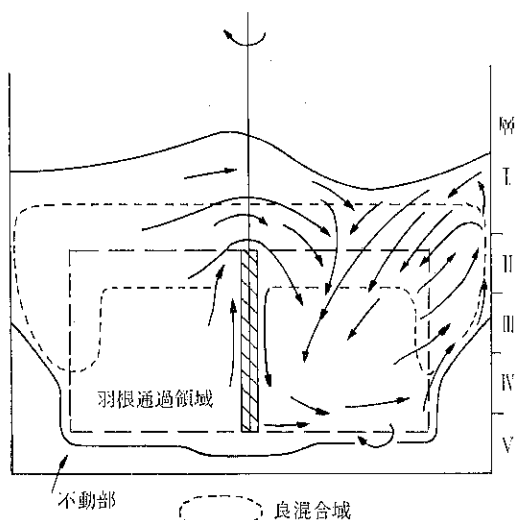


Fig. 2 槽内流動状態（羽根後方と壁面に注目して）

込みの時の粒子の分散状態から容易に確認することができた。3) 第Ⅲ層では上方からの粒子の下降と半径方向への吐出が見られ、混合速度は第Ⅱ層について大きいことがわかった。4) 第Ⅳ、Ⅴ層では羽根幅の範囲内の流動と壁面における上昇流とが主であり羽根周辺のみが良混合域を形成した。5) 槽底部は不動部となり粒子は入り込まず、また中心軸付近の混合状態は悪いことが層断面および内部の観察からはっきりした。

つぎに循環流についてはa) 壁面を上昇した粉体が層の上面に拡がり、羽根半径の $\frac{2}{3}$ 付近で下降して再び吐出される流れ、b) 羽根上端の周囲に上下方向から流れ込み中心に向う流れ、c) 中心部における羽根高さの範囲内の閉鎖した循環流、d) 羽根の回転に従って槽壁面槽底不動部面上を移動する流れ、などが観察でき、濃度分布の測定結果と粒子の移動軌跡の測定結果など一致した。

4. 結 言

攪拌型粉体混合機の基礎的研究として垂直円筒型攪拌槽内の粉体の流動と混合過程を写真によって観察した。そして槽内の代表的な循環流および混合領域を動的な状態で確かめ、これらは二成分混合実験で得た結果と一致した。また混合を促進させる機構は羽根端面における剪断効果と吐出による循環流であり、羽根の形状の影響も受けた。

引 用 文 献

- 1) J. Novosad: Collection Czech. Chem. Commun 30, 3247 (1965)
- 2) D.F. Bagster and J. Bridgewater: Powder Techn. 1, 189 (1967)
- 3) 矢野武夫, 佐藤宗武: 粉体工学研究会誌 (投稿中)



二次元水平円筒型混合機を用いた粒体混合 における密度による分離偏析の研究

大阪府立大学工学部 矢 野 武 夫
寺 下 敬 次 郎
細川粉体工学研究所 武 者 孝 敏

1. 緒 言

粉粒体混合における混合機の最適操作条件、性能あるいは混合機構などに関する研究の多くは、余り密度の異なる粉体系を用いて行なわれたものが多い、ところが実際の粉粒体混合操作は、密度など物性の異なった粉体間の混合がほとんどである。したがって粉粒体混合機の機種選定および最適操作条件などを定量的に知るには、粉体物性と混合性能の関係を知らしておく必要がある。

水平円筒型混合機の混合において粒径の異なる粉体の場合、分離偏析が起こり良好な混合状態を示さないことが報告されている¹⁻⁴⁾。また密度の異なる粉体の混合にも分離偏析が観察されるという報告^{5,6)}もあるが、粒径や粒径分布などと混合性能の関係を調べた研究⁷⁾に比べて不十分である。さらに粉体密度の相違による分離偏析を防ぐには、どのように混合機を操作すればよいかはまだほとんどわかっていない。

われわれは、密度の異なる粒体あるいはその混合物が水平円筒型混合機内でどのような挙動を示すかを透明塩化ビニール板を使用し可視化した厚さの薄い水平円筒型混合機を用いて観察し、混合過程のフローパターンから密度の相違による混合状態の差異を研究した。すなわち密度の異なる各種の粒体試料あるいはそれらの混合物を用いて、いろいろな装入率および回転速度において粒体の運動状態や混合過程を、特に粒体層の自由表面および円筒断面に注意して写真撮影した。そして各粒体試料およびその混合物の運動角および粒体層高さあるいは擬臨界回転速度*を実測した。

つぎに粒体の密度の相違から生じる分離偏析現象を混

* 粒体の一部が遠心力の作用により物性の影響が軽減され、水平円筒壁に固着して運動しようとする時の回転速度。

合曲線の変化から追跡し、さらに混合機の操作条件との関係を求めた。これらの結果から粒体の密度に相違のある場合、分離偏析を防止し良好な混合状態を得ることのできる混合機の操作条件を考察した。

2. 実験装置および方法と粒体試料

実験装置の概略を Fig. 1 に示した。混合機には内径 29.80 (cm)、厚さ 2.2 (cm) [内容積 1,534 (cm³)] の透明塩化ビニール製で内部の見える厚みの薄い水平円筒型混合機を用いた。以後この混合機を二次元水平円筒型混合機と呼ぶことにする。混合機の回転軸は、ノンスリップ・ベルトで無段変速電動機につながり水平に回転させるようにした。

回転速度は、無段変速電動機を調節し任意の一定速度に保ち、電磁式カウンタあるいはタコメータにより測定した。また粒体密度は、空気比較式密度計を用いて求

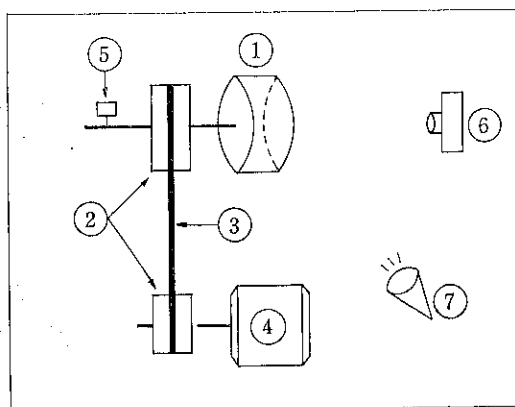


Fig. 1 実験装置の概略

- | | |
|---------------|------------|
| 1. 水平円筒型混合機 | 5. 電磁式カウンタ |
| 2. プーリー | 6. カメラ |
| 3. ノンスリップ・ベルト | 7. ストロボ |
| 4. 無段変速電動機 | |

めた。

粒体試料には、日本工業規格標準節で $-6/+7$ メッシュに篩分けした Table 1 に示した直径 2.80~3.360 mm の樹脂、ガラス、アルミナ、鉄および鉛（散弾）などの粒体を用いた。さらに密度の異なる粒体混合物には樹脂—鉛、樹脂—鉄、アルミナ—鉄およびガラス—鉄などの二成分系粒体試料を用いた。なお今後、鉛と鉄などの重い方を A 成分、樹脂やアルミナあるいはガラスなどの軽い方を B 成分と呼ぶ。

Table 1 粒体試料とその物性

粒体名	ρ (g/cc)	安息角 (度)	粒体名	ρ (g/cc)	安息角 (度)
樹 脂	1.48	35.0	鉄	7.83	24.8
ガ ラ ス	2.52	29.4	鉛(散弾)	11.10	25.0
アルミナ	3.55	30.0			

実験にあたり、まず混合機と粒体試料が静電気の影響を受けるのをできるだけ少なくするために、両者とも帯電防止剤で処理した。

混合機内の粒体の運動状態は、Fig. 1 に示したように混合機の回転軸の延長上にカメラを置きストロボを使用し、定常状態における運動状態を写真撮影して、写真結果から粒体試料およびその混合物の各操作条件における運動角、粒体層高さあるいは擬臨界回転速度を測定した。

さらに密度の異なる粒体系の混合実験における混合度 M の算出には、両粒体の定常状態の写真結果から、円筒断面を N 等分し万能投影機を用いて各部分の全粒子数およびその中に含まれる着目粒子数を数え個数濃度を求め、分散あるいは混合度を算出した。

2. 混合機内の粒体の運動状態と混合機構におよぼす密度の影響

3.1 粒体の運動状態の写真観察

粒体試料あるいはその装入率が変化した場合、水平円筒型混合機内で、粒体がどのような運動状態を示すかを写真観察で調べることにした。

一例としてアルミナ粒体を粉体装入率 $F^*/V=30\%$ 一定で混合機に装入し、回転速度 N を 10 から 100 r.p.m. まで変化させて粒体の運動状態を写真撮影した結果を回転速度の小さい方から順々に Fig. 2 (a)~2 (e) に示した。

まず Fig. 2 (a) に示した回転速度の小さい ($N=10$ r.p.m.) 場合の粒体の挙動は、他の研究者⁸⁻¹⁰) もすでに述べているように、混合機の回転に従って粒体は壁に沿って回転上昇し、ある粒体層の高さに達すると粒体群は上昇をやめ傾斜降下面を作る。傾斜降下面および表面

近傍の粒体は、ある程度ランダム運動する粒体層を形成しなだれ落ちる。傾斜面の底部に到達した粒体は層底流と合流して、混合機の回転に従って再び回転上昇し循環運動する。この粒体層中の粒子は、落下時に混合が起っているため混合領域^{8,9)}と呼ばれている。また回転上昇中の粒体は、余り混合しないので静止あるいは輸送領域^{8,9)}ともいわれている。

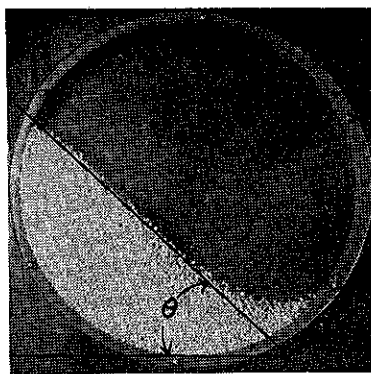
さらに両領域の境界面すなわち粒体群の中央付近に不動域が存在する。またこの低回転速度の場合、混合機内の粒体は比較的稠密に充填された状態で運動しており、粒体層の密度がほぼ一定であると同時に、粒体が運動する流動面積も大きな変化を示さないと考えることができた。そこで低回転領域の粒体の運動状態を特徴づけるパラメーターとして、Fig. 2 (a) に示した写真のように傾斜面に沿って引いた直線と水平線の角度すなわち運動角¹¹⁾ θ を使用することにした。

また Fig. 2 (b) の $N=40$ r.p.m. 付近では、粒体がカスケード状運動を最も著しくあらわしたが、混合および輸送領域あるいは不動域を観察することができた。

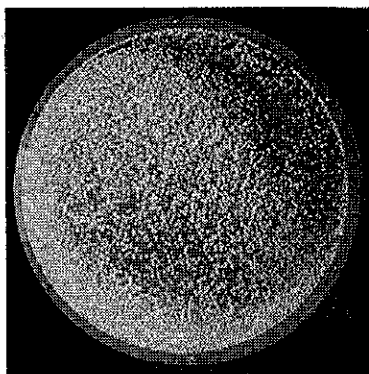
つぎに回転速度が $N=40$ r.p.m. よりも増大し $N=60$ r.p.m. 付近になると粒体の運動状態は、Fig. 2 (c) の写真結果からわかるように、回転上昇運動を終了した粒体が傾斜面を示して粒体層を流下しようとするが、遠心力が働き始め粒体の一部は放物線状をなして飛散した。したがってこの状態での粒体の運動は、Fig. 2 (a) などで観察された粒体群中心付近の不動域の存在は不明確になるとともに、見掛け上輸送領域よりも混合領域の面積の割合が増大していると解釈できた。また粒体の流動領域の面積が円筒断面を占有する割合が大きくなり、粒体の充填密度は減少した。しかも運動角 θ は測定できなくなった。そこで高回転領域での粒体の運動状態を表わす一つの尺度として、Fig. 2 (c) に示されるような円筒底部から粒体層の最大高さすなわち粒体層高さ H を、写真結果から万能投影機で測定した。

さらに回転速度が Fig. 2 (d) の $N=70$ r.p.m. 付近まで上昇すると、遠心力がより大きく粒体に作用し粒体物性の影響が軽減され、粒体の一部が円筒壁に固着して運動しようとする粒体の運動状態が観察された。また Fig. 2 (a, b) などの結果よりも、多くの粒体がランダム運動をしていることも認められた。また当然のことであるがアルミナ粒体の流動領域は、円筒の全断面をほとんど覆った。すなわち粒体層高さ H がちょうど水平円筒の直径 D とひとしくなり、流動領域が全断面を占めるような状態となった。この状態を擬臨界状態とし、この時の回転速度を擬臨界回転速度 N_{cr} と呼ぶことにした。

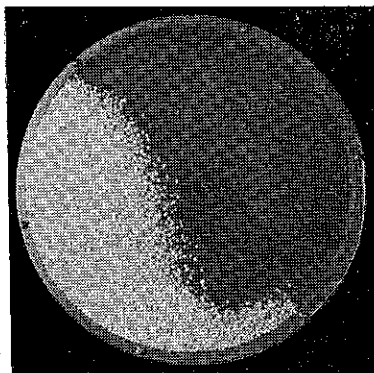
最後に高回転速度の $N=100$ r.p.m. [Fig. 2 (e)] の場



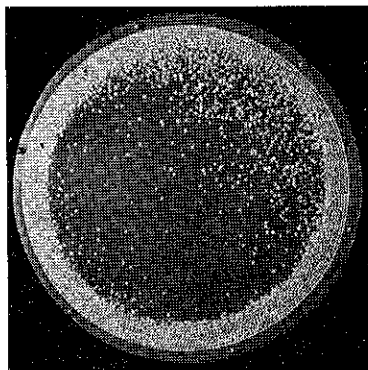
(a) $N=10$ r.p.m.



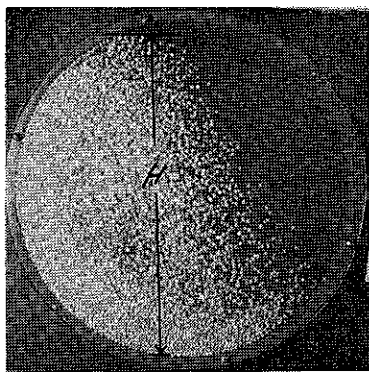
(d) $N=70$ r.p.m.



(b) $N=40$ r.p.m.



(e) $N=100$ r.p.m.



(c) $N=60$ r.p.m.

Fig. 2 粒体の運動状態 ($F^+/V=30\%$)

合、粒体の運動は遠心力の作用がさらに強くなり、粒体群は円筒壁に固着して水平円筒とともに回転運動を示し、混合に必要な粒体間の移動がほとんど見られなくなった。

以上の粒体の運動状態の写真観察結果から、**Fig. 2** (a, b) などの低回転領域では粒体群の中心部に不動域が生じ、**Fig. 2** (e) の高回転領域においては粒体群が水平

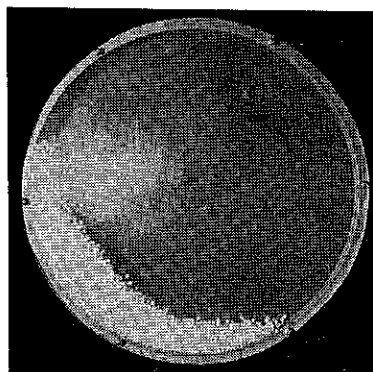
円筒に固着して運動するため、混合操作を行なうには好ましくない条件と考える。さらに **Fig. 2** (d) の状態は、粉体物性（たとえば密度）の影響が軽減され、多くの粒体がランダム運動するため、混合操作に適当な条件であると予測することができた。

つぎに粉体装入率 F^+/V （見掛容積規準）を10～5%の範囲で6段階変化させ、粒体の運動状態を写真撮影し

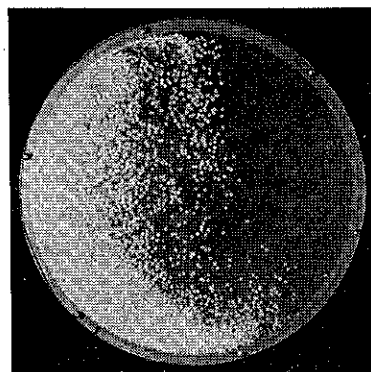
た結果の一例として樹脂の粒体の場合を Fig. 3 (a)~3 (f)に示した。

まず粉体装入率 $F^+/V=10\%$ での粒体の運動状態は、回転速度が $N=5\sim100$ r.p.m. に変化しても、Fig. 3 (a)

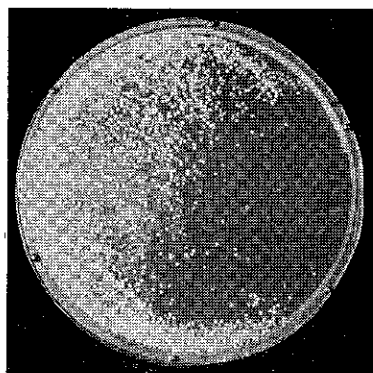
に示す $N=80$ r.p.m. の場合とほぼ同様な結果が観察された。すなわちいずれの回転速度でも、混合および輸送領域あるいは不動域が認められた。また粉体装入率 $F^+/V=15\sim20\%$ の粒体の運動は、 $N=80$ r.p.m. 付近で擬臨



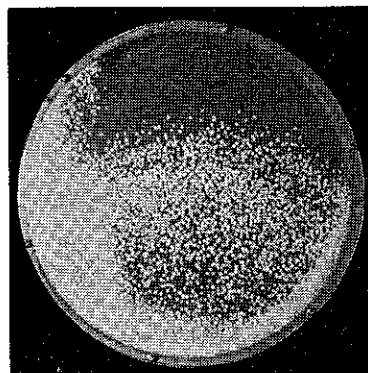
(a) $F^+/V=10\%$
 $N=80$ r.p.m.



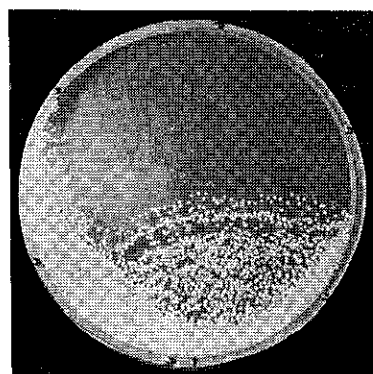
(d) $F^+/V=20\%$
 $N=80$ r.p.m.



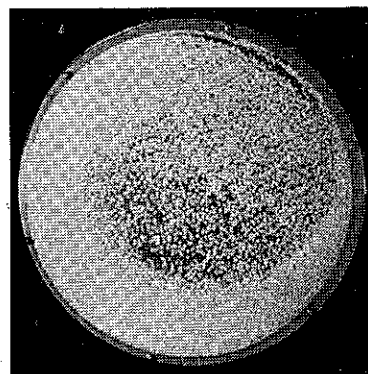
(b) $F^+/V=15\%$
 $N=80$ r.p.m.



(e) $F^+/V=20\%$
 $N=80$ r.p.m.



(c) $F^+/V=15\%$
 $N=80$ r.p.m.



(f) $F^+/V=50\%$
 $N=73$ r.p.m.

Fig. 3 粉体装入率 F^+/V を変化させた場合の粒体の運動状態

界状態を示した〔Fig. 3 (b および d)〕が、粒体の運動状態が不連続のため Fig. 3 (c および e) のような複雑で不安定な状態も得られた。すなわち粒体層高さの最大を示す付近において、粒体の一部が塊となって円筒壁から離れて崩解飛散する粒体の運動状態が観察された。このような粒体の運動状態は、ある粒体層高さまで達した粒体群が、円筒壁と粒体あるいは粒体間の摩擦が減少すると同時に、回転速度の増大により遠心力が大きく働き、重力とのバランスが失われたために生じたと思われる。

さらに $F^+/V=30\%$ から Fig. 3 (f) の $F^+/V=50\%$ の範囲では、いずれの回転速度においても Fig. 3 (c) および (e) のような不連続な粒体の運動状態は観察されず、Fig. 2 (c) および (d) に示した運動状態と似ており、この範囲内の装入率が、密度の異なる系の混合に適当な装入範囲であると予測された。

以上の粒体試料およびその装入率を変化させた写真結果あるいは写真観察結果を省略した粒体混合物などの運動状態から、運動角や粒体層高さおよび臨界回転速度を求め、次節以後で定量的に検討することにした。

3.2 密度の異なる粒体の運動角および粒体層高さ

密度の異なる粒体試料の運動角 θ と回転速度 N の関係を Fig. 4 に示した。Fig. 4 からいずれの粒体についても運動角 θ は、データに少しのばらつきは見られるが、粒体の密度にほぼ関係なく回転速度 N の増加とともに $N=30$ r.p.m. までは直線的に増大していることがわかった。Fig. 5 には、各粒体試料について粒体層高さ H と回転速度 N の関係を示した。Fig. 5 から粒体層高さ H は、回転速度が 10 r.p.m. までの一部と安息角が比較

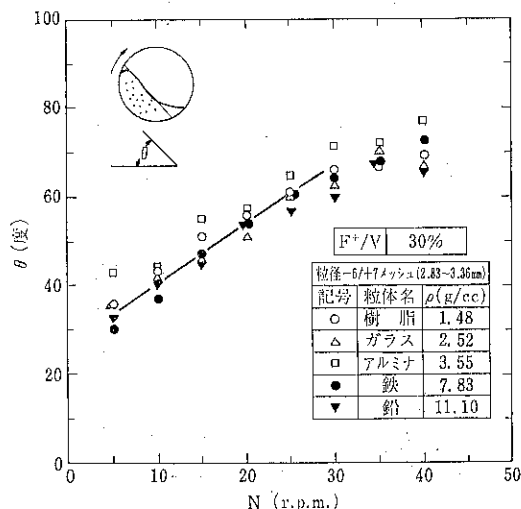


Fig. 4 密度の異なる粒体試料の運動角 θ と回転速度 N の関係

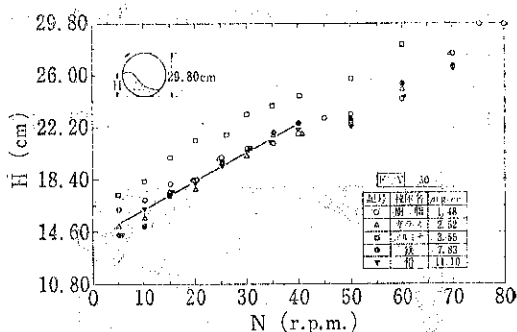


Fig. 5 密度の異なる粒体試料の粒体層高さ H と回転速度 N の関係

的大きいアルミナ粒体の結果をのぞけば、粒体の密度に相違があっても各回転速度においてほぼひとしい数値を示した。したがって密度の異なる粒体でも一定の回転速度で運動する場合、粒体間の摩擦力はほぼひとしく粒体は一定の粒体層高さまで引き上げられある運動角を形成したことになる。以上のことから粉体装入率が $F^+/V=30\%$ の本実験範囲では、Fig. 4 および 5 の結果から粒体の密度に異なりがあっても、粒体は各回転速度においてほぼ類似な運動状態を示していると推測してもよいであろう。

つぎに粉体装入率 F^+/V を変化させた場合における運動角 θ と回転速度 N の関係を Fig. 6 に示した。Fig. 6 から運動角 θ は、 $F^+/V=10\%$ の結果をのぞけば、粉体装入率にあまり影響を受けずほぼひとしい値を示し回転速度 N とともにまず近似的に直線を示して増加し、その後飽和する傾向を示した。さらに粉体装入率をパラメータとし粒体層高さ H と回転速度 N の関係を示したのが Fig. 7 である。Fig. 7 より H の値は、 $F^+/V=10\%$ では回転速度が変化してもほぼ一定値を示した。 $F^+/V=30\%$ 以上の H は、各粉体装入率において回転速度 N の増加とともにほぼ直線的に増大した。なお 両者の中間の

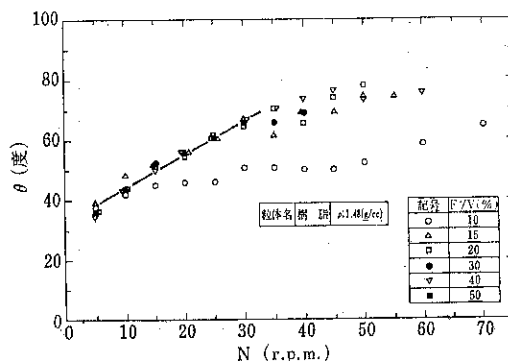


Fig. 6 運動角 θ と回転速度 N の関係 (粉体装入率を変化させた場合)

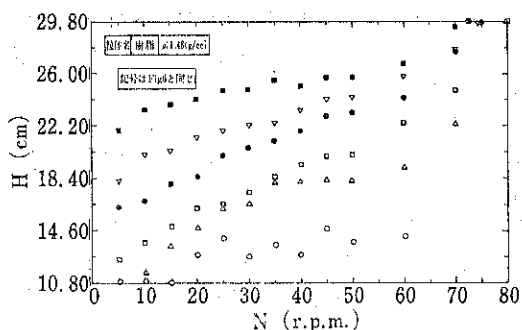


Fig. 7 粒体層高さHと回転速度Nの関係
(粉体装入率を変化させた場合)

$F^+/V=15\sim20\%$ では、データはばらついているが一応回転速度とともにHは増加する傾向が見られた。

3.3 粒体混合物の運動角あるいは粒体層高さ

粉体装入率 $F^+/V=30\%$ で仕込比率を $A:B=6:4$ の一定に保ち、種々の粒体混合物について、運動角 θ あるいは粒体層高さHと回転速度Nの関係を調べそれぞれFig. 8および9に示した。

まず Fig. 8 から粒体混合物の運動角 θ は、混合物の密度比が異なっても、ほぼ同じ値を示し回転速度Nの増加とともに増大した。さらに Fig. 9 からわかるように、粒体混合物の密度に相違が見られても類似な値を示して回転速度の増加に伴ない増大し、 $N=75\sim80$ r.p.m. で水平円筒の直径とひとしいHを示していることがわかった。したがって θ あるいはHで代表される粒体混合物の水平円筒での運動は、本実験範囲では密度比が異なる粒体系でも、ほとんど類似であると結論できる。

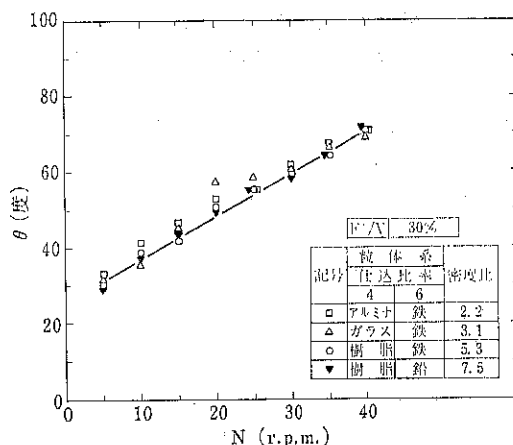


Fig. 8 粒体混合物の運動角 θ と回転速度Nの関係

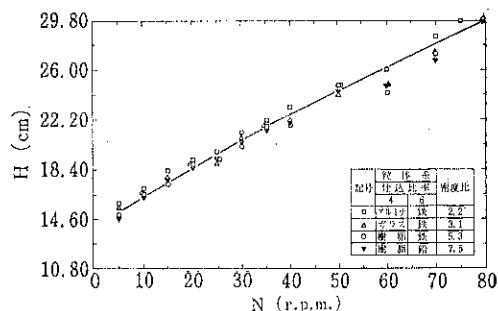


Fig. 9 粒体混合物の粒体層高さHと回転速度Nの影響

3.4 擬臨界回転速度と臨界回転速度との関係

密度の異なる粒体試料で装入率を変化させた場合あるいは粒体混合物の擬臨界回転速度 N_{cr}' を写真から求

Table 2 擬臨界回転速度 N_{cr}' の測定結果

粒体名	ρ (g/cc)	擬臨界回転速度 r.p.m.	備 考	粒体混合物	密度比	擬臨界回転速度 r.p.m.	備 考
樹 脂	1.48	75 (75~77)	-6/+7	鉄 - 鉄	1	80 (80~83)	F ⁺ /V=30% 仕込比率 A : B = 6 : 4
ガ ラ ス	2.52	78 (78~82)	メッシュ	アルミナ - 鉄	2.2	80 (75~80)	
アルミナ	3.55	70 (70~78)	F ⁺ /V=30%	ガ ラ ス - 鉄	3.1	80 (80~83)	
鉄	7.83	80 (80~82)	粒体試料	樹 脂 - 鉄	5.3	80 (77~80)	
鉛(散弾)	11.1	80 (80~82)		樹 脂 - 鉛	7.5	80 (75~80)	
擬 臨 界 回 転 速 度 Ncr' (r.p.m.)							
粉体装入率 F ⁺ /V(%)		樹 脂		ガ ラ ス		鉄	
10		110 (110~115)		130 (120~130)		140 (130~140)	
15		85 (80~85)		95 (90~95)		100 (95~100)	
20		80 (80~85)		85 (80~85)		90 (90~100)	
30		75 (75~77)		78 (78~82)		80 (80~82)	
40		75 (75~77)		78 (78~80)		80 (78~80)	
50		73 (73~75)		77 (75~77)		78 (78~80)	

め、結果を Table 2 にまとめて示した。表において () の数値は、擬臨界回転速度の測定された範囲をそれぞれ示した。

Table 2 から、密度の異なる粒体およびその混合物の擬臨界回転速度 N_{cr}' は、粉体装入率 $F^+/V=30\%$ では粒体密度に相違があっても一部をのぞき一定の値 $N_{cr}'=80$ r.p.m. が得られた。しかし $F^+/V=10\sim 20\%$ の範囲では、 N_{cr}' は粉体装入率が増大するにしたがい減少する傾向を示した。

一方、水平円筒型混合機内での単一粒体の臨界回転速度 N_{cr} は、計算によって求めることができる。すなわち粉粒体に働く重力と遠心力がつりあい粉粒体が混合機の内壁に固着しようとする限界の回転速度であるから、混合機の最大半径 R_{max} (m) を基準にとり、重力加速度 g (m/sec²) および質量 m (kg) とすれば

$$m \left(\frac{2\pi N_{cr}}{60} \right)^2 \cdot (R_{max}) = m \cdot g \quad \dots\dots(1)$$

$$\therefore N_{cr} = \frac{30.2}{\sqrt{R_{max}}} \quad \dots\dots(2)$$

となる。

(2)式から本実験に用いた水平円筒型混合機の臨界回転速度を求めると、 $N_{cr}=78$ r.p.m. が得られた。

(2)式から求めた臨界回転速度 N_{cr} と実測の N_{cr}' を比較すると、 $F^+/V \geq 30\%$ で測定した密度の異なった粒体およびその混合物の測定値は一致していると思えた。さらに前節の θ および H が密度の相違に無関係な N_{cr} と Table 2 に示した N_{cr}' の両者の値がほぼひとしくなった範囲では、粒体およびその混合物がともに粒体群として運動している。あるいは粒体相互の干渉により、粒体の物性の違いがあらわれなくなったと考えた。

4. 混合実験の結果と考察

4.1 混合における分離偏析と粒体密度

3.1) 節の結果から、擬臨界回転速度 N_{cr}' 付近の回転速度は物性の影響が軽減され良好な操作条件となるであろうと予測することができた。しかしまず物性の差が明らかに現われると予想される条件で混合実験を行ない、分離偏析現象を観察することにした。

二次元水平円筒型混合機に密度の異なる (密度比 = 5.3) 樹脂と鉄の粒体を粉体装入率 $F^+/V=30\%$ および仕込比率を樹脂 : 鉄 = 4 : 6 (見掛容積規準) を一定に保ち Fig. 10(a) のように混合機に装入した。そして回転速度 $N=50$ r.p.m. の一定で時計方向に回転させた。それぞれの総回転数 $N\theta$ で得られた粒体の運動の写真観察を Fig. 10(b)~10(g) に示した。いずれの写真でも白く映っているのは樹脂の粒子である。さらに密度のひと

い二成分系の混合実験結果も Fig. 11(a)~11(g) に示した。なお密度のひとしい二成分系粒体試料には、鉄の粒体を用い色別により区別した。

まず Fig. 10(a)~(g) の写真結果から、総回転数 $N\theta$ の増加とともに両粒体の分散状態がよくなるが [Fig. 10(a)~(c)], さらに $N\theta$ が増大すれば密度の大きい鉄の粒子が粒体群の中央部にあつまり、その外側を密度の小さい樹脂の粒体が運動する結果を示していることがわかった [Fig. 10(d)~(g)]。また Fig. 10(g) などに示したような両粒体の状態は、相当長時間継続混合しても崩れなかった。さらに混合二成分を十分よく混合して装入した場合あるいは装入方法が異なっても (鉄の粒体が下層)、総回転数 $N\theta=30$ 以上では写真結果を省略したが Fig. 10(g) のような分離偏析が明確に認められた。

つぎに Fig. 11(a) から (g) に示した混合二成分の密度がひとしい場合の実験結果では、この条件においても分離偏析は認められなかった。

以上の写真撮影結果から混合状態を定量的に知るために、混合度 M と総回転数 $N\theta$ の表示による混合曲線を求め Fig. 12 に示した。

Fig. 12 より密度の異なる粒体系 (樹脂-鉄) の混合曲線では、粉体装入方法が異なっても総回転数 $N\theta$ の増加とともに混合度 M がいったん増大し極大値を示した後、分離偏析現象により混合度が減少し M の小さい最終混合状態に到達した。しかし密度のひとしい粒体系 (鉄-鉄) では、樹脂-鉄系に比べて混合曲線に極大値がなく、最終混合度も大きく良好な混合状態が得られた。

さて前報¹²⁾において内容積が約 6 l の三次元の水平円筒型混合機を用い、密度比が 1.02~5.65 の範囲で -42/+150 メッシュ (104~351 μ) の粉体系を選び混合実験を行なった結果を報告したが、この結果は Fig. 12 の両系の混合曲線の傾向と類似な結果を示している。すなわち密度比の大きい粉体系 [(塩化ビニール-鉄) 密度比

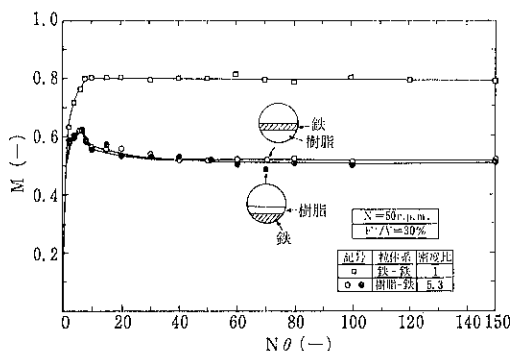
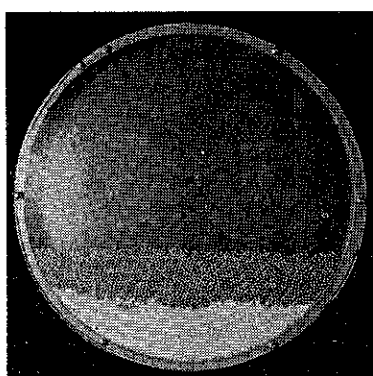
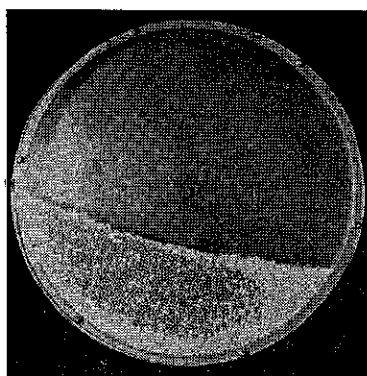


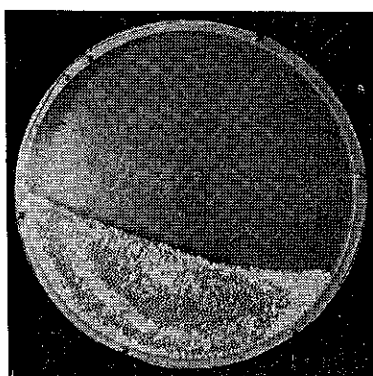
Fig. 12 分離偏析が起こる時の混合曲線



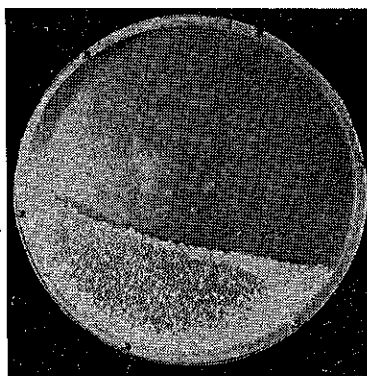
(a) 装入状態



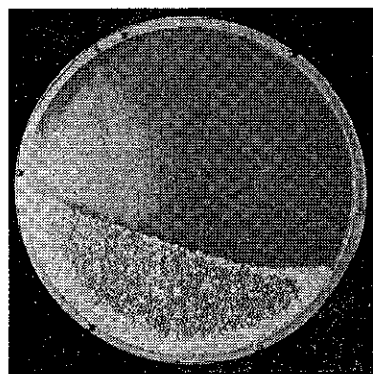
(e) $N\theta = 30$



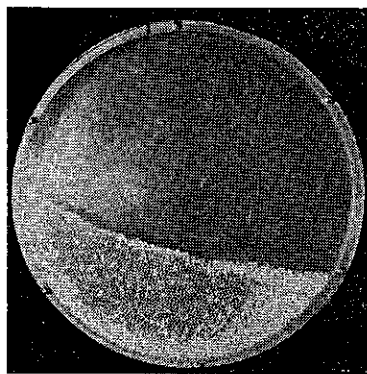
(b) $N\theta = 2$



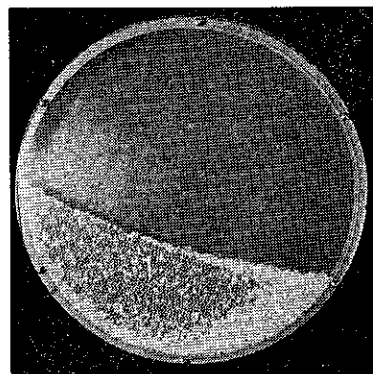
(f) $N\theta = 50$



(c) $N\theta = 6$

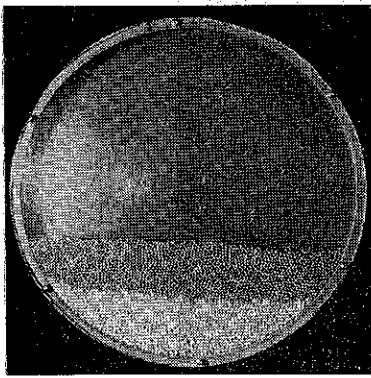


(g) $N\theta = 150$

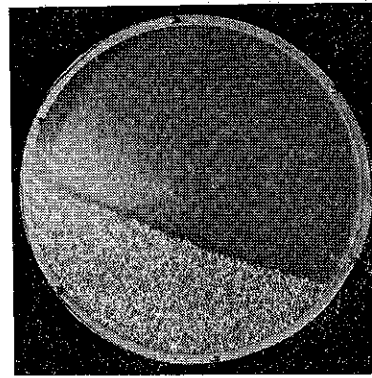


(d) $N\theta = 15$

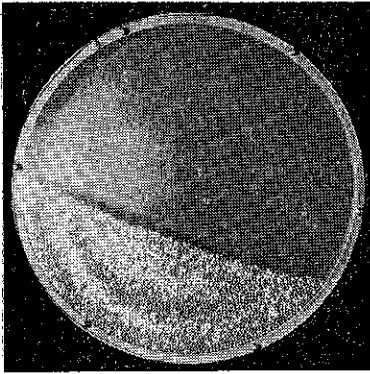
Fig. 10 密度の異なる粒子系の混合過程における粒子の挙動 ($F^+/V=30\%$, $N=50$ r.p.m.)



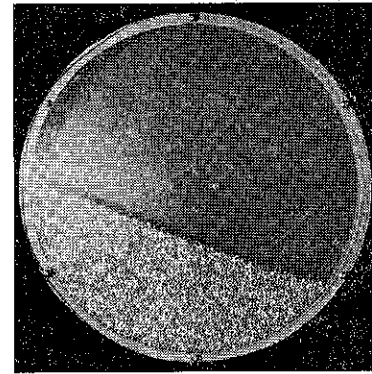
(a) 装入状態



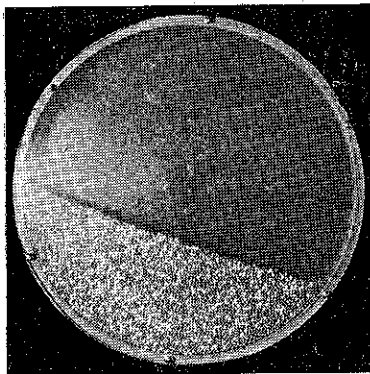
(e) $N\theta=30$



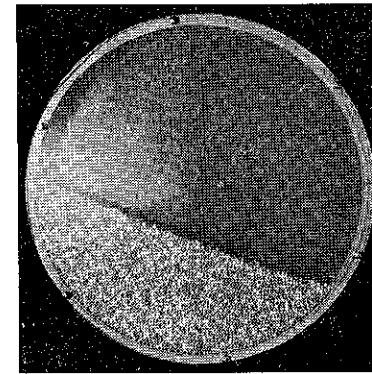
(b) $N\theta=2$



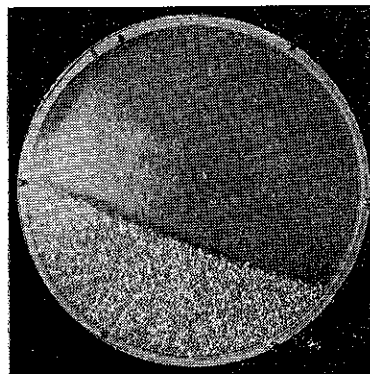
(f) $N\theta=50$



(c) $N\theta=6$



(g) $N\theta=150$



(d) $N\theta=15$

Fig. 11 密度のひとしい粒子系の混合過程における粒子の挙動 ($F^+/V=30\%$, $N=50$ r.p.m.)

5.65] の混合曲線は、回転数とともに混合度 M は増大し極大値を示した後減少し漸次的に平衡状態の一定な M に達した。しかし密度のほとんど異なる粉体系〔炭酸ソーダー砂〕密度比: 1.02〕では、混合曲線は増大し M の平衡値すなわち最終混合度に達し極大値を持たない。また最終混合度の値は、密度の相違のない粉体系の場合が大きくなり、密度比が大きくなると、この値は分離偏析の増大によって段々減少する点も二次元の混合機の場合と同様であった。これらのことから本報の二次元混合機の結果は、前報に示した実際の水平円筒型混合機のよいモデルとなっていると考えることができた。

4.2 分離偏析の起こりにくい操作条件の探求

前節では、回転速度が $N=50$ r.p.m. の一定で密度の異なる系の混合実験を行ない、粒体の挙動および混合曲線から分離偏析の起こる条件を確認した。しかし回転速度が変化すれば、3.3) 節の結果から粒体混合物の運動状態が変化することから、分離偏析が減少する操作条件を見出さうかも知れない。そこで回転速度を変化させて粒体のフローパターンから混合状態の差異を定量的に検討することにした。

粉体装入率や仕込比率ならびに仕込方法〔Fig. 10 (a) 参照〕を前述と同じ方法で、混合機の回転速度のみを変化させて混合実験を行なった。

樹脂-鉄系について、各回転速度で両粒体の運動が定常状態に達した後の流動状態で得た写真結果の一例を Fig. 13(a)~13(d) に示した。さらに回転停止後における粒体の静止状態の写真と併せて Fig. 14(a) から 14(d) に示した。

まず回転速度の小さい $N=30$ r.p.m. の結果では、Fig. 13(a) からわかるように粒体群の自由表面、すなわち粒体群の傾斜降下面において、密度の大きい粒子（黒色：鉄）が傾斜移動層をくぐりぬけて中心部の不動域に落ちこみ粒体群を形成し、両粒体はそれぞれ一定の循環流を生成した²⁾。したがって Fig. 14(a) に見られるように鉄の粒子の分散範囲がせまくなり分離偏析を示した。しかし回転速度が増大し Fig. 13(b) の $N=70$ r.p.m. 付近になると遠心力の影響が強くなるとともに粒体群を流下する粒子の速度が増大するため、密度の大きい粒子のみが傾斜移動層をくぐりぬけて粒体群を形成する傾向は小さくなり粒体の不動域は消失し、分離偏析が抑制される傾向を示した。すなわち Fig. 14(b) の静止状態においても鉄の分散範囲が拡大し、Fig. 13(a) に見られたような明瞭な分離偏析は観察されなくなった。

つぎに回転速度が $N=80$ r.p.m. 付近では、Fig. 13(c) からわかるように粒体の重力と遠心力がある程度バランスして、密度に異なりがあっても両粒体はほとんど一体

となって運動するとともに粒体の一部が円筒壁に沿って運動した。すなわちこの粒体系の擬臨界回転速度であることから、両粒体の物性の相違が軽減されランダム運動し、Fig. 13(a) などのような密度の異なりによる循環流は見られなくなった。したがってこの回転速度の静止状態における両粒体は、Fig. 14(c) に示したようにほぼ均一な分散状態を示した。すなわち良好な混合状態が得られた。

さらに Fig. 13(d) の $N=100$ r.p.m. の高回転領域になると遠心力の作用が卓越し、両粒体は水平円筒にリング状となって運動し混合はほとんど行なわれなかった。Fig. 13(d) の粒体の運動状態から混合機を急停止させると Fig. 14(d) のような静止状態が得られた。すなわち Fig. 14(a) から 14(b) などの結果とは逆に、密度の大きい鉄の粒体が樹脂の粒体の外側に分離偏析を示していることがわかった。

したがって混合二成分に密度の異なりがある場合、輸送および混合領域が判別され一定の循環流が観察される状態あるいは遠心力の作用が強く働き両粒体が円筒壁に固着して運動する時、良好な混合状態が得られない。良好な混合状態を得るには、物性の影響を少なくし両粒体がランダム運動する擬臨界回転速度 N_{cr} 付近で混合操作を行なえばよいということがわかった。

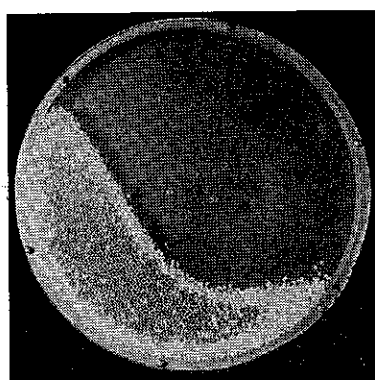
以上の Fig. 13(a)~14(d) などの両粒体の運動状態から、混合状態をある程度知ることができたが、より定量的に混合状態を調べることにした。写真結果から各回転速度での最終混合度 M_{∞} を求め、5 種類の密度の異なる粒体系について最終混合度 M_{∞} と回転速度 N の関係を Fig. 15 に示した。

Fig. 15 から、まず密度のひとしい粒体系（鉄-鉄およびガラス-ガラス）の最終混合度 M_{∞} は、回転速度 N が 50 r.p.m. 以上ではほとんど同じ値を示し、回転速度の影響をほとんど受けないことがわかった。またこの両系は、密度が異なるが、大体同じ M_{∞} の値を示した。

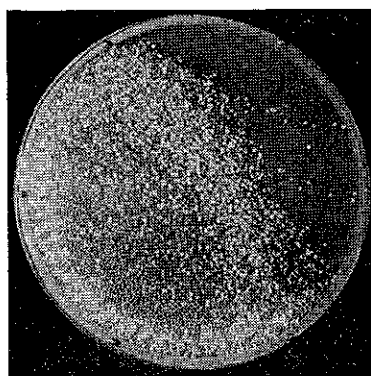
つぎに密度比が 2.2~7.5 の粒体系の最終混合度 M_{∞} は、低回転領域では密度の相違により分離偏析を示すことから、密度のひとしい系の M_{∞} よりも小さい値を示し、良好な最終混合状態が得られない結果を示した。また密度比が大きいほど最終混合度は小さい値を示した。このような結果は、三次元の混合機でも得られている¹²⁾。

さらに実験に用いた粒体あるいは粒体系の臨界および擬臨界回転速度にほぼひとしい $N=80$ r.p.m. では、最終混合度 M_{∞} が増大し密度比の影響がほとんどなくなり密度のひとしい系の M_{∞} にほぼ近い値を示した。

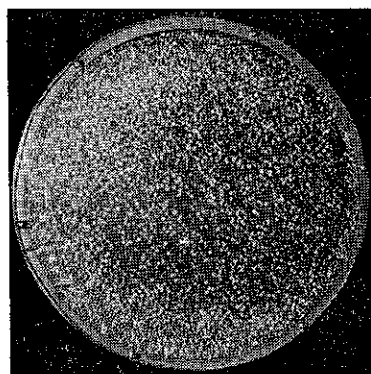
さらに回転速度 N が擬臨界回転速度 N_{cr} よりも増大



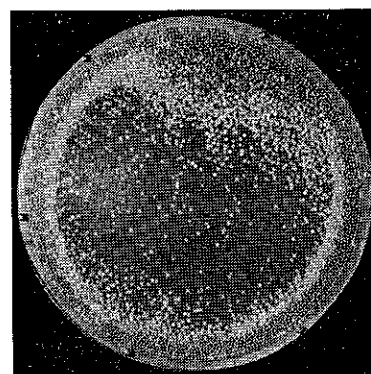
(a) $N=30$ r.p.m.



(b) $N=70$ r.p.m.

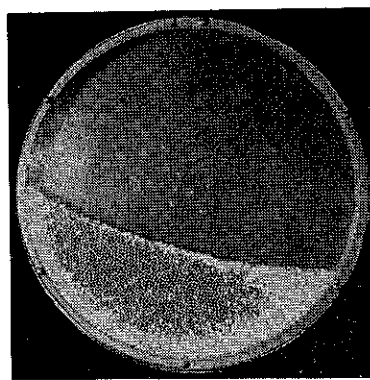


(c) $N=80$ r.p.m.

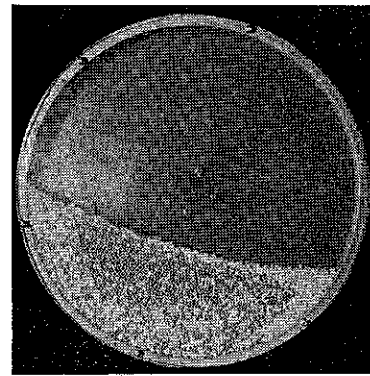


(d) $N=100$ r.p.m.

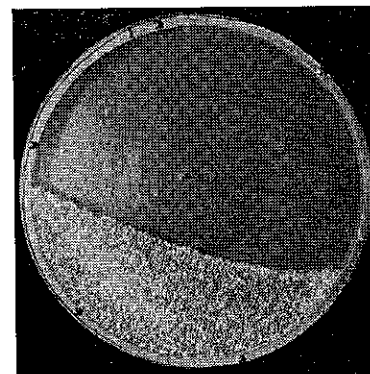
Fig. 13 回転速度を変化させた場合の粒体の流動状態



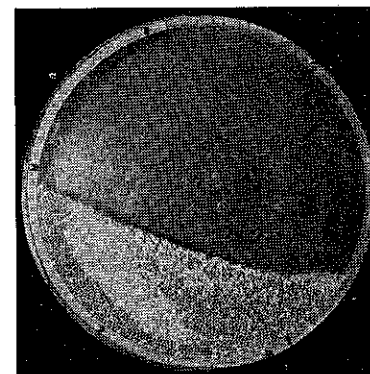
(a) $N=30$ r.p.m.



(b) $N=70$ r.p.m.



(c) $N=80$ r.p.m.



(d) $N=100$ r.p.m.

