

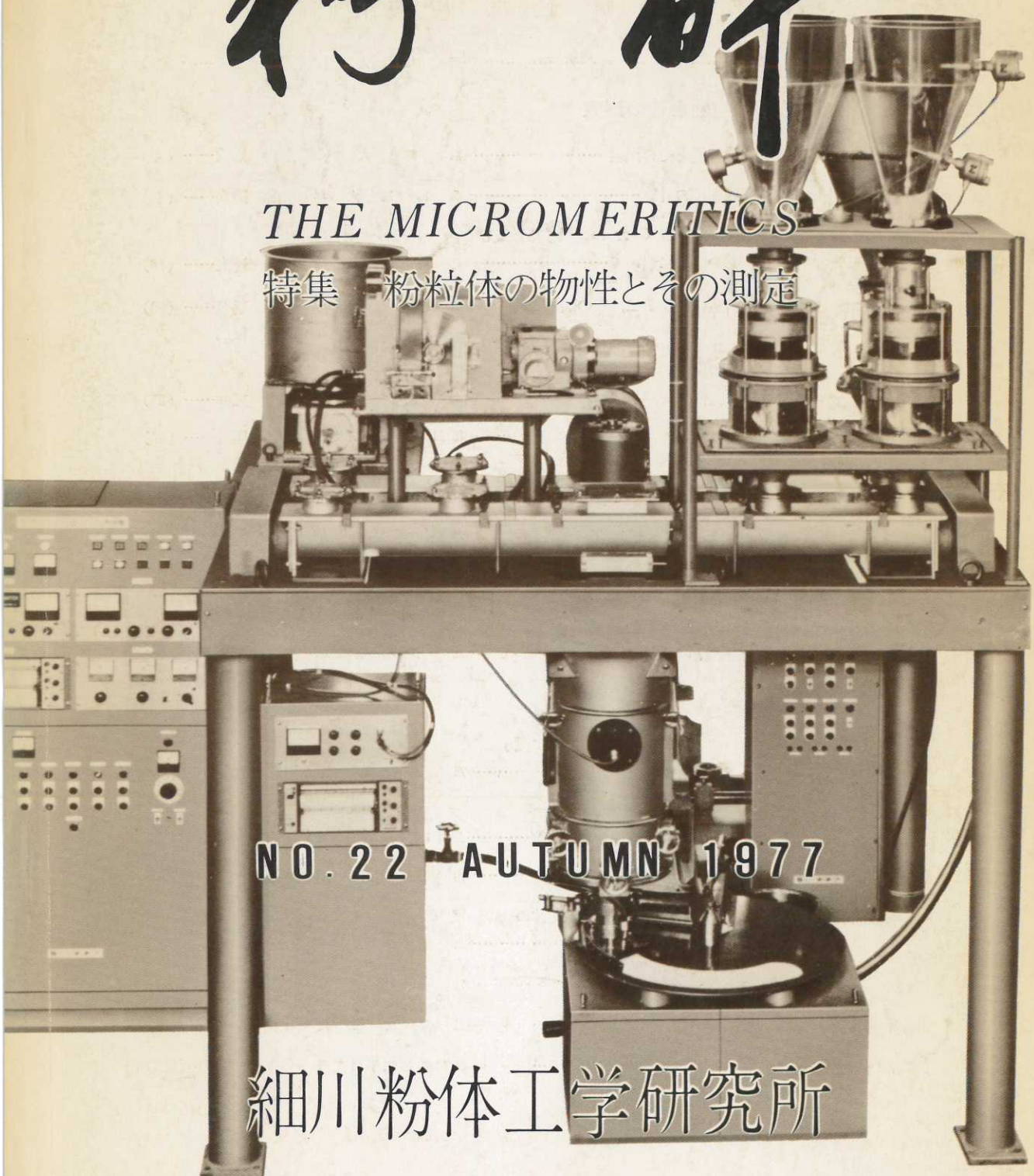
新 碎

THE MICROMERITICS

特集 粉粒体の物性とその測定

NO. 22 AUTUMN 1977

細川粉体工学研究所



“粉 碎” 22号 昭和52年(1977) 秋季号 目次

【巻 頭 言】 見 る……………京 都 大 学 荒川 正文……(2)

＜特 集＞粉粒体の物性とその測定

粉体物性の測定とその意義……………京 都 大 学 荒川 正文……(4)

粉体の固結強度の計算……………北 海 道 大 学 田中 達夫……(9)

付着性粉体に対する Carr の流動性指数及び
噴流性指数の意味について……………北 海 道 大 学 田中 達夫……(16)

微粒子の性質に関する二、三の問題(続)……………昭 和 大 学 金庭 延慶……(18)
今川 敏二

凝集性粉体の流出
一試作した回転ホッパーについて……………金 沢 大 学 川合 誠……(23)

吊り下げ式付着力測定器の試作と測定……………細 川 粉 体 工 学 研 究 所 彼谷 憲美……(32)
藤井 謙治
横山 藤平

【研 究 報 告】 粉体の低濃度垂直空気輸送の加速領域の流れ……………九 州 工 業 大 学 富田 侑嗣……(39)
上滝 具貞
湯谷 正司

【研 究 報 告】 流動層における分散板用多孔板に関する研究
一分散板上粒子の不動部分の体積について……………九 州 大 学 田中 勇武……(44)
葭村 雄二
篠原 久

【研 究 報 告】 連続粉碎のシミュレーションの基礎に関する
概念的考察と若干の実験……………東 京 大 学 岡野 靖彦……(52)
太田 元

【総 説】 ホッパーからの粉粒体の自然流出速度……………長岡工業高等専門学校 五十嵐平太郎……(58)

【総 説】 カオリン鉱物の精製、特性とその利用……………山 形 大 学 高坂 彬夫……(70)

【参 考 資 料】 ニューマ・エスカレータによる粉粒体の
連続加熱操作について……………北 海 道 大 学 篠原 邦夫……(82)

【随 筆】 粉碎機の系譜……………富 山 大 学 沢 昌 恭……(89)

【参 考 資 料】 試験用ダストの発生方法……………工 業 技 術 院 山下 憲……(91)

【技術ノート】 フローメトロン の供給精度について……………細 川 粉 体 工 学 研 究 所 浦山 清……(105)
藤井 謙治

【新製品紹介】	産業分野における製造環境の清浄化 —ハイクリーンユニット、ハイクリーンコレクターの有用性—	ホソカワ環境 エンジニアリング 環境事業部	(107)
【新製品紹介】	ランミックス・システム	細川鉄工所 化学システム事業本部	(112)
【新製品紹介】	ホソカワ/マイクロ パルスエアLPシリーズ	細川鉄工所 第二環境システム事業本部	(114)
【新製品紹介】	ダクト中における火粉検知装置 —ホソカワ/ミクロン ルミ・アラーム—	細川鉄工所 第二環境システム事業本部	(116)
【製品紹介】	大型 ホソカワ/トリット キャビネットコレクター	ホソカワ環境 エンジニアリング トリット事業部	(118)
	ホソカワ ニュース		(120)

新製品ひとこと	レベル制御機 ホソカワ/ミクロン フローレベラー	(51)
豆 ニ ュ ース	第11回粉体工学に関する講演討論会開催 —工学に活用できる粉体物性のつかまえ方と実演—	(111)
特許一言メモ	めまぐるしく改正される特許法	(22)
	公開特許公報	(43)
	特許協力条約	(119)

Original Reports:

• Discharge of Agglomeration Powders	S. Kawai	(23)
• On the Development and Measurement of a New Type Tensile Strength Tester	Y. Kaya, K. Fujii and T. Yokoyama	(32)
• Flow in the Acceleration Region of Dilute Phase Pneumatic Transport of Powdery Materials in Vertical Pipe	T. Tomita T. Jōtaki and S. Yutani	(39)
• Perforated Plate Distributor of Fluidized Bed —Dead Zone Volume of Particles on Distributor—	I. Tanaka Y. Yoshimura, and H. Shinohara	(44)
• Conceptual Studies and Some Experimental Tests on Simulation Fundamentals of Continuous Grinding	Y. Okano and H. Ohta	(52)

【表 紙】連続混合装置 ホソカワ/ミクロン ランミックスシステム
(関連記事が112頁に掲載されています)

見 る

荒 川 正 文*

Masafumi Arakawa



トルストイの寓話に「人は何で生きるか」というのがある。小学校の4、5年頃に読んだのだからあまりはつきりとは憶えていないが、トルストイ流の人は愛によって生きるというテーマである。お断りしておくが小学生時代からロシア文学などに凝っていたわけでは決してない。当時、新潮社から日本小国民文庫という全集ものが出版され、かなりのベストセラーであったと思う。[心に太陽をもて]とか「君たちはどう生きるか」とか、そして「世界の謎」,「日本文学選」など、毎月1冊づつ本屋が配達してくれた。うつつをぬかすテレビもなく、塾などというものもなかった子供にとって毎月楽しみに待たれたものである。多分、その中の「世界名作選」に載っていたのだと思う。しかし、ここでは神を説き、人類愛について語るなどという気は全くないし、第一そんな柄ではない。実はこんな問題を出してみようと思ったのである。「人は何で見るか」？ 何を？ “もの”をである。何によらず見る対象物をである。そんなことは子供にでもわかると思われるだろう。そういえば前に述べた小国民文庫の中のどれだったかにこんな話がでていた。

子供が丘の上に立って景色を見ている。空の雲を見たり太陽を見たり、大きな眼をあけてじっと見る。そして今度は目を閉じる。こんなことを何度も繰返してから子供は叫ぶ。「そうだ、目があるからなんだ」。子供は丘を駆け下り家に帰って、夕食のときにこの発見を家族に話すのである。「何かが見えるのは目があるからなんだ」。家族はそれを聞いて皆笑う。そんなこと当たり前じゃないか。しかしおじいさんだけが笑わなかった。「そうだ目があるから見えるんだ。とても大事なことをお前は自分で見つけた」。少年は後に有名な学者になるが、後々まで、おじいさんが自分の発見を認めてくれた喜びを忘れなかった。

では目があれば本当に見えるのだろうか？ もう20年以上も前のことになるが、当時、京大理学部教授佐々木申二先生の講演を聞く機会があった。その中に、暗室で育てた猿の話があった。全く光のない暗室で育てた猿は明るいところに出しても見えないそうである。たとえば棒を出しても逃げようとしない。棒で叩くとそれが身体に当たるまではケロリとしていて、触れたとたんに悲鳴をあげるそうである。少々可哀そうであるが、これは別に目に故障があるからではなく、目に入ったものを認識できない、つまり見る事ができていないのである。考えてみれば当然のことで、肉眼というのは一個のカメラ、それもフィルムの入っていないカメラである。水晶体というレンズを通った対象物の像は網膜というピントグラス上に倒立投影される。網膜上の視覚細胞が光の強弱、波長などを感じ視神経を経て脳細胞にその情報を伝える。網膜に投影された像の情報と対象物に対する認識とがマッチしなければそれは見えていないのである。よく、車中なので考えごとなどしていると前に坐った知人に気がつかなかったりする。目には入っているのだが頭の方が他のことを考えているから見れども見えなくなる。ただし、きれいな女の子などと他の要素、つまり色彩が強烈だとか香水の香りがするとか、何か考えごと以上の強い要素が働くからすぐに気がついて、今度は考えごとの方がお留守になる。

要するに見るということは単に目に入れることでなく、その情報を頭の中で整理し組立てることであり、人は(人に限らないが)生れてからその訓練を自然に受けて物も見ようようになってきたのである。生れたての赤ん坊は目が見えない。生きるために必要なもろもろの事物を数多くの経験の積みあげの中から貯え、ものを見る目を養っていく。この佐々木先生の講演は実はこのことを

イントロダクションとしていろいろの見る道具、顕微鏡や電子顕微鏡、イオン顕微鏡についてのことに移ったが、今でも心に残るお話であった。

顕微鏡や電子顕微鏡でも同じことである。それがどんな原理、つまり試料と電磁波とのどんな相互作用によって見えるのかがわかっていなければ“もの”は見えないし、見えてもその像の意味が理解できない。つまり、本来得られている情報を利用できないことになる。だから、これらの道具を使ってもものを見るのにも訓練がいる。顕微鏡に限ったことではない、たいていの道具、装置は最終的には肉眼観察に帰してしまう。それが電流計の読みであるか記録紙上の図形であるか、あるいは色の変化になるかはわからないが、いずれにせよ、それらの変化と対象物におこっている現象の関係がわかっていれば間接的にせよ見て確めることができる。専門家たちはいろいろの測定装置から与えられるチンプンカンプンの図形の僅かの変化を見てそこに何がどの位あるかを読みとることができる。もちろん、これらの変化は別に見なくてもよい。音でも、触感でも、相手によっては味だったり臭いであつたりしてもよいには違いない。しかし、私達はこのような他の感覚でものをチェックしても、その情報を相互に定量的に伝えることに馴れていない。だから、たとえばそのような他の感覚の方がよく変化をとらえられることでも、計測装置というような間接的な手段を通して何とか目で見られるようにしようと努力する。つまり“Seeing is believe” 見ることは信じることなのである。誰もが見ることが証拠であり、いくら間接的な写真があつても“空飛ぶ円板”はまだ未確認飛行物体UFOとしてせいぜいインスタントラーメンの商標に使われる運命でしかない。

今、電子顕微鏡で分子が見え、原子が見えたかどうかの論争になりつつある。これら電子顕微鏡で見た分子像は、すでにX線回折による構造解析などによって立体的な形がよくわかっているものであり、その構造と電子顕微鏡像がピタリと一致した、だから見えたんだということである。つまりわかっているものを見たらわかっていたように見えた、万才!! ということなので少々馬鹿らしいような気がしないでもない。しかし、たとえばX線回折像を解析し書きあげていったものが、肉眼で直接(写真としてであるが)見えるということに意味がある

し、これが前に述べた“見ること”のいわば訓練である。それがやがて、わからないものを見て確めるための基礎になる。

粉体を取扱うとき、私達は一個一個の粒子の形とか大きさを識別しないで集団として見ていることが多い。砂のようにまだ肉眼の分解能の圏内にあるものでも、粉というバルクの状態では個々の粒子に対する意識はもたないだろう。「きわめて多数の粒子の集合体」それが“粉”という状態に対する基本的な認識だろうからその中の個々の粒子を仔細に眺め、それらの動きを追うことは通常の取扱いに対しては必ずしも要求されないには違いない。むしろ、鹿を追う猟師、山を見ずということになりかねない。粉体のバルクとしての性質を見失ってしまうことになりかねないのである。しかし、逆に、粉体全体の現象は構成粒子の個々の性質の発現であるのも事実である。巨大なサイロから流出する大量の粉体(粒体でも構わないが)を見るときに、その中の個々の粒子がどのように動き、飛び跳ね、衝突し、付着・凝集するか、それらの動きが全体としての挙動にどんな形で関係していくか、粉体の現象のとらえ方にはこのような構成粒子の動きから全体の現象に移るというアプローチも必要である。個々の粒子の動きと全体としての挙動、この関係がわかるようになったとき、粉体ははじめて人間の目で本当に“見える”ようになるだろう。いろいろの粉体の基礎的性質と現象の関係を確め、それらの知識を貯えてゆくこと、これが粉を見る目を養うことであろうし、粉体物性測定の意義はこの点にあると思う。どんな方法によってもその動きは見えず存在だけがわかるもの——人々はそれを魔性のものと呼ぶ。粉体がもはや魔ものでなくなったのは、その動きのかなりの部分を見ることができるようになったからである。しかし、前に述べたように“見る”というのは漠然と目に入れることではない。目に入った情報を考え、解析し、そして対象と比較するという操作を繰返し確めてゆくことである。いま、私達には本当に“粉”が見えているだろうか、暗室で育った猿の仲間にはなりたくないものである。

* 京都大学 化学研究所
(〒611 宇治市五ヶ庄)
Tel (0774) 32-3111

粉粒体の物性とその測定

近年粉体に関する関心が高まり、粉体物性の正体もようやくその外観を表わしてまいりましたが、なおまだ実際の粉体現象を十分説明するには問題点があるように思われます。本特集においては粉体基礎物性が現象とどのようなかわりあいを持ち、どのような意味があるのか、またその物性値をどう推定し、測定したらよいかについて幾つかの提案、報告をまとめてみました。本特集が粉体物性解明の一助となれば望外の喜びであります。

編集 部

粉体物性の測定とその意義

荒川 正文*

Masafumi Arakawa

1. まえがき

粉体物性とは何だろうか。本来、物質の性質をそれらを構成する最小単位である原子の構造にもとづいて考えるとき「物性論」的に取扱うという。原子は核とその周囲を廻る電子群によって構成され、化学的な結合とか、材料の変形、破壊の過程とか、電磁気的な性質とか、すべて物質の性質はこれら原子の状態の発現であり、これらの挙動に着目して、それが物質の特性とどのように関係するかを追究するのが物性論である。しかし、いま「粉体物性」といわれているのはそんな深い意味をもっていない。粉体という「物の性質」を略して粉体物性といっていることが多い。用語というのは使う人達の間で定義され、了解されていればどうでもよいのかも知れないが、漠然とこの粉は凝集性であるとか、粒度がいくらかといっても、それらが粉体を構成する物質のどんな性質に基づくのか、粉体系の特性にどんな形で関係するの

かというようなことがわからなければ意味がない。そこで、粉体の物性ということをも本来の物性論とのアナロジーで考えるならば、粉体に特有の性質、たとえば固体であるのに流動するとか、大きな塊にくらべて化学的に活性だというようなことが、その粉体の構成単位である粒子の性質とどのように関係するかを考え、整理し、体系づけることにほかならないと思うのである。

2. 粉体とは何か

さて、粉体とは物質が示す状態の一つである。一般に材料の物性工学において一つの体系をつくり整理するには次のような順序で考えてゆくことが多い。すなわち、

- 1) 物質が定義された状態をとるための条件を知る。
- 2) その状態の標準的な構造を知る。
- 3) その構造の物性を知る。
- 4) その構造に対する外部条件、外力の効果を知る。
- 5) その他の特殊問題、物質の特性との関係など。

粉体についてもこの順序で考えてゆくとするとまず^{*}粉体の定義をしなければならないが、一般的に“粉”といわれている材料に共通し、私達の日常周辺の環境条件の下で感覚的にとらえられる特性を整理すると Table 1 の

* 京都大学化学研究所
(〒611 宇治市五ヶ庄)
Tel. (0774) 32-3111 (代)

Table 1

特 性	固 体		液 体		気 体
	バルク	粉	バルク	ミスト	
1. 物性が等方的である.	△	○	○	○	○
2. 流動性がある.	×	○	○	○	○
3. 流動限界での流動性の変化が大.	×	○	×	×	×
4. 類似物質間の混合ができる.	×	○	○	○	○
5. 粒子の離合集散が可逆的である.	○	○	×	×	×
6. 塑性, 加工性がある.	△	○	×	×	×
7. バルクより化学的に活性.	×	○	×	○	×

ようになる。

このように粉体は物質の他の状態にはない特性をもっているが、このような“粉”の共通特性を満足させる条件は

1. 個体の微粒子であること。
2. それがきわめて多数集合していること。
3. 粒子間に適当な相互作用が働いていること。

適当というのはあいまいな表現であるが、これが大きいのは成形体、焼結体などであり、無視できるのは粉塵やエアロゾルである。どちらも粉体の一つの限界状態には違いないが、いわゆる“粉”というのは人が軽く触れた程度の力で流動、変形する程度の相互作用力が働いている状態をいうことにする。これらをまとめると私の粉体の定義は次のようになる。

「粉体とは多数の固体粒子の集合体で、粒子間に適度の相互作用が働いている状態である。」

3. 粉体の基礎特性

粉体を以上のように定義するとその挙動を考えるのには多数の単位粒子（ここでいう粒子とは集合体を構成する基本単位）の集合体で、各粒子間に相互作用—ポテンシャルエネルギーを考慮しなければならない系の取扱いが参考になる。いま、古典統計力学による液体の分子論的な考えを借りることにしよう。液体の内部エネルギー E は(1)式のような形で与えられる。

$$E = \frac{2}{3} N_M k T + \frac{2\pi N_M^2}{V_M} \int_0^\infty r^2 U(r) g(r) dr \quad (1)$$

ここで N_M : モル分子数, k : ボルツマン定数, T : 絶対温度, V_M : モル分子容, r : 作用しあう分子間距離, $U(r)$: 2分子間ポテンシャル, $g(r)$: 動径分布関数である。

(1)式の右辺第1項は個々の分子の運動エネルギーの総和で、系全体に含まれる運動エネルギーを示し、第2項は分子間のポテンシャルエネルギーの総和である。

粉体系では、運動エネルギー E_d は単位体積中の粒子

数 N とすると

$$E_d = \sum_{i=1}^N \frac{P_i^2}{2m_i} \quad (2)$$

すなわち、個々の粒子の質量 m とその運動量 P で表される運動エネルギーの総和である。しかしポテンシャルエネルギー項については全くわからないが、液体とのアナロジーから流動粉体系では、粒子間相互作用力、粒子の充填構造（空隙率）、系の単位体積中にある粒子数が関係するであろう。したがって、これらの各変数がきまれば系全体のエネルギーがきまることになる。

ここにあげた粉体の力学現象に関する基本量は、現在一応は測定可能であるが、その意味をあらためて整理してみる。

3.1 粒 度

粉体特性としての粒度の重要性はよく知られているが、その意味は次のようなものである。

- i 運動単位の質量 m , すなわち D_p^3 である。
- ii 単位体積中に含まれる粒子数 N , すなわち個々の粒子体積の逆数 $1/D_p^3$ に比例する。
- iii 粒子間相互作用力：後述のように相互作用力は機構によって異なるが粒子径の関数であるものが多い。
- iv 主として粒子の表面特性が関係する現象では比表面積

ここで、粒子径とは必ずしも単粒子ではない。式からわかるように必要なのは“運動単位となる粒子”の大きさである。場合によっては凝集体、成形体、造粒物の大きさであることに注意せねばならない。

3.2 粒子間相互作用力

粒子間相互作用力はよく知られているように次のようなものが考えられる。

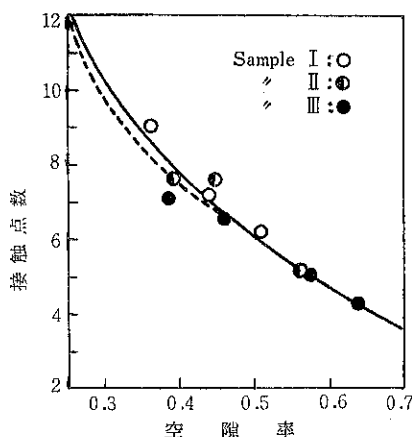
- i London-van der Waals 力
- ii 粒子の静電荷電によるクーロン力
- iii 粒子間の液膜による付着力
- iv その他の介在物、固結現象など

以上の中で i ~iii は粒子径および粒子表面間距離の関数である. iv, v は一般にその材料物質系の特性である.

3.3 粒子の充填構造

粒子の充填構造は粒子の運動エネルギーと粒子間相互作用力の関係で定まる2次物性である。しかし、ある粉体系の力学現象をしらべるときに初期状態として規定しておかねばならない基本的な因子であることは前に述べた通りである。

充填状態を完全に定量的に表現することは難しい。しかし、これが広義の粉体の流動現象に関してもっている意味は、粒子の移動し得る空間の存在率と、粒子間相互



実線：R-T式による。点線：Smithの実験
円形は分布のある系での実測値（荒川）

Fig. 1 球形粒子の空隙率と接触点数の関係

作用力の働く粒子接触点の数である。したがって、一般には平均的な値として、粉体の嵩密度などから求められる空隙率 ϵ と、それから Ridgway-Tarbutck 式などによって求めた粒子平均接触数 k_p を用いることになる。R-T 式はいろいろの測定者による等大球の充填実験の結果をまとめたものであり(3式として示される。

$$\varepsilon = 1.072 - 0.1193k_p + 0.00431k_p^2 \quad (3)$$

この式は球形粒子であればある程度粒度分布をもつていても適用できることが確かめられた¹⁾。

3.4 粒子の表面特性

粒子表面の性質は、とくに粒子間、粒子と分散相との相互作用に対して影響が大きい。通常の大気中では粒子表面に吸着・凝縮した水分が付着・凝集力の主因となることが多いが、このような水分の吸着性についても粒子表面の性質が関係する。また粉体粒子の化学的性質、固結、焼結、反応性、溶解性などに対する粒度の効果は主として表面物理化学の問題である。このように粒子表面の性質は粒子自身の活性、介在物との相互作用などを通して粒子集合体の性質に関係してくる。

4. 粉体の現象と基礎的性質

以上、粉体の現象に共通する基礎的性質として、1) 粒度、2) 粒子間相互作用力、3) 粒子充填構造、4) 粒子表面の性質をあげることができる。これらは、実際にはいろいろな仮定や困難な問題が多いが、直接または間接に測定可能な量である。したがって、粉体の特性に対するこれら基礎的性質の寄与がわかっていれば、粉体現象の制御ができる。すなわち、ある材料処理プロセスにおける個々の操作に対して最も適当となるような基礎

Table 2 材料をなぜ粉にする？

材 料													目 的				
鉄	鋼	超硬合金	焼結材料	セラミックス	セメント コンクリート	充填材	複合材料	塗料	医薬品	飼料	食品	鉱業	廃棄物処理				
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	輸送のために	☐	☐	☐
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	混合のために	☐	☐	☐
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	成形のために	☐	☐	☐
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	均質化のために	☐	☐	☐
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	反応のために	☐	☐	☐
☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	分離のために	☐	☐	☐

粉体の基礎物性はどう関係する？

目 的		基礎物性			
		粒度は？	粒子間力は？	空隙率は？	表面活性は？

的性質を与える粉体材料設計をおこなえばよい、そして、粉体物性の測定の意義はまさにこの点にあるはずである。

実際の工業界で粉体材料が広く取扱われているのは Table 1 に示したような特性の利用である。これらの粉体特性が固体材料の取扱いにどのように生かされているか、たとえば Table 2 に幾つかの例をあげておこう。

また、これらの粉体の特性がどのような基礎的特性に関係しているかもあわせて示してある。この表で○印の大きさはその強さか大きさの目安である。

以上、粉体の特性のなかでも重要な流動性を対象とした議論を進めてきたので、液体論とのアナロジーを用いている。したがって静止した粉体層や、粒子間隔の充分大きいエロゾルのような状態では(1)式の右辺のどちらかの項は無視してよいことになる。しかし、さらに一步進めて、たとえば固体の破壊に関する物性論的な取扱いや結晶の転位の役割などを粉体層に拡張するというような試みは当然なされてよい。それらを含めて、個々の粒子の動きの観点から粉体現象の解明を進めるのも、粉体工学の体系化に対する重要なアプローチであると思う。

5. 二、三の粉体特性に対する基礎的性質の寄与

5.1 粉体の流動性²⁾について

振動粉体層の流動³⁾と、オリフィスからの流動特性⁴⁾、粉体の混合、偏析に対する粒子表面の寄与⁵⁾などについて、筆者は 2, 3 の実験をおこなってきたが、ここでは簡単な説明を記すにとどめておく。詳細は文献を参照されたい。

Fig. 2 は、グラファイト粉体を振動させ、振巾による電気抵抗(上図)と流動度(下図)の変化の対応を示す。粉体層の電気抵抗は粒子の接触状態に関係するから、その振巾による変化と流動性が対応するのは粉体の流動度が粒子接触数すなわち空隙率に関係することを示している。パラメータの記号は粒度と粒子形状でⅡが最も細かく番号の増すほど大きい。これらの粒子は不規則形状であるが、Sは球状黒鉛であり、流動性がよい。

Fig. 2 において振巾 0.2 mm 以上の領域の電気抵抗の変化 R_0/R_x と流動度 ϕ の関係は、Fig. 3 のようになり、次の実験式が成立する。

$$\phi = a \exp\left(-b \frac{R_0}{R_x}\right) \quad (3)$$

ここで、 R_0 は静止状態におけるグラファイト層の電気抵抗で、 a 、 b は定数である。振動時の電気抵抗 R_x が無限大のとき R_0/R_x は 0 であるが、これは試料粒子が完全に分散して相互に接触していないことを意味する

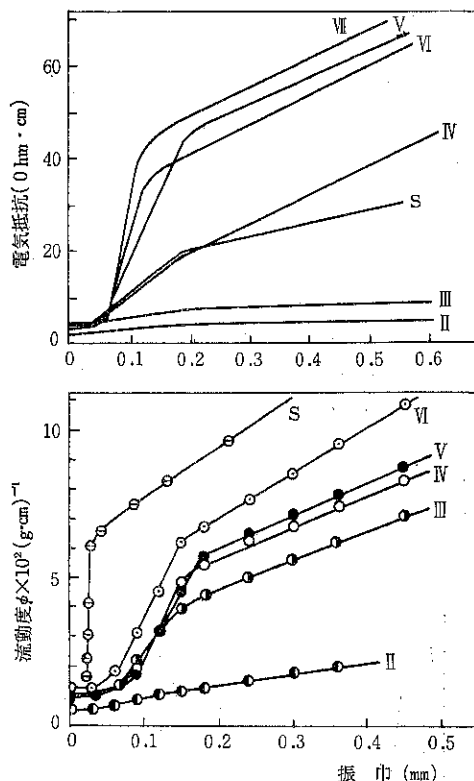


Fig. 2

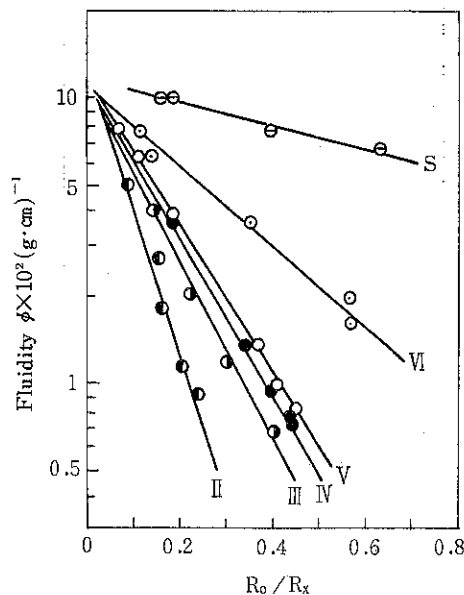


Fig. 3

から、このときの流動度 ϕ は試料の種類に関係ない一定値 a となり、これが装置定数であることを示している。一方各直線の勾配 b は試料粒度が大きいほど、ま

た、球形粒子ではとくに小さく、振動強さが流動性の増加にあたえる効果が少いことを示している。すなわち定数 b は試料の流動性に関する定数で粒度、粒子形状などの基礎的性質に関係することがわかる。

また(3)式の R_0/R_x を V_0/V_x (V_0 は固体の、 V_x は溶融状態である温度における分子の自由体積)と書き変えると、溶融ガラスや高分子の粘度の温度依存性に関する粘度式(熱運動による分子の自由体積の増加を考えると)同じ形となることは興味がある。

Fig. 4(b)に示したように他の粉体層でも搅拌抵抗は振動の強さ(振巾)によって Fig. 2 と同様の変化をする。しかしオリフィスからの流速には(a)のように振動の効果はほとんどなく、この実験に用いた 60Hz ではむしろ流出速度(g/sec)を減少させる方にはたらく。これは振動による容器内の粒子の充填効果が空隙率の減少をまねくためと考えられる。

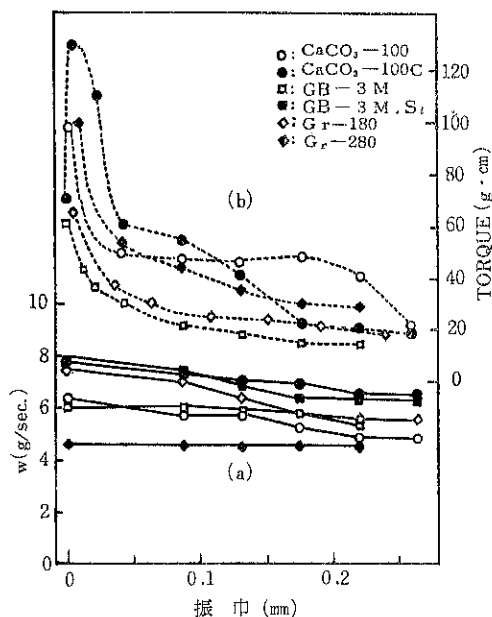


Fig. 4

5.2 粉体の偏析と粒子表面の性質

粒度 $100\ \mu\text{m}$ 位のガラスビーズ (GB703), 石灰石粉砕物 (Ca 150) および黒鉛末 (Gr) を $70\ \mu\text{m}$ 位の網をはった円筒に充填した層をつくり、その上に $20\ \mu\text{m}$ 位の

炭酸カルシウム粉を載せて振動を加えると、粗粒子層を通過して下の網目から落下する。その通過重量の時間的増加を測定すると偏析のしやすさがわかる。重質炭酸カルシウムSZと、それを脂肪酸処理して表面を疎水性にしたSZ-Pについてこれらの粉体層の通過量の時間的増加を測定した。実線は表面に脂肪酸処理を施し疎水性にしたSZ-Pである。点線の親水性の炭カルSZは、GB, Caの親水性表面粒子中ではSZ-Pより通過しにくい。表面が疎水性黒鉛粉体層では逆にSZ-Pの方が通過しにくくなる。すなわち、表面が親水性同志、または疎水性同志の粒子間では親和性が強く通過性が悪い。すなわち偏析しにくいことを示している。

粒子表面の性質が偏析に関係する例である。

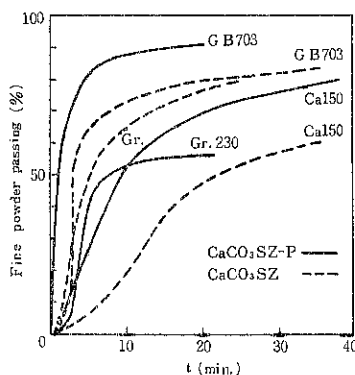


Fig. 5

6. あとがき

粉体のいろいろの現象を支配するもっとも基礎的な因子とそれが関係する2, 3の例をあげた。実際の粉体系ではその取扱いは、もっと複雑になるであろうが、いろいろのファクターの中で、どれが最も支配的かとききわめて現象を追求することが必要であろう。

参考文献

- 1) 荒川, 西野: 材料, 22, 658 (1973)
- 2) 荒川: 材料, 23, 504 (1974)
- 3) 荒川, 西野: 材料, 20, 776 (1971)
- 4) 荒川, 西野: 材料, 24, 654 (1975)
- 5) 荒川, 西野: 材料, 21, 562 (1972)

粉体の固結強度の計算

田中 達夫*

Tatsuo Tanaka

1. はじめに

袋詰して貯蔵中によく固結を起こす食塩、ミルクその他の食品、アンモニウム塩などの肥料や硝酸塩のような火薬は直接クレームのもととなり、また輸送中のパイプの壁に付着形成する各種粉体や、北海道における石炭ストーブの集合煙突内壁の遊離カーボンの固着などは日常遭遇するきわめて厄介な現象である。またある高温ガスの中におかれた懸吊粒子の濃度センサーが、その表面での粒子の固結のために働かなくなることもあり、とくにこのタイムスケールが何カ月という長期になると、適当な温度設定が可能にならぬ限り、センサーのテスト自体に思わぬ長期間を要するというトラブルも起こる。

このような一種の付着現象——とくに接触粒子間に形成される固体橋による——に対してはそれぞれの分野で昔から多くの実験的研究が行われ、特定の物質に対しては関係する因子を変えて付着張度の測定が行われており、また粉体による空気中の水分の吸着のメカニズムに対しても最近研究が行われている。

筆者ら¹⁾は前にこのような固体橋の生成を熱と物質移動が同時に起こっている場合をモデル化することにより、主として粒子間にできる固体橋の強さをその最狭部の大きさの項で表わすような理論的試みを発表した。この稿では、このような基本的な考え方を実在の物質の実験値と比較し、果して長期間にわたって出現する固結強度がどの程度理論的に予測できるものか、またどのような因子が判っていればよいかなどを考察してみた。

あらかじめこのような固結強度を予測しうるならば、固結を防止あるいは破壊するための方策によって防結も

可能になるであろうし、逆に造粒操作に対しては積極的に固結強度を調節することもできよう。

2. 固体橋形成のモデル

2.1 幾何学的計算

Fig. 1 に示すように粒径の等しい球 (R を半径) が一点で接触しており、その間に体積 V_c の水が水膜として存在するものとする。この水の表面張力や毛管力による付着力の計算や実験は従来からかなり多く行われている。簡単のために水膜と空気の境界線を半径 r の円で近似するものとし、このときの水膜の体積 V_c 、固液接触面積 S 、気液接触面積 A を、球の半径 R と角度 θ をパラメータとして計算すると次のようになる。

$$S = 4\pi R^2 (1 - \sin\theta) \quad (1)$$

$$r = R(1 - \sin\theta) / \sin\theta \quad (2)$$

を用い、かつ Fig. 1 (b) によって

$$A = 4\pi \int_0^\theta (R+r) \cos\theta - r \cos\alpha \, r d\alpha \\ = 4\pi R^2 \{ (1 - \sin\theta) / \sin\theta \} (\theta \cdot \cot\theta + \sin\theta - 1) \quad (3)$$

$$V_c = 2 \left[\int_0^\theta \pi \{ (R+r) \cos\theta - r \cos\alpha \}^2 r \cos\alpha d\alpha \right. \\ \left. - \int_0^{\frac{\pi}{2}} \pi R^3 \cos^3\theta d\theta \right] = 2\pi R^3 \left\{ (1 - \sin\theta) \cot^2\theta \right. \\ \left. - \left(\frac{1 - \sin\theta}{\sin\theta} \right)^2 \cot\theta \left(\theta + \frac{\sin 2\theta}{2} \right) \right. \\ \left. + \frac{(2 + \cos^2\theta) \sin\theta}{3} \left\{ 1 + \left(\frac{1 - \sin\theta}{\sin\theta} \right)^3 \right\} - \frac{2}{3} \right\} \quad (4)$$

(1), (3), (4) 式の相互関係を θ をパラメータとして計算の結果、Fig. 2 のようにほぼ直線をえたので

$$S / 4\pi R^2 = 2.7 \times (V_c / 2\pi R^3)^{0.22} \\ \therefore S \approx 10 V_c^{0.22} \quad (5)$$

$$\text{また } A/S = 1.5 (V_c / 2\pi R^3)^{0.22} \quad (6)$$

やや大胆にすぎる仮定であるが、粒子の表面に付着する水分が毛管吸引力により粒子の各接点 (配位数 k_0) に均等に集まってくると考えると、それぞれの接点は二つ

* 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

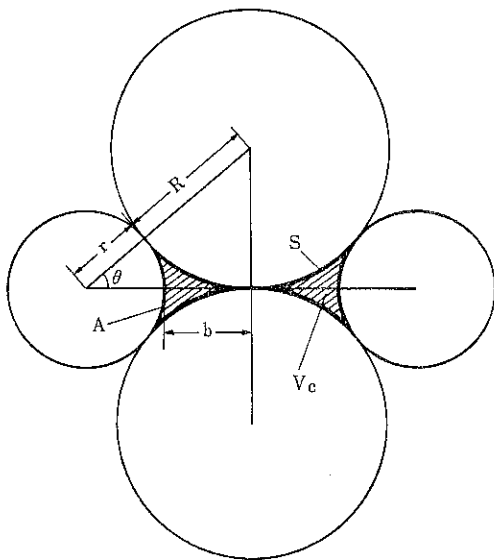


Fig. 1 (a)

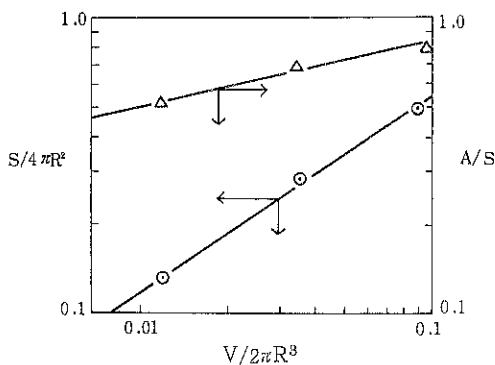


Fig. 2

の粒子に共有されることを考え

$$V_c = 2V/k_0 \quad (7)$$

V は 1 箇の粒子のもっている水分の全体積である。配位数 k_0 については Rumpf²⁾ により $k_0 \approx \pi/\epsilon$ が成立つ。よって

$$\begin{aligned} A/S &= 1.5(\epsilon V/\pi^2 R^3)^{0.22} \\ &= 1.5\{(\epsilon/\pi) \cdot (V/(4/3)\pi R^3 r) \cdot (4/3)r\}^{0.22} \\ &= 1.5\{4\epsilon/3\pi\} (a'/100)r\}^{0.22} \\ &= 0.45(\epsilon r a')^{0.22} \end{aligned} \quad (8)$$

ここに ϵ は粒子層の空隙率、 r は粒子の比重、 a' は水分の重量百分率となっている。 $\epsilon \approx 0.4 \sim 0.6$ 、 $r \approx 0.8 \sim 2.0$ に対して

$$A/S \approx 0.4(a')^{0.22} \quad (8')$$

また Fig. 1 に示す液橋の最狭部の半径 b は

$$b = (R+r)\cos\theta - r$$

$$\text{より } (b/R) = 1 - (1 - \cos\theta)/\sin\theta \quad (9)$$

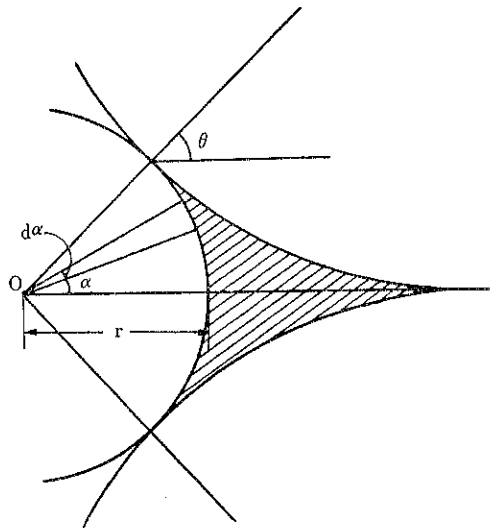


Fig. 1 (b)

やはり θ をパラメータとして (b/R) と (V_c/R^3) の関係を求めると、近似的に次式が成立つ¹⁾。

$$b/R = 0.82(V_c/R^3)^{0.25}$$

したがって、もし液体が蒸発して結晶固体が v の容積だけ析出したときの固体橋の最狭部半径も

$$b/R = 0.82(v/R^3)^{0.25} \quad (10)$$

2.2 熱と物質移動による固体橋の形成

初期水分量 $V_{c,0}$ とする。Fig. 1 (a) において固液接触面積 S を通して両方の固体から水の中へ溶解が起こるものとする、飽和固体濃度を C_s として

$$\frac{dw}{dt} = k_d \cdot S(C_s - C) \quad (11)$$

w は溶解した固体重量、 t は時間、 k_d は溶解速度定数 (cm/sec)、 C (g/cm³) は水の中の固体濃度である。一方、気液接触面積 A を通して熱が外部から流入し、水分の乾燥が起こるものとする、その速度は次式で表わされる。

$$-dV_c/dt = kA(H_w - H) \quad (12)$$

k は物質移動係数 (cm/sec)、 H は絶対湿度、 H_w はその温度における飽和湿度 (—) である。前報¹⁾ では便宜上 $-dV_c/dt = kV_c\%$ のような減率乾燥の形を仮定したが、本稿では一般的に上のように改める。

$$\text{ここで } C = w/V_c \quad (13)$$

$$\text{微分して } dw/dV_c = C + V_c(dC/dV_c) \quad (14)$$

(11), (12) 式から

$$-\frac{dw}{dV_c} = \frac{k_d S(C_s - w/V_c)}{kA(H_w - H)} \quad (15)$$

(14), (15) 式より

$$C + V_c(dC/dV_c) = X(C - C_s) \quad (16)$$

$$\text{ここに } X = k_d S / kA(H_w - H) \quad (17)$$

とおいた。この中で A/S は前項(8)式により、厳密には水分の変化により、すなわち時間的に変るものであるが、もともと V_c の量はそんなに大きくはないので、近似的に X は一定、すなわち初期水分 V_{c0} によってきまるものとする。

初期条件を $V_c = V_{c0}$, $C = 0$ として(16)式を解くと

$$\frac{V_c}{V_{c0}} = \left\{ \frac{XC_s - (X-1)C}{XC_s} \right\}^{\frac{1}{X-1}} \quad (18)$$

$C = C_s$ に達した瞬間に固体の溶解はとまるので、この時間 t までに溶解した固体量を w_s とすると $C_s = w_s/V_c$ である。ゆえに(18)式で $C = C_s$ とおき

$$\frac{V_c}{V_{c0}} = \frac{w_s}{C_s V_{c0}} = X^{\frac{1}{1-X}} \quad (19)$$

これ以上水分がなくなると、溶解した固体の一部は結晶析出するので、その密度を ρ とすると、最終的な固体の体積 v は(19)式を用いて

$$\frac{v}{R^3} = \frac{w_s}{\rho R^3} = \frac{C_s V_c}{\rho R^3} = \left(\frac{C_s V_{c0}}{\rho R^3} \right) X^{\frac{1}{1-X}} \quad (20)$$

(19)式により、析出固体最狭部径 b は

$$\frac{b}{R} = 0.82 \left\{ \left(\frac{C_s V_{c0}}{\rho R^3} \right) X^{\frac{1}{1-X}} \right\}^{0.25} \quad (21)$$

ここで変数を水分に変換するため、配位数と空隙率の関係 $k_0 = \pi/\epsilon$ を使って

$$\frac{V_{c0}}{\rho R^3} = \left[\frac{V_{c0}(k_0/2)}{(4/3)(\pi R^3)r} \left(\frac{4\pi}{3k_0/2} \right) \right] = \frac{8\epsilon}{3} \left(\frac{a'}{100} \right) \quad (22)$$

r は固体の比重、 a' は初期水分重量パーセントである。よって

$$b/R = 0.82 \left\{ \frac{8\epsilon}{3} \cdot C_s \cdot \left(\frac{a'}{100} \right) X^{\frac{1}{1-X}} \right\}^{1/4} \quad (23)$$

ここでもう一度 X に返り、(17)の X をより便利な形にしておく。

(8)式を用い、かつ簡単に $H_w = 0.02$ $H = 0$

(これは 25°C で湿度 0 の空気と接触した場合に相当する) すると

$$\begin{aligned} X &= k_d / 0.02k \times 0.4(a')^{0.22} \\ &= (1/8) \times 10^3 (k_d/k) \cdot (a')^{-0.22} \end{aligned} \quad (24)$$

すなわち X は物質移動(溶解と乾燥)速度の比と初期水分量によって定まる値である。

2.3 粒子層の固結強度

Fig. 3 のように半径の等しい球が空隙率 ϵ をもって充填されているときの固結強度は次のように導かれる。単位面積(層の切断面)に並ぶ粒子の個数は $[(1-\epsilon)/\pi R^2]$,

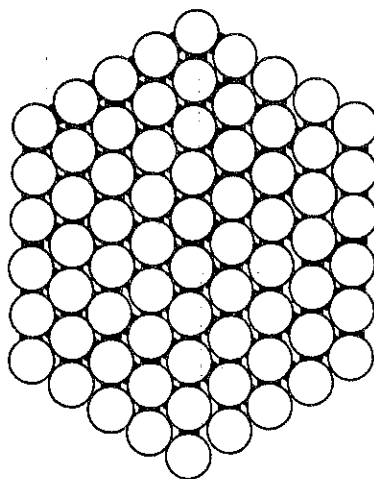


Fig. 3

1 箇の粒子は近傍の粒子と k_0 箇の共有接触点をもつので、その接点における力(付着力)を H_z (kg) とすると粒子層の強さ σ (kg/cm²) は

$$\sigma = \frac{1}{2} \frac{(1-\epsilon)}{(\pi/4)D_p^2} \cdot \frac{k_0}{2} \cdot H_z \quad (25)$$

最初の $1/2$ は力の方向係数である。 D_p は粒子直径 (cm)。配位数 k_0 は空隙率 ϵ の関数であり、前述のようにほぼ $3.1/\epsilon = k_0$ で近似されるので

$$\sigma = \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon \cdot D_p^2} \cdot H_z \quad (26)$$

一方、接点における付着力 H_z は、このような結晶析出固体層の場合、その最狭部径 b と、再結晶した粒子層の実効の強度 σ_z から次のように表わされる。

$$H_z = \pi b^2 \sigma_z \quad (27)$$

(26), (27) 式を組合せ(23)式を用いることにより

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon D_p^2} \cdot \pi (0.82)^2 \frac{D_p^2}{4} \left\{ \frac{8\epsilon C_s}{3} \left(\frac{a'}{100} \right) X^{\frac{1}{1-X}} \right\}^{1/2} \\ &\approx 0.085 \{ (1-\epsilon)/\sqrt{\epsilon} \} \cdot (C_s a' X^{\frac{1}{1-X}})^{1/2} \cdot \sigma_z \end{aligned} \quad (28)$$

となり、粒子径 D_p は無関係になる。ただし X は(24)式で与えられる。これらの式は何れも次元的に健全な式であるから、 σ_z (kg/cm²) が判っていれば直ちに粒子層の構造、水分及び物質移動などの値を知って、その粒子層の固結強度 σ (kg/cm²) が求められる。

3. 食塩の固結強度

(28)式により室温における食塩の固結強度を計算する。 $\epsilon = 0.5$ であり、NaCl の場合 $C_s = 0.350$ (g/cm³) はほぼ温度に無関係である。最も重要なものは X の値、すなわち溶解速度定数と乾燥速度定数である。

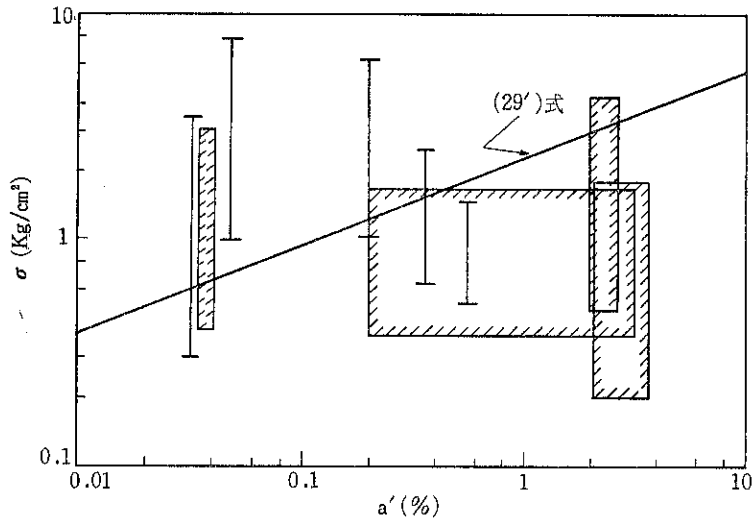


Fig. 4

3.1 k_d について

Ranz-Marshall の式 ($k_d D_P / D_L = 2$, D_L は拡散係数で常温 (25°C) における $D_L = 3 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ とすると

$$k_d = 2 \times 3 \times 10^{-5} / D_P \text{ (cm/sec)}$$

3.2 k について

同様に空気中の水蒸気の拡散係数 $D_g = 0.220 \text{ cm}^2/\text{sec}$ とすると

$$k = 2 \times 0.220 / D_P \text{ (cm/sec)}$$

3.3 X の評価

$$X = \frac{1}{8} \times 10^3 \left(\frac{6 \times 10^{-5}}{0.44} \right) (a')^{-0.22} \\ = 1.70 \times 10^{-2} (a')^{-0.22}$$

$a' = 0.01 \sim 10.0\%$ の値に対して $X \ll 1$. よって

$$X^{\frac{1}{1-X}} \approx X \text{ とおける.}$$

よって図式の σ は一層簡単になり

$$\sigma = 0.085 \left(\frac{0.5}{\sqrt{0.5}} \right) \cdot (0.350)^{\frac{1}{2}} \cdot (1.70 \\ \times 10^{-2})^{\frac{1}{2}} a'^{\frac{1-0.22}{2}} \cdot \sigma_z = 0.046 (a')^{0.39} \cdot \sigma_z \quad (29')$$

3.4 σ_z の値について

NaCl の単結晶の強さは $10,000 \text{ kg/cm}^2$ のオーダ⁸⁾ であるが、もちろん粒子間に再結晶して生成した固体橋はこのような微結晶の集合であり、実際の固体橋の強度は著しく小さい。Rumpf²⁾ によれば $\sigma_z = 50 \text{ kg/cm}^2$ であるのでそれを用いる。

ゆえに NaCl の固結強度は、本稿のモデルに従えば

$$\sigma = 2.31 (a')^{0.39} (\text{kg/cm}^2) \quad (29')$$

両対数紙に σ と水分重量パーセント a' を示すと Fig. 4

のようになる。

3.5 実験との比較

増沢⁵⁾ の実験によれば、食塩、並塩、精製塩の 30 kg 包装からの 620 g 包装、保存条件 3 カ月～20 カ月、粒度 (50% 径) $250 \sim 480 \mu$ の 3 種類の塩についての σ の測定値がある範囲にわたって報告されている。そのデータを Fig. 4 に水分重量%に対してプロットした。ハッチングで示したのは両軸とも実験の範囲を示したものであって、やや理論値の傾向と一致しない向きもあるが、種々の環境的パラメータを含んだ式と少なくともオーダは充分に一致している。

もともと NaCl の粒子形状は、ここに仮定した球形モデルをあてはめるにはやや無理があり、また微分方程式を解く段階で一つの仮定をした点、すなわち水分の時間的変化の A/S に及ぼす影響を無視したことなどが、水分の σ に及ぼす影響に対し実測値と離れた原因ではないかと思われる。しかし少なくとも図式で与えられる理論式が含む種々の変数の値をあらかじめ知っていれば、任意の条件に対する粉体の固結強度を概略にでも予知することができるであろう。

たとえば温度に対しては C_s , k_d , k などは直ちに關係して σ の値をかえる。 σ_z に対しても再結晶の転位点などが判っていれば、それらも關係するであろう。また圧力に対しては理論式における $(1-\epsilon)/\sqrt{\epsilon}$ の項が先ず考えられる。これらによる σ に及ぼす影響について若干の考察を加えてみる。

4. 固結環境が σ に及ぼす影響

理論式(29)に対するいくつかの環境条件の影響をここで

は定性的に検討し、今後考慮されるべきいくつかの項目を挙げてみよう。

4.1 圧力の影響

包装、貯蔵中に粉体は大きい圧力を受ける。このことは直ちに空間率の減少、したがって関式の $(1-\epsilon)/\sqrt{\epsilon}$ に対する圧力の効果を考えればよいが、しかし一般に多くの材料は実際には粒子同志の接点において変形を起し、接触面積がモデルで考えられるものよりも著しく大となる筈である。このような弾性及び塑性変形の程度を圧力の関数として導入すればよい。過去の圧縮の実験から⁵⁾

$$(1-\epsilon) \propto P^{0.15 \sim 0.2}$$

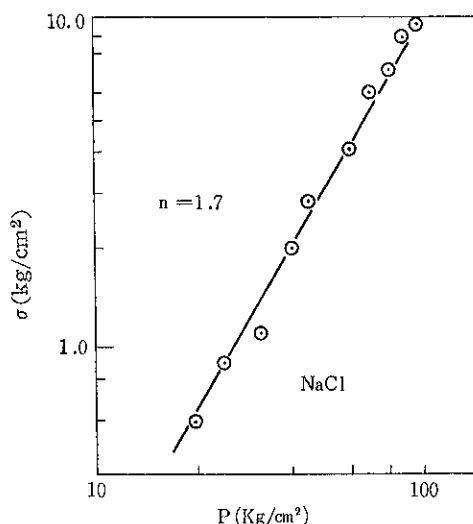


Fig. 5 (a)

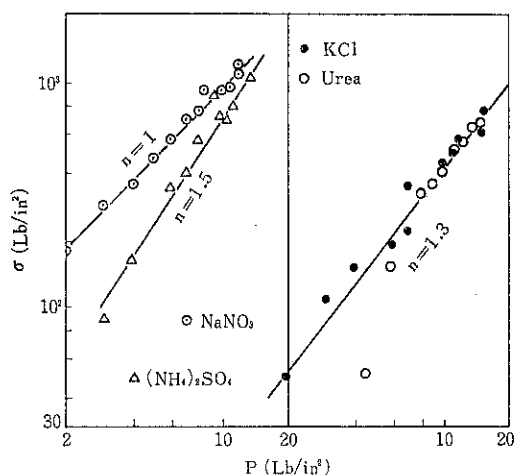


Fig. 5 (b)

計算により $1-\epsilon=0.3 \sim 0.7$ の範囲で

$$(1-\epsilon)/\sqrt{\epsilon} \propto (1-\epsilon)^{1.7} \propto P^{0.25 \sim 0.34}$$

一方、接触面積 s は弾性変形に対し P の $1/2$ 乗に、塑性変形に対しては P の 1 乗に比例するので⁶⁾

$$s \propto P^{(1/2 \sim 1.0)}$$

この場合、大部分の水は押し出されて接触面の外で固結するので、両方の効果が相乗的に σ に関係すると考えると、

$$\sigma \propto \frac{(1-\epsilon)}{\sqrt{\epsilon}} \cdot s \propto P^{0.95 \sim 1.34}$$

Fig. 5 (a) および Fig. 5 (b) に NaCl, KCl, NaNO₃, (NH₄)₂SO₄, 尿素に関するいくつかの文献⁷⁾⁸⁾ による σ v.s P の実測値のプロットを行ったが、おおむね $\sigma \propto P^{1.0 \sim 1.7}$

の範囲にあつて上述の予測にほぼ一致している。

4.2 温度の影響

江崎、杉山⁷⁾らは食塩の固結現象を実験的に検討し、一定の水分を与えた食塩に対し固結強度が次のような温度による依存性のあることを確かめている。(セミ、ログ紙で直線)

$$\sigma = k_1 \times 10^{(0.0100 - 0.00665)t_e} \quad (A)$$

k_1 は水分、圧力その他による定数であるが、ここには温度依存性のみ着目する。上式の温度 t_e の範囲は 10°

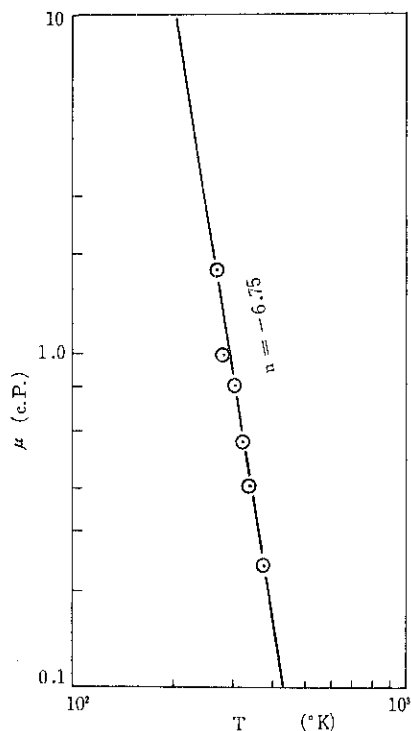


Fig. 6

~80°C.

本稿における理論式(1)において温度が直接関与するのは飽和濃度 C_s であり、また溶解速度定数 k_d と物質移動(乾燥)係数 k に対する影響が見逃せない。さて NaCl の C_s に対する温度依存性は特別の場合として殆んど無視できるものとしよう(化工便覧 p. 53)。一方、 k_d , k に対してはそれぞれ直接拡散係数 D_L および D_g に比例する。

$$\left. \begin{aligned} k_d &\propto D_L \propto T/\mu \\ k &\propto D_g \propto T^{1.75} \end{aligned} \right\} \quad (B)$$

ここに T は絶対温度、 μ は水(溶媒)の粘度である。 μ の温度依存性は著しく、Fig. 6 のように $\mu \propto T^{-0.75}$ によって(8)式と(B)式を用いて

$\sigma \propto X^{1/2} (k_d/k)^{1/2} \propto (D_L/D)^{1/2} \propto T^{3.0} \propto (273+t_e)^{3.0}$
 ちなみに t_e と $\{(273+t_e)/100\}^{3.0}$ をセミログ紙にプロットすると Fig. 7 のように近似的に直線となり、

$$\sigma = k_2 \times 10^{0.0045t_e} \quad (C)$$

がえられ、10のべきは実験値よりやや小さい。ちなみに同氏らの実験値は $a' = 1.8\%$ 、25°C で約 $3.0(\text{kg}/\text{cm}^2)$ を示しており、本稿の理論式による Fig. 4 の値に大変うまく一致している。よって k_1 と k_2 は大体等しいとみてよく、温度依存性はほぼ定量的に説明されている。

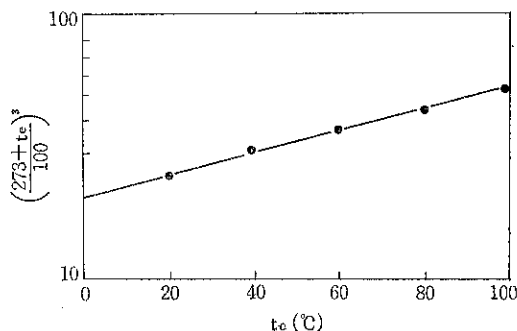


Fig. 7

4.3 水分の影響

Fig. 4 から分るように σ に及ぼす a' の影響は必ずしも明確ではない。江崎ら⁷⁾の報告でも、むしろ σ に最大値があるらしいことを実験値は示しているが、何れにせよ余り大きい変化は認められない。理論式においては $\sigma \propto (a')^{0.89}$ であってそれほど顕著ではないが、一般に a' に対して σ は増す形になっている。これは 1 つには(10)の微分方程式を X を一定として近似的に解いたことに原因があるが、一方固結時間とも密接な関係がある。初期水分が多いほど固結には時間がかかる。このため同じ時間で測定されたとしても部分的な固結強度を測ってい

る場合もあるので、とくに水分の多い実験ではやや低い σ を測定していることもあろう。事実江崎ら⁷⁾らは固結時間の σ に対する依存性を実験的に認めていることによってこのことが指摘されるのである。

4.4 時間の影響

(5)式と(6)式を関係づけると(12)式より $-dV_c/dt = k' V_c^{0.887}$ となるが、これを近似的に

$$-dV_c/dt = k' V_c \quad (30)$$

とおく、 $t = t_s$ で飽和点に対しそのとき $V_c = V_{cs}$ の条件で積分して

$$\left. \begin{aligned} V_{cs}/V_{c0} &= 1 - e^{-k't_s} \\ V_c/V_{c0} &= 1 - e^{-k't_m} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

結晶の析出率 ζ は

$$\zeta = (C_s V_{cs} - C_s V_c) / C_s V_{cs} = 1 - V_c/V_{cs} \quad (32)$$

(31)式を用い

$$\zeta = 1 - \exp\{-k'(t_m - t_s)\} \quad (33)$$

固結強度 σ は理論の項で述べたように、 (ζv) の $1/2$ 乗に比例するので

$$\begin{aligned} \sigma &\propto \zeta^{0.5} \\ &\propto [1 - \exp\{-k'(t_m - t_s)\}]^{0.5} \end{aligned}$$

大まか粗っぽく $t_m \gg t_s$ 。しかも $k't_m$ が 1 に比べて充分小ならば、 $\exp$ を展開して高次を省略し次のような近似がえられる。

$$\sigma \propto (k't_m)^{1/2}$$

このような条件が常に成立するとは限らないが、江崎ら⁷⁾の NaCl の実験によれば、 σ は時間 t の平方根に比例しており、たとえば $a' = 1.7\%$ 、30°C において $\sigma = 0.98 t_m^{0.500}$ なる実験式を与えている。(t_m (hr))

5. ま と め

粉体のプロセスや製品に対し常にトラブルになる粉体の固結強度の予測を可能とするため、簡単なモデルについて幾何学的ならびに物理的な計算を行ってみて、その一般式を NaCl に関する既存の実験値と比較した。理論式には、含有水分百分率のほか、とくに温度に依存する飽和濃度(溶解度)、溶解と乾燥における物質移動係数などを含み、これらに影響を与える温度、圧力、時間等の操作変数の固結強度に及ぼす効果を理論式により定性的に考察したところ、充分とはいえぬまでもほぼ実験値の傾向と一致した。とくに検討は行わなかったが湿度 H の効果も理論式に含まれている。

ここには水に対する NaCl の溶解を例としたが、場合によっては酸にとける塩類の再結晶などが固結の原因となるような場合もあり、そのような場合の反応速度や

結晶速度，結晶の転移（温度による）などをあらかじめ知ることにより，多くの固結の可能性とその強度を事前に予知することがほぼ可能であろう．また逆に必要な強度をもたせるために，造粒に際して与えるバインダーとしての水分の量などもこのようなモデルを介して決定することもできると思われる．多くは従前殆んど理論なしのケース・バイ・ケースに実験的に報告されているいろいろの物質の固結強度に対し，このような総合的なモデルの適応性を今後広く調査検討すべきである．

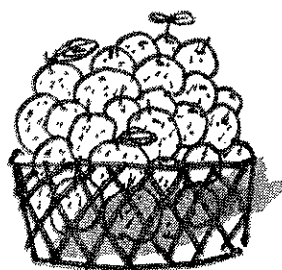
主 な 記 号

a' : 水分重量百分率	(%)
A : 気液接触面積 (Fig. 1)	(cm^2)
b : 最狭部半径 (")	(cm)
C : 固体濃度	(g/cm^3)
C_s : 飽和濃度	(g/cm^3)
D_p : 粒子直径	(cm)
D_L : 液中の拡散係数	(cm^2/sec)
D_g : 気相拡散係数	(cm^2/sec)
H : 湿度 (—) : H_w : 飽和湿度	(—)
H_z : 接点の付着力	(Kg)
k_0 : 配位数	
k : 物質移動係数	(cm/sec)
k_d : 溶解速度係数	(cm/sec)
P : 圧力	(Kg/cm^2)
R : 粒子半径	(cm)
r : 液膜曲率半径	(cm)
S : 固液接触面積	(cm^2) (Fig. 1)
s : 圧縮による固一固接触面積	(cm^2)
t : 時間	(sec)
t_m : 時間	(sec)

t_s : 飽和する迄の時間	(sec)
t_e : 温度	($^{\circ}\text{C}$)
T : 絶対温度	($^{\circ}\text{K}$)
V : 1 箇当りの水の容積	(cm^3)
V_s : 1 接点当りの水の容積	(cm^3)
V_{co} : 初めの水の容積	(cm^3)
v : 析出固体容積	(cm^3)
w : 析出固体重量	(g)
X : 17 式のパラメータ	(—)
α : (Fig. 2)	(rad)
θ : (Fig. 1)	(rad)
γ : 比重	(—)
ρ : みかけ密度	(g/cm^3)
ε : 空隙率	(—)
σ : 固結強度	(Kg/cm^2)
σ_z : 析出結晶の強度	(Kg/cm^2)
ζ : 析出率	(—)
μ : 粘度	(c. p.)

