

粉 砕

THE MICROMERITICS

特集 粉体の単位操作と粉体物性

NO. 20 AUTUMN 1975

細川粉体工学研究所

“粉 碎” 20 号 昭 和 50 年 (1975) 秋 季 号 目 次

【巻 頭 言】	粉碎を見直す……………	中川 有三………… (2)
	“粉碎”20号によせて	
	“粉碎”誌と時のきざみ……………	北海道大学 田中 達夫………… (3)
【特 集】	粉体の単位操作と粉体物性	
	粉体物性測定上の諸問題—粉体の物性は本当	
	に測定できるようになったのだろうか—……………	名古屋大学 神保 元二………… (4)
	固気混相流装置計画上の諸問題……………	静岡大学 狩野 武………… (11)
	貯槽と粉体物性……………	横浜国立大学 青木 隆一………… (21)
	粉体物性と集じん技術……………	大阪府立大学 吉田 哲夫………… (33)
	粉粒体混合機の混合性能……………	大阪府立大学 矢野 武夫………… (39)
		寺下敬次郎
【研究報告】	流動層における粉体の混合および分離	
	—気泡の効果—……………	信州大学 佐納 良樹………… (49)
		猪爪 孝一
		秋葉 育郎
【研究報告】	流動層における粒子—流体間の伝熱係数につ	
	いて……………	九州大学 田中 勇武………… (56)
		篠原 久
		吉原 紀幸
【研究報告】	粉体の壁面付着強度について……………	北海道大学 篠原 邦夫………… (62)
		關安川電気製作所 花崎 芳朗
【研究報告】	単粒子破碎に及ぼす媒液の双極子モーメント	
	ならびに金属蒸着膜の影響について……………	東北大学 八嶋 三郎………… (70)
		斎藤 文良
【研究報告】	カスケード インパクターの捕集性能—付着量	
	と再飛散量の効果について……………	九州工業大学 上滝 具貞………… (81)
		山口大学 早野 延男
		原田 教男
【研究報告】	フロートロンを用いた連続定量供給装置の試	
	作およびその性能……………	大阪府立大学 佐藤 宗武………… (91)
		矢野 武夫
【技術報告】	試作流動乾燥機“エレカレート・ドライヤー”	
	の特性……………	細川粉体工学研究所 横山 藤平………… (99)
		中川 文雄
		彼谷 憲美
【研究報告】	エジェクター・フィードによる凝集粉体の分	
	散……………	静岡大学 渡辺 始………… (105)
		松野 孝好
		中田 好洋
【解 説】	統計的推定(第2回)……………	東京大学 菅沼 彰………… (110)
【技術紹介】	低温粉碎—リンレックスミルについて……………	關大阪瓦斯 中井 利明………… (115)
		細川粉体工学研究所 豊立 勝二
【参考資料】	容器内粉粒体層の底圧について……………	福岡教育大学 森山 龍一………… (121)
		九州工科大学 上滝 具貞
【参考資料】	板谷産ゼオライトの特性と利用……………	山形大学 高坂 彬夫………… (127)

【総 説】	粒子層内における熱と水分の同時移動現象に関する諸問題.....北海道大学 倉前 正志.....(135)
【参考資料】	標準粉体の紹介.....機械技術研究所 山下 憲.....(143)
【新製品紹介】	ホソカワ/マイクロ ジャンボパルスエアー —JTPシリーズ—.....鶴細川鉄工所 第二環境システム事業本部.....(151)
【製品紹介】	混合機.....鶴細川鉄工所 化学システム事業本部.....(155)
【ニュース】	海外ニュース.....鶴細川鉄工所 海外事業本部.....(158)
	ホソカワニュース.....(160)

豆 ニ ュ ース	鋳物砂混合機 ホソカワ/ストロング サンドターボ (新製品) (32)
	環境問題シンポジウム開かる —第9回粉体に関する講演討論会より— (98)
	産業廃棄物処理機 アレックス (特許出願中) の開発 (109)
速 報	鶴細川鉄工所社長 細川益男氏紫綬褒章を受章さる (126)

Original Reports:

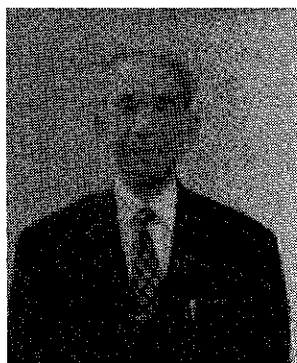
- Mixing and Segregation of the Solid Particles in the Fluidized Bed—Contribution of Bubbles—.....Y. Sano, K. Inotsume and I. Akiba (49)
- Fluid-to-particle Heat Transfer in Air-Fluidized BedsI. Tanaka, H. shinohara... (56)
and N. Yoshihara
- Adhesive Strength of Powder on a Plane Wall.....K. Shinohara..... (62)
and Y. Hanasaki
- Effect of Dipole Moment of Liquids and Evaporated Metal on..... (70)
Single Particle Crushing.....S. Yashima and F. Saito
- On the Collection Efficiency of a Cascade Impactor..... (82)
—Effect of the Striking and Rebound Phenomena—.....T. Jyotaki, N. Hayano
and N. Harada
- Development of a Continuous Solid Particles Supplier with..... (92)
Constant Flow Rate using FLO-TRON.....M. Sato and T. Yano
- The Characteristics of New Dryer “ESCALATE DRYER” (100)
with Fluidized Bed.T. Yokoyama, F. Nakagawa
and N. Kaya
- Dispersion of Agglomerated Powders by Ejector Feeder..... (106)
.....H. Watanabe, T. Matsuno
and Y. Nakada

【表 紙】 大型集塵機・ホソカワ/マイクロ ジャンボパルスエアー (CP 30-20)
(関連記事が151頁に掲載されています)

粉碎を見直す

中 川 有 三*

Uzo Nakagawa



本誌「粉碎」は、本年発行の号を以って20を数えるに至った。その間、比較的順調に編集刊行を重ねて今日を迎えたのであるが、その内容は粉碎のみに偏することなく、広く粉体工学の全域を包括す分野に涉っていて、本誌の英文名、MICROMRITICS に相応わしいものとなっている。前号の巻頭言で吉田教授が指摘した如く、粉体工学自体はまた化学工学全般に涉るばかりでなく、その必要性は、資源処理、衛生工学より人類の社会生活に直結した環境工学に重視されるに至っている。粉体技術談話会は粉体工学研究に従事している研究者、技術者の有志が中心となって発足した会であって、これらの問題の解決に多少なりとも寄与貢献したい目的の下に毎年講演会を催し、粉体技術に関連した業務に従事して関心の深い専門技術者の間で知識の交換を行い、併せて技術の紹介、製品の展示などを行ってきたのである。

私はここに20号の発刊を契機として、粉碎という語について再考したい気持ちになっている。粉碎という操作は、元来比較的塊状である原料を粉碎してこれを細粒にする手段であって、次の製造工程に便宜を与えるばかりでなく、その特性の向上に寄与する操作である。化学工業でも最初の工程には必須な操作であり、更に化学反応に適応した状態にもたらずに欠く可からざる操作でもある。しかるに、この目的に合致せしめる方法としては、粉碎は経済的にも甚だ非能率的な方法である。元来、粉碎は破砕することで、その目的は細粒化にあって、破砕ではない、むしろ一定粒度またはある粒度範囲内にある粒体群を造ることが要求される場合が多い。粉碎は粗砕から微粉碎まで幾多の段階に分類されるだろうが、その何れの場合にも常に粒度分布が付随する。材料の力学で応力と変形の間の関係を研究することと、破壊または破砕を取り扱うのとは全然異なった方向にあるといつてよ

い。丁度、医師が人間の身体の組織とかその働きを研究して、病気に対する抵抗力を推考するようなもので、これ位の外力を与えれば破砕が可能であるとか、粉碎しないだろうとかを推定する。しかし材料の粒子については破壊の様相も千差万別であり、人間の寿命のように一定しないだろう。粉碎に伴う粒度分布は自然現象であって、これを避けることはできない。一様な粒度分布のものを望むことが不自然であることに気がつく。しかるに我々は不自然なものを望むのである。破砕で材料の破面がどこに生じるか全く予測しえない。破砕の選択性、または多様性によるといってもよい。換言すれば、破砕現象はその規模とその発生頻度との間に自然に調和した関係があって、粒度分布は全く自然の均衡を示すものである。粒度を揃える企は自然に逆った仕業である。しかし人間は常にそれを遂げようとする。人間のみが成しうると考えている。手近な家庭用品として使われているプラスチック材料はどうも自然の中には日当たらぬ。人間が自由の力を駆使して、自然に逆らって、というよりも自然を乗り越えて、躍進して造ったもののようである。それでよいのか。粉碎を機縁にこれについて再考しよう。粒度分布の在る如く、人間の世界には、高低とか貧富とか、また優劣とか善悪とか、それは恐らく観点の相異に寄るものが多いが、種々の分布が存在する。これも実は自然に起伏する分布で、これを均等化しようという企が、厳正には不自然で到底可能ではない。それにも拘らず、この企を正道と考えて人の住む世界を改善しようと心懸けるのが人間の宿命である。それで自然との間に調和を保つことが重要になる。近時叫ばれている公害も天災と諦めていたものも案外人災であったりする場合が多いといわれる程である。これも自然との調和を無視した破壊行為が齎らしたものである。人間のみに与えられ

た知恵は人間のみのために使うべきものではない。

各方面の専門家はその専門の分野で最善を求め、最良の方法を発見するために努力する。これは当然のことで斯くありたく望むところである。しかし、これを適用する目的の面より一般的に観察すると、これは甚だ視野の狭い功利的なもので、これら専門家の業績を積み上げ、これを組み立て、調和のとれた建造物にすることが真の

人間の目的であらねばならぬ。

粉碎の方法には破砕から磨砕まであり、粒域の程度に応じて粗砕から微粉碎まで種々の方法が考案されている。ここに Comminution という語がある。これを訳して辞典にも粉碎と書いているようだが、これは細粒化ともいうべきで、一は方法であり、一は目的である。方法には種々あり、それ自体の研究も真摯でなければならぬ。しかし目的は厳然として存在し、これが達成には自然との調和を保ったものでなければならぬ。

* 京都大学名誉教授

(〒606 京都市左京区吉田神楽町8)

“粉碎” 20号によせて

“粉碎” 誌 と 時 の き ざ み

田 中 達 夫*

Tatsuo Tanaka

“粉碎” 誌が刊行されて20号目になるそうである。独創的な超微粉碎機や分級機などのすぐれた技術を育ててこられた細川社の栄光とともに、粉碎誌も一層充実と成長を遂げてきたことは粉体研究を志向したものにとって喜ばしいことである。

20年前といえば私が初めて粉碎の勉強を志した時期であった。むろんその頃の私など今以上の若輩であったし、1号〜3号までは寄贈していただけなかった。昭和33年から2ケ年間ミネソタ大学に留学している間に、京大の吉岡先生から投稿をすすめられ、どんな雑誌かを知らないまま、半分フザけたような、先生あての手紙が転載されたのが4号であった。たしか題名も吉岡先生がつけて下さり“Micromeritists in U.S.A.”となっていた。粉体の専攻者を Micromeritist というのかと初めて知った次第である。爾来ふり返ってみると、何度か掲載して貰ったのは半分真面目で半分不真面目な雑文が多くて、今もって汗顔に堪えない。何故こんな記事を投稿したのかよく考えてみると一つ理由がある。毎年1冊発

行される粉碎誌の投稿のお誘いが2月〜3月にある。この時期は私にとって一番幸せな時なのである。学生たちとのキビしい討論も終わって卒論発表がすみ、ようやく責任から逃れてヤレヤレというとき、しかも深く閉していた雪がとけ始めて、北海道にも春めく陽光がさしはじめる頃なのである。つい明らかに冗談の一つもとばしたくなる時期である。

粉碎誌に原稿を送ったあとは、再び絶望的な1年間のはじまる。新しい学生が参加し、そしてまた巣出てゆく。私の若い共同研究者たちが粉碎誌に掲載して貰った論文は、このような何年かの仕事の集成である。確実に彼らは成長し、私との差をつめ、遂にはハルカに凌駕して前進しつつある。それが時というものであろう。

思えば私がはじめてこの雑誌に紹介した英国の Rose 教授や西ドイツの Rumpf 教授(5号)という粉体学者もその当時は研究をはじめて間もない頃であったが、今や大きな業績を残されてそろそろ第1戦をひこうとされている気配である。お2人とも2度も来日されたことは記憶に新しい。

粉体学は間違いなく大きな組織にふくれ上がり、世界の各地で成長しつつあるようである。そして“粉碎誌”はまさしく私たちに「時のきざみ」を感じさせてくれる。

* 北海道大学工学部合成化学工学科

(〒063 札幌市北区13条西8丁目)

Tel 011-711-2111

粉体物性測定上の諸問題

——粉体の物性は、本当に測定できるようになったのだろうか——

Some problems on the measuring methods of powder properties and characteristics.

神保 元二*

Genji Jimbo

1. 粉体物性は測定できるのか？

粉体の物性——その中でもここでは付着・凝集・摩擦特性をとりあげるわけであるが、その位狭い範囲に限定しても、粉体物性の測定方法はずいぶん昔から考察され、用いられてきている。例えば安息角（あるいは息角）がその一例であり、粉体の範囲を広げて土砂まで入れるとすれば、内部摩擦角や粘着度など、すでに 100 年近い歴史をもっている。

しかし粉体のいろいろな挙動やいろいろな現象を意識的に念頭において、粉体の付着特性、摩擦特性を解析的に測定し、工学的な意味での実際の粉体の挙動とより基礎的な表面物性とを結びつけようとした試みが組織的にはじめられたのは、比較的新しく、ここ 15 年位と考えるといいのではなかろうか。

私が知る限りでは、Jordan¹⁾、Larsen²⁾ が繊維への粉体の付着を測定しようとしたのが、1 個粒子の付着力測定として非常に早い例であるが、この頃になると Rumpf の付着力・凝集力を論じたきわめて包括的な論文³⁾ もでていし、Kordecki-Orr も遠心法で測定を行なっている⁴⁾。しかし十分に体系的に付着力測定を行なったのは、ドイツの H. Krupp で、彼も 1960 年頃からその測定結果を発表しはじめていて⁵⁾、1967 年頃にほぼ一通りの研究をまとめるに至っている⁶⁾。ソヴエトの Deryagin-Zimon の付着力測定もこの頃からわれわれの目につきだし⁷⁾、Zimon の本もその数年後にでている⁸⁾。また同じ頃、アメリカの Jenike が例の flowfactor の考えを発表している⁹⁾。(Carr の flowability の考えはやや遅れて発表されている¹⁰⁾ こうしてみると、1960

年をはさんだ 3～4 年間というものは、粉体工学にとって実に動きの激しい、転機ともいえる時代だったことがわかる。粉体の物性が測れるようになった！ その物性値にもとづいて、粉体の諸機械、諸装置が設計できるようになる！ そういう期待がにわかに高まり、粉体工学の基礎へ多くの人の関心が向けられたのである。

それからほぼ 15 年、その間にさらに種々の粉体物性の概念とその測定法が提案され、測定装置が考案され、また膨大な測定結果が蓄積されてきた。さてそれで、15 年前にわれわれが感じたように、こういう物性についての知見とデータの蓄積によって、はたして粉体工学はどれだけ発展したのだろうか。いやそもそも、粉体の物性というものをどれだけ測ってきた、といえるのだろうか。そろそろわかってきたことと、疑問に残されていることをはっきり認識しておくことが、次の粉体物性研究のステップに対して必要なのではないかと思う。

2. 粉体物性の測定法の中で、どれが一番すぐれているのか？

さてこの 15 年余りの間に実に沢山の粉体物性測定法が提案された。現在でも毎月といってもいい位新しい方法が提案されているといっても過言ではない。その中で一体どれを選びだして使ったらいいのだろうか。

この問いに対する答えは、現在のところ“それぞれの目的に応じ、最適の方法を選ぶ外ない”ということになる。前節で述べたように粉体物性の測定は、基礎的かつ体系的なものを指向してはいるが、現在実際に用いられている方法の多くは何らかのかなり直接的な目的があって生まれたもので、それをさらに一般化しようとして基礎的な物性測定法が考案されてきているのであって、どういう目的で、どの程度の一般性をねらって測定を進めるか、という点で選ぶべき測定方法が決められてくる。

* 名古屋大学工学部

(〒464 名古屋市千種区不老町)

Tel 052-781-5111 内3377

表 1 各種の粉体物性測定法*

	← 一次物性	二次物性	三次物性 →
直接法	○スプリングバランス法 (Fig.1, a) ○振子法 (Fig.1, b) ○遠心分離法 (Fig.2) ○振動分離法	○引張り破断法 (Fig.3) (高圧成形) (水平破断) (低圧成形) (垂直破断¹⁸⁾) ○直接せん断法 (Fig.4) (一軸、三軸) (一面、二面) (分銅載荷法) (プレス載荷法)¹⁹⁾ ○Flowfactor法 (Jenike)²⁰⁾ ○環状セル法²⁰⁾ ○吹き飛ばし法¹⁾	○充てん法 (圧縮) (タッピング) ○沈降容積法 ○押出し破断法²¹⁾ ○傾斜板法²²⁾ ○流動層法²³⁾ ○粘度計法²⁴⁾ (回転二重円筒) ○安息角法 ○気流中分散法 ○Powder-testor法²⁵⁾ (carrの方法)
間接的方法へ 複合的な物性へ			○付着板引き上げ法²⁶⁾ ○流出法 (流出最小オリフィス法)²⁷⁾ ○Stickiness法 (Fig.-5) (流下排出法) ○Dustability法 (Andreasen 発塵法)²⁸⁾ ○Dispersability法 (分散法) ○浮遊性測定法²⁹⁾ ○逃散性法³⁰⁾

*ここでは文献は国内の初期のものを中心に示した。外国文献などについては、他の総説³¹⁾などを参照されたい。

表 2 諸物性間の関係

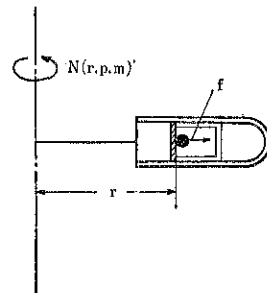
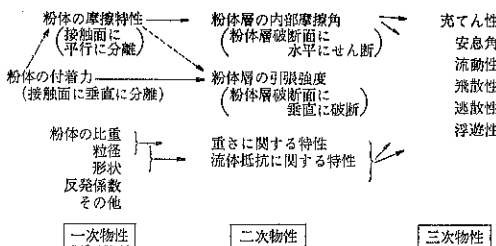


Fig. 2 遠心分離法の原理

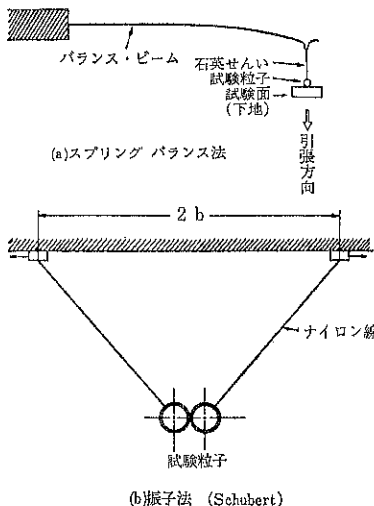


Fig. 1 1個粒子の付着力測定法

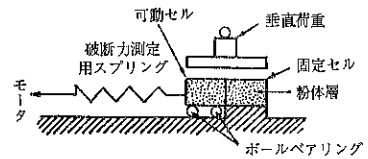


Fig. 3 粉体層の引張り破断法

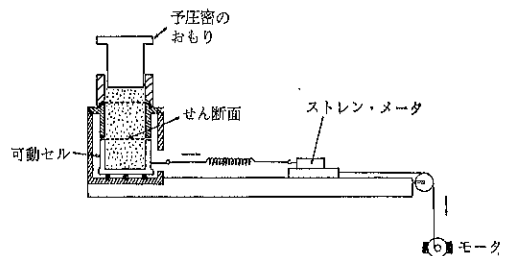


Fig. 4 せん断法

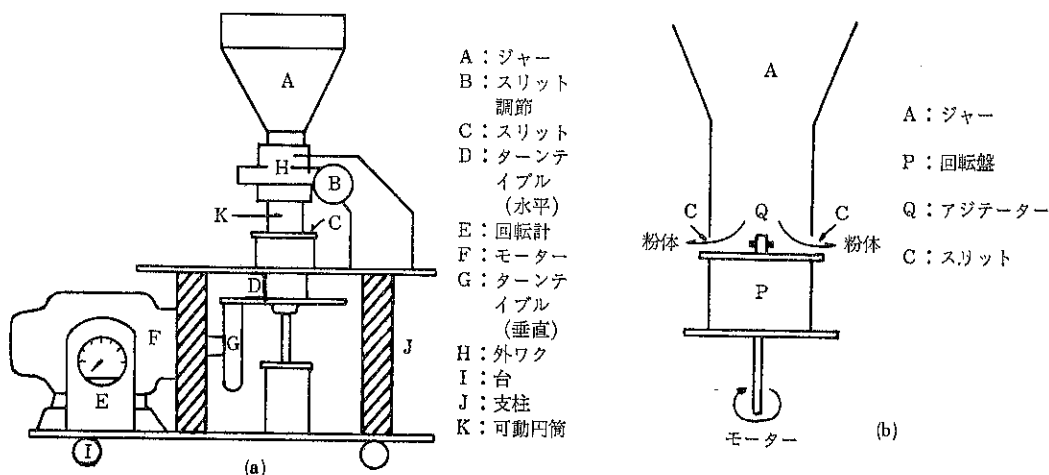


Fig. 5 流下排出法の1例 (flowability tester)²⁶⁾ (a)全体図, (b)主要部

このような測定方法の違いを、ごく定性的な分類として Table 1 のようにまとめてみた。またこれらの諸物性間の関係を Table 2 に示してみた。

さて粉体物性を測定するのは、普通何らかの実際的の目的のためであるから、役に立たない測定法では意味がない。しかし基礎的裏づけのない物性測定は、ある特殊な狭い対象に対する限られた目的には使えても、一般性がなくてその適用を拡張したり、他のデータとの比較を行なったりできない。それでも困るのである。そこで実際的な測定と、そのもとになる基礎的な測定との間を何とか結びつけようとして、次に述べるような難しい点が明らかになったために、まだまだウロウロしているのが粉体物性測定の現状ということができよう。

だから、どれが一番いい測定方法かを探す前に、物性測定がもつ、複雑さと多様さに注視しなければならないのである。

3. どうしていろいろな方法が、別々の結果をだすのだろうか？

粉体の物性値は付着力というもの一つをとってみても定義をはっきり決まっているものではないし、測定の原理もいろいろであるから、測定結果を相互に同じ単位で比較してみることができる場合もきわめて少なく、多くの場合は比較できるとしてもいろいろな仮定をおいた換算の結果である。そしてこのような定量的な比較の場合も、また定性的な傾向をみるだけの比較の場合も、異なった方法による測定結果はなかなか一致しないのである。これは何故であろうか。考えられる要因としては、次のようなものをあげることができよう。

(1) 一番単純な力の測定でも、なおかつそれは確率的な

値で、測定結果は当然統計的の分布をもっているからである。一番典型的なものは遠心法による1個粒子の付着力測定結果であろう。一例を Fig. 6 に示すように、それは広い分布をもっている¹¹⁾。また繊維に付着した粒子を分離させるのに必要な風速の例を Fig. 7 に

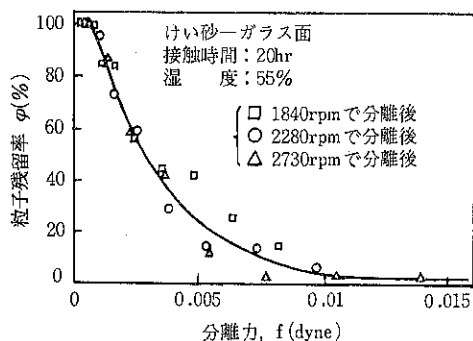


Fig. 6 遠心法による測定結果1例

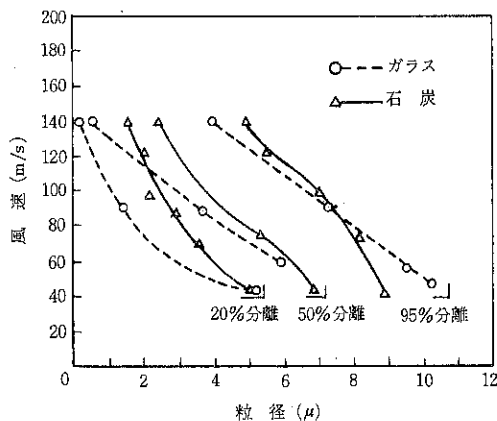


Fig. 7 吹きとばし法の測定結果1例

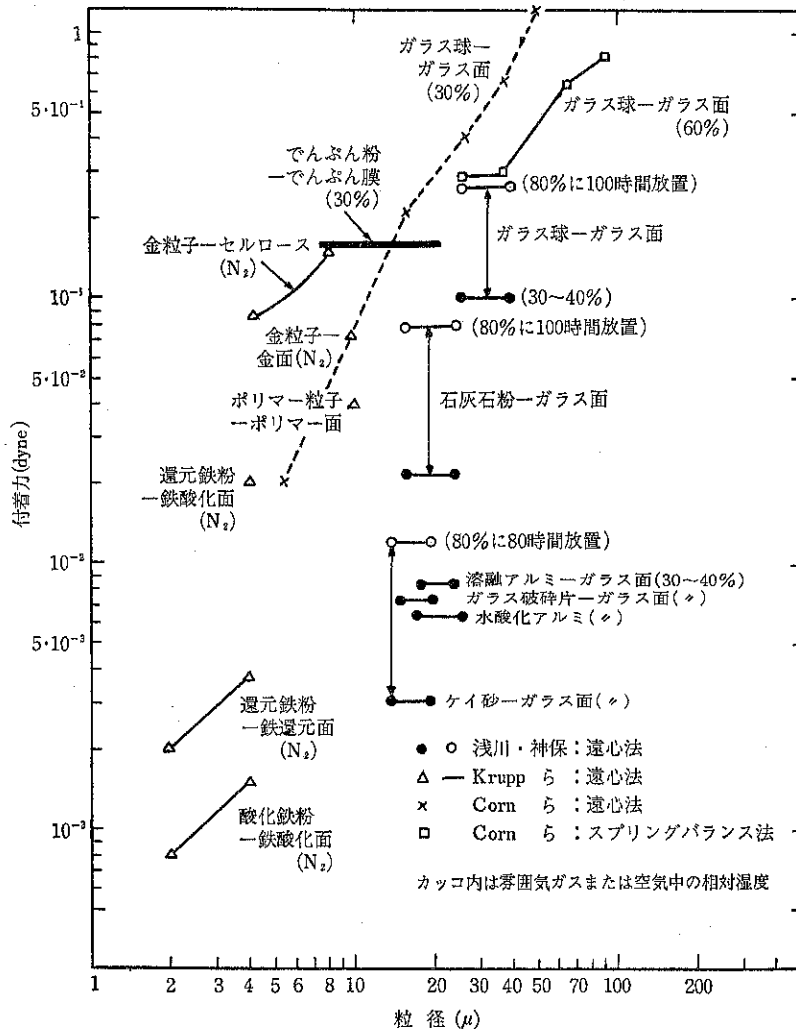


Fig. 8 平面に対する粒子付着力測定結果の比較

示したが¹⁾, ある付着した粒子を95%分離するのに必要な風速は20%分離する風速の実に3.5倍であって, 粒子の付着力は非常に広い広がりがあることがわかる。

従って統計的処理を経ない付着力測定結果の比較はあまり意味がないことが多いのである。

- (2) 付着力が関与する特性値の中でも, とくに動的な特性をつかむことがきわめて難しいからである。

Table 1¹³⁾ をみると, 表の左上の方ほど粒子が静止状態にあって, ある critical な時点で突然運動を開始する, というようなものが多く, 右下の方にくるほど粒子がかなりはげしい運動状態にあって, その過程での粒子の物性を顕在化して示すものが多い。実は次で述べるように, 静的な物性値でさえまだいまのところ影響する諸因子の数が多すぎて研究も混乱の中にあ

るありさまである。粒子の運動状態などといえは, 回転円筒容器内の流動や, 空気輸送管中の粒子の運動あたりが最近やっとわかってきかかったところで, 物性値に影響する動的要因を明らかにすることなど, ごく一部の特殊の場合(充填とか飛散など)を除いては, まだまだ先のことになるう。

従ってここでも“動的”な物性値の問題はこれ以上掘り下げないことにするが, しかし実際の物性値測定としては, 動的測定の方がかえって定常状態での測定を可能としてやさしい場合があることもつけ加えておきたい。

4. それでは付着力についていままで何がわかったのか?

要するに付着力の測定は非常に難しく, 従って数多く

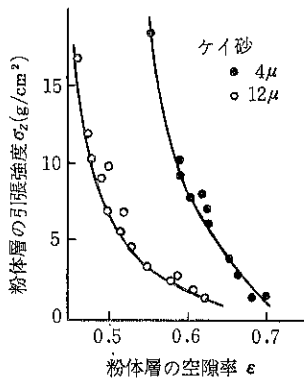


Fig. 9 粉体層の引張り強さに及ぼす空隙の影響

の測定方法が並行して存在し、しかもそれぞれの測定方法による結果が一般的には一致しない、ということになると、一体この15年間の付着力測定の研究は、何を明らかにしたのだろうか。或いは付着力測定は単なる研究者の“遊び”に過ぎなかったのだろうか。

確かに付着力を中心とする粉体物性の難しさは研究が進むに従ってますます増大するよう思われ、今後の見通しもたないようみえる。しかし考えてみると、前節で述べたような難しさが具体的に明らかになってきたこと自体、大変な進歩といえないこともない。とにかく粉体物性というものを、付着力や摩擦係数という定量的な数値にもとづいて議論することができ、しかもその数値がどういった要因によって補正されなければならないか、ということまで次第に明らかになってきているのであるから、その成果はやはり大きかったとみるべきではあるまいか。

なかでも粉体の付着力に影響する諸因子については、かなり問題点が絞られてきている。その中で筆者自身の研究結果として明らかになった点のうち、とくに重要視するものをあげてみると――

(1) 物よりまず形である！

“物性”というからには“物の性質”には違いないが、粉体に関する限りどうも質よりも形の方がまず重要視されなければならないようだ。Fig. 8 に遠心分離法による測定結果のいくつかの例を示したが¹⁴⁾、この中でガラス球-ガラス面とガラス破砕片-ガラス面の両者の付着力測定結果が10：1以上の開きをもっている点に注目したい。同じことを Krupp は鉄粉、鉄面を酸化したり還元して粗度を変えるという実験で検討しているが、やはりその影響は大きい。付着力の小さい物質である珪砂と、付着力が大きい方では代表格の石灰石でも、その付着力の

違いは10：1に達しないことを思うと、“物その物”も重要でないというのではないが、“形”の付着力に及ぼす影響の大きさは、予想を越えるものがあるのである。

(2) そのものよりも雰囲気が大事！

同じ Fig. 8 をみると、矢印で示してあるような範囲で温度の影響を受けていることがわかる。この方は実は予想された通りであって、別に意外な結果ではない。しかし珪砂が温度によって付着力を増加する程度は、石灰石との差を埋めるまでにはやや及ばないが、他のより付着力の大きい物質との差は埋めて余りがあり、温度の影響の大きさを示している。この結果は表面が水に対して比較的安定な物質に関するものであるから、部分的にでも溶解性のある物質であれば、その影響はさらに大きいものとなることはいうまでもない。

このほか添加剤による物性変化もいくつか報告されているが、これらのことから、粉体の本来の構成物質がそのまま接触していることは、むしろ例外的ということになるであろうか。

(3) 粉体の充填層とは、すなわち空隙である！

二次物性以上では、一般的に粉体“層”の状態では物性を測定することが多い。ところがこの場合の粉体“層”としての付着力と、1個1個の粒子の付着力とがなかなか一致しないところが問題になっているのである。

ところで粉体層の引張りに対する強さ σ_z は、一番簡単に考えると、粒子と粒子の接触点数 N と、1接触点当たりの付着力 f の積としてあらわすことができる。従って

$$\sigma_z = N \cdot f \cdots \cdots (1)$$

付着力 f の方は一次的な粉体物性の測定法（例えば遠心法）で測定することができる。 N の方もモデル的な実測は可能であるが、その対象粒子と粒径には制限があるので、物性を問題とするような微粉ではまず難しいと考えていいであろう。そこでいろいろなモデル論的な推定計算がなされるわけであるが、これには有名な Rumpf の式があって、かなり適用しうるものと考えられている。

$$N = \frac{9}{8} \frac{(1-\epsilon)}{\pi d^2} \cdot k \cdots \cdots (2)$$

ここで d は粒径、 ϵ は空隙率、 k は粒子の配位数である。Rumpf はさらに $k \approx 3.1 \approx \pi$ の仮定をおいて、(1)式と(2)式から次の近似式を求め、次の式が現在広く用いられている。

$$\sigma_z = \frac{1.1(1-\epsilon)}{\epsilon} \cdot \frac{f}{d^2} \cdots \cdots (3)$$

この式からもわかるように、空隙率 ϵ がちょっと変わっても σ_z の方は大きく変化する範囲がある。 ϵ を小さくする（粉体層を圧密すると）と、粉体層の付着力 σ_z はど

んどん大きくなる (Fig. 9). そのきき方は雰囲気湿度の影響よりも大きい位である。つまり f の値より ϵ の値の方がこの際重要ということになる。だから粉体層の付着力 σ_z を測定して、その結果を実際の粉体現象にあてはめてみようとしても、現場で粉体の空隙率 (しかも多くの場合かなり局所的な空隙率) を知ることは一般に困難であるから、どうにも使いようがない、ということになってしまうのである。

ところがその上もう一つ困ったことがもち上がっている。もし Rumpf の式が正しいとすると、 d と ϵ がわかれば σ_z は f だけによってきまってしまうはずであるが、それがどういうわけかそうならないで、 ϵ を小さくすると、 σ_z が大きくなるのは当然であるが、同時に f そのものも大きくなっている、ということがわかっている。つまり (2) 式、(3) 式よりも、 ϵ のきき方はもっとずっとはげしいのである。では Rumpf の式は間違っているのだろうか。

そこで Rumpf の式に対する修正意見がいろいろだされているわけであるが、その考えは大きく分けて二つに分類され、第1の意見は Rumpf の充填モデルは間違っている、この充填モデルをもう少し解析的に修正するというものであり¹⁶⁾、第2の意見は粉体層を圧密するとき、空隙の減少とともに粒子の接触点で変形がおこり、真の接触面積が変わることによって付着力が増大する、というものである¹⁷⁾。

いずれにしても空隙の重要性を認識する点では多くの研究は一致している。

5. もっと粉体の基礎を解明しよう！

このようにみえてくると、付着力の測定結果を評価する上での問題点は、かなりはっきりしてきていることがわかる。問題というのはどういう場合にもそうであるが、わからない点がはっきりする、ということは大変な進歩なのであるが、みかけ上はますますわからなくなって後退したように感じられるものである。

それはそうとして、付着力の問題をもう一つ掘り下げると、いずれも粉体工学ないし粉体科学のもう一つ基礎的なテーマにぶつかってくる。それをまとめてみると次のような諸点を指摘できようか。

(1) やはり重要なのは幾何学的な特性だ。とくに形状特性がきわめて重要であることがあらためて再確認される。それにもかかわらず形状係数や形状指数は抽象的にはとにかく、具体的な測定法ということになると意外に研究がおくれているが、幸い最近粒子影像のデータ処理的解析方法が急速に発達したので¹⁸⁾、形状特性に関する研究も今後の発展が期待される。

(2) 幾何学的特性をさらに立体的なものにまで拡張して、粒子充填の立体構造を明らかにする必要がある。

これは現在ステレオロジーという新しい学問分野として発展しつつあるが、粉体工学の立場からとくに粉体層充填の不均一性について検討を加えたものも目につくようになった。ひどく遠まわりのようであるが、こういう基礎的な研究がさらに望まれるのである。

(3) 固体表面に関する研究を忘れてはならない。以上のように“幾何学的な特性”さえまだ充分わかっていないのであるが、しかしそのことは固体表面の物理化学的な特性の重要性を少しでも減ずるものではない。例えば雰囲気中の水分と固体表面の関係、水分吸着状態の固体表面の性質など、まだほとんど手をつけられていないといっている。しかし筆者自身この点にはあまり明るくないので、その重要性を指摘するだけに止める。

6. これからの粉体物性測定の方法は？

さて、またはじめの問いにもどって、粉体の物性は測定できるのだろうか？ これに対する答えは、いまの時点では“ある程度できる”ということになるだろうか。しかしまだ万能の測定方法、一般的な測定方法はみつからない。JISに規定できるような方法も恐らく当分の間みつからないであろう。そういう意味では本当に測定できるようになった、とはいえないのかも知れない。

しかし問題点はかなり絞られてきていることはいままで述べた通り。研究の方向も相当はっきりしてきている。ただ方向はわかっても、それはいずれも長い間問題になっていながら、容易に解決しえないような難しい問題ばかりであった。しかしそれを避けて通るわけにはいかないのであって、こういう基礎的問題を一つ一つ解決していく以外に、粉体物性の測定をより一般化していく道はないのである。

しかし一方、実際の目的に応じた測定方法については、目的に応じてもっととどろん新しい測定方法を考案していこう。そしてデータを数多く蓄積したいものである。粉体物性の測定が沢山行なわれ、しかもまだ不明の部分が多いとはいっても、他の工業材料 (例えば金属やプラスチックのような) とくらべるとデータはきわめて少ない。もっとデータが欲しい。

そしてデータをただ出すだけではなくて、それを蓄積し整理し、そして互いに交換しあいたいものである。できればどこかのセンターにそのデータを集めて基礎物性と具体的な粉体の挙動との間のつながりを、具体的に考えていけるような体制がくまれるとすばらしいと思う。そうすれば基礎的研究の目標ももっとはっきりするのだらう。

う。

そしてその中から次第に標準的な方法が浮かび上がり、またいくつかの代表的な測定方法が統合されまとめ上げられていくこととなろう。そのようにしてはじめて、具体的でかつ一般的な測定方法が確立していくのである。

そのための基盤はすでにできてきている、と思うのであるがいかがであらうか。

参 考 文 献

- 1) Jordan, D. W. ; *Brit. J. Appl. Phys.*, **3**, S 194 (1954).
- 2) Larsen, R. L. ; *Am. Ind. Hygiene Assoc. J.*, **19**, 265 (1958).
- 3) Rumpf, H. ; *Chem.-Ing.-Technik*, **30**, 144 (1958).
- 4) Kordecki, M.C. and C. Orr, Jr. ; *Archives of Environmental Health*, **1**, 1 (1960).
- 5) Krupp, H., et al., *Dechema-Monogr.*, **38**, 115 (1960), Boehme, G., Krupp, H., Rabenhorst, H. and Sandstede, G. ; *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **40**, 252 (1962).
- 6) Krupp, H. ; *Advances in Colloid and Interface Science*, **1**, (No. 2) 113 (1967).
- 7) Deryagin, B. V. and A. D. Zimon ; *Kolloidnyi Zhurnal*, **23**, 544 (1961).
- 8) Zimon, A. D. ; *Adhesion of Dust and Powder* (trans. ed. M. Corn), Plenum Press, 1969 (これは英訳本であるから原書はその2~3年前発行のはず)
- 9) Jenike, A. W. ; *Third Congress of the European Federation of Chemical Engineering, London, 1962-June* (Preprint D 26).
- 10) Carr, R. L. Jr. ; *Chem. Eng.*, Jan. 18, p. 163, Feb. 1, p. 69 (1965).
- 11) 浅川貞雄, 神保元二 ; 材料, **16**, 358 (1967).
- 12) 神保元二 ; 材料, **19**, (203) 765 (1970).
- 13) 神保元二 ; ケミカルエンジニアリング, 1968年7月号, p. 31.
- 14) Corn, M., ; *Air Poll. Contr. Assoc.*, **11**, 528 (1961), Corn, M. and F. Stein ; *Amer. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1965, July-Aug., p. 325.
- 15) Shinohara, K. and T. Tanaka ; *J. Chem. Eng. Japan*, **8**, (1) 50 (1975).
- 16) 神保元二, 浅川貞雄, 曾我尚人 ; 材料, **17**, (177) 540 (1968).
- 17) 椿淳一郎, 神保元二, 和出良一 ; 材料, **24**, (7) 622 (1975).
- 18) 綱川浩, 青木隆一 ; 粉体工学研究会誌, **11**, (5) 263 (1974).
- 19) 種谷真一, 佐藤重勝, 青木隆一 ; 粉体工学研究会誌, **11**, (4) 199 (1974).
- 20) 篠原邦夫, 小林仁, 後藤圭司, 田中達夫 ; 粉体工学研究会誌, **2**, 352 (1965).
- 21) 林平三郎, 貝奈美秀蔵 ; 薬学雑誌, **84**, 229 (1963).
- 22) 野上寿, 仲井由宣, 杉原正泰 ; 薬剤学, **24**, 103 (1964).
- 23) 種谷真一 ; 応用物理, **33**, 887 (1964).
- 24) 鈴木照磨 ; 農業技術研究所報告, C, No. 3, p. 98 (1953).
- 25) 石井義男, 赤柴健夫, 西村茂, 小川正和 ; 農業生産技術, No. 2, p. 9, (1960).
- 26) 松井堯政 ; 粉体工学, **1**, 598 (1964).
- 27) 疋田強 ; 工業火薬協会誌, **10**, 143 (1950).
- 28) 青木大, 福田友昭 ; 薬剤学, **27**, 103 (1967).
- 29) 横山藤平, 浦山清 ; 粉体工学研究会誌, **6**, 264 (1969).
- 30) 神保元二 ; 化学工学, **32**, (8) 740 (1968).
- 31) Shinohara, K. and T. Tanaka ; *J. Soc. Chem. Eng., Japan*, **8**, 46 (1975).

固気混相流装置計画上の諸問題*

A few Controversial Problem about the Planning of Flowing Gas-Solids Suspensions

狩野 武*

Takeshi Kano

1. ま え が き

粉粒体を気体で運搬・輸送する装置にはいろいろあるが、それらを計画するにあたっては、いずれの場合でもまず確実かつ円滑に輸送できるようにすることが必要であると同時に、設備費ならびに運転維持費が最小になるように配慮する必要がある。

この観点から従来とられていた計画方法を見た場合、いろいろ問題があるように思われるので、ここにその二、三の事項をあげて参考に供することにする。

2. 所要動力を最小にする管の内径

説明の便宜のために、まず粉粒体の空気輸送装置において与えられた輸送条件に対し、所要動力を最小にする管の内径の理論的計算方法¹⁾について述べる。

輸送のために必要な空気量を Q_a [m^3/min], 圧力を P [kg/m^2 , mmAq] とすると、空気源機械の所要動力 [kW] は理論的に

$$[\text{kW}] = Q_a P / (60 \times 100\eta) \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。ここで η は空気源機械の効率と輸送中の瞬間的な圧力変動、輸送条件の多少の変化に対する安全性などを総合的に考えあわせて決める係数で、それぞれの場合によって異なるが、一般的には0.5~0.7程度の値をとる。

(1)式からわかるように、所要動力は空気量と全圧力いにかえれば全圧力損失との積に正比例する。したがって所要動力を低減するためには原則的には各部分の圧力損失が小さいように計画することが前提であるが、理論的には太い輸送管を用いて空気量が多くなっても圧力損失

を小さくしたほうが有利か、細い輸送管を用いて圧力損失が大きくなっても空気量を少なくしたほうが有利かという問題がある。

實際上、装置の計画にあたっては所要動力の大きさからだけでなく、適切とする輸送方式、それに用いる空気源機械の種類、輸送管の種類と架台、付帯設備、環境保全対策の種類と難易、それらの設備費と運転保守費、将来計画などをあわせ考え、総合的な見地から仕様値を決める必要がある。

一般的には、近距離の輸送には比較的太い輸送管によって圧力損失を低減し、ルーツブロックを空気源機械とした低圧圧送式あるいは吸引式が適する場合が多い。また遠距離の輸送には空気源機械として往復動式あるいはスクリュ式空気圧縮機を用い、細い輸送管によって空気量を少なくし、できるだけ高混合比で輸送する高圧圧送式が有利な場合が多い。

いま装置の仕様値が所要動力の大きさに与える影響の程度を調べるために、付帯設備および粒子の加速のための圧力損失を一定とみなし、圧力損失としては輸送管中の定常輸送のための圧力損失 ΔP_m [kg/m^2] だけを考える。空気だけを流したときの圧力損失を ΔP_a [kg/m^2], 混合比を μ_s とすると

$$\Delta P_a = \lambda_a \frac{L_{eq}}{D} \frac{\gamma_a}{2g} u_a^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\Delta P_m = (1 + \beta \mu_s) \cdot \Delta P_a \dots\dots\dots (3)$$

$$\mu_s = \frac{W_s}{60(\pi/4)D^2 u_a \gamma_a} \dots\dots\dots (4)$$

と表わすことができる。ここで λ_a : 空気だけを流した場合の管摩擦係数, L_{eq} : 輸送管の相当長さ [m], D : 輸送管の内径 [m], γ_a : 空気の比重量 [kg/m^3], g :

* 静岡大学工学部 化学工学科
(〒432 浜松市城北3丁目5番1号)
Tel 0534-71-1171

※ 昭49.8.23 第8回粉体技術談話会(枚方)における講演内容に一部添削を加えたものである。

重力の加速度 $[m/s^2]$, u_a : 輸送空気速度 $[m/sec]$, β : おもに輸送物の性状によって決まる係数, W_s : 輸送量 $[kg/min]$ である。

(2)~(4)式を(1)式に代入して整理すると次式を得る。

$$[kW] = K_1 \left(1 + \beta \frac{K_2}{D^2 u_a} \right) D u_a^3 \dots\dots\dots(5)$$

ここで

$$K_1 = \frac{\pi \lambda_a L \eta g \gamma_a}{800 g \gamma}, \quad K_2 = \frac{W_s}{15 \pi \gamma_a} \dots\dots\dots(6)$$

であり, 与えられた条件においては K_1 および K_2 はそれぞれの場合について定数と考えることができる。このとき(5)式が与える値は輸送管の内径 D と輸送空気速度

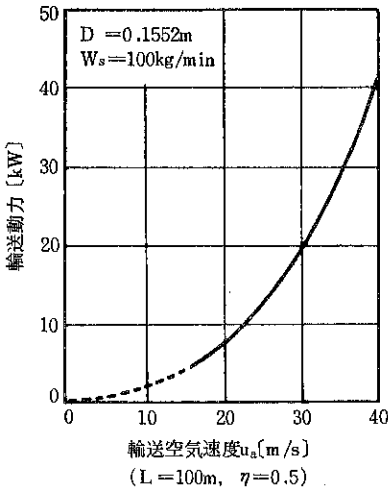


Fig. 1 輸送空気速度 u_a と輸送動力 kW との関係

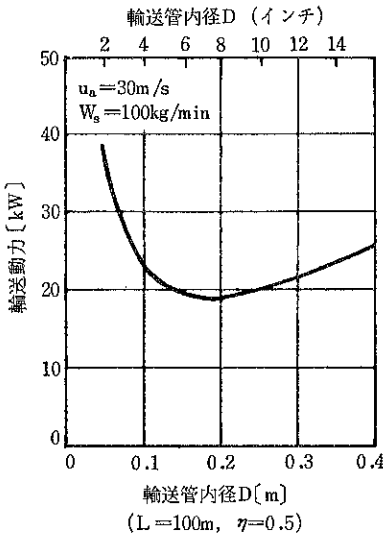


Fig. 2 輸送内径 D と輸送動力 kW との関係

u_a によって変わり, それらが所要動力におよぼす影響の傾向がわかる。

Fig. 1 および Fig. 2 はこれらの傾向を知るために(5)式を数値計算した結果を描いた一例で, 所要動力は輸送空気速度が小さいほど, また輸送空気速度が一定の場合はある内径の場合に最小になることがわかる。この所要動力が最小になる管の内径は(5)式で D を偏微分した式を 0 とおくことによって

$$D = \sqrt{\beta \frac{K_2}{u_a}} = \sqrt{\frac{\beta W_s}{15 \pi \gamma_a u_a}} \dots\dots\dots(7)$$

で与えられる。したがって理論的な所要動力だけについていえば, 最小の輸送空気速度で(7)式が与える内径の管を用いれば最も有利であることになる。

一例として $\beta = 0.4$, $\gamma_a = 1.20 kg/m^3$ の場合について(7)式を数値計算した結果を, 横軸に輸送量 W_s $[t/h]$ をとり, たて軸に輸送管の内径 D $[mm]$ をとって図に描くと Fig. 3 のとおりになる。実際上は前述のように諸条件をあわせ考えて最終的に決める必要があり, 理論

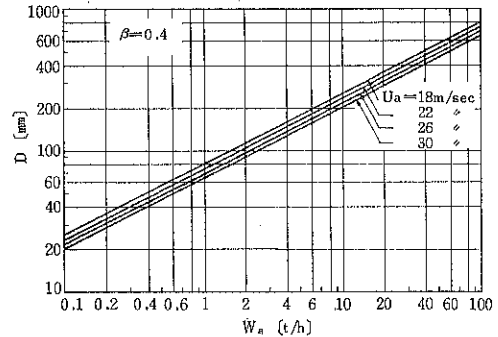


Fig. 3 輸送量 W_s に対して所要動力を最小にする輸送管の内径 D ($\beta = 0.4$ の場合)

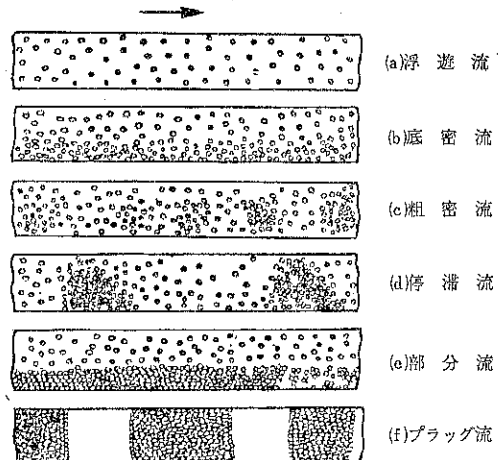


Fig. 4 輸送空気速度と流動状態との関係

的計算結果だけによることは危険である。

3. 輸送空気速度の選定

前述のように所要動力低を減するためには輸送空気速度が小さいほど好ましい。ただし、これは輸送管中で粉粒体が円滑に輸送されると前提してのことである。

しかし実際には輸送空気速度によって輸送の状態は Fig. 4 に示すようにいちじるしく相違する。すなわち輸送空気速度が大きいほど粒子はより一様に近く気流中に分散浮遊して輸送されるが、速度が小さくなると管底に近いほど密に分布し、ついで管底をしゅう動して、ある限度よりも遅いと脈動をともない、その程度がいちじるしくなって円滑に輸送されなくなり、極端な場合には閉そくすることになる。

これらの現象と対応して輸送空気速度と圧力損失との関係は Fig. 5 のようになる。この図は理論式を数値計算した結果の一例²⁾であるが、実験的にも妥当なことが確かめられている。すなわち輸送空気速度が大きいと、ほぼその自乗に比例して圧力損失が増大し、また反対に速度が小さいといちじるしく大きくなって、ある輸送空気速度の場合に圧力損失が最小になる。実験によるとこのとき輸送物は管底に近いほど密に分布しているが、停滞することなく円滑に輸送されている。内径 3 B (インチ) の管で小麦を輸送する場合、圧力損失が最小になる輸送空気速度は約 18~20 m/sec であった。なお、この値は輸送物の性状、物性によってはもとより輸送の条

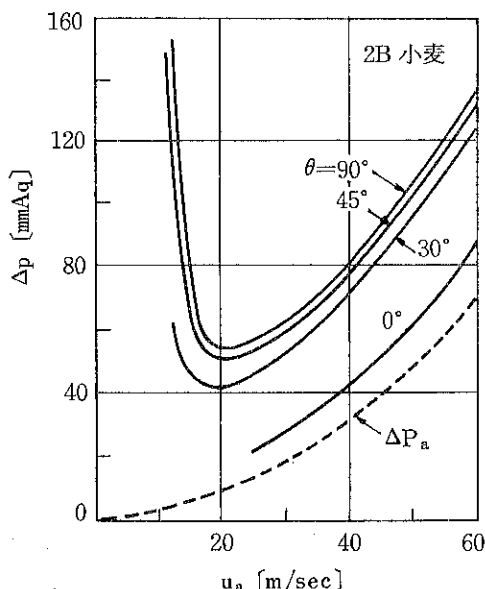


Fig. 5 輸送空気速度 u_a と定常輸送区間 1 m についての圧力損失 Δp との関係の計算例 (Δp_a は空気だけを流した場合の値)

件によっても異なることが経験されている。

固気混相流装置たとえば空気輸送装置の計画にあたっては、まず輸送空気速度を適切に決める必要がある。これは輸送物の性状、物性と輸送の条件に対してある程度までは理論的に計算によって求めることができるが、最終的には経験的に決めなければならない現状である。理論的計算値どおりに決定できない理由はいろいろあるが、おもな要素を列挙するとつぎのとおりである。

(1) 輸送物粒子の大きさが不均一なこと：一般に粉粒体は大小いろいろな大きさの粒子からなっているが、必ずしも小さい粒子ほど輸送しやすいとは限らない。大きい粒子は輸送しにくい、また微小な粒子も輸送しにくいことが経験されている。

平均粒子径はいわば仮空の数値であって、輸送上の特性の平均値を持つ粒子の大きさを表わすものではない。たといそれを表わすとしても、装置の計画にあたっては最も輸送しにくい粒子を対象として仕様を決めるべきである。

粒度分布が広い粉粒体の輸送上の特性、難易については未知のことが多い。

(2) 輸送物粒子は必ずしも球形でないこと：力学的解析では、普通は便宜上粒子を球形として扱うが、実際にはほとんどのものが非幾何学的な形をしている。そして一般的に非幾何学的な形状のものほど輸送しにくく、また圧力損失が大きいうことが経験されている。

この現象は特に遅い速度で輸送する場合に顕著で、非幾何学的な粒子ほど空気抵抗と壁面摩擦係数が大きいことからもうなずかれるが、その程度を計算によつて的確に予測できるまでには今のところいない。

(3) 輸送管内の空気速度分布が一律でないこと：

粒子輸送の理論的な解析にあたっては一般に、気流中にある粒子には気流と粒子の相対速度にもとづく動圧が働けり、これが粒子を気流の方向に輸送する基本的な推力になるとして扱っている。しかし実際には管内の気流はある速度分布を持ち、特に壁面では境界層を形成しているので均一ではない。また粒子は相互にあるいは壁面と接触、衝突、反発をくり返し、さらに重力の影響を受けて管底に近いほど密に分布して、管底をしゅう動しながら輸送されるものが多い。これらの現象は特に高混合比あるいは低速度で輸送する場合に顕著である。

このような複雑な挙動を示す粒子に働く推力と輸送の機構を的確に計算することはきわめて困難であり、これらに対して適用できる理論的計算方法は今のところ未知である。

(4) 比例法則が未確定なこと：装置の計画を進めるにあたって、対象となる粉粒体に対して適切とする輸送空

気速度と圧力損失比（輸送中圧力損失と空気だけを流したときの圧力損失の比）を比較的小規模の試験装置によって実験的に求めることが多い。

ところが筆者の経験では、それらの値は輸送物の性状と濃度、輸送管の傾斜によって異なることはもちろん、空気速度、輸送管の直線長さや内径などの影響も受ける。したがって実験によって適当とするおおよその値は知ることができても、実験値をそのまま計画に適用することは危険である。

たとえば輸送管の内径が大きいほど気流の速度分布が均一に近くなるので、管底近くで停滞しがちな粒子群の気流への混合効果が小さくなり、そのため輸送しにくい状態にある輸送物の絶対量が多くなる。したがって輸送管の内径が大きい場合ほど輸送空気速度を大きくとらなければならない。

しかし今のところ、実験値を実際装置の計画へ適切に応用できる比例法則が確立されていないので、実績経験を参照して最終的に決定せざるを得ない現状である。

(5) 配管状態によって輸送物の流れ方が異なること：輸送物の流れ方は同一の物質、混合比、空気速度でも、輸送管が水平、傾斜、鉛直によって異なることはもちろん、それらの一つの区間の長さ、ベンドの間隔、切換弁の位置、さらに前述のように内径によっても異なることが経験されている。特に供給器からベンドまで、あるいはベンドの間隔またはベンドと切換弁の距離が短い場合は圧力損失が大きい。

これらは粒子の加速にある距離を要することからうなずかれる。すなわち供給されてから定常輸送状態に達するまでの加速区間の長さは一般的に粉体では数メートル、粒体では10数メートル必要である。またベンドで粒子は壁面との衝突・摩擦のためと方向変換のために運動エネルギーの約 $\frac{1}{2}$ を失って減速し、ベンド通過後再び気流から運動エネルギーを得て増速される。したがってこれらの加速区間にベンドあるいは切換弁があると、遅い速度の粒子に気流が衝突することになるので圧力損失が大きい。

また長い水平管または傾斜管では輸送しにくいことが多い。これは気流の乱れの程度が小さくなることと、粒子が重力の作用を受けて次第に管底に近いほど密に分布することになるため、円滑に輸送をつづけるためには輸送空気速度を比較的大きく選定する必要がある。また一般的に鉛直管のほうが同じ長さの水平管よりも圧力損失が大きい。これは重力に逆って粒子を持ち上げるためにエネルギーを要することから当然なことであるが、水平管の場合よりも小さい空気速度で輸送できる場合が多い。

これらのために、ベンドの数が多くなっても鉛直、水平管を交えて配管し、まっすぐな長い輸送管をなくしたほうが結果として合理的なことがある。特に比重量が大きく輸送しにくい粉粒体ではこの傾向がいちじるしい。

しかしこれらの諸現象の程度を算定する方法と、その影響を考慮に入れた的確な計算方法はまだ確立されていない。

(6) 粒子の付着、凝集、固着の実態が複雑なこと：一般に微細な粉体ほど、付着、凝集、固着の現象がいちじるしい。これらの原因としては分子間力、毛管力、電気力、機械的なからみ合い、などが考えられているが、固気混相流の輸送ではそれらの原因が重なって作用するようである。また高温気流を扱う装置では熱分子運動によって粉末粒子が低温壁面に付着する傾向が見られる。

さらに SO_3 などのガスを含む気流では露点が上昇して結露しやすく、壁面に粒子が付着しやすい。そのほか化学変化を与えるガスが存在する場合や、吸湿性あるいは潮解性の粒子では付着、凝集、固着などの現象があらわれる。

これらの現象によるトラブルを避けあるいは低減するために輸送空気速度を大きくしたほうがよいのか、あるいは小さくしたほうがよいのかは、それぞれの場合によって異なるようで、今のところまだ定説を見ず、まして適切とする輸送空気速度を算出する方法は寡聞にして知らない。

(7) 粒子の破碎、機器の摩耗低減に対する考慮が必要なこと：品質あるいは商品価値を維持するために輸送物粒子の破碎を最小限にとどめたい場合や、機器補修のための経費と時間を節減するために摩耗をできるだけ少なくしたいことが多い。

輸送にともなう粒子の破碎と機器の摩耗の程度は粉粒体の種類とそれぞれの場合の輸送条件によって異なるが、一般的に粒子の破碎は輸送空気速度のほぼ2～3乗に比例し、機器の摩耗は約3乗に比例して、いずれもベンドにおいて発生しやすい。

したがって輸送装置としてまず粒子の破碎や機器の摩耗を極力少なくしたい場合は、経済性を無視してもベンドの数が少なくしかも輸送しやすい配管経路をとり、輸送空気速度をできるだけ小さく選定する必要がある。この場合は、経済的な見地から所要動力を最小にしようとする計画方法とは考え方が異なることになる。

以上の諸事項は互いに関係しあっていて現象が複雑であり、問題を解決できるまでにはいたっていないが、解決の一助とするために二、三の研究が進められているので参考までに一端を以下に紹介する。

4. 粒子の飛散

混相流における固体粒子輸送の基本問題として、まず粒子層の上面にある粒子が気流によって飛散する現象について考える。これについては、おもに土木工学関係の多くの研究者によって実験的ならびに理論的研究が進められてきたが、管による混相流輸送の計画にそのまま応用できる結論にまではまだいたっていないようである。

この現象を解析するには、まず粒子層上の気流の速度分布を知る必要がある。これについていろいろな実験式あるいは理論式⁸⁾が示されているが、現在のところ Prandtl たちが与えたつぎの半理論式が最も妥当である。すなわち粒子層表面に沿って流体が流れる場合、面の近くでは境界層ができて速度が小さくなり、高さ方向に速度勾配を生ずる。いま粒子層の粗さを k とすると、高さ z のところにおける速度 u_a は

$$\frac{u_a}{u_*} = \alpha + 5.75 \left\{ \log \left(\frac{k u_*}{\nu} \frac{z}{k} \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

で表わされる。

ここで u_* は面における摩擦速度で、流体の密度を ρ_a 、それによる粒子層表面における摩擦応力を τ とすると

$$u_* = \sqrt{\tau / \rho_a} \quad \dots\dots\dots (9)$$

で定義され、 $[m/sec]$ の次元を持っている。なお ν は流体の動粘性係数で、 $k u_* / \nu \leq 5$ では粒子は境界底層の中に入り、速度分布に粗さの影響はあらわれなしとして、 α は粒子の大きさによって決まる定数で、Nikuradse は実験によって

微細な粒子による層では $\dots\dots\dots \alpha = 5.5$

十分に粗い粒子による層では $\dots\dots\dots \alpha = 8.48$

と与えている。

なお粒子層の粗さ k は粒子径 d_s の粒子が充てんされた面の粗さで、次式が示されている。

Bagnold の式 (比較的小さい砂粒の場合) :

$$k = d_s / 30 \quad \dots\dots\dots (10)$$

White の式 (比較的大きい砂粒の場合) :

$$k = d_s / 9 \quad \dots\dots\dots (11)$$

Zingg の式 (単位は mm とする) :

$$k = 0.081 \log (d_s / 0.18) \quad \dots\dots\dots (12)$$

いま粒子層の表面には Fig. 6 (a) に示すように (9) 式で表わされる速度勾配を持つ流れがある場合、斜線を施した一つの粒子が飛散する条件を考えてみる。この粒子には推力と揚力が生じ、その合力 f が (b) 図、(c) 図に示すように働く。この力のために隣接する粒子との接点 j のまわりにモーメントを生ずる。この大きさが粒子の重量 w が同じく接点のまわりに生ずるモーメントよりも大きくと転動しはじめ、浮び揚ろうとする。力学的には、力 f と重量 w との合力を q 、この力と接点 j との距離を l とすると、モーメント $q l$ が (b) 図のように下向きの場合には粒子は粒子層に押し付けられ飛散しないが、(c) 図のように上向きの場合には飛散することになる。

ところが粒子は一旦浮び揚ると、流れの速度分布が (a) 図に示すように粒子層から離れるほどより均一に近くなるから揚力が減少し、(d) 図の位置 1—2—3—4 について示してあるように合力 q の方向が次第に水平に近くなり、つづいて下向きになって粒子は沈降することになる。

しかし流れの速度は粒子層表面から離れるほど大きいことと、乱れおよび粒子の形が不規則なこと、落下した粒子が静止している粒子をはね飛ばすこと、粒子の自転による Magnus 効果などのために、さらに飛散する粒子もあらわれ、外観的に粒子群は Fig. 7 (b) に示すような不規則なちょう躍と落下をくり返した運動することになるが、層の面は (c) あるいは (d) のような規則的な形をとりながら下流方向あるいは上流方向に移動することもある。

粒子が飛散しはじめるときの限界摩擦速度 u_{*c} は粒

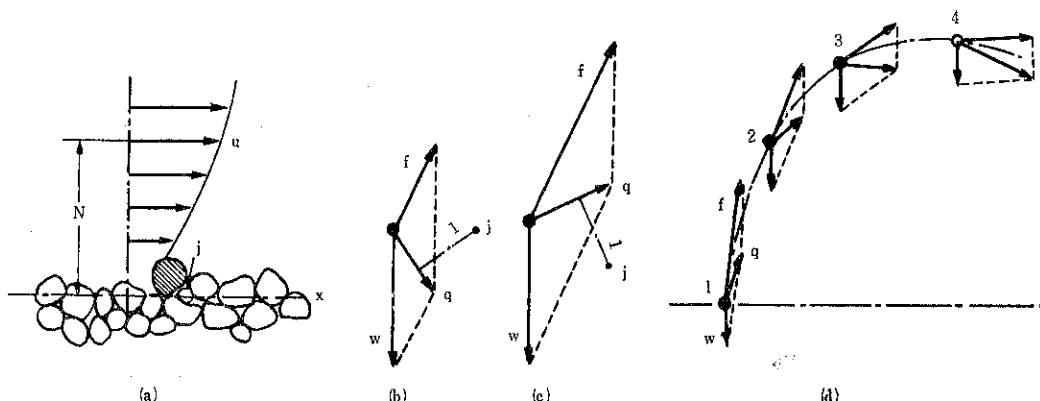


Fig. 6 粒子層表面に平行な流れによる粒子の飛散

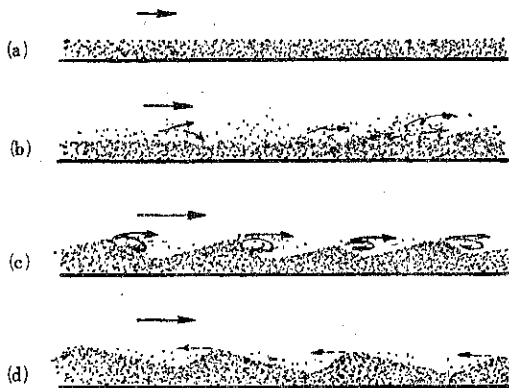


Fig. 7 粒子層表面における粒子の運動と移動

子の直径 d_s , 密度 ρ_s , 静止摩擦係数 ϕ_s のほか流体の密度 ρ_a , 動粘性係数 ν にも関係して, いろいろな実験結果が報告されている。それらの気流および水流についての多くの研究結果を岩垣, 土屋は次式の形でまとめ Fig. 8 を得た⁴⁾。

$$\frac{u_{*c}^2}{\left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a}\right) g d_s \tan \phi_s} = \frac{1}{\varepsilon \Psi \left(\frac{u_{*c} d_s}{\nu} \right)} \quad (13)$$

ここで左辺は無次元化した限界掃流力を表わし, g は重力の加速度, ε は実験定数, Ψ は () 内の因子についての関数である。この図によると $u_{*c} d_s / \nu \approx 10 \sim 30$ の場合, たとえば気流について $u_{*c} \approx 0.15 \text{ m/sec}$, $\nu \approx 1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$ とすると $d_s \approx 0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ の粒子が最も飛散しやすいことになる。

管路による固気混相流の輸送についてはこの整理方法に含まれている因子以外に, 前述のように粒子および気流の流れ方についての多くの物理・化学的性質の影響を受け現象がさらに複雑であると考えられるが, 研究を進

めるうえの一つの参考になると思われる。

5. 障害物のまわりにおける粒子のたい積⁵⁾

固気あるいは固液混相流では物体のまわりに固体粒子がたい積しやすい。たとえば粉粒体の空気輸送では管底, 切換弁あるいはダンパなどのまわりなどに輸送物が残留しやすいが, ある種の産業ではこれは厳禁とされている。たとえば高級食品工業では腐敗防止のため, 石油化学工業では異品質物の混入を避けるため, 吸湿性あるいは固着性のものではその成長による閉そくを避けるため, などの理由によって残留は皆無にすることが要求される。

物体のまわりにおける粒子のたい積現象は, 前項で述べた粒子の飛散に関係する諸要素に加えて, 物体のまわりにおける気流の流れ方にいちじるしく影響されることが経験されている。

そこで筆者らは Fig. 9 に示す実験装置を用いて基礎研究を行なった。管路は透明アクリル製で横断面は幅 20 mm, 高さ 100 mm の長方形である。この中に幅 20 mm, 長さ $l = 10 \sim 50 \text{ mm}$ の黄銅板を底面に対する角度が $\theta = 30 \sim 90^\circ$ に変えて置く。それぞれの場合についてアルミナを含む気流を十分長い時間流し, 板の前後に生ずるたい積量とたい積の範囲を測定した。実験に用いたアルミナの物性値はつぎのとおりである。

真密度 $\rho_s = 4.05$, かさ密度 $\rho_b = 0.955 \sim 1.452$
安息角 $\phi_r = 41^\circ 00'$, 崩壊角 $\phi_t = 13^\circ 20'$
壁面摩擦角 $\phi_w = 18^\circ 28'$, 内部摩擦角 $\phi_i = 9^\circ 24'$
ストークス平均粒子径 $d_s = 27.4 \mu$

実験ではこれを混合比 $\mu_s = 0.1 \sim 0.5$, 風速 $u_a = 5 \sim 30 \text{ m/sec}$ の範囲で流した。

実験条件とたい積状態との関係は一見複雑であるが,

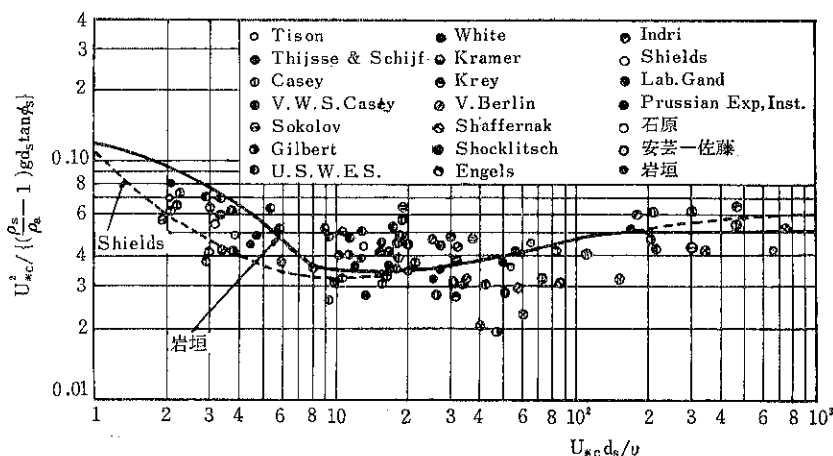


Fig. 8

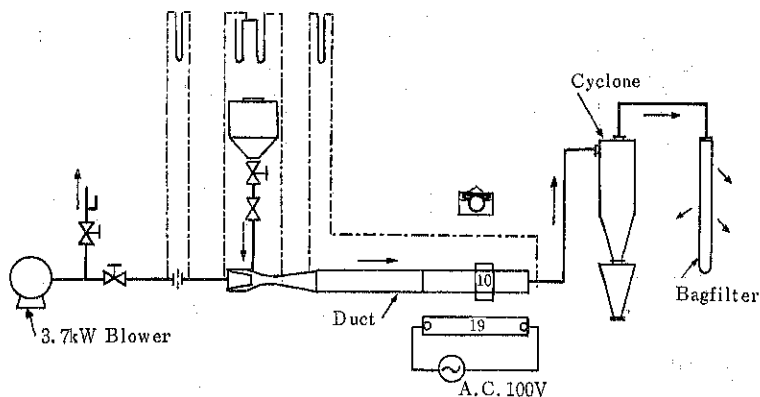


Fig. 9 たい積実験装置系統図

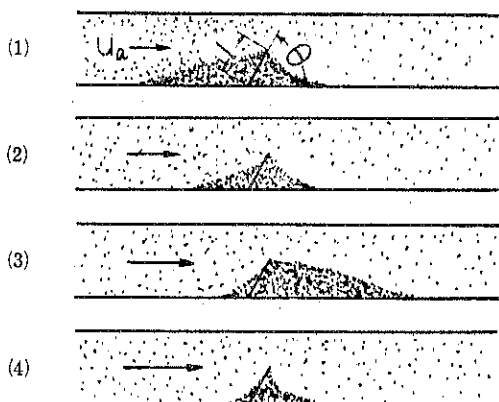


Fig. 10 板のまわりにおけるたい積状態

Fig. 10 に一例を示すように一つの定性的な関係が見られた。すなわち風速が小さい場合は板の上流側でのたい積がいちじるしい。風速がある程度大きくなると上流側でのたい積量は少なくなり、むしろ下流側で多くなる。これは上流側では吹き流されるのに対し、下流側では板の背後に生ずる後流の範囲が大きくなってその中にたい積するためと考えられる。さらに風速が大きくなると下流側のたい積量も減少する。これは後流の乱れの程度が大きくなり、たい積しようとする粒子が洗い流されるためと考えられる。もちろんこれらの定量的な関係はそれぞれの場合の条件によって異なる。

このようにたい積量 W は多くの因子の影響を受け測定値を一概に整理しにくい。横軸に $R_e \cdot F_r$ をとり、たて軸に $W/(\mu_s \theta / \phi_r)$ をとって描くと Fig. 11 のとおりになって、比較的規則性が見られる。

ここで $R_e = u_a m \rho_a / \mu$: Reynolds 数, m : ダクトの動水半径, ρ_a : 空気密度, μ : 空気粘性係数, $F_r = u_a / \sqrt{mg}$: Froude 数, g : 重力の加速度, $W = W_s / W_0$: 無次元で表わしたたい積量, W は板の前後に粉

粒子が安息角をもってたい積したと仮定した場合のたい積量で、 B をダクトの幅とすると $W_0 = 2 \rho_a g B l^2 \sin^2 \theta / \tan \phi_r$, その他の記号は前述のとおりである。

この図から近似的に、無次元で表わしたたい積量 W を

$$W = K (R_e \cdot F_r)^n (\theta / \phi_r) \mu_s^{1.5} \quad \dots\dots\dots (14)$$

と表わすつづきのことがいえる。

1) $R_e \cdot F_r < 7 \times 10^3$ の範囲 ;

$$K = 8.0 \times 10^5, \quad n = -1.0$$

2) $7 \times 10^3 < R_e \cdot F_r < 4.5 \times$

10^5 の範囲 ;

$$K = 1.5 \times 10^{-2}, \quad n = 0.5$$

3) $4.5 \times 10^5 < R_e \cdot F_r$ の範囲 ;

$$K = 1.5 \times 10^5, \quad n = -1.0$$

$\theta = \pi/6$ の場合は (14) 式では表現できない。この場合は板の背後に生ずる後流の形と気流の乱れの状態が他の場合とは異なるのではないかと考えられる。

板の前面のたい積量 W_1 と後面のたい積量 W_2 との比 W_1/W_2 は Fig. 12 に示すように $R_e \cdot F_r$ の値が大きいくほど減少する傾向が見られる。すなわち流速が大きいくほど板の後面にたい積する割合が大きくなる。

この図から W_1/W_2 は $(\phi_r/\theta)^6$ にほぼ比例するが、 $R_e \cdot F_r \approx 10^6$ の測定点ではやや大きい値を示している。これは板の背後に生ずる強いうずのためにたい積しようとする粒子が吹き流されて、後面たい積量 W_2 が減少するためと考えられる。

これらのことから物体のまわりのたい積量は、流速が十分大きいほど、障害物表面とダクト底面の間の角度が

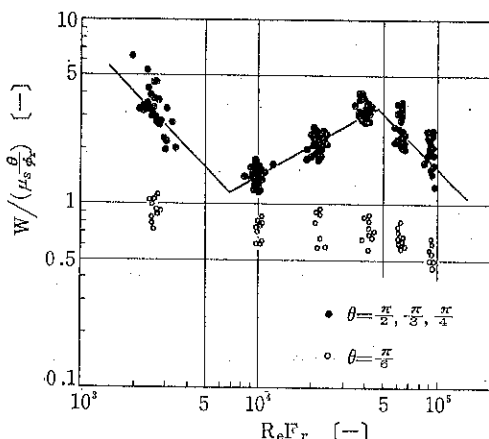


Fig. 11 $R_e F_r$ と板のまわりにおける粒子のたい積量との関係

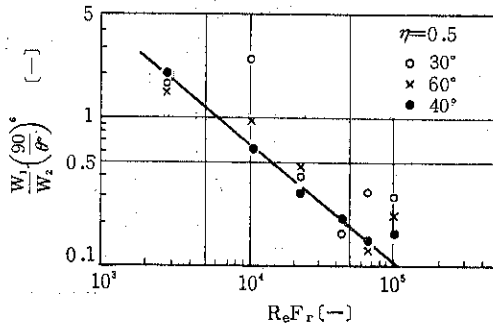


Fig. 12 $Re \cdot Fr$ と板の前後におけるたい積量の比 $(W_1/W_2)(90/\theta)^\eta$ との関係

小さいほど少なくなることがわかる。なお実際的には障害物の形を粒子がたい積しようとする形にしておけば、たい積は避けられることになる。

6. 輸送の限界条件

固気混相流たとえば粉粒体の空気輸送において、輸送管の単位長さについての圧力損失は一般的に水平管に比べて鉛直管のほうが大きい、輸送するために必要な最小限の空気速度は水平管のほうが大きい、この限界空気速度 u_a はもちろん輸送物の種類とその性状によって異なるが、輸送の濃度すなわち混合比 μ_s と輸送管の内径 D によっても異なることが経験されている。すなわち輸送状態はこれらによって変わり、装置の計画にあたってはこれらを考慮に入れて適切な輸送空気速度を選定する必要がある。その理由については3で述べたとおりである。

限界輸送空気速度についての研究の重要性は認識されいながら理論的にも実験的にも難しい問題で、現在のところまだ疑問が残されているが、Barth⁶⁾, Bohnet⁷⁾, 上滝⁸⁾などの研究結果が報告されている。Fig. 13はこれらの研究者が得た結果を図に描いたものである。この図の横軸の Fr は、たて軸の混合比 μ_s に対して閉そくを生ずるときの輸送空気速度 u_a と管の内径 D についての Froude 数である。したがって図中の各線より上の領域の混合比では閉そくすることを表わしている。なお図中の各点は日本機械学会がアンケートで得た日本国内の実際装置の運転値をあわせて描いたものである。

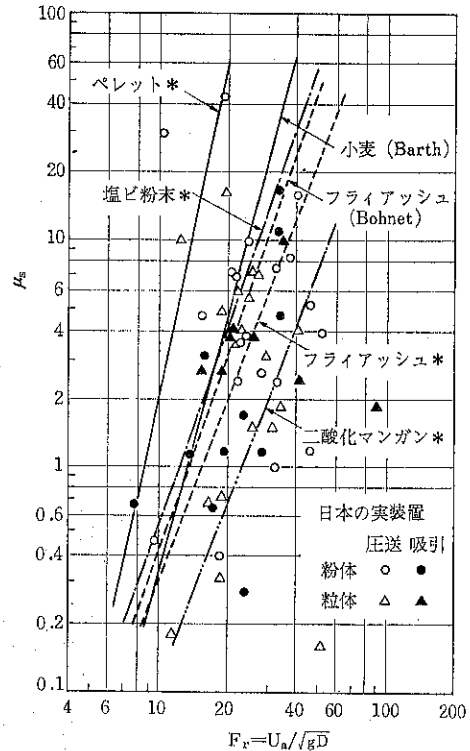
各研究者の実験条件と図に描いた限界線をもとに

$$\mu_s = K Fr^n / 10^4 \quad (15)$$

と表わしたときの係数 K と指数 n の値は表1のとおりである。

(15)式からそれぞれの輸送物について

$$\frac{\mu_s}{Fr^n} = \frac{K}{10^4} = \text{一定}$$



(*印: 上滝の実験結果)

Fig. 13 輸送限界の Froude 数 Fr と混合比 μ_s との関係

表1 輸送限界条件に関する実験条件と実験式の係数 K および指数 n の値

研究者	輸送物	管内径 D mm	K	n
W. Barth	小麦	20~420	0.31	4
M. Bohnet	フライアッシュ		0.41	3
上滝 具貞	ペレット (3.2mm)	2~5B	0.463	4.7
"	塩ビ粉末 (150μ)	"	3.32	3.19
"	フライアッシュ (40μ)	"	6.28	2.69
"	二酸化マンガ (30μ)	"	2.08	2.69

の関係があるので、管内径 D_1 、混合比 μ_{s1} のときの限界輸送空気速度が u_{a1} の場合、管内径 D_2 、混合比 μ_{s2} するとき予想される限界輸送空気速度 u_{a2} は

$$\mu_{s1}/Fr_1^n = \mu_{s2}/Fr_2^n$$

の関係から

$$u_{a2} = u_{a1} \left(\frac{\mu_{s2}}{\mu_{s1}} \sqrt{\frac{D_2}{D_1}} \right)^{1/n} \quad (16)$$

で与えられる。

試みに $\mu_{s2}/\mu_{s1} = 1 \sim 6$, $D_2/D_1 = 0.5 \sim 4$, $n = 2$,

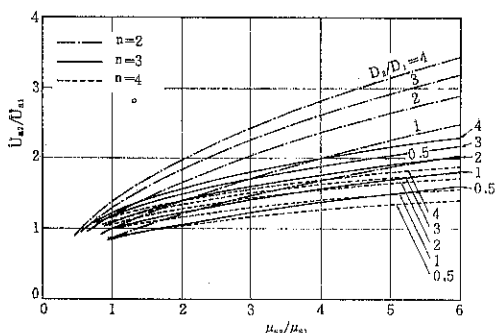


Fig. 14 粉粒体空気輸送装置の仕様値換算曲線

3, 4 の場合について(16)式を数値計算し, その結果を図に描くと Fig. 14 のとおりになる。

装置の計画段階では普通比較的小さい内径の輸送管によるモデル試験を行ない限界とする輸送空気速度を知る場合が多いが, その実験値を内径および混合比が異なる実際の装置に適用する場合は, (16)式あるいは Fig. 14 によって実際の 限界輸送 空気速度を 推算することができ

る。なおいろいろな実際の装置について検討してみると, 輸送管の内径が限界輸送空気速度に与える影響は(16)式による以上に大きい場合が多い。上流も混合比が一定のときは, 輸送管の内径が大きいかほど限界輸送空気速度がいちじるしく小さくなる傾向があることを指摘している。いろいろな輸送物について, この明瞭な定量的関係と(16)式で表わされる係数Kと指数nの値を確認することが今後に残された課題といえよう。

なお上記では気流は非圧縮・非膨張性として扱っている。高圧圧送式あるいは高真空吸引式輸送では問題がさらに複雑になり, 今のところ寡聞にして発表された研究例を見ない。

7. 粒子層を吹抜くために必要な空気圧力⁹⁾, 10)

固気混相流装置, 特に高濃度の空気輸送装置あるいは粗大物の吸引輸送装置などの計画にあたっては, 輸送の限界条件としてプラグ状態にある輸送物閉そく層の長さとしてそれを吹抜くために要する空気圧力との関係を知っておく必要がある。いいかえればプラグ状態にある層の長さを, 使用する空気源機械の最大吐出圧力(吸引式の場合は最大吸引圧力)以内に吹抜くことができるように計画する必要がある。

この現象には多くの要素が関係することが経験されていて, 理論解析を行なうためにはいろいろの仮定を設ける必要があるが, プラグ層内は粒子が均一に充てんされ

ていること, 空気の圧縮性・膨張性は無視できるとすること, などの条件の下でプラグ層を吹抜くために要する空気圧力 Δp についての理論式として次式を得た。

(1) ベンド管の場合

$$\Delta p = \frac{\pi R}{2} r_b \frac{\left(\psi - \frac{8}{3\pi} \xi_w \right) + \frac{1}{4K\xi_w} \left(\frac{D}{R} \right) \left(\frac{8}{3\pi} \xi_w \psi + 1 \right)}{\left\{ 1 + \frac{1}{(4K\xi_w)^2} \left(\frac{D}{R} \right)^2 \right\} (\psi - 1)} \quad \dots\dots\dots(17)$$

$$\psi = \exp \left(2K\xi_w \frac{\pi R}{D} \right)$$

(2) 直管

$$\Delta p = L r_b \left(\sin \theta + \frac{8}{3\pi} \xi_w \cos \theta \right) \quad \dots\dots\dots(18)$$

これらの式で記号はつぎのとおりである。R: ベンド管の曲率半径, D: 管の内径, r_b : 粉粒体のかさ比重量, ξ_w : 粉粒体の壁面摩擦係数, K=Rankin 定数, L: プラグ層の長さ, θ : 水平面からの管の傾斜角, である。

実験は Fig. 15 に示す装置によって行なった。管は透明アクリル製でベンドは内径 $D=77.0 \sim 99.7\text{mm}$, 曲率半径 $R=225 \sim 1,000\text{mm}$ の 7 種類, 直管はそれぞれの内径の管についてプラグ層の長さを水平管では $L=0.3 \sim 2.7\text{m}$, 鉛直管では $L=0.2 \sim 1.7\text{m}$ に変えてた。

粉粒体試料としてはポリエチレンペレットを用いた。その物理的性質はつぎのとおりである。

真比重量 $r_s=901\text{kg/m}^3$,
かさ比重量 $r_b=497 \sim 634\text{kg/m}^3$,
安息角 $\phi_r=35.9^\circ$, 壁面摩擦係数 $\xi_w=0.466$,
内部摩擦係数 $\xi_i=0.793$,
重量平均粒子径 $d_s=3.225\text{mm}$

ベンドについての実験結果の一例を Fig. 16 に示す。たて軸にとった $\Delta p/(\pi R r_b/2)$ はプラグ状態にあるベンド内粉粒体の単位量当りに必要とする空気圧力の程度を表わして、これは横軸にとった曲率半径Rと内径Dの比 R/D が小さいほど, 特に6以下では減少し,

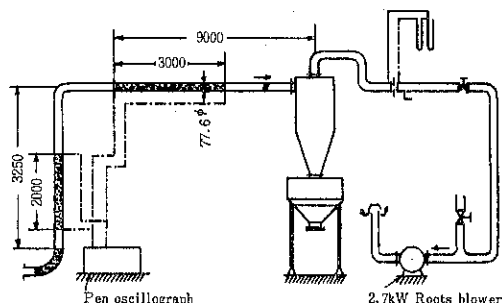


Fig. 15 吹抜け実験装置系統図

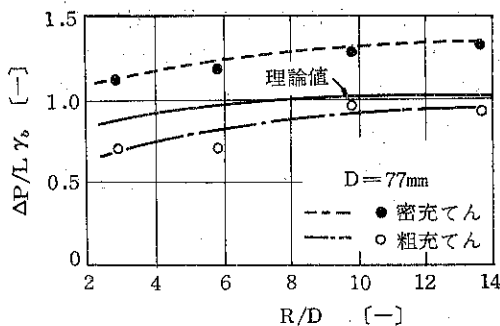


Fig. 16 ベンドの R/D とプラグ層を吹抜くために必要な圧力 Δp の理論値および実験値

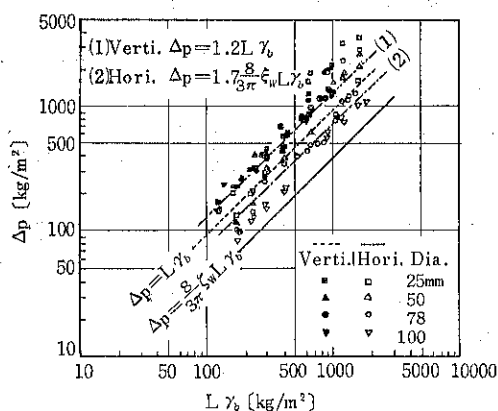


Fig. 17 直管部のプラグ層を吹抜くために必要な圧力 Δp の理論値と実験値および半理論式

理論値と実験値とはよく一致している。このことは曲率半径が小さいベンドほど閉そく状態にある層を吹抜きやすいことを表わしている。

直管についての実験結果は Fig. 17 のとおりで、実験値は(18)式から計算した理論値よりも全般的に大きい値を示している。この結果から理論式の修正係数を求めるとつぎの半理論式が得られる。

$$\text{鉛直管: } \Delta p = 1.2L\gamma_0 \dots\dots\dots(19)$$

$$\text{水平管: } \Delta p = 1.7 \times \frac{8}{3\pi} \xi_w L\gamma_0 \dots\dots\dots(20)$$

なお実験は装置の空気系統を組みかえ、プラグ層を正圧によって吹抜く場合と負圧によって吹抜く場合について行なったが、両者の実験値は本実験の条件内ではまったく同じであった。

8. あとがき

本文では固気混相流装置の計画にあたって留意すべき二、三の問題点とその基礎的研究の一端について紹介したが、いずれもまだ実務上の問題を解決するまでにはいたっていない。

特に適切とする輸送空気速度と圧力損失の算定に関係する事項、たとえば粒子の形状係数の実用的な算出方法、低速高混合比あるいはしゅう動輸送機構、粒子径あるいは比重量がいちじるしく異なる粒子群輸送の難易と偏析、微粉体の管内付着防止、粒子の弾力性が輸送の難易におよぼす影響、輸送上の比例法則、空気の圧縮性・膨張性の影響、およびこれらの諸事項を計画値に正確に算入する方法、などについては未知ことが多い。

本文にいささかでも各位のご参考になる点があれば幸いである。

研究にあたって井伊谷先生はじめ諸先生からご指導と文献のご恵与をいただいたことを感謝している。なお実験は藤井史郎、深沢盛吉、藤井謙治、広野幸洋およびそのグループ諸君の協力によるものである。

参 考 文 献

- 1) 2) 狩野武, 粉粒体輸送装置, 4 版 (昭49), 141, 99, 日刊工業.
- 3) たとえば石原藤次郎編, 水工水理学, (昭47), 637, 丸善.
- 4) たとえば石原藤次郎, 本間仁, 応用水理学(中 I), 6 版 (昭46), 18, 丸善に紹介してある.
- 5) 狩野武, 藤井史郎, 藤井謙治, 板倉敏文, 粉体工学研究会誌, 12-1 (1975-1), 4~9.
- 6) W. Barth, Chemi. Ing. Techn., 26-1 (1954), 33.
- 7) M. Bohnet, V. D. I-Forsch.-h., 507 (1965), 20.
- 8) 上滝具貞, 粉粒体の空気輸送(新版), (昭49), 270, 日刊工業.
- 9) 狩野武, 深沢盛吉, 南条行雄, 広野幸洋, 大江邦夫, 化学工学協会第8回秋季大会研究発表講演要旨集, (昭49-10), 240~241.
- 10) 狩野武, 深沢盛吉, 広野幸洋, 大江邦夫, 粉体工学研究会昭和50年度春期例会講演要旨集, (昭50-5), 64~68.