Fig. 14 各回転速度での粒体静止状態

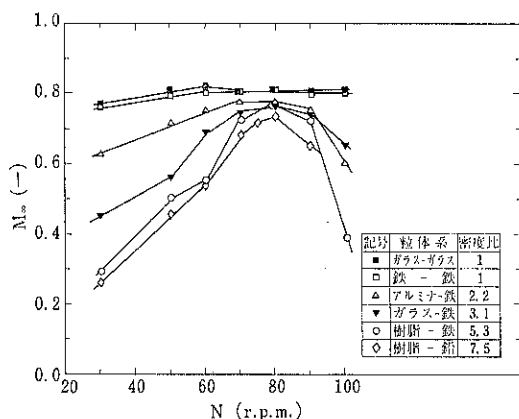


Fig. 15 最終混合度 M_{∞} と回転速度 N の関係

し $N=90$ r.p.m. 以上の高回転領域になれば、密度比のある系では再び分離偏析が起こり M_{∞} は小さい値を示し良好な最終混合状態が得られなくなった。

5. 結 論

密度の異なる数種の粒体およびその混合物が、二次元水平円筒型混合機内でどのような運動するかを種々の条件において観察し、さらにそれぞれの運動角、粒体層高さおよび擬臨界回転速度を実測した。

つぎに同じ混合機を用いて混合実験を行ない、密度の異なる粒体系のフローパターンの違いおよび混合度を調べ、混合状態の差異を粒体混合物の擬臨界回転速度を用いて考察を試みた。さらに粒体密度の相違に原因する分離偏析の影響を少なくし、良好な混合状態を得る混合機の実験条件を調べた。その結果、つぎの結論が得られた。

1) 密度の異なる粒体試料およびその混合物の運動角、粒体層高さおよび擬臨界回転速度は、粉体装入率 $F^+/V \geq 30\%$ では密度の影響をほとんど受けないことがわかった。

2) 低回転領域においては、密度の大きい粒子が傾斜降下面を流下する間に粒体層をくぐりぬけて、中心部で塊状集団を形成し分離偏析した。しかし擬臨界回転速度および臨界回転速度付近では、遠心力の作用により分離偏析は見られなくなり良好な混合状態を示した。さらに回転速度が増大すると密度の大きい粒体は、粒体群の外側に分離偏析した。

3) 最終混合度 M_{∞} は、密度のひとしい系では回転速度の影響を受けず一定値を示した。また密度の異なる粒体系では、低および高回転領域においては M_{∞} が小さい値を示し良好な混合状態が得られなかった。しかし粉体

混合物の $N_{cr'}=80$ r.p.m. 付近において密度比の影響はなくなり良好な混合状態を示し、密度のひとしい系の最終混合度 M_{∞} の値に近い数値を示した。

4) 密度の異なる粒体系の場合、分離偏析の影響を防止し良好な混合状態を得るには、密度の相違が原因となって両粒体群が分離した循環流を生じないように混合機を操作する必要がある。したがって本実験範囲では、(2) および(3)の結論から擬臨界回転速度および臨界回転速度に近い回転速度で混合操作を行えばよいことがわかった。

5) 本研究の混合曲線の傾向および最終混合度と密度の関係などは、三次元の水平円筒型混合機などにおける混合実験結果とも一致し、本実験に用いた二次元水平円筒型混合機は、三次元の混合機のよいモデルであることがわかった。

記 号

F^+/V	: 粉体装入率(見掛容積基準) (%)
H	: 粒体層高さ (cm)
M	: 混合度 ($\equiv 1 - \sigma/\sigma_0$) (-)
M_{∞}	: 最終混合度 (-)
N	: 回転速度 (r.p.m.)
N_{cr}	: 臨界回転速度 (r.p.m.)
$N_{cr'}$	: 擬臨界回転速度 (r.p.m.)
θ	: 運動角 (度)
ρ	: 粒体試料の密度 (g/cc)

引 用 文 献

- 1) Campbell, H. and W.C. Bauer: Chem. Eng., Sept. 12th., 179 (1966)
- 2) Donald, M.B. and B. Roseman: Brit. Chem. Eng., 7, 749 (1962)
- 3) Roseman, B. and M.B. Donald: Brit. Chem. Eng., 7, 823 (1962)
- 4) 大山義年: 理研彙報, 18, 600 (1939)
- 5) Ullrich, M.: Chem.-Ing.-Tech., 41, 903 (1969)
- 6) 遊佐美津雄: 粉体工学研究会誌, 6, 164 (1969)
- 7) 矢野, 蟹瀬, 佐納ら: 化学工学, 23, 589 (1959)
- 8) 大山義年: 理研彙報, 12, 953 (1933), 14, 570, 770 (1935) 19, 1070 (1940)
- 9) 沢島泰: 粉体工学研究会誌, 6, 95 (1969)
- 10) Rutgers, R.: Chem. Eng. Sci., 20, 1079 (1965)
- 11) Franklin, F.C. and L.N. Johanson: Chem. Eng. Sci., 4, 110 (1955)
- 12) 矢野, 寺下, 山崎: 粉体工学研究会誌, 9, 83 (1972)

色素吸着法による表面積測定

富山大学工学部

諸 橋 昭 一*

川 口 初 男**

1. 緒 言

吸着法にもとづく粉粒体の表面積測定については、気相、液相を問わず従来から数多くの研究が行なわれている。このうち、気相吸着による方法は実用化されている装置もあり、精度もよく、測定が比較的簡単であることから一般に用いられている。一方、液相吸着は本質的には気相吸着と変わらないが、そのもっとも大きな相違点として溶媒の影響がある。また、気相吸着は一般に物理吸着のみを考慮すればよいが、液相吸着においては化学吸着も考慮しなければならない。

このように、液相吸着は気相吸着に比較すると複雑な現象を示すが、ここでは中性、酸性溶液中におけるガラス粒子に色素（メチレンブルー）を吸着させる実験を行ない、吸着量の変化から表面積の測定ができるかどうかについて実験的検討を試みた結果得られた二・三の知見について報告する。

2. 実験装置および試料の調製

吸着色素量を求めるに当って、吸光度の測定には日立分光光度計 101 型を使用した。吸収セルはガラス製で、光路長 1 cm のものである。

吸着実験に使用した色素は東京化成製メチレンブルーで、これを減圧下で 100°C で脱水して無水物とし、蒸留水に溶解して $1.00 \times 10^{-3} \text{M}$ とした。一方、吸着剤として使用した試料は 2.52 g/cm^3 の密度を有する東芝ガラスビーズである。

このガラスビーズは JIS 標準篩を用いてふるい分けを行ない、 $-210\mu / +177\mu$ (目開き平均粒子径 194μ)、 $-177\mu / +149\mu$ (163μ)、 $-149\mu / +125\mu$ (137μ)、 $-125\mu / +105\mu$ (115μ)、 $-105\mu / +88\mu$ (97μ)、 $-88\mu / +74\mu$ (81μ)、 $-62\mu / +53\mu$ (58μ)、 -44μ の各粒子径区間に整粒した。 -44μ のガラスビーズについては顕微

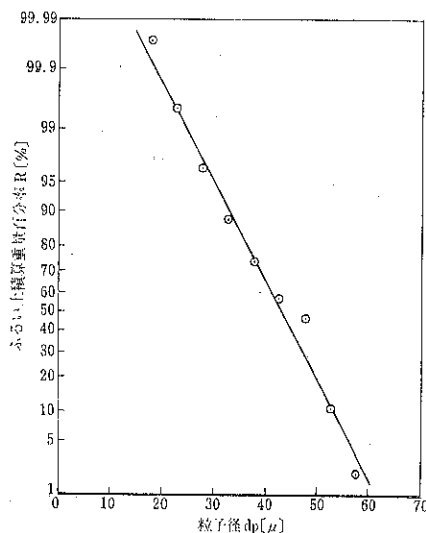


Fig. 1 44μ ふるい下ガラスビーズの粒度分布 (正規確率紙)

鏡計測により粒度分布を求めたが、その結果を Fig. 1 に示す。

ふるい分けしたガラスビーズは 1 N 塩酸溶液中に浸し、時々かきまぜながら 1 時間放置した後、蒸留水で十分洗浄した。この洗浄操作を 3 回行ない、最後に pH メータにて洗浄用蒸留水が中性であることを確かめてから、恒温乾燥器内で乾燥した。この試料はデシケータ中に保存して、実験のつど取出して使用した。

3. 実験方法

あらかじめ所定濃度のメチレンブルーを 25°C において十分吸着させておいた 50 ml の丸底フラスコに、試料であるガラスビーズ 0.5000 g を精秤して入れ、先に調製しておいた所定濃度のメチレンブルー溶液 50 ml をピペットを用いて注入する。ただちに吸着容器を 25°C に保った恒温水槽に浸し、5 分毎に容器を振盪し、吸着を進行させる。30 分経過してから、容器内のメチレンブ

* 富山大学工学部化学工学科 高岡市中山園町 1-1

** 富山大学工学部化学工学科、現在富山化学工業株式会社

ブルーの吸光度を測定し、ガラスビーズによるメチレンブルーの吸着前後の濃度差から吸着量を求める。

4. 実験結果および考察

4.1 メチレンブルーの吸着に及ぼす酸性度の影響

メチレンブルー水溶液に酸を加えた場合、吸収がどのような影響を受けるか調べた結果は Fig. 2 に示すごとくである。メチレンブルーは中性溶液においては青色を呈するが、塩酸酸性にしても実験範囲では、肉眼的には色調の変化は認められなかった。図からわかるように、中性溶液においては 610 m μ および 665 m μ の 2 個所に吸収がみられるが、塩酸を加えると 740 m μ 付近に新しい第 3 の吸収が見られるようになる。また、第 1, 第 2, の吸収は塩酸の濃度を増加させていくにつれて減少するのに対し、第 3 の吸収が著しく増大していることがわかる。Fig. 3 は塩酸の濃度と 610, 665, 740 m μ の各波長における吸光度を示したものである。

Rabinowitch ら¹⁾によれば、第 1 の吸収はメチレンブルーの二量体イオンに起因し、第 2 の吸収は単体イオ

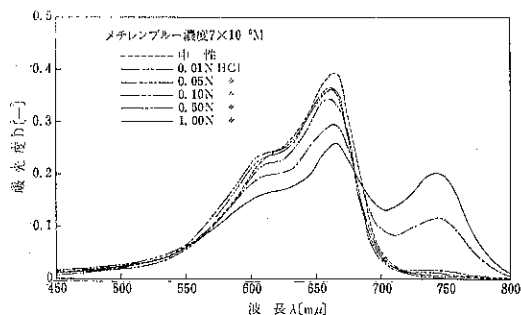


Fig. 2 メチレンブルーの吸収に及ぼす酸性度の影響

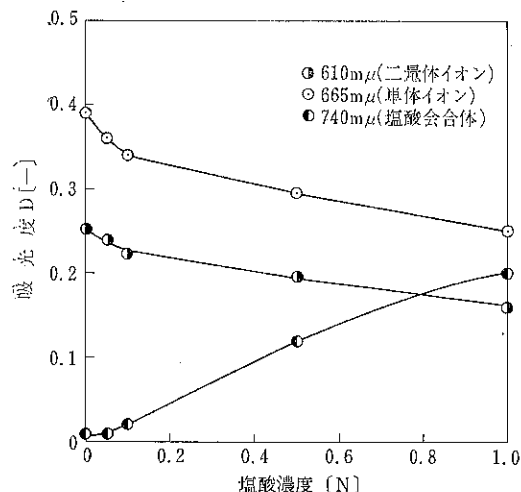


Fig. 3 塩酸濃度と二量体イオン、単体イオンおよび塩酸会合体の吸光度変化

ンに起因するものとしている。また、岡ら²⁾によれば、第 3 の吸収は塩酸酸性とした場合にはじめて現われ、塩酸の濃度と共に増加しているところから、メチレンブルーと塩酸との会合体に起因するものとしている。すなわち、塩酸の濃度を増加させるに従って、メチレンブルーの単体イオンの濃度は減少し、それに応じて二量体イオンは解離して濃度を減少するものと考えている。

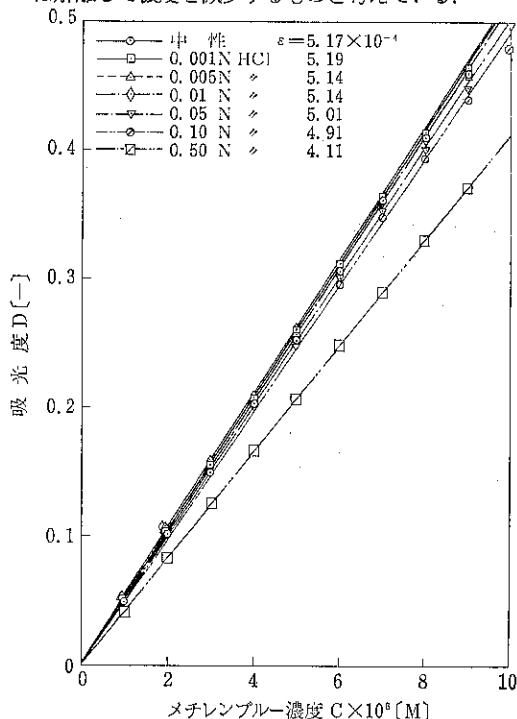


Fig. 4 メチレンブルーの検量線に及ぼす酸性度の影響

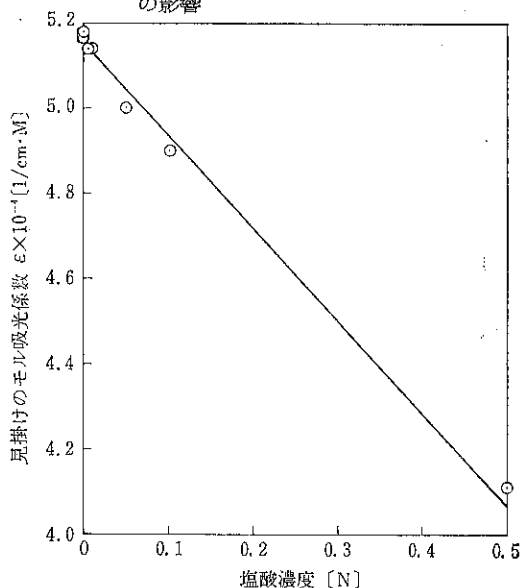


Fig. 5 見掛けのモル吸光係数と塩酸濃度の関係

4.2 メチレンブルーの検量線に及ぼす酸性度の影響

各塩酸濃度において、メチレンブルーの濃度 $C[M]$ を $1 \times 10^{-6}M$ から $10 \times 10^{-6}M$ まで変化させて、665 m μ における吸光度 $D[-]$ を測定した結果を Fig. 4 に示す。

なお、本実験においては1測定点につき5回の実験を行ない、検量線の傾き（見掛けのモル吸光係数 ϵ ）を最小自乗法によって求めた。図より、いずれの塩酸濃度においても、 $10 \times 10^{-6}M$ までは Beer の法則

$$D = \epsilon l C \quad (1)$$

によく従い、直線関係を示すことがわかる。ここで、 $[cm]$ は光路長である。

Fig. 5 は見掛けのモル吸光係数と塩酸濃度との関係を示したものである。

4.3 ガラスビーズによるメチレンブルーの吸着

4.3.1 吸着時間の影響

中性および酸性溶液中において、ガラスビーズにメチレンブルーを吸着させた場合、吸着量に及ぼす吸着時間の影響を調べた結果を Fig. 6 に示した。

この場合の吸着量は次のように示して求めることができる。すなわち、吸着前のメチレンブルーの濃度を $C[M]$ 、吸光度を $D[-]$ 、吸着後の濃度を $C'[M]$ 、吸光度を $D'[-]$ とすれば、 D 、 D' を測定することにより、Fig. 4 の検量線を使用して C 、 C' を求めることができる。

したがって、単位質量当りのガラスビーズによるメチレンブルーの吸着量 $v [mol/g]$ は、使用したメチレンブルーの溶液量が 50 ml、試料質量が 0.5000 g であるので次式のようになる。

$$v = \frac{C - C'}{0.5000} \times \frac{50}{1000} \quad (2)$$

本実験においては光路長が $l=1cm$ であるから、(1)、(2)式より吸着量 v は

$$v = \frac{D - D'}{10\epsilon} \quad (3)$$

となる。

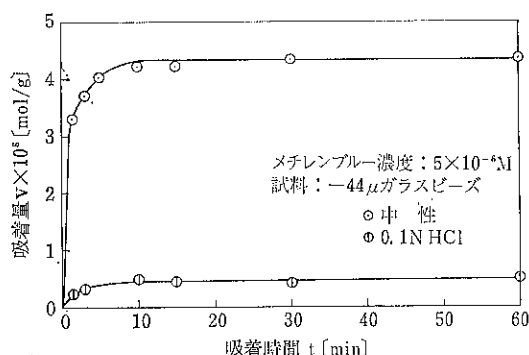


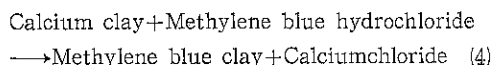
Fig. 6 吸着時間の影響

図から、中性、酸性のいずれの溶液中においても、メチレンブルーの吸着量は最初の数分間で平衡状態に達することがわかる。よって、以下の実験においては吸着時間はすべて30分間とした。また、図より平衡状態における吸着量は中性溶液中の方がはるかに多いこともわかる。

4.3.2 吸着等温線

ガラスビーズによるメチレンブルーの吸着等温線を調べた結果を Fig. 7 に示した。メチレンブルー濃度 $6 \times 10^{-6}M$ 付近では飽和吸着量に達していることがわかる。

Fischer⁸⁾ は粘土に対するメチレンブルーのような塩基性染料の吸着機構は主として陽イオン交換によるものであるとしている。すなわち、水溶液中において、メチレンブルーと粘土は次のように反応する。



また、Robertson⁴⁾ はカオリンによるメチレンブルーの吸着は二段階にわたって起こるものとしている。すなわち、第一段階においてメチレンブルーは陽イオン交換反応によりカオリンに吸着し、この交換反応が終ると第二段階のメチレンブルー分子そのものの物理吸着が起こるものと考えている。

以上の点から、本実験に使用したガラスビーズの主成分は SiO_2 であり、水溶液中では陰イオンとなるので、それに対するメチレンブルーの吸着機構は本質的には、Robertson⁴⁾ の場合と同様であると考えて差しつかえない。

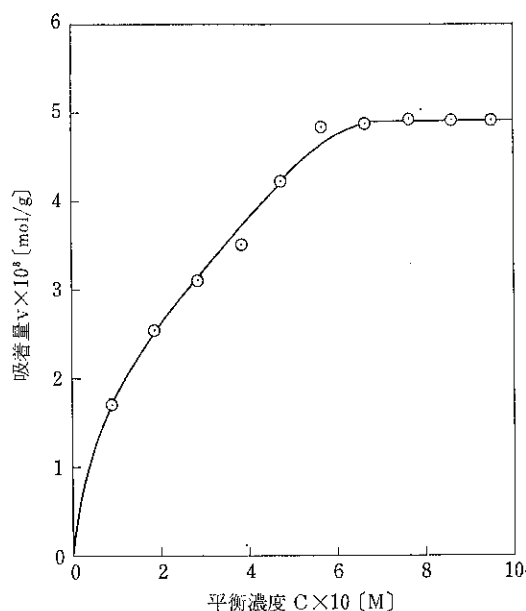


Fig. 7 吸着等温線（試料: -44μ ガラスビーズ）

いであろう。

吸着等温線の典型的な形の一つとして次式で表わされる B.E.T. 型がある。

$$\frac{C}{v(C_0 - C)} = \frac{1}{v_m k} + \frac{k-1}{v_m k} \frac{C}{C_0} \quad (5)$$

ここで、 v_m [mol/g] は吸着剤の全表面に単分子層を形成するのに必要な吸着量、 C_0 [M] は飽和濃度、 k [-] は定数である。本実験の場合のように $C_0 \gg C$ のときは $C_0 - C \approx C_0$ となり、また一般に $k \gg 1$ であるので (5)

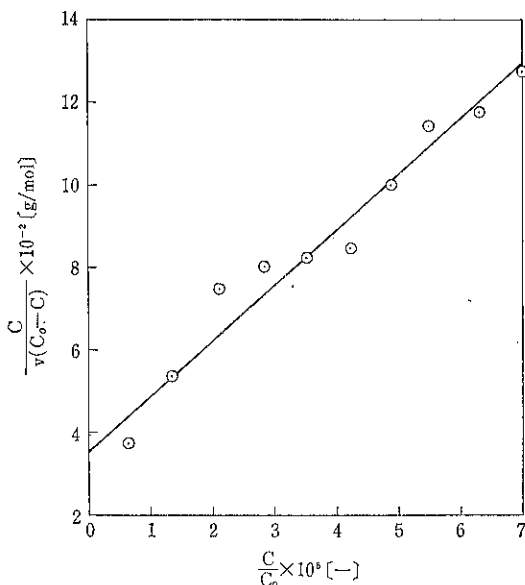


Fig. 8 吸着等温線の B.E.T. 式への適用

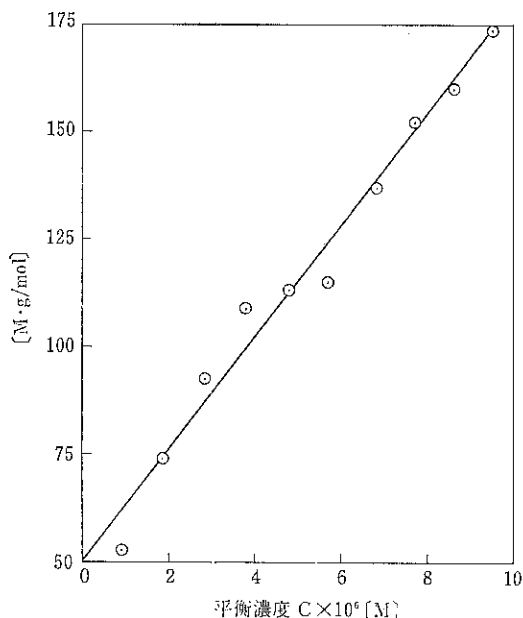


Fig. 9 吸着等温線の Langmuir 式への適用

式は Langmuir 型の吸着等温線である

$$\frac{C}{v} = \frac{1}{ab} + \frac{C}{b} \quad (6)$$

となる。ここで、 a [1/M]、 b [mol/g] は一定の温度においては吸着系によって決まる特有の定数である。

本実験における吸着等温線の結果を (5), (6) 式に適用して図示してみると Fig. 8 および Fig. 9 のようになり、若干のバラツキも見られるが、いずれの場合も直線関係が成立しているとみなされることから、これらの型の吸着が生じているものと思われる。

4.3.3 塩酸の影響

メチレンブルーの濃度を一定にして、種々の塩酸酸性溶液中で吸着させた結果を Fig. 10 に示す。図より、塩酸濃度が増加するにつれて、吸着量が減少していることが知られる。この原因としては、酸性溶液中では、水素イオンがガラスビーズに吸着し、その分だけメチレンブルーの吸着が妨害され、塩酸濃度が増加するにつれて、その傾向も増加するものと考えられる。

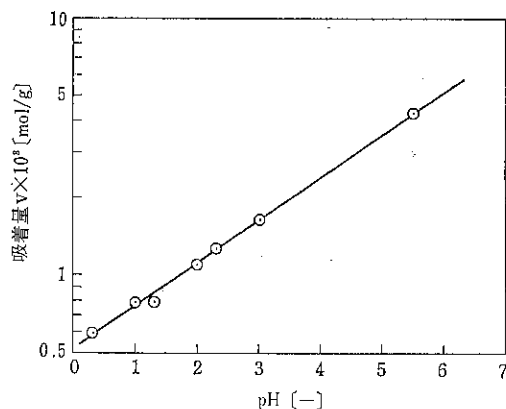


Fig. 10 吸着に及ぼす酸性度の影響
メチレンブルー濃度： 5×10^{-6} M
試料：-44 μ ガラスビーズ

4.4 色素吸着法による表面積測定への応用

球形試料であるガラスビーズの平均粒子径を d_p [cm]、密度を ρ_p [g/cm³] とすれば比表面積 S_w [cm²/g] は

$$S_w = \frac{6}{\rho_p d_p} \quad (7)$$

と表わされる。つぎに、試料 1 g 当りに吸着したメチレンブルーの占める面積を S_a [cm²/g] とし、多分子層吸着における各層の占める面積を単分子層吸着の占める面積 (S_w に等しい) と等しいものと仮定すれば、メチレンブルーの吸着層数 n [-] は

$$n = \frac{S_a}{S_w} \quad (8)$$

となる。ここで S_a [cm²/g] はメチレンブルー 1 分子

の占有面積を s [cm²], 試料 1 g 当りのメチレンブルーの吸着量を v [mol/g], アボガドロ数を N_A [1/mol] とすれば次式で与えられる,

$$S_a = svN_A \quad (9)$$

なお, メチレンブルー 1 分子の占有面積に関しては, いくつかの報告があり^{5,6,7)}, $s=105\sim130\text{\AA}^2$ である。また, メチレンブルー分子の陽イオンは Fig. 11 に示すような「イカダ」状の構造をしているものと考えられている⁷⁾。

吸着層数 n は試料の粒子径によらず一定であると仮定すれば, (8), (9)式より

$$v = \frac{n}{sN_A} S_w \quad (10)$$

となる。

(10)式はメチレンブルーの吸着量 v と試料の比表面積 S_w は比例関係にあることを示している。(10)式を実験的に検討してみるために, ガラスビーズの粒子径を変化させて, メチレンブルーの濃度を $7\times10^{-6}\text{M}$ で一定に保って吸着させてみると Fig. 12 に示すような直線関係が得

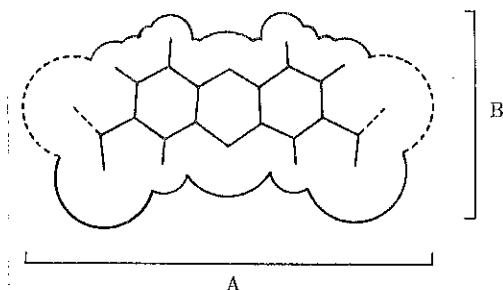


Fig. 11 メチレンブルー分子の陽イオンの概略図
A=16.0Å, B=8.4Å, 最小厚さ=4.7Å

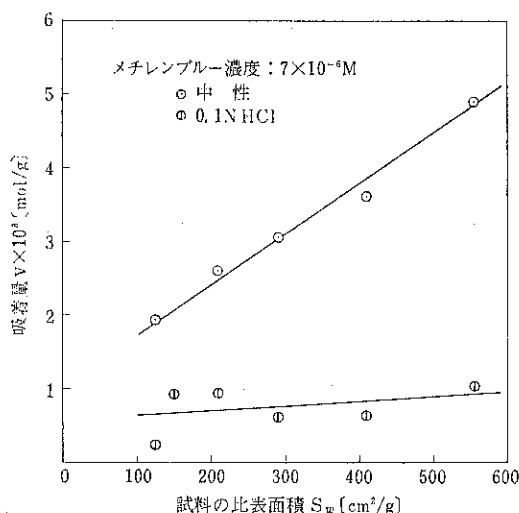


Fig. 12 吸着量と試料の比表面積との関係

られ, 明らかに(10)式が成立することがわかる。

したがって, 任意の試料については Fig. 12 のような検定線をあらかじめ実験的に求めておけば, 表面積の測定が可能であることがわかる。図には酸性溶液中における検定線も合わせて示したが, この場合は比表面積に対する依存性がなく, また吸着量も少ないので, 表面積測定への応用性は乏しいことになる。

5. 結 言

中性および酸性溶液中におけるガラスビーズによるメチレンブルーの吸着について実験的に検討した。得られた知見を要約すれば次のようになる。

(1) 中性, 酸性溶液を問わず, ガラスビーズによるメチレンブルーの吸着は最初の数分間で平衡状態に達した。

(2) 中性溶液における吸着等温線は B.E.T. 型あるいは Langmuir 型を示した。

(3) 酸性溶液中におけるガラスによるメチレンブルーの吸着量は酸性度が増加するにつれて減少することが知られ, 水素イオンがメチレンブルーの吸着を妨害するものと考えられる。

(4) 色素吸着法による表面積測定への応用について検討した。

以上, メチレンブルーをガラス球を用いて, 液相における粒子表面への色素吸着に関する若干の実験的検討を行なった。液相吸着は本質的には気相吸着と変わらないが, その相違点として溶媒の影響, イオン交換吸着などがあり, これらの点についての詳細な検討が今後必要であると思われる。

〔付記〕 本実験の遂行ならびにこれからの研究の方向づけに対して貴重な示唆を与えていただいた, 本学部教授沢島恭先生に深く感謝の意を表わします。

記 号

a: 定数	[1/M]
b: 定数, 飽和吸着量	[mol/g]
C, C': メチレンブルーの濃度	[M]
C ₀ : メチレンブルーの飽和濃度	[M]
D, D': メチレンブルーの吸光度	[—]
d _p : 試料の平均粒子径	[μ]
k: 定数	[—]
l: 光路長	[cm]
n: 吸着層数	[—]
N _A : アボガドロ数	[—]
s: メチレンブルー 1 分子の占有面積	[cm ²]
S _a : 試料 1 g 当りに吸着したメチレンブルー	

一の表面積	[cm ² /g]
Sw: 試料の比表面積	[cm ² /g]
v: 吸着量	[mol/g]
V _m : 試料表面に単分子層を形成するのに必要な吸着量	[mol/g]
ε: 見掛けのモル吸光係数	[1/cm・M]
ρ _P : 試料の密度	[g/cm ³]

文 参 考 献

1) F. Rabinowitch, L.F. Epstein: J. Am. Chem.

Soc., 63, 69 (1941)

2) 岡好良, 松尾茂樹: 日本化学雑誌, 74, 38 (1953)

3) H. Fischer: Trans. Farad. Soc., 33, 2 (1937)

4) R.H.S. Robertson, P.H. Plesh: Nature, London, 161, 1020 (1948)

5) J.J. Kipling, R.B. Wilson: J. Appl. Chem., 10, 109 (1960)

6) J.M. Los, K. Tompkins: J. Chem. Phys., 24, 630 (1956)

7) W.H. Taylor: Chem. & Ind., 54, 732, (1935)

粉 の 話

(社内報より)

魚 の エ サ

十用の丑の日に『うなぎ』を食べる習慣をつくった元祖は江戸時代、平賀源内だと言われています。夏の暑い時に栄養をとるのは大変結構なことですが、この頃のように『うなぎ』も高価なものになってしまつては、なかなか元気がつくほど食べるわけにはまいりません。

粉のお話に『うなぎ』が出てくるのは一寸おかしいかも知れませんが、うなぎを大きくするエサを考えますと実は、ホソカワ/マイクロパルベライザー、或いは、フライン・パルベライザーと言うホソカワの粉砕機で粉にされているのです。

『とる漁業から作る漁業へ』といわれて最近では、色々な魚が養殖されています。ハマチなどはその良い例で昭和三十四年頃から市場へ出て、多分今ではウナギ、コイを抜いて生産量是一位だそうです。養殖魚で多いものは、このハマチに次いで、ウナギ、コイ、虹マスの順になります。これらの魚に人工的な配合飼料が与えられるようになったのは、まだごく最近のことです。以前は主に、サナギや生魚が与えられておりました。配合飼料が最も早く出来上ったのは虹マス用で、これも日本における歴史はやつと十数年ほどです。サケ、マス等については欧米諸国で古くから病氣、栄養の研究が行なわれており、これに我が国自身の研究が熱心に加えられ独自の開発が行なわれて虹マス用の北洋産の自身の魚の粉末を主体とした配合飼料が出来上りました。

コイの飼料についても虹マス用を応用してサナギから配合飼料に変わってきました。

ウナギについては、馬鈴薯のアルファー澱粉が練餌としてよい粘結性を付与すること、魚粉をできるだけ細かく粉砕すると口あたりが良く『うなぎ』が好んで食べる

ことなどが発見されて、急速に開発が進み、昭和四十年から市販されて従来の生魚、主にイワシやサバに代って配合飼料が与えられるようになりました。ハマチについては、まだ配合飼料だけで養殖できるまでには至っていないようですが、やがてこれも開発されていくことでしょう。品不足で流通困難、価格不安定な生魚に代って安価で保存のきく栄養価の高い配合飼料が開発されると、良い魚が市場へ安く出まわることでしょう。これらの養魚飼料の開発には魚の栄養学ビタミン学、病氣に関する研究などが基礎になりますが、魚の嗜好についても重要な問題です。とにかく自然にあっては、見たこともないエサを主食にするわけですから。

『うなぎ』の飼料は水と油で混ぜて練餌にしてザルの中に入れて与えられます。ウナギが食べられる程のやわらかさが必要ですが、食べ終るまでに水に溶けてしまわない程度の固さと粘りが必要です。

虹マスやコイのエサは粉末をペレット(粒状)に固めて与えられます。このペレットの固さも難しく、固すぎるとマスがお腹をこわします。軟かすぎでは水に入れた時に粒がこわれて、粉になって食べられなくなってしまいます。ですから、粒の沈む速度までが問題にされます。

『粉のお話』から少し外れてしまったようですが、これらの飼料の原料となる北洋産の魚の粉砕には、ホソカワの技術が大活躍をしています。

乾燥された魚をウナギやマスが好んで食べられる程に細かくすることは、みかけによらず難しいものです。機械の磨耗も激しいようで、細川の優秀な粉砕機が『とる漁業から作る漁業へ』のキャッチフレーズで陰ながら貢献しております。

空気圧による粒子充填層の体積変動

信州大学繊維学部

佐 納 良 樹

矢ヶ崎 孝 彦*

1. 緒 言

粉粒体は大なり小なりレオロジー的性質を示すことは、古くから知られているにかかわらず、それらに関する実測データは決して多いとはいえない。しかも、大抵は粉体層の剪断歪に関するものである¹⁻⁸⁾。しかし粉体層の変形は剪断歪に限らず圧縮による容積変化⁴⁾あるいは流動化法で見られるように流体の透過流量の変動によ

る粉体層の膨張、収縮を伴う場合も多い。特に流動層に加わる圧力(ガス圧)を周期的に変動させる、動的流動化(dynamic fluidization)⁵⁾では種々の興味ある挙動を示し、流動層の性能改善も期待できることもあって、今後の解明がまたれるところである。

本報告では動的流動化法に関する基礎資料の一つとして粒子充填層の空気圧による体積変化を測定した。

すなわち、粒子充填層に空気を流通させたときの粒子

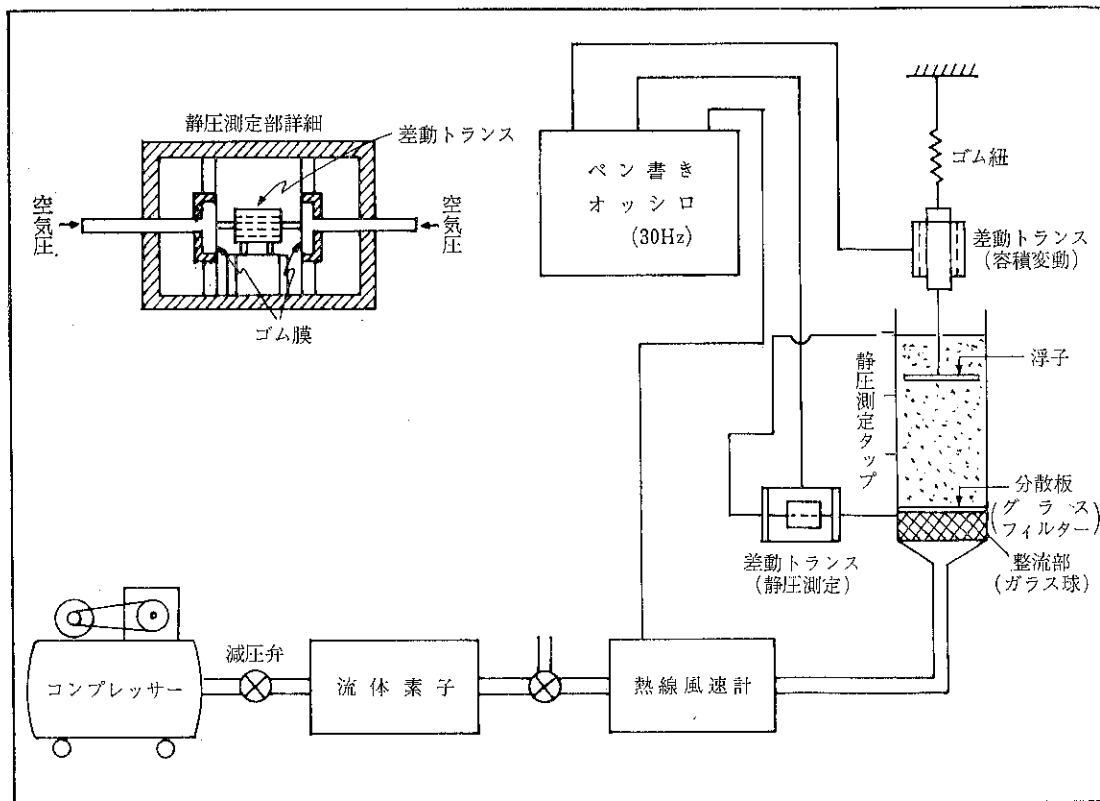


Fig. 1 装置概略図

* 現在 横綱川鉄工所

層の微小な膨張を検出する装置を試作し、粒子層に静的な外力すなわち一定の空気圧を比較的長時間加えたときの粒子層の応答を調べた。

2. 実験装置、測定方法および試料

2.1 実験装置

実験装置の概略を Fig. 1 に示した。体積変化測定部は $49\phi \times 380$ のガラス製円筒である。コンプレッサーからの空気を純流体素子に導き、素子内での空気流路の切換えによってステップ状の空気圧を発生せしめ、測定部へ導く。粉体層に加わる空気圧は後に述べる方式によって分散板の直下および粉体層上端付近で測った静圧の差から、あらかじめ検定しておいた分散板の圧損を差引くことにより求めた。

空気流速はダクトの中心線上へ挿入した熱線風速計により測定した。

次に粉体層の体積（見掛け体積）の測定は Fig. 2 に示したような検出端によった。

すなわち、多孔板浮子はその孔を流通する空気流速が粒子の u_{mf} 以上にならないように開孔率を大きくし（約 76%）、かつ粉体層高の変化を平均的に検出するように浮子の直径は塔内径の約 85% の大きさにした。

Fig. 2 のように、浮子に針金を連結し、一方針金の他端は差動トランスの鉄芯につなぎ、それをさらにゴム紐で釣り下げている。ゴム紐の強さは、浮子、差動トランスの鉄芯および針金の総重量と釣り合うように選んだ。これにより、浮子は粉体層の層高変化（体積変化）に十

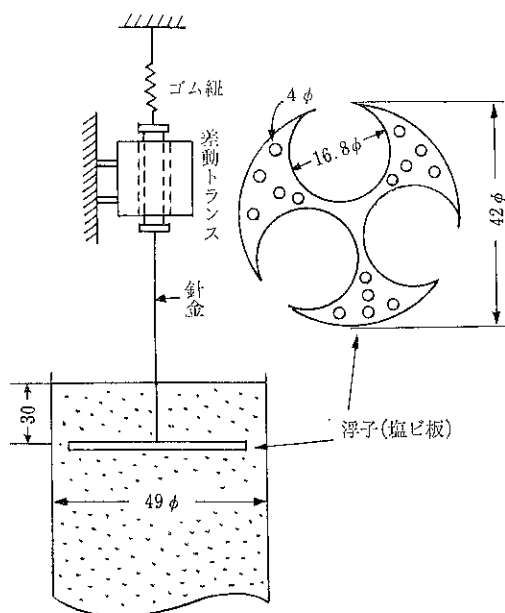


Fig. 2 体積変化検出端

分追随しうる。

また、測定部の側壁に立てたタップから取り出した静圧は Fig. 1 に示したように2枚のゴム薄膜の伸び量の差におき替え、これを差動トランスで検出してペン書きオシログラフ（0~30 Hz）で記録した。

さらに測定部下端には整流部として、 $2.5\text{ mm}\phi$ のガラス球を充填し、分散板としてはガラスフィルター（G-3, 平均孔径 $20\sim 30\mu$ ）を使用した。

2.2 測定方法

測定部に所定量の試料粉体を投入後、十分つき固めることにより比較的密な層を形成せしめた（この際、Fig. 2 に示したように粉体層表面から約30%の深さに、針金を連結した浮子を埋め込む）。次に浮子の追随性をよくするためにゴム紐の取付け金具を上下して張力を調節する。その後、空気を急激に測定部に導き、粉体層に透過させて、その時刻から後の、粉体層の変化を記録した。

2.3 試料粉体

実験に使用した粉体は豊浦砂および相馬砂など比較的粗いものと、活性白土、ベントナイトなど比較的微細な粉体である。それらの主な性質を Table 1 に示した。

Table 1 試料粉体の性質

粉 体	粒 径 (μ)	真 密 度 (g/cc)	見掛け密度 (g/cc)
豊 浦 砂	149~350	2.63	1.64
相 馬 砂	149~210	2.64	1.52
ガ ラ ス 球	53~63	2.42	1.64
鉄 粉	149以下	7.18	2.36
アルミニウム微粉	—	2.70	0.531
活 性 白 土	44~88	2.17	0.629
ベ ン ト ナ イ ト	62~74	2.29	0.918

3. 実験結果および考察

3.1 装置性能の検討

(1) 空気圧の形状

空気流速をステップ状に変えたときの測定部での静圧変化は、Fig. 3 に示すごとく空気圧の大小にかかわらず瞬間的であり、ほとんど時間遅れがないことを確かめた。

(2) 粉体層内の圧力分布

粉体層の高さ方向の4~5カ所について静圧を実測した結果を Fig. 4 および Fig. 5 に示した。また、種々な流速において粉体層内の同一層高断面内の3カ所（各測定点間の中心角は 120° ）における静圧測定結果を Fig. 6 に示した。

Fig. 4 に付記した流速の値のうちもっとも大きいも

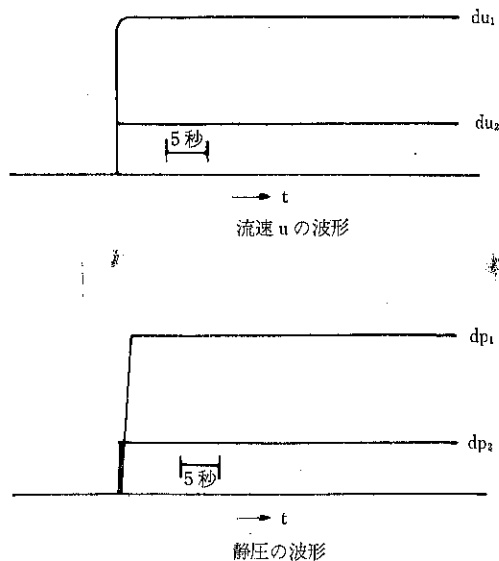


Fig. 3 空気圧および流速の波形

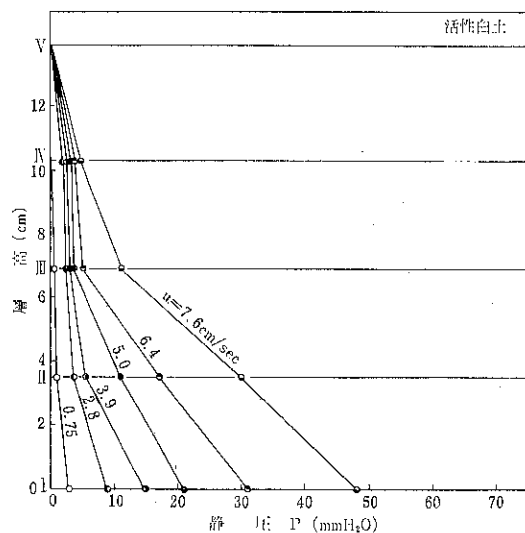


Fig. 5 粉体層軸方向圧力分布

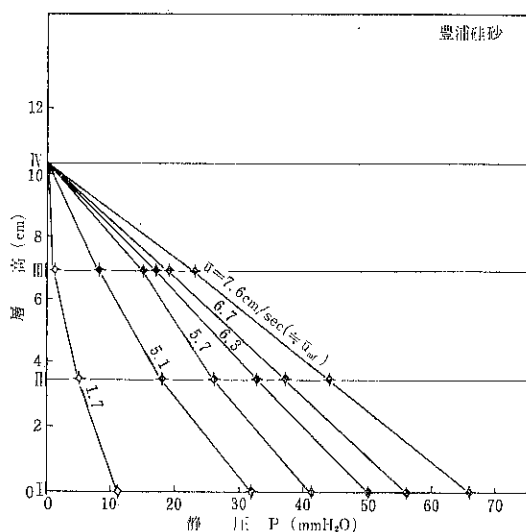


Fig. 4 粉体層軸方向圧力分布

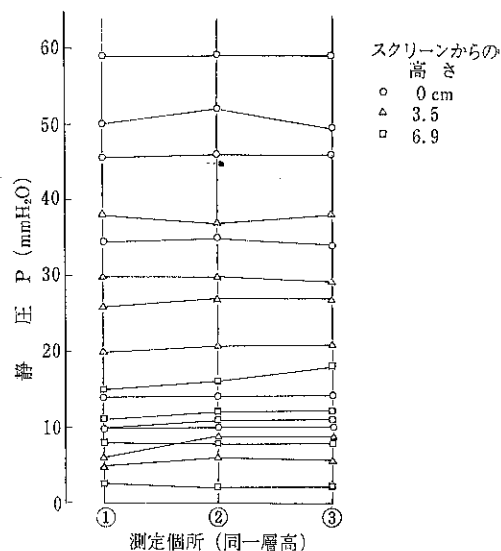


Fig. 6 粉体層水平方向圧力分布

のは u_{mf} に近い。図からわかるように流速 u が大きいときは層高対静圧の関係は、ほぼ直線となり充填層の高さ方向全体にわたり一定の静圧差を示すものと見なした。図は省略したが、同じことが相馬砂など、粒子径が比較的大きい粉体に対してもいえた。しかし Fig. 5 のように活性白土などの微粉では層高対静圧の関係は直線とならず、層の下半分で圧損が大きかった。また、Fig. 6 に示したように水平方向の圧力分布はほぼ一定であることから、空気圧は断面全体にほぼ均一にかかるものと見なしてよいであろう。

3.2 粉体層体積の変化

ある時刻にステップ状に加圧した後、その圧を保ちつけた時の粉体層容積の変化量 $\Delta V/V$ 対時間の関係の 1 例を Fig. 7 に示した。本実験で粉体層に与えた体積変化の程度は $\Delta V/V$ で約 1.5% 以内であり（それ以上の変化を起こさせると流動化開始のおそれがある）、変化量としては比較的小さいといえる。粉体層は空気圧の突然の変動に対し最初は急激に体積膨張を来した後、漸近的に平衡値に到達することがわかった。このことは他のすべての粉体についても同じであった。また平衡に到達

するに要する時間は予想以上に長く $\Delta V/V$ の大きい場合には約20秒を要した。また、予想に反しアルミニウム微粉、ベントナイトなどのような微粉でも他の比較的粒径の大きい粉体の場合と目立った差異は見られなかった。

Fig. 8 は、Fig. 7 の変形初期の時間軸を拡大したものである。図から、体積膨張の大部分は最初の数秒のうちに起こっているといえる。

つぎに Fig. 7 に例示した $\Delta V/V$ 対 t 曲線で、体積変化が十分に平衡に達したとみなせるときの $\Delta V/V$ を dp/L に対して点描した結果を Fig. 9 に示した。すなわち、曲線群はほぼ原点を通るものと、通らないものの2種類に大別できた。

各曲線をもっと詳細に眺めると、 dp/L の増加に伴って体積がゆるやかに増加するのは、たかだか始めの体積の0.1%以下という、極く狭い範囲であった。すなわち、粒子同士が比較的粘着性をもつと思われるアルミニウム微粉、活性白土およびベントナイトなどでも空気透過とともに粉体層の体積膨張に、粉体の特性が関与するのは極く初期のみであると推定できる。

さらに豊浦硅砂およびガラス球など比較的粒子径が大きく、かつ粒子形状の整った粉体で明らかに降伏値の存在が見られた。

また比較的長い時間にわたって一定圧力を加えた後、

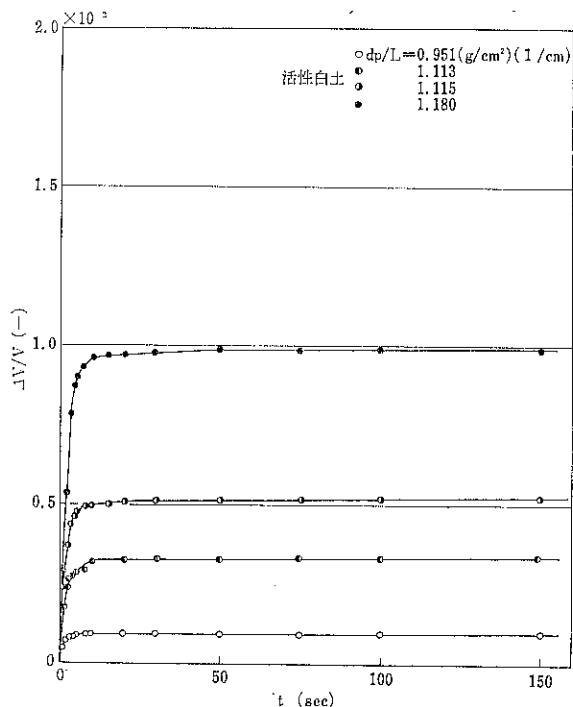


Fig. 7 粉体層容積の変化

ステップ状に圧力を抜いたときに起こる粉体層の収縮の状況を Fig. 10 および Fig. 11 に示した。ベントナイト、アルミニウム微粉は活性白土などとともにほぼ最初

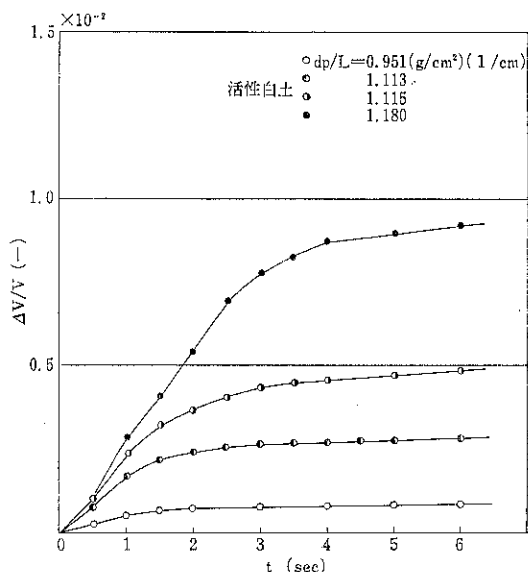


Fig. 8 粉体層容積変化の時間遅れ

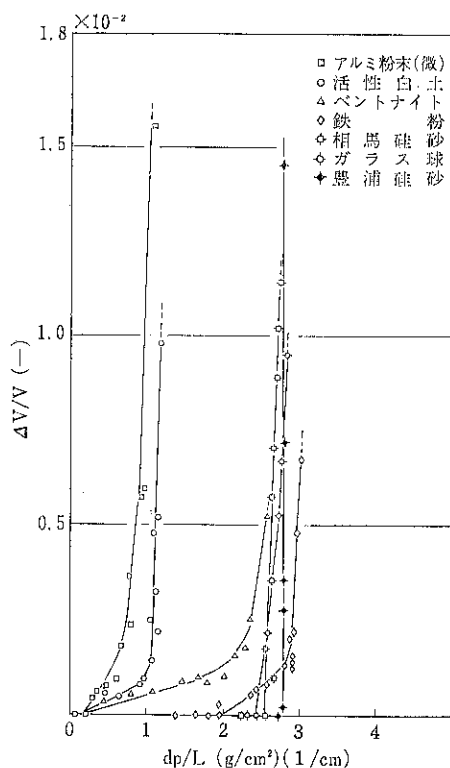


Fig. 9 体積変化量 対 圧力勾配

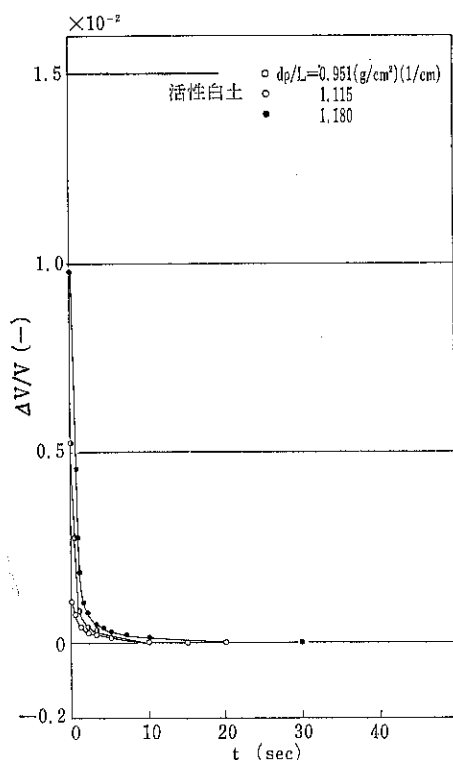


Fig. 10 粉体層容積の収縮

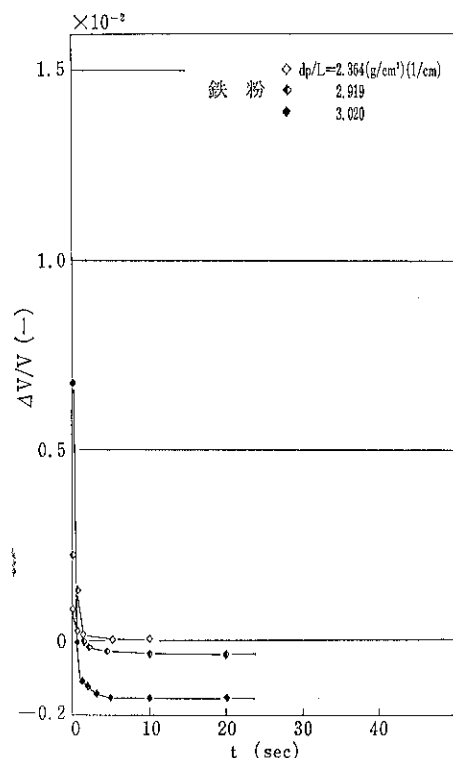


Fig. 11 粉体層容積の収縮

の状態にもどったが、ガラス球、豊浦砂および相馬砂では粉体層容積はもとに戻らなかった。さらに鉄粉では、逆に最初の状態より収縮するという興味ある結果がえられた。

しかしこれらの過程では粉体の収縮する方向に圧力を加えたわけではなく、また最初の装入時のつき固めの強さとも関連して来るはずであり、本実験では定量的な判断はできないので、これ以上論じないことにする。