引 用 文 献

- 1) 工藤，倉前，田中：化学工学論文集 2, 625 (1976)
- 2) Rumpf : Chem-Ing-Tech. 30, 144 (1958)
- 3) Lowrison : Crushing and Grinding : p. 23, (1974) Butterworths.
- 4) 増沢：粉体工学研究会誌 7, 554 (1970)
- 5) 田中：粉体プロセス入門, 8 (1965) 工学図書
- 6) 大内山，田中：I & EC. Proc. Des. Dev. 14, 286 (1975)
- 7) 江崎，杉山：日本塩学会誌 14, 199 (1960)
- 8) Adams and Ross : Ind. Eng. Chem., 33, 121 (1941)



付着性粉体に対する Carr の流動性指数及び 噴流性指数の意味について

田中 達夫*

Tatsuo Tanaka

1965年 Chem. Eng. Jan. 18に発表された Carr の流動性及び噴流性指数という2つの経験的インデックスが、その後多くの実際の操作によく適合し、これに基づき細川社でパウダーテスターという新しい測定器として開発され、いろいろの方面で使用されているのは周知の事実である。またこの機器に関していろいろの物質の測定が各方面で行われ、細川社の横山氏¹⁾をはじめとしていくつもの研究が発表されており^{2),3)}、またその物理的な意味をめぐって何回かの討論が行われてきた。

筆者が始めてこのパウダーテスターについて具体的にお話を伺ったのは、確か昭和46年の粉体工学研究会夏季シンポジウムの席上であり、このときの討論で印象に残ったこと（その時点での筆者の考え）を同誌の378（1969）ページに寄稿している。その後第7回粉体に関する講演討論会（1973）においてやはり細川社の鈴木氏⁴⁾らの講演に対する烈しい討論があって、そのときにも筆者の考えを開陳し、これに対してたしか神保教授その他の方々から反論があった。そのときの筆者の考えは前と変わらず、それは「粉砕」誌（1973）、No. 18、19ページの埋草に掲載されている。

前置きが長くなったけれども、要は、筆者の当時の考え方として、流動性指数というのは付着強度に対応したものではないか、一方噴流性指数というのは付着力そのものに対応するのではないかということである。その理由は前にも書いたので省略するが、前々から議論されていた主題は、要するに、この実用的にはかなりよく粉体の流動に関する性質を表わすインデックスの物理的な意義を見出したいということであって、その後京大の増田氏⁵⁾らによって、流動性指数の統計学的な正しさが確認されているものの、その物理的な意味が明らかに

なったとはきいていない。

たまたま三輪氏ら⁶⁾が広範な物質についてパウダーテスターによる豊富な測定値をデータ表として粉砕誌（1971、p. 103）に発表されており、これらを拝借して筆者のかねて考えていたことを検討してみた。

単なる直観による上述の仮定を式でかいてみると次のようになる。三輪らにしたがい F_F を流動性指数、 F_f を噴流性指数とする。

$$F_F \propto \left[\left(\frac{(1-\epsilon)}{\frac{1}{4}\pi D_p^2} \right) \cdot \frac{N}{2} \cdot \frac{1}{2} H \right]^{-n} \quad (1)$$

ここで ϵ は空間率、 D_p は平均粒径、 N は1箇粒子の接点数で配位数とよばれ、隣接粒子と共有する。 H は粒と粒との一接点に働く付着力 (Kg) であり、その原因は水による毛管力や静電力、その他何でもよい。右辺の () 内は単位面積に並ぶ粒子の箇数であり、 $\frac{1}{2}$ は力の方向指数である。一方配位数は空間率 ϵ の関数であり、Rumpf⁷⁾によれば、 N は近似的に ϵ に逆比例するから、定数を全部省略して

$$F_F \propto \left[\frac{(1-\epsilon)}{\epsilon D_p^2} H \right]^{-n} \quad (1')$$

このべき n は F_F に対する [] 内の付着強度 (Kg/cm²) の依存性をべき関数で近似したという意味である。

一方粒子同志の間の付着力 H は前の仮定によって直接噴流性指数と1対1の対応があるとしたので

$$H \propto (F_f)^{-m} \quad (2)$$

べきを何れもマイナスにとったのは F_F 、 F_f ともに付着強度、付着力のそれぞれが大きいほど小さいからである。(2) を (1') に代入して整理すると

$$F_f \text{ (噴流性指数)} \propto \left[\frac{F_F^{1/n}}{\left(\frac{\epsilon}{1-\epsilon} D_p^2 \right)} \right]^{1/m} \quad (3)$$

一般的には

$$F_f = f \left(F_F^\infty / \frac{\epsilon D_p^2}{1-\epsilon} \right) \quad (3')$$

* 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

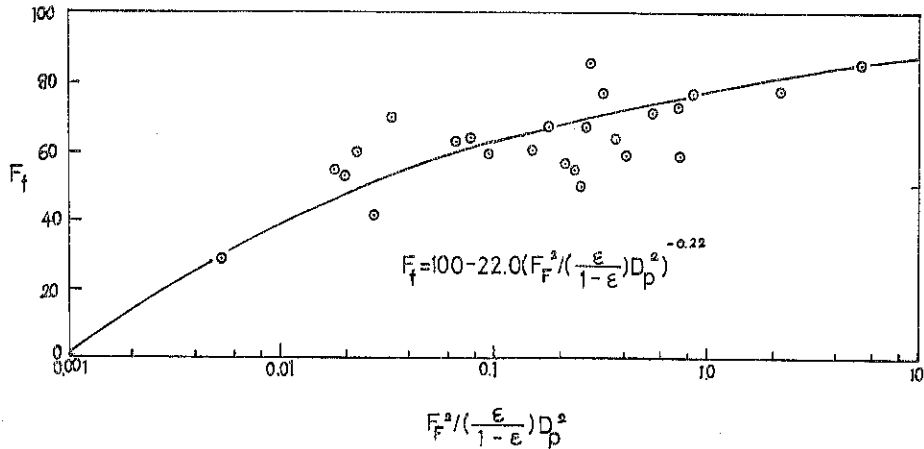


Fig. 1 流動性指数 F_F と噴流性指数 F_f との関係

したがって、もし前述のような仮定が成立つならば、流動性指数 F_F と噴流性指数 F_f の間には (3) のような関数関係が成立つはずである。幸い三輪ら⁶⁾の報告にはこの検討を可能にする詳細な実測値が数多く掲載されており、しかもその範囲はあらゆる種類の物質につき、平均粒径 $D_p(\mu) = 4900 \sim 30$; 真密度 (g/cm^3) = $6.11 \sim 0.90$, 空間率 = $0.29 \sim 0.88$ に及び、 $F_F = 26 \sim 99$, $F_f = 29 \sim 86$ であった。このうち、本質的に非付着性である粒径 500μ 以上の実測値約 10 個は、除外すべきである。実際に付着性が顕著になる 100μ 以下に対して (3) 式を検討すべきであるが、試みに 300μ 以下のデータに対してすべて再計算を行った。

(3) 式の α に対し、いろいろの数値を trial して best fit になる関係を求めた結果が、Fig. 1 に示すように次の実験式で表わされる関数関係である。

$$F_f = 100 - 22.0 \left\{ F_F^2 / \left(\frac{\epsilon}{1-\epsilon} \right) D_p^2 \right\}^{-0.22} \quad (4)$$

ここに D_p の単位はミクロンである。三輪氏ら⁶⁾は F_f と F_F との関係をプロットし、ほとんどその間に規則性はなく大きく散乱した結果を認めているが、最初の仮定に従った半理論的な補正により、かなり面白い相関がある

ことがわかった。(ちなみに、 F_F と F_f の関係の散乱に寄与しているのは、ここで省略した 500μ 以上のデータではなく、それらのデータはすべてこの Fig. 1 に含まれている)

このように考えると、Carr の流動性指数及び噴流性指数は、何れも、粉体層の付着強度、接点間の付着力のそれぞれそのものではないが、それらに直接依存する性格をもった経験的指数であるといってもよいのではないであろうか。しかし厳密には、この指数のうちの何れかが付着性の何れかであることを実証しなければ、真の証明ではありえない。

参 考 文 献

- 1) 横山, 浦山: 粉体工学研究会誌 6, 264 (1969)
- 2) 矢野, 寺下, 山崎: 粉砕 [16] 96 (1971)
- 3) 佐藤, 井上ら: 粉体工学研究会誌 9 90 (1972)
- 4) 鈴木, 丸子: 粉砕 No. 18, 80 (1973)
- 5) 増田, 吉田, 井伊谷: 粉体工学研究会誌 12, 209 (1975)
- 6) 三輪, 清水: 粉砕 No. 16, 103 (1971)
- 7) Rumpf: Chem-Ing-Tech. 30, 144 (1958)

微粒子の性質に関する二、三の問題(続)

Some properties of micro particle

金庭 延慶* 今川 徹二*

Nobuyoshi Kaneniwa Kanji Imagawa

固体を微細化すると様々な物性値が粒径と共に変化する。中でも溶解性の変化は薬学では重要な課題である。溶解速度と溶解度は、医薬品の消化管内での吸収速度に関係があり利用効率という面から薬効に影響を生じるためである。

粒子径と溶解性についてはすでに本誌で述べたが¹⁾、今回は粒子径と溶解度について、粒子径と表面エネルギーについて量的関係を求めて検討する。

1. 比表面積と表面自由エネルギー

固体を微細化すると、単位質量当りの表面積である比表面積が増加する。立方体の辺の長さを d 、密度を ρ とすれば比表面積は $6/\rho d$ であるが、 $1/n$ の粒径の場合は $6n/\rho d$ で n 倍となる。

溶解速度は一般に表面積に比例する²⁾から、 $1/n$ の粒径の医薬品はもとの粒子の n 倍速く溶解し、かつ吸収が良くなることが考えられ医薬品の微細粒子の使用は広く行われている。

固体を微細化することは固体を分散することであるから、この分散系の自由エネルギー G を考える。内部の自由エネルギー G^I と表面の自由エネルギー G^S の和であり $G = G^I + G^S$

で、表面積 A を dA 広げるに必要な仕事は表面張力を γ とすれば γdA となる。一定温度一定圧下ではこの仕事は表面自由エネルギーの増加となる。 $dG = \gamma dA$ だから $G^S = \gamma A$ となり

$$G = G^I + \gamma A$$

となる。分散によって体積変化はなく表面積のみが変化するが、分散により表面自由エネルギーは増加する。このため、分散は自発的に進行しないし、不安定である。

微粒子は粒子間の凝集により表面積を減少する傾向を持つことがうなずける。逆に表面張力を減少させる界面活性剤の添加は微粒子を安定に分散させる。

表面積による自由エネルギー変化は $(\partial G/\partial A)_{T,P} = \gamma$ であるから表面張力は単位表面積当りの表面自由エネルギーと考えられるが、これは液体においては成立するが、固体の場合には表面積変化による表面自由エネルギーの変化が生じて一致しないという³⁾。変形を受けた固体の表面張力を σ とすれば、

$$\sigma = \frac{d(\gamma A)}{dA} = \gamma + A \frac{d\gamma}{dA}$$

これは固体表面の分子が自由に動くことができないため、表面に空孔が生じたり、格子定数が変化したりするため $d\gamma/dA$ が零にならないからであるという。したがって粒子の変形形態により影響するがここでは考えない。

また結晶の各面によって表面張力が異なる。結晶の析出、溶解においては、表面の自由エネルギーが最小となるように現象は進行し、その結果、結晶は一定の形態となる。しかしこの異方性の少ない結晶では、球形に近い形態となるといえる³⁾。これらのことは現象が平衡に近い状態で進行するときに成り立ち、粉砕等で生ずる様々な形態は表面のエネルギー状態を複雑とする。角や稜のエネルギーについて検討もされている。

2. 粒子径と溶解度

1で述べたように粒子においては形態が表面張力と関係して問題があるが、ここでは球形で等方的と考える。表面が曲面を成しているときには曲面の内外で圧力差が生じる。粒子の直径 D 内部の圧力 P^I 、外部の圧力 P のとき圧力差 $\Delta P = P^I - P$ で、この圧力差によって dD の直径変化が生じると表面積変化 $dA = -2\pi D dD$ であり、表面張力 γ との積 $-\gamma \times 2\pi D dD$ はこのときの仕事である。体積変化 dV は $\pi D^2 dD$ でこのときの仕事は $\Delta P dV$

* 昭和大学薬学部

(〒142 東京都品川区旗の台1の5の8)

Tel (03) 784-1151 内 266)

Table 1 液滴の粒子径と水への溶解度比 (計算)

液 体	クロロホルム	四塩化炭素	エチル エーテル	ベンゼン	n-オクチル アルコール	オレイン酸	n-ヘキサン	n-オクタン
分 子 量	119.3	153.8	74.12	78.11	130.2	282.5	86.2	114.2
密 度	1.498	1.604	0.709	0.889	0.826	0.891	0.659	0.703
界面張力	32.8	45	10.7	35	8.5	15.6	51.1	50.8
直 径								
1 cm	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
$\times 10^{-1}$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
$\times 10^{-2}$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0001	1.0001	1.0001
$\times 10^{-3}$	1.0004	1.0006	1.0002	1.0004	1.0002	1.0008	1.0011	1.0013
$\times 10^{-4}$	1.0042	1.0069	1.0018	1.0049	1.0021	1.0080	1.0108	1.0134
$\times 10^{-5}$	1.0430	1.0722	1.0182	1.0508	1.0219	1.0832	1.1139	1.1427
$\times 10^{-6}$	1.5250	2.0082	1.1980	1.6428	1.2418	2.2237	2.9409	3.7968
$\times 10^{-7}$	6.8×10	1.1×10^3	6.090	1.4×10^2	8.7212	3.0×10^3	4.8×10^4	6.2×10^5
$\times 10^{-8}$	2.1×10^{18}	1.9×10^{30}	7.0×10^7	6.6×10^{21}	2.5×10^9	5.1×10^{34}	7.0×10^{46}	8.7×10^{57}

$=\pi D^2/4PdD$ で両者は等しく $(P_i - P) \times \pi D^2 dD = -2\pi DdD$ で変形して

$$dP = \frac{4\gamma}{D}$$

を得る。この式は Laplas の式として知られている。

この圧力差によって粒子の蒸気圧も変化する。圧力の増加は自由エネルギーを増加する。モル容積 V_m = 分子量 M / 密度 ρ とすれば、 $dG = \int V_m dP$ であり、固体の場合、圧力変化による体積変化が無視できるとすれば $dG = V_m \cdot dP$ である。圧力変化は $4\gamma/D$ であるから $dG = 4\gamma V_m/D$ となる。これは粒子径内部の自由エネルギー変化である。固体と平衡状態にある蒸気の自由エネルギー変化は $dG = RT \cdot \ln(P_D/P_\infty)$ で与えられ両者は等しく、 $4\gamma V_m/D = RT \ln(P_D/P_0)$ で変形すれば

$$P_D = P_\infty \exp\left(\frac{4V_m \gamma}{RTD}\right) \quad (1)$$

が得られる。 P_∞ は平面での蒸気圧、 R は気体定数、 T は温度である。(1)式は William Thomson の式⁴⁾として知られている。(1)式については様々な実験的証明⁵⁾が試みられているが、熱力学的に正しいということが応用される理由であるという。

(1)式は溶解度 C に対しても同様に適用できると考えられ

$$C_D = C_\infty \exp\left(\frac{4V_m \gamma_{INT}}{RTD}\right) \quad (2)$$

となる。ここでは表面張力でなく界面張力 γ_{INT} である。界面エネルギーは液体について簡単に測定

できる。水との界面張力を用い様々な液体が水中に分散したと仮定して(2)式を使い溶解度比 C_D/C_∞ を計算すると、Table 1 の結果が得られた。ほとんどの液体で直径が $1 \mu m$ から著しい増加が見られる。また極性液体の方が非極性液体に比べてやや低くでている。 $0.1 \mu m$ 粒径で前者が5%, 後者が10%程度である。また 0.1μ 以下では有機化合物においては無機化合物に比べて著しい増加である。これはあくまで計算上のことであり、また液体についての値であるが、有機化合物については微細化を行い得れば効果が大きいことを示していると考え、分子レベル迄計算したがほぼ完全に溶解している値である。

固体の表面張力を測定する方法として(2)式が利用できて実際行われている⁶⁾⁷⁾。得られた表面張力(実際は界面張力)の値によって $1 \mu m$ での溶解度増分を%で Table 2 に示した。かなり大きな値が得られた。無機

Table 2 界面張力と粒子径が $1 \mu m$ の時の溶解度増

固 体	界 面 張 力	水への溶解度	粒子径が $1 \mu m$ の溶解度増分
NaCl	300 dyne/cm ²	35.7 g/100ml	2%
CaF ₂	2500	1.6×10^{-3}	25
BaSO ₄	1250	1.15×10^{-4}	33
CaSO ₄ ·2H ₂ O	370	2.23×10^{-1}	7
AgCaO ₄	575	1.4×10^{-3}	5.6
SrSO ₄	1400	1.13×10^{-2}	29.2
PbF ₂	900	6.2×10^{-2}	4.4
PbI ₂	130	4.42×10^{-2}	1.6
MgO	1040	6.2×10^{-4}	4

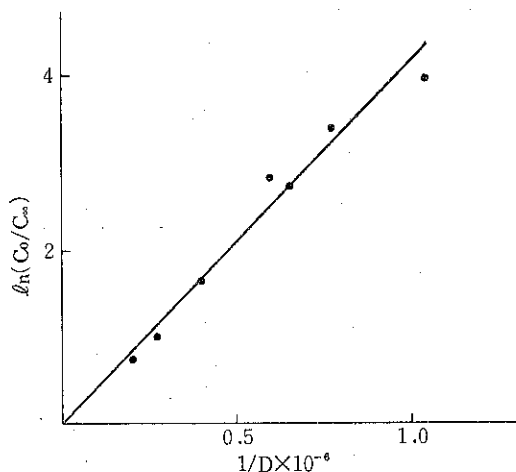


Fig. 1 SrSO_4 の粒子径と溶解度比

化合物の固体では表面張力が極めて大きいために、このような大きな値が得られたと考えられるが、有機化合物においては無機化合物ほど大きな表面張力を持たないために先の有機化合物の液体での結果はほぼ実際に当てはまると考える。

硫酸ストロンチウムに関する実際の測定例⁸⁾をFig. 1に示す。かなり良い直線性を示している。医薬品には微粒子を液体中に懸濁した剤形があるが、この剤形の安定性に微粒子の溶解、大粒子上への析出による劣化が大きな影響を与える。これは朝夕、季節による温度変化が促進するようである。このような過飽和状態は温度が一定であればかなり長時間保てるという。

3. 粒子径と表面エネルギー

表面積を増加させると熱の吸収を生じる。これは表面エネルギーの増加となる。表面エネルギー E^s と表面自由エネルギー G^s との間には Gibbs-Helmholz の式で

$$E^s = G^s + TS^s$$

の関係がある。 S^s は表面エントロピーで $S^s = (\partial G / \partial T)_P - (\partial r / \partial T)_P$ の関係にあり結局

$$E^s = r - T \left(\frac{\partial r}{\partial T} \right)_P$$

となる。 $(\partial r / \partial T)_P$ は一般に負であり、 E^s は r より大きい。この E^s は表面が内部に比べて過剰に持っているエネルギーであり、ミクロ的には次のように考えられる。結晶内部で分子が安定しているエネルギーは、単位結合のエネルギー $e/2$ と配位している分子数の積で与えられる。内部での配位数を n^i 、表面での配位数を n^s とすれば、分子についての表面エネルギー $e^s = (n^i e - n^s e) / 2$ であり、単位表面積当りの分子数を N^s とすれば

$$E^s = N^s (n^i e - n^s e) / 2 \quad (3)$$

となる。 $n^i e$ は分子についての安定化エネルギー、つまり凝集エネルギーである。

(3)式で表面エネルギーは表面での分子密度と配位数に関係するが、これらは結晶構造によって各面で異なる。これが表面張力の異方性の理由である。Bravais の法則⁹⁾ “多面体結晶の形づくる面は分子密度の最高な面である” というのは、分子密度の最高な面では配位数が最高であって最も表面エネルギーの低い面であると考えられる。実際の表面エネルギーについて例¹⁰⁾を Table 3 に示す。有機化合物については妥当な値と考えられるが、金属においてはやや小さいと考えられる。

表面エネルギーが粒子径と共にどのように変化するかは、微粒子の性質について考えるときに重要である。これを液体について計算すると Table 4~7 の結果を得た。水とエタノールについては表面エネルギーが凝集エ

Table 3 表面張力と表面エネルギー

液 体	r (erg/cm ²)	T (°C)	dr/dT	E_s (erg/cm ²)	E_s' (cal/mol)
He	0.308	25K	-0.07	0.47	8.7
N ₂	9.71	75K	-0.23	26.7	585
C ₂ H ₅ OH	22.75	20	-0.086	46.3	1340
H ₂ O	72.75	20	-0.16	120	1780
NaNO ₃	116.6	308	-0.050	146	2150
C ₇ F ₁₄	15.70	20	-0.10	45.0	2610
C ₆ H ₆	28.88	20	-0.13	67.0	2680
n-C ₈ H ₁₈	21.80	20	-0.10	51.1	2920
Na	202	97	-0.10	239	4002
Ag	879	1100	-0.184	1132	10900
Cu	1300	1535	-0.31	1721	13000
Fe	1880	1535	-0.43	2657	20100

Table 4 粒子径と表面エネルギー

水 分子量 18.02 密度 1.0
表面エネルギー 120 erg/cm²
凝集エネルギー 5.05×10^{11} erg/mol

粒子径 (cm)	粒 子 数 (mol ⁻¹)	全表面積 (cm ² /mol)	全表面エ ネルギー (erg/mol)	表面エネ ルギー/ 凝集エ ネルギー
1	3.44×10	1.08×10^2	1.30×10^4	2.57×10^{-8}
$\times 10^{-1}$	$\times 10^4$	$\times 10^3$	$\times 10^5$	$\times 10^{-7}$
$\times 10^{-2}$	$\times 10^7$	$\times 10^4$	$\times 10^6$	$\times 10^{-6}$
$\times 10^{-3}$	$\times 10^{10}$	$\times 10^5$	$\times 10^7$	$\times 10^{-5}$
$\times 10^{-4}$	$\times 10^{13}$	$\times 10^6$	$\times 10^8$	$\times 10^{-4}$
$\times 10^{-5}$	$\times 10^{16}$	$\times 10^7$	$\times 10^9$	$\times 10^{-3}$
$\times 10^{-6}$	$\times 10^{19}$	$\times 10^8$	$\times 10^{10}$	$\times 10^{-2}$
$\times 10^{-7}$	$\times 10^{22}$	$\times 10^9$	$\times 10^{11}$	$\times 10^{-1}$
$\times 10^{-8}$	$\times 10^{25}$	$\times 10^{10}$	$\times 10^{12}$	$\times 1$

Table 5 粒子径と表面エネルギー

エタノール 分子量 46.086 密度 0.789
 表面エネルギー 46.3 erg/cm²
 凝集エネルギー 4.325 erg/mol

粒子径 (cm)	粒子数 (mol ⁻¹)	全表面積 (cm ² / mol)	全表面エ ネルギー (erg/mol)	表面エネ ルギー/ 凝集エ ネルギー
1	1.115×10^2	3.503×10^2	1.622×10^4	3.75×10^{-8}
$\times 10^{-1}$	$\times 10^5$	$\times 10^3$	$\times 10^5$	$\times 10^{-7}$
$\times 10^{-2}$	$\times 10^8$	$\times 10^4$	$\times 10^6$	$\times 10^{-6}$
$\times 10^{-3}$	$\times 10^{11}$	$\times 10^5$	$\times 10^7$	$\times 10^{-5}$
$\times 10^{-4}$	$\times 10^{14}$	$\times 10^6$	$\times 10^8$	$\times 10^{-4}$
$\times 10^{-5}$	$\times 10^{17}$	$\times 10^7$	$\times 10^9$	$\times 10^{-3}$
$\times 10^{-6}$	$\times 10^{20}$	$\times 10^8$	$\times 10^{10}$	$\times 10^{-2}$
$\times 10^{-7}$	$\times 10^{23}$	$\times 10^9$	$\times 10^{11}$	$\times 10^{-1}$
$\times 10^{-8}$	$\times 10^{26}$	$\times 10^{10}$	$\times 10^{12}$	$\times 1$

Table 6 粒子径と表面エネルギー

ベンゼン 分子量 78.11 密度 0.879
 表面エネルギー 67 erg/cm²
 凝集エネルギー 3.38×10^{11} erg/mol

粒子径 (cm)	粒子数 (mol ⁻¹)	全表面積 (cm ² / mol)	全表面エ ネルギー (erg/mol)	表面エネ ルギー/ 凝集エ ネルギー
1	1.697×10^2	5.33×10^2	3.57×10^4	1.06×10^{-7}
$\times 10^{-1}$	$\times 10^5$	$\times 10^3$	$\times 10^5$	$\times 10^{-6}$
$\times 10^{-2}$	$\times 10^8$	$\times 10^4$	$\times 10^6$	$\times 10^{-5}$
$\times 10^{-3}$	$\times 10^{11}$	$\times 10^5$	$\times 10^7$	$\times 10^{-4}$
$\times 10^{-4}$	$\times 10^{14}$	$\times 10^6$	$\times 10^8$	$\times 10^{-3}$
$\times 10^{-5}$	$\times 10^{17}$	$\times 10^7$	$\times 10^9$	$\times 10^{-2}$
$\times 10^{-6}$	$\times 10^{20}$	$\times 10^8$	$\times 10^{10}$	$\times 10^{-1}$
$\times 10^{-7}$	$\times 10^{23}$	$\times 10^9$	$\times 10^{11}$	$\times 1$
$\times 10^{-8}$	$\times 10^{26}$	$\times 10^{10}$	$\times 10^{12}$	$\times 10$

Table 7 粒子径と表面エネルギー

n-オクタン 分子量 114.2 密度 0.703
 表面エネルギー 51.1 erg/cm²
 凝集エネルギー 4.15×10^{11} erg/mol

粒子径 (cm)	粒子数 (mol ⁻¹)	全表面積 (cm ² / mol)	全表面エ ネルギー (erg/mol)	表面エネ ルギー/ 凝集エ ネルギー
1	3.11×10^2	9.76×10^2	4.99×10^4	1.20×10^{-7}
$\times 10^{-1}$	$\times 10^5$	$\times 10^3$	$\times 10^5$	$\times 10^{-6}$
$\times 10^{-2}$	$\times 10^8$	$\times 10^4$	$\times 10^6$	$\times 10^{-5}$
$\times 10^{-3}$	$\times 10^{11}$	$\times 10^5$	$\times 10^7$	$\times 10^{-4}$
$\times 10^{-4}$	$\times 10^{14}$	$\times 10^6$	$\times 10^8$	$\times 10^{-3}$
$\times 10^{-5}$	$\times 10^{17}$	$\times 10^7$	$\times 10^9$	$\times 10^{-2}$
$\times 10^{-6}$	$\times 10^{20}$	$\times 10^8$	$\times 10^{10}$	$\times 10^{-1}$
$\times 10^{-7}$	$\times 10^{23}$	$\times 10^9$	$\times 10^{11}$	$\times 1$
$\times 10^{-8}$	$\times 10^{26}$	$\times 10^{10}$	$\times 10^{12}$	$\times 10$

Table 8 分子におけるエネルギー比

	1 分子 容 球 換 算 径	表面エネ ルギー/ 凝集エネ ルギー
H ₂ O	3.85 Å	0.67
C ₂ H ₅ OH	5.7	0.66
C ₆ H ₆	6.6	1.61
n-C ₈ H ₁₈	8.0	1.50

エネルギーの1%となるのは0.1 μm以下である。ベンゼンとn-オクタンでは1 μm程度で約10倍の比となっている。有機化合物では微粉碎しようとするとき固結してしまうのもこの辺に理由があるのかも知れない。アボガドロ数に分散したと考えてそのときの比を求めるとTable 8のようになった。極性化合物と有機化合物ではかなりのひらきがあるが、両者の間に1があることはこの簡単な計算でも妥当なことを示していると考えられる。なおこのときの分子径は原子間結合距離的に考えてほぼ妥当な値である。

極性液体と非極性液体での差は表面での分子の配向等によって極性液体では表面エネルギーが小さく出たものとも考えられる。

4. 医薬品の粉碎

医薬品の粉碎の目標の一つは溶解性の向上にある。これまでに溶解性を増加させる理由として、結晶形の変化や結晶が非晶質化するなどの報告がある。さらに第2の物質を多量に混合して粉碎すると効果がある場合が多いことが報告されている。この理由は未だ充分に判っていないが界面化学的に説明するとすれば次のように考えられるであろう。有機化合物を粉碎すると固結して器壁に付着し易い。これは先の計算において無機化合物よりも表面エネルギーの凝集エネルギーに対する割合が大きいのではないかとと思われる結果によって理解できよう。このため微粉碎が困難であるが、第2の物質が多量に存在すると、互いに分散しあい凝集しても対象の医薬品の凝集の割合は低下して微粉になり得る。また第2物質が界面エネルギーを低下する¹¹⁾ことなどが考えられる。

また医薬品は吸収過程が存在するため、第2物質が無害なものであれば薬効を妨げることが無いと考えることにより、多量に第2物質を混合粉碎することが可能となる。また混合粉碎においては非晶質化が著しく進行する場合がある。これは第2物質の分子が医薬品中に拡散して、欠陥をひき起すのかとも考えられる。あるいは、極めて微細な粉碎物となるために結晶性が低下するとも考

えられる。

参 考 文 献

- 1) 金庭延慶：粉砕，[15] 48 (1970).
- 2) A. A. Noyes, W. R. Whitney: J. Chem. Soc., 19, 930 (1897).
- 3) R. Schuttleworth: Proc. Roy. Soc. (London), A 63, 444 (1950).
- 4) W. Thomson: Phil. Mag., 42, 488 (1871).
- 5) Victor K. LaMer, Ruth Gruen: Trans. Faraday Soc. 48, 410 (1952).
- 6) M. L. Dundon: J. Am. Chem. Soc., 45, 2479 (1923).
- 7) ibid 45, 2658 (1923).
- 8) Enüstün, Turkewich: J. Am. Chem. Soc., 82, 4502 (1960).
- 9) 笛木和夫：化学物理，p. 287 (オーム社 1967).
- 10) Adam: Physical Chemistry of Surface (Interscience 1967).
- 11) A. シェルドロコ；ユロイド化学，p. 85 (共立出版 1975).

特許一言メモ

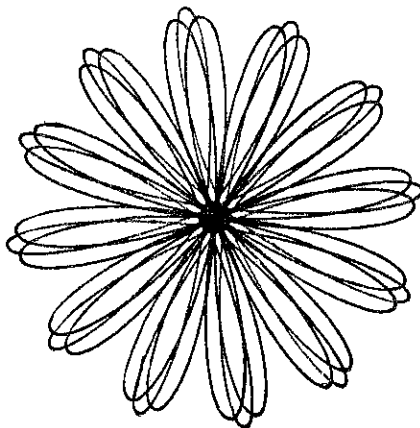
めまぐるしく改正される特許法

昭和46年1月 出願の公開制度……審査なしでなんでも公開公報に掲載されるようになった。
また、別に料金を払い審査請求手続きをしないと審査されないようになった。

昭和51年1月 物質特許とクレームの多項制が認められるようになった。また、登録商標の使用

義務が強化された。

そして、次は特許制度の国際化（特許協力条約；PCT）であり、国をあげて目下その準備中。来年度中（1978年）には発効とか、ここ数年のうちにでも特許法は大きく変貌している（M. N）



凝 集 性 粉 体 の 流 出

Discharge of agglomeration powders

——試作した回転ホッパーについて——

川合 誠一*

Seiichi Kawai

§ 1. はしがき

粉粒体の流出に関する研究は生産の連続、自動化に伴って近年急速に関心が高まり、多くの報告が提出されている。筆者もさきにホッパーからの粒体の流出実験式を発表し、適用範囲の粒径 150μ 以下ではその重力流れが不連続となり、ついで閉塞することを報告した¹⁾。当時粉体は細かくなると内部摩擦係数が大きくなる上、凝集力が無視できなくなるからであると説明した。そのうち粒体の流動性に関して内外で大いに研究が進められてきたけれども、やはり問題が残されていることに変わりがない。まして付着凝集性をもつ粉体についてはなおさらである。その物性解明の困難なことは日常生活で使用する粉体が液体を移しかえるような簡単なわけにゆかないことで誰しも経験するところである。したがってこのような粉体を取扱う現場や実験室における供給方法はおもに振動を与えたり、エアレーションや造粒するなどの方法が用いられている。しかしながら偏析する恐れや、特別な装置と余分の工程を要するなどいくつかの不利が伴う。幸い粉体を回転しながら流出させると閉塞がかなり回避できることに着目し、新たに凝集性粉体の流出装置を試作した。そしてとかく研究対象よりはるかに勝ちなこれらの粉体が回転ホッパーから流出する傾向と物性の関係について検討した結果を報告する。

§ 2. 粉体の物性値

試料には一連の粒度に篩分けた石膏（福島県若松産）とガラス粉末および測定した粉体物性値の比較に都合の

よいガラス球（東芝電気製）を用いた。そのほか単一粒径の薄力小麦粉や馬鈴薯澱粉の粉末食品、天秤粘土や滑石の窯業原料も準備した。

まず粒径 D_p は光学顕微鏡で粒度分布を測り、体積平均径で算出した。密度 ρ はルシヤテリーの比重瓶を用い、また嵩密度 ρ_a は約 12 cm 上方から例えば 48 メッシュ （細かさによりそれ以下の篩も使用）を通して 25 cc メスシリンダー中に少量づつ分散堆積させた最粗充填体積 V_o と、これをできるだけタッピングしたときの最密充填体積 V_c より横山ら¹⁵⁾の方法にならい、それぞれ最粗密度 ρ_o と最密密度 ρ_c との平均値から求めた。同時に流動性に高度の關係が予測される充填度⁸⁾ $P = (V_o - V_c)/V_o$ や圧縮度¹²⁾ $F = (\rho_c - \rho_o)/\rho_o$ も算出した。

つぎに直接剪断法により内部摩擦角 θ および凝集力 C を求めた。内径 10 cm 、深さ各 2 cm の塩ビ製の上枠と下枠を同心におき、その中へ一定量の粉体を入れる。落し蓋の上に先行荷重として 2 kg の分銅を約一分間のせ、 3.15 cm の充填高さに予圧したのち荷重した。荷重量は $0, 100, 190, 375, 525, 700, 1,000\text{ g}$ である。下枠をのせた台車をシンクロンモーターで引張り、上枠と糸でつないであるバネ秤が剪断のため指示する最高の目盛を読みとった。垂直力 σ に対する剪断力 τ の値を方眼紙にプロットすると摩擦に関するクーロンの式にもとづく図の直線の傾きから θ を、截片から C が求まる。これは下部可動型であるが、上枠が自由に可動できるのでいわゆる上部可動型と同じ特性を有している。したがって測定値が正確であるけれども、取扱いが複雑な三軸試験の値と僅か $1\sim 3^\circ$ の差に過ぎないといわれている¹⁴⁾。剪断速度は普通 60 mm/min 、で行ない、 $20, 8.0, 2.7\text{ mm/min}$ 、とも比較した。なお剪断箱が移動する際の摩擦抵抗は空試験で予め調べ、測定の都度差引いた。

* 金沢大学工学部

(〒920 金沢市小立野 2-40-20)

Tel. (0762) 61-2101

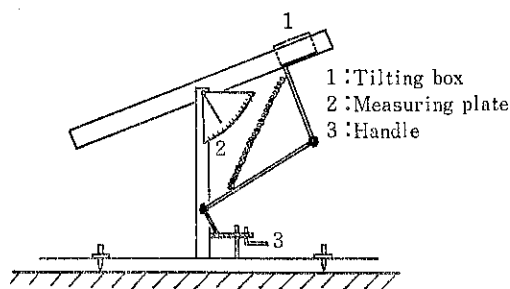


Fig. 1 Apparatus for measurement of angle of repose

しかし本実験では安息角の測定は後述の理由ならびに、操作が簡単で粉体にも適用できる Fig. 1 に示す箱傾斜角法を採用した。最初試料を光沢紙から箱の中に注ぎ入れ、軽く表面を筆の穂先で平坦にした。10°/20 sec. の割合で手で徐々に傾斜させ、上層部全体が一度に滑り始めるときの角度を安息角 ϕ とした。さらにこの方法の信頼度を高めるため箱の寸法についてつぎの実験を行った。はじめに箱をのせる樋の幅から箱のそれを 3 cm とし、長さを変えて石膏とガラス球でテストし Fig. 2 を得た。図より石膏は D_p が小さくなるにつれ側壁の影響が現われ、 ϕ の値が大きくなっている。一方ガラス球は D_p が大きいと箱の長さとはほとんど関係しないが、 D_p が小さくて箱が短いと摩擦面が少なくなって早く滑り始める。反対に箱が長い場合には、滑りが前後二度に行われ易いことから 4.7 cm 内外を適当と判断した。さらにこの長さに対し Fig. 3 のように幅をかえてみると、 D_p が

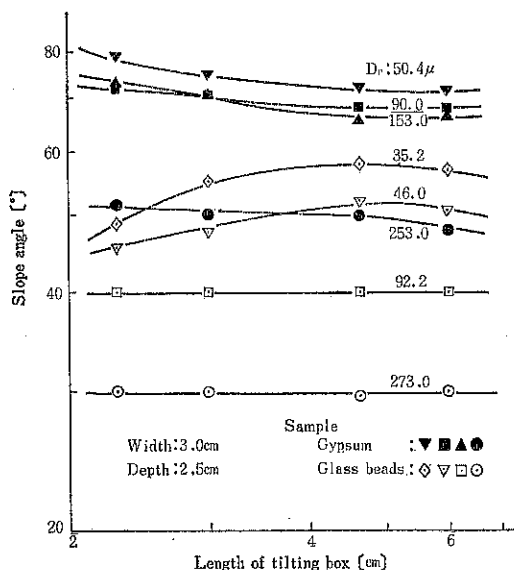


Fig. 2 Effects of length of tilting box

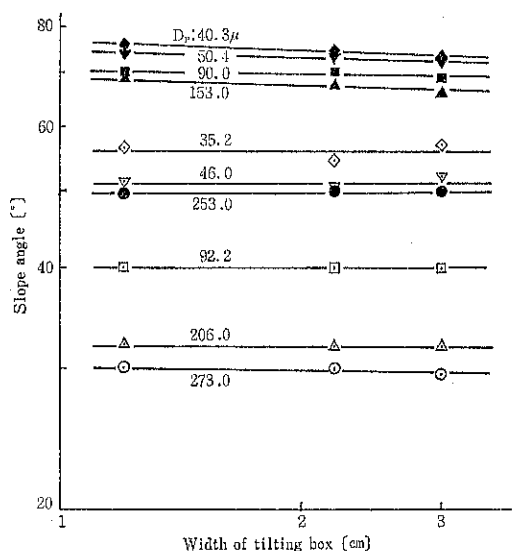


Fig. 3 Effects of width of tilting box

小さい石膏に僅かな影響のみみられる程度に過ぎない。それで 5×3 cm の林²⁾や 8×4 cm の林⁸⁾が選んだ寸法を参考に一応長さの約 0.6 倍を妥当と考えた。深さには特に詳しく測定しなかったが 2.5 cm を用いた。

増湿するには試料を薄く抜けた写真用バットを塩ビ製ボックスの中に入れ、この中へウルトラソニックネブライザーから水蒸気を噴霧した。添加水分は乾量基準で含水率 w を算出した。

比表面積 S はプレーンの空気透過装置で測定した。

§ 3. 粉体の流出装置

試作した粉体の流出装置は Fig. 4 の略図に示すよう

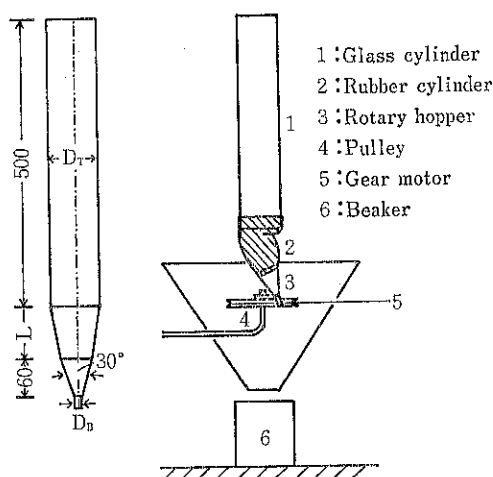


Fig. 4 Experimental apparatus

に粉体を充填するガラス円筒とプーリーで回転しながら粉体を流出させる回転ホッパーおよび両者を接続する厚さ 0.5 mm の具羽ゴムの並ハイカシートで作った接続ゴム円筒からできている。ガラス円筒の内径 D_T は 5.5, 6.5, 7.5, 8.0, 9.0 cm ϕ で、亜鉛引鉄板製の回転ホッパーの流出口 D_B は 1.44, 1.73, 2.15, 2.60 cm ϕ である。回転ホッパーの先端を 9 cm ϕ のプーリーのアームの間にさし入れ、変速モーターを駆動して 0, 40, 60, 75, 90, 100, 110 r.p.m に回転数 N を変えた。流出量を測定するには試料をガラス円筒に充填し、プーリーが一定回転数になってから秒時計を動かし、5 秒（または 10 秒）ごとにホッパーから流出する粉体をビーカーにうけた。これを上皿天秤で秤量して瞬間流出量 W_t を、さらに 10 回前後の合計から流出量がわかる。この操作を 3~4 回同じ条件で測定したうちのほぼ中間値に近いデータをこの場合の平均流出量 W とした。

つぎに D_T と D_B はともに大きくなるにつれ、 W も多くなるが Fig. 5 に示すように D_T がある範囲を越えると、流下粉体の流出抵抗を増すので W は少なくなる。この装置では両試料とも D_T 7.5 cm ϕ ~ 8 cm の範囲で最大に達している。なお、 D_B が 1.44 cm ϕ の場合ガラス球以外はほとんど流出しなかった。

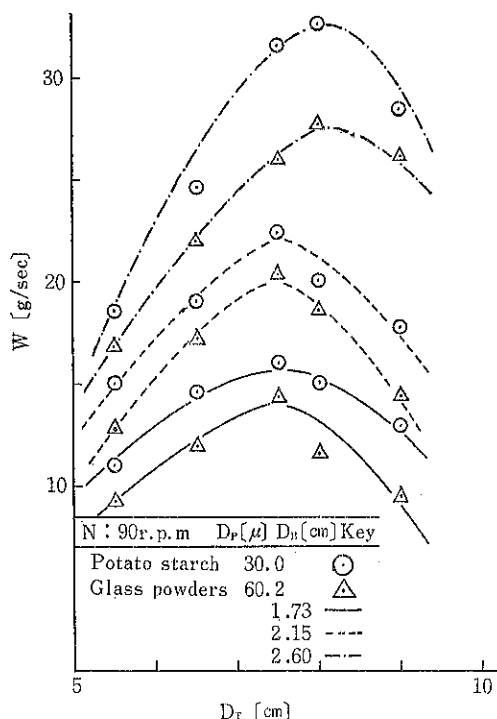


Fig. 5 Effects of diameter in cylinder on the flow rate

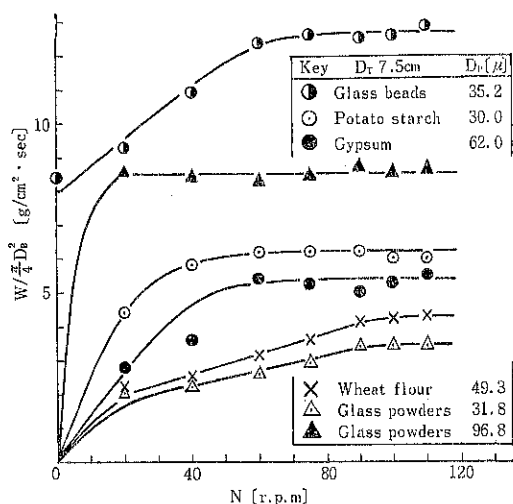


Fig. 6 Relation of the flow rate and revolution speed

Fig. 6 において、比較的小さい小麦粉、ガラス粉末、滑石、粘土は 90 r.p.m まで N とともに W が大きくなるけれども、それ以上速くても粉末の流下が伴わないから W は増加しないことを示している。一方ガラス球や澱粉および 96.8 μ のガラス粉末のように球形もしくは粒径が粗くてサラサラしている粉体は D_B の大きさで制限され、すでに 40 r.p.m 付近から一定の W を示す。ただし石膏は後者の流出傾向に似ている。このことは圧縮度 F が 1.2~1.4 と他の粉体に比べて一段と大きいため、 N が多くなるほど凝集し易いことにもなる。したがって小刻みに速く送り出される量と、ゆっくり一回転当りに比較的多く流出する量とが総体的に大差なく、 N の遅速にさほど左右されないのであると推測することができる。

ちなみに F の大小は架橋の難易に関連するほか、 F が大きければ圧縮され易い反面、ときにはフラッシングを起して瞬くうちに流出し終る厄介な性質がある。それゆえ実験に際しては充填した粉体が暫く沈降するのを待って測定し始めた。

つぎに接続ゴム円筒の屈曲で生ずるゴムのひだは充填円筒の粉体圧を減殺することが予想できる。またこの上に乗った粉体はホッパーの回転でゴムのうねりにつれ順次流出口へ送られる。このことは円筒の各位置に置いた色別の約 3 mm ϕ の塩ビ粒子をトレーサーとした流出調査から判断でき、いわゆるホッパーの不動部分がないから充填と排出粒子の順序が逆転することはない。それでもし接続ゴム円筒が短いとひだの生成が僅かであるから充填粉体が一度に流下しようとし、反対に長過ぎると回

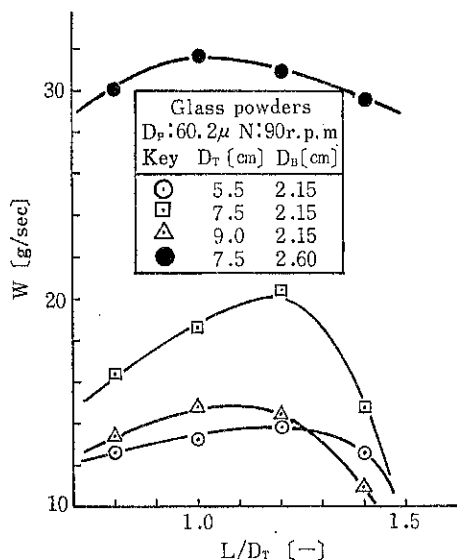


Fig. 7 Flow rate of powder against L/D_T

転ホッパーの傾きが緩いため滞留し易く、ともに W は少ない。Fig. 7 はその長さ L が D_T に対して 1.0~1.2 の範囲が適当であることを示している。

前述の諸条件をいろいろ変えた結果より W_t の偏差が大で、 W が少ないのは $D_T: 9\text{cm}$ 、 $D_B: 1.73\text{cm}$ 、 $N: 60\text{r.p.m}$ であった。反対に良い条件とは $D_T: 7.5\text{cm}$ 、 $D_B: 2.15\text{cm}$ 、 $N: 90\text{r.p.m}$ の場合である。さらに接続ゴム円筒付近の流出状態を観察するため、この部分を厚さ 1 mm の透明なビニールシートで代用し、側面にマンメータにつづいたビニール細管を挿入する。円筒内外の圧力差 ΔP が減圧または加圧に変わるたびに写真撮影し、同時に 10 秒ごとの W_t をプロットすると Fig. 8 となる。その結果良い装置条件では ΔP ならびに W_t の変化が少なく、また鎖線で示すごとく W も多い。一方不適当な条件では閉塞で生じた負圧の空洞に向かって上部粉体層が落盤のようにつぎつぎに落下し、間もなく正圧に変る。この空洞は瞬く間に上昇し、ひだの付近で消失する。また架橋していると言ってもホッパー側面の接目が回転ごとに衝撃振動を与えるとともにホッパーの向きが変わるので架橋下側の部分が少しづつ崩れて流出している。そのため次第にアーチが長くな

り、弱まった途端に破壊されて一度に勢よく流出する。この際空気を伴うので直ちに負圧に変るが、 D_B 、 N ともに小さいと流出口の一部が塞がり、続いて落下する粉体によって再び架橋状態に戻る。かように架橋、空洞、落盤、正圧と崩壊、流出、負圧をほぼ 30~40 秒の周期で繰返す過程のあらましを知ることができた。

§ 4. 流出量に影響する物性値の考察

Fig. 9 は粒子径 D_p と種々の物性値の関係を示したもので、 D_p が小さくなるにつれ単位面積中に含まれる粒子数が多くなるため、粉体間に働く接触点の数が増加する。したがって架橋、あるいは吸着した微粉末相互の摩擦増加のため ϕ が大きくなる。つまり $\tan\phi$ 、 F 、 ϵ 、 C の値はふえ、 ρ_a が減少するから W は少くなる。一方 D_p が大きくなると石膏やガラス粉末ではその表面の凹凸の影響が現われ、 $\tan\phi$ や ϵ が再び大きくなる粒径がいわゆる臨界粒径と称されている。ただしガラス球ではかような関係がみられず、40~50 μ 以上ですでに粒体同様に重力流出が可能である。

いま $D_p: 50.4\mu$ 、 $w: 10.47\%$ の石膏を乾燥すると Fig. 10 に示すように乾燥前よりいくらか W は多くなる。これは粉体表面に付着していた微粉末が離脱し、流出する際に隣接する粉体相互のロックを防ぎ、 C が減少する

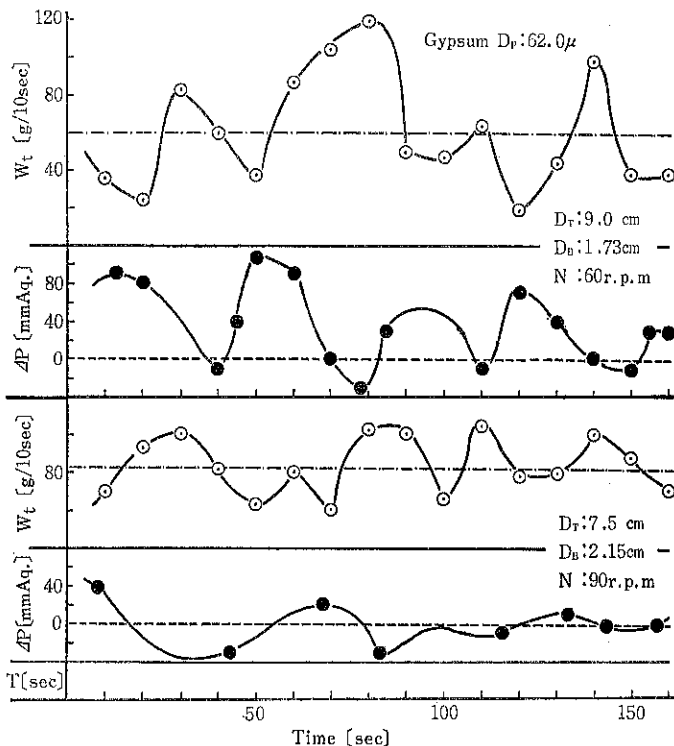


Fig. 8 Constancy of flow rate

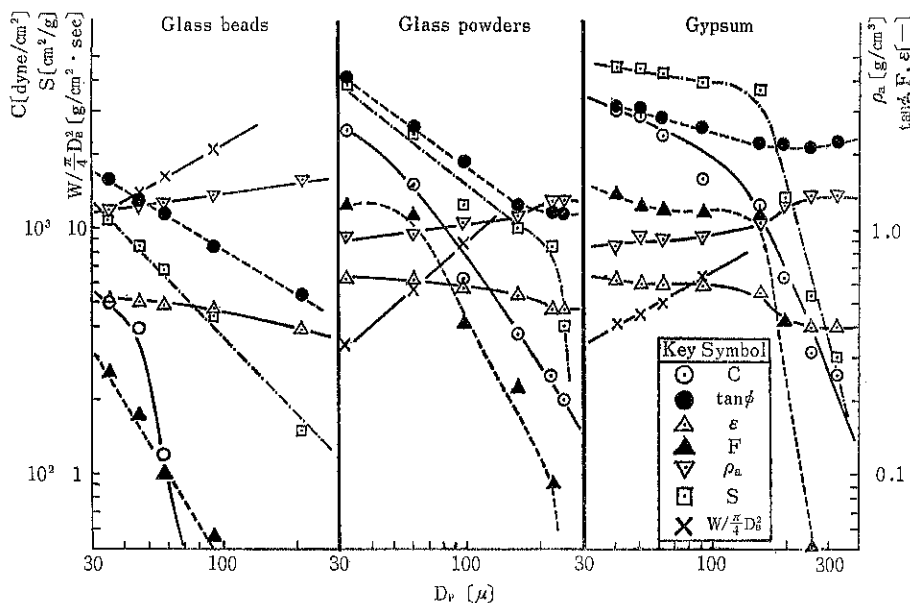


Fig. 9 Relation between powder properties and particle size

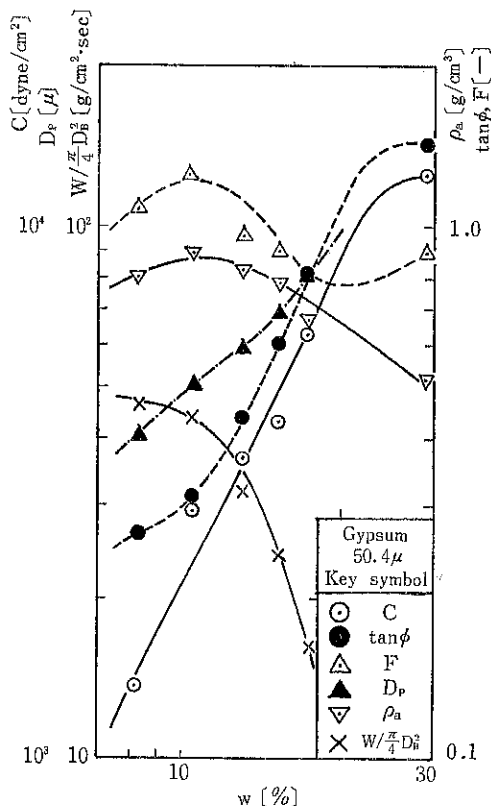


Fig. 10 Relation between powder properties and moisture content

からである。徐々に湿分を添加してゆくと互に凝集して多孔性の二次粒子を作り、みかけの D_p が大きくなると

ともに ρ_a が減少し、水膜により C が大きくなる。したがって15%台では流動し難くなり、 N を増しても流下が伴わず、かえって W が少なくなる。17%になると流出口への流下が多少不連続になり、20%で遂に流出しなくなる。岡田らも各種澱粉について w を細かく変えて約20%まで剪断テストし、 C との傾向がよく似た結果を報告している⁹⁾。また Shotton らは水膜が粒子間の減摩作用を果し、馬鈴薯澱粉が24%で最大の C を示すと述べている¹⁰⁾。本実験でもそのような傾向がうかがわれるようである。

なおここに図示しなかったけれども、ガラス球は表面が平滑なため濡れ易く僅かな w の増加も W に敏感に響き、すでに1%内外で流出しなくなる。従って、数回同一試料を剪断テストに使用していると、 w が変化し時間の経過とともに τ が小さくなり、これらの測定値をプロットすると直線になり難いことは明らかである。

さて凝集性粉体の流出実験式に関係する変数として当然 F または C を予期していた。しかしながら Fig. 11 (左) に見られるように F と W の関係は石膏が一般の傾向からはずれ、殊に F が小さくなるにもかかわらず W は逆に減少している。一方 C との関係は同図 (右) に示すように滑石および C の値: 500 dyne/cm² 以下のガラス球が一般の傾向と異なっている。また、Fig. 12 のように石膏の充填量を少々変えると順次 ε とともに C の値も変わってゆく。けれどもガラス球に(澱粉も同様)このような結果が現われないのは、恐らく充填後予圧する際上下枠の合せ目の僅かな間隙を小さな球形粒子が潜り抜け、その

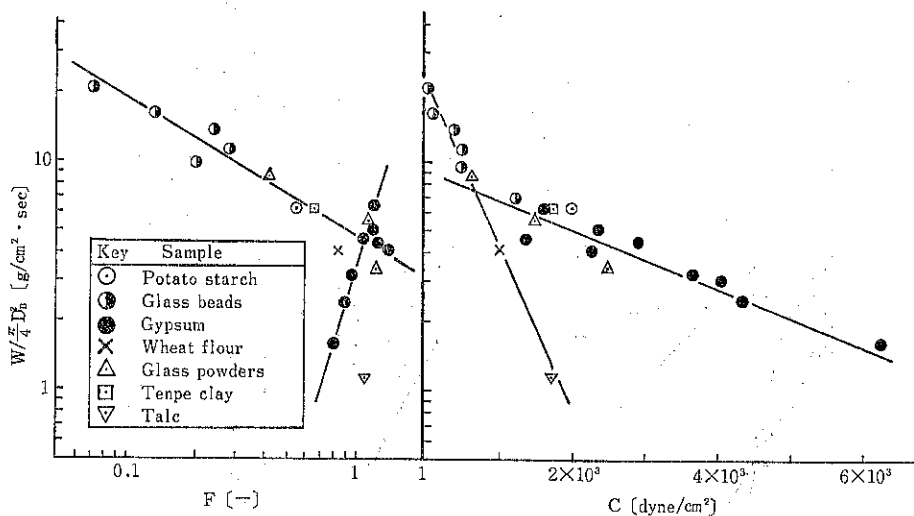


Fig. 11 Flow rate against compressibility and cohesion force

ため断剪面が滑かとなって互に似たような断剪抵抗にもとづくからと推定することもできる。

つぎに断剪速度については Fig.13 のごとく石膏では θ の値はほとんど変らないが、 C は速くても遅くても幾分大きくなっている。これは断剪面に生ずるかみ合い抵抗が結果的に C として測定されるわけであるが³⁾、速いときにはこのかみ合いを緩めるには余分の τ が必要となる。反対に遅い場合には充填粉末の再配列をする余裕があるため安定度を増し、若干 τ が大きく現れると理解するのが適切のようである。

最近105~297 μ 、53~210 μ および44~88 μ のガラス球を3mm/min.の断剪速度で測定したつぎの報告がある¹³⁾。この報告によると D_p が大きいなら密充填となって断剪を受けるとき無理にずりを生じ、実際の断剪が行なわれる粉体層が厚くなるから τ もまた大きくなるとの見解である。しかるに本実験では Fig.14 に示すように断剪速度に関係なく、上記と反対の結果を得た。このことは断剪面に少数の大きな粒子が並ぶよりも、小さくとも多数の接触点が存在すれば大きい τ を示すということ考がこれまで大概の研究者の考え方である^{1),9)} ことを考

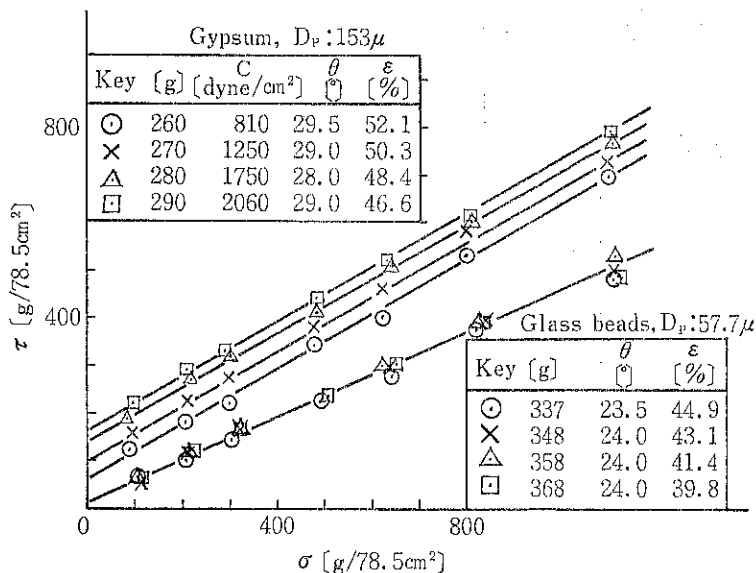


Fig. 12 Variation of τ against σ with changing weight of packed powder

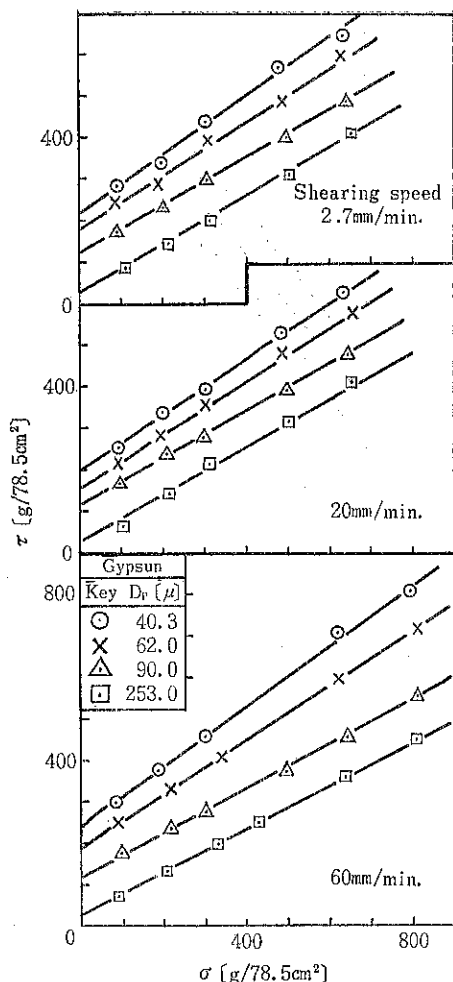


Fig. 13 Variation of Cohesion force on the shearing velocity

慮すると掲載されているような動的と静的の剪断速度によって大小 D_p の順位が逆転するはずがないように思われる。また ϵ や W など全く同じ条件で数回づつ同じテストを繰返すことは随分骨が折れるばかりでなく、得られる結果が不安定なことを指摘する向きもある⁷⁾。かように剪断試験から求められる μ と C の値に対する疑問や再現性にいつても多分に気がかりな点がある。ところがこれに代る安息角にもまた物理的意味を持たず、1つの対応関係にとどまっており、物性値として流出実験式より除外しても差支えないとの提案がある⁴⁾。しかしながら粒体の μ の項を無視すると、式の精度が悪くなることは以前に報告したように粒子形状が球から遠ざかるほど観測値に対し過大な値が算出される⁵⁾。ともあれさきに接続ゴム円筒の機能や流出現象の観察のところで触れた通り剪断試験の場合のように強制的に圧縮されることはまず考えられない。むしろ本装置の適当条件で流出す

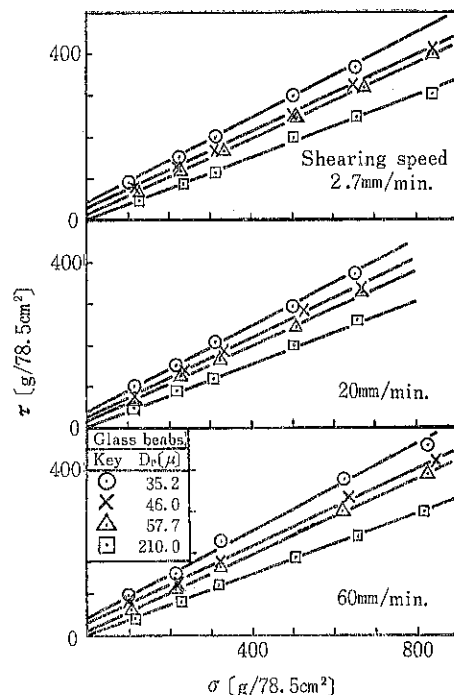


Fig. 14 Relation of $\tau : \sigma$ on the shearing velocity

る際の粉体相互の接触状態は圧縮、剪断で得られる θ よりも、比較的自重で形成される ϕ と W の関係の方がより実状に添っていることがうなずけるはずである。事実 Fig. 15 は W に対する μ と $\tan \phi$ のプロットの比較であるが、 μ の僅小な変化が W に大きく響き、かつ比例しないものが多い。反対に $\tan \phi$ はかかる恐れが少なく、

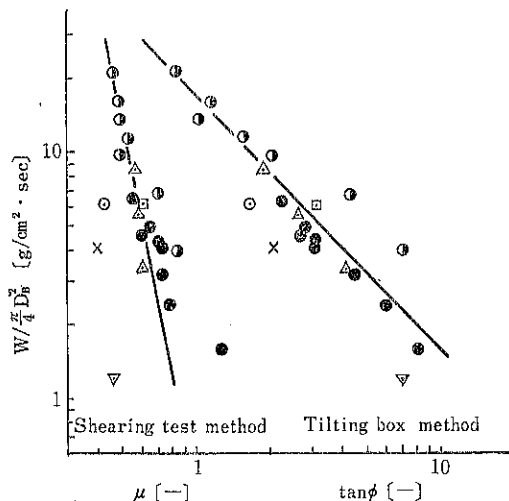


Fig. 15 Comparison of shearing test and tilting box method

流出実験式の有用な変数の一つである。

§ 5. 流出実験式

上述の装置条件や粉体物性値についてWに関係する変数を検討した結果、 D_P 、 D_B 、 D_T 、 ρ_a 、 g 、 $\tan\phi$ などが考えられる。そこで $W/D_P^{2.5} \rho_a \sqrt{g}$ を D_T/D_B に対し点綴した Fig. 16 より直線関係が得られ冪数は1.2となる。 $W/D_P^{2.5} \rho_a \sqrt{g} (D_T/D_B)^{1.2}$ と D_B/D_P を Fig. 17 のようにプロットすると同じ勾配をもつ直線群を得る。これらの位置の相異は各粉体の $\tan\phi$ によるのであるから $D_B/D_P=400$ の縦軸の値から $\tan\phi$ の冪数が決まる。最後に Fig. 18 に示すように全データを一本の直線上にのせることができ次式が求まる。

$$W = 0.085 D_P^{2.5} \rho_a \sqrt{g} \tan\phi^{-0.8} \left(\frac{D_B}{D_P} \right)^{2.4} \left(\frac{D_T}{D_B} \right)^{1.2} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ただし約 200 mesh 以下の凝集性粉体に対し、すでに述べた良い装置条件の場合に限定される。Nについては粉体の流出促進に重要と考えられるけれども、Wとの関係が物質によりまちまちであるから前述のCとともに実験式の変数に加えなかった。またこれまで取扱った粉体のうち重曹粉末は針状結晶で ϕ が 85.0° と特に大きく、ゴム円筒部で塊状になるとWは極端に少なく、計算値より随分はずれるのでデータに加えることを見合わせた。

増田ら⁹⁾は $D_B: 5.12 \text{ cm}$ 、 $N: 120 \text{ r.p.m}$ の Vibra Screw Feeder を用い $D_P: 68 \mu$ 、 $\rho_a: 1.23 \text{ g/cc}$ の珪砂が 100 g/sec 流出するという。この条件を(1)式にあては

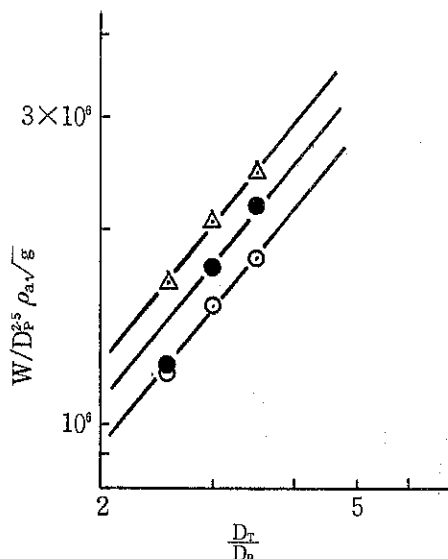


Fig. 16 Log plot of $W/D_P^{2.5} \rho_a \sqrt{g}$ vs. D_T/D_B

め $D_T/D_B=3.49$ においてWを算出すると約 3.5 倍多く流出する。しかし 100 V で 215 g/sec 流出するフロートロンのクリアランス 2 cm を D_B とみなした本装置のWは $1/4$ に過ぎなかった。

なお簡単のため Fig. 15, 16, 17, 18 の試料別記号は Fig. 11 に準ずることとお断りする。

§ 6. むすび

凝集性粉体を回転しながら流出させると、かなり閉塞

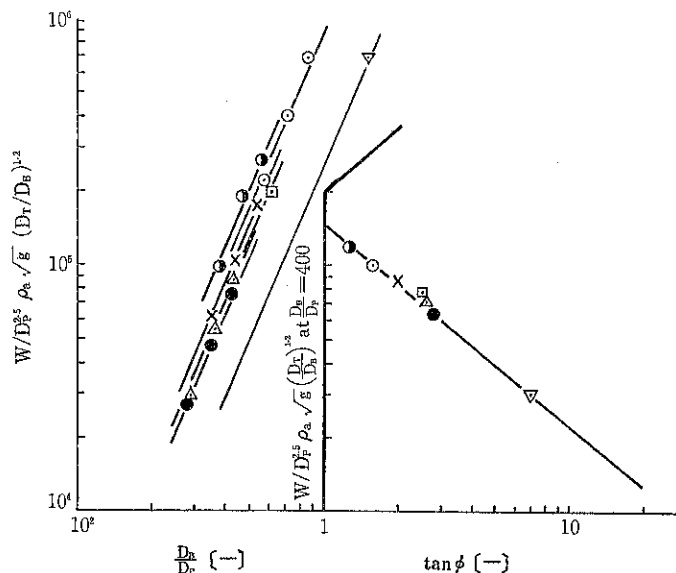


Fig. 17 Determination of power number of $\tan\phi$

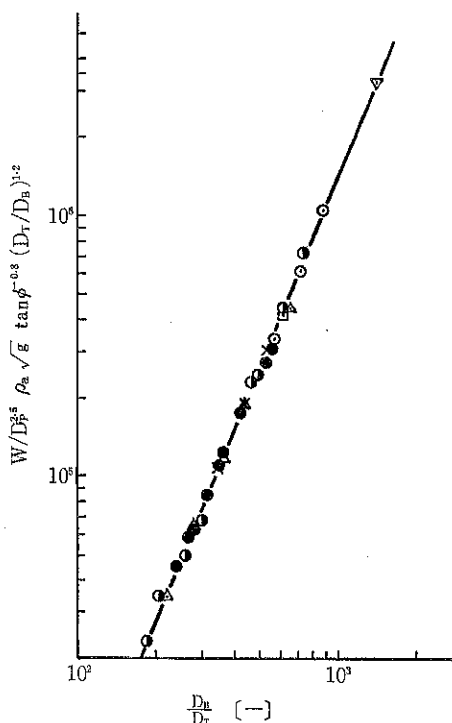


Fig. 18 Summary of all data results in a satisfactory correlation for all materials

が避けられることに着目して回転ホッパーを試作した。この流出状態を接続ゴム円筒部で観察すると架橋、空洞、落盤、加圧と崩壊、流出、減圧を繰返すとき W_t の偏差が多く W は少ない。しかし D_T , D_B , N など適当な装置条件を選ぶとほぼ定常流出が可能である。当初、流出に必須の因子と考えていた剪断試験から求めた μ や C の値は W に対応しない場合が多いが、箱傾斜角からの $\tan \phi$ とは良い関連性が認められた。ガラス球以外は回転を与えないと流出できないが、ある N 以上では W の増加はみられない。なお流出効果に重要な接続部のゴム円筒は一般性に乏しいとの批判もあるが、理論的にはともかく一考に値する操作法と思う。勿論定量性を一層高めるよう工夫する余地が残っている。

終りに臨み、本実験の測定を行った河合利明、藤井志郎両君に深く感謝の意を表します。

使用記号

C :	凝集力	[dyne/cm ²]
D_B :	流出口径	[cm]

D_P :	粒子径	[μ]
D_T :	ガラス円筒径	[cm]
F :	圧縮度	[-]
g :	重力の加速度	[cm/sec ²]
L :	接続ゴム円筒長さ	[cm]
N :	回転数	[r.p.m]
P :	充填度	[-]
S :	比表面積	[cm ² /g]
V_c :	最密充填容積	[cm ³]
V_o :	最粗充填容積	[cm ³]
W :	平均流出量	[g/sec]
W_t :	瞬間流出量	[g/sec]
w :	含水率	[%]
ΔP :	圧力差	[mmAq]
ϵ :	空間率	[-]
μ :	内部摩擦係数	[-]
σ :	垂直応力	[dyne/cm ²]
τ :	剪断応力	[dyne/cm ²]
ρ :	密度	[g/cm ³]
ρ_a :	かさ密度	[g/cm ³]
ρ_c :	最密充填密度	[g/cm ³]
ρ_o :	最粗充填密度	[g/cm ³]
θ :	内部摩擦角	[°]
ϕ :	安息角	[°]

参考文献

- 1) 荒川正文：粉体工学研究会誌 臨時号 14 (1966)
- 2) 林尚孝：材料 20, 753 (1971)
- 3) 林平三郎, 見奈美秀蔵：薬学雑誌 84, 229 (1963)
- 4) 五十嵐平太郎：粉体工学, 3, 38 (1966)
- 5) 川合清一：粉体工学 2, 877 (1965)
- 6) 増田, 増田, 井伊谷：粉体工学研究会誌 7, 479 (1970)
- 7) 最上武雄：土木学会誌 27, 745 (1941)
- 8) 中島栄一：高峰研究年報 8, 97 (1956)
- 9) 岡田寿太郎, 安部孝子：薬学雑誌 83, 39 (1963)
- 10) Shotton E. & Harb N.: J. Pharm. Pharmacol., 18, 175 (1966)
- 11) 田中達夫, 川合清一：化学工学 20, 144 (1956)
- 12) 種谷真一, 曾根敏磨：応用物理 31, 483 (1962)
- 13) 種谷, 佐藤, 青木：粉体工学研究会誌 11, 199 (1974)
- 14) 山田清臣：土と基礎 13, 89 (1965)
- 15) 横山藤平, 豊立勝二：材料 18, 515 (1969)

吊り下げ式付着力測定器の試作と測定*

On the Development and Measurement of a New Type
Tensile Strength Tester

—測定条件と試料の充填状態について—

彼谷 憲美** 藤井 謙治** 横山 藤平**
Noriyoshi Kaya Kenji Fujii Tohei Yokoyama

Abstract

A new apparatus, the split cell type tensile strength meter adapted the hanging strips instead of the steel balls was developed to evaluate the adhesion force of the powder bed with enough accuracy without requiring delicate and time-consuming operations. For a standardization of the measurement methods which gave the reproduceable and steady results, the adhesion force data obtained by this tester were compared with results from other authors and effects of measuring conditions, such as cell depths, filling procedures in the cell and compression times were examined. It was found that the measured values on the tensile strength of packed bed of CaCO_3 was of the same order as those from other authors and the apparatus was available for practical applications.