貯 槽 と 粉 体 物 性

Storage Bin and Properties of Bulk Solids

青木 隆一*

Ryuichi Aoki

ま え が き

貯槽の設計に当って主要な粉体力学的問題点は 1. 粉体圧 2. 閉そく現象 3. フローパターン 4. 流出速度である。これらの中で実験室規模で古くから研究が行なわれているのは流出速度であり、多くの実験式も提案されている¹⁾。しかし実際の貯槽の操作では底部の流出口を全開にして重力で自由落下させる操作はむしろ少なく、大部分の場合ベルト、チェーン、ロータリー、スクリュウ、振動フィーダーなど各種の機械的排出機、あるいはエアスライド、シュートなどを用いて排出させており、自由落下の流出速度は一般にこの場合よりもかなり大きい²⁾ため、その推算はあまり実用的な意味を持たない。

(もちろん、処理量大きい場合に流路の必要最小断面寸法を計算するのには有用であるが)

大型サイロにおいてはサイロ壁面あるいは挿入物に及ぼす粉体圧は依然として未解明の部分を残した問題であり、また付着、凝集性を有する粉体を取扱う貯槽においてはアーチやラットホールによる閉そくが最大のトラブルである。

貯槽内の粉体のフローパターンは混合粉体の場合には偏析現象と直接関連するので重要である。また穀類その他経時変化のおそれのある粉体の貯蔵では先入先出が必要であり、このためにはマスフローになるようにすることが望ましい。しかし完全なマスフローにするには極めて尖ったホッパーを用いなければならず、これは容量の点で多くの場合実際的でない。したがって實際上、ほとんどの貯槽が完全なマスフローではない。しかしパイピングのような顕著なファネルフローは避ける必要がある。

粉体力学的問題点を以上のように展望してみると、粉体層の静的および動的な応力状態を正確に求めることがこれら諸問題に共通した基礎的な事項であることがわかる。これに対しては粉体層を連続体として取扱った土質力学の手法が適用されることになるが、一般の粉粒体の場合、特に応力問題に関しては粉体層の不連続的な性格が顕著に現われることが多いために、一般的な表現は困難でケースバイケースという場合がかなりある。以下、サイロにおける粉体圧の場合について概観してみる。

1. サイロ (直立円筒ビン) 内の粉体圧に関する理論的考察

1.1 Janssen の式

Fig. 1 に示すように同筒内の粉体の任意の深さにおける垂直方向の力の釣合を考えて図における記号を用いれば周知の Janssen の式は次のようになる。

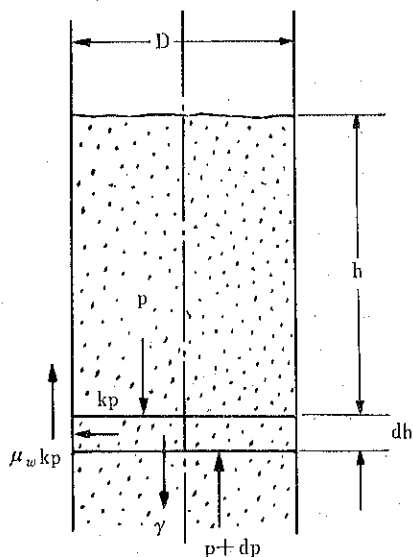


Fig. 1

* 横浜国立大学工学部
(〒233 横浜市南区大岡 2-31-1)
Tel 045-741-3541

$$p = \frac{Dr}{4\mu_w k} \left[1 - \exp\left(-\frac{4\mu_w kh}{D}\right) \right] \quad \dots\dots(1)$$

また粉体層の上表面に垂直方向に均一な圧 p_0 が働くと

$$p = \frac{Dr}{4\mu_w k} \left[1 - \exp\left(-\frac{4\mu_w kh}{D}\right) \right] + p_0 \exp\left(-\frac{4\mu_w kh}{D}\right) \quad \dots\dots(2)$$

すなわち Fig. 2 に示すように

$$p_\infty = Dr/4\mu_w k \quad \dots\dots(3)$$

とすれば, (1), (2)式は p_∞ に漸近する指数曲線となる.

(2)式は書きかえて

$$p = p_\infty - (p_0 - p_\infty) \exp(-4\mu_w kh/D) \quad \dots\dots(4)$$

すなわち $p_0 = p_\infty$ の場合には層内の至る所一定の圧になる.

壁面に垂直に働らく粉体圧 p_w は

$$p_w = kp = \frac{Dr}{4\mu_w} \left[1 - \exp(-4\mu_w kh/D) \right] \quad \dots\dots(5)$$

1.2 Reimbert の式⁸⁾

Reimbert は Fig. 3(a) に示すように粉体層の上表面は h_1 の高さの円錐状堆積層を考える. この部分の粉体重量 Q_0 は

$$Q_0 = \frac{\pi}{12} D^2 h_1 r \quad \dots\dots(6)$$

深さ h における粉体の全重量 Q_h は

$$Q_h = r \frac{\pi D^2}{4} h + Q_0 \quad \dots\dots(7)$$

十分深い位置では厚さ dh の粉体層の重量は壁面の摩擦で支えられると考えれば

$$\pi D dh kp_\infty \mu_w = \frac{\pi}{4} D^2 dh r$$

$$\text{だから } p_\infty = Dr/4\mu_w k \quad (4)$$

サイロ底面にかかる荷重の最大値 $Q_{\max}$ は

$$Q_{\max} = \frac{\pi}{4} D^2 p_\infty = \frac{\pi D^3 r}{16\mu_w k} \quad \dots\dots(8)$$

Fig. 3(b)において I は全荷重と h との関係すなわち(7)式を示す. 垂直荷重は曲線 II で表わされるとすると I - II = III で壁に働く荷重の深さ方向の変化が示される. III は $h=0$ で H 軸に接し, I と同じ勾配の漸近線

$$y = r_B Ah - (Q_{\max} - Q_0) \quad \dots\dots(9)$$

を有する. これを双曲線と仮定すれば

$$y = \frac{ah^2 + bh + c}{eh + f} \quad \dots\dots(10)$$

原点を通ることから $c=0$, $(dy/dh)_{h=\infty} = rA$ から $a=erA$, $(dy/dh)_{h=0} = 0$ から $b=0$, したがって

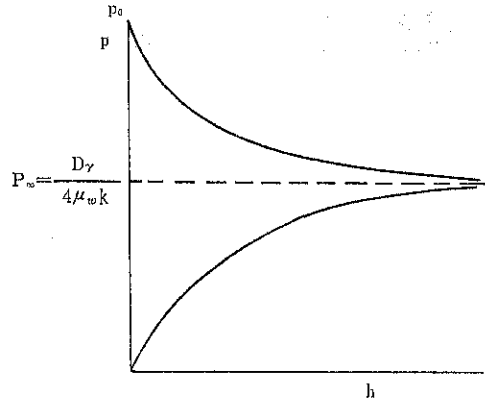


Fig. 2

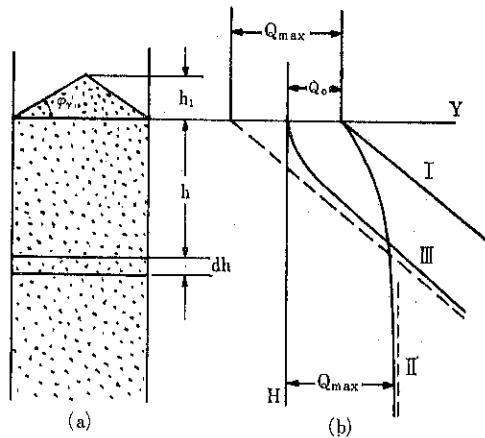


Fig. 3

$$y = \frac{erAh^2}{eh+f} \quad \dots\dots(11)$$

(9), (11)より

$$\begin{aligned} y - rAh &= \frac{erAh^2}{eh+f} - rAh \\ &= \frac{-frAh}{eh+f} = -(Q_{\max} - Q_0) \end{aligned}$$

$(Q_{\max} - Q_0)/A$ を rh にくらべて無視すれば

$$f = \frac{e[Q_{\max} - Q_0]}{rA} \quad \dots\dots(12)$$

したがって

$$y = \frac{rAh^2}{h+B} \quad \dots\dots(13)$$

ただし

$$B = \frac{Q_{\max} - Q_0}{rA} = \frac{D}{4\mu_w k} - \frac{h_1}{3} \quad \dots\dots(14)$$

(13)式より

$$dy = \frac{rA(h^2+2Bh)dh}{(h+B)^2} \quad \dots\dots(15)$$

すなわち深さ h の所で dy の荷重が壁面に鉛直方向に働いているから

$$p_w \pi D \mu_w dh = \frac{rA(h^2+2Bh)dh}{(h+B)^2}$$

$$\therefore p_w = \frac{Dr}{4\mu_w} \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{h}{B} + 1\right)^2} \right] \quad \dots\dots(16)$$

垂直平均応力 $\bar{p}_v$ は

$$\bar{p}_v = rh + \frac{rh_1}{3} - \frac{rh^2}{h+B}$$

$$= r \left[\frac{Bh}{h+B} + \frac{h_1}{3} \right] \quad \dots\dots(17)$$

1.3 Jenike の理論⁴⁾~7)

Jenike は充てん時 (静止時) および流出時の応力状態を Fig. 4 に示すように説明している。すなわち粉体を貯槽内へ上方から落下させて充てんすると粉体層は自重および衝撃力で垂直方向に圧縮されて Fig. 4 (a) に示すように主動応力状態になる。図には最大主応力線を示し、これは中心部で鉛直、壁面において鉛直方向と $\pi/2 - \epsilon_1$ の角度で交っている。 $(\epsilon_1$ は Fig. 11 に示す。) 右側に p_w の分布を示してあるが円筒部分では Janssen の式に従っている。

マスフローで連続的に流れている場合は粉体層は垂直方向に膨張しようとするため受動応力状態となり、中心部においては最大主応力は水平方向になる。Fig. 4 (b) に示すようなアーチ状の主応力線になるため arched state と呼んでいる。(これに対して (a) は peaked state ともいう)。応力分布は Jenike によれば (b) に示すように深さ方向にほとんど均一になる。(a) から (b) に移行する際には (c) 図に示すような応力状態の switch が生ずる。すなわち流出を始めるとホッパー出口から順次上方へ arched stress state が広がる。上方は peaked state であり、その境界の所に不連続的な集中荷重が作用する。この位置は次第に上方へ移動し、ビンとホッパーとの接合部や、内壁に凸出がある位置で止まることが多いが (c) 図の右に示すものはスイッチが上表面まで伝播したときの集中荷重の輪廓を示す。

この値の最大値は最小歪エネルギーの考え方で求めることができる。歪エネルギーが最小になるには円筒状から僅かに偏倚した特別な形が必要で、流下中の壁面付近の境界層はこのような形状を形成させようとする傾向がある。多くの場合、境界層は不安定で短期間しか続かない。層ができると Janssen field から minimum strain energy field へ switch が起こる。層が分解すると Janssen field へ switch back する。

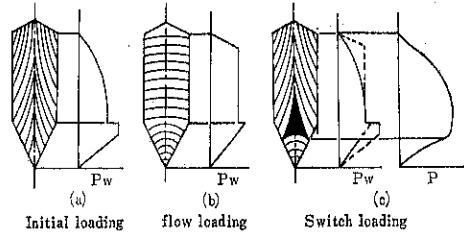


Fig. 4

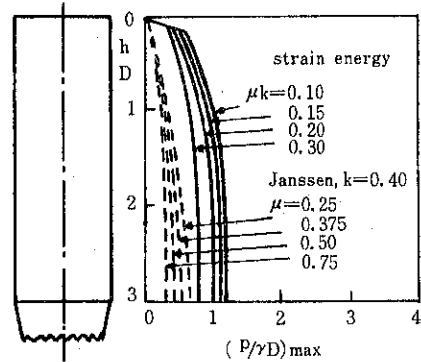


Fig. 5

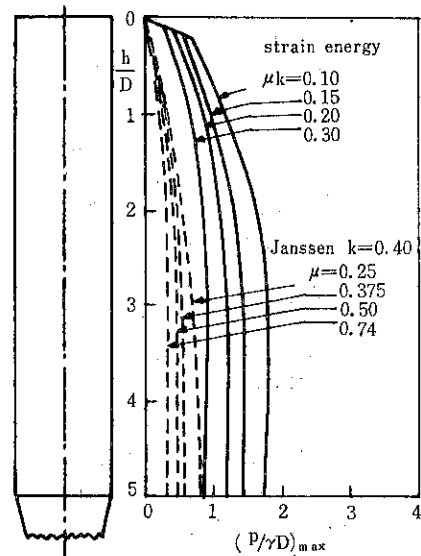


Fig. 6

溶接のつぎ目やコンクリートサイロの断面の円からの変形や仕上げの不良は境界層の原因となる。下方に僅かに広がった平滑円筒では境界層の厚さが switch を生ずるに不十分で流動中も Janssen field が保たれている。しかし凸出部があると部分的に Janssen 値の 2~3 倍になり、ピークは最小歪応力に近づく。ピーク値は粉体の圧縮度、摩擦特性と共に convergence の割合にもよ

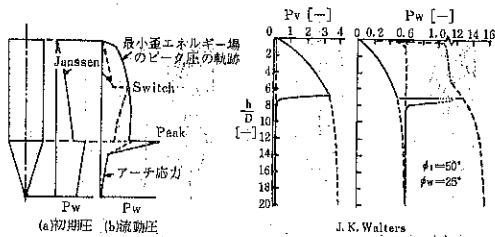


Fig. 7

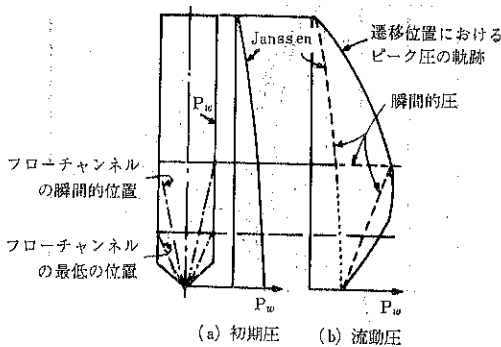


Fig. 8 ファネルフロービンにおける圧力分布

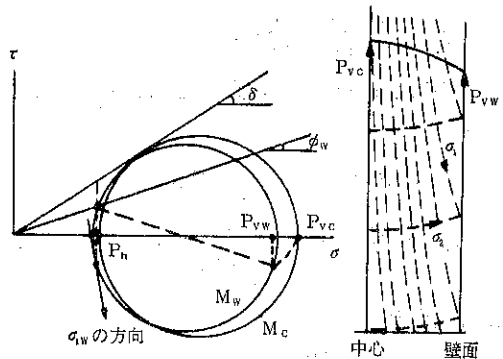
る。内部に大きな凸出があると歪エネルギーによる圧よりも大きな値になる。Fig. 5, 6は H/D がそれぞれ3および5の場合の円筒内の Janssen 式および歪エネルギーによる圧力分布を示す。すなわち垂直円筒内の粉体圧は(a)円からの僅かの偏倚, (b)壁面に形成される薄い安定または不安定境界層によって大きく影響される。したがって圧の限界のみが確定され下限は Janssen 式で近似できる。上限は歪エネルギーによる圧となる。Fig. 7, 8はそれぞれマスフロービンおよびファネルフロービン内の応力状態を示したものである。

具体的な設計指針としては Jenike は次のように述べている。

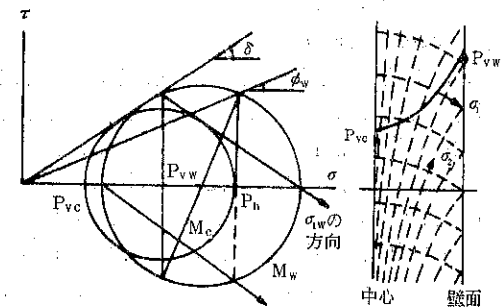
- (1) 溶接による収縮などのように表面に僅かの不完全さを有する下方に拡がっていない円筒では歪エネルギーに基づいて設計されるべきである。
- (2) 連続的に未拡がり又は段階的に未拡がりで収縮部のない円筒では Janssen 式による。
- (3) 凸出部のある未拡がりの円筒ではヤンセン式に係数をかけて設計する。

1.4 Walker の式⁸⁾

D. M. Walker は Fig. 9 に示すように主応力線の傾きを Mohr 円を用いて求め、垂直応力の半径方向分布を解析的に導いた。その結果 Janssen の式は平均垂直応力 $\bar{p}$ を用いて次のように修正される。



(a) 静的状態



(b) 動的状態

Fig. 9

$$\bar{p} = \frac{Dr}{4\mu_w k'} [1 - \exp(-4\mu_w k' h/D)] \quad \dots\dots (18)$$

$$k' = 1 / \left\{ (1 + 2 \tan^2 \delta) \pm \frac{4}{3\mu_w^2 \cos \delta} [\tan^2 \delta - (\tan^2 \delta - \mu_w^2)^{2/3}] \right\} \quad \dots\dots (19)$$

上式において複号は静的状態において+, 流動状態において-をとる。 $\delta = 42.6^\circ$, $\phi_w = 19.9^\circ$ の場合, Janssen の式は $k = 0.1927$, 19式では主動状態では $k' = 0.1965$, 受働状態では $k' = 3.423$ となる。また p_w は

$$p_w = k' \bar{p} = \frac{Dr}{4\mu_w} [1 - \exp(-4\mu_w k' h/D)] \quad \dots\dots (20)$$

この考え方は壁面においては摩擦力が働くから主応力の方向が壁面方向と一致しないことを考慮に入れているから粉体力学的には Janssen の仮定よりも健全であるが、流動中の k' の値の実測結果は後述するように 1 前後の値となり必ずしも実情と一致しない。

1.5 Switch に関する Walters の考察⁹⁾

前節と同じことであるが Walker および J. K. Walters の Fig. 10, 11に示す記号を用いれば

$$\bar{S}_z = \frac{1}{4BD} (1 - e^{-4BDZ}) \quad \dots\dots (21)$$

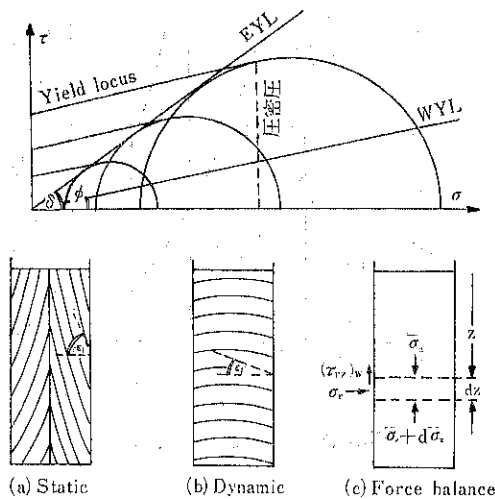


Fig. 10

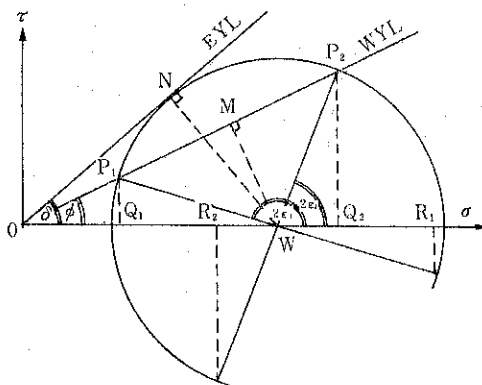


Fig. 11

$$S_r = \frac{1}{4 \tan \phi} (1 - e^{-4BDZ}) \quad \dots\dots(22)$$

$$T_w = \frac{1}{4} (1 - e^{-4BDZ}) \quad \dots\dots(23)$$

ただし

$$\bar{S}_z = \bar{\sigma}_z / rd, \quad S_r = \sigma_r / rd, \\ T_w = (\tau_{rz})_w / rd, \quad Z = z/d \quad \dots\dots(24)$$

$$B = (\tau_{rz})_w / (\sigma_z)_w \\ = \frac{\sin \phi \cos^2 \delta}{\cos \phi (1 + \sin^2 \delta) \pm (\sin^2 \delta - \sin^2 \phi)^{1/2}} \quad \dots\dots(25)$$

$$D = (\sigma_z)_w / \bar{\sigma}_z \\ = \frac{\cos \phi (1 + \sin^2 \delta) \pm 2(\sin^2 \delta - \sin^2 \phi)^{1/2}}{\cos \phi [(1 + \sin^2 \delta) \pm 2 \sin \delta]} \quad \dots\dots(26)$$

$$y = \frac{2}{3c} [1 - (1 - c)^{3/2}] \quad \dots\dots(27)$$

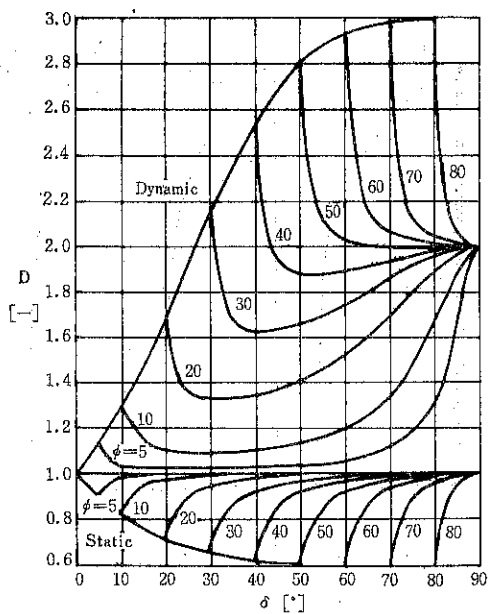


Fig. 12 Dと\$\delta, \phi\$との関係

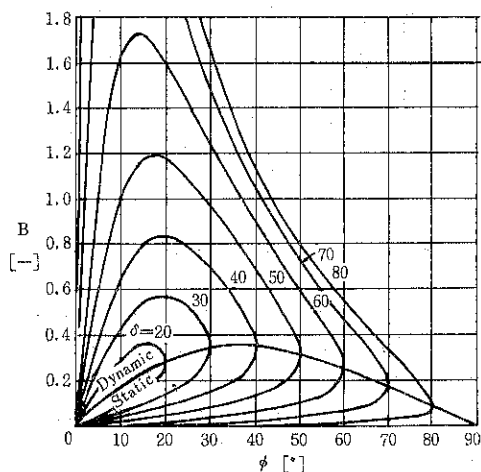


Fig. 13 Bと\$\delta, \phi\$との関係

$$c = (\tan \phi / \tan \delta)^2 \quad \dots\dots(28)$$

\$D\$は distribution factor と呼ばれ、 \$\delta\$ と \$\phi\$ によって Fig. 12 に示すような値となる。 また \$B\$ は Fig. 13 に示すようになり、 式から \$BD\$ は Janssen 式の \$\mu_{wk}\$ に相当することがわかる。

Fig. 14 は \$\delta = 50^\circ\$、 \$\phi = 25^\circ\$ のときの静止および流動中の応力分布を示す。 この場合、 \$(BD)_s = 0.1194\$、 \$(BD)_d = 1.6759\$ となるから層の深い位置において \$\bar{p}\$ は流動中の値は静止時の約 14 になる。

switch における応力状態は Fig. 15 (a) のように考え

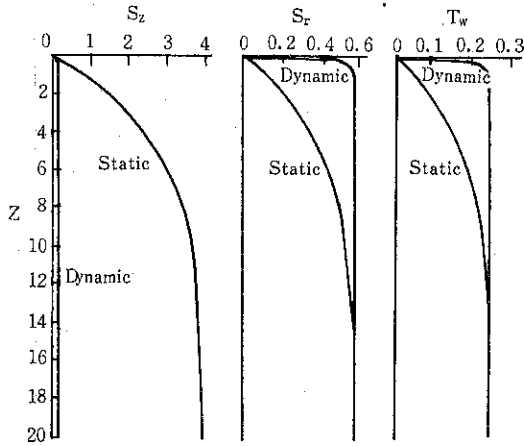


Fig. 14 $\delta=50^\circ$, $\phi=25^\circ$ の場合の応力分布

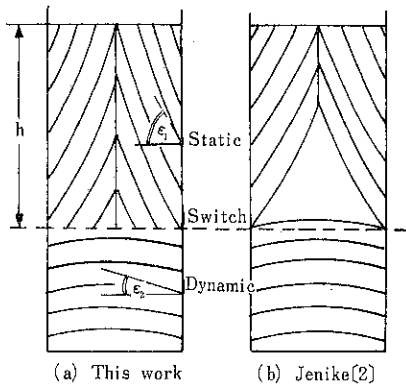


Fig. 15 スイッチにおける主応力線の方角

る。すなわち無次元深さ h の位置で switch が起こっているとすると、それより上方は静的状態で (2)~(3) 式に $(BD)_s$ を用いて応力が計算できる。 h より下方は受動状態で $Z=h$ における静的状態の応力を surcharge として有すると仮定する。したがって $Z \geq h$ においては

$$\bar{S}_z = \frac{1}{4(BD)_D} [1 - e^{-4(BD)_D(Z-h)}] + \bar{S}_{zs} e^{-4(BD)_D(Z-h)} \quad \dots\dots(29)$$

$S_r = BD \bar{S}_z / \tan \phi$ だから

$$S_r = \frac{1}{4 \tan \phi} [1 - e^{-4(BD)_D(Z-h)}] + \frac{(BD)_D}{(BD)_S} (S_r)_s e^{-4(BD)_D(Z-h)} \quad \dots\dots(30)$$

S_r の最大値は switch で生ずるから $Z=h$ として最大値の包絡線は

$$(S_r)_{env} = \frac{(BD)_D}{(BD)_S} (S_r)_s \quad \dots\dots(31)$$

Fig. 16 に種々な δ および ϕ に対して $(BD)_D/(BD)_S$ の

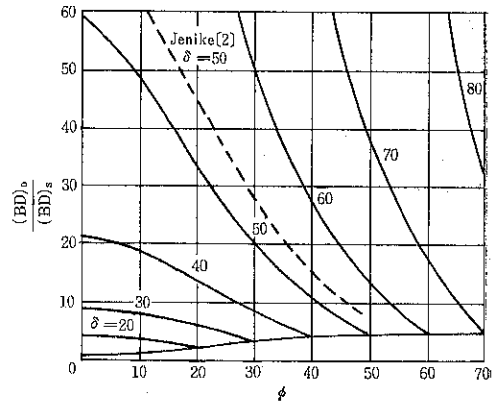


Fig. 16 $(BD)_D/(BD)_S$ 対 ϕ

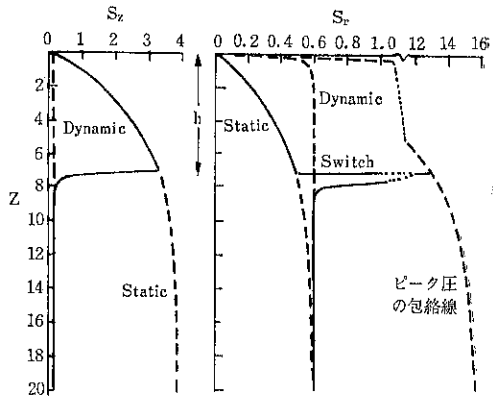


Fig. 17 $\phi=25^\circ$, $h=7$ における静、動およびスイッチ応力

計算値を示す。図中の破線は $\delta=50^\circ$ の場合の、Sokolovski の式を用いた Jenike の計算結果である。また Fig. 17 は $\delta=50^\circ$, $\phi=25^\circ$, $h=7$ の場合の応力状態であり壁面における switch 応力は静止状態の 26.6 倍であるが、この値はその下側で急激に減少し直径の $1/2$ 下方では静的圧の 2 倍以下になる。

剪断応力 T_w は S_r の $\tan \phi$ 倍であるから switch においては T_w も急増する。

switch のピーク応力は壁面の極めて小さい面積に働らく短時間の遷移応力であるから実測することは困難である。測定装置は応答が速く小型でなければならない。しかし一方では受圧面は粒子の大きな塊の影響を平均化するために十分大きくなければならない、これらの矛盾する要求のために (3) 式で示されるような大きな応力が報告されなかった。Platonow の実測結果は小型で高感度のゲージによったため大きな側圧を得ている。

2. 粉体圧と粉体物性

粉体圧の実際は上述の理論的考察よりもかなり複雑で、投入方法、投入速度など種々の因子に影響される。その一例として Fig. 18 に示すピンおよび充てん方法で測定した結果の一部を Fig. 19~27 に示す。これらを見ると、各点の測定値のみでは Janssen 式の指数曲線状の圧力分布を確認することは困難だが、個々の測定点の層高に

これらの円筒サイロ内の粉体圧の測定データーをみると同一材料でも μ_w の値がかなり大幅に異なり、さらに



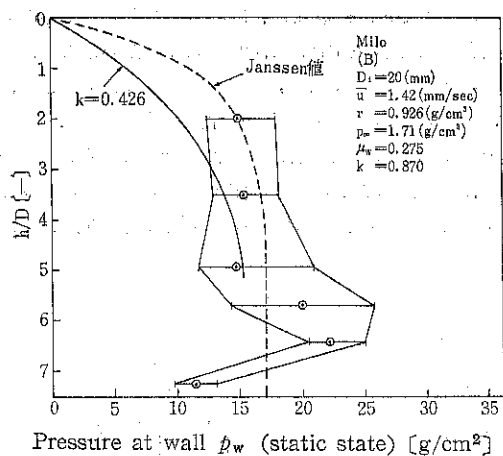


Fig. 21

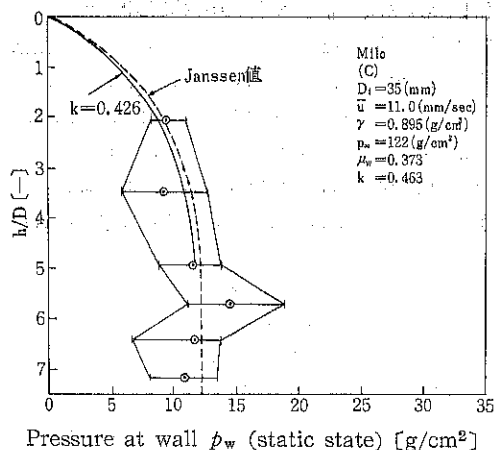


Fig. 24

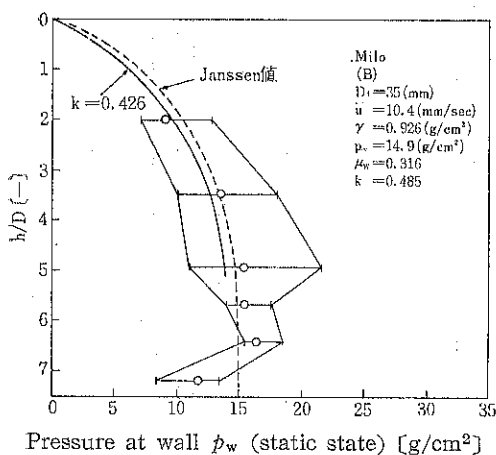


Fig. 22

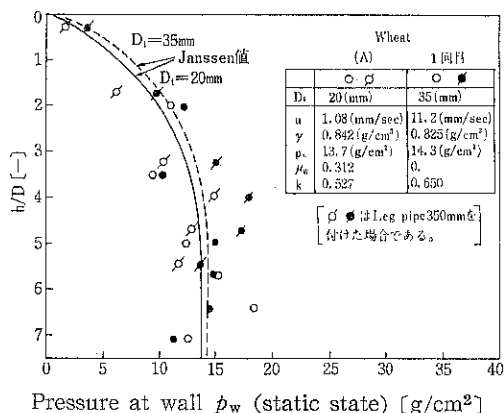


Fig. 25

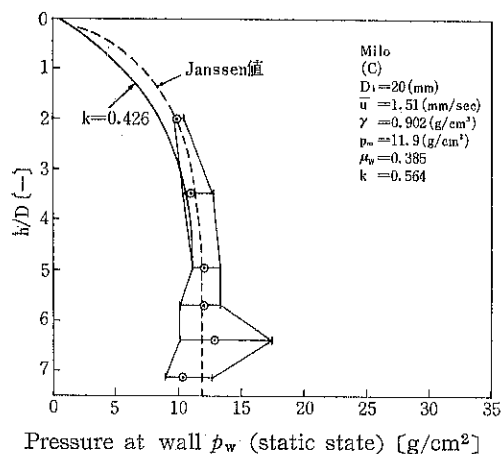


Fig. 23

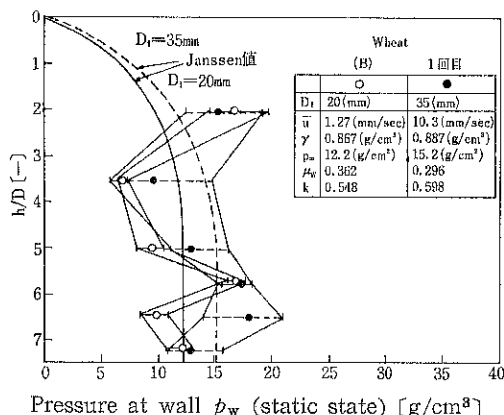
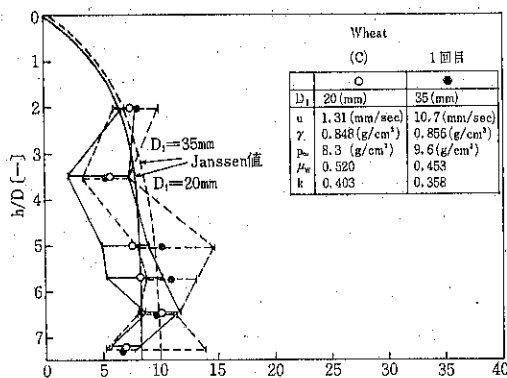


Fig. 26



Pressure at wall p_w (static state) [g/cm²]

Fig. 27

Table 1

粒体	充填方法	D _i (mm)	u (cm/sec)	γ (g/cm ³)	P _w (g/cm ²)	μ _w (-)	k (-)	μ _w k (-)
ガラスビーズ	A	15	0.90	1.56	9.55	0.829	0.715	0.592
		35	14.6	1.53	26.2	0.296	0.695	0.206
	B	15	0.87	1.61	10.1	0.808	0.380	0.307
		35	12.8	1.60	10.2	0.795	0.535	0.425
	C	15	0.92	1.57	10.9	0.730	0.545	0.398
		35	13.9	1.55	11.3	0.695	0.517	0.359
小	A	20	1.08	0.842	13.5	0.316	0.400	0.126
		35	11.1	0.825	10.3	0.406	0.372	0.151
	B	20	1.01	0.867	11.0	0.400	0.282	0.113
		35	10.4	0.887	13.8	0.326	0.353	0.115
	C	20	1.20	0.854	7.3	0.593	0.207	0.123
		35	10.0	0.863	6.8	0.644	0.279	0.180
マ	A	20	1.43	0.891	19.7	0.230	0.442	0.102
		35	11.3	0.877	21.4	0.208	0.643	0.134
	B	20	1.42	0.926	17.1	0.275	0.870	0.239
		35	10.4	0.926	14.9	0.316	0.485	0.153
	C	20	1.51	0.902	11.9	0.385	0.563	0.217
		35	11.0	0.895	12.2	0.373	0.463	0.173

Table 2

研究者	材料	円筒直径 [cm]	γ [g/cm ³]	μ _w [-]	k [-]	其他
K. Pieper	石英砂	100 □	1.5	0.53	0.40	
	麦 芽	◇	0.78	0.37~0.56		
G.P. Deutsch & L.C. Schmidt	砂	76.2		0.446	0.260	μ=36
綱川・青木	鉄 球	5.3	4.4~4.6	Fig 28	Fig 28	Fig 29
	ガラス球	5.3	1.48~1.55	◇	◇	◇
	豊浦砂	5.3	1.35~1.38	◇	◇	◇
杉 田	小 麦	680	0.82	0.697 (0.33)		P _w 静 = 0.2 kg/cm ²
	大 豆	900	0.786	0.176~0.253 (0.35)		P _w 静 = 1.6 ~ 0.7 kg/cm ²

同一サイロに同一材料を投入した場合でも投入方法や投入速度によって μ_w の値が変化する。Fig. 28 をみると

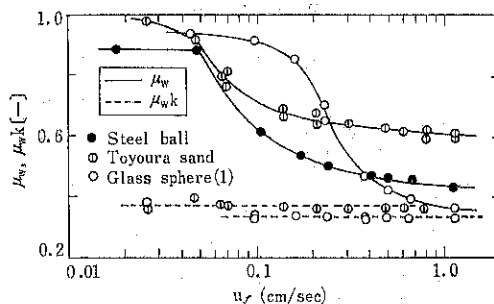


Fig. 28 μ_w に及ぼす投入速度の影響

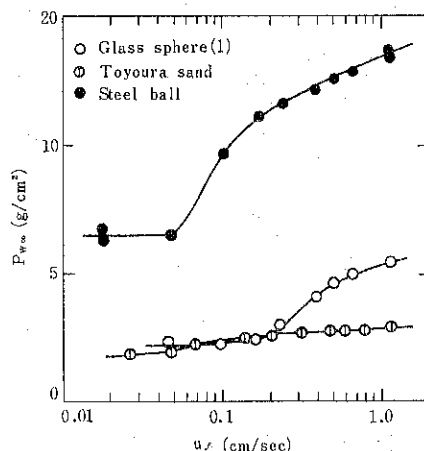


Fig. 29 $\mu_{w\infty}$ に及ぼす投入速度の影響

一般に投入速度が大きいほど μ_w は小さくなり、したがって $p_{w\infty}$ が大となる (Fig. 29)。この傾向は球粒子ほど顕著である。ただし μ_w は $\mu_w = Dr/4p_{w\infty}$ から求めたものであり、粉体物性としての壁面摩擦係数と言ってよいか否かは問題が残る。しかし Janssen の考え方を前提として p_w を算出するに当たっては粉体の充てん状態に応じて異なるこの μ_w の値を使用する必要がある。Table 3 は Fig. 18 において充てん中に各測定点の粉体圧の変化から求めた μ_w の値を示したものである。

なお多くの場合、 μ_w が変化してもこれに対して k が逆に変化して $\mu_w k$ の値は比較的一定であることは注目に値する。

2.2 重力流動中のサイロ壁に及ぼす粉体圧¹⁰⁾

垂直壁面に働らく粉体圧 p_w は重力による流動中は静止時の粉体圧にくらべてかなり増大することがある。これに関しては前述のように応力状態が主動状態から受動状態に切り変わる際の不連続的な圧力増加のためと説明されているが、実状は必ずしも理論と一致しない。流動時は圧の変動が著しく、ピーク値は静止時の数倍、時に

Table 3 μ_w

充填方法	D ₁	GAUGE NO						全体のグラフより求めた μ_w
		7	5	3	2	1	0	
ガラスビーズ	A	15	0.587	1.038	0.943	0.646	0.766	0.912
		35	0.306	0.293	0.253	0.296	0.301	0.299
	B	15	0.389	0.961	0.790	0.708	0.768	0.798
		35	0.758	1.043	0.794	0.787	0.882	0.888
	C	15	0.538	0.805	0.857	0.789	0.822	0.731
		35	0.784	1.098	0.891	0.651	0.706	0.769
小変	A	20	0.384	0.255	0.291	0.303	0.222	0.337
		35	1.173	0.373	0.356	0.16	0.228	0.254
	B	20	0.201	0.540	0.405	0.215	0.385	0.331
		35	0.218	0.515	0.350	0.221	0.248	0.270
	C	20	0.544	0.588	0.497	0.420	0.497	0.526
		35	0.634	0.941	0.503	0.448	0.572	0.665
マロイ	A	20	0.449	0.123	0.334	0.126	0.199	0.182
		35	0.264	0.258	0.155	0.138	0.225	0.196
	B	20	0.282	0.150	0.176	0.253	0.208	0.368
		35	0.790	0.322	0.327	0.294	0.274	0.340
	C	20	0.419	0.383	0.330	0.455	0.411	0.500
		35	0.443	0.350	0.323	0.334	0.322	0.388

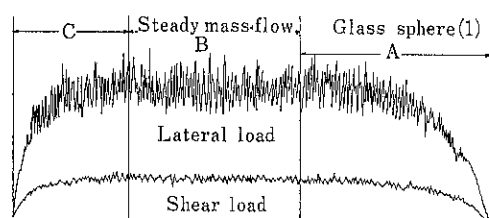


Fig. 30 応力中の粉体応力による荷重の記録例

は10倍以上もの値が検出されることがあるが、平均値はそれほど極端な増大は見られないことが多い。

定常状態で流動中の粉体層はその速度に無関係な μ_w の値を示し、したがって p_w も流出速度には無関係になる。Fig. 30 はガラス球粒子をピンの底部から定常的に流出させながらより大きな流入速度で充てんした場合 A、一定層高で定常流れの範囲 B、および排出過程 C の

p_w および摩擦応力の測定結果である。AおよびCの範囲の記録は粉体圧と層高との関係を示し、指数曲線状であることから流動中も Janssen の式の考え方が適用できることがわかる。また摩擦応力と p_w との比から壁面における動摩擦係数 μ_w を求めることができ、この値は Table 4 に示すように $\mu_w' = D\tau/4p_w\infty$ から求めた値とよく一致している。自由流動性の各種の粒体において同様に求めた μ_w および μ_w' の値は同表に示すようになる。さらに指数曲線の形から $\mu_w k$ が求まり、これから k を計算すると Table 4 に示すように1に近い値になるが、受動土圧のように1より大きな値となるものは少ない。また同表に示す k' の値は $\phi_w = \tan^{-1} \mu_w$ を用いて

$$k' = \frac{1 - \sin^2 \phi_w}{1 + \sin^2 \phi_w} \quad \dots\dots (32)$$

から求めたものであり k にほぼ近い値である。

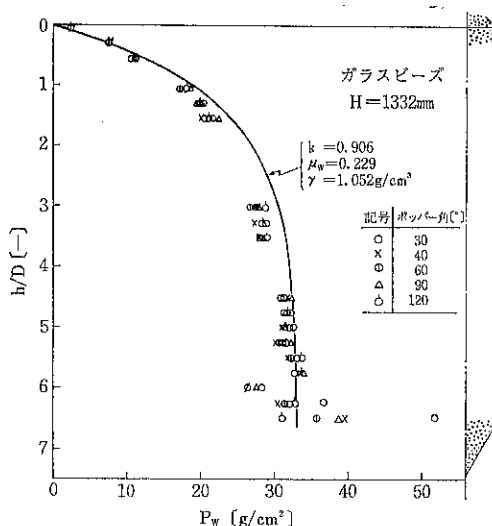


Fig. 31 サイロ壁に働らく水平応力（ホッパー角度の影響）

Table 4 マスローにおける粒体の流動特性値

Materials	d_p (mm)	γ ($\frac{g}{cm^3}$)	p ($\frac{g}{cm^2}$)	τ ($\frac{g}{cm^2}$)	μ_w (-)	μ_w' (-)	k (-)	k' (-)
Glass sphere(1)	1.3	1.50	8.65	1.98	0.229	0.228	1.09	0.906
Glass sphere(2)	0.61	1.50	6.34	1.94	0.306	0.312	0.784	0.842
Polystyrene sphere	2.0	0.616	3.78	0.829	0.219	0.216	0.973	0.915
Steel ball	0.61	4.48	16.4	—	—	0.363	0.738	0.792
Spherical lactose	2.0	0.758	2.93	1.00	0.238	0.343	0.792	0.810
Rape seed	1.8	0.680	3.79	0.937	0.247	0.238	1.04	0.898
Millet	1.3	0.851	3.25	1.13	0.346	0.346	0.774	0.807
Milo	2.1	0.818	4.33	1.12	0.260	0.250	0.845	0.889
Wheat	4.1	0.851	5.40	1.13	0.208	0.209	0.954	0.920
Rough rice	3.5	0.868	5.30	1.17	0.221	0.217	0.849	0.914
Soma sand	1.1	1.53	3.70	1.96	0.530	0.547	0.878	0.626

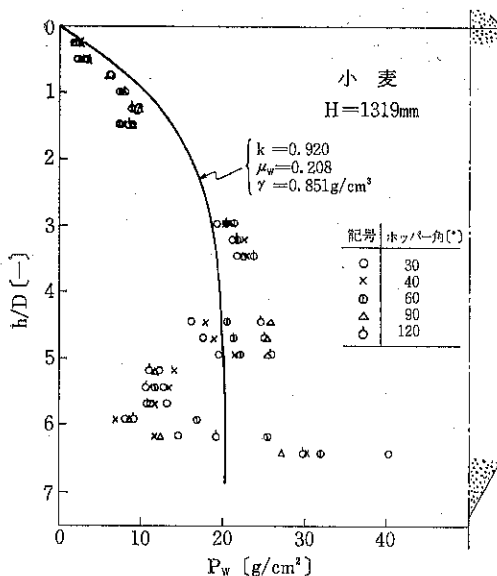


Fig. 32 サイロ壁に働く水平応力（ホッパー角度の影響）

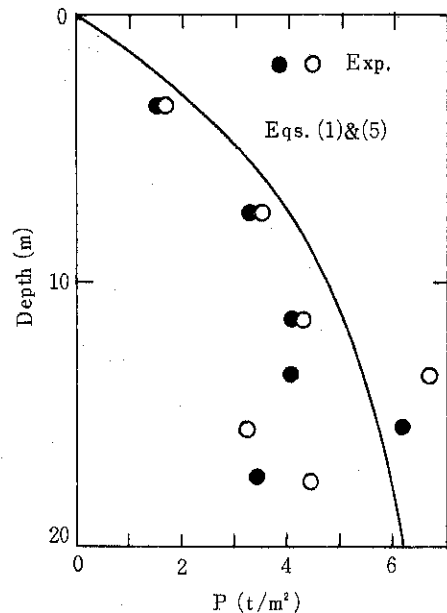


Fig. 33 実物サイロにおける測定値との比較（小麦）

Table 5 直接剪断法の結果

材 料	粒 径 [mm]	真比重 [g/cm³]	内 部 ま さ つ 測 定					壁面まざつ測定	
			ϵ [-]	μ_o [-]	$\mu_w k$ [-]	k [-]	μ_w [-]	μ_{wh} [-]	ϵ [-]
球状ラクトース	2.03	1.526	0.489	0.730	0.486	0.258	1.88	0.240	0.522
相 馬 砂	1.06	2.649	0.400	0.590	0.331	0.326	1.01	0.223	0.386
ガ ラ ス 球	1.34	2.487	0.374	0.550	0.202	0.350	0.579	0.122	0.401
な た ね	1.84	1.123	0.375	0.654	0.279	0.293	0.954	0.190	0.410
あ わ	1.3	1.438	0.378	0.672	0.397	0.284	1.40	0.243	0.378
マ イ	2.08	1.379	0.382	0.440	0.452	0.426	1.06	0.161	0.437
小 麦	4.1	1.430	0.389	0.468	0.435	0.405	1.08	0.220	0.436
玄 米	3.5	1.424	0.373	0.438	0.314	0.428	0.733	0.201	0.407

Table 6 粉体圧測定から得られた壁面まざつ係数

材 料	流 動 状 態					静 止 状 態	
	ϵ [-]	P_{ws} [g/cm²]	τ_s [g/cm²]	μ_{ws} [-]	μ_w [-]	μ_{ws} [-]	ϵ [-]
球状ラクトース	0.503	3.14	1.07	0.340	0.320	0.721	0.476
相 馬 砂	0.424	3.37	1.89	0.558	0.599	1.04	0.399
ガ ラ ス 球	0.401	8.65	1.98	0.229	0.228	0.501	0.377
な た ね	0.395	3.79	0.991	0.262	0.238	0.626	0.369
あ わ	0.433	2.17	1.07	0.494	0.497	0.611	0.241
マ イ	0.407	3.68	1.15	0.312	0.294	0.345	0.358
小 麦	0.405	4.76	1.20	0.252	0.237	0.348	0.409
玄 米	0.390	5.08	1.16	0.229	0.226		

Table 4 は内径 5.3cm の小型の円筒容器を用いて十分に深い位置で $P=P_{w\infty}$ を測定した結果であるが、内径 20.3cm のモデルビン (Fig. 18) での定常流動時における各位置での測定値は Fig. 31, 32 に示すようにば

らつてはいるが Table 4 の μ_w , k' を用いて示した Janssen の式で平均的な値は表わされる。この値は前述のように排出速度には無関係であり、底部においてホッパーの角度の影響が見られる。また小麦におけるこの

μ_w , k' の値を用いて直径 680cm の実物コンクリートサイロにおける測定結果¹¹⁾と比較すると Fig. 33 のようになり, Janssen 式を実物規模にまで適用できることがわかる。

以上のように円筒容器内における粉体圧の実際は静的および動的の状態に対して各粉体ごとにそれぞれの μ_w および k を測定しておけば Janssen の式でほぼ推定することができる。問題はこれらの値と剪断試験で得られた結果との関係であるが, Table 5, 6 に示すように同一粉体でもそれぞれ異なった値が得られている。これはそれぞれの応力状態における粉体の充てん構造, 応力の伝達機構が異なるためと考えられ, 力学的物性値としての統一的な取扱いは今後に残された問題である。

む す び

貯槽と粉体物性という題で主として粉体圧に関する力学的考察ならびにその粉体物性との関連について述べた。粉体圧現象は種々な因子により顕著な, あるいは不連続的な変化を呈することがあるため思いがけない事故をまねく危険性がある。貯槽の設計上配慮しなければならない事項は冒頭に述べたように粉体圧の他に閉そく現象および偏析現象があり, これらも当然粉体の基礎物性と関連して解明されねばならない。すなわち内部摩擦

角, 壁摩擦角のような力学的特性値を測定するにはそれぞれの粉体現象に即した方法を採用する必要がある, これが現在当面している最も大切な問題点であろう。

引 用 文 献

- 1) 三輪茂雄, 「粉粒体工学」 p. 208 (朝倉書店, 1972).
- 2) Janssen, H. A., Z. VDI, 39, 1045 (1895).
- 3) Reimbert, M. Reimbert, A., "Traité Théorique et Pratique", p. 26 (Eyrolles, 1965).
- 4) Jenike, A. W., Johanson, J. R., Trans. ASME, J. of Eng. for Ind., 91, B-2, 339 (1969).
- 5) Jenike, A. W., Johanson, J. R., Carson, J. W., ibid, 95, B-1, 1 (1973).
- 6) Jenike, Johanson, Carson, ibid, 95, B-1, 6 (1973).
- 7) Jenike, Johanson, Carson, ibid, 95, B-1, 13 (1973).
- 8) Walker, D. M., Chem. Eng. Sci., 21, 975 (1966).
- 9) Walters, J. K., ibid, 28, 13 (1973).
- 10) Tsunakawa, H., Aoki, R., J. Chem. Eng. Japan 7, [2], 131 (1974).
- 11) 杉田稔, 粉体工学研究会誌 7, [6], 513 (1970).

豆 ニ ュ ース

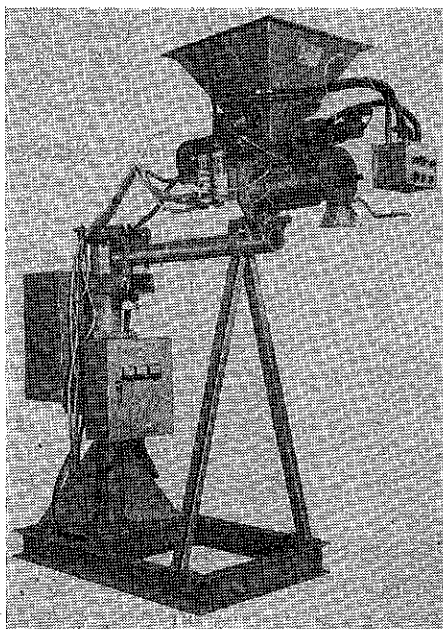
鋳物砂混合機 ホソカワ/ストロング サンドターボ (新製品)

サンドターボは米国ストロングスコット社から '74 年技術導入した自硬性鋳物砂の混合機です。円筒容器内で多数のパドルを取りつけたロータが回転していて, 砂とレジンとキャタライザーとを連続的に混合し, 数秒間で自硬性鋳物砂を生産します。'74 年のクリーブランドの鋳物ショウに出品して以後, わずかの月日で既に 30 台以上の受注をしているなどの実績をみても, 本機は鋳物業界の要望にマッチした新しい鋳物砂の混合機と言えます。

(特長)

- 混合は数秒という短い時間で完了します。
- 機内での付着, 残留が非常にわずかです。
- レジン, 触媒が従来機の 15~40% 節約できます。
- 一定流量の砂へ定量の液が添加されるので品質が安定しています。

- 液の切替が確実に機内へのもれがないので機内掃除が短時間で済みます。



粉体物性と集じん技術

Effects of Particle Characteristics on Dust Collection

吉田 哲夫*

Tetsuo Yoshida

1. ま え が き

集じん操作と粉体物性とのかわり合いを考える場合、何といっても粒子の捕集のしやすさという観点からの考察が第1に重要であり、第2に捕集された粒子の扱いの難易の面からの考察が必要であろう。後者は何も集じんに限った問題ではないので本稿では前者について若干の考察を試みる。最初に集じんとはどのような操作なのかという観点から粉体物性とのかわりを大まかに考察し、次に集じんにおいてもっとも重要な役割を果たすであろう粉じん粒子の大きさの問題について考え、最後に集じん操作におけるいわば粉体物性の改質とでもいふべき問題についてその可能性を検討してみたい。

2. 粉体物性と集じんとのかかわりあい

集じん操作は大別して、1)捕集面への粒子の接近、2)捕集面上に到達した粒子の捕捉、3)捕集された粒子の回収、の三つの段階からなりたっている。そこで集じん操作をこのような三つの過程に分けて眺め、それぞれの過程において粉体物性がどのように関係してくるのかを以下に大まかに考えてみる。まず各過程において関係しそうな粒子の性質をピックアップすると次のようである。

過程Ⅰ：捕集面への粒子の接近……粒子径、密度、電気抵抗、誘電率、熱伝導度

過程Ⅱ：捕集面上における粒子の捕捉……反発性、ぬれ易さ、付着性

過程Ⅲ：捕集粒子の回収……堆積粉体層の諸性質（粒子径、空隙率、付着力、流動性など）、スラリーの性質（粒子径、濃度など）

まず過程Ⅰにおいては粒子径がもっとも重要であるが、

これに関しては後に項を改めて考察する。粒子密度はそれほど大巾に変化しうるものではなく粒子径ほどの重要性はないがこれについても粒子径とあわせて後に考察する。

粒子の電気的性質はとくに電気集じんの分野において重要であり、なかでも粉体の比抵抗が問題にされる。比抵抗が $10^{10} \sim 10^{11} \Omega \text{cm}$ 以上の高抵抗のダスト、たとえばフライアッシュなどでは捕集されたダスト層からの放電すなわち逆放電（放電極からではなく集じん極からの放電）が発生し、集じん極への粒子の移動速度が低下する。また逆に比抵抗が $10^5 \sim 10^6 \Omega \text{cm}$ 以下のたとえばカーボンブラックのような粒子では、捕集面上のダストが再飛散し過程Ⅱにおける弊害をきたす。したがって前者に対しては流入含じんガスに水分を含ませて比抵抗を低下させたり、後者に対しては湿式にするなどの方策がとられる。次に粒子の誘電率についてはこれが大きくなるにつれて一般に静電沈降の速度は徐々に大きくなり捕集が有利になるとされている。電気集じんのように粒子に強制的に帯電させる場合のほか、たとえば繊維層などにおいて粒子が帯電している場合にもクーロン力あるいは影像力による捕集性能の向上が期待できる。Fig. 1 は繊維充てん層フィルタによる捕集効率が、粒子が電荷をもつことによってどれだけ向上するかを示したものである¹²⁾。

粒子の熱伝導度は集じんとは一見何のかかわりもないように思われるが、熱泳動現象を利用して微粒子を捕集する thermal precipitator あるいは実際の集じん装置においてたとえば高温の含じんガスを湿式で処理するときのようにガス内に大きな温度勾配が生じる場合にこの熱伝導度が、あまり大きくはないが関係してくる（熱伝導度が小さいほど熱泳動速度は大きくなる⁶⁾）。

過程Ⅱでは捕集面上に移動してきた粒子がそこに付着するかどうか、あるいはいったん付着した粒子が再飛散しないかどうかの問題である。たとえばサイクロンのよ

* 大阪府立大学工学部

(〒591 堺市百舌鳥梅町4丁目804)

Tel (0722) 52-1161 内 2322

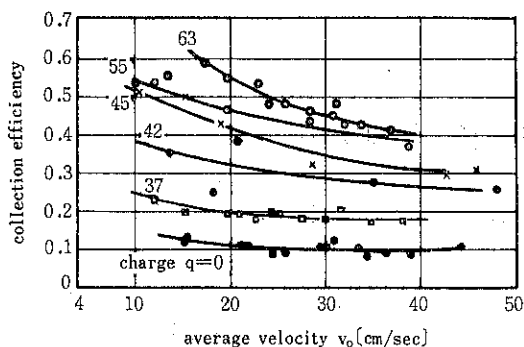


Fig. 1 Effect of electric charge on collection efficiency of fibrous filter (dia. of fiber $d_f=10.8\mu$, thickness $L=1\text{cm}$, porosity $\epsilon=0.98$, DOP particle of 1μ in dia., charge q in electrons)

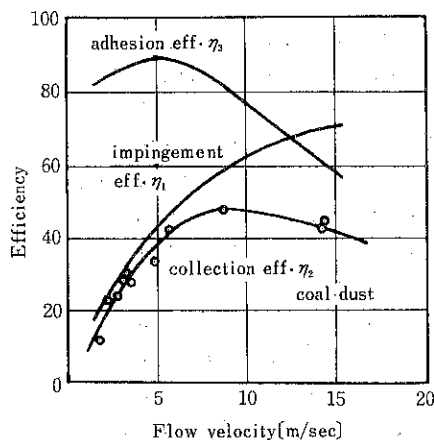


Fig. 2 Collection efficiency, impingement efficiency and adhesion efficiency for coal dust in dependence on the flow velocity. Particle size range between approximately 0.2 and $8.5\mu\text{m}$ aerodynamic diameter. Adhesive: olive oil: fiber diameter: 0.22mm

うに比較的大粒子を対象とする場合には容器壁での粒子の反発が問題になる。また一般に捕集面上に到達した粒子がそこで捕えられるためには粒子と捕集面との間には何らかの付着力が作用していなければならない。この付着力は粒子表面の吸着水分による液体架橋、静電気力、Van der Waals 力などによって生じているが、この力が重力あるいはガスの流れに伴う抵抗力に打勝てれば粒子は捕集面で保持されることになる。Fig. 2 は直径が $220\mu\text{m}$ の針金に捕集される理論衝突効率 η_1 と実測による捕集効率 η_2 とから付着の効率 η_3 を求めた Walkenhorst の研究結果の一例である⁷⁾。針金表面に

は粘着剤としてオリーブ油を塗布してあるにも拘らず流速が大きくなると再飛散がおり付着の効率が低下していく様子がよくわかる。粒子が捕集面で保持されない懸念のあるときには湿式集じんが有効となるが、しかし湿式集じんにおいても粒子のぬれ易さの問題、すなわち水滴や水膜の表面に到達した疎水性粒子はそこで必ず捕捉されるかどうかの問題がある。この点に関して Weber は、親水性（石英）、疎水性（疎水性顔料）粒子にかかわらず水滴に接触するや否やこれに付着することを観察しており、ただその場合親水性粒子では水滴内部に入り込むが疎水性粒子では水滴表面に浮んだままである点が異なると報告している⁸⁾。またベンチュリスクラバによるパラフィン粒子の捕集で良好な集じん効率をあげたという報告⁹⁾およびステアリン酸亜鉛の粒子がベンチュリスクラバのほか洗浄塔などにおいてよく捕集されたという報告もある⁹⁾。しかし一方ではベンチュリスクラバの設計では親水性、疎水性粒子を区別することが経験的に必要であるという Calvert の指摘もあり¹⁾、このような問題は今後検討されねばならないところである。

次に過程Ⅲにおいては、乾式の場合には堆積粉体層の性質、湿式ではスラリーの性質そのものが関係し、これらは必ずしも集じんに固有の問題ではなくなってしまう。バグフィルタを例にとれば、ダストケーキのガスの通過抵抗は Kozeny Carman の式で大まかには推定でき、粉体層の付着性の測定からダストケーキの払落し性能がほぼ推定することもできる。また粉体の流動性によって払落された粉体をホップから取出すときの作業性の難易が推定でき、たとえば powder tester などで測定された指標が有用となるであろう。捕集面における団結あるいはタールなどを含んだ粘着性粉体の付着などの問題もここでは重要であろう。

以上のほかに粉体物性として、可燃性、爆発性、毒性、反応性、腐蝕性、悪臭を有する粉じんに対する集じんについてもそれなりの考慮が必要であることはいうまでもない。

3. 粒子の大きさと捕集性能

集じん技術にもっとも関係深い粉体物性は粉じんの粒子径であろう。これが大きければ、拡散支配の領域を除いて、原則的に捕集は容易となる。そこでここでは最初に慣性衝突が支配的な場合に対する粉子径の評価のしかたと捕集性能について考察し、次に慣性衝突以外の因子による捕集のさいの粒子径と捕集性能の関係について簡単に考察する。

一般に流体中で粒子が運動するときに物理的に意味を有する粒子径は Stokes 径 dp_{st} または密度も考慮された

かたちの aerodynamic diameter d_{pa} である。後者は次に示す Stokes 径 d_{pst} を有する粒子と同一の終末沈降速度 u_t を有する密度 1 g/cm^3 なる球の Stokes 径として定義される。

$$d_{pst} = \sqrt{\frac{18\mu u_t}{C_m \rho_p g}}$$

したがって、

$$d_{pa} = d_{pst} \sqrt{\rho_p}$$

ここで C_m はカニンガムの補正係数、 μ は流体の粘度、 ρ_p は粒子密度である。集じん操作においては気中における Stokes 径または aerodynamic 径が重要な意味をもつが、これらは粒子の気中における終末沈降速度 u_t を測定することによって求めることができる。しかしながら沈降法を利用した市販の多くの粒度分布測定装置はたいてい気中ではなく液中における Stokes 径を測定するものであり、この液中における Stokes 径は必ずしも気中での Stokes 径を与えるとは限らない。また顕微鏡で凝集状態をほぐして測定した粒子径も気中沈降において求めた Stokes 径とは必ずしも一致しない。前項で述べた過程 I では、集じん器に入ってきた状態での粒子径——粒子が 1 ミクロン程度の小さい場合にはいくつかの粒子から成る凝集体を形成していることが多いが、それが気中に浮遊した状態における Stokes 径——が重要である。慣性力による粒子捕集においてはこの粒子径の大小によってその捕集の難易が定まる。集じん器内での流れの様子が明らかなきにはこの粒子径に基いて慣性パラメータが定まり、捕集効率が求まるが、Fig. 3 には現象が簡単な場合の慣性衝突による捕集効率の計算結果の一例を示した。

さてそれでは気中における Stokes 径と電子顕微鏡あるいは液中沈降によって測定された粒子径がどの程度異なる可能性があるのであるが、Fig. 4 はそれを調べた一例である¹¹⁾。分散剤によってよく分散された液中遠心

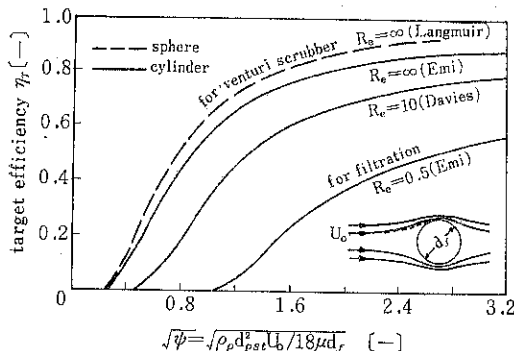


Fig. 3 Target efficiency η_T vs. inertial parameter ψ

沈降法で測定された粒子径は電子顕微鏡からの測定結果とほぼ一致するが、気中に浮遊した状態のままの粒子の大きさを気中沈降法¹⁰⁾によって測定した場合には粒子が凝集しているために粒子径がかなり大きい方にずれている。図中、乾燥状態でしかも家庭用のミキサーで強力に分散させた場合においても (●印) なお凝集していることがわかる。

慣性衝突による捕集では Fig. 3 に示したように Stokes

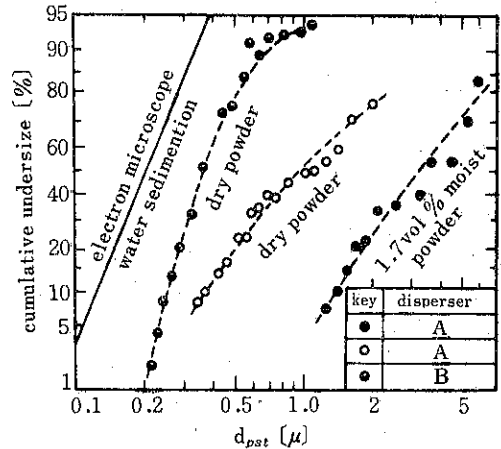


Fig. 4 Particle diameter in air (carbon black). disperser A: impeller dia.=38mm, 1500 r.p.m. disperser B: impeller dia.=55mm, 15000 r.p.m.

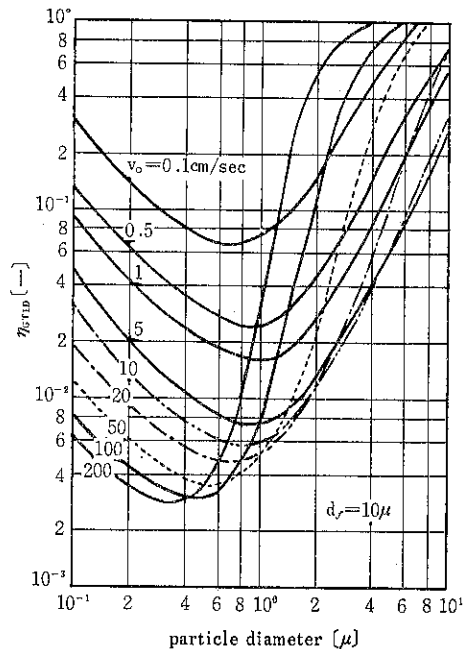


Fig. 5 Dependence of total collection efficiency on particle diameter (isolated fiber)

径が大きいほど有利であるが、次に粒子径が小さくなったときの捕集について考えてみる。Fig.5はFig.3と同様円筒障害物に対して理論的に求められた捕集効率で⁸⁾、この図では慣性衝突のほか、拡散、さえぎり、重力沈降による捕集効果も併せて考慮されている。この図は、直径が10ミクロンの円筒が重力方向の流速 v_0 なる流れ中に水平におかれたときの計算結果である。図で効率 η_{GTID} が粒子径の減少とともに最初低下するのは主として前述の慣性力による捕集効果が低下するためであり、粒子径がさらに小さくなって効率が増加してくるのは捕集機構として拡散が支配的となるためである。このように粒子径がある程度以下に小さくなるとかえって捕集が容易となってくるが、このことより集じん操作における粒子径の果たす役割の複雑さがうかがえる。

以上のほかに前述の熱泳動、すなわち含じんガスに温度勾配があるときにその中の粒子が高温側から低温側に移動する現象、においては粒子径はほとんど関与しない。また1ミクロン以下の粒子を対象とする場合の電気集じんにおいてもその静電沈降速度は粒子径にほとんど関係しないといわれている。さらに蒸気が凝縮するような場合にガス中の粒子が凝縮面に移動して捕集されるい

わゆる拡散泳動現象においても粒子径は関与しない⁹⁾。したがってこれらはいずれも非常に微小な粒子の捕集に有利となるわけである。

4. 粉体物性の改質

通常の多くの集じん操作においては粒子が大きいと捕集に有利であるので、ここでは粒子を大きくしてやるいわば集じんにおける粉体物性の積極的な改質ということについて若干考察してみたい。

電気集じんは粒子に帯電させてその粒子の集じん極への移動速度を高めるようにしたものであって、これは1種の粉体物性の改質にほかならない。ここでは粒子の捕集を容易にするための粒子径の増大法すなわち粒子成長についていくつかの研究を紹介しよう。

Table 1 はエチレングリコール蒸気、水蒸気、水の吹込みおよび音波を与えることによってどの程度の粒子成長が期待できるかを示した Fahnoe の実験結果である⁴⁾。実験精度に多少問題があり厳密な比較は無理であるが、大まかな傾向は現われていると思われる。吸湿性のエチレングリコールによる粒子の preconditioning および蒸気吹込みと水噴霧による冷却などが効果的なよう

前処理法	ダスト濃度 g/m ³	エチレングリコール蒸気 g/m ³	水蒸気 g/m ³	水噴霧 (2atg) g/m ³	音波 c/sec	捕集効率		
						総合効率	内訳	
							2~5 μ	>5 μ
1. 前処理せず	2	—	—	—	—	37.5%	31.0	6.5
2. 水のみ噴霧	1.4	—	—	100	—	84.5	41.5	43.0
3. 蒸気のみ吹込み	2.2	—	160	—	—	98.9	74.5	24.4
4. エチレングリコール蒸気のみ吹込	1.4	10	—	—	—	98.5	77.0	21.5
5. 蒸気+水	1.6	—	112	110	—	99.2	42.0	57.2
6. エチレングリコール+水	1.4	10	—	210	—	97.8	34.8	63.0
7. エチレングリコール+蒸気	1.4	10	160	—	—	99.5	77.0	22.5
8. 水+音波	1.3	—	—	210	3300	93.2	7.9	85.3
9. 蒸気+音波	1.4	—	160	—	3100	98.3	15.9	82.4
10. エチレングリコール+蒸気+水	1.4	10	160	210	—	99.2	37.3	61.9

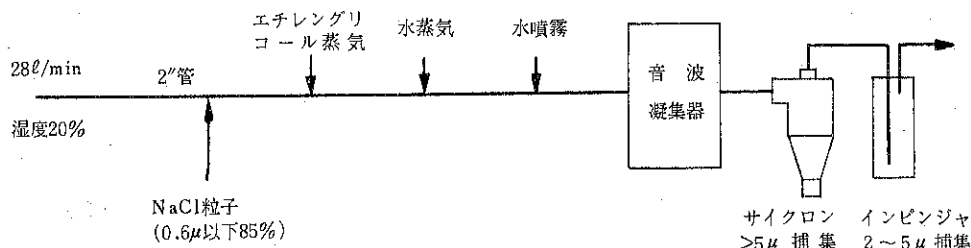


Table 1 Fahnoe の実験データ

であり、前者は硫酸ミストの成長が高湿度雰囲気中で容易に起こることと関連し興味深い。

Fig. 6 は最近 Calvert によって報告された FF/C (Flux Force/Condensation) スクラバと称せられる集じん器による捕集性能を示したものである²⁾。これは3段の sieve plate からなっており各段入口に steam を吹込む。まず第1段の plate を通過するときの bubble 中で高温の飽和含じんガスが冷却されることによって粒子のまわりに凝縮が起こりこれが成長し、2段以後で成長した粒子を捕集しようというものである。吹込み蒸気量が多い場合には、幾何平均径0.75ミクロンの酸化鉄粒子が約150mm水柱の圧損でかなりよく捕集されることを示している。

Fig. 7 は高温度と低温度の飽和空気を混合させて過飽和の雰囲気を作りそこにタバコの煙を投入して粒子成長させたわれわれの実験結果である。過飽和雰囲気中の粒子個数濃度 n_0 によって異なるが著しい成長が認められる。またこの成長はきわめて短時間に完了することも同時に観察された。

以上のような凝縮によって粒子を成長させることのほかに、Brown 凝集によって粒子を成長させることもで

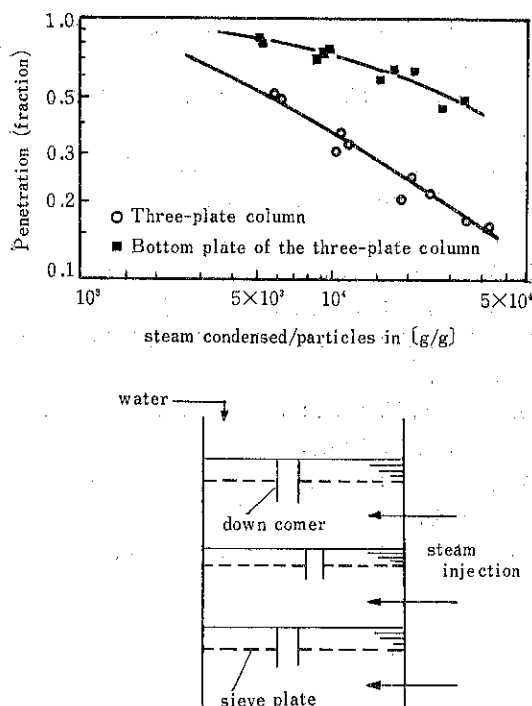


Fig. 6 Penetration vs. vapor consumption in three-plate column FF/C scrubber (pressure drop: 150 mm Aq., dustparticle: iron oxide, 0.75μ in geom. mean dia.)

きる。Fig. 8 はわれわれの行った実験結果の一例であるが、この例のように粒子個数濃度 n_0 が 10^7 個/cm³ 程度では粒子成長にかなりの時間を要することがわかる。Fig. 9 は Brown 凝集によってどの程度の粒子成長が期待できるかの概略を知るために Smoluchowski の式か

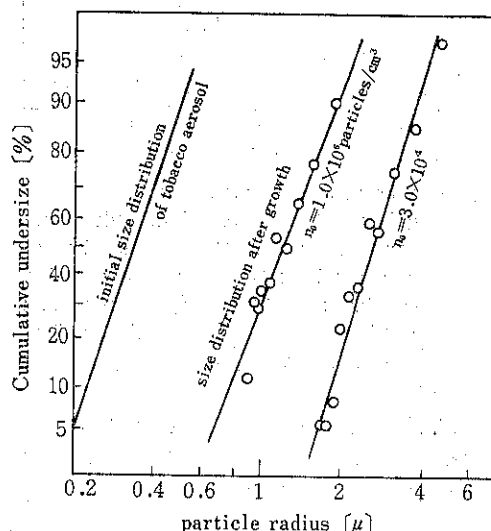


Fig. 7 Particle growth by condensation

(Supersaturation was established by mixing 60°C saturated air (16l/min) with 20°C saturated air (6l/min))

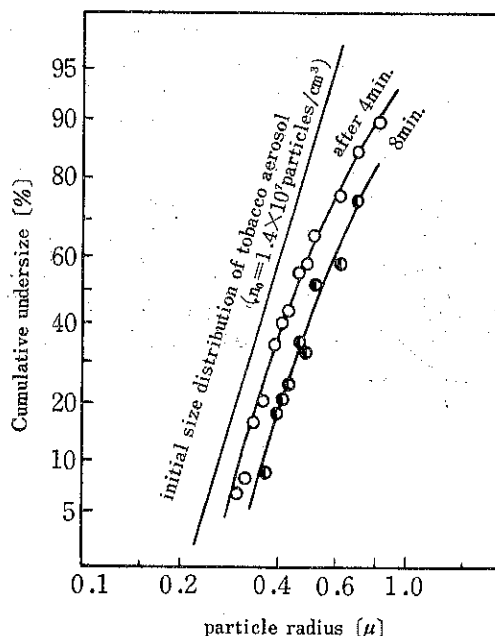


Fig. 8 Particle growth by Brownian coagulation

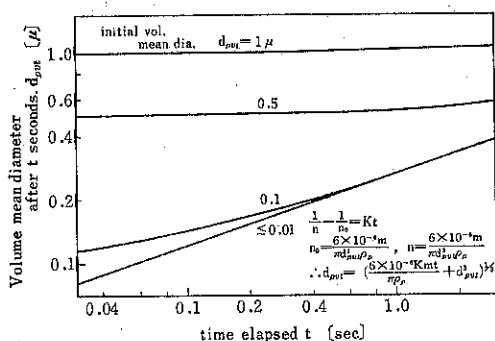


Fig. 9 Illustration of particle growth undergoing Brownian coagulation (dust concentration: $m=10\text{g/m}^3$, density of dust particle: $\rho_p=1\text{g/cm}^3$, coagulation constant: $K=10^{-9}\text{ cm}^3/\text{sec}$, n_0 and n : particle number concentration/ cm^3 at $t=0$ and $t=t$ respectively)

ら、具体例として排ガスのダスト濃度が 10g/m^3 である場合について試算したものである。図よりダスト発生時の粒径が 0.5ミクロン 以上では凝集による成長はほとんど期待できないが、 0.01ミクロン 以下であればいくらか小さくとも 0.1 秒経過後にすでに 0.1ミクロン 程度にまで成長することがわかる。一般にわれわれが観察できる排ガスは、粒子が発生してからたいてい少なくとも 0.1 秒とかあるいはそれ以上の時間を経過した状態のものであって、したがっていかに小さい粒子が発生しようともダスト濃度がある程度われわれが高いときには観察する時点においてはすでに凝集によって成長した後のものであることをこの図は物語っている。Brown凝集による粒子成長はFig. 8に示したように一見大した効果がないように思えるが、これはすでに成長速度の低下した段階においてしかわれわれが観察できないための錯覚である場合が多く、ダスト発生期の短期間に着目すれば、発生時点にすでに粒子が大きい場合およびダスト濃度の小さい場合は別として、Fig. 9の $d_{pvi} \leq 0.01$ で示されるように凝集の効果がやはり大きいことを見逃してはならないと思われる。

5. あとがき

集じんの基本的なメカニズムは現在かなり明らかとなつてきており、その知識をもとにすれば集じん技術と粉体物性とのかかわり合いは定量的にはまだ無理であつてもかなり明らかなことも多いであろう。本稿では粒子の大きさという点に焦点を絞つてその評価のしかたと、粒子の大きさと捕集性能の関係を簡単に考察した。多くの場合やはり小さい粒子、サブミクロン粒子、の捕集に問題があり、しかも捕集のメカニズムには限りがあることを考えあわせると、小さい粒子を何らかの方法で大きい粒子に成長させる方法が望まれるわけであるが、その可能性の一端を紹介した。

またここでは主として粉体の一次物性について考えたが、捕集された後の段階では、これは集じんに固有の問題ではないが、粉体の二次物性も重要となろう。

引用文献

- 1) Calvert, S.: J. A. P. C. A., **24**, 929 (1974).
- 2) Calvert, S. et al.: J. A. P. C. A., **24**, 946 (1975).
- 3) Emi, H. et al.: J. Chem. Eng. Japan **6**, 349 (1973).
- 4) Fahnoe, F.: Ind. and Eng. Chem., **43**, 1336 (1957).
- 5) Guntheroth, V. D. I. Zeitung, Reihe 3, Nr. 13 (1966).
- 6) Hidy, G. M. and Brock, J. R.: Topics in Current Aerosol Research Part 2, Vol 3, Pergamon Press (1972).
- 7) Walkenhorst, W. Staub, **34**, 149 (1974).
- 8) Weber, E.: Staub, **29**, 272 (1969).
- 9) Wicke, M.: V. D. I. Zeitschriften, Reihe 3, Nr. 33 (1970).
- 10) Yoshida, T. et al.: Ind and Eng. Chem., Fundum. **14**, 47 (1975).
- 11) 吉田哲夫ら: 化学工学協会 第40年会要旨集 D114 (1975).
- 12) 吉岡直哉ら: 化学工学, **32**, 815 (1968).

粉 粒 体 混 合 機 の 混 合 性 能

矢野 武夫*

Takeo Yano

寺下敬次郎*

Keijiro Terashita

1. はじめに

最近、粉粒体プロセスの自動化や連続混合、流動化法による粉粒体の混合、混合機の所要動力の算定および機種選定などが注目されてきている。また電子計算機の進歩により粉粒体混合過程の研究の一助としてデジタルシミュレーションも試みられている。

粉粒体混合で最も重要なことは、粉粒体の物性と混合度との関係であろう。すなわち粉粒体混合操作において、粒径や密度の異なる多成分系の混合で分離偏析を起こさず、あるいは付着・凝集が強く流動性の悪い粉体や微粉末の混合を容易に行い、いかに目的にあった混合物を得るかということである。また粉粒体の物性と混合度との関係を知っておくと、合理的な混合機の機種選定および設計が可能となる。

粉粒体混合機の性能に関しては、総説や^{22,65,76,85,95,107} レビュー^{10,23,105,125}などの形で幾度か報告されているために多少重複するが、過去わが国で発表された幾つかの文献を紹介する。特に粉粒体の物性と混合性能という問題にできるだけ重点をおくことにする。また微量混合および微粉末混合についても簡単に述べることにする。

2. 粉粒体混合に関する既往の研究

粉粒体混合に関する既往の論文などを、各混合装置について研究内容別に分類し Table 1 に掲げる。また、主な混合装置での実験条件および得られた結果の概要を Table 2 に示す。

粉粒体混合に関する研究の多くは、Table 2 に示されるように、150 μ 付近までの流動性の良好な粉粒体を用い、かつ物性に差異のない二成分系で主に行われていることがわかる。しかし実際の粉粒体混合のプロセスでは

粒径（粒径分布）、見掛け密度、角特性および凝集性などに特性あるいは差異のある多種多様な粉粒体の混合操作が通常のことであろう。したがって各混合機の混合性能が、粉体物性の差異や特性によって、どのような影響を受けるかを知っておく必要がある。

以下、まず粉粒体の物性がほぼ同じで付着・凝集の起こらない試料を用いて得られた混合機内での粉粒体の挙動および混合性能について、ごく簡単に触れる。つぎに混合速度および混合度などにおよぼす粉体物性の影響について紹介する。

3. 容器回転型混合機

容器回転型混合機の代表的な混合機である水平円筒内の粒体の運動を大山⁵⁰⁻⁵¹、沢島^{49,67,73}、井上一山口²⁰が調べ、Fig. 1 (a) に示す混合領域と輸送領域とからなる循環流れを確認している。そして粒子の混合には拡散混合が重要であることの指摘⁵⁰、循環流と混合速度および所要混合時間の関係^{49,67,73}あるいは粒子の半径方向の拡がりや混合速度などの関係が報告されている²⁰。

沢島は^{64,70,78} V型混機混合機の混合過程は、粒子群の循環流れに支配されることを確認し、混合物の混合状態は循環時間の関数として表わされることを見出している。

これに対し矢野—蟹瀬ら^{108,109,112}は水平円筒型、V型、二重円錐型および正立方体型混合機について種々の条件のもとで実験を行い、混合性能および最適操作条件を明らかにしている。すなわち、一般に水平円筒型および二重円錐型混合機は混合度に重点をおくような混合操作に適し、V型や正立方体型混合機は早く混合したい場合に効果を表わすことを指摘している。またこれらの混合機の最適回転速度は臨界回転速度の50~80%の範囲であり、最適の粉体装入量は見掛け容積基準で内容積の30%付近であることが報告されている。

さて容器回転型混合機では、二成分粉粒体に物性の差異あるいは特性がある場合、混合過程と最終混合度に影

* 大阪府立大学工学部化学工学教室
(〒591 堺市百舌鳥梅町 4-804)
Tel 0722-52-1161

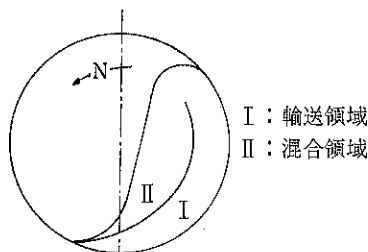
Table 1 混合装置での研究内容

	混 合 装 置		混合過程, 混合特性および最適操作条件	粉 粒 体 の 物 性		所要動力・ 撹拌トルク	シミュレ ーション
				粒径, 流動性	分離偏析		
容 器 回 転 型	水平円筒型 (回転円筒)	回分	20, 39, 49, 50, 53, 63, 67, 73, 75, 99, 109, 112	31, 74, 110, 111, 118, 120	51, 127, 132, 136	52	19, 133
		連続	36, 38, 39, 82, 83, 84, 89, (101), (102)		80, 81, 100		
	V 型		19, (30), 45, 46, 47, 63, 64, 68, 70, 75, 78, 108, 109, 112	29, 74, 110, 111, 112	18, 132		20, 133
	正立方体型		(30), 45, 109, 112	110, 111, 112			
	二重円錐型		(30), 109, 112	110, 111, 112			
	水平回転円錐型				86, 87		
	篩		(30)				
	Y 型		14				
容 器 固 定 型	リボン型	回分	69, 113, 115, 117	113	132	119, 128, 134	
		連続	60, 130, 131, 138				
	櫛型羽根 平板羽根	回分	32, 54, 93, 122, 126			5, 15, 27, 28, 104, 137	
		連続	56, 94, 96, 97, 121, 124				
	ナウタ・ミキサー		26, (43), 116, 129				
	スクルーコンベア		58				
	フィンガー・プロング		35				
	エッジランナー		40				
	ホ ッ パ ー		25				
流 動 層	均	一	6, 8, 24, 37				
	不均	一	7, 62				
	攪	拌	16, 96, 97			16, 28	
移 動 層			55, 56, 94, 96, 97, 98, 103		88		
混 練			35, 91, 137				
混 合 度 の 表 現			(1), 2, 3, 4, 21, 29, (34), 35, 44, 53, 60, 77, 90, 114, 130				
混合度の測定方法			48, (66), 123				
粉粒体混合の講義			11, 17, 59, 79, 106				
総 説・レ ビ ュ ー			9, 10, 21, 22, 23, 65, 71, 76, 85, 95, 105, 107, 125				

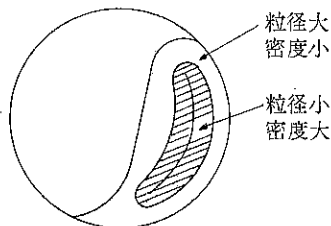
() は参考資料, ノートなどを示す.

