

新 碎

THE MICROMERITICS

ホソカワミクロン株式会社創立70周年記念号

〈特集〉世界の粉体工学(工業)の現状

NO. 30 1986

細川粉体工学研究所



ホソカワミクロン株式会社創立70周年記念号

- 【巻 頭 言】 粉体技術と国際水平展開……………ホソカワミクロン 榎 細川 益男…… (2)
- 【研究報告】 微粉碎された種々の Si_3N_4 粉体の特性……………名古屋工業技術試験所 菅野 善則…… (4)
- 【研究報告】 ガス圧勾配を利用した粉体かさ密度の制御……………Univ. of Wollongong A. G. Mc Lean… (10)
- 東 京 大 学 菅 沼 彰
横 浜 国 立 大 学 松 本 幹 治
東 京 水 産 大 学 青 木 隆 一
- 【技術報告】 ホソカワミクロンミニテーパーフィーダ
(MTF-1) の特性……………榎細川粉体工学研究所 水井 克也…… (15)
- 【参考資料】 傾斜回転円板による異形粒子の分離実験……………北海道大学 篠原 邦夫…… (21)
- 松岡 英司
- 【参考資料】 二次元ホッパーにおける流動時の空気圧および
かさ密度の分布……………静岡 岡 大 学 竹下 武成…… (27)
- 渡 辺 始
渥 美 邦 夫
- 【解 説】 粉体流量の計測……………広島 大 学 増田 弘昭…… (31)

<特集> 世界の粉体工学 (工業) の現状

- アメリカにおける固体混合の最近の動向……………Kansas State Univ. L. T. Fan …… (36)
- Yi-ming Chen
- U. S. Grain Marketing
Research Center F. S. Lai
- 粒子のキャラクタリゼーション
- 丸い世界の不規則粒子—……………Technische Hogeschool Delft B. Scarlett…… (41)
- サイクロン, 湿式スクラバ, バグフィルタ
による集塵技術の現状……………Univ. Karlsruhe F. Löffler …… (49)
- J. Sievert
- 東ドイツにおける粉体工学……………Bergakademie Freiberg H. Schubert… (62)
- タイにおける粉体工学の役割……………Chulalongkorn Univ. W. Tanthapanichakoon
…… (70)
- 韓国粉体工業技術の現況……………嶺南大学校工科大学 姜 錫浩…… (73)
- 釜山大学校薬学大学 崔 堉植
- 最近の粉碎技術……………東 京 大 学 井上外志雄…… (81)
- 空気輸送の研究におけるわが国の現状……………大 阪 大 学 森川 敬信…… (93)

気・固系流動層の流動特性と粉体物性	名古屋大学 山崎 量平	(99)
貯槽の Overpressure について	福岡教育大学 森山 龍一	(109)
国内における粉体力学物性測定に関する 最近の研究	姫路工業大学 大島 敏男	(116)

【総 説】 無機物とポリマーの粉碎における メカノケミカル現象の相似と対応	久保輝一郎	(127)
--	-------	-------

【行 事 報 告】 第19回 粉体工学に関する講演討論会から	編集部	(138)
--------------------------------	-----	-------

【新製品紹介】 ホソカワミクロン ファインシャープ セパレータ	ホソカワミクロン 株式会社 東京事業本部	(142)
------------------------------------	----------------------	-------

【新製品紹介】 ホソカワ/ソノダイン パルス コンパクションドライイングシステム	ホソカワミクロン 株式会社 大阪事業本部	(146)
---	----------------------	-------

【新製品紹介】 圧力(室圧, ダクト圧)制御装置	ホソカワ環境 エンジニアリング 株式会社 環境事業部	(149)
--------------------------	-------------------------------	-------

【新製品紹介】 ホソカワミクロン ラボミキサ (LV-0)	株式会社細川粉体工学研究所	(152)
ホソカワ ニュース		(154)
“粉碎”誌総索引 (No. 1~No. 30)		(157)