3.3 粉体層体積の変化速度

粉体層を圧縮あるいは膨張させる過程を極めて遅い速度で進行させれば、粉体層は外部に対し何の抵抗も示さないが、外圧を急激に変化させると粉体層内部の摩擦力などのために外圧に対応する体積変化が同時に起こらず、時間遅れを生ずる。したがってステップ状の外圧を加えたときの粉体圧の体積変化速度には粉体の特性が含まれて来るはずである。

Fig. 8 に示したように粉体層の体積変化速度は時間の経過とともに漸時減少した。そして体積変化の大部分は過程の初期に起こっているから、ここでは体積変化の初速度をもちいることにする。このような体積変化速度を

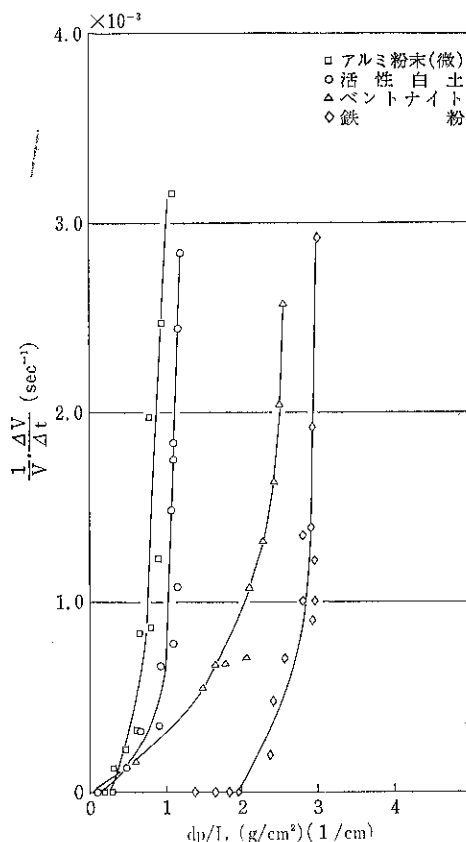


Fig. 12 体積変化速度 対 圧力勾配

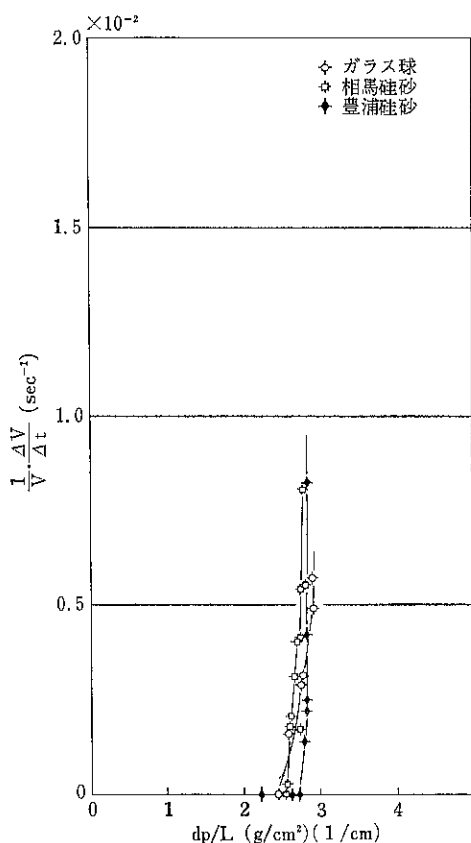


Fig. 13 体積変化速度対圧力勾配

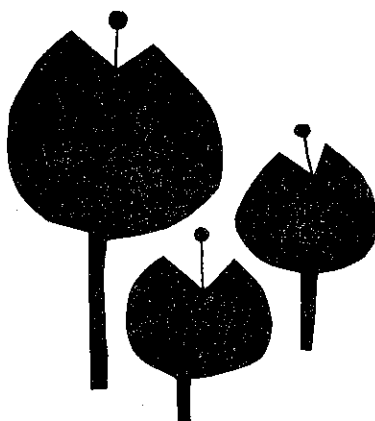
dp/L に対して点描した結果を Fig. 12 および Fig. 13 に示した。両者のグラフから、相馬砂など比較的粗い粉体の体積変化速度は活性白土など比較的微細な粉体のそれより約10倍大きいといえる。

4. 緒 言

粒子充填層の下方からステップ状の空気流を透過させたとき、および空気流を遮断したときの粒子層容積の変動について述べた。ステップ状の空気圧変動に対し粉体層の容積変化は、ある時間遅れを示したが、粉体の種類による差異を定量的に比較検討するまでには到らなかった。本研究においては外圧として流体圧（空気圧）をもちいたので粒子層の体積変化過程にも流体の特性の介在は避けられない。今後、この点に検討、改善を加えれば、本研究の方法により粉体の流動学的性質を測定することは可能であると思われる。

引用文献

- 1) 種谷真一，曾根敏磨：31, 286 (1962)
- 2) 青木隆一：化学工学 24, 598 (1960)
- 3) 新井親夫，早川 誠，佐納良樹：化学工学協会第1回秋季大会講演要旨集，p. 141 (1967)
- 4) 川北公夫：科学 26, No. 3 149 (1956)
- 5) 鞭 巖：森 滋勝，加藤 隆：化学工学の進歩 5, 粉体装置工学 p. 93 (昭46) 日刊工業新聞社



粉 末 と 包 装 材 質

包装材質面における粉末の滑り易さの検討

東京大学病院薬剤部

篠 崎 勲

は し が き

従来、粉末薬品の包装は手分包によって行われていたが、最近、調剤、製剤の能率化に伴い機械包装が導入され、機械により、また目的によって、いろいろな包装材質が用いられている。そこで包装された粉末薬品を服用する際、包装材質に粉末が付着して服用しにくいことがよくある。粉末自身の滑り易さによって、簡単に服用出来るものと、出来難いものがある。特に粉末が少量の場合は、包装材質に付着して、服用誤差の原因ともなる。また包装材質によって、服用の難易があることは経験的に知られている。

滑りの難易は、粉末自体の問題、たとえば、粉末の粒子径、形状、帯電性、含湿量などいろいろな factor が考えられる。また包装材質の相違、包装材質面の状態などが考えられる。今回は包装材質の表面状態を示す表面粗さと粉末の粒子径について、すべり易さを検討した。

1. 実 験 装 置

包装材質の表面粗さ測定法¹⁾²⁾³⁾は、日本工業規格(以下JISと略す)表面粗さ測定法に従って、平面的測定法、立体的測定法、平均粗さ測定法の三種類に分類できるが、今回の実験では、Table.1に示す立体的測定法の切断式触針電気拡大法で行った。測定器はJIS表面粗さ測定器、SE-3形万能表面形状測定器により、最大高さ粗さ maximum height roughness (以下 μH_{max} と略す)を測定した。

Fig.1の粗さ曲線(Roughness Curve)から粗さを推定して、この表面粗さに相当する基準長さについて、JISの方法から、平均表面粗さ mean Surface Roughness (以下 μH_{max} と略す)を求める。

滑り易さの目安は、Fig.2に示す如く、傾斜角の測定器を用いた^{4)~8)}。まず測定器の傾斜板上に包装材質をおき、さらにその上に巾2 mm、長さ20 mmの穴のあい

Table 1 Method of measurement for Surface Roughness

方 式	測 定 法
触 感	指先・ツメの感覚
肉 眼	アラサ標準との比較 傾斜光線による陰影法 ストレートエッジによる隙見法
切 断 式	機械的切断法 触針法 { 機械的拡大 光学的拡大 電氣的拡大 空気マイクロメータによる拡大
光 学 式	光切断法 光波干渉法(顕微干涉計) 視差法(双眼顕微鏡) 透過光線散乱法
電 気 式	電子顕微鏡の双眼的使用

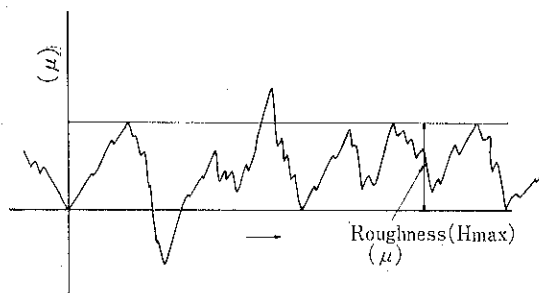


Fig. 1 Roughness Curve

た縦3 cm、横5 cmのプラスチック板を置き、その上から、粉末試料を、篩を通して、うすく充填した後、そのプラスチック板を取り除き、毎秒1.4度の角速度をもつ motor によって、傾斜板を傾かせ、粉末が全部滑り落

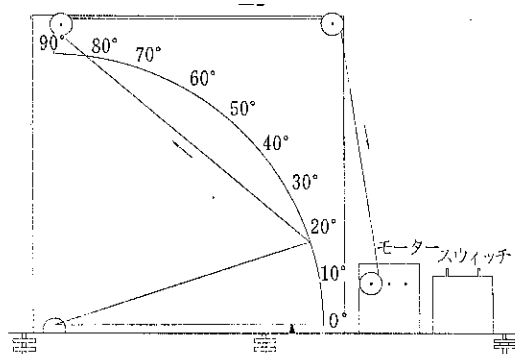


Fig. 2 Apparatus for measuring of Sliding Angle

した点を、その包装材質に対する粉末の滑り易さとした。

2. 試 料

使用した粉末は、粒子径の異なる Active Alumina 5種類, Sulfathiazole と Sodium Borate 各6種類, Flusiom Alumina 5種類である⁹⁾¹⁰⁾。また用いた包装材質とその $\mu\bar{H}_{\max}$ を Table.2 に示す。ただし、同表における F. Side は包装材質表面を、W. Side はその裏面を意味する。

Table 2 Mean Surface Roughness of Packing Material ($\mu\bar{H}_{\max}$)

		F. Side	W. Side
Blanché Roll Paper (Cartridge Paper)	I	8.3(μ)	12.0(μ)
	II	9.7	8.3
	III	10.0	11.3
Parchment Paper		9.3	10.7
Paraffin Paper	I	5.4	
	II	4.8	
Blanché Glassine		5.0	2.6
Polyethylene Laminate			
Polyethylene	I	10.0	
	II	0.7	

3. 実験結果と考察

Fig. 3, 4, 5は、それぞれ同一の包装材質、すなわち $\mu\bar{H}_{\max}$ 一定とし、粒子径の異なる同種粉末について、すべり易さを測定した。縦軸に傾斜角 ϕ_r (以下 ϕ_r と略す)、横軸に粒子径をとり、各粒子径における ϕ_r を plot した。なお、包装材質の表 (F. Side) と裏 (W. Side) の区別をして示した。

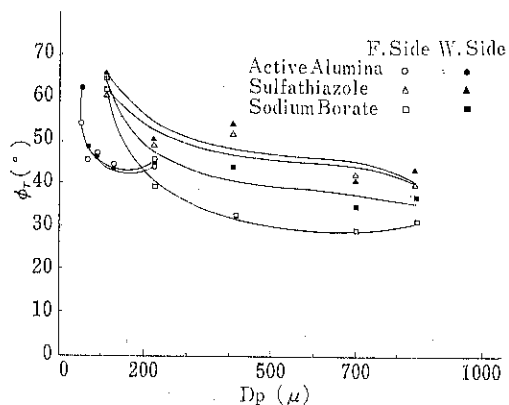


Fig. 3 Relationship between Sliding Angle and Particle Diameter in Blanché Roll Paper

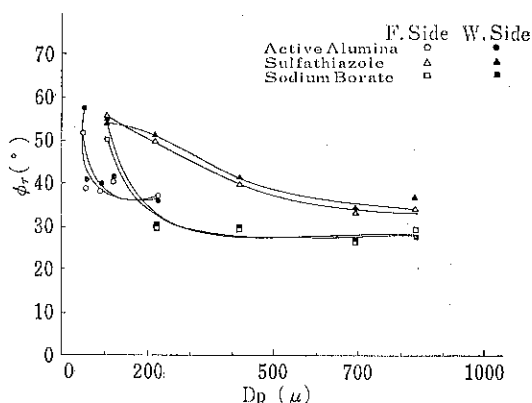


Fig. 4 Relationship between Sliding Angle and Particle Diameter in Parchment Paper

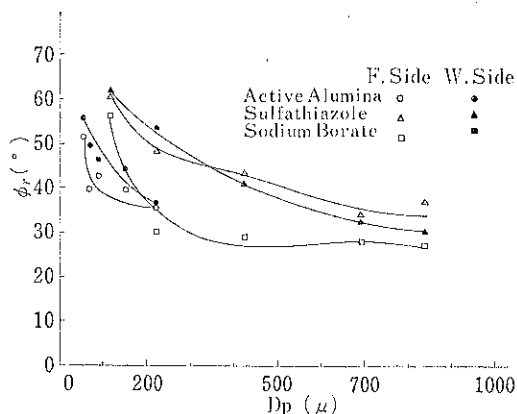


Fig. 5 Relationship between Sliding Angle and Particle Diameter in Blanché Glassine Polyethylene Laminate

Fig. 3は、純白ロール紙 Blached Roll Paper に対して Active Alumina の粒子径 $69.5-223\mu$ の範囲で測定したところ、ほぼ一定の ϕ_r (約 45°) の値を示すが、粒子径が 65μ より小さくなると、 ϕ_r は急激に増大する。従って、粒子径 65μ 付近に、この包装材質に対する Active Alumina の限界粒子径があるものと思われる。また Sodium Borate も Active Alumina と同じような傾向を示し、粒子径 $840-223\mu$ において、ほぼ一定の ϕ_r (表面は約 35° 、裏面は約 40°) の値をとるが、粒子径が 223.0μ 付近より小さくなると急に ϕ_r は大きくなる。従って、粒子径 $840\mu-223\mu$ での ϕ_r の緩やかな傾斜直線と粒子径 223μ 以下の ϕ_r の急勾配な直線との交点、すなわち粒子径 223μ 付近に、この包装材質に対する Sodium Borate の限界粒子径があるものと思われる。しかし Sulfathiazole については、そのような限界粒子径の存在を見い出せなかったが、粒子径が微細になるにつれて、 ϕ_r は、漸次増大してくる。

Fig. 4 のパーチメント紙 (硫酸紙) に於て、Active Alumina は純白ロール紙の場合と類似の結果を得た。また Sodium Borate も純白ロール紙の場合と似ているが、表面と裏面が殆ど同じ ϕ_r 値を示す。

Fig. 5 のサラシ・グラシン・ポリエチレン・ラミネートに於て、Active Alumina は、表面で、純白ロール紙の場合と同様の結果を得た。粒子径 70μ 付近より急な上昇を示す。Sodium Borate は、表面に於て、パーチメント紙の場合と同じような結果を得、粒子径 223μ より急な上昇を示す。しかしその他については、殆ど粒子径が小さくなるにつれて、直線的に ϕ_r は大きくなる。

従って、包装材質と粒子径の異なる同種粉末との間には、粒子径が微細になるにつれて、 ϕ_r は上昇を示し、またこれらの実験結果から粉末のすべり易さが、包装材質の表と裏に於て、あまり有意な差が見られない。なお純白ロール紙に於ては、他の二種類の包装材質に比べて、いずれの粉末に関しても、 ϕ_r 値は高いが、粒子径が大きくなるとその差は見られなくなる。

Fig. 6, 7, 8は粉末と包装材質の $\mu\bar{H}_{max}$ について、縦軸に ϕ_r 、横軸に $\mu\bar{H}_{max}$ をとり、各包装材質の $\mu\bar{H}_{max}$ における一定粒子径の粉末の ϕ_r を示したものである。

Fig. 6は、Active Alumina の粒子の違いによるもので、A (223μ)に於て、 ϕ_r と関係がみられ、他のそれ以外の粒子径 (125.3μ 以下) では、それぞれ $\mu\bar{H}_{max}$ に関係なく、一定の ϕ_r を示す。

従って、比較的大きな粒子径のものは、包装材質面に於て、重力に影響され、 $\mu\bar{H}_{max}$ の変化に伴って ϕ_r が変わるが、小さい粒子径では、包装材質面との接触面積率の増大と共に、付着力が増加し、この実験での $\mu\bar{H}_{max}$

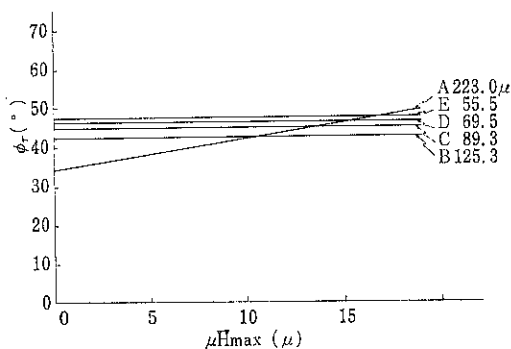


Fig. 6 Relationship between Sliding Angle and Mean Surface Roughness of Papers in Active Alumina

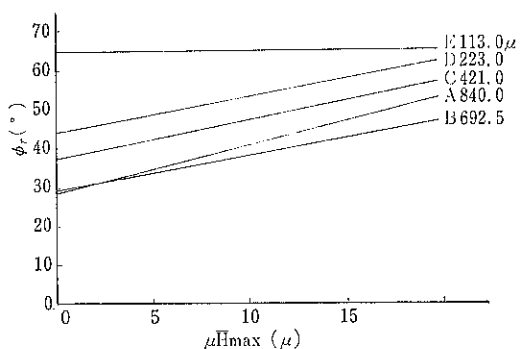


Fig. 7 Relationship between Sliding Angle and Mean Surface Roughness of Papers in Sulfathiazole

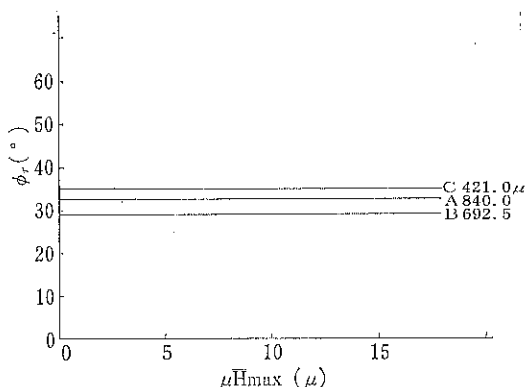


Fig. 8 Relationship between Sliding Angle and Mean Surface Roughness of Papers in Sodium Borate

程度に於ては、 $\mu\bar{H}_{max}$ に無関係に ϕ_r は一定の値を示す。しかも粒子径が小さいほど、そのことは顕著である。

Fig. 7は、ABC順に Sulfathiazole の粒子径が小さくなっている。これらのうち、E (113 μ)のみ、 $\mu\bar{H}_{\max}$ に関係なく、高い一定の ϕ_r を示し、他の、それ以上の大きな粒子径に於て、 $\mu\bar{H}_{\max}$ と ϕ_r に関係が見られる。

Fig. 8は、Sodium Borate の $\mu\bar{H}_{\max}$ と ϕ_r で、両者の間には、相関がなく、粒子径ごとに特定の値を示す。また粒子径が大きいほど ϕ_r は小さい値を示す傾向にある。

Fig. 9に示される如く、ある傾斜角を持つ斜面を物体が滑り落ちるとき、その滑り始めるときの角度 θ と物体の質量M、物体と斜面との間の摩擦係数 μ 、付着力fの間には、Eq (1)に示されるような関係があることが知られている¹¹⁾。

$$Mg\sin\theta = \mu Mg\cos\theta + f \quad (1)$$

M : Solid Particle Mass

g : Gravitational Constant

θ : Slope of Plane

μ : Friction Coefficient between Solid and Plane

f : Adhesion Force between Solid and Plane

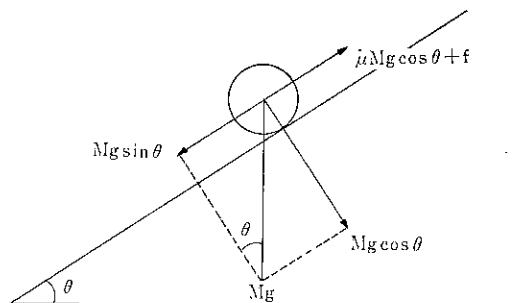


Fig. 9 Force Acting on a Particle Supported by Inclined Plane

今、粒子間の付着力や、摩擦を無視し、また滑り始める際の粒子と包装材質面との接触状態を一定とした場合、包装材質と粒子径の異なる同種粉末の間には、粒子径が微細になるにつれて、 ϕ_r は増大する。つまり滑り易さが悪くなるが、その包装材質に対する粉末の種類によって、限界粒子径 Critical Particle Diameter¹⁰⁾以下になると、 ϕ_r は一層の増大を示すことから、限界粒子径になる前の比較的大きな粒子における付着力をfとし、また限界粒子径を過ぎた比較的微細な粒子の付着力をf'とした場合、 $f' < f$ となる。

また限界粒子径を境として、 ϕ_r に関して、二つの部

分に分けて考えられ、限界粒子径より大きい粒子の時の値を ϕ_r' 、限界粒子径より比較的小さい粒子の値を ϕ_r'' とした場合、 $\phi_r' < \phi_r''$ となる。

従って、Eq (1)について、限界粒子径を過ぎた比較的微細な粒子のほうが、 $Mg\sin\theta$ の値は大きいと判断される。

4. ま と め

粉碎技術の進歩に伴い、微細化が進んでいる。しかし一方微細化による比表面積の増大によって、付着性、凝集性、あるいは飛散性が大きな問題となってきた。^{12~15)}

従来、服用誤差の要因、あるいは服用の難易が、包装材質によると思われていたが、今回の実験によって、その要因が包装材質面の状態、つまり表面粗さよりも、むしろ粉末自身の粒子径によるものであり、一般に限界粒子径より小さい粒子の粉末ほど、その影響が顕著である。

本研究にあたり、傾斜角測定器の援助を賜った昭和大学薬学部教授金庭延慶博士および表面粗さ測定に御協力下さいました小坂研究所に深甚の謝意を表します。

文 献

- 1) 大越 諄：表面アラサ検査法（表面アラサ表示法），コロナ社（1963）
- 2) 山本健太郎：表面アラサ（計量管理技術双書19），コロナ社（1963）
- 3) J I S : B0601
- 4) 神保元二：化学工学，28，704（1964）
- 5) 栗田，中島，森岡，池上，吉積：薬誌，80，1657（1960）
- 6) Cremer, E., et al: Angew. Chem., 64, 10（1952）
- 7) Battel, B.: Chemie Ing. Techn., 32, 8（1960）
- 8) Patat, F. and W. Schmid: Chemie Ing. Techn., 32, 8（1960）
- 9) “粉体粒度測定法”：粉体工学研究会編
- 10) 川上，種谷：粉体工学（その特性と単位操作），プラント工学社
- 11) 中島栄一：薬誌，81，1068（1961）
- 12) 種谷：応用物理，31，4，286（1962）
- 13) 林：薬誌，84，3，229（1963）
- 14) 岡田：薬誌，83，1，39（1962）
- 15) Asthton, M.D., R., Farley, and F. H.H. Valentin: J. Sci. Instrum. 41, 763（1964）

水ガラス系硬化体における白華の検討

菊水化学工業株式会社 中央研究所

長 谷 川 勝

山 内 史 朗

1. ま え が き

白華 (Efflorescence) は一般に建築物外装などにおいて“はなたれ”“アク”などといわれ、古くからその現象について観察されてきたが、セメント硬化体に発生する白華は、セメント中の可溶性成分を溶解した溶液が、セメント硬化体の表面の乾燥に伴って水分が蒸発することにより、溶解成分が硬化体の表面に析出した白色物質を総称するもので、成因により一次白華、二次白華と区別されている。生成される状態は多くの場合、微細結晶の粉体状であるが、場合によっては石灰乳状に固着した状態で生成されることもある。

この白華については、古くから多くの研究が行われており、成分はアルカリ金属の炭酸塩あるいは硫酸塩^{1~7)}アルカリ土類金属、主に Ca の炭酸塩⁸⁾少数例として珪酸⁹⁾、硝酸塩⁹⁾などがあり、その発生は季節(気温・湿度・風向・風速)、水および砂の配合比、粒度、砂の種類、基体の表面状態など多くの因子に影響されるものとして、これら因子との関連性を述べている。さらにこれらの他にも多くの報告があるが、作用する因子が多すぎためか、いずれも判然とした結論を得るには至っていない。

われわれは、白華現象は基体内部の物質の基体表面への移動と、基体表面での析出に関わるものであり、この観点から検討を加えるのも一方法であると考え、生成する成分を単純化するため水ガラスを硬化成分として、水ガラスの濃度による影響、基体形状と発生との関係を模型的に検討したので報告する。

2. 実験方法および結果

2.1 水ガラス濃度と白華の関係

2.1.1 実験方法 Table 1 に示すような c-1 類耐火レンガを Fig. 1 の形状に切り出す。市販の 3 号水ガラス ($\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$ のモル比 1 : 3, 水分 60.4%) を水で希釈して珪酸ナトリウムの 40, 20, 10, 6.7, 3.6,

Table 1

化学成分	組 織	原 料	かさ比重
SiO_2 58.4%	ガラス・ムライトの混合物	粘土	1.06
Al_2O_3 37.0%			使用したものは 1.114 と 1.06 の 2 種類 (空気比較式比重計で測定)
Fe_2O_3 2.74%			
CaO 0.76%			

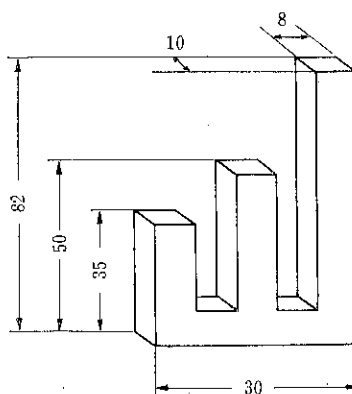


Fig. 1 基体レンガの形状 (単位 mm)

0% (wt%) の溶液を調整する。この液にレンガの下部を静かに浸漬して毛細管現象により可能な量だけ液を含浸させる。前後の重量を測定し、ガラス板上にのせ段ボール箱に入れ、室内の日陰の場所に静置し、一定時間後の重量減少と白華の発生状態を観察する。なおこの場合、レンガ組織と水ガラスとの化学反応は考えられないので、単に白華の現象は毛細管を通過の基体内部の水ガラスの表面への析出と考えてよい。

2.1.2 結 果 使用した c-1 レンガは空気比較式比重計の測定から真比重は 2.54 であり、体積と重量から嵩比重は 1.066 となる。気孔率 = $1 - \text{嵩比重} / \text{真比重}$ で表わされる。したがって気孔率は 0.567 となる。レンガの重量から簡単に Open Pore の容積が分り、レンガに含

浸された溶液の重量から Open Pore の何割が溶液によって満たされたかが計算できる。この値を水ガラスの濃度に対してプロットすると Fig. 2 のようになり、同時にレンガの 8 cm の高さまで毛細管現象によって液が上昇するに要する時間も示した。これによると、水ガラスの濃度が高くなる程満たされない Pore の部分が多くなり、上昇速度も遅くなり、40%の濃度ではほとんど吸い上げられなくなる。40%液で液が上昇しないという事は液の濃度が高くなるとレンガ表面とのぬれが悪くなる事を示しており、この結果、図からも明らかなように濃度の高い液では Pore の充填率がしだいに小さくなってく

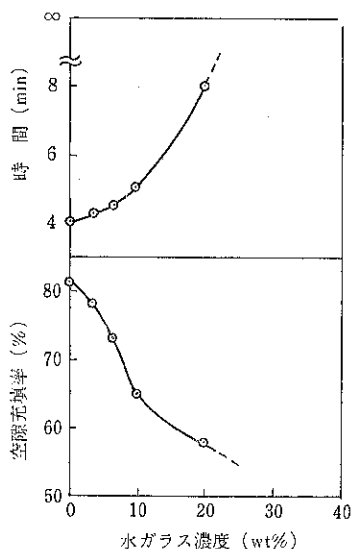


Fig. 2 水ガラス濃度と上昇時間、空隙充填率の関係

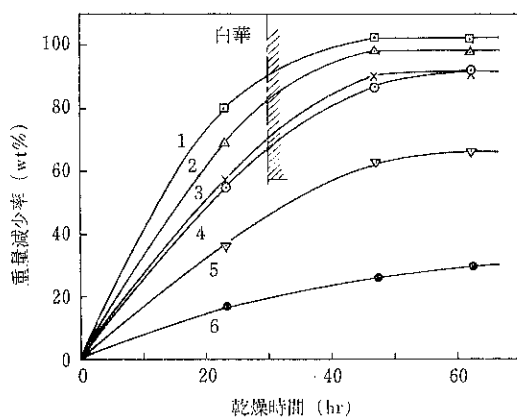


Fig. 3 水ガラス濃度と乾燥曲線

- | | |
|---------|--------|
| 1. 0% | 4. 10% |
| 2. 3.6% | 5. 20% |
| 3. 6.7% | 6. 40% |

る。空气中に水分が蒸発する事によってレンガ内部の溶液はしだいに濃縮されるが、この様子を始めの液の重量に対する蒸発水分の重量%を経過時間に対してプロットすると、Fig. 3 のようになる。この図から明らかなように最終的に45時間ほどで平衡状態になり0, 3.6, 6.7, 10, 20, 40%の各液でそれぞれ103, 98, 91, 91, 56, 30%の重量減少となっている。完全に水分を蒸発させてしまえばそれぞれ100, 96, 93, 80, 60%となるはずである。それぞれ後者から前者の値を差し引くと-3, -2, 2, 24, 30%となる。この事から濃溶液ほど最終的に水を多く含んだ状態で平衡になることが判る。比較のため40%水ガラス液をガラス板上に流したものの乾燥状態を測定すると Fig. 4 のようになる。この図によれば50時間36%減少で平衡状態となり Fig. 3 の40%液の30%より少し多く蒸発するようである。これはレンガ表面は凹凸の多い面であるため乾燥速度が早く、毛細管であるため内部には少し水が多く含まれた状態になるものと考えられる。Fig. 4 の曲線の曲がり方は昼夜の温湿度の相違により、夜は乾燥速度が遅く、昼速くなるためであり、恒温恒温で行えば当然破線で示す曲線になると思われる。

40%溶液では白華は皆無、20%では極めて少量、10, 6.7, 3.6%の順に少なく現われ、経過時間がおおよそ30時間、脱水量にして3.6, 6.7, 10%液でそれぞれ84, 69, 64%, 液の濃度に換算してそれぞれ20.4, 21.6, 23.4%になる時点から発生している。Photo. 1 に発生状況を示す。詳細に観察すると20%液は乾燥速度の遅い溝の部分にはほんの少し、10, 6.7, 3.6%では乾燥速度の速いコーナーの部分から発生し始めている。Fig. 5 に液の濃度と経過時間の関係をプロットしてみる。40, 20%液では破線に近い曲線になる。破線はガラス板上で水ガラスを乾燥した時の平衡状態の重量%である。10, 6.7,

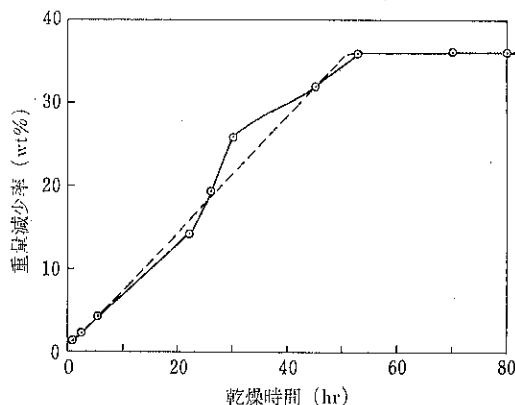


Fig. 4 水ガラス (40%) の乾燥曲線

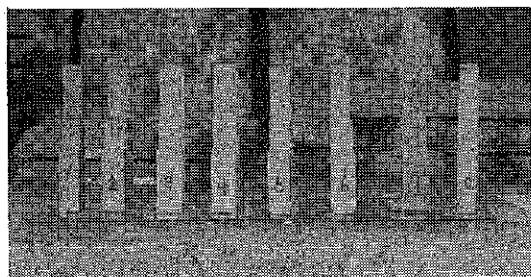


Photo. 1 水ガラス濃度と白華

左から

No.1 40% No.2 20% No.3 10%
No.4 6.7% No.5 3.6% No.6 0%

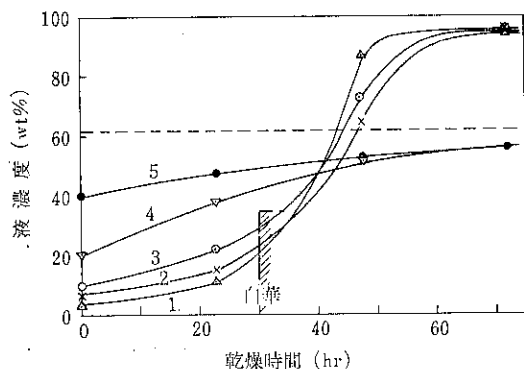


Fig. 5 水ガラス液濃度の変化

- | | |
|---------|--------|
| 1. 3.6% | 4. 20% |
| 2. 6.7% | 5. 40% |
| 3. 10% | |

3.6% 液では点線を短時間で越え、40, 20% とは異なった傾向を示している。水ガラス40%液は乾燥によって粘度を増し、透明ガラス様に固化し、光沢滑面を有し、短期には白華も白濁もしないが、長期には表面が白華し粉をふいたようになってくる (Photo. 2)。乾燥物はX線的には amorphous である。10% 以下の希薄な溶液ではビーカーに入れ適時水を補給しながら空中に放置しておくとしだいに白濁してくるのが観察される。

白華の組成を検討するため X線回折を行った (Fig. 6)。水ガラスは $\text{Na}_x\text{Si}_y\text{O}_z$ として表わされる種々の珪酸ナトリウムの混合物から成り、単一化学成分ではない。白華は水ガラスの珪酸ナトリウムそのものであるか、または空気成分との反応物のどちらかであると考えられ、空気成分中 N_2 , O_2 は不活性であるため、珪酸ナトリウムが水中ではアルカリ性である事を考慮すると、 CO_2 との反応が考えられる。Photo. 3 に見られるように、白華が針状、またはひげ状の方向性をもったものであるということは水ガラスがそのままガラス構造の

まま方向性を持って析出するとは考えにくい。Fig. 6 における No. 3 が発生して間もない透明な白華であるが、これは試薬の $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ のピークに一致する。これを 110°C で 4 時間乾燥すると、無水の Na_2CO_3 のピークに一致する。10水塩として発生した白華はしだいに

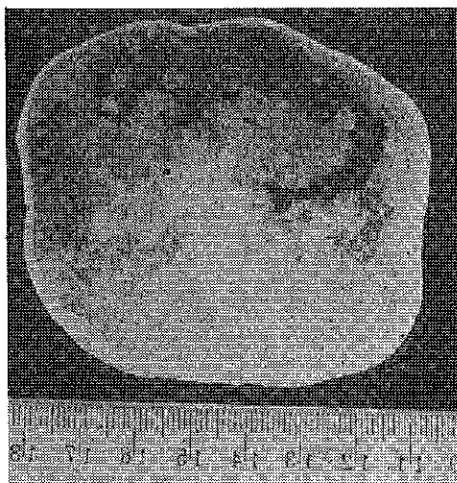


Photo. 2 水ガラス40%固乾物の長期的白華 (乾燥後2カ月)

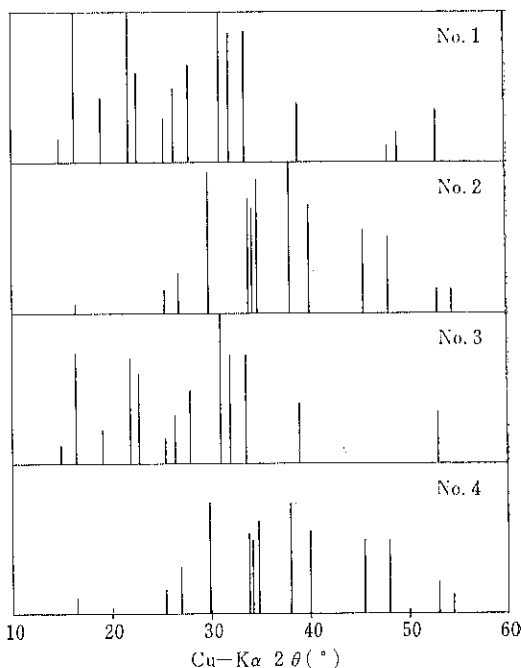


Fig. 6 白華の粉末X線回折図

- | | |
|------|--|
| No.1 | 試薬 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ |
| No.2 | 試薬 Na_2CO_3 |
| No.3 | 10%水ガラスからの白華 |
| No.4 | 白華: 110°C 4 hr 乾燥 |
| | " : 1 カ月風乾 |

風化して白色粉末状となり、長い針状晶はもろくくずれ落ちていく。完全に風化したもののX線ピークは無水のそれに一致する。Photo. 3 の針状晶を光学顕微鏡で観察すると Photo. 4 に示すような柱状晶である。前記のように、水ガラスの10%溶液を、ビーカーに入れて放置しておき、白濁したものを風乾すると、肉眼でも確認できる状態で三層に分離して沈析する。この上、中、下の

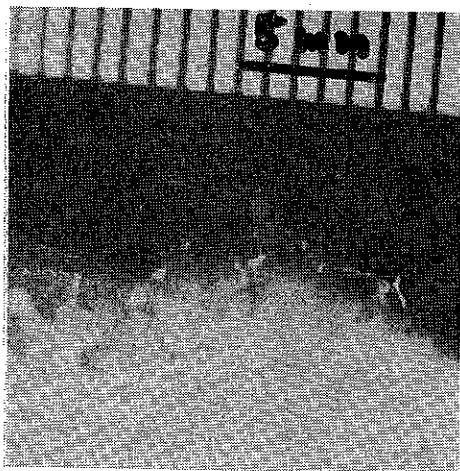


Photo. 3 10%水ガラス液からの白華

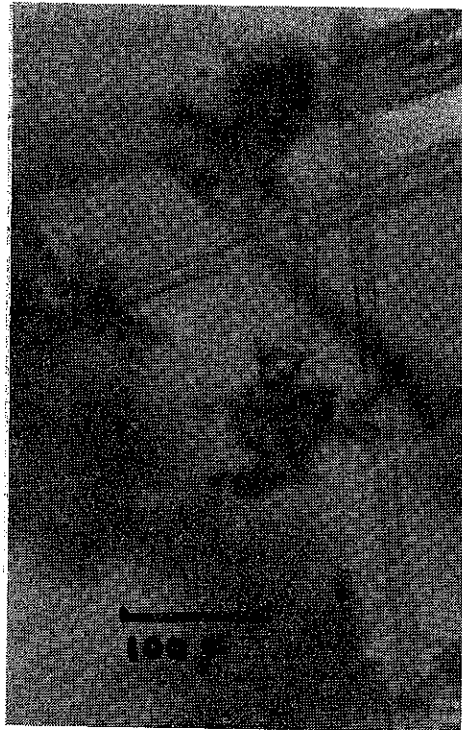


Photo. 4 10%水ガラス液からの白華の顕微鏡写真

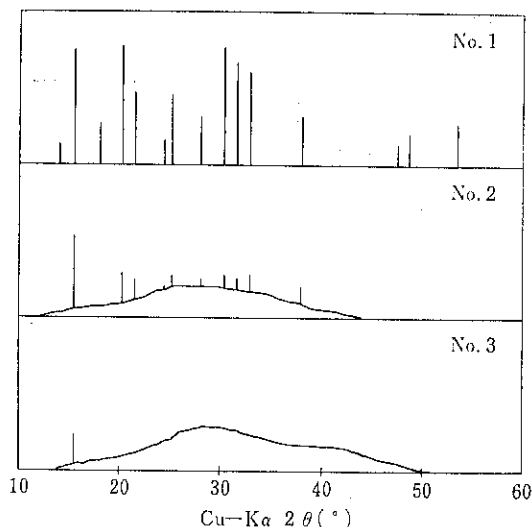
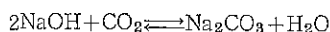
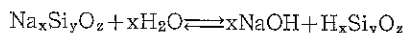


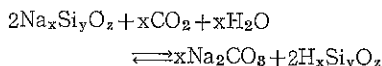
Fig. 7 水ガラス10%液風乾分離層のX線粉末回析図

No. 1 上層 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ に一致
No. 2 中層
No. 3 下層

三層をそれぞれX線で回析したものが Fig. 7 である。これから明らかなように上層は完全に $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 、下層は完全に amorphous である。したがって白華は水ガラス成分の、珪酸ナトリウムではなく、これが空気中の CO_2 と反応してできる Na_2CO_3 から成っていることが認められる。この反応は一部加水分解している珪酸ナトリウムの NaOH と CO_2 との反応と考えられる。すなわち



20%以上の濃溶液のガラス状に固化したものの、長期での白華反応は



と考えられる。

2.2 基体形状と白華の関係

2.2.1 実験方法 2.1項と同じc-1類耐火レンガを球、円筒、立方体および直方体に切り出しこれに3号水ガラスの10% (wt%) 溶液を含浸させ、ガラス板上にのせる。これを段ボール箱中に入れ無風状態にし研究室内の日陰の場所に静置する。一定時間後の重量変化と白華の発生状況を観察する。

2.2.2 結果 Fig. 8 に経過時間と重量減少との関係を示す。10%溶液を用いたため完全に水分が蒸発すれば90%の重量減少があるはずである。しかし実際には上述したように10%の珪酸ナトリウムのうち、Na は

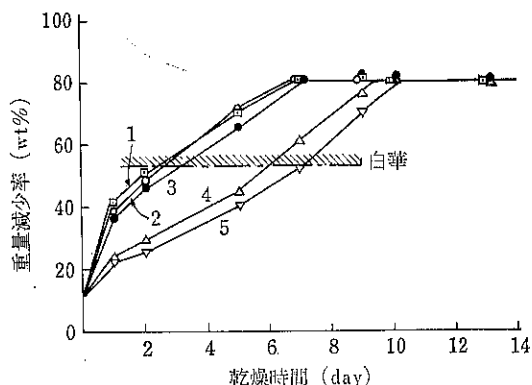
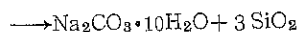
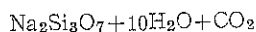


Fig. 8 基体形状と乾燥曲線

1. 立方体
2. 球
3. 円筒
4. 直方体
5. 長直方体

$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ になるので90%の減少はない。 $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$ のモル比が1 : 3であるから、水ガラスの代表化学式として $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$ とする。



上式で反応するものと仮定すると、 $\text{Na}_2\text{Si}_3\text{O}_7$ の分子量242、右辺の分子量は合計484でほぼ倍の重量となって析出することとなり10%の珪酸ナトリウムは20%の重量となる。したがって脱水が完了するまでに、完全に炭酸化されれば重量の減少は80%でよいはずである。図では重量の減少は80%前後で平衡になっている。乾燥の完了時間は、基体の体積が大きくなるほど長くなっている。図から求めた乾燥完了時間で、基体の寸法、含浸液の Open Pore の充填率を Table. 2 に示す。これによると、Pore の液による充填率は、球の場合65.0%で、Fig. 1 の65%とよく一致しているが直方体に近づくほどこの値は下がっている。基体の高さが高くなるほど充填率が低くなるが毛細管の液面上昇の最高値は管径に比例することから、逆にレンガの毛細管は、ある幅をもった管径分布を有している事が判る。白華の発生状況の観察によると、最初に立方体の上部コーナーの部分、次いで球、円



Photo. 5 白華の発生 5日目

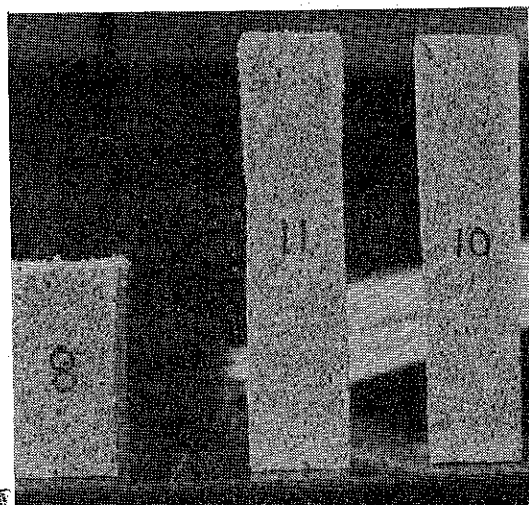


Photo. 6 白華の発生 7日目

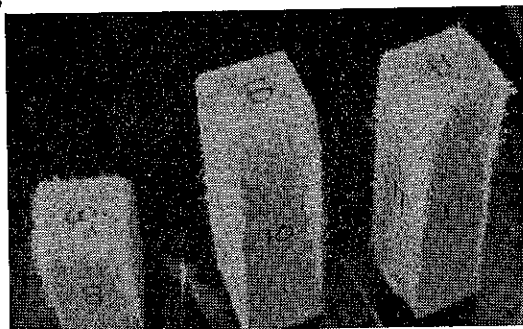


Photo. 7 白華の発生 9日目

Table 2

基体形状	直 径 (cm)	高 さ (cm)	体 積 V (cm^3)	全表面積 S (cm^2)	pore の充填率 (%)	V/S	乾燥完了時間 (hr)
球	3.46		26.5	36.7	65.0	0.559	150
円 筒	3.41	3.14	28.8	52.0	62.5	0.554	168
立 方 体	3.27	3.27	34.8	60.4	60.4	0.576	168
直 方 体	3.27	6.57	77.5	103.2	58.7	0.685	216
長直方体	3.26	13.4	141.0	193.7	54.1	0.728	240

筒、直方体の順に、Fig. 8 の一点鎖線部の左から右へ移行する順序で発生する。この状態を5日目、7日目、9日目の写真で示す (Photo 5, 6, 7)。写真から認められるように、すべて上部より白華が生成している。空中に基体が浮んでいるものであれば水の蒸発は重力、磁場、電場の作用は受けないと見なして、すべての面で一様であってよいはずである。したがって本実験において上部から白華が発生するのは、外気の条件に温度、対流など不均一な状態があったと見るより、単純に下部がガラス面に接し、水の蒸発が零に近く、したがって乾燥が上方に行くほど相対的に速くなる、いわゆる乾燥速度勾配があるためと考える方がよい。これを確かめるため、10%の Na_2CO_3 液を含浸させ、針金の台によって、空中に浮かせた状態で白華させたものは、全面からほとんど同じように白華した。方形の場合コーナー部から白華し始めるのは、この部分が最も乾燥が早く、したがって最も早く溶液が濃縮されるためと考えられる。Fig. 8 から認められるように白華は基体内部の溶液が一定濃度に濃縮され、始めて発生するようである。このため V/S の値の大きい基体ほど遅く発生する。白華は早いもので2日、遅いもので7日目頃から発生している。

3. 結果の考察

2.1項の結果から、20%以上の溶液ではガラス状で固化し、10%以下で30時間前後から白華し始める事が認められた。この時の基体内部の溶液の濃度は、3.6、6.7、10%溶液に対してそれぞれ20.4、21.6、23.4%である。一方2.2項の結果から基体の大きさによって2日～7日の範囲で、内部の溶液が一定濃度まで濃縮された時白華が発生する事が認められ、この時の濃度は20.2%である。いずれも白華の発生時期には、水ガラス中の珪酸ナトリウムは20%程度に濃縮されているということがいえる。この時、液中の Na がすべて炭酸化されていると仮定すると Na_2CO_3 の濃度は、それぞれ23～28%の範囲にあり、15°Cでの Na_2CO_3 の飽和濃度14%をかなり上回っている。もちろん、炭酸ガスとの反応は表面から進行するものであり、液中の Na の一部は珪酸と結合しているであろうが、この値は炭酸ナトリウムの白華の発生時期が、発生点での飽和濃度に達する時間に依存している事を示している。20%以上の濃度では、水ガラスの解離度は極めて小さく、 Na はほとんど珪酸と結合しており、さらにほんのわずかの水分の蒸発によって急激に粘度が上昇し、このため遊離の NaOH との炭酸ガスの反応は極めて少なくなり、一次白華はないと考えられる。そして珪酸ナトリウムとの直接反応による長期的白華が生成する。

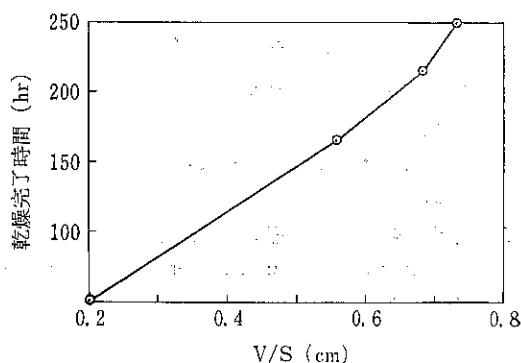


Fig. 9 乾燥完了時間と V/S の関係

2.1項の基体レンガの V/S は計算すると0.21になる。この値と Table 2 の V/S の値とを乾燥完了時間に対してプロットすると Fig. 9 のようになる。 V/S の次元は cm でありレンガの空隙を連通した毛細管の集合とみなした時、毛細管の長さに比例する値である。したがってこれは両端の開いた毛細管中の水分の乾燥速度を示すものといえるが、毛細管の管径分布と連通構造は不明である。管径に分布がある場合は蒸発によって液はしだいに細い管に集中してくる¹⁰⁾。このことが上下および横方向とも蒸発量が大体同じになり、したがって白華も全面に出てくる大きな理由であると考えられる。もし同じ管径の毛細管の連通機構であれば蒸発することによって液面はしだいに下がり、したがって白華は下部の横方向から発生するはずである。さらにレンガ表面の白華の発生部分も、微視的には大きな径のものよりも細孔に発生する事が考えられる。