Table 2 主な混合装置での実験条件および研究内容

混合装置	粉粒体試料	粒 径 範 囲	混 合 度		研究内容および得られた結果	文献 番号
			定量方法	表示		
容 器 水平円筒型 (回転円筒)	ガラス球	6,000 μ	粒子追跡法	推移確率	混合機内の粒子の運動と混合過程・混合特性	20
	相馬砂, 豊浦砂, 川砂	1,000~710, 177~149, 420~350 μ	識別計数法	$\frac{\sigma^2 - \sigma_r^2}{\sigma_0^2 - \sigma_r^2}$	混合性能, 混合機構	53
	相馬砂	1,410~840 μ	"	$\frac{\sigma_{\max}^2 - \sigma_r^2}{\sigma_{\max}^2 - \sigma_r^2}$	混合状態は粒子群の平均循環時間より知ることが可能	67
	炭酸ソーダ-塩化ビニール	149~74 μ	滴定分析	σ	混合性能, 最適操作条件	109
	川砂, 方解石	2,360~1,410 μ	重量分析	滞留時間	粒子の滞留時間分布の機構は, 粒子の流通機構モデルにそう	83
V 型	ガラス球	2,830~2,380 μ	粒子追跡法	マルコフ過程	混合機内の粒子の運動と混合過程	19
	アンチピリン-乳糖	149~105 μ	吸光度	σ^2	凝集粉体の挙動, 仕込位置による混合速度の相違	47
	相馬ケイ砂, 寒水石	1,410~840 μ , 2,000~1,000 μ	識別計数法	$\frac{\sigma_{\max}^2 - \sigma_r^2}{\sigma_{\max}^2 - \sigma_r^2}$	混合機内の循環流の確認-混合機構	64
	炭酸ソーダ-塩化ビニール	149~74 μ	滴定分析	σ	混合性能, 最適操作条件	108
	炭酸ソーダ-砂	420~297, 297~210, 210~177, 177~149 μ	滴定分析	σ	混合性能, 最適操作条件	113
容 器 リ ボ ン 型	炭酸ソーダ-豊浦砂	350~105 μ	"	$S = C_i/C_0$	回分式混合と連続式混合機の混合度定義の差異	60
	ガラス粉	350~105 μ	光反射法	σ	連続混合に適した羽根形状および最適操作条件	130
	食塩-炭酸カルシウム	食塩35 μ , 炭カル5 μ	滴定分析	$\sigma, 1-\sigma/\sigma_0$	混合性能, 最適操作条件	116
	食塩砂, 炭酸ソーダ-塩じ	500~350, 149~74 μ	"	σ/σ_0	攪拌槽内の混合が拡散機構で説明できる	54
	炭酸ソーダ-豊浦砂	350~105 μ	"	σ	槽内の循環流および混合領域を明らかにする	122
流 動 層	豊浦砂, 食塩, 炭酸ソーダ	"	電気伝導度	σ	槽内のフローパターンと混合状態におよぼす操作条件	124
	塩化ビニール	150~100 μ	光電比色	σ^2	活性, 不活性部の流速比が混合過程を規定する	7
	豊浦砂	297~105 μ	写真撮影		不均一流動層の混合特性	62
	食塩-セメント原料	$\approx 25\mu$	炎光分析	σ	攪拌流動層の有効性	16



(a) 粒径および密度に差異のない場合の粒子群の挙動



(b) 分離、偏析状態



(c) 分離帯

Fig. 1 水平円筒型混合機内の粒子群の運動

響を与えることが知られている。

水平円筒型混合機で粒径あるいは密度に差異のある粉粒体を混合すると、低回転速度およびカスケード流れを示す状態において、粉粒体が Fig. 1 (a) に示す混合領域を降下する際、小粒子および密度の大きい粒子群が、大粒子あるいは密度の小さい粒子群の間隙を通過する浸透効果により、小粒子や密度の大きい粒子群が粉粒体層中心部に塊状集団を形成し分離偏析することが認められている^{51,80,100,127,136} [Fig. 1 (b)]. すなわち、混合機内に分離帯 [Fig. 1 (c)] が形成され、良好な混合状態が得られない。この分離帯の大小および形は、粒径比と混合比との割合および回転速度によって変化し、混合状態に複雑な影響を与えることが見出されている^{51,80,100,127,136}。また杉本は^{86,87}、コンカルボールミルなどで代表される水平円筒容器で、粒径分布や形状の異なる粉粒体を混合した場合の分離偏析状態を調べ、容器の小口径側に大粒子が、大口径側に小粒子が偏析することを明らかにしている。

井上一山口は¹⁸、2次元V型混合機内での密度の異なるより起こる分離偏析状態を追跡粒子法で測定し、密度の大きい粒子は粒子の循環流れの中心部で流動していることを認めている。

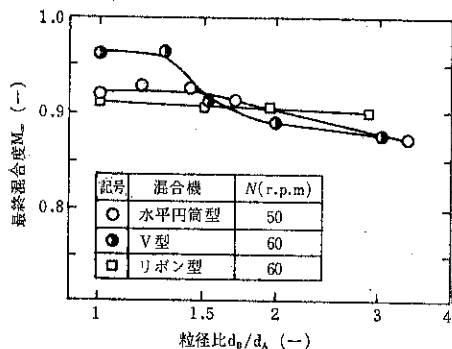


Fig. 2 形状の異なる混合機の最終混合度におよぼす粒径比 d_B/d_A の影響

このように水平円筒型やV型混合機のごとく、重力場での粉粒体の運動により混合が進行する場合、粒径や密度の差異が大きくなるほど混合速度が小さくなることが実験的に確かめられている^{112,120,132}。しかし分離偏析が起こる場合は、混合速度よりもむしろ最終混合度すなわち製品の混合状態が重要であると考えるのが妥当である。

矢野一寺下¹³²は水平円筒型、V型およびリボン型混合機の最終混合度が、粒径比の大小によってどのような影響を受けるかを調べ Fig. 2 に示す結果を得た。水平円筒型およびV型混合機では、付着や凝集の起こらない粉粒体の粒径比が約1.5付近より大きくなると、良好な最終混合度が期待できないといえよう。また密度差が大きくなるほど、それぞれの混合機において多少の差異があるが、良好な最終混合度が得られていない^{120,132}。

以上の結果は回分式混合機の場合であるが、流通式回転円筒内での異径2粒子の分離偏析状態を杉本ら^{80,81}および外山ら¹⁰⁰によって検討されている。

杉本らは分離帯の形成は、粒子の粒径比と混合比とからなる充填状態の臨界条件を考慮することによって排出組成の変動を推定できるとしている。また分離帯の発生条件にある2成分系粒子の軸方向分散活動は、分離帯の発生により大きく阻止されることを明らかにしている。すなわち、分離の発生によって円筒内の流れが、ピストン流れに変化することを意味している。外山らは、異径2粒子の運動状態を円筒断面での観察あるいは平均滞留時間より検討し、粒径比が0.4~0.5以下になると分離偏析の起こることを指摘している。

混合機内での分離偏析は、粉粒体の物性と挙動のいかなる組合わせによって起こるかの考察の余地を残すが、少なくとも良好な最終混合状態が得られないことは確かである。当然のことであるが分離偏析現象を抑制し、混合状態をよくする方法が検討されている。

杉本は⁸²⁾、混合機内に混合媒体を添加することにより分離帯を乱だし、半径方向の混合を活性化し混合状態をよくできることを明らかにしている。沢畠⁸⁸⁾も混合媒体の効果を確かめている。また外山ら¹⁰⁰⁾は、円筒を4分円構造にすることにより偏析防止を試みている。

さらに矢野一寺下は¹²⁷⁾、2次元水平円筒混合機内での密度の異なる粒体の分離偏析過程の観察から、回転速度を調節することにより良好な最終混合状態が得られるとして、実装置で密度の異なる粉体系の実験を回転速度を変化させて行い、Fig. 3の結果を得た¹³⁶⁾。密度に差異があっても回転速度を調節することにより、良好な最終混合度を得られていることがわかる。すなわち最適回転速度が存在する。この最適回転速度は、密度のほぼ等しい系より求めた最適回転速度¹⁰⁹⁾に比べて、水平円筒型混合機ではほぼ等しいがV型混合機では幾分小さいことが実験より得られている¹³⁶⁾。

以上の偏析防止方法は、いずれも混合機内に特定の混合領域を作らないことを意味する。

ところで混合機内で良好な混合状態が得られても、混合操作後の製品の排出一輸送一貯槽一排出などの操作による粉粒体の流動により、分離偏析が起こることが知られている^{12,13,61)}。したがって粉粒体混合操作を粉粒体プロセスとして捉えるべきである。

混合機内で粉粒体が複雑に挙動する場合、粒径や密度などの1次物性以外に、粉粒体の流動性を表わす2次物性と混合状態の関係を見出すことも重要であろう。

矢野一蟹瀬ら¹¹⁰⁾は、傾斜樋からの粉粒体の流出状態から動的な物性を求め、粉体相互の動的な物性が異なるほど水平円筒型、V型、二重円錐型および正立方体型混合機の最終混合度は悪くなることを指摘している。また

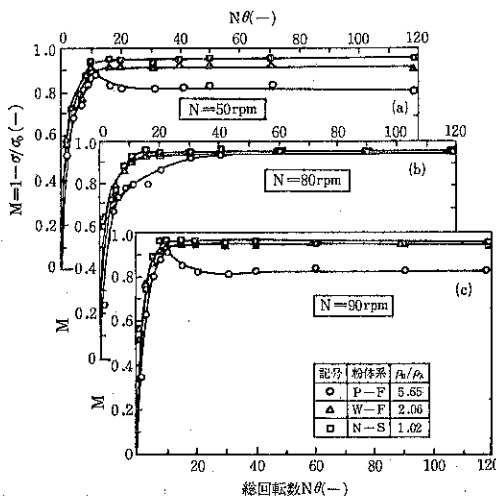


Fig. 3 混合度Mにおよぼす回転速度の影響

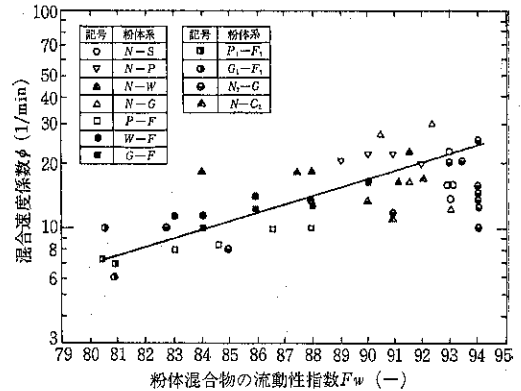


Fig. 4 混合速度係数 ϕ と粉体混合物の流動性指数 F_w の関係

二重円錐型および水平円筒型混合機は他の混合機に比べて混合時間が長くなるが動的な物性に差異があっても、かなり良好な混合状態が得られることが調べられている。沢畠は⁷⁴⁾流動性の尺度として安息角に注目し、安息角が小さいすなわち流動性のよい系ほど混合速度が大きくなることをV型および水平円筒型混合機で確かめている。さらに矢野一寺下ら^{118,120)}は、Carrの流動性指数を2成分混合物に適用し、水平円筒型混合機を用いて混合状態におよぼす指数の影響を評価した。その結果の一例をFig. 4に示す。データにかなりのばらつきが見られるが、混合速度は混合物の流動性が大きくなると増大しているといえよう。しかし流動性指数と最終混合度との間には、明らかな関係が得られていない。

混合状態が粉粒体の平均粒径や粒径分布により、どのような影響を受けるかということがしばしば問題となるが、この方面に関する研究は少ない^{46,110,111,112,182)}。

水平円筒型、V型、二重円錐型および正立方体型混合機を用い、平均粒径および粒径分布と混合状態の関係が調べられている^{110~112)}。実験結果によると、粒径が 150μ より大きい場合は、粒径が大きいほど混合度が悪くなるが所要混合時間には大差は見られない。また粉体の粒径範囲が広い範囲に分布する場合にはその粒径にメディアン径を用いると狭い粒径分布の粉体に対する算術平均粒径を用いた混合度と大差がない。さらに平均粒径が変化すると最適回転速度が異なることを指摘すると共に、最適粉体装入率は粒径にほとんど影響を受けないで内容積の30%付近であることを明らかにしている。これらの結果は上述のいずれの混合機についても同様である。

4. 容器固定型混合機

容器固定型混合機は、連続化が比較的容易で付着・凝

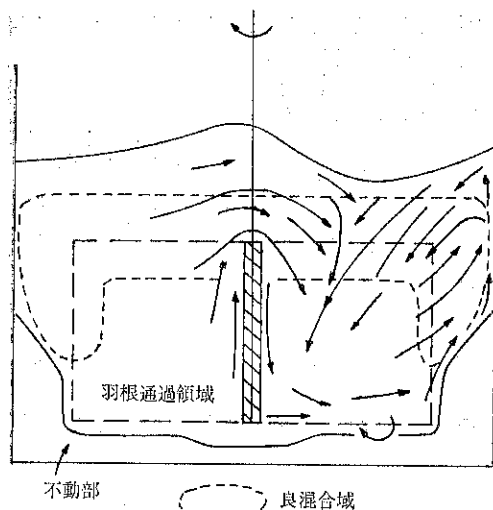


Fig. 5 攪拌槽の流動状態
(羽根後方と壁面に注目して)

集性の強い微粉体でも混合が可能であるなどの特徴があるといわれているが、混合性能を調べた研究は容器回転型混合機に比べて少ないといえよう。

大竹ら⁵⁴⁾は、攪型羽根を装着した攪拌槽で混合攪拌を行い、2種粉体の濃度分布から液相拡散に準じた拡散係数すなわち混合係数を測定し、これと操作条件の関係を求めている。また攪拌槽内の粉粒体の混合が拡散混合で説明できることを確かめている。その後、矢野—佐藤^{122, 126)}は攪型羽根による粉粒体の混合と流動過程の観察から、槽内の代表的な循環流および混合領域を明らかにしている (Fig. 5)。さらに混合過程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ることを示唆している。このような基礎研究に対し、混合性能に関する実験は主にリボン型混合機で行われているようである。

矢野—佐納¹¹⁸⁾は、リボン型混合機の混合性能を調べるために平均粒径の異なる試料を用いて混合実験を行い、粒径が大きくなると混合速度が大きくなるが、混合度は Fig. 6 に示すように悪くなること、および最適粉体装入率は 30~40% 付近であることを明らかにしている。また混合性能におよぼすリボンの形状と大きさについて検討し、幾何学的に相似なリボン型混合機の回転速度のスケールアップにはピッチ比を考慮する必要があることを述べている。さらに混合速度はフルード数の 0.2~0.4 乗に比例することを示し、容器回転型混合機の 0.4~0.7 乗に比べリボン混合機の方がやや小さいことを見出している¹¹⁵⁾。

矢野—寺下¹¹⁶⁾らは回分式スクリュウ型混合機 (ナウ

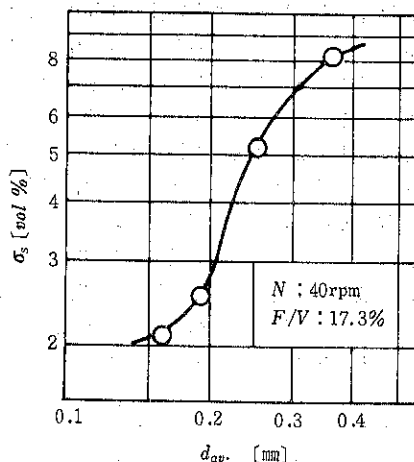


Fig. 6 混合度 σ_s と平均粒径 d_{av} の関係

タミキサー)の実用機を用いて微粉の混合を行い、混合速度、最終混合度および所要混合時間などが粉体装入率の影響をあまり受けないことから、この混合機のスケールアップの容易さを推定している。またこの混合機の機械的および操作上の特徴も紹介されている^{26, 43)}。

密度や粒径の差異および平均粒径が、リボン型混合機の混合状態にどのような影響を与えるかを実験的に検討し、この混合機が容器回転型混合機に比べて、混合速度および最終混合度が粉粒体の特性の影響を受けにくいことが報告されている¹³⁶⁾。すなわち剪断混合が大きな混合作用である容器固定型混合機は、粒径や密度などに差異のある粉粒体の混合に適していることがわかる。

容器固定型混合機には、この他に回転円板型、高速流動型およびマラー型などの興味ある混合機が市販されているが^{41, 42, 57)}、これらの混合機の混合性能に関する定量的なデータは見られない。

容器固定型混合機は、構造的に連続化がしやすいことから、リボン型混合機および攪型あるいは平板羽根などを取りつけた攪拌槽で、連続混合が行われている^{56, 60, 94, 96, 97, 121, 124, 130, 137)}。その中で佐納あるいは矢野—佐藤らの報告が興味深い。

佐納⁶⁰⁾、連続混合の混合度として混合槽出口で採取したサンプル濃度 C_i の、平均供給濃度 C_0 に対する比 C_i/C_0 の値(標準偏差 S)を用いるとよいことを指摘し、リボン混合機で混合実験を行い、混合度 S (標準偏差)と粉体のホールドアップ比 ϕ との関係を調べ Fig. 7 の結果を得ている。混合度 S は $\phi \approx 0.4$ 付近で良好な混合状態が得られていることがわかる。

矢野—佐藤ら^{130, 131)}は、堅型円筒内に攪拌翼あるいは連続二重巻リボン羽根を取りつけた連続式混合機の混

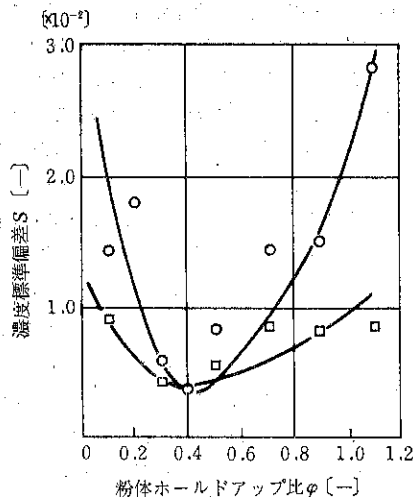


Fig. 7 混合度対粉体ホールドアップ比

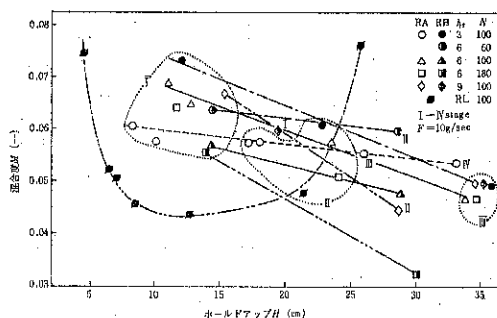


Fig. 8 混合度MとホールドアップHとの関係

合特性を過渡応答法より求めている。すなわち混合機内から流出する組成を光学的に連続測定し¹²³⁾、過渡および定常特性を算出して、連続混合に適した羽根形状および操作条件を求めている。さらに連続巻リボン羽根を多段に分割して連続混合機に用い、この羽根の混合効果を調べている。Fig. 8はその結果の一例である。分割リボン羽根(RA, RB)は、段間隔 h_s をある程度大きくとることにより、連続混合に不利な逆混合現象を防ぎ、ホールドアップを大きくとれることを明らかにしている。この形式の連続混合機は実用化されている¹³⁸⁾。

連続式混合の場合、いかに混合精度のよい混合機を用いても、供給に変動があれば組成比が時間とともに変化することになる。特に付着・凝集の強い粉体や微粉を原料ホッパーから、いかに高精度で混合機に供給することができるか、また混合機内で付着や固結を起こさず一様に排出することができるかが大きな問題である。さらに少品種多量連続混合の場合、どの程度以上の処理量であれば回分式に比べて利点があるのか、今のところ明らか

でない。

5. 流動化混合

流動層はもともと粒子の混合がよく物質移動もすぐれていることが知られている^{6,24,37)}。最近、流動層を粉粒体混合に応用した流動化混合が注目されてきている。この方法は従来の機械的な混合機に比べて大容量が処理でき、短時間で混合が可能であるという特徴をもっているが、研究は途についたばかりである。

安藤ら⁷⁾は、不均一通気の混合過程をフローパターンおよび混合速度係数から検討し、流速比が大きいくところ混合速度係数が大きくなることを報告している。また佐納⁸²⁾は、均一および不均一通気方法による粉粒体の挙動を調べ、不均一通気の方が混合作用が大きいことを確かめている。

ところで、付着性の粉体や凝集しやすい微粉末の混合の場合、低い流動化速度では吹き抜けなどが生じ、良好な混合状態が得られにくい場合がある。そこで池田ら¹⁶⁾は、攪拌流動層を用いて微粉の混合を行っている。結果の一例を Fig. 9 に示す。この装置では初期の混合速度が大きく、最終混合度も良好であることがわかる。また機械攪拌を併用することで、粉体の膨張比や飛散量が少ないなどの特徴を明らかにしている。

流動化混合においても粉粒体の物性の差異および特性が、混合状態に影響を与えることは容易に予測することができる。しかし、この問題について具体的に検討した例は発表されていないように思われる。

6. 微量混合

工業での混合操作では、二成分粉粒体の混合比が極端に異なる微量混合が多く行われている。特に製剤工程においては高倍率希釈という問題で取扱われている。

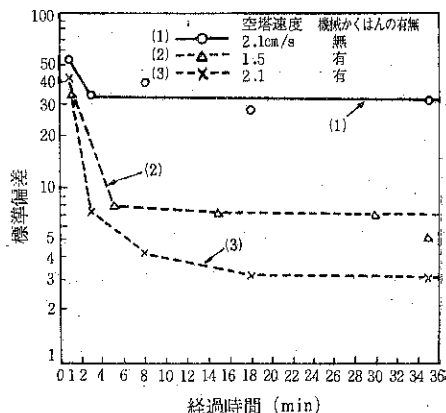


Fig. 9 攪拌流動層の混合状態

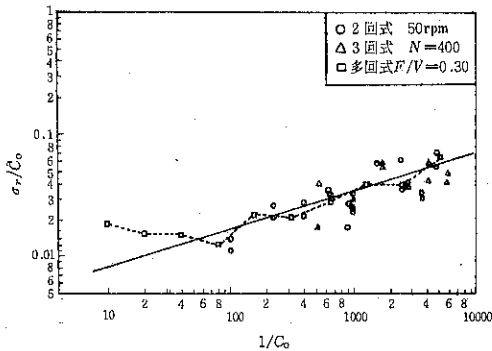


Fig. 10 変動係数 σ_r/C_0 と希釈率 $1/C_0$ との関係

矢野一蟹瀬ら¹⁰⁸⁾は、V型混合機を用い混合比を1:1~1:19の範囲で変化させて混合状態を調べた結果、着目成分の割合が小さくなるにしたがい標準偏差が減少し見掛け上混合状態がよくなるが、変動変数で表わすとあまり差が認められないことを報告している。また上述の混合比での混合速度は、ごく混合初期をのぞけばほぼ等しいことも調べられている^{68,108)}。

岡田一松田ら⁴⁵⁾は、薬剤混合における微量の主薬を多量の賦形薬に混合する場合を考え、混合比が3:10~1:500という極端な混合について検討し、希釈率が大きくなると変動係数が大きな値を示し最終混合度が悪くなることを指摘している。そして変動係数 σ_r/σ_0 と希釈率 ($1/C_0$) との関係として Fig. 10 に示す直線を得ている。

通常、微量混合すなわち高倍率に希釈する場合の混合は、低倍率の希釈を繰り返して目的の希釈を行う方法がとられている。このような倍数法の効果について岡田一松田ら⁴⁵⁾が実験を行い、立方体型混合機では Fig. 10 よりわかるように、倍数法の効果がありあるとはいいいにくい結果を得ている。この知見はあらゆる混合機および粉粒体試料についていえるとは限らない。したがって微量混合を行う場合は、大希釈せず低倍率の希釈を繰り返す方が良策である。また微量混合では、特に死空間の少ない混合機を選び、着目成分の仕込位置に注意する必要がある。

7. 微粉末の混合

微粉末混合に関する研究が少ないことは Table 2 より知ることができる。これは粒体に比べて微粉末が付着・凝集性が強く、取扱いがやっかいであるためと考えられる。したがって微粉末の混合をいかに容易に行い均一な混合状態を得るかということは、混合操作の中でも重要な課題の一つである。

命尾³⁰⁾は、微粉の混合を容器回転型混合機で行うと

共に、医薬品の微粉混合の予備混合として用いられている篩分散効果を検討している。すなわち、V型および二重円錐型混合機の混合状態には大差が見られないが、強制攪拌翼をそなえたV型混合機は通常のV型に比べて所要混合時間が約1/2短縮され、かつ最終混合状態も良好であることを明らかにしている。さらに篩分機を用いた場合、所要混合時間が大幅に短縮され、篩操作が微粉混合のプレミキサーとして効果的であることを指摘している。矢野一寺下¹²⁹⁾も微粉の混合を回分式スクルー型混合機で行い、微粉末の混合には剪断機構の寄与が大きいことを述べている。すなわち微粉末の混合において良好な混合状態を得るには、網面や攪拌翼などの剪断効果により各粒子の凝集を防止し、混合状態をよくする拡散混合が十分に働けるようにする必要がある。

以上の方法とは異なり矢野一寺下ら¹³⁵⁾は、付着や凝集が起こらない2成分粒体をスクリーンミル形式の衝撃粉碎機を用い粉碎混合することで微粉末の混合に代える実験を行い Fig. 11 に示す結果を得た。粉碎混合を行うことで、微粉末をリボン型混合機で混合した場合と同程度の混合度が得られていることがわかる。すなわち別々に粉碎した微粉末の混合の困難性を考えると、粉碎と混合とを一挙に行う粉碎操作で、たやすく微粉末の混合ができることを示唆している。

以上、粉粒体混合機の混合性能に関する文献を幾つか紹介したが、この他に移動層での粒子混合^{55,56,94,96,98,103)}あるいは混合性能の評価を所要動力より検討する^{52,110,128,134)}などの興味ある研究が見られるが割愛した。

商業用混合機の目録は単行本で収集されており^{41,57)}、実操作での操作条件および混合性能についても述べられている。また混合装置を型式別に分類し、それらの特徴および問題点について要領よくまとめられた報告⁴²⁾があるので、機種選定の参考となる。

混合度に関しては、矢野一佐納ら¹¹⁴⁾が過去に提出された混合度の適用性を検討しているし、白崎ら⁹⁰⁾が標本の大きさと混合度の関係を調べている。また赤尾ら

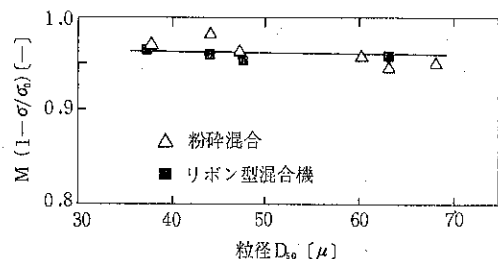


Fig. 11 粉碎混合で得られた混合度 M と粒径 D_{50} との関係

2,3,4,44)は、粒径が極端に異なる場合の混合度および定容積サンプリングの問題について検討している。さらに混合度の表示および特性については赤尾¹⁾、遠藤⁹⁾、神保²¹⁾および山口¹⁰⁵⁾の文献紹介あるいは解説がある。

最後に第8回粉体工学に関する講演討論会で発表した、混合操作と粉体物性については、別に報告してある⁹²⁾。

引用文献

- 1) 赤尾洋二：粉体工学研究会誌，5，1019 (1968)。
- 2) 赤尾洋二，野田悌一郎：化学工学，33，582 (1969)。
- 3) 赤尾洋二，野田悌一郎，高橋進太郎，大友昭：粉体工学研究会誌，8，321 (1971)。
- 4) 赤尾洋二，野田悌一郎，遠山孝雄，井上慧一：同誌，8，326 (1971)。
- 5) 青木隆一，山崎和男：同誌，2，296 (1965)。
- 6) 青木隆一，山崎量平：粉碎，No. 13，3 (1968)。
- 7) 安藤公二，田保英明，原 弘：粉体工学研究会誌，7，356 (1970)。
- 8) 新井紀男，架谷昌信，杉山幸男：化学工学，35，565 (1971)。
- 9) 遠藤一夫，綾木一夫：同誌，19，333 (1955)。
- 10) 遠藤一夫：同誌，27，587 (1963)。
- 11) 遠藤一夫：粉体工学研究会誌，7，307 (1970)。
- 12) 粉粒体供給装置委員会編：“粉粒体の貯槽と供給装置” p. 47，(1963) 日刊工業新聞社。
- 13) 林 俊孝，笹野睦雄，津々見雄文，川北公夫，池田千尋：材料，19，574 (1970)。
- 14) 細川永一，細川益男，横山藤平，中本正弘，福本史郎：粉碎，No. 7，13 (1961)。
- 15) 飯山栄一，青木隆一：化学工学，24，205 (1960)。
- 16) 池田研吾，佐々木惇，重信安俊，太尾田清通：粉体工学研究会誌，6，345 (1969)。
- 17) 井上一郎，山口賢治：同誌，5，1010 (1968)。
- 18) 井上一郎，山口賢治：化学工学協会北海道大会前刷，B. 16 (1968)。
- 19) 井上一郎，山口賢治：化学工学，33，286 (1969)。
- 20) 井上一郎，山口賢治：同誌，34，1323 (1970)。
- 21) 神保元二：最近の化学工学，p. 201 (1959) 丸善。
- 22) 蟹瀬 徹：化学機械技術，9，124 (1957) 積書店。
- 23) 蟹瀬 徹：化学工学，25，857 (1961)。
- 24) 加藤邦夫，今福克明，服部一男，久保田宏：同誌，30，748 (1965)。
- 25) 川合清一：粉体工学研究会誌，9，3 (1972)。
- 26) 松山卓蔵，鈴木昭明：粉碎，No. 10，12 (1964)。
- 27) Makishima, S. and S. Shirai : J. Chem. Eng., 1, 168 (1968)。
- 28) Makishima, S. and S. Shirai : ibid, 1, 175 (1968)。
- 29) 松田芳久，林 信一，岡田寿太郎：粉碎，No. 19，35 (1974)。
- 30) 命尾晃利：粉体工学研究会誌，5，986 (1968)。
- 31) 三宅康夫，定方近衛，立石公男，豊島昭二：薬学雑誌，90，1107 (1970)。
- 32) 三輪茂雄，阪上雅保：粉碎，No. 18，10 (1973)。
- 33) 水科篤郎，大阪一郎，森川省三：化学工学，24，601 (1960)。
- 34) 輿 徹：粉体工学研究会誌，3，517 (1966)。
- 35) 森 芳郎，神保元二，高城 真，鷺尾文郎：化学工学，25，806 (1961)。
- 36) 森 芳郎，神保元二，山崎昌男：同誌，28，204 (1964)。
- 37) 森 芳郎，中村厚三：同誌，29，865 (1969)。
- 38) 森山 昭，菅 哲男：鉄と鋼，80，25 (1974)。
- 39) 森脇 徹：粉体工学研究会誌，11，400 (1974)。
- 40) 長崎 勉，渡辺 明，田淵平次，材料，12，425 (1963)。
- 41) 日本粉体工業協会編：粉体機器要覧，p. 233 (1974) 広信社。
- 42) 日本粉体工業協会混合攪拌分科会：粉体と工業，7，1月号，49 (1974)。
- 43) 丹羽久雄：粉体工学研究会誌，5，981 (1968)。
- 44) 野田悌一郎：同誌，8，159 (1971)。
- 45) 岡田寿太郎，松田芳久，森田修之，和田泰享，大西治夫：薬学雑誌，88，827 (1968)。
- 46) 岡田寿太郎，松田芳久，松田康男：同誌，89，1562 (1969)。
- 47) 岡田寿太郎，穂積啓一郎，松田芳久，福森義信：同誌，90，1532 (1970)。
- 48) 岡田寿太郎，松田芳久，福森義信：同誌，92，270 (1972)。
- 49) 小川武男，石野和幸，沢島 恭：粉体工学研究会誌，9，153 (1972)。
- 50) 大山義年：理研彙報，12，953 (1933)，14，570，770 (1935)，15，320 (1936)，19，1070 (1940)。
- 51) 大山義年：理研彙報，18，600 (1939)。
- 52) 大山義年：理研彙報，19，1088 (1940)。
- 53) 大山義年，綾木一夫：化学工学，20，148 (1956)。
- 54) 大竹伝雄，北岡秀利，東稔節治：同誌，25，178 (1961)。
- 55) 大竹伝雄，東稔節治，清水敏正：同誌，30，891 (1966)。

- 56) 大竹伝雄, 東稔節治, 松尾博之: 同誌, 30, 941 (1966).
- 57) 最新, 粉粒体プロセス技術集成編集委員会編: 資料編, 6 (1974) 産業技術センター
- 58) 佐納良樹, 中野敏, 矢野武夫: 粉碎, No. 6, 8, (1961).
- 59) 佐納良樹: 粉体工学研究会誌, 1, 59, 387 (1965),
- 60) 佐納良樹: 同誌, 5, 965 (1968).
- 61) 佐納良樹, 宮田清己, 勝俣春美: 材料, 19, 570 (1970).
- 62) 佐納良樹: 粉碎, No. 18, 23 (1973).
- 63) 沢島 恭: 化学工学, 30, 178 (1966).
- 64) 沢島 恭: 同誌, 30, 1140 (1966).
- 65) 沢島 恭: 最近の化学工学, p. 169 (1966) 丸善.
- 66) 沢島 恭: 粉体工学研究会誌, 4, 831 (1967).
- 67) 沢島 恭: 材料, 16, 364 (1967).
- 68) 沢島 恭: 粉体工学研究会誌, 4, 889 (1967).
- 69) 沢島 恭: 同誌, 4, 894 (1967).
- 70) 沢島 恭: 化学工学, 31, 1212 (1967).
- 71) 沢島 恭: 粉体工学研究会誌, 5, 999 (1968).
- 72) 沢島 恭: 同誌, 5, 1169 (1968).
- 73) 沢島 恭: 同誌, 6, 95 (1969).
- 74) 沢島 恭: 同誌, 6, 99 (1969).
- 75) 沢島 恭: 同誌, 6, 104 (1966).
- 76) 沢島 恭: 材料, 18, 446 (1969).
- 77) 沢島 恭: 粉体工学研究会誌, 6, 351 (1969).
- 78) 沢島 恭: 化学工学, 33, 195 (1969).
- 79) 沢島 恭: 粉体工学研究会誌, 7, 382 (1970).
- 80) 杉本益規, 遠藤一夫, 田中達夫: 化学工学, 30, 427 (1966).
- 81) 杉本益規, 遠藤一夫, 田中達夫: 同誌, 31, 145 (1967).
- 82) 杉本益規: 同誌, 32, 176 (1968).
- 83) 杉本益規: 同誌, 32, 291 (1968).
- 84) 杉本益規: 粉体工学研究会誌, 5, 957 (1968).
- 85) 杉本益規: 同誌, 6, 208, 273 (1969).
- 86) 杉本益規: 化学工学, 34, 447 (1970).
- 87) 杉本益規: 材料, 21, 572 (1972).
- 88) 杉本益規, 山本健市: 材料, 22, 684 (1973).
- 89) 関口 勲, 東畑平一郎, 鬼山和彦: 粉体工学研究会誌, 7, 284 (1970).
- 90) 白崎高保, 向井田健一, 横尾弘一郎: 同誌, 4, 730 (1967).
- 91) 白崎高保, 落合康額, 向井田健一, 岡田正秀: 同誌, 5, 971 (1968).
- 92) 寺下敬次郎, 矢野武夫: 粉体と工業, 6, 10月号, 31 (1974).
- 93) 東稔節治, 大竹伝雄: 化学工学, 30, 439 (1966).
- 94) 東稔節治, 樋口敏一, 田村精司, 大竹伝雄: 化学工学, 30, 1033 (1966).
- 95) 東稔節治: 最近の化学工学, p. 103 (1968) 丸善.
- 96) 東稔節治, 須田隼介, 大竹伝雄: 化学工学, 34, 281 (1970).
- 97) Tone, S., I. Oda., K. Kawamura, and T. Otake: J. Chem. Eng. 5, 69 (1972).
- 98) 外山茂樹: 化学工学, 27, 397 (1963).
- 99) 外山茂樹: 同誌, 31, 282 (1967).
- 100) 外山茂樹, 千賀 博, 小西右文: 粉体工学研究会誌, 5, 1199 (1968).
- 101) 外山茂樹: 同誌, 6, 191 (1969).
- 102) 外山茂樹: 千賀 博: 同誌, 6, 354 (1969).
- 103) 矢木 栄, 国井大蔵, 長原勝美, 内藤 宏: 化学工学, 25, 469 (1961).
- 104) 山藤和男, 川口浩明, 青木隆一: 粉体工学研究会誌, 4, 881 (1967).
- 105) 山口賢治: 化学工学, 33, 314 (1969).
- 106) 山口賢治: 粉体工学研究会誌, 6, 292 (1969).
- 107) 山口賢治: 最近の化学工学, p. 43 (1970) 丸善.
- 108) 矢野武夫, 蟹瀬 敏, 田中邦雄: 化学工学, 20, 156 (1956).
- 109) 矢野武夫, 蟹瀬 敏, 波多野由純, 倉橋成元: 同誌, 21, 420 (1957).
- 110) 矢野武夫, 蟹瀬 敏, 田中邦雄, 倉橋成元: 同誌, 22, 758 (1958).
- 111) 矢野武夫, 蟹瀬 敏, 佐納良樹, 岡本行雄, 堤 万吉: 同誌, 23, 589 (1959).
- 112) 矢野武夫, 蟹瀬 敏, 佐納良樹: 同誌, 24, 198 (1960).
- 113) 矢野武夫, 佐納良樹, 白川宇吉, 富永 徹: 同誌, 24, 219 (1960).
- 114) 矢野武夫, 佐納良樹: 同誌, 29, 214 (1965).
- 115) 矢野武夫, 佐納良樹, 富永 徹, 宮田紀夫: 同誌, 29, 1001 (1965).
- 116) 矢野武夫, 寺下敬次郎, 北山輝昭, 峯下 豊: 粉体工学研究会誌, 8, 263 (1971).
- 117) 矢野武夫, 佐藤宗武, 立石享司: 粉碎, No. 16, 18 (1971).
- 118) 矢野武夫, 寺下敬次郎, 山崎利夫: 同誌, No. 16, 97 (1971).
- 119) 矢野武夫, 佐藤宗武, 阿部保明: 化学工学協会第6回秋季大会前刷, A-308, 大阪 (1971).

(69頁へつづく)

流動層における粉体の混合および分離

— 気泡の効果 —

Mixing and segregation of the solid particles in the fluidized bed

—Contribution of bubbles—

佐納 良樹*

Yoshiki Sano

猪爪 孝一*

Koichi Inotsume

秋葉 育郎*

Ikuro Akiba

Abstract

Few studies on the fluidized mixing of powder have been reported. If it can be operated in appropriate condition, fluidized bed may be regarded as one of the excellent mixer.

In this paper, mixing and/or segregation processes of particles by succeeded single bubble are observed, in a experimental two dimensional fluidized bed.

From the difference of the movements of the base component and the tracer, it can be implied that the segregation occurs according to the velocity difference of movement of both upward and downward.

著者摘録

従来、流動化法による粉粒体混合についての研究は極く僅かしか報告されていない。しかし、2成分あるいはそれ以上の異種粉体を混合する場合、適切な条件さえ選べば、流動化混合により極めて短時間に大量の粉粒体を混合しうる。

本研究ではこのような異種粉体の混合、分離に対する気泡径、気泡発生周期の影響を調べ、それぞれ対流混合および局部的混合に関連していると推測しえた。さらに気泡上昇に伴う異種粉体の挙動の差異を明らかにし、気泡による分離のメカニズムに示唆を与えることができた。

1. 緒言

流動層は接触分解装置としても知られて以来、漸時その用途を拡大し今日では化学反応のみならず乾燥、焼却、造粒、粒子コーティングなど広い範囲に用いられている。

これらの応用技術に関連して従来、流動層内の粒子およびガスの混合ならびに気泡について数多くの研究がなされてきた。すなわち気泡に関しては気泡の形¹⁾、ウェーク²⁾、気泡上昇速度³⁾ならびに生成気泡径⁴⁾などが報

告されている。

しかしこれらの研究はいずれも唯一種類の粉体を流動化させたものであって、粒子混合そのものを目的として粒径や密度の異なる異種粉体の混合については従来あまり研究されていなかった。

Leva⁵⁾は適当な条件を選べば異種粉体を流動化によって混合しうる可能性を示し、逆円錐型の層内に多段攪拌羽根を設置することを提案している。また著者ら⁶⁾は通気速度が密度のより大きな粒子の U_{mf} の1.2倍以上なければ粒子混合は起こらないし、密度差が小さいときには通気速度の小さい範囲で分離し大きい流速では混合することを明らかにした。さらに Nienow ら⁷⁾は密度、粒子径および U_{mf} の異なる粒子の混合および分離を系統的

* 信州大学繊維学部 (〒386 上田市常田3丁目15-1)
Tel 0268-22-1215

に調べ、密度差および粒径差のある場合でも複合 U_{mf} が存在し得、その条件下では異種粉体があたかも単一の成分であるかのように挙動するなど興味ある事実を報告している。

本研究は、このような異種粉体の混合や分離に対する気泡の役割りを調べるため単一気泡発生装置をもちいてまず同一種類の粉体につき、気泡の上昇にともなう粒子の挙動を観察し、ついで異種粉体系について同様の実験を行なって、気泡による混合、分離の経過を明らかにした。

2. 実験装置、試料および実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概略は Fig. 1 に示した。装置は大別して [I] 流動層本体 [II] 流動化空気の入送部および [III] 単一気泡発生部からなる。流動層本体①は $200^{\circ} \times 25^{\circ} \times 500^h$ の2次元層であり、前後の壁面(観察面)は透明塩ビ板製である。ガス分散板 (G-2 ガラスフィルター) ②および整流部 (3 m/m ガラス球を200m/m 充填) ④は、共に流動層本体内の粉体を最小流動化状態に保つための空気送入口 [II] に連らなっている。単一気泡発生部はコンプレッサー⑧、ソリッドステート・タイマー⑦、小型電磁弁⑥および気泡吹込管⑤からなる。⑤の先端は分散板の中央③に開口している。コンプレッサーから送り出された空気は電磁バルブの開閉により発生周期を0.5~1.0秒の範囲に調節した。また圧入空気圧 (0.8~1.4 kg/cm²G) と圧入時間 (0.05~0.5秒) を適当に選ぶことにより気泡の大きさを調節した。

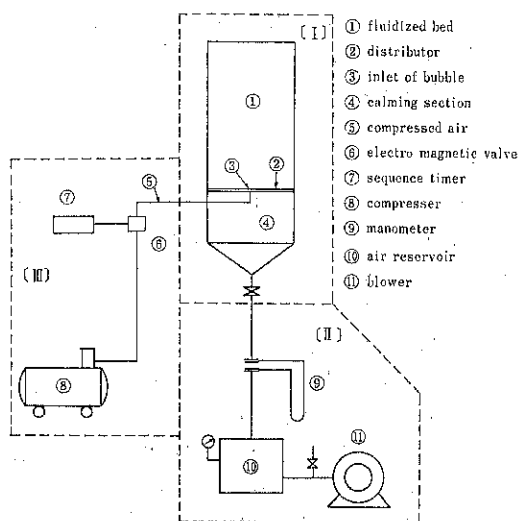


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

Table 1 Properties of samples

Particulate solids	Particle size, dp (μ)	Particle density (g/cm ³)
Glass beads	149~210	2.5
	500~590	
	590~840	
	840~1000	
	1190~1410	
Soma Sand	590~1000	2.6
	1410~1680	
Poly styrene beads	710~840	1.05
	840~1000	
Steel ball	1.0 (mm)	7.8
	1.5 (")	
Alundum	210~350	3.98
Toyo-ura sand	105~297	2.63

2.2 試料

試料粉体としては比較的粒度が粗く、かつ粒径範囲のせまいガラス球、相馬砂、豊浦砂およびアラダムを主として用い、その他、ポリスチレン球、鋼球(ベアリング用、上級)も使用した。供試粉体の主な性質を Table 1 に示した。このような試料粉体を後述のようなトレーサー粒子として使用するときには相馬砂はメチレンブルーで着色したものを、またガラス球、ポリスチレン球および鋼球についてはマジックインキで赤または黒に着色したものを使用した。

2.3 実験方法

ベース(多量成分)粉体に重量基準で約1~1.5%の、着色して区別した同種粉体(同種粉体実験)または異種粉体(異種粉体実験)をトレーサー粒子として加え、十分に混合してから層内に充填した。層内を最小流動化状態に保った後、気泡発生部により所定の気泡径および発生周期で単一気泡を発生させた。流動層前面(観測面)に現われるトレーサー粒子の位置を、特に断らぬ限り気泡5ヶ通過毎に透明被膜上に打点することにより粒子の移動状況を追跡した。しかしこの方法では同時に唯1ヶのトレーサー粒子しか追跡できないので、気泡発生周期の短い場合および気泡通過経路内の粒子の追跡には16m/mカメラで撮影(64コマ/秒)した後、コマ数計数器つきビューアーで追跡した。

本研究で実験をおこなった粉体の組み合わせならびに気泡径および気泡発生周期を一括して Table 2 に示した。

なお粉体層高は特に断らぬ限り一定(250mm)に保った。

Table 2 Experimental conditions

Base component	Tracer component	Particle size, dp (μ)	Diameter of bubble, D _B (cm)	Period of bubble formation (sec)
Glass beads (590~840 μ)	Glass beads	590~840	3.0	1.0
		"	4.5	"
		"	5.5	"
		500~590	4.5	1.0
		590~840	"	0.5
		"	"	0.63
Glass beads (149~210 μ)	Glass beads	"	"	0.75
		"	"	1.0
		1190~1410	"	"
		"	"	"
Glass beads (590~840 μ)	steel ball	1.0 (mm)	4.5	0.5
		"	"	1.0
		1.5 (mm)	"	"
	Poly styrene beads	"	5.5	"
		710~840	4.5	1.0
		840~1000	"	0.5
Soma Sand (590~1000 μ)	Soma Sand	590~1000	5.5	1.0
		1410~1680	6.0	"
Toyo-ura Sand (105~297 μ)	Alundum	210~350	6.0	1.0

3. 実験結果および考察

3.1 圧入空気量と気泡容積

Fig. 1 の③から圧入する空気量は電磁バルブへの通電時間により調節し、水置換法により予め測定しておいた。このようにして圧入された空気により発生した気泡の一例を Photo 1 に示した。このような気泡の断面積を面積計で求め、仮りに円筒形であるとして計算される容積ならびに実際に圧入した空気容積を Table 3 に示した。圧入空気量に比べ気泡容積の仮想値が $1/3 \sim 1/4$ になる場合もあり、気泡断面積計測の誤差ならびに形状を円筒と仮定したための誤差では上述の差異は説明しきれない。

気泡の撮影は、気泡が十分成長した後に行なわれていることから圧入空気のうち相当部分が気泡を形成せずに粒子間隙を通り抜けたものと見なければならぬ。この空気は流動化用の空気と合流して粉体粒子の動き易さに影響している筈である。また表からわかるように圧入空気量と気泡容積の比は粉体の種類により異なるようであるが、ここでは論じないことにする。

3.2 同種粉体の挙動

異種粉体の混合および分離におよぼす気泡の効果を論ずるに先立ってまず同種粉体粒子の挙動を調べた。

3.2.1 気泡付近の粒子のフローパターン

590~1,000 μ の粒度範囲をもつ相馬砂に、着色して区

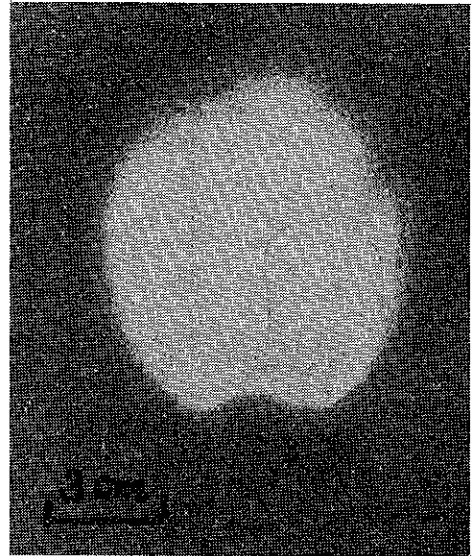


Photo 1 Bubble (590~840 μ Glass beads)

Table 3 Penetration out of the bubble

Sam-ples	Diameter of bubble, D _B (cm)	Calculated volume of bubble, V _{cal} (cc)	Blowerd volume of air, V _{exp} (cc)	V _{cal} / V _{exp}
Toyo-ura sand	4.0	25.1	35.0	0.72
	6.2	60.3	90.0	0.67
	7.5	88.4	123.0	0.72
Glass beads	2.9	13.2	35.0	0.38
	4.6	33.2	90.0	0.37
	5.5	47.5	123.0	0.39
	7.0	77.0	180.0	0.43
Soma sand	2.0	6.3	35.0	0.18
	4.0	25.1	90.0	0.28
	4.5	31.8	125.0	0.25
	6.0	56.6	180.0	0.31
Alun-dum	4.0	25.1	125.0	0.20
	6.5	66.4	180.0	0.37

別した同砂をトレーサーとして混入し、径約5.5cmの気泡を周期1.0秒で発生させ、16m/mカメラで撮影した。16m/m用ビューアーで1コマ毎に気泡およびトレーサー粒子の位置を追跡した結果から作成した図を Fig. 2 に示した(図では煩雑さを避けるため4コマ毎の位置を示してある)。図中に付記した数字はコマ数である。すなわち図は約 $1/4$ 秒間の気泡および数個の粒子の移動経路を追跡したものである。気泡通過経路およびその近辺の粒子は気泡の通過周期とほぼ同じ時間周期でループを描きながら漸時側方へ押しやられるのが観察された。しかし Fig. 2 では時間経過が短かすぎて広い範囲での粒子移動状況がつかめないの気泡1個通過毎または5個通

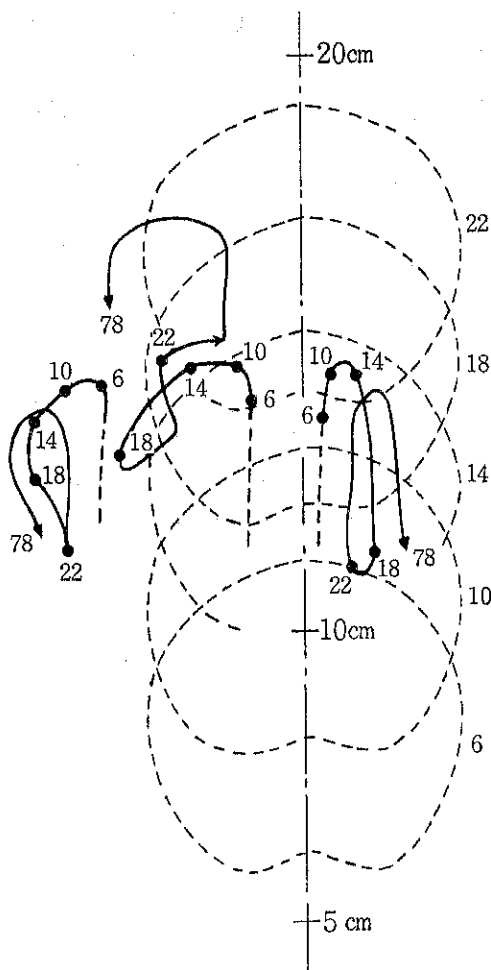


Fig. 2 Particle path lines correlated with the bubble movement (1/4 sec.)

過毎の粒子位置を追跡した結果を Fig. 3 に示した。図からあきらかなように気泡通過経路内およびその近辺の粒子は上述のようなループ運動を行ないながら上方、下方あるいは側方へ移動するという基本的パターンが明らかになった。

3.2.2 気泡圧入周期

気泡圧入の時間間隔が長ければ層内粒子はつぎの気泡が圧入されるまではほぼ静止することになり、逆に圧入周期が短かければある気泡による影響を受けた粒子がその動きを止めぬうちにつぎの気泡の影響を受けることになる。そこで気泡発生をの周期をそれぞれ1.0, 0.75, 0.63 および0.5秒に設定してトレーサー粒子の移動経路を追跡したもののうち1.0秒と0.63秒の結果を Fig. 4 に示した。図中、各経路上に画かれてある、相隣る2点は Fig. 3 の・印で示したのと同じく気泡5個通過毎のトレ

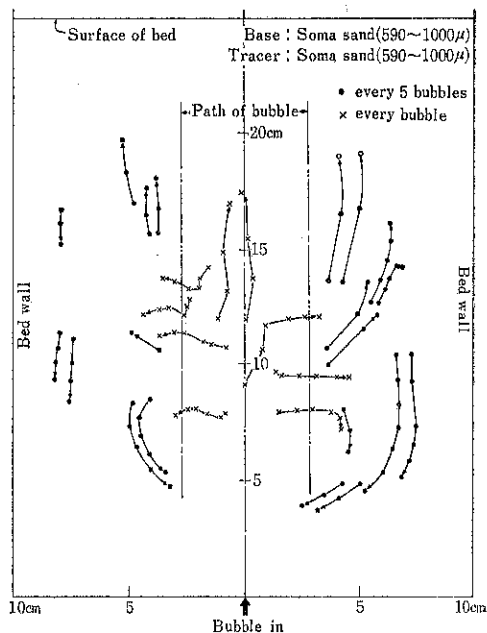


Fig. 3 Flow patterns of particles

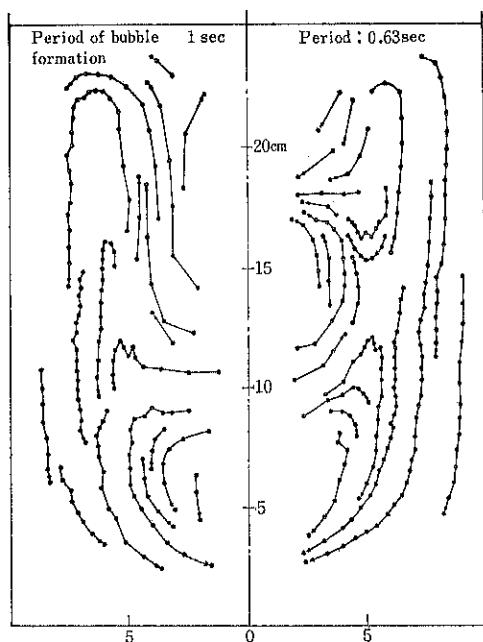


Fig. 4 Effects of the period of the bubble formation (Glass beads: 590~840μ, bubble dia.: 4.5cm)

ーサー粒子の位置を示したものである。

周期0.63秒の場合、層の中心軸方向へ粒子が流入する個所が2ヶ所あるが、これは層内に2ヶの気泡が存在しているためである。したがって見掛上、1.0秒のときの

フローパタンと0.63秒のそれとの間に差異があるようであるが粒子移動速度にはほとんど差異は見られなかった。

3.2.3 “吐出流”

Fig. 5 (a)および(b)はそれぞれ層高が10cmおよび25cmになるようガラス球 (590~840 μ) を充填し、両者とも径4.5cmの気泡を周期1.0秒で発生させたときの結果である。またFig. 6 (a)および(b)に気泡径がそれぞれ5.5cmおよび3.0cmの気泡を周期1.0秒で発生させたときのトレーサーの粒子追跡結果を示した。

層高10cmの場合は Fig. 5 (a)のように粉体層表面近くと気泡発生位置直上の間に、ほぼ左右対称な下向き循環

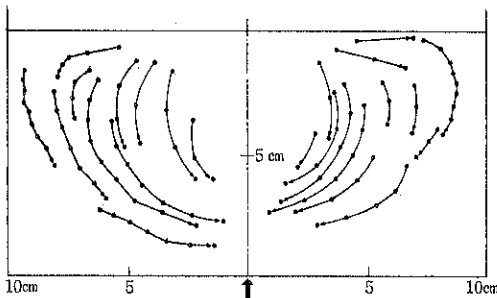


Fig. 5 (a) Effect of the bed height ($H=10\text{cm}$)
(Glass beads : 590~840 μ , bubble
dia.: 4.5cm, period : 1.0sec.)

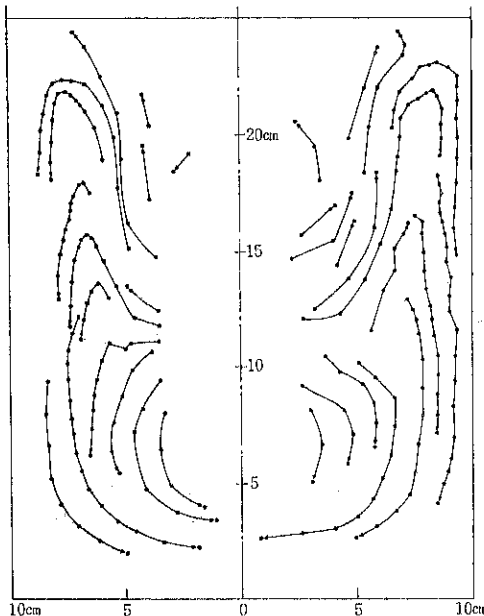


Fig. 5 (b) Effect of the bed height ($H=25\text{cm}$)
(Glass beads : 590~840 μ , bubble
dia.: 4.5cm, period : 1.0sec.)

流が見られた。なおこの場合、気泡が粉体層表面に達した時点においても気泡は成長途中にある。これに対し層高25cmでは (Fig. 5 (b)) の気泡発生口からの高さ10cm以下の領域での下降循環流の他に、粒子が一旦水平方向に押し出された後、上方へ向う流れと上述の下降循環流に合流する流れに分れるのが見られた。このような、側方向へのフローパタンは粉体層高さえ一定以上であれば気泡径、気泡発生周期が異なる場合にも見られた。すなわち粉体粒子は気泡発生口からの特定の高さで水平方向に“吐き出れる”のが見られた。しかもそのような水平流の発生する高さは気泡径が大きい程高かった (Fig. 6)。

このように粉体層内の特定の高さであたかも液体攪拌槽での吐出流に類似した粒子の循環が見られるのは興味深いことである。しかしこのような“吐出流”も Fig. 2 に示したような気泡1ヶ通過毎に画く不完全ループ運動の結果としての現象であるから液攪拌槽内の吐出とは根本的に異なると考えねばならない。図は省略したが、層内での気泡の成長経過を追跡した結果、気泡径4.5cmでは成長完了高さが約10cm、気泡径6.7cmのものでは発生口から約15cmの高さで成長が完了するという事実と関連があるように思われる。

3.3 異種粉体の挙動

3.3.1 粒子径が異なる場合

密度が同じ (同一種粉体) で粒子径の差異も比較的小さい組み合わせ (590~840 μ のガラス球に500~590 μ の

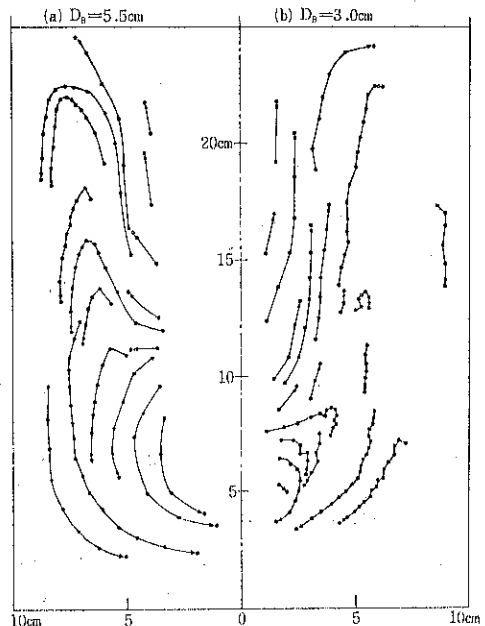


Fig. 6 Effect of diameter bubbles
(Glass beads : 590~840 μ , period : 1 sec.)

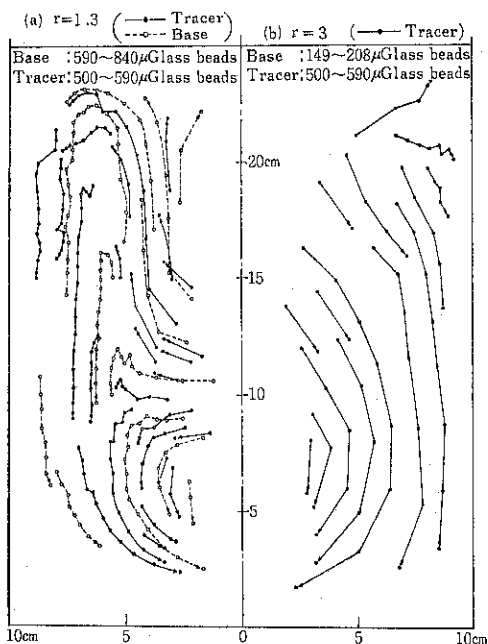


Fig. 7 Effect of the particle size ratio r

ガラス球をトレーサーとして混入) および差異が比較的大きい組み合わせ (149~208μ のガラス球に 500~590μ のガラス球を混入) の粒子移動経路を Fig. 7 (a) および (b) に示した。粒径比 r は粗粒径/細粒径を表わす。

粒径比が 1.3 程度ではトレーサー粒子の動きはベース粒子のそれとほとんど変わりがなく、細粒が層上部へ分離偏析するようなことはなかった。しかし Fig. 7 (b) に示したように粒径比が 3 程度になると (a) と全く同じトレーサー粒子の動きは前者と大きく異った。すなわちトレーサー粒子である粗粒は粉体層面近くを除き層全体にわたって、かなりの速さで下降した。

3.3.2 密度差のある場合

590~840μ のガラス球をベース粉体とし、それぞれ 710~840μ, 840~1,000μ の粒径範囲をもつポリスチレン球をトレーサー粒子として混入し、両種粉体の経路を追跡した結果を Fig. 8 (a), (b) に示した。(b) ではポリスチレン球の粒度範囲がベース粉体のそれより粗粒側へずれているためその影響も考えねばならないが、ポリスチレン球の密度がベース粉体のその約 1/3 にしか過ぎないにかかわらずベース粉体粒子の流れに逆らって、直接層表面へ浮上するようなことはなかった。すなわちポリスチレン球の一部はベース粉体粒子とともに“吐出”された後層底部まで達し、気泡によって層頂へ持ち上げられた。しかし、一旦層表面に達したポリスチレン球は再び層内に入り込むことなく、表面に集積するのが見られた。このような動きは (b) 図に示した、粒径のより大きい

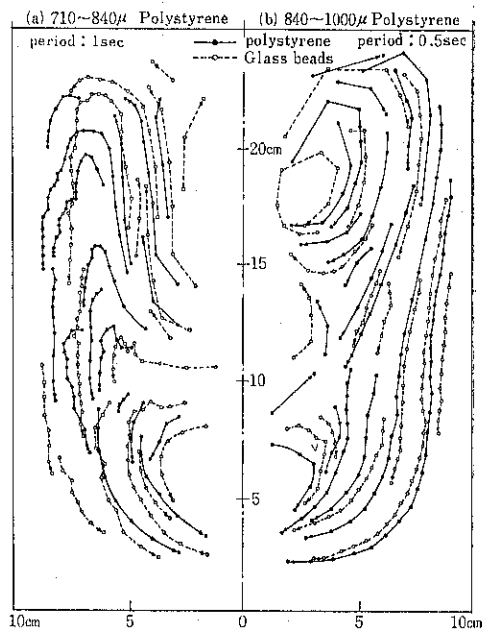


Fig. 8 Effect of the particle density
(Base: 590~840μ Glass beads)

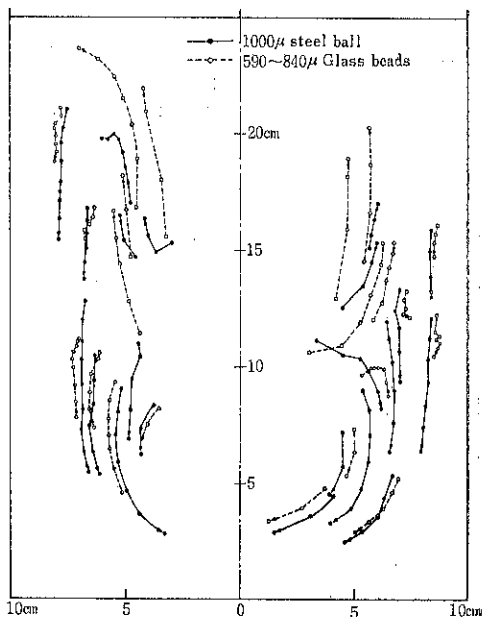


Fig. 9 Effect of the particle density
(Base: 590~840μ Glass beads,
 $D_B=4.5\text{cm}$, period: 1 sec.)

場合に一層明瞭であった。

つぎに、590~840μ のガラス球に 1,000μ の鋼球を混入し、鋼球がどのような経過を経て底部に偏析するかを調べた。Fig. 9 は気泡径 4.5cm, 気泡発生周期 1.0 秒の

き得た結果である。鋼球はガラス球に比べ密度がかなり大きいにもかかわらず層上半部ではベース粉体粒子の動きに乗せられてゆっくりと上昇するのが見られた。一旦上昇した鋼球は左右の側壁に沿って下降し、層底中央部に集積した。そして気泡に伴うウェークを持ち上げられるものあるいは気泡内をフィンガーとして落下するものもあった。しかし、 $1,500\mu$ の鋼球についての観察では上昇する粒子は全くなく、沈下するのみであった。

Fig. 9をもう少し詳しく眺めると、層上半部では鋼球はガラス球に比べて上向きの移動距離が短い。また層底から10~12cmの領域では“吐出”された後ガラス球は層内を上昇するのに対し鋼球は下降した。さらに層下半部では鋼球の下降速度がガラス球のそれよりも大きかった。

すなわち層上半部および下半部で軽重両粒子の挙動が互いに逆の関係にあり気泡の上昇に伴う異種粉体の分離のメカニズムを示唆しているものと思われる。

3.4 考 察

以上、同種粉体および異種粉体について単一気泡の上昇にともなう粒子挙動の観察結果について述べた。気泡通過毎の粉体粒子の動きから、気泡径の大きい程、当然のことながらその影響はより遠くの粒子まで及び、かつ移動速度も大きい。したがって気泡径は主として粒子の循環流の規模すなわち対流混合に関連するものと考えてよいであろう。それに対し気泡上昇にともない気泡通過経路内およびその周辺の粒子は不規則なループ運動を強いられる。したがってこのような局所的な粒子の運動は気泡発生周期すなわち本実験では同一時刻に層内に存在する気泡の数が多し程、活発になる筈である。したがって気泡発生周期は機械的固体混合でいう局部的混合に関連すると考えてよいであろう。

またFig. 7~Fig. 9からも明らかなように、粒子の特性がかなり異るときでも両種粉体が全く異った動きをするのではなく、ベース粉体粒子(多量成分粒子)の挙動に大いに制約されるようである。

ただ、本研究における実験結果は2次元層の壁面に出現した粒子の動きにのみ基いていること、ならびに単一気泡であるため多くの場合、気泡圧入後つぎの圧入までの間、層内粒子が静止しているなどのため、ここで得た知見をそのまま実用規模の流動層へ適用することは勿論適当ではない。しかし流動層底部分散板近辺のいわゆるグリッドゾーンはここで扱った状態に比較的近く、その領域の解析に役立つであろう。

4. 結 論

実験室的2次元流動層をもちいて同種および異種粉体粒子の混合ならびに分離、偏析におよぼす単一気泡の効果を調べ、つぎの結論をえた。

- (1) 気泡径および気泡発生周期は、それぞれ対流混合および局部的混合に関連する。
- (2) 両成分粉体の特性がかなり異なる場合でも、多量成分粒子の挙動に制約され、直ちに分離、偏析することはない。

引 用 文 献

- 1) Rowe, P. N.; B. A. Partridge; Symposium on the Interaction between Fluids and Particles, p. 135, London, Instn. Chem. Engrs. (1962).
- 2) Reuter, H.; Chem. Ing. Tech., **35**, 98 (1963).
- 3) Davidson, J. F., R. C. Paul, M. J. S. Smith, H. A. Duxbury; Trans. Instn. Chem. Engrs. London, **39**, 230 (1961).
- 4) Baumgarten, P. K., R. L. Pigford; A. I. Ch. E. Journal, **8**, 115 (1960).
- 5) Leva, M; Paper Congr. European Fed. Chem. Engrs, 3rd. London, B30-B37 (1962).
- 6) 佐納良樹, 猪爪孝一, 樋口照雄; 化学工学協会第5回秋季大会講演要旨集, p. 65 (1971).
- 7) Rowe, P. N., A. W. Nienow, A. J. Agbin; Trans. Instn. Chem. Engrs. **50**, 310, 324 (1972).

流動層における粒子-流体間の伝熱係数について

Fluid-to-Particle Heat Transfer in Air-Fluidized Beds

田中 勇武* 篠原 久* 吉原 紀幸**
Isamu Tanaka Hisashi Shinohara Noriyuki Yoshihara

Abstract

The heat transfer coefficients between gas and fluidized solids were examined in the gas-solid fluidized bed.

The steady-state system was realized by the constant rate drying in the batch fluidized bed. The axial distribution of the gas temperature was measured by the suction thermocouple. Used fluidized particles were Beppu earth and the micro spherical catalyst. The range of particles sizes was 0.7~1.36mm. The bed depth were 70~120mm in fluidized conditions.

The obtained fluid-to-particle heat transfer coefficients were correlated within 25% deviation as $Nu_p = 0.13 Re_p^{0.9}$, $30 < Re_p < 200$.

Above results and literature will support the assumption that gas flow in the fluidized bed be the piston flow.

要 旨

固-気系流動層における粒子-流体間の伝熱係数を湿潤粒子の恒率乾燥期間を利用して、実験的に検討した。

従来の伝熱係数の実験値は大きくバラついているが、これは、流動層中の空気温度測定に問題があると考えられる。本実験においては、この温度を精度よく測定するために、吸引温度計を用いた。

流動化用粒子としては、別府白土とネオビード（シリカ・アルミナ系触媒球形粒子）とを用い、その粒径範囲は0.7~1.36mmである。

流動層の層高は、7~12cmである。

本実験で得られた伝熱係数は、±25%の精度で次式で整理された、 $Nu_p = 0.13 Re_p^{0.9}$, $30 < Re_p < 200$

さらに、流動層中のガス側の流れを押し出し流れと仮定すれば、既往の研究も含めて、全データを Nu_p と Re_p とで整理できることがわかった。

結 言

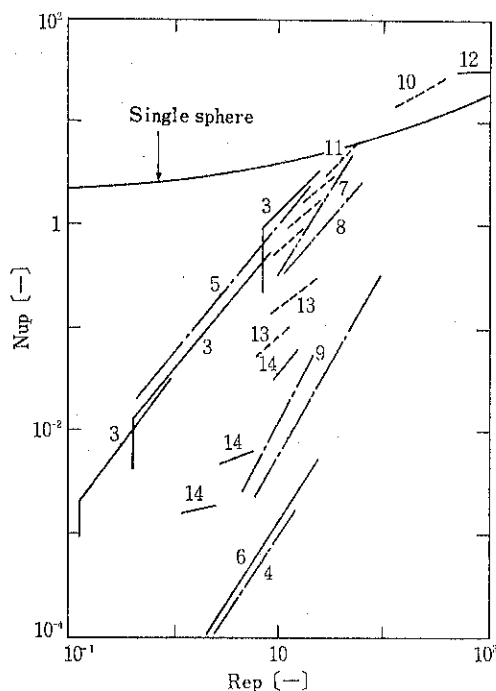
流動層を反応、乾燥、または冷却用の装置として用いるときには、粒子-流体間の伝熱係数が重要となる。この伝熱係数については、従来、数多くの実験的研究がな

されてきたが、Fig. 1 にみられるようにそれらのデータは、かなりバラついている。その原因としては、粒子およびガスの温度の正確な測定が困難であること、粒子-流体間の接触面積が大きいために、粒子-ガス間の温度差が分散板上のわずかな距離で消失してしまうこと、さらに、固-気系流動層の粒子側は、ほぼ完全混合とみなされているが、ガス側については、押し出し流れであるか、または完全混合流れであるかについて、十分に理解されてないことなどが考えられる。

伝熱係数を実験的に求める方法は、以下の3種に大別

* 九州大学工学部化学機械工学科
(〒812 福岡市東区箱崎6丁目10-1)
Tel 092-641-1101

**現在 旭硝子㈱



	粒子側	ガス側	文献番号
定常法	完全混合	押し出し流れ	5・7・8・10・11・12
非定常法	完全混合	押し出し流れ	3
		完全混合	4・6・9・13・14

Fig. 1 Correlation for fluid-to-particle heat transfer coefficients

できる。

- (イ) 定常法：粒子の温度を何らかの方法で一定に保ち、ガスの温度分布を測定する方法
- (ロ) 非定常法：空塔中に、ある所定の温度に保たれたガスを流しておき、ある瞬間に粒子群を投入し、そのとき形成される流動層の温度の時間的変化を測定する方法
- (ハ) 非定常法：(ロ)と同じ手順で、ある層高における粒子温度とガスの時間的変化を求める方法

以上3種の方法の内、(ロ)の方法で層の温度を測定することは、換言すれば、ガスの層内流れを完全混合流れと仮定していることになる。しかし、ガスの軸方向の温度分布を測定した一例*を示すと Fig. 2¹⁵⁾ のようになり、層の軸方向にかなりの温度分布がみられる。このため、(ロ)の

* まず300°Fの流動層を形成させておき、 $\theta=0$ secにおいて突然切り換えて125°Fの空気を送入した場合の流動層中の空気温度の変化を示す。

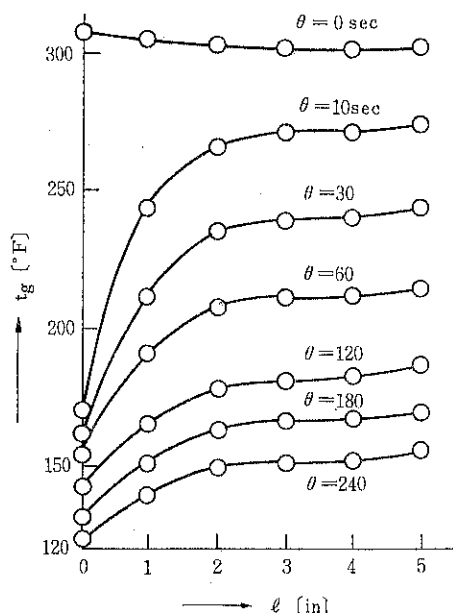


Fig. 2 Transient gas temperature profiles in fluidized bed

方法では、真の伝熱係数は測定できないと考えられる。

一方、(ハ)の方法で測定された伝熱係数¹⁵⁾は、Fig. 2で示されたように軸方向にガスの温度分布が存在するにもかかわらず、任意の一定高さにおけるガスと粒子の温度に基づいて、算出されているので、層底部と上部とでは、その値が著しく異なることが推測される点で、不正確であるように思われる。

本報告では、湿潤粒子の恒率乾燥期間を利用し、軸方向のガスの温度分布を測定して伝熱係数を求める(イ)の方法で実験を行ない、その結果を既往の研究結果と比較検討した。

1. 実験装置および実験方法

実験装置の概略図を Fig. 3 に示す。

空気は、ブローヤより脈動止タンクを経て、四分円ノズルで流量を測定された後、ヒーターで所定の温度に加熱され、分散板(厚さ 0.5mm、孔径 1.5 ϕ mm、ピッチ 3mmの正分配列の真鍮製多孔板)を通して、塔本体へ導びかれる。塔本体は、内径 100 ϕ mmの透明アクリル管であり、その壁には、スケールが取り付けられている。

空気の軸方向温度分布**は、吸引温度計を層中心で軸方向にスライドさせることにより測定した。スライドの高さは、1/100mmの精度で行なった。吸引温度計の詳細を Fig. 4 に示す。温度計の層内に挿入される部分には、

**半径方向の温度分布は、均一であると仮定した。

ガラス管（外径 8ϕ mm，内径 6ϕ mm）を用い，銅—コ
ンスタンタン・シース熱電対（ 1.6ϕ mm，素線径 0.3ϕ
mm）をガラス管壁面と接触しないようにとりつけた。
また，その先端には，粒子が吸引温度計内へ流入するの
を防ぐために 20mesh の金網を装着した。

実験に用いた試料を Table 1 に示す。

これらの試料を乾燥状態で 250g 秤量し，湿潤させた
後，流動層頂部より投入する。粒子群が良好な流動状態
を示し，かつ出口空気温度が一定になった時を定常状態
とみなし，入口，出口の空気温度，空気の層内軸方向温
度分布，ならびに流動層高さを測定した。また同時に乾

Table 1 Fluidized particles

	粒径分布	粒 径	真密度	見掛け密度	U_{mf}
	mesh	mm	g/cm ³	g/cm ³	cm/sec
別府白土	8~10	1.36	2.25	1.27	79
	10~12	1.08	〃	1.10	61
	12~16	0.852	〃	〃	47
	16~20	0.696	〃	〃	37
Neo Bead	14~22	0.727	2.50	1.02	29
	22~28	0.422	〃	〃	22

粒径測定は，空気透過法による

乾燥速度曲線を得るために，一定時間毎に少量の粒子（約
1g）をサンプリングし，含水率の変化を求めた。なお，
入口空気温度は， $41\sim 44^{\circ}\text{C}$ の範囲で実験した。

2. 本実験を行なうにあたり特に注意した事項

i) 湿潤粒子の流動化；湿潤粒子は，その表面に付着
した水分のために凝集しやすく，流動化させようとしま
も，チャンネリングやスラッシングを起こし，良好な流
動化状態が得られにくい。このため，実験試料として
は，粒子間の凝集が起こりにくい比較的大きな径の多孔
質粒子を選び，それらを Table 1 に示した。

ii) 空気の流動層内軸方向温度分布の測定；流動層内
のガス温度のみを検出することは，周囲に異なった温度
の粒子が流動化しているため，非常に困難であると考え
られる。このため，本報告では，吸引温度計を用いて，
ガス温度を測定した。まず，吸引温度計が正確なガス温
度を示すかどうかを以下の方法で確かめた。すなわち，
裸熱電対温度計と吸引温度計とを同じ高さに並べ，同一

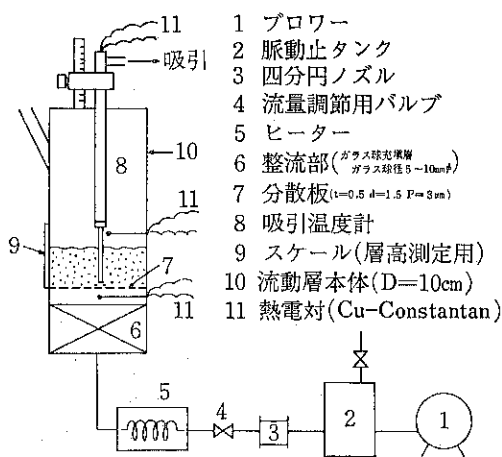


Fig. 3 Schematic diagram of apparatus

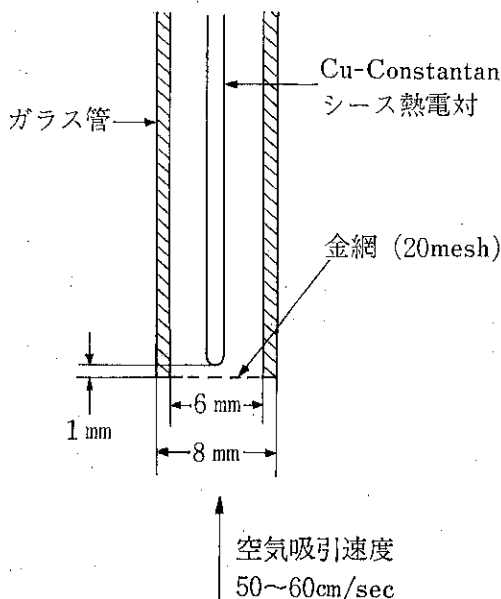


Fig. 4 Suction thermocouple

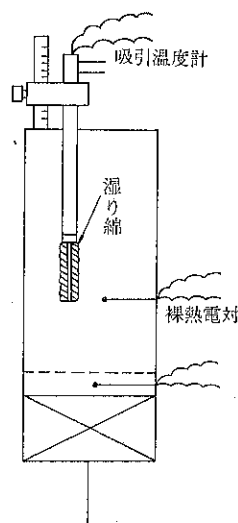


Fig. 5 Apparatus for calibration of suction thermocouple

温度指示であることを確かめる。次に、Fig. 5 に示すように、吸引温度計のガラス管の外壁に湿潤粒子の代わりとして、湿った綿を巻きつけガス温度を測定した。その結果、吸引を行わない吸引温度計の指示温度は、湿った綿の影響を受け、裸熱電対温度計の指示温度より小さいが、吸引した場合の指示温度は、後者のそれとほぼ同一温度を示すことが確かめられた。

iii) 粒子の比表面積の測定；粒子の比表面積 ($=6/D_p$) は、伝熱係数を算出する際に大きな影響を与える。本実験においては、空気流速を小さくして、大粒子径まで層流域で正確に測定できる空気透過法の装置を試作し、これによって比表面積を求めた。

iv) 流動化時の層高 l_f の測定； l_f は、絶えず激しく上下に振動しており、その値を正確に測定することは難しい。しかし、比較的大きな粒子で流速が低い時には、その変動幅も小さく測定しやすくなる。これらの条件で l_f を目測して求めた。また、粒子の含水率の相異により、層高も変化することが考えられるが、ここでは、乾燥終了時の粒子を用いて層高を測定した。

3. 伝熱係数について

3.1 伝熱係数の算出方法について

次の仮定をおく。

- (i) 粒子群は、層内で完全混合であり、各粒子の温度は等しい。
- (ii) 空気の流動層内流れは、押し出し流れである。
- (iii) 流動層壁面からの熱損失はない。
- (iv) 粒子は球形であり、全粒子表面積が伝熱に寄与する。
- (v) 層内の嵩密度は均一である。

以上の仮定を基にして、流動層の微小高さ dl についての熱収支をとると、定常状態であるため

$$C_H G A_f dt_g + h_p a (t_g - t_s) dl = 0 \quad \dots\dots(1)$$

$$\text{境界条件 } l=0 \text{ で } t_g = t_{gi} \quad \dots\dots(2)$$

Eq. (1)を(2)の条件で積分すると

$$\ln\{(t_{gi} - t_s)/(t_g - t_s)\} = h_p a l / C_H G A_f \quad \dots\dots(3)$$

$$\text{ただし } a = 6W/d_p \rho_p l_f \quad \dots\dots(4)$$

3.2 前述の仮定の検討

(i) の仮定；流動層においては、粒子はほぼ完全混合であり、また、恒率乾燥期間を利用しているため、各粒子の温度は等しいと考えられる。よってこの仮定は、ほぼ妥当であると考えられる。

(ii) の仮定；流動層内の空気の流れは非常に複雑であるが、大別すると粒子間を通り抜ける空気と、気泡となって層内を通り抜けるものになるとされている。これを押し出し流れと仮定することは、妥当であるとはい

ない。よってこの仮定については、まだ十分検討の余地が残されている。

(iii) の仮定；この仮定の妥当性を調べるために熱収支を検討した。恒率乾燥期間を利用しているため、流入空氣が失った熱量 q_a と水分の蒸発に使用された熱量 q_w とは等しい。なお、 q_a 、 q_w は次式により算出できる。

$$q_a = C_H G A_f (t_{gi} - t_{go}) \quad \dots\dots(5)$$

$$q_w = (-d\omega/d\theta) W \lambda \quad \dots\dots(6)$$

Fig. 6 は、実験により求められた q_a の値と q_w の値とを示す。大多数のデータにおいて両者の差異は7%以内であり、この仮定はほぼ妥当であると考えられる。

(iv) の仮定；ネオビード粒子については球形である。一方、別府白土は非球形粒子であるが、本実験では空気透過法により比表面積を測定し、これより球相当径 d_p を求めているため、球形として取り扱ってもさしつかえないと考えられる。(iv) の仮定の後段である、粒子の全表面積が伝熱面積に等しいとすることについては、問題がある。しかし、有効な伝熱面積の測定法が確立されていない現状では、容量係数 $h_p a$ より h_p と a とを分離するための一手段として、全粒子の表面積が伝熱面積が伝熱面積に等しいと仮定したにすぎない。

(v) の仮定；粒子層は、激しく運動していて、時間的、空間的に変動が多いため、層内の嵩密度を均一とすることには問題がある。しかしこれらの変動を考慮に入れることは、現段階では、不可能であるから層高 l_f を用いて嵩密度の時間的、空間的平均値を算出したことになる。

4. 実験結果および考察

空気の軸方向温度分布を測定した一例を Fig. 7 に示

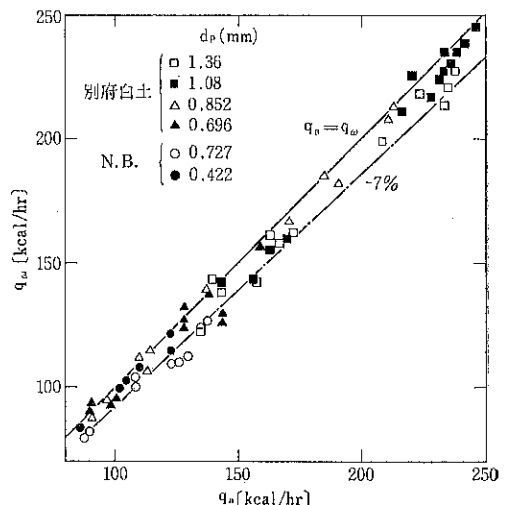


Fig. 6 Heat loss

す。分散板上 1~2 cm の範囲で急激な温度変化がみられ、伝熱の大部分が層入口のわずかな区間で行なわれていることがわかる。この温度変化は、粒径が小さく、空気速度が小さい程急激であるという傾向がみられた。さらに、層上部では、空気温度は変化せず一定であり、この温度は、入口空気の湿球温度にほぼ等しいという結果が得られた。このため、層上部では、粒子-空気間、熱的に平衡に達しているとみなし、この温度を粒子温度 t_s とした。

次に $\ln\{(t_{gi}-t_s)/(t_g-t_s)\}$ と l との関係を Fig. 8 に示す。図中の直線の傾きが、Eq.(3) よりわかるように、 $h_p a / C_H G A_f$ を与える。よって h_p が算出される。この直線は、どの実験においても原点を通る結果は得られなかった。これは、分散板として多孔板を用いたために、分散板直上での粒子-空気間の伝熱機構が、他の領域におけるそれと異なっているのではないかと考えられる。

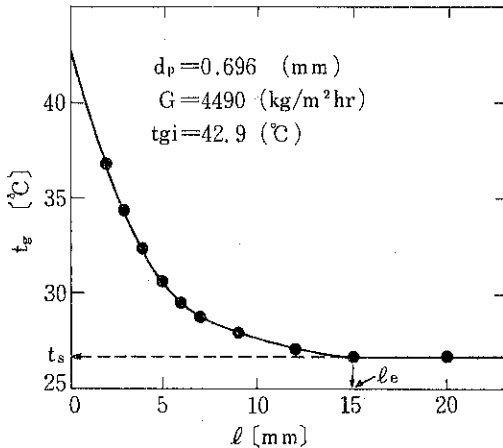


Fig. 7 Gas temperature distribution curve

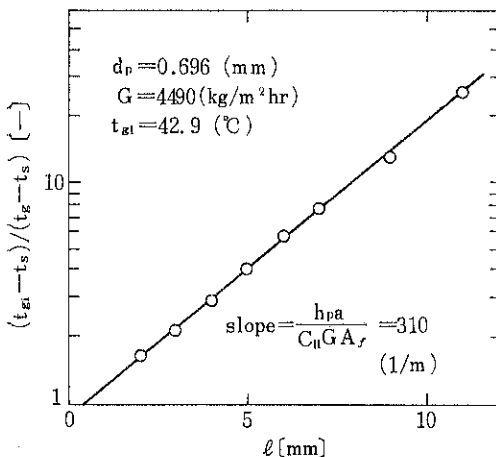


Fig. 8 $\ln\{(t_{gi}-t_s)/(t_g-t_s)\}$ as a function of height above distributor

以上のようにして得られた h_p の整理図を Fig. 9 に示す。図より、次式で示される精度 $\pm 25\%$ の実験整理式が得られる。

$$Nu_p = 0.13 Re_p^{0.9} \quad 30 < Re_p < 200$$

次に既往の結果と比較するために、ガス側を押し出し流れと仮定している結果のみを抽出して、本結果も含めて整理すると Fig. 10²⁾ が得られる。このことは、ガス側は押し出し流れとする仮定がほぼ妥当であることを示しているように思われる。また、 $Re_p = 100$ 付近より急激に Nu_p が低下していることが認められる。これは、前述の仮定 (iv) で粒子の全表面積が伝熱面積に等しい

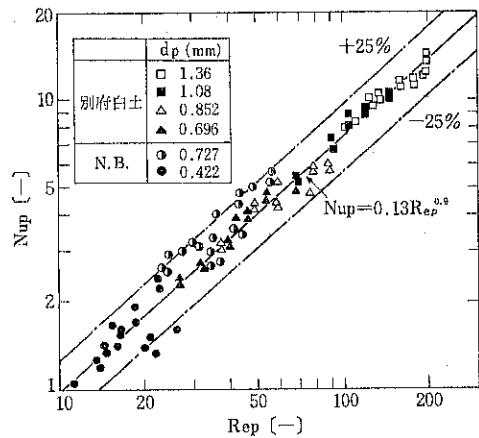


Fig. 9 Correlation for fluid-to-particle heat transfer coefficients (this work)

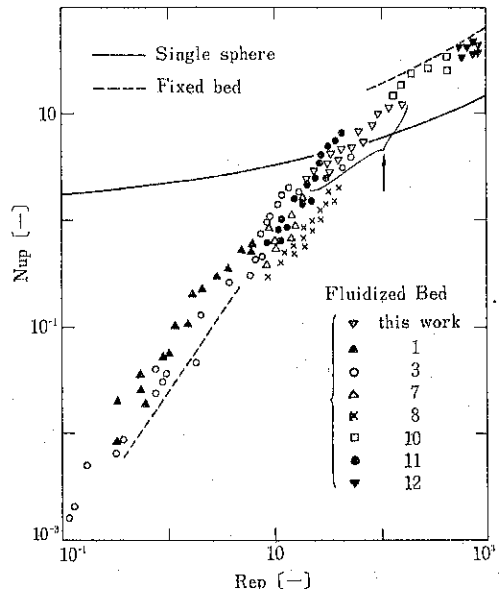


Fig. 10 Correlation for fluid-to-particle heat transfer coefficients

としたことに起因するように考えられる。

結 言

本研究における仮定と測定法には、多少の問題はあるが、本研究では、一応、ガス側を押し出し流れと仮定して、伝熱係数を算出し、下記の結論を得た。

(1) 湿潤粒子の恒率乾燥期間を利用した定常法により、流動層内の粒子—流体間の伝熱係数を測定し、次の実験整理式を得た。

$$Nu_p = 0.13 Re_p^{0.9} \quad 30 < Re_p < 200$$

(2) 精度よく伝熱係数を測定するためには、まだ解決すべき実験上の問題点はあるが、ガス側の流れを押し出し流れと仮定すれば、既往の研究をも含めて、全データを Nu_p と Re_p とで整理できることがわかった。

〔謝 辞〕本研究の実験において、山本晶生氏の御協力をいただいた。ここに記して謝意を表わします。

使用記号*

A_f : 塔断面積	[m ²]
a : 層単位高さ当たりの粒子表面積	[m ² /m]
C_H : 空気の湿り比熱	[kcal/kg°C]
d_p : 粒子径	[m]
G : ガスの質量速度	[kg/m ² hr]
h_p : 伝熱係数	[kcal/m ² hr°C]
k : ガスの熱伝導率	[kcal/mhr°C]
l : 流動層における軸方向高さ	[m]
l_e : 流動層において伝熱が行なわれる粒子層高	[m]
l_f : 流動化時における粒子の層高	[m]
q_a : 流入空気が失った熱量	[kcal/hr]
q_w : 水分蒸発に要する熱量	[kcal/hr]
t_g : 空気温度	[°C]
t_{gi} : 入口空気温度	[°C]
t_{go} : 出口空気温度	[°C]
t_s : 粒子の温度	[°C]
U_{mf} : 流動化開始速度	[m/hr]
W : 粒子保有量 (絶乾重量)	[kg]

ρ_p : 粒子の見掛け密度	[kg/m ³]
ρ_s : 粒子の真密度	[kg/m ³]
ω : 含水率	[kg水/kg乾燥粒子]
θ : 時間	[hr]
λ : 蒸発潜熱	[kcal/kg]
$Re_p = d_p G / \mu$: 粒子レイノルズ数	[—]
$Nu_p = h_p d_p / k$: ヌセルト数	[—]

引 用 文 献

- 1) A. C. Juveland et. al.; *I. E. C. Fund.*, **3**, 329 (1964).
- 2) D. Kunii et al.; "Fluidization Engineering" (1968).
- 3) G. Donnadiue et al.; *Rev. Inst. France du Petrole*, **16**, 1330 (1961).
- 4) J. C. Fritz; Ph. D. thesis, Univ. of Wisconsin (1956).
- 5) J. E. Richardson et. al.; *Trans. Chem. Engrs.*, **37**, 314 (1959).
- 6) J. R. Ferron; Ph.D. thesis, Univ. of Wisconsin (1958).
- 7) J. S. Walton et al.; *Ind. Eng. Chem.*, **44**, 1474 (1952).
- 8) K. N. Kettenring et al. *Chem. Eng. Progr.*, **46**, 139 (1950).
- 9) K. Yoshida; B. S. thesis, Univ. of Tokyo (1961).
- 10) L. J. Petrovic et al.; *J. Chem. Eng.*, **46**, 114 (1968).
- 11) P. M. Heertjes et al.; *Chem. Eng. Sci.*, **5**, 161 (1956).
- 12) R. D. Bradshaw et al.; *AIChEJ.*, **5**, 590 (1963).
- 13) K. Sato, et al.; Preprint of Annual Meeting, (Soc. Chem. Engrs., Japan) (1950).
- 14) W. W. Wamsley et al.; *Chem. Eng. Progr.*, **50**, 347 (1954).
- 15) T. M. Chang et al.; *Chem. Eng. Progr., Symposium Series*, No. 67, **62**, 111 (1966).