The effect of the cell depth on the void of the powder bed was large and the smaller depth of the cell resulted in smaller void. The compression time also affected the void in the smaller depth of the cell.

The comparison of two different filling methods, one was the charging by a spatula into the cell and the other was the filling through the sieve dispersingly was made on the the cohesive fine powder TiO_2 and we obtained lower values of adhesion and void in the case of the sieve fillings.

著者摘録

粉体層の付着性を測定するための、実用的で簡単な、しかも充分な精度をもつ付着力測定器を開発するためにボール転動を吊り下げ式に改良した二分割セル付着力測定器を試作した。

また、この測定器による再現性のある、バラツキの少ない測定値を得るために測定方法を標準化する目的で、従来の測定法の結果と比較し、セル深さ、セルへの投入方法、圧密時間などの測定条件の影響について検討した。

炭酸カルシウムでの測定結果を比較すると、従来の測定値とほぼ同じ値を示し、充分実用可能なことが認められた。またセル深さは空隙率に影響し、セル深さが小さいと空隙率はより小さな値を示すことが判った。さらに圧密時間も、セル深さが小さいときに空隙率に影響する。

セルへの投入方法に関して、スパチュラで投入する場合とフルイを通して分散させて投入する場合について、凝集性の酸化チタン微粉で比較すると、フルイ充填の場合に付着力、空隙率が低くなった。

* 昭和52年5月11日、化学工学協会第37回研究話談会、
6月1日、粉体工学研究会春期例会、10月6日、化学工学協会第11回秋期大会にて講演

** (株)細川粉体工学研究所

(〒573枚方市招提田近1-9) Tel (0720) 57-3721

1. はじめに

粉体プロセスを取扱った際して、最も問題となるものに、流動性、付着性などの粉体の物性がある。最近、この物性をテーマとした各種の討論会やシンポジウムなども催され、多くの人の関心が向けられているものの、実

際に物性を測定するとなると、測定方法、あるいは装置上、むずかしい問題も多い。

筆者らは物性の中でも特に付着性に着目し、工学的な物性測定法として充分に利用でき、また、操作が簡単で実的に使用できる測定器を開発するため、二分割セルによる粉体層引張強度式付着力測定器を改良した装置を試作し、その測定値を従来の結果と比較し更に測定方法を標準化するために、測定条件を変えて試料のセル内充填状態と関連させて検討した。

2. 測定装置および測定方法

試作した吊下げ式付着力測定器をFig. 1, 2に示す。

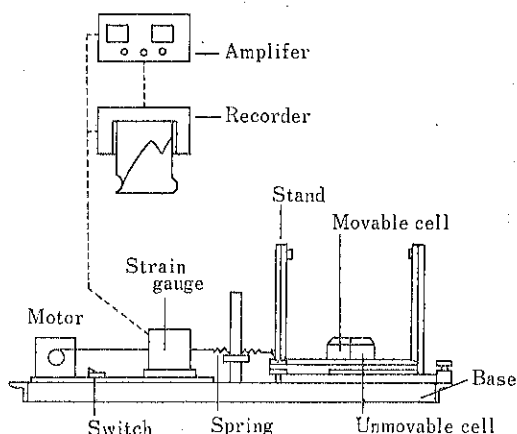


Fig. 1 Schematic figure of apparatus

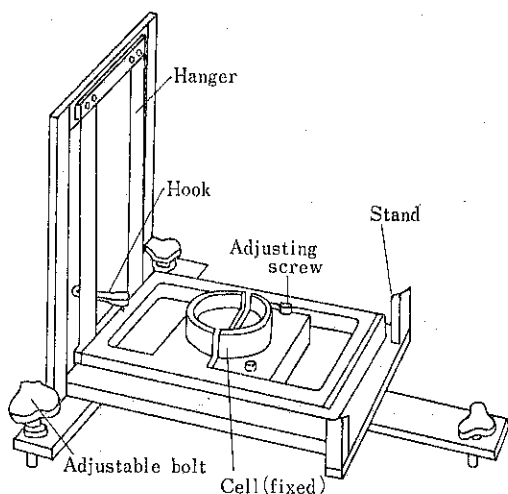


Fig. 2 Details of cell and stand

セルは内径50φ、深さ20mmで底面にサンドペーパーを貼りつけ、粉体層が滑べらないようにしてある。セルの可動部側は支持棒から長さ200mm、幅30mm、厚さ

0.2mmの磷青銅帯板(左右それぞれ2枚、計4枚)で吊下げ、スプリング、ストレーンゲージを介してモーターで引張る。一方、固定部側は支持台上で固定されている。なおセルには試料粉体の層高を変えられるように厚さ5および10mmの底板をとりつけることができる。引張速度はモーターにつけた滑車を変えて調節できるが、今回の測定では1.5 (mm/sec) に一定とした。

従来の2分割セルでは可動セルをボール上に載せて、ころがす、移動機構になっているのに対し、本測定器ではハンガーによる吊下げ構造となっているので転動面での粉体付着がなく、ころがり摩擦の影響を受けない利点がある。

試料は予め、乾燥器で十分に乾燥し、デシケーター中で放冷したものを用いた。測定に際して、固定、可動の両セル先端が接触し、支持棒が水平となるよう調節する。試料のセルへの充填方法は、粉体の圧縮性が異なり、充填圧密中に層高が変化するので、事前に予備テストで投入量を決めておく。試料の充填圧密は、接合した固定、可動セルに充填筒を装着し、充填筒内に試料を投入する。さらに圧密用重錘を充填筒に差し込み、定時間圧密する。その後、重錘、充填筒をはずし、セル上面の試料を削り取る。この余剰分の粉体重量からセル充填量を求めた。

この付着力測定器ではハンガーのバネ作用が測定値に影響することもあると考えられるので、試料を充填しないブランクテストで、その影響を調べた。Fig. 3にブランクテストによる可動セル変位-引張力結果を示す。変位は拉

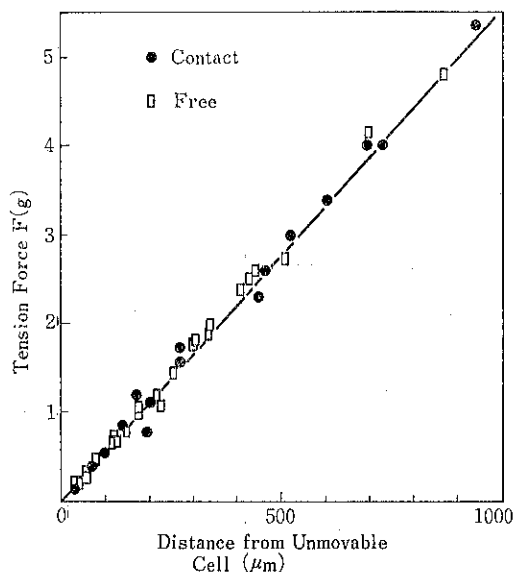


Fig. 3 Tension force of movable cell vs. distance from unmovable cell

大投影器により測定した、これより可動セルが固定セルと接触した状態を基点とした変位でも、また可動セルが垂直静止した状態からの変位でも、引張力は原点を通る同一直線で示され、実用上、ハンガーのバネ作用は無視でき、引張力はセルおよび支持棒重量に関係していると考えられる。

3. 測定値の整理

測定結果の例をFig. 4に示す。モーターを駆動し、引張力を加えてゆくと、時間と共に引張力が増加し、ある

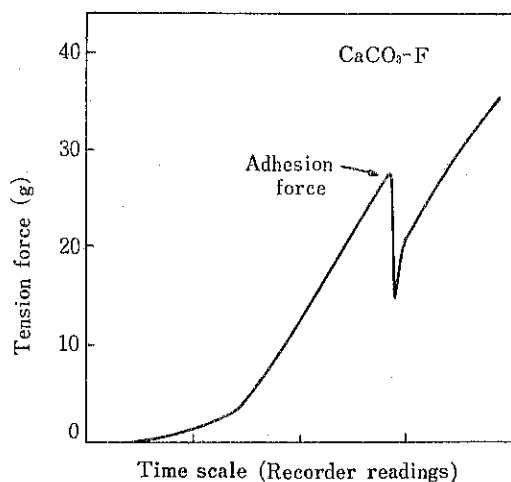


Fig. 4 Typical pattern of adhesion measurement

ピーク値に達すると試料粉体層が破断し、セルが分割する。その時点で急激に引張力は低下するが、引続き引張力を加えると、可動セルとその試料重量が引張力として検出され、再び応力は増加する。付着力の測定では、このピーク値をセル断面で割った値を粉体層破断強度 σ_z (g/cm²) とし、これより次の Rumpf の式から付着力H(g)を求めた。

$$\sigma_z = \frac{9}{8} (1 - \epsilon) k \frac{H}{\pi D_p^2} \quad (1)$$

ここで σ_z : 粉体層破断強度 (g/cm²) ϵ : 空隙率 (-) k : 見掛け配位数 (-) H : 粉体層1接触点あたりの付着力 (g), D_p : 平均径 (cm) である。

また配位数 k については、Ridgwayらが従来の実験結果を広範囲に渡り整理して提案した関係式(2)より、空隙率 ϵ から配位数 k を計算した。

$$\epsilon = 1.072 - 0.1193k + 0.00431k^2 \quad (2)$$

4. 測定法の比較

試作した吊下げ式付着力測定器による測定が従来のボ

ール転動式測定器による測定値と相異なるかどうか検討する必要がある。過去に測定された同一試料を入手することは困難なので、比較の実験結果の多い炭酸カルシウムを試料として平均粒径を変えて測定した。Fig. 5にその測定比較を示す。

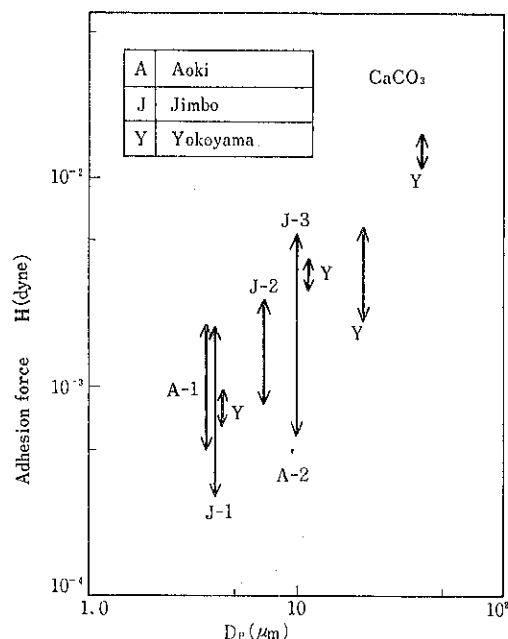


Fig. 5 Comparison of adhesion measurements

ここで記号Aは青木らの、Jは神保らの測定結果であり、Yは本装置による測定値である。試料の粒度、水分、空隙率など測定条件の違いを考慮すれば、付着力と平均粒径は、粒子径が大きくなると付着力も増大し、ほぼ同じ傾向を示している。したがって、吊下げ式付着力測定器による測定値とボール転動式二分劃セルの付着力測定とは、測定値そのものについては大差ない値を示すものと考えられる。

5. 測定方法

付着力の測定では同一試料でも、測定値にバラツキが多く、測定条件が異なれば更にバラツキの範囲が広がってくる。これを極力小さくし、再現性のある測定値を得るためには、装置上、あるいは測定方法などを規格標準化することが望ましい。特に上から試料を充填し、水平方向に引張る二分劃セル法では垂直方向に粉体圧が変化するため、セル深さ (粉体層高さ)、投入方法、圧密時間などの相異が付着力測定に影響するものと考えられる。

そこで今回、測定方法を標準化する以前に、測定方法の相異がどのように影響するかを、セル深さ（粉体層高さ）、投入方法、圧密時間について検討した。

5.1 セル深さの影響

セルに、厚さの異なる底板をとりつけて、セルの深さを変えて測定した。この場合、圧密時間は10分間で一定とし、圧密荷重を200(g)から1(kg)まで4種類の重錘を使用した。測定結果をFig. 6に示す。粉体層高が大きくなる程、空隙率の変化は減少し、層高が小さくなると圧縮力の影響が大きくなっている。これは層高が大きくなると圧縮力はセル上部の粉体層で保持され、底部へ応力が伝わらないため、空隙率は全体としては小さくならないものと考えられる。

Fig. 7はセル深さをパラメーターに空隙率 ϵ に対して付着力Hを示したもので、セル深さが5mmのときは空隙率が変わっても付着力は影響されていない。一方、15～20mmでは空隙率が増加すると付着力は減少し、空隙率の影響が認められる。

5.2 投入方法の相異

凝集性の強い微粉を試料とする場合、試料中の水分が少なくても、大きな塊となっている場合もある。このような場合、試料をセルに充填するだけでも、投入方法によって空隙率が変わることが予想される。一度に試料を投入する場合と、細かく数回に分けて投入する場合とではセル内での充填状態は異なっているであろう。

Fig. 8は、凝集性の著しい酸化チタン粉末を、そのま

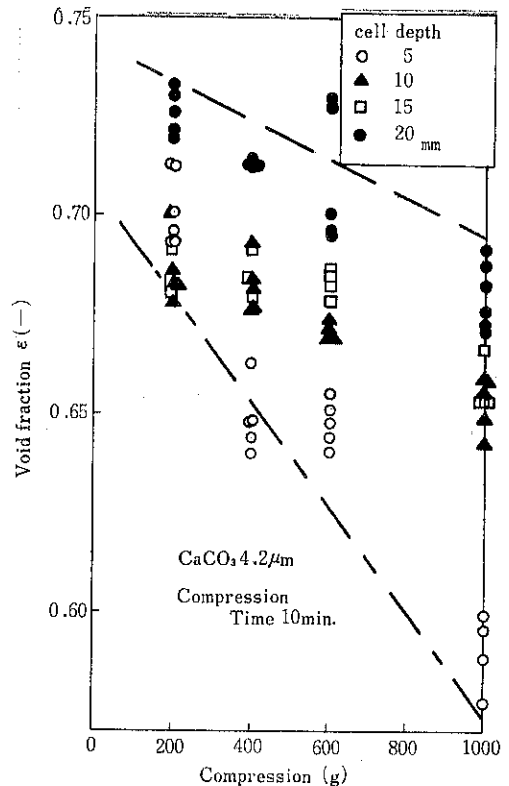


Fig. 6 Relationships between void fraction and Compression

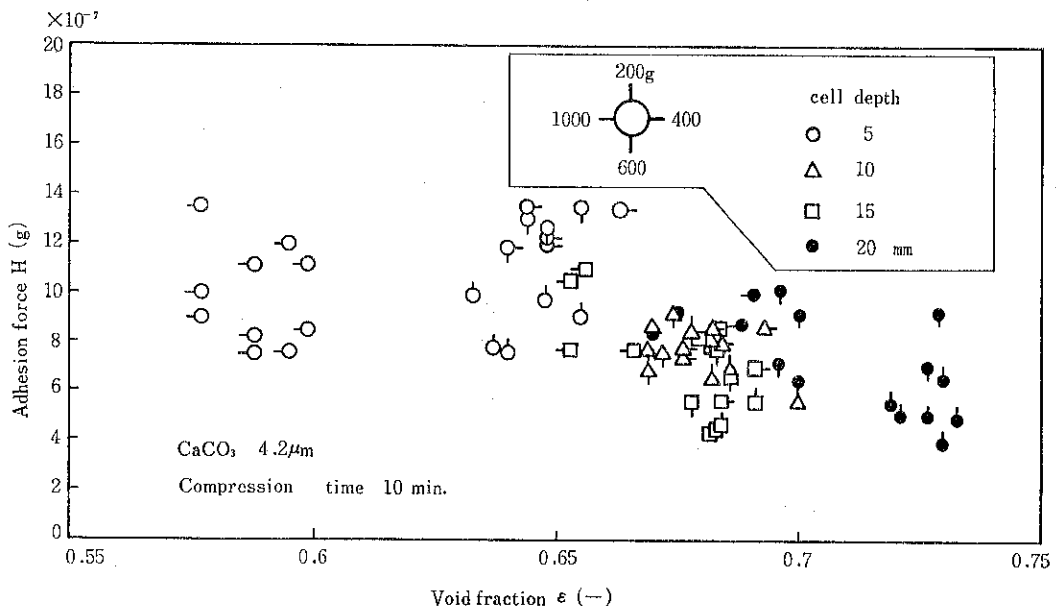


Fig. 7 Relationships between adhesion force and void fraction

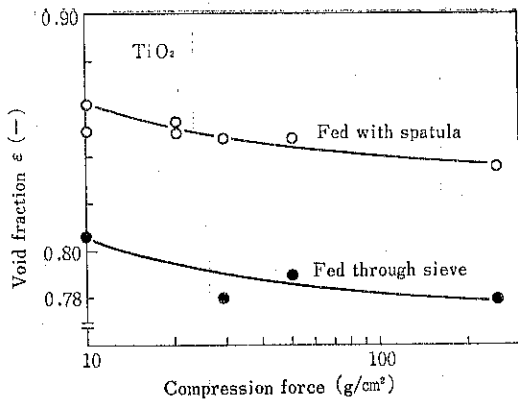


Fig. 8 Effects of feeding methods of powder on void fraction

まスパチュラでセルに投入した場合と、24メッシュの篩を通して均一分散させてセルに充填した場合の圧縮力と空隙率の関係を調べたものである。明らかに篩を通した場合、空隙率が小さく密充填されていることが判る。また、この篩処理の有無を空隙率と付着力の関係で示すと Fig. 9 のとおりになる。篩処理の測定点が少ないが、スパチュラでそのまま投入した未処理の場合が、多少、付着力の値が大きいようである。なお、ここで白丸と白三角記号は測定者が異っており、各測定点は同一条件5回測定の実値である。

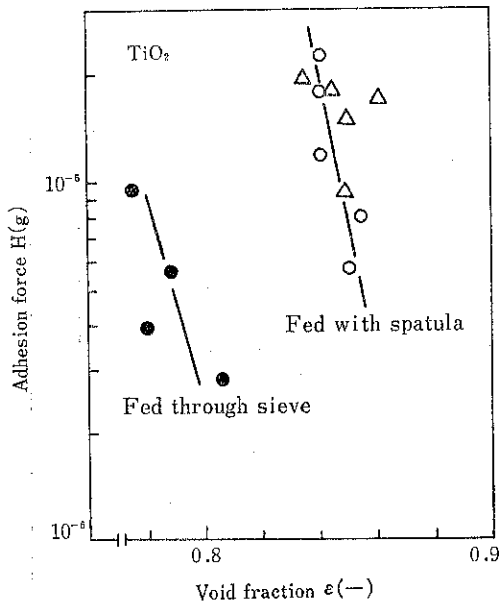


Fig. 9 Comparison of adhesion force

このような傾向は、単に酸化チタン粉末だけに限らず関東ローム微粉 (JIS 11種) にも認められ、圧縮力と

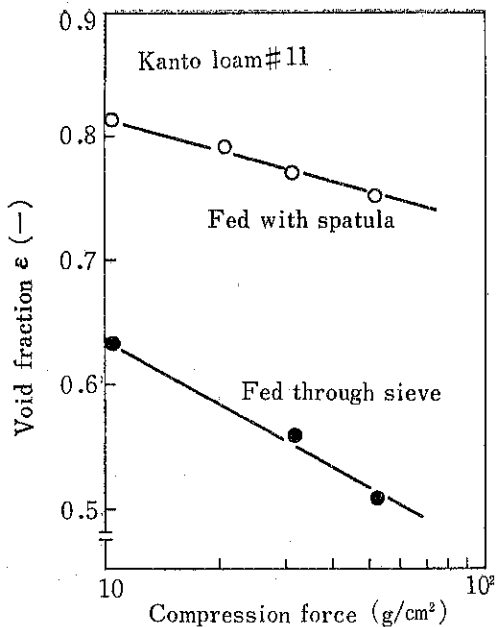


Fig. 10 Effects of preparation on void fraction

空隙率の関係を Fig. 10 に示す。

凝集性の強い試料では、スパチュラでセルに直接投入すると、塊状で投入されるため、その塊と塊の間の空隙が圧密時間中も保持され、セル全体としては空隙率は見掛け上、大きな値となるのに対し、篩を通すと、そこを通過した2次粒子がセル内に均一分散し、空隙率は低い値になると考えられる。したがって篩を通さない未処理の場合、引張破断は、“塊”と“塊”の間で生じ、篩処理では2次粒子間で生じ、その値から付着力が計算されていることも考えられる。そのため、圧縮力を大きくすると、2次粒子同志が圧密され、付着力は見掛け上、“塊”付着に近づくと思われる。Fig. 11 は、圧縮力と付着

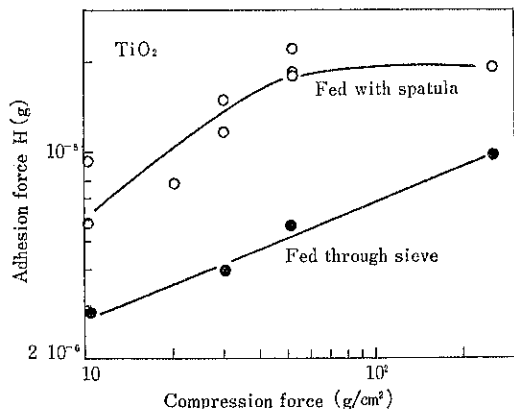


Fig. 11 Effects of compression force on adhesion force

の関係を調べたもので、圧縮力が増えると篩処理の値が未処理の値に接近している。

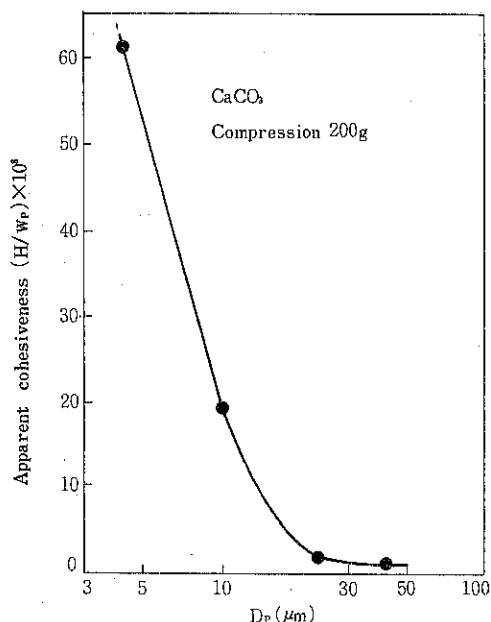


Fig. 12 Relationship between particle size and apparent cohesiveness

このことは凝集性の粉体では、セルへの投入方法によっても測定値が変動し、また一般の粉体でも、粒子径が小さくなると自重 W_p に対する相対的な1接触点あたりの付着力 (H/W_p) が増大するため、微粉になるほど凝集性が増え、測定値に影響すると考えられる (Fig. 12)

5.3 圧密時間の影響

セル内の試料充填状態に関する測定条件として、セル深さ、投入方法など以外に圧縮力を加える圧密時間も充填状態に関与し、付着力に影響を及ぼすと考えられる。そこで、空隙率変化の大きいセル深さ5mmと影響の比較的小さい20mmの2条件で圧密時間による変化を調べた。Fig.13は圧縮力を一定とし、セル深さをパラメーターに空隙率変化をプロットしたもので、圧密時間が8~10分間程度で一定値に達している。この場合もセル深さ5mmの測定値が空隙率変化は大きくなっている。

空隙率の圧密時間による影響は認められるものの、付着力についてはセル深さが5、20mmでも圧密時間の影響は明らかではない。(Fig. 14, 15) このように圧密時間により空隙率は変化するが、付着力が変化しない現象は、今回用いた試料の特有の性質かどうか、試料を変えて検討する必要がある。しかしセル内の試料充填状態から考えると、今回の試料については10分間程度の圧密時

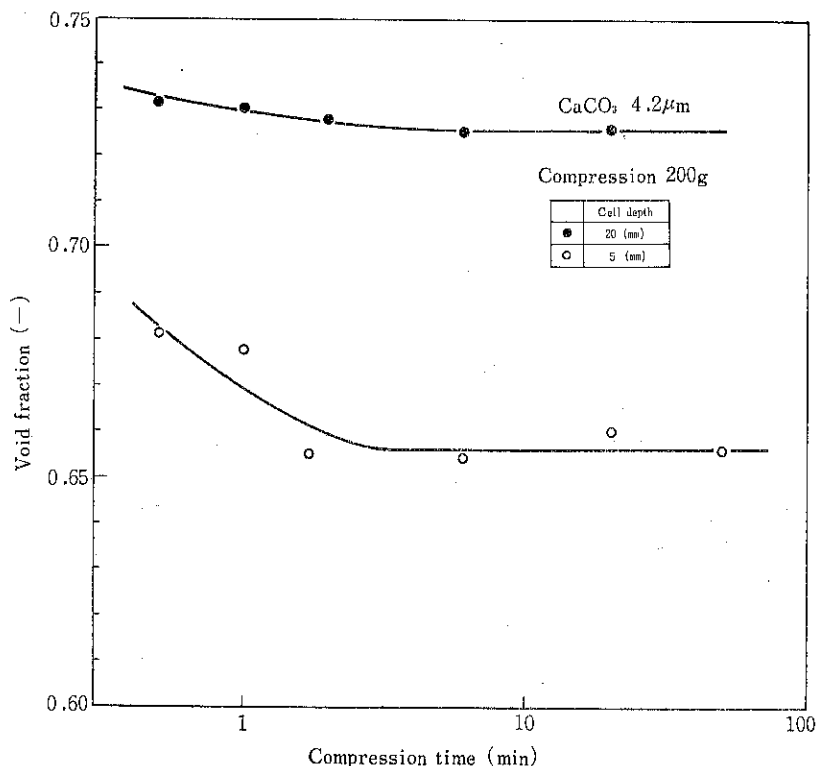


Fig. 13 Effects of compression time on void fraction

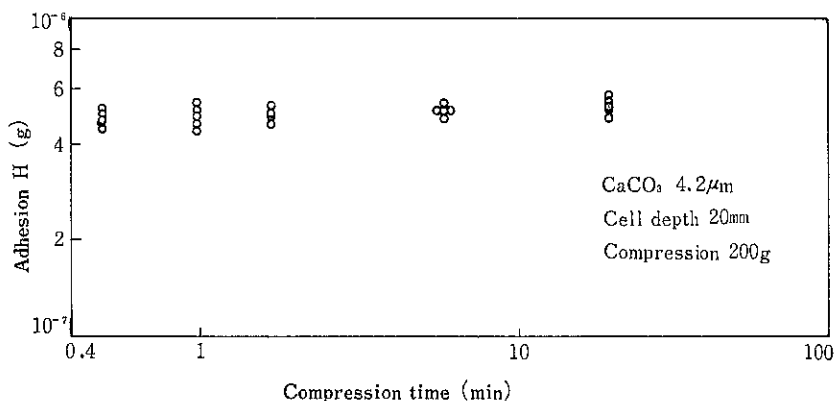


Fig.14 Effect of compression time on adhesion

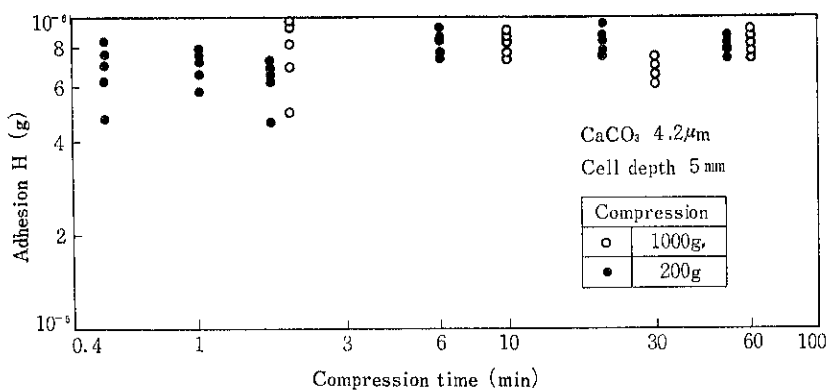


Fig.15 Effect of compression time on adhesion

間が必要であると思われる。

6. おわりに

粉体の付着性は粉体を取扱う工業的操作にとって、重要な特性であり、その値を測定することは意義のあることと考えられる。しかし実際に測定するには、測定値のバラツキ、測定条件の相異などにより信頼できうる測定値を得ることは容易ではない。ここでは工学的に十分信頼でき、また手軽に測定できる測定器を開発するため、試作した吊下げ式付着力測定器を用いて、測定条件により測定値がどのように変化するか、特にセル内の試料充填状態と関連して検討した。

測定の結果、圧縮荷重が 200~1000 g (圧密応力、約 $10\sim50 \text{ g/cm}^2$) の比較的小さい範囲では、均一な圧密が困難であり、セル深さ、即ち粉体層高さ方向で充填状態が異なっていると考えられる。そのためセル深さにより圧縮力に対する空隙率が異なり、圧密時間の影響も変化

している。

また凝集性の強い粉体では、セル深さが 20 mm と大きい場合、試料の投入方法によっても充填状態が相異している。セル深さが小さい場合の試料投入方法の影響は検討されていないが、圧縮荷重が小さい場合、セル深さの影響は大きく、セル寸法の決定には十分注意する必要があると思われる。また試作した吊下げ式付着力測定器では、試料粉体を脆(ぜい)性材と考え、粉体層の破断とともに引張変位が生じると仮定している。しかし凝集性の強い粉体や、水分を多く含む粘着性材料では、粉体層が伸びた点で破断し、Fig.3 に示す変位による力が無視

できなくなる。そのため、この種の材料では変位と破断力の両方を測定し、変位による力を補正しなければならないであろう。

今後、この引張変位の検討も含めて実験を重ね、再現性のある装置構造および測定条件を見い出し、その標準化に努めたい。

参 考 文 献

- 1) 彼谷憲美, 藤井謙治, 横山藤平: 化学工学協会第11回秋期大会講演要旨集, p.50, (1977)
- 2) 彼谷憲美, 横山藤平: 粉体工学研究会春期例会講演要旨集, p. 94, (1977)
- 3) 横山藤平, 朝倉進太郎, 彼谷憲美: 化学工学協会第37回研究談話会講演要旨集, p.50, (1977)
- 4) 神保元二, 浅川貞雄, 曾我尚人: 材料, 17, [177] 540 (1968)
- 5) 青木隆一, 綱川浩: 材料, 18, [186], 47 (1969)

粉体の低濃度垂直空気輸送の加速領域の流れ

Flow in The Acceleration Region of Dilute Phase Pneumatic Transport of Powdery Materials in Vertical Pipe.

富田侑嗣* 上滝具貞* 湯谷正司*
Yuji Tomita, Tomosada Jōtaki, Shouji Yutani

Abstract

The acceleration pressure drop and the acceleration length in vertical pipe flow of pneumatically transported powdery materials are examined theoretically. A theory, based on one-dimensional solids flow model, assumes that the solids are fed into a fully established air flow with zero initial solids velocity. The acceleration pressure drop depends on solids/air ratio, air velocity, solids pipe friction factor and free falling velocity of solid particles. The acceleration length also depends on the same variables except solids/air ratio. The acceleration pressure drop becomes large with decreasing solids pipe friction factor, since the acceleration length becomes longer with decreasing solids friction factor.

著者摘録

粉体の低濃度垂直空気輸送における加速領域について理論的に調べた。気流は非圧縮性とし、一次元の運動方程式に基づいて、十分発達した流れに対して、加速区間で余分に必要な付加加速圧力損失と管に沿う圧力こう配が一定になるまでの加速領域の長さを明らかにした。その結果、粉体の管摩擦係数が小さいものほど加速領域は長く、したがって付加加速圧損も大きくなることが示された。

1. まえがき

垂直空気輸送装置の計画において配管系の圧力損失特性は重要な問題である。これまでかなりの研究がなされてきているが、粒径の小さな粉体に関するものは比較的少ない。特にいわゆる加速領域の特性については十分に調べられていないというのが現状のようである。

ここでは混入器にエアリフトを使用するような場合の低濃度輸送における垂直管内の加速領域の圧力損失やその長さについて理論的に述べる。

2. 理 論

2.1 運動方程式

エアリフトを混入器とする場合輸送始端の圧力は、エ

アリフトタンク内の粉体の自重による圧力水頭と等しいので、一般に低く、したがって管内圧力も大気圧よりわずかに大きい程度である。そこで空気の流れは非圧縮性と考えてもよい、このとき垂直管における粉体の一次元定常流の運動方程式は次のようになる。

$$\left(\frac{1}{g} \frac{G_s}{A u_s}\right) u_s \frac{du_s}{dl} = n C_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{\gamma_a (u_a - u_s)^2}{2g} - \lambda_m \frac{1}{D} \frac{\gamma_m u_s^2}{2g} - \frac{G_s}{A u_s} \quad (1)$$

ここで、 G_s ：粉体の重量流量、 u_s ：粉体の速度、 u_a ：空気の速度、 γ_m ：粉体の輸送比重量、 γ_a ：空気の比重量、 C_D ：粉体粒子の空気抵抗係数、 λ_m ：粉体の管摩擦係数、 d ：粉体粒子の直径、 D ：管径、 A ：管横断面積、 n ：粉体の個数濃度、 g ：重力加速度、 l ：垂直上向き座標、 C_D はレイノルズ数 $Re = (u_a - u_s)d/\nu$ の関数であるが、粉体の流れはストークス則で与えられる範囲内にあると仮定する。ただし、 ν ：空気の動粘性係数。

* 九州工業大学機械工学科
(〒804 北九州市戸畑区仙水町1の1)
Tel (093) 871-1931

すなわち,

$$C_D = \frac{24\nu}{(u_a - u_s)d} \quad (2)$$

更に粉体粒子の浮遊終末沈降速度 u_{mg} もストークス則で算出できるものとする。よって,

$$u_{mg} = \frac{1}{18} \frac{r_s d^2}{r_a \nu} g \quad (3)$$

ここで, r_s : 粉体の真比重量。式(2), (3)を使って式(1)を変形すれば次式を得る¹⁾。

$$\frac{d\phi}{dF_m} = \frac{1}{\phi} \{-\zeta_D \phi^2 - \phi_m \phi + \phi_m(1 - \phi_m)\} \quad (4)$$

ここで,

$$\phi = \frac{u_s}{u_a}, F_m = \frac{g l}{u_{mg}^2}, \phi_m = \frac{u_{mg}}{u_a}, \zeta_D = \frac{\lambda_m u_{mg}^2}{2gD} \quad (5)$$

前述のように空気の流れは非圧縮性としているので, 定常流では空気流量が一定であり管内空気速度 u_a も一定である。 λ_m は一般には u_s または u_a の関数であるが, u_a の関数とみなす方が種々の点で都合である。このとき式(4)は u_a , u_{mg} , λ_m をパラメータとする u_s の l に関する微分方程式となる。したがって, 十分発達した流れでは ϕ の変化はないので, 式(4)で $d\phi/dl = 0$ とおくことにより, 最終速度比 ϕ_x は $\phi_x \leq 1$ を考慮して次式で与えられる。

$$\phi_x = \frac{-\phi_m + \sqrt{\phi_m^2 + 4\zeta_D \phi_m(1 - \phi_m)}}{2\zeta_D} \quad (6)$$

ここで, 粉体の輸送量 G_s は

$$G_s = A r_m u_s = A \left(\frac{\pi}{6} d^3 n r_s \right) u_s \quad (7)$$

で与えられる。定常流では G_s は一定なので, $r_m u_s$ は一定である。したがって $l = 0$ で $u_s = 0$ とすれば r_m は無限大となり, $l = 0$ は特異点となるので連続の式は使えない。これは点 $l = 0$ を粉体の湧出し点とみなしていることによる。

2.2 加速域の圧力損失

入口から高さ l までの全圧力損失を Δp_T とし, このうち空気流の管壁との摩擦損失を Δp_a , 粉体による圧力損失を Δp_s とすると

$$\Delta p_T = \Delta p_a + \Delta p_s \quad (8)$$

とおける。空気流は簡単のため $l = 0$ で十分発達しているとし加速域の損失を無視すれば, Δp_a は次式で算出できる。

$$\Delta p_a = \lambda_a \frac{l}{D} \frac{r_a u_a^2}{2g} \quad (9)$$

ここで, λ_a : 空気の管摩擦係数。式(1)を次のように書きかえる。

$$nC_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{r_a (u_a - u_s)^2}{2g} = \left(\frac{1}{g} \frac{G_s}{A u_s} \right) u_s \frac{du_s}{dl} + \lambda_m \frac{1}{D} \frac{r_m u_s^2}{2g} + \frac{G_s}{A u_s} \quad (10)$$

このとき, Δp_s は上式を l について 0 から l まで積分したものである。上式を $l = 0$ で $u_s = 0$ の下で積分すると次式を得る。

$$\Delta p_s = \frac{G_s}{A g} \left(\int_0^u u_s du_s + \int_0^l \frac{\lambda_m}{2D} u_s dl + g \int_0^l \frac{dl}{u_s} \right) \quad (11)$$

上式の右辺第一項は粉体の加速による圧力損失, 第二項は粉体の管壁等による摩擦圧力損失, 第三項は粉体の上昇のための圧力降下である。式(4), (5)において式(11)を変形すれば次式を得る。

$$\Delta p_s = \frac{m r_a u_a^2}{g} \left\{ \int_0^\phi d\phi + \int_0^\phi \frac{\zeta_D \phi^2 d\phi}{-\zeta_D \phi^2 - \phi_m \phi + \phi_m(1 - \phi_m)} + \int_0^\phi \frac{\phi_m^2 d\phi}{-\zeta_D \phi^2 - \phi_m \phi + \phi_m(1 - \phi_m)} \right\} \quad (12)$$

ここで m は $G_s / A r_a u_a$ で与えられる混合比である。前述のように λ_m が u_a の関数であれば ζ_D は定数となるので積分の外に出すことができる。このとき式(12)は次のようになる。

$$\Delta p_s = \frac{m r_a u_a^2}{g} \left\{ \frac{\phi_m}{2\zeta_D} \ln \frac{|-\zeta_D \phi^2 - \phi_m \phi + \phi_m(1 - \phi_m)|}{\phi_m(1 - \phi_m)} - \frac{\phi_m(\phi_m + 2\zeta_D)}{2\zeta_D \sqrt{\phi_m^2 + 4\zeta_D \phi_m(1 - \phi_m)}} \times \ln \frac{\{\phi_m + \sqrt{\phi_m^2 + 4\zeta_D \phi_m(1 - \phi_m)}\} \phi - 2\phi_m(1 - \phi_m)}{\{\phi_m - \sqrt{\phi_m^2 + 4\zeta_D \phi_m(1 - \phi_m)}\} \phi - 2\phi_m(1 - \phi_m)} \right\} \quad (13)$$

このようにして, λ_m , u_{mg} , u_a および m が与えられれば, 加速域の圧力損失が求まることになる。

2.3 付加加速圧損

等速区間では速度比 ϕ は $\phi_x = \text{一定}$ となるので式(12)の右辺第一項の加速圧力損失はない。すなわち等速区間の長さ H 当りの付加圧力損失 Δp_{sF} は次式で与えられる。

$$\Delta p_{sF} = \lambda_m \frac{H}{D} \frac{r_m u_s^2}{2g} + r_m H = \frac{m r_a u_a^2}{g} \left(\zeta_D \phi_x + \frac{\phi_m^2}{\phi_x} \right) \quad (14)$$

空気の流れについては加速域の圧力損失は無視しているので, その場合加速域のため余分に必要な圧力損失すなわち付加加速圧損 Δp_{sac} は次式で与えられる。

$$\Delta p_{sac} = \lim_{\phi \rightarrow \phi_x} (\Delta p_s - \Delta p_{sF}) = \frac{m r_a u_a^2}{g} \cdot \frac{2\phi_m}{\sqrt{\phi_m^2 + 4\zeta_D \phi_m(1 - \phi_m)} - \phi_m} \ln \frac{\{\phi_m^2 + 4\zeta_D \phi_m(1 - \phi_m)\} - \phi_m \sqrt{\phi_m^2 + 4\zeta_D \phi_m(1 - \phi_m)}}{2\zeta_D \phi_m(1 - \phi_m)} \quad (15)$$

なお空気流の加速域の圧力損失は粉体の場合と異なって速度分布が入口、 $l=0$ 、での分布から十分発達した流れの分布になるまでの過程に起因するものである。また、上述の計算は $l=0$ からの輸送管内における損失であって、タンクから輸送管へ入る際の入口損失とは別のものである。更に配管系の圧力損失の計算では管出口でいわゆる速度水頭 $r_a u_a^2/2g$ や $r_m u_s^2/2g$ が損失として考慮されるが、これらも加速圧損とは別のものである。たとえば、式(12)における粉体粒子の加速のみに使用される圧力降下は $r_m u_s^2/g$ であって、粉体の速度水頭とは異なる。

2.4 加速域の長さ

ここで、加速域とは速度や圧力こう配が管下流の十分発達した領域でのそれぞれの値になるまでの領域を意味している。理論的にこれらは無限大の距離を必要とする。しかし実際にはある一定の距離をへて発達した領域となる。したがってこのような現実的な状況に対応させるために、最終的な値のある比率までになる距離として加速域を算出してみよう。この比率をここでは99%と選ぶが、このときその長さは厳密に言えば、速度比 φ や圧力損失で異なる²⁾。ここでは実用的にも重要な圧力損失に対する加速域の長さ l_0 を求めてみる。

$$\Delta p_s(l_0) - \Delta p_{sf}(l_0) = 0.99 \Delta p_{sac} \quad (16)$$

式(13)、(14)、(15)を式(16)に代入すると次式を得る。

In

$$\frac{\{\phi_m - \sqrt{\phi_m^2 + 4\zeta_D \phi_m(1-\phi_m)}\} \varphi(F_{mo}) - 2\phi_m(1-\phi_m)}{2\phi_m(1-\phi_m)} = 0.99 \times$$

In

$$\frac{-\{\phi_m^2 + 4\zeta_D \phi_m(1-\phi_m)\} + \phi_m \sqrt{\phi_m^2 + 4\zeta_D \phi_m(1-\phi_m)}}{2\zeta_D \phi_m(1-\phi_m)} \quad (17)$$

ここでは $\varphi(F_{mo})$ は F_m が $F_{mo} = g l_0 / u_{mg}^2$ での φ を意味する。

2.5 粉体の管摩擦係数

上述の諸量を算出して具体的な値を求めるには粉体の管摩擦係数 λ_m が必要となる。この求め方について述べてみる。等速区間の長さ H 当りの全圧力損失 Δp_F は式(9)、(14)より次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta p_F &= \Delta p_a + \Delta p_{sf} \\ &= \lambda_a \frac{H}{D} \frac{r_a u_a^2}{2g} + m \varphi_x \lambda_m \frac{H}{D} \frac{r_a u_a^2}{2g} + \frac{r_a m}{\varphi_x} H \quad (18) \end{aligned}$$

Δp_a は管内を空気のみが u_a の速度で流れたときの圧損として算出するとすれば、 λ_m を求めるには m 等の他に Δp_F と φ_x を必要とする。 φ_x は測定より求めるのが一番確実であるが、一般に難しい。以下計算によって求め

る方法を紹介する。等速区間では $du_s/dl = 0$ であるので、式(10)より次式を得る。

$$n D_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{r_a (u_a - u_s)^2}{2g} = \lambda_m \frac{1}{D} \frac{r_m u_s^2}{2g} + \frac{G_s}{A u_s} \quad (19)$$

これは等速区間の単位長さ当りの圧力損失 $\Delta p_{sf}/H$ に等しい。ここで Δp_{sf} を次式で定義される付加圧損係数 λ_z で表わしておく。

$$\Delta p_{sf} = (\Delta p_F - \Delta p_a) = m \lambda_z \frac{H}{D} \frac{r_a u_a^2}{2g} \quad (20)$$

式(19)の左辺と、式(20)の右辺を H で割ったものを等しいと置くことにより φ_x が次で求まる。

$$\varphi_x = \frac{1}{1 + (\lambda_z u_a u_{mg} / 2gD)} = \frac{1}{1 + (\lambda_z F_r^2 \phi_m / 2)} \quad (21)$$

ただし F_r は $u_a / \sqrt{gD}$ で定義される管フルード数である。

一方式(14)、(20)より λ_m は λ_z 、 φ_x と次の関係を有する。

$$\lambda_m = \frac{1}{\varphi_x} \left(\lambda_z - \frac{2}{\varphi_x F_r^2} \right) \quad (22)$$

式(22)に式(21)の φ_x を代入することにより λ_m は次式のように与えられる。

$$\lambda_m = \left(1 + \frac{\lambda_z F_r^2}{2} \phi_m \right) \left\{ \lambda_z (1 - \phi_m) - \frac{2}{F_r^2} \right\} \quad (23)$$

従って、圧力損失 Δp_F を測定することにより式(20)から λ_z が求まり、上式より λ_m が求まることになる。

3. 計算

3.1 付加加速圧損

Fig. 1 は無次元付加加速圧損 $\Delta p_{sac} / (m r_a u_a^2 / g)$ を ϕ_m に対して、 ζ_D が u_a の関数でない場合について ζ_D

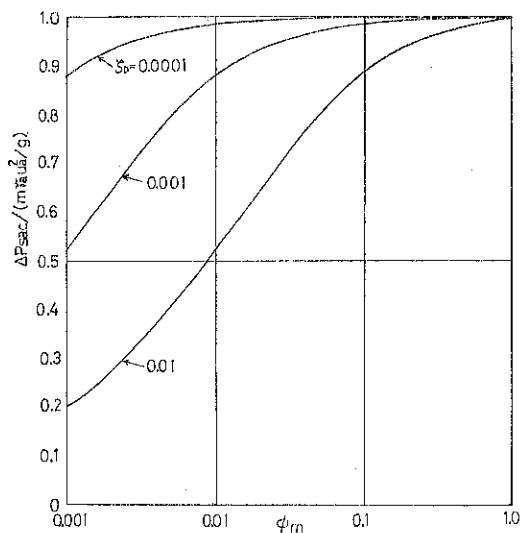


Fig. 1 Non-dimensional acceleration pressure drop

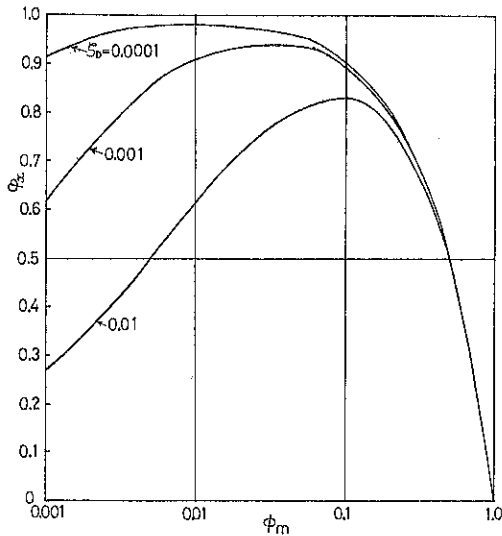


Fig. 2 Terminal velocity ratio

をパラメータとして図示したものである。\$u_a\$ が大きいとき、すなわち \$\phi_m \rightarrow 0\$ の場合、\$\Delta p_{pac}/(m\gamma_a u_a^2/g)\$ は 0 となる。一方、\$u_a\$ が \$u_{mg}\$ に近づくとき、すなわち \$\phi_m \rightarrow 1\$ の場合は、\$\Delta p_{pac}/(m\gamma_a u_a^2/g)\$ は 1 となる。粉体の管摩擦係数が 0 の場合、すなわち \$\zeta_D = 0\$ のときは \$\Delta p_{pac}/(m\gamma_a u_a^2/g)\$ は 1 である。この結果から同じ風速では \$\zeta_D\$ が大きいものほど、\$\Delta p_{pac}/(m\gamma_a u_a^2/g)\$ は小さいということがわかる。これは \$\zeta_D\$ が大きいものほど加速域の長さが短いためと考えられる。\$\zeta_D\$ が \$u_a\$ の関数のときは、各 \$u_a\$ ごとに異なる \$\zeta_D\$ について計算すればよく、たとえば、\$\zeta_D\$ が \$u_a\$ の増加につれて減少する場合には、\$\phi_m\$ の増加につれて図の \$\zeta_D\$ パラメータ群を \$\zeta_D\$ の小さい値の曲線から大きい値の曲線へ横切るように変化することになるであろう。

粉体を初速度 0 から最終速度まで加速するのに必要な圧力損失は \$\phi_x m\gamma_a u_a^2/g\$ である。Fig. 2 はこれを \$m\gamma_a u_a^2/g\$ で無次元化したもの（即ち最終速度比 \$\phi_x\$）を \$\zeta_D\$ をパラメータとして \$\phi_m\$ に対して図示している。\$\phi_m\$ が大きいとき、すなわち \$u_a\$ が小さいときは浮遊速度が占める割合が大きいため付加加速圧損は粉体のこの真の加速圧損より大きくなっていることがわかる。

3.2 加速域の長さ

Fig. 3 は圧力降下に対する加速域の計算例を示す。この場合も \$\zeta_D\$ が \$u_a\$ の関数でない場合を示している。この図から \$\zeta_D\$ が大きいものほど加速域の長さ \$l_0\$ が短くなっていることがわかる。この結果からわかるように \$l_0\$ は極めて短い。この \$l_0\$ は粒体の場合と比べてかなり小

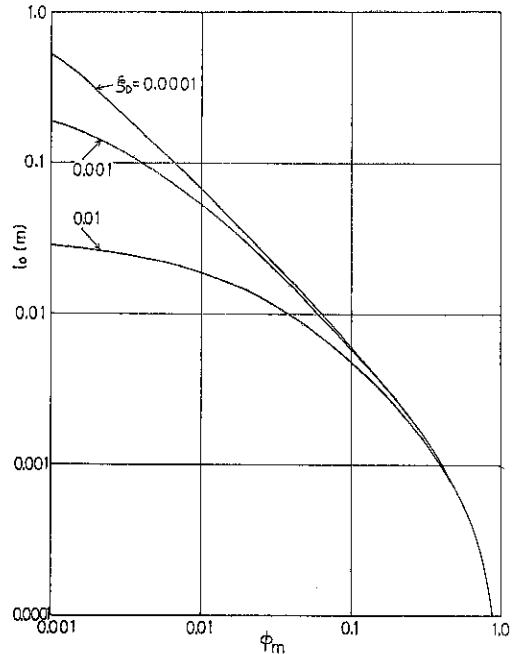


Fig. 3 Acceleration length

さくなっている²⁾。残念ながら本解析と比較しうる明確な実験結果を得ていないので、どの程度実際の長さを示しているかは現時点でははっきりしていない。特に粉体では \$\lambda_m\$ が必ずしも一定とならない場合もあり、本解析より長くなる。

4. 結 論

粉体の垂直空気輸送の低濃度低速輸送の場合について加速領域の長さとして付加加速圧損を理論的に求めた。その結果は粉体の管摩擦係数が小さいものほど加速域の長さが長く、この結果付加加速圧損も大きくなるということが示された。

記 号

- A : 管横断面積
- \$C_D\$: 粉体粒子の空気抵抗係数
- D : 管径
- d : 粉体粒子の直径
- \$F_m\$: 無次元変数 (\$=g/l/u_{mg}^2\$)
- \$F_r\$: 管フルード数 (\$=u_a/\sqrt{gD}\$)
- \$G_s\$: 粉体の重量流量
- g : 重力加速度
- l : 垂直上向き座標
- \$l_0\$: 加速域の長さ

m : 混合比 ($=G_s/Ar_a u_a$)

n : 粉体の個数濃度

Δp_a : 空気流の管壁との摩擦損失

Δp_F : 等速区間の長さH当りの全圧力損失

Δp_s : 粉体による付加圧力損失

Δp_{sac} : 加速域における粉体の付加加速圧損

Δp_{SF} : 等速区間の長さH当りの付加圧力損失

Δp_T : 入口から高さ l までの全圧力損失

u_a : 空気の流れ

u_{mg} : 粉体粒子の浮遊 (終末沈降) 速度

u_s : 粉体の速度

γ_a : 空気の比重

γ_m : 粉体の輸送管内比重

φ : 速度比 ($=u_s/u_a$)

$\varphi(F_{mo})$: $F_{mo}=gl_0/u_{mg}^2$ での速度比

φ_a : 最終速度比

λ_a : 空気の管摩擦係数

λ_m : 粉体の管摩擦係数

λ_z : 付加圧損係数

ϕ_m : 無次元変数 ($=u_{mg}/u_a$)

ζ_D : 無次元変数 ($=\lambda_m u_{mg}^2/2gD$)

引用文献

- 1) 上滝, 「粉粒体の空気輸送」(昭和49年), 日刊工業.
- 2) 富田他2名, 日本機械学会論文集, 42, 364 (昭和51年12月), 3914.

特許一言メモ

公開特許公報

昭和46年以降の出願は, すべて公開されるようになったが, いまだにおかしいなあと思うこと. それは「公開特許公報」「公開実用新案公報」と公報の一番上に太くかかれていることで, まるで“公開特許”“公開実用新案”などという権利でもあるような錯覚を一般の人に与

えてしまうことです. そこで提案をひとつ. 単にこういうものが出願されました, ということにすぎないので「特許出願公開公報」, 「実用新案出願公開公報」というように改称されたら公開公報であることがもっと認識されやすいのでは…… (M. N)



流動層における分散板用多孔板に関する研究

—分散板上の粒子の不動部分の体積について—

Perforated Plate Distributor of Fluidized Bed —Dead Zone Volumes of Particles on Distributor—

田中 勇武*, 葭村 雄二*, 篠原 久*
Isamu Tanaka Yūji Yoshimura Hisashi Shinohara

Abstract

The dead zone volume on the perforated plate distributor of fluidized bed was measured by two methods, these are, the method (1) of measuring the particle mixing ratio by tracer and the method (2) of measuring the fluctuation of pressure by pressure probe.

The dead zone volumes estimated by method (1) fairly agree with ones by method (2).

They are affected by the pitch, the diameter and the number of the hole of distributors.

They decrease and approach to the finite volumes as the increase of superficial gas velocity and mixing time.

The equation by method (2) to estimate the dead volume is shown as follows,

$$V_D = an \left\{ \left(\frac{p^4}{6} - \frac{d^2 p^2}{4} + \frac{\pi d^4}{3} \right) - \sqrt{2} p \left\{ \frac{p^3}{6} (\sqrt{2} + \ln(1 + \sqrt{2})) - \frac{dp^2}{2} + \frac{\pi d^3}{34} \right\} \right\}$$

where

V_D = dead zone volume on the perforated plate distributor [cm^3]

n = number of the hole of perforated plate [—]

p = pitch of perforated plate [cm]

d = diameter of the hole of perforated plate [cm]

a = experimental coefficient [1/cm]

in the case of Toyoura sand (particle diameter = 178μ , particle density = 2.67 g/cm^3 ,

$$u_{mf} = 3.9 \text{ cm/sec}, \quad a = \frac{1.2}{(d - \sqrt{2}p)} \left\{ 1 + \frac{10}{(u/u_{mf} - 1)^2} \right\}$$

u = superficial gas velocity [cm/sec]

u_{mf} = incipient fluidization velocity [cm/sec]

著者摘録

流動層における分散板上に形成される粒子の不動部分の体積を下記の2つの方法を用いて推算した。

- (1) トレーサーを用いて、粒子混合状態を測定する方法
- (2) 圧力プローブを用いて、圧力変動を測定する方法

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

両実験法によって推算された粒子の不動部分の体積はよく一致した。

粒子の不動部分の体積は、多孔板のピッチ、孔径、孔数の影響を受けることが認められた。また、これらの不動部分の体積は、空塔ガス速度と混合時間を増加させれば、減少するが、ある量の不動部分の体積は、必ず残ることがわかった。

なお、本研究で使用した豊浦砂については、(2)の方法によって、多孔板のピッチ、孔径、孔数、および空気ガス速度が既知であれば、多孔板上に形成される粒子の不動部分の体積を推算できる式が得られた。

緒 言

流動層を設計する際に適切な分散板を選定することは、その適否によって流動層の特性が大きく左右されるから、重要であると考えられる。

本報告では、分散板上に存在する粒子の不動部分の体積について検討した。この種の研究としては、数報¹⁻³⁾あるが、まだ精度よく整理されているとはいえない。現在、流動層の分散板としては、多孔板が広く用いられているため、本報告においても、種々の多孔板を用いて、その上に形成される粒子の不動部分の体積を実験的に調べた。すなわち、粒子の不動部分の体積を、2種類の測定方法で求め、各測定値の妥当性を検討し、さらに流速、多孔板種類等の影響を調べた。

Table. 1 Distributor

Distributor No.	d [cm]	p [cm]	n [-]	m [%]
1	0.2	2.0	21	0.84
2	0.1	0.5	317	3.17
3	0.1	0.7	161	1.61
4	0.1	0.9	97	0.97
5	0.15	0.8	121	2.72
6	0.2	1.0	81	3.24
7	0.2	1.2	57	2.28
8	0.2	1.4	37	1.48
9	0.5	4.5	5	1.23
10	0.4	4.5	5	0.8
11	0.4	4.0	5	0.8
12	0.3	3.0	9	0.81

1. 実験装置および実験方法

1.1 粒子混合法

層内粒子の軸方向における混合状態を測定するために、Fig. 1中のAの装置を用いた。ここで使用した分散板は、真鍮製多孔板(1mmの厚さ、正方配列)で Table.