4. 結論

白華現象について、水ガラスを硬化成分とし、水ガラス濃度の影響および基体形状と発生の関係について2.3の検討を行ない次の結論を得た。

1. 水ガラスの20%以上の濃溶液ではガラス様に固化し、一次的な白華とはならず、長期的に徐々に表面より炭酸化し白華する。
2. 10%以下の希薄溶液では基体内部で一定濃度に達すると、速やかに針状白華が生成し、長いものでは1cm以上になる。
3. V/S の値が大きくなると一定濃度に達する時間が長くなり、したがって白華発生も遅くなる。また、白華は乾燥の速い部分から発生し始める。
4. 白華は $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ の透明結晶として生成し、風化によって無水の白色粉末に変化する。

参 考 文 献

- 1) S. Rihánek; ZEMENT-KALK-GIPS 6, 253 (1971)
- 2) R.K. Robertson; J. Can. Ceram. Soc., 13, 40 (1944)
- 3) 近藤, 湧井, 山内: 窯業協会誌 68, [4], 97 (1960)
- 4) B. Butterworth: British Ceram. Soc., 53, 9, 596 (1954)
- 5) 中原, 青木: セメント技術年報, 134 (1962)
- 6) T. Ritchie: J. Amer. Ceram. Soc., 38, [10] 362 (1955)
- 7) J. E. Joung: J. Amer. Ceram. Soc., 40 [7] 240 (1955)
- 8) J. T. Ritchie: J. Amer. Ceram. Soc., 38 [10] 357 (1955)
- 9) F.O. Anderegg: ASTM Bull 185 (1952)
- 10) 大谷, 前田: 化学工学, 28, 463 (1964)

粉 の 話

(社内報より)

化 粧 品

粉と言えばオシロイ, 白粉を思い浮かべるほど, 化粧品とは密接な関係がありました。また女性と粉体の結びつきは日常生活においてメリケン粉, 砂糖, インスタント粉末食品などの食品に多く見受けられますが, 女性の手で評価される粉体は化粧品の粉おしろいの他にはないだろうと思われます。ちょっと歴史をふり返って見ますと, 顔に赤土などをぬって「化粧をする行為」は古代までさかのぼって古事記や日本書記の中にも記述されているそうです。近世になって古墳から出土した数多くの埴輪(はにわ)眼の下, 額, 口下などに直線や曲線を描いたと思われる点があり, 古い時代から女性と粉体とのむすびつきを明らかにしています。

おしろいは持統天皇の御世, すでにシロキモノとして製造されていることが記録に残っており, 平安朝時代には白粉や紅でのお化粧も盛んであったとされています。原料も日本古来の米の粉を使ったものから, 中国伝来の鉛を原料としたものに変わってきました。この鉛白おしろいは主として京都で作られ「京おしろい」と呼ばれ, 以来明治時代まで及んでいます。このおしろいは色が純白で美しく皮膚への付着力が強いため俳優はもちろん一般女性も常用し, ことに厚化粧がはやり, えり元まで濃厚にすることが花柳界で流行しました。これらは日本式化粧法の水練おしろいで, 今日では花嫁姿や歌舞伎の舞台に見られるだけとなりました。「色の白いのは七難かくす」との格言どおり顔を白くするための美容法でした。

明治末期には薄化粧のクリームの下地の上に粉おしろいを用いる欧米式の現代的な美容法が普及しました。また明治のころには鉛の害がやっと知られるようになり,

また歌舞伎の名優が鉛害で倒れたり, 女性も乳児にまで害を及ぼすなど実害も伴ったりで, 鉛の入った化粧品が衛生上危険であることがわかり, 無鉛おしろいが代わって使われるようになりました。ちょうど現在, カドミニウム, 水銀などの重金属による汚染が公害の問題として大きく取り上げられていると同じように, 鉛白おしろいの人体に対する毒害が問題となったのです。

現代でも食品中の有害物, 薬の副作用による害などがあつとを絶ちませんが, その時代では, 今ほど科学も進歩しておらず, 官庁のカントクも行き届かずまた補償などの思想も明らかでないので大変なことだったろうと推察されます。

(この項は粉体と工業2巻12号 湯浅正治「女性と粉体」を参考しています。)



モデルビン壁面における粉体圧の測定

細川粉体工学研究所

中 川 文 雄 島 谷 敏 久
鈴 木 昭 明 横 山 藤 平

I は し が き

大型のビンやサイロが作られ始めたのは1860年代以降といわれ、初期の貯槽設計者は粉体を液体と同様に考えて、強度計算を行っていた。しかし、粉体のおよぼす壁圧がビンの深さに比例して増加しないで、粉体の重量の幾分かが壁面摩擦として吸収されることが実験的に実証され、19世紀末 Janssen¹⁾ によって初めて貯槽内の粉体圧を理論的に導く式が提案された。それ以後多くの研究者によって実験的研究が行なわれ、材質の向上と構造上の設計方法による安全率の低下によって、ビン設計上の問題は1930年代に一応解決したかに見えた。しかし、それ以後も大型のビンやサイロに亀裂ができたり、破壊したりする事故は依然として発生している²⁾。粉体圧は充填静止時（静的圧力と便宜上呼ぶ）と流れている時（動的圧力と呼ぶ）とは異なっていて、巾広く変動していることが観察され、Walker³⁾、Reimbert⁴⁾らによって新しい理論も提出された。しかし、実際に測定してみると、粒子の物性、充填状態、容器の形状、排出条件によって複雑に変化していて、これらの理論式より外れている場合が多い⁵⁾。

本報においては、実験室的なものと、実際の大型貯槽との中間規模のモデルビンを用いて、条件を種々変え、壁面にかかる粉体圧を測定し、二、三の知見が得られたので報告する。

II 実験装置および実験方法

1) 実験装置

実験装置の概略図を Fig. 1 に示した。①の可動容器に実験試料の運搬と中間槽②への供給という役割を持たせ、その底面に試料流出孔（40～50φ）を数カ所設けた。②の中間槽はモデルビン③の直上、ほぼ同心上に位置し、下端にモデルビンへの供給速度をコントロールするオリフィスを設けた。③のモデルビンは円筒部分（胴径

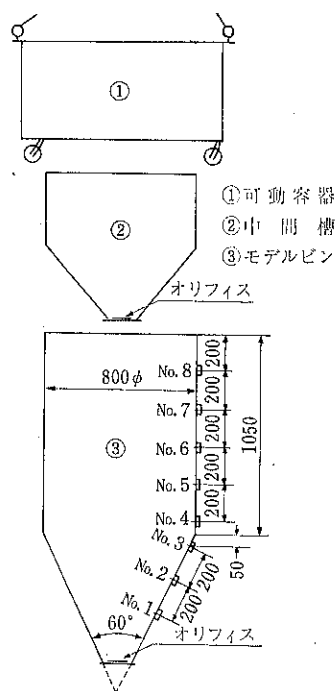


Fig. 1 実験装置および測定孔位置

80 cm) と直円錐形の ホッパー部分とからなる内容積約 0.65 m³ の鋼板製容器で、下端中心部に粉粒体排出用オリフィスを取りつけた。圧力測定用の測定孔はモデルビン壁面に、垂直方向に一刻に 8 カ所図示した位置に設けた。

Fig. 2 に測定孔部分を拡大して示した。圧力測定には受圧面 57.5φ の新興通信工業社製上圧計 (GD/1 型、容量 1.0 Kg/cm²) を 2 コ用い、その歪量を動歪測定器にて増巾し、2 ペン式記録計にて 2 測定点同時に記録した。

2) 実験方法

測定計器類の調整および試料のモデルビンへの供給、

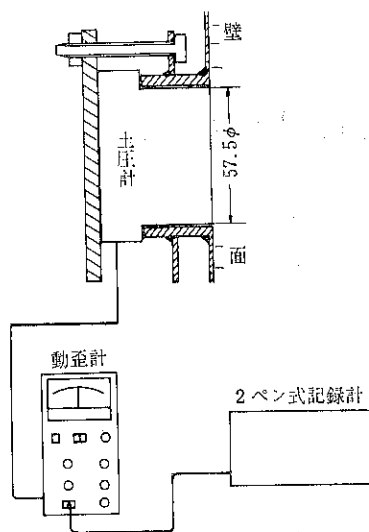


Fig. 2 測定部拡大図

排出の実験条件をセットした後試料を充填した。充填方法は、まずクレーンで吊り下げられた可動容器の底部の試料流出孔を開け試料を中間槽に貯めた。ある程度のレベルに達した後その下部のオリフィスを開け、モデルビンの中央部へ供給した。モデルビンが試料粒で満杯になった状態（手でならした試料の上部表面とモデルビンの上端水平面とが一致した状態）で中間槽のオリフィスを閉じた。

各測定位置における圧力の測定は試料がモデルビンに充填され始める時点より始め、モデルビンより排出し終るまでの時間的変動を記録した。

実験条件として次の5要因をとりあげて実験した。

(1) 試料供給方法……3方法

i) センター供給法

モデルビンの中央部へ供給 (Fig. 1 参照)

ii) 壁面供給法

樋を用いてモデルビン壁面近くに供給 (Fig. 3 (a) 参照)

(1) 川 砂

(2) 玉 砂 利

(3) 寒 水 石

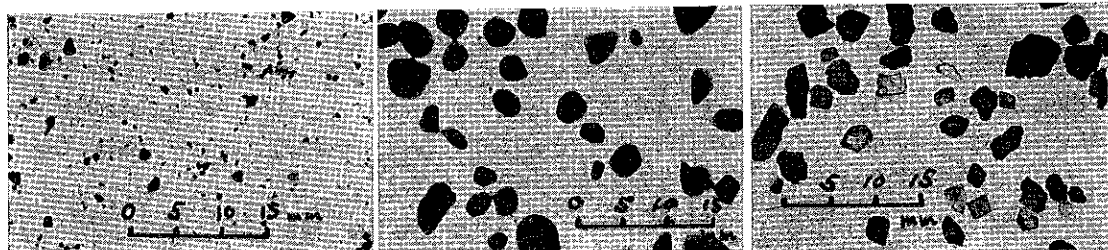


Photo. 1 実験に用いた試料

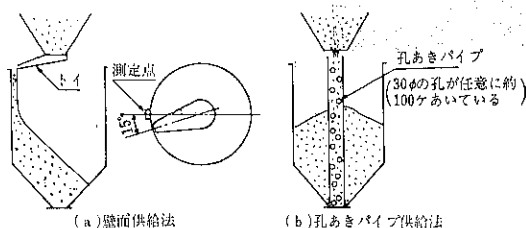


Fig. 3 試料供給方法

iii) 孔あきパイプ供給法

多数の孔 (30φ) のあいたパイプ (110φ) を用いて供給する方法 (Fig. 3 (b) 参照)

(2) 供給速度……4段階

中間槽のオリフィス径 (25φ, 45φ, 61φ, 70φ の4種) を変えることによって供給速度を設定した。

(3) 排出速度……4段階

モデルビンの排出オリフィス口径 (19.5φ, 35φ, 61φ, 70φ の4種) によって排出速度を変えた。

(4) 排出様式

i) 定常流出……ビン内試料重量一定流れ

あらかじめ中間槽の供給オリフィンをモデルビンの排出オリフィスと同一径のものを装着し、モデルビンおよび中間槽に試料を満杯まで充填した後、同時に両オリフィスを開く。供給、排出速度がほぼ同一なのでモデルビン内の試料総重量はほぼ一定である。

ii) 非定常流出……ビン内試料重量減少流れ

モデルビンに試料を満杯に充填した後、中間槽オリフィスは閉じたまま、モデルビンのオリフィスを開いて排出する。

(5) 実験試料

粒度および粒子形状の異なる3種の粒体を用いた。

III 実験に用いた試料

実験に用いた試料は、比較的流動性のよい、付着性のほとんどない川砂、玉砂利および寒水石の3種類の粒体である。Table 1 に試料の基礎物性を、Photo. 1 に各

々の写真を示した。

Table 1 実験に用いた試料の基礎物性

試料名 物 性	川 砂	玉砂利	寒水石
平均粒子径 D_{50} [mm]	0.7	2.7	2.3
粒 子 形 状	角ばって いる	丸みがある	角ばって いる
見掛(かさ)密度 ρ_B [g/cm ³]	1.45	1.63	1.55
安息角 ϕ_r [°]	39	37	40
壁面摩擦角 ϕ_w [°]	19	18	20
スパチュラ角 ϕ_s [°]	37.5	38	45
流動性指数 (Carr による)	84	91.5	83.5

IV 実験結果

試料がモデルビンに供給され、排出されるまでの間に壁面にかかる圧力の時間的変動を Fig. 4 にモデル的に示した。図より、試料充填期の壁圧 P_w は試料充填高さが増すに従って増加するが、ある一定のヘッドまで達するとほぼ一定の値を示す。また、その増加の様子はかなりスムーズで、圧力の微圧変動は少い。定常排出期(ビン内試料重量一定流れ)における圧力(動的圧力)の変動はかなり激しく、微圧変動しながら大きく変動している。代表値として最大圧力および平均圧力(目で観察して平均的な圧力)を採った。非定常排出期(ビン内試料重量減少流れ)における圧力は液体の場合と異なり、あるレベルまでは定常排出期と同じように大きな圧力変動

を示している。定常排出期の最大圧と非定常排出期の最大圧とを比べてみると、両者の出現の様子は異なっているが、数値的な差はあまり認められなかった。

1) 静的(ビン内満杯充填静止時)圧力

Fig. 5 に、試料として川砂を用いた場合の各測定位置における静的壁圧 P_w をプロットした。供給速度 38.3 kg/min (40φオリフィス)、実験回数 5~8 回で、得られた測定値の平均値をプロットし、バラツキの範囲は矢印で示した。なお、同図に Janssen の理論線**注1をも併せて示した。

測定結果は Janssen 理論値とかなりよい一致を示している。試料として玉砂利、寒水石を用いても、この傾向は変わらない。しかし、測定値のバラツキの程度は試料によって異なっている。

(1) 供給速度の影響

Fig. 6 に、供給速度 (15.1~227.0 kg/min の範囲) をパラメータとして、各測定位置における静的壁圧を点綴した。ただし、試料は川砂である。この測定結果から判断すると、供給速度の壁圧におよぼす影響はあまり認められない。

(2) 供給方法の影響

Fig. 7 に、試料の供給充填方法を変えた場合(試料川砂)の各測定位置における静的壁圧をプロットした。この図より、センターフィードタイプと壁面フィードタイプとはあまり差は認められないが、孔あきパイプ供給法は前二者と異なり、円筒部で全体として低い圧力を示している。

2) 動的(粉粒体が流れている状態)圧力

(1) 排出速度の影響

Fig. 8 に、試料として川砂を用いた場合の排出速度

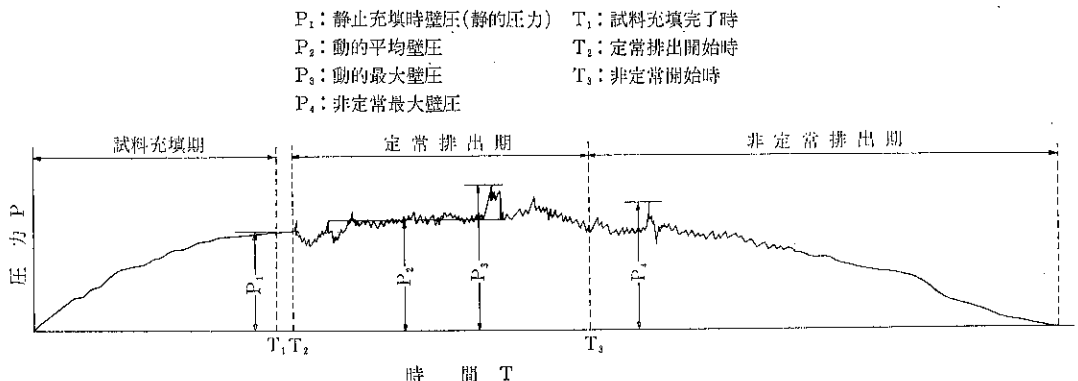


Fig. 4 試料の供排出時圧力変動特性モデル図(試料:川砂, 測定点 No. 5)

**注1 文末 Appedix (1) 参照

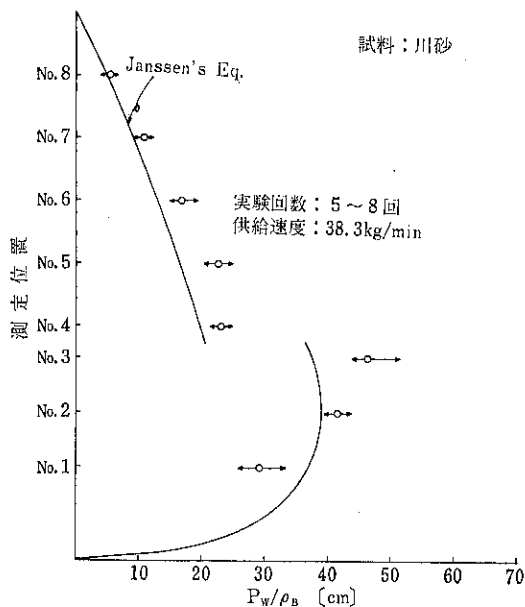


Fig. 5 モデルビン各測定位置における静的圧力 (川砂)

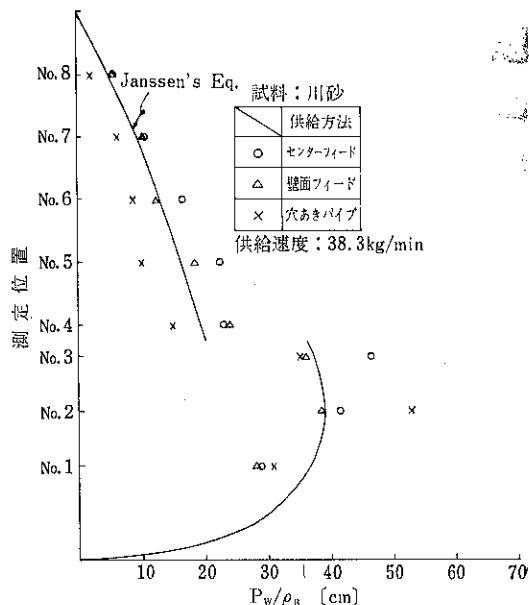


Fig. 7 供給充填方法の静的圧力への影響

せて示した。

Fig. 9 に、試料として玉砂利を用いた場合の排出速度の動的圧力への影響を同様にプロットした。測定範囲は 5.5 kg/min~147.0 kg/min.

これら 2 つのグラフより次のような傾向が見受けられる。

i) 川砂の場合 (Fig. 8 参照) 排出速度の影響はほとんど見受けられない。Walker および Janssen の理論線との関係についてみると、いずれの理論値にも一致しないで、両曲線の間に点在している。

ii) 玉砂利の場合 (Fig. 9 参照) 排出速度の影響がかなり顕著に見受けられる。特に最大壁圧にそれがよく現れていて、排出速度が大になると最大壁圧も大になる傾向が認められる。また、Walker および Janssen の理論値との関係についてみると、排出速度の大きな範囲の最大壁圧は Walker の理論線と比較的よく一致する。

iii) 静的圧力 (静止充填時壁圧) と動的な最大壁圧とを比較すると、川砂の場合 (Fig. 8 参照) No. 3~No. 8 の位置では、後者は前者の約 2 倍程度があるが、玉砂利の場合 (Fig. 9 参照) は約 6 倍を示すものも認められた。しかし、No. 1 と No. 2 の位置では静的圧力と動的な最大圧とがほぼ等しいか、または逆に動的な最大圧が低くなっている。

以上 i) ~ iii) に述べた川砂と玉砂利の傾向の違いは、排出の際のフローパターンに起因するものと考えられる。すなわち、目での観察によれば川砂の場合ファネ

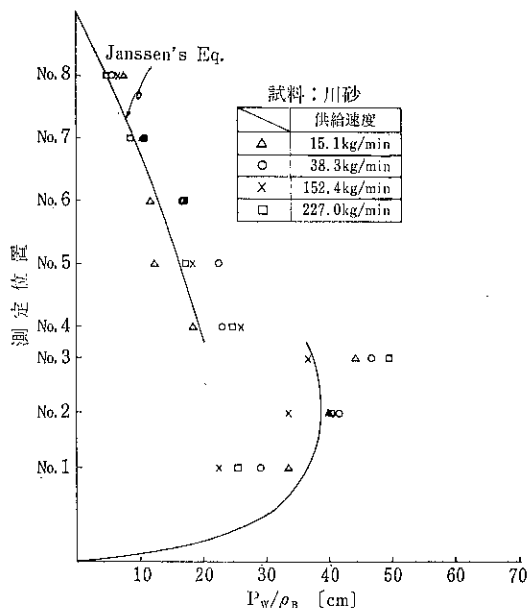


Fig. 6 供給速度の静的圧力への影響

の動的圧力 P_{wd} への影響をみた。測定範囲を 7.8 kg/min (19.5φオリフィス)~152.4 kg/min (60φオリフィス) の 3 段階で行ない、定常排出時の平均壁圧および最大壁圧を各測定位置についてプロットした。また、Janssen 理論線および Walker の理論線***注 2 をも併

***注 2 文末 Appendix (2) 参照

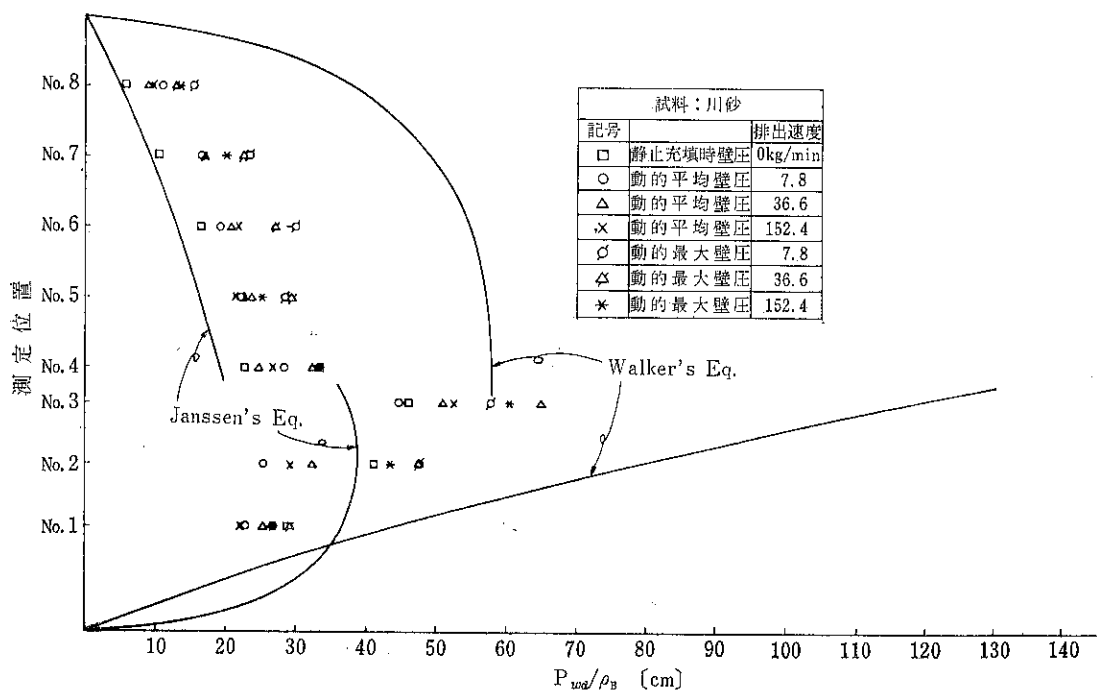


Fig. 8 排出速度の動的圧力への影響（川砂）

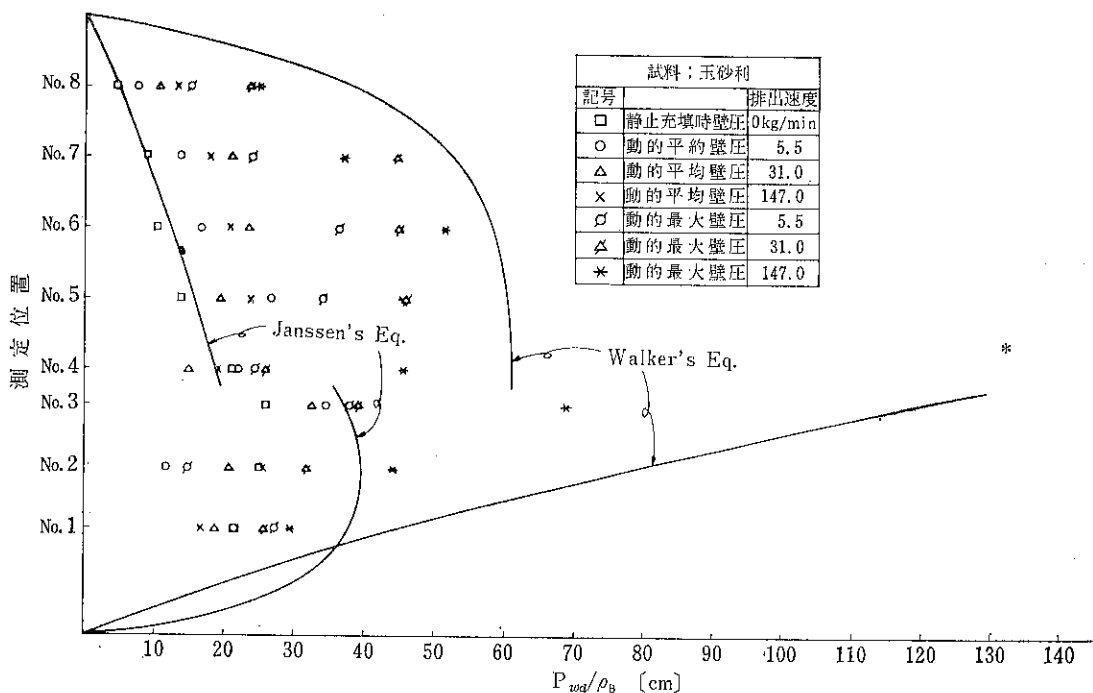


Fig. 9 排出速度の動的圧力への影響（玉砂利）

ルフローを呈するに対し、玉砂利はマスフローを呈する流れ（モデルビン全体にわたって完全なマスフローではないが）である。従って、完全なマスフローを仮定して

導いた Walker の式が玉砂利の場合にかなり良く一致するもののためと考えられる。

（２） 供給，排出方法の動的圧力への影響

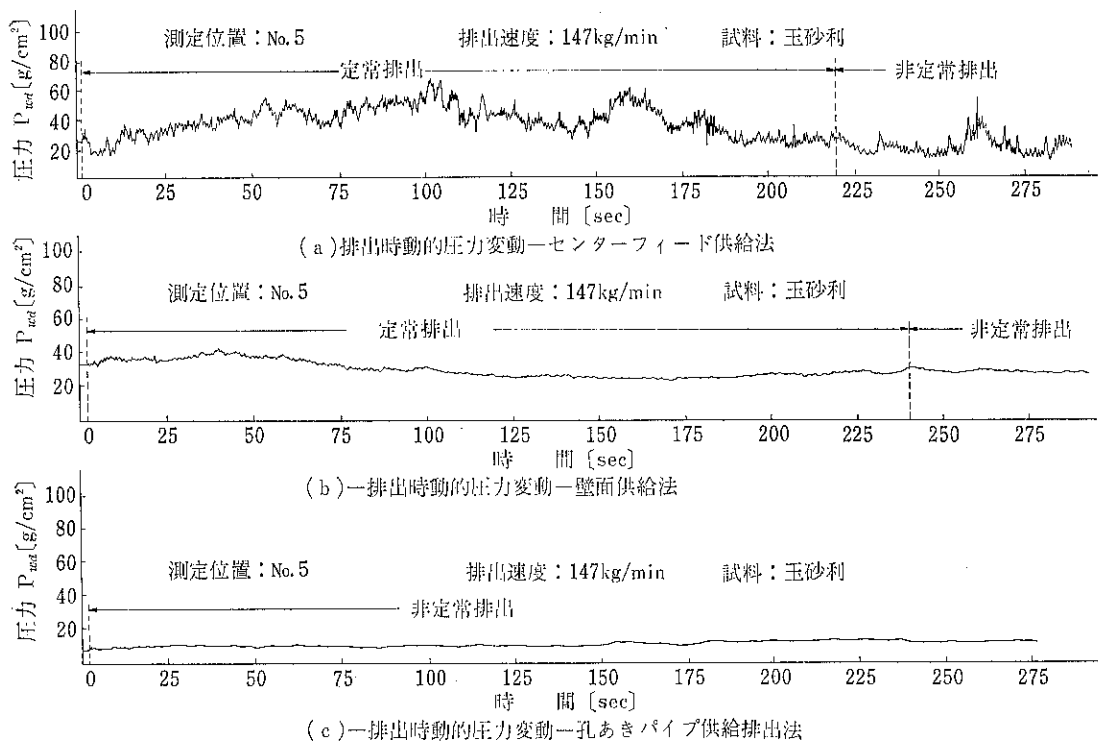


Fig. 10 供給排出方法による排出時動的圧力変動への影響 (測定位置 No. 5)

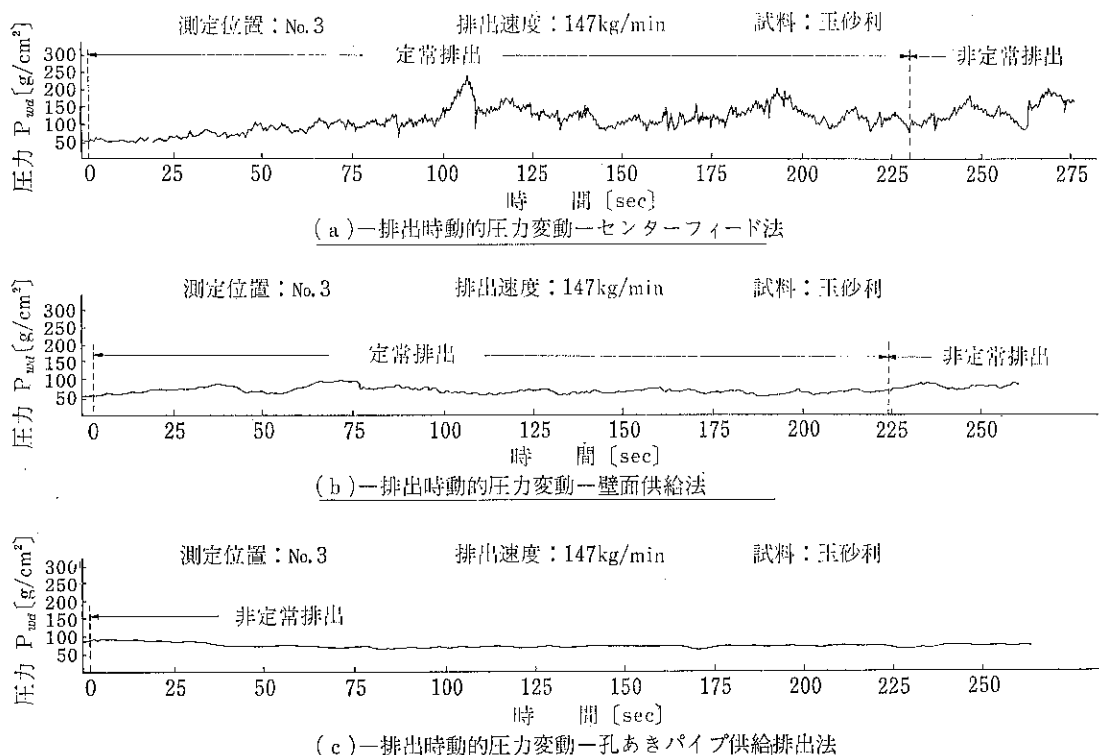


Fig. 11 供給排出方法の相異による動的圧力への影響 (測定位置 No. 3)

Fig. 10 および Fig. 11 に、排出時の動時圧力 P_{wd} におよぼす供給、排出方法の影響を示した。代表例として、比較的動的圧力変動の大きな玉砂利の場合（排出速度 147 kg/min）を選定し、Fig. 10 は測定位置 No. 5（円筒部）、Fig. 11 は No. 3 の位置（円錐部）における排出時の壁面に与える圧力変動を示した。供給方法は (a) センタフィード法、(b) 壁面供給法、(c) 孔あきパイプ供給排出法（排出時もパイプはそのままの状態）の 3 種類について比較した。

両図に示した結果からもうかがえるように、

(i) 供給、排出方法によって圧力変動に大きな差が認められる。すなわち、実験した 3 種の供給、排出方法のうちセンタフィード法の場合の圧力変動が一番激しく、孔あきパイプ供給、排出法が最も安定していく変動が小さい結果となっている。

(ii) 特に、孔あきパイプ供給、排出法の場合、圧力変動が小さいばかりでなく、壁圧力そのものも他の場合より低い。

(iii) 前述の傾向は測定位置が異なっても同様である。

V 結果の考察

1) 静的充填状態における壁圧

静的充填状態における壁圧には本実験の場合、試料の種類、試料供給速度、および試料供給方法に依らず、かなりのバラツキは認められるが、ほぼ Janssen 理論式の傾向と一致する。この傾向はいくつかの研究報告^{6,7)}にも同様な結果が得られている。Janssen 理論式の前提となる 3 つの仮定

i) 容器内の粉体層の見掛け密度 ρ_B は深さ h や粉体圧にかかわらず一定である。

ii) 垂直圧は水平方向にすべて均一に分布している。

iii) 粉体層中いたるところの水平圧 P_h と垂直圧 P_v との比 $k(=P_h/P_v)$ は同じで一定である。

は厳密には成立しないことが実験的に指摘されている^{8,9)}にもかかわらず、前述のような結果が得られたのは次のような理由に基づくものと思う。

(i) 実験に用いた試料が圧縮性のあまりない、流動性のよい粒体であるので、位置による ρ_B の差はあまりない。

(ii) モデルビンへの試料充填完了時における内部圧力場では主働圧 (Active State Pressure) が支配的で、ある水平方向の断面をとった場合、垂直圧は Janssen の仮定と異なり、中心部 (P_{vc}) が大で、壁面部 (P_{vw}) が小さい。しかし、Walker も述べているが、

P_{vc} と P_{vw} との差はあまり大きくない。

2) 動的状態における壁圧

(1) フローパターンと壁圧との関係

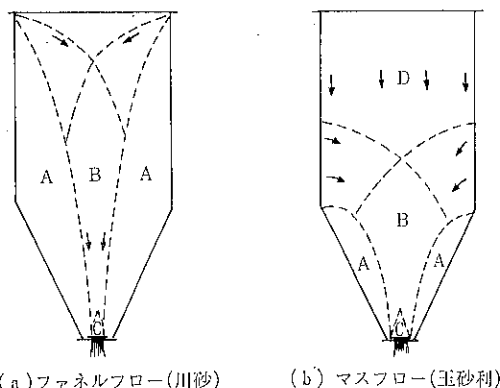
動的状態における壁圧と粉粒体のフローパターンとの間には密接な関係があることは本実験の結果からも、またいくつかのレポート^{10,11)}においても確認されている。

排出時の上部自由表面の観察結果から試料粒体内部のフローパターンを推定し、Fig. 12 に示した。試料として川砂を用いた場合(a)のようなファネルフローを呈し、玉砂利の場合(b)に示すマスフロー的な流れ（円筒部中程まではほぼ完全なマスフローである）を呈している。

(a)の川砂の場合、Fig. 8 に示した動的壁圧測定結果と、(b)の玉砂利の場合、Fig. 9 の測定結果と対比してみると非常に興味深い。以下フローパターンと壁圧との関係について考察する。

(i) 排出オリフィスを開け、排出を開始した時点について考えてみると、試料粒体の排出と同時に試料粒体の支持力は減少し、粒体は垂直方向に膨張する。その結果垂直方向の圧力は大幅に減少し、応力状態が変る。すなわち圧力の主働状態 (Active State) から受働状態 (Passive State) へ移行する。測定結果でもその傾向は認められ、No. 1 および No. 2 の測定位置では圧力は減少し、その他の測定点では増大している。

(ii) 動的最大圧は Jenike ら¹²⁾のいう転換 (Switch) による集中力とも考えられるが、Switch に要する時間は通常数分の 1 秒のオーダーであること、最大圧は排出開始直後に現われるのでないこと (Fig. 10 および Fig. 11 参照) などを勘案すると、Fig. 12 の B のゾーンの不連続な流れの発生、または A の不動域粒体内部での周期的な迂回などがショック的な圧力の原因と考えられる。



(a) ファネルフロー (川砂) (b) マスフロー (玉砂利)

Fig. 12 排出時のフローパターン (推定)

(iii) Fig. 12-(a) のファネルフローの場合、広い範囲にわたって A の不動域があるため、Switch による集中力、または粒体内部でのりによるショック的な圧力などの壁面におよぼす効果が弱められる。従って、Fig. 8 に示したように最大圧と平均圧との差があまり認められない。一方、Fig. 12-(b) のマスフローの場合、D のゾーンが広く、A のゾーンが狭いので最大圧と平均圧との差が大きく現われている (Fig. 9 参照)。また、Fig. 9 に示したように排出速度の壁圧に対する影響が認められることは、排出速度によって、D のゾーン範囲が変わること、および壁面の試料落下速度が増大することに起因するのではなからうか？

VI む す び

より確実な粉体貯槽の設計基準をつくる上で、何らかの指針になればと考え、中間規模のモデルビンに充填された試料の静的および動的状態における壁圧を測定した。

試料も少く、実験回数も少いので結論を出すのは、早急とは思えるが一応本実験範囲内においては次のことがらがまとめられる。

1) 静止充填時の壁圧は試料物性、供給速度、供給方法などの相異にほとんど関係なく Janssen 理論式の傾向に一致する。

2) 動的圧力はフローパターンと密接な関係があることが認められた。マスフローの流れにおいて、動的最大圧は Walker の式にほぼ一致する。

3) 動的排出時の壁圧は供給充填時のそれと異なり、非常に変動が激しく、その最大圧が静的圧力の約 6 倍にも達する場合もある。

4) 異常圧防止附属部品として孔あきパイプ方式はかなり効果的であることが実証された。

以上多分に現象面的、表面的な面だけをとりあげて、検討したが、今後更に広い範囲の条件を設定して実験を行い、理論的に解析するならば興味ある結果が得られると思う。

なお、本研究遂行にあたっていろいろと御指導いただきました横浜国立大学青木隆一先生に深甚な謝意を表します。

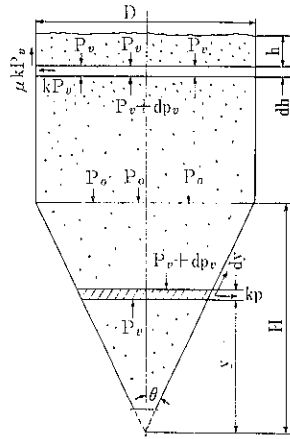
Appendix

(1) Janssen の理論式

(i) 円筒部の壁圧

図のような容器の円筒部の深さ h における微小厚さ dh の粉体層の力のバランスを考える。

$$\pi/4 D^2 P_v + \pi/4 D^2 \rho_B dh$$



図一粉体圧における記号

$$= \pi/4 D^2 (P_v + dP_v) + \pi D \mu k P_v dh$$

上式を解いて、

$$P_v = \frac{D \rho_B}{4 \mu k} \left(1 - e^{-\frac{4 \mu k}{D} \cdot h} \right)$$

従って、壁圧 P_w は次式で与えられる。

$$P_w = k P_v = \frac{D \rho_B}{4 \mu} \left(1 - e^{-\frac{4 \mu k}{D} \cdot h} \right)$$

ただし、 μ_w は壁面摩擦係数 ($\mu = \tan \phi_w$)

k は Rankine の土圧論から

$$k = \frac{P_w}{P_v} = \frac{1 - \sin \phi_i}{1 + \sin \phi_i}$$

ϕ_i : 粉体の内部摩擦角

(ii) 円錐部の壁圧

同様な力のバランスを考えて、解くと、

$$P_v = \frac{\rho_B Y}{1 - C} \left\{ \left(\frac{Y}{H} \right)^{C-1} - 1 \right\} + P_0 \left(\frac{Y}{H} \right)^C$$

$$P_w = \left[\frac{\rho_B Y}{1 - C} \left\{ \left(\frac{Y}{H} \right)^{C-1} - 1 \right\} + P_0 \left(\frac{Y}{H} \right)^C \right]$$

$$(k \cos^2 \theta + \sin^2 \theta)$$

$$C = 2 \mu \cot \theta (k \cos^2 \theta + \sin^2 \theta)$$

(2) Walker の理論式

垂直応力は半径方向にすべて均一に分布しているのではなく中心部 P_{vo} と壁面部 P_{vw} とは異っていて、平均垂直応力 $\bar{P}_v$ を定義している。

$$P_{vw} = D \bar{P}_v$$

$D = \phi_0$ (有効摩擦角) と ϕ_w との関数となる分布係数 (Distribution Factor)

内部応力状態を考慮して、

$$\bar{P}_v = \frac{\rho_B D}{4 B D} \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{4 B D}{D} h \right) \right\}$$

$$B = \frac{\sin \phi_e \sin \varepsilon}{1 - \cos \varepsilon \sin \phi_e}$$

$$\left(\varepsilon = \phi_w + \arcsin \frac{\sin \phi_w}{\sin \phi_e} \right)$$

$$P_w = \frac{\rho_B D}{4\mu} \{1 - \exp(-4BDh/D)\} \dots\dots\dots \text{円筒部}$$

円錐部においては

$$P_w = \frac{D(1 + \sin \phi_e \cos 2\beta)}{1 - \sin \phi_e \cos 2(\theta + \beta)} \bar{F}_v$$

$$\text{ただし } \beta = \frac{1}{2} \left(\phi_w + \arcsin \frac{\sin \phi_w}{\sin \phi_e} \right)$$

$$\bar{F}_v = \frac{\rho_B \gamma}{2BD \cot \theta - 1} \left\{ 1 - \left(\frac{y}{H} \right)^2 BD \cot \theta - 1 \right\}$$

$$+ P_o \left(\frac{y}{H} \right)^2 BD \cot \theta$$

参 考 文 献

- 1) H.A. Janssen; Zeitschrift Verein Deutscher Ingenieure, 39, Aug. 31, 1045~9 (1895)
- 2) O.F. Theimer; Transactions of the ASME, May 460~477 (1969)

- 3) D.M. Walker; Chem. Eng. Sci., 21, 975~997 (1966)
- 4) M. & A. Reimbert; "Silos-Traité Theorique e Pratique", Editions Eyrolles, Paris (1956)
- 5) 青木, 森; 化学工学, 24, 926 (1960)
- 6) 杉田; 粉体工学研究会誌, 7, No.6 513 (1970)
- 7) G.P. Deutsch, L.C. Schmidt; Trans. of the ASME (Paper) No. 68-MH24 (1968)
- 8) 吉岡, 都築ら; 化学工学協会第31年会講演要旨集, 409 (1966)
- 9) 正路, 篠原, 田中; 化学工学協会第1回秋季大会講演要旨集, 143 (1967)
- 10) 杉田; 粉体工学研究会誌 7 No.6, 520 (1970)
- 11) M.G. Perry, H.A.S. Jangda; Powder Technol. 4 No.2, 89 (1971)
- 12) A.W. Jenike, J.R. Johanson; Am. Soc. of Civil Eng. 94, No. ST4 Apr. (1968).....抄訳, 鈴木雅之; 粉砕 No.15; 21. (1970)



圧縮における Bockstiegel 式と川北式について

法政大学工学部

川 北 公 夫

池 田 正 明

中空の金属の球のモデルから導かれた Bockstiegel 式¹⁻⁵⁾によれば

$$P = \sigma_0 \frac{V_M}{V - V_M} \quad \dots\dots\dots (1)$$

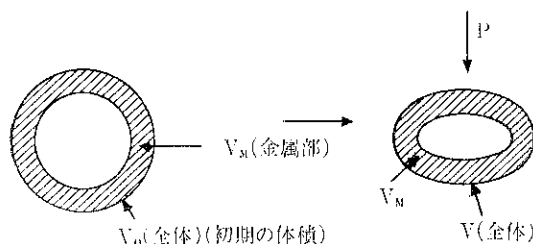
ここに σ_0 = 金属の降伏強度 (Yield strength)

V = 外部圧 P による加圧下の中空球の体積

(中空球内部の圧はゼロ)

V_M = 中空球の金属の体積

Fig. 1 に Bockstiegel のモデルを示した。



穴の体積($V_0 - V_M$) → 加圧下の穴の体積($V - V_M$)

Fig. 1 Bockstiegel のモデル

一方川北式は

$$\frac{V_0 - V}{V_0} = a \frac{bP}{1 + bP} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$a = \frac{V_0 - V_M}{V_0} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに b = 粉体の特性定数 (圧縮流動性関係値)

P = 加圧力

V_0 = 初期見掛け体積

V = 加圧下の見掛け体積

V_M = 無限大加圧下の体積

(実質体積であり、空隙ゼロの体積)

式(1), (2), (3)について

$$\left. \begin{aligned} \frac{V - V_M}{V_M} &= v \\ \frac{V_0 - V_M}{V_M} &= v_0 \end{aligned} \right\} \text{とにおいて川北式と Bockstiegel 式を比較すると,}$$

川北式は

$$P = \frac{1}{b} \frac{v_0 - v}{v} \quad \dots\dots\dots (4)$$

Bockstiegel 式は

$$P = \sigma_0 \frac{1}{v} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで Bockstiegel 式は確率論と空隙 (ポーア) 変形の両見地より導かれたものであるから、

$$P = \sigma(v_0, v) \frac{v_0 - v}{v} \quad \dots\dots\dots (6)$$

として表現できる⁶⁾。

式(4)と(6)を比較すると同形であることがわかる。川北式の $1/b$ は Bockstiegel 式の $\sigma(v_0, v)$ に相当し、降伏力を意味し、ブリITTLEな粒子集合体の場合は粒子の破壊強度に相当すると考えてよい。

著者は種々の粉体を用いて圧縮実験を行ない、 b は流動性に関する定数であり、 $1/b$ は圧力のデimensionをもつ降伏値であり、粉体粒子の塑性変形またはブリITTLEな粒子では粒子破壊であることを確認している⁷⁾。

参 考 文 献

- 1) G. Bockstiegel, IV Intern. Pulvermet. Tagung, Sept., (1969), Dresden.
- 2) G. Bockstiegel, J. Hewig, Archiv f. d. Eisenhüttenwesen, 751~767 (1965).
- 3) G. Bockstiegel, Int. Journal Powder Metallurgy, No. 4, 13~26 (1966).
- 4) G. Bockstiegel, Int. Journal Powder Metallurgy, No. 1, 29~37, (1967).
- 5) 私信
- 6) 私信および G. Bockstiegel, Powder Metallurgy, 3, No. 1, 17, (1971).
- 7) 粉体工学研究会誌に発表予定

倉敷にて—新湊園の石臼群

富山大学工学部

沢 昌

恭

初夏の残照に映える土蔵造りの家並の、壁の格子模様
が露路の奥へと消えかかるあたりには、和服姿の美人を
立たせたいような印象を与えるのが倉敷の街である。

その倉敷の街の中心、大原美術館の本館と新館とには
さまれた庭園、新湊園の小池のほとりや小路の面に注意
を向けると、多分備作地方近在の農家からでも集めてこ
られたのであろうか、敷石代りの多くの石臼が見付けら
れる。本業を終って地面に埋まるそれら石臼は、大形の
もの直径凡そ50cm、小形のもの外径約35cmと2種類に
分けられる。

“誌上博物館——粉碎機（石臼）”とは、徳寿工作所
の命尾起作翁と同志社大学の三輪先生が粉体工学研究会
誌〔6, 446（1969）〕に寄稿された、いろいろな石臼の
刃面構造の物語で、地方によって刃面分割数が異なる傾
向をもつのではないか、岐阜の8分割曲線8本刃は曲線
刃に珍らしさがあるのではないかなどの事柄を、数葉の
写真とともに記されたものである。

誌上博物館の記憶をたどって、新湊園の石臼群を調べ
てみると、それとは別の興味の もたれる 事実がえられ
る。大形のものが殆ど8分割であるのは当然にしても、
1組だけ7分割の異端者があり、それらの刃形も直線7
本刃、直線6本刃に混って、珍らしい曲線5本刃のもの
もある。小形の方は、美術館本館から新館への細道を新
湊園に入ってすぐ右側、亭舎玄関のアプローチとして数
十組が三列に敷きつめられ、直線4本刃、曲線6本刃、
曲線8本刃などの刃面が入り乱れる。

刃の切り方は、V字形細溝の間が平坦という構造のも
のが殆どであるが、中に二・三どうやら鋸歯状の刻歯を
行なった形跡のものも見られ興味はつきない。

今年度初め、3年生のレポートに自宅で使っているコン
クリート製石（？）臼を用いたソバ粉の摩擦実験を報
じたものがあつた。もらった拓本からは、その石臼が直
径32cm、8分割曲線8本刃であることが判り、新旧の

別はあっても岐阜の石臼に類似し、県境を接する岐阜と
富山の間の伝習の交流を伺がわせる。それに比べて新湊
園の石臼群は、形の大小、刃の曲直あるいは刻歯の数に
整然とした対応関係がつけづらく、もしもこれらの石臼
すべてが備作地方のものであるとするならば、この様な
混合状態が発現した所以もひとつ検討の対象とするに足
りる。この地方に、刃面構造に関する地域的定法が無か
ったのか、石工職人それぞれの秘伝の違いか、それとも
用途の違いに起因するものなのであろうか、或はまた、
備作地方が刃面構造の遷移領域として構造上の混合が見
られるのか、逆に、この石臼が備作以外の広い領域から
この小さな庭園にかつぎ込まれたのか、これらの仮説は
さまざまな事件に関して考察検証されねばなるまい。

本誌に色素吸着の報告を寄せた諸橋君が、本来の同体
摩擦による超微粉の生成プロセスとそれに伴うメガノ
ケミカルな現象の追求のかたわら、実験的検討を行なっ
て発表の機会を持っている回転円板上の大きな粒子のら
せん運動の軌跡の問題がある。既にえられた結果の一部
は、トレーサー色素溶液で湿潤化した粒子の紙面上に画
く軌跡は球形、非球形の別なくアルキメデスらせんであ
り、鋼球、ガラス球等ドライな粒子が鋼板上に印す軌跡
は対数らせんであるというものであるが、この様な知見
は、ベアリングボールの研磨や丸粒剤の製造、回転板式
摩擦ミル内での穀粒の挙動と関連させて興味深く、或い
は、粉碎機メーカーの先達としての石工が何故に曲直2
様式の石臼の刃面構造を選択したか、その所以に対する
回答も与えてくれることになるであろう。

人間生活の歴史に見られる往復運動から回転運動への
転換の中で、もっとも古いものは杵臼の組合せから挽臼
への変化ではなかったろうか。遙かな昔からの永い時の
流れの中に刻み込まれた、先人達の智慧の限りの努力の
成果としての石臼群を新湊園に見出して、あれこれ想い
をめぐらすに至ったのも、あるいは倉敷の街にただよう
歴史のにはいのせいかも知れない。

ビクトリーミルの汎用化

—スリットライナーの適用について—

細川粉体工学研究所

鈴木 昭 明

安 芸 良 明

1 緒 言

ビクトリーミルは1970年末に開発完成した衝撃型粉砕機であり、弱熱性で且つ靱性に富む低融点物質、例えば合成樹脂のようなものを、冷却された低温の空気を用いたり、粉砕原料自身を低温に冷却することなく、室温において能率的に粉砕することを目的に開発された。

過去2年の間にビクトリーミルはこのような低融点物質専用の粉砕機としてその分野に機能をはたして来た、この間に我々はビクトリーミルが単に低融点物質の粉砕のみならず、一般の鉱物、あるいは植物性の原料に対しても秀れた粉砕性能を示すことを見だし、低融点物質以外の分野にもビクトリーミルが適用できるよう改良の努力をして来た。

ビクトリーミルは最初から合成樹脂のような物質を粉砕することを目標に開発されたものであり、一般にこれらの物質は軟かく、粉砕時において機械を摩耗させることは少ない、したがってビクトリーミルには硬度のある普通の鉱物等を粉砕した時に生じる摩耗に対する対策はなされていない。汎用機化への試みはまずこの点を改良するにあった。