* 本文中、単位系が異なるものは、その旨明記した。

粉体の壁面付着強度について

Adhesive Strength of Powder on A Plane Wall

篠原 邦夫*

花崎 芳朗**

Kunio Shinohara

Yoshiro Hanasaki

Abstract

By means of our tensile-test device in the vertical direction, adhesive strength is directly measured of powder on a plane wall, and the effects are examined of properties of wall and particles.

It is found that higher roughness and wetting ability of wall surface as well as decrease in voidage and increase in moisture of powder result in larger strength.

The breakage mechanism is quite similar to that of powder mass itself, that is, the ultimate strength is governed by adhesive and cohesive force in the closest packing portion of the mass. It is supported by observation of residual particles on the surface after breakage besides remarkable change in strength with voidage. The adhesive force calculated from the strength could, therefore, be regarded as an overall physical property.

著者 摘 録

粉体層の壁面付着強度を垂直方向での直接引張り試験により測定し、粒子物性のみならず壁面性状の強度に及ぼす効果を検討した。その結果、空隙率の減少、含水率の増加によって付着強度が増大し、粗度が大きく濡れやすい材質の壁面ほど壁面付着強度が大きくなることがわかった。

破壊の機構は、付着強度の空隙率による大きな変化や単一層程度の粒子が壁面のところどころに残留することから、粉体層の凝集強度と同様に、最密粒子充填部分の強度が最終的に測定されると考えられる。その際、破断面では粒子—壁面間のみならず粒子間の付着力も作用している。したがって、その付着力は粒子と壁面の性質により決まり、総合的な物性値として取扱えた。

1. 緒 言

粉体の付着、凝集性は、貯蔵、供給、輸送、混合などの流動現象のみならず、分級、集塵、粉碎、造粒など粉体のあらゆる単位操作に関与する基本的特性である。

一般に微粉ほど付着、凝集性が著しいと言われているが、これは微粉の比表面積が大きく、着目部分での粒子間接触点数が多いためである。これとは別に、粒子の置かれている場や粒子物性などで粒子間あるいは粒子—壁面間の付着、凝集力が異なる。例えば、高圧下で圧密成型された粉体塊では粒子間距離が約 100Å 以内になると分子間力が働き、壁面や粒子間の摩擦が激しいと静電気力を生じる。また化学反応や溶融、再結晶などで粒子間に強力な結合力を生じる場合もある。しかし通常では、単位操作中や大気中からの水分が粒子表面に付着ないしは吸着して、水の表面張力と負圧による毛管力を生じやすい（溶出や温度による表面張力の変化も含む）。

* 北海道大学工学部 合成化学工学科
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)
Tel 011-711-2111 (内) 6593

**安川電気製作所
(〒806 北九州市八幡区藤田2346)
Tel 093-621-0481

このような付着、凝集性を定量的に評価するには、大まかに3種類の方法が以前から採用されている。すなわち秤量法や振子法、傾斜板法、遠心法^{1),2)}のように単一粒子について粒子間あるいは粒子—壁面間の分離力を直接測定する方法と、粉体層の剪断試験³⁾や引張り試験^{4),5)}によって測定された破壊強度としてあるいはそれから粒子間付着力を算出する方法、さらに分散法、流動度法、噴流法、タッピング法、流動層法、回転粘度計法、安息角法など間接的に付着、凝集性の度合を測定する方法がある。

これらの測定法によって、実際に例えば空気輸送管や噴霧乾燥塔の内壁に付着する粒子の分離力や強度を推定するには、粒子間や粒子—壁面間の付着力の種類のみならず、個々の粒子の壁面への付着生成過程や周囲の状況(温度、湿度、風速など)を定量的に把握しておく必要がある。それによって、最も適当な測定法と測定条件を選定することができるはずである。

粒子—壁面間の単一粒子の付着力やその分布を、多数の粒子について迅速に測定し統計的に処理できる点では遠心法が優れているが、粒子が壁面に多層にわたって付着、成長している時には、単一粒子の付着力の結果から実際の剝離現象を直接説明することは難しい。また直接剪断試験を行ないクーロンの式で粘着力を求めても、摩擦力が含まれており⁶⁾、壁面付着強度の測定法としては単純な破壊機構とは言い難い。それらの点で、直接引張り試験法は壁面付着強度の測定に適している。

そこで本研究では、筆者らの考案した天秤による垂直方向の引張り試験機で⁷⁾、成型粉体層の壁面付着強度を直接測定し、試料の含水率や粒子径、壁面の材質、粗度などの付着性に及ぼす効果を検討した。なお本試験機は、種々の雰囲気や温度(壁面や雰囲気)でも測定できるが⁸⁾、ここでは大気中における常温での測定にとどめる。

2. 基礎的考察

粉体層と壁面との付着強度は、破断面がどこに生じるかによって二通り考えられる。一つの考え方は、壁面と接触している粒子しか破断に関与しない場合で、粒子表面が比較的滑めらかな時には各粒子の壁面との接触点数は通常1ヶと考えられ、付着強度は壁面と接触している粒子の数に正比例する。別の考え方は、破断面が必ずしも第1層目の粒子と壁面間だけではなく、壁面近傍の粉体層内にも入り込んでいる場合である。いずれにしても、付着、凝集強度の最も小さなおとこに破断面を生じるであろうから、付着性は粒子あるいは壁面間の付着力や粉体層の充填ムラに大いに依存する⁹⁾。そこで実験に

先立ち、壁面付近での粉体層の充填構造と壁面付着強度の関係について、筆者らの考えを簡単に述べておく。

2.1 粉体層の充填構造

壁面付近の粉体層は、粒子の付着、成長過程によってその堆積ないしは充填構造が異なり、個々の粒子間や粒子—壁面間の付着力の大きさにも分布がある²⁾と考えられる。一般に粉体層の構造を巨視的に表現するパラメータとして空隙率 ϵ がしばしば用いられるが、着目する単位断面あるいは単位容積を小さくしてゆくと当然 ϵ 分布を生じる¹⁰⁾。したがって場所により粒子数と配位数が異なり、粒子間あるいは壁面間の接触点数にムラができる。また粒子径や粒子形状、壁面の材質や粗度によって、 ϵ 分布も異なるであろうが、特に粒子—壁面間の付着力は大きな影響を受けると考えられる²⁾。

そこで、壁面付近の粉体層の充填状態も筆者らの不均一充填モデル^{8),9)}によって一般的に表現すると、それはFig. 1のように最密充填部分 R_r と最疎充填部分 R_c の粒子充填部分と有効空隙部分 ϵ_e との混合状態として、それぞれ空隙率 ϵ により次式のように表現することができる。

$$R_c = \frac{\{e^{\alpha(\epsilon-0.26)} - 1\} \cdot (1-\epsilon)}{0.524\{e^{\alpha(\epsilon-0.26)} - 1\} + 0.740(\alpha/\beta)} \quad \dots\dots(1)$$

$$R_r = \frac{(\alpha/\beta) \cdot (1-\epsilon)}{0.524\{e^{\alpha(\epsilon-0.26)} - 1\} + 0.740(\alpha/\beta)} \quad \dots\dots(2)$$

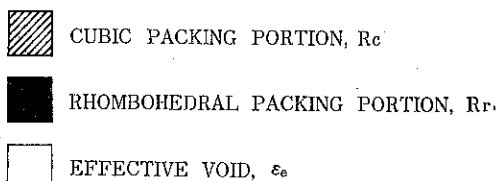
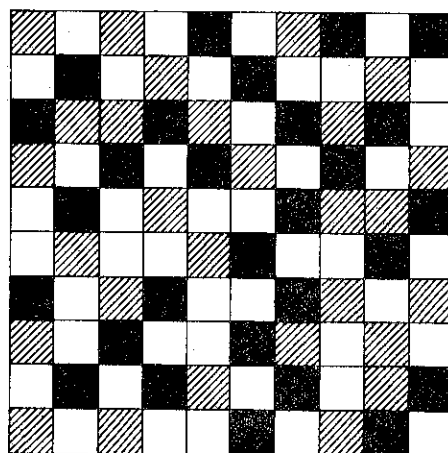


Fig. 1 Non-uniform packing model of powder mass

$$\varepsilon_e = \frac{(\varepsilon - 0.476) \{e^{\alpha(\varepsilon - 0.26)} - 1\} + (\varepsilon - 0.260)(\alpha/\beta)}{0.524 \{e^{\alpha(\varepsilon - 0.26)} - 1\} + 0.740(\alpha/\beta)} \quad \dots\dots(3)$$

2.2 壁面付着強度

粉体層と壁面間の引張り付着強度 C_T は、前述の充填モデルをもとに、一般に次式のように表現することができる。

$$C_T = \left\{ \frac{R_c(1 - 0.476) \cdot d_p \times N_c +}{(\pi d_p^3/6)} \right. \\ \left. \frac{R_r(1 - 0.260) \cdot (d_p/\sqrt{2}) \times N_r}{(\pi d_p^3/6)} \right\} H \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 N_c と N_r はそれぞれ各粒子充填部分における粒子の破断に關与する接触点数で、 H は粒子間あるいは粒子—壁面間の付着力である。もし粒子と壁面間の付着力 H_w が、粒子間のそれ H_p に比較して十分に小さく、破断が粒子—壁面間のみで起きる時には、 $N_c = N_r = 1$ で $H = H_w$ である。しかし後述のように、 C_T の実験結果が ε による粒子数の変化よりも一段と大きいことから、 H_p や H_w が通常の低圧密下では ε に無関係にほとんど変化しないとすれば、測定された壁面での最終引張り強度は、少なくとも粉体層の第1層目に食い込んだ破断面に基因していると考えられる。そこで H_p と H_w の数値が例え違っても、粒子と壁面の種類が決まると、正方形菱面格子充填部分の各粒子の破断に關与する接触点（粉体層中では $N_r = 4$ ）のうち壁面と接する点の割合は ε によらずほぼ一定であると仮定して、壁面付着強度 C_T は粉体層の引張り強度と同様に、最密充填部分の強度のみが最終的には測定されているとして、近似的に次式が成立する。

$$C_T = \frac{H(1 - \varepsilon)}{\phi d_p^2} \times \frac{2.96\alpha}{0.524\beta \{e^{\alpha(\varepsilon - 0.26)} - 1\} + 0.740\alpha} \quad \dots\dots(5)$$

ただし $\phi = \pi\sqrt{2}/6$ である。なお H の内容については、後述の考察のところで再び論ずる。

3. 実 験

3.1 装置と方法

壁面付着強度 C_T を測定するために、Fig. 2 に示す筆者らの直接引張り試験機を用いた。壁面は、Fig. 3 に示す下方のピストン5を種々の材質や粗度で製作し、取換えて実験した。

測定の手順を大まかに述べると、まずピストン5を天秤の台座に固定し、シリンダー4をネジ込んで両者の上表面が同じ高さで滑らかになるようにする。シリンダー2と4を接続しリング3で固定した後、2の上部から試

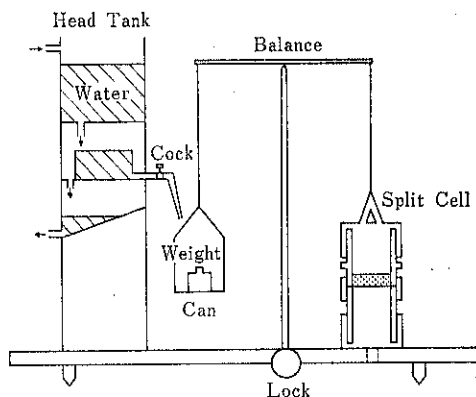


Fig. 2 Device for measuring adhesive strength of powder by tensile breakage

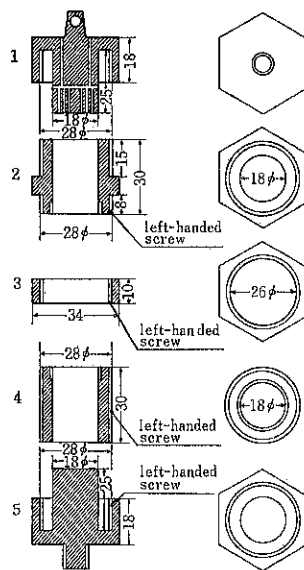


Fig. 3 Details of split cells of the device

料を注入し粉体表面を平らにする。シリンダー2を手で固定してピストン1を12回転し、粉体層を圧縮成型して下部ピストン5の壁面に付着させる。シリンダー2を動かさないよう手で下方へ押えながら、リング3をネジってシリンダー4に移す。次に、Fig. 1の天秤で左方の缶内に水を一定流量で供給して、シリンダー2と4（ピストン5と一体）が上下に完全に分離するまでの時間を測定する。

その結果、分離に要する正味の荷重を破断面積（ピストン5の断面積）で除して壁面付着強度 C_T とした。その際、破断面付近の空隙率（ピストン1でネジリながら上方から圧縮しているので壁面付近の空隙率が最も大きく、したがって破断面も壁面付近に生じるようになっ

Table 1 Material Properties of Powder and Wall

Powder Sample	Moist. Cont. (vol %)	α (-)	$H/\phi d_p^2$ (G/cm ²)	Wall (roughness)	Particle Properties		
					Size (μ)	Density (g/cc)	Shape
G. B.	1.56	56	12.0	Acrylate	76***	2.52	spherical
	2.58	38	4.9				
	4.77	31	6.5				
	10.44	28	8.2				
W. A. #700	3.5	32	21.5	Acrylate	24* 4.5**	3.90	angular
	4.8	30	8.8				
	6.2	26	14.5				
	10.9	22	10.0				
W. A. #700	4.7	23	14.5	Brass (rough) (medium) (smooth)	24* 4.5**	3.90	angular
	4.7	22	10.1				
	4.7	19	7.0				
W. A. #700	4.7	19	7.8	Aluminium	24* 4.5**	3.90	angular
	4.7	19	5.0	Acrylate			
W. A. #700	6.2	26	14.5	Acrylate	24* 4.5**	3.90	angular
	#800	26	17.0				
	#1000	28	21.0				
	#1500	30	15.0				

G.B.; Glass Beads, W.A.; White Alundum,

$\beta=0.1$

* by hydrometer, ** by permeametry, *** by sieving

ている)をより正確に知るため、厚さ1mmの3枚のリングを用意し、同様に5mmの厚さに試料を圧密の後、壁面に接するリング内の試料を秤量して破断に与する空隙率とした。なお本試験装置および実験方法の詳細については、前報⁷⁾にゆずる。

3.2 試料と壁面

粉体試料としては、球形で吸湿性のないガラスビーズ(東芝製)と角ばったホワイトアラウンド(粉体工学研究会標準試料)を用いた。参考までに、それぞれの試料の平均粒子径と粒子密度を Table 1 に示してある。試料は、湿量基準の体積百分率で含水率を数種類変えて調製した。なお空隙率は、試料の採取重量により任意に変化させることができる。

粉体の付着する壁面の性状として、材質はアルミニウム、黄銅、アクリルの3種でピストン5の円柱部分を製作し、粗度は黄銅製ピストンの表面を粗さの異なる3種のグラインダーで研磨し適当に凹凸をつけた。削り傷の深さや幅などは詳細に数値で表現できないので、単にその度合を大、中、小で示してある。

3.3 結果と計算

まず含水率を変えて、空隙率 ϵ に対する壁面付着強度 C_T の変化をガラスビーズとホワイトアラウンドについて示したのが、Fig.4 と Fig.5 である。次に同一の壁面材料(黄銅)について、付着強度に及ぼす粗度の効果

を調べた結果が、Fig.6 に示してある。また壁面材質の違いによる強度の変化を Fig.7 に示す。Fig.8 は、参考までに平均粒子径の C_T vs ϵ 関係に及ぼす効果を調

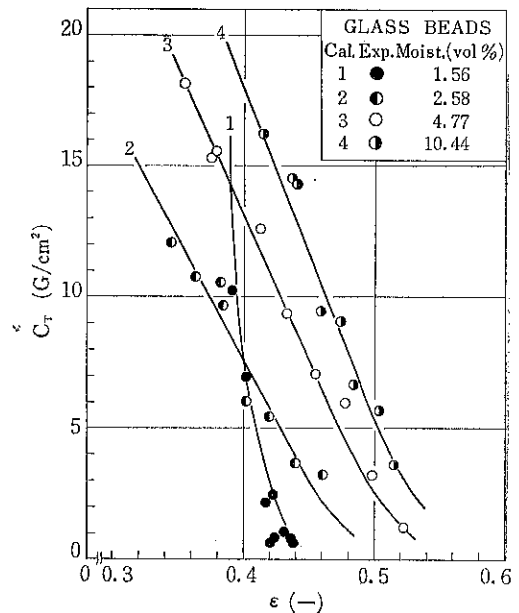


Fig. 4 Variation of adhesive strength with void fraction for glass beads of different moisture content

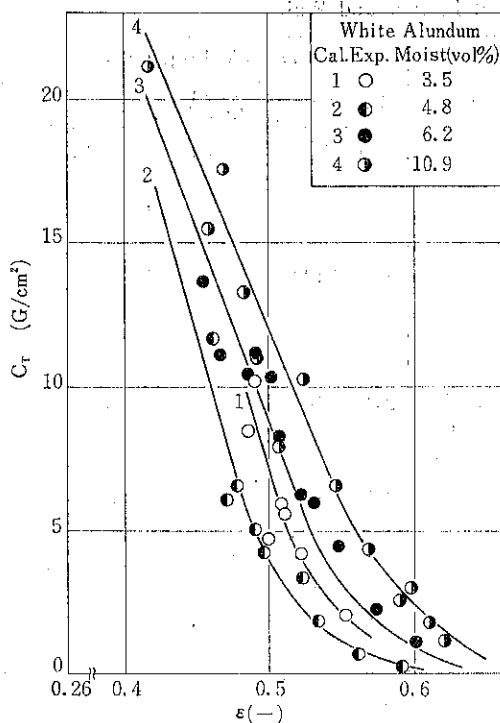


Fig. 5 Variation of adhesive strength with void fraction for White Alundum of different moisture content

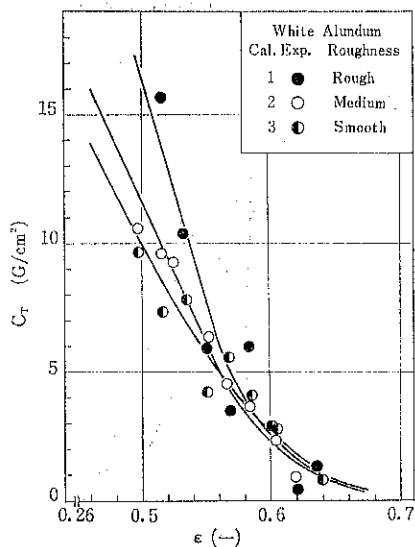


Fig. 6 Effect of wall roughness on adhesive strength with White Alundum

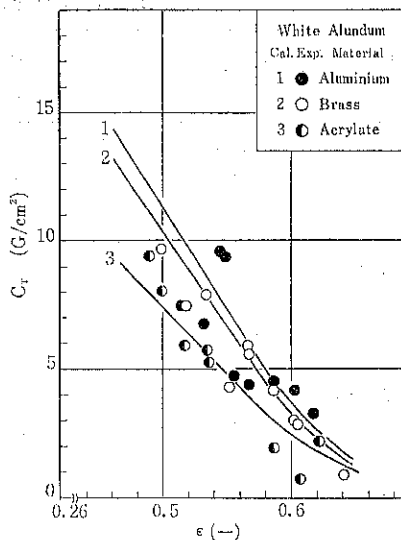


Fig. 7 Effect of wall material on adhesive strength with White Alundum

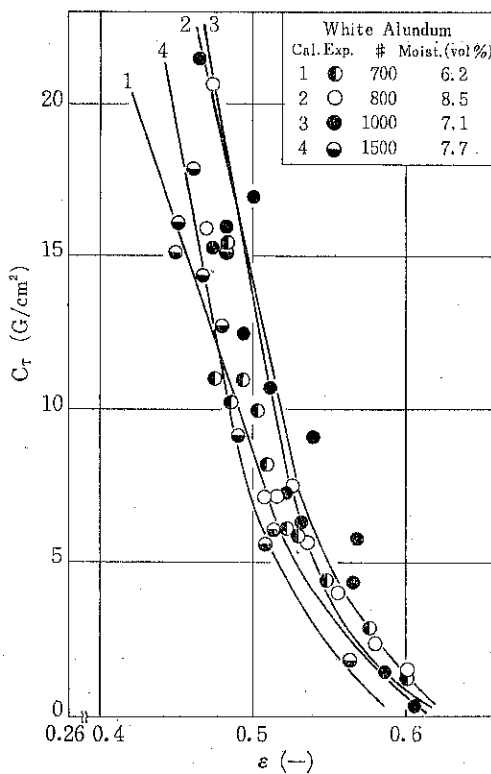


Fig. 8 Effect of particle size on adhesive strength with White Alundum

べたものである。

これらの図には、いずれも計算曲線が描かれているが、これらは前述の(5)式をもとに、例えば Fig. 9 や

Fig. 10 に示すように $C_r / (1 - \epsilon)$ の実験値を縦軸に計算値を横軸にとって、両対数紙上でほぼ 45° の直線にな

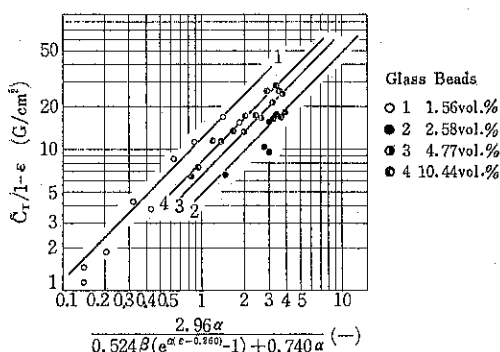


Fig. 9 Log-Log plots to determine α and β for glass beads

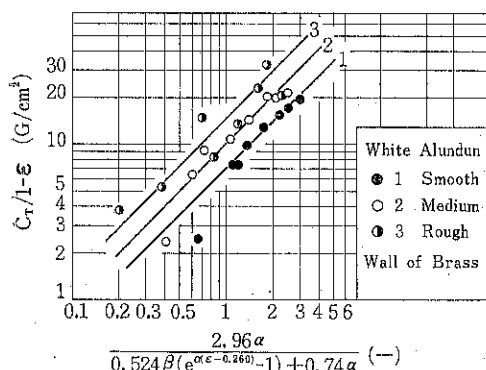


Fig. 10 Log-Log plots to determine α and β for White Alundum

る α の値を採用して描いたものである。また Figs. 9や10で、横軸の値が1の所の $C_T/(1-\epsilon)$ が $H/\phi d_p^2$ の値を与えるから、粒子間あるいは粒子—壁面間の付着力 H を算出することも可能である。Table 1に、得られた数値を示す。

4. 考 察

まず Fig. 4からFig. 8までの C_T vs ϵ 曲線では、いずれもわずかな空隙率の減少によって壁面付着強度が急激に増大しており、この変化の大きさは単位断面積内の粒子数や配位数の増加だけでは到底記述できないことがわかる。したがって H が ϵ によってあまり変化しないとすれば、(5式)のような不均一充填構造に基因する強度であると考えざるを得ない。

含水率の増加によって明らかに付着強度は増大するが、Figs. 4, 5で気付くように、低含水率では異常に大きな強度を示している。これは、ネジリ圧縮の際の粒子とアクリル壁面間の摩擦による静電気力のためであるうか。

壁面粗度は大きい程、Fig. 6に示すように付着強度が増大する傾向にある。これは、壁面の材質が同一の黄銅であるから、粒子—壁面間の付着力がほとんど同じであるとすれば、 α の値がTable 1に示すように粗度とともにやや大きくなっていることから壁面近傍の粉体層の充填構造変化そのものに起因するのか、それともその結果破断面の形状が変化し有効な接触面積が増大したためか、あるいは壁面の傷の幅や深さが大きくなるにつれ各粒子との付着力が増大したためか、この実験結果だけでは判断しかねる。

壁面の材質に関しては、Table 1に示すように、 α の値はほぼ同じで粉体層の充填構造変化に及ぼす効果は同じ位だが、粒子—壁面間の付着力は壁面の濡れ特性によって異なるようである。Fig. 7に見られるように、比較的疎水性と思われるアクリルは、金属の黄銅やアルミニウムに比較して付着力が小さめになっている。

粒子径やその分布特性は、粉体層の充填構造のみならず粒子間や粒子—壁面間の付着力に直接関与していると考えられるが¹¹⁻¹³⁾、Fig. 8では、含水率のバラツキのためか、それともホワイトアランダムのかげった粒子形状のためか、あるいは粒度分布のためか、壁面付着強度に顕著な差や一定の傾向が認められなかった。

以上の諸因子はいずれも粉体層の充填構造に関連し、そのパラメータである α は、粒子や壁面の物性、含水率などによって異なるが、 β はほぼ0.1に固定できた。また最密粒子充填部分のみに着目して壁面付着強度の空隙率による大きな変化を記述できたことは、粉体層内での引張り付着強度とかなり類似の破壊機構が壁面上にも適用できると考えられる。実際に破断後の壁面をよく観察すると、ほぼ単一粒子層程度の粒子が壁面のところどころに付着、残留しており、破断面が必ずしも滑らかでなく、壁面極近傍の粉体層内にも入り込んでいることが認められる。

その際、2の基本的考察でも言及したように、粒子間の付着力 H_p と粒子—壁面間のそれ H_w に大きな差がある時は、粉体層内の第1層目と第2層目の間($H_w \gg H_p$ の時)あるいは第1層目の粒子と壁面間($H_w \ll H_p$ の時)に破断面を生じるであろうことは容易に推察されるが、一般に H_w と H_p の差があまり大きくない時は、壁面も粒子層内と同様に破壊面の一部を形成していると考ええる。したがって最終付着強度を与える最密粒子充填部分の各粒子の4ヶの接触点のうち、統計的に何点かが直接壁面と接触して H_w で、残りの接点は H_p であり、それらの平均的な値 H は、粒子物性(粒度分布、粒子形状、吸湿性など)と壁面物性(粗度、材質ないしは濡れ特性など)および雰囲気(含水率、温度など)によ

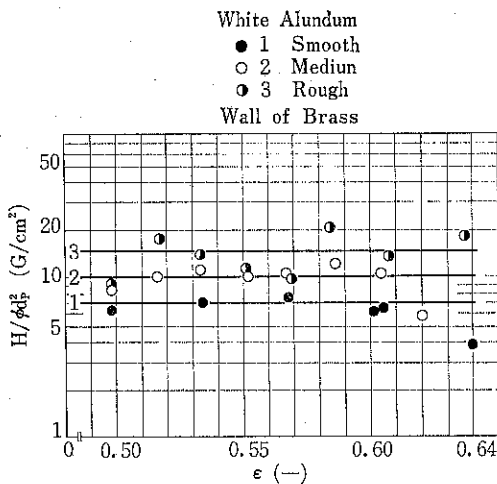


Fig. 11 Relationship between adhesive force and voidage for different wall roughness with White Alundum

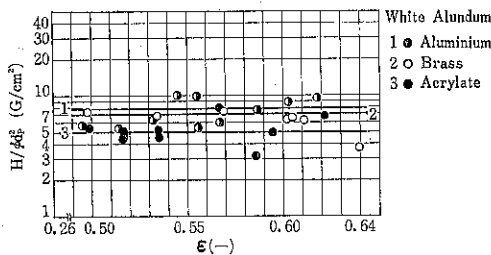


Fig. 12 Relationship between adhesive force and voidage for different wall material with White Alundum

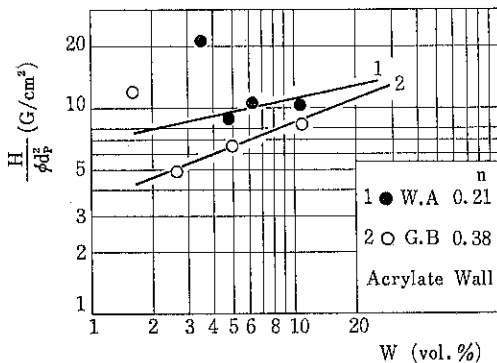


Fig. 13 Variation of adhesive force with moisture content

って決まり、空隙率のような操作条件によって変化しないあたかも複合的な“物性値”と考える。なぜならば、上記の基本因子は未だ数値で評価できないものが多いか

らである。

そこで、Figs. 9, 10 のようにして得られた付着力の値 $H/\phi d_p^2$ を空隙率 ϵ に対してプロットしてみると、Figs. 11, 12 のように ϵ に無関係にほぼ一定値になっていることがわかる。

この平均的なしは総括的な付着力 H も、粒子間のそれと同様に体積基準の含水率 W の関数として(6)式で表わされるとすれば⁹⁾、Fig. 13 に示すように $H/\phi d_p^2$ vs W を両対数紙に描いて、含水率のべきの値 n と粒子の形状の効果 ϕ'' を実験的に求めることができる。

$$H = \phi' d_p T W^n \quad \dots\dots(6)$$

したがって

$$\frac{H}{\frac{\pi}{6} \sqrt{2} d_p^2} = \frac{T W^n}{\phi'' d_p} \quad \dots\dots(7)$$

ただし

$$\phi'' = 6\phi'/\pi\sqrt{2} \quad \dots\dots(8)$$

5. 結 言

粉体の付着、凝集特性の一つとして工業的にも重要な粉体層の壁面付着強度を、直接引張り試験法によって測定し、粒子と壁面の種々の因子の効果を実験的に検討した。その結果、壁面付着強度は一般的に粉体層の引張り凝集強度とほぼ同じ挙動を示すことがわかった。これは、壁面の極近傍の粒子層が壁面と共に破断面を形成するためである。したがって粉体層の引張凝集強度と同様に、不均一充填モデルに基づき最密充填部分の強度として最終強度が記述できた。壁面の粗度や材質も粒子径や粒子形状、含水率などと同様に、充填構造のパラメータ α と総括的な付着力 H によって定量的に評価することができた。特に壁面の性状や粒子形状などは、現時点では数値で表現できないし、圧密圧などの操作条件によって変化しないので、粒子と壁面が与えられた時には、物性値のように取り扱っても工学的には差し支えないと考える。

なお本装置は⁷⁾、実際によく見られるような種々の壁面温度や雰囲気でも付着特性が測定できるので⁸⁾、さらに広範な粉体の付着、凝集現象の解明に役立つものと期待される。

記 号

C_T : 粉体層と壁面間の引張り付着強度 [G/cm²]

d_p : 平均粒子径 [cm]

H : 粒子間および粒子—壁面間の総括的な付着力 [G]

H_p : 粒子間接触点における付着力 [G]

H_w : 粒子一壁面間の接触点における付着力	[G]
N_c : 立方格子充填部分の各粒子の破断に関する接触点数	[-]
N_r : 菱面格子充填部分の各粒子の破断に関する接触点数	[-]
n : 体積含水率 W のべき数	[-]
R_c : 粉体層単位断面における最疎粒子充填部分の割合	[-]
R_r : 粉体層単位断面における最密粒子充填部分の割合	[-]
T : 水の表面張力	[G/cm]
W : 粉体の体積基準の含水率	[vol%]
α, β : 不均一充填モデルのパラメータ	[-]
ϵ : 粉体層の空隙率	[-]
ϵ_0 : 粉体層の不均一充填モデルにおける有効空隙率	[-]
ϕ : 正方型菱面格子充填部分における粒子の形状係数で $\frac{\pi}{6}\sqrt{2}$	[-]
ϕ' : 粒子間または粒子一壁面間の付着力に及ぼす粒子形状の効果を表わす因子	[-]
ϕ'' : 粉体層の付着性に関与する粒子の形状係数	

$$\text{で } 6\phi'/\pi\sqrt{2} \quad [-]$$

引用文献

- 1) G. Boehme, H. Krupp, H. Rabenhart and G. Sandstedt : Trans. Instn. Chem. Engrs., **40**, 252 (1962).
- 2) 浅川, 神保 : 材料, **16**, 358 (1967).
- 3) 荒川, 岡田, 水渡 : 材料, **15**, 151 (1966).
- 4) 神保, 浅川, 菅我 : 材料, **17**, 540 (1968).
- 5) 青木, 綱川 : 材料, **18**, 497 (1969).
- 6) 篠原, 田中 : 化学工学, **32**, 88 (1968).
- 7) K. Shinohara and T. Tanaka : J. Chem. Eng. Japan, **8**, 46 (1975).
- 8) 竹田, 半田, 林 : 粉体工学研究会昭和48年度秋季例会講演要旨集, 33 (1973).
- 9) K. Shinohara and T. Tanaka : J. Chem. Eng. Japan, **8**, 50 (1975).
- 10) 山崎, 神保 : 化学工学, **38**, 299 (1974).
- 11) W. Pietsch and H. Rumpf : Chemie-Ing.-Techn., **39**, 885 (1967).
- 12) 井伊谷, 村元 : 材料, **16**, 352 (1967).
- 13) 綱川, 青木 : 化学工学, **36**, 281 (1972).

(48頁のつづき)

- 120) 矢野武夫, 寺下敬次郎, 山崎利夫 : 粉体工学研究会誌, **9**, 83 (1972).
- 121) 矢野武夫, 新井親夫, 佐藤宗武 : 同誌, **9**, 9 (1972).
- 122) 矢野武夫, 佐藤宗武 : 同誌, **9**, 234 (1972).
- 123) 矢野武夫, 佐藤宗武, 峯下 豊 : 同誌, **9**, 244 (1972).
- 124) 矢野武夫, 佐納良樹, 新井親夫, 佐藤宗武, 丸田節雄 : 同誌, **9**, 299 (1972).
- 125) Yano, T. : 同誌, **9**, 秋季臨時号, 88 (1972).
- 126) 矢野武夫, 佐藤宗武 : 粉砕, No. 17, 10 (1972).
- 127) 矢野武夫, 寺下敬次郎, 武者孝雄 : 同誌, No. 17, 22 (1972).
- 128) 矢野武夫, 佐藤宗武 : 化学工学協会岡山大会前刷, A-205 (1972).
- 129) 矢野武夫, 寺下敬次郎 : 粉砕, No. 18, 14 (1973).
- 130) 矢野武夫, 佐藤宗武, 峯下 豊, 山本義隆 : 粉体工学研究会誌, **11**, 67 (1974).
- 131) 矢野武夫, 佐藤宗武, 山本義隆 : 同誌, **11**, 76 (1974).
- 132) 矢野武夫, 寺下敬次郎 : 同誌, **11**, 392 (1974).
- 133) 矢野武夫, 荒谷敏朗, 寺下敬次郎, 智福博行 : 粉砕, No. 19, 42 (1974).
- 134) 矢野武夫, 佐藤宗武, 石井和広 : 化学工学協会北陸大会前刷, B-208 (1974).
- 135) 矢野武夫, 寺下敬次郎, 橋本正雄 : 化学工学協会第40年会前刷, D-109, 名古屋 (1975).
- 136) 遊佐美津雄 : 粉体工学研究会誌, **6**, 164 (1969).
- 137) 梅屋 薫, 鈴木嘉弘, 相島悠二 : 化学工学, **28**, 682 (1964).
- 138) 横山藤平, 浦山 清, 北村 隆 : 粉砕, No. 18, 66 (1973).

単粒子破碎に及ぼす媒液の双極子モーメント ならびに金属蒸着膜の影響について

Effect of Dipole Moment of Liquids and Evaporated Metals on Single Particle Crushing

八嶋 三郎* 斎藤 文良*
Saburō Yashima Fumio Saitō

Abstract

An experimental study of environmental effects of various liquids and evaporated metals on single particle crushing under slow rate of loading was carried out by using spherical specimens made of three kinds of glassy material and made of six kinds of mineral. The nominal diameter of the specimens was 2.0cm and the rate of loading was 0.3 ton/min for all of the specimens.

Experimental results are summarized as follows :

- 1) In the mineral specimens, compressive strength and specific fracture energy and new surface produced decreased with the increase of dipole moments of medium liquids, on the contrary, in the glassy material specimens, these increased with the increase of dipole moments of the medium liquids.
- 2) Fracture surface energy was independent of dipole moments of the medium liquids.
- 3) When the metals (Au, Al and Pb) were evaporated on the surface of specimens, the magnitudes of compressive strength and specific fracture energy increased with the increase of surface energy of the metals.
- 4) In the glassy material specimens, quartz specimen and feldspar specimen, compressive strength and specific fracture energy obtained from non-evaporated specimens tended to be larger than those of the evaporated specimens, on the contrary, in limestone, marble and talc, these tended to be smaller than those of the evaporated specimens.
- 5) Furthermore, it was found that specific fracture energy was proportional to 5/3-power of the compressive strength irrespective of the kinds of sample, environmental medium liquid and evaporated metal.

著者 摘 録

本報告は、ガラス質試料3種類および天然産試料6種類の球形試験片を用いて常速荷重下で単粒子破碎実験を行ない、試験片の周囲の媒体あるいは蒸着金属の破碎性に及ぼす影響について検討したものである。試験片の公称直径は2.0cmであり、荷重速度は0.3ton/minである。

* 東北大学選鉱製錬研究所
(〒980 仙台市片平2丁目1-1)
Tel (0222)27-6200 内線 2804

その結果

- 1) 天然産岩石試料では双極子モーメントの増大とともに球圧壊強度、破碎エネルギーおよび増加比表面積は減少し、逆にガラス質試料では増大する傾向にあった。
- 2) 破碎表面エネルギーの双極子モーメントによる影響は顕著には認められなかった。
- 3) 蒸着金属の表面エネルギーが大きいほど、球圧壊強度、破碎エネルギーも大きくなる傾向が認められた。
- 4) 空気中での球圧壊強度および破碎エネルギーに対して、ガラス質試料、ケイ石、チョウ石では小さい値を示し、逆に石灰石、大理石、カツ石では大きい値になる傾向が認められた。
- 5) 試料の種類、試験片を囲む雰囲気あるいは表面状態を異にしても、破碎エネルギーは球圧壊強度の5/3乗に比例するという理論的關係が成立することが認められた。

1. 緒 言

一般に固体の破壊強度は、雰囲気や媒質の種類に依存することが知られており、この媒質による効果をRehbinder効果¹⁾と称している。これまでRehbinder効果はガラス、金属、多孔質物質などの機械的、物理的性質について検討されてきている。この強度の媒液中での低下現象に対する一般的な説明は、極性物質の固体表面への物理吸着による表面エネルギーの低下によるものとされている。著者らは各種ぜい性材料の単一球形試験片について、真空中 (10^{-5} mmHg)、空気中、水中と雰囲気を変えた場合に、破碎性に及ぼす水分の影響について検討してきた²⁾。本報告は各種のぜい性材料の球形試験片を、双極子モーメントの異なる種々の有機液体中で破碎し、媒液の双極子モーメントの破碎性に及ぼす影響について検討したものである。また球形試験片の表面に金属を蒸着し、試験片の表面状態をコントロールした場合の破碎実験も行ない、破碎に及ぼす金属蒸着膜の影響をも検討した。

2. 試料と試験片

実験に使用した試料は、セキエイガラス、ホウケイ酸ガラス、ソーダガラス、ケイ石、チョウ石、石灰石、大理石、石コウ、カツ石の合計9種類である。ガラス質の球形試験片は整形後、焼きなましてひずみを除去したものを使用し、そのほかの天然産岩石試料の試験片は実験室で球形に整形して使用した。試験片の公称直径は2.0 cmであり、各試料の性質をTable 1に掲げた。これらの天然産試料の試験片の作製方法と仕上げ精度(表面のあらさ)、寸法精度などについては既報^{3), 4)}に詳しいので省略する。なお実験に使用した試験片の個数は後のTables 4, 5に掲げた。

3. 実験装置および実験方法

実験には材料試験機を用い、試験片の変位は差動トランスによって検出し、X-Yレコーダに荷重-変位曲線として記録させた。荷重速度は0.3 ton/minの一定とし、常速荷重下で実験を行なった。有機液体中の破碎実験にはn-ヘキサン、ベンゼン、クロロホルム、エチルアルコール、アセトン、ニトロベンゼンの6種類を使用した。Table 2には、これらの有機液体の性質^{5), 6)}を掲げた。なお各種有機液体には1級試薬を使用した。実

Table 1 Properties of samples

Kinds of sample	Density ρ [g/cm ³]	Moh's hardness H [—]	Work index W _i [kWh/ton]	Young's modulus Y ₁ [Kg/cm ²]	Poisson's ratio ν_1 [—]
Silica glass	2.20	6.5	14.8	7.50×10^5	0.16
Borosilica glass	2.33	6.5	15.2	6.24×10^5	0.21
Soda glass	2.4 ~ 2.8	5 ~ 6	—	$5 \sim 8 \times 10^5$	—
Quartz	2.62	6.5	13.3	8.89×10^5	0.16
Feldspar	2.55	6.0	12.4	5.99×10^5	0.26
Limestone	2.70	4.0	9.40	6.94×10^5	0.32
Marble	2.70	3.0	6.90	5.45×10^5	0.30
Gypsum	2.30	2.0	6.30	3.86×10^5	0.32
Talc	2.78	1.0	11.8	1.53×10^5	0.33

Table 2 Properties of organic liquids

Organic liquids	Molecular formula	Molecular weight [—]	Dipole moment D [debye]	Surface tension σ [ergs/cm ²]	Boiling point T _b [°C]	Molecular diameter [Å]
n-Hexane	C ₆ H ₁₄	86.2	0	18.4	68.8	5.23
Benzene	C ₆ H ₆	78.1	0	28.9	80.1	4.71
Chloroform	CHCl ₃	119.4	1.2	27.2	61.2	4.70
Ethyl alcohol	C ₂ H ₅ OH	46.1	1.7	22.6	78.3	4.20
Acetone	CH ₃ COCH ₃	58.1	2.9	23.3	56.2	4.28
Nitrobenzene	C ₆ H ₅ NO ₂	123.1	4.2	43.6	210.9	5.00

Table 3 Properties of metals

Kinds of metal	Specific gravity [—]	Melting point t [°C]	Tensile strength S [Kg/cm ²]	Young's modulus Y [Kg/cm ²]	Surface tension σ [ergs/cm ²]	Surface energy γ [ergs/cm ²]
Au	19.3	1063	1200	8.12×10^5	1134	2175~2516
Al	2.7	660	700	7.05×10^5	914	1648~1909 (Al ₂ O ₃ : 1950)
Pb	11.3	327	150	1.76×10^5	480	497(327°C) (PbO : 230~250)

験に先立ち、試験片に付着しているガスや水分などの不純物を取り除くために、球形試験片を有機液体とともに500cm³の丸底フラスコに入れ、湯浴上あるいは直火で約20分間沸とうさせた後、室温まで放冷して破碎実験を行なった。そのさい有機液体を満たしたエポキシ樹脂製容器を材料試験機に装着し、この中に前処理を施した球形試験片を移し、エージングによる効果をできるだけ少なくするために、前処理を終えた後、直ちに破碎実験を行なった。つぎに球形試験片の蒸着に使用した金属は金、アルミニウム、鉛の3種類であるが、これらの金属の機械的、物理的性質^{7),8),9)}をTable 3に掲げる。なお表中の表面張力は各金属の融点における値であり、表面エネルギーは常温での値である。ただしAlとPbは空気中において酸化し、Al₂O₃およびPbOとなるので、これらの金属の酸化物の表面エネルギーの値も併記した。金属蒸着を施した球形試験片の破碎実験方法は常速荷重下での空気中破碎の場合と同様で、すでに既報^{8),4)}に詳しいので省略する。有機液体中の破碎産物は洗浄後、風乾し、また金属蒸着球の破碎産物はそのまま粒度分析を行なったが、この粒度分析方法も既報^{8),4)}と同様である。なお金属膜の厚さは分析の結果、ガラス質試料の場合平均2,300 Åであり、天然産岩石試料の場合は数百 Åであったが、酸化膜を作る金属の場合はこれより厚くなっているものと思われる。

4. 実験結果

4.1 球圧壊強度、破碎エネルギーなどの計算

球圧壊強度(引張強度) S_s は球形試験片の直径を x 、破壊荷重を P として

$$S_s = \frac{2.8 \cdot P}{\pi \cdot x^2} \quad (1)$$

から求めた¹⁰⁾。球形試験片の圧壊の際のひずみエネルギー E と試験片質量 M とから破碎エネルギーを E/M として算出した。Timoshenko¹¹⁾によると弾性体の球が二つの平行平板で圧縮されたときの単位質量当たりの弾性ひずみエネルギー E/M は理論的に

$$\frac{E}{M} = 0.682 \cdot \left(\frac{1-\nu_1^2}{Y_1} + \frac{1-\nu_2^2}{Y_2} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{\pi}{V} \right)^{1/3} \cdot P^{5/3} \quad (2)$$

で与えられる。ここに Y はヤング率、 ν はポアソン比であり、添字1は試料、2は加圧板をあらわす。実験には加圧板としてタングステンカーバイドの円板を用いたが、そのヤング率は $Y_2 = 6.05 \times 10^6 \text{ Kg/cm}^2$ 、ポアソン比は $\nu_2 = 0.21$ である。また $V (= \pi x^3/6)$ は球形試験片の体積である。したがって Eqs. (1), (2)より

$$\frac{E}{M} = 0.898 \cdot \rho^{-1} \cdot \pi^{2/3} \left(\frac{1-\nu_1^2}{Y_1} + \frac{1-\nu_2^2}{Y_2} \right)^{2/3} \cdot S_s^{5/3} \quad (3)$$

が導かれる^{8),12)}。ここに ρ は試料の密度である。球形試験片の破碎産物の比表面積 Σ_w は破碎産物の粒度分析結果から破砕片の形状係数を6として求めた。軟質試料

で荷点点を結ぶ直径を含む大円面で真二つに割れるものの Σ_w は $3 \cdot \pi \cdot x^2 / 2M$ として計算した。一方破碎前の試験片の比表面積 Σ_{w0} は形状を幾何学的球と仮定して $\pi x^2 / M$ から求め、

$$\Delta \Sigma_w = \Sigma_w - \Sigma_{w0} \quad (4)$$

より増加比表面積 $\Delta \Sigma_w$ を計算した。また破碎表面エネルギー τ_e は E/M と $\Delta \Sigma_w$ とから Eq. (5) により求めた。

$$\tau_e = (E/M) / \Delta \Sigma_w \quad (5)$$

4.2 有機液体の試験片破碎に及ぼす影響

各試験片について行なった6種類の有機液体中での球圧壊強度、破碎エネルギー、平均破壊荷重、破壊点における平均変位、増加比表面積、破碎表面エネルギーの測定結果を Table 4 に示した。また表中には既に実施した各種試験片の球形試験片の空気中と水中における実験結

果²⁾ならびに使用した試験片個数をも掲げた。実験結果から各試験片について球圧壊強度と双極子モーメントとの関係を Fig. 1 に示した。また破碎エネルギーと双極子モーメントとの関係を Fig. 2 に示した。ニトロベンゼンの場合には、前処理の際の沸とう温度 (210.9°C) が高く、この温度で結晶水の一部が失なわれるものもあるので、Fig. 1, Fig. 2 では天然産試験片のニトロベンゼン中での破碎実験の結果を削除した。Fig. 1 より球圧壊強度は、ガラス質試験片2種類の試験片を除く他のすべての天然産岩石試験片では、双極子モーメントの増大と共に減少する傾向が認められる。先に今中らは、アルミナ砥粒を有機液体でぬらした状態での破碎実験を行ない、同様の傾向を見出している⁹⁾。これらの現象に対して充分な説明を行なうことは困難であるが、おそらく極性液体分子

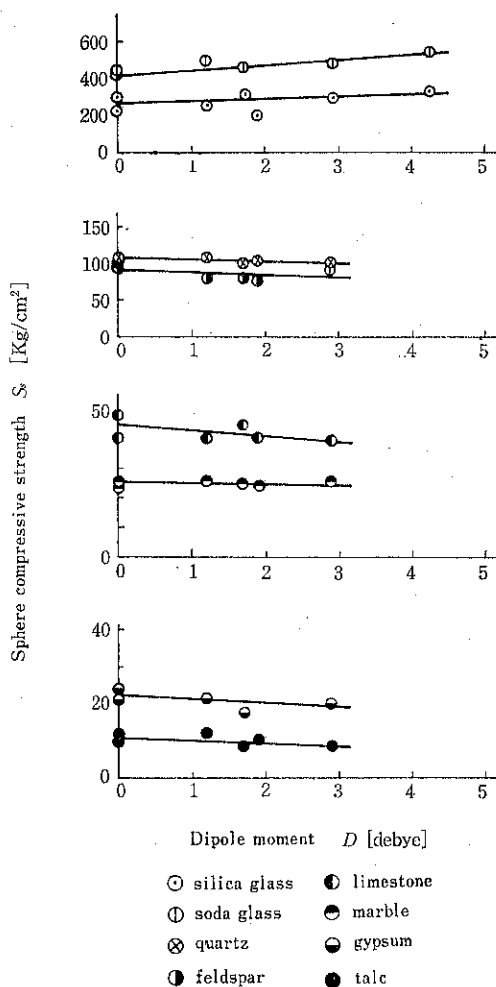


Fig. 1 Relation between sphere compressive strength and dipole moment

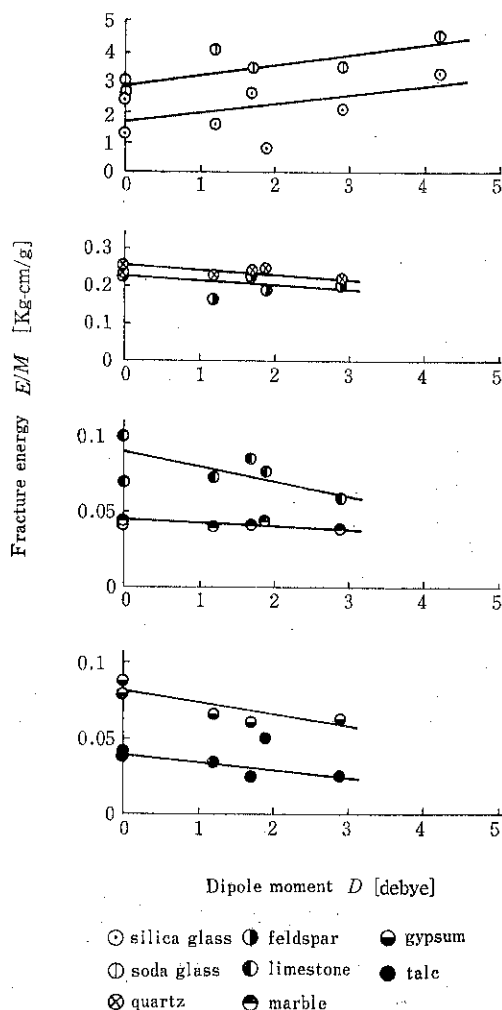


Fig. 2 Relation between fracture energy and dipole moment

Table 4 Experimental results concerning fracture in various medium liquids

Kinds of sample	Medium	Dipole moment	Sphere compressive strength S_s [Kg/cm ²]	Fracture energy E/M [Kg-cm/g]	Decrease of fracture energy ϵ_1/M [Kg-cm/g]	Decrease of fracture energy ϵ_2/M [Kg-cm/g]	Decrease of fracture energy ϵ_3/M [Kg-cm/g]	Load P [Kg]	Deformation Δ [μ]	New surface produced $\Delta\Sigma_w$ [cm ² /g]	Fracture surface energy γ_s [ergs/cm ²]	Number of specimen N
Silica glass	n-hexane	0	228	1.35				1050	292	3.92	3.37×10^5	50
	benzene	0	311	2.40				1420	399	6.72	3.50×10^5	50
	chloroform	1.2	251	1.56				1170	315	4.03	3.79×10^5	50
	ethylalcohol	1.7	334	2.76				1530	427	7.61	3.55×10^5	50
	acetone	2.9	295	2.10				1340	351	6.11	3.37×10^5	50
	nitrobenzene	4.2	353	3.30				1510	431	6.54	4.94×10^5	50
	air	—	275	1.76				—	—	8.08	2.13×10^5	60
	water	1.9	155	0.72				—	—	3.36	2.10×10^5	50
	n-hexane	0	393	2.79				1200	379	7.85	3.48×10^5	50
	benzene	0	436	3.18				1340	376	7.07	4.41×10^5	50
Soda glass	chloroform	1.2	504	4.06				1540	415	9.88	4.03×10^5	50
	ethylalcohol	1.7	464	3.56				1420	403	9.47	3.68×10^5	50
	acetone	2.9	465	3.67				1420	404	9.29	3.87×10^5	50
	nitrobenzene	4.2	551	4.68				1690	414	10.2	4.50×10^5	50
	air	—	321	1.70				—	—	8.09	2.06×10^5	100
	water	1.9	—	—				—	—	—	—	—
	n-hexane	0	108	0.256	2.2×10^{-2}	0	0	485	145	2.58	9.72×10^4	50
	benzene	0	96.4	0.234	3.0×10^{-2}	3.54×10^{-5}	8.67×10^{-5}	433	149	1.56	1.47×10^5	50
	chloroform	1.2	107	0.226	1.6×10^{-2}	2.94×10^{-5}	8.57×10^{-5}	483	124	2.03	1.09×10^5	50
	ethylalcohol	1.7	96.5	0.240	3.8×10^{-2}	1.42×10^{-5}	4.13×10^{-5}	423	146	2.06	1.14×10^5	50
Quartz	acetone	2.9	99.2	0.218	-2.7×10^{-2}	1.65×10^{-5}	5.11×10^{-5}	446	139	2.26	9.45×10^4	50
	nitrobenzene	4.2	107	0.282	—	8.49×10^{-5}	2.52×10^{-4}	483	171	2.09	1.32×10^5	50
	air	—	116	0.295	—	—	—	—	—	1.53	1.89×10^5	96
	water	1.9	102	0.251	5.0×10^{-3}	1.74×10^{-4}	3.90×10^{-4}	—	—	1.31	1.88×10^5	99
	n-hexane	0	90.5	0.226	0	0	0	407	135	1.76	1.26×10^5	50
	benzene	0	88.9	0.255	-2.9×10^{-2}	3.77×10^{-5}	7.30×10^{-5}	399	159	1.11	2.25×10^5	50
	chloroform	1.2	77.5	0.162	6.4×10^{-2}	3.13×10^{-5}	6.30×10^{-5}	349	108	1.17	1.36×10^5	50
	ethylalcohol	1.7	76.8	0.228	-2.0×10^{-3}	1.51×10^{-5}	3.02×10^{-5}	345	161	1.18	1.89×10^5	50
	acetone	2.9	92.8	0.210	1.6×10^{-2}	1.76×10^{-5}	4.27×10^{-5}	417	128	1.68	1.23×10^5	50
	nitrobenzene	4.2	99.3	0.325	-9.9×10^{-2}	9.05×10^{-5}	1.85×10^{-4}	443	173	1.21	2.63×10^5	50
Feldspar	air	—	99.5	0.253	—	—	—	—	—	1.50	1.65×10^5	99
	water	1.9	71.6	0.182	4.4×10^{-2}	1.85×10^{-4}	3.58×10^{-4}	—	—	1.09	1.64×10^5	99

Table 4 Experimental results concerning fracture in various medium liquids

Kinds of sample	Medium	Dipole moment	Sphere compressive strength S_s [Kg/cm ²]	Fracture energy E/M [Kg-cm/g]	Decrease of fracture energy ϵ_1/M [Kg-cm/g]	Decrease of fracture energy ϵ_2/M [Kg-cm/g]	Decrease of fracture energy ϵ_3/M [Kg-cm/g]	Load P [Kg]	Deformation Δ [μ]	New surface produced $\Delta\gamma_w$ [cm ² /g]	Fracture surface energy γ_e [ergs/cm ²]	Number of specimen N
Limestone	n-hexane	0	40.4	0.0696	0	0	0	181	96	0.55	1.24×10^5	50
	benzene	0	48.3	0.104	-3.44×10^{-2}	3.54×10^{-5}	5.31×10^{-5}	217	102	0.55	1.85×10^5	50
	chloroform	1.2	40.8	0.0632	6.40×10^{-3}	2.94×10^{-5}	4.46×10^{-5}	183	87	0.55	1.13×10^5	50
	ethylalcohol	1.7	45.6	0.0878	-1.82×10^{-2}	1.42×10^{-5}	2.13×10^{-5}	205	114	0.55	1.56×10^5	50
	acetone	2.9	39.4	0.0593	1.03×10^{-2}	1.65×10^{-5}	2.48×10^{-5}	177	88	0.55	1.06×10^5	50
	nitrobenzene	4.2	51.3	0.109	-3.94×10^{-2}	8.49×10^{-5}	1.29×10^{-4}	225	116	0.55	1.94×10^5	50
	air	—	42.3	0.0896	—	—	—	—	—	0.56	1.58×10^5	105
	water	1.9	40.4	0.0785	-8.90×10^{-3}	17.4×10^{-5}	2.64×10^{-4}	—	—	0.56	1.38×10^5	100
Marble	n-hexane	0	24.8	0.0425	0	0	0	110	87	0.55	7.57×10^4	50
	benzene	0	22.5	0.0434	-9.00×10^{-4}	3.51×10^{-5}	5.24×10^{-5}	101	99	0.55	7.73×10^4	50
	chloroform	1.2	27.1	0.0424	1.00×10^{-4}	2.92×10^{-5}	4.41×10^{-5}	121	80	0.55	7.55×10^4	50
	ethylalcohol	1.7	25.1	0.0438	-1.30×10^{-3}	1.41×10^{-5}	2.11×10^{-5}	113	87	0.55	7.80×10^4	50
	acetone	2.9	27.5	0.0448	-2.30×10^{-3}	1.64×10^{-5}	2.45×10^{-5}	124	84	0.55	7.98×10^4	50
	nitrobenzene	4.2	14.2	0.0265	1.60×10^{-2}	8.42×10^{-5}	1.27×10^{-5}	64	93	0.55	4.72×10^4	50
	air	—	25.3	0.0455	—	—	—	—	—	0.56	8.03×10^4	99
	water	1.9	24.5	0.0488	-6.30×10^{-3}	1.72×10^{-4}	2.61×10^{-4}	—	—	0.56	8.60×10^4	99
Gypsum	n-hexane	0	23.8	0.0890	0	0	0	104	149	0.65	1.34×10^5	50
	benzene	0	21.2	0.0809	8.10×10^{-3}	4.20×10^{-5}	6.16×10^{-5}	95	150	0.65	1.22×10^5	50
	chloroform	1.2	21.6	0.0658	2.32×10^{-2}	3.49×10^{-5}	5.18×10^{-5}	97	121	0.65	9.92×10^4	50
	ethylalcohol	1.7	17.2	0.0601	2.89×10^{-2}	1.69×10^{-5}	2.48×10^{-5}	76	136	0.65	9.06×10^4	50
	acetone	2.9	20.1	0.0669	2.21×10^{-2}	1.96×10^{-5}	2.88×10^{-5}	90	124	0.65	1.01×10^5	50
	nitrobenzene	4.2	14.4	0.112	-2.30×10^{-2}	10.1×10^{-5}	1.50×10^{-4}	65	290	0.65	1.69×10^5	50
	air	—	24.7	0.0859	—	—	3.05×10^{-4}	—	—	0.65	1.30×10^5	100
	water	1.9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Talc	n-hexane	0	11.6	0.0421	0	0	0	52	156	0.53	7.78×10^4	50
	benzene	0	10.3	0.0339	8.20×10^{-3}	3.45×10^{-5}	5.11×10^{-5}	46	142	0.53	6.27×10^4	50
	chloroform	1.2	12.0	0.0399	2.20×10^{-3}	2.87×10^{-5}	4.30×10^{-5}	52	155	0.53	7.38×10^4	50
	ethylalcohol	1.7	8.65	0.0256	1.65×10^{-2}	1.38×10^{-5}	2.06×10^{-5}	39	127	0.53	4.73×10^4	50
	acetone	2.9	8.93	0.0268	1.53×10^{-2}	1.61×10^{-5}	2.39×10^{-5}	40	128	0.53	4.96×10^4	50
	nitrobenzene	4.2	9.85	0.0352	6.90×10^{-3}	8.28×10^{-5}	1.24×10^{-4}	44	164	0.53	6.51×10^4	50
	air	—	10.8	0.0385	—	—	—	—	—	0.53	7.12×10^4	50
	water	1.9	10.3	0.0523	-1.02×10^{-2}	1.69×10^{-4}	2.53×10^{-4}	—	—	0.53	9.67×10^4	50

の吸着によって試験片表面のGriffithクラックの内壁の表面エネルギーが低下し、クラックの成長が容易になるためであろうと考えられる¹³⁾。またクラック内壁が膨潤して押し合うためという考えもある¹⁴⁾。一方、Fig.1において、セキエイガラスとソーダガラスの場合には、天然産試料の実験結果とは逆に双極子モーメントの増大と共に球圧壊強度が増大しているが、このようなガラス質試験片と天然産岩石試験片の実験結果の相違は、試験片の表面の状態によるものと考えられる。いま試験片表面の状態を考えると、天然産試料の球形試験片では、その仕上げ過程でカーボランダムによる研磨を行なうので、表面には多数のクラックが存在し、そのクラックの大きさが大で、深さも大きく、また、球形試験片の表面に存在する結晶粒子の方位もまちまちであり、研磨による結晶の乱れなども考えられ、表面の状態はかなり不均質である。これに比べると、ガラス質試料の球形試験片の表面は、はるかになめらかで均一と考えられる。このためガラス質試験片の場合には、極性物質の吸着によって表面エネルギーがほぼ均一に低下し、試験片がほぼ均一に弾性的な変形を生じやすく、かなりの圧縮変形の後に破壊し、したがって破壊荷重、破壊までの変位が共に増大し、結果として有機液体の双極子モーメントの増大と共に球圧壊強度、破壊エネルギーが大となるものと思われる。事実、ガラス質試験片の破壊点における平均荷重 P と破壊点における平均変位 Δ を示すとTable 4のようで双極子モーメントが零の n -ヘキサンとベンゼンの破壊点における荷重と変位に比べると、双極子モーメントの大きい有機液体中でのそれらは、どれも大きくなっていることがわかる。さらに破壊状況を観察すると、ガラス質試験片は空中で破壊あるいは双極子モーメント零の n -ヘキサン、ベンゼン中での破壊の場合には、ほぼ瞬間的に破壊し、しかもその破壊はいわば壊滅的に起こるが、双極子モーメントをもつ有機液体中での破壊ではFig. 3に示したように、幾度か試験片の載荷点付近の表面が薄片状にはく離する小規模な破壊が生じた後に全体の破壊が起こり、しかもこの小規模破壊の発生ひん度は双極子モーメントの値の大きい液体ほど大であるのが認められた。これはガラス質試験片が破壊点に達するまでかなりの弾性変形を生じ、載荷点が点接触から面接触へと移行するので、載荷点付近に引張応力が生ずるためと考えられる。このような破壊現象の場合には、破壊荷重の定義が問題となるが、この小規模破壊を起こしてもなお試験片は依然としてほぼその原形を保っているので、解析に当たっては最終的破壊の段階をもって破壊荷重とした。ガラス質試料の試験片の場合とは逆に6種類の岩石試料では、試験片の強度そのものを低下させる働

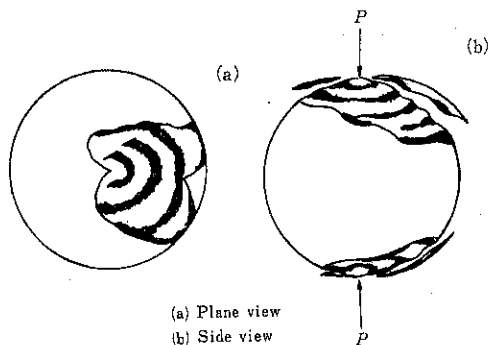


Fig. 3 Small scale fracture neighboring the contact point in glassy specimens

きをしているようである。ガラス質試料の試験片と岩石試料の試験片の球圧壊強度に対する有機液体の双極子モーメントの影響の相違をこのように考えると、一応の説明はできるが、しかし、ガラス質試料の試験片を水中で破壊すると、そのときの球圧壊強度は、空気中のそれよりも低下しており、この現象は上述のような考え方で説明ができない。現段階では水中での測定結果を含めて、これらの現象を統一的に説明することは困難であり、将来の研究にまたれるところである。さて、Table 4の天然産試料について n -ヘキサンの場合の単位質量当たりの破壊エネルギーを基準としてこれを E_0/M とし、各有機液体中および水中でのそれを E_x/M とすると、 n -ヘキサンの場合に対する破壊エネルギーの減少量は表中の $(\epsilon_1/M) = (E_0 - E_x)/M$ のようになる。一方、有機液体の表面張力から、これらの液体が試験片の表面に吸着したために低下すると考えられる破壊エネルギーの減少量は、仮りに試験片の表面積が表面のおうとつのために幾何学的な表面積 $4\pi r^2$ [$r = x/2$ は球形試験片の半径]の3倍の表面積をもつものと考え、Table 4に掲げた $(\epsilon_2/M) = 3 \times 4\pi r^2 \cdot (\sigma_x - \sigma_0)/M$ のように計算される。さらに破壊の進行を動的過程として観察した場合、すなわち新しく生じた破壊面につぎつぎと液体が吸着し、これによる表面エネルギーの低下量を考えた場合、破壊産物の全表面積を S_w とすると、破壊エネルギーの減少量の最大限度はTable 4に掲げたように $(\epsilon_3/M) = S_w \cdot (\sigma_x - \sigma_0)/M$ と計算される。ここに σ_0 は n -ヘキサンの表面張力、 σ_x はその他の有機液体および水の表面張力である*)。もしも n -ヘキサンの場合を基準として、その他の有機液体および水の場合の破壊エネ

*) 本報告では表面張力と表面エネルギーを特に厳密には区別しないで論述を進める。

ルギーの減少量が、単に極性物質の吸着による試験片の表面エネルギーの減少量のみによるものとすれば、 $(\epsilon_1/M) = (\epsilon_2/M)$ または $(\epsilon_1/M) = (\epsilon_3/M)$ となるはずであるが、Table 4 からこれらの両者を比較すると、 $(\epsilon_1/M) \gg (\epsilon_2/M)$, $(\epsilon_1/M) \gg (\epsilon_3/M)$ の関係にあるのが認められる。そこでこの点を考察してみると、球形試験片を圧縮破碎した場合、平松ら¹⁰⁾ の球形試験片の応力解析結果によると、破壊は試験片中心付近から発生することとなる。先に著者らが水中での球圧壊強度は空気中での球圧壊強度に比べて最高30%も低下することを確認しており²⁾、また Table 4 に掲げた概算結果からも破碎エネルギーの低下量が考えられる以上に大きくなっていることから、破壊に寄与するクラックは、中心付近からばかりではなく、試験片表面からも成長するもので、試験片表面に新しく生成したクラックに極性物質がつぎつぎと吸着し、表面エネルギーを低下させつつ、内部から成長してきたクラックと連携して最終的な破壊に至るのではなかろうかと考えられる。つぎに Fig. 2 の破碎エネルギーと双極子モーメントとの関係から両者の間には、球圧壊強度の場合とほぼ同様の傾向があることがわかる。しかし、その増加あるいは減少の割合は、球圧壊強度の場合に比べて当然のことではあるが大きくなっている。またガラス質試料およびケイ石、チョウ石までの

増加比表面積の双極子モーメントによる影響については、球圧壊強度、破碎エネルギーの場合と同様な傾向が得られたが、破碎表面エネルギーの双極子モーメントによる影響は顕著には認められなかった。

4.3 金属蒸着膜の試験片破碎に及ぼす影響

球形試験片表面に金属膜を蒸着した試験片の破碎実験結果を Table 5 に掲げた。表中には使用した試験片個数も掲げた。また Table 6 には空気中での球圧壊強度と金属膜を蒸着した試験片の球圧壊強度の相違を不等号で示した。およそその傾向として二つのグループに分けられる。すなわちガラス質試料とケイ石、チョウ石のグループでは、セキエイガラスを除き [空気中の強度] > [蒸着球の強度] の関係にあり、また石灰石、大理石、カツ石のグループでは、石灰石のアルミニウム蒸着の場合を除き [空気中の強度] < [蒸着球の強度] の関係にある。この二つのグループについては、各試料の硬度と破壊様式の相違が現われているように思われる。すなわちガラス質試料およびケイ石、チョウ石ではどれもモース硬度が6以上の硬質試料であるのに対して、石灰石、大理石、カツ石はモース硬度4以下の軟質試料である。また破壊状況から観察してもガラス質試料およびケイ石、チョウ石試料ではほぼぜい性破壊を起こすのに対して、石灰石、大理石、カツ石試料ではかなりの塑性変形を伴

Table 5 Experimental results concerning fracture of metal evaporated specimen

Kinds of sample	Metal	Sphere compressive strength S_s [Kg/cm ²]	Fracture energy E/M [Kg-cm/g]	New surface produced ΔS_w [cm ² /g]	Fracture surface energy γ_e [ergs/cm ²]	Number of specimen N [—]
Silica glass	Al	298	1.88	6.84	2.69×10^5	50
Borosilica glass	Al	398	3.17	9.95	3.12×10^5	50
Quartz	Au	108	0.260	1.68	1.52×10^5	100
	Al	101	0.235	2.48	9.29×10^4	101
	Pb	105	0.256	1.90	1.32×10^5	101
Feldspar	Au	92.5	0.262	1.52	1.69×10^5	98
	Al	99.3	0.277	1.40	1.94×10^5	100
	Pb	90.0	0.248	1.39	1.75×10^5	98
Limestone	Au	47.4	0.0930	0.55	1.65×10^5	99
	Al	40.1	0.0693	0.55	1.23×10^5	93
	Pb	46.7	0.0946	0.55	1.69×10^5	97
Marble	Au	25.8	0.0460	0.55	8.20×10^4	99
	Al	27.0	0.0494	0.55	8.75×10^4	96
	Pb	25.1	0.0470	0.55	8.36×10^4	100
Talc	Al	14.8	0.0669	0.54	1.22×10^5	95
	Pb	13.4	0.0486	0.53	8.92×10^4	101

Table 6 Comparison of strength between non evaporated specimen and metal evaporated specimen

Kinds of sample	Strength obtained by non evaporated specimen	:	Strength obtained by metal evaporated specimen
Silica glass	Strength obtained by non evaporated specimen	<	Strength obtained by Al evaporated specimen
Borosilica glass	Strength obtained by non evaporated specimen	>	Strength obtained by Al evaporated specimen
Quartz	Strength obtained by non evaporated specimen	>	Strength obtained by Au evaporated specimen
	Strength obtained by non evaporated specimen	>	Strength obtained by Al evaporated specimen
	Strength obtained by non evaporated specimen	>	Strength obtained by Pb evaporated specimen
Feldspar	Strength obtained by non evaporated specimen	>	Strength obtained by Au evaporated specimen
	Strength obtained by non evaporated specimen	>	Strength obtained by Al evaporated specimen
	Strength obtained by non evaporated specimen	>	Strength obtained by Pb evaporated specimen
Limestone	Strength obtained by non evaporated specimen	<	Strength obtained by Au evaporated specimen
	Strength obtained by non evaporated specimen	>	Strength obtained by Al evaporated specimen
	Strength obtained by non evaporated specimen	<	Strength obtained by Pb evaporated specimen
Marble	Strength obtained by non evaporated specimen	<	Strength obtained by Au evaporated specimen
	Strength obtained by non evaporated specimen	<	Strength obtained by Al evaporated specimen
	Strength obtained by non evaporated specimen	<	Strength obtained by Pb evaporated specimen
Talc	Strength obtained by non evaporated specimen	<	Strength obtained by Al evaporated specimen
	Strength obtained by non evaporated specimen	<	Strength obtained by Pb evaporated specimen

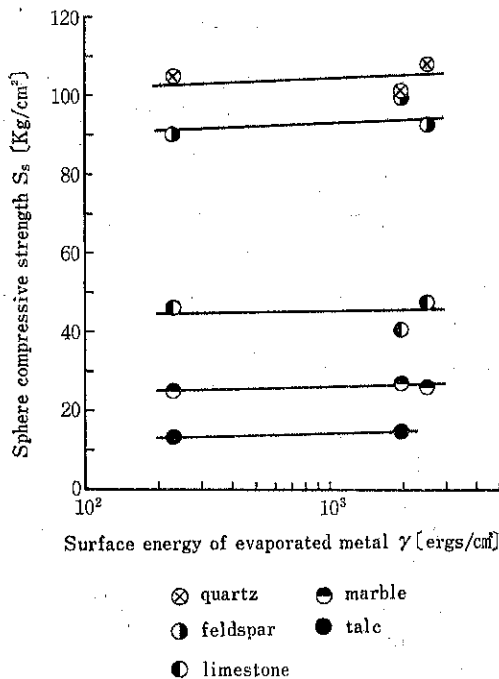


Fig. 4 Relation between sphere compressive strength and surface energy of evaporated metal

った状態で破壊しているのが認められた。つぎに試験片本来の表面エネルギーは、金属を蒸着することによって低下すると考えられるが、金属膜を含めた試験片全体の表面エネルギーに対し、金属の表面エネルギーが支配的となるものと考えて、金属の表面エネルギーと球圧壊強度との関係を片対数紙上にプロットすると Fig. 4 のようになる。図よりわずかではあるが、金属の表面エネルギーの増大とともに球圧壊強度が増大する傾向を示している。しかし変動係数からパラツキの検定および平均値に対する有意差の検定を行なった場合、水準がかなり低いところで有意差が認められる結果となった。また図には示さなかったが、破壊エネルギーと金属の表面エネルギーとの間には、Fig. 4 と同様の関係があることが認められた。以上のことから金属蒸着膜は、ガラス質試料およびケイ石、チョウ石に対しては、空気中の強度よりも強度を低下させるように働き、石灰石、大理石、カツ石に対しては、載荷点部分の塑性変形を増進させ、点接触状態から面接触状態へと移行するために、空気中の強度よりも大きい強度を示す結果となったものと考察される。またすべての試料について金属の表面エネルギーの増加とともに球圧壊強度はわずかながら増大する傾向にあることがわかった。破壊エネルギーについては、ほぼ球圧壊強度の場合と同様の傾向を示している。増加比表

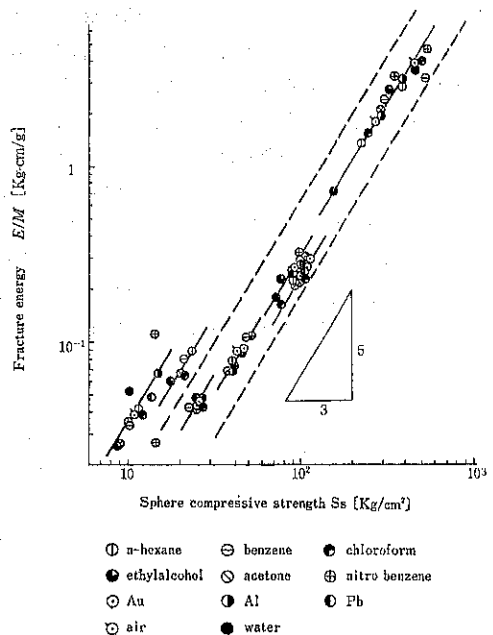


Fig. 5 Relation between fracture energy and sphere compressive strength

面積についてはガラス質試料では、[空気中破碎における増加比表面積]>[蒸着球破碎における増加比表面積]の関係があるが、ケイ石、チョウ石では[空気中破碎における増加比表面積]<[蒸着球破碎における増加比表面積]となり、金属の種類や表面エネルギーとの関連性については明確な傾向はつかめなかった。最後に各種有機液体中および各種金属膜蒸着下での球圧壊強度と破壊エネルギーとを空気中破碎、水中破碎の場合と合わせて、両対数紙上にプロットすると Fig. 5 のようになる。図中の直線は傾き 5/3 である。図より試料の種類および試験片周囲の雰囲気あるいは状態が異なっても、Eq. (3) の関係がほぼ満足されることが認められた。

5. 結 言

真空中、空气中、水中と雰囲気を変えた実験に合わせて、本報告では、有機液体中および金属を蒸着して破碎実験を行ない、有機液体の双極子モーメントおよび蒸着金属の表面エネルギーの破碎性に及ぼす影響を調べた。その結果、有機液体中破碎において、1) 天然産岩石試料では双極子モーメントの増大とともに球圧壊強度、破碎エネルギー、増加比表面積は減少し、逆にガラス質試料では増大する傾向にあった。2) 破碎表面エネルギーについては双極子モーメントによる影響は認められなかった。つぎに金属膜を蒸着した球形試験片の破碎において、3) 空气中での球圧壊強度および破碎エネルギーに

対して、ガラス質試料、ケイ石、チョウ石試料では小さい値を示し、逆に石灰石、大理石、カツ石試料では大きい値となる傾向が認められた。4) 増加比表面積についてはガラス質試料では空気中の方が大きい値を示し、逆にケイ石、チョウ石では金属を蒸着したほうが大きくなる傾向にあった。また5) 蒸着金属の表面エネルギーが大きいほど、球圧壊強度、破碎エネルギーも大きくなる傾向が認められた。6) 試料の種類および試験片を囲む雰囲気あるいは表面状態を異にしても、球圧壊強度と破碎エネルギーとの間には Eq. (3) の理論的關係が成立することが認められた。

記 号

D	: 双極子モーメント	[debye]
E	: 破碎エネルギー	[Kg-cm]
E_0	: n-ヘキサン中の破碎における破碎エネルギー	[Kg-cm]
E_x	: その他の有機液体中および水中破碎における破碎エネルギー	[Kg-cm]
H	: モース硬度	[—]
M	: 試験片質量	[g]
N	: 試験片個数	[—]
P	: 荷 重	[Kg]
r	: 試験片半径	[cm]
S	: 引張強度	[Kg/cm ²]
S_0	: 球圧壊強度	[Kg/cm ²]
S_w	: 破碎産物の全表面積	[cm ²]
T	: 沸 点	[°C]
t	: 融 点	[°C]
V	: 試験片体積	[cm ³]
W_1	: 仕事指数	[kWh/ton]
x	: 試験片直径	[cm]
Y	: ヤング率	[Kg/cm ²]
γ	: 表面エネルギー	[ergs/cm ²]
γ_0	: 破碎表面エネルギー	[ergs/cm ²]
Δ	: 試験片縦変位	[μ]
ϵ_1	: E_0 に対する破碎エネルギー減少量	[Kg-cm]
ϵ_2, ϵ_3	: n-ヘキサンの場合を基準とした試験片の破碎エネルギー減少量	[Kg-cm]
ν	: ポアソン比	[—]
ρ	: 試料の密度	[g/cm ³]
Σ_w	: 破碎産物の比表面積	[cm ² /g]
Σ_{w0}	: 試験片の比表面積	[cm ² /g]
$\Delta\Sigma_w$	: 増加比表面積	[cm ² /g]
σ	: 表面張力	[ergs/cm ²]

引用文献

- 1) P. A. Rehbindler: Z. Physik, **72**, 191 (1931).
- 2) 八嶋三郎, 斎藤文良, 三国哲朗: 化学工学投稿中.
- 3) 八嶋三郎, 諸橋昭一, 栗野修, 神田良照: 化学工学 **34**, 210 (1970).
- 4) 八嶋三郎, 神田良照, 坂本宏, 栗野修, 諸橋昭一: 化学工学, **34**, 1199 (1970).
- 5) 日本化学会編, 化学便覧基礎編II, p. 1227. 丸善, (1966).
- 6) 安積宏: 量子化学, 1967, p. 222, 培風館.
- 7) 化学工学協会編: 化学工学便覧, p. 35, p. 1320, 丸善, (1968).
- 8) 日本化学会編: 化学便覧基礎編II, p. 538, 丸善, (1966).
- 9) 久保輝一郎: メカノケミストリー概論, p. 26, 東京化学同人, (1971).
- 10) 平松良雄, 岡行俊, 木山英郎: 日本鉱業会誌, **81**, 1024 (1965).
- 11) Timoshenko, S. & J. N. Goodier: *Theory of Elasticity*, 372 (1951).
- 12) 八嶋三郎: 東北大学選鉱製錬研究所彙報, **26**, 31 (1970).
- 13) E. Orowan: Nature, **154**, 341 (1944).
- 14) S. J. Gregg: *The Surface Chemistry of Solids*, p. 59, (1951).