1中のNo.1~No.8である。流動化粒子として用いた豊浦砂は、粒子の静止層高と塔径とが、ほぼ等しくなるように、流動層上部から投入された。ある一定の流速 u [cm/sec]で粒子を流動化させておき、ある時間経過後、トレーサー粒子(豊浦砂とほぼ物性が等しい粒状ソーダ灰($\rho_s=2.54$ g/cm³, $u_{mf}=3.9$ cm/sec, $D_p=182\mu$))

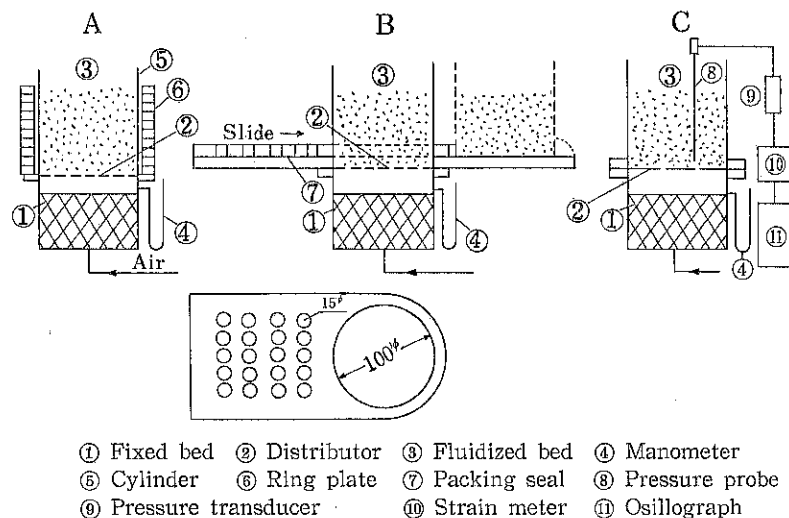


Fig. 1 Experimental apparatus

を用いた。)を瞬間的に上部より投入する。一定時間 θ [sec] 混合させた後、流動化ガスの送入を停止する。その後、Fig. 1 の A 中の亜鉛板製円筒⑤を上方へ抜きとり、各セクション(1 cm 間隔)⑥を横に上部から順にスライドさせ、その区間に存在する流動化粒子の量とトレーサー量を測定する。トレーサーの量は $\frac{1}{10}$ N-HCl を用いる中和滴定によって求めた。この方法で得られる粒子の混合状態は、一旦粒子を静止させた時の状態であるため、気泡などを含んだ実際の流動化時の粒子の混合状態を得るために、Fig. 1 の B の装置を試作した。分散板より 1 cm の高さの面の上下に、図に示すような特殊なフランジを設けた。下面のフランジは固定されていて、その上にゴムシートが張られている。一方、上面のフランジの左側半分は、図に示すように、15 mm 径の穴を 20 個設け、その下面に 200 メッシュの金網を張り、さらに、穴部以外の全部分にゴム製シートを張りつけた。上面のフランジがスライドしやすいように、上下のゴムシート間にグリスが塗られている。横方向に移動させる時に、上分散板 1 cm に存在する粒子群が残こり、空気は 15 mm の穴群を通り抜けるように、また、スライド面の間から空気が洩れないように注意した。実験方法は、前述と同様であるが、次の点で異なる。一定時間 θ [sec] 混合させた時、流動化用空気を止めないで、分散板上 1 cm の高さ以上の塔本体をすばやく横方向にスライドさせ、分散板上 1 cm 以下に残った粒子量とトレーサー量とを測定する。この操作により、分散板上 1 cm の高さ (Grid Zone) における流動化時の粒子混合状態がわかる。

1.2 圧力変動測定法

Fig. 1 中の C にその装置の概略を示す。塔頂からピトー管型圧力測定用プローブ (1.8 mm ϕ) を挿入し、圧力変換器⑨、動歪計⑩、オシログラフ⑪に接続して、層内の圧力変動分布を測定した。測定位置は、上部にとりつけたスケールによって、 $\frac{1}{100}$ mm の精度で半径方向位置と軸方向高さを読めるようにした。分散板には、不動体積部分が生じやすい比較的ピッチの大きい、Table. 1 中の No. 9 ~ No. 12 を用いた。

各実験を通じて流動化粒子としては、豊浦標準砂 ($\rho_s = 2.67$ g/cm³, $u_{mf} = 3.9$ cm/sec, $D_p = 178 \mu$) を用いた。

2. 各測定法による分散板上の粒子不動体積部分の推算式

2.1 粒子混合法

Fig. 2 に示すようなモデルを考える。流動層を分散板

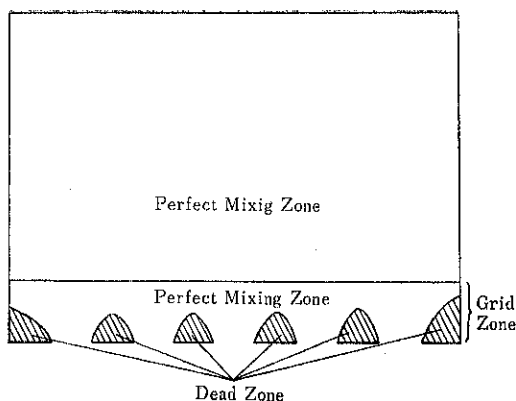


Fig. 2 Mixing model

支配領域 (Grid Zone) とそれ以上に存在する粒子層とに分ける。Grid Zone の一部に粒子の不動体積領域 (Dead Zone) が存在し、他の部分は、完全混合であると仮定すると次式が導出される。(Appendix (1) 参照)

$$V_D = W_s(1 - c/c_0)/(1 - \epsilon)\rho_s\{1 - (c/c_0)(W_s/W_0)\} \quad (1)$$

2.2 圧力変動法

Dead Zone は分散板の孔間に、2 次曲線で示される稜線をもって堆積すると仮定する。その結果、次式を得る。(Appendix (2) 参照)

$$V_D = an\{p^4/4 - d^2p^2/4 + \pi d^4/32\} - \sqrt{2}p[p^3(\sqrt{2} + \ln(1 + \sqrt{2}))/6 - dp^2/2 + d^3\pi/24] \quad (2)$$

係数 a は、実験的に決められる係数である。

3. 実験結果および考察

3.1 粒子混合法

Fig. 1 の A の装置により得られた層内軸方向における粒子の混合状態の一例を Fig. 3 に示す。図からわかるように、分散板直上の部分での混合状態が悪く、他の部分は、ほぼ完全混合状態になっていることがわかる。このため、Grid Zone における混合状態を Fig. 1 の B の装置を用いて詳細に検討した。

3.1.1 混合時間の影響 Fig. 4 にその結果の一例を示す。 $\theta = 60$ sec 以上になると、Grid Zone における c/c_0 は、一定となることがわかる。しかし、その値は 1.0 より小さい。このことは、混合時間を長くしても、ある量の Dead Zone が存在することを示している。

3.1.2 空塔速度の影響 結果の一例を Fig. 5 に示す。図より、 u/u_{mf} が 7 ~ 8 以上になれば、 c/c_0 が一定となることがわかる。しかし、 c/c_0 の値は、1.0 より小

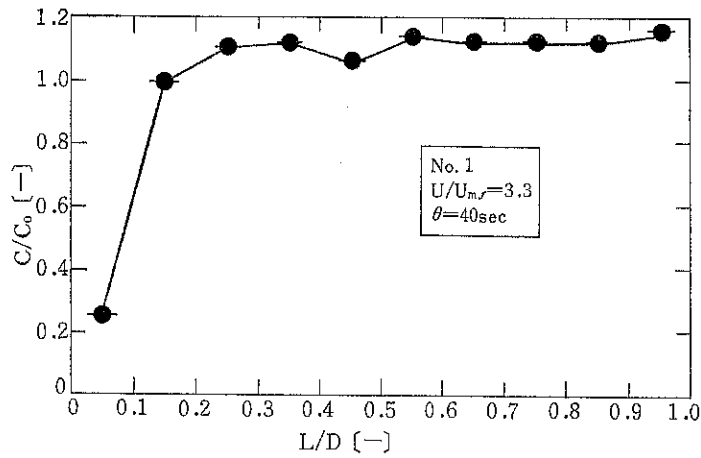


Fig. 3 Effect of height from distributor on mixing ratio

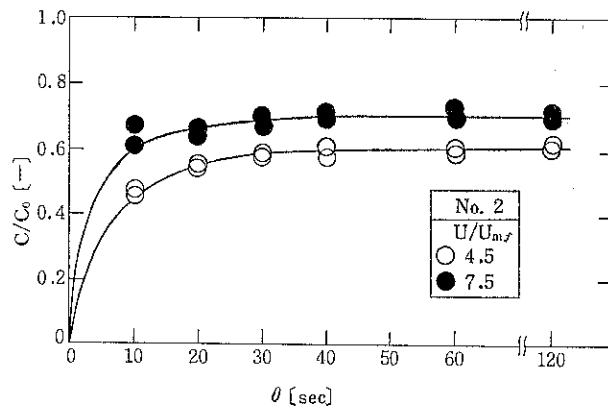


Fig. 4 Effect of mixing time on mixing ratio in grid zone

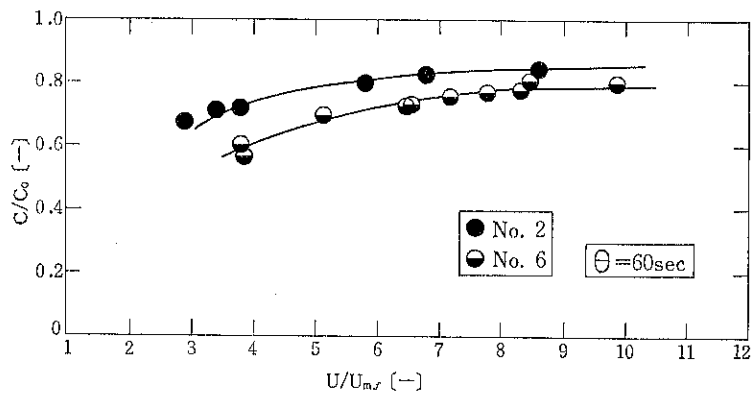


Fig. 5 Effect of superficial gas velocity on mixing ratio in grid zone

い。すなわち、 u/u_{mf} を増加させても、ある量の Dead Zone が、必ず存在することがわかる。

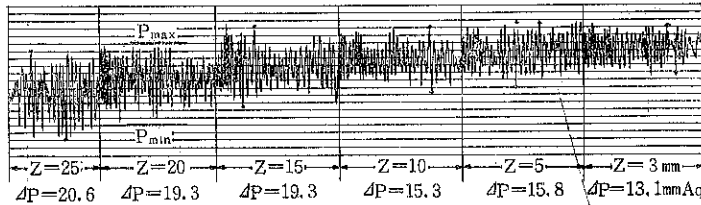


Fig. 6 Pressure fluctuation

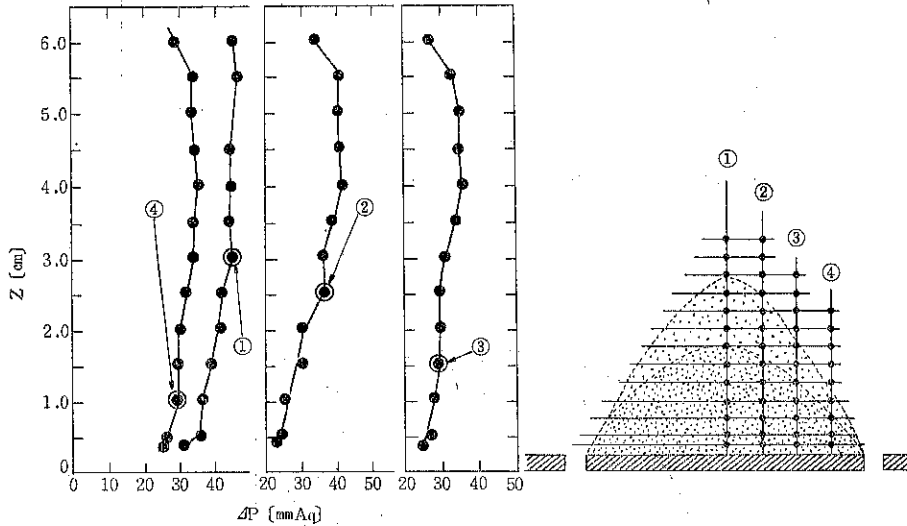


Fig. 7 Effect of height from distributor on fluctuation and measurement point

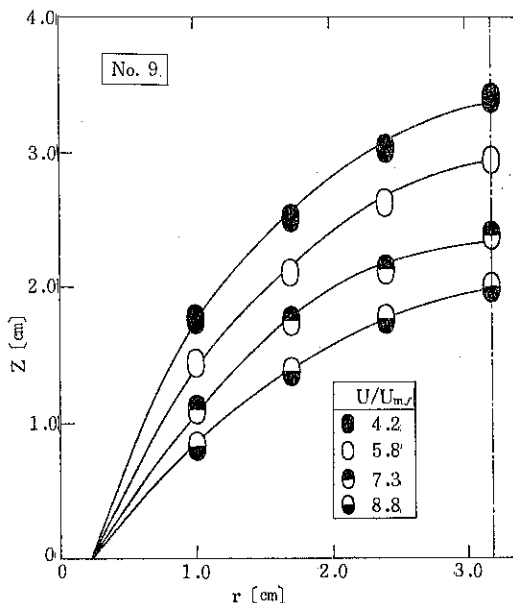


Fig. 8 Dead zone profile measured by fluctuation method

3.2 圧力変動法

測定結果の一例をFig. 6に示す。この圧力変動の最大値 P_{max} と最小値 P_{min} との差を ΔP とする。これと Dead Zone とを関連づけるため、半円筒形装置（図省略）で観察された Dead Zone の形と各位置で測定された ΔP の値をFig. 7に示す。図中の白丸印で示した圧力変動の変化点が、ほぼ Dead Zone の境界点に対応している。すなわち、Dead Zone では、粒子が静止しているため、ガス圧の変動幅 ΔP は小さいが、その領域を越えると、粒子が動いている領域に入るので、 ΔP は大きくなり、その値はほぼ一定となる。このように ΔP は粒子が活発に動いているかどうかを判定する指標になると考えられる。このことより、高さ方向に、最初に生じる ΔP の変化点を知ることによって、Dead Zone の形状を知ることができると推測される。この圧力変動法を三次元の流動層に適用して得られた Dead Zone の稜線の一例をFig. 8に示す。図より、 u/u_{mf} の増加と共に、Dead Zone の高さが小さくなるのがわかる。

このようにして得られた Dead Zone 稜線より Eq.(2) 中の係数 a が次のようにして求められた。 $r=d/2$ に

ける稜線の勾配 $\tan\phi$ を u/u_{mf} に対して整理すると Fig.9を得る。これを石田ら¹⁾にならって、次式で整理した。

$$(dz/dr)_{r=d/2} = \tan\phi = \tan\phi_0 + K/(u/u_{mf} - 1)^2 \quad (3)$$

図の実験点によく合致するように $\tan\phi_0$, K を決定すると

$$\tan\phi_0 = 1.2, K = 12 \quad \text{を得る。}$$

Eq.(3) と Eq.(A-13) より求められた a の値を Eq.(2) に代入すれば、Dead Zone の体積が計算される。

Eq.(2) を Table 1 中の No.1 ~ No.8 の分散板にも適用できるとして、求められた V_D の値を Fig.10-a, 10-b 中の実線で示す。図中の各点は、3.1で得られたデータを Eq.(1) に代入して求めた値を示す。図からわかるように、圧力変動法で得られた Dead Zone の体積は、粒子混合法によって得られた値とほぼ一致する。

このことより、両測定値は、ほぼ妥当であると考えら

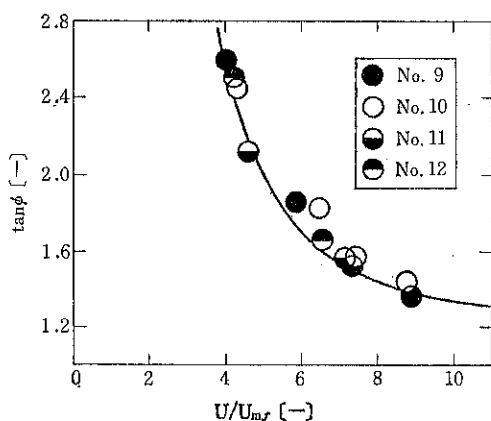


Fig. 9 $\tan\phi$ vs. u/u_{mf}

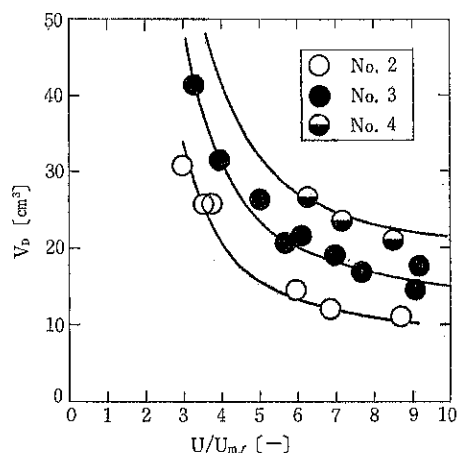


Fig. 10-a Relation between dead zone volumes by mixing method and ones by fluctuation method

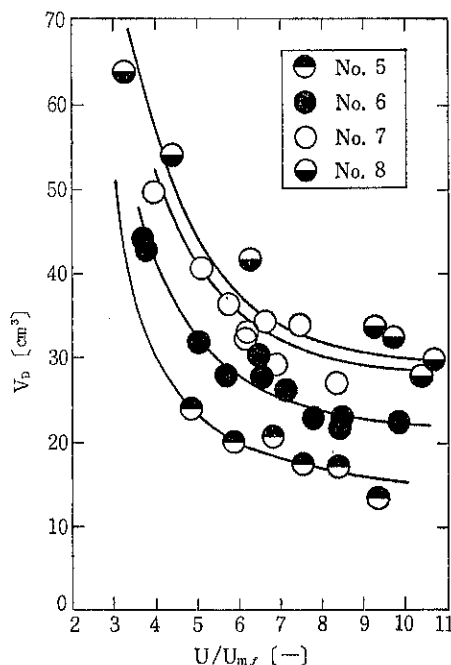


Fig. 10-b Relation between dead zone volumes by mixing method and ones by fluctuation method

れる。本実験では一種の粒子だけを用いたが、他の粒子についてもここで用いた測定法によって、分散板上の粒子の不動体積部分は求められることが予測される。

結 言

- (1) Dead Zone の体積は、混合時間を長くしても、ガス流速を速くしても、必ず存在することがわかった。
- (2) 粒子混合法、圧力変動法で測定された Dead Zone の推算値は、互いにほぼ一致した。
- (3) 本研究に使用した豊浦標準砂については、分散板のピッチ、孔径、孔数および流速がわかれば、Dead Zone の体積を推算できる式が得られた。

Appendix (1)

粒子の収支について

$$W_0 = W_M + W_S = W_M + W_{SM} + W_{SD} \quad (A-1)$$

Grid Zone 中のトレーサー濃度

$$C = \omega_S / W_S \quad (A-2)$$

完全混合領域では

$$\omega_S / W_{SM} = \omega_0 / (W_M + W_{SM}) \quad (A-3)$$

全粒子層が完全混合の場合

$$C_0 = \omega_0 / W_0 \quad (A-4)$$

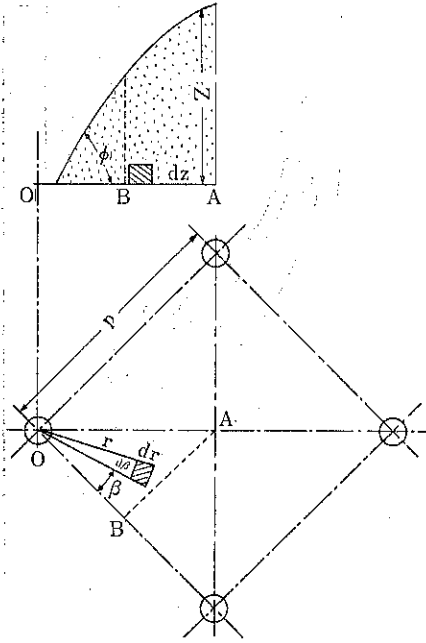


Fig. A-1 Dead zone profile

以上を整理すると

$$W_{SD} = W_S(1 - C/C_0) / \{1 - (C/C_0)(W_S/W_0)\} \quad (\text{A-5})$$

Eq. (A-5) を体積で示すと

$$V_D = W_{SD} / (1 - \varepsilon) \rho_s \quad (\text{A-6})$$

Appendix (2)

Fig. A-1 に示すように、Dead Zone 稜線を次式の二次曲線で近似する。

$$z = ar^2 + br + c \quad (\text{A-7})$$

境界条件

$$\text{孔のまわりでは } r = d/2 \text{ で } z = 0 \quad (\text{A-8})$$

$$r = d/2 \text{ で } dz/dr = \tan \phi \quad (\text{A-9})$$

Fig. A-1 に示すように、A点で、粒子の不動部分の高さは、最大値をとるので、 $r = p/\sqrt{2}$ で、 $dz/dr = 0$

$$(\text{A-10})$$

Eq. (A-8) を Eq. (A-7) に代入し、 c を求めて整理すると

$$z = a(r^2 - d^2/4) + b(r - d/2) \quad (\text{A-11})$$

Eq. (A-11) に Eq. (A-10) を代入して

$$b = -\sqrt{2}ap \quad (\text{A-12})$$

Eq. (A-11) に、Eq. (A-9) を代入し、Eq. (A-12) の関係より、

$$a = \tan \phi / (d - \sqrt{2}p) \quad (\text{A-13})$$

Fig. A-1 のような微小体積 $rd\beta dr dz$ を考えて、孔 1 個あたりの粒子の不動部分の体積を求めると

$$V_D/n = 8 \int_0^{\pi/4} d\beta \int_{d/2}^{p/2 \cos \beta} r dr \int_0^z dz \quad (\text{A-14})$$

Eq. (A-11) を代入して

$$= 8 \int_0^{\pi/4} d\beta \int_{d/2}^{p/2 \cos \beta} r \left[a(r^2 - \frac{d^2}{4}) + b(r - \frac{d}{2}) \right] dr \quad (\text{A-15})$$

$$= 8 \int_0^{\pi/4} \left[a \left(\frac{r^4}{4} - \frac{d^2 r^3}{8} \right) + b \left(\frac{r^3}{3} - \frac{dr^2}{2} \right) \right]_{d/2}^{p/2 \cos \beta} d\beta \quad (\text{A-16})$$

$$= \frac{ap^4}{8} \int_0^{\pi/4} \frac{d\beta}{\cos^4 \beta} - \frac{ad^2 p^2}{4} \int_0^{\pi/4} \frac{d\beta}{\cos^2 \beta} + \frac{bp^3}{3} \int_0^{\pi/4} \frac{d\beta}{\cos^3 \beta} - \frac{bd^2 p}{2} \int_0^{\pi/4} \frac{d\beta}{\cos^2 \beta} + \left(\frac{\pi}{4} \right) (ad^4/8 + bd^3/6) \quad (\text{A-17})$$

ここで、

$$\int_0^{\pi/4} \frac{d\beta}{\cos^4 \beta} = \frac{4}{3}, \quad \int_0^{\pi/4} \frac{d\beta}{\cos^2 \beta} = 1, \quad \int_0^{\pi/4} \frac{d\beta}{\cos^3 \beta} = \frac{\sqrt{2} + \ln(1 + \sqrt{2})}{2}$$

以上整理すると、

$$\frac{V_D}{n} = a \left(\frac{p^4}{6} - \frac{d^2 p^2}{4} + \frac{d^4 \pi}{32} \right) + b \left[\frac{p^3}{6} (\sqrt{2} + \ln(1 + \sqrt{2})) - \frac{dp^2}{2} + \frac{\pi d^3}{24} \right] \quad (\text{A-18})$$

Eq. (A-18) に Eq. (A-12) を代入して Eq. (2) を得る。

使用記号

D	= 流動層直径 (=10cm)	[cm]
D_p	= 重量基準50%通過粒子径	[μ]
d	= 多孔板孔径	[cm]
L	= 静止粒子層高 (=10cm)	[cm]
m	= 多孔板開孔比	[%]
n	= 多孔板孔数	[-]
p	= 孔のピッチ	[cm]
r	= 孔中心からの距離	[cm]
u, u_m	= 空塔ガス速度および流動化開始速度	[cm/sec]

V_D = 粒子の不動部分固体積 [cm³]

$W_0, W_M, W_S, W_{SM}, W_{SD}$ = 粒子全保有量, 分散板支配領域外にある完全混合状態の粒子量, 分散板支配領域にある粒子量, その領域でかつ完全混合状態にある粒子量, その領域にある不動

粒子量 [g]
 z = 分散板から粒子の不動体積部分の稜線までの高さ [cm]
 ε = 空隙率 [-]
 θ = 混合時間 [sec]
 ρ_s = 粒子の密度 [g/cm³]
 ϕ = 分散板と、粒子の不動部分の稜線とのなす角度 [deg]
 ω_0, ω_s = 各々、全、分散板支配領域に存在する、ト

レーザー量 [g]

参 考 文 献

- 1) 石田愈, 白井隆; 第31年会講演要旨集 (化学工学協会), 43 (1966)
- 2) Makishima, S. and T. Shirai; *J. Chem. Eng. of Japan* 2, 124 (1969)
- 3) 牧島信一, 白井隆; 第34年会講演要旨集 (化学工学協会) 176 (1969)

新製品ひとこと

レベル制御機 ホソカワ/ミクロン フローレベラー

従来からの粉体レベルの計測は、おもにホッパーなど容器内の粉体量を計測するのが目的であり、粉体流量や粉体物性の測定ほど厳格でなくても良いのが普通でした。しかし、粉体プロセスの自動化が進むにつれて容器内の静的レベルの検出だけでなく、動的な状態にある粉粒体のレベル計測やレベルコントロールが必要となってきました。

弊社では先に連続混合装置、ホソカワ/ミクロン ランミックスシステムを発表いたしました。混合槽内で攪拌翼によって流動している粉体のレベルコントロールを目的としてホソカワ/ミクロン フローレベラーを開発しました。

本機は、貯槽内における静止した粉体層のレベル計ではなく、攪拌混合槽内におけるような流動状態にある粉体レベルの制御装置であります。粉体の流動によって受ける検出羽根の傾斜角から粉体レベルを検出し、供給機

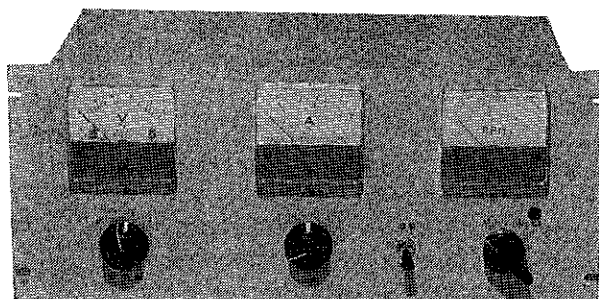
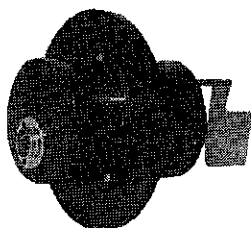
あるいは排出機へ制御信号を送って粉体レベルを精度よく一定に保つことができます。

フローレベラーの特長をまとめると次のような点があげられます。

- 1) 流動状態にある粉体層のレベルコントロールが可能である。
- 2) レベルコントロールの精度が高い。
- 3) 検出部が小型で、装置への取り付けも容易である。

仕 様

レベル検出部 寸法	200×100 ^φ mm
制 御 函 寸 法	450×200×220mm
入 力 電 源	100V, 100VA, 50/60Hz



研究報告

連続粉砕のシミュレーションの基礎に関する 概念的考察と若干の実験*

Conceptual Studies and Some Experimental Tests on Simulation
Fundamentals of Continuous Grinding.

岡野 靖彦**, 太田 元**
Yasuhiko Okano Hajime Ohta

Abstract

According to a review by the authors, it has been likely thought possible to simulate mathematically a continuous grinding process by combining so-called selection and breakage functions with a retention time distribution of particles.

Usually the former functions are obtained from a batch grinding test, while the retention characteristics from continuous one through free-from-grinding tracers. The authors, therefore, tried to get some more realistic information by conducting a continuous grinding test in which in-mill conditions could be revealed.

Although in a qualitative explanation the results are summarized as follows:

An optimum feed rate inducing a favorite in-mill condition results in a high energy efficiency. On the other hand an extremely low or high feed rate leads to a mixing or a piston flow respectively with no selective discharge of product resulting in an inferior efficiency. Those experimental results seem to suggest that there exists a mutual dependence between grinding and retention characteristics in the continuous ball milling process.

1. はじめに

「粉砕」ほど歴史が古くまた多くの製造プロセスの基礎となる単位操作は他に見当たらない。

ところが「粉砕」の実験は力は要るし、ほこりまみれになったり、ふるい分け試料が山ほど出てきたりして大変なものである。

したがって種々の条件下での粉砕結果を机上で予測することのできる粉砕シミュレーション技術の達成は大いに望まれるところである。

近年活発に行なわれている粉砕の速度論的研究と電算機の普及および各種トレーサ技術の進歩^{1),2)}が、粉砕プロセスのシミュレーションの発展の推進力となっていることは言うまでもない。

すなわち、注目した粉砕機における粉砕の速度過程と粒子の滞留特性とを数式の上で結合させることによってシミュレーションが試みられているのである。

本報ではボールミルによる粉砕を前提として連続粉砕プロセスのシミュレーションに関する研究の動向を展望したのち、それが動機となって行なった若干の基礎的実験の結果について報告する。

2. シミュレーションに関する 従来の研究

ボールミルによる連続粉砕プロセスのシミュレーションを目指す場合、前述のように当該プロセスを粉砕過程と運搬過程とに分離して注目し、前者に関しては粉砕動力学的な考察を、後者にはプロセス動特性の観点からの考察を適用するというのが、一般的に行なわれる方法で

* 本報は第33回セメント製造技術シンポジウム(51年11月大阪)における講演の一部と、ドイツセメント協会主催のセメント製造プロセス工学に関する国際会議(52年9月デュセルドルフ)における研究発表¹⁶⁾の一部にデータを補充し、検討を加えたものからなっている。

** 東京大学工学部資源開発工学科
(〒113 文京区本郷7-3-1)
Tel (03) 812-2111 (内3120)

ある。ここではこのような思想に関連した従来の研究を展望する。

2.1 粉砕動力学または粉砕速度論

ボールミルをはじめ多くの粉砕機がそうであるように、単一粉砕事象が繰り返し起こるような粉砕プロセスにおいては、当該プロセスを速度過程としてとらえること、つまり粉砕プロセスの速度論的考察が必須となる。単位破壊現象の繰り返しとして粉砕プロセスを数学的に記述するために、単位破壊産物の粒度分布、つまり破壊関数 $B(x, y)$ がはじめて提示されたのは、1941年 Brown によってであり、これが今日の解析的粉砕速度論発展の口火となったと言えよう。1947年には Epstein が破壊現象を2つの関数、つまり被粉砕体が破壊される確率を表わす選択関数 (selection function) と、破壊された結果どのような粒度分布となるかを表わす破壊関数 (breakage function) との結合によって表現することを提案した。彼は前者については粒度に関係ない一定の確率 (π) を想定し、後者については破壊前の粒度 (y) と破壊後の粒度 (x) の比率を唯一の独立変数として関数が正規化されるとした。

この選択関数および破壊関数による考え方はその後多くの研究者、たとえば Sedlatschek ならびに Bass, Theimer, Brenner ならびに Vidmajer, Broadbent ならびに Callcott, Filipov, Gaudin ならびに Meloy および Gardner ならびに Austin らに受け継がれ R I (放射性同位元素) を用いた実験方法および電算機の導入による数値解法の駆使によって、実験的にも理論的にも着実に発展している⁸⁾。なかんずく、Broadbent ならびに Callcott によるマトリックス表示法は電算機の普及に伴いリバイバルし、最近その適用を試みる例が多くなっている。

上述のように発展してきた粉砕速度論の分野で今のところ問題となっている点を要約すると次のごとくである。

i) 選択関数 $S(x)$ が x の単純な関数形にはなりにくいこと。
ii) 選択関数 $S(x)$ および破壊関数 $B(x, y)$ の時間依存性。一般に $B(x, y)$ は時間に依存せず、また $S(x)$ も時間に関係しないとする、つまり1次の粉砕速度過程が成り立つとする場合が多かったが、粉砕時間の経過にともないミル内粒子の粒度分布すなわち粉砕雰囲気の変化することから、最近では $S(x)$ の時間依存性が問題にされるようになってきている。因みに Huyet は粉砕時間のこのような影響が反映されている経験式を提案した⁴⁾。

他方、粉砕産物の表面積あるいは各種の粒度 (分布)

特性値の時間的変化を主として実験的に把握し数式化するというタイプの粉砕速度論も展開されてきた。たとえば注目した粒度に関する残分量の時間変化を記述したアンドレーエフの式⁵⁾がとくにソ連圏において実用面に広く適用されている。

2.2 粒子のミル内滞留特性

ミル内滞留特性に関する1つの因子としてまず「ホールドアップ」、すなわち連続ミルにおいてミル内に保持される被粉砕体の量に注目し系統的な実験を行なった Kelsall⁶⁾ の研究が挙げられる。すなわち、湿式オーバフロー型のボールミルにおいて、たとえばフィードの粒度がホールドアップに及ぼす影響が調べられている。また著者らの実験⁷⁾によって、同じタイプのミルにおいてフィード量の変化がホールドアップに及ぼす影響が調べられている。

このホールドアップをフィード量で除すると、被粉砕粒子のミル内滞留時間の平均値が求まることは論を俟たないが、平均値だけでなく、さらに分布の形をも調べるための努力が払われているのは勿論である。

この滞留時間分布はプロセス動特性に関する種々の試験方法の適用によって実験的に求められるが、広く採用されるインパルス応答法の場合、粉砕作用の影響を受けない物質をトレーサとして選ぶのが普通である。たとえば水中のイオン (湿式粉砕の場合)、極微細粒子あるいはある特定の化学成分などを利用するのである^{6), 8)}。また逆に粉砕作用そのものを除去してしまう方法として、軽い材質のボールを用いた非粉砕ミルを使用し、滞留特性に及ぼすフィードの量、粒度あるいは他の機械的条件の影響を調べた研究⁹⁾もある。

このようにミルのいわゆる混合特性を調査した結果は、一般にミル軸方向の1次元拡散モデルによく当てはまると言われている。

2.3 連続粉砕プロセスのシミュレーション

被粉砕粒子のミル内滞留特性に完全混合およびピストン流を想定して連続式粉砕の方程式を記せば、それぞれ (1)式および (2)式のごとくである¹⁰⁾。

$$P_R(x) = P_F(x) + (W/F) \int_x^{y_{\max}} [dP(y)/dy] S(y) \cdot B(x, y) dy \quad (1)$$

(完全混合の場合)

$$P_R(x) = P_F(x) + \int_0^t \int_x^{y_{\max}} [\partial P(y, t)/\partial y] S(y) \cdot B(x, y) dy dt \quad (2)$$

(ピストン流の場合)

ここで、

$P_F(x)$: フィードの粒度分布関数 (通過分)

$P_R(x)$: 産物の粒度分布関数 (通過分)

$P(x)$: ミル内粒子群の粒度分布関数 (通過分)

x, y : 粒度

F : フィード量

W : ホールドアップ

t : 時間

$\bar{t}$: 平均滞留時間, $\bar{t} = W/F$

$S(x), B(x, y)$: それぞれ選択関数, 破壊関数

これらピストン流および完全混合は前述の拡散モデルの中に、Bodenstein 数の大小の両極端の場合として包含されることは周知の通りである。現実にはこれらの中間の滞留特性がみられることを前節(2・2)は示唆しているが、実際に粉砕作用を受ける粗大な粒子の滞留時間分布についての情報が不足しているのは問題である。因みに Schönert¹¹⁾ は連続粉砕プロセスを対流-拡散-粉砕の組み合わせたプロセスとしてモデル化し、その中で粉砕を伴わない運搬過程は対数正規分布で近似されることを示し、このような場合の拡散モデルの適合性を認めている。また、Mika¹²⁾ はミル軸方向に拡散過程を推定することの意義を電算機シミュレーションによって検討している。さらに Olsen¹³⁾ はミル内の粒子の通過速度分布を表わす行列演算子を導入している。

なお2・1節の末尾で触れたアンドレーエフの式を基礎として連続粉砕プロセスをモデル化し諸変数の間の関係をノモグラム化して、設計、管理の実用面に利用することが行なわれてはいるが¹⁴⁾、この種の方法では連続粉砕プロセスについて精度の高い普遍的な数学モデルの作成、あるいはそのための基礎に関する情報の獲得は不可能であろう。

3. 問題点と若干の基礎的実験

ここでは、上述の展望に伴って著者らに生じた疑問点を掲げ、それを解明すべく、緒についた基礎実験の若干の結果について説明する。

3.1 問題点

連続式ボールミル粉砕プロセスにおいて、ボールミル自体の粉砕機能と被粉砕粒子のミル内滞留特性を別個に論ずることの妥当性はどうか。つまり両者の間には相互依存性があるのではなからうか。

2・3節で紹介した Mika¹²⁾ の研究では両者間の相互関係に触れ、滞留特性に拡散モデルを想定すれば、粉砕過程そのものには単純な線形モデルを適用しても、シミュレーション結果は良好であると述べているが、実験データの提示による現実との対比が不十分のように思われる。

また、Olsen¹³⁾ による演算子(2・3節)は、被粉

砕粒子のミル内滞留特性の粒度依存性すなわち一種のミル内分級特性を表わすものであるが、ミル内を完全混合とみなしている点非現実的と言えよう。

3.2 基礎的実験

3・1の問題点を究明すべく下記のような実験を行った。すなわち乾式ボールミルによる連続粉砕プロセスを実験室において実現させ、定常状態におけるミル内の状況を調べることによって、粒子の粉砕現象と滞留現象が同時に進行している条件下での両者の特性を明らかにするような何らかの情報を得られるものと期待したわけである。

3.2.1 装置および方法

使用したボールミルの要目は下記のごとくであり、このボールミルと振動フィーダならびに粉粒体流量計による定量供給装置およびミルディスチャージ流量の連続測定部とによって実験システムは構成されている。

ボールミル要目：シリンドリカル型 (240 mm ϕ $\times$ 240 mm)、回転速度 66.7 rpm (臨界速度の77%)、目皿板 (開孔率3%) による排出方式、装入ボール (20 ~ 30 mm) 12.5 kg

所定の定常状態に達したのちボールミルを停止させミル内部上方の空間に、軸方向に4区分された半円筒形のサンブラを挿入し、ミルを静かに半回転させてミル内容物(ホールドアップとボール)をサンブラ内に捕収する。すなわちホールドアップをミル軸方向に4つに区分して捕捉することにより、ホールドアップのミル軸方向の変化を把握するためである。当該実験システムとサンプリング方法の模式図は別報¹⁵⁾ に示されている。なお粉砕試料はほぼ整粒された (0.84 ~ 1.68 mm 90%) 石英粒子である。

フィーダ量を数段階に選んで連続粉砕を行ない、定常状態に達したのち産物とともに上述の方法でミル内粉粒体のサンプルをも採取した。

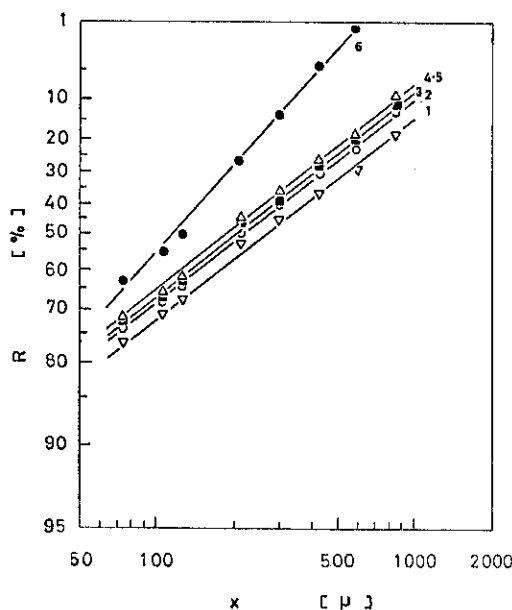
また比較のため同一のミルを用いて回分式粉砕を行なった。とくにそれぞれの連続粉砕に対応させるために粉砕試料装入量をホールドアップ量に、粉砕時間を平均滞留時間 (ホールドアップ量/フィーダ量) に合わせた回分粉砕に重点をおいた。

なおサンプルの粒度分析は乾式標準ふるい分け方法によって行なった。粒度分析結果の Rosin-Rammler 線図への適合性は良好であった。

3.2.2 実験結果

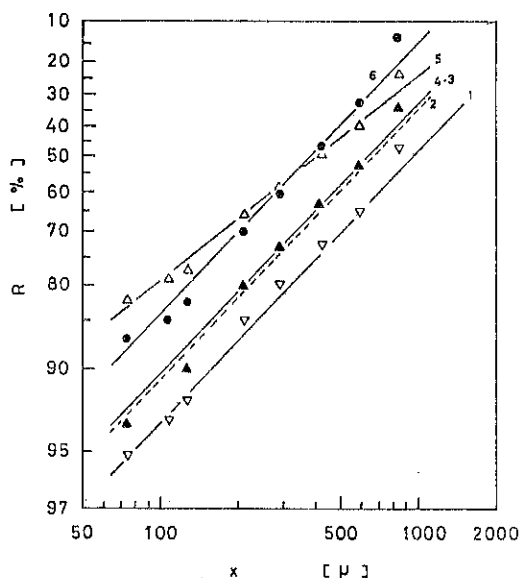
代表的な実験結果を Fig. 1 ~ 4 に示す。

Fig. 1 ~ 3 はそれぞれ代表的なフィーダ量の場合に関

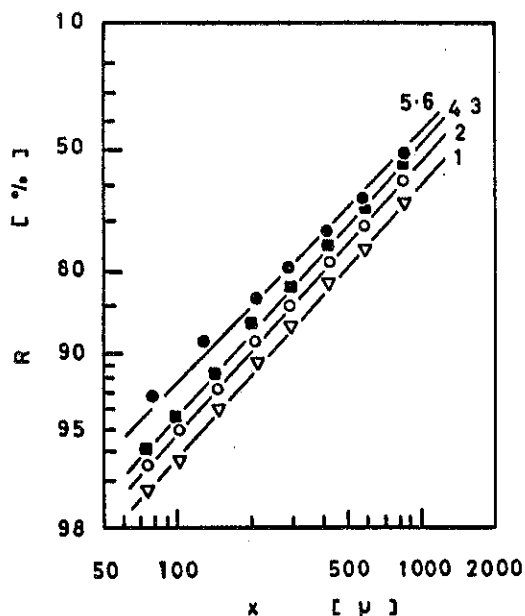


(フィード量 75 g/min の場合)
Fig. 1 Rosin-Rammler 線図

する結果であって、図中 1, 2, 3, 4 はミル軸方向に 4 分して採取されたホールドアップのそれぞれにフィード口からディスチャージ口に向って付した番号であり、5 は当該連続粉碎産物、6 は対応する回分粉碎産物を指している。Fig. 4 は今回行なった回分粉碎の結果をまとめて示したものである。



(フィード量 200 g/min の場合)
Fig. 2 Rosin-Rammler 線図



(フィード量 375 g/min の場合)
Fig. 3 Rosin-Rammler 線図

3.2.3 考 察

これらの粒度分布線図を検討することによって、次のように推測することができよう。

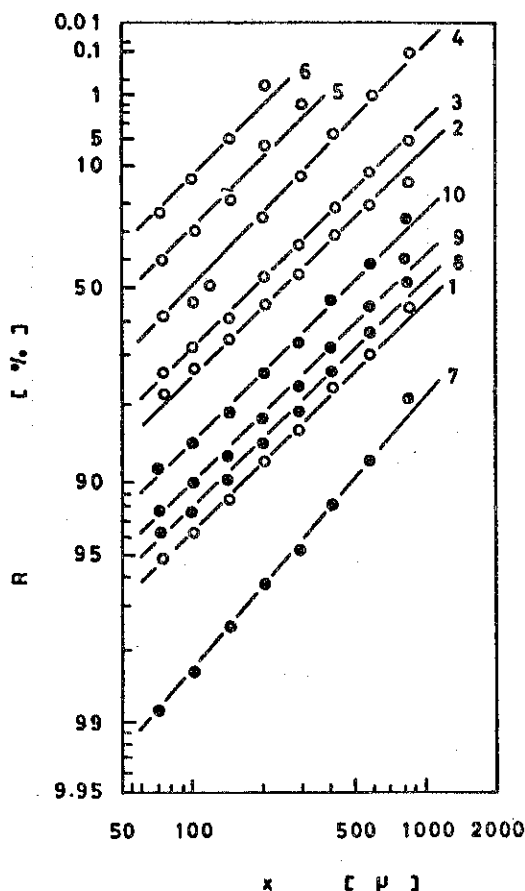
フィード量が少ない場合 (75 g/min) と多い場合 (375 g/min) の何れにおいても、粒度分布曲線 4 と 5 がほぼ一致していることから、粒度に関する選択的ディスチャージいわゆるミル内分級の効果は見られない。さらに粒度分布曲線 5 と 6 を比較することによって、それぞれの場合にミル軸方向の混合流およびピストン流が推察される。中間的なフィード量 (200 g/min) の場合は粒度分布曲線 4 と 5 が著しく異なっていることから、何らかのミル内分級効果が存在するものと思われる。

一方、粉碎エネルギーの観点に立ってこれらの結果を検討してみよう。粉碎における粒度変化とエネルギーとの間の関係式として Charles の式¹⁶⁾は良く知られるところである。そこで Bond の法則¹⁷⁾を前提とし、粒度分布に Rosin-Rammler 分布を想定して得られる同種の式(3)を利用して、今回の連続式ならびに回分式粉碎試験の結果を、粉碎時間—粉碎エネルギー線図上にプロットしたのが Fig. 5 である。

$$\epsilon = c \left\{ \frac{1}{\sqrt{d'_f}} \Gamma \left(\frac{n_f - 0.5}{n_f} \right) - \frac{1}{\sqrt{d'_p}} \Gamma \left(\frac{n_p - 0.5}{n_p} \right) \right\} \quad (3)$$

ここで、

ϵ : 単位重量のフィード (d'_f, n_f) を産物 (d'_p, n_p)
まで粉碎するのに必要なエネルギー



回分粉碎の場合

直線 No.	試料装入力 [g]	粉碎時間 [min]
1	826	2
2	"	5
3	"	8
4	"	11, 16
5	"	18
6	"	26
7	1590	1.23
8	"	4.25
9	"	5.3
10	"	7

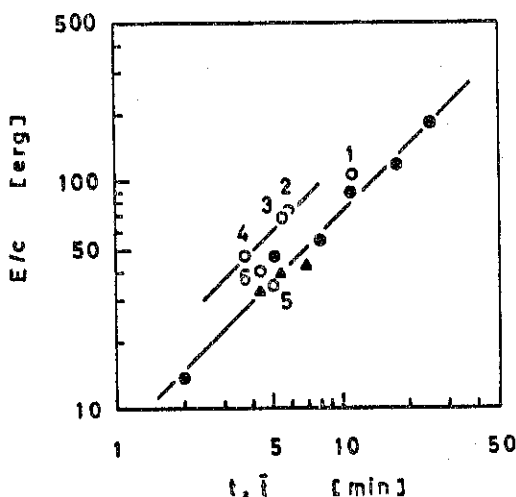
Fig. 4. Rosin-Rammler 線図

d'_f, n_f, d'_p, n_p : Rosin-Rammler 分布におけるパラメータ (添字 f, p はそれぞれフィードおよび産物を意味する)

c: 定数

両対数プロットによる Fig. 5 において, 結果を近似的に勾配 1 の 2 本の直線で整理してある。

これによると, まず回分粉碎の結果は大体下方の直線



●, ▲.....回分粉碎結果

1~6.....連続粉碎結果

(それぞれフィード量 75, 113, 161, 200, 250, 375 g/min の場合)

Fig. 5 粉碎時間と粉碎エネルギーの関係

上にのる。したがって, 試料装入量のかなり広い範囲 (Fig. 4 参照) にわたって, 粉碎エネルギーが粉碎時間に比例している。このことは今回の回分粉碎ではもっぱら 0 次の粉碎速度過程が支配的であったことを暗示しているものと思われる。この直線の縦軸切片は単位時間当りの粉碎エネルギーつまり一種の粉碎エネルギー効率を与える。一方, 連続粉碎結果のプロット (図中の 1~6) をみると, 大小両極端のフィード量の場合 (図中の 1, 5, 6) は回分粉碎と同一の直線上にのっているが, 中間的なフィード量の場合 (図中の 2, 3, 4) は上方の直線上に集まっており, エネルギー効率が上がっている。つまり, 前記の Fig. 1~3 の結果を粉碎エネルギー効率の観点からみると, Fig. 1 および Fig. 3 では, 回分, 連続ともに効率は同一であるが, Fig. 2 では連続粉碎の方が効率が高い。この粉碎効率の向上は, 流れ特性すなわち粒子の滞留特性の変化 (粒度に関する選択的なディスチャージ効果のあらわれ) に伴って, 粉碎特性そのものの変化—— Fig. 2 の 1, 2, 3, 4 の傾斜と Fig. 4 の直線群の傾斜がほぼ一致していることから, とくに選択関数の変化が考えられる——が生じていることを示唆するものと思われる。

4. おわりに

連続粉碎プロセスのシミュレーションの基礎としてのミル内の粉碎過程と運搬 (滞留) 過程に関する特性は, 従来別個に試験, 検討されている。本報では連続粉碎の

ミル内の状態を実験的に調べることによって、両者が合
わせ起る現実的な条件下で両特性に関する何らかの知見
を得ることを試みた。その結果両特性の間には相互依存
性のみられる場合があり、両者を全く切り離して論ずる
ことの不適切さを示唆するようなデータが得られた。今
後はより多くの実験結果を蓄積した上で解析を進め、こ
の点に関して定量的な検討を行ないたいと思っている。

参 考 文 献

- 1) R. P. Gardner and L. G. Austin: "A Chemical Engineering Treatment of Batch Grinding," Proc. 1st European Symposium Zerkleinern, Dusseldorf, Verlag Chemie 217-246 (1962).
- 2) A. Merz and O. Molerus: "Ermittlung der Transportkoeffizienten von Schüttgütern in einen Drehrohr und ihre Abhängigkeit von Korngrösse und Markierungsfunktion," 3rd European Symposium Zerkleinern Paper III-3 (1971).
- 3) L. G. Austin: "Introduction to the Mathematical Description of Grinding as a Rate Process," Powder Technology, 5, 1-17 (1971/1972).
- 4) G. Huyet: "Mathematical Model of Wet Grinding of Ores," XIIMPC (1975) Paper No. 7.
- 5) С. Е. Андреев, В. В. Товаров, В. А. Перов: "Закономерности измельчения и исчисление характеристик гранулометрического состава." Москва.
- 6) D. F. Kelsall, K. J. Reid and C. J. Restarick: "A Dynamic Investigation of Continuous Grinding in a Small Wet Ball Mill," AIMM No. 2 21-32 (1966).
- 7) 今泉常正, 井上外志雄, 岡野靖彦: "湿式ボールミル粉砕回路の静特性に関する2, 2の考察", 日本鉱業会誌 84 [960] 433-439 (1968).
- 8) Y. Mori, G. Jimbo and M. Yamazaki: "Flow Characteristics of Continuous Ball and Vibration Mill, Mixing, size distribution, dynamic response of flow rate and applications," 2nd European Symposium Zerkleinern Paper F-1 (1966).
- 9) R. Keienburg, H. M. V. Seebach und F. Strauss: "Einfluss von Durchsatz, Mahlkörperfüllung und Austragswand auf den Mahlgutfüllungsgrad und Mahlgut-Verweilzeitverteilung in Rohr-Mühlen," 3rd European Symposium Zerkleinern, Paper III-4 (1971).
- 10) L. G. Austin, R. R. Klimpel and A. N. Beattie: "Solution of Equation of Grinding," 2nd European Symposium Zerkleinern Paper B-4 (1966).
- 11) Von K. Schönert: "Eine mathematische Beschreibung des kombinierten Prozesses "Konvektion-Diffusion-Zerkleinern", 3rd European Symposium Zerkleinern Paper II-1 (1971).
- 12) T. S. Mika: "Application of a distributed parameter model for a continuous grinding mill at steady state," Transactions IMM 239-249 (1975).
- 13) T. Olsen and S. R. Krogh: "A low order model of continuous ball mill grinding," XI IMPC Paper No. 5 (1975).
- 14) Б. И. Кауль, Б. А. Коряков, В. М. Савойский, А. Н. Марюта: "Определение регулировочных характеристик двухстадийного цикла измельчения на НКГОКе," Известия ВЧЗ Горный Журнал, No. 1, 161-167 (1965).
- 15) Y. Okano and T. Imaizumi: "Ball mill - not as a black box," VDZ Kongress (1977)
- 16) R. J. Charles: "Energy Size Reduction Relationships in Comminution," Mining Engineering, Jan. 80-88 (1957).
- 17) 今泉常正: 粉砕理論概説: 日本鉱業会誌, 80 [909] 172-175 (1964).

ホッパーからの粉粒体の自然流出速度

Flow Rates of Bulk Solids through Hoppers

五十嵐平太郎*
Heitarō Igarashi

1. 緒 言

粉粒体貯槽および供給容器の設計・操作においては、粉粒体の力学的挙動に関する知識が不可欠であり、これまで多くの研究がなされてきた。それらの研究を大まかに分類すれば、(i) 粉粒体の応力 (ii) フローパタン (iii) 流出速度となるであろう。これらは互に密接に関係しているが、ここでは (iii) に関する研究のみをとりあげることとする。

オリフィスおよびホッパーからの流出速度に関する研究報告は多数あり、それらのレビューや著書の数も多い (文献 9, 19, 21, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 42, 44, 48, 49, 50, 59, 61, 70, 71, 72)。また、最近報告された関連文献もかなりの数にのぼる。

本稿ではホッパーからの流出速度の問題に絞り、既往文献を系統的に整理するとともに筆者の考えの一端を述べ、今後の研究の進展の一助としたい。

粉粒体の流出に 関与する 物体力としては、(i) 重力 (ii) 振動力 (iii) 遠心力 (iv) 流体抵抗による強制力などが考えられるが、ここでは、重力による大気中での自然流出の場合に限定する。

2. 円錐形ホッパー

工業上多く使用されているホッパーは Fig. 1 に示す円錐形ホッパーである。ホッパー壁の角度として、普通、角 θ が用いられるが、角 α または β も使用される。

2.1 特定条件下における実験データ

Залогин ら⁷⁴⁾ (1960) は流出速度に及ぼす壁の傾斜角の影響を調べるために、砂および流動性の良い粉粒体

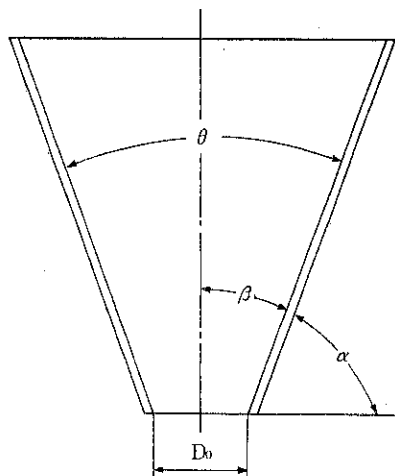
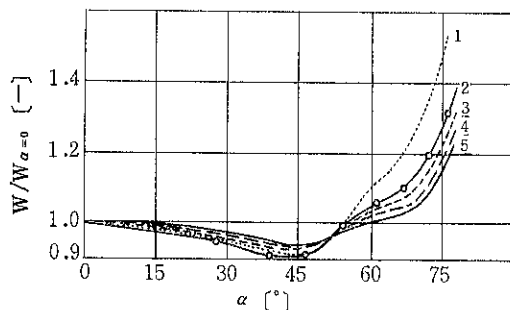


Fig. 1 円錐形ホッパーの諸元



1~5 は $D_0/D_p = 10, 20, 30, 40, 60$ と対応

Fig. 2 流出速度と壁傾斜角の関係 (Залогин ら)

を、 $\theta = 30, 45, 60, 90, 120^\circ$ のホッパーから流出させ、Fig. 2 に示す結果を得た。横軸の α は壁の傾斜角、縦軸の $W, W_{\alpha=0}$ はそれぞれ角 α に対する流出速度、平底容器からの流出速度である。また、パラメーターは出口直径 D_0 と粒子径 D_p の比 D_0/D_p である。Залогин らは、実験に用いた粉粒体の安息角が $35 \sim 40^\circ$ であるので、それまで一般にいわれていた“壁傾斜角 α が安息角

* 長岡工業高等専門学校機械工学科
(〒940 長岡市西片貝町 888)
Tel. (0258) 32-6435

より大きくなると流出速度が増加する”という考えは妥当でないといっている。

Fig. 2 は五十嵐²⁰⁾ (1968) の円錐形オリフィスの実験結果と定性的に同じである。五十嵐が用いたオリフィスの肉厚は十分大きくないので、Залогин らの結果と同等な比較はできないが、 $W/W_{\alpha=0} < 1$ なる α の領域が存在することは注目すべき事実である。

Reisner^{52) 58) 64)} (1961) は $D_0 = 22.2$ mm, $\alpha = 15, 30, 45, 60, 75^\circ$ のホッパーから比較的粒径の大きい粉

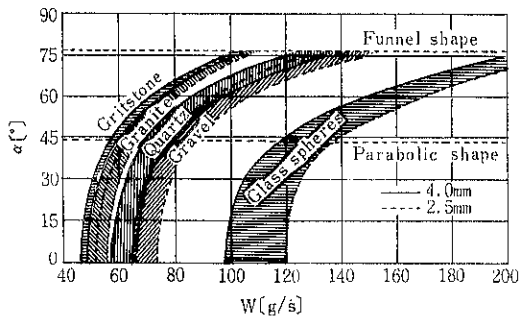


Fig. 3 流出速度に及ぼす壁傾斜角の影響 (Reisner)

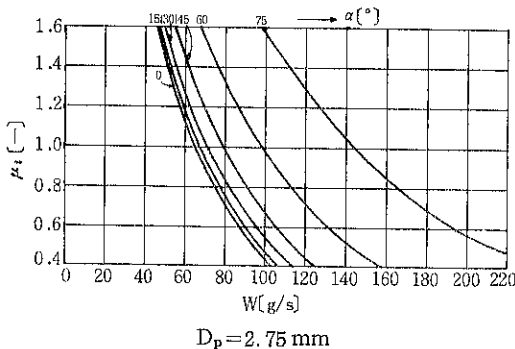


Fig. 4 流出速度に及ぼす内部摩擦係数の影響 (Reisner)

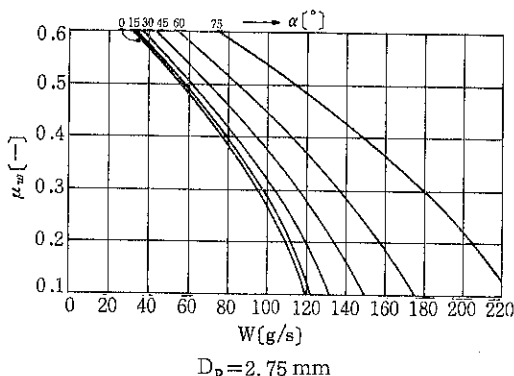


Fig. 5 流出速度に及ぼす壁摩擦係数の影響 (Reisner)

粒体を流出させ、Fig. 3～Fig. 6 を得た。 μ_i , μ_w , ρ_b はそれぞれ内部摩擦係数、粉粒体-壁摩擦係数、見掛密度である。Fig. 3 から流出速度は同一物質に対しては粒子径が小さいとき大きくなり、また、同一粒子径では球形になると大きくなることが分かる。

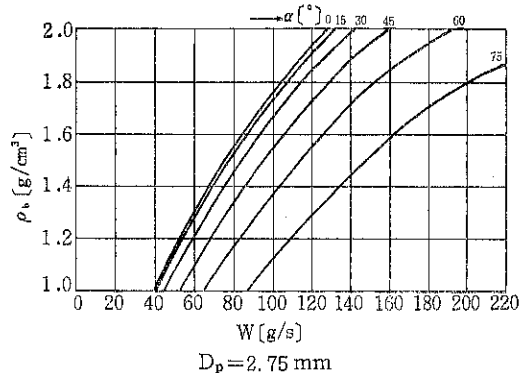


Fig. 6 流出速度に及ぼす見掛密度の影響 (Reisner)

Fig. 3 を Fig. 2 と比較して気づくことは、Fig. 3 においては、Fig. 2 のような $W/W_{\alpha=0} < 1$ なる α の領域は存在せず、 W は α の増加関数となっていることである。Reisner は角 α が安息角 ϕ_r より大きくなると W が増加し始めると述べているが、これは Залогин らの主張と食い違う。

2.2 次元解析

ある物理現象に關係する諸因子を選び、これらを適当な無次元積で表わし、Buckingham の Π 定理により諸因子の關係を実験的に決定しようというのが次元解析の手法である。ここで問題となることは、どんな因子をどのように組合わせて無次元積をつくるかということである。

ホッパーからの流出速度についての研究を最初に手掛けたのは Deming & Mehrling¹²⁾ (1929) である。無次元方程式を次のように表わした。

$$t D_p^{5/2} \rho_b g^{1/2} = f(D_p/D_0, \mu_r, \theta) \quad (1)$$

ここに、 t は与えられた粉粒体を流出させるのに要する時間 $[T M^{-1}]$, D_p は粒子径 $[L]$, ρ_b は見掛密度 $[M L^{-3}]$, g は重力加速度 $[L T^{-2}]$, D_0 は出口直径 $[L]$, μ_r は摩擦係数 $= \tan \phi_r$ (ϕ_r は安息角) $[-]$, θ はホッパー開き角 $[rad]$ である。(1)式を

$$(D_p/D_0)^{5/2} f(D_p/D_0, \mu_r, \theta) = F(D_p/D_0, \mu_r, \theta)$$

なるおきかえにより変形すると

$$t D_0^{5/2} \rho_b g^{1/2} = F(D_p/D_0, \mu_r, \theta) \quad (2)$$

実験データから関数 F を求め、最終的に得られた式は

$$t = (\mu_r/D_0^{5/2}\rho_b)[34.6 + (67.4 + 444 \sin \frac{\theta}{2}) \times (\frac{D_p}{D_0} + 0.130 - 0.161\mu_r)] \quad (3)$$

ここに、 t は 100 g 当りの流出時間 [min], D_0 [mm], ρ_b [g/cm³] である。実験は $\theta = 30, 60, 90^\circ$; $D_0 = 1 \sim 73$ mm; $D_p = 0.131 \sim 13.5$ mm; $\rho_b = 0.4 \sim 6.5$ g/cm³; $\mu_r = 0.380 \sim 1.07$ の範囲にわたって行われたが、(3)式決定のための実験は $D_0 = 1 \sim 15$ mm で行われており、小規模の実験であること、さらに(3)式では g が除外されているので次元が不完全な式であることに注意する必要がある。

Rausch⁵¹⁾ (1948) は実験条件を広範囲に変えて、無次元積 $W\sqrt{\tan \phi_r}/C_w C_\theta \sqrt{g \rho_b D_p^{2.5}}$ を D_0/D_p を対して両対数紙上にプロットしてその相関を調べた。 C_w , C_θ はそれぞれ ρ_b に対する壁効果修正係数、ホッパー角修正係数である。 C_w , $C_\theta (=W/W_{\alpha=0})$ の値はそれぞれ、Fig. 7, Fig. 8 から求める。

国井²⁸⁾ (1962) は Rausch⁵¹⁾ の相関図を式に表わし

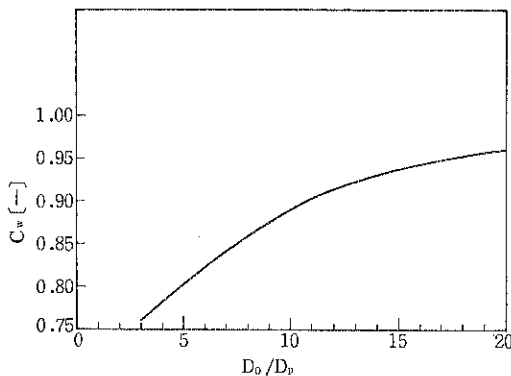


Fig. 7 壁効果修正係数 (Rausch)

$$\frac{W (\tan \phi_r)^{1/2}}{C_w C_\theta g^{1/2} \rho_b D_p^{2.5}} = 0.161 \left(\frac{D_0}{D_p} \right)^{2.748} \quad (4)$$

を得た。

Fig. 8 において、 $\alpha \geq 20^\circ - 30^\circ$ に対し $C_\theta \geq 1$ となっているが、これは Залогин ら⁷⁴⁾ のデータ (Fig. 2) と矛盾する。