従来のビクトリーミルにおいて特に摩耗対策を必要とする所は、スクリーン、ライナー、とローターである。後の二者は材質又は構造の変更により容易に耐摩耗性を向上させることが出来る、しかしスクリーン（打抜多孔板）の存在は、スクリーンミルで総称される他の粉砕機と同様に摩耗性物質粉砕に対して最大の弱点となる。

我々はビクトリーミルを汎用化し、硬度のある摩耗性物質の粉砕にまで適用するため、スクリーンとライナーの組合せの代りに特殊な形状のロストルを組合せたスリットライナーを用いることにし、その形状について研究し、充分目的にあうものを開発した。

衝撃式粉砕機へのロストルの適用は従来、破碎、粗碎

の分野ではよく行なわれているが微粉砕機においては、製品粒度を細かくするために、普通の形状のロストルではロストル自身及びロストル相互の間隙を極度に小さくする必要があり、製作、組立上に困難がともない、工業的な規模の粉砕機への適用は容易ではなく、あまり例はない。

今回、研究開発された特殊な形状のロストルはこれらの欠点をとりさり、微粉砕機への適用を可能としたうえに、従来のスクリーンミルにない特性をひき出すことが出来た。

本報では各種の形状のロストルに対するビクトリーミルの粉砕特性を中心に報告する。

2 ビクトリーミルの構造と汎用化のための対策

従来のビクトリーミルの構造の概略を Fig. 1 に示した。低融点物質の粉砕を目的に開発されたものであるため、構造上の特徴も熱の発生、温度上昇の防止を目的としたものが中心となっているが、一般の鉱物質原料を粉砕する場合においてもそれらが粉砕機構上の特徴となる。

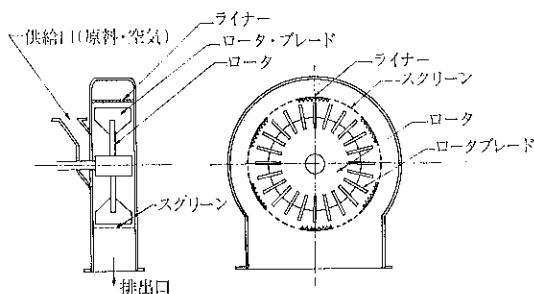


Fig. 1 ビクトリーミルの構造

(1) ロータ

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てある。ブレードの枚数を多くして衝撃回数を増すと共に、一枚のブレードの前に多くの碎料が滞留して摩擦、圧縮、剪断等の衝撃以外の力が加えられないようにしてある。従来のビクトリーミルの標準ロータはランナーボス、ディスク、ブレードが一体となった鋳鋼製である。したがってこれを摩耗性の強い鉱物の粉碎に適応させるためにはブレードの先端に耐摩耗材料をとりつけるか、あるいは、衝撃部に耐摩耗材料をつけたブレード又はスイングハンマをディスクと一体でなく取付け交換が可能なものにする必要がある。今回の開発研究においては、この点も考慮しロータの形状に関してもテストを行った。

(2) 中央からの供給

これは低融点物質の粉碎のために、新しく供給された粉碎原料が、ライナーとロータの先端の間よりなる粉碎域全体に分散され、全的に同じ条件で粉碎され、粉碎域の場所により温度差が生じないようにしたものである。温度上昇があまり問題にならない一般鉱物の粉碎においても、ロータの全ブレードに均一な負荷をかける点において、この中央からの供給は粉碎能率を向上させるものである。

(3) ライナー、スクリーンとそれ等に代るスリットライナー

普通、このタイプの粉碎機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多数に分割して交互に配列してある。これは低融点物質の粉碎において、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ものであるが、一般鉱物の粉碎においても、粉碎された微粉がすみやかに排出されるように排出口が円周全面に分散されている方がよい。又前節で述べたようにスクリーンを使用することは摩耗に対して問題があり、ロストルも普通の形状では使用に困難がともなう。

本研究の主目的であるビクトリーミルの汎用化のために、微粉碎機への適用ができ、製作が容易な上に、且つそれを用いることにより、従来のスクリーンミルにはない操作特性が得られるようロストルを組合せたスリットライナーを開発することを主眼にこの研究が進められた。

3 実験装置及び粉碎原料

実験に用いた粉碎機はビクトリーミル5 HPのテスト用の機械を改造して用いた。Fig. 2 にその構造と主要寸法を示した。

目的とするスリットライナー、ローターの形状については後の章で説明する。

実験装置のフローシートを Fig. 3 に示した。ホッパーに入れられた粉碎原料はフロートロン（電磁振動式供給機）により上記の実験用粉碎機に供給される。粉碎された材料は後尾のファンにより粉碎機に吸入された空気によりパルスエアー（バグフィルター）に送られ、ここで空気から分離され、ロータリーバルブより連続的に排出される。

粉碎原料は石灰石をハンマーミルで粗砕したものを全ての実験に用いた。原料の粒度分布を Table. 1 に示した。

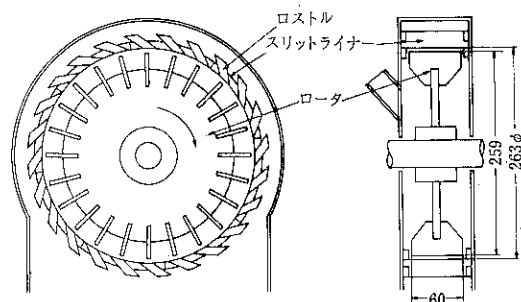


Fig. 2 実験用ビクトリーミル

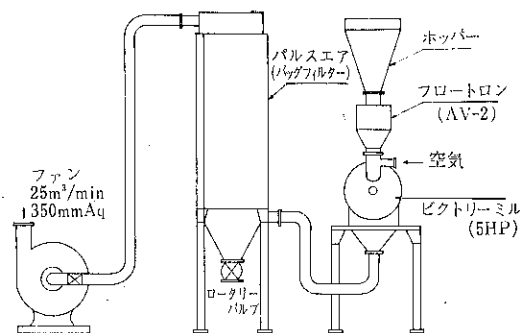


Fig. 3 実験装置フローシート

Table 1 粉碎原料（石灰石）粒度分布

粒 径 (メッシュ)	分 布 (%)
8 mesh on	16.0
8~12	16.0
12~24	25.0
24~32	9.5
32~60	14.0
60 mesh pass	19.5

多くの実験において、処理能力の測定は、粉碎機のモーターに一定電流(14.5A)の負荷がかかるよう原料の供給量を調節し、粉碎原料の重量とそれを粉碎するに要した時間から算出した。

粉碎品の粒度分布は湿式篩分け法と沈降天秤法による測定を併用した。

風量の測定はパルスエアーからファンに至る間のダクトにピトー管を入れて行った。

4 スリットライナーの形状

ロストルの形状については色々な形のものが考えられ

る。例へば粉碎面に波状に凸出させて衝突効率の上げられるもの、配列の仕方によりロストル間隙のかわるものなどが考案され、実際に製作されたうえ簡単なテストが

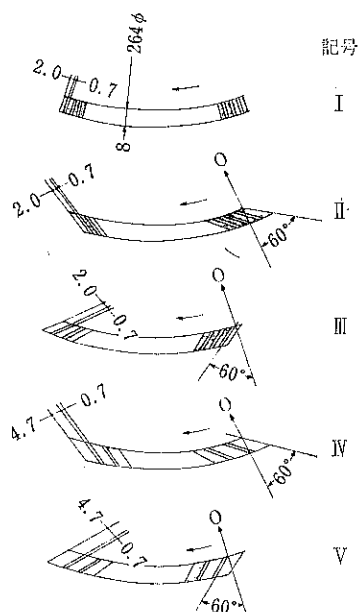


Fig. 4 スリットライナー寸法
(傾斜角度の影響)

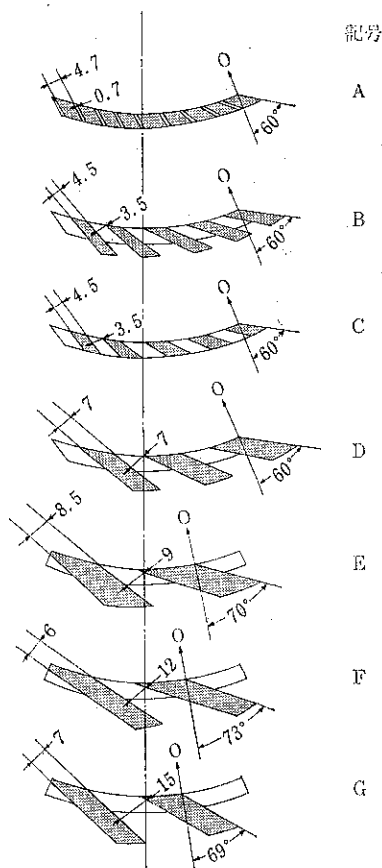


Fig. 5 スリットライナー寸法
(ロストル・スリットの
大きさの影響)

Table 2 スリットライナーの諸寸法

スリットライナー 記 号	スリット 間 隙 (mm)	スリット 傾 斜 角 (度)	全 円 周 スリット (個数)	全スリット面積 (最小断面) (m ²)	スリット最狭部の通過速度(m/sec)			
					機内通過風量 m ³ /mm			
					9.6	6.0	3.0	1.2
A	0.7	60	72	0.33×10^{-2}	48.2	30.2	15.1	6.0
B	3.5	60	40	0.92×10^{-2}	17.3	10.8	5.4	2.2
C	3.5	60	40	0.92×10^{-2}	17.3	10.8	5.4	2.2
D	7.0	60	24	1.11×10^{-2}	14.4	9.0	4.5	1.8
E	9.0	70	16	0.95×10^{-2}	16.8	10.5	5.2	2.1
F	12.0	73	16	1.27×10^{-2}	12.6	7.9	4.0	1.6
G	15.0	69	16	1.58×10^{-2}	10.1	6.3	3.2	1.3

行なわれた、テスト結果の詳細についてはここでは省略する。ロストルの形状に必要な条件として、粉碎性能が高いことは勿論であるが、製作の容易なことと、ロストル間の凹部あるいはスリットに粉砕品がつかまらずにスムーズに通過できることがある。

その意味で、各種ロストルのテスト結果を検討、採用されたのは Fig. 4, 5 に示すようなものとなった。ロストルは一定数だけ一定間隔に両側のバーに固定されて一枚のスリットライナーを形成し、これがビクトリーミルのテスト機に8枚とりつけられる。

以下この形状のロストルからなるスリットライナーの性能について述べる。

5 スリットの角度について

スリットライナーにおいてスリットの傾斜角度は重要な問題である。Fig. 6 は Fig. 4 に示した通りのスリットライナーについての試験粉碎機の無負荷運転時のモーター電流を測定したものである。スリットの傾斜角 (Fig. 4, 5 に示した角度でスリットの面から法線への方向がロータの回転と同方向の時に正、反対方向の時に負とする) が大きくなるほどモーター電流が小さくなる、勿論この測定においてミル内を通過する風量は一定としてある。ロータ回転にともなう空気の流れのための抵抗が傾斜角が小さくなるほど特に負の値の時は大きい。Fig. 4 のスリットライナー IV と V について同条件で石灰石を粉碎した時の結果を Table. 3 に示す。これらの結果より傾斜角は大きいほど有利である。ここでは製造上の問題も考慮してスリットの傾斜角は 60° ないし 70° とした。

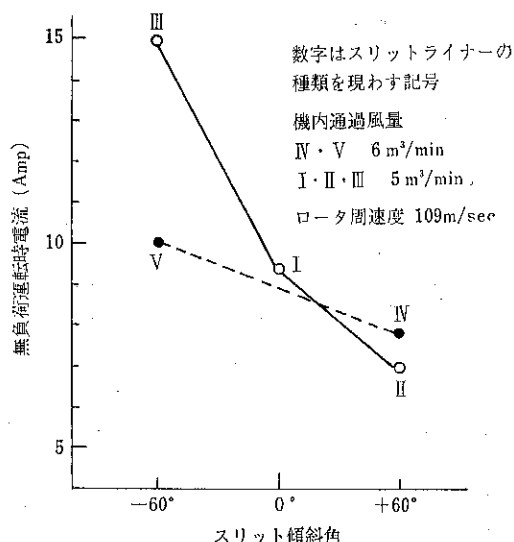


Fig. 6 スリット傾斜角と無負荷運転時電流

Table 3 スリット傾斜角が粉碎性能に及ぼす影響

使用スリットライナー		IV	V
スリット傾斜角 (°)		+60°	-60°
使用ロータ		標準型	
ロータ周速 (m/sec)		109 m/sec	
機内通過風量 (m³/min)		6 m³/min	
無負荷運転時電流 Amp		7.8	10.0
粉碎運転電流 Amp		14.5	
処理能力 (kg/PHr)		44.0	41.0
製品粒度 200 mesh pase %	200 mesh pase %	74.7	52.8
	250	69.9	49.2
	300	62.1	45.8

6 ロストル、スリットの大きさについて

前節までの実験ではほぼ形状の定まったスリットライナーにつき、ロストル、スリットの大きさが粉碎性能におよぼす影響を知るために各種のスリットライナーと試作して実験した。実験に使用したスリットライナーの形状と諸元を Fig. 5 と Table. 2 に示した。以後スリットライナーの名称については Fig. 5 の記号で呼ぶこととする。Fig. 5 の7種のスリットライナーについて、粉碎機のロータ周速を変えて石灰石を粉碎した場合の結果を Fig. 7 と Fig. 8 に示した、これによるとスリットライナー、B, C, D, E の4種は、ロータ周速の低いところでは若干の差が認められるも、ほぼ同程度の粉碎能力と製品粒度を示すものと考えてさしつかえない、F, G のスリットライナーは明らかにスリットが大きすぎ、特に低いロータ周速のところで製品粒度が粗くなっている。又高いロータ周速で運転され、全体として細かい製品が得られている場合も、1~3 mm程度の粗大粒子がわずかつ混入するのが見受けられた、スリットライナーAはスリットの巾が小さいにもかかわらず製品粒度が粗い、これは、他のスリットライナーに比べ開孔率が少なくスリットを通過する空気の流れが特に大きくなっているためと考えられる。Fig. 9 は7種のスリットライナーについて、ロータ周速を最高にした時、即ち、それぞれのスリットライナーについての最も細い製品の粒度分布を比較したものである。スリットライナーAをのぞいてほぼ同等の製品粒度分布を示すと考えて差しつかえない。

マーク	○	●	×	△	▲	□	▣
スリットライナー種類	A	B	C	D	E	F	G

ロータ 標準型
風量 $9.6\text{m}^3/\text{min}$

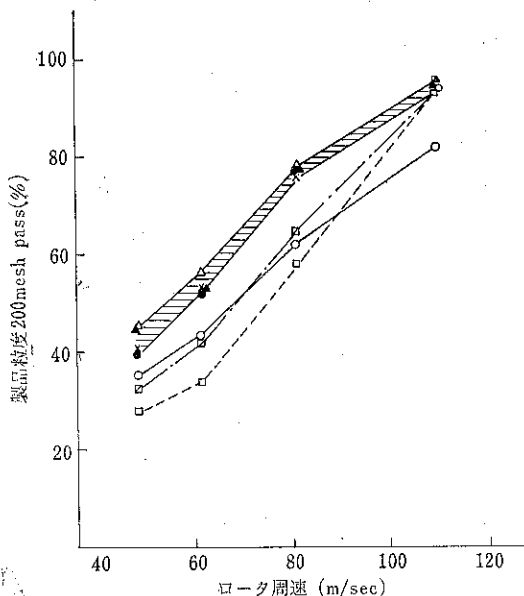


Fig. 7 スリット・ロストルの大きさの製品粒度に対する影響

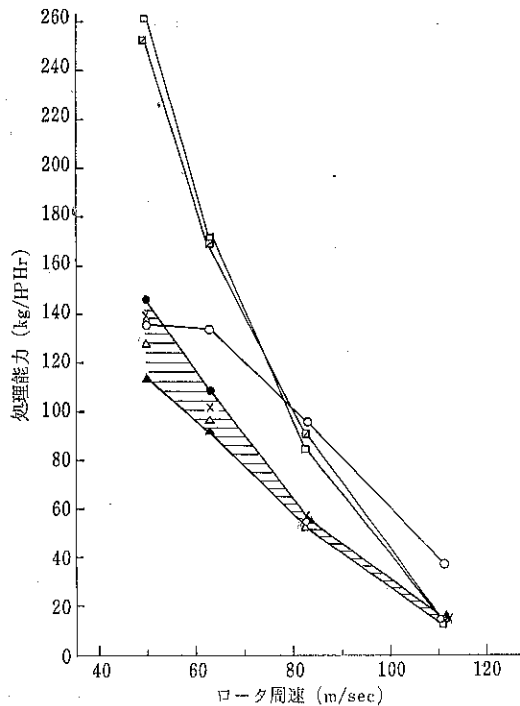


Fig. 8 スリット・ロストルの大きさの処理能力に対する影響

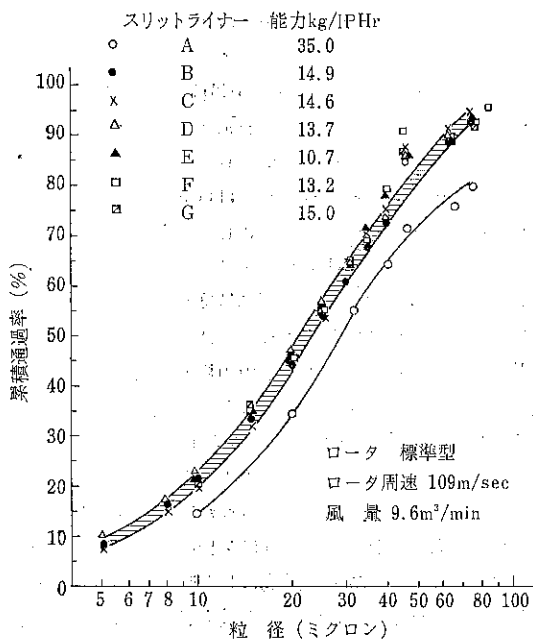


Fig. 9 各種スリットライナーによる製品粒度分布

以上のテスト結果よりスリットの巾はある一定の大き

さまで、即ち Fig.5のEまでは大きくしても製品粒度、能力に対する影響はほとんどない。したがってこの範囲内で製作しやすい大型のスリットライナーを一種類つくればよい。

7 製品粒度の調節

一般のスクリーンを備えた同種の衝撃型微粉砕機では製品の粒度を調節するための可変要素は孔径のこととなるスクリーンに交換する、ロータ周速を変える、機内通過風量を変えるの三つである。

これまでの実験において、ビクトリーミルにスリットライナーを使用する時は、通常の粉砕機のスクリーンの孔径に相当するスリットの大きさは粉砕製品の粒度に大きな影響を与えず、一種類を用意すればよいとの結論をえている。

Fig. 10と Fig. 11はスリットライナーBを用いて、機内通過風量、ロータ周速を変えて、石灰石を粉砕した場合の実験結果を示したものである。

機内通過風量が製品粒度に与える影響はロータ周速が小さい所では、風量が多いほど製品粒度は大であるがロータ周速の大きい所では逆に風量が多いほど製品粒

スリットライナー B
標準型ロータ

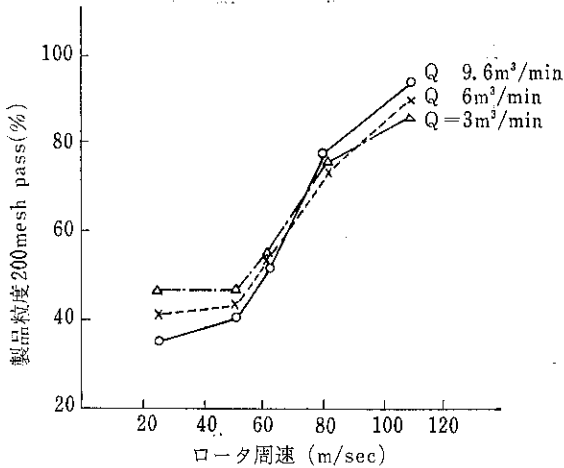


Fig. 10 製品粒度に対するロータ周速と風量の影響

機内通過風量 —○— $Q=9.6\text{ m}^3/\text{min}$
—×— $Q=6$
—△— $Q=3$

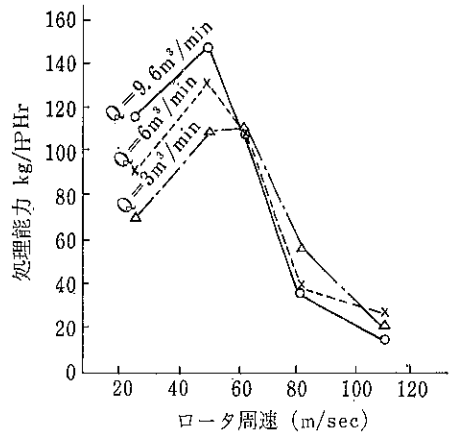


Fig. 11 処理能力に対するロータ周速と風量の影響

度は細かい。この理由は不明である。

しかし、風量の $3\text{ m}^3/\text{min}$ から $9.6\text{ m}^3/\text{min}$ の大幅な変化に対して 製品粒度の変動の範囲は少なく、しかも、変動の多いロータ周速の低いところは、Fig. 11 からわかるように衝撃力が有効に作用する範囲からはずれている。したがって、この形状のスリットライナーを備えたビクトリーミルにおいては、機内通過風量の変化が製品粒度に与える影響は実用上ないといってもよい。ロータ周速度は製品粒度に大きな影響を与える。これは他の衝撃式粉砕機と同様であるが、スリットライナーを備えたビクトリーミルではよりその傾向が顕著である。ビクトリーミルの場合、粉砕された微粉はすみやかにスリットから排出され、製品の粒度を決定する大きな要因は衝撃力の大きさだと考えられる。この種のミルでは製品粒度の調節はロータの回転数の変更のみで可能であり、又それで充分である。そうすることによりスリットの大きさの製作誤差、摩擦による変動、あるいは運転中の機内通過風量の変動などが万一生じても、常に安定した粒度分布の製品が得られる。

8 ロータの形状について

前節までの実験に使用されたロータは全て従来のビクトリーミルの標準型のロータである。ビクトリーミルは合成樹脂のような低融点物質の粉砕を目標に開発された機械であり、このような物質は比較的機械を摩擦させることが少ないのでビクトリーミルの標準型のロータには摩擦に対する対策は講じられていない、勿論、ロータの

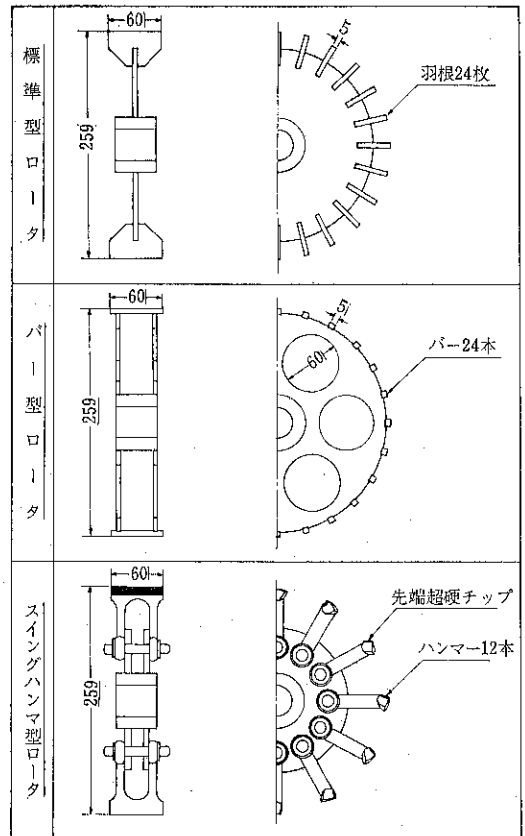


Fig. 12 3種ロータの概略図

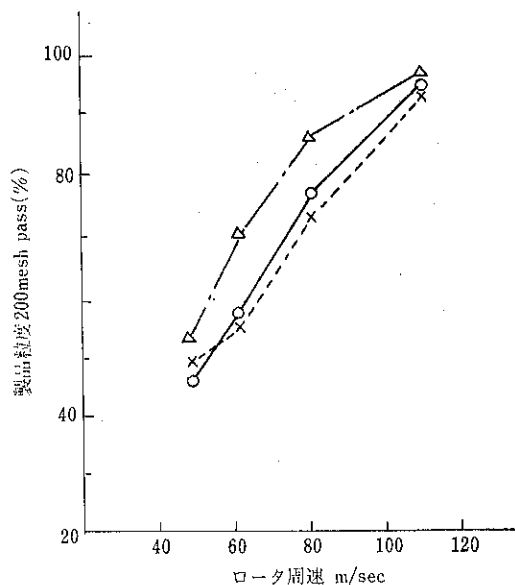


Fig. 13 ロータ形状と製品粒度

ブレードの先端に耐摩耗材料をつける、表面硬化処理を行う等の方法で容易に耐摩耗性をもたせることが出来るが、ここではロータそのものの形状についても標準型以外のものについて実験を行った、その一つは、粉砕原料に直接衝撃を与えるのはロータブレードの先端部だけであることを考慮したバー型のロータであり、他の一つは、こうした高速回転衝撃型の粉砕機に一般に使用されるスイングハンマ型のロータである、Fig. 12 に実験に使用した三種ロータの形状、寸法を示した。

9 三種のロータの性能比較

スリットライナーDを用いて、標準型、スイングハンマ型、バー型の3種類のロータについて、石灰石を粉砕して性能を比較した。その結果を Fig. 13 にロータ周速と製品粒度の関係、Fig. 14 にロータ周速と処理能力の関係を示した。標準型のロータとスイングハンマ型のロータとは常用されるロータ周速の範囲ではほぼ同じ性能を示した。

バー型ロータは能力は少ないが製品粒度が他の2種に較べて細い、これはミル内での空気及び粉砕材料の流れの状態がことなり、バー型の場合、排出速度が遅く、滞留量が多く若干くりかえし粉砕が行なわれているものと推定される。(Fig. 15)

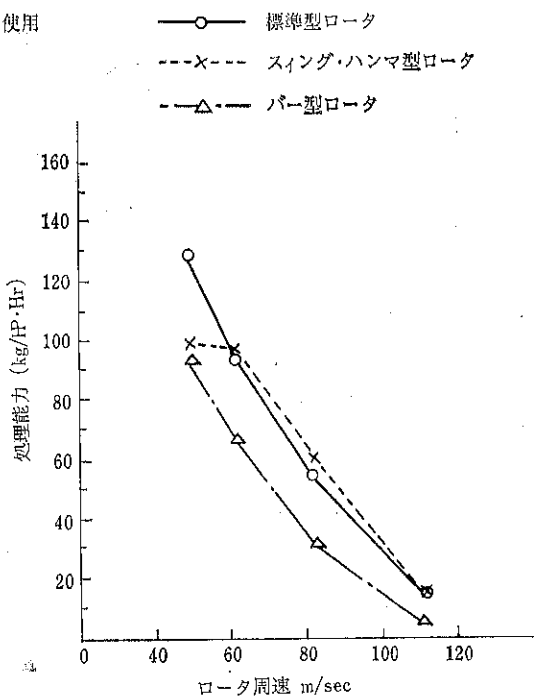


Fig. 14 ロータ形状と処理能力

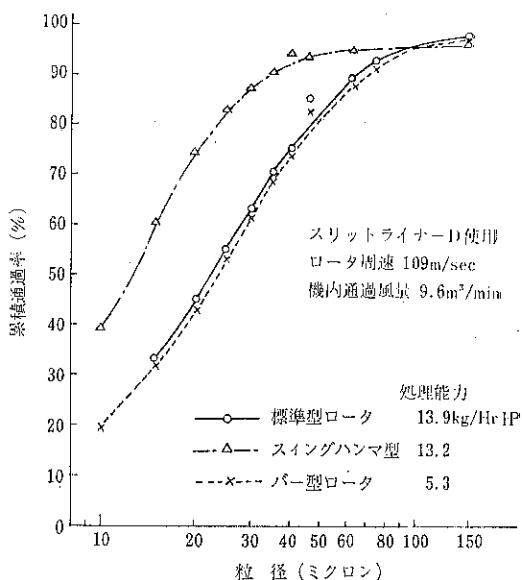


Fig. 15 製品粒度分布に対するロータ形状の影響

10 スイングハンマ型ロータのハンマ数

高いロータ周速 (109 m/sec) でスリットライナーDを使用しハンマの本数を12本、6本、3本と変えて粉砕

特性を調べるための実験を行った。結果を Fig. 16 に示す。

製品粒度はハンマ数が少なくなるに従って粗くなる、ハンマ数12本と6本の差は少ないが、6本と3本の間の差は非常に大きい。粉碎能力はハンマ本数が少ない方が増大しているようであるが、これは製品粒度が粗くなっているためで、例へば12本のスイングハンマをもつロー

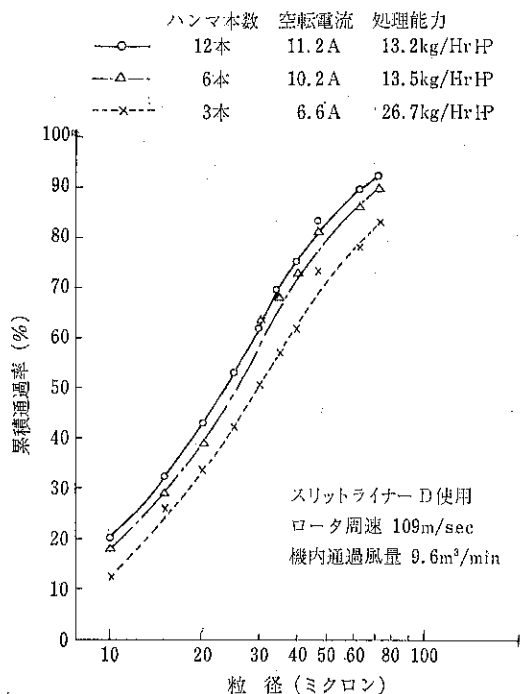


Fig. 16 ロータのハンマ本数の影響

タを用いて回転数を調節して周速度を下げても同程度の粗さの製品粒度が得られるようにすると12本のハンマを持つものの方が能力が大である。即ちハンマ数が少なくなると粉碎自体の能率が低下する。

11 結 語

低融点物質の粉碎専用開発されたビクトリーミルにおいて、スクリーン及びライナーを特殊な形のロストルよりなるスリットライナーにおきかえることにより、摩耗性のある一般の鉱物質の粉碎へも使用できる見通しがついた。

このスリットライナーは従来衝撃式破碎機において用いられている普通のロストルとは性質を異にし、ロストル間のスリットの巾をそれほど小さくしなくとも微粉末を得る目的に使用でき、製作も容易にして、充分微粉砕機に適用できるものである。

又、このスリットライナーをビクトリーミルに適用した場合、製品の粒度はスリットの間隙、あるいは機内通過風量による影響をほとんど受けず、ほぼロータ周速のみの関数となる。したがって一種類のスリットライナーを用意するのみで、ロータ回転数の変更により広い範囲で製品の粒度を調節することが出来ると同時に運転中、風量の変動が生じて、製品粒度が変化することなく安定している。

ビクトリーミルの標準型ロータの他に普通の衝撃式微粉砕機によく用いられるスイングハンマをつけたロータも同じ性能をもって使用できることが確認された。

又この場合ハンマの本数は多くした方が粉碎が有効に行なわれることが確認された。



粒 度 に 関 す る 試 論 (第1回)

東京大学工学部

菅 沼

彰

1. 単一粒子の粒度と粒径

1.1 物体の幾何学的な意味での大きさとは何か

たとえば直径10cmの球と言うだけで、その球の幾何学的な意味での大きさは確定する。直径10cmと言うかわりに、表面積 $314.159\cdots\text{cm}^2$ の球と言っても、体積 $523.59\cdots\text{cm}^3$ の球と言っても、その球の幾何学的な意味での大きさが確定することに変わりはないし、直径10cmの球は直径12cmの球よりは幾何学的な意味で小さく、直径8cmの球よりも幾何学的な意味で大きな球であることは疑いようもない事実であって、球の幾何学的な意味での大小関係の順列は、直径で比較しても、表面積で比較しても決して変動しない。

どんなに複雑な形をした物体であっても、同じ形をした物体同志であるならば、幾何学的な意味での大きさの比較、大小関係の順列が大きさの定義次第で逆転したり変動したりするような事態は起らない。ミロのヴィナス像——西郷さんの銅像でも戦艦大和でもよいのだが——を正確に写しとった、縮尺の異なる模型がいくつかあるとしよう。なるほど形は複雑であるが、どの部分のどういう寸法で模型の幾何学的な意味での大きさを表示するかをはっきりさせておくかぎり、それがどの部分のどういう寸法であってもかまわない。ヴィナス像であれば、身長で大きさを表示してもよいし、肩巾でもよいであろう。鼻の高さを像の大きさを示す尺度として用いることも可能である。対象がミロのヴィナス像であって、“せむし”や“てんぐ”がまぎれこんでいないかぎり、身長より高いヴィナス像は鼻の高さもより高いはずであり、肩巾で比較して一番小さなヴィナス像の身長が一番低いはずである。戦艦大和の模型ならば、艦首から艦尾までの長さを大きさの尺度にしてもよいであろうし、模型が細部に至るまで正確ならば主砲の直径で模型の大きさを比較することも可能である。幾何学的な意味での大きさを表示する尺度が長さでなければならぬという必然性は何もないから、甲板の面積や吃水線以下の部分の体積——排水量——を大きさの尺度にしてもよい。主砲の直径で比較して一番大きな模型の甲板が一番広く、排水

量も一番大きい。

ところが仮に、ヴィナス像と戦艦大和の模型とを比較してどちらが大きいかなどと言い出せば、そこには必ず混乱が生ずる。何という無意味な設問かと一笑に附するは自由であるが、本誌の読者ならば、著者がこの例で何を言いたいのか想像がつくはずである。我々粉体関係者が粒度、粒径という語を口にするとき、ヴィナス像と船の模型どころか、もっともっと妙な組合せについてその大小比較を論じてはいないであろうか。

「直径100 μ の球形粒子は、1辺の長さ80 μ の立方体粒子よりも幾何学的な意味において大きいか？」という問に対しては、何か注釈をつけなければ答えられないはずである。Table 1に、球についても立方体についてもその値が定められるような幾何学的な意味での大きさの尺度のいくつかを挙げてみた。同じ形の物体同志、たとえば球同志の大小比較を考えるかぎり、Table 1に挙げたいずれの尺度を用いても大小関係の順列に変動をきたさないことは明らかである。さらに、読者諸氏の多くがすでに気づいたように、Table 1に挙げた尺度は現にそのまま粒径として用いられているもの、粒径に換算する以前の段階における粒子の大きさの尺度として用いられているもの、そうでなければ上記のいずれかによく

Table 1 幾何学量による大きさの定義 (大小比較の基準にする量) の例

大きさの定義 (大小比較の基準にする量)	記号*	次元
通過可能な最小円孔の直径	d	[L]
通過可能な最狭スリットの中 周 囲 長**	b	[L]
投 影 面 積**	l	[L]
表 面 積	a	[L ²]
体 積	s	[L ³]
単位投影面積当たりの体積	v	[L ³]
単位表面積当たりの体積	v/a	[L]
	v/s	[L]

* 引用や対照の便を考慮して仮に符号を割当てただけであって、特別の意味はない。

** 水平面上に放り出した際に出現の確率が最も高いような姿勢を考へ、その姿勢を真上から見たときの値

Table 2 直径10 cm の球と 8 cm 角の立方体の大小比較*

大きさの定義*	球の大きさ	立方体の大きさ	大小比較
d	10.0 cm	11.3 cm	球<立方体
b	10.0 cm	8.00 cm	球>立方体
l	31.4 cm	32.0 cm	球<立方体
a	78.5 cm ²	64.0 cm ²	球>立方体
s	314 cm ²	384 cm ²	球<立方体
v	524 cm ³	512 cm ³	球>立方体
v/a	6.67 cm	8.00 cm	球<立方体
v/s	1.66 cm	1.33 cm	球>立方体

* 大きさの定義については Table 1 参照

似た概念である。すなわち Table 1 に列挙した尺度は、物体の幾何学的な意味での大きさの尺度としてそれほど変なものではないと言える。さて Table 2 は、これらの尺度を用いて直径 10 cm の球と 1 辺の長さ 8 cm の立方体の大きさを比較してみた結果である。球は立方体よりも大きいという判定が 4、立方体よりも小さいという判定も 4 になった。Table 2 において判定が規則正しく 1 回ごとに逆転しているのは偶然の——実は著者の——いたずらに過ぎないが、形状を異にする物体の大小関係の順列は、幾何学的な意味での大きさを比較するという限定をつけたとしても、大きさの定義、すなわち大きさの尺度次第で変動するものであることが、これで明らかになったであろう。

形が違う物体の幾何学的な大きさを比較するときには、その体積を尺度に選ばざるを得ない、選ぶべきだ、選ぶのが当然だ……と主張したが人が、私の体験によれば比較的多いようである。そういう意見の持主にその論拠を述べてもらおうとたとえばこういうのがあった。

「目の前にいろいろな形をした純金の塊が並べられていて、どれか 1 個だけもうえるとしたら、誰しも一番大きな金塊を選ぶであろう。この場合、一番大きな金塊というのは体積が一番大きい金塊のことであって、一番長い金塊や、表面積最大の金塊でないことは明らかである。」

「粘土をこねまわすいろいろな形になる。形が変れば巾とか高さとかいう「長さ」も、表面積とか投影面積とかいう「面積」も変化するが、粘土の「体積」は変わらない。同じ粘土であるのに、ちょっとこねまわしただけで値が変わってしまうような量は大きさの尺度として不都合である。」いずれも一見もっともらしい議論であるが、これらはいずれも、金とか粘土という物質の量、すなわち質量という物理量の概念と、純幾何学的な体積の概念とを混同していることから起る錯覚であって、幾何学的な意味での大きさは体積であるという論拠にはなっていない。たしかに、物質の量であるところの質量と最も

緊密に結びつく幾何学的量は体積であるから、物体の大きさを質量で表示したり比較したりするのが便利であるような場合には、それを幾何学的な尺度で代用するすれば長さや面積ではなくて体積で代用すべきであろう。金塊の価格はその質量で定まるものであるから、たまたま幾何学的尺度で価値の大小を比較する必要が起った場合には、質量の代用としては最も適当な幾何学量であるところの体積で比較するのが妥当だというだけの話である。その証拠に、もらって帰った金塊を暖めてやれば膨張して体積が増大するけれども、暖めてやったからといって金塊の価値がふえるわけではない。こねまわしただけで粘土塊の大きさが変わるようでは不便であるから目方で取引するべきだというのは妥当であろうが、だからといって粘土細工の幾何学的大きさは常にその体積で表示、比較されるべきだとは言えない。

我々のまわりをみまわして、「ものの大きさ」の幾何学量による表現を拾い集めてみたのが Table 3 である。どうしてこのような表現、表示が用いられるに至ったかの吟味はいずれ行なうことにするが、とにかく、「ものの大きさ」の表現には、長さ [L¹]、面積 [L²]、体積 [L³] のどれもが利用されていることがわかるであろう。すなおに考えてみるならば誰しも、幾何学的な意味での「ものの大きさ」の次元が長さ [L¹] であるとはかぎらないこと、体積 [L³] であるべきだとか面積 [L²] でなければならないなどという画一的な議論は不可能であり無意味であることに気がつくはずである。

Table 3 幾何学量による大きさの表現の実例とその次元

身の丈 7 尺の大男 [L]
胴まわり 1 尺の大蛇 [L]
9 寸 5 分の刀 [L]
ふたかかえもある松の大木 [L]
海拔 4,000 m の高峰 [L]
周囲 1 里の小島 [L]
50 センチ砲 [L]
100 畳敷の大広間 [L ²]
50 町歩の山林 [L ²]
敷物にしたら 8 畳敷にもなろうかという
巨大な虎 [L ²]
4 合びん [L ³]
2 升なべ [L ³]
4 斗なべ [L ³]
千石船 [L ³]

1.2 ものの大きさとは何か

前節では議論を、幾何学的量による物体の大きさの表現に限定したが、そもそも大きさとはどのような概念で

あろうか。果して常に、幾何学的な量だけで表現できるような概念であろうか。答は否である。

金塊の大きさは幾何学量よりも質量で表現するべきであることは前節で指摘した。この場合、大きさの次元は [M] である。「モータが小さ過ぎる。もっと大きなモータが必要だ」と言われたときには、倉庫の奥に眠っていた旧式で体積の大きい、目方の重いモータと交換しても駄目である。この場合にモータの大きさはその出力で比較するべきものであり、大きさの次元は [FL/T] である。大国が幾何学的な意味で大きな国であるとは限らない。日本は経済大国になったと主張する人々といえども、経済活動のおかげで国土面積が大きくなったと信じているわけではなからう。史実によれば秀吉もナポレオンも大男ではなかったそうであるが、前者は日本史上、後者は世界史上屈指の「偉大な」人物であったと言ってよいだろう。10円硬貨は100円硬貨よりも幾何学的には大きい。「通貨としての大きさ」は $\frac{1}{10}$ に過ぎないし、1万円札の幾何学的な大きさや質量は千円札のそれにくらべて僅かに大きいだけであるが、「通貨としての大きさ」は10倍なのである。

ふざけた例ばかり並べると思う人があるかもしれないが、これは真面目な話であり、「大きさ」という言葉の意味するものがいかに多種多様であり、いかに不明確な概念であるかを認識しないかぎり、粉体の粒度について論じても益は無い。前節とこの節とをあわせての結論として、「ものの大きさ」を表示、比較する尺度にはいろいろあり得ること、尺度の種類や次元を画一的に頭からきめてかかる根拠は何も無いこと、尺度の種類や次元の選択を誤ればとんでもないナンセンス、混乱や失敗が起り得ることがわかる。

Table 4 大きさの表現の実例とその次元*

5 ポンド砲, 4 斤砲 [M]
100 万 t タンカー, 8 t トラック [M]
50 貫の偉丈夫 [M]
1,000 t 高炉 [M]
100 万 t のエチレンプラント [M/T]
10 デニールの糸 [M/L]
1,000 t プレス [F]
10 メガトンの核弾頭 [FL]
100 W の電球, 10 馬力のモータ [FL/T]
5 冷凍トンの冷房機 [FL/T]
2 人乗のヨット, 500 人乗の大型機 [人]
時価 10 億円の巨大なエメラルド [辛]
2 時間で 1 周できそうな小島 [T]

* 幾何学量による表現については Table 3 参照

Table 4 は Table 3 と同様に、我々のまわりでよく用いられている「ものの大きさ」の表現を集めてみたものである。ただしここには、純幾何学的な尺度以外のものだけを並べて Table 3 と重複しないようにした。

1.3 粒度とは何か

粒度とは粒子の「大きさ」である。ここに「大きさ」とは、何らかの意味での大きさ、すなわち 1.1 と 1.2 で考察した結果明らかになったような、「広い意味での大きさ」である。それでは定義にならないという抗議の声があがるであろう。ほとんど定義になっていないことは私も認める。認めるどころか、正にその事実、「この粒子の粒度」と言っただけではほとんど何も定義されていないという事実の認識こそ重要であるというのがこの講義の眼目である。粒度が「広い意味での粒子の大きさ」であるからには、その尺度にはいろいろな種類が考えられ、次元もさまざまであってよいことになる。その粒子の質量 [M] も、体積 [L³] も、表面積 [L²] も何らかの意味でその粒子の大きさを表現している。粒度の次元は [M] でなければならぬとか、次元が [L/T] であるからこれは粒度ではない、などと主張することは、モータの大きさを目方で比較したり、10円玉は100円玉より「大きなお金」であると考えのと同程度に見当違いな主張である。

「粒子の大きさ」と言うとき多くの人達は「粒径」という言葉を想起するが、「粒子の大きさ」、すなわち「粒度」と、「粒径」とは決して同義語ではない。「粒径」は、元来粒子直径を意味する語であるが次第に拡張されて、「粒度」のうちでその次元が [L] であるものを指す言葉として使われるようになった。従って、「粒径」はたしかに「粒度」の一種であるけれども、「粒度」と言ったら「粒径」のことだとはかぎらない。「粒度」イコール「粒径」と考えることは、「生物」とは「鳥」のことであると考えるようなものである。冒頭からくどいほど強調してきたように、「大きさ」は「長さ」、すなわち「次元 [L] を持つ尺度」で表示しなければならないという根拠や必然性は全く無いのであって、「粒子の大きさ」を表示するには「粒径」を用いなければならないとか、「粒径」を用いるのが便利であるという説には根拠が無い。それにもかかわらず、

- ・直観的にわかりやすいような気がする。
- ・相互比較がしやすいような気がする。
- ・顕微鏡写真で測定できる量が事実上「長さ」にかぎられていた。

などの事情が背景になって、「粒度」の表示に「粒径」を用いたがる傾向が非常に強く、「粒径」にあらずんば「粒度」にあらずというような暴論がまかり通ってい

Table 5 粒度 $x[X]$ を粒径 $D_p[L]$ に換算する方法の分類

1. $X=L$ の場合	
1-1	特に換算は行わず、あるルールに従って測定した“粒子の長さ” x をそのまま D_p とする。 x の測定ルールの名前をとって～径と称する。 例) 長軸径, 短軸径, 定方向径
1-2	1個の粒子について2つ以上の長さ x_i ($i=1, 2, \dots, P; P \geq 2$) を測定し、何らかの意味での x_i の平均値を D_p とする。～平均径と称されるので粒子群の代表値としての平均径とまぎらわしいが、これはあくまで単一粒子の粒径である。 例) 2軸算術平均径, 3軸幾何平均径
2. $X=L^P$ の場合*	
	特定の粒子形状を仮定したときに導かれる幾何学的公式を用いて換算する。 例) 円相当径, 立方体相当径
3. X に L 以外の次元が含まれている場合	
	特定の粒子形状と、特定の物理的条件を仮定したときに導かれる物理学的公式を用いて換算する。 例) ストークスの沈降径

* 一般に $P=2$ か $P=3$ であるが、これ以外にたとえば $P=1$ などとも考えられないわけではない。1-2の平均径の多くは相当径として解釈しなおすことが可能である。

る。その結果、ある測定法によって粒度 $x[X]$ が測定され、その次元 $[X]$ が長さ $[L]$ ではなかったとすると、相当な無理をしてでも x を粒径 $D_p[L]$ に換算しなければならぬという強迫観念が生ずる。Table 5 はこのような場合に行なわれる換算法の分類である。 x が沈降速度である場合が非常に多いが、粒度を求める目的が沈降速度を知ることにあるような場合でさえも、 x を D_p に換算したがるのは笑止千万であり、そうしなければ報告書や論文が受理されないことがあるのは迷惑千万な話である。心ならずも x を D_p に換算したときは、測定された粒度 x から粒径 D_p への換算法——換算に用いた定数や係数をも含めての換算法を詳細に付記しておくべきであり、換算した結果がたまたま 5μ であったとしても、その粒子は決して直径 5μ の球ではないことを夢にも忘れてはならない。このことは $x \rightarrow D_p$ の換算のみならず、 $D_p \rightarrow x$ 、たとえば顕微鏡で粒子の“長さ”を測定して沈降速度を推定する場合にも言えることであり、 $x \rightarrow y$ 、すなわちある粒度 x から別の粒度 y に換算する場合には絶対に忘れてはならない大切な心得である。

1.4 粒度として何を選ぶべきか

長さでも面積でも、さらには重さでも粒度であり得るということになると、眼前に1個の粒子があったときに、どういう量をその粒子の粒度とすべきかという問題が発生する。粒度の選択は、粒子の大きさを測定し、表示する目的が何であるかを考え、その目的に適当した粒度を測定、表示するようにすべきであり、それが理想である。タンカーやトラックの大きさが積載可能な積荷の重さで表示され、大砲の大きさが発射される弾丸の大きさで表示されるのは、そうすることが大きさを表示する目的に最も適当しているからである。したがって、同一対象物であっても大きさを論じる目的が変れば大きさの表示法も変更した方がよいのである。モータの運搬だけを問題にしているような場合には、そのモータの馬力数よりも重さがわかっている方が大切なのであり、発泡プラスチックの運送会社にとっては、積載可能な数よりも荷台の容積が問題である。粒度についても全く同様であって、表面積が重要な意味を持つ触媒粒子の大きさは表面積を、水中での沈降速度が問題になるプロセスにおいてはその粒子の水中における沈降速度を、空気中での沈降速度が問題になるところではその粒子の空気中における沈降速度を、それぞれ粒度として選ぶべきものである。

ところが現実問題として、我々が利用できる粒度測定的手段には限度があり、本当に知りたい粒度を測定できない場合がある。むしろその方が一般的であって、測定手段、具体的には測定装置、の都合で粒度の種類を選定がなされてしまうのが実情である。これはある程度やむを得ない。しかしその際に忘れてはならないことは、自分が本当に必要としている粒度と、自分が測定している粒度とは別物である、別物であるかもしれぬということ。を絶えず想起することである。従来は粒子の沈降速度を粒度として採用し、製造工程を管理してきたとする。そしてそれが充分機能してきたとしても、製品の別の側面、従来は問題になっていなかったような性質を問題にしなければならなくなったとき、依然として製品粒度の管理が沈降速度の管理だけで充分だとはかぎらない。製品を使用する段階で問題になる粒度がたとえば表面積であったとしても、自動包装機械で包装する工程の成績に影響するのは別の意味での粒度かもしれないのである。

第1回への結言

粒度という量は、粉体関係者にとっては避けて通るわけにはいかないものであり、多少なりともそれらしきものを測定できるという意味から、粉体に關する貴重にして重要な情報である。それだけに、粒度や粒度測定を扱

った名著や良い解説も数多く出されているわけであるが、粒度に関する問題がすべて解決済であるとは思えないにもかかわらず、粒度というものをまるで温度とか質量とかのように非常に明確な概念であるかのごとき印象を与える記述が多く、粒度が無限に近い多くの側面を有する複雑な多面体であり、個々の測定や表示はこの多面体の側面図か投影図に過ぎないことを理解させる努力は必ずしも充分でないような気がする。

一読されて明らかなように、著者の議論は問題指摘と問題の換言に終始して解答をほとんど欠いている。しか

しながら、具体策を全く用意せずに行なわれる少数野党の政権批判も場合によっては有益であろうかと思うし、たとえば1.4後半の記述——記述自体はたとえ話の形にせざるを得なかったが——は、著者が実際に相談を受けて問題が解決した事例である。先入主を捨てて“粒度”を考えなおしてみることも無駄ではないと思われる。

編集者がこのような造反的拙論に対してさらに紙面を提供されるならばであるが、第2回には粉体の平均粒度について同じような立場から論じてみたい。

フンタイ・スリラー

「一寸きてくれないか、便所に変な焼け焦げがある」オリンピック開催も間近い2月の午後、物性講座のS先生が部屋へ入ってきた。顔が青い、すぐ前の便所に行ってみると一番奥の西洋式便所のフタの表と裏にかなりひどい焼け跡が残り、板壁の表面にススの跡がついている。便器の中には黒い長細い燃えかすが沢山浮いている。明らかにボヤがあった！時が時だけにひらめくものがあり、化学のT先生を呼んだ。「こりゃ油だな。ベンゼン類ならもっとススが多いし、アルコールなら水に比べて大したことはない筈だ」「しかし一体何のためにやったんだろう」3人交互に憂鬱な顔をみあわせる。「まさか放火じゃなろう。この真昼間に…」研究室の学生にきくと、11～12時に異様においがしたという。押っとり刀で駆けつけた事務長さんも“一部過激派”が念頭をはなれぬらしい。

帰宅してからも、教室主任、甚だユーウツである。しかし昼間人の出入りの多い便所で放火とはどうしても考えにくい。ザッと計算する。この階に50人、1日大小併せて1人平均3回、1人の平均滞留が2分とすると合計5時間になる。1日8時間に対し便所の空いてる時間は3時間。比例的に1分半位の空白である。同時に3人づつ交代したとしても空いてる時間は6分程度だ。ここ数分間に人の目に全くふれないで放火をやるのは確率的にかなり冒険が伴う。先ずは不可能であろう。

次に私の子供の推理である。「ものすごく沢山ウンコした人が紙を沢山使い、ウツカリその上に煙草の火を落したんだヨ。それが突然燃え上って慌ててフタしたら、フタの塗料に燃え移ったのサ」「ナルホド」それなら完全な失火だ。文字通り尻に火がついたわけで、本人は慌てたに違いない。時あたかも卒業論文の締切は近い。甚

だ象徴的でさえある。がマテヨ「そのタバコを落すのはムズかしいぜ。洋式便所に坐ってマタの間からタバコを捨てるには一寸ムリな恰好になる」この推理もカゲが薄くなった。

とすると意識的に何かを燃そうとしたのかな。それも深い意趣があったとは第1の推理から考えられない。すると、1人の男が便所に坐りこんでトモカク無想の状態になったとき、偶発的に何かを思いついたのかも知れぬ。明治の昔、東大の学生であった後年の大物理学者たちが数人集り、屁は燃えるかをめぐって議論百出。結局理論より実験に如かずとばかり、1人がシリを捲って母砲一発。今1人がマッチを近づけた処見事着火して実験は成功したが、シリを提供した男のそのあたりのジャングルに引火して大火傷をしたという涙ぐましい逸話がある。今やくだんの便所男、自分のウンチが燃えるかどうかを試そうとしたのだろうか。ヤニワに紙をガラガラと引出し高く盛り上げ、火をつけた。ウンチが燃えたかどうかは知らないが、火勢がつよくなりすぎ、異様な臭いが充満し、慌ててフタをしたが火勢あまって……。

しかし何でまたこんなアイデアが…と思う。卒論発表も間近か。データは出ない。ヤケクソになった学生が、クソでもヤケと思ったのだろうか。これは粉体の燃焼と爆発を研究しているM君の説である。いよいよ本当のフン体工学になった。ま、とにかくこの話、深刻でないことを祈る。何にせよ、口ならぬシリを拭いて知らん顔をしている犯人に、もし届出てくれたら心からお見舞を申そうと待ってるのだが、今の処現れていない。問題の便所のフタはフン体を塗りたくった色合いを残して、今日も訪れる人をギョツとさせている。(T.T.)