Discussion

質問: ϵ_1/M は実験精度上 (材料のパラツキも含めて) $\epsilon_2/M, \epsilon_3/M$ と comparable な値となり得ないので、——極端な場合には ϵ_1/M が負の値となっている。—— $\epsilon_1/M \gg \epsilon_2/M, \epsilon_1/M \gg \epsilon_3/M$ における $\gg$ なる考察には問題がありはしないか。

応答: ϵ_1/M は双極子モーメントが零の n-hexan あるいは benzene 中での破碎エネルギーを基準 (表には n-hexane 中での破碎エネルギーを基準にとった) として、この値と各種液体中で測定された破碎エネルギーとの差、すなわち破碎エネルギー減少量を示したものである。これらの値と双極子モーメントとの関係を調べると、Fig. 2 からわかるように天然産試料では、おおまかにみて双極子モーメントの値が大きくなるに伴い、破碎エネルギー減少量 (ϵ_1/M) は大きくなる傾向にあり、その値は正の値を示す傾向にある。そして、それらの値 (150頁へつづく)

カスケードインパクターの捕集性能

—付着量と再飛散量の効果について—

On the Collection Efficiency of a Cascade Impactor

—Effect of the Sticking and rebound Phenomena—

上滝 具貞*
Tomosada Jyotaki

早野 延男**
Nobuo Hayano

原田 教男**
Norio Harada

Abstract

The measurement of dust in chimney stacks and of airborne particles is an urgent matter with respect to the problem of air pollution. The cascade impactor, originally developed by K. R. May, is a very effective device for measuring the amount of aerosol particles.

Until now, many investigators have drawn their attention mainly to the collection efficiency of dust particles. However, the phenomena arising from the rebound action of particles at the target plate remains unclear and, in connection with the above recoil motion, particles stick to both the surrounding walls and the lower part of the nozzle block.

In some cases, this causes serious errors in the measurement of collection efficiency, especially when dust has a wide range of particle sizes.

In this report, we are interested in clarifying these problems and in collecting useful information which might lead to its resolution.

1. はしがき

カスケードインパクターによる粒度測定は、顕微鏡法、沈降法と比較して、直接秤量により短時間に粒度分布が求まるという利点がある。その分離機構については、K. R. May¹⁾が1945年に最初に角型4段の装置を試作して研究を開始して以来、多くの研究者によって検討が行われてきている。

W. E. Ranz²⁾らは、単分散エアロゾルを用いて実験並びに理論の両面にわたる研究を行っている。

また、井伊谷、湯らは^{3),4),5)}、実際面から重要な意義をもつ多分散粉じんを用いた粒度測定上の問題点について広範な研究を行っている。

鈴木⁶⁾らは、沈降法による粒度測定とカスケードインパクターによる結果との比較検討を行っている。

ここで、カスケードインパクターにおける測定誤差については種々の原因が考えられるが、一旦捕集された粒子が再飛散する現象、また、ノズル内壁へ粒子が付着するという問題などについては現在迄の所充分な解明がなされていないように思われる。

本報告では、測定条件を広範囲に変化させて、これらの測定条件と再飛散現象並びに付着現象との関係を詳細に検討し、併せて、これらの現象がカスケードインパクターの捕集性能に及ぼす影響について考察を行ったものである。

2. 実験装置及び方法

実験装置の配置図を Fig. 1 に、試作した単体インパクター本体を Fig. 2 に示す。

Fig. 1 のテーブルフィーダーは、回転数1 rpm と4.3 rpm の2台を使用した。前者に対する供給性能は、

* 九州工業大学 (〒804 北九州市戸畑区仙水町)

Tel 093-871-1931

** 山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台)

Tel 0836-31-5100

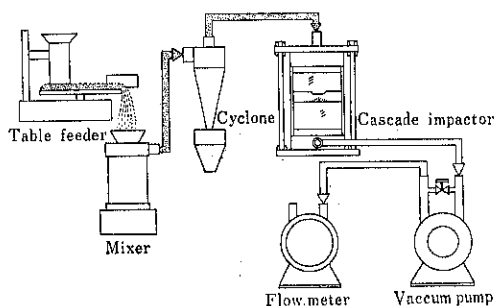


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

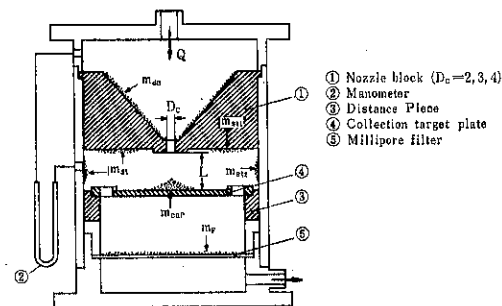


Fig. 2 Sectional view of the impactor

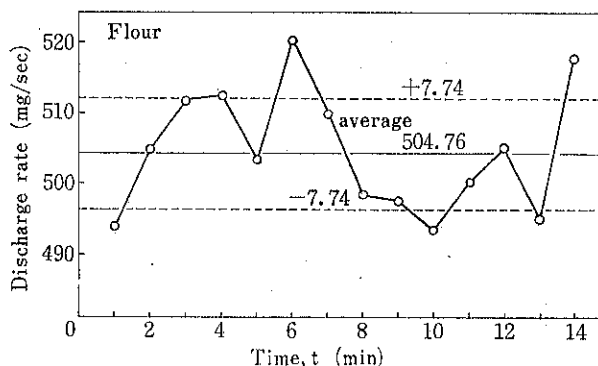


Fig. 3 Characteristics of the table feeder

Fig. 3 に示されている。供給量の調節は可能であるが、再現性を考慮して本実験では、供給量を 504.26 (mg/min) とした。発塵機としてはミキサーを使用し、凝集粒子及び大粒子の捕集用として小型サイクロンを前置した。

この実験で Fig. 2 のような単体インパクトを試作した理由としては、ノズル及びディスタンス・ピースなど装置定数を種々変化させて、これらが捕集状態に及ぼす効果を調べるためである。

Fig. 2 のノズルは、円形でノズル径 D_n の異なるもの 3 種類使用し、それらの入口角度は 60 度となっている。出口部には、微粒子捕集用として孔径 0.22 (μ) のミリポアフィルターが取り付けられている。L/D_n で表わされるクリアランス比は、Fig. 2 の③のディスタンス・ピースを交換することにより 5 段階に変えることができる。実験条件は、Table 1 に示すように広範囲に変化させて、各場合について捕集効率の測定を行った。

インパクト内各部に付着し、捕集されている粉じんの状態は、Fig. 2 に示されており、各量を次のように定義する。

- m_{in} : 入口粉じん量 (mg)
- m_{de} : ノズル内壁沈着量 (mg)
- m_{cap} : 捕集量 (mg)

Table 1 Experimental parameter

Flow rate Q (cm ³ /sec)	Nozzle diameter D_n (mm)	Clearance L (mm)	Clearance ratio L/D_n
50	2	2	1
		6	3
		10	5
		3	1
	3	6	2
		9	3
		12	4
		15	5
	4	4	1
		12	3
		20	5
		2	1
100	2	2	1
		6	3
		10	5
		3	1
	3	6	2
		9	3
		12	4
		15	5
	4	4	1
		12	3
		20	5
		2	1
200	2	2	1
		6	3
		10	5
		3	1
	3	6	2
		9	3
		12	4
		15	5
	4	4	1
		12	3
		20	5
		2	1

m_{st} : 付着量 ($=m_{st1}+m_{st2}$) (mg)

m_F : フィルター捕集量 (mg)

入口粉じん量は、これら各量の和と考えられるから、フィルターを通過する微小粒子を無視して

$$m_{in} = m_{st} + m_{cap} + m_{de} + m_F \quad \dots\dots(1)$$

となる。また、右辺各量を m_{in} で除し、無次元化して、

Table 2 Physical properties of flour

Mean diameter (μ)	14
Density (g/cm^3)	1.45
Bulk density (g/cm^3)	0.42
Angle of repose ($^\circ$)	40.3

η_{cap} : 捕集効率 ($=m_{\text{cap}}/m_{\text{in}}$)

η_{de} : 沈着率 ($=m_{\text{de}}/m_{\text{in}}$)

η_{st} : 付着率 ($=m_{\text{st}}/m_{\text{in}}$)

とする。 m_{cap} は、捕集板上にアルミ箔を装着して捕集前後の重量差を測定し、 m_{st} 、 m_{de} については、脱脂綿で払い落とすことによりそれぞれ自動天秤 (感度 0.01mg) を用いて秤量した。実験材料の物性値は、Table 2 に示されている。

3. 実験結果及び考察

3.1 入口粉じん量と粒度分布の測定

インパクト内各部での付着、捕集状態を定量的に把握するには、入口粉じん量の定量性が重要である。

Fig. 4 は、入口粉じん量 m_{in} と吸引時間 t の関係を示したものである。図から、単位時間当たりの m_{in} の増加量がほぼ一定で、定量性の良好さが認められる。また、インパクトの入口 (サイクロン出口) に流入するダスト (小麦粉) の粒度分布は、Fig. 5 に示されている。図より、ほとんど 10μ 以下の微小粒子で、カスケードインパクトが常用される粒度範囲となっている。

3.2 捕集効率 η_{cap} と付着率 η_{st} の測定

カスケードインパクトは、ノズルから粉じん気流を捕集板に衝突させ、粒子の慣性力 (気流から与えられる) で分離捕集する機構であるから、ノズル出口速度 V 及びクリアランス比 L/D_c によって、捕集効率が変化すると考えられる。よって V 、 L/D_c を変化させ、吸引時間経過と共に捕集効率がどのように影響されるか検討する。

3.2.1 クリアランス比 L/D_c をパラメーターとし吸引時間を変えた場合

この節では、まず L/D_c を変えることによって捕集板上の粉じんの堆積状態がどのように変化するのかについて考察する。

ここでは、我々の装置での最適動作状態 (最も良好な捕集状態) に近いパラメーターとして、ノズル径 D_c を $D_c = 4$ (mm)、吸引流量 Q を $Q = 100$ (cm^3/s) とし、

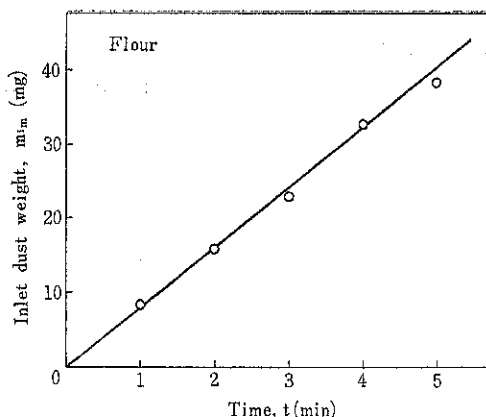


Fig. 4 Inlet dust weight of the impactor against time

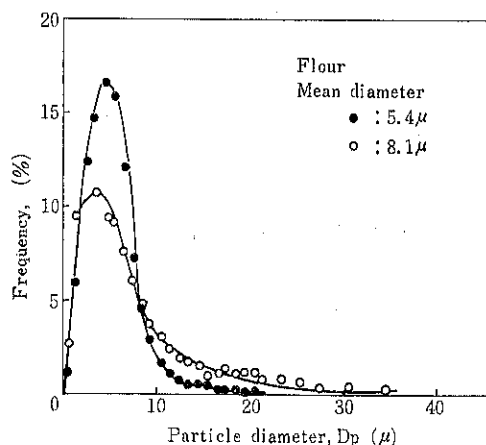


Fig. 5 Particle size distribution of the dust particle ; Symbol $\bullet$ and $\circ$ indicate particle at the exit and entrance of cyclone respectively.

Arithmetic mean diameter 8.1μ and 5.4μ in above figure (in number base) correspond to 23.5μ and 11.2μ in weight base.

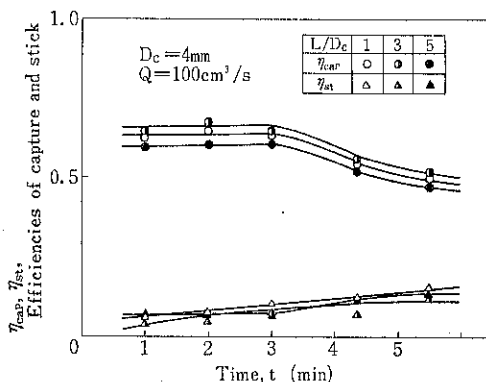
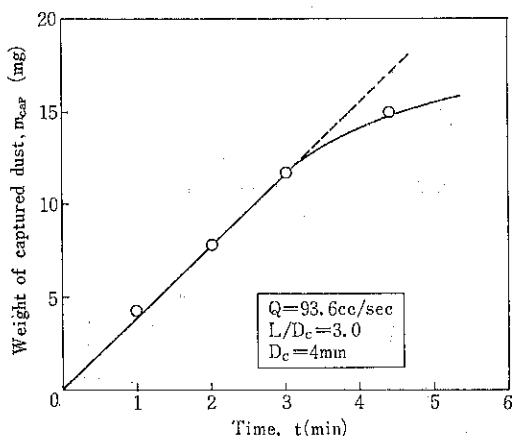


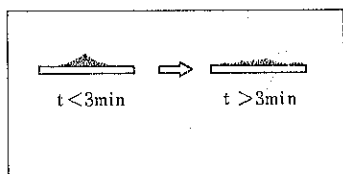
Fig. 6 Relation of the capture and stick efficiencies with time

Lを3通りに変化させて実験を行った。

η_{cap} , η_{st} と吸引時間との関係は Fig. 6 のようになるが、図より L/D_c の影響をみると、捕集効率は t に関係なく $L/D_c=3$ で最大となっている。 $t=3$ 分迄は各クリアランス比とも η_{cap} は、ほぼ一定で高い捕集効率を示すが、3分を経過するとその後 η_{cap} は減少し、一方 η_{st} は増大している。



(a) Variation of m_{cap} with time



(b) Illustration of the collection mechanism on the target plate

Fig. 7 Variation of the capture weight and explanation of the collection phenomena

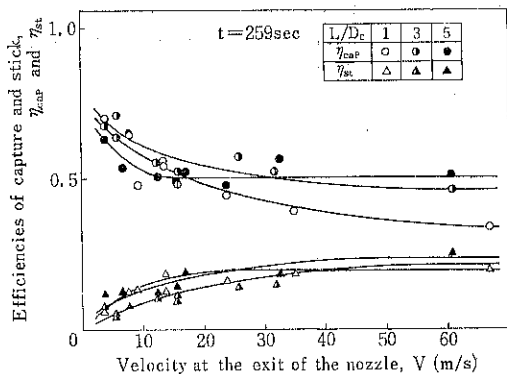


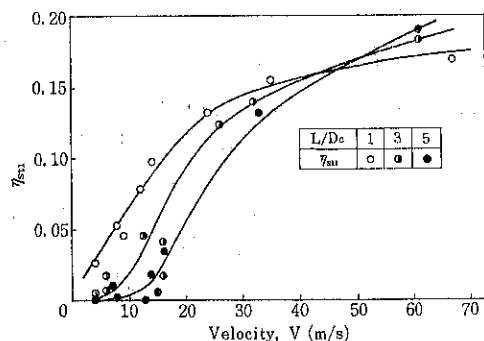
Fig. 8 Relation of capture and stick efficiencies with nozzle velocity; ' $t=259$ sec' means the suction duration and also corresponds to the period of one revolution of the table feeder.

捕集効率 η_{cap} が時間と共に減少し、付着率 η_{st} が増加する傾向について検討するために、Fig. 7 (a) に捕集量 m_{cap} と時間の関係を示し、また Fig. 7 (b) では捕集板上の粉じんの堆積状態の時間的推移が示されている。

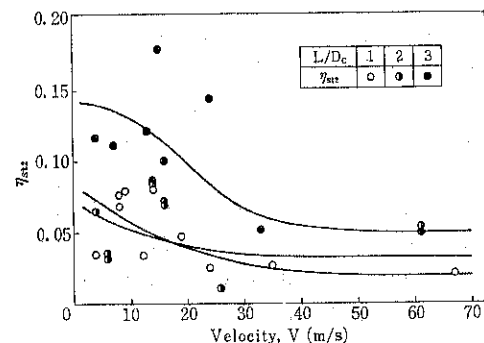
図 (Fig. 7(a)) より、約3分までは m_{cap} は時間と共に一定の割合で増加するが、それ以後はある一定値に落付く傾向を示している。したがって、 η_{cap} の定義 ($=m_{cap}/m_{in}$) より、 m_{in} は Fig. 4 のように一定割合で増加し続け、一方 m_{cap} の値の方は飽和するので、結局 η_{cap} は減少することになる。この間の事情は Fig. 7 (b) の捕集状態図に示されている。形状がある大きさになるまで粉じんは円錐状に堆積して行くが (この実験条件では3分) それ以後は、円錐の頂部は吹き飛ばされて m_{cap} が一定量となる状況が観察される。

3.2.2 L/D_c をパラメーターとし ノズル出口速度を変えた場合

本実験の範囲では温度変化並びに粒子と気体間の相対速度は無視されるので、このような近似ではノズル出口



(a) $\eta_{st1}-t$; η_{st1} is the efficiency of dust sticking to the underside of the nozzle block.



(b) $\eta_{st2}-t$; η_{st2} represents the efficiency of dust sticking to the surrounding wall.

Fig. 9 Variation of the stick efficiencies to the underside of the nozzle block and side wall with the velocity of air stream at the exit of nozzle.

速度 V は、次式で与えられる。

$$V = \frac{4 Q P_i}{\pi D_c^2 P_0} \quad \dots\dots(2)$$

P_i : ノズル入口圧力 (g/cm^2)

P_0 : ノズル出口圧力 (g/cm^2)

Q : 吸引流量 (cm^3/s)

D_c : ノズル径 (cm)

上式の V の値を用いて V と η_{cap} , η_{st} との関係を調べたのが Fig. 8 である。

各クリアランス比とも V が大きくなるにつれて η_{cap} は減少し、逆に η_{st} は増大するが、 L/D_c によってその変化割合が異っている。

再飛散現象 (η_{st}) をさらに詳細に考察するため η_{st} を

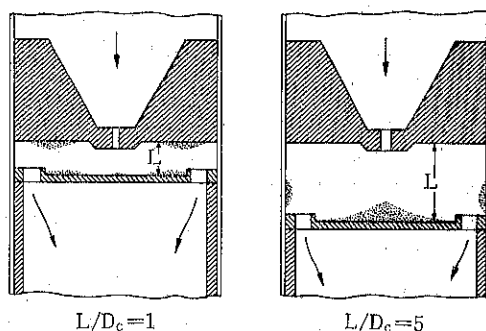
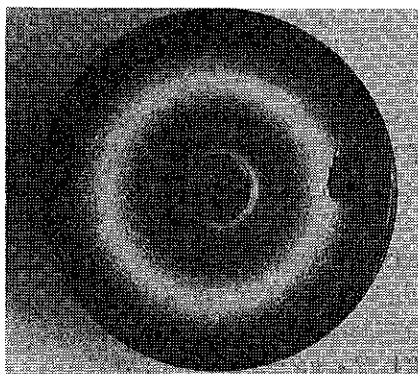


Fig. 10 Illustrations of the recoil action of particles from the target and the status of sticking to the side walls



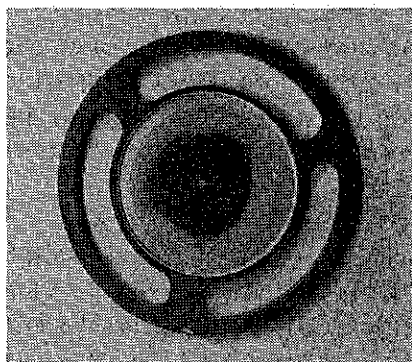
$Q = 145.6 (\text{cm}^3/\text{s})$

$D = 2 (\text{mm})$

$L/D_c = 3$

$t = 3 (\text{min})$

(a) In the case of high flow rate



$Q = 33.2 (\text{cm}^3/\text{s})$

$D_c = 4 (\text{mm})$

$L/D_c = 5$

$t = 3$

(b) In the case of low flow rate

Fig. 11 Photographs show the status of impactation to the target plate and of the underside of the nozzle block

ノズル底面 (Fig. 2 参照) への付着率 η_{st1} とインパクター側壁への η_{st2} とに分けてノズル出口速度 V との関係求めたのが Fig. 9 である。

図より η_{st1} は V が大きくなると増大し、一方、 η_{st2} は傾向として減少している。また、 η_{st1} はクリアランス比 L/D_c が小さい程 V の影響が顕著であり、 η_{st2} では逆に L/D_c が大きい方が、大きく変動している。この理由について考察すると V が大きく、クリアランス比の小さい場合 ($L/D_c = 1$) には捕集板上の粉じんの山形堆積層が吹き飛ばされ、再飛散粒子はノズル底面に衝突 (反跳) するものと考えられる。一方、ノズル出口速度 V が小さくクリアランス比の大きい場合 ($L/D_c = 5$) には、ノズル出口近傍での自由噴流の広がり方が大きくなるため、インパクター側壁まで飛散する割合が大きくなるものと考えられる。この状態がモデル的に Fig. 10 に示されている。また、捕集板、ノズル底面へダストが付着している状態が Fig. 11 に示されている。(捕集板から再飛散した後、ノズル底面などに付着するまでの詳細については '付録' 参照)

3.3 沈着率 η_{de} の測定

ダスト粒子が気流から分離してノズル内壁へ沈着する現象は、ノズル内壁部の形状 (テーパー)、ダスト粒子の物性などによって影響されるが、これらが一定の場合には力学的には、粒子の沈降速度を用いて現象を評価するのが適当と考えられる。

Fig. 12 はノズル径 D_c を 2, 3, 4 (mm) と変化させ、流量 Q が沈着率 η_{de} に及ぼす影響について調べたものである。

吸引量を 50~200 (cm^3/s) の範囲に変化させると η_{de} は 20~10 (%) 程度まで減少している。すなわち、吸引

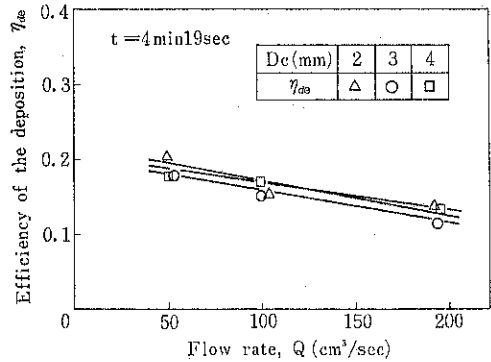


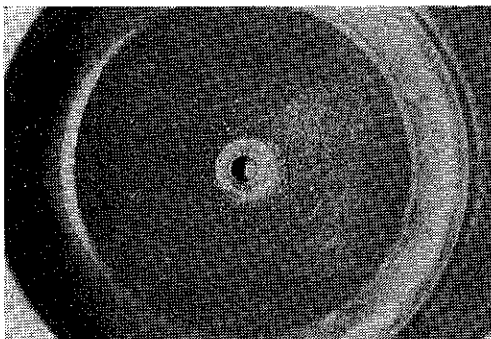
Fig. 12 Relation between the deposition efficiency and flow rate; 't=4min 19 sec' means the suction duration and also corresponds to the period of one revolution of the table feeder.

流量が大となればノズル内壁部の流速も大きくなるので沈着しにくい状態になり、 η_{de} は減少の傾向を示すものと考えられる。この範囲の D_c ($2 \leq D_c \leq 4$ mm) に対しては、 η_{de} に対するノズル出口径の影響はほとんど表わされていない。

Fig. 13 には、それぞれ流量 Q の少ない場合と大きい場合の付着状態が示されている。

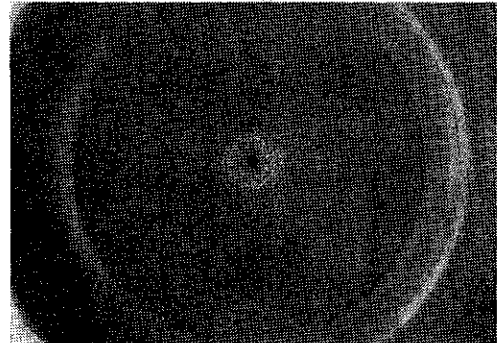
3.4 フィルター捕集量 m_F の測定

捕集量の堆積状態と同様 (Fig. 7 参照)、再飛散量及び付着量についても時間の経過と共に、これらはほぼ一定に近づくものと考えられる。したがって、流れの上流側で各部に付着したり、また、捕集板上に堆積する各量がほぼ一定量に近づいた後では、出口側に装置されているミリポアフィルター上の粉じん量の増加の割合が大き



$Q = 33.2 (\text{cm}^3/\text{s})$
 $D_c = 4 (\text{mm})$
 $L/D_c = 5$
 $t = 3 (\text{min})$

(a) In the case of low flow rate



$Q = 145.6 (\text{cm}^3/\text{s})$
 $D_c = 2 (\text{mm})$
 $L/D_c = 3$
 $t = 3 (\text{min})$

(b) In the case of high flow rate

Fig. 13 Explanation of the deposition phenomena onto inside part of the nozzle block

くなって行くと考えられる。

したがって、再飛散及び付着現象の時間的な経過を調べるためには、すべての量 m_{in} , m_{cap} , m_{st1} , m_{st2} , m_{de} 及び m_F についての時間的な変化を測定することが必要である。Fig. 14 は、ノズル径 $D_c = 2$ (mm), クリアランス比 $L/D_c = 1$, 流量 $Q = 200$ (cm³/s) とした場合の上記各量の時間的な変化を示したものである。

図より、 m_{cap} と m_{st1} は、3 分以後減少の傾向を示しており、 m_{st2} と m_{de} は飽和する傾向を示している。一方、 m_F は急激に増加している。したがって、この m_F の 3 分以後の急激な増加は、主として m_{cap} の減少がその原因になるものと考えられる。

本実験では、1 段のカスケードインパクト（単体インパクト）を用いて測定しているが、2 段以上連結した場合に上述の状態（約 3 分以後）になれば、再飛散粒子が徐々に次段の捕集板に堆積することになり、粒度分布測定の際に誤差の原因になるものと思われる。

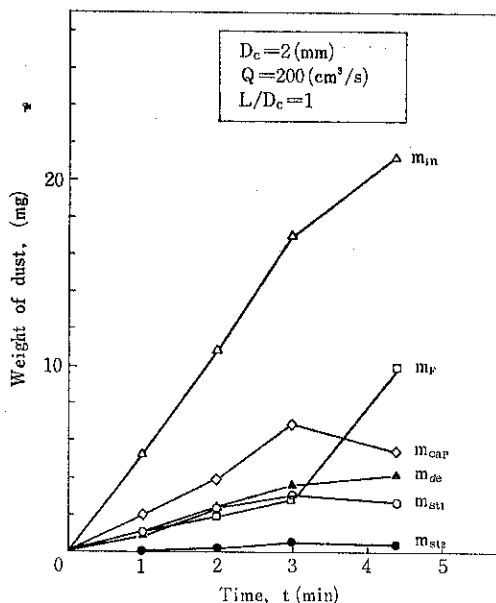


Fig. 14 Variation of the weight of dust at different positions with time

3.5 捕集効率 η_{cap} 及び沈着率 η_{de} に関する考察

Ranz ら²⁾は、カスケードインパクトでの粒子の捕集機構を特徴づける量として、慣性パラメーター ψ と無次元沈降速度 G なるものを考えている。 ψ 及び G はそれぞれ次式で定義される。

$$\psi = \frac{C \rho_p V}{18 \mu D_c} D_p^2 \quad \dots\dots(3)$$

$$G = \frac{C \rho_p D_p^2}{18 \mu V} g \quad \dots\dots(4)$$

ここで

C : カニンガムの補正係数 (—)

D_p : 粒子径 (cm)

ρ_p : 粒子密度 (g/cm³)

g : 重力加速度 (cm/s²)

μ : 空気の静粘性係数 (g/cm · s)

これらの無次元量 ψ , G は、ストークスの法則が適用される範囲で適用される。 ψ は、ノズルから飛出す粒子の慣性効果と粘性効果の比であり、 G は、粒子の重力と流体粘性力との比としての意味を持っている。

Ranz らは円形ノズルを用いて、クリアランス比 $L/D_c = 3$ とした場合の $\sqrt{\psi}$ と衝突効率 $\Delta\eta$ の関係を実験的に求めている。

我々の実験では多分散じんを使用している関係上、現象がかなり複雑なので、以下で再飛散の効果を説明する前にカスケードインパクトの分離機構に対する入口、出口での粒度分布と L/D_c (クリアランス比), V (ノズル出口速度), ψ (慣性パラメーター), $\Delta\eta$ (部分分離効率 = ある特定の粒子径に対する捕集効率) などの関係について予備的な考察を行う。

(1) L/D_c を変えた場合

すでに述べたようにカスケードインパクトは、ノズルからの噴流を捕集板に衝突させて粒子を捕集する機構となっているので、クリアランス比の影響を受け易く、このためクリアランスを変えるとそれにつれて $\Delta\eta$ 曲線が変化する。クリアランス比を変えた場合の $\Delta\eta$ に関するこれまでの実験結果を ψ を縦軸とし、 L/D_c を横軸として表わしたのが Fig. 16 である。

図より、クリアランス比が小さくなると、より小さい

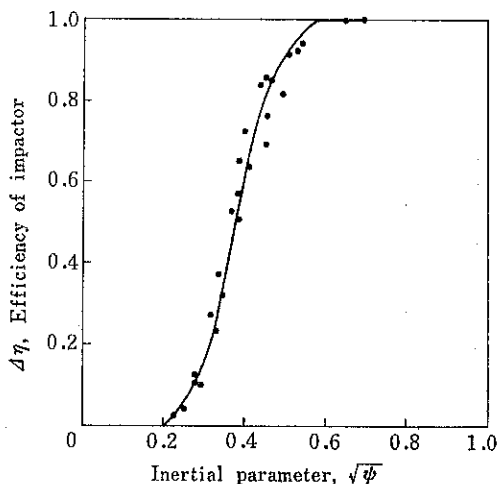


Fig. 15 Experimental result of round jet by Ranz

ψ 値で $\Delta\eta=50\%$ となっているが、Fig. 16 に模式的に示されるように、これは L が小となりガス流線の曲率が大となるため今まで気流と共に運び去られていたより小さい粒でも捕集板と衝突し、捕集されることを意味している。

また、 L/D_c の小さい所では $\Delta\eta=0.9$ と $\Delta\eta=0.1$ の間隔($\Delta\psi$)が、 L/D_c が大きい所に比べて小さくなっており、衝突距離 L を小さくすることにより ψ に対する部分分離効率 $\Delta\eta$ が鋭くなっていることがわかる。

以上の関係を L/D_c をパラメーターとして $\Delta\eta-\sqrt{\psi}$ の関係で表わしたのが Fig. 17 である。

(2) $L/D_c=3$ としてノズル出口速度を変えた場合

Fig. 15 のすべての実験点を使用し、最小二乗法によって回帰直線を求めると次式になる⁸⁾。

$$\Delta\eta = 3.8\sqrt{\psi} - 0.954 \quad \dots\dots(5)$$

今、式(5)でノズル出口速度を V_1 、ノズル径を D_{c1} と

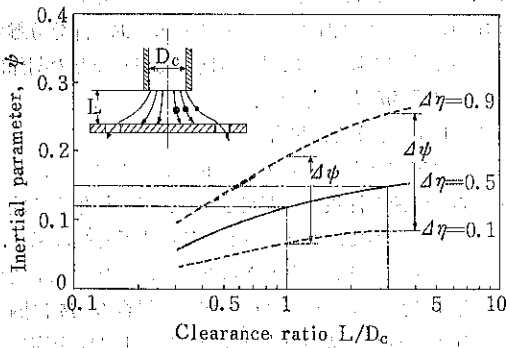


Fig. 16 Characteristics of ψ and L/D_c (effect of the partial collection efficiency, $\Delta\eta$)

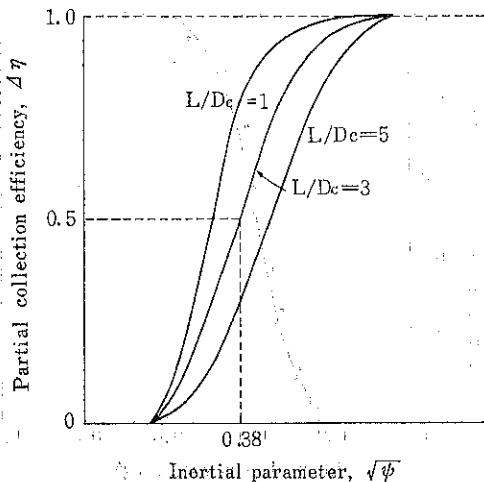


Fig. 17 Relation of the $\Delta\eta$ and $\sqrt{\psi}$ (effect of the clearance ratio, L/D_c)

し、 $\Delta\eta=50\%$ の場合を考えると

$$0.5 = 3.8 \sqrt{\frac{C\rho_p V_1}{18\mu D_{c1}}} D_{p50} - 0.954 \quad \dots\dots(6)$$

となるが、このときの D_{p50} を D_{p1} と書き、 $\sqrt{\psi}$ 中の C 、 ρ_p 、 μ などは一定としているので $\sqrt{\frac{C\rho_p}{18\mu}}$ を ξ と書いて上式を書き直せば

$$0.5 = 3.8 \xi \sqrt{\frac{V_1}{D_{c1}}} D_{p1} - 0.954 \quad \dots\dots(7)$$

となる。移項して整理すれば

$$\frac{1}{3.8} (0.5 + 0.954) \frac{\sqrt{D_{c1}}}{\xi} = \sqrt{V_1} \cdot D_{p1} \quad \dots\dots(7')$$

となる。

次に、 D_{c1} はそのままとし、ノズル出口速度 V_1 が V_2 と大きくなった場合、同じ部分捕集効率($\Delta\eta=50\%$)になるとして、この場合について式(5)を書けば

$$0.5 = 3.8 \xi \sqrt{\frac{V_2}{D_{c1}}} D_{p2} (D_{p50}) - 0.954 \quad \dots\dots(8)$$

となるが、式(7')と同様に書き替えれば

$$\frac{1}{3.8} (0.5 + 0.954) \frac{\sqrt{D_{c1}}}{\xi} = \sqrt{V_2} \cdot D_{p2} \quad \dots\dots(8')$$

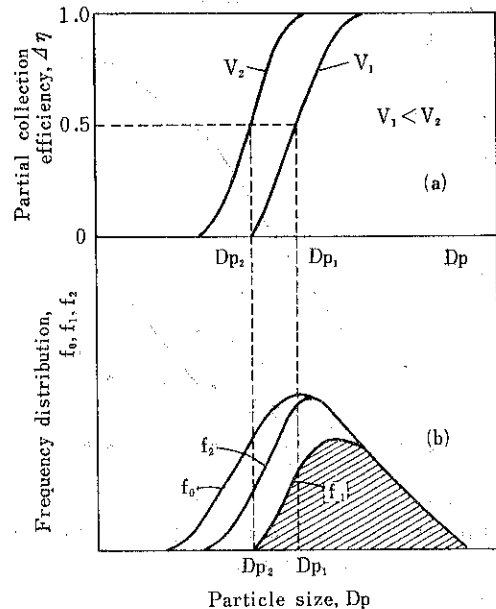


Fig. 18 Particle size distribution

f : Frequency distribution of dust particles at the inlet of the impactor.

f_1 : Frequency distribution of particles on the target plate in the case of lower nozzle speed

f_2 : Frequency distribution of dust particles on the target plate in the case of higher nozzle speed

となる。式(7)'と(8)'を比較すれば左辺は同じなので等置して

$$\sqrt{V_1} \cdot D_{p1} = \sqrt{V_2} \cdot D_{p2} \quad \dots\dots(9)$$

となる。仮定より $V_1 < V_2$ なので上式より $D_{p1} > D_{p2}$ となる。この間の事情を縦軸に $\Delta\eta$ を取り横軸を D_p として示したのが Fig. 18(a)である。

いま、カスケードインパクトの入口での粒子群の頻度分布を f_0 、ノズル出口速度 V_1 のときの捕集板上の頻度分布を f_1 、 V_2 のときの頻度分布を f_2 とする Fig. 18(a) の $\Delta\eta$ - D_p 曲線から同図(b)のような f と D_p との関係が導かれる。Fig. 18(b)の曲線より V_2 の場合の全捕集効率 $\eta(V_2)$ は

$$\eta(V_2) = \frac{\int_0^\infty f_2 dD_p}{\int_0^\infty f_0 dD_p} \quad \dots\dots(10)$$

となり、また V_1 の場合には

$$\eta(V_1) = \frac{\int_0^\infty f_1 dD_p}{\int_0^\infty f_0 dD_p} \quad \dots\dots(11)$$

で与えられる。

図より、 f_2 の囲む面積が f_1 の面積より大きいので $\eta(V_2) > \eta(V_1)$ となり、ノズル出口速度が大きい時 (V_2 の時) の方が大きい全捕集効率を与えることになるが、一方、我々の η_{cap} と V との実験結果 (Fig. 8) は、 V が大きくなると捕集効率 η_{cap} は小さくなっている。この理由は前述したように、一旦捕集板上に堆積した粒子群が再飛散現象によって吹き飛ばされることを示しており、このため、(i)ノズル出口速度がある値より大きい場合、(ii)とくに、多分散粉じんを多量にかつ、長時間吸引する場合、などについては、再飛散の効果を考慮して実験結果を評価することが必要で、特定の単分散粉じんに対して求められた式(5) (Fig. 15) をそのまま多分散粉じんに適用することは問題があると考えられる。

つぎに、ノズル内壁への粒子の付着現象については、ノズル内を流下する気流速度の影響を受けると考えられる。したがって、ノズル内を流下する速度が小さい場合には、(3)、(4)式を適用すると G は大きくなり、逆に ψ は小さくなる。このことは Fig. 12 に示されているように、吸引流量 Q の小さい所で η_{de} が大きくなっており、 Q の増加と共に η_{de} が減少する傾向にあることから納得される。よって η_{de} に対しては、無次元沈降速度 G の効果が支配的になるものと考えられる。

4. 結 言

以上の結果より次のことが明らかになった。

- (1) 吸引時間 t に関係なく捕集効率が一定となる定常

状態が存在する。(Fig. 6)

- (2) 吸引時間の増加とともに捕集量 m_{cap} が一定となる傾向がある。(Fig. 7(a))
- (3) ノズル出口速度 V が大きくなると、 $L/D_c = 1, 3, 5$ の各クリアランス比とも、ノズル底面への付着率 η_{st1} は増大し、側壁への付着率 η_{st2} は減少する傾向がある。(Fig. 9)
- (4) 広範囲にわたる V と吸引時間 t の値に対し、これまで行なわれた研究者の結果と同様に $L/D_c = 3$ で良好な捕集機構を示すことが確認された。(Fig. 6, Fig. 8)
- (5) ノズル内壁への沈着率 η_{de} は、流量が大きくなると減少する傾向がある。(Fig. 12)

本実験の小麦粉の場合には、吸引時間約3分迄の再飛散が顕著になるまでに粒度を測定した方が測定誤差が少ないと思われるが、他の試料の場合についても、この点についてより詳細な実験を行う予定である。

終わりに材料の提供を賜った日本製粉 K. K. ならびに昭和49年度、生産機械工学科大学院修了生、藤井康博君及び生産機械工学科卒業生、石井洋樹君に対し深甚なる感謝の意を表わす次第である。

参 考 文 献

- 1) K. R. May; J. Sci. Inst., **22**, 178 (1945).
- 2) W. E. Ranz and J. B. Wong; Ind. Eng. Chem., **44**, 1376 (1952).
- 3) 井伊谷, 湯, 牧野, 中野; 化学工学, **33**, 7, 689 (1969).
- 4) 湯, 井伊谷; 化学工学, **34**, 4, 427 (1970).
- 5) 井伊谷, 湯; 化学工学, **35**, 11, 1251 (1971).
- 6) 鈴木, 津原, 林; 三菱重工技報, **5**, 6, 620
- 7) 上滝, 早野, 原田, 藤井, 石井; 日本機械学会九州支部第28期総会講演論文集 No. 758-1, (1975-3).

〔付録〕付着現象 (η_{st1} , η_{st2}) に関する考察

ノズル底面及びインパクト側壁への付着現象については、3.2.2 で述べたようにクリアランス比 L/D_c 及びノズル出口速度 V によって (本文 Fig. 9, 10 参照) 付着状態が変化することが判明している。ノズル底面及びインパクト側壁への粒子の付着は、通路の気流速度の影響を受けるものと思われる。

Fig. A は、再飛散粒子が気流から分離してノズル底面及びインパクト側壁の所で付着する状態を示したものである。図中の V_c はノズル中心から半径 R の所で、ノズル底面と捕集板間のすき間を l とした場合の円筒面を通過する気流の平均速度を示す。この半径 R の位置は、

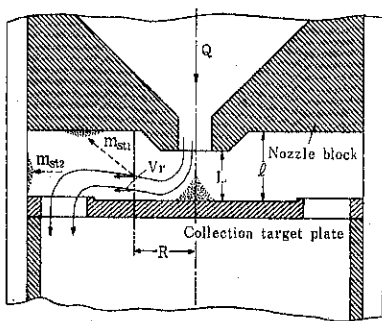


Fig. A Illustration of the rebound action of particles from the target and the status of sticking to the side wall

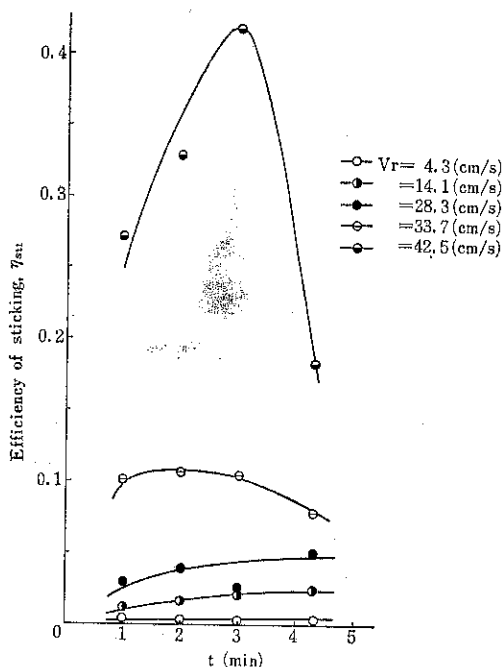


Fig. B Sticking efficiency to the bottom of nozzle block

m_{st1} の付着している位置とノズル中心との中間点に相当する。この V_r をパラメーターとし、ノズル底面への付着率 $\eta_{st1}(=m_{st1}/m_{in})$ 及びインパクター側壁への付着率 $\eta_{st2}(=m_{st2}/m_{in})$ と吸引時間の関係を調べたのが Fig. B 及び C である。

Fig. B よりノズル底面への付着率 η_{st1} は、気流速度 V_r が大きい場合には、大きい値を示している。これは、捕集板上に、一旦、山形に堆積した粒子の一部が気流によって吹き飛ばされ、ノズル中心から半径 R (本実験では $R=0.8\text{cm}$) の近傍で粒子は気流から分離しノズル底面に衝突すると考えられ、この半径 R 近傍での粒子の分離速度は、 V_r が大きくなると増大し、このためノズル底面に衝突する割合が増加するためと考えられる。

一方、Fig. C の側壁への付着率 η_{st2} は、吸引時間 2～3 分まではガス速度 V_r の小さい場合に、大きい値を示している。これは、平均気流速度 V_r が小さい場合は、半径 R の近傍で分離される粒子の量が減少し、このため側壁の方へ運ばれる粒子が多くなるためと考えられる。

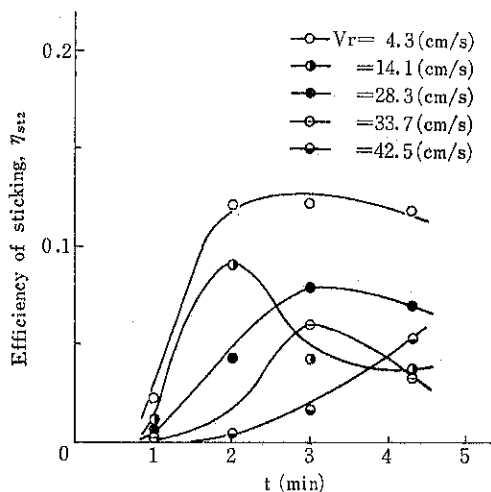


Fig. C Efficiency of dust sticking to the surrounding wall

フロートロンを用いた連続定量供給装置の 試作およびその性能

Development of a continuous solid particles supplier with
constant flow rate using FLO-TRON

佐藤 宗武*
Munetake Sato

矢野 武夫*
Takeo Yano

Abstract

A continuous solid particles supplier with constant flow rate has been developed. This device which is a kind of electrically vibrating feeders, is constructed by the FLO-TRON (Hosokawa Iron Works) improved, flow-rate meter and voltage regulator.

By using the device developed, the calibration of output voltage and solid particles flow rate has been checked. For both cases of treated powders, good and poor flowability, this feeder can control satisfactorily the feed rate of powders with an accuracy of $\pm 10\%$.

著者摘録

連続式の定流量粉体供給機の開発を行なった。本装置は電磁振動型供給機 FLO-TRON (細川鉄工所製) を改良したものと、粉体流量計および電圧調節器から成り立っている。この装置を用いて出力電圧と流量の関係を検討した。そして流動性の良好な粉体および流動性の悪い粉体の両方の場合共に $\pm 10\%$ の精度で連続定量供給をすることができた。

1. 緒言

粉粒体を取り扱う製造プロセスにおいて原材料の供給や製品のとり出し操作等はそれ自身による単位操作のみならずプロセス全体に対しても大変重要な位置を占めている。特に、粉粒体の連続処理プロセスにおいては、供給機あるいは排出機の性能がそのまま処理装置の能力や精度を決定づけている場合もある。そこで種々の型式の供給機や排出機が考案され実際に使用されている。

ここでは連続粉粒体混合装置の開発の一環として採り上げた供給排出機について i) 小型で流量変更が容易、ii) 密閉構造であるなどの理由から電磁式振動円盤型粉

粒体供給機 (フロートロン) を選び、これに定量性の向上ならびに流出特性の改善のために若干の構造的な改良を加えた。そしてまた定量性を確保するのに不可欠な粉粒体流量の連続検出器の設置ならびに駆動電圧制御器を組み合わせ連続定量供給 (排出) 機を試作したのでこれらのことについて報告する。

2. 供給機および連続流量測定器

2.1 供給機

ここで使用した供給機は Fig. 1 に示したような形式で、円形振動板①を貯槽あるいは装置の排出口の直下に設置し振動によって粉体を流動化させながら重力の作用下で流入または排出する電磁フィーダーの 1 種でフロートロン (細川粉体工学研究所製品) と呼ばれている。振動板は直径 195mm, 流入管②は内径 120mm, ケース③は内径 300mm で排出口 (120mm) に向って 60度の

* 大阪府立大学工学部化学工学科
(〒591 堺市百舌鳥梅町 4-804)
Tel. 0722-52-1161

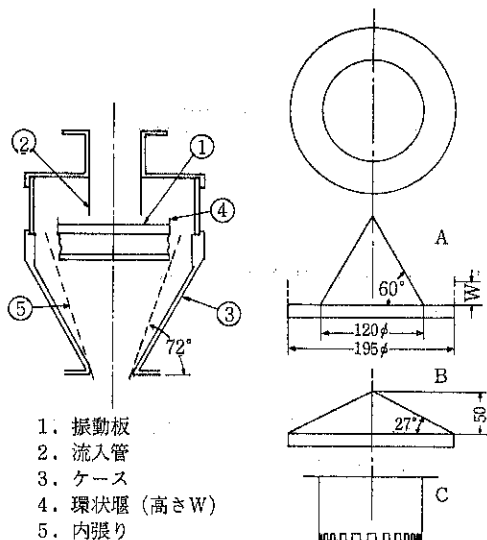


Fig. 1 フロートロンおよび振動面, 流入管

円錐形をなしている。粉体流量の調節は駆動電圧および振動板と流入管の間隙の調節さらに振動板側面に環状の堰④を取り付けて行うようになっている。

ここでは使用する粉体の物性や操作条件に応じてより精度の良い流出特性が得られるように次のような若干の構造的な改良を加えた。

(a) 振動面：平板の振動面に堰④を取り付けることによりある程度流量をコントロールできるが、このような堰を設けることによって一方振動板上の粉体ホールドアップが増えると同時に同板中心付近での粉体の運動が周辺部に比較して緩慢であり滞留部を形成する。そのために微量成分が封じ込められたり粉体によっては偏析あるいは造粒されることがあり均一な排出が困難になる場合があった。そこで比較的流動性の良好な粉粒体に対しては Fig. 1 の(A)に示すような振動円板中心部に頂角60度の円錐体を取り付けた。一方、付着性が高い微粉体に対しては(B)に示すような円板全面を円錐面にした。なお円錐面の角度および流入管と面との間隙は粉体により異なるのであらかじめ予備実験によって決めた。また、円板および円錐面は粉体の付着を防ぐためにできるだけ平滑にしておく必要があった。

(b) 供給管：流動性の良好な粉体では環状の堰からのオーバーフローだけでかなり良好な流下状態を示したが微粉体では円板上の堆積層の影響によって不規則な流下状態になるため、B型の円錐面の上の下端を櫛状に切り欠いた流入補助管Cを取り付けた。この管と円錐面との間隙および切り欠き部の大きさによって凝集しやすい粉体が細分化され、かなり均一に流下するのが認められ

た。また、振動停止時には粉体自身の閉塞性によって排出が止まるため弁などは不用であった。

(c) ケースおよびシュート部：振動板から落下した粉体はケース③の内面をすべって排出口に集中されるが、このとき傾斜面の表面粗さおよび傾斜角度によっては粉体が付着し不規則な流れとなる。また内部のボルトや電源ケーブルなどの突起物面に粉体が堆積し流路を狭めまたは付着と剝離が不規則に起こり流量精度を落す原因となった。そこで磨いた不銹鋼板(SUS27)を用いて円錐部を72度の急傾斜角を持たせて内張りするとともに突起部やボルトには、粉体がかからぬようあらかじめ邪魔板を楕状につけた。このことによって微粉の場合もかなり良好に流下するようになった。

2.2 粉体流量検出器

粉体流量の測定方法には秤量法、電気的方法、差圧法、力学的方法、統計的方法その他いくつかの組合せによる方法など多くの方法が考案され、いくつかは実用化されている。ここでは構造が比較的簡単で粉体の流路中に直接取り付け密閉化しやすい形式として衝撃力(impulsive force)による流量検出器を作製した。

Fig. 2に作製した衝撃型流量検出部の概略と測定回路を示した。また Table 1 には代表寸法などを示した。図中①はフロートロンからの粉体を受ける傾斜衝撃板で、粉体の付着を防止するために平滑なアルミニウム板を用いた。板は傾斜角調節用のネジ④によってパネ鋼板アーム②にとり付けられている。アームは衝撃板の水平分力だけを検出するように垂直に付けた。アームは流量範囲、感度、固有振動などを考慮して材質、パネ定数を選ぶ必要がある。アームの固定端の近くの両面にはストレインゲージ(抵抗線型歪ゲージ)③を貼り挽みを検出するようにした。ストレインゲージの抵抗値変化はブリッジ回路で検出し動歪みアンプにより電圧値とし、記録計で連続測定するようにした。なお、歪み変化に振動が加

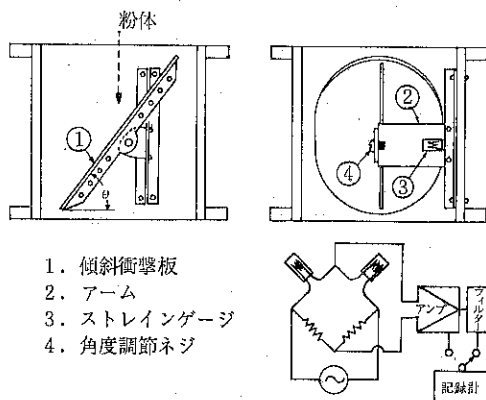


Fig. 2 粉体流量検出器および測定回路

Table. 1 流量検出部寸法およびストレーンゲージ

検出部 構造	傾斜衝撃板 (mm)				アーム (mm)			
	材質	長径	短径	厚さ	材質	長さ	幅	厚さ
	アルミニウム	120	80	0.5	パネ鋼(SK-5)	75	20	0.3
ストレーン ゲージ	長さ (mm)		抵抗 (Ω)		ゲージファクター(%)		枚数	
	6		119.6 $\pm$ 0.3		2.05 $\pm$ 0.1		表裏	2枚

Table. 2 粉体物性値

物性値 物質名	粒径範囲 μm	平均粒径 μm	真密度 g/cm^3	見掛密度 ゆるみ g/cm^3	見掛密度 充てん g/cm^3	安息角 deg	流動性
ガラス粉末	177~350	260	2.50	1.42	1.46	40	良好
炭酸カルシウム	1~150	16.5	2.70	0.88	1.37	71	乏しい

わっている場合、必要に応じてフィルターをアンプの後段に接続し、歪みの基本波形を測定した。

3. 流量検出器の性能およびフロートロンの特性についての実験結果

内部を改良したフロートロンと衝撃型連続粉体流量検出器を用いて、まず流量計の試験をし、ついでフロートロンの流出特性に及ぼすいくつかの因子について検討した。

使用した粉体試料は流動性の良いガラス粉末および付着性の強い炭酸カルシウムの微粉末であり、それぞれの物性値を Table 2 に示した。

3.1 流量検出器の検定

粉体の流量 F (gr/sec) と検出器ビームの歪量 (μ) との関係を得るためにフロートロンを用いて試料粉体を一定条件下で流下させた。フロートロン入口には防振ゴムパッキングを介して流入管と同一径の直管 (120mm ϕ $\times$ 500mm) を粉体貯槽として接続し、粉体層高を常に一定に保って粉体圧による流量変化を防ぎつつ流下させた。フロートロン出口には円錐ノズルを付け流下粉体が検出器の傾斜板中央部に集中するようにした。検出器を通った粉体は一定時間毎にサンプリングし計量して流量を求めた。

Fig. 3 にガラス粉末を用いた場合の流量と歪量の関係を衝撃板の傾斜角をパラメータとして示した。本実験範囲内では流量と歪量は比例関係にあり、傾斜角が小さいほど感度が良いことを示している。しかし粉体の安息角より傾斜角を小さくすると板上に粉体が堆積するので、ここでは40~50度の範囲に決めた。この角度内では図からも明らかなように粉体の板に対する衝突角はあまり検出感度に影響を及ぼさないことがわかる。また、フロー

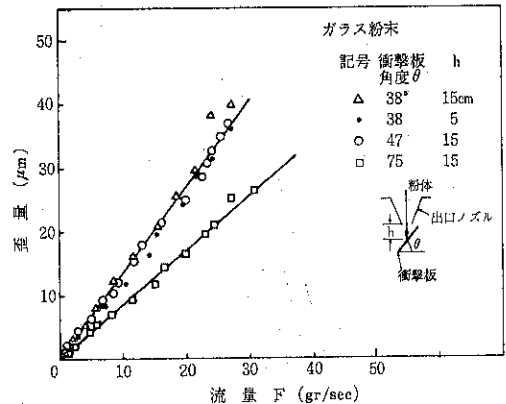


Fig. 3 流量対歪量の検量線 (ガラス粉末)

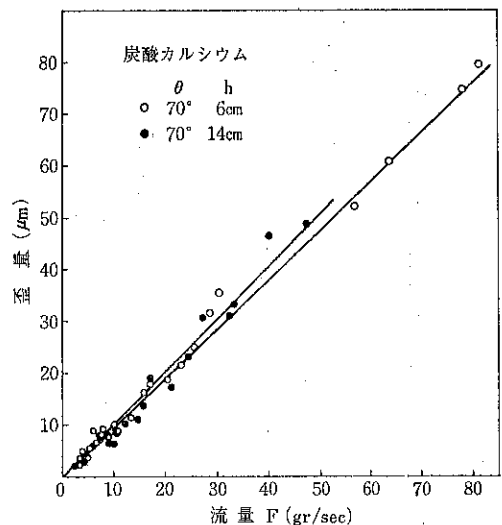


Fig. 4 流量対歪量の検量線 (炭酸カルシウム)

トロンの出口ノズルから衝撃板までの距離を 5~15 cm の間で変化させたが検出感度に大差はなかった。しかし粉体の種類、物性（特に大粒径）によっては排出口から検出面までの落下距離および衝突角が検出感度にさらに大きく影響を及ぼすことは十分に予測しうる。

Fig. 4 に炭酸カルシウムを用いた場合の結果を示した。衝撃板の角度は粉体の付着防止と十分な検出感度を得るために実験的に70度に定めた。流量のかなり広い範囲にわたってFと歪量は比例関係を示した。粉体の落下距離は粉体が飛散性であることを考慮して6cmを最適値として選んだ。

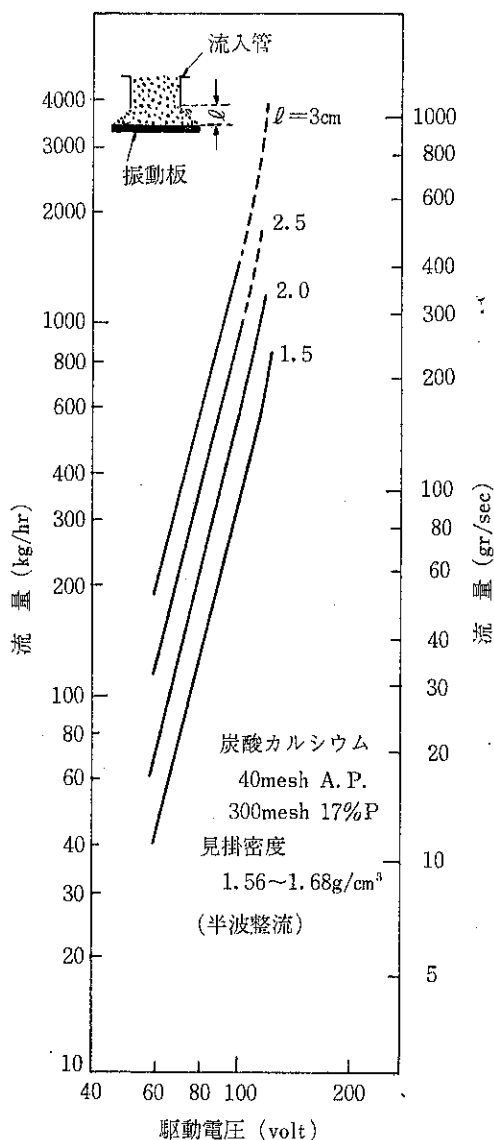


Fig. 5 フロートロン電圧・流出特性
(細川粉体工学研究所)

3.2 フロートロンの流出特性

フロートロンによる粉体の流出特性は粉体の物性値（密度、平均粒径、粒径分布、形状、含水率等）によって、また、操作条件（電圧波形、振動板と流入管の間隙、振動板形状など）によってそれぞれ異なっている。Fig. 5 には本供給機の標準仕様（平面振動板と流入管の距離を変化させた場合）による電圧（60Hzを半波整流）と流量の関係の一例を示した（細川仕様書より）。流量は電圧の増加と共に急激に増加し、また、流入管の間隙の増加によっても増加している。Fig. 6 には2.1節で示した Fig. 1 (A) の振動板と環状の堰を持つ構造についてのガラス粉末を使用した場合の電圧と流量との関係を示した。駆動電圧は交流 60Hz そのままの場合とシリコン整流器によって半波整流した場合についてそれぞれ示した。半波整流した電圧で振動させると流量が 20g/sec 以上で急に増大し10ボルトの電圧変化に対して流量は4倍以上に増加した。このような特性は、粉体を一時に排出する場合には便利であるが電圧制御によって高流量で定量排出する際にはややむずかしい曲線に属する。一方、交流 60Hz そのままで使用した場合は、振動板が高速で運動し粉体自身に効果的に流動化のエネルギーを伝達しないため粉体は排出されにくいが高流量域での電圧・流出特性は半波整流の場合よりも勾配が緩かとなり制御がより容易となると考えられる。

このようにフロートロンは使用目的によって駆動電圧波形を選択するとより効果的な性能を示すと推察された。

環状堰の影響は高さが大きいほど粉体は流出しにくくなり同一波形の電圧ならば流出特性曲線は高電圧側に平行移動した形になった。すなわち、同一電圧でも堰高さを変えることによってかなり流量を広範囲に変化させ得ると同時に、流量を制御する場合に、制御機器が最も安定に作動するような電圧範囲が制限されるようなとき、

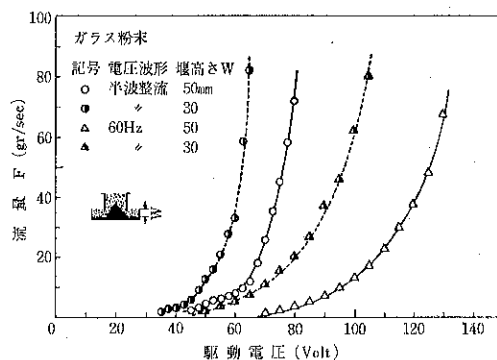


Fig. 6 電圧・流出特性に及ぼす電圧波形と堰高さ
(ガラス粉末)

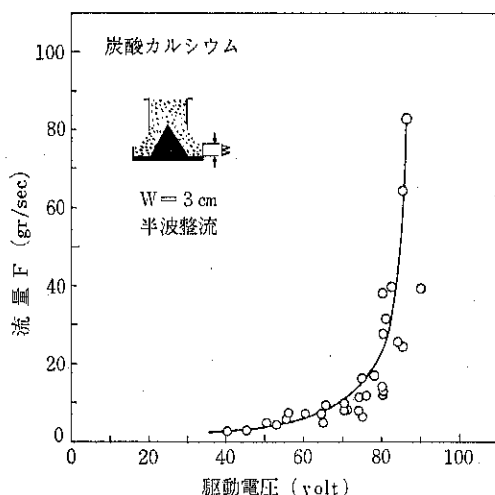


Fig. 7 電圧・流出特性 (炭酸カルシウム)

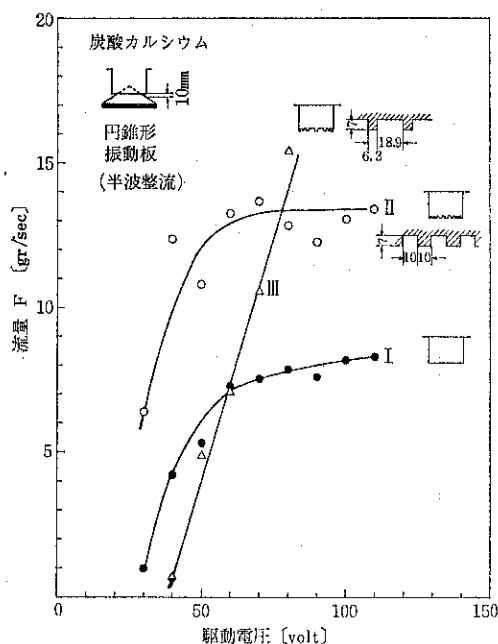


Fig. 8 電圧・流出特性に及ぼす振動板と流入管の影響

適当な電圧値を選択できる可能性があることを示している。

Fig. 7 に(A)の振動板をそのまま使用したときの炭酸カルシウムの電圧・流出曲線を示した。実験にはすべて半波整流した電圧を用いたが図に示したように電圧を70ボルトまで上げてても粉体は流出しにくく、75ボルトを越えると急激に流出し始め制御が不可能であった。そこでFig. 1の振動面(B)と流入管(C)によって測定を行なった。Fig. 8に流入管下端を種々に切り欠いた状態で電圧と

流量の関係を示した。流入管下端と振動面までの距離はいずれも10mmとした。図中の(I)は直管そのままで管下端と円錐面との開口面積が 37.7cm^2 の場合である。(II)は管周囲を38等分し一つおきに計19ヶ所を切り欠き(幅10mm, 切り込み深さ7mm), 開口部面積を 50.9cm^2 に拡大したものである。IとIIを比較すると流出量は開口部が大きい程増大したが、電圧と流量の関係はほぼ相似であり、60ボルト以上になると流量の増加率が小さくなり、開口部の面積に応じた固有の値に近づく傾向があった。(III)については管周囲を60等分し(幅6.3mm, 切り込み深さ7mm), $\frac{3}{4}$ を開いた状態、すなわち開口部面積が 57.5cm^2 の場合を示した。開口部を拡大すると電圧と流量の関係が直線的になり本実験の流量範囲では電圧が40~80Vの範囲で良好な排出特性を示した。

これらの流出特性は目的によって有効に利用しうる。例として連続式の粉体混合を考えると、混合機の出口では混合が完了して物性値がほぼ一定になっているので、混合物を安定して次の処理プロセスに送り込めば良いようなときI, IIのようにある程度の自己安定性のある流出特性を利用することによって流量の制御を簡易化できる。一方、IIIのような特性を利用して流入粉体の物性変動や流路内の充てん状態の変化から流出状態が変化するとき流量の連続制御を行なう際都合が良いと考えられる。

4. 粉粒体の流量制御による連続定量流出操作

フロートロンの流出特性が粉体物性はもとより貯槽形状、粉体レベルによる充てん状態の変化など時間的に変動する外的要因にも影響されることから、内部の構造的な改良のみでは長時間の精度良い連続定量供給排出を確保するのは困難である。そこで先に述べた流量検出器を用いてフロートロンの電圧を制御することにした。

4.1 流量制御装置

制御回路の作製においては流量変動を小さくして平均流量が一定となることを目指した。すなわち粉体の小塊による瞬間的な小さい流量変動は容認するが、流量の平均値は時間的に変動しないことを条件とした。

Fig. 9に制御回路の概略を示した。先に示した流量検出器のストレインアンプからの直流出力電圧をチョップ増幅器で増幅し、フロートロン用電圧制御器を動作させる一連のフィードバック制御系である。ここで用いた電圧制御器は交流変圧器の回転子をサーボモーターで直接駆動する型式の定電圧供給装置(東芝AM-110C)の自動平衡回路の一部を改造したものである。この型式のものは変圧器回転子に適当な慣性力があり、微小な変

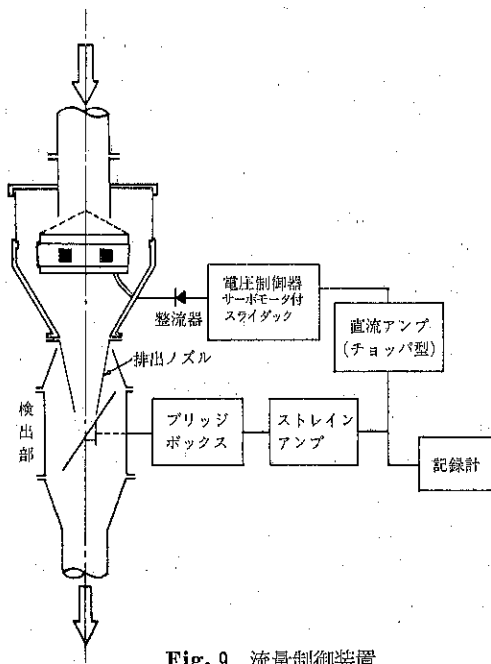


Fig. 9 流量制御装置

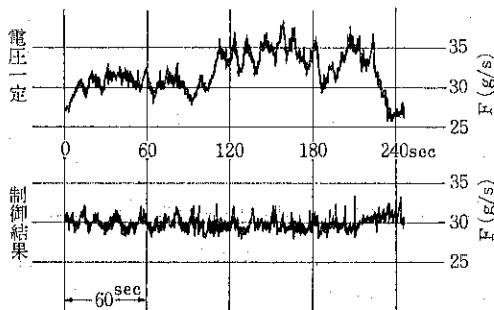


Fig. 10 流量制御による定量排出（ガラス粉末）

動をうまく緩和し（積分作用）、平均値に追従するので本装置には望ましい特性を持っている。そして流量検出器からの出力電圧とあらかじめ流出量に見合った設定電圧（電池とポテンシオメーターにより設定）を比較して、差が零になるようにフロートロンを制御する方式である。変圧器の出力範囲は 0～120 ボルトであり、交流および半波整流用の 2 端子を取り付けた。

4.2 流量制御による連続流出性能

Fig. 10 にガラス粉末についての流出実験を、流量制御した場合としない場合のそれぞれについての連続記録結果を示した。制御なしの場合は最初の設定流量から次第に偏倚してゆき、また、流量の変動が大きかった。しかし、流量制御の結果は図のように安定した特性を示し、振動面上の不規則な粉体の流動変動を補正した。

Fig. 11 の(a)と(b)にはガラス粉末および炭酸カルシウムについての流出実験結果を示した。どちらの粉体系の場合にも制御をしないと時間の経過と共に流量変化が大きくなり、特に炭酸カルシウムでは、高流量に設定するとかえって流量が減少して、振動面の上方で固結し、流出しない状態も起きた。これは振動によって貯槽内粉体が圧密状態になりブリッジを形成するためとみられる。したがって振動強度は初期の設置値より大きくしないと流出しない。これに対し制御を行なった場合には、いずれの粉体、流量設定値においても $\pm 10\%$ 以内の流量変動以内に収まっており、良好な流出特性を示した。

4.3 連続流量制御による 1, 2 の実験例

流量制御装置を付けたフロートロンによって貯槽からの粉体の排出実験を行なった。

つぎに垂直円筒内に多段の搅拌羽根を内装した形式の連続混合機の入口および出口側にこのフロートロンを設置して微粉体の連続混合を行なった。

実験に使用した貯槽は内径 120mm、高さ 700mm、上部に開角 60 度の漏斗を付けた容積約 8 l のものである。Fig. 12(a) にガラス粉末についての流出実験結果を示した。駆動電圧を一定に保って粉体を排出した場合図に示したように粉体層の高さによって流量は時間と共に変化した。すなわち、排出を開始して粉体が貯槽の a 部にある間は流量が増加し、b の直管部から流量はやや安定

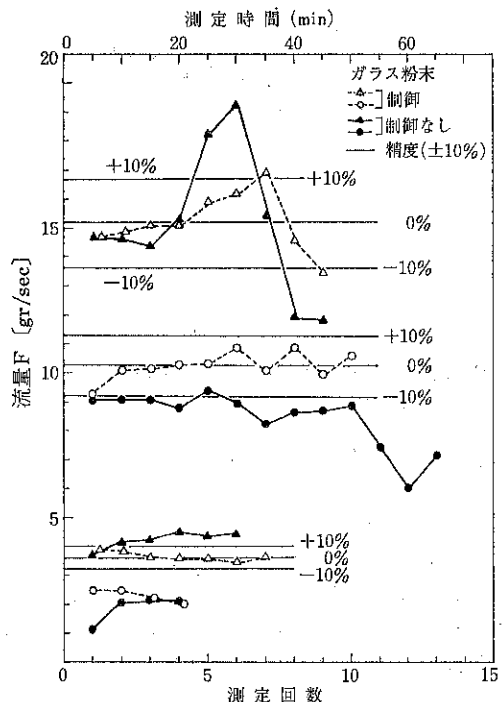


Fig. 11 (a) 流量制御の精度（ガラス粉末）

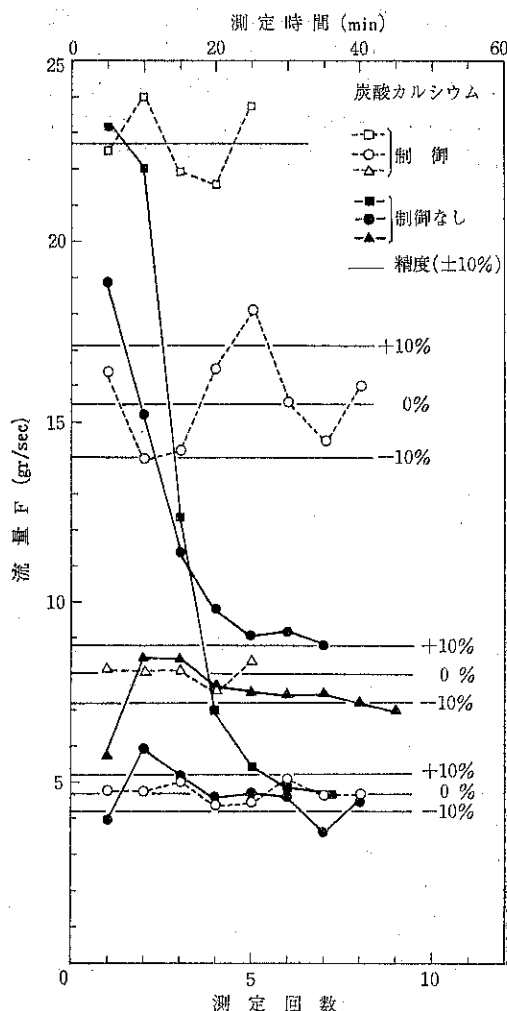


Fig. 11 (b) 流量制御の精度 (炭酸カルシウム)

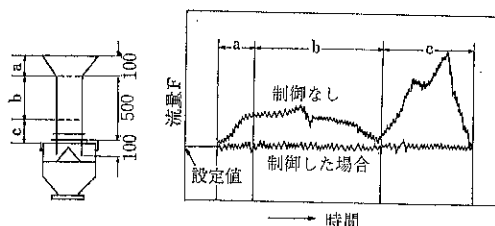


Fig. 12 (a) 貯槽からの排出の記録例 (ガラス粉末)

してきた。振動板面から 20~25cm のところから流量は減少し c 部の振動面から 20cm 以内になると貯槽内粉体が流動化し急激に流量が増えて排出を完了した。この際の最大流量は初期の設定値より 5~6 位大きくなった。これを連続制御すると図に示したように全排出時間一定の平均流量を保ち精度は $\pm 10\%$ 以内であった。

Fig. 12 (b) には炭酸カルシウムについての結果を示し

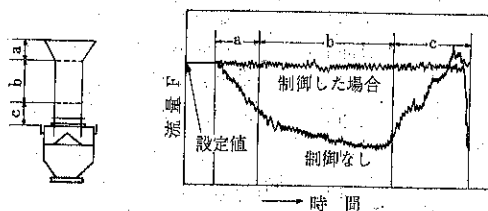


Fig. 12 (b) 貯槽からの排出の記録例 (炭酸カルシウム)

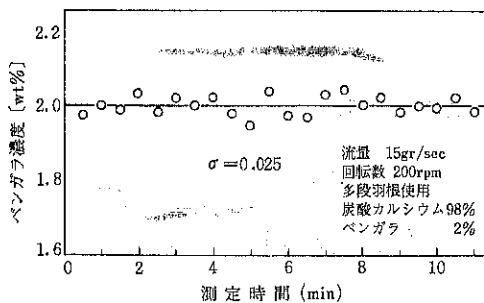


Fig. 13 連続混合機の出口における定常状態での組成変動

た。この粉体は振動によって圧密されて凝集しやすく、したがって流動性が悪くなるためにフロートロンの電圧を一定に保っておくと排出開始時から流量が減少してゆき、貯槽の b の領域内でやや落着くが振動板から 20~25 cm のところで最小となった。この後振動面上の粉体層高が減少するに従い急激に流量が増加し、排出終了前にはフラッシング状態を示した。このような流出状態を示す粉体を制御しながら排出すると図中に示したようにガラス粉末よりはやや劣るが $\pm 10\sim 15\%$ の精度内で定量排出が可能となった。

つぎに Fig. 13 に連続混合機の供給機および排出機として流量制御装置を付けたフロートロンを使用したときの出口における混合物の平均組成変動を示した。使用粉体は白色の炭酸カルシウムと赤色ベンガラで、いずれも微粉で付着性の強いもので入口での混合比は 98 対 2 である。上部の入口供給機からそれぞれ連続投入された粉体は、多段分割羽根で攪拌されつつ下部から定量排出され光电比色法でその組成比が決定された。平均組成は時間的にほとんど変化なく各データの平均値のまわりの標準偏差は 0.02~0.04 程度であり良好な混合状態を得ることができた。

5. 結 言

粉粒体の連続供給排出装置の性能は取り扱い材料の物性値をはじめとして操作条件、装置の構造などに影響さ

れる。ここで使用した電磁式振動円盤型供給機（フロートロン）は振動面形状，流入管間隙，堰の高さなどの構造的な因子および駆動電圧波形によって流出特性が変化した。そこで対象とする粉体の種類によって流量制御に都合の良い・流出特性を示す構造と電圧範囲を実験的に決め，流量検出器と電圧制御装置を組合わせてフロートロンの制御を行なった。その結果，流動性の良い粉体お

よび付着性が強く流動性の乏しい微粉末のそれぞれについて設定流量の±10%の精度で連続排出操作を可能にした。ついでこの装置を連続式混合機の供給および排出側に取り付け，2種の微粉末を連続混合したところ，平均組成が一定で実用上完全に混合された粉体を得ることができた。

豆ニュース

環境問題シンポジウム開かる

—第9回粉体に関する講演討論会より—

8月8日，恒例の「粉体工学に関する講演討論会」が本年は「環境問題」をテーマに，細川鉄工所枚方事務所5階講堂において開催された。

真夏のうだるような暑さの中にもかかわらず，多数の参加者を得たのは，現在の大きな社会問題である廃棄物，大気，排水の処理技術に焦点を合せた企画に関心をもたれたものと思われる。

定刻10時の開会に当中川先生より，粉体工学の研究は狭い専門の視野だけでは十分でなく，広い分野の知識と平行して進めていかなければならないということ，青少年期の教育の問題にたとえて話され，挨拶にかえられた。

吉田先生の御講演は，昨年9月，調査団の団長として見学されたヨーロッパ各地の固形廃棄物処理の現状に興味深く話された。

井伊谷先生は，アメリカにおける乾式集じんの研究の体制，機関，組織について説明され，その研究活動の状況を多くのスライドにより具体的に示された。

矢野先生は排水処理における各種の方法について述べられた後，大阪府立大学に建設された実用規模の処理プラントについて実運転データの詳細を解説された。

これは学長の依頼により矢野先生がチーフとして立案，設計，建設されたもので，大学で排出する汚水を三種の系統に分けて処理し下水に排出している。

東門常務は，湿式集じん装置（ホソカワマイクロエレクトロフィル）についてその特徴，適用，性能等について解説された。

この後，吉岡先生の手際よい司会により，狩野先生（静岡大学）のスイスのゴミ処理システムにおける空気輸送について，つっ込んだ質問や松山先生（関西大学）の電気集じんは粉じん濃度のうすい建屋集じんのような超大容量用に向けるべきだとの提言，また石原産業，竹内氏の排水処理においては原料サイドの変動によって，計画値と実際のずれがあまりに大きいこと，計測のむずかしさなどの体験がコメントされ，40分の討論時間は熱気のうちに過ぎた。

細川副社長の講師の先生方，参会者への謝辞があり，午後5時，身近な問題を追求した今年の講演討論会は拍手と共に終了した。

プログラム

開会挨拶 京都大学名誉教授

粉体技術談話会々長 中川有三氏

講演 ヨーロッパにおける固形廃棄物処理の見聞
大阪府立大学教授 吉田哲夫氏

講演 アメリカにおける乾式集じんの開発状況
京都大学教授 井伊谷鋼一氏

講演 排水処理施設の問題点と実際
大阪府立大学教授 矢野武夫氏

講演 ホソカワ／マイクロ エレクトロフィル
（湿式電気集じん機）について

総括討論 司会 京都大学教授 吉岡直哉氏
株細川鉄工所常務取締役 東門栄一氏

試作流動乾燥機「エスカレート・ドライヤー」の特性

The Characteristics of New Dryer "Escalate-Dryer" with Fluidized Bed

横山 藤平* 中川 文雄* 彼谷 憲美*
Tohei Yokoyama Fumio Nakagawa Noriyoshi Kaya

Abstract

A test dryer of a fluidized bed type has been built utilizing the pneumatic escalator developed by Shinohara, Tanaka, et al. Applicability of the pneumatic escalator as the dryer has been evaluated and as the result of experiments it was found that the new device could be made available for industrial drying applications with a certain modifications of its baffle plates and air box.

It should be noted, however, that neither equation of the apparent velocity of particles nor the residence time distribution of particles for the pneumatic escalator can be applied as it is for the new dryer. New test device has a high value of overall heat capacity coefficient, which was found to be subject to the residence time as well as the inlet air temperature. It was also found that the heat efficiency is related with the feed capacity and inlet air temperature.