Welschof^{69) 39)} (1961) は自ら導いたオリフィスからの流出速度式 $W_{\alpha=0}$ に Fig. 7 で与えられる C_θ を乗じて $W = W_{\alpha=0} \times C_\theta$ (5)

をホッパーからの流出速度式としている。

田中・川合⁶⁵⁾ (1956) は $D_p > 0.15$ mm, $\theta < 90^\circ$ のホッパーに適用できる実験式として次式を提出している。

$D_p/D_0 < 0.10$ のとき

$$\frac{W}{\rho_b \sqrt{g} D_p^{2.5}} = 0.18 (\mu_r \tan \frac{\theta}{2})^{-0.32} \left(\frac{D_p}{D_0} \right)^{-2.70} \quad (6)$$

$0.10 < D_p/D_0 < 0.23$ のとき

$$\frac{W}{\rho_b \sqrt{g} D_p^{2.5}} = 0.10 (\mu_r \tan \frac{\theta}{2})^{-0.32} \left(\frac{D_p}{D_0} \right)^{-3.0} \quad (7)$$

実験は $D_0 = 3.6 \sim 11.74$ mm, $D_p = 0.15 \sim 2.0$ mm, $\mu_r = 0.45 \sim 1.0$ の範囲で行われた。

Rose & Tanaka⁵⁶⁾ (1959) は付着性粉体に対しても適用できる式として次式を提出している。

$$\frac{W}{D_0^{2.5} \rho_s \sqrt{g}} = 0.16 \left(\frac{D_0}{D_p} - 3 \right)^{0.3} \times f(\theta) \times (Z-5)^{-0.5} \times \exp \left[-7.7 \times 10^{-6} \times \frac{c}{D_p^3 \rho_s g} \right] \quad (8)$$

ただし

$$\theta/2 < (90 - \phi_r)^\circ \text{ のとき } f(\theta) = \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{-0.35} \quad (9)$$

$\theta/2 \geq (90 - \phi_r)^\circ$ のとき

$$f(\theta) = [\tan(90 - \phi_r)]^{-0.35} \quad (10)$$

(8) 式の ρ_s は粒子の真密度、 Z は Heywood によって定義された粒子の形状係数、 c は付着力である。

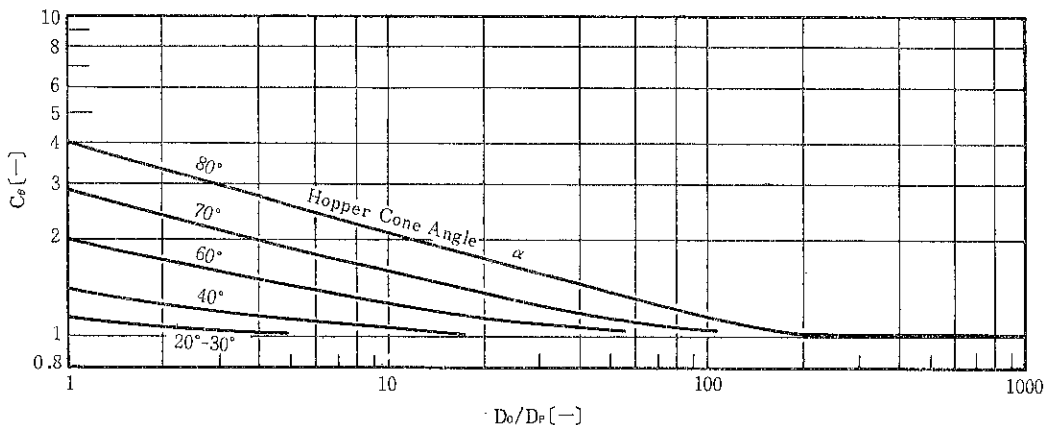


Fig. 8 ホッパー角修正係数 (Rausch, Zenz)

$D_p \geq 0.3 \text{ mm}$ ならば付着力は無視し得るので、(8)式の $\exp$ の項は1とおけるとしている。

$f(\theta)$ を(9), (10)式のように2つの領域に分けたのは、 W の θ 依存性が安息角 ϕ_r を境にして変わるという考えに基くものである。Rose らは $\alpha < \phi_r$ なるホッパーでは粉粒体は角 ϕ_r の傾斜面上を動くとしているが、この考えは正しくない。筆者の実験では、 $\alpha < \phi_r$ においても粉粒体はホッパー壁面上を滑ることが確認された。

Harmens¹⁵⁾(1963) は、 $\alpha > \phi_r$ のときは Rose らの式(9)を用い、 $\alpha \leq \phi_r$ のときは $W = W_{\alpha=0}$ と考え、次式を提出している。

$$\mu_r \tan \frac{\theta}{2} < 1 \quad \text{すなわち} \quad \alpha > \phi_r \quad \text{のとき}$$

$$W = W_{\alpha=0} \times \left(\mu_r \tan \frac{\theta}{2} \right)^{-0.35} \quad (11)$$

$$\mu_r \tan \frac{\theta}{2} \geq 1 \quad \text{すなわち} \quad \alpha \leq \phi_r \quad \text{のとき}$$

$$W = W_{\alpha=0} \quad (12)$$

Циборовский & Бондзыньский⁷⁵⁾(1963) は無次元積 $(\rho_b A_0 \sqrt{2gD_0}/W)(D_0/D_p)$ 対 D_0/D_p を角 α をパラメーターとして普通方眼紙上にプロットして、直線の相関を得て実験式

$$\rho_b A_0 \sqrt{2gD_0} W^{-1} = \left(78.45 \sin \frac{90^\circ - \alpha}{2} - 2.93 \right) \times \left(\frac{D_p}{D_0} + 0.0115 \right) + 1.61 \quad (13)$$

を提出している。 A_0 は流出口の断面積で $\pi D_0^2/4$ である。実験は $D_p = 0.14 \sim 0.71 \text{ mm}$ の砂と $D_0 = 1.5 \sim 5.0 \text{ mm}$ 、 $\alpha = 0 \sim 85^\circ$ のホッパーを用いて行われた。

以上のように、II 定理の適用に際し、様々の無次元積が用いられている。 W に関する無次元積において、長さを表わす因子として、Deming ら、Rausch、田中らは粒子径 D_p を採り、Rose らと Циборовский らは出口径 D_0 を採っている。五十嵐²⁴⁾(1977) の運動量理論によれば

$$W/\rho_b A_0 \sqrt{gD_0} = \zeta_h \quad (14)$$

ここに、 ζ_h は粉粒体の物性および壁の条件により定まる無次元数である。(14)式は W に関する無次元積の長さの因子としては D_0 を採るべきことを示している。

2.3 流体アナロジー

今木²⁵⁾(1962) は流体オリフィスの流量公式からの類推により

$$W = \frac{\pi}{4} D_0^2 C_d \rho_b \sqrt{2g(k_p D_0)} \quad (15)$$

と表わした。ここに C_d は流量係数、 k_p は粉粒体圧力に関係する係数である。砂、ガラス球、ナタネ、アワによる $D_0/D_p = 5 \sim 30$ の実験データを整理して

$$W = 0.036 \left[\frac{(D_0/D_p)^{0.64}}{(\mu_i \tan \alpha)^{0.9}} \right] \rho_b A_0 \sqrt{2gD_0} \quad (16)$$

を得た。 μ_i は直接剪断実験により求めた値であり、 $\tan \phi_r$ よりかなり小さな値となっている。(16)式は α の増加に対し W が減少することを示し、これは実験事実と反する。式作成の途中で何かのまちがいがあったものとみられる。

Zenz⁷³⁾(1962) は堰(せき)を越える液体流れに対するアナロジーから流出速度式を求めた。Francis の堰の流量公式を変形すると

$$w_1 \propto \rho_l h_w^{3/2} \quad (17)$$

となる。ここに、 w_1 は単位面積、単位時間当たり堰を流れる液体の質量流量、 ρ_l は液体の密度、 h_w は堰のヘッドである。一方、Rausch⁶¹⁾ の相関の別形式として、 $w_s \sqrt{\tan \phi_r} / C_w C_\theta \sqrt{g \rho_b \sqrt{D_p}}$ を D_0/D_p に対して両対数紙上にプロットすると直線となり

$$\frac{w_s D_p^{0.2}}{\rho_b \sqrt{g D_0}^{0.7} \left[\frac{\sqrt{\tan \phi_r}}{C_w C_\theta} \right]} = 0.23 \quad (18)$$

が得られる。ここに、 w_s は単位面積、単位時間当たりの粉粒体の質量流量である。(18)式を書きかえると

$$w_s = \left[\frac{0.23 \sqrt{g} C_w C_\theta (D_0)^{0.2}}{\sqrt{\tan \phi_r}} \right] \rho_b D_0^{0.5} \quad (19)$$

(17)式と(19)式は係数だけのちがいであって同形である。

(19)式を、国井の式(4)と比較するため、かきかえると

$$\frac{W(\tan \phi_r)^{1/2}}{C_w C_\theta g^{1/2} \rho_b D_p^{2.5}} = 0.181 \left(\frac{D_0}{D_p} \right)^{2.7} \quad (20)$$

となり、両式はほぼ一致する。

Zenz は(19)式の係数 [] の中味は吟味を要するとし、 C_w 、 $\tan \phi_r$ 、 D_0/D_p をすべて省略して、平底のオリフィスからの流出速度式として

$$w_s = 1.2 \rho_b D_e^{3/2} \quad (21)$$

を得た。ここに、 D_e は Brown⁶⁾(1960) の empty annulus を考慮した有効オリフィス直径で、 $D_p = D_0 - 1.5 D_p$ とした。(21)式の各物理量の単位は w_s [lbs/s·ft²]、 ρ_b [lbs/ft³]、 D_e [in] である。(19)式と(21)式の精度計算を行なったところ、(21)式の方が優れていることが分かった。ホッパーからの流出速度 W は(21)式を用いて、 $W = w_s \times (\pi D_e^2/4)^2 \times C_\theta$ とするわけにはいかない。なぜなら、empty annulus はホッパーの傾斜角 α が増加すると減少し、 D_e は α によって変化するからである。Zenz は、オリフィスに対しては(18)式よりは精度の高い(21)式を得たが、 D_e の導入のために、ホッパーに対する式を得るまでに到っていない。

2.4 動的アーチモデル

動的アーチモデルによる流出速度式の導出は、オリフィス、ホッパーのいずれに対しても多くの研究者により試みられている。流出口の近傍に動的アーチが形成されるといふ仮説は実際の現象とかけ離れたものでないこと

は Brown ら⁶⁾ (1960), Филалков ら³⁴⁾ (1961), 出光ら¹⁸⁾⁶⁶⁾ (1966), Perry ら⁴⁶⁾⁴⁷⁾ (1967) の実験で明らかにされている。ただその形状、大きさ、周期は複雑であって各種のモデルが提出されているゆえんである。

Johanson²⁷⁾ (1965) はホッパー流出口の上に厚さが一様なアーチが動的平衡にあると考え、慣性力と粉粒体応力と重力のつりあい方程式から次式を導いた。

$$W = \rho_b A_0 \sqrt{\frac{D_0 g}{4 \tan \beta}} \sqrt{1 - \frac{ff}{ff_a}} \quad (22)$$

ここに、 ff はアーチングに対するホッパーの臨界 flow factor, ff_a は粉粒体の実際の flow factor である。 ff の値は Johanson ら²⁶⁾ (1964) の文献に線図として与えてあるが、最近 Arnold & Mclean³⁾ (1976) は Walters⁶⁸⁾ (1973) の壁面応力の理論に基いて ff の解析解を与えている。 ff_a の値は粉粒体の flow function から実験的に求めなければならない。砂やガラスビーズのように流動性の良い粉粒体に対しては $ff/ff_a = 0$ としよい。

篠原ら⁶⁰⁾⁶²⁾ (1967, 1968) はホッパー出口直上に高さ H_A の円柱形の動的アーチを仮定し、自由落下法則および質量保存則から

$$\frac{W}{\rho_b \sqrt{g D_p^{2.5}}} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D_p g}{V_A^2} \right)^{1/2} \left(\frac{1 - \epsilon_0}{1 - \epsilon_A} \right)^{1/2} \times \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{-1/2} \left(\frac{D_0}{D_p} \right)^{2.67} \quad (23)$$

を導いた。ここに V_A は高さ H_A なる A 断面の粉粒体の平均速度、 ϵ_A , ϵ_0 はそれぞれ、断面 A およびホッパー出口における空間率である。

田中・川合の式(6), (7)および Rose & Tanaka の式(9)によれば、 W の θ 依存性は大略

$$W \propto \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{-1/2} \quad (24)$$

と表わされる。然るに(23)式では $\tan(\theta/2)$ の指数は $-1/2$ となっており、(24)式のそれとかなり異なっている。その相違は次のように考えることにより理解できよう。すなわち、 V_A は

$$W = \pi \left(H_A \tan \frac{\theta}{2} + \frac{D_0}{2} \right)^2 V_A \rho_s (1 - \epsilon_A) \quad (25)$$

により定まるが、この V_A を(23)式に代入すると W は H_A の関数となる。 H_A は一定とは考えられず、 D_0 , θ , 粉粒体物性によって変わるであろう。すなわち(23)式における W の θ 依存性は見掛け上のものとみななければならない。従って、(23)式は V_A が解明されない限り、流出速度式として用いることはできない。

長谷川ら¹⁹⁾ (1967) は Филалков ら³⁵⁾ (1961) がオリフィス上に考えた楕円体アーチと相似形のアーチがホッパー内に生ずると仮定して次式を導いた。

$$W = \frac{\pi}{8} \rho_b D_0^{2.5} g^{0.5} \left\{ \left\{ \mu_i \left(1 + \frac{D_p}{D_0} + \frac{D_p}{D_0} \frac{1 - \mu_i}{\sqrt{1 + \mu_i^2}} \right) \times (\sqrt{1 + \lambda^2} - \lambda) + \frac{D_p}{D_0} \frac{1}{\tan(\beta/2)} \right\}^{1/2} + \left\{ \frac{D_p}{D_0} \frac{1}{\tan(\beta/2)} \right\}^{1/2} \right\} \quad (26)$$

ただし

$$\lambda = \mu_i \left(1 + \frac{D_p}{D_0} + \frac{D_p}{D_0} \frac{1 - \mu_i}{\sqrt{1 + \mu_i^2}} \right) / \left(1 + \frac{D_p}{D_0} \right) \tan \frac{\beta}{2} \quad (27)$$

2.5 ブロックフローモデル

Shinohara & Tanaka⁶³⁾ (1974) はホッパー出口面から自由表面に達する円柱状の粉粒体塊が一体となって間歇的に流出するものと考え、粉粒体塊の運動方程式と振動数から流出速度式を導いた。得られた式は測定困難な因子が複雑な関数で表わされていて実用的ではないが、そこに展開されている理論は付着性粉粒体の流れのメカニズム解明の上で有益な示唆を与えている。

2.6 最小エネルギー理論

Brown⁷⁾ (1961) は粉粒体の運動に流体力学の流管の概念を導入し、微小体積要素の位置エネルギーと運動エネルギーの和が粒子の衝突、回転、摩擦により流管に沿って減少し、流出口で最小になると考えて流出速度式を導いた。結果は無次元表示により次のように与えられている。

$$\frac{4W}{\rho_b \pi (D_0 - \xi)^2 [g(D_0 - \xi)]^{1/2}} = \frac{2(1 - \cos^{3/2} \beta)}{3 \sin^{3/2} \beta} \quad (28)$$

ここに、 ξ は empty annulus である。Brown は radial flow を仮定したので、この理論はオリフィス、ホッパーのいずれにも適用できるとしている。

平底容器においては角 β の傾斜面上で粉粒体同士の摩擦が生ずるのに対し、ホッパーでは粉粒体と壁面での摩擦を生ずる。従って、前者においては粉粒体間の摩擦状態、後者においては粉粒体―壁間の摩擦状態が流出速度に関係するはずであるが、Brown の理論はこのことに関しては何の情報も提供していない。これは Brown の理論がエネルギーの総和の変化だけに注目し、その変化のプロセスについては配慮していないためである。

平底容器においては角 β [Brown ら⁸⁾ (1965) はこの角を angle of approach (接近角) と称している] に問題がある。Brown は流動領域と静止領域の境界線 (流動境界線) は直線で近似できるとして radial flow を仮定したのであるが、流動境界線は五十嵐²²⁾ (1969) の砂を用いた実験では直線にはならず指数曲線となった。三輪ら⁸⁸⁾ (1973) の実験においても流動境界線は曲線となり、接近角 β を求めることは困難であった。たとえ、第1近似として流動境界線は直線であるとしても、流動境界線は時間とともに変わるのに対し流出速度

は変化しないという事実²³⁾から考えると、流出速度と接近角は直接的に関係していないように思われる。ホッパーの場合には角 β は固定されているのであるからこのような問題はないが、上に指摘した粉粒体一壁摩擦の問題が残る。Brown は二三のデータと理論値と比較して、両者の一致は良好であると述べているが、Miles²⁸⁾ (1970) の実験値は Brown の理論値から著しくかけ離れている。

2.7 運動方程式による解析

Savage⁵⁷⁾ (1965) は運動方程式の慣性項を考慮して、速度場と応力場を結合させ、流出口における粒子の平均速度 $\bar{u}_0$ の解として次式を得た。

$$\bar{u}_0 = \left\{ \frac{(1+k)gD_0}{2\{(k-1)(m+1)-1\}\sin\beta} \right\}^{1/2} \quad (29)$$

ただし

$$k = \frac{1+\sin\phi_i}{1-\sin\phi_i} \quad (30)$$

ϕ_i は内部摩擦角である。式(29)において、 m はホッパーの形状因子で、二次元流れでは $m=0$ 、軸対称流れでは $m=1$ とおく。流出速度は式(29)から得られ

$$\frac{W}{\frac{1}{4}\pi\rho_b D_0^{2.5}\sqrt{g}} = \left\{ \frac{(1+k)}{2(2k-3)\sin\beta} \right\}^{1/2} \quad (31)$$

理論値を Deming ら¹²⁾の実験値と比較したところ、式(31)は過大に見積ることがわかった。その理由は解析を進めるに際し、角 β を小さいと仮定したことおよび粉粒体一壁摩擦を無視したためであるとしている。

Savage の理論は実験値と合わなかったとはいえ、内部摩擦角が流出速度に及ぼす影響を採りあげた点で、Brown⁷⁾ の理論より一歩前進したものといえる。

Savage⁵⁸⁾ (1967) は粉粒体一壁摩擦を考慮することにより先の理論⁵⁷⁾を更に前進させた。運動方程式を摂動法により近似的に解いて

$$\begin{aligned} \frac{W}{\frac{1}{4}\pi\rho_b D_0^{2.5}\sqrt{g}} = & \left\{ \frac{k+1}{2(2k-3)\beta} \right\}^{1/2} \\ & + \frac{\varepsilon_p^2 k}{\beta} \left\{ \frac{1}{2} \{2(2k-3)(k+1)\beta\}^{-1/2} \right. \\ & \left. - \left\{ \frac{1+k}{2(2k-3)^{3/2}\beta} \right\}^{1/2} \right\} + \dots \quad (32) \end{aligned}$$

を得た。 $\varepsilon_p = (\tan\phi_w)^{1/2}$ で、 ϕ_w は壁摩擦角である。式(32)による理論値は角 β が小さい場合を除けば、Deming ら¹²⁾の実験値と一致する。

Carleton¹⁰⁾ (1972) はホッパー内の流れは radial flow であると仮定し、ホッパー出口面における粉粒体要素に働く力は慣性力と重力だけであるとして

$$Q = \frac{\pi}{8} D_0^{2.5} \left(\frac{g}{\sin\beta} \right)^{0.5} \quad (33)$$

を導いた。 Q は体積流量である。 Q にホッパー出口に

おける見掛け密度を乗ずれば流出速度が得られ、 W の β 依存性は式(31)と同じになる。

綱川・青木⁶⁷⁾ (1977) は Holland ら¹⁷⁾ (1969) が提出した運動方程式を解いて、出口の粒子速度 u_0 、流出速度 W の式として

$$u_0 = \left\{ \frac{g(D_0 - k_e D_p)}{2(1+m)\sin\beta'} \right\}^{1/2} \times [\cos\psi - F(\phi_i, \phi_w, \beta, m, \psi)]^{1/2} \quad (34)$$

$$\frac{W}{\rho_s A_0 \sqrt{g D_0}} = \frac{(1-\varepsilon) \left(1 - k_e \frac{D_p}{D_0} \right)^{1.5+m}}{(\sqrt{2})^{1-m} \sin^{1.5+m}\beta'} \times \int_0^{\beta'} \sin^m \psi [\cos\psi - F(\phi_i, \phi_w, \beta, m, \psi)]^{1/2} d\psi \quad (35)$$

を得た (記号は Fig. 9 参照)。流動粉粒体の応力に Walters⁶⁸⁾ (1973) の理論が適用され、関数 F は式(35)のように求められた。

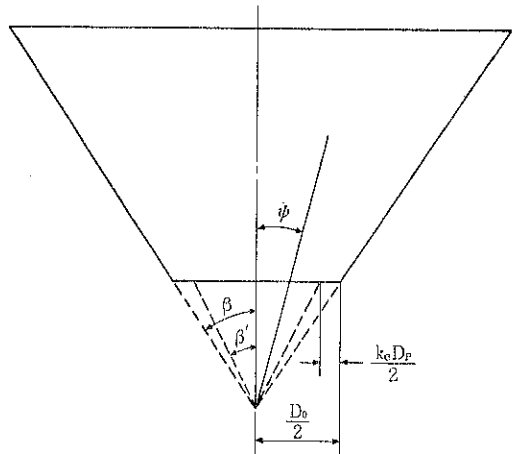


Fig. 9 式(35)の記号の説明図

$$\begin{aligned} F(\phi_i, \phi_w, \beta, m, \psi) = & C[h(\psi) \\ & + \sin\phi_i \sin 2(\phi - \psi) \times \cos\psi f'(\psi)] \\ & + C \sin\phi_i h(\psi) [\cos 2(\phi - \psi) \left(2 \frac{d\phi}{d\psi} - 5 - m \right) \\ & + \sin 2(\phi - \psi) (m \cot\psi - \tan\psi) - m] \quad (36) \end{aligned}$$

ただし

$$C = D/2k'(K-1) \quad (37)$$

$$D = \frac{\cos\gamma(1+\sin^2\phi_i) - 2(\sin^2\phi_i - \sin^2\gamma)^{1/2}}{\cos\gamma(1+\sin^2\phi_i - 2\gamma\sin\phi_i)} \quad (38)$$

$$\gamma + \sin^{-1}(\sin\gamma/\sin\phi_i) = 2(\beta + \omega) \quad (39)$$

$$\omega = \frac{1}{2} \left\{ \phi_w + \sin^{-1} \left(\frac{\sin\phi_w}{\sin\phi_i} \right) \right\} \quad (40)$$

$$\gamma_{(m=1)} = 2 \{ 1 - (1-c)^{1/2} \} / 3c \quad (41)$$

$$\gamma_{(m=0)} = \{ (1-c)^{1/2} + \sin^{-1}\sqrt{c}/\sqrt{c} \} / 2 \quad (42)$$

$$c = (\tan\gamma/\tan\phi_i)^2 \quad (43)$$

$$k' = \frac{1 - \sin \phi_1 \cos 2(\beta + \omega)}{1 + \sin \phi_1 \cos 2(\beta + \omega)} \quad (44)$$

$$K = (1 + m)(ED \cot \beta + D - 1) \quad (45)$$

$$E = \frac{\sin \phi_1 \sin 2(\beta + \omega)}{1 - \sin \phi_1 \cos 2(\beta + \omega)} \quad (46)$$

$$h(\psi) = (f(\psi) + 1) \cos \psi \quad (47)$$

$$f(\psi) = 1 + 2 \tan^2 \phi_1 - \frac{2Ek' \left[\left(\frac{\tan \phi_1}{Ek'} \right)^2 - \left(\frac{\tan \psi}{\tan \beta} \right)^2 \right]^{1/2}}{\cos \phi_1} \quad (48)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \sin^{-1} \left[\frac{2Ek' \tan \psi}{\sin \phi_1 \tan \beta (f(\psi) + 1)} \right] \quad (49)$$

34式による粒子速度の理論値は Bosley ら⁵⁾ (1969)の実験値とほぼ合うことが確認されている。また、35式による流出速度の理論値は、 ε をパラメーターとすると、Rose & Tanaka⁵⁶⁾の実験値と合う。しかし、 ε の値が大幅に変えられているので、傾向的な一致であり、絶対値の一致は不十分である。

3. くさび形ホッパー

Fig.10に示すような前後面壁が平行で側面が傾斜したホッパーは長方形のスロットを有するので、スロット型ホッパーまたはくさび形ホッパーと呼ばれる。流れは二次元流れとなるので、ときに二次元ホッパーとも呼ばれるが、ここでは、くさび形ホッパーと称することにする。

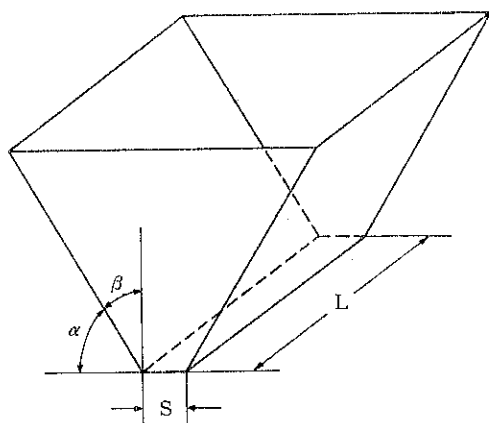


Fig. 10 くさび形ホッパーの諸元

Table 1 くさび形ホッパーからの流出速度
(S = 10mm, L = 100mm; 流出速度の単位は g/s)

物質名	D _p [mm]	ρ _s [g/cm ³]	ホッパー壁の傾斜角 α			
			0°	22°	42°	52°
Ottawa sand	0.6~0.8	2.70	400	360	400	425
Clover	1.2~1.4	1.35	140	125	140	160
Molecular sieve	1.7~2.4	1.85	127	110	125	140

3.1 特定条件下での実験データ

青木・館野¹⁾ (1965) は D_p = 1.075 mm の相馬標準砂を用いて流出実験を行ない、W 対 tan β を両対数紙にプロットしたところ、π/4 - φ₁/2 を境にして勾配の異なる二本の直線を得た。これを式で表わすと

$$\beta < \pi/4 - \phi_1/2 \text{ のとき } W \propto (\tan \beta)^{-0.42} \quad (50)$$

$$\beta > \pi/4 - \phi_1/2 \text{ のとき } W \propto (\tan \beta)^{-0.11} \quad (51)$$

実験範囲は S = 5 ~ 22.4 mm, L = 20 ~ 50 mm, β = 10 ~ 50° である。

Levinson ら⁸¹⁾ (1977) は S = 10 mm, L = 100 mm の実験から Table 1 に示す流出速度 [g/s] を得た。W/W_{α=0} は角 α が 0 ~ 42° の間で 1 より小さくなっており、円錐形オリフィスの Zalogin ら⁷⁴⁾ のデータ (Fig. 2) と類似している。

3.2 動的アーチモデル

Johanson²⁷⁾ (1965) は 2.2 節で述べたモデルからくさび形ホッパーに対する流出速度式として

$$W = \rho_b SL \sqrt{\frac{Sg}{2 \tan \beta}} \cdot \sqrt{1 - \frac{ff}{ff_a}} \quad (52)$$

を提出している。

3.3 最小エネルギー理論

Brown⁷⁾ (1961) の最小エネルギー理論は、くさび形ホッパーに対しては次式を与える。

$$\frac{W}{\rho_b L (S - \xi) \{g(S - \xi)\}^{1/2}} = \frac{\int_0^{\beta} \cos^{1/2} \psi d\psi}{\sqrt{2 \sin^{3/2} \beta}} \quad (53)$$

$$\approx \frac{\sqrt{\beta}}{\sqrt{2 \sin \beta}} \quad (54)$$

(53), (54) 式の差は高々 1% である。

3.4 運動方程式による解析

Savage⁵⁷⁾ (1965) の解析によれば、29 式において m = 0 として ū₀ を求め、W = ρ_b SL ū₀ なることを考慮して

$$\frac{W}{\rho_b SL \sqrt{gS}} \approx \left\{ \frac{1 + k}{2(k - 2) \sin \beta} \right\}^{1/2} \quad (55)$$

となる。

Mróz ら⁴¹⁾ (1971) は radial flow と Coulomb の降

伏条件の下に、慣性力を考慮した運動方程式から応力、速度場を決定して、くさび形ホッパーに対する流出速度式を得た。この式は複雑な関数の積分を含むため、数値計算によりグラフとして示されている。

Morrison & Richmond⁴⁰⁾ (1976) は Spencer⁶⁴⁾ (1964) および Pemberton⁴⁵⁾ (1965) の流動粉粒体に対する平面応力場理論で考慮されなかった重力および慣性力を考慮した一般理論を展開し、これをくさび形ホッパーからの流出速度の問題に適用して、次式を得た。

$$Q = Q_s \tanh(a^2 Q_s t) \quad (56)$$

ただし

$$Q_s = w_1 \left\{ \left(\frac{R^n - 1}{R^{2+n} - 1} \right) \left[\left(\frac{2 g w_1 \tan \alpha}{1 - 3 \sin \phi_1} \right) \left(\frac{1 - R^{n-1}}{R^n - 1} \right) - \frac{2c \cot \phi_1}{\rho_b (1 - \sin \phi_1)} \right] \right\}^{1/2} \quad (57)$$

$$a^2 = \frac{\sin \phi_1}{w_1^2 \tan \alpha} \left(\frac{R^{2+n} - 1}{R^n - 1} \right) \quad (58)$$

$$R = w_1 / w_0, \quad n = 2 \sin \phi_1 / (1 - \sin \phi_1) \quad (59)$$

ここに、 Q はスロット半幅 $w_0 = S/2$ 、奥行 $L = 1$ (単位長さ) を通して流出する体積流量、 w_1 はホッパー入口の半幅である。 t はホッパーゲートを開いてからの時間を表わし、流出中、粉粒体層の高さは一定に保たれているものとする。

4. 角錐形ホッパー

4つの壁が出口に向かって傾斜したピラミッド形状のホッパーを角錐形ホッパーと称することにする。角錐形ホッパーは実際に用いられているにも拘らず、研究報告は少ない。

今木²⁵⁾ (1962) は流体アナロジーにより次の実験式を提出している。

$$W = 5.4 \left\{ \left(\frac{\mu_1 \tan \alpha}{(D_h/D_p)^{0.62}} \right) \right\} \rho_b \frac{\pi}{4} D_h^2 \sqrt{2gD_h} \quad (60)$$

ここに、 D_h は次式で定義される円相当直径である。

$$D_h = \frac{(\text{流れの断面積})}{(\text{浸辺長})} \times 4 \quad (61)$$

(60)式において、 μ_1 と α が与えられたとき

$$W / (\rho_b \frac{\pi}{4} D_h^2 \sqrt{gD_h}) \propto (D_h/D_p)^{-0.52} \quad (62)$$

となる。ところが、円錐形オリフィスに対する国井の式(4)および田中らの式(6)は、それぞれ

$$W / (\rho_b \frac{\pi}{4} D_0^2 \sqrt{gD_0}) \propto (D_0/D_p)^{0.246} \quad (63)$$

$$W / (\rho_b \frac{\pi}{4} D_0^2 \sqrt{gD_0}) \propto (D_0/D_p)^{0.20} \quad (64)$$

角錐形ホッパーにおいても円錐形ホッパーと同様に D_h/D_p が大きいとき(14)式で定義される無次元流出速度は大きくなることが期待されるのに、(62)式では逆の関係にな

っている。

青木・綱川²⁾ (1968) は出口が長方形の角錐形ホッパーからの流出速度の実験式として次式を提出している。

$$W = C \rho_b \sqrt{g D_p^{2.5} \left\{ \frac{(B-D_p)(L-D_p)}{D_p^2} \right\}^{1.33}} \times \left(\tan \frac{\theta}{2} \right)^{-n_1} \quad (65)$$

ここに、 B と L は出口の縦横の長さ、 θ はホッパー開き角である。指数 n_1 の値は球形粒子の $20^\circ \leq \theta \leq 80^\circ$ および砂の $20^\circ \leq \theta \leq 53^\circ$ に対しては $n_1 = 0.33$ で、円錐形ホッパーにおける田中ら⁶⁵⁾ の値 $n_1 = 0.32$ に近い。(65)式の係数 C は次式で与えられる。

$$\frac{C}{C_0} = \left\{ \frac{(B-D_p)(L-D_p)}{(B-D_p) + (L-D_p)} \cdot \frac{2}{\sqrt{BL-D_p}} \right\}^{n_2} \quad (66)$$

ここに、 C_0 は出口が正方形のときの C の値を表わし、表面運動角を ϕ_k とすると

$$C_0 = 0.175 (\tan \phi_k)^{-1.3} \quad (67)$$

で与えられる。(66)式の指数 n_2 の値はホッパー開き角と粉粒体の種類により異なる値をとる。

(65)式は $B/L = 1 \sim 6$, $B \times L = 0.61 \sim 16.3 \text{ cm}^2$, $\theta = 20^\circ \sim 80^\circ$ の流出実験データから得られた。

5. 曲線形ホッパー

Daevs & Flachsbart¹¹⁾ (1952) は劇場などの狭い入口における群集の流れを研究する目的で、鋼球を用いたモデル研究を行なった。その結果入口形状を適当な曲線形によることにより単位時間当りの通過量は著しく増大することを見出した。

Table 2 鋼球の流出時間

出口形状	時間 [S]	割合 [%]
a	67	100.0
b	55	82.1
c	48	71.7
d	40	59.7
e	33	49.8
f	20	29.8
g	19	28.8

Otte⁴³⁾ (1953) は Daevs ら¹¹⁾ の定性的な研究を定量的な研究に進めた。Otte は、水平面に対し 4° の角をなす平板上に乗せた直径 5 mm の鋼球 2,000 個が Fig. 11 に示す種々の形状の出口 (その幅はいずれも 20 mm) から流出する時間を測定し、Table 2 の結果を得た。形状 e のように出口を少し丸くすることにより流出時間は形状 a の半分にすることができる。

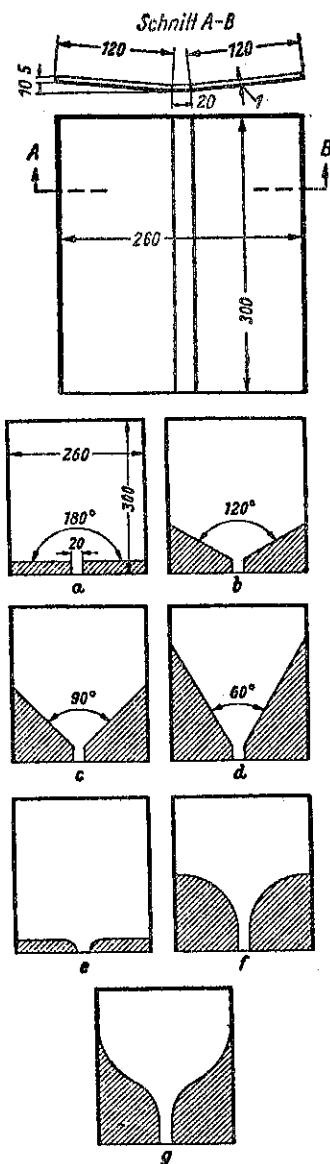


Fig. 11 出口形状が流出速度に及ぼす影響 (Otte)

Daevies らと Otte の研究は、ホッパーからの流出速度の増加のためには出口近傍の縦断面の形状を曲線形にするのが効果的であることを示唆している。

Lee²⁹⁾ (1960) はホッパー内の石炭の流動の研究を行った際、Fig.12のような曲線形ホッパーは円錐形ホッパーに比べて流動抵抗が小さいことを見だし、これを“双曲線ホッパー”と称した。ホッパー壁の流動抵抗を小さくするためには、ホッパー横断面積の鉛直下方への減少率を一定にさせるべきであるとしている。鉛直下方にY座標をとり、ホッパー横断面積をA、距離dy下

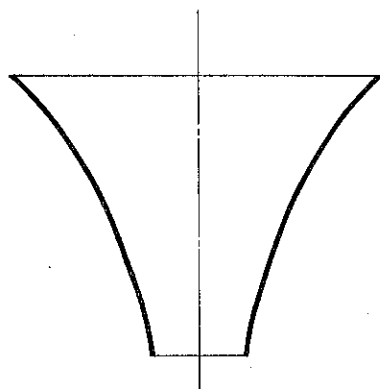


Fig. 12 Lee の双曲線ホッパー

ったときの面積変化高を dA とすれば

$$-\frac{dA}{A \cdot dy} = C = \text{const.} \quad (68)$$

これを積分して

$$A = A_1 e^{-Cy} \quad (69)$$

ここに、 A_1 はホッパー入口の断面積である。

Richmond⁵⁵⁾ (1963) は、最適ホッパー形状はホッパー内のあらゆる場所でまさにアーチを生じようとしているようなホッパーの場合に得られると考え、ホッパー内の粉粒体の応力解析から最適ホッパー形状を求めた。平面ホッパーの場合は、ホッパー出口中心に座標原点をとり、水平方向にx軸、鉛直上方にy軸をとり、 $S/2 = x_0$ とすると

$$x = x_0 + \left(x_0 - \frac{C_2}{C_1}\right)(e^{C_1 y} - 1) \quad (70)$$

ただし

$$C_1 = \frac{\gamma_b(1 - \sin \phi_i)}{2c \cos \phi_i} \quad (71)$$

$$C_2 = \frac{C_1 c_w}{\gamma_b} + \tan \phi_w \quad (72)$$

ここに、 γ_b は粉粒体の比重量、 c は粉粒体同士の付着力、 c_w は粉粒体-ホッパー間の付着力である。軸対称ホッパーの場合は、ホッパー出口中心に座標原点をとり、水平方向にr軸、鉛直上方にz軸をとり、 $D_0/2 = r_0$ とすると

$$r = r_0 + \left(r_0 - \frac{2C_2}{C_1}\right)(e^{C_1 z/2} - 1) \quad (73)$$

なる方程式によって最適ホッパー形状が与えられる。

Gardner¹³⁾ (1963) は、“最適ホッパー形状とは、流出を妨げることなくホッパー水平断面の寸法を鉛直方向に最も急速に減少させるような形状である”と定義した。そして、Richmond⁵⁵⁾ が仮定した自由アーチ（応力を生じない面）がホッパー内のいたるところで生ずるということは不可能であるとして、別の仮定を設けて平面ホ

ツパーの最適形状を求めた。

Gardner¹⁴⁾(1964)は軸対称ホッパーの最適形状についても報告している。

以上のような種々の曲線形ホッパーからの流出速度がどのようになるかは今後の課題である。

6. 結 言

種々の形状のホッパーから粉粒体が重力のみにより流出する際の流出速度に関する既往の研究をアプローチの仕方から分類して、その要点を述べた。

流出速度はホッパーの形状、寸法、壁面粗さ、および粉粒体の見掛け密度(真密度と空間率)、粒子径、内部摩擦係数(形状係数)、付着力など多くの因子に関係している。上に見てきたように、これらの因子の流出速度に及ぼす影響について様々な実験データと理論が提出されているが、ホッパーの設計および操作に十分な情報を与えているとは言い難い。この方面の研究の一層の進展が望まれる。

なお、微粉になると空気流の影響が無視し得なくなり、その評価に関する研究もなされているが、本稿では紙数の関係で割愛した。

主 要 記 号

A	: ホッパーの横断面積
A ₀	: ホッパー流出口の面積
C _w	: 壁効果修正係数
C _θ	: ホッパー角修正係数
c	: 付着力
D _h	: 筒式で定義される円相当直径
D ₀	: ホッパー流出口の直径
D _p	: 平均粒子直径
g	: 重力の加速度
k	: $= (1 + \sin \phi_i) / (1 - \sin \phi_i)$
L	: くさび形ホッパーにおけるスロットの長さ
m	: ホッパーの形状因子(くさび形ホッパーでは $m=0$, 円錐形ホッパーでは $m=1$)
Q	: 体積流量
S	: くさび形ホッパーにおけるスロット幅
u ₀	: ホッパー出口における粒子の速度
$\bar{u}_0$	: ホッパー出口における粒子の平均速度
W	: ホッパーからの粉粒体の質量流出速度
W _{$\alpha=0$}	: オリフィスからの粉粒体の質量流出速度
α	: 水平面から測ったホッパー壁の傾斜角
β	: 鉛直面から測ったホッパー壁の傾斜角
ϵ	: 粉粒体の空間率
θ	: ホッパー開き角

μ_i	: 内部摩擦係数
μ_r	: 安息角の正接
μ_w	: 粉粒体—壁間の摩擦係数
ξ	: empty annulus (粉粒体が通過しない所の長さ)
ρ_b	: 粉粒体の見掛け密度
ρ_s	: 粉粒体の真密度
ϕ_i	: 内部摩擦角
ϕ_r	: 安息角
ϕ_w	: 粉粒体—壁間の摩擦角
ψ	: 極座標の偏角

引 用 文 献

- 1) 青木隆一, 館野英紀: “ホッパーからの乾燥砂の流出について”, 化学工学協会第30年会講演要旨集, 257~258 (1965)
- 2) 青木隆一, 綱川浩: “角錐ホッパーからの粒体の流出速度式について”, 粉体工学研究会誌, **5**, 1047~1051 (1968)
- 3) Arnold, P. C., Mc Lean, A. G.: “An analytical solution for the stress function at the wall of a converging channel”, Powder Technology, **13**, 255~260 (1976)
- 4) Arnold, P. C., McLean, A. G.: “Improved analytical flow factors for mass-flow hoppers”, Powder Technology, **15**, 279~281 (1976)
- 5) Bosley, J., Schofield, C., Shook, C. A.: “An experimental study of granule discharge from model hoppers”, Trans. Instn Chem. Engrs., **47**, 147~153 (1969)
- 6) Brown, R. L., Richards, J. C.: “Profiles of flow of granules through apertures”, Trans. Instn Chem. Engrs., **38**, 243~256 (1960)
- 7) Brown, R. L.: “Minimum energy theorem for flow of dry granules through apertures”, Nature, **191**, 458~461 (1961)
- 8) Brown, R. L., Richards, J. C.: “Kinematics of the flow of dry powders and bulk solids”, Rheologica Acta, **4**, 153~165 (1965)
- 9) Brown, R. L., Richards, J. C.: “Principles of powder mechanics” 135~202, Pergamon Press (1970)
- 10) Carleton, A. J.: “The effect of fluid-drag on the discharge of free-flowing solids from hoppers”, Powder Technology, **6**, 91~96 (1972)
- 11) Daeves, K., Flachsbart, O.: “Strömung von

- Menschenmengen", Z. VDI, **94**, 880~881 (1952)
- 12) Deming, W. E., Mehling, A. N.: "The gravitational flow of fertilizers and other comminuted solids", Ind. Eng. Chem., **21**, 661~665 (1929)
 - 13) Gardner, G. C.: "The best hopper profile for cohesive material", Chem. Eng. Sci., **18**, 35~39 (1963)
 - 14) Gardner, G. C.: "The axisymmetric "best" hopper and "best" hoppers integrated with bins", Chem. Eng. Sci., **19**, 283~288 (1964)
 - 15) Harmens, A.: "Flow of granular material through horizontal apertures", Chem. Eng. Sci., **18**, 297~306 (1963)
 - 16) 長谷川猛虎, 川合清一, 上里公平: "粒体のホッパーからの流出について", 化学工学協会 第1回秋期大会講演要旨集, 151~152 (1967)
 - 17) Holland, J., Miles, J. E. P., Schofield, C., Shook, C. A.: "Fluid drag effects in the discharge of granules from hoppers", Trans. Instn Chem. Engrs., **47**, 154~159 (1969)
 - 18) 出光保夫, 後藤圭司, 田中達夫: "ホッパーからの粒体の流出機構に関する一考察", 化学工学協会 第31年会講演要旨集, 423~424 (1966)
 - 19) 五十嵐平太郎, 青木隆一: "レビュー "固体の取扱い", ホッパーからの流出", 化学工学, **28**, 698~704 (1964)
 - 20) 五十嵐平太郎: "水平円形オリフィスからの粉粒体の自然流出速度", 化学工学, **32**, 718~719 (1968)
 - 21) Igarashi, H.: "Gravity flow of non-cohesive bulk solids through a horizontal circular sharp-edged orifice", Res. Rep. Nagaoka Tech. Coll., **4**, 27~39 (1968)
 - 22) 五十嵐平太郎: "平底容器からの砂の二次元流出 (I)一回分流出のフローパタンについて", 粉体工学研究会誌, **6**, 176~183 (1969)
 - 23) 五十嵐平太郎: "平底容器からの砂の二次元流出 (II)一マスフローについて", 粉体工学研究会誌, **6**, 331~336 (1969)
 - 24) Igarashi, H.: "Gravity flow of non-cohesive bulk solids through a conical orifice", Res. Rep. Nagaoka Tech. Coll., **13**, 5~17 (1977)
 - 25) 今木清康: "ホッパー内の流動に関する研究 I, 日本機械学会前刷集", No. 66 (62-4, 第39期通常総会学術講演会), 17~20 (1962)
 - 26) Johanson, J. R., Colijn, H.: "New design criteria for hoppers and bins", Iron and Steel Engineer, October, 85~104 (1964)
 - 27) Johanson, J. R.: "Method of calculating rate of discharge from hoppers and bins", Trans. Soc., Mining Eng., **232**, 69~80 (1965)
 - 28) 国井大蔵: "流動化法" 212, 日刊工業新聞社(1962)
 - 29) Lee, Y.: "Flow of coal in hoppers", Combustion, **31**, 20~27 (1960)
 - 30) Leva, M.: "Fluidization" 156~163, McGraw-Hill Co. (1959)
 - 31) Levinson, M., Shmutter, B., Resnick, W.: "Displacement of velocity fields in hoppers", Powder Technology, **18**, 29~43 (1977)
 - 32) Matthée, H.: "Zur formelmässigen Erfassung von Austragsmengen aus Bunkern—Das Verfahren von Jenike", Ber. Wiss., **13**, 333~341 (1966)
 - 33) Miles, J. E. P.: "Some aspects of the flow of particulate materials from hoppers", J. Soc. Cosmetic Chemists, **21**, 53~72 (1970)
 - 34) 三輪茂雄: "粉体オリフィスの設計", 粉砕, No. 8, 25~30 (1962)
 - 35) 三輪茂雄; 井伊谷鋼一編 "粉体工学ハンドブック" 116~123, 朝倉書店 (1965)
 - 36) 三輪茂雄: "粉粒体工学" 207~221, 朝倉書店(1972)
 - 37) 三輪茂雄: "オリフィスからの粉粒体の流出", 粉体工学研究誌, **9**, 27~32 (1972)
 - 38) 三輪茂雄, 神田正紀: "ホッパー内の粉粒体の流動について一流出角の測定一", 粉体工学研究会誌, **10**, 324~329 (1973)
 - 39) 森川敬信: "オリフィスおよびノズルによる粒体の流出量の測定", 粉砕, No. 9, 3~6 (1963)
 - 40) Morrison, H. L., Richmond, O.: "Application of Spencer's ideal soil model to granular materials flow", J. Appl. Mech., **43**, 49~53 (1976)
 - 41) Mróz, Z., Szymanski, Cz.: "Gravity flow of a granular material in a converging channel", Arch. Mech. Stos., **23**, 897~917 (1971)
 - 42) Orr, C.: "Particulate Technology" 156~165, Macmillan Co. (1966)
 - 43) Otte, W.: "Strömung von Menschenmengen durch Engpässe", Z. VDI, **95**, 240~241 (1953)
 - 44) Pariseau, W. G., Fowkes, R. S.: "Bin Hopper Engineering and Bulk Materials Flow; A state-of-the-art report on empirical and theoretical analyses", Bureau of Mines Information Circular/1972, BuMines I C 8552, 1~36 (1972)

- 45) Pemberton, C. S.: "Flow of imponderable granular materials in wedge-shaped channels", J. Mech. Phys. Solids, **13**, 351~360 (1965)
- 46) Perry, M. G., Handley, M. F.: "The dynamic arch in free flowing granular material discharging from a model hopper", Trans. Instn Chem. Engrs, **45**, 367~371 (1967)
- 47) Perry, M. G., Rothwell, E., Woodfin, W. T.: "Velocity distributions in the discharge of solids from mass-flow bunkers", Powder Technology, **14**, 81~92 (1976)
- 48) Pilpel, N.: "Flow properties of non-cohesive powders", Chemical and Process Engineering, April, 167~171 (1965)
- 49) Pilpel, N.: "The flow of powders and granular solids", British Chemical Engineering, **11**, 699~702 (1966)
- 50) Rao, V. L., Venkateshwaralu, D.: "Gravity flow of bulk solids in bins and hoppers", Chem. Eng. World **7**, 47~56 (1972)
- 51) Rausch, J. M.: "Gravity flow of solid beds in vertical towers", Ph. D. thesis, Princeton Univ. (1948)
- 52) Reisner, W.: "Beitrag zur Untersuchung der Fließ- und Druckverhältnisse von gebunkerten Schüttgütern in Abhängigkeit von der Bunkerform", Bergb. Wiss., **8**, 175~189 (1961)
- 53) Reisner, W.: "The behaviour of granular materials in flow out of hoppers", Powder Technology, **1**, 257~264 (1967/1968)
- 54) Reisner, W.: "Probleme beim Speichern von Schüttgütern", VDI-Berichte, Nr. 169, 5~9 (1971)
- 55) Richmond, O.: "Gravity hopper design", Mechanical Engineering, **85**, 46~49 (1963)
- 56) Rose, H. E., Tanaka, T.: "Rate of discharge of granular materials from bins and hoppers", The Engineer, **208**, 465~469 (1959)
- 57) Savage, S. B.: "The mass flow of granular materials derived from coupled velocity-stress fields", Brit. J. Appl. Phys., **16**, 1885~1888 (1965)
- 58) Savage, S. B.: "Gravity flow of a cohesionless bulk solid in a converging conical channel", Int. J. Mech. Sci., **9**, 651~659 (1967)
- 59) Schwedes, J.: "Fließverhalten von Schüttgütern in Bunkern", 107~170, Verlag Chemie, Weinheim/Bergstr. (1968)
- 60) 篠原邦夫, 出光保夫, 田中達夫: "ホッパーからの粉粒体流出速度式の誘導と既往の実験式との比較", 化学工学, **31**, 718~719 (1967)
- 61) 篠原邦夫: "レビュー "粉体", 容器内の粉体の挙動", 化学工学, **32**, 752~755 (1968)
- 62) Shinohara, K., Idemitsu, Y., Gotoh, K., Tanaka, T.: "Mechanism of gravity flow of particles from a hopper", I & EC, Process Design and Development, **7**, 378~383 (1968)
- 63) Shinohara, K., Tanaka, T.: "An approximate consideration on the mechanism of gravity flow of particles through an aperture of a storage vessel on the basis of a block-flow model", Chem. Eng. Sci., **29**, 1977~1989 (1974)
- 64) Spencer, A. J. M.: "A theory of the kinematics of ideal solids under plane strain conditions", J. Mech. Phys. Solids, **12**, 337~351 (1964)
- 65) 田中達夫, 川合清一: "粉粒体がホッパーから流出する速度について", 化学工学, **20**, 144~146 (1956)
- 66) 田中達夫: "粉体プロセス入門", 1~5, 工学図書 (1968)
- 67) 網川浩, 青木隆一: "ホッパーからの粉粒体の流れに関する一考察", 粉体工学研究会春期例会講演要旨集, 28~32 (1977)
- 68) Walters, J. K.: "A theoretical analysis of stresses in axially-symmetric hoppers and bunkers", Chem. Eng. Sci., **28**, 779~789 (1973)
- 69) Welschhof, G.: "Beitrag zur Messung der Ausflussmengen körniger Güter mit Blenden und Düsen", Landtech. Forsch., **11**, 138~141 (1961)
- 70) 油谷暢悦: "オリフィスからの粉粒体の流出速度式 (I) —重力下の場合—", 粉体工学研究会誌, **12**, 289~297 (1975)
- 71) Zenz, F. A.: "How to predict gravity flow rates", Hydrocarbon Process. & Petrol. Refiner, **36**, 162~170 (1957)
- 72) Zenz, F. A., Othmer, D. F.: "Fluidization and Fluid-Particle Systems", 136~147, Reinhold Pub. Corp. (1960)
- 73) Zenz, F. A.: "Use fluid data for solids flow rates", Hydrocarbon Process. & Petrol. Refiner, **41**, 159~168 (1962)
- 74) Залогин, Н. Г., Кенеман, Ф. Е., Воробьев, В. Н.: "О механизме свободного истечения сыпучих тел, Инженерно-Физический Журнал, **3**, 18~22 (1960)
- 75) Циборовский, Я., Бондзыньски, М.: "Свободное истечение сыпучего материала через отверстие в конусном днище сосуда, Инженерно-Физический Журнал, **6**, 26~35 (1963)

カオリン鉱物の精製,特性とその利用

Purification, Properties and Utilizations of Kaolin Minerals

高坂 彬夫*
Ayao Takasaka

1. はじめに

カオリン鉱物, 硫酸バリウム, 炭酸カルシウム, 亜硫酸カルシウム, 珪藻土, サチンホワイト, 酸化チタン, 酸化亜鉛, 硫化亜鉛などは白色顔料として重要なものである。

カオリンは古くから使用されてきたが, その性質が研

本稿においては, カオリン鉱物の特性とわが国の製紙工業に使用されている山形県板谷産のカオリン鉱物を例にとりその産出, 精製, 特性および利用の面などについて述べる^{5) 6)}。

2. 鉱 床

カオリンの大規模な鉱床は米国の Georgia 地方にみ

Table 1 わが国のカオリンの輸入と生産

区 分 国 別	昭 和 50 年			昭 和 51 年		
	数 量 (t)	価 格 (千円)	円/t	数 量 (t)	価 格 (千円)	円/t
米 国	176,905	7,008,690	39,618	268,153	10,612,771	39,577
韓 国	92,738	622,350	6,711	83,869	602,148	7,180
北 朝 鮮	7,770	68,445	8,809	10,833	107,945	9,965
そ の 他	6,976	160,095	—	10,965	329,710	—
合 計	284,389	7,859,580	—	373,820	11,652,574	—
日 本*	298,459	—	—	230,499	—	—

* 生産 カオリンクレーを含む

究されるにつれて, 他の白色顔料にくらべて製紙工業で大量に使用されるようになった¹⁾。

わが国においては, 近年良質のカオリン資源が乏しくなり, その精製工程が一段と高度化するとともに, 精製のための費用もさらにかかるようになった。このため, 輸入によるカオリン資源の確保, それに代わる顔料の開発研究も活発に行なわれるようになった²⁾。

Table 1 はわが国のカオリンの輸入および生産の現状を示したもので, 国内需要の不足分を米国, 韓国, 北朝鮮などからの輸入で賄っている^{3) 4)}。

られる。Georgia カオリンは雲母質片麻岩が自然の崩壊作用を受け, 2 次的に沈積して生成されたため, 砂粒あるいは摩耗性の不純物が少なく, 六角板状の粒子を含有する。

このため, 高不透明度, 強光沢度のコート紙を生産するのに適している。Georgia カオリンの埋蔵量は巨大で1億トンを上回り, 100 年以上の供給量を有するといわれている。

この他重要なのは, 英国 Cornwall 地方のカオリンである。これは母岩である長石が化学的に風化を受け, 生成の過程で母岩鉱物のアルカリ金属は水に溶出して残渣として珪酸アルミニウムすなわちカオリンが残ったものである。この1次カオリンは約80%もの砂粒, 雲母, その他付随する鉱物を含むため, これを除去することに

* 山形大学工学部
(〒992 米沢市城南4丁目3-16)
Tel (0238) 22-5181

よって製紙用に適した製品が得られる。

その他、チェコスロバキア、インドなどにも製紙用のカオリンを産出する。

板谷産カオリンの鉱床は、奥羽本線板谷駅南方約4.5 kmの地点にあり、鉱体はカオリナイト、セリサイトを主成分とする塊状鉱床で、露天採掘、馬蹄型ベンチカット法により採掘されている⁵⁾⁶⁾。

3. 精製法

原鉱のまま製紙用その他に供給できる純度や物理化学的諸性質のとのったカオリンは存在しない。このため、原鉱は乾式法または湿式法によって精製される。

3.1 乾式法

乾式法は工程が比較的簡単で低コストの製品を得ることができるが、コーティング用カオリンとしては適当でない。フィラー用として使用する場合でも、処理した製品の性質は原鉱の性質に近いので、所要の白色度、摩耗性の珪砂を含まない原鉱を用いなければならない。

その設備は先に報告した天然ゼオライトの乾式精製法⁷⁾に類似しているので詳細は省略する。

3.2 湿式法

高級のコーティング用カオリンおよび製紙用のカオリンはすべて湿式法によって精製される。米国の湿式法によるカオリンの製造工程についてはすでに報告されているので⁸⁾、本稿では板谷産カオリンの湿式精製法について述べる。

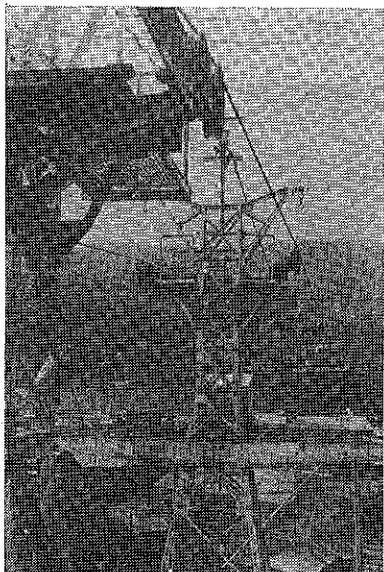


Photo. 1 カオリン鉱物の輸送

鉱床よりケーブル(Photo. 1)によって輸送されてきた原鉱は、インペラブレーカーによって約20mmに粗砕さ

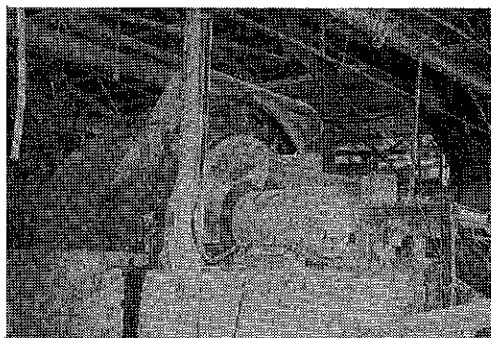


Photo. 2 ボールミル

れる。さらに、水とともにコンカルボールミル(Photo. 2)あるいはロータリスクラバーで懸濁液がつくられる。

カオリンのスラリーは6"サイクロンで270 mesh オールパスまで分級され、つぎに、特に Fe^{2+} 、 Fe^{3+} の水溶性塩類を除くために、アメリカンディスクフィルター

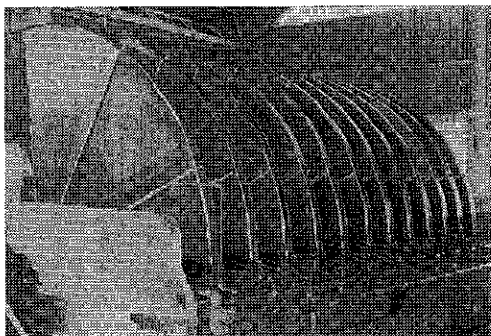


Photo. 3 ディスクフィルター

(Photo. 3)で処理され洗滌される。ケーキは再分散され、つぎに、浮選機(Photo. 4)に導かれ、硫化鉱が除去される。浮選機から出たスラリーは種々の直径の液体サイクロンによって分級され、工業的用途に応じて粒度別に区分される^{10)~14)}。



Photo. 4 浮選機

分級されたスラリーは酸化または還元漂白される。

このため、硫酸、次亜塩素酸ナトリウム、チオ硫酸ナトリウム、ハイドロサルバイトナトリウムなどの薬品が使用される。

カオリンのスラリーは陽イオン交換塔に導かれ、ここで水溶性鉄イオンが除去される。イオン交換塔を出た製紙コーティング用カオリンスラリーは遠心分離機¹⁵⁾ (Photo. 5, 6) 濃縮タンク、さらにフィルタープレス (Photo. 7) で70%まで濃縮される。

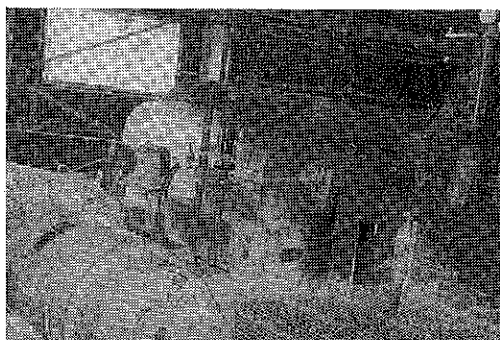


Photo. 5 パード型遠心分離機

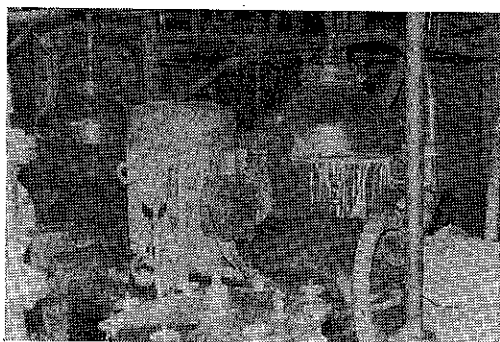


Photo. 6 ノズル型遠心分離機

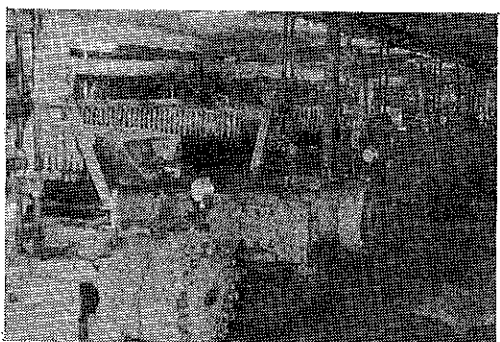


Photo. 7 フィルタープレス

製紙フィラー、ペイントおよびゴム用のものは24~30%までタンク中に濃縮されたものを真空ストリングフィルター

ルター (Photo. 8) で固体分濃度約72%まで脱水する。脱水された各カオリンケーキはコンベヤドライヤー (Photo. 9) で製紙コーティング用のものは含水率約3%まで、フィラー用のものは約2%まで乾燥される。

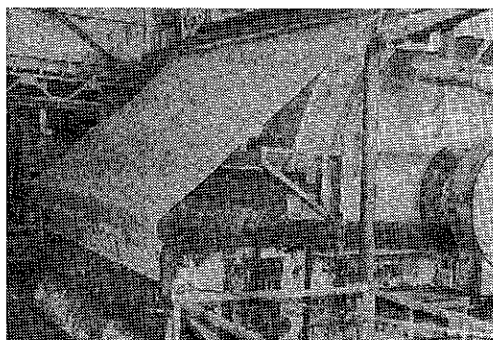


Photo. 8 ストリングフィルター

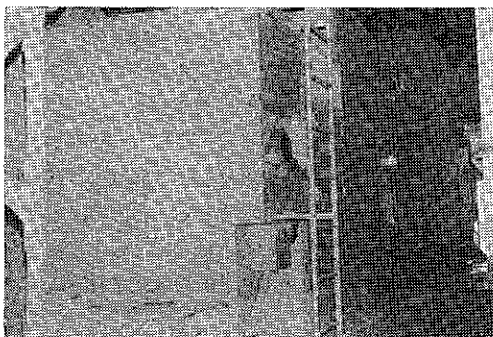


Photo. 9 コンベヤドライヤー

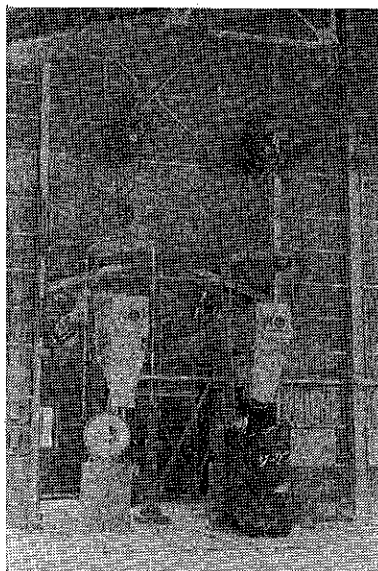


Photo. 10 自動パッカー

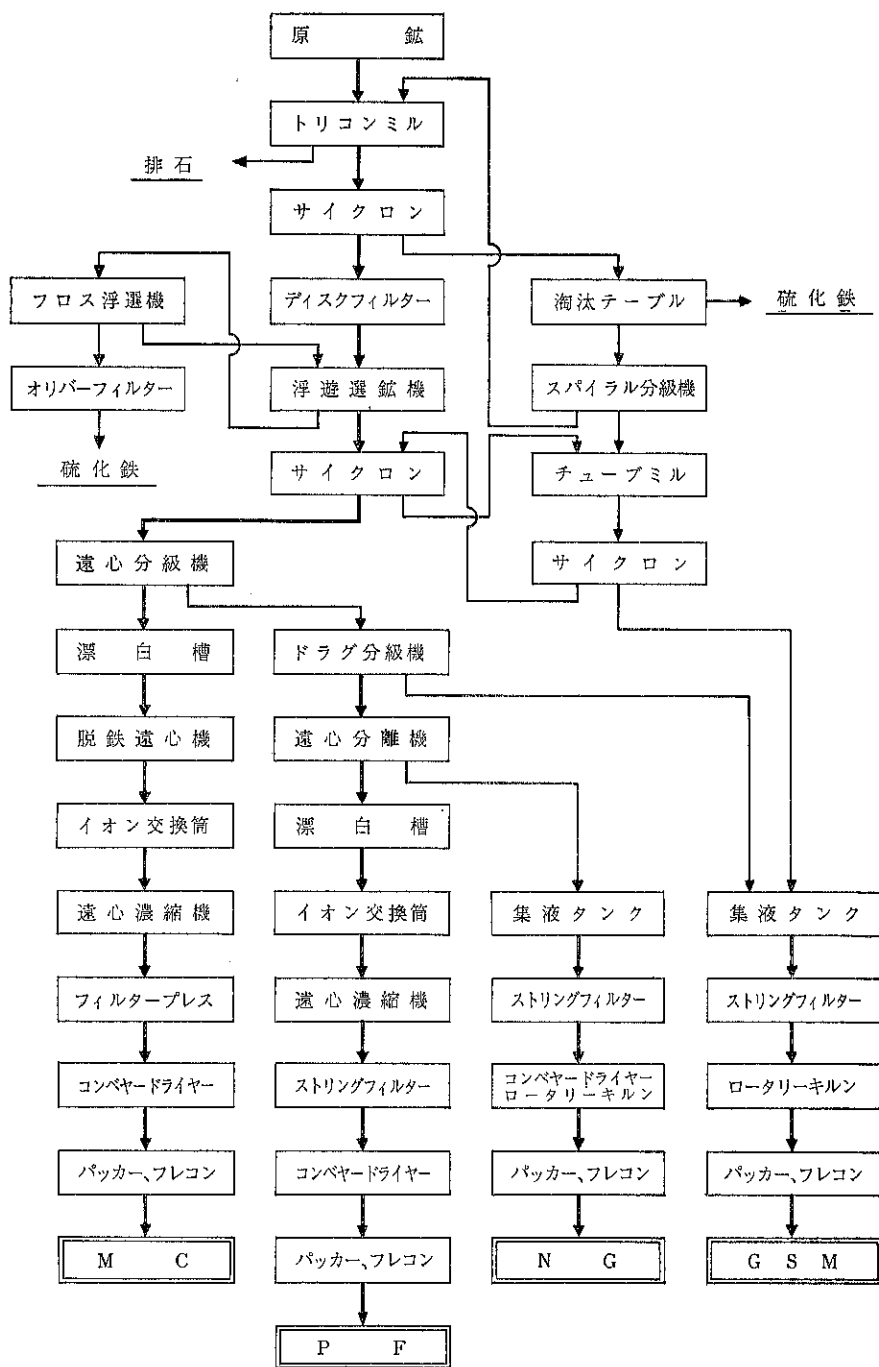


Fig. 1 板谷産カオリンの精製工程

ペイントおよびゴム用のものは含水率が約1%まで回転乾燥機で乾燥される。

乾燥製品は自動パッカーでクラフト袋中に包装するか、容量1トンのコンテナ袋に入れられる。(Photo.10)