粉 粒 体 の 密 度 測 定

法政大学工学部

川 北 公 夫

池 田 正 明

1. ま え が き

粉体工学において、粒子密度は最も重要な特性値の一つである。粒子密度はそれ自体が重要な値であるばかりでなく、粒子の純度、生成条件、などを知るための品質管理の有効な方法でもある。また、空隙率、粒度、粉体現象の解析にも直接の影響をおよぼす。粒子密度は粉体の重量と体積が正確に測定できさえすれば、公式を書くのも気がひけるほどの簡単な割り算で算出できる。この計算で“分子にある項”の測定は化学天秤によっておどろくほどの正確さで測定できる。しかし、“母なるほう”の測定はとなると、これはまことに困難至極の業であって、これを正確に測定するために数々の方法が開発されてきた。ではこの体積測定がなぜに困難であるか？答は簡単である。粉粒体の形は初等幾何学の球や立方体などという規則的なものはまったくといってよいほどなく、中谷宇吉郎先生のあのさまざまな美しい雪の結晶どころではない複雑怪奇な形をしているからである。このことだけなら“アルキメデスの風呂”の方法で測定すればよいのであるが（実際、液浸法はこの域を脱していない。）、粒子には空隙あり、亀裂あり、ひどいものになると空気を体内にはらんでいるものもある。このことが体積測定を困難にしている。

真密度の測定は粉体の体積をいかに正確に測定すべきであるかという観点にもとづいて研究されてきた。以下、測定法を示してそれらの問題点について述べる。

2. 密度と比重量の定義

物質の密度 ρ_p は単位体積あたりの質量のことであり、絶対単位では g/cm^3 あるいは kg/m^3 で表わす。一方、質量および重力をとともに基本単位に含めた工学単位系では単位体積あたりの重量を比重量 γ_s といい、重力単位では g/cm^3 あるいは kg/m^3 で表わしている。両者の間には $\gamma_s = \rho_p g$ の関係がある。すなわち γ_s を重力単位 kg/cm^3 で表わした数値は、 ρ_p を絶対単位

kg/m^3 で表わした数値と同等である。比重は物質の重量と、その物質と同体積の標準液の重量との比であり無次元量である。

このときの比重値は g/cm^3 で表わした密度の値にほぼ一致している。したがって（実用上は）化学工学の単位のとりかたに従って比重と密度を同じ値として扱ってもさしつかえない。

3. 粒子密度測定法の分類

粒子密度測定の基本となっているのは体積測定であり、粉体体積を液体で置換する方法と気体で置換する方法に大別できる。しかし厳密な意味において、測定方法を分類することは困難であるが、以下筆者なりに分類すると

1. 浮遊法（均衡法）
2. 浮力法
3. 液浸法
4. 気体容積法
5. 遠心分離法
6. その他

以上の諸方法によって測定して得られた密度は、一般には密度とはいっているが、実は粒子密度であり、真の密度 ρ_s と粒子密度 ρ_p とかさ密度 ρ_B との間には一般に次の関係がある。

$$\rho_s \geq \rho_p > \rho_B$$

ρ_s は空隙ゼロ、粉体の実質体積、すなわち固体としての密度である。 ρ_p をどこまで ρ_s に近づけるかは、粉体粒子のそれ自体の空隙をどうしてゼロにするか、あるいはそれを液体でどう完全にうめるか、という問題と一致する。このどとが完全に行なわれて、測定値が得られた場合には（溶解その他の界面化学的現象が無いということももちろん前提条件であるが）、

$$\rho_s = \rho_p$$

である。なお、かさ密度については川北の総説（たとえば、粉体と工業、3, No. 5, 1 (1971)）を参照されたい。

3.1 浮遊法 (均衡法)

現在、鉱石や宝石の密度測定に使用されている方法で、粒子の大きいもの、または固体が少量しかない場合などは便利である。すなわち、粉体を液体中に入れた時、両者の比重が等しければ、粒子は液体中のどの位置にも静止するはずである。この均衡から求める方法で、直感的である。測定粒子を液相中に入れて、粒子が沈むならばその液体に比重の大きな液体を加え比重を増加させ、均衡を確認する。粒子が浮上すれば逆の操作を行えばよい。ただし、粒子表面の気泡の付着を防止するために攪拌するか、容器を水流ポンプにつないで減圧するかしなければならない。使用液として、ヨウ化メチレン (CH_2I_2 比重 3.3) とベンゼン (0.9) の混合液、ブromホルム (CHBr_3 , 比重 2.9) とキシレン (比重 0.86) の混合液、有機物粉体にはヨウ化水銀カリウム (K_2HgI_4) の水溶液を用いる。ヨウ化水銀カリウムは塩化第二水銀にヨウ化カリウム水溶液を、いったん析出した赤色のヨウ化水銀が溶解するまで加えてつくる。その濃水溶液は比重約 3.2 である。

浮遊法の利点は粉体の体積が測定の際に、関係してこないということである。この方法によれば気相中に超音波などによって均一に分散させ、その状態の均衡から密度を求める可能性もある。

3.2 浮力法

この方法は最も簡単な方法である。粒子の気相中、液相中での質量はそれぞれ m_s , m_s' とすると、液相中で粒子が受ける浮力: f は

$$f = (m_s - m_s')g$$

また、密度 ρ_l の液相中で体積 V_s の粒子が受ける浮力は

$$f = V_s \rho_l g$$

で表わされる。したがって粒子の体積は

$$V_s = (m_s - m_s') / \rho_l$$

となり、粒子の密度 ρ_p は

$$\rho_p = m_s / V_s$$

で計算される。しかし、粒子は密度 ρ_g の気相中で浮力を受けるからそれを補正すると

$$\rho_p = \rho_g + \frac{m_s(\rho_l - \rho_g)}{m_s - m_s'}$$

となる。Fig. 1 のような比重びんを使用する方法が果吊法でこれについては、三輪氏の総説を参照された (13, 15, 16)。

人造研削機の比重試験法 (JISR-6125) が果吊法を採用している。ここで

比重びんの重量 : (W_0)

(比重びん)+(試料) : (W_s)

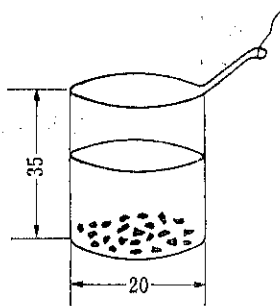


Fig. 1 果吊法に使用される比重びん

(比重びん)+(試料)[液相中での重量] : $W_{s'l}$
とすると粒子の比重量 r_s は次式によって算出できる。

$$r_s = \frac{\rho_s(W_s - W_0)}{(W_s - W_0) - (W_{s'l} - W_{0l})}$$

以上、浮力法について簡単に述べたがこの方法でも脱気の方法が問題となり、攪拌、湯煎、超音波分散などを行なうべきである。

3.3 液浸法 (比重びん法)

この方法は Fig. 2 に示したような比重びんを用いて粉体体積を液体置換することから液浸法 (液体置換法) と言われる。(この意味においては上記の果吊法も液浸法である。)

比重びん法の測定はルシャテリエ比重びん法以外では直接体積を測定しないから重量のみの測定で、脱気をかなりの精度で行なえば、正確な粒子密度が得られる。測定方法は 10~50 cc の容積の比重びんの約 1/2 ほど粉粒体を入れ、10 mm Hg 以下の減圧下で十分脱気する。この際段階的に減圧してゆくのがよく最終圧力は 3 mm Hg ぐらいが適当である。

比重びんの重量 : W_a

(比重びん)+(粉体) : W_b

(比重びん)+(粉体)+(液体) : W_c

(比重びん)+(液体) : W_d

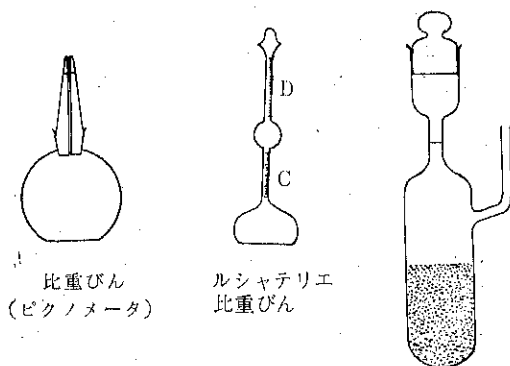


Fig. 2 比重びんのいろいろ

の測定値を得たなら粒子の密度は次式で算出できる。
(一般に比重, くわしくは定義参照)

$$d_p = \frac{W_b - W_a}{W_b + W_d - W_a - W_c} d_l$$

ここで d_l は液体の比重である。

また, ルシヤテリエ比重びんのように直接粉体体積を測定する方法もある。Fig. 2 中央図のように体積目盛を刻んだ比重びんを用い, 最初に液を目盛Cの中央まで入れて恒温槽の中で一定の温度に保ち, その体積 V_1 を測定する。次に質量 m_s の粉粒体をびんに入れ, 減圧, 振動により脱気し, 恒温槽中で一定温度にした後, その体積 V_2 を測定する。この測定値によって粒子の密度 ρ_p は次式で算出できる。

$$\rho_p = m_s / (V_2 - V_1)$$

液浸法では脱気, つまり, 粉粒体および粒子のすみずみにまで液が浸透することが必要であり, この観点から種々の液浸法の測定方法が研究されてきた。湯煎, 減圧, 超音波分散, 界面活性剤の利用, これらの方法の併用などがある。Deeg, Hahn は液浸法の原理的考察から加熱温度を高くするより, 減圧度を上げた方が有効であることを示している。また, 加熱することは粉粒体に化学的变化をおこさせる原因にもなるので好ましくない。この他の方法として, 真空中に引いた後, 水蒸気を導入し粉体に水分を凝縮させて細孔に水を浸透させる方法もある。また, 水銀を使用することによって個体との接触角を 140° とし, 1 気圧での水銀の浸入できる細孔が 15μ 以上の直径となるので, それ以下の細孔を無視することによって密度を測定する方法もある。液浸法では媒液が粉体に濡れにくかったり, 溶かすことは不適当なので, 粉

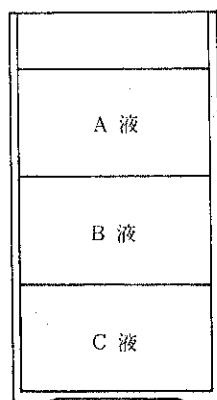


Fig. 3 相互溶解のない液層による粉体のぬれテスト
(例 A: ベンゼン
B: 水
C: 四塩化炭素)

粒体の性質と媒液を比較検討して使用しなければならない。また, 粉粒体が媒液に浮かぶようなことがあると比重びんでは測定できないので Fig. 3 のように互いに混じりあうことのない密度の異なる液をいくつかの相に分かれるように入れ, その中に粉体を入れ, どの位置に静止するかによって液の密度から粉粒体のぬれの模様や密度をあらかじめ知っておく測定準備として有効な手段である。

3.4 気体容積法

液浸法は粉体の体積を液体によって置換して測定するが, この液体のかわりに気体を用いる気体置換法を気体容積法と言う。前述の液浸法による液体置換法はしばしば系統的な誤差をまねき, このことは粒子混合物中の気泡のため液の不完全な浸透によっておこるものであった。このような場合, 脱気の心配のない気体容積法は便利な方法である。この方法の原理は閉じた容器内にある気体の等温的状态変化を利用したものである。空気を使用することはこのように脱気の心配がないということ, 粉粒体に特に化学的变化をおこさないということなどの利点があるが, 空気が粉粒体に吸着吸収される問題がある。この問題を解決するためにヘリウムを用いる。ヘリウムは分子が非常に小さくて, 空孔に完全に侵入し, ほとんど固体に吸着されない。このために粉体の空隙率, 平均空孔径などの微細構造の研究手段に用いられるようになった。

このように気体容積法は測定も比較的簡単ではあるが液浸法ほどには再現性のよい値を得ることができない。

(表-1)

気体容積測定法にはいろいろな方法があり, 大別すると表-2 のようになる。

圧力比較法として有名なものに Beckman 930 Air Comarison Pycnometer がある。これは Fig. 4 に示したような二つのシリンダを有し, 粉体の真の体積をピ

表-1 粉体の特性概論

試料	気体容積法		液浸法 (キシロール)
	空気	ヘリウム	
SiO ($1,000\mu$)	3.205 (0.010)	3.226 (0.024)	3.216 (0.005)
ガラス球 (720μ)	2.506 (0.035)	2.512 (0.008)	2.490 (—)
Sintered Morundum	3.582 (0.049)	3.644 (0.022)	3.603 (0.019)
重質タンカル (6μ)	2.914 (0.026)	2.750 (0.017)	2.678 (0.013)
亜鉛華 (0.5μ)	>7.2	5.7 (0.241)	5.626 (0.050)

(カッコ内は標準偏差)

表-2

原 理	容積変化	操 作	測 定
	定容積法	圧 縮	圧 力
		膨 張	圧 力
	不定容積法	圧 縮	容 積
		膨 張	圧力容積 容 積
圧力比較	(ベックマン)		

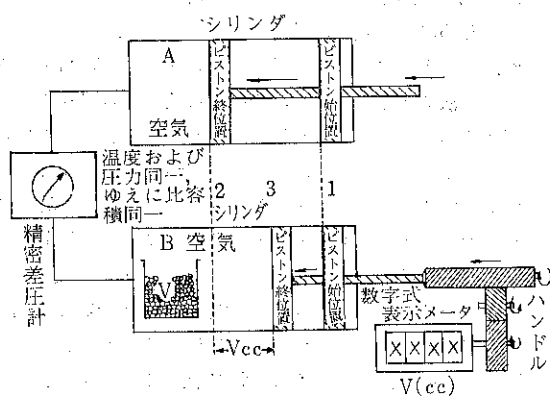


Fig. 4 空気圧縮式真密度測定器の原理図 (Beckman 980 Air Comparison Pycnometer)

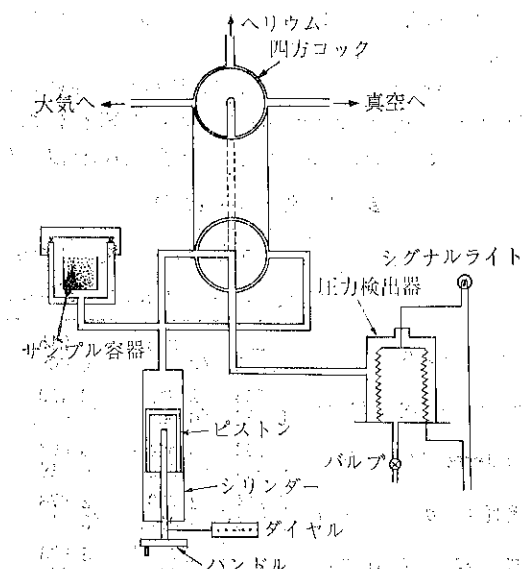


Fig. 5 ヘリウムエアピクノメーターの原理図 (島津)

ストンの移動量から求めるもので、ヘリウムガスの使用も可能である。この測定器はハンドル操作に多少の技術を要するが、測定値の再現性もよく、最も簡便な測定器でもある。また、定容積圧縮法ではマイクロメリテクス社のヘリウムエアピクノメーターがあり島津からでている。原理図を Fig. 5 に示す。定容積圧縮および膨張の両方を行ない、ヘリウムを使用できる装置を三輪氏が改良している^{3,18)}。(筒井理化学器械製)。

3.5 遠心分離法

媒液を使用する他の粒子の密度測定法に遠心分離法がある。この方法は適当な媒液の比重を変えた数種の混合液、たとえば四塩化炭素と流動パラフィンの混合率を変えて、数種類の混合液をつくり、それぞれの混合液に等量の試料を投入して遠心分離を行ない、沈殿量から求める。沈殿容量(v)と混合液の密度(S)の関係を Fig. 6 の(A)に示してある。この図から S と $S+dS$ 間の沈殿容量 dv とすれば、重量は $S'dv$ になる。粉体の全重量は、

$$\int_0^{v_t} S dv$$

で、平均粒子密度 $\bar{\rho}_p$ は、

$$\bar{\rho}_p = \frac{\int_0^{v_t} S dv}{v_t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

になる。また Fig. 6 のB図のように混合液の比容積 v と沈殿重量との関係では、混合液中の粉体の全容量が、

$$\int_0^{G_t} v' dg$$

で、(B)図の斜線部分になり、粉体の平均の比容積(v')は、

$$\bar{v}' = \frac{\int_0^{G_t} v' dg}{G_t} \quad \dots\dots\dots (2)$$

となり、 $\bar{\rho}_p$ は、

$$\bar{\rho}_p = \frac{G_t}{\int_0^{G_t} v' dg} \quad \dots\dots\dots (3)$$

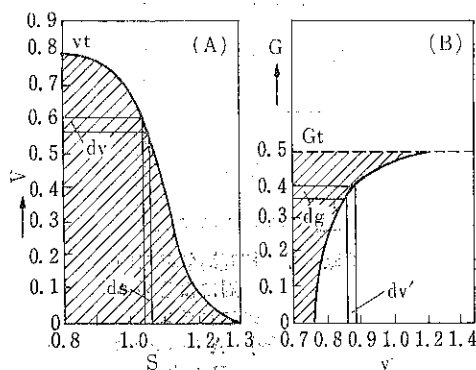


Fig. 6 混合液中の粉体の沈殿容量と重量

として求められる。以上が遠心分離法の概要である。この方法は気泡を持つ粒子に対して有利であるばかりでなく、密度分布を得るためにより利点をもっている。

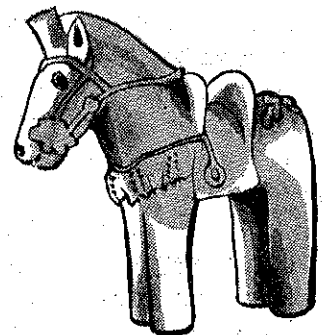
4. あとがき

以上、粉粒体の粒子密度測定法について代表的な測定法を示し述べた。測定値を得て問題となることは、再現性のよい方法での値がかならずしも真の密度であると結論できないことである。つまり、ある程度バラツキのある測定値の半数が真の密度（神様だけが知っている粉粒体の真密度）である群と、バラツキがほとんどなく、しかしその値が真の密度よりある程度かたよった群がある時、科学者ならば神に語りかけようとする。しかし粉体工学者は後者の群を正確な測定値として採用するであろう。この“再現性のある測定値”の中に重要な意味を見出すのである。このことから、我々粉体工学者が粉粒体についての測定を行なう際には、測定値の変動の幅を狭くするように努力すべきである。また、どの測定法を使用するかということは強制されるべきものではなく、現代社会というある一つの系にある“価値観の多様性”という基準にもとづいて選定すればよい。ただ、ストークスの法則を使った粒度測定の時には、同じ媒液を使用する液浸法で、充填体の空隙率の計算などでは気体容量法を……。これが筆者の持論である。一つの測定値でもって他の特性値を算出するには、基準となる測定値が測定されたのと同じ条件でのみの正確さが意味をもつのである。

筆者はここで簡単なものほどむづかしいという一種の哲理を痛感する。

引用文献

- 1) 川北公夫・種谷真一：概論粉体工学。プラント工学社
- 2) 鮫島實三郎：物理化学実験法，p. 154～p. 156。裳華房。
- 3) 化学工学協会編：化学工学の進歩5 粉体装置工学，p. 15～p. 16，日刊工業新聞社（1971）
- 4) 井伊谷鋼一：集塵装置，p. 2～p. 5，日刊工業新聞社。
- 5) 狩野 武：粉粒体輸送装置，p. 14～p. 17，日刊工業新聞社。
- 6) JIS. Z-8807 (1962) 固体比重測定法。
- 7) JIS R-6125 人造研削材の比重試験方法。
- 8) J. Res. Assoc. Powder Tech. vol 6, No. 2.
- 9) Verhoog: Neth. Milk & Dairy J., 17, 234 (1963).
- 10) 木村他：化学工学，21, 3, p. 178 (1957).
- 11) 手島，山形：資源技術試験所報告，46号。
- 12) 三輪茂雄：材料，19, [200] 476 (1970).
- 13) 三輪茂雄訳：“液浸法による粉体の密度測定”：粉体工学研究会資料 No. 251.
- 14) 三輪茂雄，永岡一義共訳：“微粉体の固体体積測定用体積計の開発” 粉体工学研究会資料 No. 252.
- 15) 三輪茂雄，吉田富貴子共訳：“粉体の特性化を便利にするための簡易空気式ピクノメーター” 粉体工学研究会資料 No. 253.
- 16) 三輪茂雄訳：“粉体真比重測定装置” 粉体工学研究会資料，No. 254.
- 17) 三輪茂雄，田坂和彦共訳：“ヘリウムを用いた固体密度測定装置” 粉体工学研究会資料，No. 256.



石炭粉砕過程

Coal Breakage Processes

S. R. Broadbent & T. G. Callcott

抄訳 九州工業大学

上 滝 具 貞

富 田 侑 嗣

まえがき

本論文は上記主題目の下で J. Inst. Fuel 誌に I (1956, 29, 524), II (1956, 29, 528), III (1957, 30, 13), IV (1957, 30, 18), V (1957, 30, 21) の5部に分けて発表された粉砕の行列解析法を短縮化して紹介するものである。

第I部 石炭粉砕過程の新しい解析

1. 緒 論

本報では従来の石炭粉砕過程の研究を考察し、後続の論文で用いる新しい解析法を要約する。

2. 石炭粉砕概論

粉砕過程とは粉砕によってある粒子集合の部分または全体の粒度を変える過程と定義できる。粉砕過程の解析は個々の粒子の粉砕性の研究から出発すべきであるが集合での粒子の挙動をうまく記述できないこと、個々の粒子の研究は理想化された模型についてなされているので実際の石炭粒子への適用には大胆な仮定を必要とすることのため、多くの研究は粉砕過程を比表面積等の変化を消費エネルギーに関係づけ RITTINGER の仮説との一致をうたっている。確かに両者の間には相関があるが石炭粉砕では正確な比表面積の測定と粉砕の消費エネルギーの決定が難しいためこの仮説は役に立たない。また RITTINGER らの方法は問題を単純化しすぎている。実際の粉砕過程は粒度分布全体に亘って変化を及ぼすものであり、粉砕後の産物の粒度分布に規則性があり粒砕機構と関連を持っているので、研究方法は統計的になされるべきである。その場合問題は適当なパラメータで集合を特性表示し、粉砕過程によるパラメータの変化の仕方の研究に帰着する。産物の粒度分布の規則性に関して種々の法則

が提唱されていて一定の有用性を持っているが、(i) 法則に含まれる関数の取扱に適当な手法が与えられていない、(ii) 末粉砕の粗粒物質の記述の問題、(iii) 供給が特定の粒度分布を有するという仮定に欠陥があり、粉砕の効果と粉砕機や被粉砕物の性質等との関係が明確にされていない。

3. 選択と粉砕の概念、行列法による解析

著者らは広範囲の種々の機械による粉砕を一つの関数によって記述できることを見出し、この関数を選択の概念と関連づけて使っている。本解析での選択は残分と細粒部分の概念に代わるものでこれによって残分記述の困難さが除去されている。更に粒度分布をベクトルで、粉砕、分級過程を行列で記述する。ベクトル近似は関数の代用であり、行列解析の精度は使用データと同程度でこの方法は石炭粉砕過程の記述に十分適している。以下の論文で用いる主要な概念を要約しておく。

(i) 粒子集合の粒度分布はベクトルで表わし、ベクトルの成分はフルイ分析等の粒度分布から求める。

(ii) 粉砕等による粒度分布の変化はベクトルと行列の積で表現され、その結果が産物の粒度分布ベクトルとなる。

(iii) 産物の粒度分布は石炭の種類や粉砕方法に独立とされるが、最初の粒子粒度が尺度係数として入っている。産物の粒度分布は次の粉砕関数によって記述される。

$$B(x, y) = \{1 - \exp(-x/y)\} / \{1 - \exp(-1)\} \quad (1)$$

これは粒度 y の粒子が粉砕される時、産物の粒度が x 以下となるものの重量割合を示す。

(iv) 粒子集合が粉砕される時一部分だけが粉砕される。この時粉砕過程は各粒度粒子の一部を「選択」するといひ、選択された粒子だけが $B(x, y)$ に従って粉砕さ

れる。石炭と粉砕過程間の相違は選択関数によって説明される。

(v) 最も簡単な粉砕過程の π 粉砕は粒度に独立に割合 π だけが粉砕に選択され、 $(1-\pi)$ は未粉砕で過程を通過するもので、パラメータ π によって過程が完全に記述される。

(vi) 機械の粉砕ゾーンでの取扱いや再粉砕の問題に対しては、供給のうち π が粉砕ゾーンを出る前に κ 回粒度に独立に粉砕を経験し、残りの $(1-\pi)$ は未粉砕で通過するという π 、 κ 粉砕過程が利用できる。必要とあれば数個のパラメータで産物を予測する数学的模型を作って、更に複雑な過程を考えることも可能である。

第Ⅱ部 粉砕の行列表示

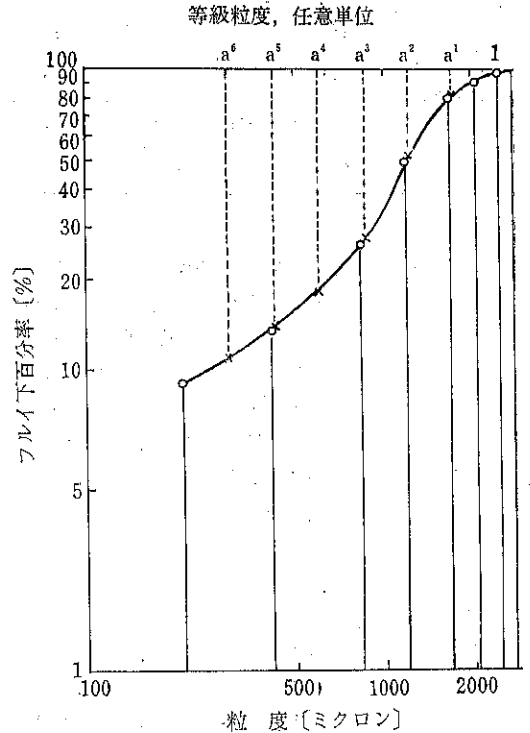
1. 緒 論

本論文では π 粉砕を中心にしてベクトルや行列の使用法、 π のようなパラメータの評価方法について述べる。作用する粉砕過程の形は供給と産物の側での粒度分布が既知であるとして、このデータから評価される。

2. 粒 度 分 布

本報では粒度をフルイ分析によって定義する。フルイ分析は等級粒度（本研究では等比数列）で行なうと便利である。分析結果を粒度分布や累積分布で対数グラフ上に滑らかな曲線で表示する（図1）。粒度分布のベクトル表示は、まず粒度の単位となる最大粒度を定め等級粒度比（本報では公比） a とベクトルの項数 n を決定して、累積ベクトルの要素はフルイ分析曲線と等級粒度との交点の高さとして定義することによりなされる。頻度ベクトルは累積ベクトル要素の相隣れる組の差を要素とする。フルイ下*を最小粒度以下の割合とすれば、これは頻度ベクトルの要素ではないが100%から頻度ベクト

ルの要素の総和を減じたものになっている。フルイ下は括弧をつけて表わすことにする。表1は図1の結果のベクトルへの変換を示す。頻度ベクトルは $n=6$ の要素、累積ベクトルは $n+1=7$ の要素から成る。試料の最大粒度は使用した最大フルイ目の2411 μ であり、 a は $2^{-\frac{1}{6}}$ とした。このようにして粒度分布は列ベクトル f で表わ



○ フルイによって得た点

× ベクトルに対して求めた点

図1 フルイ分析のベクトル変換

表1 フルイ分析のベクトル変換

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
フルイ分析			ベクトル解析			
B.S. フルイ	公称口径 (ミクロン)	フルイ下 百分率	等級粒度		フルイ下 百分率 (累積ベクトル)	百分率 (頻度ベクトル)
			任意単位	ミクロン		
7	2411	100	1	2411	100	19
8	2057	92	a	1705	81	31
10	1676	80	a ²	1206	50	23
14	1204	50	a ³	852	27	9
18	853	27	a ⁴	603	18	5
36	422	13	a ⁵	426	13	2
72	211	9	a ⁶	301	11	(11)

* undersize

表2. 仮想粉砕過程の粒度分析

(表中の数字は初めの供給の百分率)

		被 粉 砕 物 の 割 合				粉砕後の 合 計	末粉砕物 の 割 合	粉砕過程後 の 総 合 計
		粉砕前の粒度等級における百分率						
		1-a	a-a ²	a ² -a ³	a ³ -0 (フルイ下)			
粉砕後の粒 度等級にお ける百分率	1-a	6	0	0	(0)	6	15	21
	a-a ²	3	4	0	(0)	7	10	17
	a ² -a ³	3	4	2	(0)	9	5	14
	a ³ -0(フルイ下)	(3)	(2)	(3)	(20)	(28)	(20)	(48)
合 計		15	10	5	(20)	50	50	100

ずることができる。aとnを適当に選べば元のフルイ分析と同程度の情報を含ませることができる。実際にはn=6~9が適当である。ある過程への供給の全重量をFとすれば各粒度範囲の重量はFfでありこれがフルイ分析で得られるものである。粉砕等による粒度分布の変化は「供給のうち割合でπだけが粒度に独立に選択される」とか「粉砕粒子は新しい粒子集合になり、その粒度分布関数は既知である」の法則の下で生ずると仮定される。この法則のベクトル形の粒度分布への作用が行列とベクトルの積で表現される。

3. 粒度分布の変化

3要素ベクトルを使って説明する。fは列ベクトルであるが行間を節約するため便宜的にf={30, 20, 10}と記す。最大粒度は既知とする。供給の半分が粉砕に選択され残りは未粉砕で通過する過程(π=1/2)を考える。表2にその結果を示す。第1列は粉砕前1とaの粒度等級にあった15%の粉砕結果を示す。零は粉砕により粒度が増加しないことを示す。粉砕前の20%のフルイ下はそのままで、結局粉砕後の粒度分布は{6, 7, 9}となる。フルイ下は50-(6+7+9)=28%で、全粉砕過程の結果は{21, 17, 14}となる。表3は表2の各項をその列の合計で除したもので、その第1列は第1等級粒度にあったものが0.4, 0.2, 0.2の割合で各粒度等級に分布させら

れたことを示し、フルイ下は1-(0.4+0.2+0.2)=0.2である。表3と供給{15, 10, 5}が与えられれば表2が得られる。同じ粉砕法則が成り立つとすれば粉砕過程の効果が推定できることを意味する。表3の成分を行列 $B = \begin{pmatrix} 0.4 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 \end{pmatrix}$ によって表わす。産物の粒度分布はBに粉砕に選択される供給の粒度分布を乗ずることにより得られる。従って{21, 17, 14}の供給がこの粉砕過程に入ると半分の{10.5, 8.5, 7}が選択されて上述の法則で粉砕されその産物は次のようになる。

$$\begin{pmatrix} 0.4 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 10.5 \\ 8.5 \\ 7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4.2 \\ 5.5 \\ 8.3 \end{pmatrix}$$

全粉砕過程の結果は{4.2, 5.5, 8.3}+{10.5, 8.5, 7}={14.7, 14.0, 15.3}となる。表4はこれを示している。

次に供給が粉砕に選択される表現を求める。単位行列Iを導入するとπ粉砕過程は次のように表現される。

$$B\pi I f + (1-\pi) I f = (\pi B + (1-\pi) I) f$$

上式は一周期の粉砕過程の産物を示すベクトルである。再度同じ過程に供給すればその結果の産物は次式となる。

$$(\pi B + (1-\pi) I)(\pi B + (1-\pi) I) f \\ = (\pi B + (1-\pi) I)^2 f$$

表2と表4はこの関係になっており、f={30, 20, 10}, $(\pi B + (1-\pi) I) = \begin{pmatrix} 0.7 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.7 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.7 \end{pmatrix}$ で $(\pi B + (1-\pi) I)^2 f = \{21, 17, 14\}$, $(\pi B + (1-\pi) I)^2 f = \{14.7, 14.0, 15.3\}$ となることが分る。

表3 表2から導かれる粉砕法則

		粉砕前の粒度等級の割合		
		1-a	a-a ²	a ² -a ³
粉砕後の粒 度等級 の 割 合	1-a	0.4	0	0
	a-a ²	0.2	0.4	0
	a ² -a ³	0.2	0.4	0.4

表4 異なった供給に関する同じ粉砕過程の粒度解析

(表中の数字は初めの供給の百分率である)

		被 粉 砕 物 の 割 合					未粉碎物 の 割 合	粉碎過程後 の 総 合 計
		粉 砕 前 の 粒 度 等 級 の 百 分 率				粉砕後の 合 計		
		1-a	a-a ²	a ² -a ³	a ³ -0 (フルイ下)			
粉碎後の 粒度等級 の 百分率	1-a	4.2	0	0	(0)	4.2	10.5	14.7
	a-a ²	2.1	3.4	0	(0)	5.5	8.7	14.0
	a ² -a ³	2.1	3.4	2.8	(0)	8.3	7.0	15.3
	a ³ -0(フルイ F)	(2.1)	(1.7)	(4.2)	(24.0)	(32.0)	(24.0)	(56.0)
合 計		10.5	8.5	7.0	(24.0)	50.0	50.0	100.0

4. 粉砕関数と選択関数

粉砕確率の概念は、EPSTEIN* による、すなわち粒度Yの粒子がある過程を通過する時、粉砕される確率はYの関数S(y)によって与えられ、粒度Yの粒子のうちS(y)が粉砕に選択されるという。Yの粒子が粉砕される時の粉砕法則をB(x,y)とする。ここではすべての石炭はすべての粉砕過程で同一の法則で粉砕されるとし、石炭と機械の相違は選択の相違で各種粒子粒度の産物間の相違は初めの粒度との比の寸法係数によって示す。粉砕行列Bの要素であるB(x,y)は(1)で与えられる。等級粒度比aを使って1を最大粒度とする時等級 $a^r \sim a^{r+1}$ の間の代表粒子の粒度を $y = a^{r+\frac{1}{2}}$ としこれがB(x,y)に従って粉砕されるとする。表5Aは $a^{r+\frac{1}{2}}$ 粒子の産物を示す。従って $a^{\frac{1}{2}}$ 粒子の粉砕の産物は等級1~a, $a \sim a^2$ 等に

表5A 粒度 $a^{r+\frac{1}{2}}$ ($r=0.1, \dots, n-1$)の粉砕産物：累積分布

粒 度 x	フルイ下の割合 すなわち B(x, $a^{r+\frac{1}{2}}$)
a^r	1
$a^{r+\frac{1}{2}}$	1
a^{r+1}	$[1 - \exp(-a^{\frac{1}{2}})] / [1 - \exp(-1)]$
a^{r+2}	$[1 - \exp(-a^{\frac{3}{2}})] / [1 - \exp(-1)]$
$\vdots$	$\vdots$
a^{r+n-1}	$[1 - \exp(-a^{\frac{2n-3}{2}})] / [1 - \exp(-1)]$
a^{r+n}	$[1 - \exp(-a^{\frac{2n-1}{2}})] / [1 - \exp(-1)]$
0	0

表5B 粒度 $a^{r+\frac{1}{2}}$ ($r=0.1, \dots, n-1$)の粒子の粉砕産物：頻度分布

等 級	等級範囲の産物の割合	記号
$a^r \rightarrow a^{r+1}$	$[\exp(-a^{\frac{1}{2}}) - \exp(-1)] / [1 - \exp(-1)]$	b_1
$a^{r+1} \rightarrow a^{r+2}$	$[\exp(-a^{\frac{3}{2}}) - \exp(-a^{\frac{1}{2}})] / [1 - \exp(-1)]$	b_2
...	...	...
$a^{r+n-1} \rightarrow a^{r+n}$	$[\exp(-a^{\frac{2n-1}{2}}) - \exp(-a^{\frac{2n-3}{2}})] / [1 - \exp(-1)]$	b_n
$a^{r+n} \rightarrow 0$	$[1 - \exp(-a^{\frac{2n-1}{2}})] / [1 - \exp(-1)]$	b_{n+1}

b_1, b_2 等の割合で分布され、aの数値が決まれば表5Bから b_1 等は求まる。 b_{n+1} は $1 - (b_1 + b_2 + \dots + b_n)$ である。Bのi行j列要素は粉砕前j番目の粒度等級の粒子が粉砕後i番目の等級になる割合を示し、第1列は1~aにあった代表粒子の各等級間への分布 $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ を示し、この時のフルイ下(a^n 以下)は b_{n+1} である。同様に $a \sim a^2$ の代表粒子は $\{0, b_1, b_2, \dots, b_{n-1}\}$ でフルイ下は $b_n + b_{n+1}$ である。このようにしてBは次のような $b_1, b_2, \dots, b_n$ のn個の階段行列になっている。

$$B = \begin{pmatrix} b_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ b_2 & b_1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_n & b_{n-1} & b_{n-2} & \dots & b_1 \end{pmatrix}$$

選択関数も行列で表わせば最も簡単なものは πI であ

* EPSTEIN, B., Ind. Engng. Chem., 1948, 40, 2289.

る。一般的には対角上に $s_1, s_2, \dots, s_n$ が入り他が零の行列であり、 s_j は j 番目の粒度等級 $a^{j-1} \sim a^j$ が選択される割合を示す。この場合供給から粉砕に選択されるものは

$$Sf = \begin{pmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & s_2 & & \\ 0 & 0 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & s_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_1 f_1 \\ s_2 f_2 \\ \vdots \\ s_n f_n \end{pmatrix}$$

で $(I - S)f$ が未粉砕の粒度分布となる。選択関数は普通前もって得られた実験結果から評価される。

5. フルイ下の計算

Bf の計算で n 要素の産物 P を得る。産物のフルイ下は 1 から P の要素の総和を引いたものになる。又は供給で第 1 粒度等級にあったものがフルイ下になるのは $b_n + b_{n+1}$ 等であり一方供給でフルイ下のものは産物でもフルイ下であるのでフルイ下に対するベクトルが B から作られ、その要素は $b_{n+1}, b_n + b_{n+1}, \dots, b_2 + \dots + b_n + b_{n+1}$ となる。従ってフルイ下はこのベクトルと f の内積に f_{n+1} を加えて得ることができる。計算ではこの二つの方法を使うとよい。 B と S による粉砕過程でのフルイ下はフルイ下ベクトルと Sf の内積に f_{n+1} を加えたものになる。

6. 粉砕される粒子の割合の計算

粉砕過程から供給分布 f 、産物分布 p を得、粉砕行列 B は既知で階段行列であるとし、粉砕過程を π 粉砕とした時の π の評価法を述べる。過程を表わすベクトル式は

$$(\pi B + (1 - \pi) I) f = p \quad (2)$$

$$\text{又は } (p - f) - \pi(B - I)f = 0 \quad (3)$$

となり n 個の一次式を示す。この過程によるフルイ下は Bf でのフルイ下を β_{n+1} と書けば次のようになる。

$$(p_{n+1} - f_{n+1}) - \pi \beta_{n+1} = 0 \quad (4)$$

(3), (4) から π が求められる。両式を次のように書く。

$$\alpha - \pi \beta = 0 \quad (5)$$

α, β は $(n+1)$ 要素ベクトルで、 α の i 番目要素 α_i

は $p_i - f_i$ で β の最初の n 要素 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ は $(B - I)f$ の要素と同じで $(n+1)$ 要素は β_{n+1} である。(5) は一般に唯一解を持たないが、実測値と計算値をよく合せる π は次のように最小二乗法で求まる。 α と β の要素を下の方から累積合計した新しいベクトルを α', β' とする。例えば

$$\alpha' = \{0, \alpha_2 + \dots + \alpha_{n+1}, \dots, \alpha_n + \alpha_{n+1}, \alpha_{n+1}\}$$

この時(5)の解は次式で求められる。

$$\pi = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} \alpha'_i \beta'_i}{\sum_{i=1}^{n+1} \beta_i'^2} \quad (6)$$

表 6 に計算例を示す。第 7 列の最下段の要素 β_{n+1} は β の要素の総和が零になる条件又はフルイ下ベクトルを使って $(0.61 \times 0.30) + (0.76 \times 0.20) + (0.92 \times 0.10) + 0.40$

から求まる。これから $\sum_{i=1}^{n+1} \alpha'_i \beta'_i = 0.2191$, $\sum_{i=1}^{n+1} \beta_i'^2 = 0.428249$ が求まり(6)より $\pi = 0.51$ となる。第 11 列と 12 列に産物の累積ベクトルの実測値と計算値を示しておりよく一致している。表 6 の過程は供給の 51% が B に従って粉砕され 49% が未粉砕で通過することを意味し、 B と $\pi = 0.51$ によってこの過程が完全に特性表示されることが分る。

7. 結論と展望

本論文を要約すると次のようになる。

- (i) 粒度分布のベクトル表示のため、粒度範囲とベクトルの項数 n を決定し、等級粒度比 a を決める。
- (ii) 選択行列は $S = \text{diag}\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ で表わす。要素 $s_1, \dots, s_n$ は過程やここで扱っている石炭を記述している。
- (iii) 石炭粉砕では粉砕は階段行列 B で表わし、その要素 $b_1, b_2, \dots, b_n$ は不変とした。
- (iv) 供給粒度分布 f に対する選択粉砕過程は次式で表わす。

$$(B + (I - S)f)$$
- (v) π 粉砕過程の結果は次式で記述される。

$$(\pi B + (1 - \pi) I)f$$

表 6 π の計算例

(1) 等級 粒度	(2) 粉砕行列 の 第 1 列	(3) フルイ下 の ベクトル	(4) 供給頻度 ベクトル	(5) 産物頻度 ベクトル	(6) α	(7) β	(8) α'	(9) β'	(10) $0.51Bf$ + $0.49f$	(11) 与えられた 産物累積 ベクトル	(12) 計算された 産物累積 ベクトル
1	0.08	0.61	0.30	0.16	-0.14	-0.276	0	0	0.159	1.00	1.00
a	0.16	0.76	0.20	0.13	-0.07	-0.136	0.14	0.276	0.131	0.84	0.841
a ²	0.15	0.92	0.10	0.09	-0.01	-0.015	0.21	0.412	0.092	0.71	0.710
a ³	(0.61)	(1.00)	(0.40)	(0.62)	+0.22	+0.427	0.22	0.427	(0.618)	0.62	0.618

$$\sum_{i=1}^{n+1} \alpha'_i \beta'_i = 0.2191$$

$$\sum_{i=1}^{n+1} \beta_i'^2 = 0.428249$$

$$\pi = 0.51$$

次に π 粉碎の概念の二つの一般化を示す。一つは粉碎が一度以上同じ粉碎法則でなされる π , κ 粉碎である。これは上述の操作で $\mathbf{B}$ を $\mathbf{B}^*$ としたもので、例を付録Ⅰ、Ⅱに示す。もう一つは粒度により粉碎が変わるもので、例を付録Ⅲに示す。パラメータは最小二乗法で計算される。

付録Ⅰ 数 値 例

第Ⅳ部の試作円錐ミルの開回路行程の例を使って π 粉碎の計算例を示す。石炭は中速回転のミルに 0.32g/sec で供給した。表7にフルイ分析とそのベクトル表示を示す。この場合の粉碎過程は次式でよく表現された。

$$(\pi \mathbf{B}^3 + (1-\pi) \mathbf{I}) \mathbf{f} = \mathbf{p} \quad (7)$$

π は6節の方法で求め、 $\pi = 1.3029/5.7520 = 0.2265$ であ

った。表8に(7)の計算を示す。第11列の計算値と表7、第7列の実測値の一致は良好といえる。

付録Ⅱ π と κ の評価

6節の方法は π 粉碎される回数 κ が分れば π の計算に有効であるが、試作円錐ミルの解析では多くの π を計算する必要があり、その操作を早くするには最小二乗法の効率を少し犠牲にするしかない。このため第一に実験回数が多いこと、第二に供給粒度分布は全実験を通じて一定であること、第三に粉碎は π , κ 粉碎によりほぼ等しく近似されることが必要である。表9は上記のミルの実験結果を示すが、供給粒度分布は一定であった。 $\pi=1$ の100%粉碎で $\kappa=1, 2, 3, 4$ の時に得られる産物粒度分布ベクトルの計算は $a=2^{-\frac{1}{2}}$, $n=8$ を使って行ない実際

表7 数 値 例

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
フルイ分析			ベクトルへの変換					
B.S.	フルイ下百分率		等級粒度		累積ベクトル		頻度ベクトル	
フルイ	供給	産物	任意単位	ミクロン	供給	産物	f	p
7	100	100	1	2411	1	1	0.480	0.380
8	75	81	a	1705	0.520	0.620	0.395	0.320
10	50	53	a ²	1206	0.125	0.300	0.125	0.070
12	25	40	a ³	852	0	0.230	0	0.010
14	12.5	30	a ⁴	603	0	0.220	0	0.010
16	0	24	a ⁵	426	0	0.210	0	0.010
18	0	23	a ⁶	301	0	0.200	0	0.009
22	0	22.3	a ⁷	213	0	0.191	0	0.008
36	0	21	a ⁸	151	0	0.183	0	0.183
52	0	20						
85	0	18.8						
100	0	18.3						

表8 数 値 例

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
等級粒度		B ³	フルイ下 ベクトル	B ³ f	β (B ³ -I)f	α p-f	β'	α'	計算された産物	
任意単位	ミクロン								頻度 ベクトル	累積 ベクトル
1	2411	0.0010	0.6969	0.0005	-0.4795	-0.100	0	0	0.3713	1
a	1705	0.0058	0.7732	0.0032	-0.3918	-0.075	0.4796	0.100	0.3062	0.6286
a ²	1206	0.0160	0.8428	0.0101	-0.1149	-0.055	0.8714	0.175	0.0990	0.3224
a ³	852	0.0301	0.9018	0.0215	0.0215	-0.010	0.9863	0.230	0.0049	0.2234
a ⁴	603	0.0453	0.9471	0.0356	0.0356	0.010	0.9648	0.220	0.0081	0.2185
a ⁵	426	0.0590	0.9772	0.0500	0.0500	0.010	0.9292	0.210	0.0113	0.2104
a ⁶	301	0.0696	0.9932	0.0624	0.0624	0.009	0.8792	0.200	0.0141	0.1991
a ⁷	213	0.0763	0.9990	0.0715	0.0715	0.008	0.8168	0.191	0.0162	0.1850
a ⁸	151		(1)	(0.7453)	(0.7453)	(0.183)	0.7453	0.183	(0.1688)	0.1688

表9 1, 2, 3, および4周期粉碎後の供給と産物の各フルイを通る百分率, $\pi=1$

B.S.S.	供給における百分率	産物における百分率			
	f	$\kappa=1$	$\kappa=2$	$\kappa=3$	$\kappa=4$
7	100	100	100	100	100
8	75	98.0	99.8	100	100
10	50	95.3	99.5	100	100
12	25	89.3	98.0	99.8	100
16	0	72.4	95.0	99.1	99.9
18	0	63.2	90.8	98.6	99.8
22	0	56.5	88.9	97.6	99.6
36	0	37.4	75.5	93.0	98.3
52	0	27.4	65.4	87.8	96.5
85	0	17.0	50.0	78.1	92.8
100	0	14.4	46.2	74.6	90.5

のフルイを通る割合は結果を図示して補間法で求めた。 π, κ 粉碎で κ 一定の時, あるフルイ粒度以下の割合は次のように

$$(1-\pi)f_s + \pi\kappa$$

π の一次関数となる。 f_s, κ_s は供給 および κ 回粉碎後のこのフルイ粒度以下の割合である。図2は $\kappa=3$ での種々の π に対する各フルイ粒度以下の百分率を与える直線を示す。各フルイを通る産物の百分率から π が得られるが、これらはよく一致しているので算術平均により π を定めた。種々の κ に対して上述の図を使うことによりすべてのフルイ粒度でよく一致する π を与える κ を決めることができる。 π は実際は κ にあまり関係しない。表10は付録Iの例の産物のフルイ分析と図2からの π を示す。 π の算術平均は0.23である。付録Iでは0.2265であった。この方法ではフルイ分析をベクトルに変換しなくてよい。

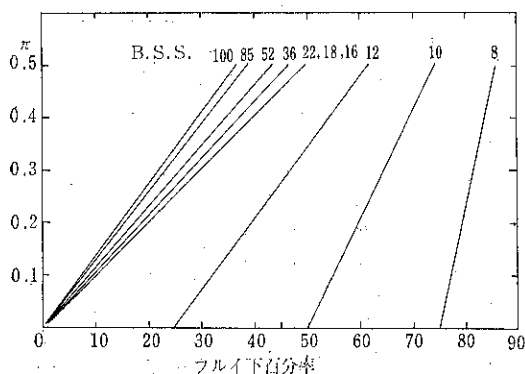


図2 $\kappa=3$ と種々の π でのフルイ粒度以下の百分率

表10 フルイ分析からの π の直接計算

B.S.S.	フルイを通る百分率	$\kappa=3$ での π の値
18	23.0	0.23
22	22.3	0.22
36	21.0	0.22
52	20.0	0.22
85	18.8	0.23
100	18.3	0.24

付録Ⅲ 粒度の指数に比例する粉碎確率

粉碎に選択される粒子の確率が粒度の指数に関係する過程を考える。粉碎確率は粒度の ν 乗に比例するとし $\omega=a^\nu$ と置くと、各粒度等級間の確率は $\pi, \pi a^\nu, \pi a^{2\nu}, \dots$ となる。 Ω を主対角が1, $\omega, \omega^2, \dots, \omega^n$ その他が零の行列とすれば選択行列は $\pi\Omega$ で選択関数は $S(y) = \pi a^{-\frac{\nu}{2}} y^\nu$ となる。 π と ν は供給と産物を表わす f と p から求められる。この時の過程は次式で示される。

$$P = (\pi B \Omega + I - \pi \Omega) f$$

κ 回粉碎される時は B を B^κ とする。上式を変形すると $(p-f) - \pi(B-I)\Omega f = 0$

となり、 π は各 ω に対して最小二乗法により求まる。 ω は次の近似法が便利である。 ω の種々の適当な値に対して $(B-I)\Omega f$ を計算しこれを図示すると、粒度 a を通り ω が減ると a^n で減る滑らかな曲線群を得る。同じ図に $p-f$ を描く時これらの曲線群から $p-f$ と同じ形でその上方に一定間隔で位置する ω に対応する曲線を選べば ω を定めることができ、その間隔が係数 π となる。

例1) 図3は Penallta 石炭を低速回転のパイロット円錐ミルに 3.56 ton/hr で供給した時の計算例を示す。

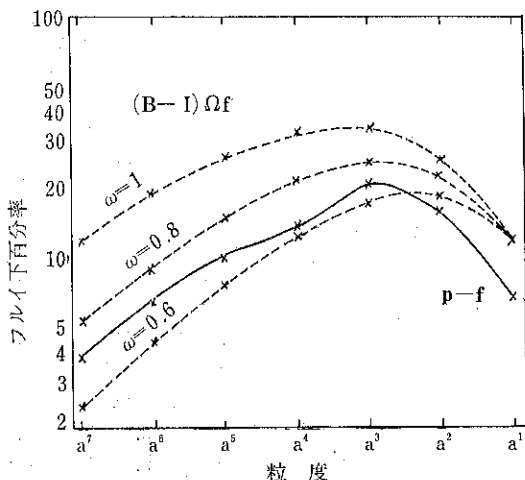


図3 π と ω の評価

$a = \frac{1}{2}$ である。図から (B-I) の ω は $\omega = 0.8$ 程度で p-f に相似で、その約 0.7 上方にあることが分る。直接計算すれば、 $\pi = 0.7$, $\kappa = 1$, $\nu = 0.33$ によく合うことが確かめられる。粉砕確率は粒度が 2 倍になっても 1.26 倍にしかならず、 $\pi = 0.45$, $\omega = 1$ とした π 粉砕当てはめでも悪くない結果が得られる。

例 2) Markham Hards 石炭を中速回転の試作円錐ミル II 号に 0.14 g/sec で供給した時、 $a = 2^{-\frac{1}{2}}$ として $\pi = 0.46$, $\kappa = 3$, $\omega = 0.85$, $\nu = 0.47$ を得た。粉砕確率の粒度依存性は例 1 よりも強く粒度が 2 倍になれば 1.39 倍になっている。

本シリーズの研究では一般に粒度依存性は重要でない。

第 III 部 石炭輸送系の解析

1. 緒 論

ガス発生装置に対する石炭取扱プラント (図 4) にお

注: 実際は AA を境に左右は直角に交叉している。

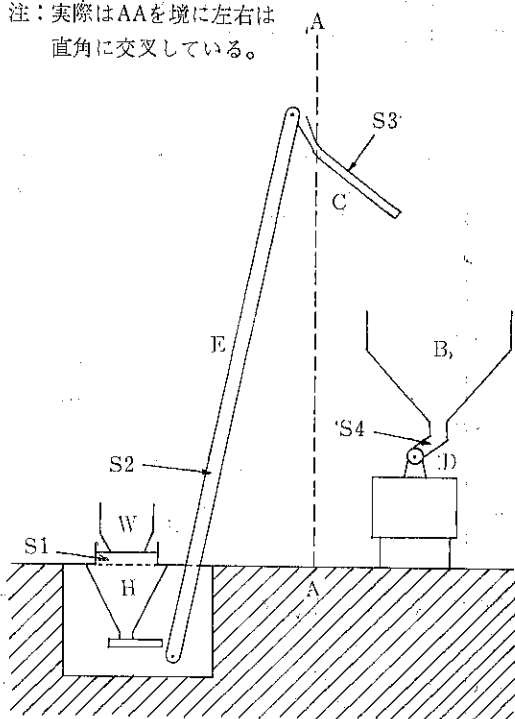


図 4 機械的ガス発生器への石炭供給取扱プラントの概略

W: 貨車, H, ホッパー, E, バンカーエレベーター, C, シュート, B, 主バンカー, D, ドラム

* Brown, R. L., Fuel, 1948, 37, 82.