著者摘録

篠原・田中らによって考案されたニューマチック・エスカレーターを応用した流動乾燥機を試作した。この試作機の乾燥装置としての適用性を検討し、その結果、装置構造を多少変えることによって実用化が可能であることが判った。

しかしニューマチック・エスカレーターのモデルに基づく粒子の見掛移動速度と滞留時間分布の式を直接適用することには多少問題があると認められる。

また本装置においては総括熱容量係数は大きな値を示すが、これは粒子の静止時の流動層高さが小さいことによるもので、粒子見掛移動速度と入口空気温度に影響を受ける。また熱効率も粒子見掛移動速度に関係し、熱効率を最大とする処理量、入口空気温度が存在すると考えられる。

1. はじめに

粉粒体の空気による輸送装置の一つとして、粉粒体を流動化し、次々に隣りのセルに移動させ、上方へも輸送可能な Pneumatic Escalator が田中・篠原らによって試作研究されている^{1),2)}。この Pneumatic Escalator

の応用分野を広げるため、乾燥操作を伴う実用規模の Pneumatic Escalator を試作し、これをエスカレートドライヤー（商品名）と名付けた。この試作機を用いて 2, 3 の試料による乾燥実験を行い粒子見掛移動速度を中心に乾燥特性を検討し若干の知見を得たので報告する。

2. 流動乾燥装置

試作した流動乾燥装置は Fig. 1 に示すとおり、分散板の上に一定の間隔で仕切板が設置されている。この仕

* 細川粉体工学研究所
(〒573 枚方市招提田近 1-9)
Tel (0720)57-3721

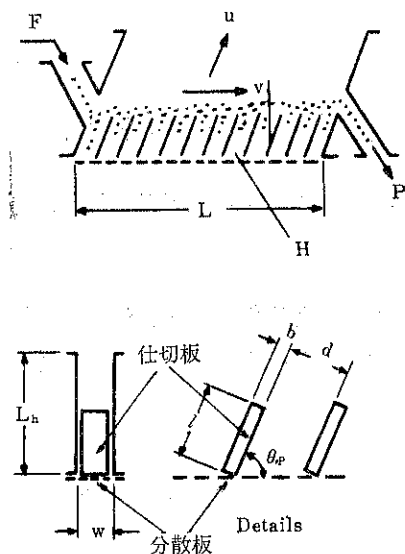


Fig. 1 流動乾燥装置（本体）

Table 1 装置諸元

	ℓ (cm)	d (cm)	w (cm)	b (cm)	L (cm)	θ_p (°)
篠原・田中 らの装置 ¹⁾	5	0.5	1.5	0.3	50	63
本装置 ²⁾	10	9.7	15	0.2	150	75

注 1) 各種の寸法の装置で実験されているため、代表例のみを示す。

2) 材料投入口付近で ℓ , d の値は変化している。

切板は流動層本体ケーシングとは別の枠に取付けられ、取りはずしが自由で、仕切板傾斜角も任意に調整できる。

なお本装置と Pneumatic Escalator との主な構造上の相異点として。

1) 材料投入口付近での湿潤粒子の付着、固結を防ぐため仕切板長さ ℓ を短かく、間隔 d を長くしてある。

2) 入口部での粒子—ガスの接触を促進させるため、多量の熱風を入口部へ送るような空気室に案内羽根を設けてある。

3) 多孔板を利用した分散板も、材料投入口付近では孔径を大きくとり、熱風の通過をよくするようになっている。

投入口から流動層内へ供給された粒子は、入口部の多量の熱風によって分散され、仕切板で分けられたセルへ吹き飛ばされる。分散板を通過した空気が仕切板の傾斜によって、粒子を出口方向へ送り出す作用をする。その

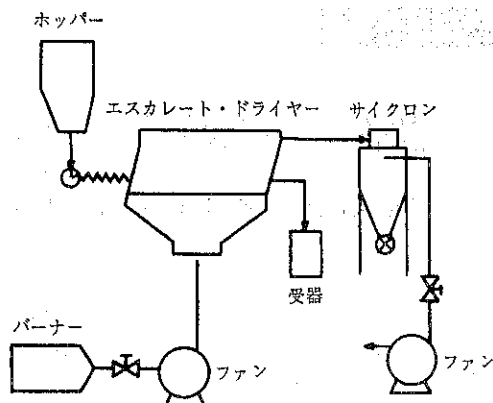


Fig. 2 流動乾燥装置フローシート

ため粒子はセル内で回転運動を伴いながら次々と隣りのセルへ移動し最後に排出口より製品として排出される。

Fig. 2 に本実験のフローシートを示す。都市ガスを炉で燃焼させ、その熱風を直接、流動層へファンで送り込み、風量は加熱炉の後にあるバルブによって調節する。試料は適当な供給機を通してホッパーから流動層へ供給する。本実験ではスクリーフィーダーとフロートロンを使用した。製品は直接、流動層排出口から取り出されるか、微粉の場合はサイクロンを経て回収される。

3. 実験方法

試料は Table 2 に示した物性の関東ローム粉および鋳物砂を用い、原料に予め水を加えて原料の含水率を一定にするよう

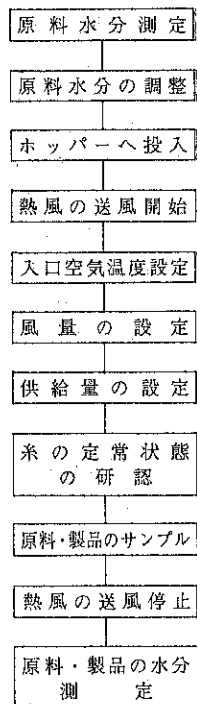


Fig. 3 実験方法の手順

Table 2 実験に用いた試料

	鋳物砂	関東ローム
粒 度	-20/+150 mesh $D_p = 298 \mu$	-42/+145 mesh $D_p = 210 \mu$
密 度	2.6 g/cm ³	3.1 (砂鉄分もかな) り混入
物 性 および形状		焼成粉につき porosity に富む

調製した、風量・原料供給量を設定して運転を開始、流動層からの排出量が一定になった時点から系が定常状態になったと考え、原料・製品のサンプルを採取した後、装置の運転を停止してサンプルの含水率を測定する。最後に装置内のホールドアップを測定する。この実験方法の手順を Fig. 3 に示す。

4. 実験結果および考察

4.1 粒子見掛け移動速度

ホールドアップH、原料供給量F、製品排出量Pを測定し、流動層長さLから粒子見掛け移動速度 v_{exp} を次式で計算する。

$$v_{exp} = \frac{FL}{H} = \frac{PL}{H} \quad (1)$$

篠原らは Pneumatic Escalator の粒子見掛け移動速度 v_{cal} に関して、実験式(2)を提案した¹⁾。

$$\begin{aligned} \frac{v_{cal}}{\sqrt{gD_p}} &= 110 \left(\frac{u}{\sqrt{gD_p}} \right)^{0.87} \left(\frac{F}{\rho \sqrt{g} d^{2.5}} \right)^{0.72} \\ &\quad \left(\frac{D_p}{d} \right)^{-0.52} \left(\frac{\rho_p}{\rho} \right)^{-1.2} \left(\frac{b}{d} \right)^{0.061} \\ &\quad \times \left(\frac{w}{d} \right) \left(\frac{1}{d} \right) \left(\frac{\rho \sqrt{g} d^{1.5}}{\mu} \right)^{-0.44} \\ &\quad \times (\cos(\theta_p + \theta_i))^{0.88} (\sin \theta_p)^{-0.79} \quad (2) \end{aligned}$$

(1), (2)式による粗見掛け移動速度 v の比較を Fig. 4 に示す。これより本装置の粒子見掛け移動速度 v は計算値より約4倍速いことが判った。

また、Pneumatic Escalator の滞留時間分布は次式で示される²⁾。

$$\phi(\theta) = \sum_{m=0}^N \frac{N C_m B^{2m} (1-B)^{N-m} N m \theta^{m-1}}{e^{BN\theta} (m-1)!} \quad (3)$$

ただし

$$B = 0.003(350 - u) F^{0.076} \sin(\theta_p + \theta_i) \quad (4)$$

(3), (4)式から求められる滞留時間分布と本装置の実験から得られる分布の比較例を Fig. 5 に示す。ただしこの滞留時間分布の測定では乾燥実験と異なり、湿っていない鋳物砂を試料に、トレーサーとして塩を用いて硝酸銀で滴定する Mohr 法に従った。

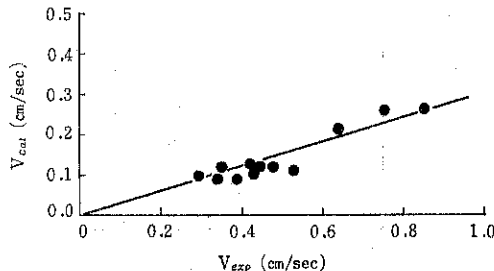


Fig. 4 粒子見掛け移動速度 V の実験値と計算値

乾燥された粒子の流動は全装置内で一様に流動化するが、湿潤粒子の流動乾燥ではガス-材料間の流れが十字流であり、材料入口部では水分に富み、付着性が強く塊になりやすく、流動化が困難であるのに対して、排出口付近では粒子は乾燥されているため容易に流動化する。そのため装置内で材料の入口・出口方向に流動化の状況が変化し、流動化による粒子の流動高さも粒子が乾燥されるに従い高くなり、微粉も多く観察される。そのため滞留時間分布の測定は実際の乾燥操作と系が多少相異なるものの、一応の目安になると考えられ、Fig. 5 から判断すると、装置構造上の相異によって流動化の様子が異なっているため、Fig. 4 に示される計算値と実験値の差が生じたものと考えられる。

4.2 乾燥特性

総括熱容量係数 ha の計算には、本装置を横型連続流動層とみなして、乾燥期間を表面蒸発、材料加熱の両期間に分けて次のように計算する³⁾。

イ、表面蒸発期間

表面蒸発期間については次のように仮定する。(Fig. 6)

- (1) 流動層内温度は全て均一である。
- (2) 材料表面で飽和状態にあり、材料温度は接する熱風温度 T_{A1} の湿球温度 T_w である。

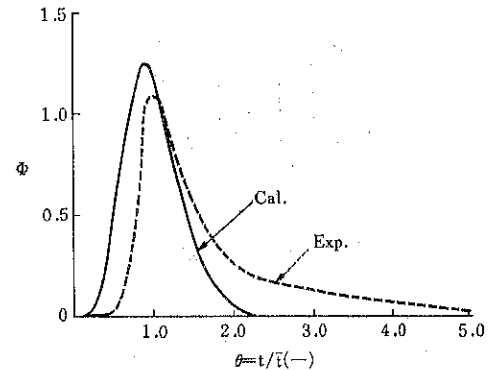


Fig. 5 滞留時間分布の比較例

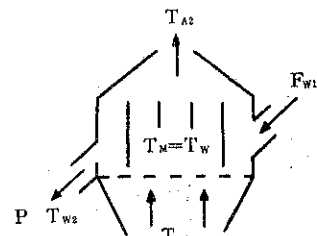


Fig. 6 表面蒸発期間

以上のような仮定から熱収支をとり

$$q = F(\omega_1 - \omega_2)r_w = G C_H(T_{A1} - T_{A2})A \\ = haz(T_{A1} - T_w)A \quad (5)$$

(5)式から総括熱容量係数 ha は

$$haz = G C_H / \left\{ \frac{G C_H A (T_{A1} - T_w)}{F r_w (\omega_1 - \omega_2)} - 1 \right\} \quad (6)$$

ロ、材料加熱期間

材料加熱期間では次の仮定をおく。(Fig. 7)

- (1) 材料の限界含水率は充分低く、水分は表面蒸発期間で蒸発されてしまう。
- (2) 材料は表面蒸発期間での湿球温度 T_w から製品排出温度 T_{M2} まで加熱される。

以上2つの仮定から、流動層微小底面積 dA に関して

$$dq = F C_M dT_M = G C_H (T_{A1} - T_{A2}) dA \\ = haz(T_{A2} - T_M) dA \quad (7)$$

(7)式を整理して積分すると

$$haz = G C_H / \left\{ \left[\frac{G C_H A}{F C_M} / \ln \left(\frac{T_{A1} - T_{M1}}{T_{A2} - T_{M2}} \right) \right] - 1 \right\} \quad (8)$$

流動層内に材料を供給してからの出口空気温度、流動層内温度、含水率、排出量の経時変化を Fig. 8 に示す。この場合、平均滞留時間 $\bar{t}$ は $\bar{t} \approx 6$ (min) 程度で

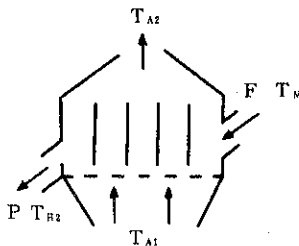


Fig. 7 材料加熱期間

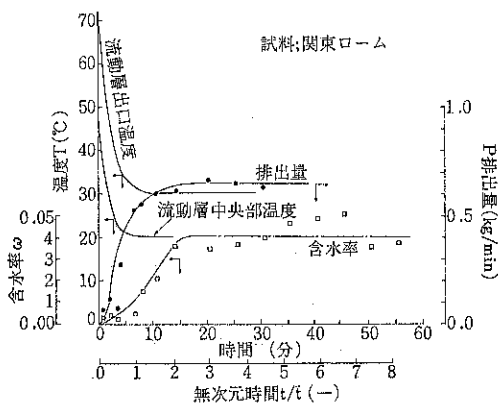


Fig. 8 連続運転テスト経時変化の例
試料：関東ローム

あった。したがって流動層の出口空気温度、流動層内温度は無次元滞留時間 $\theta = t/\bar{t} = 1$ 程度で、含水率、排出量に関しては $\theta \approx 3$ 程度で定常値に達している。そこで実験は流動層内温度が一定値に達した後、2~3倍程度の時間を経過した測定値から(6)、(8)式を計算することにした。

求められた総括熱容量係数 ha を粒子見掛け移動速度 v に対してプロットしたのが、Fig. 9 である。これより総括熱容量係数 ha は入口空気温度 T_{A1} をパラメーターとする粒子見掛け移動速度 v の関数で示されるようである。本実験条件では静止時の流動層高さ z が極端に小さく、入口空気温度が大きく作用する分散板、流動層本体ケーシングの温度の影響を受けて総括熱容量係数 ha が大きな値を示し、また入口空気温度のパラメーターとして表わされたものと思われる。

また一般に流動層では総括熱容量係数 ha から伝熱係数 h を分離して、ヌッセルト数 Nu とレイノルズ数 Re の無次元数の形で整理している。粒子比表面積 a は次式で示される。

$$a = \frac{6 \rho_B}{\rho_p D_p} = \frac{6(1-\epsilon)}{D_p} \quad (9)$$

(9)式を用いて、求められた総括熱容量係数 ha から伝熱係数 h を分離して

$$Nu = \left(\frac{h D_p}{\lambda} \right) \quad (10)$$

$$Re = \left(\frac{D_p v \rho}{\mu} \right) \quad (11)$$

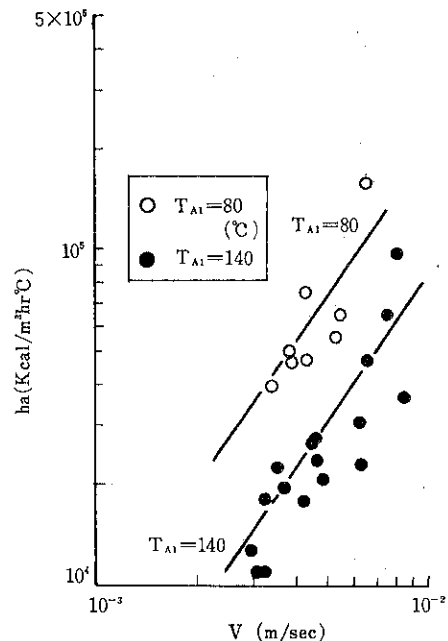


Fig. 9 粒子見掛け移動速度 V と総括熱容量係数 ha

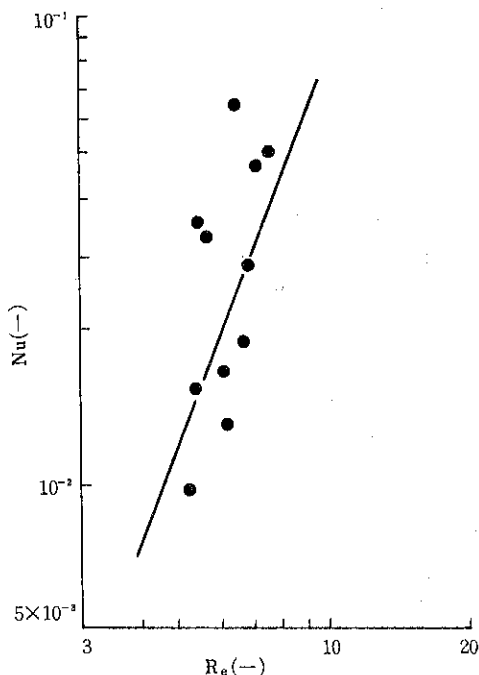


Fig. 10 Nu と Re の関係

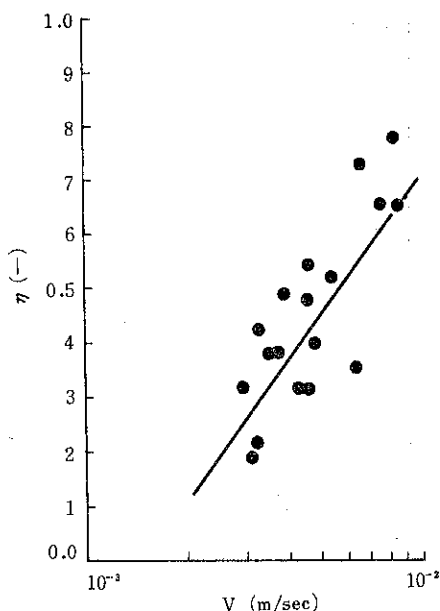


Fig. 11 粒子見掛け移動速度Vと熱効率 η

(10), (11)式の無次元式で整理すると Fig. 10 に示される
とおり, (12)式を与える.

$$Nu = 1.8 \times 10^{-4} Re^{2.7} \quad (12)$$

また熱効率 η を, 熱風生成熱量に対する実乾燥に要した
熱量の割合として次式で定義する.

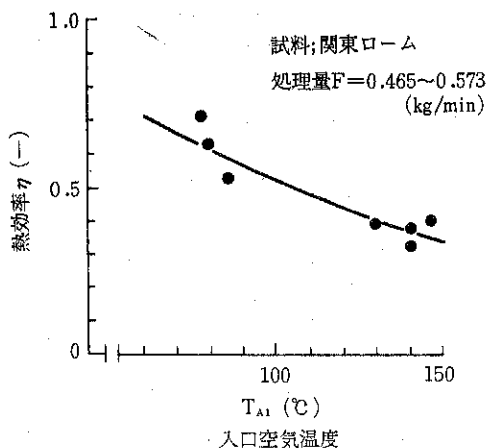


Fig. 12 入口空気温度 T_{A1} と熱効率 η との関係

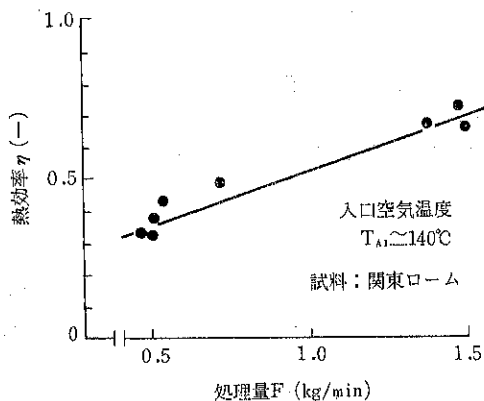


Fig. 13 処理量 F による熱効率 η の影響

$$\eta = \frac{F(\omega_1 - \omega_2)[r_w + C_w(T_{M2} - T_{M1})] + FC_M(T_{M2} - T_{M1})}{GC_H(T_{A1} - T_{A2})} \quad (13)$$

(13)式から求められる熱効率 η と粒子見掛け移動速度 v と
の関係を Fig. 11 に示した. これより熱効率 η は総括熱
容量係数 ha と同様, 粒子見掛け移動速度 v が大きくなれ
ば増加の傾向にある. Fig. 12 は処理量を一定にして入
口空気温度 T_{A1} と熱効率 η との関係を求めたもので,
高温熱風を多量に吹き込んでも, 排気温度の上昇による
熱効率の低下を招くことが判る. しかし熱効率は一方
で, 処理量にも影響されることが Fig. 13 から認められ
る.

5. 結 論

Pneumatic Escalator を応用し, 実際の乾燥操作へ
の適用性を検討した結果, 次のことが判った.

- 1) Pneumatic Escalator を乾燥装置として利用す
るのは可能であるが, 湿潤粒子の流動を円滑にする

ため、供給部において装置構造を多少変える必要がある。したがって田中らによって Pneumatic Escalator から導びかれた粒子の見掛け移動速度に関する実験式は係数を変えることにより適用可能になると思われる。

- 2) 総括熱容量係数は大きな値を示す。これは静止時の流動層高さが小さいことによるものと考えられ、入口空気温度の影響を受ける結果となっている。
- 3) また総括熱容量係数は粒子見掛け移動速度に関連するが、これは滞留時間が作用しているものと思われる。
- 4) 熱効率も粒子見掛け移動速度に関連し、入口空気温度と処理量に依存している。それゆえ熱効率を最大とする熱風温度と処理量の最適値が存在する。

以上の結果から、本装置では Pneumatic Escalator から導びかれた実験式の係数を変えることで、仕切板角度、長さ間隔等を変えることによって滞留時間の調整が可能であり、粒子見掛け移動速度が大きい方が熱効率、総括熱容量係数も高いので、熱感受性が著しく、長時間乾燥には不向の合成樹脂、食品等の材料の乾燥に適するものと思われる。

6. あとがき

本装置は Pneumatic Escalator を実用規模の乾燥操作に応用する目的で試作されたもので、仕切板の角度、寸法などの構造を変えることにより粒子の滞留時間の調整を可能にすることを特長とする。

一般に連続粉体乾燥装置の供給方法については材料の性質に応じてケースバイケースで適当な型式を選ぶ必要があり、またこれは装置設計上の重要な技術的課題である。本機もこの範ちゅうにあり現在のところ試料、データ共に多くはないが、今後更に広範囲の材料に対して、実験条件を変えて検討を進めてゆくつもりである。

〔註〕 本乾燥装置は“ホソカワ/ミクロン・エスカレータードライヤー”と名付けられ細川鉄工所化学システム事業本部において商品化された。

記 号

- A : 流動層底面積
a : 粒子比表面積
B : 仕切板間のセル内粒子移動率

- b : 仕切板厚さ
 C_H : 空気湿潤比熱
 C_M : 材料比熱
 C_w : 液比熱
 D_p : 粒子径
d : 仕切板間垂直距離
F : 無水材料供給量
G : 風量
H : ホールドアップ
ha : 総括熱容量係数
h : 伝熱係数
l : 仕切板長さ
 $<L$: 流動層全長
N : 仕切板間のセル数
 N_u : ヌッセルト数
P : 製品排出量
 R_e : レイノルズ数
 T_A : 空気温度
 T_M : 材料温度
 T_w : 湿球温度
u : 空塔速度
v : 粒子見掛け移動速度
w : 流動層幅
z : 流動層静止時の高さ
 τ_w : 蒸発潜熱
 ε : 空隙率
 η : 熱効率
 θ : 無次元時間
 θ_p : 仕切板傾斜角
 λ : 空気熱伝導度
 μ : 空気粘度
 ρ : 空気密度
 ρ_B : カサ密度
 ρ_p : 粒子密度
 ω : 含水率

引用文献

- 1) Shinohara, K and T. Tanaka : J. Chem. Eng. Japan, 5, 279 (1972).
- 2) Shinohara, K and T. Tanaka : ibid, 6, 447 (1973).
- 3) 桐原良三 : 乾燥装置 p. 271 (1966, 月刊工業新聞).

研究報告

エジェクター・フィーダによる凝集粉体の分散

Dispersion of Agglomerated Powders by Ejector Feeder

渡辺 始* 松野 孝好* 中田 好洋*
Hajime Watanabe Takayoshi Matsuno Yoshihiro Nakada

著書摘録

凝集性微粉体の乾式分級を行なう場合に、分級帯に凝集したまゝで微粉が入ると見かけ上大きい粒子となって粗粉側に出て分級効率を低下させることがある。筆者らは凝集性粉体としてフライアッシュを用いて絞り部分のない簡単なエジェクター・フィーダで供給と分散を同時に行ない次のことがわかった。

- (1) 分散が最大になるノズル位置は $l = kD - d/2$ で表示できる。又この点は供給口の負圧の最大の点と一致する。
- (2) 分散には流体の加速力の外に吸引力が十分効果がある。
- (3) 不完全分散の平均粒子径と試料（完全分散）平均粒子径、初期平均粒子径の間の相関関係は $\bar{d}_s = A \cdot \bar{d}_{s0} \cdot e^{-Bv} + \bar{d}_{s0}$ で示される。
- (4) 実験範囲では、供給粒子濃度の影響はなかった。

1. 緒 言

エジェクター・フィーダは粉粒体の実験室用供給装置として広く用いられている。森¹⁾らは1本の管をノズルとして、絞り部分のない単純なエジェクター・フィーダを用いて粉粒体の吸い込み実験を行ない、吸引速度に関する実験式を導いている。筆者らは、この単純なエジェクター・フィーダを用いて、その吸引力と加速力を利用し、凝集粉体の供給と分散とを同時に行なう方法を先に発表した²⁾、その分散効果について不明な点があるため、装置の一部を改良して実験的研究を行なった。

2. 実験装置

実験に用いた装置を Fig. 1 に示す。ベピコンはオイルフリー、自動アンロード式 3.7 kW で、エアートランスホームで水分の除去を行なった。ノズルは黄銅管で分散実験に使用したものは内径 D_N は 2.4 mmφ で、負圧測定には、1.5 mmφ、3.9 mmφ のものも用いた。分散

管はガラス管で 16.8 mmφ×150 mm、ノズルの位置は変えられる。

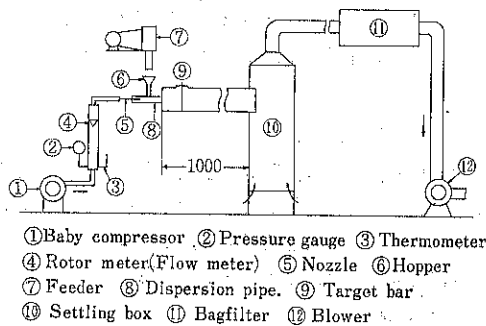


Fig. 1 Experimental equipment

粒子衝突棒（捕集棒）は半円柱形で 3 mmφ×60 mm で平面側を上流に向けてセットした。

沈降室は 500 mm×1,000 mm×1,500 mm で下部から空気を自由に吸い込み衝突棒付近の気流の流速に影響を与えないように注意した。分散した粉体はバッグフィルターで除去した。

エジェクター・フィーダの詳細図を Fig. 2 に示す。

2.1 実験方法及び結果

* 静岡大学工学部化学工学科
(〒432 浜松市城北 3-5-1)
Tel 0534-71-1171

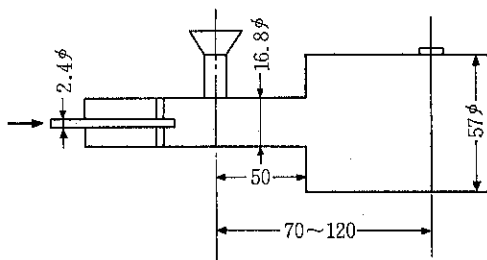


Fig. 2 Ejector feeder

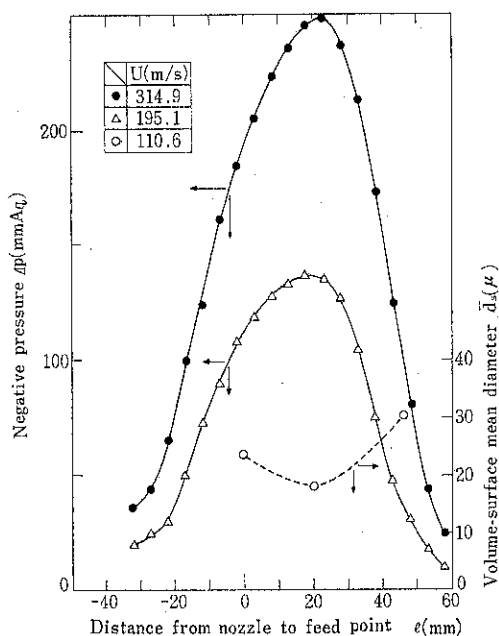


Fig. 3 Effect of nozzle position

(a) ノズル位置の決定

試料粉体の供給口の負圧は、空気吸引力に比例するとし、供給口の漏斗を外して水柱マンメータをつなぎ、ノズル内径、ノズル流速を変えて、この負圧とノズル位置の関係を測定した。結果の一部を Fig. 3 に示す。

(b) 分散実験

半円柱型の衝突棒の平面側に両面粘着テープを注意してはりつけ、この面を上流側に向けて固定する。衝突棒の位置はノズル流速 U が 59.2 m/s の時、供給口からの距離を 70 mm とし、流速 110.6 m/s 以上の時は、120 mm とした。これは衝突棒に多量の粒子が付着し相互に重なるのを避けるためである。

試料粉体は中電興業のフライアッシュで密度 ρ_s : 2.25 g/cm³ (東芝ベックマン空気比較式比重計による)、粒度分布は家庭用ミキサーを用いて水中に分散させたものを顕微鏡写真にとった。粒度分布測定機で定方向径 d_s

を測定した後、個数分布を求めてから重量分布に換算し、次式に基いて体面積平均径 $\bar{d}_s$ を求めた。

$$\frac{\sum w}{\sum (w/d_s)} = \bar{d}_s \quad \dots\dots\dots (1)$$

試料の体面積平均径 $\bar{d}_{s0}$: 7.12 μ である。

分散実験はこの試料約 0.01 g ~ 0.05 g を瞬時的 (約 0.3 秒 ~ 0.5 秒) にスムーズ・オートフィーダから漏斗型ホッパーを通して供給した。ノズル位置は負圧が最大の位置である。ノズル流速 U はロタメーターで測定し、圧力および温度の補正をしたもので、59.2 m/s, 110.6 m/s, 195.1 m/s, 314.9 m/s である。温度および湿度は室内のそれであるが、湿度は相対湿度でおよそ 50% ~ 75% で、雨等のため特に高い日 (80% 以上) は実験を中止した。

(c) 分散粉体の粒度分布測定

(b) の方法により凝集粒子の付着した両面粘着テープを衝突棒から注意してはがしとり、スライドガラスにていねいに張り付ける。これから約 30 枚顕微鏡写真にとり、前述の方法で重量分布を求める。測定個数は約 2,000 ~ 3,000 個である。また、(1) 式に基いて体面積平均径 $\bar{d}_s$ を求めた。これらの実験結果の一部を Fig. 4, Table 1, Photo. 1 に示す。

(d) 供給 (初期) 粒子径 ($\bar{d}_{s0}$) の測定

スムーズ・オートフィーダの出口で両面テープを張った顕微鏡用スライドガラスを手で横に移動させ、落下付

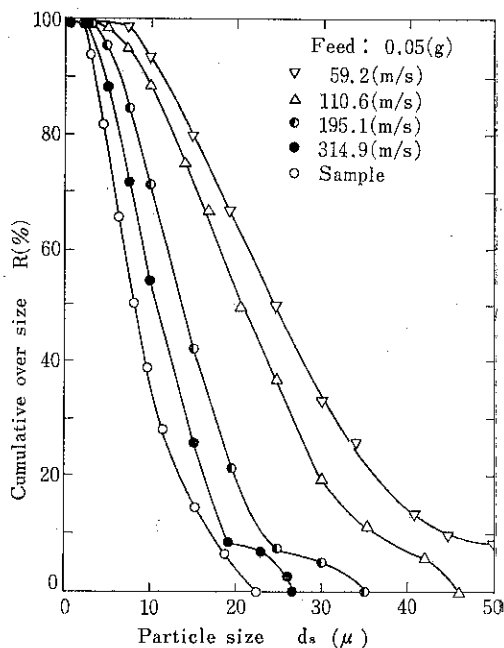


Fig. 4 Particle size distribution of dispersed powders

Table 1: Volume-surface mean diameter of dispersed powders (d_s) (μ)

Nozzle velocity Feed (g) U (m/s)	314.9	195.1	110.6	59.2
0.05	8.90	14.40	17.58	21.55
0.044	10.02	14.28	15.22	16.82
0.012	7.95	14.29	17.95	18.17
Perfect dispersed powders (Sample)	$\bar{d}_{sc} : 7.12$			
Initial powders (Feed)	$\bar{d}_{so} : 493.2$			

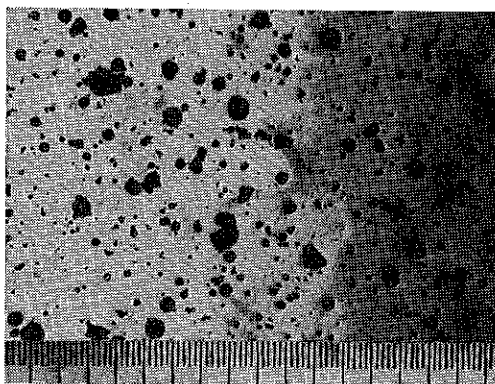


Photo. 1. Dispersed agglomerated powders (Scale : $10\mu/\text{div.}$) $U : 59.2\text{m/s}$

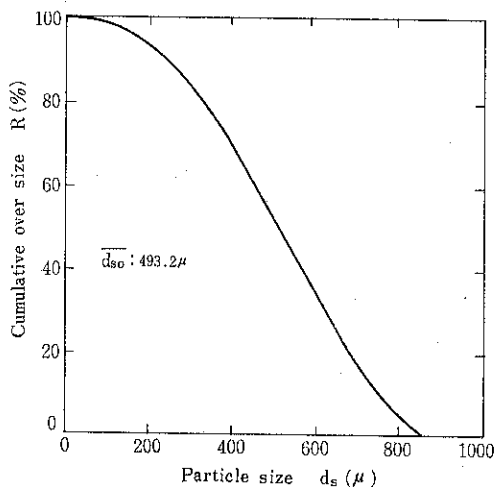


Fig. 5 Particle size distribution of initial agglomerated powders

着した粒子の粒度分布を測定する。結果を Fig. 5 に示す。体面積平均径 $\bar{d}_{so} : 493.2\mu$ である。

3. 結果の考察

(a) 吸引力の影響

凝集粉体の分散には供給口における吸引力と分散管中の加速力の相乗効果が考えられるので、吸引力がどのようにノズル位置によって変化するかを知ることは重要なことである。筆者らの実験においては Fig. 3 に示したように、分散管内径 $D : 16.8\text{mm}\phi$ ノズル内径 $D_N : 2.4\text{mm}\phi$ 、ノズル流速 $U : 195.1\text{m/s}$, 314.9m/s の時、負圧の最大値はそれぞれ 136mm 水柱, 249mm 水柱であるが、いずれもノズル位置は供給口から後方へ約 22mm の位置であった。この関係は内径の異なるノズルについても同じであった。また分散管内径 D を変えて負圧が最大になるノズル位置を測定した結果を Fig. 6 に示す。これから次の実験式が成立する。

$$\ell = kD - d/2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

k : 実験定数で実験条件により定まる。ここでは 1.7 である。

この結果からノズルからの噴流が Fig. 7 の点線のような位置になった時に負圧が最大すなわち吸引力が最大になると考えられる。

また、Fig. 3 には右縦軸に分散粒子の体面積平均径 $\bar{d}_s$ を点線でプロットしてある。これはノズル流速 U が 110.6m/s の場合におけるノズル位置を変えて行った分

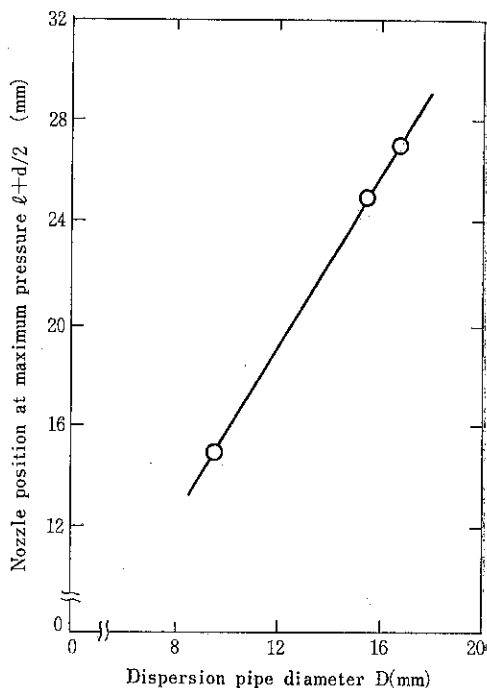


Fig. 6 Nozzle position at maximum negative pressure vs. dispersion pipe diameter

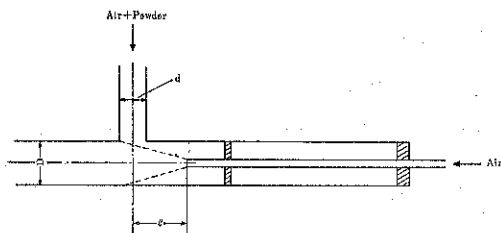


Fig. 7 Nozzle position at maximum negative pressure

Table 2: Efficiency of impaction for ribbon ($Re_t > 1 \times 10^3$) (%)

$d_s (\mu)$	1	3	5	7	10	20
U (m/s)						
5	0	3	30	52	68	88
10	0	19	52	68	80	92
20	0	44	67	80	88	94
40	2	60	80	88	92	97
50	3	66	82	90	93	98
70	10	70	87	91	94	99
100	22	76	90	93	95	100
200	47	87	93	95	98	100

散実験結果であるが、負圧が最大のところで $\bar{d}_s$ が最小になることを示している。これから吸引力が分散に有効であることがわかった。

(b) 凝集粒子の衝突効率

筆者らの使用した衝突棒は半円柱型の平面側を衝突面としているので文献³⁾のリボン型衝突棒に基いて衝突効率の計算を行った。衝突棒の直径 D_t を $3\text{ mm}\phi$ とし、これに対する空気速度を 5 m/s としてそのレイノルズ数 (Re_t) を求めたところ 1×10^3 であるので、この文献の衝突効率は十分使用できる。これに基いて衝突効率を計算した結果を Table 2 に示す。この表から直径が 1μ の粒子に対しては衝突効率は低いが、試料粉体の粒度分布から推定して分散した凝集粒子中には 1μ 以下の粒子は非常に少ないことが予想される。

また衝突棒を供給口から 70 mm のところにセットした場合、ノズル流速は 59.2 m/s であり、衝突流速も 50 m/s 以上になることを熱線風速計で確認してある。この場合には計算上表から 3μ の粒子で 66% 以上の衝突効率が予想されるので、筆者らの方法でも十分分散効果を検討することが可能と考えられる。

(c) ノズル流速の影響

Fig. 4 からこの実験範囲でノズル流速が早くなるに従

ってよく分散して、完全分散の状態に近づくことがわかった。

(d) 供給粒子濃度の影響

筆者らの実験範囲の濃度においては Table 1 に示す如く供給粒子濃度の影響は、測定誤差を考慮すれば殆んど差は認められなかった。

以上の結果を総合して、Fig. 8 に示すようにセミログ紙上に (凝集粒子平均径 - 完全分散粒子平均径) すなわち $(\bar{d}_s - \bar{d}_{so})$ 対ノズル流速 U をプロットすると、ほぼ 1 本の直線が得られた。これから次の実験式を得た。

$$\bar{d}_s = A \cdot \bar{d}_{so} \cdot e^{-BU} + \bar{d}_{so} \quad \dots\dots\dots (3)$$

A, B は粒子の物性及びその他分散条件により定まる定数である。この実験では $A : 3.9 \times 10^{-2}$, $B : 6.8 \times 10^{-3}$ であった。

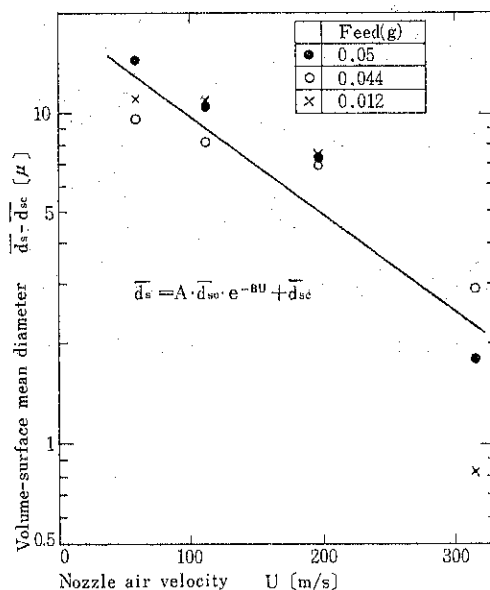


Fig. 8 Volume-surface mean diameter vs. nozzle velocity

これらのことから凝集粉体はノズル流速が 59.2 m/s で初期粒子径の約 $1/100$ まで細くなるが、流速が増えるにつれてその減少率が低下し、 314.9 m/s の高速になってもまだ完全分散しない。すなわちフライアッシュは他の多くの凝集性粉体に比べると粒子径も比較的大きく、凝集性も小さい方⁴⁾であるが、濃度がこの実験範囲になると完全分散し難いことが判明した。これらのことが凝集性粉体の乾式分級の分級効率の向上を非常に困難たらしめている原因の一つになっていると考えられる。

4. 結 論

絞り部分のない簡単なエジェクター・フィーダを用い

て凝集性粉体であるフライアッシュの分散実験を行い、次のことがわかった。

(1) 分散が最大になるノズル位置は負圧の最大位置とほぼ一致する。その位置は(2)式で示される。

(2) 分散には流体の加速力の外に供給口における吸引力が有効である。

(3) 凝集粒子平均径と供給（初期）凝集粒子平均径および完全分散粒子平均径との間には(3)式の関係が成立する。

(4) 凝集性粉体をある濃度以上で乾式分級を行う場合は、粒子同志が相当凝集して、分級効率を低下させる原因の一つになるであろう。

Nomenclature

A	experimental constant	[—]
B	" "	[—]
D	dispersion pipe diameter	[mm]
D_N	nozzle diameter	[mm]
D_t	target bar diameter	[mm]
d	feed pipe diameter	[mm]
d_s	unidirectional particle diameter	[μ]
$\bar{d}_s$	mean volume-surface diameter	[μ]
$\bar{d}_{s,c}$	mean volume-surface diameter of	

	sample particles	[μ]
$\bar{d}_{s,0}$	mean volume-surface diameter of initial feed particles	[μ]
k	experimental constant	[—]
l	distance from feed point to nozzle	[mm]
Δp	negative pressure	[mmA _q]
Re_t	Reynolds number of target	[—]
U	nozzle air velocity	[m/s]
w	weight of particles in the given size range	[g]
ρ_s	particle density	[g/cm ³]

参考文献

- 1) 森 芳郎, 神保元二: 粉体工学研究会誌, 1, 27 (1964).
- 2) 渡辺 始, 中田好洋, 高橋和士: 粉碎, No. 16, 24 (1971).
- 3) 井伊谷鋼一「粉体工学ハンドブック」朝倉書店 (1965).
- 4) 渡辺 始, 谷村喜代次, 森下英臣, 竹下武成: 粉体工学研究会昭和50年度秋季例会発表.

豆ニュース

産業廃棄物処理機アレックス (特許出願中)の開発

最近乾式集塵機で捕集した粉塵の再飛散が問題となっています。この2次公害を防止するため、ホソカワが後処理用ペレットマシン—アレックスを開発しました。

このアレックスは農ビ、農ポリのフィルムを従来の溶解法によらず機械的にペレット化させることができる等数々の応用の効くオリジナルマシンです。

(特長)

- 機械的に造粒します。
ダストなどの容積が大巾に縮少でき、運搬に便利です。
- 軽量でコンパクトです。
据付が簡単で場所をとりません。
- シンプルな構造。
誰でもすぐ運転ができ、取扱いが簡単です。
- 農ビ、農ポリのペレット化もできます。
溶解処理に比べて低コストで、しかも有毒ガスの発

生の心配がありません。

(標準仕様)

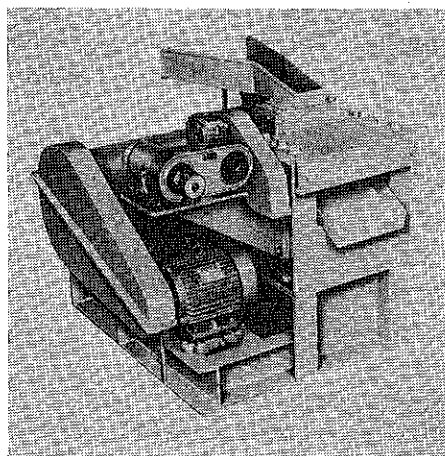
概略寸法; 1100×1100×1000, 概略重量; 1000kg

処理能力; 農業用ビニールで約50~60kg/hr

動力; 5.5kw (メインモータ), 0.4kw (フィードモータ)

主軸回転数; 430r.p.m

(資料その他の問い合わせは鶴細川鉄工所粉体システム事業本部までお願いいたします。)



統計的推定(第2回)

Statistical Inference

菅 沼 彰*

Akira Suganuma

1. ランダム・サンプリング

前回に述べたように、母集団からランダムに標本を抽出し、標本から得られる情報をてがかりにして、確率の法則を活用することによって母集団に関する何事かを推定するのが、統計的推定である。抽出された標本は母集団のごく一部分に過ぎないから、標本をいくらかよくしらべてみたところで、母集団に関して断定を下すことはできないが、確率の法則を活用すれば、母集団に関して統計的推定をすることができるのである。

統計的推定は、標本が母集団からランダムに抽出されたものであることを前提にしている。ランダムに抽出された標本をランダム・サンプル、標本をランダムに抽出する操作をランダム・サンプリングと呼んでいる。ランダムに抽出するということは、いい加減にでたらめに取り出すということではなく、ランダム・サンプルとはいいい加減にでたらめな、質の悪い標本ということでは決してないのである。母集団からその構成要素を1個だけランダムに抽出するということは、母集団を構成しているどの要素について着目してみても、その要素が抽出される確率は他の要素が抽出される確率に等しいような抽出方法で抽出することを意味している。そして、このような抽出を n 回行なって得られた標本が、サイズ n のランダム・サンプルである。

現実に我々が得た標本が、果して厳密な意味でのランダム・サンプルであるか否か、近似的にランダム・サンプルとみなしてもよいか否か、というような問題は大変重要であり、それだけに大変むずかしい問題でもある。この点については私の解説でもいづれ又触れることになると思うが、1個抽出してみたところ、いかにも例外的

に大きなものが出てきたので標本にするのはよそうとか、このところ小さめのものが続くようだから、もう少し大きめのものが出てくるように工夫してみようとか、得られる結果に判断を加えて選別するようなことをしたのではランダム・サンプルにならないことだけは確かである。

母集団からその一部分を標本として取り出す方法には、ランダム・サンプリング以外にもいろいろとあるのではないか。少なくとも、ランダムに取り出すよりはもっとよい方法があるに違いない。ランダム・サンプリングでは、極端に大きなものばかりが抽出されたり、逆に非常に小さなものばかりが抽出されたりして、およそ母集団を代表するのにはふさわしくないような標本が得られることもある。ある程度の判断を加えるようにして、母集団をよく代表しているような標本を選び出すべきではないか。このような疑問が提起されることは珍しくない。ここではまず、R. M. Cormack の回答を紹介することにしよう。

目の前にジャガイモの袋を出されて、「5個のジャガイモを取り出すことによって、袋の中のジャガイモの大きさの分布をしらべなさい」と言われた場合を想像してほしい。貴方ならばどうやって5個のジャガイモを選び出しますか。読者諸君、今すぐにきめてほしい。袋の口のあたりにあるジャガイモを5個取り出すことにしますか。それはまずいでしょう。袋の口のあたりには、小さなジャガイモばかりが集まっているかも知れませんが、何故なら大きくて重いジャガイモは、袋の底の方に沈んでしまっているでしょうからね。いや待って下さいよ。果してそうでしょうかね。小さなジャガイモは、大きなジャガイモの間をすりぬけて、袋の底の方にもぐりこんでいるのではありませんか。貴方はジャガイモが袋の中でどのような配置をとるのか、御存じではなかったのですか。

* 東京大学工学部化学工学科

(〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

Tel 03-812-2111

袋の中へ、毎回違った深さにまで腕をつっこんでジャガイモを取り出すようになさるのですか。なるほど、しかし、いくつかのジャガイモは大きすぎて、貴方にはつかめないかも知れませんよ。いずれにしても、貴方には、つかもうとしているジャガイモの大きさの見当が感触でわかるわけでしょう。非常に小さなイモが手に触れた場合には、それは代表とするのにはふさわしくないと判断して取り出さないことにするつもりでしょうね。貴方は、ランダムに取り出したのでは代表的なものを取り出すことにならないという意見なのですからね。

なるほど、少し小さ目のジャガイモでも取り出した方がよいというわけですか。さて貴方が小さ目のイモを取り出したからには、その影響を補正するために、次は少し大き目のイモを選んで取り出す必要がありますね。そうすれば標本の平均値を正しくしたもつことになりますから。さて次に貴方は、どんな大きさのイモを取り出すつもりなんです……

(R. M. Cormack: "The Statistical Argument" の1節より筆者訳)

Cormack にたたみかけられてみると、「ランダム・サンプリングよりは少しはましなサンプリング」を実行することは、思ったよりもむずかしい、それどころか、多くの場合に非常に困難であることに気がつくであろう。

しかしながら、Cormack 自身も認めているように、熟練したジャガイモ検査人ならば、彼自身も口に出して他人に説明することは困難であるような一種の職業的な勘によって、ランダム・サンプルよりも優れた標本を選び出すことができるかもしれない。たとえば彼は、袋の中へ腕をつっこんだ段階で、腕全体で袋の中のジャガイモという母集団を感じとっているに違いない。しかるのちに彼は、その感じをもとにして、見本にするべきジャガイモを選び出すのであろう。このように考えてみると、「母集団は未知である。未知なものから標本を抽出する段階で、何か判断を加えることができるというのは論理矛盾である。母集団が未知であるというのに、適切な判断で見本を選び出すなどということが、一体どうして可能なのか」というような主張は、必ずしも説得力に富んだ公平な論理ではないように、私には思われる。袋の中へ肩口まで腕をつっこんだジャガイモ検査人にとっては、母集団はもはや決して「全く未知なるもの」ではない筈だからである。彼は、長い間に研ぎ澄まされた職業的な勘によって、袋一杯に詰まっているジャガイモという母集団に関する、さまざまな情報をすでに得ているのである。ただし、こういう職業的な勘とか、名人芸と

か呼ばれるようなものを、客観的に記述したり、解釈したりすることは非常に困難であるから、こういうものを前提にした推測統計学の大家を創出すことは容易でないであろう。

これに反して、ランダム・サンプリングによって得られる標本と母集団との関係は、確率論を武器にして客観的、定量的、そして一般的に解明していくことができる。この点が、推測統計学がランダム・サンプリングを前提にする最大の理由であると言ってよいだろう。

実際のサンプリングは、一般に必ずしも厳密なランダム・サンプリングにはならないが、得られた標本に対して推測統計学の公式や手法を適用するつもりならば、できるだけランダム・サンプルに近い標本が得られるように努力しなければならない。つまり、推測統計学を利用することを前提にするならば、サンプリングの努力目標はランダム・サンプリングであり、推測統計学における理想的な標本はランダム・サンプルである。

2. 統計量

x の母集団からランダムに抽出された標本、

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n \quad (1)$$

は大きさ(サンプル・サイズ) n のランダム・サンプルと呼ばれる。前章の例で言えば、 x は個々のジャガイモの大きさ(たとえば重量)であって、袋の中のジャガイモ全部について、個々に重量を測定して作りあげた数値リストが x の母集団である。そして、袋の中からランダムに n 個のジャガイモを取り出してその重量をしらべた結果が、標本(1)である。 x の母集団を指定しても、抽出がランダムであるから、標本(1)を構成する n 個の数値、 x_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) がどのような値になるかは確率的にしか記述できない。つまり、ランダム・サンプルを構成する数値 x_i は、確率の法則に従ってその数値が変化するような変数——確率変数 X_i とみなすことができる。すなわち、サイズ n のランダム・サンプルは、 n 個の確率変数の組、

$$X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_n \quad (2)$$

であって、ランダム・サンプリングを実行した結果として得られた具体的な数値の組(1)は、ランダム・サンプル(2)の実現値である。

一般に、 n 個の確率変数の任意の関数 t_n を選び、これをサイズ n のランダム・サンプル(2)の関数と考えた場合、すなわち、

$$T = t_n(X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_n) \quad (3)$$

を統計量と呼ぶ。統計量 T は、 n 個の確率変数の関数であるから、それがどのような値になるかは確率的にしか記述できない。つまり、統計量 T は確率変数である。

そして、(3)式の $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ に、その実現値 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ を代入して得られる、

$$t = t_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (4)$$

は、統計量 T の実現値である。

統計量 T の確率分布を論ずる標本分布論が、推測統計学の重要な分野であることは、前回の解説でも述べた。標本分布論が何故重要であるかという点、統計的推定は、適当な統計量 $t_n(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ を選び、この関数にランダム・サンプル(2)の実限値(1)を代入して統計量 T の実現値 t を計算し、 t の値をもとにして母集団に関する推定、判断を行なう操作に他ならないからである。統計量 T は確率変数であるから、 x の母集団を指定しても、 T の分布が定まるだけであって T の値は確定しない。すなわち T の実現値 t の値と x の母集団とは、 T の分布という形でしか関係づけることができないわけである。どのような統計量を選んでみても、その実現値 t の値はサンプリングのたびごとに変動するから、絶対に誤りのない、的中率 100% の統計的推定というものは有り得ない。したがって、 x の母集団がどのようなものであれば統計量 T の分布がどうなるか……がよくわかっていないと、このような統計量 T の実現値 t を使って x の母集団に関する推論を行なうことの根拠や妥当性があいまいになってしまうし、そのような推論の結果がどの程度の的中率を有するか、はずれるとすればどの程度にまでははずれる危険性があるのか、等々がはっきりしないことになる。

3. 点推定の偏り

母集団を指定すればその値が定まるような量を母数と呼ぶ。母数 θ の点推定とは、適当な統計量を選んで、

$$\hat{\theta} = t_n(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (5)$$

を求める推定のことである。母数 θ の値は $\hat{\theta}$ であろうと、ただ 1 点で推定するのでこの名がある。これに対して、母数 θ は多分、 $\theta_1 \sim \theta_2$ の範囲内にあるだろうと推定するような推定は、範囲推定と呼ばれている。統計的推定にはこれ以外にもいろいろなものがあるが、本章では母数の点推定、特に点推定の偏りについて述べることにする。議論を簡潔に進めるため、 x の母集団は、特別にことわらないかぎり無限母集団を考えることにしよう。

母集団における x の密度関数(粉体工学的表現をするならば x の個数頻度関数)を $f(x)$ とすれば、

$$\mu = \int x f(x) dx \quad (6)$$

は x の母平均である。母平均 μ はその名が示すように母集団についての値、すなわち母数であって、母集団全体をしらべないかぎりその値を知ることができない未知数である。母平均 μ の推定値 $\hat{\mu}$ としては、

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

が用いられている。これは、母平均 μ の推定値として標本平均 $\bar{x}$ を使うことに相当する。

$$\sigma^2 = \int (x - \mu)^2 f(x) dx \quad (8)$$

は母分散である。母分散の点推定には、

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (9)$$

が用いられる。母平均 μ の推定値として標本平均 $\bar{x}$ を使うことから考えれば、母分散 σ^2 の推定値として標本分散、

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (10)$$

を使えばよさそうなものであるのに、何故、

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{n}{n-1} s^2 \quad (11)$$

を使うのであろうか。この問に対する答は、ほとんどすべての入門書や教科書に書いてあるので、大部分の読者は先刻承知のはずである。

$\bar{x}$, $\hat{\sigma}^2$, s^2 などは、それぞれ、ランダム・サンプリングで得られた標本から計算して得られる値であるから、もう一度サンプリングをして得られた別の標本から、 $\bar{x}$, $\hat{\sigma}^2$, s^2 などを計算してみると、今度は又、違った値が得られるであろう。こういう作業を m 回くりかえしたとすれば、

$$\left. \begin{array}{l} \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_j, \dots, \bar{x}_m \\ \hat{\sigma}_1^2, \hat{\sigma}_2^2, \dots, \hat{\sigma}_j^2, \dots, \hat{\sigma}_m^2 \\ s_1^2, s_2^2, \dots, s_j^2, \dots, s_m^2 \end{array} \right\} \quad (12)$$

が得られる。 m 個の数値の平均値を考えて、 $m \rightarrow \infty$ の極限における値、

$$\left. \begin{array}{l} E(\bar{x}) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \bar{x}_j \\ E(\hat{\sigma}^2) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \hat{\sigma}_j^2 \\ E(s^2) = \lim_{m \rightarrow \infty} \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m s_j^2 \end{array} \right\} \quad (13)$$

を、 $\bar{x}$, $\hat{\sigma}^2$, s^2 などの期待値(expectation)と呼ぶ。すなわち、ある統計量の期待値とは、サンプリングを無限にくりかえしたときに得られる、統計量の平均値である。ここで注意しなければならないことは、サンプル・サイズは一定値 n に固定したままでサンプリングを無限回くりかえすのだという点である。統計量の期待値は、サンプル・サイズ n を無限大にしたときの極限値ではない。

さて、きわめて簡単に証明できることであるが、 x の

母集団がどのようなものであっても、

$$\left. \begin{aligned} E(\bar{x}) &= \mu \\ E(\hat{\sigma}^2) &= \sigma^2 \\ E(s^2) &= \frac{n-1}{n} \sigma^2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

となることが知られている。 $\bar{x}$ の値は、 μ よりも大きくなることもある一方では、 μ よりも小さくなることもある。 $\bar{x}$ を求める作業を無限に反復して平均したとすると、 μ よりも大き過ぎた場合とがうまくバランス $\bar{x}$ の平均値は正確に μ と一致するのである。 $\hat{\sigma}^2$ についても同様であって、個々の $\hat{\sigma}^2$ の値は大小いろいろであるが、 $\hat{\sigma}^2$ を無限回求めて平均すると σ^2 に一致する。すなわち、 $\bar{x}$ や $\hat{\sigma}^2$ は統計量であるからいろいろな値をとるけれども、 $\bar{x}$ は μ から、 $\hat{\sigma}^2$ は σ^2 から傾向的にどちらかへずれるということはないのである。ところが s^2 はどうであろうか。これも又、統計量であるからには、 σ^2 よりも大きくなったり小さくなったりして、その値がサンプリングのたびごとにバラツキを示すのはしかたのないことであるが、期待値 $E(s^2)$ は σ^2 よりも小さな値になってしまうのは、大変に不都合である。すなわち、 σ^2 の推定に s^2 を用いると、バラツキだけではなくて、 σ^2 を小さ目に推定する傾向が現われる。

一般に、ある母数 Γ の点推定にある統計量 g を選んだ場合を考えると、統計量 g の期待値 $E(g)$ と、推定すべき母数 Γ との差、

$$B(g) = E(g) - \Gamma \quad (15)$$

を Γ の推定量 g の偏り (bias) と呼ぶ。 $B(g) = 0$ ならば g は Γ の不偏推定量であって、 g を求めてその値を Γ の推定値にする推定の誤差はバラツキだけである。しかしながら $B(g) > 0$ であれば、 g は正の偏りを有する推定量であるから、 g で Γ を推定する点推定にはバラツキの他に、 Γ を過大に推定する傾向的な誤差があることになる。逆に、 $B(g) < 0$ ならば、 g で Γ を推定すると Γ を過小評価する誤差が現われる。Eq. (14)と Eq. (15)により、

$$B(\bar{x}) = E(\bar{x}) - \mu = 0 \quad (16)$$

$$B(\hat{\sigma}^2) = E(\hat{\sigma}^2) - \sigma^2 = 0 \quad (17)$$

となり、 $\bar{x}$ による μ の点推定、 $\hat{\sigma}^2$ による σ^2 の点推定は偏りのない推定である。そこで $\hat{\sigma}^2$ を標本分散 s^2 と区別する名前として、不偏分散という言葉が用いられている。標本分散は、同じく Eq. (14)と Eq. (15)により、

$$B(s^2) = E(s^2) - \sigma^2 = -\sigma^2/n \quad (18)$$

となるので、 s^2 で σ^2 を推定すると小さ目の値になる傾向がある。すなわち s^2 には負の偏りがある。

以上が、母平均 μ の推定には標本平均 $\bar{x}$ を用いるにもかかわらず、母分散 σ^2 の推定には標本分散 s^2 を用いないで、それを修正した不偏分散 $\hat{\sigma}^2$ を用いる理由である。

このこと自体は、先に述べたように、どの本にも書いてあり、誰もが知っていることであるが、この解説でこの例を引用した狙いは、推定量の偏りということの意味を明確に認識していただくことにある。標本分散 s^2 を計算して、その値を母分散 σ^2 の推定値による推定が、 σ^2 を過小に見積る傾向を有しているということを、 σ^2 の推定量 s^2 は負に偏ると表現する。その偏りは Eq. (18)で与えられるが、Eq. (18)は、 s^2 を計算する基礎になったサンプル・サイズ n のサンプルが、推測統計学における理想的なサンプル、すなわちランダム・サンプルであることを前提にして得られた式である。つまり、 σ^2 の推定量 s^2 の偏りは、推定量 s^2 の本質的な性質であって、サンプルの偏りとは別物である。

サンプルの偏り、偏ったサンプリングによって得られる偏りのあるサンプル、そしてそれを故意又は過失によって、ランダム・サンプルであるかのごとく扱った結果として導き出される結論 (推定)の偏り、などについては、多くの入門書、解説書が巧みな例をあげて力説している。その一つを示せば次のようになる。

1936年の米国大統領選挙の際にある雑誌社は、独自の世論調査をもとにしてルーズベルト候補の大敗を予測したが、結果はその逆で、民主党のルーズベルトは60.8%の票を獲得して圧勝した。この雑誌社の世論調査は大規模なものであったが、サンプルすなわち調査対象は、この雑誌の購読者リストと電話帳から選び出された。当時、電話を所有したり、この雑誌を購読したりしていた人達は、有権者全体を公平に代表するサンプルではなくて経済的に恵まれた人々が多く、共和党候補支持の傾向が強かったのである。

このような例をあげて、偏りのあるサンプリング、偏ったサンプルがもたらす悲喜劇を強調することは、大学の正門前で「貴方は今日、講義に出席しますか」というアンケート調査をして、その大学の学生全体の講義出席率をしらべたつもりになるような愚行が跡をたためかぎり、大変重要であり、有意義である。しかしながら、あまりに多くの入門書が、統計的推定の偏りについて、サンプルの偏りだけを強調し過ぎているように思われる。試みに書店で推計学の教科書や入門書を手にとって、巻末索引で偏りの項をひいてみると、大多数の書がサンプルの偏りだけをとりあげている。どの教科書にも不偏分散 $\hat{\sigma}^2$ の記述がなされているにもかかわらず、索引の偏りの項からたどって標本分散の偏りの記述に到達できるようになっている書籍は驚くほど少ない。こういう教科書を使って勉強する結果、多くの人達が偏りのないサン

ブルを使って行なった統計的推定には偏りが無い……という錯覚を起こしてしまうのである。偏りのあるサンプルをもとにした推定は偏るが、サンプルに偏りがなくても推定のやり方によっては、推定結果に偏りが出てくるのは当然である。この点をよくよく再認識していただきたい。

4. 偏りのある推定量の身近な例

第3章の説明で推定量の偏りとはどういうものであるかの理解が深まり、ランダム・サンプルは偏りのないサンプルであるから、それをもとにした推定が偏るわけがない……というような、推定量の偏りに対する偏見から解放されてみると、これまで何気なく使っていた推定量の中に、偏りのある推定量が数多く含まれていることに気がつくはずである。たとえば母集団の標準偏差は母分散 σ^2 の平方根として定義されるが、母標準偏差の推定に不偏分散の平方根 $\sqrt{s^2}$ を用いると、これはもはや不偏推定ではなくて、負の偏りのある推定になってしまう。母歪度、母尖度、母相関係数などの推定量として、標本歪度、標本尖度、標本相関係数などを用いると、いずれも偏りのある推定量になる。これらの統計量は普通の推計学でよく利用される量であるから、少し詳しい教科書には書いてあるはずなので、ここではこれらが偏りのある推定量であることを指摘するだけにしておく。

今回のまとめを兼ねて、我々粉体工学関係者にとって

大変に身近な例をあげておくことにしよう。粉体工学では個数平均径以外にも数多くの平均径が利用されている。それらはいずれも粉体の性質、挙動を記述する手段として重要であり、粒度測定のための目的が粉体の性質や挙動の解明、予測などである以上、たとえば平均体積径(mean volume diameter: 体積平均径というのは明らかに誤訳であるというのが筆者の見解である)⁸⁾や重量平均径を求めなければならないことがある。顕微鏡や粉子カウンターの類を利用する計数法粒度測定で得られるデータは個数基準のデータであるが、このようなデータから計算した各種の平均径はサンプルについての値、すなわち標本平均径である。粒度測定で平均径を求める目的は、サンプルの平均径の値を確定することではなくて、粉体全体(母集団)の平均径を推定することである。計数法粒度測定のサンプリングが理想的なランダム・サンプリングであると仮定して、各種の標本平均径の期待値と母平均径とを比較してみると、我々が日常利用している平均径の中で標本平均径が母平均径の不偏推定量になるのは個数平均径だけであることがわかる(Table)。調和平均径と幾何平均径は正の偏り、他はいずれも負の偏りになる⁵⁾。

Tableに示した偏りの符号はいずれも理論的に求められたものであり、粉体の粒径分布がどのような形をしているかには無関係である。ただし、偏りがどの程度になるかは粉体の粒径分布次第である^{1),2),4),6)}。この点に

(120頁へつづく)

Table 各種標本平均径の偏り⁵⁾

名 称 ³⁾	母 平 均 径	標 本 平 均 径	偏 り
個 数 平 均 径	$\int x f(x) dx$	$\frac{1}{n} \sum x_i$	$B = 0$
長 さ 平 均 径	$\frac{\int x^2 f(x) dx}{\int x f(x) dx}$	$\frac{\sum x_i^2}{\sum x_i}$	$B < 0$
面 積 平 均 径	$\frac{\int x^3 f(x) dx}{\int x^2 f(x) dx}$	$\frac{\sum x_i^3}{\sum x_i^2}$	$B < 0$
重 量 平 均 径	$\frac{\int x^4 f(x) dx}{\int x^3 f(x) dx}$	$\frac{\sum x_i^4}{\sum x_i^3}$	$B < 0$
平 均 面 積 径	$\{\int x^2 f(x) dx\}^{1/2}$	$\left\{\frac{1}{n} \sum x_i^2\right\}^{1/2}$	$B < 0$
平 均 体 積 径	$\{\int x^3 f(x) dx\}^{1/3}$	$\left\{\frac{1}{n} \sum x_i^3\right\}^{1/3}$	$B < 0$
長 さ 平 均 面 積 径	$\left\{\frac{\int x^3 f(x) dx}{\int x f(x) dx}\right\}^{1/2}$	$\left\{\frac{\sum x_i^3}{\sum x_i}\right\}^{1/2}$	$B < 0$
幾 何 平 均 径	$\exp\{\int (\ln x) f(x) dx\}$	$\exp\left\{\frac{1}{n} \sum \ln x_i\right\}$	$B > 0$
調 和 平 均 径	$\{\int x^{-1} f(x) dx\}^{-1}$	$\left\{\frac{1}{n} \sum x_i^{-1}\right\}^{-1}$	$B > 0$

低温粉砕

—リンレックスミルについて—

中井 利明*

Toshiaki Nakai

豊立 勝二**

Katsuji Toyotake

1. はじめに

低温粉砕は古くて新しい技術である。ゴムのような弾性体でも、これを脆化点以下に冷却すると低温脆性により容易に粉砕できる。このことは古くから原理的には知られ、特許上でも40年以上も前に既に見られている。しかしながら当時は、技術的、経済的な理由から、ほとんど工業的規模では実施されることがなかったが、ここ数年、急に脚光をあび、新しい技術として登場してきた。

数十年前のneedsが、現在の各分野にわたる広範な微粉化へのneedsと、第2次大戦後の急速な低温技術の進歩により、ようやく芽を出したものであろう。

種々の要素のなかで、最近の低温粉砕技術の最大の特徴は、液体窒素の使用であろう。液体窒素そのものは、古くからあったけれども、安価で大量の液体窒素が手近に得られるようになったこと、これが新しい低温粉砕技術のもとになっている。needsの面から言えば、プラスチックの驚くべき普及があげられる。現代は、プラスチック時代と言われるほどに、各種各様のプラスチックがあふれ、その微粉化の要求が高まったこと——しかしプラスチックは、常温で粉砕しにくいものの代表なのである——、それに、ニュータイプの食品や嗜好品の出現が、低温粉砕技術の登場をもたらしたと言えるであろう。

大阪ガスは、LNG冷熱利用の一環として空気分離を計画し、ここから得られる大量安価な液体窒素の用途開発として、低温粉砕をとり上げ、細川鉄工所は、新しい粉砕分野としての低温粉砕に着目し、1972年以来、

共同研究を続け、廃タイヤ等を対象とした廃棄物再資源化システムおよび、一般用低温粉砕システムの二つのシステムを開発した。本稿では、一般用低温粉砕システムに重点をおき、低温粉砕技術について紹介する。

2. 低温物性と粉砕

低温粉砕と言っても、物体の破壊という見地に立てば何ら常温と変わるところはない。即ち、物質を低温にして、その物性が脆くなったところで粉砕するのであるから、常温で脆い物質を、常温で粉砕するのと同じである。

この関係を図式化して、Fig. 1 に示した¹⁾。破断点(×印)の縦軸をとれば、破断に必要な応力であり、斜線部分の面積は、破断に要するエネルギーである。低温粉砕では、(a)、(b)、(c)、を(d) (又は(d'))にして粉砕しようとするものである。従って、低温粉砕の粉砕機構は、ほとんど衝撃粉砕である。

低温粉砕を理論的に取り扱った研究は少ないが、松居らは、プラスチックの低温圧縮、引張り試験等の結果を、松居の粉砕理論に基づいて整理している^{2),3)}。一例をFig. 2 に示した。詳細な説明は省略するが、材料に

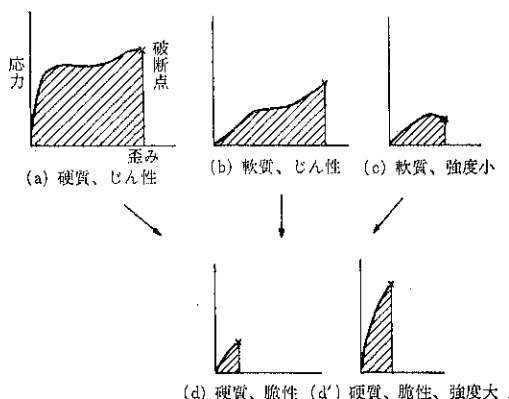


Fig. 1 各種物質の応力—歪み曲線の分類

* 大阪瓦斯株式会社総合研究所
(〒554 大阪市此花区西島町9-119)
Tel. (06)-462-1451

** 細川粉体工学研究所
(〒573 枚方市招提田近1-9)
Tel. (0720)-57-3721

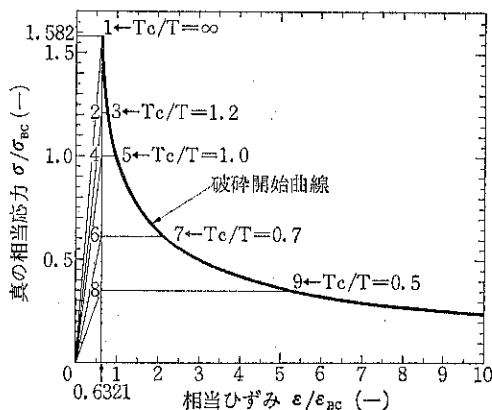


Fig. 2 いくつかの温度レベルにおける（応力速度 0.4cm/min 一定）ポリマーの真の応力-ひずみ曲線

固有の温度 T_c が存在し、 T_c より高温では粉碎に要するエネルギーが著しく増大すること、低温になればなるほど粉碎開始に要する応力は大きくなるが、粉碎に要する全エネルギーは小さくなることを報告している。松居らの提唱する T_c は、まだ多くの物質について測定されてはしない。

しかし、種々のプラスチックについて、ガラス転移点が測定され、報告されている。このガラス転移点以下の温度では、ガラス状となり、その破面は、脆性破面となる。また、この温度以上では、いわゆる粘弾性を示し、粉碎は著しく困難となる。Table 1 に、いくつかのプラスチック、ゴムについて、ガラス転移点及び、その他の転移点を示した¹⁾。

ところが、実際の低温粉碎では、それほど簡単にかたづけるわけにはいかない。まず、ガラス転移点そのものが明確な点ではなく、ある程度の範囲をもつこと、プラスチックの性質は、製造条件、添加物、熱履歴等により大きく異なること、また種々の力学的データは、測定条件により異なる——例えば、荷重速度等——ことに留意しなければならない。また、粉碎時には、衝撃を受ければ必ずミクロ的に見れば、温度上昇をきたし、粉碎前の碎料温度や雰囲気温度とは異なった温度になっている。従って、実際の粉碎に当たっては、最適の温度、粉碎条件は多面的な検討を要することになる。

3. 低温粉碎の冷媒と熱収支

3.1 冷 媒

さきに、液体窒素が、低温粉碎の冷媒として、極めて優れていると述べた。その理由は、次の 4 項目に要約される。

Table 1 高分子物質の転移点 (°C)

物 質 名	ガラス転移点	その他の転移点
天然ゴム	-73~-75	-55~-60
SBR(スチレン25%)	-57	-45~-46
SBR(スチレン70%)	18	—
NBR	-35~-65	—
ポリエチレン	-21~-24	-120~-140
ポリプロピレン	-35	—
ポリ塩化ビニール	70~80	-70
ポリスチレン	80~100	—

- ① 極めて低い沸点であること
- ② 不活性であること
- ③ 工業的に容易に得られること
- ④ 大気圧下で液体であり、取り扱いが便利なこと

これらを説明するため、Table 2 に、各種低温液化ガスの物性値を示した。窒素より沸点の低いガスは、ヘリウムや、ネオンのような希ガスや水素などであるが、これらのガスは、経済的に使用できないし、また、水素は、爆発、火災の危険もある。窒素よりは高いが、ほぼ同程度の沸点をもつガスとして、空気とアルゴンがあるが、アルゴンは経済的に、また空気は窒素と酸素の混合物であり、酸素が濃縮化する危険を考えると、どちらも低温粉碎の冷媒として望ましくはない。

これらを考えると、工業的に使用できる冷媒としては液体窒素が最も低い沸点を有している。これが冷媒としての液体窒素の最大のメリットである。圧力によって、沸点は若干異なるが、粉碎はほぼ常圧下で行われるので、窒素の常圧での沸点-196°C までの低温は液体窒素の注入量のコントロールだけで容易に得られる。換言すれば、液体窒素は現在、経済的に考えられる冷媒の中で、最も温度調節可能範囲が広く、最も低い温度に到達できる冷媒である。これは、粉碎装置の運転から見ても、粉碎対象がますます広がり、より低い温度が要求されてきている needs 面から見ても、液体窒素が現在の低温粉碎の冷媒として最もふさわしいことを示している。

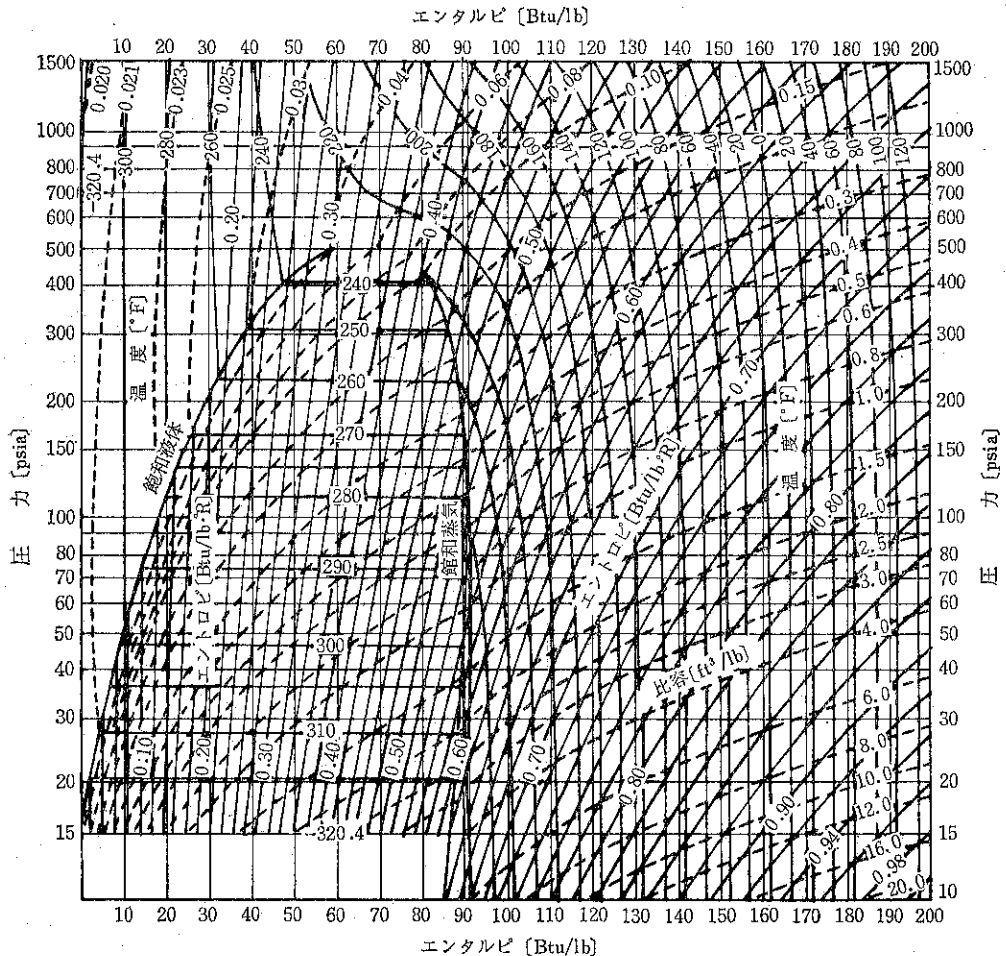
また窒素は、化学工業や食品工業で広くページガスやシールガスとして用いられているように、不活性であり、食品、香辛料、嗜好品や化学薬品のように変質を嫌うところや、粉体爆発や火災の危険のあるところでは、極めて有利な条件となる。

更に工業的に容易にしかも比較的安価に得られる冷媒となると、液体窒素とドライアイス（又は、液化炭酸）があるが、ドライアイスでは、-78°C までしか得られないこと、固体であるため取り扱いがやかいかであることから、最近の低温粉碎では、ほとんどすべて液体窒素

Table 2 低温液化ガスの物性

ガ ス	融 点 (°K)	融 解 熱 (kcal/kg)	沸 点 1atm (°K)	蒸 発 熱 (kcal/kg)	臨 界 定 数		液 密 度 (kg/l)
					温 度 (°K)	圧 力 (atm)	
ヘリウム (⁴ He)	1 (25atm)	1 (25atm)	4.2	4.90	5.2	2.3	0.125
水 素	14.0	13.9	20.4	107	33.2	13.0	0.071
ネ オ ン	24.5	4.0	27.2	20.7	44.5	26.8	1.206
窒 素	63.4	6.1	77.4	47.6	126.1	33.5	0.808
空 気	—	—	78.8 ¹⁾	49.0	135.2	37.2	0.870
ア ル ゴ ン	83.6	6.7	87.4	39.1	150.8	48	1.402
酸 素	54.9	3.3	90.1	50.9	154.8	50.1	1.141
メ タ ン	90.7	14.0	111.7	121.9	190.5	45.8	0.425
エ チ レ ン	104.0	28.5	169.3	115	282.8	50.9	0.565
二 酸 化 炭 素	215.7	43	194.7 ²⁾	137 ²⁾	304.5	72.8	1.56 (固体)
R-14	89.5	—	145.1	32.2	227.5	37	1.62
R-13	91.6	—	192	35	302	38.2	1.505
R-22	113	—	232.5	56.1	369	48.7	1.414
R-12	118	—	243.1	40	384	39.6	1.488

1) 飽和液体の起沸点 2) 1atm昇華点における値

Fig. 3 N₂ の Mollier 線図⁴⁾ 基準 -320.4°Fの飽和液体H=0, S=0

によっている。

3.2 熱収支

液体窒素が比較的安価であるとは言っても、低温粉碎コストの大きな部分を、冷媒コストが占めている。そのため、低温粉碎では、熱収支を考えることは極めて重要である。まず、低温粉碎系で装置の温度を上げようとする因子は、次のようなものがある。

- ① 系内で発生する熱量（粉碎機、ファン等）
- ② 外部から浸入する熱量（冷熱損失）
- ③ 碎料（常温）の持ち込む熱量

粉碎工程で消費されたエネルギーのうちで、真に粉碎（表面積増加）に費やされるものは、たかだか1%にすぎない。残りは全て熱となり、冷媒の消費につながる。このため低温粉碎では、常温粉碎以上に高性能な粉碎機が望まれるのである。

外部からの熱の浸入も直接冷媒の消費につながるので、極力おさえなければならないから、保冷が必要であるが、粉碎装置の運転・保守・清掃を充分考えて、工夫しなければならない。碎料は、通常、常温であるが、粉碎機へ供給される前に予冷される。この予冷には、低温排ガスの冷熱を利用したりして、極力冷媒の消費をふやさないように努力しなければならない。

一方、これらの熱に抗して、温度上昇を防ぐのが、冷媒（液体窒素）の冷熱である。Fig. 3に、窒素の熱力学線図を示した。Fig. 3から明らかなように、圧力によって、気化潜熱は異なるが、冷熱として利用できるのは、潜熱と気化温度から粉碎装置外へ排出される温度までの顕熱の和である。常圧の場合の排気ガス温度と、利用可能冷熱量との関係を、Fig. 4に示した。排気ガス温度が0°Cの場合、97kcal/kg、-50°Cの場合で84kcal/kgとなる。

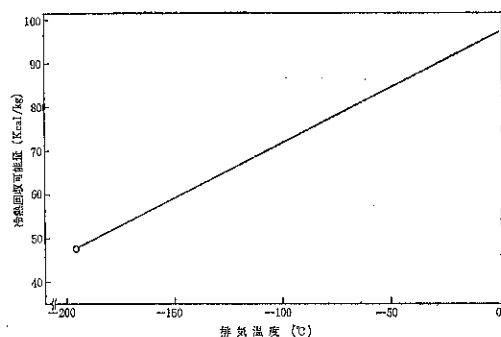


Fig. 4 液体窒素の冷熱量

4. LINREX SYSTEM

4.1 LINREX MILL (FVP-R) の開発経過

我々は、共同研究開始以来、種々のタイプの粉碎機で

の試験を重ねた上で、一般用低温粉碎機として、最もふさわしいタイプを選定し、7.5psの試作1号機を製作した(Photo.1)。更に、この試作機で検討改良を重ね、詳

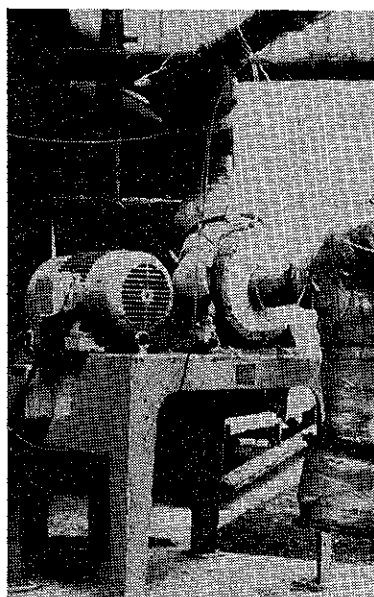


Photo. 1

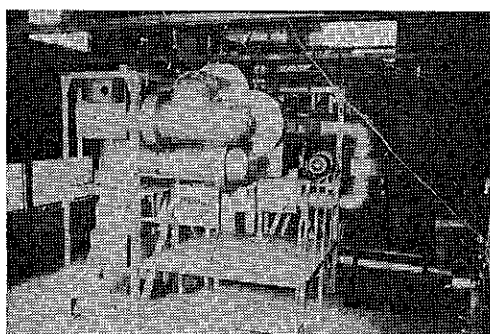


Photo. 2

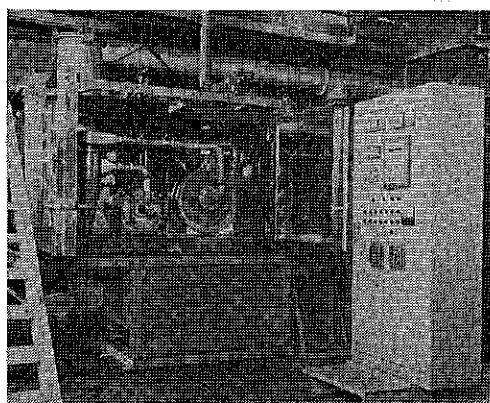


Photo. 3

細な運転データを得るため、10psの試作2号機(Photo. 2)を製作し、種々の運転データを得、また外部からの多くの試験粉砕依頼に应运ってきた。そして、これらの経験、データをもとに、一般用低温粉砕装置を完成し、LINREX MILL (FVP-R) と名づけ、1974年の化学プラントショーに展示した(Photo. 3)。現在、このタイプの一般用低温粉砕装置は、3 psの小型機から、10～15ps, 30ps, 50psの標準仕様をそろえ、実働に入っており、既に500psまで、装置製作が可能な体制にある。なお、我々は、このLINREX MILL (FVP-R) 以外にも、廃棄物再資源化用の低温粉砕装置を開発しており、これらも含めて、低温粉砕のシステムを、LINREX SYSTEM と命名している。

4.2 LINREX MILL の特徴

既に、3.2で述べた如く、低温粉砕では、常温粉砕以上に、高性能が要求される。高性能とは、粉砕機の動力当たりに、時間当たり得られる所望粒度の製品量が多いことを意味する。低温粉砕では、この性能が低いと大きな粉砕機が必要だけでなく、液体窒素の消費量は、粉砕装置の動力にほぼ比例するので、単位製品当たりの液体窒素消費量も多くなり、粉砕コストは高いものになってしまうからである。我々はどうしたら、高性能の粉砕装置となるか考えた末に、粉砕機内に、分級機を内蔵し、所要粒度に粉砕された粒子は、すみやかに粉砕機外に排出し、過粉砕を避け、むだな発熱を防止するのが最も望ましいと判断した。分級機内蔵型粉砕機と言っても、低温でしかも微粉砕をねらうには、常温でよく用いられるスクリーンなどは適当でないことが分かったので、我々は全く新しい遠心分級機構をもつ粉砕機を開発した。また、この分級機構の副次的効果として、粒度調節がきわめて容易になり、粉砕機の運転中にさえ、装置の外部から簡単に粒度変更ができるようになり、操作性が著しく向上した。これがLINREX MILLの最大の特徴である。もう一つのLINREX MILLの特徴は、保冷方法である。粉砕機本体及びその他の低温の主要部分は、保冷ボックス内に収納されている。そして、保冷ボックス内の装置そのものは、裸のままなので、装置の点検、保守、清掃が極めて容易にできる。更に、この方法を採用したために、機器単体毎に保冷していた場合に比べて、保冷効果も向上し、外部からの熱浸入による冷熱損失は、ほとんど無視できるまでに減少した。

4.3 LINREX SYSTEM (FVP-R) のフローシート

LINREX MILL (FVP-R) を組み込んだ一般用低温粉砕システムのフローシートを、Fig. 5に示した。システム全体としては、この図の他に、砕料及び製品粉末に

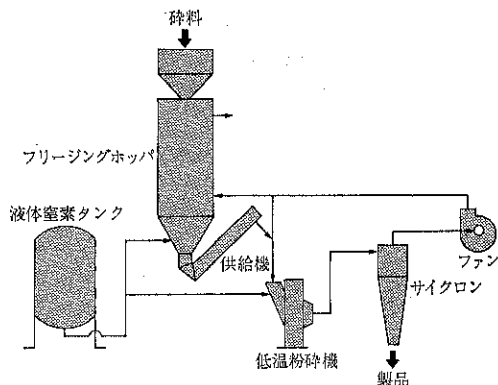


Fig. 5 LINREX MILL SYSTEM フローシート

応じた付帯装置がつけられる。個々の装置には、低温粉砕用に種々の工夫がこらされているが、フローとしては極めて簡単である。

4.4 LINREX MILL の仕様

LINREX MILL の概略仕様は、下記の通りである。

- ① 粉砕型式：高速回転式衝撃粉砕機
- ② 内部分級機構：遠心分級式内部分級
- ③ 保冷方法：低温ボックス式保冷
- ④ 制御方法：フリーザー LN₂ 液面制御
粉 砕 機 粉砕機出口温度制御
過電流自動制御
- ⑤ 材質：SUS 304以上のオーステナイト系ステン
レス鋼(液室配管は、銅、銅合金及びSU
S304)
- ⑥ 粉砕温度：常温～-180℃
- ⑦ ローター周速度：最高110m/sec
- ⑧ モーター馬力：標準3, 10～15, 30, 50ps, max
500ps

5. 低温粉砕の応用

低温で粉砕すれば、

- ①低温脆性が利用できる。
- ②熱的変質が防止できる。
- ③窒素の不活性雰囲気を利用できる。

これらの三要素から、いろいろの分野で多くのメリットが期待できる。廃タイヤ等の廃棄物再資源化のプロセスを、我々は既に開発しているが、プラスチック、食品、嗜好品、香辛料等の微粉砕のために開発したのが、LINREX MILL である。

プラスチックの分野では、社会的な省資源、省力化、無公害化の要求により、粉末塗装、粉末成型用のプラスチック粉末が大きく伸びつつあるが、常温では粉砕できなかったり、微粉化が不可能な場合が多く、低温粉砕が

Table 3 低温粉碎例

品 名		粉碎温度 (°C)	処理量 kg/ hrps	粒 度	液体窒素 消費量 (LN ₂ kg/ 碎料kg)
プ ラ ス チ ッ ク 類	ナ イ ロ ン④	- 80	2	150mesh90%	5.5
	⑤	-100	1	60 90	12
	E V A④	-120	0.8	325 50	15
	⑤	-120	19	40 35	0.9
	ポリエチレン④	-120	1.5	100 74	8
	⑤	-120	10	150 70	1.5
	ポリプロピレン	- 50	7	60 70	1.6
食 品 類	ゴ マ	-100	20	香り・舌ざわり良好	0.9
	ココアナッツ	-100	10	”	1.5
	C M C	- 50	6	325mesh85%	1.8

④と⑤は物性値のことなる樹脂

注目されつつある。

食品、嗜好品等の分野では、上述の②、③の特徴が充分發揮され、熱や酸化による変質防止、フレーバーの保持等食品にとって、最も重要な点において威力を發揮する。さらに、含油性の食品などでは、常温での粉碎が困難で、搾油、乾燥した後粉碎し、その後に油を添加するという、回りくどい方法がとられる場合もあるが、低温粉碎では、そのままで粉碎可能で、プロセスが著しく簡単になる。

我々は、種々の物質の低温粉碎を検討してきたが、その一部を Table 3 に例示した。

6. おわりに

大阪ガス㈱と鶴細川鉄工所とが共同開発した LIN REX SYSTEM を中心に、低温粉碎について述べた。

低温粉碎は、従来の粉碎技術にはない数々のメリットがあり、今後工業的にも大いに發展するものと考えられる。しかしながら、「粉碎技術はノウハウである」と言われるように、粉碎の分野では、対象毎にそれぞれ異った技術、配慮を必要とし、一つ成功したからと言って、そのまま他で成功するというわけではない。低温粉碎で大きな可能性をもつプラスチック、食品等の分野でも、これはそのままではまる。従って、我々は低温粉碎を工業的に成功させるためには、今後ともキメ細かな配慮と努力を続けて行かなければならないと考えている。