消費者への輸送は鉄道またはトラック便で行なわれる。Fig.1は板谷産カオリンの精製工程を示したものである。

4. カオリン鉱物の諸性質

4.1 カオリンの形状

カオリン鉱物の1種であるカオリナイトは直径が約2 μm を限界としてその粒子の形状が変化する。2 μm 以下のカオリナイトの粒子は微少の六角板状結晶とそれが不規則に集合したものとの混合物として存在する。結晶の厚みは直径の約 $\frac{1}{10}$ である。2 μm 以上の粒径のものは六角板状結晶が強固に結合、重畳した集合物からなる。

各国産のカオリンの形状の電子顕微鏡写真は多くの文献にみられる^{16) 17)}。

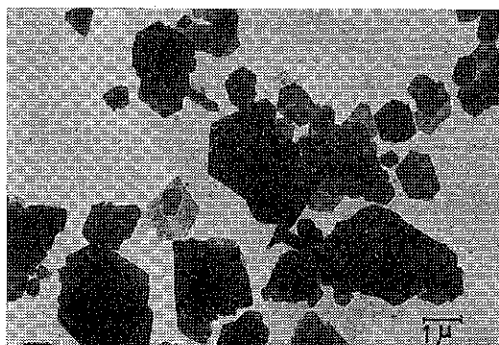


Photo. 11 板谷産カオリン

Photo. 11 は板谷産カオリンの電子顕微鏡写真で、その粒子の大部分は2 μm 以下である。この板状形の粒子はコートすべき表面に対して平行に配列される傾向が著しく大きい。

白色顔料の不透明度すなわち隠蔽力は、主として顔料内部の面における光の反射によって決まる。極度に偏平なカオリナイトはこの点で全く理想的である。

直径が2 μm 以上の粒子は積層 (stack) されていることが多い。これは単一の板状粒子というよりはむしろ殆んど等方性の形態のものとなっている。この stack を工業的規模で剝離し薄くすることが試みられている¹⁸⁾。

4.2 化学組成

カオリン鉱物中のカオリナイトの化学式は $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ で示される。Georgia カオリンおよび他産のカオリン鉱物の代表的な分析値を Table 2 に示す。Georgia カオリンの特徴はシリカ分が少なくアルミナの量が多い。不純物としては酸化鉄が0.5%以下、酸化チタンが1~2%である。

最近、国産のカオリンは品質が低下し、シリカ分が多くアルミナ分が少ないものが多くなった。

Table 2 カオリン鉱物の化学組成

組 成 (%)	1	2	3	4	5
SiO_2	46.5	44.90	46.77	46.44	47.27
Al_2O_3	39.5	38.35	37.79	37.65	34.72
Fe_2O_3		0.43	0.56	0.60	1.29
MgO		Trace	0.24	0.25	0.68
CaO		Trace	0.13	0.24	0.17
K_2O		0.28	1.49		
Na_2O		0.14	0.05		
TiO_2		1.80	0.02		
H_2O (付着)		—	0.06		
H_2O (結晶)	14.0	14.20	12.18	13.67	14.63
合 計	100.0	100.10	99.84	98.85	98.76

1. カオリナイト理論値
2. 代表的な2次カオリン (米国産)
3. 水ひ1次カオリン (英国産)
4. 国産カオリン
5. "

製紙用のカオリンには遊離の水分と結合水の2種が存在する。遊離の水分は105°C に加熱すれば除去されるが、結合水は400°C 以下では安定で500°C 付近から放出する。

市販の乾燥したコーティングカオリンは空気中の水分を吸着する性質が少ない。また、稀薄な酸およびアルカリには侵されない。

4.3 結晶構造

カオリナイトの結晶構造は Brindley によって詳細に研究された²⁰⁾。それによると結晶性の良いカオリナイトは三斜晶系に属し、 $a_0 = 5.14\text{\AA}$, $b_0 = 8.93\text{\AA}$, $c_0 = 7.39\text{\AA}$, $\alpha = 91.8^\circ$, $\beta = 104.5^\circ$, $\gamma = 90^\circ$ の格子定数をもつ。

Fig. 2 にカオリナイトの構造ならびにその層の積み重なり方を示す。カオリナイトにおいて Al 原子の位置を考えると右型のものと左型のものが存在する。

以上は構造層の規則的な積み重なり方の場合であるが、粘土鉱物のような層状構造のものにはしばしばこの規則的積み重なり他に変位が不規則に起こっていることが知られている。

経時変化と共にカオリナイトの結晶性は高くなるので、地質時代の新しい本邦産のカオリナイトは外国の古い時代のカオリナイトに比べて結晶性が低い²¹⁾。

4.4 加熱変化

カオリン鉱物の加熱に伴う組成、構造変化については、X線回折、熱重量および示差熱分析などによって研究されている。(Table 3 参照)

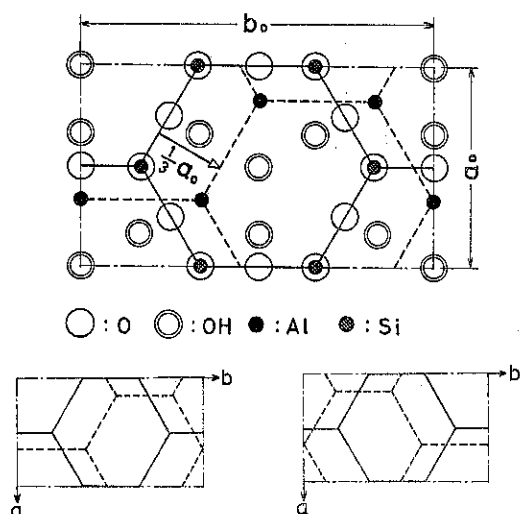


Fig. 2 カオリナイト層の構造と異方性

Table 3 カオリナイトの加熱変化

温度(°C)	組成および変化
20~150	付着水の脱着
400~600	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ が熱分解して結晶水がとれ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ が生成する。この反応は吸熱で、比容積が増加する。
850~1050	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 無定形のムライト ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) とトリジマイト (SiO_2) を生ずる。
1350 付近	ムライトの結晶化が始まる。
1470	トリジマイトはこの温度以上では不安定でクリストバライトの形が安定である。
1545	クリストバライトとムライトの共晶を生ずる。その組成は Al_2O_3 5.5%, SiO_2 94.5% である。
1745~1790	最終的な融点
2000 付近	SiO_2 が蒸発し SiO に還元される。その結果純粋なムライトができる。

カオリナイトの脱水反応の反応速度については多くの研究がある²²⁾²³⁾。Murray および White²⁴⁾によると 524°C における反応速度は 1 次である。

筆者らが示差熱分析装置を使用して Kissinger の方法で求めた国産カオリン鉱物の脱水反応は 1 次~1.5 次であった²⁵⁾。

4.5 粒度分布および比表面積²⁶⁾

カオリンをコーティング顔料として使用する際、その粒度分布は非常に重要である。

1 cm² の光沢コート紙には粒径 1 μ の粒子ならば約 20

億個のカオリン粒子が存在すると言われており、顕微鏡的手段を用いて粒度を測定することは、統計的に考察するとサンプリングに十分注意を払っても困難である。

シャドウイング法を用いた顕微鏡写真でも、殆んど 2 次元に制限された知識しか得られない。このため、真に完全な粒径データが得られるのは立方体状のものを扱う場合に限られるが、カオリンの粒子は一つとして 3 次元に等方性のものがない。

このため、実際の場合は Stokes の法則を使用した沈降法が用いられる。懸濁された粒子の沈降速度を測定するために使用されている装置としてはアンドレアゼンビペット、沈降天秤および比重計がある。これらはそれぞれ特長を持っているが、カオリンを対象とする場合は測定に長時間を要し、測定し得る粒子の大きさにも限界がある。

筆者らは遠心式光透過法による粒度分布測定装置を開発した²⁷⁾²⁸⁾。本測定装置によると従来、アンドレアゼンビペット法で数日を要するようなカオリン鉱物の粒度分布測定が短時間で終了するばかりでなく、自然沈降法による光透過法で測定が困難であったカオリン鉱物の粒度分布が良好な再現性のもとで測定できるようになった。

Fig. 3 は各国産カオリン鉱物の粒度分布測定結果の例である。

カオリン鉱物の比表面積は一般に BET 法によって測定される。吸着ガスとして窒素が広く用いられるが、クリプトンなども利用されている。水蒸気の単分子層を形成する相対圧 P/P_0 は 0.19 付近である²⁹⁾。

空気透過法によるカオリン鉱物の比表面積測定法としては Lea and Nurse 法、Fisher sub-sieve sizer 法、Blaine 法などが用いられているが、わが国では恒圧通気法が一般に用いられている。

4.6 白色度

カオリン粒子の大きさおよび有色不純物は白色度に影響する。粗製カオリンから得られた微粒子状のカオリンは、他の要素が一定であれば粗粒子よりも白色度が大きい。しかし米国産カオリンは 0.25 μm を限界とし、それよりも細くなると白色度と隠蔽力が減少すると言われている。

白色度は Hunter 白色度計などによって測定される。ある種のカオリンは 700°C 以上に加熱するとかなり白色度が向上する²⁵⁾。しかし摩耗性はかなり増加する。

4.7 流動性と噴流性

カオリンを取り扱う場合、その流動性と噴流性は特に重要な特性である。パウダーテスター³⁰⁾によるカオリ

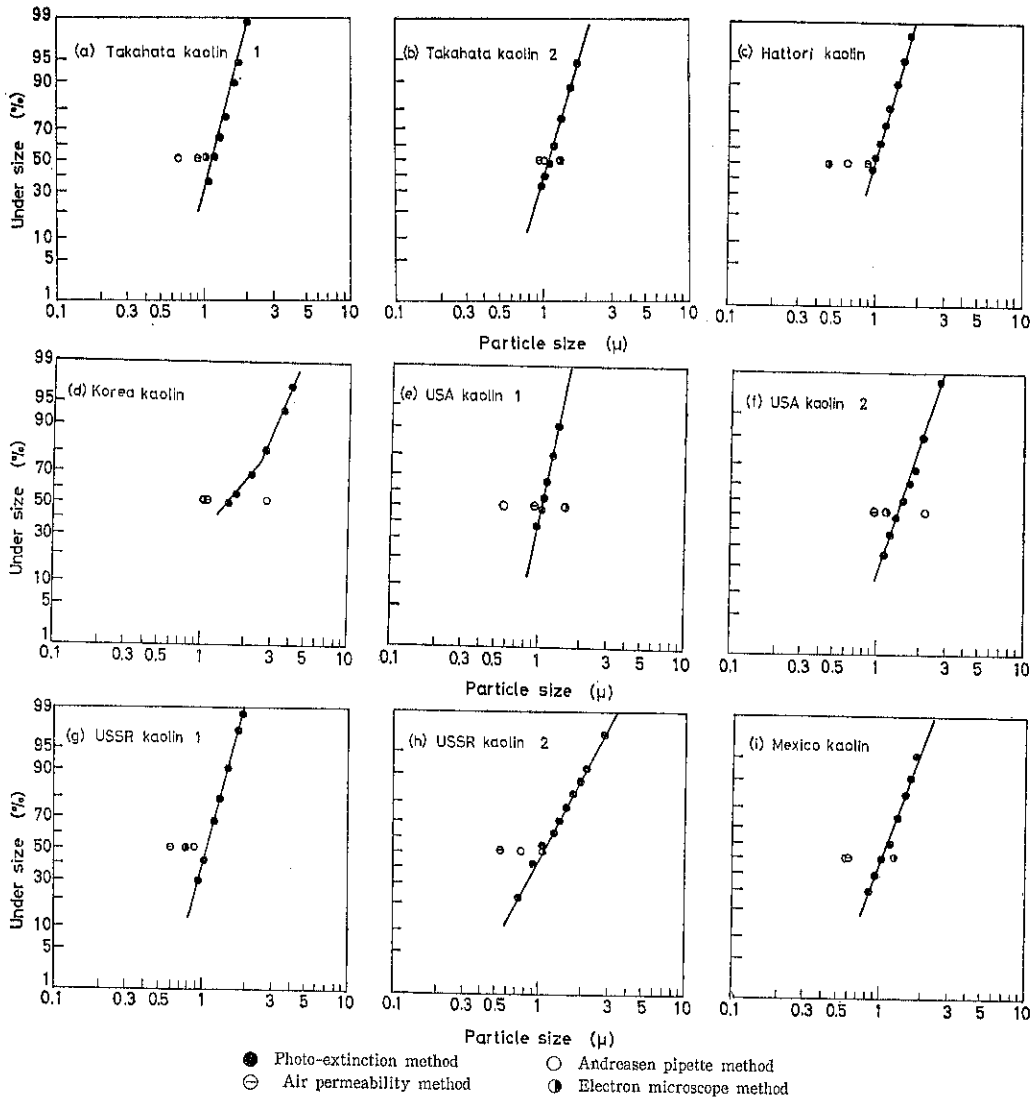


Fig. 3 各国産カオリンの粒度分布

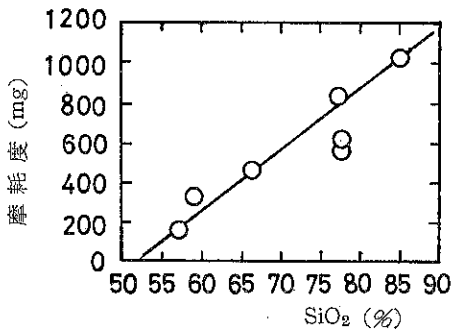


Fig. 4 磨耗度におよぼす SiO_2 含有量の影響

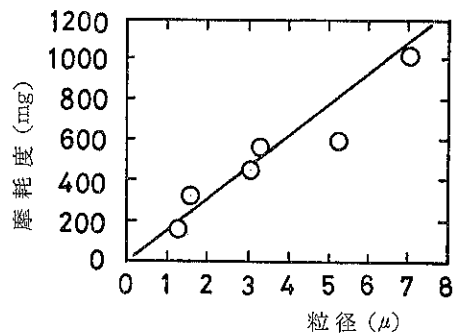


Fig. 5 石英を多く含むカオリンの磨耗度におよぼす粒径の影響

Table 4 カオリン鉱物の物理的性質

	国産カオリン 1	米国産カオリン 1	国産カオリン 2	米国産カオリン 2	国産カオリン 3
ゆるみ見掛密度(g/cm ³)	0.617	0.600	0.328	0.273	0.180
固 め "	1.129	0.959	0.675	0.682	0.480
動 的 "	0.849	0.730	0.510	0.520	0.370
圧 縮 度 (%)	45.34	37.43	51.41	59.97	62.50
安 息 角 (°)	52.7	44.4	49.7	42.7	47.1
スパチュラ角 (°)	65.0	66.6	66.7	65.1	69.7
凝 集 度 (%)	5.92	34.47	6.40	41.25	53.92
流 動 性 指 数	40.5	40	38.5	35	31
崩 潰 角 (°)	24.0	24.5	36.7	24.9	32.3
差 角 (°)	28.7	19.9	13.0	17.8	14.8
分 散 度 (%)	72.5	8.6	28.0	9.0	34.0
噴 流 性 指 数	86	63.5	60.5	58.5	58.5

ンの物理的性質, Carr 流動性指数および噴流性指数の評価は Table 4 の通りである³¹⁾.

4.8 摩耗係数

カオリン鉱物の摩耗性は Valley 摩耗試験機によって

測定される. この方法は必ずしも正確な再現性を与えないが, 摩耗度の評定値として使用されている.

筆者らは各種粘土鉱物の摩耗性を Valley 試験機を用いて研究した³²⁾. カオリン鉱物の摩耗性は その種類,

Table 5 ジークライト製品の特性

項目	品名	MC	P F	NG	GSM	摘 要
水分		4.0% ↓	2.0% ↓	1.0% ↓	0.5% ↓	赤外線水分計 (105°C-1h)
pH		8~9.5	4~6	4~6	4~6	pH メーター (20% solid)
残 渣		0.05% ↓ (325M) ↓	0.1% ↓ (325M) ↓	0.5% ↓ (250M) ↓	1.0% ↓ (250M) ↓	標 準 篩 (J I S)
白 色 度		88% ↑	85% ↑	77% ↑	73% ↑	P C B 白色度計 (ホトボルト・ リフレクション)
粒 度	+5μ -2μ	5% ↓ 72% ↑	+15μ 10% ↓ - 5μ 75% ↑	30% ↓ 15% ↓	50% ↓ 10% ↓	アンドレアゼン ピペット法
化 学 分 析	SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ CaO TiO ₂ Ig loss	56~58% 28~30% 0.5% ↓ 0.3% ↓ 0.05% ↓ 7~9%	68~75% 18~20% 0.4% ↓ 0.3% ↓ 0.07% ↓ 4~5.5%	89~90% 5~6% 0.3% ↓ 0.2% ↓ — 1.5~2%	90~92% 4~5% 0.3% ↓ 0.2% ↓ — 1.2~1.7%	重 量 法 キレート法 光電比色法 キレート法 光電比色法 重 量 法
仮 比 重		0.20~0.35	0.30~0.40	0.50~0.60 0.55~0.65	0.60~0.65 0.65~0.75	農薬公定法
吸 油 量		50~55cc/100g	25~30cc/100g	—	—	顔料試験法 (アマニ油)
X線判定		カオリナイト(K) セリサイト(S)	K S ≫ Q(石英)	K S ≪ Q	K S ≪ Q	ガイガーフレックス X 線 分 析
包装形態		3P 紙袋25kg 入 フレコンバック 1t入	3P 紙袋25kg 入 フレコンバック 1t入	3P 紙袋25kg 入 フレコンバック 1t入 ワンウェイバック 1t入	3P 紙袋25kg 入 フレコンバック 1t入 ワンウェイバック 1t入	

不純物、粒度などによって大きく影響を受ける。Fig. 4 は摩耗性におよぼす SiO_2 の含有量、Fig. 5 は粒径の影響である。

カオリン鉱物の摩耗性は散弾法や筆者らの研究した攪拌法によっても測定できる³⁸⁾³⁴⁾。

4.9 粘 度

カオリン懸濁液の粘度を比較するためには、十分に分散した濃厚な水溶液についてなるべく2つ以上の剪断速度の下で測定する必要がある。米国や英国産のコーチングカオリンについては71%の高濃度で Brookfield 粘度計による測定が行なわれている。

わが国の測定の1例としてB型粘度計を用いカオリン濃度60 wt % (分散剤、ピロ磷酸ナトリウム、対カオリン0.5 wt %) において6 r.p.m, 60 r.p.m で測定されている。

低濃度のカオリン懸濁液の粘度はオストワルド粘度計でほぼ測定することができる。カオリンにモンモリロナイトが含まれると粘度は増大する³⁵⁾。

4.10 pH

製紙用のカオリン懸濁液の pH は一般に微酸性であり、化学的に脱色したカオリンの pH は通常4.0~6.0位である。分散性を良くするためにアルカリの解膠剤を加えたものの pH は8.0~9.5である。

カオリン鉱物懸濁液の pH はガラス電極 pH メーターで例えば固体分濃度20%で測定される。コーチング用カオリンは強力な還元剤などによって脱色されているから、これら薬品が極微量カオリンの中に残っていても pH 値に大きく影響する。

Table 5 は板谷産カオリン鉱物を湿式精製分級して得られた製品の特性値である。

5. カオリンの利用

近年、製紙用コーチングおよびフィラー用カオリンに関する研究が進み、その基本的性質が明らかになるにつれて、従来の応用面ばかりでなく新しい用途が開けてきた。以下、カオリンの主なる利用の面について述べる。

5.1 製 紙

普通の紙はパルプを主成分とし、サイズ剤、充てん剤その他を配合して抄紙される。紙に充てん剤を入れることによりコストの低減、寸法の安定性、紙面の平滑度、光沢性、印刷効果を向上させる。しかし、紙力を弱めるために包装用紙にはあまり多く使われていない。

充てん剤を添加した紙はそれだけでは未だ最高の印刷に適するほどの平滑度が十分でない。このため、紙の表面をさらに白色度が高い細かいカオリンをカゼイン、澱粉、ラテックスなどの接着剤とともに分散させた水溶性

塗料で薄膜状にコートし、カレンダーにて紙面の平滑性と光沢を与える。こうすることにより印刷インキの吸収も均一になり印刷効果も向上する。

5.2 プラスチック充てん剤

カオリンは珪酸アルミニウム顔料として塗料、顔料の充てん剤として広く利用されているが、有機系溶剤中でのぬれが悪く分散しにくいので実用面が限定されている。このため、カオリンの表面改質法が研究されている³⁶⁾。

処理方法としては湿分を1%以下にした0.5 μm の水ひしたカオリンに重量比で1%の1級アルキルアミンの酢酸塩を加えてスチーム・ジェットミル中で粉碎する。アルキル鎖は $\text{C}_4\sim\text{C}_8$ を含んでいるものが適している。処理したカオリンはポリエステル樹脂の充てん剤として用いることができる。

塩化ビニル電線の絶縁性の低下は、塩化ビニル樹脂および配合剤、着色剤などに含まれている微量の不純物および熱分解によって生成する塩化水素が最も大きな要因と考えられる。したがって、塩化ビニル樹脂の体積抵抗率を向上させるためには、この遊離イオンを固定するような物質を配合させることが効果的である。

カオリンを500~800°Cで焼成すると構造水が脱出し、もとの結晶構造がなかば崩壊し多数の活性中心を生じ、この部分に遊離のイオンが吸着固定され絶縁向上効果が発揮されるものと考えられる。また、焼成処理は有機物を分解し白色度を向上させ、微粒のカオリンコロイドの焼成によって粒度をやや粗くし分散しやすくする利点がある。このカオリンの焼成は低周波流動焙焼法を利用することにより促進される³⁷⁾。

Table 6 は JIS K 6723 (軟質塩化ビニルコンパウンド) により混練性、試料の色、体積抵抗率と向上率、熱安定性および加熱変化について行なった試験結果である。

国産カオリンを焼成して得られた焼成カオリンの諸性質は殆んど良好であることがわかった。体積抵抗率については、一般に国産の焼成カオリンを添加したビニルコンパウンドは米国産の Clay # 30 にくらべて悪い。その原因はカオリンを湿式精製する際に残留する微量の不純物と考えられるが詳細は明らかでない。しかし、国産のカオリンの焼成物でも絶縁電線製造の際の原料として期待できるものもあり、一部実際に使用された。

高橋³⁸⁾はカオリン鉱物を乾式および湿式摩砕しその構造変化をX線回折、示差熱分析、電子顕微鏡法などによって研究した。この変化はメカノケミストリーとして興味があり、多量に有効な表面改質ができるようになれば工業的に利用できるようになると思われる。

Table 6 ビニルコンパウンドの諸性質

試料	混練性	試料の色	熱安定性 (min)	加熱変化	分散	体積抵抗率 $\Omega \text{ cm}$		絶縁向上倍数	
						30°C	60°C	30°C	60°C
AF	○	○	240	○	□	1.1×10^{14}	2.7×10^{12}	2.0	2.9
K1	○	○	285	○	○	1.2×10^{14}	5.0×10^{12}	2.2	5.5
SC	○	□	240	○	×	1.0×10^{14}	2.2×10^{12}	1.8	2.4
T1	○	○	300	○	○	1.1×10^{14}	2.8×10^{12}	2.0	3.1
TF	○	○	203	○	×	5.3×10^{14}	2.7×10^{13}	9.0	29.4
Clay 30	○	○	222	○	○	6.3×10^{14}	2.8×10^{13}	11.5	30.5
Blank	○	○	—	○	○	5.5×10^{13}	9.2×10^{11}	1	1

○ 良 □ やや良 × 悪い

最近、カオリン鉱物を遠心型回転ボールミル装置を用いて改質する試みがなされ、カオリンの表面に微細な金属層粉（ステンレス粉、銀粉）を吸着させ特殊な導電性顔料が製造された³⁹⁾。

5.3 ゴムの充てん剤⁴⁰⁾

ゴムの充てん剤としては二層構造のカオリン鉱物が用いられる。カオリン鉱物は未加硫のゴムの生地を硬くし、加硫ゴムに高いモジュラス、引張り強さおよび耐摩耗性を与えるハードクレーとそれほど強度、耐摩耗性を示さないソフトクレーがある。

ハードクレーとソフトクレーは成分的には殆んど差が認められないが、粒径分布、粒子の形状、吸着能などの点で相違がある。

5.4 窯業原料

カオリン鉱物を湿式成形し焼成したものは陶器として日常生活で広く使用されている。

カオリン質鉱物を乾式成形し、これを焼成すると湿式法によるものより寸法精度、品質の高い製品を得ることができる⁴¹⁾。

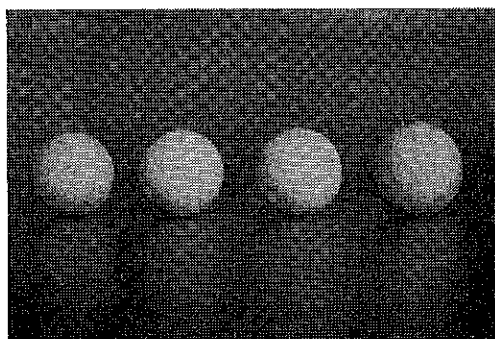


Photo. 12 カオリン質粘土の乾式成形品

Photo. 12 はカオリン質素地を球状粒子とするため噴霧乾燥し、これをゴム型に入れて液体中で乾式成形した

ものである。（成形圧力は写真左より1000, 500, 250, 100 Kg/cm^2 ）

カオリン質鉱物は硼珪酸ガラス（Eガラス）などの製造原料として使用することができる。

純粋なカオリンを電気溶融し高速の空気流によって吹き飛ばして繊維状にしたものは、優れた断熱性と耐熱性を備えている。

Table 7 カオリン繊維の諸性質

使用温度	°C	1260
融点	°C	1760
繊維の径	μm	平均 2.8
繊維の長さ	mm	最長 250 平均 100
真比重	g/cm^3	2.56
比熱	$\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$	0.255 (常温~982°C)
引張り強さ	kg/mm^2	133.6
硬度 (モース)		6
ショット(粒子)含有率 %		8
化学組成 %	Al_2O_3 (アルミナ)	45.1
	SiO_2 (シリカ)	51.9
	Fe_2O_3 (酸化第二鉄)	1.3
	TiO_2 (チタニヤ)	1.7
	MgO (マグネシア)	微量
	CaO (カルシア)	0.1
	Na_2O (アルカリ)	0.2
耐侵食性	冷水、熱水、海水	全く影響されない。
	酸	弗酸、燐酸以外の酸に殆んど侵されない。
	アルカリ	僅かに侵される。

Table 7 はカオリン繊維の諸性質を示したものである。

カオリン繊維はパネル工法による大型熱処理炉の築炉、徐冷カパー、溶接作業における温度急変の調節、溶

接部分の歪みの発生防止、膨張代の充てん、焼鈍炉インナーカバー・ガスシール、オリフィスリングの断熱などに広く使用されている⁴²⁾。

5.5 無機化合物製造原料

群青は一種の珪酸塩で、古くからウルトラマリンとして知られている。

カオリン、ソーダ灰、硫黄、木炭を粉碎混合して空気を断って 500~700°C で数時間加熱すると生成する。組成比によって青緑色、純青色、紫青色となる。耐久性は強いが酸には非常に弱い⁴³⁾。

カオリン鉱物 ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2 \sim 4\text{H}_2\text{O}$) は純度が高いものが得やすいので、ゼオライトAの合成に適している。原料を約 500°C で加熱処理しメタカオリンに変えてからアルカリとともに加熱して結晶化させる。この方法によってゼオライトAばかりでなくゼオライトX、ゼオライトYも合成できる。

結晶度の低いハロサイトおよびアロフェンを原料としてもゼオライトAが合成できる。この場合、原料の結晶度が低いので反応性に富み直接アルカリとともに大気圧下で加熱するだけでゼオライトAが生成する⁴⁴⁾。

5.6 化粧品配合剤

カオリンは大きな被覆力を持ち汗を吸収するから皮膚の鎮静、冷却の作用を持っている。タルクと混ぜるとその輝きを消すことができる。しかし、すべりが悪いので15%内外の混合割合にとどめられている。

良質な微粉状カオリン (オスモカオリン) は粗製のカオリンを適当な電解質を含む水中に分散させ、懸濁した微粒子のみを電気泳動によって集めてつくられる。

5.7 医薬品配合剤

カオリン鉱物は粘土鉱物の中では小さな塩基置換容量を持っており、1~10 meq/100 g 程度である⁴⁵⁾⁴⁶⁾。この性質を利用して胃散中に配合されたことがある。

また、消炎、鎮痛のパップ剤⁴⁷⁾に配合されている。

5.8 農薬粉剤

カオリンは農薬の有効成分に希釈剤として加えられる。なお、希釈剤の性質として粒度分布、見掛け密度、流動性、固着性、経時安定性などが重要である。

5.9 その他

カオリンは上述の他、 $\text{SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$ 系触媒および担体、研磨剤 (カオリンと遊離の石英の混合物)、クレンザー、鉛筆の芯⁴⁸⁾ 製造の原料などとして用いられる。

また、濁度測定標準試料として用いられる⁴⁹⁾。

6. おわりに

カオリン鉱物を主体とした粘土を人類は極めて古くか

ら使用している。例えば、粘土質の地球の表面にコンクリートとガラスなどからできた家を立て、食物をつくり陶器の食器を使用し食事をし、カオリンをコートした紙を使用し印刷物を読み生活している。

カオリン資源は世界的に見れば未だ十分な埋蔵量があるが、わが国では良質なカオリン資源に年々乏しくなっている。このため、残された資源の特性に応じた有効な利用は極めて重要であると考えられる。

最後に貴重な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。

文 献

- 1) TAPPI Monograph Series No. 20, : Paper coating pigments (1958).
- 2) 田中 稔, 橋詰源蔵, 松井 博: “排煙脱硫工程からのセッコウウイスカーについて” 材料, 28, [283] 309~318 (1977).
- 3) 大蔵省関税局貿易統計閲覧室資料
- 4) 通産大臣官房資源エネルギー統計資料
- 5) ジークライト化学鉱業KK: 会社案内
- 6) Zeeklite Chemical & Mining Co: Zeeklite products guide.
- 7) 高坂彬夫: “板谷産ゼオライトの特性と利用” 粉碎, [20] 127~142 (1975).
- 8) 前田立一: 粉体工学ハンドブック, 754, 朝倉書店 (1965).
- 9) 吉岡光典, 遠藤養一郎: “粘土鉱物の分類, 特性および用途” 新しい工業材料の科学A-5, 236, 金原出版 (1966).
- 10) 篠崎平馬, 高坂彬夫, 京極恒由, 佐藤幸作, 中村 操: “小型液体サイクロンの濃縮 および分級性能” 化学工学, 25, [5] 329~333 (1961).
- 11) 高坂彬夫, 佐々木正芳, 篠崎平馬: “超小型液体サイクロンの原液の処理能力” 化学工学, 28, [11] 952~956 (1964).
- 12) 高坂彬夫, 安部保志, 窪 一義, 高坂知勝: “ある液体サイクロンの性能について” 材料, 16, [164] 326~330 (1967).
- 13) 高坂彬夫, 北浦 徹, 柿本十郎: “超小型液体サイクロンの濃縮および分級性能” 化学関係学協会連合東北大会 要旨集, (化学工学) 23~24 (1969).
- 14) 高坂彬夫, 青木孝史: “水ひび液体サイクロンの性能” 化学工学協会 第35年会要旨集II, 113~115 (1970).
- 15) 高坂彬夫, 遠藤二男, 木村義行: “カオリン鉱物の湿式遠心分級” 材料, 20, [213] 706~710 (1971).
- 16) 河嶋千尋: “粘土とその利用” 64, 112, 朝倉書店

- (1958). “電子顕微鏡の理論と応用Ⅲ” 丸善(1960).
- 17) 日本粉体工業協会, 粉体工学研究会編: “粉体物性図説” 産業技術センター (1975).
 - 18) 高坂彬夫, 大門芳雄: “カオリン鉱物の湿式摩砕” 材料, **21**, [225] 512~515 (1972).
 - 19) 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).
 - 20) G. W. Brindley: “X-ray identification and crystal structures of clays and clay minerals” 51~131 (1961).
 - 21) 岩井津一: “本邦産堆積源カオリンの X線回折にみられる特徴” 堆積源のカオリン鉱物についての討論資料, 16~25 (1967).
 - 22) G. W. Brindley and M. Nakahira: Nature, **181**, 133 (1958).
 - 23) W. D. Kingery: “Introduction to ceramics,” John Wiley (1960).
 - 24) P. Murray and J. White: Trans. Brit. Ceram. Soc., **54**, 151 (1955).
 - 25) 高坂彬夫, 大門芳雄, 遠藤二男: “塩化ビニルフィラー用としてのカオリン鉱物” 材料, **19**, [201] 543~549 (1970).
 - 26) 高坂彬夫: “微粉体の粒度測定技術” 粉砕, [21], 40~49 (1976).
 - 27) 高坂彬夫, 安部保志: “遠心式光透過法による粘土鉱物の粒度分布測定” 材料, **17**, [177], 570~573 (1968).
 - 28) 高坂彬夫, 姜 義清: “遠心式光透過法によるカオリン鉱物の粒度分布測定” 材料, **18**, [189], 526~530 (1969).
 - 29) D. Dollimore, T. A. Horridge and R. Robinson, : “The bulk volumes of some related siliceous materials”, Powder Technology, **7**, 39~43 (1973).
 - 30) 細川鉄工所: パウダーテスター取扱説明書
 - 31) 高坂彬夫, 曳地広昭: “カオリンおよび天然ゼオライトの流動性と噴流性” 第13回粉体に関する討論会要旨集, 105~107 (1975).
 - 32) 高坂彬夫, 遠藤二男, 木村義行: “粘土鉱物スラリーによる材料の摩耗” 化学工学協会, 第38年会要旨集, 131~133 (1973).
 - 33) 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).
 - 34) 高坂彬夫: “材料の湿式摩耗” 日本材料科学会学術講演要旨集, 25~26 (1974).
 - 35) 高坂彬夫, 木村義行: “微粉体-液体系の粘性” 材料, **15**, [150] 138~141 (1968).
 - 36) 小石真純, 角田光雄: 粉体の表面化学, 160~161, 日刊工業新聞社 (1975).
 - 37) 河嶋千尋, 瀬高信雄, 高坂彬夫: “低周波によるカオリンの流動ばい焼” 化学工学協会東北地方大会講演 (1966).
 - 38) 高橋 浩: “カオリン鉱物の磨砕に関する研究” 窯業協会誌, **67**, [10] C348~C354 (1959).
 - 39) 武林 敬, 山崎全一, 小石真純: “遠心回転ボールミル法によるカオリン-ステンレス系顔料の製造” 第28回コロイドおよび界面化学討論会講演要旨集, 3B17 (1975).
 - 40) 久保輝一郎, 水渡英二, 中川有三, 早川宗八郎編: 粉体 “理論と応用” 792~795 丸善 (1962).
 - 41) 同上: 754~757.
 - 42) イソライト工業KK: Kaowool ceramic fiber, Bulletin-127.
 - 43) 浅原照三: 解説工業化学, 99, 共立出版 (1964).
 - 44) 原 伸宜, 高橋 浩編: ゼオライトー“基礎と応用” 48~49 (1975).
 - 45) 渡辺 裕: “粘土の塩基置換容量の測定法” 粘土科学, **1**, [1] 23~26 (1961).
 - 46) H. van Olphen: “An introduction to clay colloid chemistry” John Wiley (1963).
 - 47) 棚田成紀, 榎本三郎: カオリンパップの塑性粘度変動について, 材料, **21**, [225] 598~601 (1972).
 - 48) 持田 茂: “鉛筆工業と粘土” 粘土科学, **1**, [2~3] 65~69 (1961).
 - 49) 蔵持科学器械製作所: 標準カオリンカタログ (1977).

ニューマ・エスカレータによる粉粒体の連続加熱操作について

Continuous Heating of Particles with Pneuma-Escalator

篠原 邦夫*
Kunio Shinohara

1. はじめに

ニューマティック・エスカレータは、粉体の輸送、供給のみならず流通式気固接触装置としても利用することができ、実際に細川鉄工所でエスカレート・ドライヤーとして商品化されている¹⁾。本装置の特徴は、数m/secという比較的低風速で上方へも輸送でき²⁾、かつ粒子の滞留時間分布を装置寸法や操作条件によってかなり自由に变化させることができる³⁾点にある。さらに、気固接触操作を通じて種々の利点の出ることが期待される。そこで、粒子の予熱はもとより、粉粒体の乾燥や熱分解などの同時操作を行なう際に不可欠な本装置の伝熱特性について、実験的に検討したので、設計や操作の際の一参考資料として報告する。ここでは、特に設計の目安として容易に参照できるように、総括的ではあるが、まず作成した粒子温度の実験式の一例を示し、次に通常比較に用いられる見掛けの伝熱係数によって操作条件の効果を示し、最後にその伝熱係数の内容について若干の考察を述べる。なお、さらに詳細な解析については、別報⁴⁾を参照されたい。

2. 実験装置と方法

粉体試料として Table 1 に示すガラスビーズを用い、

Fig. 1 に示す実験装置（本体の主な寸法は、Table 1 に示す）によって伝熱実験を行なった。本装置では、加熱空気をフィルターを通して下方から送り、粒子をニューマ・エスカレータ本体の右端上方から供給すると、粒子

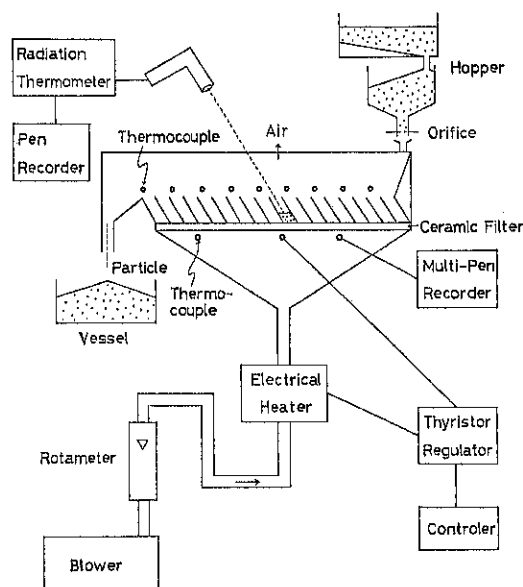


Fig. 1 Experimental equipment.

Table 1 Particle Properties and Dimension of Pneuma-Escalator

Glass Beads	; $dp=358.0 \times 10^{-6}(m)$, $\rho_p=2520.0(kg/m^3)$, $C_p=0.18(kcal/kg^\circ C)$
Pneumatic Escalator	; $l=6.27 \times 10^{-2}(m)$, $b=6.00 \times 10^{-3}(m)$, $D=2.00 \times 10^{-2}(m)$, $\theta_p=53.0(^{\circ})$, $L=0.587(m)$, $W=2.01 \times 10^{-2}(m)$, $N=18(-)$
Operational Conditions	; $24.5 \leq Q(m^3/hr) \leq 84.0$, $7.4 \leq F(kg/hr) \leq 47.0$, $151.0 \leq T_{ai}(^{\circ}C) \leq 367.0$

* 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

は傾斜仕切板に沿って吹き上げられて次々と左方へ運ばれながら加熱される。簡単に実験の手順を述べると、まずフィルター下方の空気温度と風量 Q を設定して、装置全体が定常状態になったら、フィルター上方の熱電対によって入口空気温度 $T_{ai,n}$ を測定する。その後、オリフィスを通して粒子を一定流量 F で供給し、再び定常になった時、上方の熱電対は見掛上、出口空気温度 $T_{ao,n}$ を示す。そこで、空気と粒子の供給を同時に止めて、装置の各セル内の粒子表面温度 $T_{p,n}$ を輻射温度計ですばやく測定した後、装置内の粒子のホールドアップ H を秤量する。

こうして得られた粒子温度の測定値は、3.節で作成される実験式によって任意の操作条件、 Q 、 F 、 T_{ai} の粒子加熱効果を直接知るのに役立ち、またホールドアップの実験値は、4.節で行なう本装置の伝熱係数の算出に必要である。

3. 粒子温度と操作条件の関係

入口空気温度 $T_{ai,n}$ のセルによる分布がほぼ一定になるニューマ・エスカレータでは、粒子温度 $T_{p,n}$ は、Fig. 2 に示すように粒子供給口のセルから順に上昇し、 $T_{ai,n}$ に漸近する。また出口空気温度 $T_{ao,n}$ も同様に变化するが、粒子温度よりは常に高く、 n が無限大では、 $T_{ao,n} = T_{p,n} = T_{ai,n}$ となるはずである。

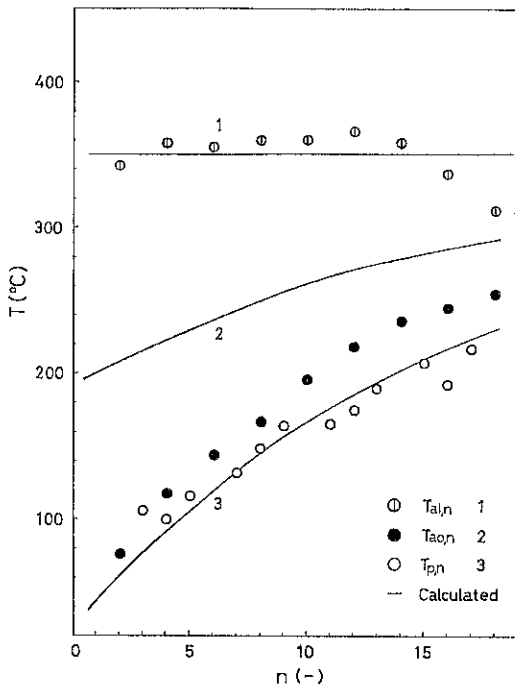


Fig. 2 Change in air and particle temperature along the filter in Pneumatic Escalator.

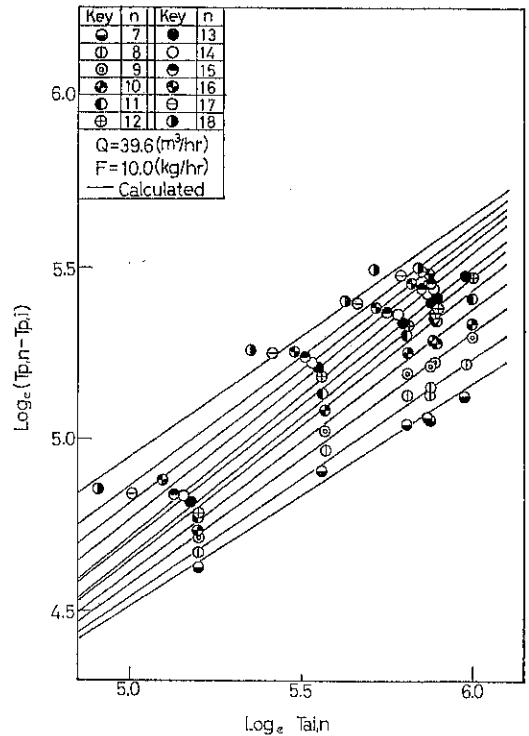


Fig. 3 Effect of inlet air temperature on particle temperature.

まず操作変数として、入口空気温度 $T_{ai,n}$ のみを変化して各セルについてそのベキを求めたのが、Fig. 3 である。これは、セルによって多少 $T_{ai,n}$ が異なるため、最初に $T_{ai,n}$ のベキを決めた。そうすると、一定操作条件下で粒子温度 $T_{p,n}$ のセルによる変化が、Fig. 4 のように semi-log プロットではほぼ直線にのせることができた。当然のことながら、入口空気温度が高い程、また粒子供給口からのセルの順に粒子温度が上昇することを示している。次に、操作条件として粒子供給量 F の効果を見たのが Fig. 5 で、 $T_{p,n}$ は F の増加により低下することがわかる。さらに、Fig. 6 で風量 Q とともに粒子温度が上昇することを示している。結局、この実験範囲内で利用できる粒子温度の実験式として、次式が得られた。

$$T_{p,n} = T_{pi} + 1.003 T_{ai,n}^{0.757} \cdot e^{0.050n} \cdot F^{-0.526} \cdot Q^{0.400} \quad (1)$$

ただし、 T_{pi} は粒子の初期温度で、通常は室温とほぼ同じになっている。無論、室温の空気では粒子は加熱されないから ($T_{pi} = T_{ai,n}$)、数学的には (1) 式は不完全であるが、補内するには充分役立つ。Fig. 7 は、最終的に (1) 式による計算値 (縦軸) と実験値 (横軸) を比較した図である。

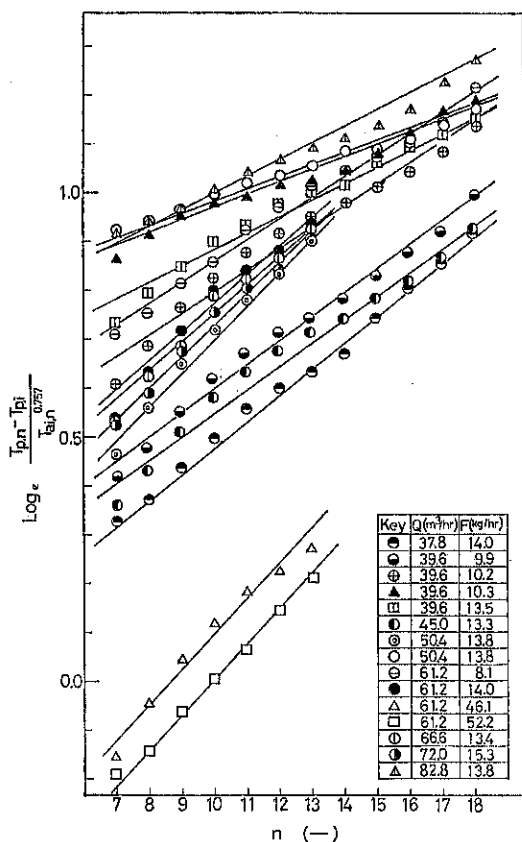


Fig. 4 Variation of particle temperature with the number of cell.

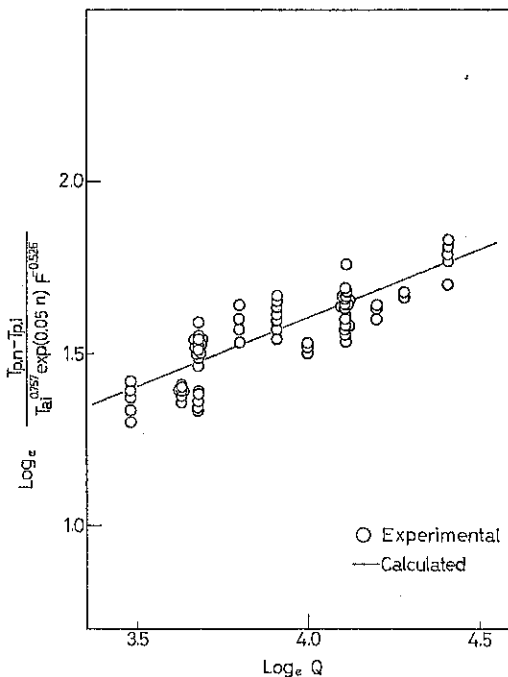


Fig. 6 Effect of air flow rate on particle temperature.

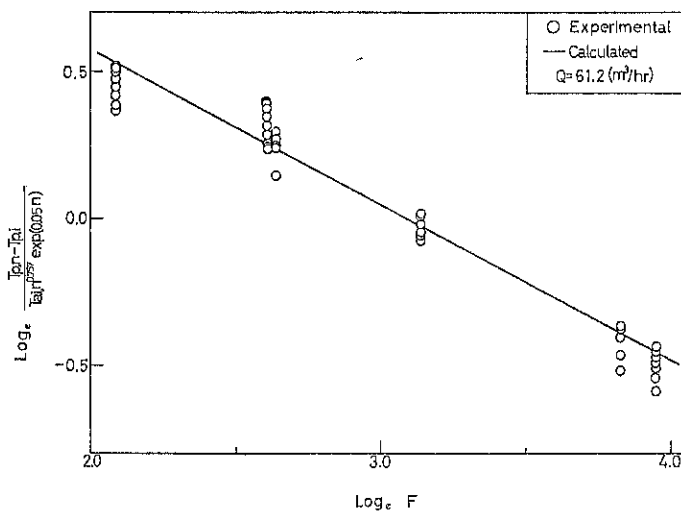


Fig. 5 Effect of solids feed rate on particle temperature.

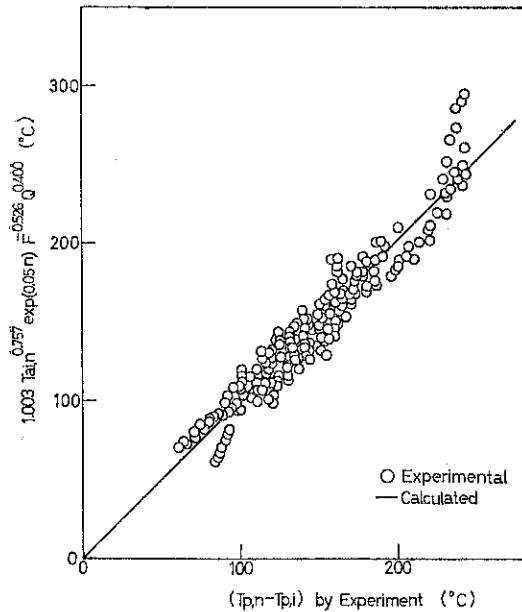


Fig. 7 Comparison of data with experimental equation of particle temperature.

4. 伝熱特性

実際、ニューマ・エスカレータによる任意の操作条件下での粒子温度は、直接(1)式で目安が立つが、伝熱装置としての評価は、やはり従来どうり伝熱係数によるのが適当であろう。そこで、上述の粒子温度の実験式と全く独立に伝熱特性を検討した。

粒子温度の測定値からニューマティックエスカレータの見掛けの伝熱係数 h_n を算出するために、熱収支と伝熱速度を表現すると、以下ようになる。

4.1 熱収支

一般に n 番目のセル内での粒子の温度上昇に費やされた熱量 q は、

$$q = F \cdot C_p \cdot (T_{p,n} - T_{p,n-1}) \quad (2)$$

(2)式の熱量の分だけ空気温度低下があるから

$$q = C_a \cdot (T_{ai,n} - T_{ao,n}) \cdot Q \rho_a / N \quad (3)$$

ただし、 C_p 、 C_a は、それぞれ粒子および空気の比熱で、 ρ_a は空気の密度である。

空気および壁面と粒子間の見掛けの伝熱係数を h_n とし、各セル内での粒子の完全混合と壁面のほぼ同じ輻射伝熱係数を仮定して、有効温度差として空気のセルの入口、出口における平均粒子温度との対数平均温度差 $\Delta T_{em,n}$ をとると、 n 番目のセルにおける伝熱速度式は、粒子表面を伝熱面積として次式のように書き表わすことができる。

$$q = h_n \cdot \Delta T_{em,n} \cdot \frac{S_w H}{N} \quad (4)$$

ただし

$$\Delta T_{em,n} = \frac{T_{ai,n} - T_{ao,n}}{\ln \left(\frac{T_{ai,n} - T_{p,n}}{T_{ao,n} - T_{p,n}} \right)} \quad (5)$$

ここで、セル出口の空気温度 $T_{ao,n}$ は、(2)式と(3)式から粒子温度によって(6)式で表わすことができる。

$$T_{ao,n} = T_{ai,n} - \frac{NFC_p}{Q \rho_a C_a} \cdot (T_{p,n} - T_{p,n-1}) \quad (6)$$

4.2 伝熱係数

各セルにおける伝熱係数は、一般に(3)式と(4)式から

$$h_n = \frac{Q \rho_a C_a}{S_w H} \cdot \log_e \frac{T_{ai,n} - T_{p,n}}{T_{ao,n} - T_{p,n}} \quad (7)$$

しかし本実験では、熱電対をセルの1 cm 上方に側壁を通して水平に挿入してあるため、セルから吹き飛ばされてきて熱電対に衝突する(低温)粒子によって出口空気温度 $T_{ao,n}$ は正確に測定されない。そこで輻射温度計によって粒子温度 $T_{p,n}$ のみを測定して伝熱係数 h_n を算出するために、(6)式を(7)式に代入して $T_{ao,n}$ を消去すると、

$$h_{p,n} = -\frac{Q \rho_a C_a}{S_w H} \cdot \log_e \left\{ 1 - \frac{NFC_p}{Q \rho_a C_a} \cdot \left(\frac{T_{p,n} - T_{p,n-1}}{T_{ai,n} - T_{p,n}} \right) \right\} \quad (8)$$

もし、ニューマティック・エスカレータ全体での粒子の見掛けの流れ方向(フィルターの長さ方向)で、入口空気温度 $T_{ai,n}$ と伝熱係数 $h_{p,n}$ がほぼ一定とみなせる場合には、(8)式を変形して $T_{p,n}$ について展開すると、セルによる粒子温度の変化は(9)式で表わされ、平均伝熱係数 h_{pv} は(10)式のように誘導できる。

$$T_{p,n} = \frac{T_{p,i}}{(1+K)^n} + \left\{ 1 - \frac{1}{(1+K)^n} \right\} \cdot T_{ai} \quad (9)$$

ただし、(9)式中の K は、単なる置き換えで

$$K = \frac{Q \rho_a C_a}{NFC_p} \left(1 - e^{-\frac{S_w H}{Q \rho_a C_a} \cdot h_{pv}} \right)$$

Fig. 2の計算曲線は、(9)式と(6)式によって、それぞれ描いたものである。

$$h_{pv} = -\frac{Q \rho_a C_a}{S_w H} \cdot \log_e \left[1 - \frac{NFC_p}{Q \rho_a C_a} \left\{ \left(\frac{T_{ai} - T_{p,i}}{T_{ai} - T_{p,n}} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right\} \right] \quad (10)$$

(10)式から、理論的には、任意のセルにおける粒子温度 $T_{p,n}$ を一ヶ測定すれば平均的な伝熱係数 h_{pv} が求まり、(6)式と(9)式から出口空気と粒子のセルによる温度変化が計算され、装置設計の際の手軽な目安になる。この際、(1)式の粒子温度に関する実験式も参考になるであろう。

4.3 伝熱特性の無次元化表示

伝熱係数 $h_{p,n}$ に及ぼす操作条件の効果をみるために、まず風量 Q のみを変えて、いずれもセル番号8から11 (本装置内の粒子の流れ長さの中心付近で、Fig. 2に示すように入口空気温度も伝熱係数もほぼ一定) の粒子温度を測定して、Nusselt 数と Reynolds 数の関係としてプロットしたのが Fig. 8である。ただし、無次元

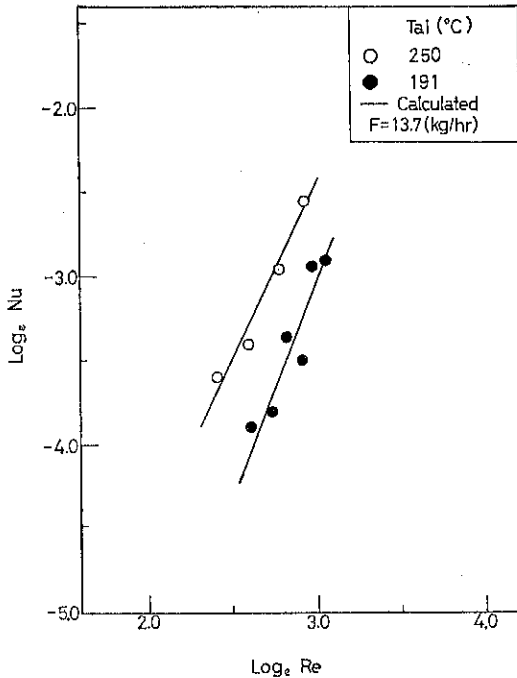


Fig. 8 Nu vs. Re plots.

数に含まれる空気物性値は、セルの入口と出口の空気温度の算術平均値に対応し、かつ $h_{p,n}$ 同様、四ケのセルの平均値である。また風速 U は空塔速度である。予期した通り、風量とともに伝熱係数が増大した。次に、風量を一定にして粒子供給量 F を増すと、Fig. 9に示すように Nu 数が増大する。Fig. 10は、入口空気温度の効果をみたもので、やはり T_{ai} によってわずかに Nu 数が増加することを示している。これらは、いずれも直接操作条件に対応して Nu 数を記述しているの、セル内の粒子のホールドアップ H が操作変数の組合せで変動し²⁾、伝熱機構が複雑で、単純に対流伝熱が支配的とか、壁面と粒子間の伝導伝熱や輻射伝熱が効いているなどと判断できない。特に、 F や T_{ai} のベキが小さいのは、効果がないというより、その効き方の複雑さを暗示していると考えられる。あえて推測すれば、 Q は対流、 F は伝導、 T_{ai} は輻射の効果をより強く示しているかもしれない。これら全てのデータを Re 数に対して整理

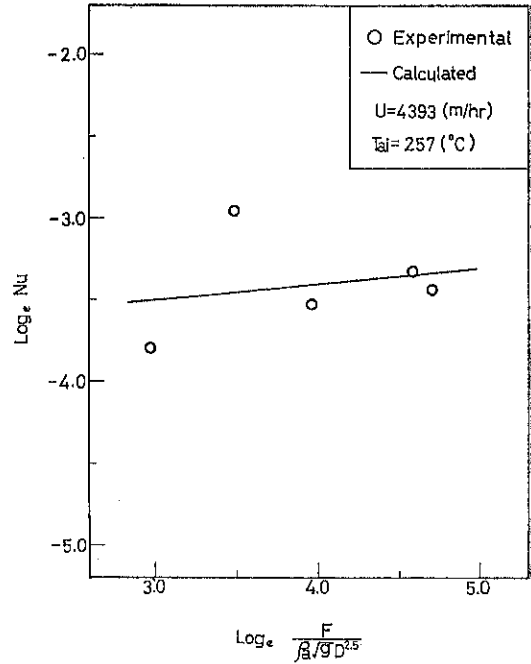


Fig. 9 Nu vs. $(F/\rho_a \sqrt{g} D^{2.5})$ plots.

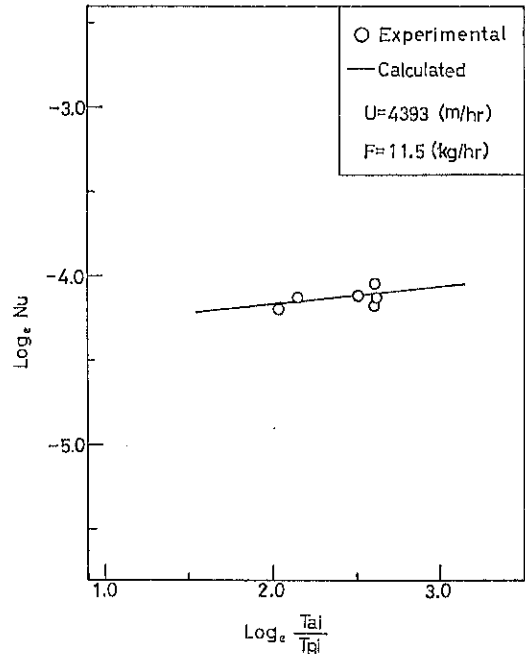


Fig. 10 Nu vs. (T_{ai}/T_{pi}) plots.

し、伝熱係数の無次元化表示をしたのが Fig. 11で、図中の直線は、得られた実験式(11)である。

$$Nu = 3.26 \times 10^{-5} Re^{2.81}.$$

$$\left(\frac{F}{\rho_a \sqrt{g} D^{2.5}} \right)^{0.095} \cdot \left(\frac{T_{ai}}{T_{pi}} \right)^{0.099} \quad (11)$$

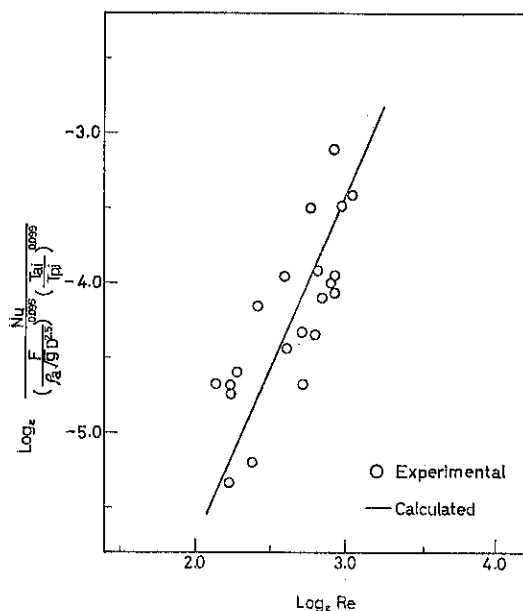


Fig. 11 Correlation of data with dimensionless equation of heat transfer.

ただし, $Nu = h_p \cdot d_p / k_a$, $Re = d_p \cdot U \cdot \rho_a / \mu_a$, d_p は粒子径, D はセルの傾斜仕切板の間隔である.

4.4 伝熱係数の内容について

ニューマティック・エスカレータにおけるセル内部および各セル間の飛翔粒子の極めて複雑な軌跡を見ても明らかなように³⁾, 伝熱係数の内容も数値的に分離して見積ることは容易でない. 例えば, 対流, 伝導, 輻射の効果をそれぞれ順に次式のように定義してみる.

$$h_{p,n} = h_{cv,n} + \left(\frac{k_a}{B} \right)_n + \frac{\sigma \phi}{2} (T_{p,n} + 273)^2 \times (T_{ri}^3 + T_{ro}^3 + T_{ri}^2 + T_{ro}^2 + T_{ri} + T_{ro} + 2)_n \quad (12)$$

ただし, $h_{cv,n}$ は対流伝熱係数, B は有効接触距離で, $(k_a/B)_n$ は伝導伝熱係数, σ はステファン-ボルツマン定数, ϕ は角関係や反射率, 透過率などを含む係数, T_r は(12)式で定義される無次元温度で, 右辺第三項目は n 番目のセルにおける入口と出口での輻射伝熱係数の算術平均値である.

$$T_r = \frac{T_a + 273}{T_p + 273} \quad (13)$$

B は h_{cv} と同様, 操作条件で変化するであろうから,

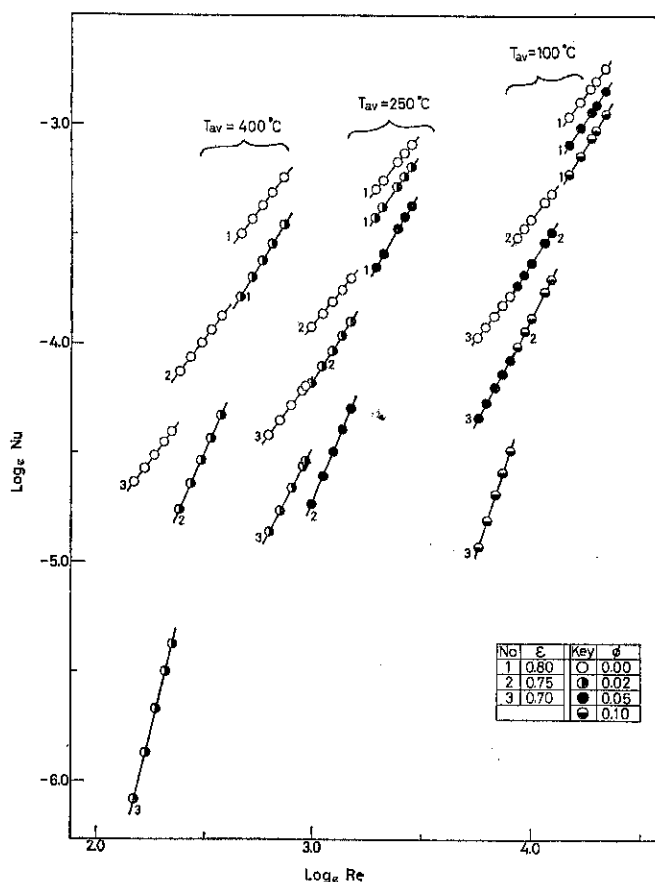


Fig. 12 Effect of particle concentration within a cell and radiation on Nu vs. Re's relation.