いて石炭粒度の全体的劣化を来す好ましくない粉砕が生じた。その輸送系のどの部分でどの程度の粉砕又はこわれが生じたかを見出すための解析が π 粉砕模型による行列解析によって行なわれた。

S1 ~ S4 の石炭標本は図 4 に示す各点でとった。標本の粒度分布の比較により標本点間での粉砕が分る。粉砕防止の解決には粉砕領域の発見だけでは不十分であり、各部での石炭強度の評価も必要である。このため鋼板への 6 ft 落下の粉砕試験により強度の目安を得た。粉砕試験の過程も π 粉砕模型とした。輸送系では大きな π は標本抽出点間での広範囲の粉砕を示すが、粉砕試験ではもろくなった石炭が大きな値の π を有する。

2. 粒度分布と粉砕試験

標本重量は 50 lb から 60 lb の間である。標本調査のため最初に 2 in. から $\frac{1}{8}$ in. に亘る粒度の一貫した目安を決めることが必要であった。フルイ分析をすべてに用いるには問題があるので、粒度の目安は粒子のグラム重量の立方根 $W^{1/3}$ を用いた。標本中で $\frac{1}{2}$ in. B.S. フルイを通る粒子はフルイ分析しそれを付録 I の方法で $W^{1/3}$ に変換した。大粒子は $W^{1/3}$ によるベクトルの等級重量比 a が $2^{-\frac{1}{2}}$ になるよう次の

100-35.37, 35.36-12.51, 12.50-4.43, 4.42-1.57 のグラム重量群に分類した。4.43 g 以下の粒子は細粒分を前もって $\frac{1}{8}$ in. B.S. 手動フルイで除去し、その残分から約 300 g を $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{8}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{16}$, $\frac{1}{8}$ in. B.S. フルイを使ったロータップ振とう器で 2 周期、各 10 分間ふるい分けしそれを $W^{1/3}$ に変換した。表 11 に累積ベクトル ($a = 2^{-\frac{1}{2}}$, $n = 7$, 最大粒度 $W = 100$ g) を示す。

4 つの標本の強度は輸送系において受ける粉砕に相当すると考えられる粉砕試験によって評価した。粉砕試験装置は標準のものと厳密には一致しないが原理と操作に関して BROWN* によるものと似ている。 $\frac{1}{8}$ in. B.S. フルイを通る石炭は粉砕試験を行なっていない。

表 11 には粉砕試験前後の粒度分析結果も示しているが、石炭は輸送系でかなりこわれることが分る。

3. 行列解析と考察

各標本対間と粉砕試験での粉砕の π 粉砕模型による解析結果を表 12 に示す。 π 粉砕模型は粒度分布について実測値とよく一致し、両者の累積ベクトルの差の根二乗平均は輸送系で 3.6 in., 粉砕試験で 2.6 in. であった。表から転送系での重大な粉砕は S3 と S4 抽出点の間、つまりバンカーへの落下とその中での移動によることが分る。粉砕試験での π の一定性は石炭強度が標本間で変化しない、つまり輸送系での応力によって平均的強度が変わらないことを示している。これらは表 11 だけでは結論できない。

表11 各標本の粉碎試験前後のフルイ下百分率

粒 度 ($w^{\frac{1}{3}}$ 規定の単位)	等価粒子重量 (g)	標 本 1		標 本 2		標 本 3		標 本 4	
		前	後	前	後	前	後	前	後
1	100.00	100	100	100	100	100	100	100	100
a	35.36	62.0	72.0	70.0	81.0	76.0	84.0	93.0	98.0
a ²	12.50	19.0	35.5	23.5	40.0	32.5	49.0	60.0	70.0
a ³	4.42	4.0	16.8	6.8	20.5	11.4	23.8	34.5	47.5
a ⁴	1.56	1.4	10.5	4.3	13.0	5.9	14.5	20.8	32.5
a ⁵	0.55	1.1	6.8	3.2	8.8	4.0	9.3	14.5	22.0
a ⁶	0.20	0.9	4.8	2.5	6.4	3.2	6.8	11.0	17.0
a ⁷	0.07	0.7	3.7	2.2	5.2	2.6	5.4	9.0	13.8

表12 輸送系と粉碎試験における π の評価

	輸 送 系			粉 碎 試 験			
	S1→S2	S2→S3	S3→S4	S1	S2	S3	S4
100 π	7.0	8.1	36.3	20.6	21.2	19.9	22.0

粉碎試験は π によってよく記述されているが π が石炭強度の有効な表現とは必ずしもいえない。

本研究から単一のパラメタ π によって非常に複雑な情報を効果的に要約できることが分る。

付録I 粒度分析技術

フルイ分析による粒度の目安と粒子重量測定による目安とを関係づける方法について述べるが、必ずしもこれらが一般的に適用できるとはいえない。

石炭標本は2 in. の大粒子や非常に小さい粒子を含んでいる。フルイ分析では特に大粒子の場合、第一にふるいの中に粒子が粉碎されうること、第二にフルイ目より少し小さい粒子の通過確率は粒度分布とフルイ範囲内の全重量、フルイの線と穴の大きさに関係して変化すること、第三にこの確率とフルイ分析の一般的結果はふるいの仕方に非常に関係することのため、全粒度域に亘る一貫した取扱いは不可能である。

粒子の密度と形が重量と共にあまり変らなければ集合の平均粒子重量は平均粒子径の三乗に比例するので、粒子重量の立方根 $W^{1/3}$ を大粒子の粒度の目安にできる。フルイ分析による粒度との比較は一对一の対応がないので難しいがそれらの平均的關係は粒度分布に強く依存することが分るので、それを次の方法で関係づけた。

方法1) 標本のうち $\frac{1}{2}$ in. B.S. フルイを通る部分をフルイ分析する。各フルイ範囲内の粒子集合を計量し粒子数を求めて、平均粒子重量の立方根を出し、これに幾何

学的平均を関係づける。

方法2) 個々の粒子を計量して標本を種々の粒子重量群に分類し、 $W^{1/3}$ による累積分布を描く。全標本をフルイ分析し $W^{1/3}$ による分析に内挿し、あるフルイ目を通る百分率を同じ百分率で過小重量**となる $W^{1/3}$ に関係づける。

二つの方法による三つの石炭標本A, B, Cの結果を表13~15と図5に示す。方法1と2が合い、粒子の密度

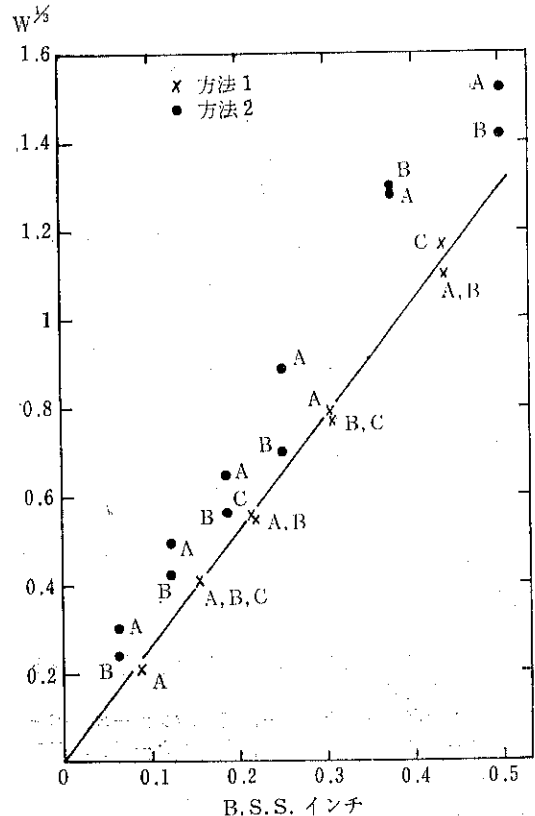


図5 フルイ口径と平均粒子重量の関係

** underweight

と形、標本抽出に変動がなければ図5の点は原点を通る直線上にくるはずである。1/2 in. B.S. を通る粒子が一边1/2 in. の立方体で密度が 1 1/8 g/cc であればその直線は1/2 in. B.S. フルイで $W^{1/3}=1.40$ となり、1/2 in. の球であれば $W^{1/3}=1.30$ となるはずである。図の直線は球とした場合のものである。図の結果はこれらの条件を満足している。方法2が1の上にあるのは方法1では粒子をフルイ分析の後計量したためである。

表13 フルイ口径と平均粒子重量の関係に対するデータ：方法1

B.S. フルイ	標本A		標本B		標本C	
	重量(g)	粒子数	重量(g)	粒子数	重量(g)	粒子数
-1/2 in.+3/8 in.	107.0	80	154.2	115	584	380
-3/8 in.+1/4 in.	101.9	208	129.1	287	300	650
-1/4 in.+3/16 in.	32.6	200	33.3*	200*	124	700
-3/16 in.+1/8 in.	37.3	538	27.5*	400*	74	1110
-1/8 in.+1/16 in.	6.2*	600*	—	—	—	—

* 全標本ではない

表14 フルイ口径と平均粒子重量の関係に対するデータ：方法2

粒 子 重 量 分 析		
重 量 (g)	過 小 重 量 百 分 率	
	標 本 A	標 本 B
12.5	100	100
4.4	82.8	57.9
1.6	50.6	35.9
0.5	31.7	23.5

第IV部 開回路粉碎における円錐ミルの精査解析

1. 緒 論

円錐ミル (B.P. App. No. 25027/54) は鉛直の回転円錐とその上に水平保持環で支えられるボールから成る。石炭は円錐の頂点から供給されその一部分が円錐とボールの間で粉碎される。円錐ミルの粉碎では粒子の層ができるのを避けることができ、層を圧する際のエネルギーの無駄な消費が避けられ、一回の通過で相当に粉碎が進行する。

試作ミルはI号、II号の二つがあり、トラック直径約4 in, ボール直径1 in, ピッチ円直径約4.6 in で、-700 B.S.S. 石炭を供給の -1/8 in. から 170 lb/hr で生産する。II号はI号よりトラックを横切る粒子の角度が小さい。パイロットミルはトラック直径約14 in., ボール直径1 1/2 in か 2 in., ピッチ円直径約15.2 in. で、-100 B.S.S. 石炭を供給の -1/8 in. から 4 ton/hr で生産する。本論文ではこれらのミルの性能に及ぼす種々の要因の影響を π , κ 砕粒模型で行列解析を行なった。ミルは開回路、つまり既知粒度分布の石炭を円錐頂部より供給

フ ル イ 分 析		
B.S.フルイ	フ ル イ 下 百 分 率	
	標 本 A	標 本 B
1/2 in.	72.1	48.9
3/8 in.	50.9	33.5
1/4 in.	30.7	20.6
3/16 in.	24.2	15.5
1/8 in.	16.8	10.7
1/16 in.	8.7	5.3

表15 フルイ口径と平均粒子重量の関係

方 法 1 (表13)			
平均粒度 (in.)	平 均 $W^{1/3}$		
	標 本 A	標 本 B	標 本 C
0.433	1.10	1.10	1.16
0.306	0.79	0.77	0.77
0.217	0.55	0.55	0.56
0.153	0.41	0.41	0.41
0.088	0.21	—	—

方 法 2 (表14)		
B.S. フルイ	百分率過小重量での $W^{1/3}$	
	標 本 A	標 本 B
1/2 in.	1.52	1.41
3/8 in.	1.29	1.30
1/4 in.	0.89	0.70
3/16 in.	0.65	0.56
1/8 in.	0.49	0.42
1/16 in.	0.30	0.24

表16 試作円錐ミルの1回の通過の産物粒度分布の代表例：実測値と π , κ 粉砕模型による計算値

ミルの型 R.P.m. 石炭 100 π κ	II 中 Markham 50 4		I 高 Gedling 43 4		I 高 Markham 21 3		II 低 Markham 20 2		I 中 Pentremawr 6.5 2		I 低 Markham 4 2		I 120 Gedling 4 1	
B.S.フルイを 通る百分率	実測	計算	実測	計算	実測	計算	実測	計算	実測	計算	実測	計算	実測	計算
18	52.8	50.2	46.1	43.4	26.9	21.2	20.3	18.5	7.3	6.4	4.2	4.0	2.8	2.7
22	52.2	50.1	45.4	43.2	24.4	20.8	18.8	18.1	6.1	6.1	3.7	3.8	2.1	2.3
36	50.5	49.5	43.3	42.6	19.4	19.8	16.0	15.4	4.4	5.1	3.0	3.2	1.4	1.5
52	48.9	48.5	41.1	41.8	16.4	18.8	14.1	13.2	3.7	4.3	2.6	2.6	1.0	1.1
85	46.4	46.5	37.9	40.0	13.4	16.6	11.1	10.1	3.0	3.3	2.1	2.1	0.7	0.7
100	45.1	45.2	36.6	39.0	12.5	15.9	9.6	9.2	2.8	3.0	1.9	1.9	0.7	0.6

し結果の産物を集めて粒度分析するという方法で試験した。円錐回転速度、供給率および石炭の種類の影響は π と κ の対応する相違によって研究した。

2. 円錐ミル試験の行列解析

ミルの粉砕効果を表わす方法はいくつかあるが、 π , κ 粉砕模型は規定条件下のミルによる粉砕が π と κ の二つのパラメータによって記述され、これらが大きい程ミルが効果的であることを示す。

表16は試作ミルによる産物の粒度分布の一例を示す。実測値と計算値の一致は良好で、他のすべての試験でも見られた。実測値と計算値のフルイ粒度での累積分布間の差の根二乗平均は試作ミルI号、II号で1.8と1.7、パイロットミルで3.2であった。これは π , κ 粉砕模型が円錐ミルの粉砕を十分に記述していることを示す。行列法は解析が容易な他に、第一に異なる粉砕模型が容易に比較でき、これにより試作ミルII号とパイロットミルでは大粒子程粉砕される機会が大きいことが分り、第二に数少い開回路試験からその試験範囲内で種々の運転条件下のミルの効果を予測できるという利点がある。同様に未試験の供給粒度分布に対するミルの効果も予測でき、Fをその供給率、fを頻度ベクトルとし、 π , κ 粉砕とすれば、規定粒度以下の新物質の生産率は $\pi F(B^{\kappa} - I)f$ のうち規定粒度以下の割合となる。 πF を粉砕率という。

3. 試験の要約

(i) 各試験は供給と産物の粒度分布測定およびその π , κ 粉砕の当てはめから成る。(ii) 試作ミルの回転速度は低、中、高で区別し、供給率は $\frac{1}{4}$ と12 g/secの間で変えた。パイロットミルの回転速度は低、高で、供給率は $\frac{1}{2}$ と12 ton/hrの間で変えた。(iii) 各試験の再現性と π , κ 粉砕との一致は良好であった。(iv) π と κ

はミルの回転速度の増加と共に増大する(表17)。(v) 石炭の種類にあまり関係せず同じように粉砕されその粉砕性*と関係がない。(vi) 供給率の増加は π と κ を少し減ずる。(vii) II号はI号の約2倍の生産を有する。(viii) ミルの最適条件追求の試験ではないが、試験結果から再循環系では生産率は増大し、更に高い生産率のミルを作り得ることが推察される。

表17 試験で得た π と κ

試作ミル

ミル	ミル速度	π	κ	供給率の範囲 (-7+16 B.S.S. 石炭) g/sec
I II	低	0.075 0.2	2 2	0.25—6.24 4.0
I II	中	0.17 0.40	2, 3 3, 4	0.32—4.98 0.14—6.25
I II	高	0.3 0.46	3 3, 4	1.19—4.56 9.9—11.7

パイロットミル

ミル速度	π	κ	供給率の範囲 (-1 $\frac{1}{2}$ in. B.S.S. 石炭) tons/hr
低	0.3	1	3 $\frac{1}{2}$
高	0.95	2	0.6—12

4. 結論

π と κ は運転変数と一致して変わるのでミル内の粉砕過程の理解が容易である。二つの異なる供給粒度分布に対するミルの作用が π と κ の比較によって正確に比較できる。例えばパイロットミルでの Sherwood 石炭は Penallta 石炭より生産率が小さいが、供給分布は前者

* Grandability

の方が粗い。行列解析により両石炭はミルで同じように粉砕されるが、供給分布の相違のため産物が異なることが示される。

円錐ミルは軽量、単純、丈夫でコンパクトであり大量の石炭を処理でき、高率の生産が得られ再循環率は低く制御も簡単で作動範囲が広い等の特長を持っている。

第V部 閉回路粉砕の解析

1. 緒 論

閉回路粉砕系とはミルの産物がミルに戻る大粒子の再循環物と微小粒子から成る生産の二つに分離される系である。系の特性はミルと分級器の運転知識から求められる。本論文では補給物の粒度分布が分ると再循環率と生産の粒度分布の予測が可能な式と解を与え、それを図6に示す試作円錐ミル系の試験で実証した。

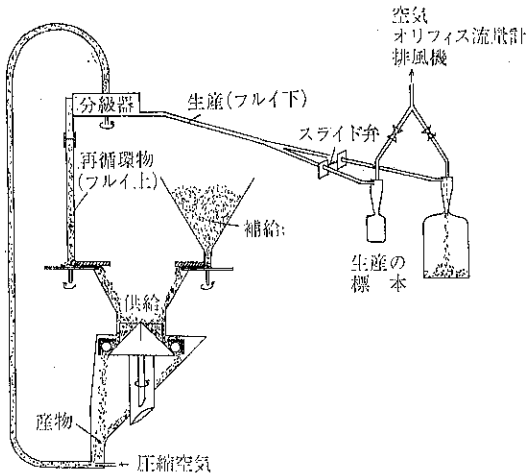


図6 再循環系の試作円錐ミル

2. 閉回路粉砕系の式

図6に基づいた図7の一般的系について式を導く。 f, p をミルに関する供給と産物の粒度分布ベクトル、 F, P をそれらの質量流量、ミルの選択行列を S 、粉砕行列を B とすれば、式は次のようになる。

$$p = (BS + I - S)f \quad (8)$$

$$P = F \quad (9)$$

m と M をホッパーからの補給物、 r と R を分級器からの再循環物*の分布ベクトルと質量流量とすれば供給は

$$Ff = Mm + Rr \quad (10)$$

$$F = M + R \quad (11)$$

となる。 R 又は R/M を再循環率という。分級器からの

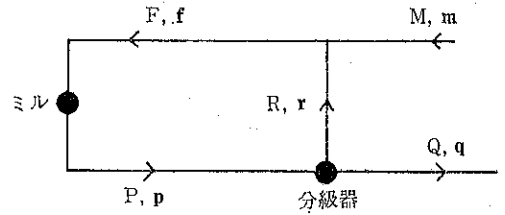


図7 閉回路

再循環物とフルイ F は次式のように書ける。

$$Rr = PCp \quad (12)$$

$$Pr_{n+1} = Pc_{n+1}P_{n+1} \quad (13)$$

C は主対角が $c_1, c_2, \dots, c_n$ 他が零の行列で、 c_i はミルに戻る i 粒度等級 ($i=1, \dots, n, n+1$) の割合である。生産はミルに戻らない産物で q と Q によって次式で表わされる。

$$Pp = Qq + Rr \quad (14)$$

$$P = Q + R \quad (15)$$

(8)~(15)によって系の運転が完全に記述される。

3. 再循環式の解

分級器と粉砕ゾーンの運転は既知とし、補給粒度分布が与えられミルは定常状態で作動し、分級器はミルに最小粒子を戻さない ($c_{n+1} = 0$) とすると、質量流量は補給率の積で与えられる。解は次の行列 Y を使って得られる**。

$$Y[I - C(BS + I - S)] = I$$

Y が求まるとベクトル Ym が構成され、解は次式となる。

$$\sum_{n=1}^n Ym + m_{n+1} = R + 1 \quad (16)$$

$$f = Ym / (R + 1) \quad (17)$$

(16)より R を求め(17)に代入して f を求め、これらを(8)~(15)に代入することにより残りのものが得られる。

最初の $(n-u)$ 粒度等級では全粒度が分級器からミルに戻され、残りの u 粒度等級では粒子は一部分だけ(零でも1でもない)が戻され最小粒度以下の粒子は戻されないとする、 C は主対角が次の行列となる。

$$1, 1, 1, \dots, 1, c_{n-u+1}, \dots, c_n$$

$S = \pi I$ の π , κ 粉砕では Y は次の方法で求まる。 C を

$$C = \begin{pmatrix} I_{n-u} & 0 \\ 0 & J_u \end{pmatrix}$$

と書く。 I_{n-u} は $(n-u)$ の正方単位行列、 J_u は主対角が $c_{n-u+1}, \dots, c_n$ で他が零の正方行列である。この時、

$$I - C(BS + I - S) = \begin{pmatrix} I_{n-u} - D_{n-u} & 0 \\ -J_u D_u & I_u - J_u D_u \end{pmatrix}$$

となり、 D_i は第1例が $(1 - \pi(2 - b_1), \pi b_2, \dots, \pi b_i)$ の

* oversize

** BROADBENT, S. R. & CALLCOTT, T. G., Phil. Trans. Roy. Soc., 1956, 249, 99.

階段行列, d_n は u 行 $(n-u)$ 列の行列で次式で表わされる.

$$d_u = \pi \begin{pmatrix} b_{n-u+1} & \cdots & b_2 \\ \vdots & & \vdots \\ b_n & \cdots & b_{u+1} \end{pmatrix}$$

b_i は第II部を参照のこと. 従って Y は次のように書ける.

$$Y = \begin{pmatrix} U & V \\ W & X \end{pmatrix}$$

U は $I_{n-u} - D_{n-u}$ の逆行列で階段行列, V は全要素が零の n 行 $(n-u)$ 列の行列, X は u 行 u 列の $I_u - J_u D_u$ の逆行列, W は $X J_n d_u U$ である.

4. 閉回路における試作円錐ミル

ミルは高速運転し, 試験1では $1/8$ in. B.S. フルイを通る石炭を 45 g/min で補給し定常状態でミル前後, 分級器前後の石炭標本を取り両者の特性を求めた. 試験2では同様ではあるが別の補給分布と供給率を用い補給分布, 循環率, 生産分布のみを測定した. 両試験から循環率と生産分布が計算され試験との一致は良好であった. 試験3では全体的に別の補給分布 ($1/8$ in. $\sim 1/16$ in. の粒子)を用い 32 g/min で補給した.

解析には6要素ベクトル, 最大粒度 $1/8$ in., $a=1/2$ を

用い, 試験1よりミルは $\pi=0.6925$, $\kappa=3$ の π , κ 粉碎とされた. 行列 $\pi B^3 I + (1-\pi) I$ の第1列は $\{0.3129, 0.0269, 0.0625, 0.0935, 0.1065, 0.1017\}$ となる. 分級器は約 100μ で産物を切るが, 切れはあまり完全ではない. 行列 C は 1, 1, 1, 1, 0.80, 0.32 の対角要素を持ち, $c_7=0$, $u=2$ となる. Y は前節の方法より

$$Y = \begin{pmatrix} 1.4554 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.0571 & 1.4554 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1346 & 0.0571 & 1.4554 & 0 & 0 & 0 \\ 0.2085 & 0.1346 & 0.0571 & 1.4554 & 0 & 0 \\ \hline 0.1860 & 0.1529 & 0.0987 & 0.0418 & 1.3339 & 0 \\ 0.0656 & 0.0615 & 0.0506 & 0.0327 & 0.0127 & 1.1113 \end{pmatrix}$$

表18に試験2, 3の結果を示す. 試験2の再循環率は10より $R=0.7605$ となり, 供給は $100R/(R+1)=43.2\%$ の再循環物を含む. 実測値は44%である. 生産分布も実験値に近かった. 試験3での補給は試験2より粗く, 1600μ 以下は後者で70%であるのに対し前者は2%であった. この場合の R は1.0958で, $100R/(R+1)=52.3\%$ で実測値は42%であった. 多分, 補給率が試験2より低いためミルか分級器の性能が改善されたためであろう. 生産分布は予測値とよく合っている.

表18 閉回路の解析: 試作円錐ミル

等級粒度		補給(累積)		Y_m		生産の計算値(累積)		生産の実測値(累積)	
任意単位	ミクロン	試験2	試験3	試験2	試験3	試験2	試験3	試験2	試験3
1	3175	1.000	1.000						
				0.4366	1.4219				
a	1538	0.700	0.023						
				0.4101	0.0718				
a ²	794	0.430	0.012						
				0.3032	0.1380				
a ³	397	0.260	0.008						
				0.2687	0.2083				
a ⁴	198	0.150	0.006			1.000	1.000	1.00	1.00
				0.1985	0.1866				
a ⁵	99	0.090	0.004			0.965	0.954	0.96	0.95
				0.0904	0.0662				
a ⁶	50	0.053	0.003			0.852	0.815	0.81	0.81
				1.7075	2.0928				

5. 閉回路におけるパイロット円錐ミル

第IV部の結果を参考にして $\pi=0.84$, $\kappa=2$ の π , κ 粉碎とし, 8要素ベクトル, 最大粒度 $1\frac{1}{2}$ in., $a=1\frac{1}{2}$ とした. 表19に第3列の補給について第4~5列の3種の分級器に対する計算結果を示す. 実験を行っていないので比較はできないが, 計算値は設計に必須のものである. 分級器1は $u=3$ として3節の方法で解き, $R=0.90$, 供給は47%の再循環物を含む. 分級2, 3の解析は簡単で, 後者に対するYの第1列は{1.2391, 0.1689, 0.2739, 0.3173, 0.3297, 0.3313, 0.3309}であり, 前者はその最初の6要素である. 従って分級器2では $R=$

0.97, 3では $R=1.27$ となり, 供給はそれぞれ49%, 56%の再循環物を含む.

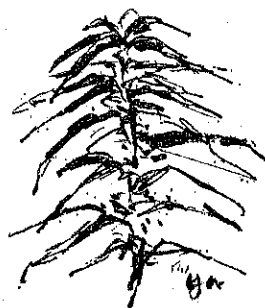
上述の計算よりパイロット円錐ミルは(i) $1\frac{1}{2}\sim 1$ 以下の低い再循環率で有用な生産をあげうる, (ii) 分級器の小変化は産物分布にあまり影響しないことが分る.

6. 結 論

閉回路系は開回路系より解析が困難であるが得るところは大きい. 産業への応用ではミルと分級器の特性の完全な情報を必要とするが, 流量や粒度分布によるこれらの特性の変化が考慮されねばならない.

表19 閉回路系の解析: パイロット円錐ミル

(1) 等級粒度		(3) 補給	(4) (5) (6) Cの主対角			(7) (8) (9) 産物(累積)			(10) (11) (12) 生産(累積)		
任意単位	ミクロン	(累積)	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	12700	1	1	1	1	1	1	1			
a	6350	0.840	1	1	1	0.980	0.981	0.983			
a ²	3175	0.630	1	1	1	0.939	0.941	0.949			
a ³	1588	0.380	1	1	1	0.866	0.870	0.888			
a ⁴	794	0.210	1	1	1	0.766	0.773	0.804			
a ⁵	397	0.112	0.5	1	1	0.640	0.651	0.698	1		
a ⁶	198	0.050	0.3	—	1	0.509	0.509	0.757	0.876	1	
a ⁷	99	0.105	0.1	—	—	0.381	0.384	0.441	0.705	0.754	1
a ⁸	50	0.005				0.271	0.271	0.328	0.517	0.532	0.744



ジャンボパルスエアー ホソカワ/マイクロエレクトロフィル マリタイム

細 川 鉄 工 所
集 塵 機 事 業 本 部

事業部発足以来、既に6ヶ月余、この間に我々は、積極的に新しい技術の開発、導入習得につとめて来た。ここにその一端を紹介したい。

新製品 ジャンボパルスエアー（大型ホソカワ/マイクロパルスエアー）

1) 始 め に

ホソカワ/マイクロパルスエアーも発売後既に十余年になり、その性能の優秀性については、広く知られるところであるが、本機が使用されている分野を分析してみると、大容量の風量処理するケースが比較的少い。その理由の一つに濾布の長さが制限されている為に機械の高さ方向に限度があり、その結果パルスエアーの特長の一つである据付面積が少いというメリットが全く失なわれ、さらには、バッグの本数が数百本以上になり、メンテナンス上に難点が出て来るという点にある為であろうと考えた。そこでこれらの欠点を除き、従来機と同じ性能を有する機種として開発されたのが、この“ジャンボパルスエアー”である。

ここに、その開発途上で見出された問題点、運転例等について説明する。

2) 逆洗のメカニズム（逆噴射圧力波形について）

基本的に、パルスエアーの逆洗効果を同一にするには、既報の逆噴射圧力波形、および、単位濾過面積当りの通過逆洗風量、風圧を同じにすれば得られると考へ、その方針に基きベンチュリー、ノズル、等の検討を行った。

まず、ジャンボパルスエアーの濾筒サイズを旧来型の倍、すなわち径を226φ長さを4.8m、濾過面積を4倍のものとすることとした。

Fig. 1, Fig. 2 に旧来型及びジャンボ型のベンチュリー特性とパルスにより生じる圧力変動を示したが、図よりも明らかな如く、ベンチュリー特性を同一化する事により圧力変動も近似的に等しくする事が出来る。ただ、ここで注目すべきは、パルスの噴射時間の影響が、旧来型とジャンボ型との間において差異のある事である。旧来型では、その噴射時間が0.05秒以上では全く変化が認められなかったが、ジャンボ型では、第3図に示す如く最小0.062秒以上で、噴射時間が増すにつれて、

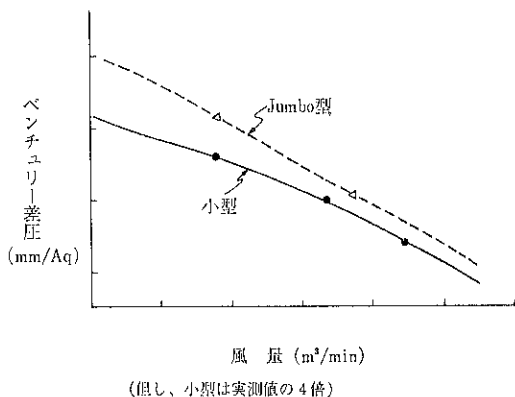


Fig. 1 ベンチュリーの特性

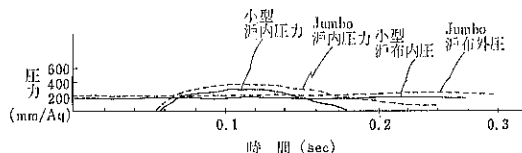


Fig. 2 パルス発生による圧力変動

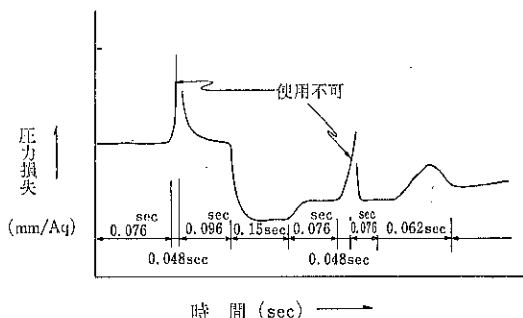


Fig. 3 パルス噴射時間と圧力損失

他は同一条件で運転されているにもかかわらず、圧力損失が低下している点で、これは使用したバルブの特性を考慮に入れても打ち消す事ができない特性である。この事は、ランニングコストに直接関係する圧空使用量とも関係があるので、圧空量を変化させその影響をみたが、バッグフィルターの圧力損失が、60 mm/Aq 以上では、圧空量を減少させると使用不能になるケースが多く現れた。

3) トップインレットかボトムインレットか？

含塵気流入口の位置が及ぼす影響については、旧来型では、はっきりその差異が認められなかったが、ジャン

ボ型では、トップインレット方式の方が、圧力損失が小さくなるという結果になった。これは、旧来型に就いて超微粉を捕集し、ホッパー内に貯めた場合、または、排出部、ホッパー下部にエアーリークがあって、ホッパー内に上昇気流がある場合に見受けられる現象の逆であって下向気流により払い落された粉塵が効果的に沈降し、汙布への再附着の割合が減少した為であろうと思われる。

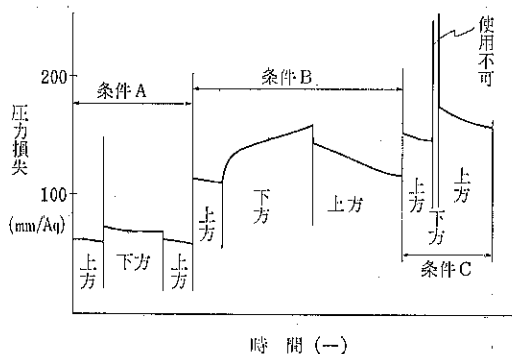


Fig. 4 含塵空気取入口の位置による圧力損失の変化

4) ジャンボパルスエアーの構造

上述の結果をもとに実用機を設計製作し、各種の立場

表-1 大型パルスエアー型式表

仕 様		型 式	P-1M3	P-1M4	P-1M5	P-1M6	P-1M7	P-1M8	P-1M9	P-1M10	P-1M11	P-1M12
過 面 積	m ²		332.1	442.8	553.5	664.2	774.9	885.6	996.3	1,107.0	1,217.7	1,328.4
布 数 量	本		90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
電 磁 弁 数 量	個		9	12	15	18	21	24	27	30	33	363
標準必要空気量	Nl/min		1,200	1,200	2,400	2,400	2,400	3,600	3,600	3,600	3,600	600
適用コンプレッサ	kw		15	15	22	22	22	37	37	37	37	373
標準耐圧度	mmAq		350	350	350	350	350	350	350	350	350	501
概 略 寸 法	A	m	3,500	4,600	5,700	6,800	7,900	9,000	10,100	11,200	12,300	3,400
	B	m	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500
	H	m	10,800	10,500	10,500	10,500	10,500	10,500	10,500	10,500	10,500	10,500
概 略 重 量	kg		15,000	20,000	25,000	30,000	35,000	40,000	45,000	50,000	55,000	60,000

仕 様		型 式	P-2N3	P-2N4	P-2N5	P-2N6	P-2N7	P-2N8	P-2N9	P-2N10	P-2N11	P-2N12
過 面 積	m ²		664.2	885.6	1,107.0	1,328.4	1,549.8	1,771.2	1,992.6	2,214.0	2,435.4	2,656.8
布 数 量	本		180	240	300	360	420	480	540	600	660	720
電 磁 弁 数 量	個		18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
標準必要空気量	Nl/min		2,400	2,400	3,600	3,600	4,800	4,800	6,000	6,000	7,200	7,200
適用コンプレッサ	kw		22	22	37	37	55	55	55	55	75	75
標準耐圧度	mmAq		350	350	350	350	350	350	350	350	350	350
概 略 寸 法	A	m	3,500	4,600	5,700	6,800	7,900	9,000	10,100	11,200	12,300	13,400
	B	m	9,100	9,100	9,100	9,100	9,100	9,100	9,100	9,100	9,100	9,100
	H	m	10,800	10,500	10,500	10,500	10,500	10,500	10,500	10,500	10,500	10,500
概 略 重 量	kg		30,000	40,000	50,000	60,000	70,000	80,000	90,000	100,000	110,000	120,000

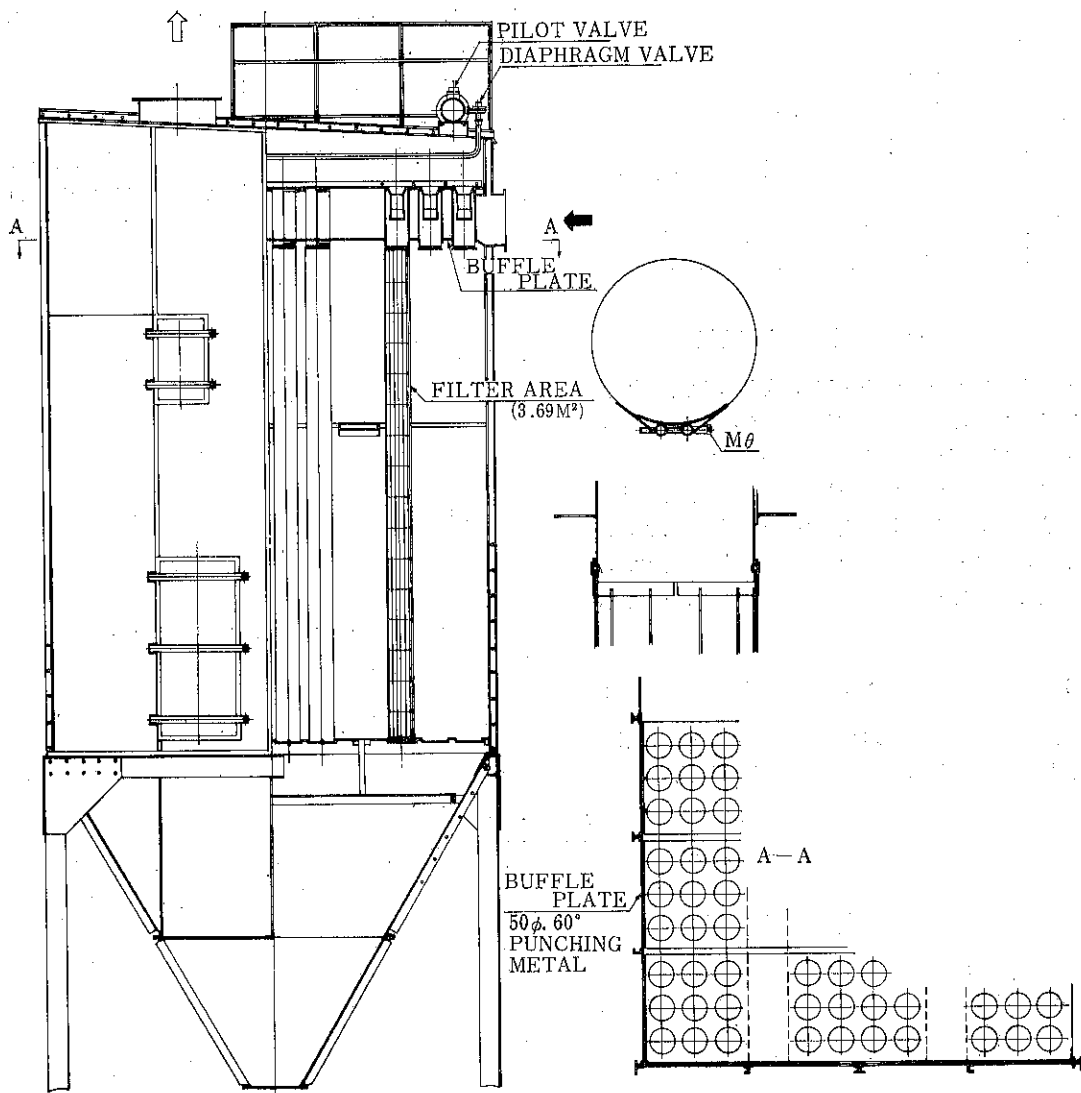


Fig. 5 ジャンボパルスエアの構造 (P-Hタイプ)

より検討を加え漸次改良を行い、Fig. 5 に示す型式に落ちついた。

ジャンボ型の旧来型と異なるところは

- 1) トップインレット方式を採用した
- 2) ベンチュリーカバーおよび、バッフルプレートによりベンチュリーと汚布の摩擦を防止した。
- 3) バッグ配列は、3-4-3 の組合せの10本1列とし、キャッツウオークを2列としてバッグ脱着の便をはかった。
- 4) マンホールが上下二ヶ所づつある。
- 5) パイロットバルブ、ダイヤフラムバルブ等をケーシングの上面に配置した。

6) 排気は全て上方排出とした。

7) バッグサポーターにより汚布の横振れを防止した。

等々である。

表-1 にジャンボパルスエアの標準仕様寸法を示した。

5) ジャンボパルスエアの実施例

a) パーライト工場の除塵

Photo 1 は、最も初期の設計になるP-1M3型(汚過面積330M²)で、パーライト焼成キルンの排ガス、および冷却用として工場内の天井集塵を同時に行った例

で、コーネックス沪布を用い、処理風量700 M³/分、ガス温度180°Cで運転されている。

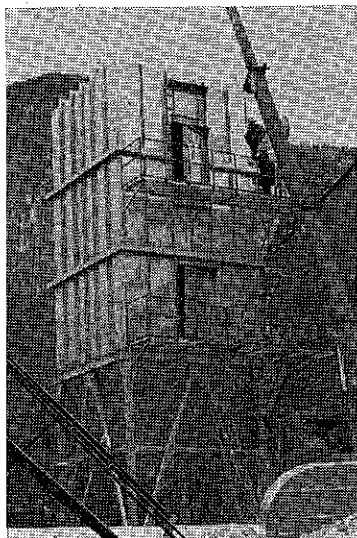


Photo. 1

b) 電気炉集塵

フェロマンガ電気炉のタップ口および電気炉上方フード集塵用に用いられているのが、Photo. 2 である。この場合は、P-1 M 5 型で、1000 M³/分の風量を処理し、タップ口の発塵が全くなくなった為、作業環境がすぐおる改善されると共に大気汚染の心配もなく、大変感謝されている。

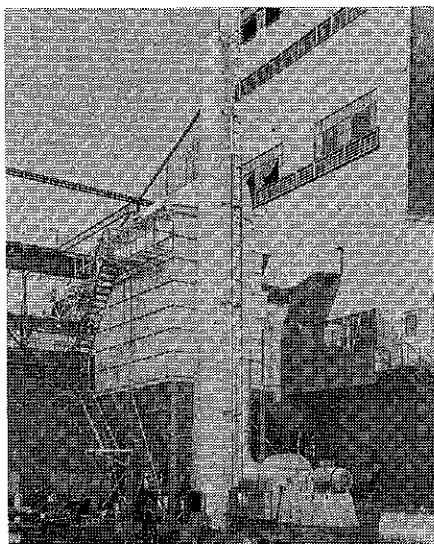


Photo. 2

c) アスファルトプラントの除塵

アスファルトプラントには、従来、湿式の集塵機が広く用いられて来たが、プラントの性格上、民家に近く設けられている場合が多く、粉塵、および汚れの問題で、最近ではバグフィルターに切り替えられつつある。特にパルスエアーは、アメリカでの数年の実績の上に湿空気の除塵にも適しているという性質が高く評価され、数多く利用されるようになった。Photo. 3 は、その一例で、200トンプラントに取り付けられたP-1 M 4 型で、排気濃度は0.01 g/Nm³ 以下となり、環境基準の0.2 g/Nm³ 以下を大きく上まわっている。

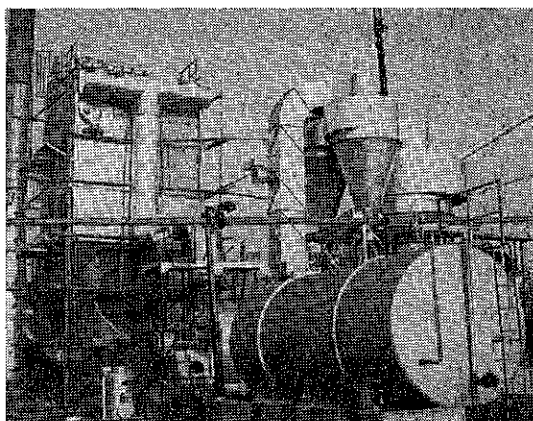


Photo. 3

6) 終 り に

我々は今、全世界の Mikro-Pul の仲間、ジャンボパルスエアーの技術を送り届ける為に忙しい毎日を送っている。これは、去る6月 Summit の小さなホテル "Subanban" で行なわれた Mikro-Pul のセールスカンファレンスで東門本部長がこのジャンボパルスエアーを報告し、我々の仲間と約束した結果である。

応用技術

電気集塵機 ホソカワ/マイクロ

エレクトロフィルの性能について

1) 始 め に

本誌、16号に紹介された電気集塵機、ホソカワ/マイクロエレクトロフィルについて、乾式で用いるよりもむしろ湿式で用いた方が有効であるとの情報を Mikro-Pul 社より数多く入手した。すなわち、塩基性酸素転炉、硫

酸製造、溶解炉、コークス炉等より排出される排ガスの除塵とガス洗滌において、その特性がいかに発揮されている。特に最近、ソーダペーク法のアルミナ電解炉より発生する弗素ガス、および粉塵の除去には、数多くの本機が採用されているということである。

そこで、我々は、世上公害の根元とされている排煙の脱硫、除塵に本機を用い得ることの可否について検討すべく、とりあえず純 SO_2 の吸収性能について検討を加えたので、その結果の一部を報告する。

2) 本機の特長

本機の構造については既に報告されている通りで、これを湿式で使用した場合、集塵板を液で洗っている為、タール分、粉塵等の堆積が全く無く、ガス流れによる波立ち以外、常に平滑な面が保たれ、放電極と集塵極の距離が一定で、常時一定電圧で運転される、またこの集塵極が、濡壁となり、気液接触が有効になされ、すぐれたガス吸収効果が得られ、集塵とガス吸収が一挙に行なわれる。更に本機において、パッフルプレートが特異な効果を出している。すなわち、含塵ガスを均一に分散せると共に、粉塵の再飛散を防止し、更には、集塵極の役

目をなし、効率を著しく高めている。なお、本機を用いる場合、集塵板に乾燥された部分が出来ると効率低下する。従って被集塵ガスを適当な方法で飽和状態を送り込み、これを防止している。

3) 実験装置と実験方法

Fig. 1 は、本実験装置のフローシートである。空気は別に設けられた風車で、WEPに押し込み、 SO_2 をポン

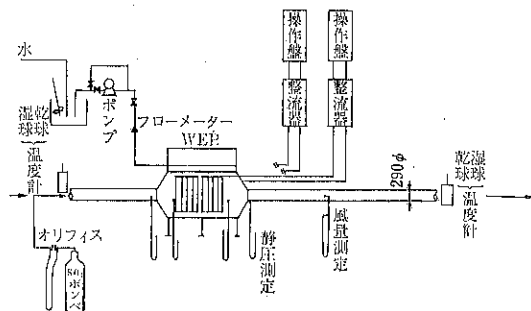


Fig. 1 実験装置のフローシート

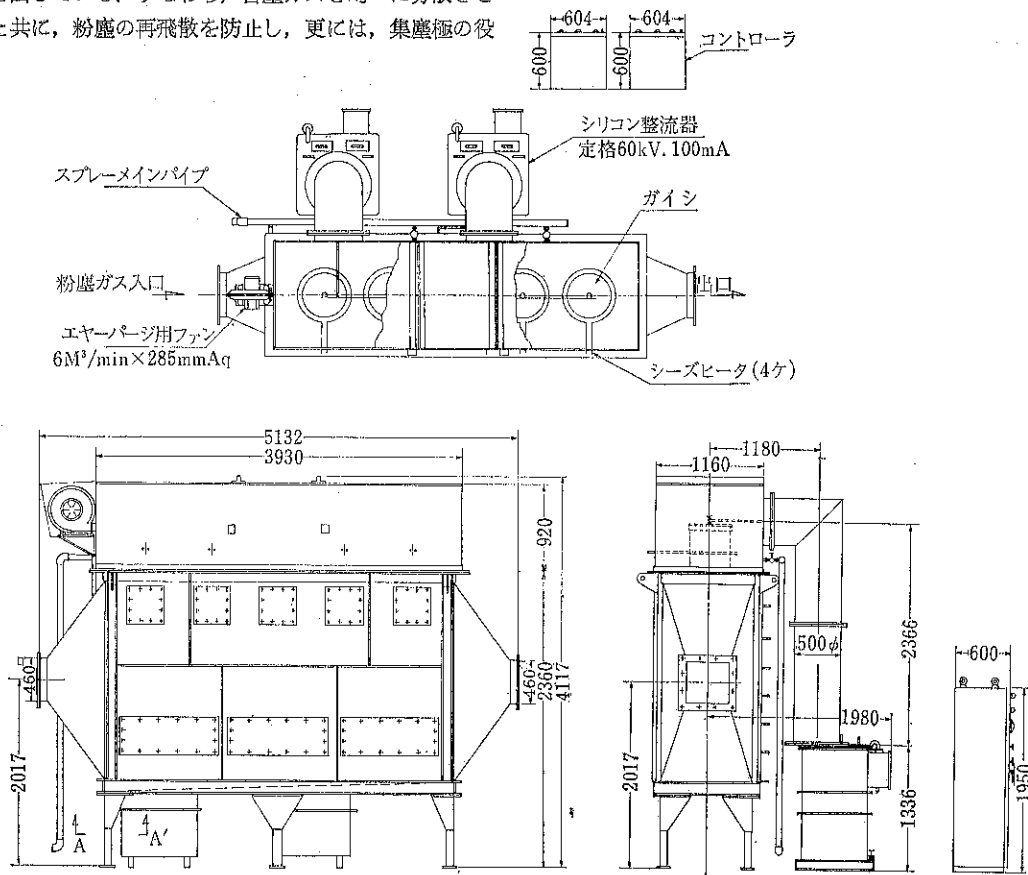


Fig. 2 実験に用いたホソカワ/マイクロエレクトロフィル

べから気化装置で気化させた後この空気流中に送り込み、充分混合したと思われる場所（WEP入口で、SO₂吹き込みにより5m離れた処）で、入口SO₂濃度を検知管式で3度測定し、その平均値を採用した。なお風量は、WEP出口側でピトー管により測定し、その調節は、風車吸気側にあるダンパーによった。吸収液は、各実験毎にpH調節し、液は一回だけで系外に排出させた。WEPの本体寸法はFig.2に示す通りである。電圧制御装置としては、オリジン電気製のものを電圧の昇降は、一定のスパークレートを保つ様に自動的に変化する様に設定した。