引用文献

- 1) 前田；超低温技術，26，13 (1975)。
- 2) 松居，清，礎；化学工学協会第38年会研究発表講演要旨 (1973)。
- 3) 松居，清，礎；化学工学協会第7回秋季大会研究発表講演要旨 (1973)。
- 4) G. S. Lin；Chem. Eng. Progr., 59, [11], 70 (1963)。

(114頁のつづき)

については次回にやや詳細に解説する予定である。

参考文献

- 1) Mori, Y. and A. Suganuma；*Kagaku Kōgaku*, 32, 1099 (1968)。
- 2) Mori, Y. and A. Suganuma；*ibid*, 34, 445 (1970)。

- 3) Suganuma, A.；*Funsai*, No. 18, 126 (1973)。
- 4) Yamamoto, H., A. Suganuma and Y. Mori；*Kagaku Kōgaku Ronbunshu*, 1, 226 (1975)。
- 5) Mori, Y. and A. Suganuma；*ibid*, 1, 300 (1975)。
- 6) Suganuma, A. and H. Yamamoto；*J. Res. Assoc. Powder Tech. Japan*, 12, 607 (1975)。

容器内粉粒体層の底圧について

The Bottom Pressure of Bulk Materials Packed in the
Cylindrical Vessel

森山 龍一*

上滝 具貞**

Ryuichi Moriyama

Tomosada Jotaki

1. はし が き

貯槽内の粉体圧についてはかなり多くの研究が行なわれ、理論的にも古くは Janssen の式があり¹⁾、その後、修正した式など提案されている^{2)~4)}。実験による検証も多く行なわれ、供給法や容器径の大きさの違いによる値のバラツキ等が説明されている⁵⁾。しかし、この段階では容器底面の全体の平均圧が主として測定されていたため、粉体圧のメカニズムについて十分に説明されているとは言えない。その後、吉岡ら⁶⁾は貯槽内の底圧を数箇所測定して壁と容器の中央でかなり圧力が異なる結果を得て、底圧分布について報告した。先の Janssen の式も壁付近ではよく一致するなど容器底面の圧力のどこかに一致することが理解された。そして、今日、分布曲線を説明した理論も進められている⁷⁾。しかし、まだ、底圧分布については若干の問題があり、底圧分布の形やその形成されるメカニズムについて、十分説明されたものはないようである。したがって、実際に、種々の条件によって、どのように圧力分布が変化するかを予測するのは今だに困難なことである。そこで、実験的に、種々の条件を変えて、底圧分布に及ぼす影響を明らかにしていくことによって、容器底面の粉体圧の形成されるメカニズムを定性的にでも早急に理解することが必要だと思われる。ここでは主として、内部摩擦係数が底圧分布に及ぼす影響（3章）と供給時の表層部の流動方向が底圧分布に及ぼす影響について（4章）、実験的に確認し

た資料に基づいて述べる。しかし、これらの測定に必要な粉粒体用圧力計として満足される市販のものがいないために、この種の測定があまり行なわれていないとも考えられるので、筆者らが製作した高感受圧計の特徴について⁸⁾、その後、考察を付け加えた分を主として、最初に（2章）述べることにする。

2. 受圧計の問題

粉体用の受圧計の条件として、まず、受圧面の大きさは流体の圧力計のようにどれだけでも小型化すればよいものでなく、測定しようとする粒径の大きさによって制限される。たとえば、粒径が 2mmφ の試料を測定するためには少なくとも粒径の 5 倍程度の受圧面がなければいけないと言われている⁹⁾。しかし、この測定範囲の限度を決めたテスト法は受圧面に粒を並べて加圧したときの較正曲線の直線性に基づいており、容器の中で粒体が自然に堆積したときには局所的なアーチ現象も生じていると考えられるので、受圧計を層内部に置いたときには、機械的に加圧したときの条件と異なり、真の値を検出していないとも考えられる。この測定範囲の限度を決める調査は今後の課題として、筆者らの実験では試料の測定範囲が 2mmφ 以下であるから、少し安全をとって粒径の 10 倍である 20mmφ の受圧面を持つように設計した。

次に、粉体用の受圧計は高感度でなければならない。たとえば、容器径を $D=206\text{mm}\phi$ にして、粒径 $d \leq 0.39\text{mm}$ のガラスビーズを層の高さ $H=70\text{cm}$ まで供給すると、底圧は 200mmAq 程度であり、500mmAq 以内の測定が多いので、圧力計は高感度のものを使用しなければならない。以上のように、比較的小型の受圧計を製作する場合の注意と、この構造をした受圧器の特徴を挙げてみる。

1) 受圧面のたわみをできるだけ小さくして圧力を検

* 福岡教育大学 技術科
(〒811-41 福岡県宗像郡宗像町赤間729)
Tel 09403-2-2381
**九州工業大学 機械工学科
(〒804 北九州市戸畑区仙水町1)
Tel 093-871-1931

出するためにはどうしても半導体ゲージを使用せざるを得ない。受圧面を薄くすればペーパーゲージを用いることができるが、粉体の測定では受圧面のたわみが大きいと受圧面付近に局部的な層のせん断ができて、真の値を計測していないことが考えられる¹⁰⁾。この点の心配をなくするためには受圧面はできるだけひずまないように厚い板を用いなければならない。このようにひずみを小さくして検出する方法として半導体ゲージの使用がよい。

2) しかし、半導体ゲージを使用すると必ず問題になるのは零点のドリフトである。半導体ゲージはその性質上温度の影響を受け易い。これを最小限に止めるために、筆者らは Fig.1 のような構造をした受圧計を製作した。この構造の特徴は温度補償用にダミーゲージとアクティヴゲージを比較的同じ環境に配置していることである。すなわち、受圧面のダイヤフラムとアクティヴゲージの貼られているビームの間にガラス球を用いて、まわりの枠の黄銅と極端に違う熱伝導度の物体を置いて、受圧面上の粉体から受ける温度差をアクティヴゲージとダミーゲージに達する時間的差を少なくしていることである。

3) さらに、100 個余り製作して気付いたことであるが、アクティヴゲージの一端を固定して他端を支持端にしても（両端固定にしたら温度の変化によるビームの伸縮によってドリフトが大きい）ビームと支持台との摩擦によって、たわみを取り去ったとき（すなわち、外力をはずしたとき）零点に戻らない。これはクーロン摩擦によるものであると思われる。このクーロン摩擦は受圧面とビームの間の球が大きいとビームのたわみが大きくなって、その分だけ大きくなる。すなわち、受圧面のダイヤフラムとビームは球を介してたわんでいるので、今、この垂直力を P [Kg]、支持端の摩擦力を F [Kg] とすると、

$$F = \mu \frac{P}{2}$$

で表わされる量だけ零点に戻らない。ここで、 μ はビー

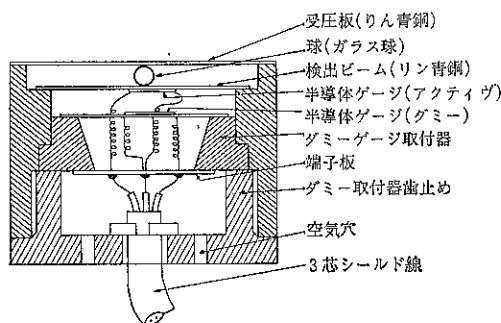


Fig. 1 粉粒体用高感受圧計

ムと支持台の摩擦係数である。逆に、ガラス球を小さくするとダイヤフラムとビームのバネが弱くなり、ガラス球は少しの振動ではずれ易い。そこで、支持台の摩擦を少なくするため、コロを用いたいところであるが、製作が困難であるので、試みに、油膜を作るためにマシン油を注入したら零点への戻りが著しくよくなることがわかった。

4) この受圧計のもう一つの特徴として、負圧の計測ができることである。その原理は、構造上、製作するときに受圧面とアクティヴ用ビームで球をはさんで、常にたわむように取り付けられているので、受圧面に負圧がかかった場合、このビームのたわみを取り去るまで、負圧の計測ができることになる。その一つの例として¹¹⁾、粉粒体が底面から背圧を受けている状態で、底面に加わる真の粉体圧のみを計測したいとき、背圧による空気抵抗によって受圧面が逆の方向に圧力を受けることがある。このような測定に有効に使用できる。

5) 4) のように、受圧面とガラス球を介したビームは一つの振動系を形成していることになり、その固有振動数は $f_0 = 2,000\text{Hz}$ 程度であるため、入力振動数が十分小さいときには加速度計として使用できる。それ故、粉粒体層内部の伝播速度や衝撃の伝達率の測定に用いられる¹²⁾。

3. 内部摩擦係数と底圧の関係

粉粒体の物性値として内部摩擦係数がある。この内部摩擦係数と粉体圧の関係を知ることは圧力のメカニズムを知る手がかりとして重要なことであるが、内部摩擦係数だけの効果をみる方法は非常に困難なことである。ここではできるだけこの効果を引き出そうとするものである。最初に、見かけ密度がほとんど同じで、粒径の違うガラスビーズを5種類用いて内部摩擦係数を測定してみた。内部摩擦係数の測定法はリング圧縮式直接せん断法を用いた。内部摩擦係数の測定法にも多くの提案があり、真の値の計測は現在でも困難のようであるが、筆者らはリングの容器の大きさを3種類変えて、せん断面の圧力分布を考慮して、最適リングの大きさを選定し、できるだけ真の値に近い結果を出すようにした¹³⁾（しかし、まだいろいろ問題があり十分と思われないので、あくまで、同じ測定器を用いたときの相対的な内部摩擦係数と考えてよい）。その結果を示すと、Fig. 2 のようになる。これによると、粒径が最も小さい GB 733 ($d \cong 0.05 \sim 0.09\text{mm}$) が小さく、それより粒径が大きくなると内部摩擦係数は大きくなるのがわかる。

次に、粉体圧に同時に影響するのは壁摩擦係数であるが、この測定法もまだ確立されていない。測定法によ

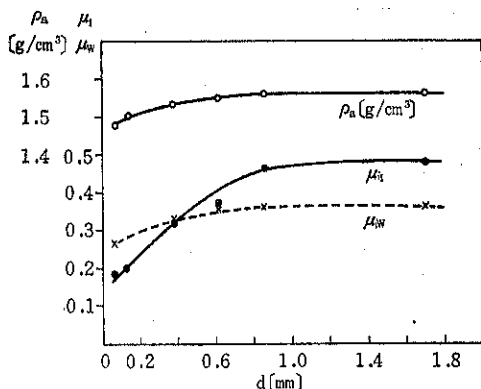


Fig. 2 試料の性質

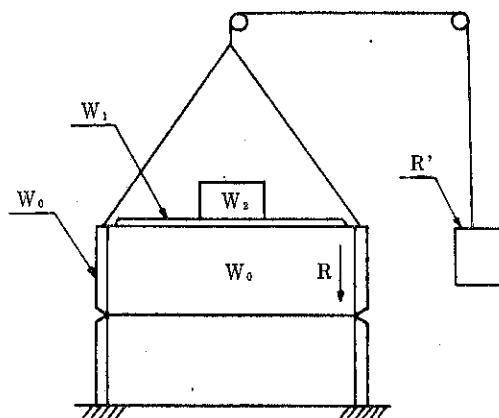


Fig. 3 壁摩擦測定装置

てかなり異なることがわかっている¹⁴⁾。ここでは Fig. 3 のような方法で測定した結果を用いる。この方法は試料が容器壁によって拘束されている条件に近いと考えるからである。その結果は Fig. 2 のようになり、粒径が大きくなると壁摩擦係数は増加していくが、この場合も粉 (GB733) が特に小さいことがわかる。また、見かけ密度 ρ_s [g/cm³] は Fig. 2 のようになり、この場合も粉 (GB733) が最も小さい。

以上のような試料を用いて、容器底圧の分布を測定してみた。実験装置は円筒形容器に内径 $D=206$ mm の銅管を用い、供給法は供給量が一定になるように供給口にオリフィスを用い、それを散乱板で散らして、さらに、その下に3段のフルイを置いて均等に供給した。供給した材料の高さは $H=70$ [cm] である。この結果は Fig. 4 のようになる。これによると、粉の場合 (GB733) は容器の中央で大きく壁付近では小さい。また、粒径が大きくなるにつれて、容器中央の粉体圧が小さくなっていく、その様子はまさに、内部摩擦係数が大きくなるに

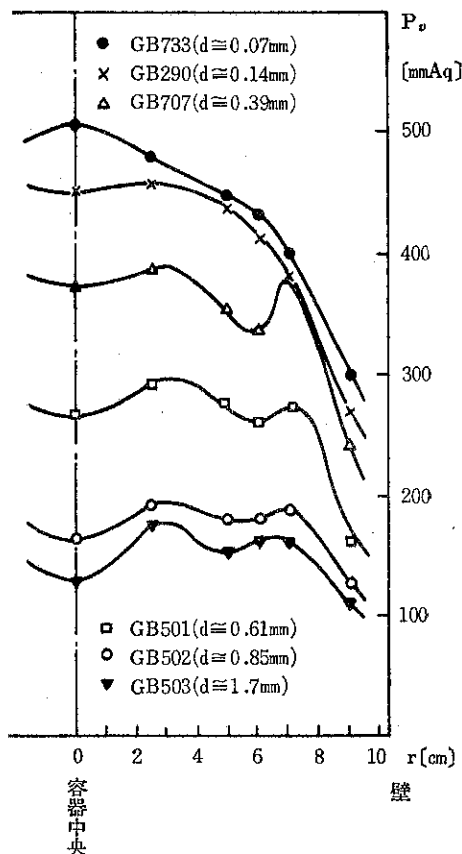


Fig. 4 粉粒体層の底圧分布 (層の高さ70cm)

つれて内部で支持される割合が大きくなっていることを示していると考えられる。同時に、壁付近の変化が容器内部に比べて小さいのは内部摩擦係数の変化に対して壁摩擦係数の変化が小さいこと (Fig. 2) と傾向が一致する。このことから、容器の壁摩擦係数の影響は特に壁面の支持力のみに関係があると考えられる。そこで、各試料の壁摩擦係数の影響を除くために、壁付近の垂直圧をどの試料も一定値にした状態で、内部の圧力の変化のみを調べる必要がある。そのため、Fig. 4 から壁付近の圧力を一致させて内部の分布曲線を描くと Fig. 5 のようになる。この場合、壁面での圧力は不明であり、壁付近の曲線から予測するしかないので、ここでは最も近い測定点で圧力分布曲線を重ねてみた。この結果による圧力の違いは一応内部摩擦係数に直接関係ある量と考えて、壁から最も遠い容器中央の圧力について考えることにする。

なお、できるだけ内部摩擦だけの効果をみる必要があるため、粉体 (GB733, $d \approx 0.05 \sim 0.09$ mm) と粒体 (GB503, $d \approx 1.4 \sim 2.0$ mm) の試料を混合したとき

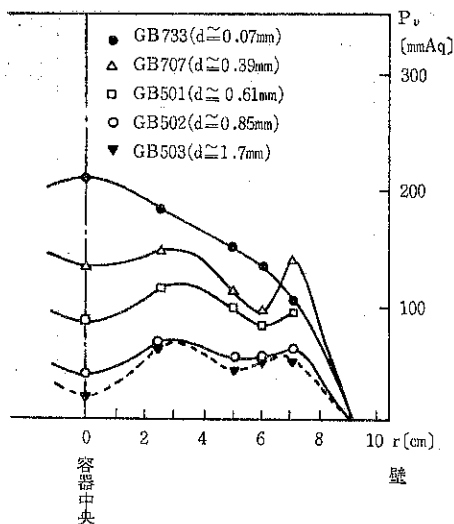


Fig. 5 壁付近の圧力を一定にしたときの容器内部の圧力の変化

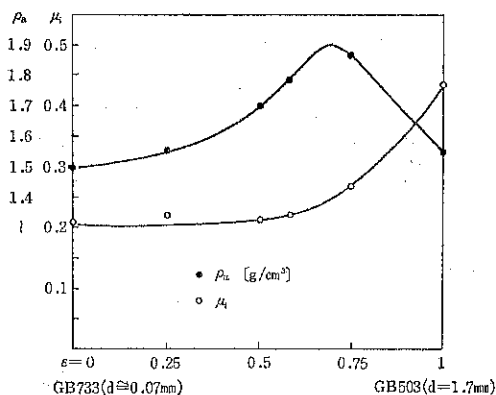


Fig. 6 混合層の試料の性質

の¹⁵⁾、内部摩擦係数と粉粒体圧の関係をみた。これによると、各混合比によって試料の性質は Fig. 6 のように変化し、内部摩擦係数 μ_i は混合比が 1 対 1 の割合 ($\varepsilon = 0.5$, ここで $\varepsilon = 0$ を粉, $\varepsilon = 1$ を粒とする) まで粉に支配されて小さいことがわかる。このときの各混合比に対する底圧分布をみると Fig. 7 のようになる。一方, Fig. 6 をみると、見かけ密度は混合によって 1.5 から 1.7 g/cm^3 に高くなり、粉体圧に対する見かけ密度の効果を無視することができないようであるが、底圧分布に対しては密度の影響は linear であって分布の形状には影響しないはずであるから、この場合も上述のように, Fig. 7 の各試料の壁付近の測定点の圧力を 1 点に集めてその分布状態だけをみると Fig. 8 のようになる。この結果、混合層の内部摩擦係数は粉に支配されて、その値の変化が少ないように、混合層の粉体圧の変化がほと

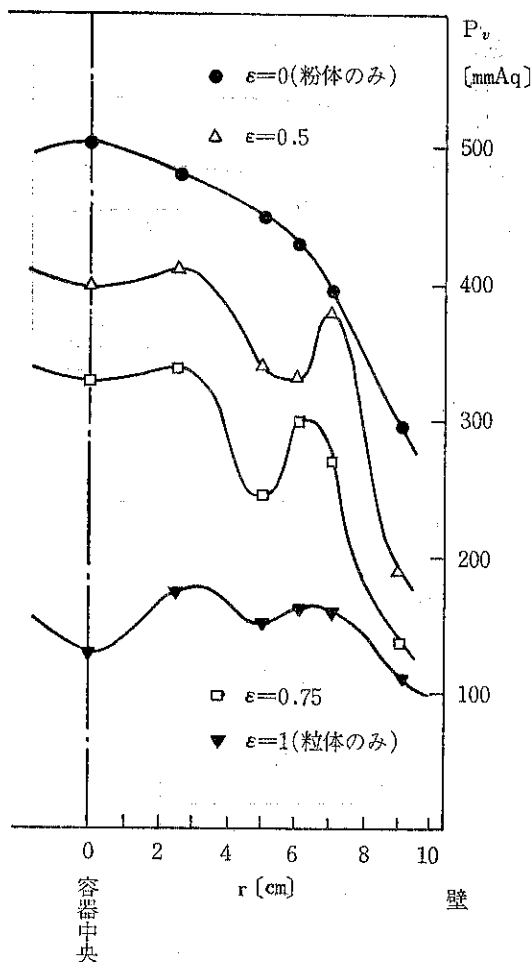


Fig. 7 混合層の底圧分布

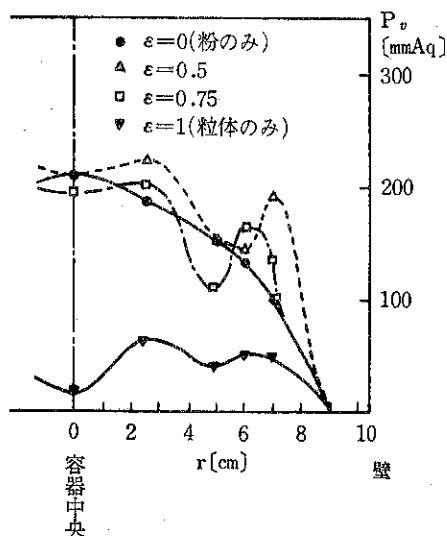


Fig. 8 壁付近の圧力を一定にしたときの容器内部の圧力の変化

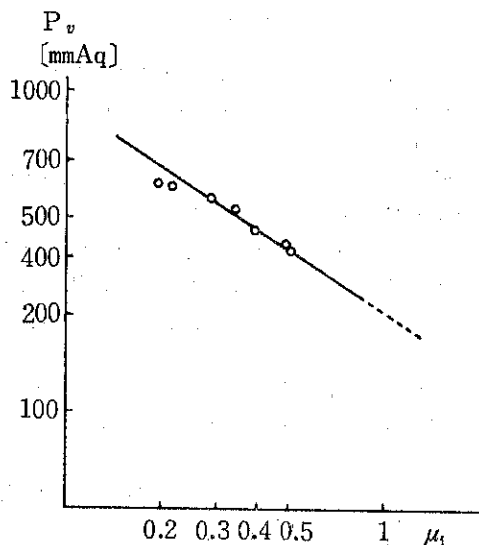


Fig. 9 内部摩擦係数と粉体圧の関係

んど粉の圧力と変わらないことがわかる。このことは、また、上述のようにして粉体圧に及ぼす内部摩擦係数の関係を求めてもよいことを裏付けていると考えられる。このようにして、壁摩擦や見かけ密度の影響をできるだけ除いて、粉(GB733)の壁付近の圧力に一致させたときの各試料の容器中央の圧力と内部摩擦係数 μ_i の関係を示すと Fig. 2 以下の総合結果として Fig. 9 を得る。

4. 供給方法と底圧分布の関係

ホッパーへの供給方法が変わると底圧が大きく変化することについては既に報告されているが⁵⁾、比較的大きいホッパーを用いて底圧分布を調べた例は少ないようである。3章で明らかのように、容器底面の圧力分布は内部摩擦係数が大きいと、容器の中央の方の圧力が低下する傾向がある。この理由として、層内部で滑りが少なく壁の方で支持される割合が大きいからと考えた。しかし、容器中央から供給して壁方向に表層部が流動するようにした場合、水平方向の圧力の成分が壁方向に強いので、壁方向にせん断されて容器の周辺で圧力が大きく、逆に容器の中央で小さくなることが考えられる。次に、容器の周辺に供給して、容器の中央に表層部が流動するようにした場合は層の支持点が容器の中央になるので、圧力は容器の中央で大きくなることが考えられる。このことを明らかにするために実験を行なった。その結果は Fig. 10 に示す通りである。これは一応予測した通り、流動する方向に鉛直圧が増加することがわかる。これは容器径が小さいモデル実験では予測されなかったことである。つまり中央から供給した場合、表層部の流動径路

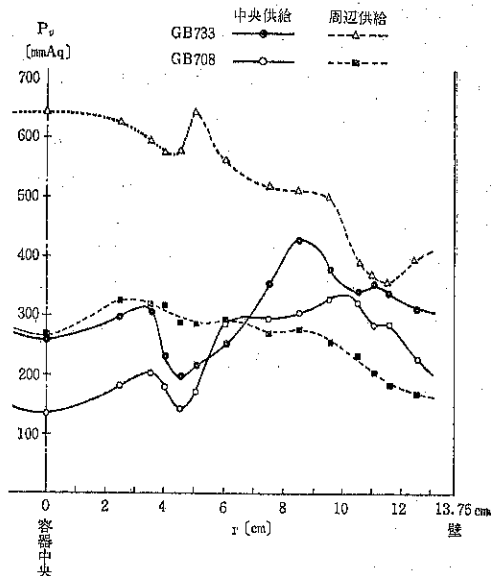


Fig. 10 供給法と底圧分布の関係

が大きいと(すなわち容器径が大きいと)、壁に達するまでに、層は流動しなげせん断されていくと思われるが、その鉛直圧の成分として累積されていく方向は中央から壁方向にあたるため、容器中央より周辺の方に圧力が増加する。そして壁の影響を受けて鉛直圧はある場所ですり合いこれより周辺になると圧力が小さくなる。したがって、この変曲点にあたるのが鉛直圧が最も大きいことになる。この現象は、丁度、この付近が層の構造的に基礎となって安定したところで、容器の中央と壁方向にアーチを形成していると考えられる。しかし、容器の中央の方では完全なアーチ形成ができなくて、途中で大きい層のせん断があることがわかる。これは容器の中央が落下点にあたるため動圧の影響を受けてアーチが崩壊してすべったものと考えられる。逆に、周辺から供給した場合は表層部の流動の方向が容器中央になるので、容器の中央の方で粉体圧が大きくなることがわかる。

5. あとがき

容器内の粉体圧のメカニズムを明らかにするためには、まず、粉体の物性値との関係をいろいろの手法でつかみ、そこに共通した法則を理解することだと考えているが、その測定の基本となっている受圧計に満足されるものが未だにみあたらないことである。半導体ゲージを用いると高感度の測定ができるが、製作上細かい注意が必要であり、筆者らの製作した受圧計も完全なものでは

なく、今後改良すべき点も多く含まれている。しかし、この種の研究室用の実験には一応満足されるようである。

粉体圧のメカニズムの要因は複雑で、物性値との関係を単独に知ることは困難と思われるが、実際にモデルホッパーを用いて、条件を変えたときの圧力の変化から粉体圧に及ぼす内部摩擦係数の効果について (Fig. 9) 大体の傾向をつかむことができた。また、供給法 (中央供給, 周辺供給) によって、底圧分布が極端に変化する (すなわち、中央供給したら周辺で大きく、周辺供給したら中央で大きくなる) ことがわかった (Fig. 10)。

なお、現状では、容器径や供給速度が変わったときに底圧分布がどのようになるのかを予測するのは困難であり、今後に残された課題である。

記 号

μ_i : 内部摩擦係数	[-]
μ_w : 壁摩擦係数	[-]
D : 平底モデルホッパーの内径	[mm]
d : 試料の平均粒径	[mm]
H : 供給した試料の高さ	[cm]
P_v : 容器の底面の垂直圧	[mmAq]
ϵ : 粉 (GB733, $d \leq 0.07\text{mm}$) と粒 (GB 503, $d \leq 1.7\text{mm}$) の混合比 ($\epsilon = 0$, 粉, $\epsilon = 1$, 粒)	[-]
ρ_n : 見かけ密度	[g/cm ³]
r : 容器中央から壁方向への半径	[cm]
F : 受圧計内部のビームと支持台の摩擦力	[Kg]
P : 受圧計内部のビームに加わっている垂直力	[Kg]
μ : ビームと支持台の滑り摩擦係数	[-]

参 考 文 献

- 1) Janssen, H. A. : 2. V. D. I, **39**, 1045 (1895).
- 2) Shaxby, J. H. and Evans, J.C. : Proc. Roy. Inst, **19**, 742 (1910).
- 3) Glastonbury, J. R. and Gbratel, P. : Trans. Instn. Chem. Engrs, **44**, (1966).
- 4) Walker, D. M. : Chem. Eng. Sc., **21**, 975 (1966).
- 5) 青木, 森 : 化学工学, **24**, No. 12, 927 (1960).
- 6) 吉岡, 都築, 山本, 首藤 : 化学工学 31 年会講演要旨, No. 337 (1966).
- 7) Takami, A : Powder Tech., **10**, 295 (1974).
- 8) 上滝, 森山 : 粉体工学研究会誌, **10**, No. 7 (1973).
- 9) 千々岩, 畑村 : 日本機械学会誌, **74**, No. 631 (1971).
- 10) 吉岡, 都築 : 粉体工学研究会誌, **4**, No. 1, 633 (1964).
- 11) 上滝, 森山 : 粉体工学研究会誌, **12**, No. 4, 217 (1975).
- 12) 上滝, 早野, 森山 : 第16回応用力学連合講演会, 論文抄録集 (IV), 47 (1966).
- 13) 上滝, 富田, 森山 : 日本機械学会講演論文集, No. 728-1, 85 (1972).
- 14) 上滝, 富田, 森山 : 粉体工学研究会誌, **10**, No. 3, 131 (1973).
- 15) 上滝, 森山 : 粉体工学研究会誌, **10**, No. 8, 550 (1973).

速 報

㈱細川鉄工所社長 細川益男氏
紫綬褒章を受章さる

去る11月20日、㈱細川鉄工所細川益男社長は長年に亘るミクロンセパレータの開発とその実用化の御業績を柱に、数々の粉体化学装置の発明開発に尽された功

績により紫綬褒章を受けられました。

紫綬褒章は吾が国の科学文化の発達に功績のあった個人に与えられる最高の榮譽で、さきに故細川永一会長がミクロンミルの発明により同褒章を授与されたのに引き続き二代にわたる受章は、細川社長のみならず、細川鉄工所の名誉であり、まことに同慶にたえません。

(この記事は版組終了後に挿入いたしました)

板谷産ゼオライトの特性と利用

Properties and Utilizations of the Itaya Zeolite

高坂 彬夫*
Ayao Takasaka

1. はじめに

ゼオライト (Zeolite) は和名で沸石 (フツ石) と称せられる鉱物であり、現在、世界では Table. 1 に示すように34種類を産出することが知られている¹⁾。最近では、天然ゼオライトの特異な性質と経済性が認識され、わが国の開発や利用についても世界で注目され始めてきた²⁾。

本稿においては、わが国で最も開発の進んでいると思われる山形県板谷産のゼオライトを中心にその精製法、物理化学的諸性質、工業的利用、今後の問題点などについて報告する。

2. 産出と精製

2.1 産 出

わが国の天然ゼオライト資源の分布については湊³⁾によって報告されている。その主なる産地は、北海道、東北6県、栃木、茨城、群馬、山梨、神奈川、新潟、岐阜、愛知、和歌山、島根、鹿児島県などである。

板谷産のゼオライトは、奥羽本線、福島一米沢のほぼ中間、山形県米沢市の東南端にある板谷駅西北の丘陵一帯に白色を呈する凝灰岩として構成されている。(Photo. 1)

現在その存在が明らかな地域は、東西に2,500m、南北に約300mで、その厚さは200~250mである。

なお、露天堀が行なわれ、以下述べるように乾式法および湿式法により精製され製品化されている。

2.2 乾式精製⁴⁾

Fig. 1 に乾式精製のプロセスを示す。

露天堀した天然ゼオライトをインパクトブレイカーで

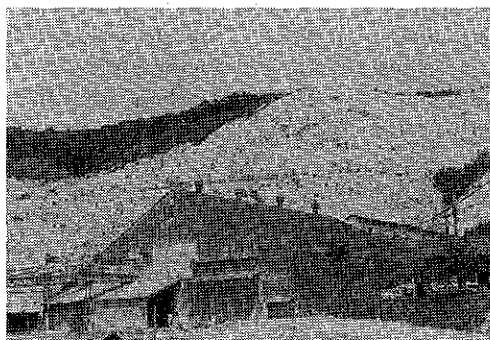


Photo. 1 View of deposit and processing plant at Itaya, yonezawa city.

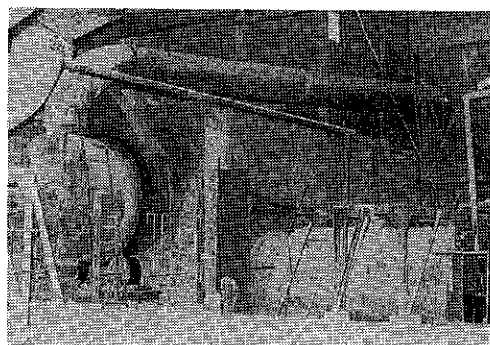


Photo. 2 Rotary kiln for drying zeolite.

粗砕し、モーゲンセンサイザーで分級した後、ロータリーキルンで乾燥する。これをスーパーミクロンミル (細川鉄工所製)、ローラーミルなどで微粉碎し、粒度別に分級しパッカーにより袋詰する。

なお、微粒部分 (SGW) の大型需要については、専用貨車へバルク輸送される。(プロセスの主要装置を Photo. 2~7 に示す)

2.3 湿式精製⁵⁾

Fig. 2 に示すように、まず 15mmφ 以下に粉碎したゼオライト原鉱石をパルプ濃度 35wt % でボールミルによ

* 山形大学工学部

(〒992 米沢市城南4丁目3-16)

Tel (0238) 22-5181

Table. 1 A list of zeolite minerals.

Name	Typical unit cell content	System
Analcime	$\text{Na}_{16}[(\text{AlO}_2)_{16}(\text{SiO}_2)_{32}] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	Cubic
Bikitaite	$\text{Li}_2[(\text{AlO}_2)_2(\text{SiO}_2)_4] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Monoclinic
Brewsterite	$(\text{Sr}, \text{Ba}, \text{Ca})_2[(\text{AlO}_2)_4(\text{SiO}_2)_{12}] \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Monoclinic
Chabazite	$\text{Ca}_2[(\text{AlO}_2)_4(\text{SiO}_2)_8] \cdot 13\text{H}_2\text{O}$	Trigonal, Hexagonal
Clinoptilolite	$\text{Na}_6[(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_{30}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Monoclinic
Dachiardite	$\text{K}_{0.7}\text{Na}_{1.1}\text{Ca}_{1.6}\text{Mg}_{0.2}[(\text{AlO}_2)_5(\text{SiO}_2)_{19}] \cdot 12.7\text{H}_2\text{O}$	Monoclinic
Edingtonite	$\text{Ba}_2[(\text{AlO}_2)_4(\text{SiO}_2)_6] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Orthorhombic
Epistilbite	$\text{Ca}_3[(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_{18}] \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	Monoclinic
Erionite	$(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Na}_2, \text{K}_2)_{4.5}[(\text{AlO}_2)_9(\text{SiO}_2)_{27}] \cdot 27\text{H}_2\text{O}$	Hexagonal
Faujasite	$\text{Na}_{12}\text{Ca}_{12}\text{Mg}_{11}[(\text{AlO}_2)_{59}(\text{SiO}_2)_{133}] \cdot 235\text{H}_2\text{O}$	Cubic
Ferrierite	$\text{Na}_{1.5}\text{Mg}_2[(\text{AlO}_2)_{5.5}(\text{SiO}_2)_{30.5}] \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	Orthorhombic
Garronite	$\text{NaCa}_2.5[(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_{10}] \cdot 14\text{H}_2\text{O}$	Tetragonal
Gismondine	$\text{Ca}_4[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_8] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	Monoclinic
Gmelinite	$\text{Na}_8[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{16}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Hexagonal
Gonnardite	$\text{Na}_4\text{Ca}_2[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{12}] \cdot 14\text{H}_2\text{O}$	Orthorhombic
Harmotome	$\text{Ba}_2[(\text{AlO}_2)_4(\text{SiO}_2)_{12}] \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	Monoclinic
Herschelite	$\text{Na}_4[(\text{AlO}_2)_4(\text{SiO}_2)_8] \cdot 10 \sim 11\text{H}_2\text{O}$	Hexagonal
Heulandite	$\text{Ca}_4[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{28}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Monoclinic
Kehoeite	$\text{Zn}_{5.5}\text{Ca}_{2.5}[(\text{AlO}_2)_{16}(\text{PO}_2)_{16}(\text{H}_3\text{O}_2)_{16}] \cdot 32\text{H}_2\text{O}$	Cubic
Laumontite	$\text{Ca}_4[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{10}] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	Monoclinic
Levynite	$\text{Ca}_3[(\text{AlO}_2)_6(\text{SiO}_2)_{12}] \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	Hexagonal
Mesolite	$\text{Na}_{16}\text{Ca}_{16}[(\text{AlO}_2)_{48}(\text{SiO}_2)_{72}] \cdot 64\text{H}_2\text{O}$	Orthorhombic
Mordenite	$\text{Na}_8[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{40}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Orthorhombic
Natrolite	$\text{Na}_{16}[(\text{AlO}_2)_{16}(\text{SiO}_2)_{24}] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	Orthorhombic
Offretite	$(\text{Mg}, \text{Ca}, \text{K}_2)_{2.5}[(\text{AlO}_2)_5(\text{SiO}_2)_{18}] \cdot 15\text{H}_2\text{O}$	Hexagonal
Paulingite	$\text{K}_{68}\text{Na}_{18}\text{Ca}_{36}\text{Ba}_{1.5}[(\text{AlO}_2)_{152}(\text{SiO}_2)_{520}] \cdot 700\text{H}_2\text{O}$	Cubic
Phillipsite	$(\text{K}, \text{Na})_{10}[(\text{AlO}_2)_{10}(\text{SiO}_2)_{22}] \cdot 20\text{H}_2\text{O}$	Orthorhombic
Scolecite	$\text{Ca}_8[(\text{AlO}_2)_{16}(\text{SiO}_2)_{24}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Monoclinic
Stellerite		
Stilbite	$\text{Na}_2\text{Ca}_4[(\text{AlO}_2)_{10}(\text{SiO}_2)_{26}] \cdot 28\text{H}_2\text{O}$	Monoclinic
Thomsonite	$\text{Na}_4\text{Ca}_8[(\text{AlO}_2)_{20}(\text{SiO}_2)_{20}] \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Orthorhombic
Viseite	$\text{Na}_2\text{Ca}_{10}[(\text{AlO}_2)_{20}(\text{SiO}_2)_6(\text{PO}_2)_{10}(\text{H}_3\text{O}_2)_{12}] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	Cubic
Wairakite	$\text{Ca}_8[(\text{AlO}_2)_{16}(\text{SiO}_2)_{32}] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	Monoclinic, pseudocubic
Yugawaralite	$\text{Ca}_4[(\text{AlO}_2)_8(\text{SiO}_2)_{20}] \cdot 16\text{H}_2\text{O}$	Monoclinic

り湿式粉碎する。粉碎物は液体サイクロンで粗分級し、下流排出物 (UF) はボールミルにより再粉碎、上流排出物 (OF) はスクリュウデカンター形遠心分離機で分級する。遠心分離機の粗粒側はさらに2次粉碎、再分級して不純物を除去回収し、微粒側はさらに同形式の遠心分離機を用い、極微粒部分を不純物として除去する。

不純物を除去したゼオライトスラリーは、次亜硫酸ナトリウムで硫酸酸性で含有する酸化鉄を選元して水溶性とし、水で稀釈した後沈降させて Fe^{++} などの上澄液として除いた後、フィルタープレスで脱水し、10mmφに成形してから連続式通気乾燥機で乾燥する。乾燥製品はペレット状であるが、さらにハンマーミルで解砕して粉

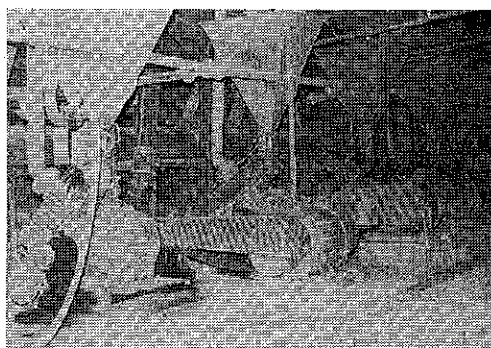


Photo. 3 Super-micron mill for crushing zeolite minerals.

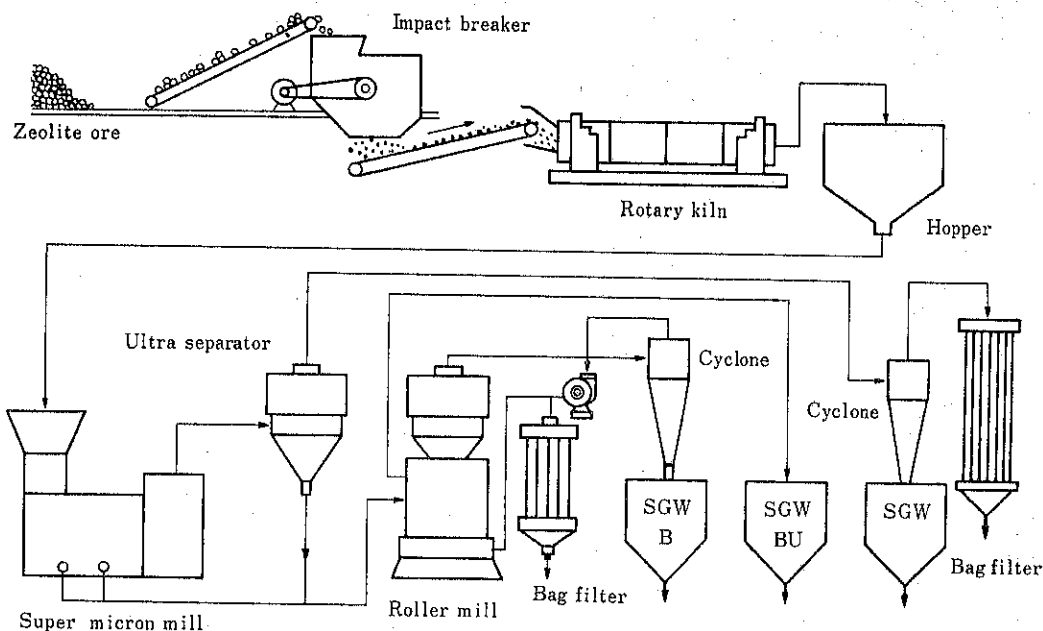


Fig. 1 Dry treatment of the the Itaya zeolite.

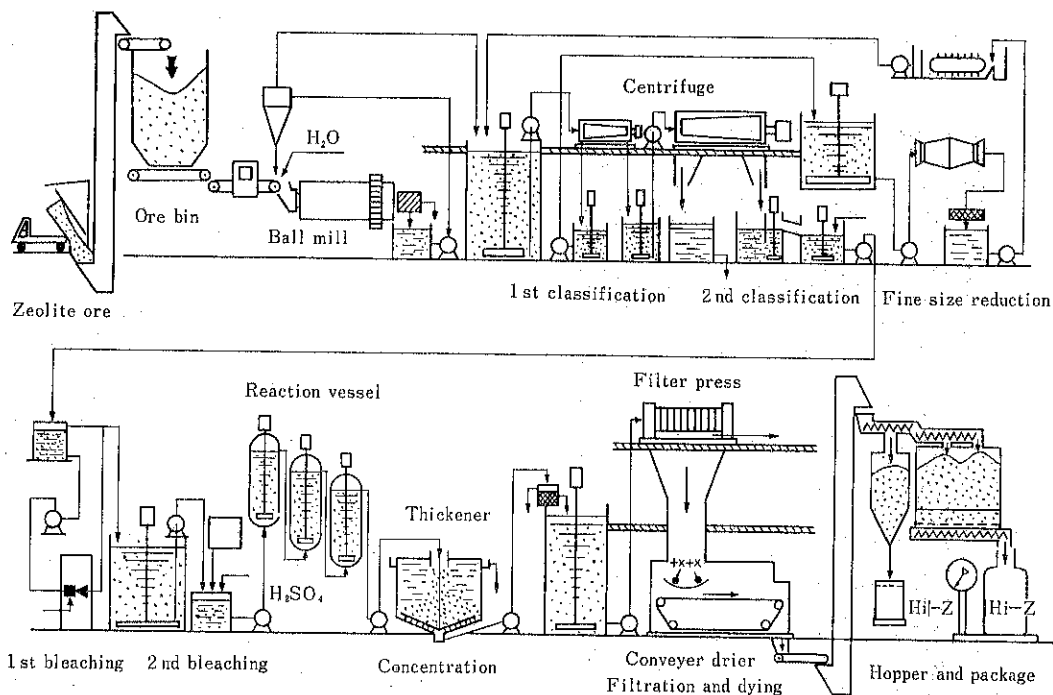


Fig. 2 Wet treatment of the Itaya zeolite.

末状のものも得られる。本湿式プロセスの特徴は、ゼオライト中の不純物が粗粒径および微粒径側に濃縮される性質を利用し、主として機械的分離によって精製することである。

3. 板谷産ゼオライトの諸特性⁶⁾

3.1 形状

Photo. 8 は板谷産天然ゼオライトの走査電子像であ

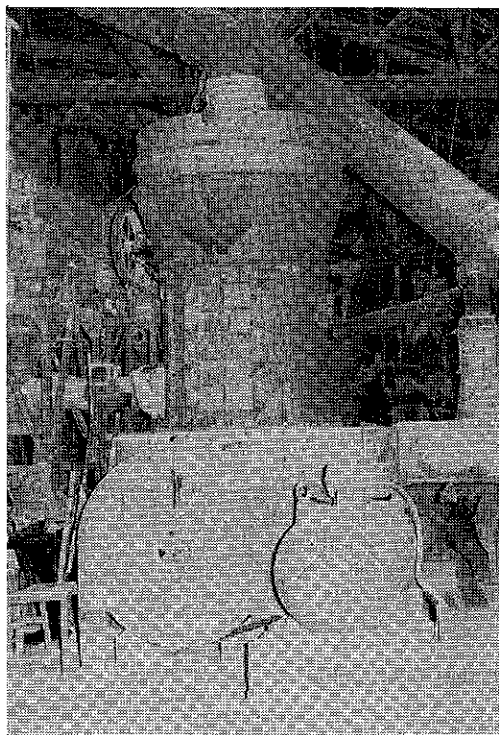


Photo. 4 Ultra separator for classification of zeolite.

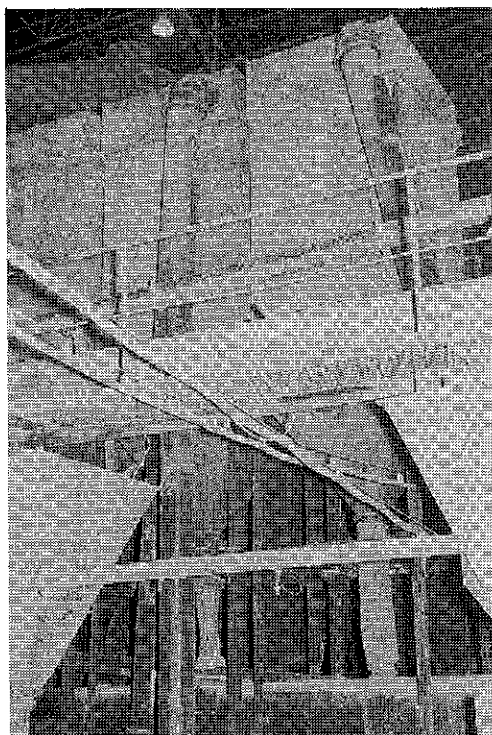


Photo. 6 Bag filter for recovery of zeolite.

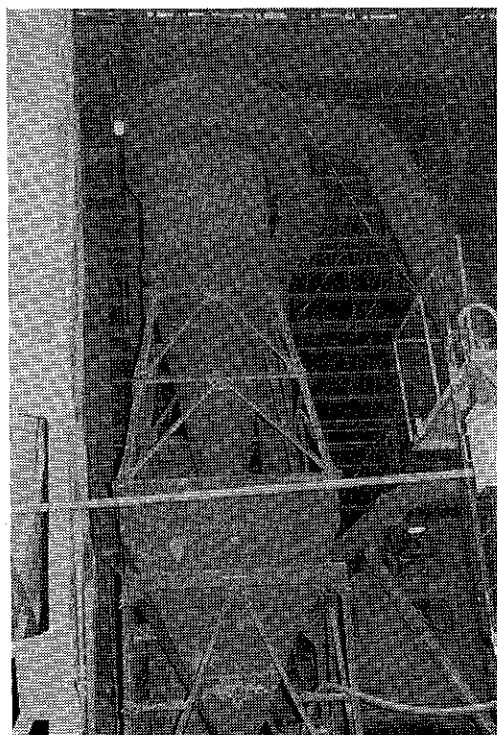


Photo. 5 Dry cyclone for separation of zeolite.

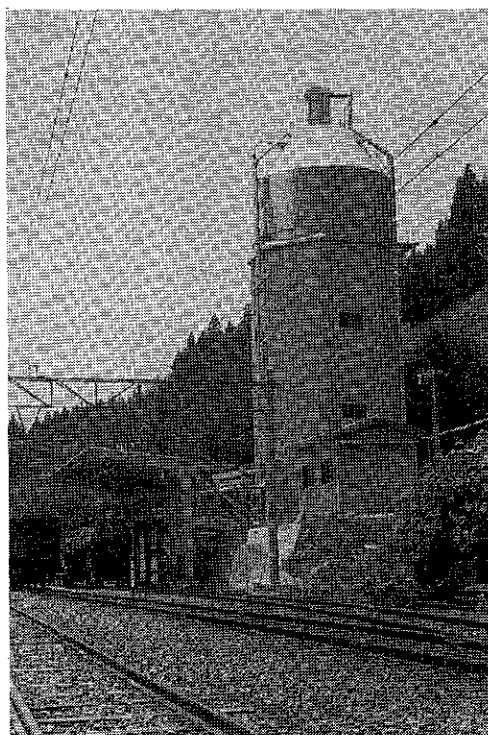


Photo. 7 Transportation for zeolite in bulk.

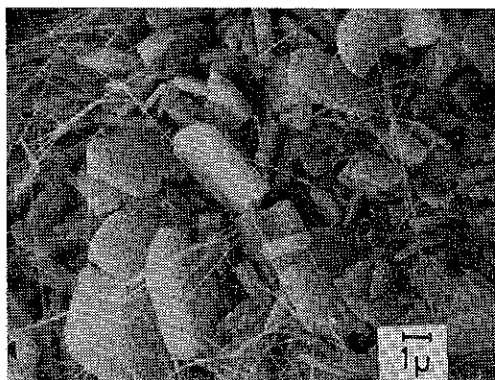


Photo. 8 Scanning electron microscop image of the Itaya-zeolite.

る。板状の物質は clinoptilolite, 繊維状の物質は mordenite と思われる。天然ゼオライトを湿式精製すると繊維状の mordenite はほとんど除去される⁵⁾。Clinoptilolite は単斜晶系に属している。板谷産のものについては、その格子定数は未定であるが米国産のものについては $a=7.41\text{\AA}$, $b=17.89\text{\AA}$, $c=15.85\text{\AA}$, $\beta=91^\circ 29'$ なることが知られている。

3.2 化学組成

板谷産ゼオライトは天然物であるためその化学組成は一定でなく不純物として、蛋白石、石英、長石などを含有している。

板谷産ゼオライトの化学組成を Table. 2 に示す。

Table. 2 Chemical composition of the Itaya zeolite.

	(1)	(2)	(3)
SiO ₂	68.08	69.89	66.68
TiO ₂	0.08	0.03	0.16
Al ₂ O ₃	11.25	11.89	11.30
Fe ₂ O ₃	1.30	0.18	0.89
FeO	0.27	0.02	n. d.
MnO	0.04	trace	trace
MgO	0.03	trace	1.14
CaO	0.83	1.12	1.86
K ₂ O	2.88	2.76	4.25
Na ₂ O	3.02	3.01	0.43
P ₂ O ₅	0.02	trace	n. d.
H ₂ O(+)	7.13	8.89	9.48
H ₂ O(-)	4.68	1.49	4.53
Total	99.61	99.28	100.72

- (1). SGW, Y. Hikichi (1966).
 (2). SGW 5~1 μ , Y. Hikichi (1972).
 (3). Natural, H. Minato (1962).

3.3 X線回折

板谷産原料ゼオライトのX線回折結果を Table. 3 に示す。(ミラー指数は一部推定値を含み、回折強度には不純物の強度も含まれる) また、その焼成に伴う構造変化をX線回折によって測定した結果、600°Cまでは熱的に安定で700°Cから徐々に加熱のための構造変化が起こり始め、900°C以上では構造が破壊された。3.2の化学分析結果と考えあわせると、板谷産ゼオライトは熱に不安定なCa型ではなく、K型⁷⁾を主体としNa型との混合型であると考えられる。

Table. 3 X-ray powder data of the Itaya zeolite.

h k l	d (Å)	I	h k l	d (Å)	I
0 2 0	9.02	76	2 1 $\bar{1}$		
0 0 2	7.96	35	0 5 1	3.48	94
1 0 $\bar{1}$	6.65	38	1 1 $\bar{4}$		
0 3 1			2 2 0		
1 1 2	5.15	29	2 0 2		
1 3 0	4.67	21	2 2 2	3.18	100
1 0 $\bar{3}$	4.33	33	2 3 1		
1 3 2	4.00	100	0 4 4	2.99	27
0 0 4	4.00	100	0 3 5	2.79	24
0 4 2	3.91	51	1 2 $\bar{5}$	2.79	24
1 4 $\bar{1}$	3.77	46	1 6 $\bar{1}$	2.74	17

3.4 示差熱分析

常温で恒温についた天然ゼオライトの示差熱分析結果の一例を Fig. 3 に示す。約30°Cから脱水に伴う吸熱が始まり、そのピーク温度は150°C、約600°Cで脱水が終わる。

3.3に述べたように、板谷産ゼオライトは600°C以下では熱的に構造が安定であるので、焼成物を再び吸湿させ示差熱分析にかけると初回と同様な脱水曲線を示す。

このことは、板谷産ゼオライトを乾燥剤として繰り返し再生利用できることを示している。

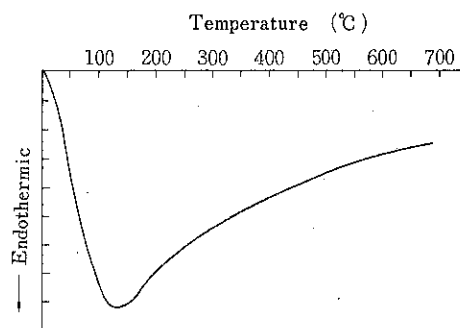


Fig. 3 DTA curve of the Itaya zeolite.

3.5 比表面積

天然ゼオライトの特異な気体の吸着特性は、その比表面積、構造、細孔分布などに依存することが多いと考えられる。このため、まず板谷産ゼオライトの比表面積をBET法で測定した。その結果、乾式精製ゼオライトについては、平均63.39 [m²/g]、湿式精製ゼオライトについては約2倍の124.05 [m²/g]であった。

3.6 細孔容積分布

原料ゼオライトの水蒸気、無機ガスおよび有機ガスの吸着特性は、その細孔の大きさ、容積分布、表面状態などに影響されるように思われる。

このため、乾式精製ゼオライトの細孔容積分布を水銀圧入法で測定し、その結果についてはすでに報告した⁶⁾。

湿式精製ゼオライトを島津—マイクロメリテックス水銀圧入ポロシメーター 903—1形で測定した結果の一例をFig. 4に示す。なお、計算にあたっては、水銀の表面張力を474dyne/cm、接触角を130°、 r と P の関係式を $r = 62, 100/P$ 、加圧範囲を1~30,000psiaとした⁸⁾。

全細孔容積0.412 [cc/g]、50%細孔径は750Åであった。

つぎにメタノール吸着法⁹⁾によって細孔部表面積を測定した。(田中科学機械製作所、自動吸着量測定装置AS—702形使用) その結果、半径10Å~100Åの細孔部表面積24 [m²/g]、10Å以下は246 [m²/g]であった。

なお、水銀圧入法によっては細孔半径約30Å、メタノール吸着法によっても細孔半径10Å以下の分布を測定することは困難である。

3.7 ガス吸着

原料ゼオライトの水蒸気吸着特性を明らかにするため、300℃および500℃において恒量になるまで焼成した。

つぎに密閉容器中にそれぞれZnCl₂、CaCl₂、NH₄Clなどの飽和溶液を入れ、温度および湿度を一定とし気相中でゼオライトの飽和吸着量を測定した。(なお、焼成物が飽和吸着量に達するまで約6hrかかる) 測定の結果をFig. 5に示す。

原料ゼオライトは、水蒸気圧のかなり低いところまで水分を吸着する。また、実験の範囲内では原料ゼオライトは約12wt% (乾料基準) の水蒸気を吸着する性質があり、これは合成ゼオライト (たとえばMS 3A) の飽和吸着量 (乾料基準) の約60%に相当する。

原料ゼオライトが水蒸気を吸着することおよびその細孔分布などから、他の無機および有機ガスも吸着する性質が推定される。

このため、悪臭ガスとしてNH₃、公害として問題となっているSO₂およびH₂Sの硫化性ガスの吸着量を測

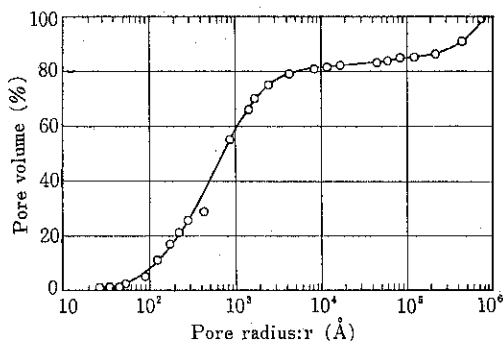


Fig. 4 Pore size distribution of the Itaya zeolite.

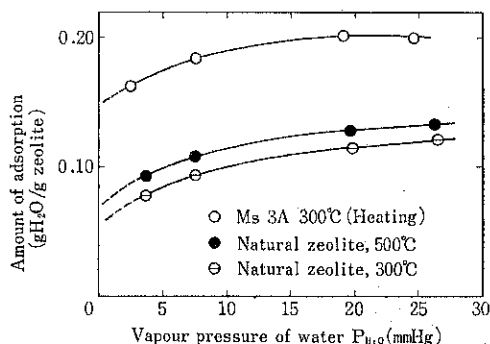


Fig. 5 Adsorption of water vapour on the Itaya zeolite.

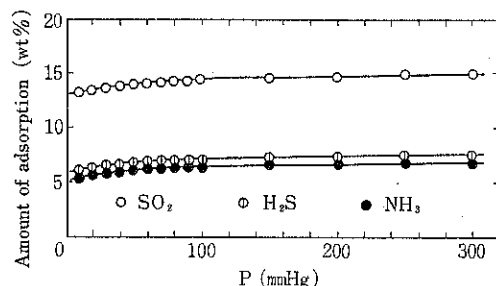


Fig. 6 Adsorption of NH₃, H₂S and SO₂ on the Itaya zeolite.

定した。その結果はFig. 6に示すように、原料ゼオライトへのこれらガスの吸着量は測定の範囲内ではガスの圧力が高くなれば若干増加するが、NH₃約5~6wt%、H₂S約6~7wt%、SO₂約14~15wt%である。

原料ゼオライトは、ホルマリン、メチルメルカプタン、o-チオクレゾールなどを吸着する性質があり、その性能は活性炭に匹敵する。

3.8 その他の諸性質

Table 4に湿式精製品その他の諸性質を示す。

また、パウダーテスター¹⁰⁾(細川鉄工所製)による

Table. 4 Properties of wet treatment zeolite.

	Pellet	Powder	Note
H ₂ O	20±1%	15±1%	110°C, 1hr
pH	4±0.2		20% solid
Whiteness	83±0.5		MgO=100
Residue	>0.1%	>0.05%	+325 mesh
Particle size	+15 μ	5.0%	Andreasen pipe-tte method
	-5 μ	55±3%	
Abrasion	100±20mg		Valley tester
Absorption of oil	43~48cc/100g		Linseed oil
CEC	140~180 meq/100g		NH ₄ ⁺ exchange

Table. 5 Flowability and floodability of the Itaya zeolite.

	SGW	SGW-B
Angle of repose (°)	44.6	46.5
Angle of fall (°)	23.1	22.6
Angle of spatula (°)	72.2	70.6
Aerated bulk density (g/cm ³)	0.311	0.323
Packed bulk density (g/cm ³)	0.668	0.693
Cohesiveness (%)	9.54	14.22
Dispersibility (%)	19	22
Angle of difference (°)	21.5	23.9
Compressibility (%)	53.44	53.39
Working bulk density (g/cm ³)	0.50	0.52

物理的諸性質の測定結果を Table. 5 に示す。

4. 利 用

3 に述べたゼオライトの諸特性を有効に利用することが試みられている。以下その主なるものを述べてみよう。

4.1 混合ガスの分離

天然ゼオライトの細孔は合成ゼオライトほど均一ではないので混合ガスの分離性能は悪い。しかし、板戸産ゼオライト（秋田県、ジークライト化学砒業鉱区、主成分 mordenite）を使用して空気中の酸素と窒素を工業的に分離することが試みられ成功を収めている。この方法では高純度の酸素と窒素を得ることはできないが、従来の液体空気を蒸溜して分離する方法と根本的に相違する分離技術であり注目される。また、空気中の酸素をゼオライト層を通過させることにより分離し、これを溶接の際

に使用することができる。

筆者らはガスクロマトグラフのカラム充てん剤として板戸産ゼオライトを使用し、空気-有機ガス系の分離実験を行なった。分離度は必ずしも良好とは言えないが、最適操作条件を見出すことにより混合ガス系の新しい分離技術への応用の道も開けるものと考えられる。

4.2 ガスの吸着剤

すでに述べたように、天然ゼオライトは多孔質であるので、各種のガスを吸着する性質がある。

板戸産ゼオライトは水分を約 12wt%（乾料基準）程度吸着するので、乾燥剤として利用できる可能性がある。しかしその熱再生温度はシリカゲルの 150°C にくらべると高いが（約 350°C）安価であるため、シリカゲルの用途の一部を置換える可能性がある。また、ゼオライト-塩化カルシウムなどの複合乾燥剤の研究開発も行なわれている。

天然ゼオライトは細孔径が一定でないため、モレキュラシーブ 3A のように水分だけを選択的に吸着する訳にはいかず、食品の乾燥の場合などはその香りまでも吸着する心配がある。しかし、筆者らは真空凍結乾燥に板戸産ゼオライトを用いるプロセスを開発し、乾燥時間の大巾な短縮化に成功した。

天然ゼオライトは NH₃、SO₂、H₂S、ホルマリン、メチルメルカプタン、オルトチオクレゾールなどの無機および有機の悪臭ガスを吸着する性質があり、あるガスの吸着量は活性炭以上の場合がある。このため、冷蔵庫その他の脱臭剤として使用されつつある。しかし、工業的に利用する場合には 2 次公害を引きおこさないため、吸着物の処理法、その脱着法などの確立は極めて重要である。

4.3 土壌改良材

天然ゼオライトの陽イオン置換容量は他の粘土鉱物にくらべて高く、いわば天然の陽イオン交換物質である。これは肥料中の NH₄⁺、K⁺ などの有効成分を吸着して流出を防ぎ必要度に応じてこれら吸着イオンを供給する性質をもっている。なお、土壌改良材として国内の使用のみならず東南アジアに輸出されている。

4.4 各種充てん材

わが国のカオリン資源は年々品位が低下してきたので、これにかわる製紙用充てん材の開発が望まれている。製紙用充てん材としては、粒度分布^{11), 12)}、摩耗度¹³⁾、白色度などの制約があるが、ジークライト化学砒業では天然ゼオライトの乾式精製品（SGW）の利用に成功し、現在電話帳、列車時刻表、葉書など中質紙の充てん材として広く使用されている。さらに高品位のものとして湿式精製品（Hi-Z）を生産している。天然ゼオ

ライトをプラスチックやゴムの充てん材として使用することも試みられている。

4.5 飼料の添加材

近年、飼料の価格が国際的に高価になった。このため家畜に効果的に消化させることが重要である。飼料に2%程度の天然ゼオライトを添加し、その吸収率を向上させることが試みられており、添加にともなう家畜の体重変化、排出物への影響なども検討されている^{(14),(15),(16)}。

4.6 排水処理材⁽¹⁷⁾

原子力発電からは大量の放射性廃棄物が排出される。そのうち、低レベルの廃液中には¹³⁷Csが含まれている。これは半減期が長いことから、廃液中の放射能レベルがなかなか低下しない。したがって¹³⁷Csを除去すれば大幅なレベルダウンになる。

天然ゼオライトによる¹³⁷Csの除去効果は

- 1) 前処理をしないで十分使用できる。
- 2) 適用のpHが2~11と広範囲である。
- 3) Feと併用すればSr, Coなどの長寿命の核種が一度に処理できる。

などから、原子力の分野で放射性廃棄物処理材料として新しい用途が開けてきた。

わが国の下水処理の約70%が活性汚泥法で行なわれている。この方法ではアンモニア性窒素の除去は困難であり、現在は殆んど未処理のまま放流しているので海洋などの富栄養化をもたらしている。

天然ゼオライトは前述のようにアンモニア性窒素のイオン交換能を有しており、熱処理によってゼオライトの再生が可能で、アンモニアを無公害の水蒸気と窒素に分解してしまう。このことに着目し、下水のアンモニア性窒素をゼオライトで処理する技術が開発されている。

また、ゼオライト層に廃液を通過させることによりSSの除去ができることも報告されている。

4.7 固結防止材

肥料などの結晶は保存中に固結するものがある。固結の原因の一つとして含有水分によることが多い。天然ゼオライトを少量混入することによりこれを選択的に吸着し、固結を防止し、結晶の表面処理も同時に行なえる。

4.8 建築材料

天然ゼオライトを原料として、断熱材のケイ酸カルシウムを製造したり、軽量骨材とすることが試みられている。また、天然ゼオライトは水分を吸着する性質があるので部屋の湿度をある程度コントロールする呼吸壁についての開発も試みられている。

4.9 触媒および担体

現在、石油化学をはじめ有機化学の分野で合成ゼオライト触媒が広範囲に用いられている^{(18),(19)}。

天然ゼオライトをそのまま触媒として用いることは殆んど期待できないが、 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系触媒を必要とする特殊合成反応に成功した例もあり、また、自動車排ガス除去用触媒担体などの研究に利用されたこともある。

5. おわりに

わが国は火山国であり、天然ゼオライトの資源には比較的めぐまれている。また、工業的に利用できるのはclinoptiloliteとmordeniteに限定されるように思われる。天然ゼオライトの諸特性は最近明らかになってきたが不明な点も多い。これら物理化学的諸性質が解明されることによって新しいより高度な利用法が開発されて行くように思われる。本稿が粉体を取り扱う方々の関心をいただければ幸である。

最後に資料の一部を提供くださったジークライト化学鉱業株式会社に厚くお礼申し上げる。

参 考 文 献

- 1) Donald. W. Breck : Zeolite molecular sieves 188 Wiley-Interscience (1974).
- 2) Ibid 740~743 (1974).
- 3) 湊 秀雄 : 天然ゼオライトの特性とその利用, 高圧ガス, 5, [3] 536~547 (1968).
- 4) ジークライト化学鉱業 : ジークライトに関するカタログ (1973).
- 5) 遠藤二男, 木村義行, 後藤秀雄, 高坂彬夫 : 天然ゼオライトの湿式精製とその特性, 化学工学協会, 第40年会研究発表講演要旨集, 454~455 (1975).
- 6) 高坂彬夫, 菊池正志, 長谷川二男 : 板谷産ゼオライトの諸特性, 材料, 23, [250] 515~519 (1974).
- 7) 湊 秀雄 : ゼオライトとその利用 84技報堂(1967).
- 8) Clyde Orr : Application of mercury penetration to material analysis Powder Technol., 3, 117~123 (1969/70).
- 9) 浦野敏平, 水沢博士, 清浦雷作 : メタノール吸着等温線による細孔分布測定法, 工業化学雑誌, 73, 1911~1915 (1970).
- 10) 細川鉄工所 : パウダースター取扱説明書.
- 11) 高坂彬夫 : 湿式摩砕による微粉体の製造, 粉体と工業, 3, [11] 42~49 (1971).
- 12) 高坂彬夫 : 微粉体の粒度測定, セラミックス, 8, [8] 599~604 (1973).
- 13) 高坂彬夫, 柴田孝雄, 西田吉克 : スラリーによる材料の摩耗, 材料, 22, [238] 709~712 (1973).
- 14) 大野木利成 : 含沸石凝灰岩粉末による鶏糞処理試 (142頁へつづく)

粒子層内における熱と水分の同時移動現象に関する諸問題

Some problems on simultaneous heat and moisture transport phenomean in granular packed bed.

倉前 正志
Masashi Kuramae

1. 緒 言

粒子層や多孔質物質の内部を熱や水分が移動する現象は乾燥操作をはじめ土壌学, 土質工学, 採油学, 衛生工学などさまざまな分野に共通に見られる問題であり, その現象を定性的ならびに定量的に把握することはこれらの分野における研究の基礎として重要である。

一般に湿潤粒子層内で起こる現象を熱と物質の同時移動現象という観点からその内容を分類すれば

(1) (主として) サクシヨンプレシャの勾配に基づいて起こる液状水移動現象 (Fig. 1—①)

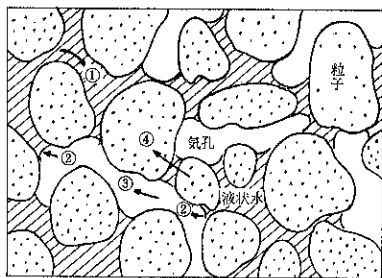


Fig. 1

(2) 相変化 (蒸発・凝縮) 点において潜熱の吸収または放出を伴う相変化現象 (Fig. 1—②)

(3) 蒸発点から凝縮点へもしくは系外への (主として) 拡散に基づいて起こる蒸気移動現象 (Fig. 1—③)

(4) 物質内の熱伝導および蒸気移動による潜熱移動に

基づく熱移動現象 (Fig. 1—④)

などである。

実際にはこれらの現象がそれぞれのプロセスに応じて相互に複雑にからみ合っている場合が多くまた材料の性状および構造 (特に空隙の幾何学的構造) の複雑性ともからんで一般にその量的な解析には困難を伴う。

本稿は粒子層の乾燥機構解析の立場から行なわれた最近の研究を中心に粒子層内で起こる熱と水分の同時移動現象に関する筆者の興味深い問題について解説する。

2. 恒温・定常状態における粒子層内液状水移動

粒子層の空隙を移動する水分には液状で移動するものと蒸気状で移動するものがありその割合に関する実験的な検討^{1), 2), 5a)}も行なわれているが, 一般に恒率乾燥過程のように粒子層の含水率が比較的多くかつ層内に温度勾配が存在しない場合には前者の移動が主であると考えられる。粒径数十ミクロン以上の比較的粗い非吸着性粒子層に存在している水分は Fig. 2 に示す如く (a)付着

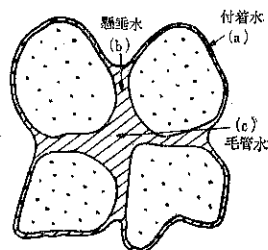


Fig. 2

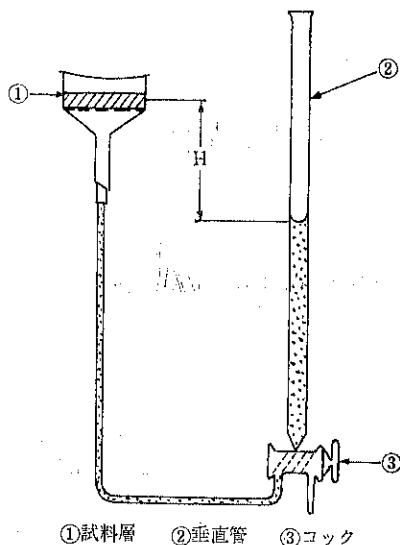


Fig. 3

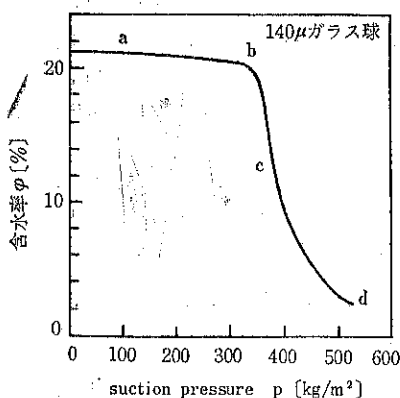


Fig. 4

水(b)懸垂水(ウェッジ水)(c)毛管水(キャピラリー水)に分けられ、このうち(a)は粒子表面分子力によるもので量的に少なく無視しようと思われる。また(b)、(c)はそれぞれ粒子間の接点および孔に毛細管力によって保有されており、液状で移動するものは主に(c)の水分である。

粒子層内の液状水移動速度を量的に表わす方法はその起動力の選び方によって種々ありそれらの関係について検討が行なわれており、一般に粗粒子層にあってはキャピラリーサクシヨンプレシャ(以下C. S. Pと略す)Pの勾配を起動力にとって表わしうることが示されている³⁾。よって液状水移動速度 G_w [g/cm²sec] は

$$G_w = \frac{\rho_w K_p}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad \dots\dots(1)$$

と表わされる。(ρ_w : 水の密度 [g/cm³], K_p : 透水係数 [cm²]) 粒子層の C. S. P については従来含水率 S

の関数と考えられその関係は Hines の装置⁶⁾ (Fig. 3) を用いて測定される^{4), 5)}, (Fig. 4) のような S—R 曲線についてさらに詳細な検討を行なえばヒステリシスの存在⁵⁾や初期含水率⁵⁾, 層厚によって異なる⁷⁾ことがわかるが、いまひとまずこれらの影響を考えず C. S. P が含水率の一価関数として整理されると仮定すれば⁸⁾(1)式は

$$G_w = \rho_w \frac{K_p}{\mu} \frac{dp}{dS} \frac{dS}{dx} \\ = -\rho_w D_w \frac{dS}{dx} \quad \dots\dots(2)$$

となる。 D_w の内容は粒子層内液状水移動現象を Fick の拡散式で表わした際の拡散係数に相当するものであり、通常水分移動係数とよばれる。

粒子層の C. S. P は気液界面の存在する粒子間隙の大きさに決まる^{51), 52)}ものであり、したがって C. S. P に基づく粒子層内の液状水移動現象を解析するためには少なくとも粒子間隙の大きさの分布を考慮に入れたモデルを採用する必要がある。その代表的なものとして Krischer らが考えたモデル⁹⁾は粒子層の大きささまざまな間隙を管径に分布を有する直立円管群より成り各円管が互いにつながっており水がとおるのに抵抗のない結合としたものである。(Fig. 5) いま dx 区間について毛細管力と重力および摩擦力のつり合いを考え、Poiseuille の法則を適用すれば

$$\frac{dp_x}{dx} dx = \frac{\rho_w g}{g_c} \sin \delta dx + \frac{8\mu u}{g_c r_c^2} dx \quad \dots\dots(3)$$

となり、定常状態での水分移動速度 G_w は

$$G_w = \int_{r_{cmin}}^{r_{cex}} \pi r_c^2 \rho_w u \frac{dn}{dr_c} dr_c \\ = \frac{\alpha \pi g_c \rho_w}{8\mu} \left\{ -\frac{\rho_w g}{g_c} \sin \delta + \frac{dp_x}{dx} \right\} \int_{r_{cmin}}^{r_{cex}} r_c^4 \frac{dn}{dr_c} dr_c \quad \dots\dots(4)$$

と表わされる。毛細管分布を実測可能な P—S 曲線でおきかえれば¹⁰⁾層水平 ($\alpha=0$) のときは

$$G_w = \frac{\alpha g_c \rho_w}{8\mu} \left\{ \int_{p_{max}}^{p_x} \left(\frac{2\sigma}{p} \right)^2 \frac{dS}{dp} dp \right\} \frac{dp_x}{dS_x} \frac{dS_x}{dx} \quad \dots\dots(5)$$

となり(2)式と比較することにより水分移動係数の物理的意味が推察される。ここで α は毛管流路の屈曲、拡張などによる補正係数であるが、精詳な測定の結果含水率や粒子の性状によって顕著に変化するということが明らかにされた¹¹⁾。(Fig. 6)

一方、粒子層の排水、水銀圧入のような二流体置換現象が確率的置換過程のモデルに基づいて考察されている^{13), 14)}。すなわち、Fig. 7 に示すように粒子層の空

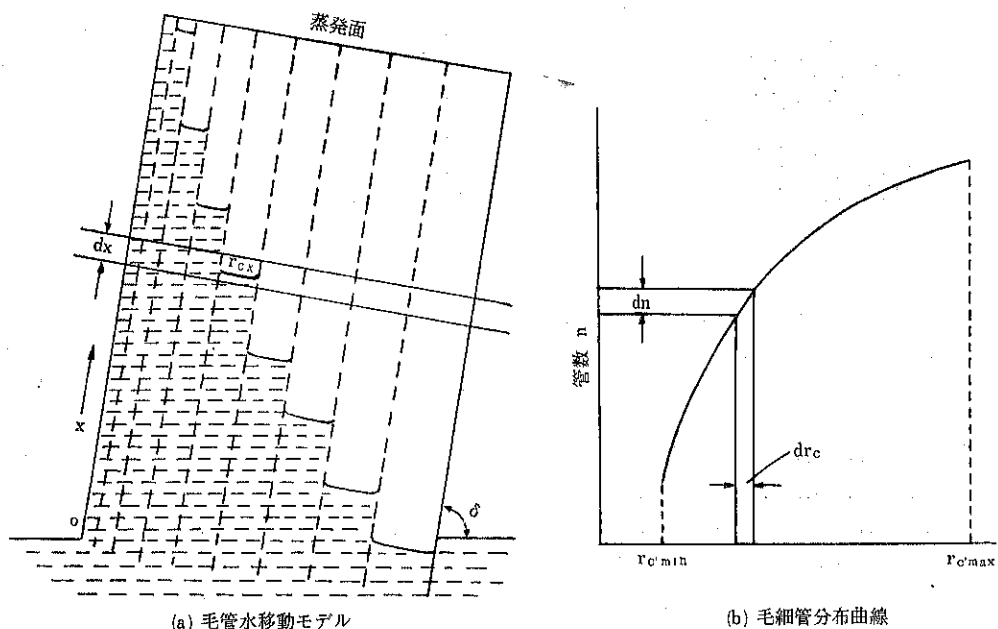


Fig. 5

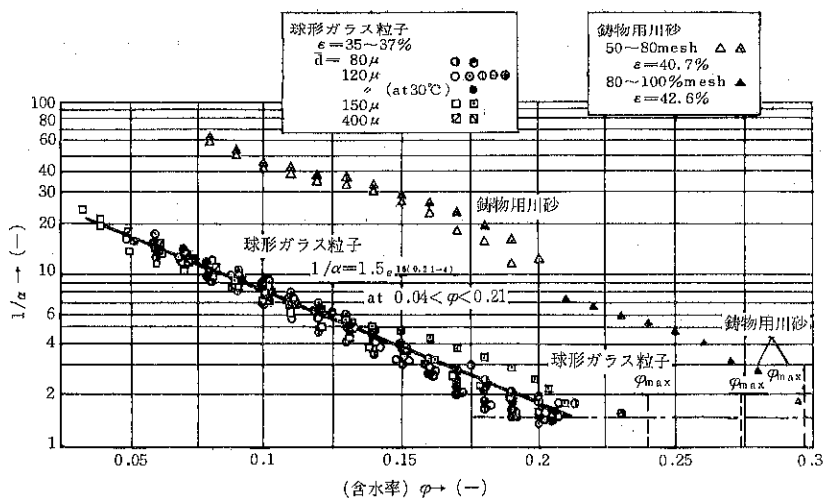


Fig. 6

隙をいくつかの粒子で囲まれた比較的大きな空間（孔）とそれらを連結する咽喉状のくびれよりなる構造とを考え、くびれ半径の分布と流体の侵入圧とで決まる流体の通過確率と流体置換率との関係が種々のタイプの構造について検討された¹⁴⁾。その結果によれば通常の粒子層ではS-P曲線（Fig. 4）のb-c区間に見られるような25~30%の通過確率の相当する臨界圧において急激な二流体置換現象の起こる理由を説明することができる。筆者はさらにこのような孔とくびれの連結モデルに基づ

きくびれ半径の分布とS-Pの関係、C. S. Pと流動抵抗のつり合い、孔に存在する液が流動に関する割合などを考慮することにより定常状態における液状水移動抵抗の含水率依存性に関する解析を行ない、先述の α の含水率変化について考察した¹²⁾。また、このモデルを恒率乾燥過程に適用し、粒子層内の水分分布について検討を加え、水分移動係数の内容および限界含水率に関する詳細な考察も行なっている¹⁵⁾。

粒状物質内における液状水移動機構にはこれまで述べ

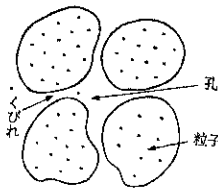


Fig. 7

た(1)C, S, Pに基づく毛管水の移動のほか(2)電気透析的な力に基づく移動^{16), 54)} (3)収縮など圧力勾配に基づく移動(4)粒子表面を流れる膜流れ¹⁷⁾ (5)重力・遠心力に基づく移動などがある。(2), (3)は主として粘土のような微粉体層の乾燥機構、(4), (5)は脱水操作と関連して重要である。またその他可溶性粉体の付着・造粒機構などの問題と関連して溶解を伴う系における水分の挙動の解析などは今後に残された興味深い問題であると思う⁷²⁾。

3. 温度勾配下における粒子層内の水分移動

湿った物質に温度勾配を与えると高温側から低温側へ水分が移動するという事実が古くから知られている。いま代表的な系として一定の含水率の粒子層を水分が逃げないように周囲を密閉し、そのような系の両端に温度差を与えた状態を考えると、粒子層内の水分は高温側では主として蒸発が起こり、蒸発した水分はその点における水蒸気分圧の勾配に基づいて低温側へ拡散しそこで潜熱を放出して凝縮が起こる。また凝縮した水分は低温側から高温側へ液状水の形で逆流する。このような蒸発→拡散→凝縮→液状水移動のサイクルを繰り返して次第に平衡状態に達していく^{18), 19), 68)}。(Fig. 8) いま含水率が多い場合は系内が飽和蒸気圧 p_s にあると考えられ⁷⁰⁾、水蒸気移動速度 G_D は Stefan の一方拡散の式を用いて

$$G_D = -\frac{\beta D \varepsilon}{RT} (1-S) \frac{P_0}{P_0 - p_s} \frac{dp_s}{dT} \frac{dT}{dx} \\ = -K_G \frac{dT}{dx} \quad \dots\dots(6)$$

と表わされる、 β, D, ε はそれぞれ蒸気移動の屈曲係数、拡散係数および層の空隙率である。

一方、液状水移動速度 G_w は表面張力 σ が温度の関数であるから $P (= 2\sigma \cos \theta / r_c, \theta: \text{接触角})$ の温度依存性を考慮すれば

$$G_w = \frac{\rho_w}{\mu} K_p \left(\frac{\partial p}{\partial S} \frac{dS}{dx} + \frac{\partial p}{\partial T} \frac{dT}{dx} \right) \quad \dots\dots(7)$$

となり、平衡状態では

$$G_w + G_D = 0 \quad \dots\dots(8)$$

であるから温度分布および水分分布の関係を表わす式は式(6)~(8)より

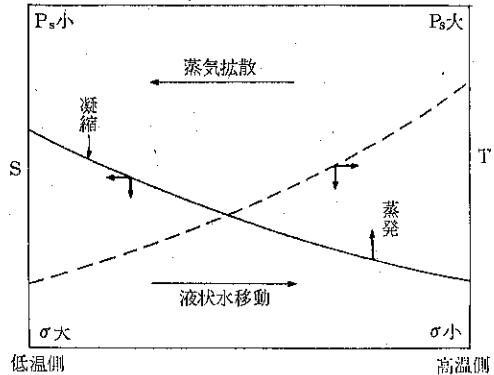


Fig. 8

$$\frac{dS}{dT} = \frac{\mu K_G}{\rho_w K_p \left(\frac{\partial p}{\partial S} \right)} - \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)}{\left(\frac{\partial p}{\partial S} \right)} \quad \dots\dots(9)$$

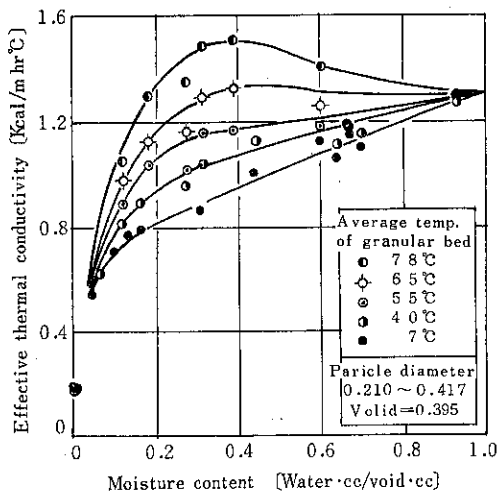
となる²⁰⁾。(9)式の右辺第1項は動的平衡の項また第2項は静的平衡の項としてその物理的意味が説明される。なお、特に飽和に近い高含水率域で空隙部が液によって隔離された気泡状態にある場合および pendular 状態の低含水率域で液状水の移動が不能の場合には(9)式は適用されず別の検討が必要になる⁸⁾。また含水率が少なく蒸発速度のおそい場合には蒸発→拡散の物質移動過程において蒸発抵抗の存在に基づく蒸発点での系の非平衡性を考慮した解析が必要であるように思われる^{61) 73)}。

温度勾配下における水分移動現象は粒子層の減率乾燥や伝導加熱型乾燥の機構の解析のほか、次に述べる粒子層の有効熱伝導度の値およびその測定法に重要な影響を及ぼす。蒸発、凝縮機構と蒸気、液状水移動との相互関係^{50), 62)} およびそれらの移動現象と粒子層構造⁵²⁾ や粒子物性との関係などについては未知な点が多く、今後の研究に待たれるところが多い。

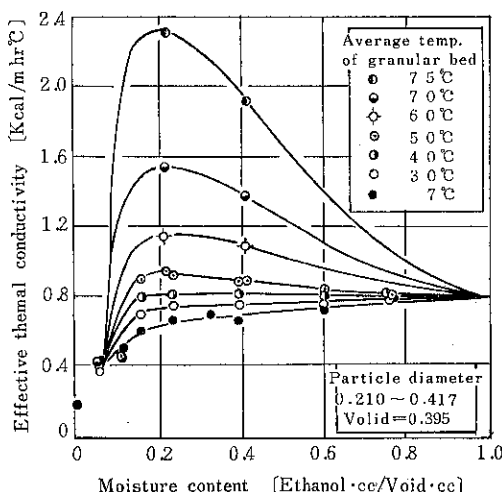
4. 湿った粒子層の伝熱機構

保温材料などが湿ると熱伝導度が大きくなることはよく知られている。すなわち多孔質物質中に水分が浸透すると空隙に熱伝導度 $\lambda = 0.02 \text{ kcal/hrm}^\circ\text{C}$ の空気に代わって $\lambda = 0.5 \text{ kcal/hrm}^\circ\text{C}$ の水が置きかえられ、さらに前節で述べたように温度差が存在すると水蒸気の拡散が生じ、物質移動に伴う潜熱移動が加わって一般に熱伝導度が増加する⁶⁹⁾。

湿った物質の熱伝導度の測定に関しては従来より熱流の周期法²¹⁾ や線状²²⁾・棒状熱源²³⁾ または平板熱源²⁴⁾ を用いた過渡応答法による測定法が採用されているが、これらの方法では比較的温度が低く潜熱移動の効果が無視しうる場合についてのみ適用しうるものである。最



(a) 水-大理石系



(b) エタノール-大理石系

Fig. 9

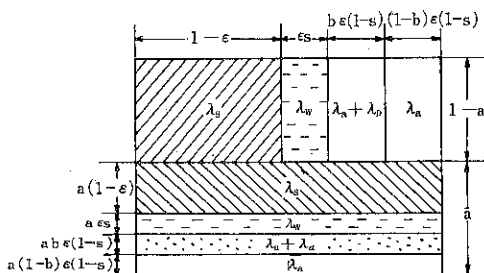


Fig. 10

近、大谷ら²⁵⁾は水およびアルコールで湿った粒子層の有効熱伝導度 λ_0 を定常法における比較法によって測定

し、潜熱移動の効果の顕著な高温域を含む広範囲の温度域にわたった比較的精度のよい測定結果を報告した。

(Fig. 9) Fig. 9 によればある温度以上の粒子層では含液率の増加とともに蒸発→拡散→凝縮のサイクルが活発に起こり λ_0 も増加するが、含液率がある値以上になると空隙が減少して潜熱移動量が減少し、その結果 λ_0 も減少すると考えられる。

このような湿った粒子層の有効熱伝導度は構成物質おのこの熱伝導率、粒子形や空隙率、含液率、温度、液の物性などに影響され、その一般的な数式化は極めて困難である⁶⁰⁾。Krischer¹⁸⁾、²⁶⁾は湿った物質を三種の相、すなわち固体、液体、空気および飽和水蒸気から成るとし、それらが熱流に対して直列および並列に組合されたものの結合より成るモデルを提出した。(Fig. 10) しかし、一般にその三相の配列状態を仮定して推算した結果は実測値の傾向を説明できないようである²⁷⁾、⁵⁹⁾。

二相系 (液体を含まないか空隙が完全に液で満たされた状態)における粒子層の λ_0 に関しては国井のモデル²⁸⁾ によって比較的精度よく推算することができるが、桐米ら²⁹⁾はこのモデルを三相系に拡張し、粒子層内の水の存在状態や蒸気拡散の存在なども考慮に入れた詳細な解析を行なっている。その結果によれば三相系の λ_0 は

$$\lambda_0 = \lambda_{e0} + c_1 \lambda_D + \frac{c_3 \lambda_D}{1 + c_2 \lambda_D} \quad \dots\dots(10)$$

と整理できる。 λ_{e0} は蒸気拡散が存在しない場合の λ_0 であって木村の実験式³⁰⁾などによって簡単に推定できる。 λ_D は拡散相当熱伝導率で系が飽和蒸気圧にある場合には

$$\lambda_D = \frac{D}{RT} \cdot \frac{P_0}{P_0 - P_s} \cdot \frac{dp_s}{dT} r \quad \dots\dots(11)$$

(r : 蒸発潜熱[kcal/kg])

と与えられる。また、 c_1 、 c_2 、 c_3 は含水率、充填構造 (主に空隙率)、構成物質の λ の関数である。

(10)式の右边第2項は孔から孔へのマクロな拡散による潜熱の移動および第3項は孔内でのミクロな拡散による固相熱伝導への寄与を示すものである。筆者が大谷らの測定結果に (Fig. 9) に基づいて計算したところによれば第3項の λ_0 への寄与も相当大きいと見られる。したがって、湿った物質の伝熱機構を各相の熱伝導と蒸気拡散による顕熱移動とに単純に分離して解析する方法には問題がある。

湿った物質の有効熱伝導度は乾燥工学などにおける重要な基礎物性値であるが、測定・解析とも困難であり現在のところその値を簡単に推定する方法は確立されてきていない。簡単、迅速かつ高精度の測定方法の開発とともに、簡単で精度のよい推算法が確立されることがの

ぞまれる。

5. 粒子層の乾燥機構

粒子層の乾燥プロセスは熱と水分の同時移動現象の典型である。このうち恒率乾燥の機構および恒率乾燥から減率乾燥への移行のメカニズムは主に蒸発表面における移動現象を考察することによってほぼ解決された。すなわち不連続湧出源 (Fig. 11) からの境界膜内におけるポテンシャル流れを考察することによりぬれ面積の割合 ϕ が変化しても表面における物質移動係数 k_g はあまり変化しないということとまた k_g が減少しても温度上昇の効果によって蒸気圧が増加し k_g の減少を補償して蒸発速度があまり変化しないというこの二つの理由によって恒率乾燥の起こる理由を見事に説明することができる^{31), 32)}。また乾燥が進行して層内の含水率が減少してくると表面の蒸発速度と内部における液状水移動とのバランスがくずれて蒸発面が不連続的に内部に進行しその結果蒸発速度が急激に減少して減率過程へ移行する⁵⁸⁾。したがってこの限界点における表面含水率が決まり、かつ内部の液状水移動機構がわかっていれば層内の水分分布を算出することにより限界含水率が求められるはずである^{33), 15)}。限界点における表面含水率がゼロ (平衡含水率)³³⁾ か有限値 (懸垂含水率)^{34), 55)} かという点については意見が別かれているが、いま限界点における表面含水率がゼロの点で規定できるとし、水分移動係数が含水率の関数である場合についての限界含水率の簡単な推定法が考案されている^{33), 74)}。

減率乾燥過程については一般に層内における熱、水分の移動、相変化およびそれらの相互作用を考慮して解析しなければならず、またこれまでに述べたように粒子層内の水分移動係数、内部蒸発係数、有効熱伝導率などの諸物性値の温度および含水率との関係がまだ十分解明されていないためしたがってこれらの物性値を一定とおくなど近似的な取扱いにならざるを得ない。また仮にこれら諸物性値の変化を考慮すれば一般に熱物質移動の微分方程式は非線型となり解析はますます困難になる。

減率乾燥の単純化したモデルとしては Fig. 12 に示すような粒子層を乾燥域と湿潤域に分け、その境界面移動を伴う熱移動方程式を解くことにより減率乾燥速度^{35), 36)}、層内温度分布^{37), 57), 64)}などの解析が行なわれている。また減率乾燥速度曲線と乾燥条件、諸物性値などとの関係についての詳細な解析的検討もある³⁸⁾。

一方、乾燥現象を不可逆過程の熱力学として統一的に取扱い一般的な熱物質移動の微分方程式を種々の境界条件の下で解くというやり方がソ連の Luikov らによってさかんに行なわれており体系化がすすんでいる^{39), 40)}。

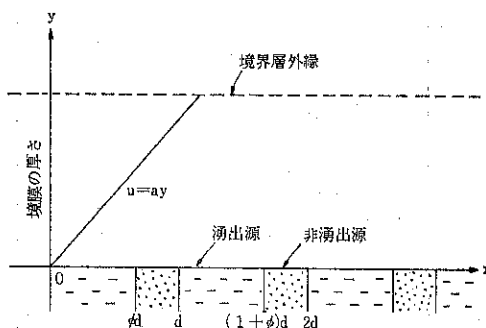


Fig. 11

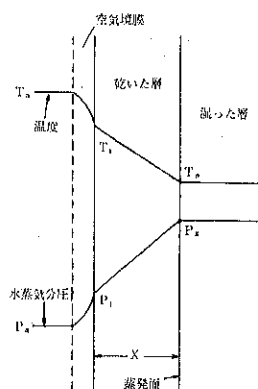


Fig. 12

これらは物性値を全て一定として取扱っており、また移動ポテンシャルのとり方や物性値の物理的意義に問題を含むものがあり更なる検討がのぞまれる。そのほか物性値の変化を考慮した解析の試みとして 杉山らの研究⁴¹⁾があり今後の進展が期待される。

また以上の他に特に乾燥方法または乾燥装置の問題に関連して興味深いものとしては伝導加熱型乾燥における層内温度分布、水分分布の解析^{42), 67)}、通気乾燥、流動層乾燥における粒子・流体間移動係数の問題^{43), 44), 68)}、粒子群の流動化と水分との関係⁴⁵⁾、回転乾燥装置における総括伝熱係数の問題^{46), 65), 66), 71)}などがある。

6. 結 言

以上述べてきたように粒子層内の熱と水分の同時移動現象の定量的な解析は種々の困難が多く、未解決な問題が多く残されている。今後更に精度のよい実験結果の蓄積とともに合理的なモデルに基づく機構の確立がのぞまれる。本稿は主として非吸湿性粒子層の乾燥機構の問題との関連で解説したが紙数の都合で割愛せざるを得なかった重要な問題も多い。これらは当該文献^{47), 48), 49), 71)}などで補っていただきたいと思う。

記 号

c_1, c_3	: 定数 [—]
c_2	: 定数 [$m \cdot hr \cdot ^\circ C / kcal$]
D	: 蒸気拡散係数 [m^2 / hr]
D_w	: 水分移動係数 [m^2 / hr]
G_D	: 蒸気移動速度 [$kg / m^2 \cdot hr$]
G_w	: 液状水移動速度 [$kg / m^2 \cdot hr$]
g	: 重力加速度 [m / hr^2]
g_c	: 重力換算係数 [—]
K_p	: 透水係数 [m^2]
k_g	: 物質移動係数 [m / hr]
n	: 毛細管数 [—]
p	: キャピラリーサクシヨンプレシヤ [kg / m^2]
P_0	: 全圧 [kg / m^2]
p_s	: 飽和蒸気圧 [kg / m^2]
R	: ガス定数 [$kcal / mol \cdot ^\circ K$]
r_c	: 毛細管半径 [m]
S	: 含水率 [—]
T	: 温度 [$^\circ C$]
u	: 水分移動速度 [m / hr]
x	: 距離 [m]
α	: 液状水移動経路係数 [—]
β	: 蒸気移動屈曲係数 [—]
r	: 蒸発潜熱 [$kcal / kg$]
δ	: 角度 [—]
ϵ	: 空隙率 [—]
θ	: 接触角 [—]
λ	: 熱伝導度 [$kcal / m \cdot hr \cdot ^\circ C$]
λ_e	: 有効熱伝導度 [$kcal / m \cdot hr \cdot ^\circ C$]
λ_D	: 拡散相当熱伝導度 [$kcal / m \cdot hr \cdot ^\circ C$]
μ	: 粘度 [$kg / m \cdot hr$]
ρ_w	: 密度 [kg / m^3]
σ	: 表面張力 [kg / m]

添 字

min	: 最小値
max	: 最大値

参 考 文 献

- 1) 若林; 化学工学, **28**, 12 (1964).
- 2) 桐栄, 林, 沢田, 藤谷; 化学工学, **29**, 525 (1965).
- 3) 大谷, 鈴木, 前田; 化学工学, **30**, 1130 (1966).
- 4) Oliver, Newitt; Trans. Inst. Chem. Engr., **27**, 9 (1949).
- 5) 大谷, 鈴木, 前田; 化学工学, **27**, 638 (1963).
- 6) Haines; ; J. Agr. Sci., **17**, 264 (1927).
- 7) 鈴木; 最近の化学工学, p. 43 (1972).
- 8) 久保田, 大谷, 河上; 化学工学, **32**, 822 (1968).
- 9) Krischer; Z-VDI., **82**, 373 (1938).
- 10) 大谷, 前田; 化学工学, **28**, 362 (1964).
- 11) 大谷, 前田; 化学工学, **31**, 463 (1967).
- 12) 倉前, 田中; 化学工学論文集, **1**, 387 (1975).
- 13) Iczkowski; I. E. C., Fund, **6**, 263 (1967).
- 14) 鈴木, 大谷, 前田; 化学工学, **37**, 1103 (1973).
- 15) 倉前, 田中; 化学工学第40年会講演要旨集, p. 409 (1975).
- 16) Newitt, Coleman; Trans. Inst. Chem. Engr., **30**, 28 (1952).
- 17) 山口, 井上; 化学工学, **30**, 433 (1966).
- 18) Krischer; VDI-Forsch., **22**, 1 (1956).
- 19) Kruger et al; Appl. Sci. Res., **22**, 390 (1970).
- 20) 大谷, 鈴木, 前田; 化学工学, **28**, 642 (1964).
- 21) 棚沢; 機会学会論文集, **1**, 217 (1935), **2**, 352 (1936).
- 22) Joy; ASTM. Sep, Tech, No. 217 (1957).
- 23) 斉藤, 岡垣; 日本機会学会誌, **62**, 741 (1959).
- 24) 森田; 日本機会学会誌, **63**, 1177 (1960).
- 25) 山川, 佐々木, 岡田, 大谷; 化学工学, **36**, 1342 (1972).
- 26) Krischer, Z. VDI, **79**, 1315 (1935).
- 27) 遠藤, 佐々木, 岡田, 大谷; 第7回日本伝熱シンポジウム論文集, p. 149 (1970).
- 28) Kunii, Smith; A. I. Ch. E. J., **6**, 71 (1960).
- 29) 桐栄, 岡崎, 伊藤; 化学工学第36年会講演要旨集, p. 224, (1971).
- 30) 木村; 化学工学, **23**, 502 (1959).
- 31) 鈴木, 前田; J. Chem. Engr. Japan., **1**, 26 (1968).
- 32) 遠藤, 鈴木, 大谷; 化学工学, **34**, 299 (1970).
- 33) 鈴木, 前田; 第3回日本伝熱シンポジウム論文集, p. 161 (1966).
- 34) 関, 福迫, 田中, 中岡; 第10回日本伝熱シンポジウム論文集, p. 389 (1973).
- 35) 桐栄, 林, 長谷川, 甲斐, 田中; 化学工学, **28**, 458 (1964).
- 36) 桐栄, 林, 藤谷; 化学工学, **29**, 771 (1965).
- 37) 桐栄, 林, 沢田, 藤谷; 化学工学, **29**, 25 (1965).
- 38) Keey, Suzuki; Int. J. Heat Mass Transfer, **17**, 1455 (1974).
- 39) Luikov; Heat and Mass Transfer in Capillary-porous Bodies, p. 341 (1966).
- 40) Luikov; Int. J. Heat Mass Transfer, **18**, 1 (1975).
- 41) 中村, 杉山; 化学工学, **35**, 1122 (1971).