実験値から対流と伝導伝熱係数を分離することはできない。そこで、輻射の項の値だけ $h_{p,n}$ から差し引いて、できるだけ対流伝熱の効果を顕著にして単一粒子の場合と比較しやすく整理したのが、Fig. 12 に示す計算結果である。すなわち、 N_u 数には $(h_{cv} + k_a/B)$ を使用している。実際この作図に当っては、粒子の輸送式²⁾と粒子温度の実験式⁴⁾が必要であり、計算手順については省略する。係数 ϕ の数値は、0 から 1 の間であろうが、未知なので二、三変えてみた。空気温度の異なる線が一本にまとまらず、輻射の機構が単純でないのか、それとも伝導伝熱の機構が複雑で対流伝熱係数 h_{cv} に比較して結構大きく効いているのかわからない。本装置の伝熱特性を考える際の何かの参考になれば幸いである。

5. おわりに

ニューマティック・エスカレータを粉粒体の連続加熱装置として利用する場合の操作や設計の参考資料として、粒子温度の実験式および伝熱係数の無次元化表示式を作成し、伝熱係数の内容について若干の考察を試みた。得られた伝熱係数の測定値から、ニューマティック・エスカレータは、例えば従来の回転乾燥機などとほぼ同じ、ないしは一けた大きな伝熱係数をもっており（粒子温度測定値で計算しても）、輸送、供給と伝熱の同時操作に充分役立つものと期待される。

記号

B	: 伝導伝熱に関与する粒子一壁面間の有効伝導距離	[m]
b	: ニューマ・エスカレータ本体の傾斜仕切板の厚さ	[m]
C	: 比熱	[kcal/kg°C]
D	: 傾斜仕切板間の距離	[m]
d_p	: 粒子径	[m]
e	: 自然対数の底	[—]
F	: 粒子供給流量	[kg/hr]
g	: 重力加速度	[m/hr ²]
H	: ニューマ・エスカレータ内の粒子のホールドアップ	[kg]
h	: 粒子と空気あるいは壁面間の見掛けの伝熱係数	[kcal/m ² hr°C]
K	: (9)式に含まれる係数	[—]
k	: 熱伝導率	[kcal/m•hr°C]

L	: ニューマ・エスカレータ内の粒子の全流れ長さ	[m]
ℓ	: 傾斜仕切板の長さ	[m]
N	: ニューマ・エスカレータ内のセルの総数	[—]
N_u	: 粒子径基準のヌッセルト数	[—]
n	: ニューマ・エスカレータの粒子供給口からのセルの番号	[—]
Q	: 風量	[m ³ /hr]
q	: 伝熱量	[kcal/hr]
Re	: 粒子径基準のレイノルズ数	[—]
Sw	: 粒子の重量基準の比表面積	[m ² /kg]
T	: 空気ないしは粒子の温度	[°C]
ΔT_{em}	: 各セルの入口と出口での空気と粒子の対数平均温度差	[°C]
T_r	: (13)式で定義される無次元化温度	[—]
U	: フィルターの有効面積を通過する空塔基準の風速	[m/hr]
W	: ニューマ・エスカレータの垂直側壁間の距離	[m]
ϵ	: セル内の粒子の平均空隙率	[—]
θ_p	: 仕切板の傾斜角	[°]
μ	: 粘度	[kg/m/hr]
ρ	: 密度	[kg/m ³]
σ	: ステファンボルツマン定数	[kcal/m ² hr°C ⁴]
ϕ	: 角関係も含めた有効輻射率	[—]

添字

a	: 空気
cv	: 対流
i	: 入口
n	: セル番号
o	: 出口
p	: 粒子
v	: 平均

参考文献

- 1) 横山, 中川, 彼谷: 粉砕, No. 20, 99 (1975)
- 2) Shinohara, K. and Tanaka, T.: J. Chem. Eng. Japan, 5, 279 (1972)
- 3) Shinohara, K., Hayashi, K. and Tanaka, T.: ibid, 6, 447 (1973)
- 4) Shinohara, K., Yasuda, A. and Tanaka, T.: ibid. に投稿中

粉 碎 機 の 系 譜

Roots of Pulverizers

沢 島 恭*

Yasushi Sawahata

昭和32年の秋から33年一杯にかけてのおよそ1年半の私は、ボールミルのあの賑やかな音に取囲まれての毎日であった。今の試験用ダスト、当時の試験用粉体 JIS Z 8901の2種と3種の試作研究には、ボールミルとアンドレアゼンペット、それにロジラムラー線図が欠くことのできない3種の神器であった。

ほんのちょっとした糸口から、まず3種の調製に成功し、間もなく2種の製法も判ってからは気楽なもので、1年もの間あてもない、こうでもないと模索したことが嘘のように、関東ロータリー系の7種、8種も併せて相当量の規格粉体を造りもしたし、その一部は粉体工学研究会の粒度測定シンポジウムでの共通試料としても提供することができるようになった。今からちょうど20年昔のことである。

試験用粉体にケリを付けて私の仕事は粉粒体の混合操作に変わった。ボールミルはボールを抜かれて水平回転円筒形混合機となり、時には磁製ボールの代りにプラスチック球が混合の助媒という名称で加えられもした。大小4種類の円筒の外に、2次元形式のものも含めて5種類のV形混合機も仲間入りした。これら9種類の装置を用いた実験も、何通かの論文として報告され、この仕事も10年ほど前に一段落をつけた。

それ以来、再び細かい粉体を作り出す実験が私の仕事の中に加わった。同体摩擦法による超微粉体の生成とか、乳鉢や揺解機を用いての摩擦、摩擦や圧壊で生ずる新生表面の吸着特性や、ある種の摩擦粒子から放射されるEEの実験などがそれである。

このような摩擦や粉碎などの仕事をいろいろな方法で行ってみると、どうも原始的な道具ほど原理的な側面を持っており、その原理的な一面に原点を求めてそこから

種々構想を巡らしてゆくと、現在使われている様々な粉碎機の原型ができてくるように思われる。それだけに、きわめて単純な原理と機構に適当な付加的要素を与えてうまく機械化していけば、これから必要とされるであろう様々な粉碎機への要求を充して機能する、新しい構成の粉碎機も発明されるのではないかと考えられるし、粉碎屋にとってはそのような方向で物を考えてみる必要があるのではないかと考えている昨今である。

アダムとイブが使ったであろう石槌と石皿は、人類の発明した最古の粉碎機である。彼等がこれをどう使ったかは推測の域に止まるとしても、人間の手や腕の動きを考えれば、槌の上下動、往復動あるいは回転動によって、穀物や木の実の搗砕や摩擦がなされていたことは想像するに難しくはない。粉体工学研究会誌の四分法のカットとしても使われているエジプト第5王朝(B.C.2500)時代の粉挽き女イティの像に用いられているサドルストーンは、その姿からみて往復動の摩擦であり、この方式は現在でも白ナイル上流スーダン南部のヌバ山脈の麓に住むヌバ族の女のもろこし粉の製造に継承されている。

それで、この一組の石槌と石皿、どこの博物館でもその一隅には展示してあることであろう一本の石塊と一枚の石板の、それぞれの形状を適当に変形し、石槌の動きに若干の操作を与えてみるとどうなるであろうか。もちろん、何がしかの付加的な機構を別に付け加えることが許されなければなるまいが、乳鉢を手で挽きながら、粉碎機の系譜を私なりに単純に考えてみたのが本稿である。

まずは2個の石塊を、ほぼ平面で接触する2枚の石板に変えてみる。上下に重ねた2枚の板の、上側の板に往復動を与えるならば、それは先述したイティの像となりヌバ族の粉ひきとなる。あるいはこの石板を円形に加工して中央に回転軸を設け、把手を付けて上側の円板を回転させる構造とすれば石臼となり、摺り臼ができる。石槌と石皿は、このような構造変化をへて今日でも有用

* 富山大学工学部化学工学科
(〒933 高岡市中川園町1番1号)
Tel (0766) 21-2510 (代)

な食品加工専用の粉碎機になったのではなからうか。

2枚の石板は平面接触である必要はない。時には曲面接触の方が効果的な場合もある。石臼の系列は湿式のコロイドミルへと発展していく途筋を示している。

もしも、接触する2枚の石板の間に、粉にするべき食品を供給することなく、適当に圧力を加えておいて空白を挽くという操作を考えれば、それこそ現在我々が実験している往復動及び回転式の団体摩擦法そのもので、単位時間当りの生成量は少ないにしても、0.2~0.3ミクロンといった機械的方法ではぎりぎり限界のほぼ均一な摩擦粉が作れるということになる。

石臼の形を長円錐台形に洗練したのが乳鉢である。使っているうちに凹む石皿の窪みが、半球形状に深まれば乳鉢である。外形を整え、乳鉢をモータードライブにすれば機械乳鉢すなわち攪拌搗解機となり、現在では要部を真空に引けるようにしたものもある。乳鉢は、手挽きであれモータードライブであれ、その容器の大きさの割には沢山の碎料を装入する訳にはいかないが、少量のものを短時間に細かく摩擦するには適当した粉碎機である。

更に変形の度合を進めてみよう。乳鉢を丸めてボールにし、乳鉢の深さを伸ばして円筒化したものの中に封じ込める。搗解機と同様、乳鉢が複数で良いようにボールもまた複数で一緒にかまわない。かくして封じ込められたボールは碎媒と名付けられ、封じ込めた円筒の回転に伴なって円筒内での上昇落下を繰返すことになる。これがボールミルである。この先をハイスウィグ式や振動ミルにもっていくにはそれ程の手間はかかるまい。

石臼の上下運動が搗碎効果をもつ。臼の中で上下動する立杵の構成はもはやでき上る。杵をモーター駆動にすればスタンプミルである。木製の立杵は、我国では静岡の登呂遺跡からの出土品があり、中国には“木を切りて杵となし、地を掘りて臼となし、杵臼の利以て万民を救う”と易の繫辭伝に見られる。堯舜の時代である。

スタンプミルの杵を、先程のボールミル同様に臼の中に封じ込めよう。スタンプの上下動は、封じ込められた容器内では外部から駆動される回転動に置換えられなければならない。これでハンマーミルの原形ができ上る。シュレッダーやチョッパー形式のもの、ディスインテグレーターの構造には、いま一步になる。

一本の石臼と一枚の石皿は、その形態を変化させ若干のカラクリを付加することで様々な粉碎機に変身できた。

しかし、咀嚼機であり粗碎機であるジョークラッシャ

ーはこの系譜には乗せる訳にはゆくまい。この機械の発想の原点は人間や動物の口器の働きであり、やはり鋼の時代の産物と見るのが至当である。

“備前すり鉢 放つても割れぬ”という歌の文句がある。搗盆あるいは雷盆と記してスリパチと読み、縁起をかつげば当り鉢となる。雷の字を当てるのは、その音が雷鳴に似た処に依るとされている。和漢三才図会にも“その搗盆備前より生ずるものを良しとする”とあり、“江戸にてすり鉢……奥州にてライバン……”とは物類称呼の記述である。

搗盆に用いる木の棒をすりこぎ、別名当り棒という。古来、山椒の木を以て最上とし、大分県深耶馬温泉の土産品である。

北越雪譜の著者鈴木牧之翁は秋山村をスケッチして、“薬缶、土瓶、雷盆などいづれの家にもなく……”と記した。今から150年昔の貧しい山村である。現在、都会生活の台所には、この秋山村と同じようにすり鉢やすりこ木の数が、やはり少なくなっていることであろう。現代の都会生活が貧しいからではないにしても、もしも都会に住む人々の多くが、偶々宿った旅館の朝食の生卵の小鉢や、旅先で飛込んだそば屋の山かけの井の形にしかこのすり鉢に接しられないとしたならば、それは人類の祖先が発明した素晴らしい粉碎機本来の味わいを失うことであり、心淋しいことではなからうか。

再び日常の仕事の中に粉碎が加わって、乳鉢の中に生成する淡いピンク色のルビーの粉を眺めながら、ふと考えてみた粉碎機の系譜、牽強附会な私の言葉には読者の批判が必要であろう。

稿末に筆者の手がけた最近の粉碎関係の論文題名を掲げてみた。御参考に供して頂ければ幸である。

- 1) “団体摩擦法による超微粉体の生成”: 粉体工学研究会誌, 10, 316 (1973).
- 2) “団体摩擦法による超微粉体の生成に及ぼす操作条件の影響”: 材料, 22, 689 (1973).
- 3) “Exo-electron Emission from Ground Powder of Rocks at Room Temperature”: Sci. Paper I. P. C. R., 67, 93 (1973).
- 4) “摩擦粒子の吸着特性”: 材料, 24, 649 (1975).
- 5) “手挽き乳鉢摩擦に関する一・二の知見”: 粉体工学研究会誌, 12, 579 (1975).
- 6) “固体新生表面の液相吸着特性”: 材料, 25, 623 (1976).

試験用ダストの発生方法

Methods of Generating Dusts for Industrial Testing

山下 憲一*

Kenichi Yamashita

1. はじめに

日本粉体工業協会で試験用ダストや基準粉体などからなる標準粉体¹⁾の頒布を始めてから最早5年を経過しようとしている。

その間に標準粉体は、Table 1.1に示すようにエアフィルタ、集じん装置、分級機などのダストに対する除じん、集じん、分級、輸送などの特性試験、および各種計器や機器の動作試験、または摩耗試験、さらには微粒子測定器の校正試験、実験用動物の暴露試験などの広範囲な分野で用いられてきた。

このように、標準粉体を必要とする分野では、標準粉体を大気じん相当として試験研究に供することが殆んどなので、ユーザーが始めて標準粉体を使用する際、大気中または気流中にどのように発生すればよいのか戸惑う場合が多く、その使用方法についての問い合わせが日本粉体工業協会を通して大へん多い。

試験用ダストの発生機については、すでにSAE推奨規格²⁾、AFI規格³⁾、BS⁴⁾などでそれぞれ定められており、わが国においても20数年以前から、同規格相当品が自動車用のエアクリーナや換気用パネル形エアフィルタなどの汚過性能試験に使用されてきた。

しかしながら、これまでのところダスト発生機についてのJISの規定もなく、同発生機の完成品の市販品もないまま今日に至り、これを必要とするユーザーは、その都度内外の文献^{5)~8)}をより所としてダスト発生機を自家製造したり、或いは関連する市販の機器を購入して、これらを組合せ完成品として使用してきたのが実情である。したがって、現在でもなお、ダスト発生機の入

手上、使用上の不便は解決されていない状態であるといえる。

いまさら申すまでもなく、試験用ダストを大気中や気流中に発生させて集じん試験、摩耗試験などを行う際に、ダストが十分に分散している場合と、分散が不十分で粒子が凝集している場合とでは試験結果が大幅に異ってくることを考えられよう。すなわち、集じん試験でいえば、気流中でダストの分散が良好でないと、粒子は気流に同伴されにくく、むしろ凝集して粗粒子となるため気流から分離しやすくなることなどがあげられる。また、摩耗試験の場合は、ダストが十分に分散しないと機器の摺動部への粒子の混入状態が異なってくるなどがあげられ、いずれの場合でも再現性を有する試験結果が期待できなくなる。

このように、ダストを必要とする諸性能試験においては、ダストの発生状態が試験の精度に直接影響を及ぼしているといっても過言でない。しかしながら、この種の研究報告^{9),10)}が比較的少ないのは、気流中におけるダストの分散状態の測定方法が容易でないことが先ず第一にあげられるが、そのほかに、ダストの発生状態が集じん性能に直接影響しないといわれてきたためと思われる。

当室では、これまで試験用ダストを規定濃度で一様に発生できるダスト発生機の開発を目標として、内外で用いられているダスト発生機を集め、それらのダスト発生機を用いて気流中にダストを発生し、粒径分布や濃度分布の測定方法を研究してきた。

ここでは、内外で使用されている各種ダスト発生機の紹介と、当室手持ちの代表的ダスト発生機の実測例を説明し、試験用ダストを使用される各位の参考に供したいと思う。なお、試験用ダストの規格¹⁰⁾に新たに追加されたエアロゾル（液滴微粒子）の発生方法は次回にゆずることにし、その種類と適用例の紹介にとどめたい。

* 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(286)

Table 1.1 内外における試験用ダストの適用例

適用例	内 容	使用ダスト	適用規格
除じん、集じん試験	(1)自動車用、建設機械用エアクリーナ (2)換気用パネル形エアフィルタ (3)防じんマスク (4)集じん装置 (5)その他	SAE ; Fine, Coarse, JIS ; 7種, 8種等 AFI 規定ダスト JIS 15種等 石英ダスト	SAE ²⁾ , BS ¹¹⁾ , JIS ¹²⁾ (自動車用エアクリーナ試験方法) AFI ³⁾ , BS ⁴⁾ , JIS ¹³⁾ (換気用パネル形エアフィルタ) JIS ¹⁴⁾ (防じんマスク)
摩耗、耐久性能試験	(1)内燃機関、及び同部品類 (2)シートベルト (耐久性能) (3)ランプ類 (気密試験) (4)航空機機器類 (環境試験) (5)その他	SAE ; Fine, JIS ; 2種, 3種, 7種, 8種 石英ダスト SAE, セメント, JIS ; 6種 (セメント) JIS ; 2種, 3種相当	O.E.C.D 標準テストコード ¹⁵⁾ (農業用及び園芸用小型エンジン試験) オーストラリア規格 ¹⁶⁾ SAE ¹⁷⁾ , JIS ¹⁸⁾ (自動車用ランプ類) MIL ¹⁹⁾ (航空機、軍用機器の環境試験法)
粉粒体機器の校正試験	(1)標準ふるい (2)粉体粒度測定器 (3)流動性試験器 (4)その他	炭化けい素等の各種	JIS ²⁰⁾ (標準ふるい) JIS ²¹⁾ 研摩材の粒度の試験方法
汙過、耐久性能、校正試験 (油空圧機器、 オイルフィルタ)	(1)油圧機器類の耐久試験 (2)油、空圧フィルタの汙過粒度試験 (3)油中微粒子自動測定器の校正 (4)自動車用オイルフィルタの汙過性能 (5)自動車用フィエルフィルタ試験	SAE ; Fine, JIS ; 3種, 8種 SAE ; Fine, JIS ; 8種等	JIS ; 8種 ISO ²²⁾ , NFPA ²³⁾ (油圧用機器の耐久試験) JIS ^{24)~25)} (油圧用、空気用フィルタ) JIS ²⁶⁾ (作動油中の微粒子測定方法 (計数法)) JIS ²⁷⁾ (自動車用オイルフィルタ試験方法) JIS ²⁸⁾ (自動車用フィエルフィルタ試験方法)

2. 内外における試験用ダストの適用例

2.1 試験用ダストの適用例

Table 1.1 は、内外における試験用ダストの各種試験への適用例を示したものである。

Table 1.1 において、除じん及び集じん試験では内外において最も多くの規格が定められ、試験用ダストの種類や粒径分布、化学組成などの特性とともに、除じん、集じん装置の性能試験を行う際のダスト濃度がそれぞれ規定されている。

機械、計器類の摩耗試験、耐久性能試験用のダストは、現在のところ JIS では自動車用ランプ類の気密試験用として普通ポルトランドセメントがきめられているが、その外のものには規定がないので、海外向けの輸出品またはアメリカ軍への受注品等に対しては、相手国の規格が次のように準用されている。たとえば、航空機関係は MIL 規格¹⁹⁾、内燃機関係は O.E.C.D 規格¹⁵⁾、シ

ートベルト関係はオーストラリア規格¹⁶⁾ にもとづいて性能試験が行われている。

粉粒体機器の校正試験では、研摩材が JIS 規格^{20),21)} で規定されている。なお、現在のところ特に規定はないが、粉体粒度測定器の校正試験用として JIS の試験用ダスト¹⁰⁾ がよく用いられている。

油空圧機器類の汙過試験、耐久性能試験^{22),23)} では、油中のコンタミナントとして、JIS の 8 種¹⁰⁾、SAE の Fine²⁾ などのダストが用いられている。ダストを空気流中に一様に発生すると同様に、油圧用フィルタ、燃料フィルタ、オイルフィルタの汙過性能試験、及び油中微粒子測定器の校正の際には、油中にダストを均一に分散した状態で機器のラインに流すことが最も重要とされている。

2.2 試験用エアロゾルの適用例

前項の試験用ダストのような固体微粒子では、粒径の一番細かいもので約 10 μm 以下であり、これ以下の粒

Table 1.2 内外における標準粉体（エアロゾル）の適用例

適用例	内 容	使用エアロゾル	適用規格
除じん、集じん試験	(1)超高性能エアフィルターの汜過性能	13種DOP, ステアリン酸 (単分散粒子)	MIL ⁸²⁾ BS ⁴⁾ (超高性能をエアフィルタ試験方法)
	(2)超高性能エアフィルターの洩れ	14種, DOP (多分散粒子)	MIL ⁸²⁾ (超高性能エアフィルタ試験方法)
	(3)高性能エアフィルターの汜過性能	14種, DOP (多分散粒子)	
	(4)放射性エアロゾル用高性能エアフィルターの汜過性能	13種, DOP, ステアリン酸	JIS ⁸¹⁾ (放射性用高性能エアフィルタ試験方法)
	(5)メンブレン（薄膜）フィルタの汜過性能	ポリスチレンラテックス	
機器の校正試験	(1)光散乱式微粒子計数器の校正	13種, ステアリン酸 (単分散粒子)	JIS ²⁹⁾ (光散乱式微粒子計数器)
	(2)光散乱式微粒子濃度測定器の校正	13種, ステアリン酸 (単分散粒子)	JIS ⁸⁷⁾ (大気中の浮遊粒子状物質自動計測器)

径のものを固体微粒子で作ることは困難なので、数 μm 以下のものに対しては一般にエアロゾルが用いられる。

Table 1.2 は、内外におけるエアロゾルの各種試験への適用例を示したものである。

Table 1.2 において、エアロゾルには単分散粒子と多分散粒子の二種類があり、前者は粒径が $0.3 \mu\text{m}$ でよく揃っており、原子力用フィルタ、クリーンルーム用超高性能エアフィルタ、及び光散乱式粒子計数器²⁹⁾ の校正用として JIS でそれぞれ定められている。後者は粒径 $3 \mu\text{m}$ 以下のものであるが、これは、高性能エアフィルタの汜過性能試験、及び超高性能エアフィルタの空気洩れ試験用として定められている⁸⁰⁾。

エアロゾルの発生方法は、内外の規格^{4), 10), 31), 32)} で定められているが、現在のところ、サブミクロン粒子に対する粒径分布の測定方法が必ずしも確立されていると

はいいがたい段階なので、厳密な意味では未だ問題点が残されている。

エアロゾルは、このほかにポリスチレンラテックス、鉛などの金属ヒューム及び塩化ナトリウムなどの塩ヒュームも発生できる^{4), 33-35)}。

3. 内外における代表的ダスト発生機の種類と内容

Table 2 は、内外における代表的なダスト発生機を示したものである。

Table 2 に示した殆んどのは、先に述べたとおり自動車用エアクリーナ及び空気調用フィルタの汜過性能試験用として、SAE 推奨規格²⁾、AFI 規格³⁾、BS⁴⁾、JIS^{12), 13)} などで規定され、今日もなお使用されている

Table 2 内外における代表的な試験用ダスト発生機

発生方法	器種、型式	ダスト濃度 $C(\text{g}/\text{m}^3)$	適用例又は関連規格
定量吹上げ法	B.M 型	可 変	B.M ⁸⁶⁾ (労働衛生, エアフィルタ)
	AFI 型	0.1 目標	AFI ³⁾ , JIS ¹³⁾ (換気用パネル形エアフィルタ)
	SAE, I 型	1 目標	SAE ²⁾ , JIS ¹²⁾ (自動車用エアクリーナ試験方法)
	SAE, II 型	1 目標	" "
定量落下法	定量落下型	可 変	通常、管路の吸引風速が $5 \text{ m}/\text{S}$ 以上の場合適用できる。
	分散機型	"	特に、JIS の規定はないが、現在、一般に最も多く使用されているもの。
	吹付け型	"	" "
	エジェクタ型	"	" "
	BS, I 型	1 目標	BS ¹¹⁾ (自動車用エアクリーナ試験方法)
定量送出法	BS, II 型	0.1 目標	BS ⁴⁾ (換気用パネル型エアフィルタ)
	回転ドラム型	0.1 目標	実験用動物の暴露試験等に適用 ³⁸⁾

ものである。

これらのダスト発生機は、容器に一定量の試験用ダストを入れ、ダストの上面に乾燥状態の圧縮空気を吹きあてて発じんさせる方法と、容器に入れたダストを常に一定量流出落下させ、これに乾燥した圧縮空気を吹きあてて発じんさせる二方法がとられている。

いま便宜上、前者を定量吹上げ法、後者を定量落下法ということにする。内外におけるダスト発生機は、これら両者のいずれかといってまちがいないといえる。

定量吹上げ法は、歯車又はピストンの回転速度と圧縮空気とを可変してダスト濃度が加減できるようになっており、定量落下法では、一様に流出落下するダストの流量と、これを受けるエジェクタの圧縮空気の圧力を加減してダスト濃度が可変できるようになっている。

なお、両者ともにダストを発生する際には圧縮空気中の水分を十分に除去して、ダストの表面や、一定量流出落下するダストに吹きあてることが必須条件となっている。脱湿機等を用いない場合、ダストは圧縮空気中の水分や油分の影響で凝集して分散しにくくなり、一様にダストを発生することができなくなる。

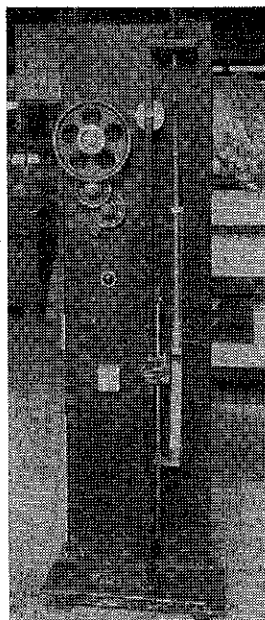
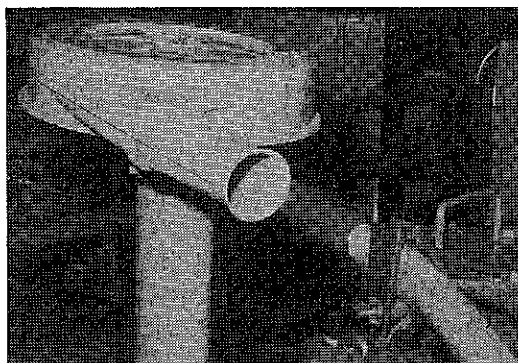


Fig. 2.1 B.M型ダスト発生機



左上…自動車用エア
クリーナ 右下…発生機よりの
ダスト気流

Fig. 1 試験用ダストを用いた自動車用
エアクリーナの濾過性能試験

Fig. 1は、試験用ダストの発生状況を示したものである。次に、各機種ごとのダスト発生機の概略的な機構と内容は次項のとおりである。

3.1 吸上げ式ダスト発生機

3.1.1 B.M型 B.M型は Fig. 2.1～2.2に示すように、エジェクタに圧縮空気を通し、のど部の静圧の低下により容器中のダストを吸上げ、これに圧縮空気を吹きあててダスト発生するようになっている。

ダスト濃度は、ダスト容器の上昇速度を変えることに

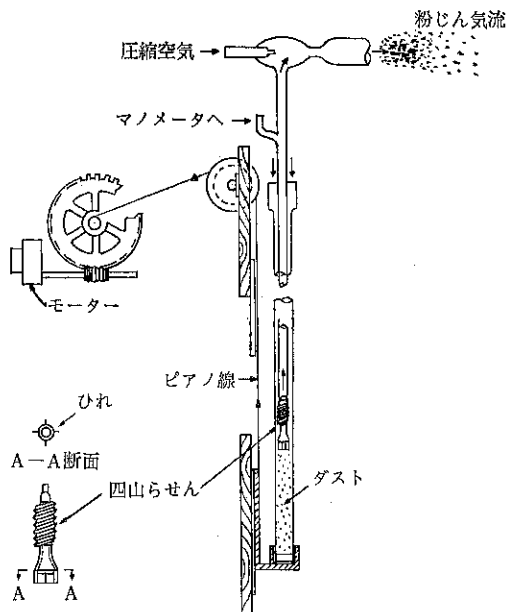


Fig. 2.2 B.M型のダスト発生機構

よって変化できる。また、ダスト吸上げ管の先端には Fig. 2.2に示すように螺旋状の溝がきつてあり、ダストの吸上げを容易にするようになっている。

3.1.2 AFI型 AFI型は Fig. 3.1～3.2に示すように、ダスト容器の移動と斜形歯に加工された歯車の回転にともない、ダストを吸込口に運び、これに圧縮

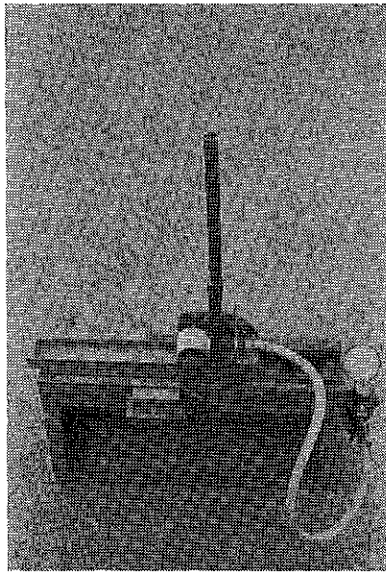


Fig. 3.1 AFI型ダスト発生機

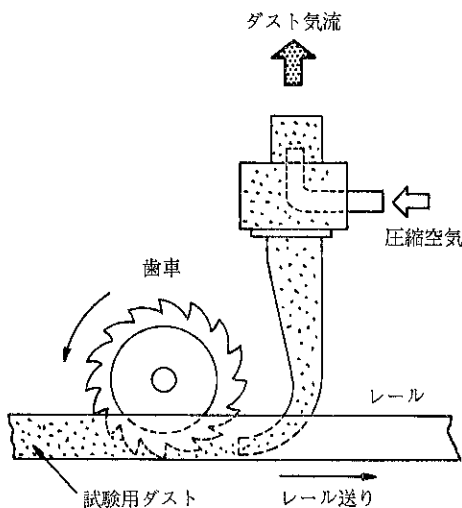


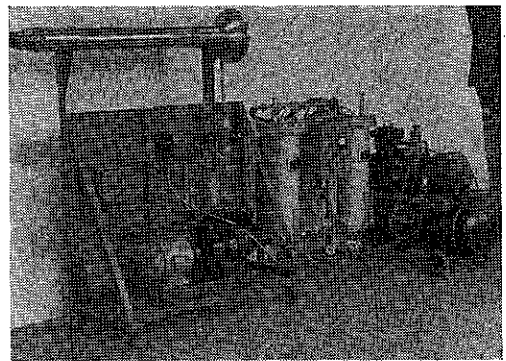
Fig. 3.2 AFI型のダスト発生機構

空気を吹きあててダスト気流を作っている。

なお、ダスト濃度は、ダスト容器の移動と歯車の回転速度及び圧縮空気を加減することにより可変できる。

このダスト発生機は、試験条件によって必要とする量のダストを容器に入れて試験し、試験終了時にすべてのダストを発生し終っていることを特長としている。

3.1.3 SAE I型 このダスト発生機は Fig. 4.1～4.2 に示すように、透明な円筒管に充填したダストをピストンで押し上げつつ、円筒管壁にけられたノズルから圧縮空気をダスト表面に吹きあてることによりダス



左…ダスト発生機 中央…脱湿器 右…空気圧縮機

Fig. 4.1 SAE I型ダスト発生機

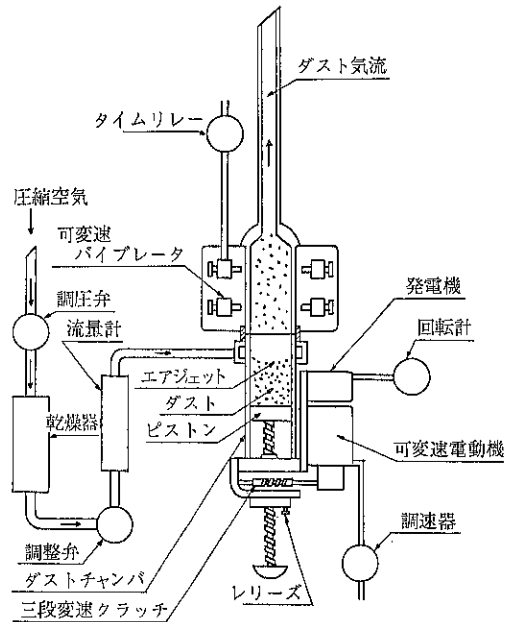


Fig. 4.2 SAE I型のダスト発生機構

ト気流を作り、大気中又は気流中に導びくようになってい

る。ダスト濃度は、ピストンの上昇速度及び圧縮空気を加減して変えられるようになってい

る。また、円筒管壁には飛散したダストが付着しやすいので、これを防ぐために小型振動器が取り付け

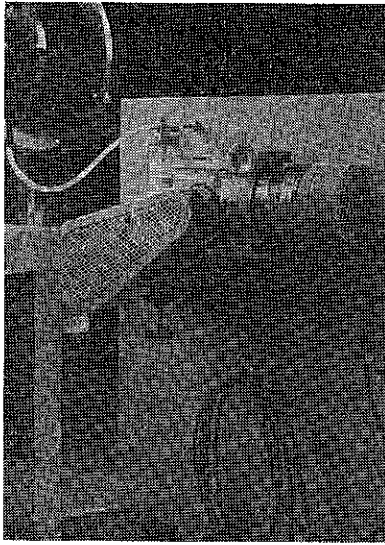


Fig. 5.1 SAE II型ダスト発生機

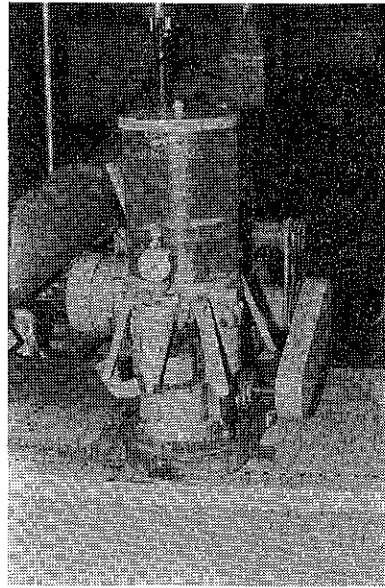


Fig. 6.1 ダスト定量供給機

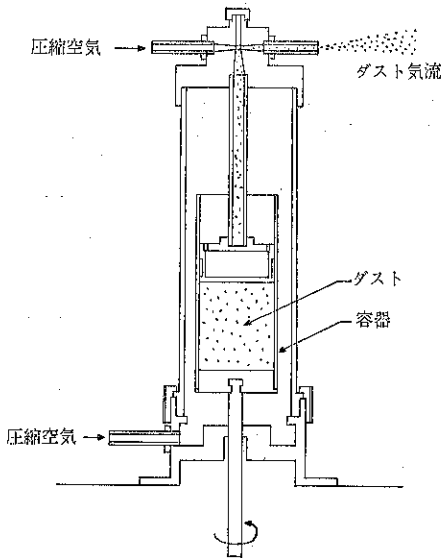


Fig. 5.2 SAE II型のダスト発生機構

吸上げ管の下端外側の3箇所には溝及び細孔が切っており、気流はダストを伴い容器の回転上昇にしたがって濃厚ダスト気流として吸上げ管を上昇し、これに吸上げ管上部のエジェクタにより濃厚ダスト気流が分散するようになっている。

3.2 定量落下式ダスト発生機

3.2.1 定量落下式ダスト供給機 Fig. 6.1～6.2は、定量落下式ダスト供給機の代表例を示したものである。

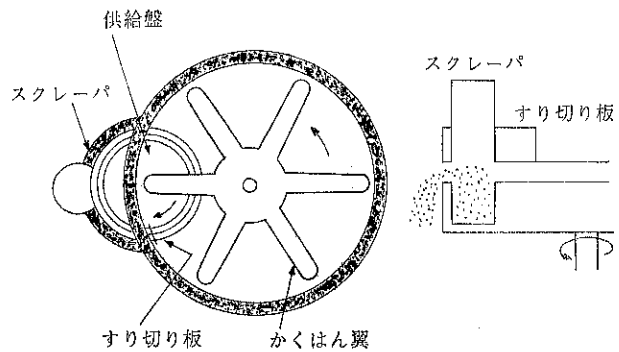


Fig. 6.2 定量供給機のダスト流出機構

これらは、粉体微量供給機として一般に用いられているものをダスト供給機として応用したものである。したがって、この種のものは電磁フィーダー型の比較的簡易なものから、微量供給できる各種があり、市場品として一般に入手できる*。

ただし、定量落下式ダスト供給機は、一定量のダストを流出落下させるだけのものであるから、そのままではダストは分散しないので、その点注意を要する(ただし、おおよそ4 m/s以上の空気流中で始めて発じんしてくる)。

* ダスト定量供給機はここに示したもののだけでなく、供給精度の高いシクロンフィーダー(舘細川鉄工所製)、マイクロフィーダー(舘三協電業製)、降下スクレーパ式ダスト供給機(協和精工機製)などがある。

したがって、この種のものをダスト発生機として使用する場合は、次項に述べるようにエジェクタなどのダスト分散器を併用することによって始めてその機能が發揮できる。

Fig. 6.1~6.2 は、定量供給機として最も普及しているものの例であるが、これは透明な円筒内に充填したダストを6枚のかくはん翼によって充填の程度を一定にして、次にかくはん翼と逆回転している供給盤の溝に充填

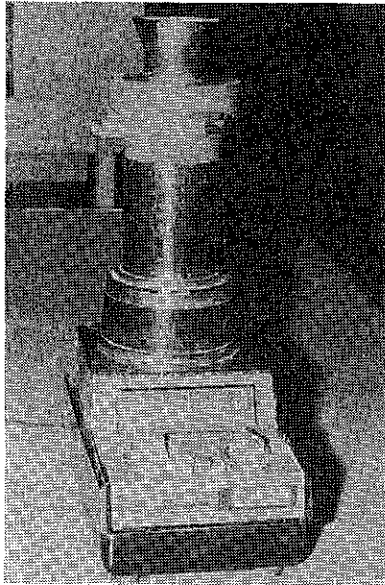


Fig. 7.1 分散機型ダスト発生機

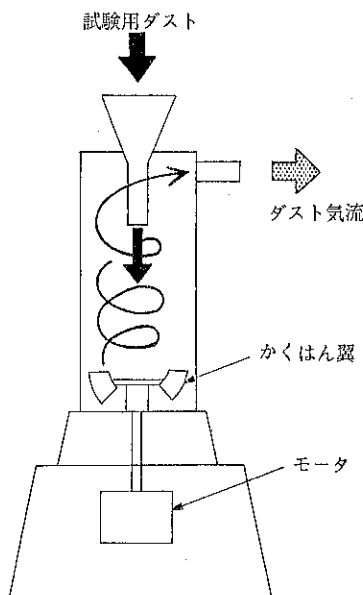


Fig. 7.2 分散機型のダスト発生機構

し、さらに溝の中のダストをすり切り板によって一定深さにすり切り、スクレーパの差込みによって定量供給できるようになっている。ダストの供給量はスクレーパの差込み深さ、及び供給盤の回転速度を変えることによって可変できる。

3.2.2 分散機型ダスト発生機 Fig. 7.1~7.2は、分散機型ダスト発生機を示したものである。

Fig. 7.1 からわかるように、このダスト発生機はジュースミキサーの一部を改良して耐摩耗性のかくはん羽根、ダスト投入口及び排出口を取付けたものである。使

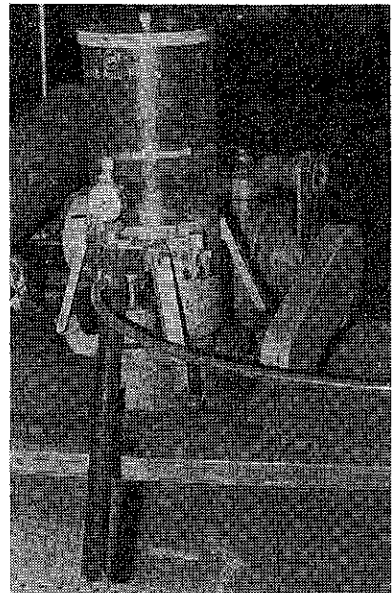


Fig. 8.1 吹付け型ダスト発生機

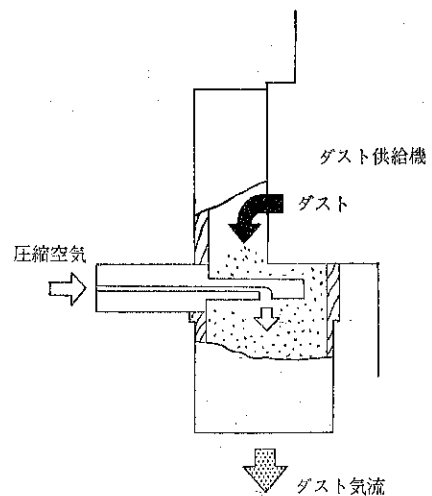


Fig. 8.2 吹付け型のダスト発生機構

用にあたっては、ダスト投入口よりダストを一定量ずつ供給すれば、かくはん羽根の回転によって分散されたダストが排出口よりダスト気流となって排出されるようになっている。

この型式のものは他のダスト発生機と異なり、圧縮空気を必要としないので、装置が大がかりにならず、定量供給機との組合せで任意の場所で手軽に使用できることを特長としている。

3.2.3 吹付け型ダスト発生機 吹付け型ダスト発生機は、定量落下式ダスト供給器のダストの流入落下する供給部に圧縮空気を導入し、ダスト気流を発生させるようになっている。

Fig. 8.1～8.2 は、吹付け型ダスト供給機と同供給機の圧縮空気の導入部を示したものである。これからわかるように、他のダスト発生機に比較して最も簡単なダスト発生機といえる。

3.2.4 エジェクタ型ダスト発生機 エジェクタ型ダスト発生機は Fig. 9.1～9.2 に示すようにきわめてシンプルな構造のものである。各種の定量供給器より供給されるダストを投入口より受け、これに乾燥状態の圧縮空気を吹きあてて発じんするようになっている。

Fig. 9.2 からわかるように、管路はダストの流入する部分で絞られ、ジェットポンプとなるためダストが十分に分散される。

4. 代表的ダスト発生機の性能の測定例

先に述べたとおり、試験用ダストは主として集じん装置の透過性能試験に用いられるが、その際のダストの発生条件は集じん装置の種類や容量の大小によって異なってくる。

集じん装置の吸入空気の流れは一般的にいて、空気調和用フィルタでは $1 \sim 3 \text{ m/s}$ 、自動車用エアクリーナでは $4 \sim 6 \text{ m/s}$ 、集じん装置では $5 \sim 10 \text{ m/s}$ の範囲とみてよい。それぞれのダスト濃度は、空気調和用フィルタ



左…管路 中央…エジェクタ 右…定量発生機

Fig. 9.1 エジェクタ型ダスト発生機

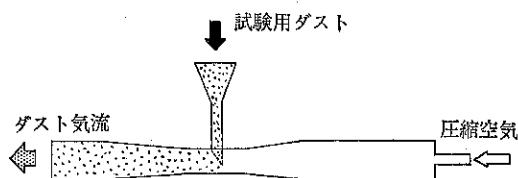


Fig. 9.2 エジェクタ型のダスト発生機構

が $10 \sim 100 \text{ mg/m}^3$ 、自動車用エアクリーナが 1 g/m^3 、集じん装置が $5 \sim 10 \text{ g/m}^3$ の範囲である。

ここでは、この種の試験に最も用いられている試験用ダスト7種（関東ローム、細粉）、8種（関東ローム、微粉）及び11種（関東ローム、超微粉）を使用し、これらのダストが Fig.10 に示す実験装置の管路内で十分に分散しているかを調べた。

管路内における平均風速は 5, 10, 15m/s 一定とし

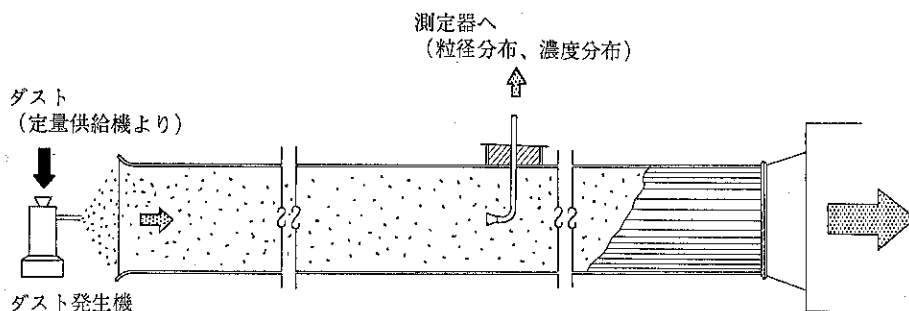


Fig. 10 実験装置概略図

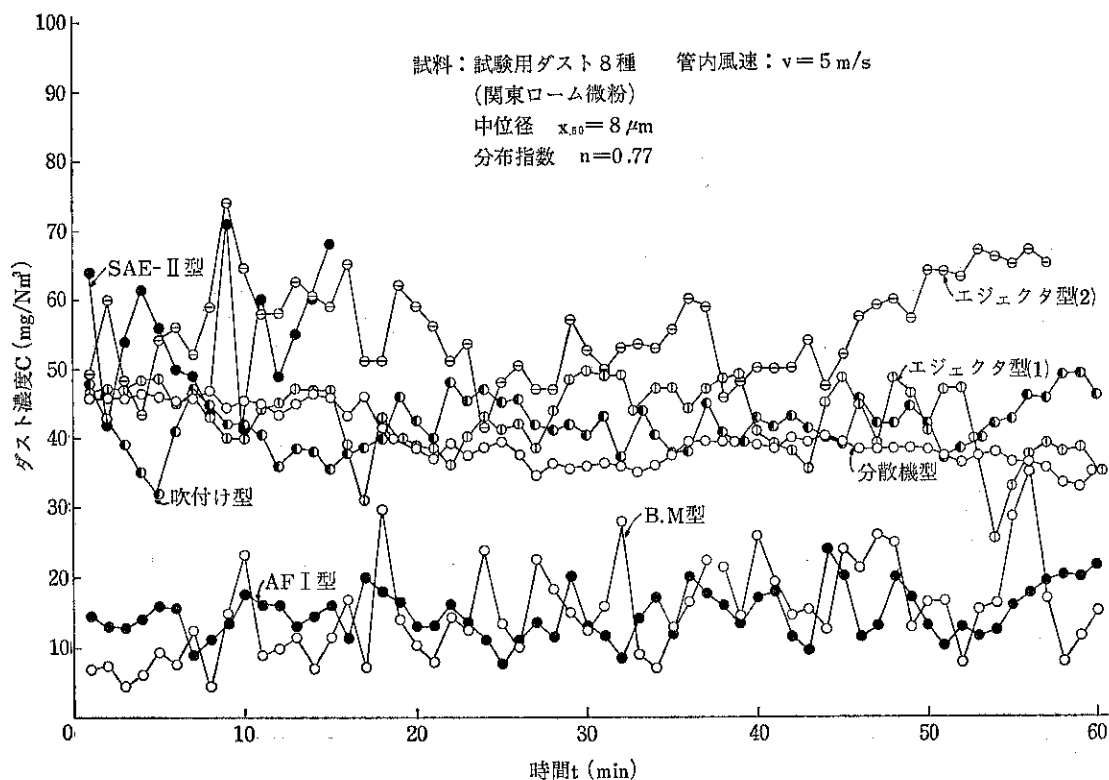


Fig. 11.1 ダスト濃度の時間的変化

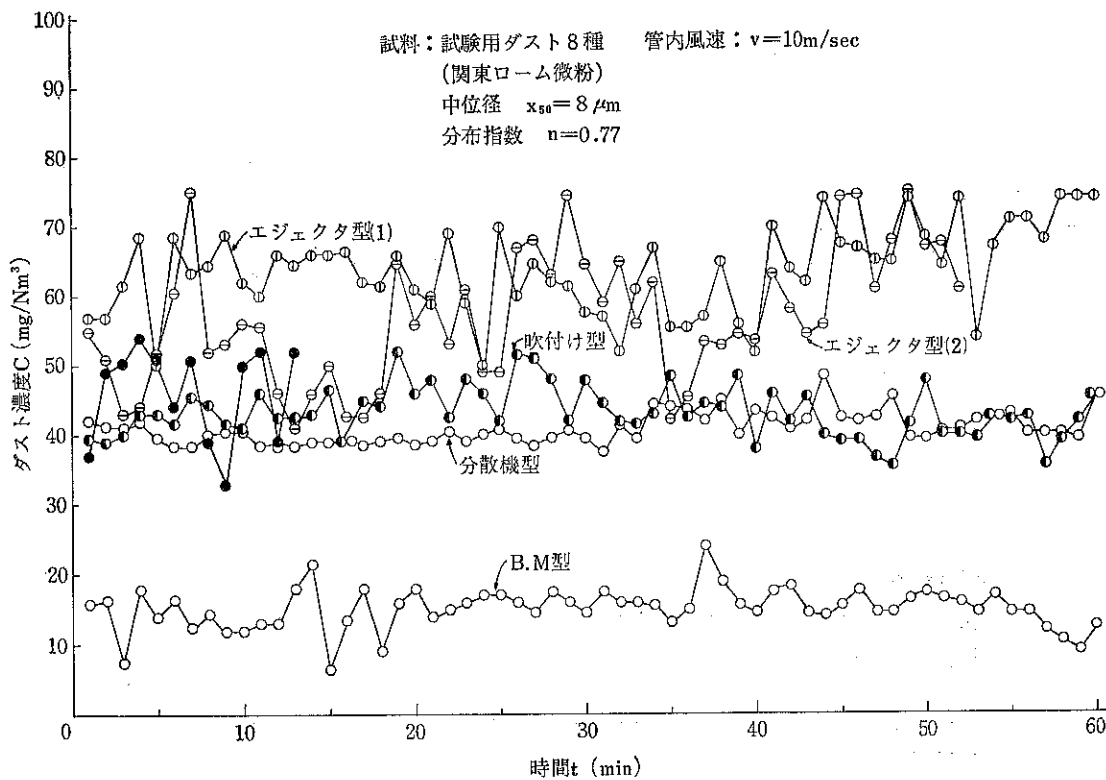


Fig. 11.2 ダスト濃度の時間的変化

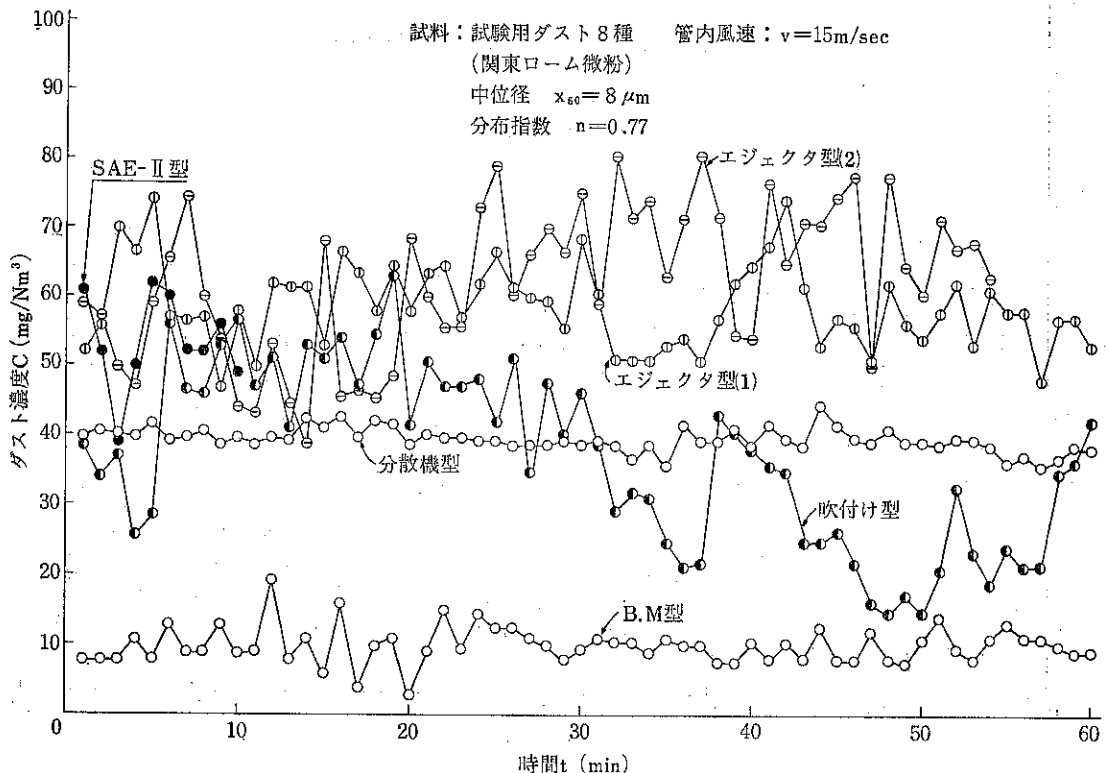


Fig. 11.3 ダスト濃度の時間的変化

で、吸入空気流中に各種のダスト発生機により、ダスト濃度 100mg/Nm^3 の状態で発生し、このダスト気流を等速吸引してダストの分散状態を濃度分布と粒径分布とから求めた。なお、濃度分布はダスト濃度連続測定器を用い、粒径分布はカスケードインパクタを用いた。

Fig. 11.1～11.3 は、各種のダスト発生機より、粒径分布の異なる7種、8種及び11種の3種類の試験用ダストを、管路内風速5, 10, 15 m/s 中に発生し、それぞれの風速におけるダスト気流を、管路内の中心部分よりダスト濃度連続測定器により等速吸引して、ダスト濃度を瞬時的かつ連続的に測定した結果である。

これらの結果から、ダスト発生機の各機種の特長は概要次のとおりであることがわかった。

4.1 ダスト濃度

4.1.1 定量吹上げ法

(1) B.M型 B.M型は微量のダスト発じん用として作られたものであるため、他のダスト発生機に比較してダスト濃度がいく分低いので、ここでは、ダスト容器の巻上げ速度を $v=29\text{mm/min}$ と最大にして発じんしたが、ダスト濃度 20mg/Nm^3 が限界で、使用時間は2hr程度まで可能であった。

Fig. 11.1～11.3の実験結果からもわかるように、ダスト濃度はかなり一様であり、発じん機として良好なものといえるが、容器内へのダストの充填時のタッピング状態によって、多少濃度のばらつきがでることが判明した。したがって、この種のダスト発生機は、試験用ダストの特性と発生機の機能を十分に習熟することによって発生の精度を高めることは可能といえる。また、ダスト容器やらせん溝を大形化すれば高濃度のダストを発生することもできよう。

(2) AFI型 AFI型は、空気調和用フィルタの試験用として作られた関係もあり、B.M型と同様にダスト濃度がいく分低い。

この機種は、容器へのダストの充填状態により、ダスト濃度が異なってくるのが認められた。実際の使用にあたって特に注意を要することは次のとおりであった。

すなわち、ダストを発生する場合、レールで容器とともに運ばれるダストを歯車によりダスト吸上げ口まで運ぶが、その際、ダストが入りすぎると歯車に次第にダストが付着して発じんしなくなるということである。本実験中でも刷毛を用いて歯車に過剰に付着したダストをたえず払い落しながらダストを発生した。

(3) SAEII型 今回の実験に用いたSAEII型

は小容量のものであるため、100 mg/Nm³の濃度で使用時間が15~20 min 程度であった*。

Fig. 11.1~11.3 からわかるように、SAE II型は各種ダスト発生機中ダスト濃度のばらつきが最も大きいことが認められた。

これは、容器へのダストの充填の程度及び圧縮空気の調整加減の影響によるものと思われる。先に JIS の試験用ダストの解説に示した¹⁰⁾この機種のもはダストの分散性が外のどの機種よりも優れていたで、容器へのダストの充填の程度が直接濃度分布の精度に影響することが認められ、今後、容器へのダストの充填方法を十分検討する必要があることがわかった。

4.1.2 定量落下法

先に述べたとおり、定量落下法におけるダスト発生機は、ダスト定量供給機とダスト発生器との組合せである。したがって、この種の発生機ではダストの供給量を定量供給機で調整し、定量落下するダストへ吹きあてる空気量は圧縮空気の圧力を変えるか、若しくはモーターの回転数を変えることによって調整できるようになっている。

(1) 吹付け型 このダスト発生機は、Fig. 14.1~14.3からわかるように、一定のダスト濃度を保つことが困難のようである。試験用ダストが7種、8種、11種と細くなるにしたがい、その傾向が著しいことが認められた。その原因は、圧縮空気の吹出し口及びダスト供給口の部分に、使用時間の経過とともにダストが付着、堆積していくためである。したがって、この対策としては、ダストの発生部にたえず適正な振動をあたえてダストの付着、堆積を防止することである。

(2) 分散機型 分散機型のモーターの回転数は低速、中速、高速の3種類があるが、中速が本実験条件に最も適しているので、ここではモーターの速度を中速一定とした。

その結果、Fig. 11.1~11.3 に示すように、この機種は11種を除く、7種、8種に対して各種ダスト発生機中最も分散性がよいことが認められた。

なお、分散機内へのダストの付着はきわめて少なく、圧縮空気を必要としないので取扱い易いのがこの機種の特長といえるが、使用が長時間にわたる場合モーターが加熱するのでその点注意が必要である。

* このSAE II型は容量80cm³の小型なので、現在は容量600cm³の中型のものを作り使用している。

(3) エジェクタ型 エジェクタ型は分散機型と同様に定量供給機との組合せで用いられる。

発生器の構造がシンプルであるにもかかわらず、粒度の異なる7種、8種、11種の各種ダストに対して分散性が比較的よいことが認められた。

ダスト濃度のばらつきの大きいところもあるが、これは、エジェクタの漏斗部へのダストの付着が原因のようである。漏斗のダスト流入落下部分を滑りやすい形状、又は材質にすることによって、このばらつきはいく分改善されるものと思われる。

5. 代表的ダスト発生機の性能比較

代表的ダスト発生機の性能を調べるために、これまでの実験結果からダスト濃度の変動率を求めたり、粒径分布を求めて相互に比較した。

5.1 ダスト濃度による比較

ダスト濃度の変動率は、7(機種)×3(5, 10, 15 m/sの各吸入空気速度)×3(7種, 8種, 11種の3種類のダスト)=63実験例より次式から求めた。

$$F(\%) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^T (C_i - \bar{C})^2 / \bar{C}}$$

ここに、F : 変動率(%)

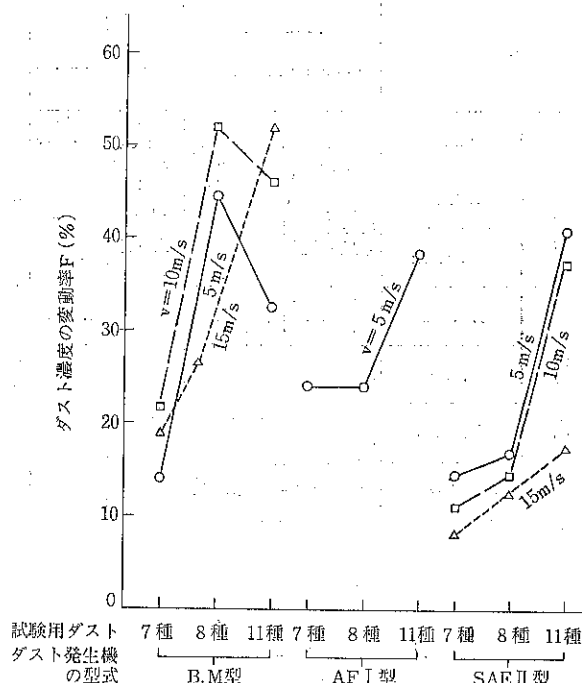


Fig. 12.1 ダスト濃度の変動率 (定量吹上げ法)

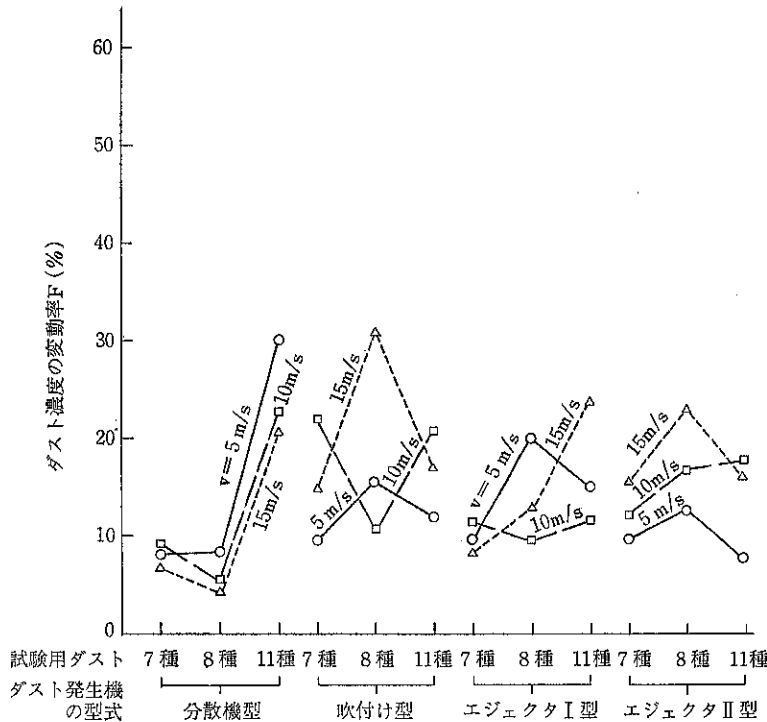


Fig. 12.2 ダスト濃度の変動率 (定量落下法)

Table 3 各種ダスト発生機の性能検定結果

発生方式及び型式		使用機器 (ダスト発生機の組合せ)	性 能							備 考
			濃度	使用時間	注 意 事 項	試験用ダストに対する分散性			7種,8種 11種相互 の分散性 比較	
						7 種 (関東ロー ム細粉)	8 種 (関東ロー ム微粉)	11 種 (関東ロー ム超微粉)		
定量吹上げ法	B.M型	本体 + 空気圧縮機 (脱湿機付) (B.M型 AF I型 SAE II型)	低 (数級増で可 変)	130cmま でのダスト 発生可能	庫車へのダ ストの付着 に注意 ダストを十 分に乾燥し て使用する	○	×	×	×	分散性の記号は次 の変動率の値を示 すものである。
	低 (可 変)		200cmま でのダスト 発生可能	△		△	×	×		
	低～高 (可 変)		100cmま でのダスト 発生可能	○		○	△	○		
定量落下法	分散機型	定量供給機 + 分散機		約1hまで	モーターの加熱に注意	◎	◎	△	△	記号 変動率(%)
	吹付け型	定量供 給機 空気圧 縮機 エジェ クタ	低～高 (可 変)	制限なし	空気吹付け部へのダ ストの付着に注意	○	○	○	△	◎ 0～10 ○ 10～20 △ 20～30 × 30～40
	エジェクタ I 型	(吹付け型 エジェクタ I 型 エジェクタ II 型)			エジェクタの漏斗部へ のダストの付着に注意	◎	○	○	○	
	エジェクタ II 型	(空気圧 縮機は 脱湿機 付)				○	○	○	—	

C_t : t分におけるダスト濃度(mg/Nm³)

$\bar{C}$: 平均ダスト濃度(mg/Nm³)

これらの結果は, Fig.12.1～12.2に示すとおりである。

Fig. 12.1 より, 定量吹上げ法によるダスト濃度の変動率は10～30%の範囲であって, この方法に含まれる型

式のダスト発生機では機器の取扱いに十分熟知しない限り変動率10%以内に定量発じんすることは困難であることがわかった。この傾向は7種, 8種, 11種とダストの粒度が細くなるほど顕著である。

定量落下法ではそのほとんどが, 20%以内の変動率で

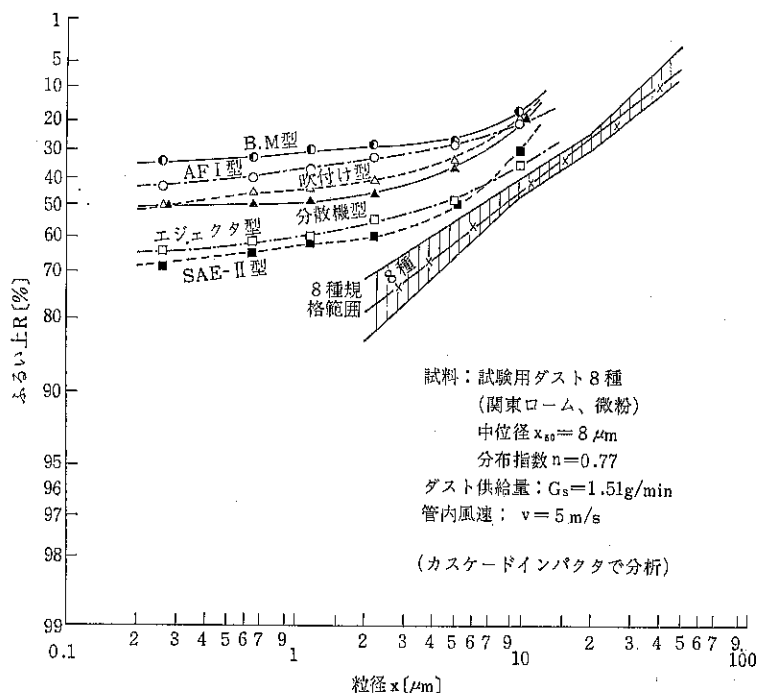


Fig. 13 ダスト気流中における粒径分布の比較

発じんでることがわかった。

この方法は定量吹上げ法と異なり、粒度の細かい11種に対しても比較的分散性がよいことも認められた。なお、分散機型は11種に対しては分散が良好でないが、7種および8種に対しては最高の定量性があるといえる。

Table 3 は、参考までに当室で取扱った代表的ダスト発生機の性能の測定結果を一覧表にまとめたものである。

5.2 粒径分布による比較

ダスト濃度を求めた際と同様に、代表的ダスト発生機を用いて、試験用ダスト8種（関東ローム、微粉）を実験装置の管路内の平均風速 5, 10, 15 m/s の空気流中に発生し、管路の上部、中心部、下部の3箇所よりそれぞれ等速吸引して粒径分布を求めた。

その結果、風速が速い方が規定粒径分布に近く、さらに、管路の中心部から下部の方が規定粒径分布に近いことが確認された。規定粒径分布に近いものは、試験用ダストが気流中で十分に分散されているためであり、規定粒径分布より細かいものは、試験用ダストの粗粒部分がすでに落下しており、一様な分散状態でないためと考えられる。

Fig. 13 は、平均風速 5 m/s のダスト気流を管路の中

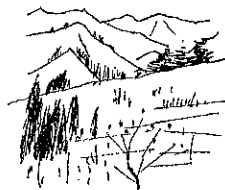
心部より採取して各種ダスト発生機の粒径分布をカスケードインパクトにより調べた結果である。

この結果によると、SAE II型やエジェクタ型は規定粒径分布に近く、ASTM型やAFI型は規定のものより細かい粒径分布を示すことが認められた。

参考文献

- 1) 山下憲一；“標準粉体の紹介” 粉砕, No. 20, 143~150(1975).
- 2) SAE Hand Book “Air Cleaner Test Code”, 829 (1973).
- 3) Air Filter Institute, “Code for Testing Air Cleaning Device Used in General Ventilation Section 1, revision (1956).
- 4) BS 2831, “Methods of Test for Air Filters Used in Air Conditioning and General Ventilation” (1971).
- 5) 井伊谷鋼一；“二、三の粉塵発生装置の試作とその特性について” 粉体工学研究会資料, No. 25.
- 6) 井伊谷鋼一；新版集塵装置, 84~89日刊工業新聞社 (1963).
- 7) Leslie Silverman and Chales E. Billings ; “Methods of Generating Solids Aerosols”

- Journal of APCA, Vol. 6, No. 2, 1~8 (1956).
- 8) 山下憲一, “標準ダストについて” 潤滑, 13 [10] 547~555 (1968).
 - 9) 増田弘昭, 倉橋 泰, 広田満昭, 井伊谷鋼一; “テーブルフィーダーによる微量定量供給” 化学工学論文集, 2, [3], 286~290 (1976).
 - 10) “試験用ダスト” JIS Z 8901—1974.
 - 11) BS 1701, “Specification for Air Filters for Air supply to Internal Combustion Engines and Compressors Other Than for Aircraft”. (1970).
 - 12) “自動車用エアクリーナ試験方法” JIS D 1612—1976.
 - 13) “換気用パネル形エアフィルタ” JIS B 9908—1971.
 - 14) “防じんマスク” JIS T8151—1972.
 - 15) O. E. C. D. “Standard Code for The Official Testing of Small Engines Used in Agriculture and Commerical Horticulture”, C (69) 1 (Final) (1967).
 - 16) Australian Standard E 35, Pat II—1970.
 - 17) SAE Hand Book, “Test for Motor Vehicle Lighting Device and Components”—SAE J 575 e, 750 (1973).
 - 18) たとえば, “自動車用ランプ類” JIS D 5500—1969.
 - 19) MIL-STD 810 C-1975. ((註)環境試験方法).
 - 20) “標準ふるい” JIS Z 8801—1976.
 - 21) “研磨材の粒度の試験方法” JIS R 6002—1973.
 - 22) ISO/TC 131/SC 6 (WG 1—3), “Multi-pass Method for Evaluating The Filtration Performance of a fine Hydraulic Fluid Power Filter Element”,—1973.
 - 23) NFPA/T 3.9, 18 “Method of Establishing the Flow Degradation of Hydraulic Fluid Power Pumps When Exposed to Particulate Contaminant”, Approved as NFPA Recommended Standard, —1976.
 - 24) “油圧用フィルタ” JIS B 8356—1969.
 - 25) “空気圧用フィルタ” JIS B 8371—1970.
 - 26) “作動油中における微粒子の測定方法(計数法)” JIS B 9920—1976.
 - 27) “自動車用オイルフィルター試験方法” JIS D 1611—1976.
 - 28) “自動車用フィエルフィルター試験方法” JIS D 1617—1978.
 - 29) “光散乱式粒子計数器” JIS B 9921—1976.
 - 30) たとえば, “空気清浄装置性能試験方法”, 日本空気清浄協会, JACA No. 10 B—1977.
 - 31) “放射性エーロゾル用高性能エアフィルタ” JIS Z 4812—1975.
 - 32) MIL-STD-282 (1956).
 - 33) 本間克典; “標準粒子の発生方法” 空気清浄, 9 [5] 28~40 (1971).
 - 34) 井伊谷 研究室; “ラテックス・エーロゾルの発生装置” 粉体工学研究会誌, 5 [3] 42 (1968).
 - 35) Morton Corn and Nurtan A. Esmen: Hand Book on Aerosols, “Chapter 2, Aerosol Generation”, 9~39 GCA/Technology Division, GCA Corporation (1976).
 - 36) H. H. Schrenk; Testing and Design of Respiratory Protective Devices, U. S. Bur. Mines. Inf. Circ. 7086 (1939).
 - 37) “大気中の浮遊粒子状物質自動計測器” JIS B 7954—1974.