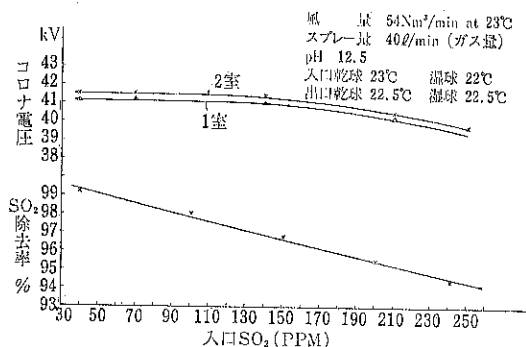


Fig. 3 入口でのSO₂量に対する出口での除去率とその時のコロナ電圧

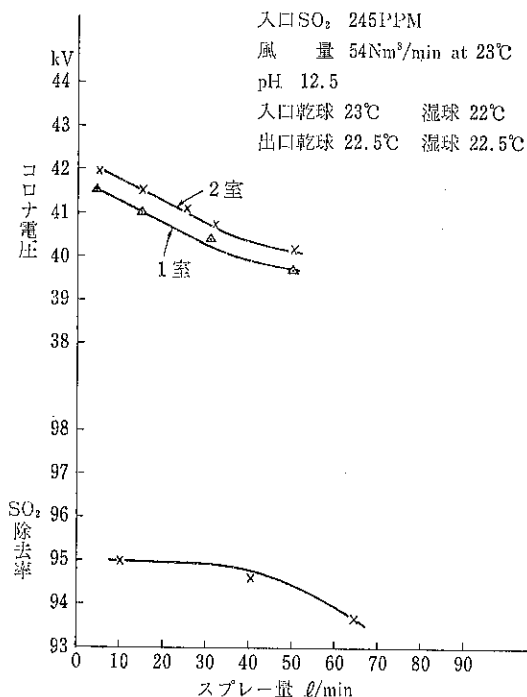


Fig. 4 スプレー量に対する出口でのSO₂除去率とその時のコロナ電圧

4) テストの結果

Fig.3に、SO₂濃度に対する除去率とその時のコロナ放電圧との関係を示した。この場合風量は54Nm³/min、ガス温度23℃、スプレーは気液比0.69（液量40ℓ/min）でpH12.5のNaOH水溶液とした。コロナ電圧は、SO₂濃度が高くなるにつれて、少しずつ下がってきている。更に第二室は第一室に比し、SO₂濃度が低い為全体的にコロナ放電圧が高い。

スプレー量を変化させた場合のSO₂除去率と放電圧との関係を示したのがFig.4である。この場合SO₂濃度は245P.P.M.、風量54Nm³/Min、NaOH水溶液のpHは12.5とした。スプレー量（気液比）がある一定値以上になると、予想に反し、SO₂の除去率が低下して来た。これはスプレー水の液膜厚さの増加により操作電圧が下がった結果と思われる。

機内通過風速に対するSO₂の除去率はFig.5に示される通りで、操作電圧は、風量の変化に対し変化しないが、効率は風速が速くなると極度に悪化する。

5) アルミ電解炉の排気処理への応用

次に、現在アメリカにおいて、このEPを用い大成功をおさめているアルミ電解炉の排気処理について、その一端をP.M社の研究報告より抜き出し紹介する。

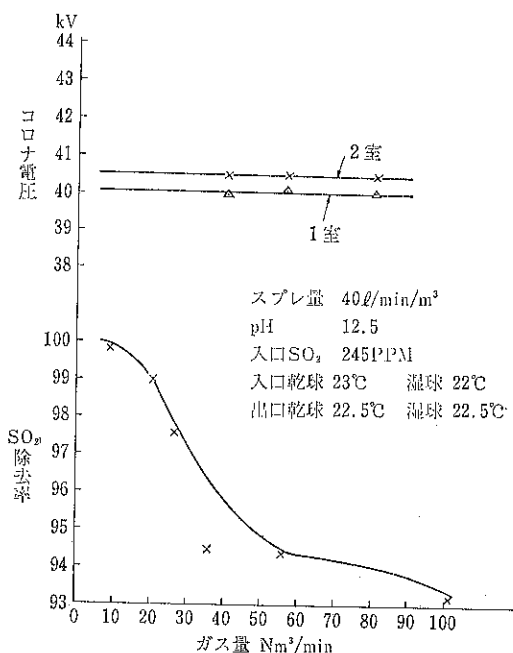


Fig. 5 風量に対する出口でのSO₂除去率とその時のコロナ電圧

一連の実験は、実際稼働中のソーダベーク法の電解炉に 400 m³/Min 及び 2000 m³/Min の処理能力の WEP を取り付け、18ヶ月運転した結果である。炉のスカート部から吸引された排ガスは、外気でうすめられた上、二段の水スプレー装置で冷却され 27°C~38°C の飽和ガスとして WEP に送り込まれている。WEP 内では、処理ガス 1 m³ 当り 0.5 l の割合で、ソーダ灰により pH を 8~9 に調整した水をスプレーしている。Fig. 6 は得られた結果をプロットしたもので横軸は運転中の任意の時刻を、縦軸には作動電圧、粉塵、ミストの捕集効率、入口ガス中の弗素ガス濃度、及び弗素ガス除去率を示した。図にみられる如く、粉塵の捕集効率は、作動電圧にほとんど関係ないが、弗素ガスの除去率は、電圧に左右される傾向にあり、いずれの場合も排気の弗素含有率は 3 PPM 以下となつて、排出基準以下の濃度となっている。

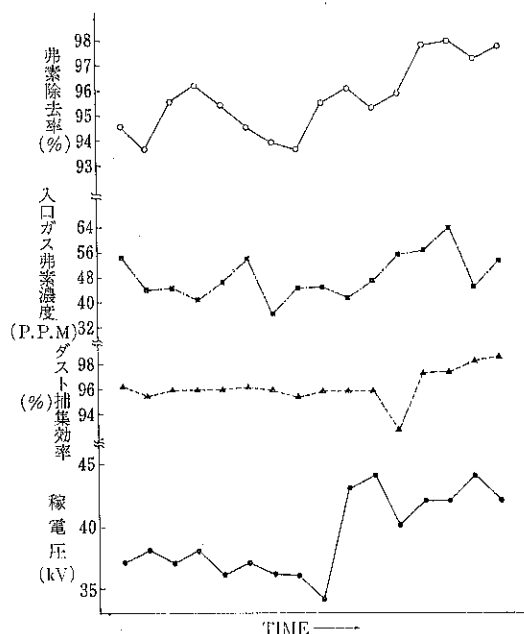


Fig. 6 アルミナ電解炉の運転実績

6) む す び

SO₂の吸収について行った実験、HFの吸収例よりみて、当初の目的に本機は充分使用し得るの見通しが得られたので、9月上旬よりボイラーに直結、パイロットプラントテストを実施する予定である。なお、本報以外にもテスト機を客先に供試しテストを行っているが、それら一連のテストで、飽和状態で、ガス処理を行っているの、排気が当然白く見えなければならないのに、全くそれが認められない。その原因は不明であるが、いわゆ

る目視公害もなく、アフターバーニング等が省略し得るという予期せざる効果があることが判った。

導入技術

タンカー用不活性ガス装置

“マリタイム”

1) 始め に

タンカーの爆発事故が時々新聞紙上ににぎわしている。最近の例では、昨年末川崎汽船の“ていむず丸”が川崎沖合で爆発火災事故を起している。幸いこの場合は大事故にならずにすんだが、荷揚中、およびタンククリーニング中に爆発の危険度が高いとされている為これが何時大事故にならないとも限らないので、最近世界各国でもタンカーの防爆対策が真剣に論議され、また、その対策が急がれている。

現在タンカーの防爆対策として一般に採用されている方法は、主としてタンクが空になった場合並びに、タンクを洗滌する時に適用するもので

- a) Rich-System ; ガス濃度を爆発上限界以上にする。
- b) Lean-System ; ガス濃度を爆発下限界以下にする。
- c) Inert-gas-System ; タンク内に不活性ガスを導入しタンク内を不活性化させる。

の3方式がある。

マリタイム方式は、上述の(C)のケースで、エアトロンスクラバーのソフトウェアの代表的な例といえるものである。

2) 装置の説明

タンカーの防爆用に用いられる不活性ガスは、一般に市販されている不活性ガス装置を用いる場合もあるが、多くの場合ボイラー排ガスを冷却洗浄し、SO_xを0.03%以下、O₂を2~6%程度にしたもので、マリタイム方式の場合は、Fig. 1に示す様なフローシートになっている。ボイラー排ガスは、煙道の一部より抜きとられ、本装置の心臓部である冷却洗浄部に送り込まれる。この部分は Pre-Cooler、ベンチュリースクラバー、およびパックドタワーより成り立っている。排ガスは、Pre-Cooler 部で飽和温度近く迄冷却された後、ベンチュリー部に送り込まれここで海水により煤煙等の固形分を洗い落とし、パックドタワーでは、SO_xが洗い除かれた後、ヒー

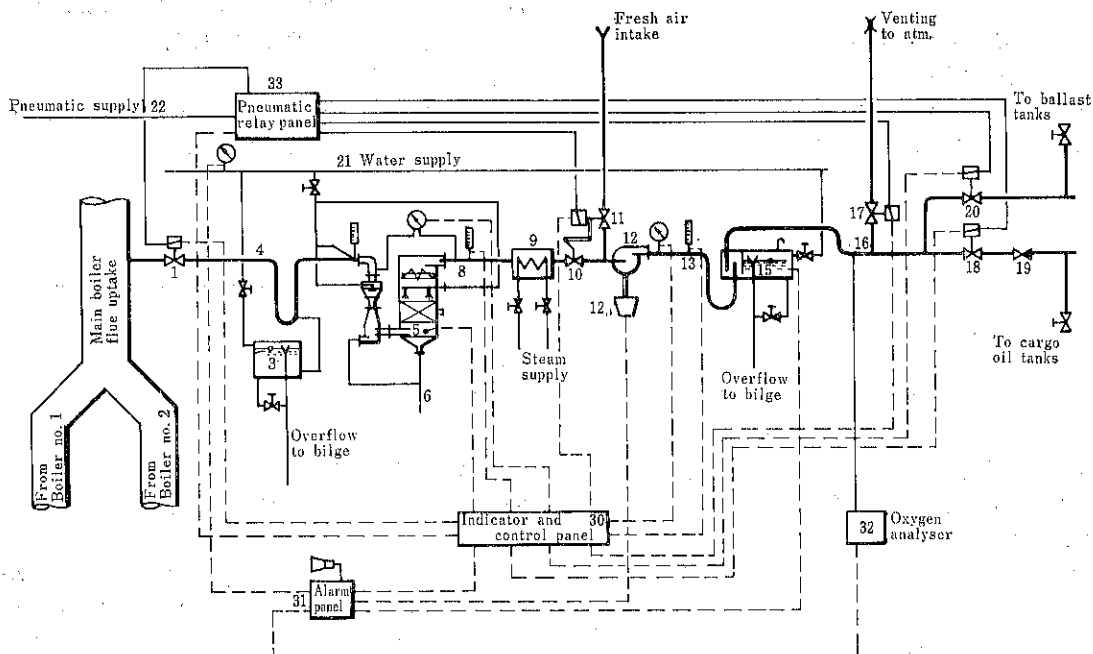


Fig. 1 TYPICAL FLOW DIAGRAM:

ターで加温され、ガス中の水滴等を完全に除去した上で、不活性ガスとしてファンにより Water-Seal を経て各カーゴタンクへ送り込まれる。なお、洗浄に用いた海水は海へ放棄する。

3) 運転実例

次に示す数値は、11万トンタンカーに積載した本方式の運転実例である。

a) 煙道ガス条件

ガス量 10,500 Nm³/Hr
 ガス温度 230°C (最高300°C)
 ガス組成 O₂: max 4.2% CO₂: Min 12.5%
 N₂: 78% H₂O: 5%
 SO_x: 0.3%
 ダスト量 250 mg/m³

b) 装置の概要

b-i) ベンチュリースクラバー

型式: -400
 概略寸法: 高さ 3,200 mm
 巾 1,300 mm
 圧力損失: 600 mm/H₂O (最大時)
 水量: 500 l/Min

b-ii) パックドタワー

型式: -400

直径: 2,000 mm
 高さ: 6,500 mm
 充填物: ポリプロ製
 圧力損失: 80 mm/H₂O
 水量: 2000 l/Min

c) 不活性ガス装置の性能

ダスト除去率: 1μ 以上 ……98%
 1μ 以下 ……94%
 SO_x 除去率: 99% (不活性ガス中に SO_x は 0.03 %以下)
 ガス温度: 25~27°C
 (パックドタワー出口では水温より少し高い程度であるがヒーターで加熱)

4) 本装置の特長

a) ガスの洗浄冷却効果が大である

これは、陸上で公害防止機器として広く用いられ信頼されているホソカワ/エヤトロンのベンチュリースクラバー、およびパックドタワーが組合わされ洗浄冷却を行っている。

b) メンテナンスが容易である

本システムに使用されている機器がすべて独立して設けられているため、個々の機器を別個に修理保全ができ

る。

c) 安全で確実な運転が持続できる

特殊設計になるデッキウォーターシールを採用しているため、カーゴオイルタンクから煙道へのガスの逆流を完全に防止している。また、バックドタワーを採用して

いるため、船のローリング、ピッチング等ゆれに対しても常に安定なガス洗浄効果が得られる。

d) 運転が容易である

全自動システムのコントロールパネルが組み込まれているので、誰でも容易に運転できる。

新製品紹介

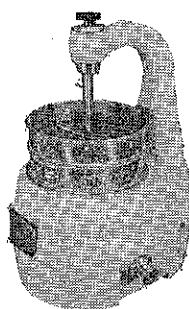
試験室用湿式篩分機

タイラー標準篩などを用いて、300メッシュ程度の篩分けを行うには、乾式では目詰りを起して篩えなくなるため、普通は湿式法が採られています。

試験室などでは水道水を篩の上から流して、網面を筆ではいたり、網の下側を手でたたいたりして行われていますが、かなり手間がかかり、篩分けの条件も一定しません。

ここに紹介する装置は、この面倒な篩分けの操作を自動的に行うもので、ゴムホースを水道につなぎ、100Vのコンセントを電源に差し込めば、後は標準篩の中に試料を入れるだけでOKです。

水道のコックをひねりますと、スプリンクラーから水が網面上に噴出し、その反力でスプリンクラーは勢いよく回転し、試料粉体を流し落します。電磁振動によって



ダイアフラムが振動し、これは空気を媒体として網面のみを振動させますので、篩分けは一層効果的となります。

たとえば、325メッシュで95%パスの炭酸カルシウム微粉末、100gを篩分けするには、従来の手による方法では2～3分間を要しますが、本機を使用すると約1分で篩分けが終了します。篩分け中は人手が要りませんので、操作する人は次の試料の準備ができ、試料が多い場合は特に能率が上がります。また、篩分け条件が一定しますので個人差がありません。

仕様	型 式	WST-1
	電 源	A.C. 100V 50/60Hz
	消費電力	30W
	使用標準篩	直径 20cm
	寸 法	巾 30cm 奥行 40cm
		高さ 50cm
	重 量	18.5kg

湿 潤 粉 体 の 供 給 機

磯 細 川 鉄 工 所

化 学 機 器 事 業 本 部

1. は じ め に

乾燥している粉体を一旦貯槽にためてこれを排出する時には、通常各種の架橋現象をおこし、液体のようにスムーズには排出されないのをお互い多く経験するところなので、偏心ホッパー、プレッシャーブレイカーなどの形状的な配慮をするか、またはブリッジブレイカーあるいはホッパーの開口を大きくとり、それにビンアクチベーターをとりつけ強制的に粉体の溜動あるいは揺動をおこさせて架橋を破壊して排出させるなどの機械的手段を講じている。このような処置をへてホッパーから落下した粉体は、ほとんどスクリュコンベアーでトラブルなしに搬送される。

ところがこの粉体が吸湿または製造工程中での湿原料である場合には、上記の手段でも排出困難であったり、あるいはたとえホッパーから落下したとしても、スクリュコンベアーではスクリュに附着して、これを棒状にしてしまい、遂には搬送不可能の状態をおこすことが往々にしてある。なお同一粉体でも湿分の多寡によってマクロ的物性は大幅に違ってくる。

この取扱い困難な湿潤粉体の排出機としてよいものはないか。特に湿原料は製品となるまでに必ず乾燥工程をへねばならない。この方面で多く使用されている気流型乾燥機では、湿潤の原料供給の際に外気を遮断しながら連続的に供給するのが乾燥能率をあげる要点である。従って、湿原料供給機は乾燥装置の表面上の主機ではないが、装置の能率および円滑運転上の重要な機械といえる。

2. 湿 潤 粉 体

水分含有率は含水率 (D.B.) または水分 (W.B.) で表示されるが、その数の大小で粉体性状を直ちに判定するのはむづかしい。たとえばイルメナイト、銅粉のようなものでは6% W.B. で水分の析出が始まり、18% W.B. 以上であれば分離した水がでてくる。一方カーボンブラック、水酸化アルミのようなものでは50% W.B.

以上でも水分の析出はみられない。また滑石の8% W.B. のものと、微粉にしたものの8% W.B. では水分のある感じ方が違う。

これらの感覚的、物性上の相違は粉体と水との親、疎水性、真比重、粒度、粒形などの関連、水分の容積混入率や水分の粉体への分布 (表面か内部か)、あるいは空気を含むか、含まないかなどの多くの要素によるものと思う。

湿潤粉体を物性上から区分すれば次のごとくなる。なお要因としての粒度、水分などの表示は「比較的」に判断していただきたい。

1) 粉粒状 (パサパサ状)

(a) 粒度大、真比重小、水分量小

(例) イルメナイト、砂、粉砕炭

(b) 粒度小、真比重小、水分量大

(疎水性粉体あるいは水分として内部水分大の粉体)

(例) 水酸化アルミ、植物粉末

2) ケーク状 (ボソボソ状とネバネバ状)

粒子微粒子、真比重中・小、水分量大・中

(例) 酵母かす、有機顔料、カーボンブラック

この場合には粉体の物性などに支配される要因があると思うが、湿潤粉体が一つのブロックを形成してこれを手で割ることもできれば握ることもできるようなものと、全体がねっとりとして、さりとて泥水状ではなく、グリスよりやや硬いようなもので、握れば指間から湿潤粉体がでてくる軟いものがある。このケーク状のものは、輸送段階でかきまぜたり、振動を与えると流動性のゾルに変る、いわゆるチクソトロピー現象や、その逆のダイラタンシー現象をおこす。

3) 泥 状

粒子微粒子、真比重大・中・小、水分量極めて大

(例) 活性汚泥、クレーなどの沈殿物

この場合は多量の液中に粉体が分散しており、手で握る以前に指間からもれるぐらに流動性がよい。

3. 湿潤粉体の供給機

このように湿潤粉体の物性は多岐にわたっており、その供給機も多様化しているが、この内粉粒状のものと、泥状のものとが最も処置し易いといえる。すなわち、前者ではスクリーンで、後者ではポンプとそれぞれ単純に決定して、トラブルも少ない。

最もむづかしいのはケーキ状粉体の場合で、水分の変動によってはネバネバ状からボソボソ状へ簡単に移行するので、湿潤粉体供給機としては現状の物性に対処するとともに、多少の水分変化による物性変化にもよく対応できるものが要求される。今回細川粉体工学研究所がこの要求をみたすべく「湿潤粉体供給機」を開発したので機能の概要を紹介する。

試料としては炭酸カルシウムの水分23%、20%、17.5%、15.3%のものを用いて排出量を調べてみた。

1) 回転数

それぞれの水分のものに回転数をかえた時の排出量の関係は図1に示すように回転数の上昇とともに排出量は増大するが、同一回転数では17.5%がどの水分よりも最も大きな排出量を示している。

2) 水分

これを水分と排出量との関係におきかえたのが図2で

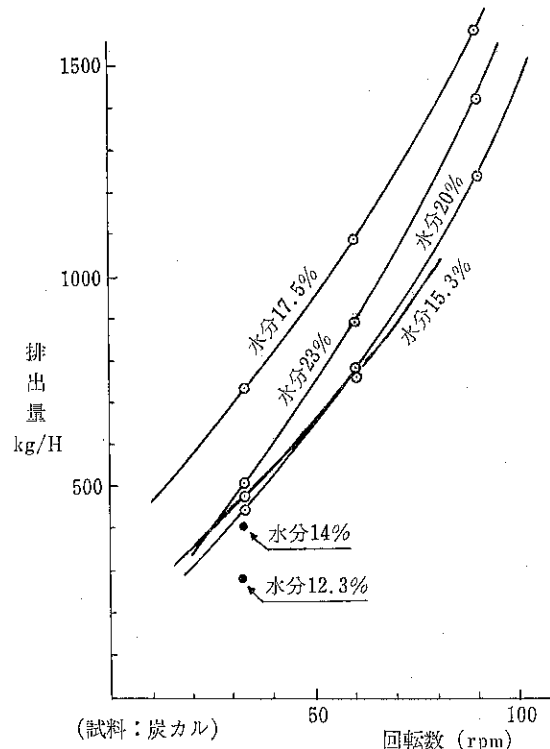


図1 水分に於ける回転数と排出量の関係

ある。すなわち23% W.B.から漸次排出量は減少し、20%ぐらいから排出量は増大して17.5%をピークとして再び下降しはじめることを示している。一方、松山氏らが本誌10号の「振動スクリーフィーダーの試作と性能」で水分と排出能力について発表しているものは、これとは逆で、対照的なものであり図3に転載する。すなわ

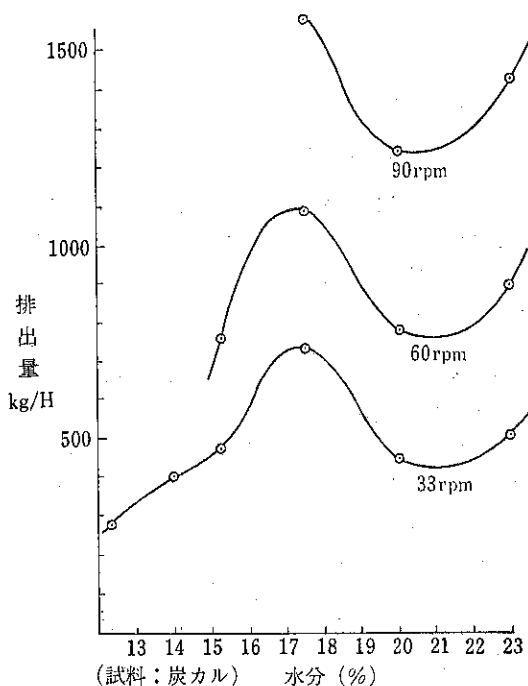


図2 回転数に於ける水分と排出量の関係

—— ユーラスモーター 3600r.p.m. 振巾量2.0mm.
 - - - ユーラスモーター 3600r.p.m. 振巾量0.5mm.
 --- アンバランスモーター 1800r.p.m. 振巾量1.0mm.

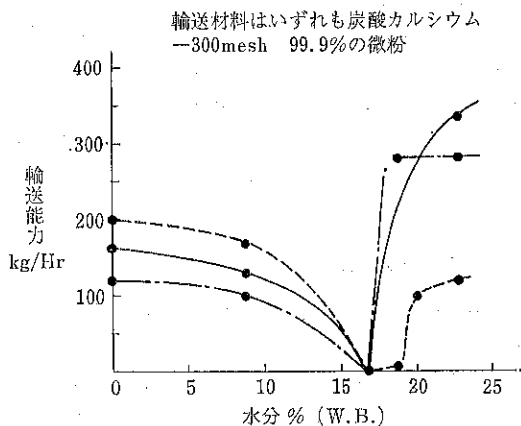


図3 振動スクリーフィーダーによる湿潤炭酸カルシウムの輸送能力 (松山ら：粉砕 No.10)

ち、図3では水分約17%では振動量、振巾を変化しても排出されないことを示している。これは振動による粉体のダイラタンスーによってホッパー内で一つの大塊となることと、スクリー部でのチクソトロピー現象により水分が析出して粉体がスクリーとスクリーケーシングの間でスリップして、スクリーが棒状となることが原因と思われる。

炭酸カルシウムの水分約17%の湿潤粉体はボソボソ状の比較的に大きなブロックを形成しており、本機では振動を与えずに排出機構へ粉体をかみこませるようになっているので、湿潤粉体としての物性は比較的大きな変化

をおこさず、見掛比重の大きなまま排出されるからこの点にピークがでてくると考える。また輸送不可能の点がないことからこの方が粉体物性に対してタフであるという。

4. む す び

広範囲の物性分布を持つ湿潤粉体の供給機の機能の一端を紹介したが、湿潤粉体は乾燥粉体以上に一對一の傾向が強く、その経験をつみ重ねて万能化されるのであるから、大方の御協力、御指導をお願いする次第である。

粉 の 話

社内報より

お しろ い の か お り

粉白粉にかおりをつけるには製品全体に一度に香料を加えるのではなく、まず香料を吸着しやすい粉体に香料を加え、密閉容器中で熟成し、完全に吸着してから他の粉体と混合します。また粉体を粉碎しながら付香して、できたての表面に香料を吸着する方法も考えられています。粉体につけられている香料は酸化したり、蒸発消失したり、変色したりしないことが必要です。

一般に香料は粉体成分、あるいはその不純物との接触により変質しやすいものです。香料の選択や、粉体の前処理、付香温度、熟成時間などの付香法に化粧品メーカーの経験と技術がこめられます。また香料もいろいろ調合されたものであり、それぞれの成分の蒸発しやすさが異なり、長時間同じかおりを保つことがむづかしい、あるいは付加した粉体により香料を吸着する力が異なるため、同じ香料を使用しても粉体構成が違えば同じかおりを得ることは期待できないなどのむずかしさがあります。

固型白粉コンパクトパウダーは粉白粉に適当な結合剤を加え乾燥加圧したもので、パフによる摩擦で表面から容易に粉末化し、パフに付着してはがれねばなりません。

メイキャップクリームは、仕上化粧用に粉体をクリームの中に分散させたもので、メイキャップあるいはファンデーションと呼ばれています。粉体をクリームの中によく分散させ、夏冬にわたって一定した品質を保つために苦労が掛けられます。また皮膚に塗った場合と、クリームをそのまま表面で見る場合とで色調は当然違ってきます。したがって製品の適切な色調の選択、及びその色彩管理には粉白粉以上の困難が伴います。

このように化粧品は多くの成分によって作られたものであり、その相互関係がうまく釣合ってすばらしい商品となっています。また感覚的な要素が非常に多いため、総合的な良し悪しの判断もむづかしく、各メーカー独自のの方法によって商品の検査、開発の判定がなされています。

この項は石粉にかおりをつけただけの化粧品がなぜあんなに高価になるかを説明するつもりでしたが、うまく表現できなかったようです。化粧品をお買いになる時は、粉とかおりのほかに夢、希望、幸福、満足がいっしょに手にはいるような努力が陰でなされているとご理解ください。

ホソカワ ニュース

○事業部制の発足

昨今、粉体処理機器装置に対して産業の各分野から、より高度の技術が要求され、その製品はますます複雑化され、多岐にわたっている。そういった社会のニーズに対処するには、粉体処理という大きな分野を区分し、各パート毎に優れた専門技術者を育成することが急務である。こうした情勢に対処して、昭和46年12月21日新しく事業部制が発足した。すなわち、製品を類別に分担して、集塵機事業本部（集塵）、化学機器事業本部（混合、乾燥、造粒等）、粉体機器事業本部（粉砕、分級等）、海外事業本部（海外関係全機種）の4事業本部に組織された。また、複雑化する工程を、より合理化するためには、システムエンジニアリングが不可欠となる。これら各事業部の製品が、それ自体独立した製品であると同時に、各々の専門技術者がつながりをもつことによって、高度のシステムエンジニアリングの実現を計ることになる。

○マリタイム社（ノルウェー）と

タンカー防爆装置の技術導入契約締結

昭和47年3月、ノルウェーのプラントメーカー、マリタイム、プロテクション社（本社オスロ市）との間で「原油タンカーなどの爆発防止用不活性ガス装置」に関する技術導入契約を結んだ。同装置はすでにノルウェー最大の船会社ヘイグ・リース社が9隻の大型タンカーに採用して実績をあげている。イギリスでは海運会議所が同装置の全面採用を義務づける決定をし、わが国でも昨年からの必要性が急速に高まってきている。

同技術は不活性ガスを用いてタンカーなどの爆発を防止するためのシステムで「ベンチュリースクラバー」（湿式集塵機）でカーボンを取除き、同時に「バックドタワー」（ガス洗浄装置）で硫黄を除き不活性ガスとする仕組み。

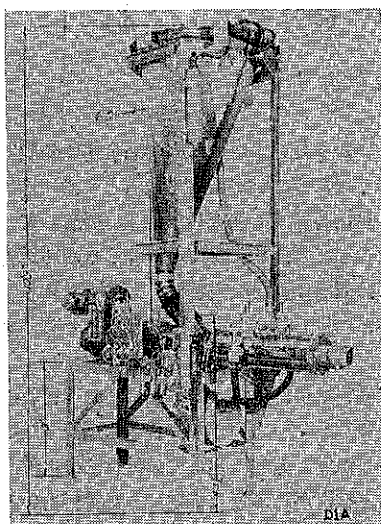
○カーター社（米国）と微粉体の袋詰

め、減容機等の技術導入契約締結

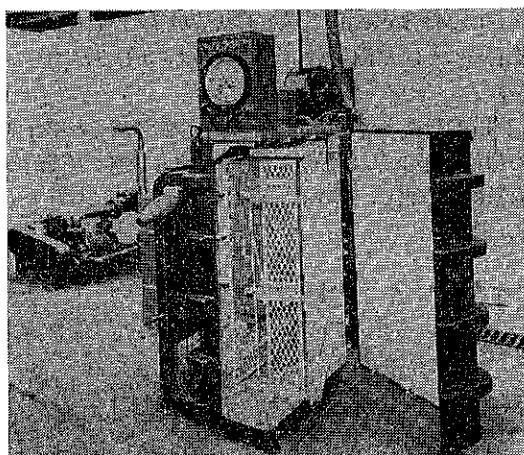
昭和47年3月、アメリカの有力機械メーカー、カータ

エンジニアリング社（本社イリノイ州ダンビル市）との間で「真空式粉体充てん機、減容機等」に関する技術導入契約を結んだ。

同技術は微粉体を袋詰めにする際の全工程に使う各装置を体系的に3種類に分けて機械化したもの。ひとつは「ノンブリッジングホッパー」機。ブリッジ防止機構を備えたホッパーで充てん機、減容機の前工程として使う。ホッパー自体に往復振動を与えて粉体の円滑な排出を可能にする。次に粉体を袋または容器に詰める前に粉体のかさ比重を増加させ体積を減らすための減容機「デンシファイヤー」。同機は主として回転スクリーンとこれを囲む二重の円筒からなっており、内筒は多孔板フィルタ、外筒は真空室である。粉体がスクリーンで輸送され



ノンブリッジングホッパーとデンシファイヤー



バッグフィーラー

る間に内筒のフィルターを通して粉体粒子間の空気を真空室に吸引する機構を備えている。そして最後に微粉体を袋または容器に充てんするためのバキュームパッカー「バッグフィラー」。一定容量の袋またはドラムに能率よく多量の微粉を充てんしたり、また逆に一定量の粉体をより小容量の袋またはドラムに充てんする、充てん能力は通常毎分1〜3袋、精度は25 kg（1袋）につき通常120 g以内の誤差の範囲に納めることができる。充てん容器の出し入れを除く工程は、すべて自動化されており、また作業時に生ずるチリなどの発生を防止する工夫もされている。

○英国に欧州向け販売会社

「ホソカワ・ヨーロッパ」社設立

昭和47年9月、英国に全額出資の欧州向け販売サービス会社「HOSOKAWA EUROPE LTD」（本社ロンドン、資本金3万ポンド）を設立した。

これまで英国に販売代理店を設けて欧州各方面に輸出してきたが最近欧州方面でホソカワの技術が高く評価され市場の成長性が高まってきた。ホソカワヨーロッパ社設立によって、これまで代理店に任せていた販売業務を直接行なうと同時に技術者を派遣してエンジニアリング業務も手がけながら英国だけでなく西独などEC諸国も含めた全欧州市場へも輸出。当面日本から輸入する主要機器に現地で調達する送風機などの関連機器を取付けて粉体処理装置とするほか集塵機などの公害防止機器とも組み合わせてシステム販売に重点を置く。直接販売活動のメリットである積極販売、円滑な業務処理、ゆきとどいたサービスを行なうことにより輸出の促進が計られ、今後の発展が期待できる。

○枚方事務所・工場建設工事完成間近

第4次長期計画の一環として枚方建設計画第3期工事及び大阪本社事務所（旧本社建物）増改築などの建設計画が発表された。

既に枚方事務所及び工場増設工事の地鎮祭を去る4月16日に終え、年内（11月中旬の予定）完成をめざして工事は順調に進んでいる。

枚方事務所は鉄筋コンクリート5階建、敷地面積約700 m²で細川粉体工学研究所と対面している。枚方工場増設は既設工場（二棟）と並列して二棟増設、敷地面積約3,800 m²、また既設工場と増設工場の間に工場事務所（4階建）を新設し年内完成の予定である。

○71年秋〜72年夏 ホソカワ出品展示会

’71化学プラントショー

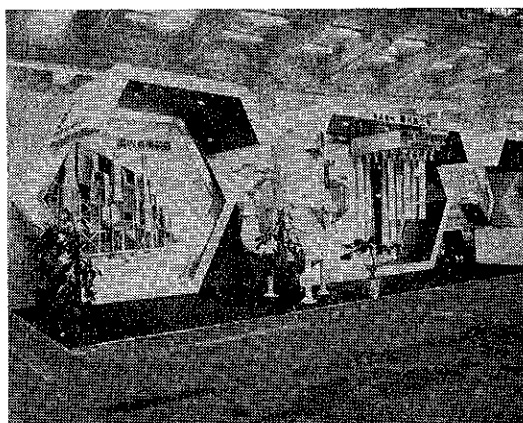
と き 昭和46年10月15日〜10月20日

ところ 東京・晴海・国際見本市会場

出品機種 ①ホソカワ／マイクロ ベンチュリースクラバー

②ホソカワ／マイクロ パルスエアー

（P-30Aビンベント型）



大阪国際見本市

＜インターエンジニアリング’72＞

と き 昭和47年4月18日〜5月1日

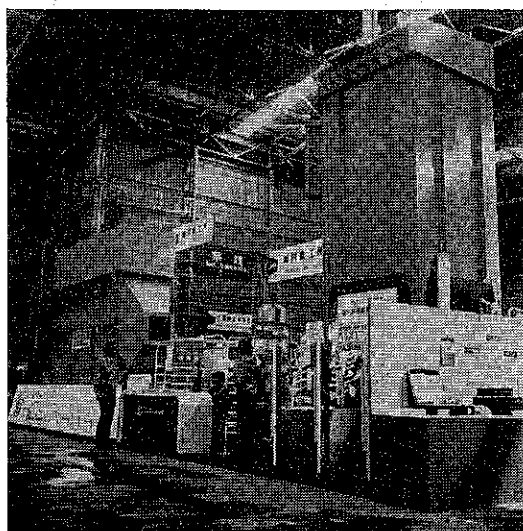
ところ 大阪国際見本市港会場

出品機種 ①ホソカワ／マイクロ エレクトロフィル

②ホソカワ／マイクロ VWDスクラバー

③ホソカワ／マイクロ パルスエアー

（SP-64-8）



海外出張

渡航年月	渡航者名	出向地	用務
46年11月	社長、東門常務、 小林貿易課長、豊 立研究員	ドイツ	Mikropul G.m.b.H. 研究開 発会議出席
47年1月	東門常務、柴田技 術係長	U.S.A.	電気集塵機とド ライスクラビング 装置の調査、見学
3月	社長、間嶋常務、 佐藤主任	U.S.A.	提携会社訪問及 びカーター社と技 術導入契約調印
"	"	ノルウェー	マリタイム社と 技術導入契約調 印、A.S.V.社見学
4月	岩戸、織田技術係 長	韓国	商談
"	増田	台湾	技術指導
"	東門常務、鈴木主 任研究員	U.S.A.	商談
6月	東門常務、鈴木主 任研究員	U.S.A.	Mikropul 社研 究会議出席
"	社長、間嶋常務、 佐藤主任	イギリス	ホソカワヨーロ ッパ設立
7月	東門常務	ノルウェー	A.S.V. 社見学 (ドライスクラビ ング)

編集後記

「粉砕」誌に対するアンケートより

編集室

さきに「粉砕」誌寄贈者名簿作成のため、はがきによるアンケートをお願いしましたところ、多数の御回答をいただきありがとうございました。

その中に読者諸兄より「粉砕」誌に対する貴重な御意見をいただきましたので、その中の一部を掲載いたします。今後できるだけこれらの御意見を生かした編集をしてゆきたいと思っております。

◎誌面等に対する希望

- ◇もう少しやわらかい話題を
- ◇研究論文と同じ程度のボリュームの業界側からみた各種の情報。
- ◇興味を引く文献紹介欄の充実
- ◇海外の粉砕機の動向についての記事
- ◇文献毎に UDC No. を
- ◇メカノケミストリーの問題を扱って欲しい
- ◇解説を多く

◇技術的にもっとほり下げて欲しい

◇発行回数をもっと増やして、粉体に関する最新情報をもっと流して欲しい。小冊子で結構

(発行回数を増やして欲しいという意見は多数あった。)

◇投書欄、質問欄など設けては

◇投稿規定があったらよい

◇創刊号以降の索引が欲しい

◇発表された先生方の連絡先を入れて欲しい

◇他社も含めた新機種を紹介

◇何冊分かをまとめる保管用ファイルがあれば

◇粉体力学の初歩的原理(素人向きに)と操作上の失敗談等の欄

◇基礎科学的総説をもっと多く

◎平易さの希望

◇内容が専門的すぎるのももっと判り易く

◇現場作業員にも判る様な平易な問題要点を一部に

◇むづかしい理論をわかり易く解説して下さい

◎実用性からの希望

◇具体的実施例に沿っての論文の強化

◇細川製品の使用具体例をなるべく多く

◇理論より応用工程の例を数多く

◎記事の具体的な希望

◇粉体(40~100 μ)の再微粉化についての資料

◇微粉砕プラントにおける集塵、輸送を含めたシステムとしてとりあげを

◇大学など研究機関の粉体に関する研究報告をもっと紹介して欲しい

◇碎料の粉砕による化学的变化について

◇粉体間ヌレに関する報文

◇粉度分布の範囲の制御

◇粉体の輸送関係の記事

◇一15 μ 以下の微粉砕について

◇各種粉体についてのブリッジ対策

◇造粒技術についての詳解

◇集塵、公害問題を取り上げては

◇ジェットミル、ハンマミルなどにおける粉砕過程をテレビ番組「4つの目」のような感じでみてみたい

◇集塵装置関係の運転データ

(集塵公害関係の記事の希望はかなりあった)

“粉 砕” No. 17 1972年 秋季号

昭和47年10月10日 印刷

昭和47年10月25日 発行

編集発行責任者 横山 藤 平

(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

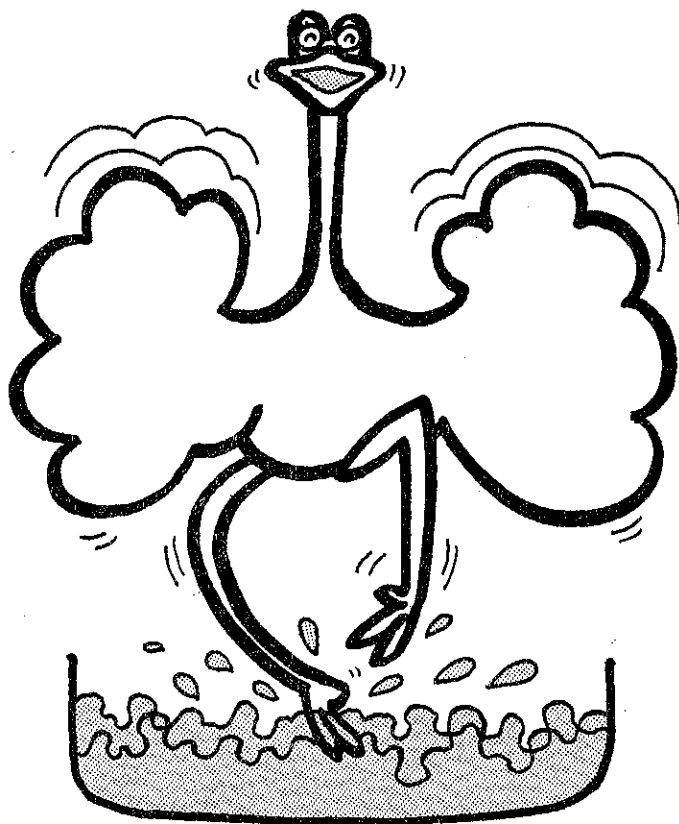
印刷所 ナニワ印刷株式会社

大阪市北区川崎町38

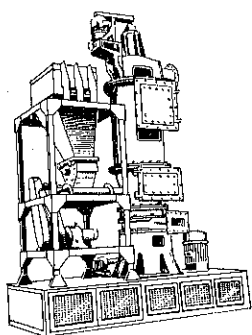
●乾燥機

●混合機

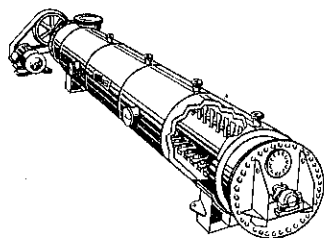
●造粒機



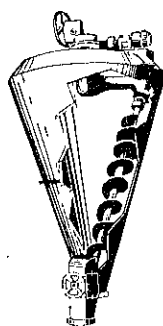
ホソカワの化学装置



ホソカワ / ミクロン
ドライヤー
No. 17 (1972)



ホソカワ / ストロング
ソリッドエアー



ホソカワ / ナウタ
ナウタミキサ

株式会社 細川鉄工所
化学機器事業本部

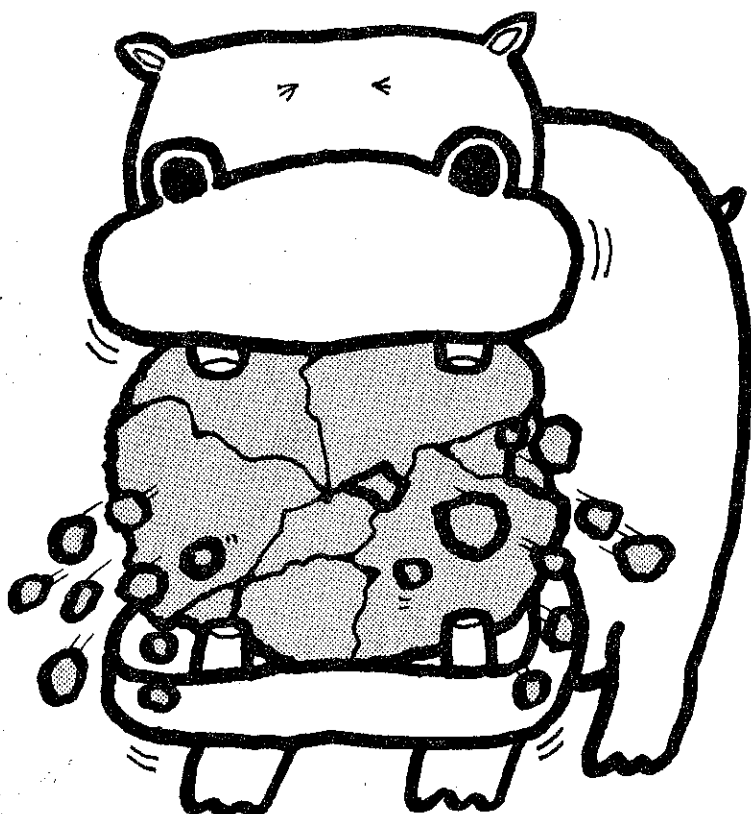
● 各種粉砕機

● 分級機

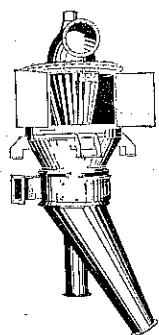
● 架橋防止機

● 供給排出機

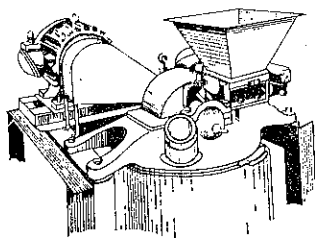
● 測定機



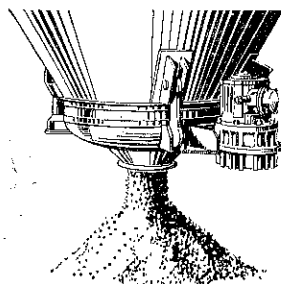
ホソカワの粉体処理装置



ホソカワ/ミクロン
ミクロンセパレータ

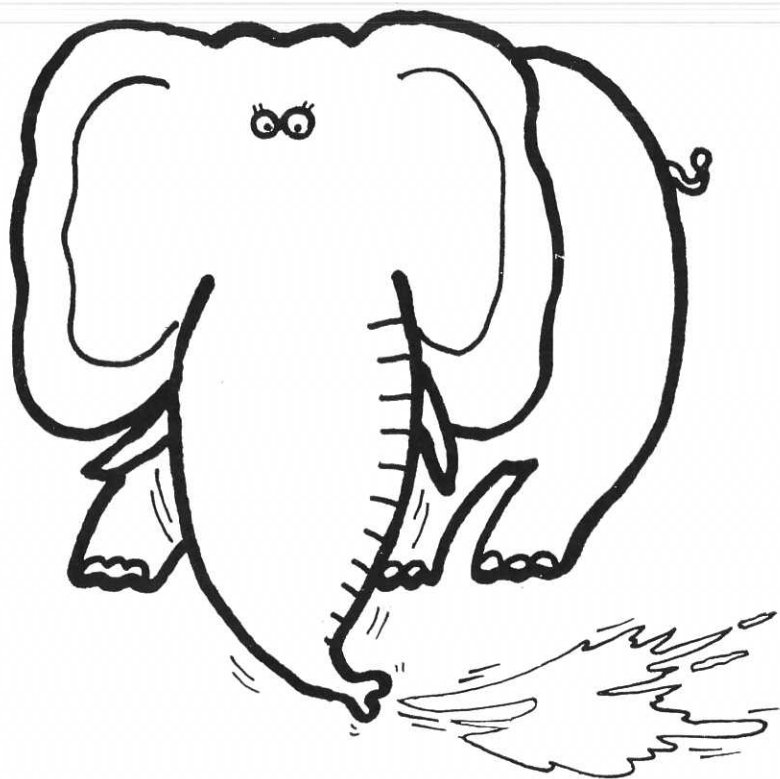


ホソカワ/マイクロ
バルベライザ



ホソカワ/バイブラ
ピンアクチベータ

株式会社 細川鉄工所
粉体機器事業本部

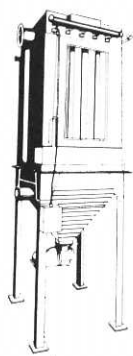


● 電気集塵機

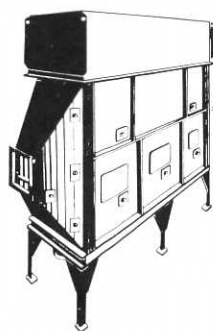
● 乾式集塵機

● 湿式集塵機

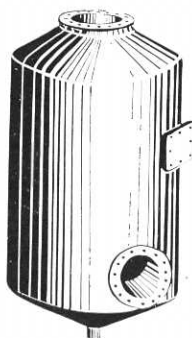
ホソカワの集塵装置



ホソカワ / マイクロ
パルスエアー

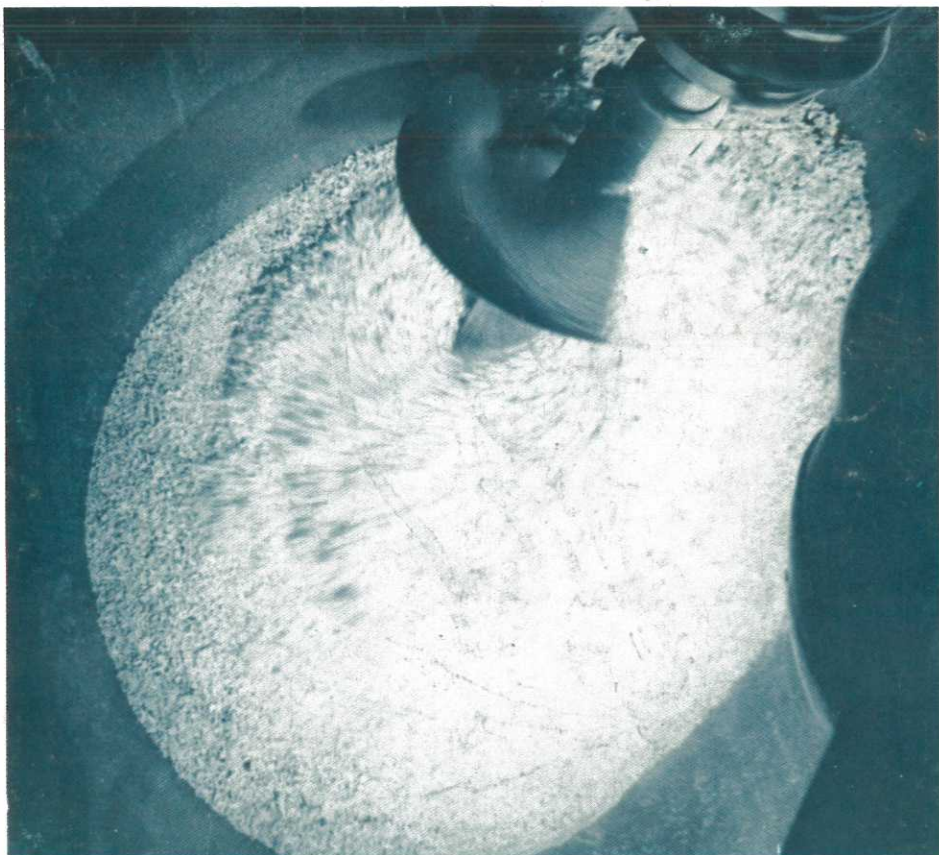


ホソカワ / マイクロ
エレクトロフィル



ホソカワ / マイクロ
VWDスクラバ

株式会社 細川鉄工所
集塵機事業本部



粉体はホソカワの原点。

システムエンジニアリングの

ホソカワ

☎ (株) 細川鉄工所

粉体機器事業本部・化学機器事業本部
集塵機事業本部

本社/大阪市港区市岡2丁目14番5号 〒552

電話/大阪06(572)5371(代) 東京03(503)2231(代)

細川粉体工学研究所

大阪府枚方市招提田近1丁目9 〒573

電話/枚方0720(57)3721~2