- 42) Bruin; Int. J. Heat Mass Transfer., 12, 45 (1969).
- 43) Kunii, Suzuki; Int. J. Heat Mass Transfer., 10, 845 (1967).
- 44) Nelson; Chem. Eng. Sci., 30, 1 (1975).
- 45) 新井, 杉山; J. of Chem. Eng. Japan, 7, 245 (1974).
- 46) 倉前, 田中; 化学工学第7回秋期大会講演要旨集, p. 271 (1973). および化学工学論文集, 1, 583 (1975).
- 47) 桐榮; 詳論化学工学, p. 581 (1967).
- 48) 大谷, 岡崎; 化学工学, 38, 118 (1972).
- 49) 倉前; 粉体と工業, 4, No. 1, 41 (1972).
- 50) Luikovら; Int. J. Heat Mass Transfer., 17, 961 (1974).
- 51) Schwartz; I. E. C., 61, No. 1, 13 (1969).
- 52) Krischer; Chem. Ing. Techn., 34, 154 (1962).
- 53) Newitt ら; Trans. Inst. Chem. Engr., 38, 273 (1960).
- 54) 若林; 化学工学, 28, 33 および 102 (1964).
- 55) Broughton; I. E. C., 37, 1184 (1945).
- 56) 山口; 化学工学, 29, 83 (1965).
- 57) Arzan, Morgan; Chem. Eng. Progr., Symposium Series., 63, No. 79, 24 (1967).
- 58) Morgan ら; Chem. Eng. Progr., Symposium Series., 63, No. 79, 1 および 14 (1967).
- 59) Nissan, Hanser, Walker; Chem. Eng. Progr., Symposium Series., 59, No. 41, 114 (1963).
- 60) Leyers; Chem-Ing. Techn., 44, 1109 (1972).
- 61) 杉山, 架谷, 中村, 森下; 化学工学, 32, 1227 (1968).
- 62) Kito, Sugiyama; Int. J. Heat Mass Transfer., 13, 1705 (1970).
- 63) Rantze; Chem. Eng. Progr., 48, 247 (1952).
- 64) Nissanら; A. I. Ch. E. J., 5, 103 および 344 (1959), 6, 406 (1960).
- 65) 広末, 秋丸, 篠原; 化学工学第39年会講演要旨集, p. 169 (1974).
- 66) Kern; Int. J. Heat Mass Transfer., 17, 981 (1974).
- 67) Mikhailov, Shishedjiev; Int. J. Heat Mass Transfer., 18, 15 (1975).
- 68) 長谷川, 関; 第10回伝熱シンポジウム講演論文集, p. 381 (1973).
- 69) 関, 斉藤, 小池; 冷凍, 44, No. 500, 14 (1969).
- 70) 関, 斉藤; 第3回伝熱シンポジウム講演論文集, p. 165 (1966).
- 71) 桐榮; 乾燥装置 (日刊工業新聞社) (1969).
- 72) 工藤, 倉前, 田中; 化学工学北海道大会講演要旨集 p. 86 (1975).
- 73) 倉前, 田中; 同上, p. 8 (1975).
- 74) 鈴木, 遠藤, 実戸, 前田; 同上, p. 2, 4, 6, (1975).

(134頁のつづき)

- 験, 山形県総合種畜場調査報告, 11~21 (1963/64).
- 15) 大野木利成; 含沸石凝灰岩粉末による鶏糞処理試験, (第2報) 同上 7~17 (1965).
- 16) 大野木利成; 鶏糞処理に関する研究, (第3報) 同上 31~39 (1966).
- 17) 西村陽一; 天然ゼオライトの特性と利用, 粘土科学, 13, [1] 23~34 (1973).
- 18) 藤田勝也; モレキュラシーブを利用した主要工業の最近の状況, 化学工学, 39, [5] 257~262 (1975).
- 19) 原 伸宣, 高橋浩編; ゼオライトー基礎と応用, 266~299講談社 (1975).

標準粉体の紹介

Introduction of the Standard Powder

山下 憲一*

Kenichi Yamashita

1. まえがき

昭和33年に始めて試験用粉体（現在は試験用ダストという）の規格が制定されてから最早28年を経過したが、その間、試験用ダストは各種集じん装置、除じん装置のろ過効率試験、機器類の摩耗、耐久性能試験などわが国の鉱工業における各種試験研究に広く用いられてきた。

しかしながら、試験用ダストを多量に必要とする業界の研究組合においては研究組合独自に試験用ダストを作っていた関係から、比較的潤沢にまかなわれていたが、このほかのユーザーが必要とする場合の入手は必ずしも容易でなかった。

したがって、試験用ダストの入手方法、使用法についての問い合わせが規格を作成した事務局である工業技術院標準部や、規格原案の作成に直接担当した私共到大へん多くあり、これに対応するだけでも大へんな状況が長く続いた。それらのいずれからも容易に“入手できる試験用ダストの早期の確立”が強く要望されてきた。

このような折の昭和46年11月、粉体工業懇話会（現在の日本粉体工業協会）が発足し、同懇話会の事業として標準粉体を取り扱うということがとりあげられ、昭和47年6月その計画の具体化をはかるために標準粉体委員会が組織された。ここでは、当面の問題としてJISに定められる試験用ダストを入手しやすく、使いやすくするとともに、今後その確立が望まれるような標準粉体を探し、これらを体系化して何時でもユーザーの要望に応じられるようにその具体化をはかることになった。

それ以来、標準粉体についての企画、普及、研究などの運営は標準粉体委員会があたっているが、標準粉体についての製造、包装、出入荷および管理の実業面は細川

粉体工学研究所が担当され今日に至っている。申すまでもなく、標準粉体を作り貯え、頒布するということとは並み大抵のことではありません。細川粉体工学研究所ではあえてこの縁の下で力持ちともいえる事業を引き受けられ、わが国の鉱工業の発展のために貢献されていることに深く敬意を表するものである。

もともと、素性のはっきりわかった各種の標準粉体を作り貯えて、この中からユーザーの試験・研究目的に合ったものを選びお分けするというシステム、すなわちパウダーバンク（粉体銀行）を作るということは、粉体とともに生きてきた私共にとって一つの大きな望みであったと申せましょう。

このようにして、日本粉体工業協会理事長、井伊谷京都大学教授がかねがね提唱されていたパウダーバンクの母体が同工業協会内に設置されて最早2ケ年を経過し、今やその理想に一步一步近づいているとともに、同工業協会の事業としても発展してきている。

標準粉体についてはこれまでも多く報告¹⁾しているので、ここでは日本粉体工業協会で行っている標準粉体を中心にご紹介する。

2. 標準粉体の内容

日本粉体工業協会の標準粉体委員会では、これまで一般に標準粉体と総称してきたものを、粉体の特性と使用目的とによってTable 1のように標準粉体、基準粉体および試験用ダストに便宜上分類している。

Table 1は、京都大学化学研究所の荒川正文先生の標準粉体の分類を引用したものであるが、標準粉体および基準粉体は、微粒子測定器や粉体粒度測定器などの検定及び校正用であり、試験用ダストは工業規模またはそれに近いダスト処理装置性能試験を対象とする。したがって、当然試験用ダストに比較して基準粉体は粒度や形状がよく揃っているものであり、さらに、標準粉体は均一粒径で形状が規則なものでより精度の高いものである。

*工業技術院機械技術研究所

(〒189 東京都東村山市富士見町5-12-2)

Tel 0423-93-9231 内線(284)

Table 1 標準粉体の分類

名 称	内 容	使 用 途	使用量
基礎物性用 標準粉体	粉体現象を複雑にする統計的性格をできるだけ単純化するため、理想的な形状と粒度をもつもの。ポリスチレンラテックス、ステアリン酸エアロゾルなど	機器の校正、検定 など	極少量
基準粉体	粉体及び粒子状物質などの基礎研究や、測定装置の検定などに用いる粉体で、形状や粒度の揃ったもの。ガラスビーズ、炭化けい素、炭酸カルシウム石松子など	機器の校正、検定、 高性能フィルタ類 のろ過度試験	少量
試験用ダスト	工業規模又はそれに近い粉体処理装置等の性能試験を対象としたもので、JIS Z 8901試験用ダストに規定されるものなど	機器の耐久性能試験、 集じん装置の ろ過性能試験	多量

Table 2 標準粉体及び基準粉体の内容と適用例

名 称	種 類	内 容	適 用 例
標準粉体	(1) ポリスチレン、ラテックス	粒径 0.1~7 μm 程度の単分散粒子で、10%の懸濁液として 5 cm^3 程のびんに入っている。	光散乱式微粒子測定器の校正 ⁸⁾ 、顕鏡用標準試料
	(2) ステアリン酸または DOP エアロゾル	ステアリン酸または DOP (フタル酸ジオクチル) をエアロゾル発生器で発生する中位径 0.3 μm 、幾何標準偏差 1.2 の単分散粒子が得られる。	浮遊粒子状物質測定器の校正用 ¹⁵⁾ 、放射性エアロゾル用高性能フィルタの性能試験用 ¹²⁾
基準粉体	(1) ガラスビーズ	化学的に安定な球状粒子、粒径数 mm から数 μm の各種	フィルタのろ過効率試験の標準試料、空気輸送実験
	(2) α アルミナ、炭化けい素	研削材として各種のものがある市販品を精選処理したもの各種	粉体粒度測定器の標準試料、各種計器の機能実験
	(3) 軽質炭酸カルシウム	立方体 (斜方六面体) 粒子で、反応条件により数 μm から 20 μm の均一粒子	
	(4) 石松子	ヒゲノカズラの胞子で粒径は 30~40 μm 、天然物で粒度がよく揃い、きわめて流動性がよい。	流動性試験の標準粒子、拡散試験

また、試験用ダストは使用の際に比較的多量のものを必要とするのに対し、標準粉体や基準粉体は比較的少量を必要とする。ただし、これは標準粉体の内容の分け方の一つの例であって、JIS の試験用ダストは試験用にのみ使用されるものでなく、機器類の校正や検定などに用いられることは当然である。

3. 日本粉体工業協会で頒布している標準粉体

Table 2 は、日本粉体工業協会で頒布している標準粉体及び基準粉体を示したものである。

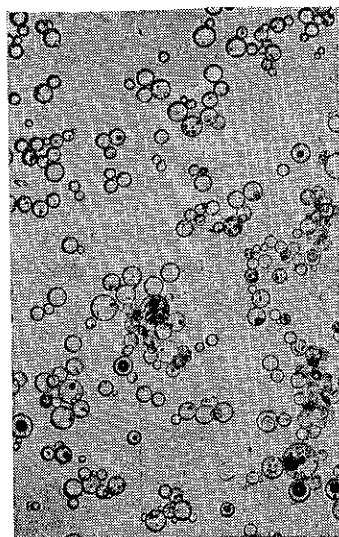
3.1 標準粉体

標準粉体のポリスチレンラテックスは Dow 社製のも

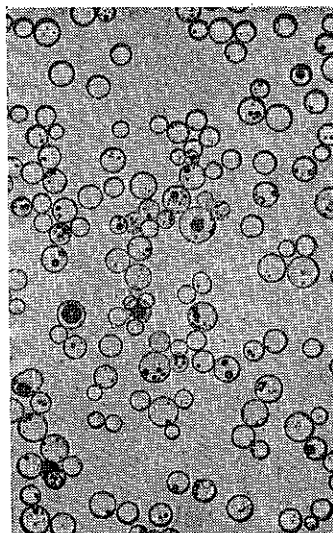
のであるが、これについては当面委託販売している。ポリスチレンラテックスは各種の粒径のものがあ、球形で粒度がよく揃っていることから、光散乱式の微粒子測定器の校正⁸⁾に用いられるほか、電子顕微鏡の検鏡試料中に添加して倍率の検定及び被検物の大きさととの比較などに用いられている。

3.2 基準粉体²⁾

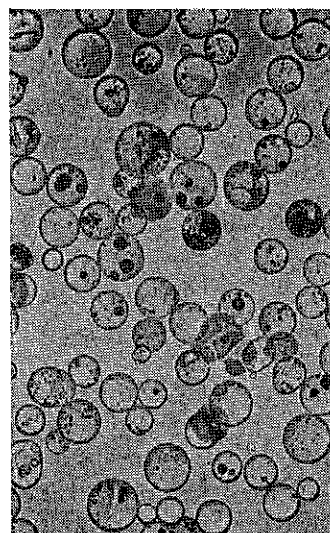
Table 2 に示した基準粉体は現在頒布しているものの例である。これらはその基礎的物性をはっきりしているし、工業粉体の精選品または中間試験装置程度の規模で製造できるのでかなり多量に確保でき、価格もそれ程高価にならない。しかし、均一径の粉体と違って輸送中の



平均粒子径：13 μm



平均粒子径：31 μm



平均粒子径：64 μm

Fig. 1 基準粉体，ガラス球の形状

UH-30C の粒度分布（光学顕微鏡）（荒川）

			度 %	個数積算 %	重量ひん度 %	重量積算 %
				2.24	0.02	0.02
				29.77	5.12	5.14
				82.48	45.38	50.52
			15.28	97.76	36.09	86.61
40 ~ 50	45	1.94		99.70	9.76	96.37
50 ~ 60	55	0.15		99.85	1.37	97.74
60 ~ 70	65	0.15		100.00	2.26	100.00
70 ~ 80	75	0				
計		100.00		100.00	100.00	100.00

個数基準平均粒子径 D_1 : 23.82 μ 標準偏差 σ : 7.87 μ 非球形粒子含有率（個数）: 6.1%
 体面積平均径 D_3 : 28.84 μ 重量平均径 D_w : 31.36 μ 真密度 : 2.565
 分布：対数正規分布

粒度偏析（大粒子と小粒子が部分的に分離する）の問題があるので，包装単位や使用に際しての注意事項などが検討されている。

Fig. 1 及び Table 3 は，基準粉体中のガラス球の一例であって，平均的な形状と粒径分布とを示したものである。これらガラス球は中空粒子や不規則形状のものが除かれ，ほとんど球状粒子のみとなっている。

オランダの中央技術研究所で作られ頒布されているガラス球²⁾は，血球や液体中の微粒子の粒径分布を測定するクーラーカウンター³⁾の校正に用いられているが，わが国でガラス球を航空宇宙用作動油のろ過効率試験，然

料ろ過器用フィルタの効率試験用の標準粒子としてその使用が検討されている。

炭化けい素も各種のものがあるが，これまでトンまたは数 10 kg 単位で販売されていたが，日本粉体工業協会では品質を精選し 1 kg 単位で頒布しているので，価格および購入単位の点で改善され，ユーザーにとっては入手しやすく，無駄なく使用できるようになっている。

軽質炭酸カルシウムは，斜方六面体という特長のある形状を有し，しかも均一粒径の粒子なので，粒体物性機器などの基礎実験用として用いられてくるものと思われる。

Table 4.1 試験用ダストの種類

種類	使用ダスト	形状又は成分	中位径 $X_{50} \mu m$	分布指数 n	幾何標準偏差 σ_g
1種	けい砂	粒状 $a \times b \times c$	193	1.93	2.14
2種	けい砂	$a \times b \times c$	30	0.95	4.00
3種	けい砂	$a \times b \times c$	8	0.77	3.63
4種	タルク	疑似斜方晶形	7	1.0	2.43
5種	フライアッシュ	球形	15	1.3	2.24
6種	普通ポルトランドセメント	$a \times b \times c$	26	1.03	3.65
7種	関東ローム	$a \times b \times c$	30	0.95	4.00
8種	関東ローム	$a \times b \times c$	8	0.77	3.63
9種	タルク	疑似斜方晶形	4.2	1.0	2.95
10種	フライアッシュ	球形	5.1	1.3	2.40
11種	関東ローム	$a \times b \times c$	2	1.2	2.15
12種	カーボンブラック	球形	—	—	—
13種 A/B	エアロゾル	球形	0.3	—	1.15
14種	エアロゾル	球形	0.8	—	1.83
15種	混合ダスト	8種 72% 12種 25% コットンリント 3%	—	—	—

Table 3 ガラスビーズ, GB

粒度範囲 μ	代表径 μ	個数ひん
0 ~ 10	5	2.2
10 ~ 20	15	27.5
20 ~ 30	25	52.7
30 ~ 40	35	—

4種	タルク (微粒)	除じん, 集じん装置試験
5種	フライアッシュ (微粒)	除じん装置試験
6種	普通ポルトランドセメント	自動車用ランプ類の気密試験
7種	関東ローム粉 (細粒)	除じん, 集じん装置試験, 機械・計器類の摩耗, 耐久性能試験
8種	関東ローム粉 (微粒)	除じん, 集じん装置試験, 機械・計器類の摩耗, 耐久性能試験
9種	タルク (超微粒)	高性能集じん, 除じん装置試験
10種	フライアッシュ (超微粒)	高性能集じん, 除じん装置試験
11種	関東ローム (超微粒)	高性能集じん, 除じん装置試験
12種	カーボンブラック (超微粒)	高性能除じん装置試験
13種	エアロゾル (超微粒)	超高性能エアフィルタ試験, 粉じん計の校正
14種	エアロゾル (超微粒)	超高性能エアフィルタ試験, 粉じん計の校正, クリーンルームのリーク試験
15種	混合ダスト	プレフィルタ試験

石松子は天然物であることと、流動性がきわめて良好なので、實在粉じんでも大気中で分散性がきわめてよいということから、流動性試験の標準試料として用いたり、拡散実験や集じん試験、動物実験などにもその用途の開発が期待されている。

3.3 試験用ダスト

試験用ダストは Table 4.1~4.2 に示したように15種類のものが定められており、Fig. 2 に示すような粒径分

布と Fig. 3 に示すような形状を呈している。現在のところ日本粉体工業協会ではこの中で13種、14種および15種を除く各種のダストを取り扱っている。

また、このほかに JIS では3、4章で述べるようなダストもきめられており、ゆくゆくは試験用ダストの規格に統合されることが望まれているが、これらのダストについても一部当協会として取り扱いが可能になっている。

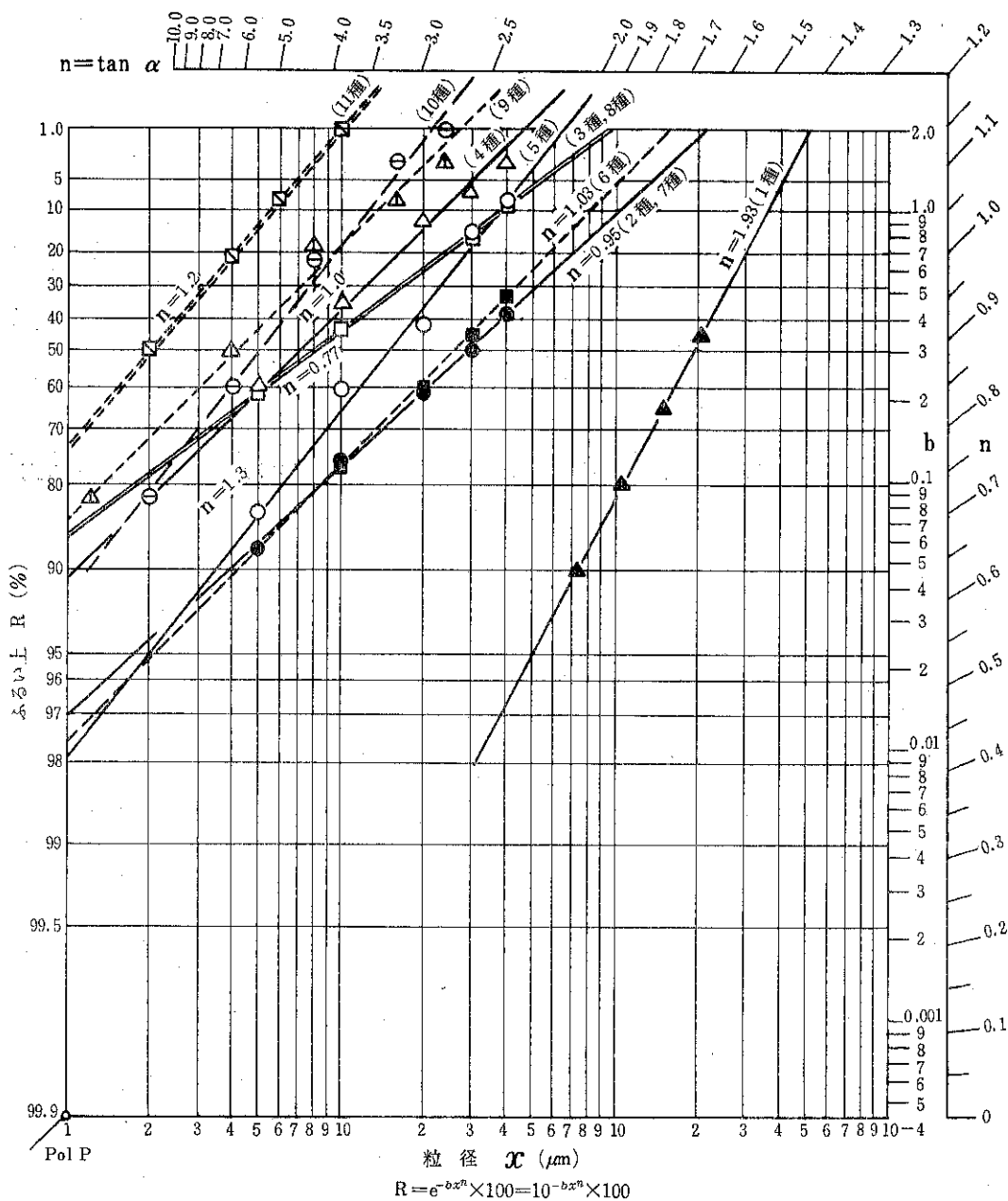


Fig. 2

現在、取り扱っているダストの概要を紹介すると次のようになる。

(1) 1種, 2種, 3種 (けい砂粉)

これらのダストは化学装置の性能試験や機器類の摩耗、耐久性能試験などに用いられている。

いずれも、後に述べる相馬標準砂を磁製ボールミルで粉碎して作られるもので、1種 (粗粒) はアメリカ軍規

格 MIL-F-7194 の No. 4⁴⁾ に相当し、2種 (細粒) 及び 3種 (微粒) はアメリカの自動車工業会推奨規格 SAE⁵⁾ の Coarse 及び Fine に相当する粒径分布をもっており、代表的な外国の規格値と関連性をもっている。

(2) 4種, 9種 (タルク)

4種 (微粒) 相当品はもともと顔料、塗料、製紙などの工業材料ならびに添加物として一般に多量に使用され

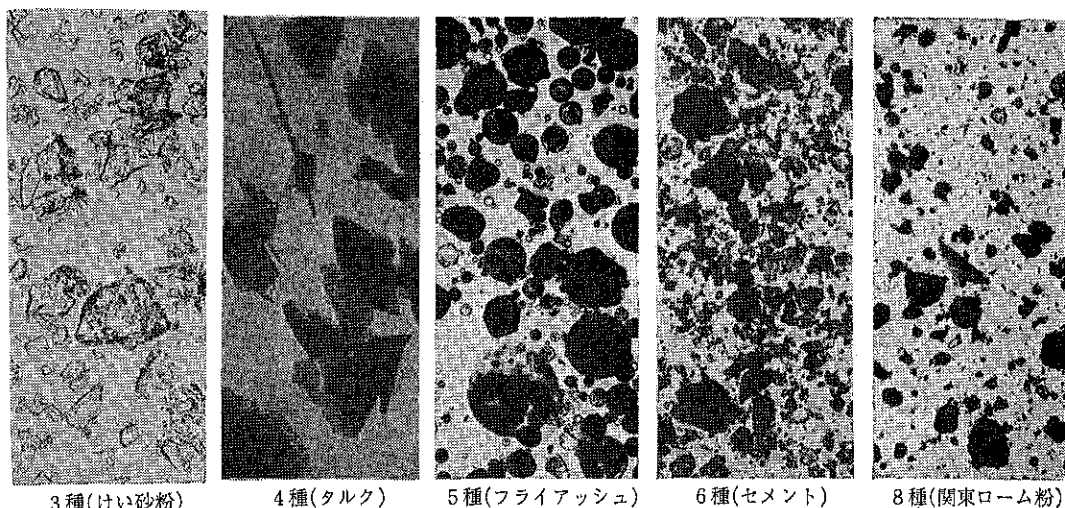


Fig. 3 試験用ダスト形状

ている関係もあり、手軽に入手できるということから集じん装置の試験用として以前から使われてきた。

ただし、一般の市場品は粒径分布がまちまちのものが多かったため、これを集じん試験に用いた場合、試験結果の再現性が期待できなかった。今回、当協会では規格品を調製し、安定供給できるようにした。

9種（超微粒）は、4種相当のタルクを適当な風力分級機で分級して作るか、或いは粉碎機により粉碎して規定粒径分布のものが作られる。

4種は一般フィルタ布の集じん性能試験に、9種は高性能フィルタ布の集じん性能試験用である。

(3) 5種、10種（フライアッシュ）

5種（微粒）は、火力発電所から発生する煤じんを集じん装置で捕集し、これを風力分級機やふるいを用いて規定粒径分布に調製したものである。

タルクと同様にこれまでも JIS で定められていたが、市販品のものの中に規定粒径分布のものがなかったため、規格品のものは使用できなかったが、近く当協会 JIS の製品が頒布される予定である。

10種（超微粒）は、5種相当のフライアッシュを適当な風力分級機を用いて作られるが、これも5種と同様に近く頒布できる予定である。

5種は各種の除じん装置、集じん装置のろ過性能試験、10種は高性能の除じん及び集じん装置の試験用である。

(4) 6種（普通ポルトランドセメント）

6種のセメントは、粒径分布が2種、3種に近接しており、試験用ダストの中で最も入手しやすいという理由から規格制定の頭初められた。しかし、吸湿性を有す

るため集じん装置や除じん装置のろ過性能試験にこれを用いた場合、試験装置内で固着して機器を損傷した例もあり、さらに規格制定の頭初とは異なり試験用ダストの一般への普及がはかられている現在ではあまり必要ないので削除したいという意見が JIS の専門委員の間で圧倒的であったが、下記の理由から規格に残ることになった。

すなわち、アメリカの SAE 推奨規格⁶⁾では自動車ランプ類の気密試験用として定められているので、国際的な関連をもたせるためにわが国でも JIS⁷⁾で自動車用ランプ類の気密試験用として定められている関係もあり、試験用ダストの規格ではそのまま保存することになった。

(5) 7種、8種及び11種（関東ローム粉）

7種（細粒）及び8種（微粒）は、関東ローム（関東火山灰土の第一層の武蔵野ロームに相当する）を焼成後、磁製ボールミルで粉碎して作られる。

2種及び3種と同様に SAE 推奨規格の Coarse 及び Fine の粒径分布をもつが、これとは化学組成が異なる。

7種及び8種は、JIS の自動車用空気清浄器の試験方法や、換気用パネル形エアフィルタなどの諸規^{8)~9)}に定められている関係もあり、JIS に規定している試験用ダストの中で使用量が最も多い。

11種（超微粒）は、8種相当の関東ローム粉を適当な風力分級機を用いて分級するか、または粉碎機を用いて粉碎して作られる。この試験用ダストは、前述の9種、10種ともに粒径 $10\mu\text{m}$ 以下の超微粒ダスト（JIS では超微粒ダストということは、ダストを粗粒、細粒、微粒とわかり易いように区分したために便宜上超微粒とした）

であるが、これらのダストはビル衛生管理基準¹⁰⁾における室内浮遊粉じん、ならびに環境基準¹¹⁾における大気中の浮遊粉じんに相当する粒径分布をもつものである。

これらのダストは高性能エアフィルタのろ過性能試験用として一部使用されているが、そのほかの高性能除じん装置の性能試験用としても使用できるようになっている。

(6) 12種 (カーボンブラック)

カーボンブラックは、実在する降下媒じんに近い特性を有することから、大形除じん装置のろ過性能試験用として今回の規格の見直しの際に新たに定められた。

もともとカーボンブラックは、放射性粉じん用エアフィルタの規格¹²⁾に定められていたが、同規格ではカーボンブラック (商品名 三池20号) がすでに国内において生産が停止していることと、放射性粉じんとその特性が異なるという理由から廃止されたので、試験用ダストの規格では日本カーボンブラック協会の推奨もあり新たなカーボンブラック (商品名 旭サーマル) が採用された。

普通、カーボンブラックを購入する場合は最小単位が20 kg 入り1袋であることと、ロットによって特性が変わるおそれがあることから、これまでユーザーにとっては不便のことが多かった。

日本粉体工業協会では大量にカーボンブラックを一括購入し、その特性を検定して1 kgの小単位として頒布できるようにしたので、特性のわかったものが容易に入手できるようになった。

(7) 13種, 14種 (エアロゾル)

13種, 14種のエアロゾルは、サブミクロンの液滴微粒子である。

固体微粒子の調製できる限界は9種, 10種及び11種のように粒径10数ミクロン以下であるが、これよりこまかいものはエアロゾルにたよらざるを得ない。エアロゾルはすでに MIL¹³⁾ や BS¹⁴⁾ で超高性能エアフィルタの試験用として定められているので、わが国においても10数年前から規格案がだされ審議されてきたが資料不足のため今日まで見送られてきたいきさつがある。しかしながら、わが国でも現実には MIL 規格を準用して放射性粉じん用エアフィルタの試験に使用されていたり、微粒子測定器の校正用として JIS¹⁵⁾ でもきめられたので、今回13種, 14種として新たに規定されるにいたった。

13種は DOP (フタル酸ジオクチル) エアロゾル及びステアリン酸エアロゾルで、ともに中位径 $0.3 \mu\text{m}$ 、幾何標準偏差 1.2 の単分散粒子で、エアロゾル測定器の校正用、高性能エアフィルタのろ過性能試験用である。

14種は DOP エアロゾルで中位径 $0.8 \mu\text{m}$ 、幾何標準偏差 1.8 の多分散粒子である。これは超高性能エアフィ

ルタの漏洩試験や高性能フィルタのろ過性能試験に用いられる。

なお、現在のところ13種及び14種のエアロゾルについては発生方法や試験方法が研究されている段階なので、近い将来当協会でも取り扱うことが要望されている。

(8) 15種 (混合ダスト)

15種の混合ダストはプレフィルタ (粗じん用フィルタ) のろ過性能試験に用いられる。

路上ダストに相当する試験用ダスト8種 (関東ロームの微粒) 72%, これに降下媒じんに相当する12種 (カーボンブラック) 25%, 室内粉じんに相当するコットンリント3%を添加した3者の混合よりなるダストで、アメリカの AFI 規格¹⁶⁾ に定められる混合ダストに相当するものである。

3.4 試験用ダスト以外に JIS に定められているダスト

(1) 航空機用空気ろ過器試験用ダスト¹⁷⁾

この規格では4種類の試験用ダストが決められているが、その4種類のダストは、先に述べた試験用ダスト1種, 2種及び3種によって作られる。

すなわち、No. 1 は2種, No. 4 は1種そのものであり、No. 2 と No. 3 は2種と3種とを混合して調製するか、もしくは相馬標準砂を磁製ボールミルで粉碎して調製するようになっている。したがって、当協会としては試験用ダスト1種, 2種及び3種と同様にこれらの試験用ダストも常時取り扱えるようになっている。

(2) 放射性粉じん用エアフィルタ試験用ダスト¹²⁾

これまでカーボンブラック (商品名 三池20号) が決められていたが、先に述べたようにカーボンブラックが廃止され、新たにステアリン酸エアロゾルが定められた。このエアロゾルは平均粒径 $0.35 \mu\text{m}$ ($\sigma_g < 1.3$) のもので試験用ダスト13種のエアロゾルに相当するものである。

(3) 防じんマスク用試験用ダスト¹⁸⁾

この試験用ダストも取り扱える態勢になっている。

防じんマスクの試験用ダストは、福島県石川山産の石英を電気炉を用い炉内温度 700°C で焼成した後、水中で急冷し乾燥後磁製ボールミルで粉碎して調製するようになっている。防じんマスクの規格ではこの石英ダストをダスト発生機によって発生し、空気中に分散した状態のダストを採取し電子顕微鏡で測定した粒径が $2 \mu\text{m}$ 以下になるように定めている。

石英ダストは防じんマスクの試験用のほかに、自動車のシートベルトの試験にも用いられる。すでにオーストラリアの規格¹⁹⁾ では定められているが、最近わが国においても JIS 化の動きがある。これは石英を磁製ボー

ルミル粉碎して、粒径 149 μm 以下の規定値のものとするものである。

ただし、石英ダストは硬質でしかも角部を有することから、これを機器の耐久性能試験などに用いる場合、摩耗促進性きわめて高いため結果の即時性のある点は勝れているといえるが、使用にあたってこれを人体が吸入した場合有害であるから取り扱い上十分注意を要する。

3.5 その他のもの

日本粉体工業協会ではこれまで紹介したもののほかに次のものも取り扱っている。

(1) 相馬標準砂

相馬標準砂は、福島県相馬郡小高町産の天然けい砂で主としてセメントの強度試験などに用いられたが、これまでも粉体機器の物性試験にもしばしば使用されてきた。

この標準砂は、小高白銀砂と称せられる粘土のいく分混ざった原砂を露天堀して、これを水洗した後、自然脱水して乾燥し、ふるい分けして粒径 840~590 μm に整粒したものである。

相馬標準砂を購入する場合最少単位が 45 kg 入り 1 袋なので、当協会においてはこの標準砂を 1 kg、4 kg、10 kg の小単位として頒布している。

(2) SAE 推奨規格⁵⁾の Fine, Coarse

アメリカの自動車工業会の推奨規格に定められる試験用ダストで Fine (微粒) および Coarse (細粒) の 2 種類がある。いずれもアリゾナの自然ダストで粒径分布および化学組成が規定されている。

Fine は自動車用空気清浄器のろ過性能試験に用いられるほか、AFI 規格¹⁶⁾に定められる混合ダスト (試験用ダストの 15 種に相当する) の主体となるものであり、航空宇宙用作動油の標準汚濁液などにも使用されている。なお、この標準汚濁液²⁰⁾は液体中の微粒子測定装置の校正に用いるもので、1 l の清浄作動油中に Fine が 1 mg の割合で添加されている。

Coarse は、建設機械用の大型空気清浄器のろ過性能試験に用いられる。

なお、Fine および Coarse は市場品として一般に入手することができるが 8 ポンドかん入りが 1 単位となっているため、ユーザーから特性を検定したものを少量欲しいという要望があるので、日本粉体工業協会ではすでに粒径分布や真比重などを検定し、数 100 g 単位で頒布できるように作業を進めている。

4. 標準粉体の入手方法の案内

標準粉体は次のところで頒布している。

〒606 京都市左京区田中関町 2-7 思文閣会館

33号 日本粉体工業協会

電話：075-761-7123

なお、官公庁、国立大学の場合事務の簡素化をはかるため、でき得る限り直接の購入申し込みはさけ、研究室に出入の業者を通して購入されると幸いである。

たとえば、日本粉体工業協会会員の筒井理化学器械 (住所、〒110 東京都台東区根岸 1-2-18, Tel: 03-872-4154) に便宜上関東地方の取扱い店になっていた。

参 考 文 献

- 1) たとえば、山下憲一；“入手しやすい試験用粉体について”，空気清浄，9，[5]，55~60 (1971)。
- 2) 荒川正文；“標準粉体”，分析化学，22，[9]，1260~1274 (1973)。
- 3) クリンルーム中における浮遊微粒子の測定方法，JIS B 9920-1975。
- 4) MIL-F-7194，(1951)。
- 5) SAE Hand Book，“Air Cleaner Test Code”，829 (1973)。
- 6) SAE Hand Book，“Test for Motor Vehicle Lighting Device and Components”-SAE J 575 e，750 (1973)。
- 7) たとえば，“自動車用ランプ類”，JIS D 5500-1969。
- 8) “自動車用空気清浄器試験方法”，JIS D 1612-1963。
- 9) 換気用パネル形エアフィルタ，JIS B 9908-1965。
- 10) 厚生省令第 2 号，“建築物における衛生的環境の確保に関する法律施行規則”，1，[11] (1971)。
- 11) 環境庁告示第 1 号，“浮遊粒子状物質に係る環境基準について”，1，[1] (1972)。
- 12) “放射性エロゾル用高性能エアフィルタ”，JIS Z 4812-1975。
- 13) MIL-STD-282' (1956)。
- 14) B. S. 2831，(1957)。
- 15) “大気中の浮遊粒子状物質自動計測器”，JIS B 7954-1974。
- 16) Air Filter Institute，“Code for Testing Air Cleaning Device Used in General Ventilation.” Section 1，revision (1956)。
- 17) “航空機用空気ろ過器 (発動機吸気用)”，JIS W 4481-1959。
- 18) “防じんマスク”，JIS T 8151-1972。
- 19) Australian Standard E 35，Part II-1970。
- 20) “Recommended Procedures for Evaluating Fluid Power Components and Systems”，Fluid Power Research Center，March，[192]，93~103。

新製品紹介

ホソカワ/マイクロジャンボパルスエアーJTPシリーズ

第2 環境システム事業本部*

ホソカワ/マイクロパルスエアーは発売開始後、既に13年を経過し、その性能の優秀性については広く知られているところであり、あらためて説明するまでもないが、発売当初は超微粉体の粉碎工程、分級工程、乾燥工程等のいわゆる粉体の生産ラインに適用されることが多く、大気汚染防止法の施行以前は、捕集性能の良すぎるパルスエアーは公害防止用機器としてはむしろ贅沢品とみなされがちであったため、大風量処理するケースが比較的少なかった。

大気汚染防止法が施行され、排出粉じん、ばいじんの排出基準値への関心が強まるとともに、パルスエアーの捕集性能の優秀さが更にクローズアップされ、設置面積が極めて小さいという利点と相俟って、大風量処理用の大型パルスエアー開発の要望が内外から高まり、『粉碎』誌 No. 17 (AUTUMN 1972) で紹介した如く、昭和47年に、標準機の長所を生かした、大型バッグを開発した。この大型機は公害防止用パルスエアーのエースとして約70台を販売したが、生産コストと性能面に今一つの問題点を有していたため、それらの解決と市場のニーズを満たす新しい構想をとり入れた新大型バッグの完成に腐心した結果、ここにJTP型ジャンボパルスエアーの誕生をみた。

1. JTP型ジャンボパルスエアー開発の指針と経過

パルスエアーの総合性能を高めるため、あらゆる角度から指針が打ち出され、それらを慎重に検討し実機にとり入れることとしたが、以下ポイントを列記し経過を記す

1. 『戸筒の洗浄効果を標準機と同等もしくはそれ以上とする』

これはパルスエアーにとって基本的な命題であ

不便さ、旧大型バッグ開発時にも種々テストを重ねたものではあるが、実際機において弱干の性能不足と取り扱いが生じたため、今回は視点を改めてテストを行い、実際機との性能差を全く生じないパルス機構を完成した。

パルスエアーにおける洗浄効果はベンチュリーの性能

アクセスドア

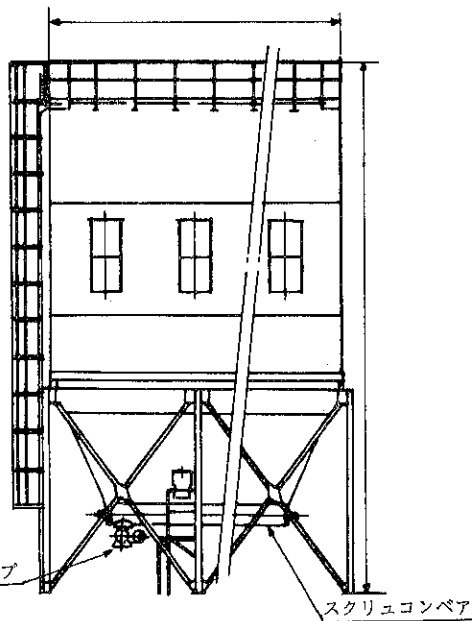
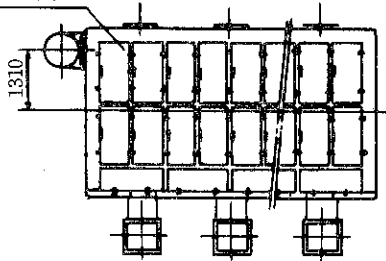


Fig. 1

* 嵯峨川鉄工所

(〒573 枚方市都堤田近1丁目9)

Tel 0720-55-2221(代)

如何にかかっているが、ベンチュリー性能はそのものの形状のみならず、圧縮空気噴出のノズル径、圧縮空気制御用電磁弁、ダイヤフラム弁、或いは電気信号を発生するタイミングパルス発生装置、等の総合的な特性を十分に考慮して決定されなければならない。

以上のことから、今回は各要素にわたって多角的なテストと検討を続け、満足すべき性能を引き出すことに成功した。

—2.『汙布のメンテナンスを容易にする』

バッグフィルターにおける汙筒の脱着作業はいたって厄介なものである。各種バッグフィルターにおける機内での汙筒脱着作業は作業の難度が高いばかりでなく労働

災害を生む危険性も無視できない。そこで機外から汙筒の脱着作業を行い得る構造を各種検討し、トライアルを重ねた結果 Fig. 2 に示す如く、作業が容易でかつ汙筒のシール性を高めることのできるトップリムーバル方式を採用することとした。

この方法による汙筒の脱着は従来機に比べ、作業時間が約 $\frac{1}{3}$ に軽減されるばかりでなく、作業者は機外の大気中で作業を続けられるため、粉じん、ガス等による労働災害を防止することができる。

—3.『含じん ガス入口をミドルインレット方式とする』

標準機におけるボトムインレットの実績、旧ジャンボ

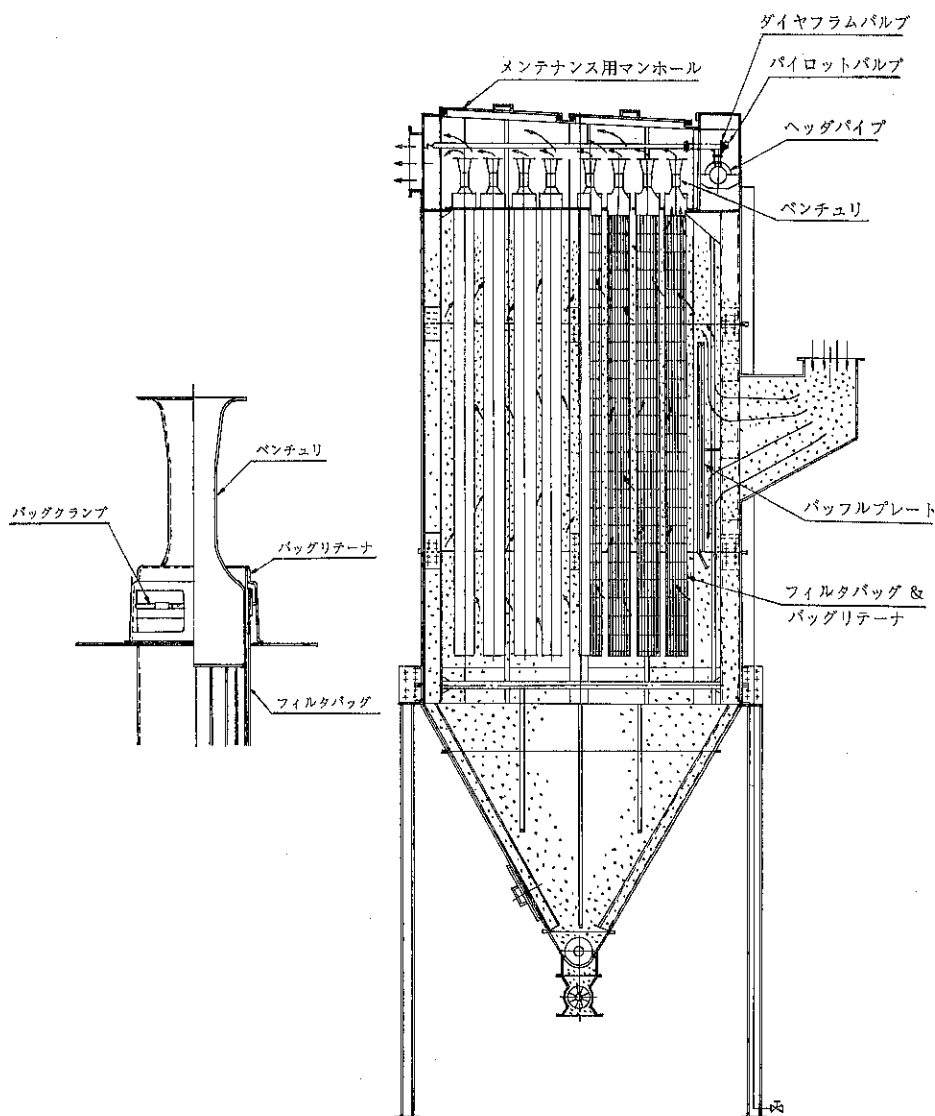


Fig. 2

パルスエアーにおけるトップインレットの性能を吟味し中間的なミドルインレット方式を採用することとした。

10ft以下の汙筒を使用する機種においてはボトムインレットで何等性能に支障はないが、長尺汙筒となるに従い、上方からの含じんガス取り入れ(トップインレット)が有利になってくる。しかし高温の含じんガスを対象にした場合には、機内の温度差が大きいと、部分的な露結条件が生じ、汙筒にダメージを与える可能性があるか

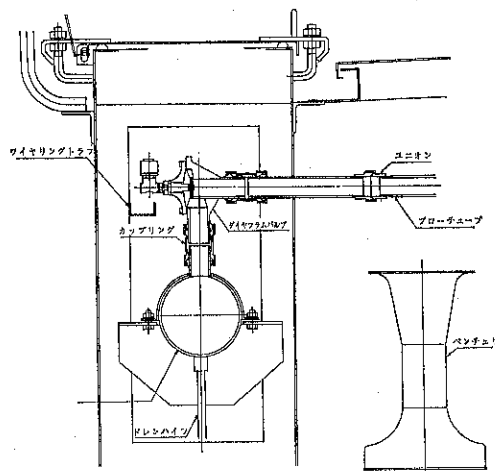


Fig. 3

ら、温度差を小さく保てる中間取り入れ方式(ミドルインレット)が最適である。

以上の観点からJTP型ではミドルインレット方式を採用することとし、更に汙筒の摩耗を防ぎ、かつ、汉過

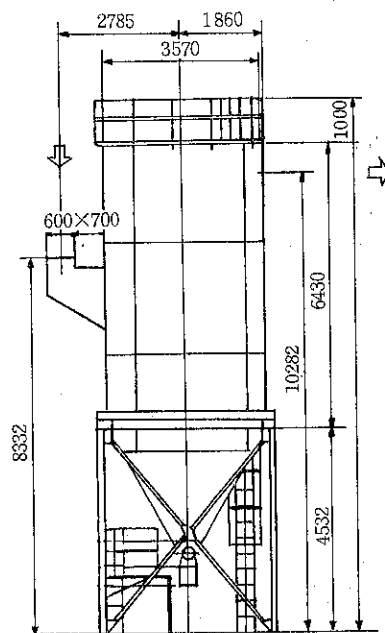


Fig. 4

Table 1

型 式	項 目	汉 布 本 数 (242×5120) (本)	汉 過 面 積 (m^2)	ダ イ ヤ フ ラ ム バ ル ブ パ イ ロ ッ ト バ ル ブ (個)	ア ウ ッ ト レ ッ ト 数 (個)	ホ ッ パ 型 式	本 機 長 手 寸 法 (A) (mm)	概 略 総 重 量 (kg)
JTP-IM3		48	177.1	6	1	RV直結型	2,820	9,500
JTP-IM4		64	236.1	8	1	スクリュ1本型	3,570	10,800
JTP-IM5		80	295.1	10	2	〃	4,320	13,500
JTP-IM6		96	354.1	12	2	〃	5,070	15,400
JTP-IM7		112	413.2	14	2	〃	5,820	16,700
JTP-IM8		128	472.2	16	2	〃	6,570	18,700
JTP-IM9		144	531.2	18	3	〃	7,320	20,500
JTP-IM10		160	590.2	20	3	〃	8,070	21,800
JTP-IM11		176	649.3	22	3	〃	8,820	23,600
JTP-IM12		192	708.3	24	3	〃	9,570	25,000
JTP-IM13		208	767.3	26	4	スクリュ2本型	10,320	27,900
JTP-IM14		224	826.3	28	4	〃	11,070	29,200
JTP-IM15		240	885.4	30	4	〃	11,820	30,600
JTP-IM16		256	944.4	32	4	〃	12,570	33,200
JTP-IM17		272	1003.4	34	5	〃	13,320	34,900
JTP-IM18		288	1062.4	36	5	〃	14,070	36,300
JTP-IM19		304	1121.5	38	5	〃	14,820	37,700
JTP-IM20		320	1180.5	40	5	〃	15,570	39,000

速度の増大をはかるため、大型パッフルと重力沈降式流入口を設けた。

一4. その他の主要改良項目

- a. 缶体を全溶構造としたためリークの心配がない。
- b. 缶体の主材を内側にもってくる、いわゆる内部柱梁構造とし、組立作業時の安全性、経済性及び高温使用時における熱の放散を少なくするように考慮した。
- c. 汙筒のサポート金具が不要であるため、作業が容易であるとともに、金具と汉筒との接触摩耗が発生しない。
- d. トップリムーバブルであるため、損傷汉筒の発見がクリーンサイドから容易に行えるようになった。
- e. 圧縮空気のヘッダーパイプをダイアフラムバルブの下方に設置し、ドレーンの排出を容易にしたためドレーンの汉布への影響が軽減された。
- f. ダイアフラムバルブと電磁弁を直結とすることによりバルブ特性が上昇し、消費空気量が少なくなった。
- g. ダイアフラムバルブ、電磁弁、を缶体におさめたため外気からの保護、防音処置及び寒冷地における電磁弁の凍結防止を容易に行えるようになった。

2. ジャンボパルスエアー JTP シリーズの構造

Fig. 1～3に示す。

3. ジャンボパルスエアー JTP シリーズの仕様寸法

Fig. 4 及び Table 1 に示す。

4. ジャンボパルスエアーの適用

元来が大風量処理用に開発したものであるから500m³/min 以上で用いるのが有利である。また高温条件を考慮して設計したため、各種キルン・ドライヤーの排ガス、或いは電気炉の建屋集じん等にはもともと適していると思われる。

5. おわりに

ホソカワで開発したジャンボパルスエアーは国外各地の MIKRO-PUL グループでも大いに関心をもたれており、その性能、コストが注目をあだていたが、今回我々は自信をもって発売できるジャンボ機の完成をみた。機の誕生に多大の労をさいていただいた各位に謝意を表わすとともに、ここに完成成果を発表する次第である。



製品紹介

混合機

化学システム事業本部*

1. はじめに

混合機は同種又は異種粉体に運動を与えて相互に分散させて、——時には液体添加をして——均一な組成をうることを目的としており、化学工業、食品、飼料、染料、プラスチック等の原料成分の混合、製品の均質化等のために使用されている。

混合機は一般には容器回転型と容器固定型（機械攪拌型）に分けられ、弊事業部の混合機は総て後者の分類に入る。容器固定型混合機の一般的な特徴としては

- イ) 凝集性の強い粉体でも混合できる。
- ロ) 連続操作に使用できるものがある。
- ハ) 投入、排出が容易で発じん防止も容易である。
- ニ) シャケット付として加熱、冷却も可能である。
- ホ) 液体添加による湿潤粉体の混合も可能である。
- ヘ) 加圧、減圧下の混合もできる。

等々があげられる。以下弊社製作の機器について、個々の機器の特徴、適用例について概要を記す。

2. リボンブレンダー

本機はリボン状の混合翼をもつ低速回転型混合機で、標準型としてHM型、特殊型としてIM型の2型式があり、共に作業容量10,000lまでの図面は完備している。

IM型の特徴

- イ) 内部ロータと軸受シャフト部が脱着できる。
- ロ) 容器隅部での粉体の堆積が少ない。
- ハ) 側板への付着が少ない。
- ニ) 内部掃除が容易である。

3. タービュライザー

本機は水平円筒容器に多数のパドルをとりつけたロータが周速 15~40m/sec で回転する高速回転型連続混合機であり、スクリュウフィーダとの組合わせた外型を

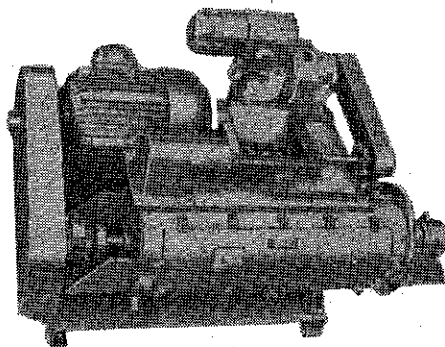


Fig. 1 タービュライザー

Fig. 1 に示す。

本機の特徴

- イ) 凝集性の極度に強い粉体の混合も可能である。
- ロ) 凝集塊を解砕して均質な混合粉体を生成させる。
- ハ) 液体添加も可能である。
- ニ) 処理能力が大きい。

本機の適用

ビスケット、ケーキミックス等の製造、飼料、澱粉等への液体添加、凝集の除去等である。

4. ナウタミキサー

本機は逆円錐型容器のなかで攪拌スクリュウが公転2 R/M、自転60 R/Mと公自転し、粉体へ上昇、公転、下降の運動を与えて混合を促進するもので、駆動用モータは本機上部に据付けられる。本機には単胴体のナウタミキサー、複胴体のコンビミキサー、スクリュウのリボン状のラピッドミキサーの3種があり、コンビミキサーは据付高さ制限でナウタミキサーが収納できない場合に、ラピッドミキサーは混合をより早く、又は凝集性の極度に強い粉体の場合に適している。

本機の特徴

- イ) 混合時間が短い。
- ロ) 高混合比でも均一に仕上げる。
- ハ) 混合後の分離がおきにくい。
- ニ) 粉体の排出が容易で、残留量が少ない。

* 関西川鉄工所

(〒573 枚方市招提田近1丁目9)

Tel 0720-55-2221(代)

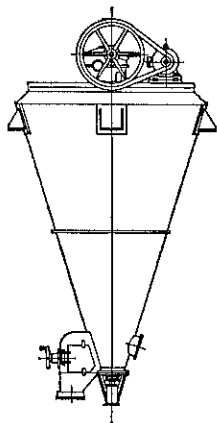


Fig. 2 ナウタミキサー

ホ) 所要動力が少ない。特に大型機では顕著で、リボンブレンダーの約 $\frac{1}{2}$ である。

ヘ) 類似型式のものにくらべて故障頻度が少ない。

なお本機は作業容量25,000lまでの標準型式があり、耐圧型構造による加圧、減圧運転又はジャケットをつけて加熱、冷却運転も可能である。又加温、給液のときにはマイクロインジェクション型を取り入れる。

本機の適用

本機は各種粉粒体への適用幅が広く、納入例も食品、飼料、農薬、合成樹脂、染料、顔料、建材、道路用材、化粧品、安定剤等々多岐にわたっている。

5. プラネタリーミキサー (新製品)

本機は Fig. 3 に示すようにU型容器内で、容器の両側板で支持されて自公転するスクリュー又はパドルの攪拌翼により混合を促進するもので、回分、連続いずれの操作も可能である。

全容量 630lにて公転回転数 10~15R/M

自転 " 50~75R/M

駆動動力 3.7kW

本機は特に粉粒体へ液体を添加して造粒品をうる場合や、攪拌翼の形状をかえて粉-粉、粉-液の混合混練にも適する。

6. サンドターボ (新製品)

鋳物砂は原料砂にバインダーを添加混合したもので、バインダーによって粘土粘結型、自硬型(無機、有機)加熱硬化型、通気硬化型等々あり、サンドターボはこれら各鋳物砂生産に適用できるが、最も特徴を発揮できるのは有機自硬型用である。鋳物砂は近年、砂おち性、廃砂の回収性がよい等から有機自砂型への転換がみられ、

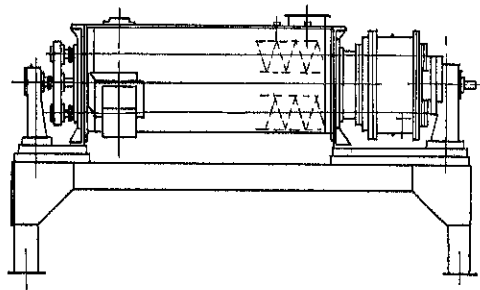


Fig. 3 プラネタリーミキサー

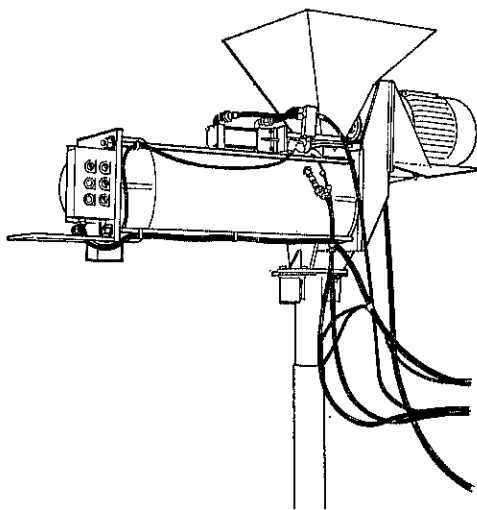


Fig. 4 サンドターボ

これに対応するように、米国のストロング・スコット社が新に開発し、それに伴い導入したものがサンドターボである。本機は Fig. 4 に示すように小型ながら、砂供給用のサンドゲート、混合機本体、バインダーである液体を供給するポンプ及びその液の切換え弁、操作盤が装着されていて、操作がシステマティックに進行するように計装化されている連続型の混合機である。本機にはST-200、ST-1000の2型式がある。

本機の特徴

イ) 従来機にない比較的高速回転の混合機である。

ロ) 混合が単時間で終了する。

ハ) 機内で硬化の進行することが少ない。

ニ) 機内残留量が少ないので掃除回数が少ない。

ホ) これらによりレジンの節約にもつながる。

本機の評価

米国ではフラン系レジンの鋳物砂に最も多くの納入実績を示しており、鋳物業界では画期的な機械であると好評をうけている。

7. 流動混合機（新製品）

本機は武田薬品工業㈱の開発になるもので、流動化された粉体中に機械攪拌を併用する型式である。本機の概要は図5に示すように、回分操作の混合機ではあるが、原料の供給、製品の排出等がバルブの切替のみで可能であり、発じん又は異物の混入の危惧はない。

本機の特徴

- イ）流動粉体中での攪拌であるから動力消費が少い。
- ロ）混合時間が短い。
- ハ）粉体バルブの使用により、原料供給から製品排出まで自動化ができる。
- ニ）粒度差があっても、よい混合結果となる。

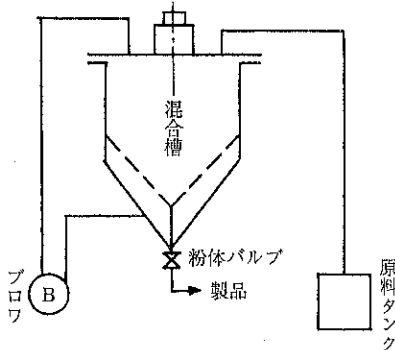


Fig. 5 流動混合機

8. 連続混合システム（新製品）

本システムは大阪府立大学工学部矢野武夫、佐藤宗武両先生の基礎研究結果に準拠し、細川粉体工学研究所が実用化装置開発にあたったもので、既に本誌18号にて紹介されている。その概要を Fig. 6 及び下記に再録する。

本システムの特徴

イ）定量供給制御機構

一定量の原料を計量ホッパーにため、排出について重量が時間と直線的関係で減少するように自動制御される。

ロ）特殊羽根混合機構

たて型混合羽根の組合わせにより、粉体が混合→押し

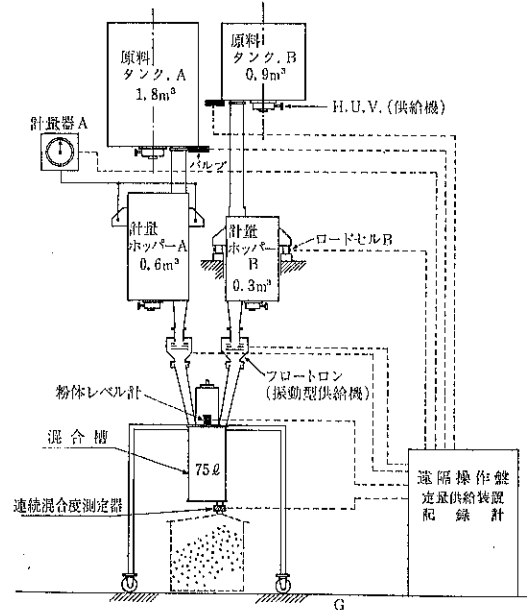


Fig. 6 連続混合システム

出し流れ→混合と槽内を流下して排出される。

ハ）混合度検知機構

照射した光の反射率が材料によって違うことを利用して連続的に混合度を検知するものである。

(追) なお本システムの定量供給機構の改造型がやがて発表されることであろう。

9. おわりに

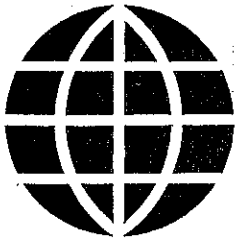
弊事業部ではここに紹介した各種混合機の単体に限らず、これを中心においての輸送、秤量等を包含した混合システムの納入事例も多い。回分式での原料の輸送、秤量等の前後機器、連続式での定量供給等の工程立案は、多品種少量生産、少品種多量生産、多品種多量生産等の品種と生産量との関連による混合機本体と同様に重要であり、全体がよくマッチしてこそ混合システムとして完成された姿となる。よりよい混合機、よりよい混合システムへと伸展させるためには需要家各位の御指摘、御指導にまたねばならぬ点々あり、本誌をかりてよろしく願い申し上げる次第である。

海外ニュース

海外事業本部*

「POWTECH '75」に参加

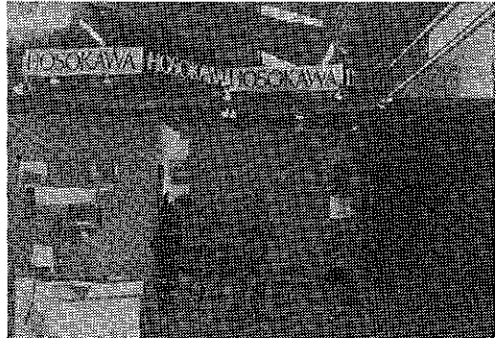
本年2月18日から3日間、英国ヨークシャー州ハロゲートで開催された POWTECH 75 にホソカワヨーロッパ



**International
Powder Technology
& Bulk Solids
EXHIBITION &
CONFERENCE**



パリミテッドを通じて参加した。POWTECH は、2年に1度開催される粉体処理機械の専門見本市で、当社の参加も今年で2回目になり、スーパー・ミクロン・ミル(M52NC型)、ピクトリーミル(FVP-1型)、ファイン・パルペライザー、パウダーテスターのほか、島津製作所よりヨーロッパでの販売を委託されている粒度測定器RS-1000を出品、展示した。ホソカワヨーロッパ英国本社、ドイツ支店、及び同社のフランス代理店の営業、技術担当者が小間のアテンドにあたった他、当社



からも粉体システム事業本部・森本大蔵副本部長が応援のため出張した。当社小間は訪客の大きな関心を集め、3日間の会期中に1件の成約を得、又、150件以上の具体的引合があり、大成功であった。

「ルーマニア向ベントナイト・プラント追加受注」

当社では、去る昭和44年から45年にかけて、ルーマニアへタルク及びベントナイト粉砕装置を輸出したが、いづれも所期以上の性能を発揮して、客先の好評を博した。今回、ベントナイト・プラントについて三井物産㈱を経て、増設の引合があり、間嶋海外事業本部長、及び田中粉体システム事業本部長が、ブカレストへ出張し、2週間にわたる技術、価格交渉を行い、約40万ドルで成

* 備細川鉄工所

(〒573 枚方市招提田近1丁目9)

Tel 0720-55-2221(代)

約した。装置の内容は、微粉碎機ファイン・ミクロン・ミルMF-50型(500HP用)、分級機ミクロン・セパレーターMS-5型、乾燥機ミクロン・ドライヤーHD-4型、自動袋詰機、及び集じん機マイクロ・パルスエアー等であり、他にスーパー・ミクロンミルM202型(30H

P用)を中心とするパイロット・プラントも含まれている。なお、本プラントは、ルーマニア産ベントナイトを 63μ 以下98%に粉碎、精製するもので、能力は年産20,000トンである。

(80頁のつづき)

はおおよそ $10^{-2}\sim 10^{-3}$ のオーダーをもった値である。一方、 ϵ_2/M 、 ϵ_3/M は、試験片表面や、新しく生成した破碎産物の表面に液体が作用した結果生ずると考えられる表面エネルギー減少量であり、これがすなわち破碎エネルギー減少量と考えられる値である。表より、 ϵ_2/M 、 ϵ_3/M の値はおおよそ $10^{-4}\sim 10^{-5}$ のオーダーをもった値となっている。もしも破碎エネルギーの減少量が試験片の表面エネルギー減少量のみによるものとする場合、オーダーからいえば $\epsilon_1/M=\epsilon_2/M$ 、 $\epsilon_1/M=\epsilon_3/M$ となるが、実際には ϵ_1/M と ϵ_2/M や ϵ_3/M との間には $10^{-2}\sim 10^{-3}$ ものオーダーの隔りがある。すなわち、考えられる破碎エネルギー減少量(ϵ_2/M 、 ϵ_3/M)より実際の破碎エネルギー減少量(ϵ_1/M)の方が大なる傾向を示している。このことから $\epsilon_1/M \gg \epsilon_2/M$ 、 $\epsilon_1/M \gg \epsilon_3/M$ とあらわしたものである。

質問：各試料毎に1本の直線にのるのは(全ての試料が1本の線にのるというのではなくて)、(3)式で計算される E/M を用いる以上、また本研究で明らかとなった雰囲気の影響などが僅少であることを考え併せれば、明らかなことではないか？ここで述べられている「Eq. (3)の関係がほぼ満足される……」とはどのような意味なのか。双極子モーメントおよび金属蒸着膜の影響がいずれ

も僅少であるために、Eq. (3)の関係が満足されることを述べているのか。

応答：Fig. 5に示した破碎エネルギー E/M は Eq. (3)より求めたものではなく、実測の荷重-変位曲線を図積分して求めた値である。また球圧壊強度 S_0 にしても実測の値を用いている。この両者の関係を材料力学的に解析して求めると Eq. (3)の理論的關係が得られるわけである。この種の研究では、破碎エネルギー E/M と球圧壊強度 S_0 との関係を明らかにしておくことは通例のことである。すなわち実験点(Fig. 5の測定点)と理論値(Eq. (3))との対比が問題となるわけである。これまで空气中あるいは水中の場合については、実験的にEq. (3)の関係をほぼ満足する結果を得てきている。今回はさらに雰囲気あるいは試験片表面の状態を変化させた実験を行ない、破碎エネルギー E/M と球圧壊強度 S_0 との関係を調べたわけである。その結果、Fig. 5に示すように空气中、水中での場合と同様、破碎エネルギー E/M は球圧壊強度 S_0 の $5/3$ 乗に比例し、しかも各試料毎に1本の直線であらわされることから、雰囲気や表面状態によらず試験片のヤング率 Y 、ポアソン比 ν はほぼ一定であることをもあらわしているものである。

ホソカワ ニュース

○機構改革

昭和49年12月21日、従来の事業本部をシステム事業本部に改称し、よりシステム化エンジニアリング化を推進することになった。集塵機事業本部は第一環境システム事業本部と第二環境システム事業本部に分離し、第一環境では電気集塵機を主体に各種湿式集塵機を、第二環境は汚濁集塵機を取り扱う。粉体システム事業本部および化学システム事業本部の取り扱い製品は従来と変らない。

○ホソカワ環境エンジニアリング株式会社設立

昭和50年1月22日、環境開発とエネルギー問題を核として空気調和、環境調和システムに取り組むべく新しくホソカワ環境エンジニアリング株式会社（資本金2,000万円）を設立した。

○'74化学プラントショー

と き：昭和49年10月1日～10月6日
と ころ：東京、晴海、国際見本市会場

出品機種

- | | |
|-------------|--------------|
| ①ACMパルペライザ | ②リンレックスミル |
| ③アレックス | ④ミツミ式エアークンベア |
| ⑤タービュライザ | ⑥ソリッドエア |
| ⑦ナウタミヤサ | ⑧エレクトロフィル |
| ⑨パルスエアー（模型） | ⑩キャビネットコレクタ |
| ⑪ミストコレクタ | ⑫スイングアーク |



○第9回近代窯業機械展

と き：昭和49年10月19日～10月21日

と ころ：瑞浪市民会館

出品機種

- ①ロロパール ②パルスエアー（模型）

○大阪工業会定例午さん会開催

昭和50年2月25日、大阪工業会主催の第432回定例午さん会が当社枚方事業所において行なわれた。多数の会員が参加され、会社概況の説明に引き続き、研究所および工場などを見学された。

○源祥貿易股份有限公司と代理店契約締結

昭和50年7月17日、台湾、源祥貿易股份有限公司と当社製品の販売代理店契約を締結した。

○デュコン・マイクロパル社へ技術輸出契約締結

昭和50年6月1日、カナダ、デュコン、マイクロパル社（DUCON-MIKROPULL LTD.）へ分級機ミクロンセパレータの技術輸出契約を締結した。

○日本燐酸銻向に湿式電気集塵機を納入

化成肥料乾燥用排ガス集塵機として本年3月受託、既に試運転を完了し、順調に稼動している。

○海外出張

渡航年月	渡航者名	出向地	用務
49年9月	副社長	独・英国・スウェーデン他	欧州資源再利用開発調査
10月	谷口本部長、蒔井増田	米国・ヨーロッパ	提携先、生産技術調査
10月	丹羽本部長	米国	ストロング・スコット、サンドターボ技術研究
11月	山口	シンガポール	パルスエアー据付、試運転
	上田課長	シンガポール	P.C.S 社打合せ、市場調査
12月	東門本部長、久保	米国	マイクロパル社、WEP技術研究
50年1月	副社長、鈴木次長、増田	米国	マイクロパル社技術会議、その他提携先訪問
2月	森本副本部長	英国・独国	POWTECH '75、ホソカワ・ヨーロッパ（英）（独）
3月	柳井課長	シンガポール	P.C.S 社打合せ
3月	川村（美知夫）	英国	ホソカワ・ヨーロッパへ赴任

4月	川上 川村(美德), 羽鳥	オーストラリア・ ニュージーランド インドネシア・マ レーシア	商談, 販売促進 日本ペイントインターナショナル社MS-4 他試運転
5月	増田 間嶋本部長 田中本部長 佐藤, 横山	インドネシア・タ イ他 ルーマニア・英国	商談, 販売促進 商談, ホソカワ・ヨーロッパ LTD
7月	花房 西村課長, 鈴木	ドイツ ドイツ 台湾	ホソカワ・ヨーロッパ (独へ赴任) MS-4 他試運転
8月	社長 山口	韓国 米国 シンガポール	商談他 マイクロパル社他 P.C.S 社へ出向

“粉砕”誌編集委員会

編集委員会査読委員

査読委員長	大阪府立大学教授	矢野 武夫氏
査読委員	京都大学名誉教授	中川 有三氏
“ ”	大阪府立大学教授	吉田 哲夫氏
“ ”	京 都 大 学 教 授	井伊谷鋼一氏
“ ”	京 都 大 学 教 授	吉岡 直哉氏 (御年令順)

編 集 後 記

編 集 部

* 昭和32年故細川永一会長の紫綬褒章を記念して創刊された“粉砕”誌もここに20号を数えるに至り、一つの節を迎えました。これも偏に諸先生方および読者諸兄のお蔭と関係者一同感謝いたしております。その間粉体工学の成長、発展に歩をあわせていくつかの変革を経験し、現在の編集委員会制による充実した内容の誌面とすることができましたことは、まことに同慶にたえません。まさしく田中先生のいわれる(本誌3頁参照)「時のきざみ」を編集者の立場からも感じる次第です。この節を将来に向けての飛躍の第一歩とすべく努力したいと思いますので、諸先生方および読者諸兄の変らぬ御指導とご鞭撻をお願いいたします。

* 前号で予告しました特集“粉体の単位操作と粉体物性”を取り上げました。このテーマの内容は、昭和49年8月26日開催された「第8回粉体工学に関する講演討論会」で講演された内容に少し手を加えられたもので、粉

体物性と単位操作とのかかわりあいについて概説され、専門的立場からいくつかの問題点を提起され、今後の動向について展望されています。

* 特集を組んだ関係上頁数が増大し、また記録を更新しました。20号を記念して創刊号以来の“粉砕”誌総索引を掲載する予定にしておりましたが、紙数の関係上割愛せざるをえなくなりました。別の機会に発行する予定であります。

* 読者諸兄との関係をより密接にするため、次号から投書欄または質問欄を設ける予定です。どしどし奮ってご投稿をお願いします。

原 稿 募 集

“粉砕”誌の原稿を募集いたします。粉体工学に関係する研究報告、技術報告、総説、参考資料、文献紹介、随筆など特徴ある計事をふるって御投稿されることをお願いします。ご一報いただきましたら、原稿用紙をお送いたします。

次号発行予定 昭和51年9月末日

原稿締切 昭和51年5月末日

“粉 砕” No.20 1975年 秋季号

昭和50年11月20日 印刷

昭和50年11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

粉体はホソカワの原点

粉体処理への 努力。

粉体は、さまざまにその姿を変えながら私たちの生活と深く結びついています。ところが複雑な性状をもつ粉体。

ホソカワは、創業60年、この粉体と真正面から取り組み、各種粉砕機、分級機、供給排出機、混合機、乾燥機、造粒機、集塵装置、輸送装置など、粉体処理に関する単位装置からシステムエンジニアリングまで、あらゆる需要に対応しています。

粉体処理装置とシステムエンジニアリングの

ホソカワ

☎ 株式会社 細川鉄工所

●粉体システム事業本部 ●化学システム事業本部
●第一環境システム事業本部 ●第二環境システム事業本部
大阪府枚方市招提田近1丁目9番地 〒573 電話/枚方 (0720) 55-2221・東京 (03) 503-2231
営業品目 / 各種粉砕・分級・篩分・混合・乾燥・集塵・輸送 —— その他粉体処理装置