フローメトロン*の供給精度について

浦山 清** 藤井 謙治**
Kiyoshi Urayama Kenji Fujii

1. はしがき

粉粒体供給装置、フローメトロンに流量検出部を組み込んで、流量の自動制御ができるようにしたフローメトロンについては前号〔粉砕, No. 21, (1976) 76~83p〕で紹介したが、今回は二三の粉粒体についてその供給精度を測定したので簡単に報告する。

2. 測定方法

試料として、ポリエチレンおよびポリスチレンペレット (3mm 球状)、これらの微粉、さらに砂粒と炭酸カルシウムを用いた。

測定は、フローメトロンで粉粒体を流出させておきその流量変動を記録計で記録するとともに、フローメトロン下部から排出される粉粒体を容器で1分間受けその重量を求め、1分間の平均流量を算出する方法をとった。同一条件での流量測定は、15回おこないその測定値から、自動制御運転時の供給誤差標準偏差 σ を求め定量性について検討した。

また、制御の効果を見るために同一条件で、制御した場合と制御しない場合の実験もおこなって両者を比較した。

3. 測定結果と考察

誤差の標準偏差 σ と供給量の関係を Fig. 1 に示す。粉粒体の性状にもよるが、一般的に供給量の増加にしたがって誤差が減少する傾向がある。また図中の右縦軸には、誤差の 3σ 値を示す。フローメトロンの供給誤差はほぼ正規分布をなすと考えられ、 3σ 値の信頼度は99.7%である。供給量が100 kg/hr~600 kg/hr 程度の範囲

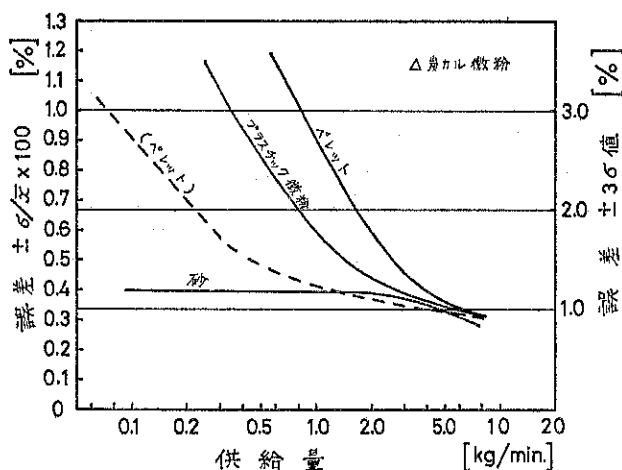


Fig. 1 流量と誤差

で誤差 (3σ 値) は $\pm 1 \sim 2\%$ 以内でありその信頼度も非常に高い。

図中に破線で示した (ペレット) の場合は、微量供給用の3カ所あるいは6カ所排出筒 (Fig. 2 参照) を付設した場合である。これは、フローメトン振動台から落下する粉粒体が全量流量検出板に衝突するように排出口を数カ所に限定したものであり、供給精度向上の効果は著しい。

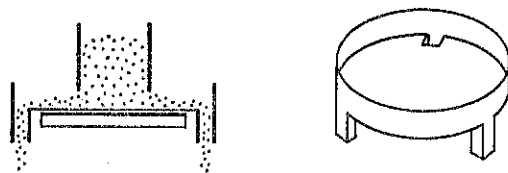


Fig. 2 3カ所排出筒

また砂粒のような流動性の良い粒度の均一な粉粒体において、供給精度は高いが、炭酸カルシウムのような凝集性のある微粉にたいしてはさらに検討する必要がある。

Fig. 3 には、フローメトロンで自動制御機構を用いて

* 本機は昭和51年10月、フロースタの商品名で発表されたが、今回、フローメトロンと改称された。

** 細川粉体工学研究所

(〒753 枚方市招提町近1-9)

Tel. (0720) 57-3721

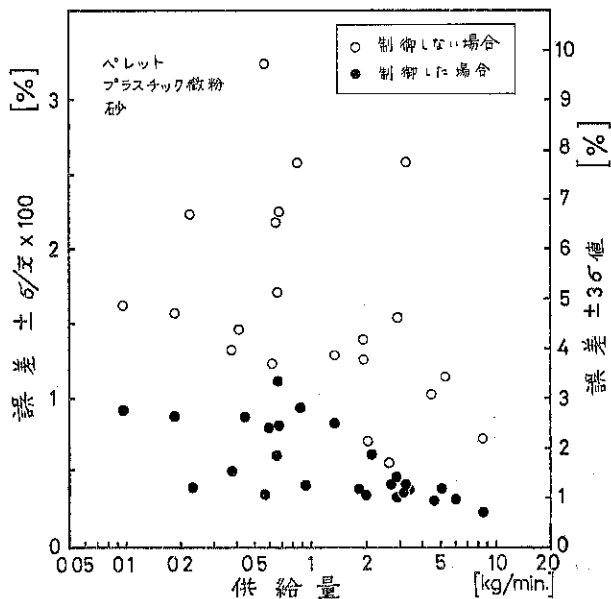


Fig. 3 制御の効果

粉粒体を供給した場合と制御機構を用いない場合との、供給誤差の比較を示す。この実験結果から、本機の制御機構が定量性を向上させるために十分その機能を果たしていると言える。

4. あとがき

フローメトロンへの供給精度について測定結果を簡単にまとめると次のようになる。

1) フローメトロンへの流量制御機構は、供給精度を向上させる著しい効果がある。

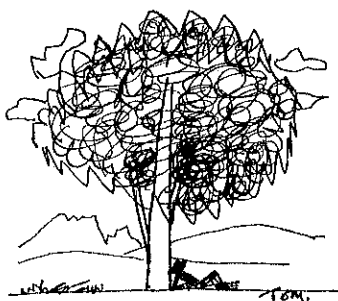
2) 供給誤差は、一般的粉粒体の場合供給量が 100 kg/hr~600 kg/hr の範囲で $\pm 1 \sim 2\%$ (3σ 値) 以内である。

3) 微量供給時の定量性向上対策として、3カ所(6カ所)排出筒が大きな改善効果をもつ。

供給誤差については、粉粒体の性質や流量により変化するが、フローメトロンは一連の粉体プロセス中の供給機や排出機として十分信頼性のある装置と考えられる。

制御機構には、流量検出部からの信号を増幅し、流量設定値と比較してフローメトロンへの振動出力部にフィードバックする方法を用いている。この応答の時定数は、現在4段階に変更できるが、粉粒体の性質によって最も適した時定数を選ぶことも供給精度を上げるために必要であると考えられる。

現在、積算回路の組込みと流量のデジタル表示化の実験中であり、今後さらに定量性の向上あるいは適用範囲の拡大についての検討を重ねたい。



新製品紹介

産業分野における製造環境の清浄化

—ハイクリーンユニット、ハイクリーンコレクターの有用性—

環境事業部*

産業分野における生産工場での生産製品の品質確保と向上の点から、製造環境の清浄化は、最近特に重要視されてきている。工場内の限定された作業区域の清浄化を計画する場合、規模内容等によっては空調（この場合は冷暖房）システムに取り入れて計画すると設備は増大し無駄を生じ、非常に高価な投資となりがちである。またそれに伴い保守管理面も複雑となってくる。限定された作業区域で局所的に高い清浄度を要求されたり、特定の室のみ清浄度を高める場合、これらを対象に空調（冷暖房）設備に関係なく要求の清浄度を満足さす目的で開発されたのがハイクリーンユニットであり、その清浄区域で粉塵が発生する場合、集塵し更に無塵無菌に近い空気まで浄化して循環供給し作業環境を清浄化する目的で開発されているのが、ハイクリーンコレクターである。

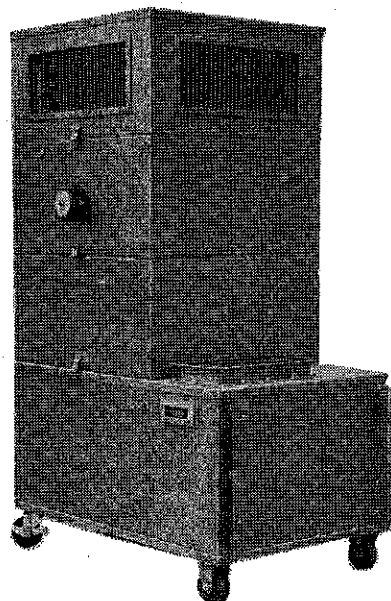


Fig. 1 ハイクリーンユニット

Table 1 ハイクリーンユニット標準仕様

型 式		HCL			
		30 H	50 H	30 M	50 M
仕 様					
処 理 風 量	m³/min	25	50	25	50
外 型 寸 法	mm	1,000×700×2,150H	1,600×700×2,150H	1,000×700×1,750H	1,600×700×1,750H
フ ァ ン	kW	1.5	2.2	1.5	1.5
電 源		AC 200 V, 3φ, 50 又は 60 Hz			
フ ィ ル タ ー		中性能フィルター (NBS 85%) HEPA フィルター (DOP 99.97%)		中性能フィルター (NBS 85%)	
附 属 品		差圧計, キャスター			
ダクト接続寸法 (ダクト接続使用時)		400 ^W ×250 ^H	500 ^W ×300 ^H	400 ^W ×250 ^H	500 ^W ×300 ^H

* ホソカワ環境エンジニアリング (株)
 (〒573 枚方市招提田近1-9)
 Tel (0720) 55-2221 (代)

1. ハイクリーンユニット

ホソカワ環境エンジニアリング(株)で開発されたハイクリーンユニットの外形写真を Fig. 1 に、その仕様を Table 1 に示す。

粉塵の発生が少ない製造環境の清浄化を計る場合、室内に設置しユニット下方より室内空気を吸込み、ラフフィルター、中性能フィルター、そして HEPA フィルターを経て無塵無菌に近い空気をユニット上部より周辺に送風して清浄度を高める。米国連邦基準または米国 NASA の規格クラス 100,000 以内を必要とする場合は、ハイクリーンユニットの処理風量が室内換気回数に換算して 20 回/時以上になるように選定せねばならない。クラス 10,000 以内を希望の場合は本ユニットの吹出側よりダクトで層流吹出ユニット(ラミベント)または、層流吹出ユニットを内蔵したクリーンブースに接続する事によりクリーンルーム、バイオクリーンルームが形成される。Fig. 2 に設置例を示す。

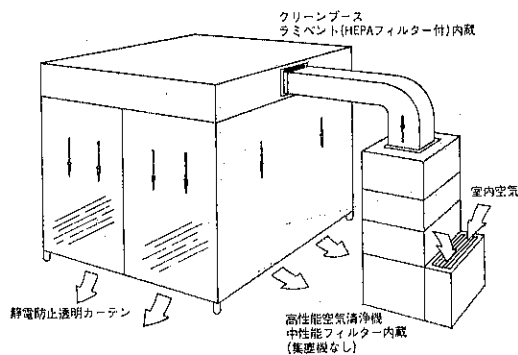


Fig. 2 高性能空気清浄機+クリーンブース

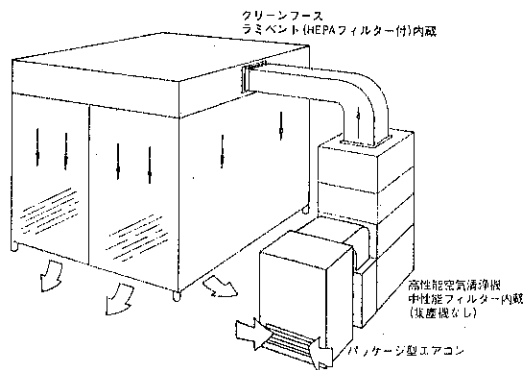


Fig. 3 高性能空気清浄機+パッケージ型エアコン+クリーンブース

クリーンブース内は必要に応じて同規格クラス 100 までの達成が可能である。某医薬品製造所でのクリーン

Table 2 L V型クリーンブースのダスト濃度測定結果

機種…ハイクリーンユニット, HCL-50H型,
処理風量 30m³/min
クリーンブース LV-3型, ブース内寸法
3,200×2,200×2,000H

測定位置…クリーンブース内軟膏充填作業位置

項目	時間(min)	微粒子数(ヶ/立方呎, 0.5μ)
運転開始前	(分)	325,910
ブース起動	10	
	8	2,160
	5	180
	3	230
作業員 3 名入室	0	250
衣服清掃		
作業準備	5	15
作業(充填)開始		0
	11	10
作業中		
小作業		
	20 (分)	0

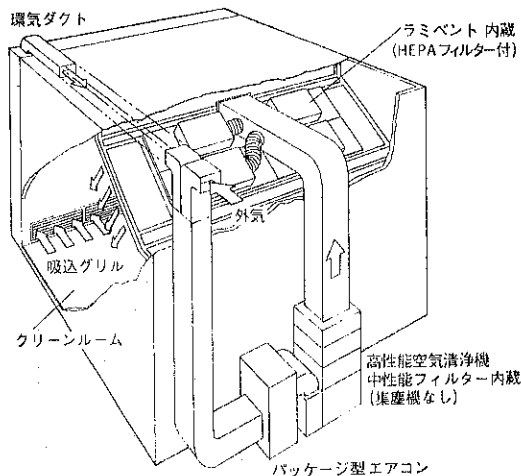


Fig. 4 高性能空気清浄機+パッケージ型エアコン+ラミベント(斜層流)

ース内の浮遊塵埃の濃度測定結果を Table 2 で示す。

また、クリーンブース内を単独に冷暖房を希望する場合は必要に応じた空調機(例えばパッケージ型エアコン)を設置し、空調機の出口空気を本ハイクリーンユニットの吸込側に接続する事により可能である。この場合の設置例を Fig. 3, Fig. 4 に示す。

2. ハイクリーンコレクター

Fig. 5はハイクリーンコレクターの外形写真, Table 3はその仕様である.

前記のハイクリーンユニットに集塵機構(当社トリット事業部のキャビネットコレクター)を内蔵し, 静圧の高い特殊ファンを採用している. 従来, 薬塵粉塵等対象

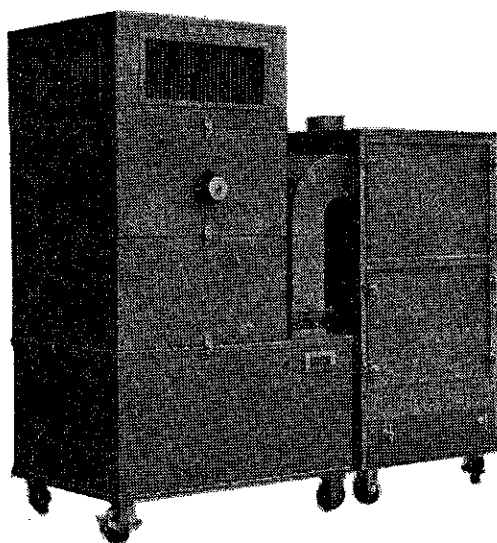


Fig. 5 ハイクリーンコレクター

の集塵機は, 室内空気を集塵後室外に排出されていたのが殆んどである. この場合, 室内が空調(冷暖房)をしていた場合は非常に大きいエネルギーの損失となっている. 一例として室内空気を毎時 $1,800\text{m}^3$ ($30\text{m}^3/\text{分}$) キャビネットコレクターに吸込み集塵した後室外に排出した場合は, 当然それに見合う外気の導入が必要である. その外気を冷房時の室温まで冷却するには 毎時 $15,000\text{ kcal}$ 以上の熱量が必要であり, これをパッケージ型エアコンで検討すると $3.75\text{ kW}\sim 55\text{ kW}$ 程度の圧縮機を内蔵した機種が必要となる. また暖房時に外気 0°C を室温 (20°C) まで加熱するには 毎時 $18,000\text{ kcal}$ 以上の熱量が必要となる. その上, これが異物の混入を避

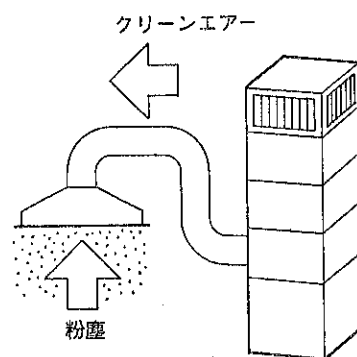


Fig. 6

Table 3 ハイクリーンコレクター標準仕様

型 式		HDC		HDCL			
		30 H	30 M	30 H	50 H	30 M	50 M
仕 様							
処 理 風 量	m^3/min	25	25	25	50	25	50
外形寸法 幅×奥行	mm	700×700	700×700	1,800×700	2,700×700	1,800×700	2,700×700
本体 高さ	mm	2,650	2,250	2,150	2,150	1,750	1,750
集塵ユニット 高さ	mm	750	750	750	1,500	750	1,500
フ ァ ン モーター	kW	2.2	2.2	2.2	3.7	2.2	3.7
電 源		A. C 200 V 3 φ 50 又は 60 Hz					
フ ィ ル タ ー	集塵用戸布	15 m^2	15 m^2	15 m^2	25 m^2	15 m^2	25 m^2
	中性能 フィルター	NBS 85%	NBS 85%	NBS 85%		NBS 85%	
	HEPA フィルター	DOP 99.97%	DOP 99.97%	DOP 99.97%		DOP 99.97%	
ダストパン容量 (集塵ユニット)	ℓ	55	55	55	150	55	150
附 属 品		差圧計, キャスター					
ダクト接続寸法 (ダクト接続使用時)	mm	400×250	400×250	400×250	500×300	400×200	500×300

けねばならぬ清浄区域の場合は導入空気の清浄化が加わってくる。

本ハイクリーンコレクターはこのような場合に対処して薬塵粉塵を集塵した後、更に中性能フィルター、HEPAフィルターで無塵無菌に近くまで濾過して室内に循環さ

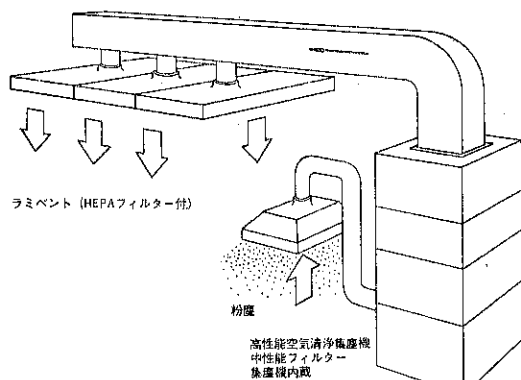
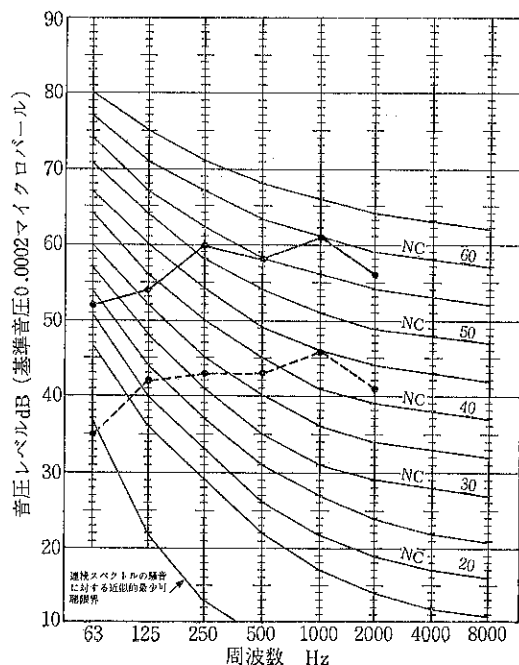


Fig. 7 高性能空気清浄集塵機+ラミベント

Table 4 ハイクリーンコレクター
HDCL-30 H 型運転騒音

測定場所…工場内
マイク位置…吹出グリル前方 1,000 m,
高さ FL+1,100 m
記号… - - - - 暗騒音
——— 運転音



せ、室内清浄度を高める目的で開発され期待に添えている。前記のハイクリーンユニットと同様、ユニット上部より直接室内に送風する事も可能であり、ダクトで層流吹出ユニット(ラミベント)に接続し送風する事により、容易にクリーンルーム、パイオクリーンルームが形成される。Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8 にその設置例を示す。

Table 4 は HDCL-30H 型の運転騒音測定データで

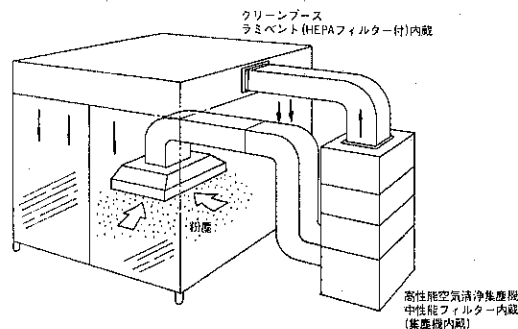
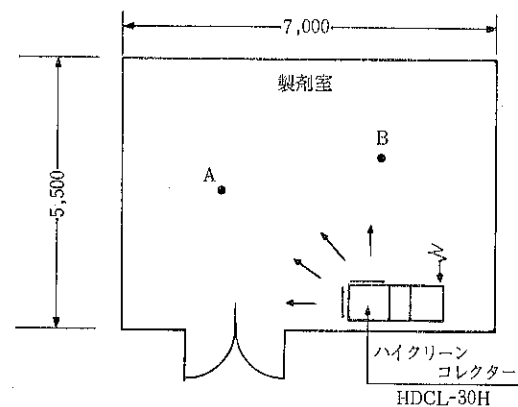


Fig. 8 高性能空気清浄集塵機+クリーンブース

室容積 $5.5\text{m} \times 7\text{m} \times 3\text{mH} = 115\text{m}^3$
ハイクリーンコレクター HDCL-30H,
処理風量 $2.5\text{m}^3/\text{min} (1,500\text{m}^3/\text{h})$
換気回数 $1,500/115 = 13\text{R/h}$
測定点 高 FL+1,000H



	微粒子、数ヶ/立方呎、CF	
	A	B
運転前	2,853,000	2,724,500
運転30分後	43,500	54,000
運転2時間後	32,800	41,200

Fig. 9 製剤室、粉塵濃度測定結果 (内服固形剤)

ある。

某医薬品製造所で本ハイクリーンコレクター HDCL-30H 型を設置し測定した浮遊塵埃の測定結果を Fig. 9 に示す。この例は、ハイクリーンコレクターを内服固定剤製剤室内に設置し、ユニット上部の吹出グリルより直接室内に送風使用されている。

ここで重要な事は、いかに高度なクリーンルーム、パ

イオクリーンルームが設備面で形成されても、作業者の管理とルーム内の生産設備、工程中の取扱い、取扱い容器、工具及び取付具、作業動線その他が充分に配慮され管理されて始めて清浄区域として存在すると言う事である。作業者の発塵防止対策（健康管理、作業衣、マスク、頭巾、靴、持込物品等の管理）、作業者又は製品の入出対策など何れも欠かす事のできない問題である。

豆ニュース

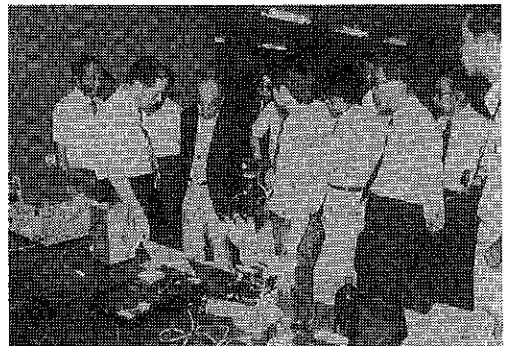
第11回粉体工学に関する講演討論会開催

—工学に応用できる粉体物性のつかまえ方と実演—

恒例の「粉体工学に関する講演討論会」が去る8月5日粉体技術談話会主催のもと、細川鉄工所枚方事務所5階会議室において開催された。本講演討論会も11回目を数え、今回は“粉体物性”をテーマとして取り上げ、各大学の研究室で独自に開発された各種測定装置を出品して頂き、その実演を通してつかみようのない粉体の物性をどのように規定し、またこれをどのように実用するかについて解説していただいた。粉体工学を専門にしておられる第一線の各大学の研究設備が一堂に会することはまたとない機会でもあり、80名を越える多数の出席者が熱心に講演に耳を傾け、実演に目をとめ、活発なる質疑応答がなされ午後5時拍手と共に終了した。

内部摩擦係数の測定

大阪府立大学助教授 宮南 啓氏



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 粉体物性の測定とその意義について
京都大学化学研究所 荒川 正文氏
- 講演 限外顕微鏡によるエアロゾルの粒径測定
大阪府立大学教授 吉田 哲夫氏
- 講演 カスケードインパクト
京都大学教授 井伊谷鋼一氏
- 講演 粉体の貫入度測定試験
同志社大学助手 日高 重助氏
- 講演 パウダーテストによる流動性の測定
細川粉体工学研究所 水井 克也氏
- 講演 微粉体の付着強度の測定およびブラフペン
による粒度測定
名古屋大学教授 神保 元二氏
- 講演 一面剪断試験機による剪断過程曲線および

各種測定機による実演

(出品測定装置)

- (1) 限外顕微鏡およびVTRによる粒径測定装置 (大府大吉田研究室)
- (2) カスケードインパクト (京大井伊谷研究室)
- (3) パウダーテスト (細川粉体工学研究所)
- (4) グラフベン座標解析装置
- (5) 引張式付着力測定器 (名大神保研究室)
- (6) 顕微鏡写真撮影装置
- (7) 貫入度試験機 (同志社大三輪研究室)
- (8) 一面剪断試験機 (大府大矢野研究室)
- (9) リング式剪断試験機 (参考出品, 細川粉工研)
- (10) 回転型流動性測定装置
- (10) 球形選別機 (京大化研荒川研究室)
- (11) 荒川式付着力測定機

総括討論 司会 京都大学教授 吉岡直哉氏

開会挨拶 大阪府立大学副社長 細川明彦氏

新製品紹介

ランミックス・システム

〔表紙説明〕

化学システム事業本部*

1. 概要

固体混合機には、操作上で回分式と連続式とがある。連続式では、スクリーン、バグミル或いはリボンブレンダーのオーバーフロー型などのような低速回転の機械かくはん型混合機と、フラッシュミキサー、フロージェット或いはタービュライザーのような高速回転の機械かくはん型混合機とがある。

一般に前者は供給粉体の粗混合に用いられ、そのあとに仕上混合機を配することが多く、後者は供給粉体に滞留時間を与えずに、瞬間的に分散、混合を完結するものであるから、鑄物砂のように流動性のよいものは別として通常は定量フィーダが装備されなければ連続混合機と言えない面があり、また混合が瞬間的であるから混合結果を察知してすぐ制御するのがむづかしいかと思う。

細川粉体工学研究所では本誌 No. 18 (1973年) に既に初期の機構を発表して以来研究を重ね、

「原料の供給速度に定量性をもち、粉体の滞留量を制御しながら、やや中速度 (48 r/m ~ 240 r/m) で回転する堅型かくはん羽根をもった混合機—ランミックス—内で、連続的に混合を進行させ、混合度を色調で判別しうる場合には、カラーコードで連続的に着目成分を検出し、制御して、常に安定した混合製品を連続的にうる」

「ランミックス・システム」を開発した。これを '77 化学プラントショーに展示し、以後弊事業部にてユーザー各位のテストの御要求におこたえすることになったので、ここに多少の解説を加える。

2. ランミックス・システムの特徴

- 1) 完全な自動化、連続化が可能となり、人手が省ける。
- 2) 連続化により装置が小型化になり、特に大容量の

混合に適している。

3) 特殊な形状の、かくはん羽根を用いているので、連続混合でおこりがちのショートパスやバックミキシングがなく均一な混合ができる。

4) 混合機内の滞留量や、かくはん羽根の回転速度の調節が容易であるから、混合原料の性状、混合の目的などに応じての最適な操作条件の設定が迅速にとれる。

5) 混合の度合をカラーコーダーで判定できる場合には混合製品の品質管理が容易である。

6) システム全体は外気に対して閉の回路になっているから、発じんの心配がない。

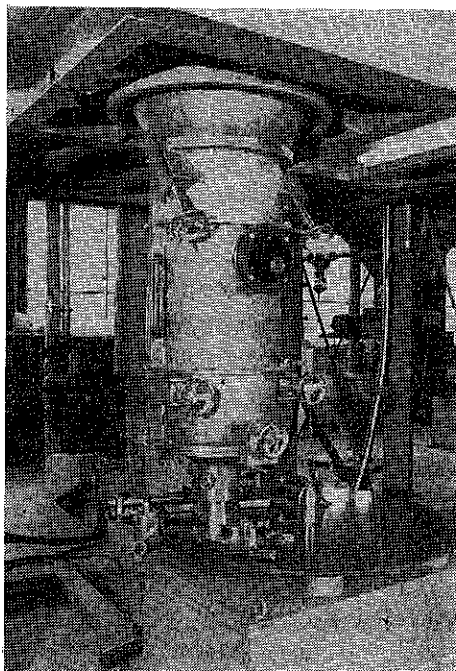


Fig. 1 ランミックス・システム

3. ランミックス・システムのフローと構成主要機について

Fig. 1 にランミックス・システムの外観を示した。

* (株)細川鉄工所
(〒573 枚方市招提田近1丁目9)
Tel (0720) 55-2221 (代)

本システムのフローシートを Fig. 2 に示す。原料ホッパー①にためられた粉体は、定量供給制御器フロートロン②で供給量をコントロールされて、混合機ランミックス③に供給され、ここで最適の操作条件で連続的に混合されて、ランミックスの底部から連続的に排出される。なお、ランミックス本体にはレベル計④をとりつけて、滞留量のコントロールを行っている。

またランミックスの排出部にカラコーダ⑥をとりつけて、混合度を色調でチェックして、混合度が異常のときは混合粉体を系外に排出したりすることもできる。以下構成主要機器について記す。

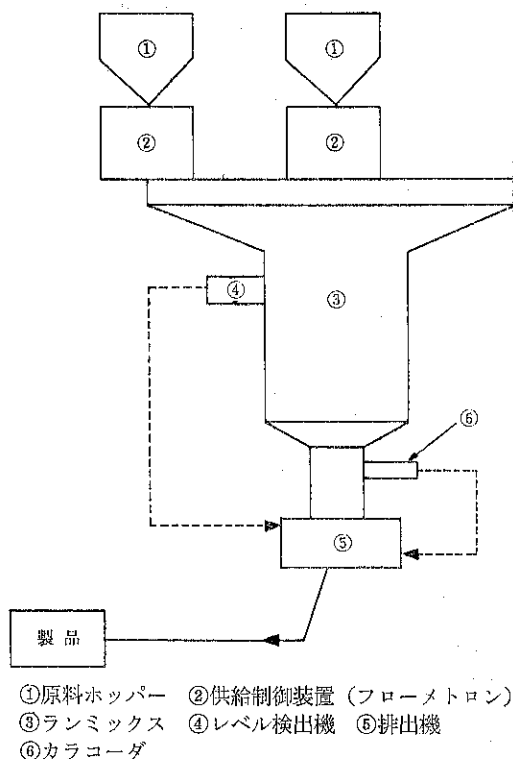


Fig. 2 ランミックスのフローシート

1) 原料の定量供給機

微量成分の添加のときにはミクロン・フィーダ、或いはライブピンフィーダなどを用いることもできるが、通常の原料供給にはフロートロンを使用する。

フロートロンは供給精度が高く、一般的な微粉体の場合に±2%以下の精度が保て、供給量の設定が簡単で応答速度が早く良好な動特性をもった定量供給機であり、かつ粉体流量の指示や記録などもとれる。

仕 様

使用電源 AC100~110V.

流量検出方式 ストレインゲージ方式

供給能力範囲 30~1,000 kg/Hr.

2) ランミックス

本システムの主体をなす連続混合機で、供給された粉体のショートパスや、バックミキシングのおこらぬような堅型のかくはん羽根によって、機内滞留粉体を連続的にかくはんし混合してゆくものである。滞留量は本体にとりつけるレベル計の位置の変更で調整できる。

仕 様

動 力 2.2kW×4P, 無段変速

回転数 48~240 R/M

有効混合容積 Max. 60 ℓ

混合比 1 : 10 程度

3) カラコーダ

本機は比色式混合度測定機であり、本システムでは混合製品のオンラインでの品質の監視用として用いられている。

本機は連続的に流れている粉体面にプローブを装着して、プローブ内に光伝せんいによって光を導入し、粉体面で反射する光を同じプローブ内にある受光用光伝せんいにより、コントローラーボックス内の光検出部へ戻して、その反射率を測定するものである。

なお、このように光源をコントローラーボックス内に内蔵しているので、測定部での温度上昇がなく、また漏電の危険もない。またフィルターの色調をかえることにより、広い範囲の色質に適用できる。また記録計をとりつけばオンラインで混合製品の品質を連続計測し記録にのこすことができる。

仕 様

電 源 単相 AC100V.

消費電力 230VA

記録計 出力端子 0~10mV.

フィルタ N (なし), G (グリーン)

B (ブルー), R (レッド)

以上の4種

4. ランミックス・システムの適用分野

本システムは飼料、農薬、食品、合成樹脂、窯業、セメント、化粧品、化学工業等広い分野において、多量生産工程への連続混合の適用は多々あると思っている。

おわりに、ユーザー各位の御指摘、御指導によって、本システムをよりよきものへと伸長させてゆきたいと思っておりますので、本誌をかりてよりしくお願い申上げる次第である。

新製品紹介

ホソカワ／マイクロ パルスエアー LP シリーズ

第二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15年を経過し、販売実績は10,000台をはるかにオーバーし、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す。我々はこれら過去の実績をジャンプ台とし、より高性能で、より安価な集塵機の開発を進めてまいりましたが、今日ここに、新しいタイプのパルスエアーLPシリーズの誕生を見るにいたしました。

1. ニュータイプ、パルスエアーLPシリーズとは

従来のパルスエアーは、フェルト製汙布を使用しパルスジェット方式の汙布洗浄機構をもった、ハイエネルギータイプの汙過式集塵機（バッグフィルター）ですが、LPシリーズは、ハイエネルギータイプバッグフィルタ

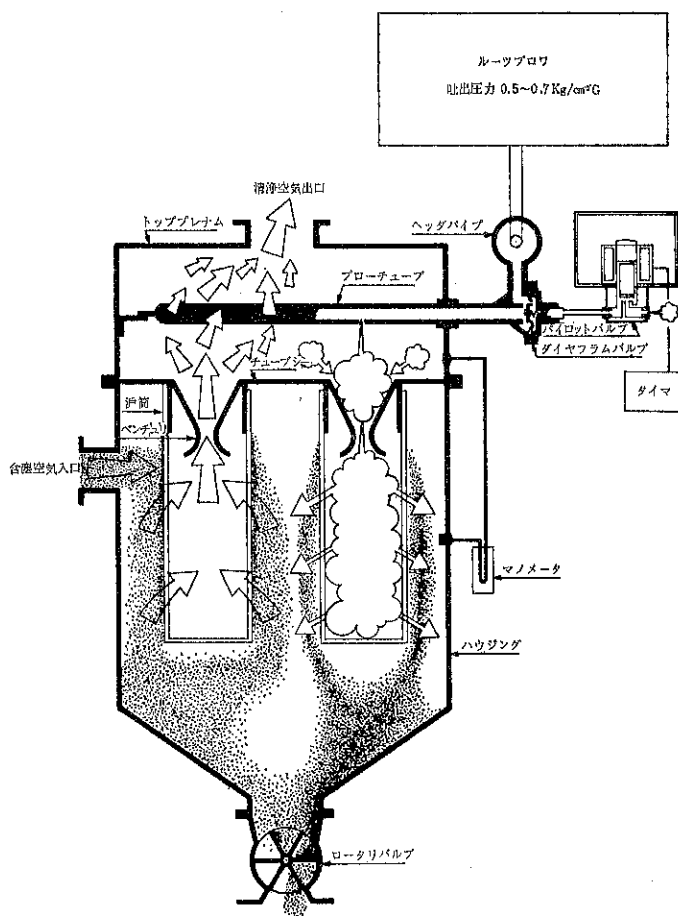


Fig. 1 ホソカワ／マイクロ パルスエアーLPの構造

* (株)細川鉄工所
(〒573 枚方市招提田近1丁目9)
Tel (0720) 55-2221 (代)

ーの長所をより延ばし、ローエネルギー（汙布洗浄空気圧力 0.5~0.7 kg/cm²G）タイプの長所との相乗効果をねらったニュータイプのパルスエアーです。

LPシリーズの最も大きな特徴は、汙布洗浄機構と汙布の改良により、処理風量が 1m² 当り 5~10m³/min が可能となったことです。

用途は小麦粉、飼料、木粉などの比較的払い落とし易い粉塵処理に最適です。

2. 機 構 (Fig. 1 参照)

[Fig. 1 にホソカワ/マイクロパルスエアーLPの構造を示しました。

含塵空気は上部入口から圧送、または吸引によってハ

ウジング内に入ります。

粉塵は汙筒表面に附着し、汙過された清浄空気は汙筒内を通して上部出口より排気されます。汙筒表面に附着した粉塵は、パルスポンプ方式の新しい洗浄機構により、連続的に払い落され下部ホッパーより排出されます。

新しい汙布洗浄装置は汙筒上部に設けられたブローチューブから低圧空気（0.5~0.7 kg/cm²G）を瞬間的に噴射させ、そのショックによる振動と外面に向って逆流する空気で附着する粉塵を効果的に払い落とします。

3. LPシリーズの仕様

ホソカワ/マイクロパルスエアーLPシリーズの仕様および寸法を Table 1 に示した。

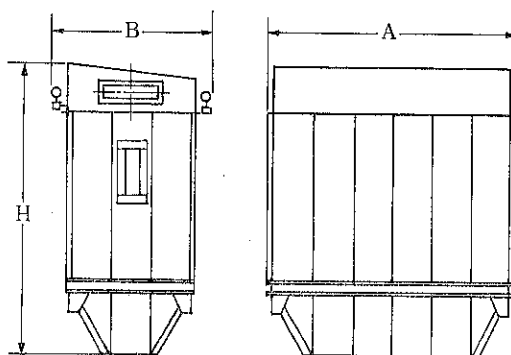
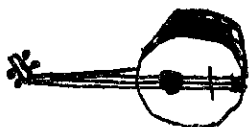


Table 1 LPシリーズの仕様と寸法

仕様	型式	P-48-6LP	P-1C1LP	P-1C1-24LP	P-1C1-48LP	P-1C2LP	P-1C2-24LP	P-1C2-48LP	P-1C3LP	P-1C4LP	P-1C5LP
汙過面積	m ²	31.6	47.4	63.2	79.0	94.8	110.5	126.3	142.1	189.5	236.9
汙布数量	本	48	72	96	120	144	168	192	216	288	360
電磁弁数量	個	12	18	24	30	36	42	48	54	72	90
標準必要空気量	ℓ/min	700	1,000	1,200	1,500	1,800	2,000	2,500	2,800	3,700	4,700
標準耐圧度		430	430	430	430	430	430	430	430	430	430
概略寸法	A	mm	1,370	1,980	2,590	3,200	3,810	4,420	5,030	6,250	8,080
	B	mm	2,670	2,670	2,670	2,670	2,670	2,670	2,670	2,670	2,670
	H	mm	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300
概略重量	kg	1,460	1,790	2,120	2,550	3,080	3,410	3,840	4,270	5,560	6,850



新製品紹介

ダクト中における火粉検知装置

—ホソカワ/ミクロン ルミ・アラーム—

第二環境システム事業本部*

1. 概要

プラスチック工業、有機合成工業、粉末金属工業、合板工業、製粉飼料工業などの製造工程における粉碎、移送、篩分、撹拌など外部から機械的な作用を与える場合、また、粉体物質の乾燥、混合、分級、計量などを行う工程では発火爆発の危険が多く存在します。粉じんの発火爆発は、物質自身で常温で酸化発熱する一部の金属類を除くと、発火源の存在が必要であります。このように粉じん爆発の核となる“火粉”をできるかぎり初期に、またできるかぎり小さな火粉の状態にあるものを早期に発見するため新しく開発いたしましたのが“ホソカワ/ミクロン ルミ・アラーム”です。

“ホソカワ/ミクロン ルミ・アラーム”は空気中に浮遊する微小な“火粉”を高感度（検知時間 0.003 sec）に検知することができるため、空気輸送中のダクト（風速 20 m/sec の場合、火粉の軌跡は 60 mm で検知）やタンク等に取り付けて使用されます。

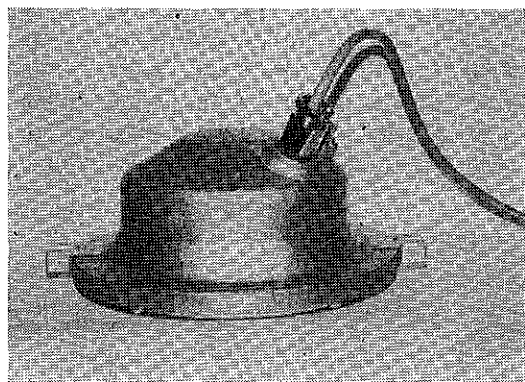


Photo. 1 ホソカワ/ミクロン ルミ・アラーム

* (株)細川鉄工所

(〒573 枚方市招提田近1丁目9)

Tel (0720) 55-2221 (代)

2. 構成

Fig. 1 にホソカワ/ミクロン ルミ・アラームの構成例を示した。すなわち本機は検知部、ミキシングボックス、増巾部および制御部からなっております。

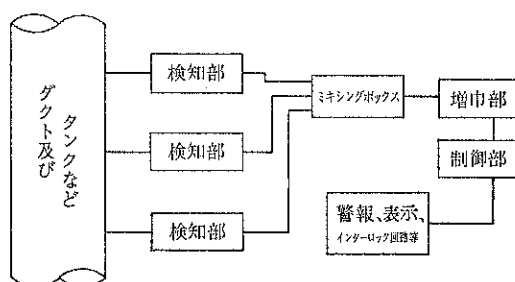


Fig. 1 ホソカワ/ミクロン ルミ・アラームの構成例

3. 検知部

検知部は光電変換検出素子として、光電子増倍管（以後PMTと略す）を使用しています。PMTが他の光検出器と大きく異なる点は検出器自体に、高利得、高速で低雑音の増倍部をもっていることです。

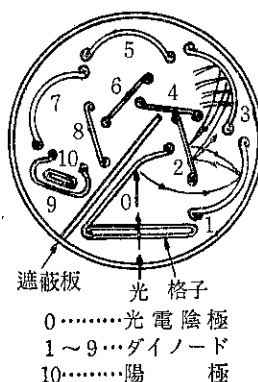


Fig. 2 PMTの機構

PMTは、光電陰極、集束電極、多段2次電子増倍を行うダイノード群、および最後に増倍された光電流を取り出す陽極からなっています。

動作機能を Fig. 2 について説明しますと、光が光電陰極面0に入ると、光電子が放出され、この電子が集束電極と第1、第2ダイノードによってできる電界に集束されて、第1ダイノードの2次電子面に衝突し、2次電子面から数個の2次電子が放出されます。

これらの数個の2次電子は各々が第2、第3……第10ダイノードによって次々と同様に増倍され、最後には始めの光電子流の数の約100万倍に増倍されて、格子形の陽極から取り出されます。

4. ミキシングボックス

ミキシングボックスは、検知部を数個一度に取付ける場合、検知部からの配線を集約するものです。

5. 増巾部

PMTの陽極から取り出された、光電子流から確実に制御出力を得るための増巾回路です。

6. 制御部

制御部は増巾部からの制御信号により、警報、表示、計数、記録、インターロック等の機能を果たすための制御機器、検出器を制御するのに必要なスイッチ、パイロットランプ、テストスイッチ、端子盤等をまとめたものです。

7. 動作

制御部の設計によって種々の制御機能を持たせること

ができますが、標準的な一例を示すと次のようになります。検知部で火粉を検知しますと、PMTの陽極から取り出される光電子流を増巾部で制御に必要な大きさの出力に増巾され、制御部に送られ、制御部の検知ランプと負荷ランプが点灯します。

これと同時に下記の様な動作機能（オプション）を持たすことができます。

- ① 警報（ベル、サイレン、回転灯等）
- ② 装置の停止（粉碎機、ブロワ、乾燥機等）
- ③ ダンパ作動（空気配管の切替、製品排出口の切替等）
- ④ 消火装置の作動（ハロゲンガス、CO₂ ガス等の放出）

8. 標準仕様

入力電源	AC 100/110 V	200/220 V	50/60 Hz
消費電力	50 VA		
検出波長	可視全城	380~760 nm	
受光時間	0.003 sec (MIN)		
受光感度	0.5 μ Lm	以上	
ガス温度	150°C (MAX)		
設置場所	検知部	ミキシングボックス	屋内外
	増巾部、制御部		屋内
検知部数量	丸ダクトで垂直管の場合		
	300 ϕ 以下		1ヶ
	300 ϕ ラコエ	400 ϕ 以下	2ヶ
	400 ϕ ラコエ	550 ϕ 以下	3ヶ
	550 ϕ ラコエ	800 ϕ 以下	4ヶ
	800 ϕ ラコエ	1,000 ϕ 以下	5ヶ
	上記数量は、含塵濃度 50 g/Am ³ 以下の場合で、50 g/Am ³ 以上の場合は、特殊設計となります。		

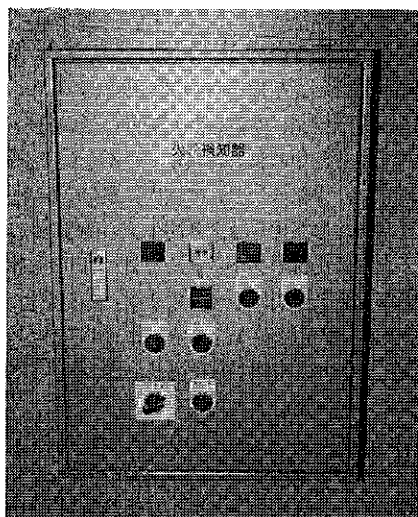


Photo. 2 ルミ・アラームの制御ボックス

製品紹介

大型ホソカワ/トリットキャビネットコレクター

トリット事業部*

局所集塵用として好評を博しているホソカワ/トリット キャビネットコレクターの大型機が開発され、各種の分野で採用されるようになりました。ここにその一端を紹介致します。

◎大型キャビネットコレクターの構造

本機の構造は小型機と全く同一で、1本が約 1m^2 の濾過面積を有する封筒型濾布が多数本機内に懸吊され小さなスペースで大きな濾過面積を確保しています。濾筒に附着したダストは手動もしくは電動型のシェーカーバーにより払い落とされます。ケーシングは、ダストパン型とホッパー型があり用途によって使い分けられます。またファンは、各種サイズのを任意に取り付けられますので、捕集する粉塵の性質により濾過風速を適当に選ぶことができます。

◎触媒再生装置への利用

触媒を再利用する為に使用済触媒を篩い分け不純物等を取り除く工程で発生する粉塵を除去する為に用いられていますが、この装置は Fig. 1 のように節機と本機を一つの台車の上にのせ自由に移動できるようにしています。これは工場内数カ所から出て来る使用済触媒を工場内あちこち運びまわることなく効率よく処理し、本装置使用後は倉庫の中に保管し、工場スペースを有効に活用しています。

このような利用方法が採用できるのは、本機の重心が低く転倒の心配が全くない為で、本例と同じ様に本機を台車にのせ移動させつつ集塵機として用いられている例に電車の台車を圧力空気で掃除する気吹き作業、焼成炉のレンガ取り替え時の発塵防止等があります。

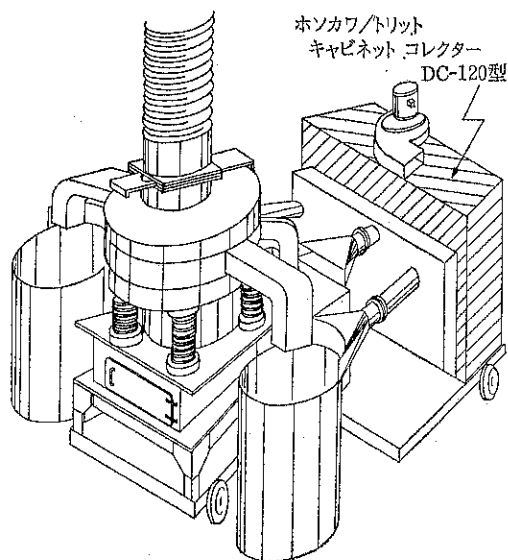


Fig. 1 大型ホソカワ/トリット キャビネットコレクターの応用例（触媒再生装置への利用）

◎食パン成型工程の集塵

充分熟成したパン生地から空気を抜き食パン型へ流し込む作業は普通完全に空調された天井の低い室の中で行なわれており工程中の打ち粉（ひっつかないように生地に振りかける小麦粉のこと）は室内に飛散し床や天井に附着し作業環境を悪化させ食品衛生上も問題となるばかりでなく、冷暖房機のフィルターを目づまりさせ冷暖房能力を低下させる原因にもなります。この打ち粉を回収する為に他型式のバッグフィルターに比し高さが低いと言う特長を生かして本機が採用され、環境改善にその偉力を発揮しています。

この他、高さが低いと言う特長がかわれ製薬会社のGMP対策の空調設備に天井の低い機械室の中へ組み込まれ $45,000\text{m}^3/\text{H}$ もの空気を処理する大型機を設計し採用されました。

* ホソカワ環境エンジニアリング株式会社
(〒573 枚方市招提田近1-9)
Tel (9720) 55-2221

◎大型ホソカワ/トリットキャビネット
コレクターの仕様

して製作していますが、御希望により500m²位迄のものを設計製作いたします。

一応 Table 1 に示しましたサイズのものを標準型と

Table 1 標準型式仕様 (ホッパー型)

仕様 \ 型式		DC-120		DC-130			DC-140		
濾過面積	m ²	40		80			120		
風 量	m ³ /min	60	80	80	110	140	110	140	170
所要動力	kW	3.7	5.5	5.5	7.5	11	7.5	11	15
概略寸法 (mm)	幅	1780		1780			2750		
	奥行	720		1480			1480		
	高さ	2800		2800			3350		

注 1. ダストパン型もあります。

2. 自動払落し式もあります。

特許一言メモ

特許協力条約 (PCT)*

特許の外国出願は、希望する国ごとにそれぞれ出願手続きがなされて来た。したがって、同じ内容の出願明細書を各国の審査官が一生懸命に審査するわけで、出願人とお役所のトータルの手間ひまは大変なものとなっている。

そこで各国がPCTに加わることにより、どこか一ヶ所で審査して希望する外国の特許権を得られるようにす

るのがこのPCTであり、その準備には(外国)出願手続きの書類と審査資料を各国で統一することが必要となる。すでにアメリカ、西ドイツがこれを批准しており、わが国は来年度中(1978年)には発効が予想されている。(M. N)

* (PCT ; Patent Cooperation Treaty の略)



ホソカワ ニュース

○組織変更

昭和52年1月5日、現代の複雑な状況に対応すべく会社組織を一部変更しました。

- (1)統括事業本部に技術部を新設する。
- (2)第二環境システム事業本部の開発課は、新しいシステムを開発販売するプロジェクト的組織とする。
- (3)第二環境システム事業本部のサービス課を枚方工場より分離する。
- (4)第二環境システム事業本部枚方工場の生産管理課は、生産管理関係業務を統合する組織である。(旧工務課、倉庫係、資材係)
- (5)第二環境システム事業本部枚方工場製造課進行係を廃止する。
- (6)粉体システム事業本部の大阪技術課、東京技術課を各大阪営業課、東京営業課に統合する。
- (7)粉体システム事業本部大阪工場部品サービス課を部品課に改称し、同製造課を製造一課と製造二課に分ける。
- (8)第一環境システム事業本部を営業係と技術係に分ける。

○ガス吸着装置の製作販売を開始

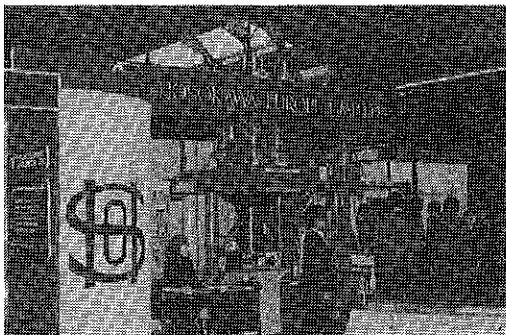
昭和52年1月、武田薬品工業㈱の技術協力により活性炭によるガス吸着装置の製作販売を開始しました。

この装置は、活性炭によって、硫化水素、亜硫酸ガス、窒素酸化物などの有害ガスや悪臭ガスを効果的に吸着し、清浄化します。又有用な有機溶剤ガスを回収します。

○POWTECH '77 に出品

世界の粉体機器の専門展示会であるパウテック '77 が3月15日～17日の3日間、英国で開催されました。

当社より連続混合装置ランミックスシステム及び分級



捕集装置をホソカワ、ヨーロッパを通じて出品し、展示実演をいたしました。パウテックの機関紙にも掲載されるなど、非常に好評を博しました。

○ホソカワ環境エンジニアリング㈱高性能空気清浄集塵機を開発

昭和52年4月、当社の関連会社である、ホソカワ環境エンジニアリング㈱が、薬塵、粉塵対策用に高性能空気清浄集塵機、ハイクリーンコレクター・ハイクリーンユニットを開発し販売を開始しました。この装置は、クリーンルーム内の発塵による汚染空気のリ循環が可能で、屋外に排出される必要もなく、エネルギーの節約ができ、応用分野も多方面に渡るなど、数多くの特長を有しています。

○輸送機デイスクエレベータ、技術提携契約締結

昭和52年5月にオランダのクインケンベルグ社と粉粒体輸送機、デイスクエレベータの技術提携契約を締結しました。

本機は、粉粒体を高所へ輸送するための縦型連続コンベアで、自浄性があるため、粉粒体の堆積がないなどの数々の特長を有しています。

○日本鑄物協会第91回講演大会、鑄物展示会

と き：昭和52年5月28日～5月30日

ところ：京都市勧業館

小間数：1小間

出品機種 サンドターボ パネル展示

○西独、デュッセルドルフへ出品

昭和52年8月28日～9月1日まで、西独のデュッセルドルフで、LNG展が開催されました。当社と大阪ガス㈱の共同開発の超低温粉碎装置、リンレックスを紹介し、非常に好評を博しました。

○'77防災システム機器展

と き：昭和52年9月8日～9月12日

ところ：大阪国際見本市港会場

小間数：1小間

出品機種 火粉検知装置 ルミアラーム 実演展示

○'77化学プラント・ショー

と き：昭和52年9月26日～9月30日

ところ：晴海・東京国際貿易センター

小間数：8小間

出品機種

- ①連続混合装置 ランミックスシステム及分級捕集装置 (実演展示)

- ②火粉検知装置 ルミアラーム (実演展示)

- ③渦過式集塵機 ミニパルスエアー F T P 12-2

- ④小型集塵機 コンビコレクター DC 80 & #106

- ⑤ステンレス帆布“ナスロン”(フェルト、織布) 当社



と日本精線㈱の共同開発の製品。

化学プラント・ショーは世界的にも有名な展示会であり、今回で第11回目であります。

当社は新製品の連続混合装置ランミックスシステム及び分級捕集装置と火粉検知装置ルミアラームの実演展示を行い、引合件数も多く、非常に盛況でした。

“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	井伊谷綱一氏
“ ”	京都大学教授	吉岡 直哉氏
		(御年令順)

上、テーマの意図から少し外れているものもあると思います。賢明なる読者のご批判、御鞭撻をお願いいたします。

* 石油ショックに端を発した不況の波は一向におさまりそうもなく、唯一の頼みの綱であった輸出も昨今の円高により一段と厳しい経済情勢となり、読者諸兄は各々の立場でご奮闘されていると存じます。明日の日本丸の行方が本当に“見える”日はいつなのでしょう？

編集後記

編集部

* このところ本誌発行日が予定より遅れ、投稿いただいた諸先生方およびご熱心な読者諸兄には申し訳なく心よりお詫び申し上げます。

* 近年粉体工学を志す研究者が多くなり、粉体物性の関心も高まっているようです。本号巻頭言で荒川先生が述べられているように粉体の正体が漠然とながら“見えて”きています。

* しからばこの物性をどのように測り、どのように利用したらよいかという観点から“粉粒体物性の測定”をテーマに「第11回粉体工学に関する講演討論会」が去る8月5日開かれ、各大学の研究設備が一堂に会し、実演を通じ活発なる討議がなされ盛会裡に終了しました。

* この掴みにくい粉体の物性に関し、本号において「粉粒体の物性とその測定」と題し特集を組みました。しかし、このテーマを設定して各著者に原稿を依頼したものでなく、関連ある記事原稿を集めて特集としました関係

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、随筆など特徴ある記事をふるって御投稿されるようお願いいたします。ご一報いただきましたら、原稿用紙をお送りいたします。

次号発行予定 昭和53年9月末日

原稿締切 昭和53年5月末日

“粉 砕” No.22 1977年 秋季号

昭和52年11月25日 印刷

昭和52年11月30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

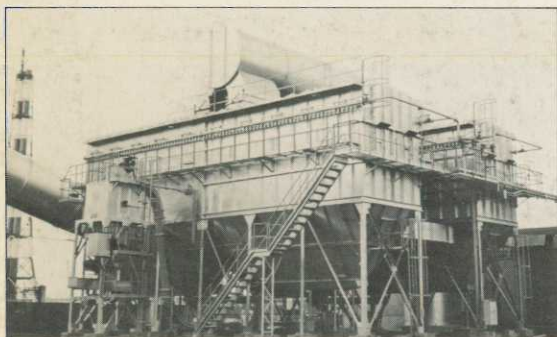
大阪府枚方市招提田近1丁目9

印刷所 ナニワ印刷株式会社

大阪市北区川崎町38

粉体処理機器で世界に伸びるホソカワ

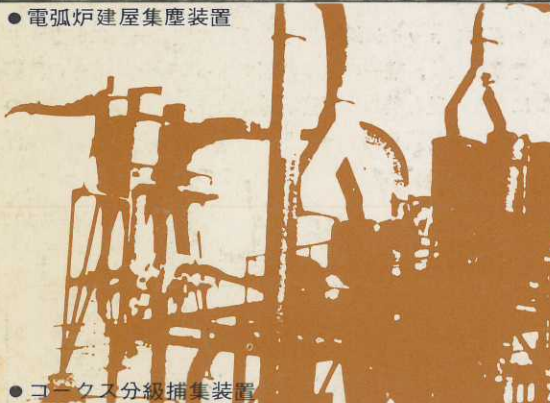
単位装置からシステムエンジニアリングまで



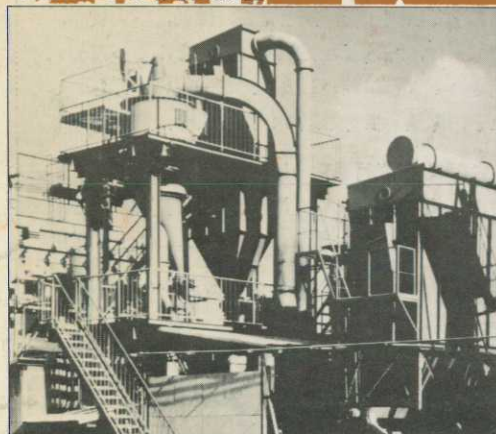
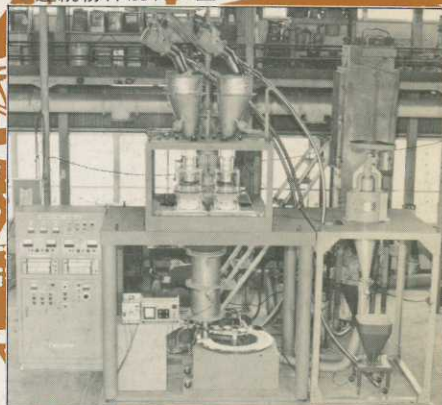
●電弧炉建屋集塵装置



●連続粉体混合装置



●コークス分級捕集装置



様々な特性を持つ粉体は、その姿を変えながら私たちの生活と深い関わり合いを持っています。ホソカワは、各種粉砕機、分級機、混合機、乾燥機、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、あらゆる産業の発展に幅広く貢献し、今後もこの粉体の分野を中心として技術開発に力を注ぎ、あらゆる需要にお応えしていきます。

ホソカワ

株式会社 細川鉄工所

〒573 大阪府枚方市招提田近1丁目9番地
〒105 東京都港区虎ノ門1丁目2番20号(第19森ビル)
電話 / 大阪(06)55-2221・東京(03)503-2231