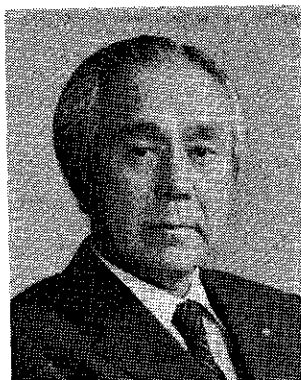
特許一言メモ	増えてきつつある国際出願(No. 68)……(9) 米国特許, 外国からの取得は日本が一番 (No. 69)……(14) 韓国への出願も日本が一番 (No. 70)……(14) 特許印紙の額面の 種類が増えた (No. 71)……(30) 意見書・補正書の指定期間の延長(No. 72)……(35) 出願書類等にコピーの使用が可能となる (No. 73)……(40) ハイブリッドシステム (No. 74)……(92) 周知慣用技術集の発行について (No. 75)……(126) 膨大な出願 件数と増える未処理件数 (No. 76)……(151)
--------	---

表紙説明	建設中の技術開発センター	(153)
------	--------------	-------

Original Reports :

- Characteristics of Various Si_3N_4 Powders Modified by
Comminution GrindingY. Kanno(4)
- The Use of Gas Pressure Gradients to Control Powder
Packing Density.....A. G. McLean... (10)
A. Suganuma
K. Matsumoto
R. Aoki
- Characteristics of Hosokawa Micron Mini-table Feeder (MTF-1).....K. Mizui (15)
- An Experiment on Separation of Differently Shaped Particles
on an Inclined Rotating DiskK. Shinohara ... (21)
E. Matsuoka
- Distribution of Air Pressure and Bulk Density during
Flow of Solids in a Plane HopperT. Takeshita ... (27)
H. Watanabe
K. Atsumi

【表 紙】 建設中の細川粉体工学研究所 技術開発センター (詳細は153頁参照)



細川 益男*
Masuo Hosokawa

粉体技術と国際水平展開

世界の粉体工学（工業）の現状についての特集号粉砕誌 No. 30が発刊されることになりましたが、「粉砕」誌30年の歴史を振り返ってまことに喜ばしく、また創刊以来の当事者として感慨深いものがあります。

近時、世界経済の中で日本は重要な地位を占め、21世紀にかけて国際国家日本は多くの課題を抱えています。その中でも85年度も500億ドルを超す対米経常収支の黒字が示す不均衡拡大の問題は、その解決のため、日本として今後とも、より具体的な対策が要請されてくるものと思われまふ。

自由貿易体制の維持を前提として、日本はその持てる技術力を活用して、世界経済の活性化に貢献していかなければ停滞する欧米経済と保護主義的風潮の中で、世界経済は、停滞と不均衡が一層拡大する恐れがあります。こういった環境の中で、国際的視点に立った行動というもの、日本、或いは日本人全体にとって大切なことになってくるものと思われまふ。その中で、輸出主導の産業構造を脱却して、国際的水平展開、水平分業ということが強く望まれています。

国際水平分業、或いは海外直接投資を拡大していくためにも、日本はより一層新しい技術革新分野を開拓していかなければなりません。

私は「粉砕」誌発刊25周年記念号の巻頭に「粉体技術

*ホソカワミクロン株式会社
粉砕川粉体工学研究所
(〒573 枚方市招提田近1-9)
Tel (0720) 55-2221

揺籃の時代は終わった」という一文を記しました。それは、粉碎誌創刊の昭和32年以来、四分の一世紀の間「粉碎」誌を通して粉体技術、粉体工学の芽が育つようすを見続けてきた実感として、今や揺籃の時代を越えて成長の時代に入ったとの一文を綴りました。その頃から粉体工学、粉体技術は世に言う、先端技術ハイテクノロジーの領域と不可分の関係の中に接点を保ちつつ、その発展のために何らかの役割を果たしてきました。そして私が申しましたように、粉体技術そのものが、一つの先端技術の領域を開き始めてまいりました。それは日本のみならず、世界共通の歩調となりつつあります。本号には、その世界の粉体工学の趨勢を皆さんに御理解いただくため「世界の粉体工学」の特集を企画いたしました次第であります。

さて、日本が今、厳しい貿易摩擦の非難の中にあって、その適切な対応が求められている中で、先に述べました国際的水平展開というものは、その最も重要なテーマであると思います。輸入を増やせとか、内需拡大と申しても、所詮それは日本が世界をリードし得る秀れた技術力を持っていることが前提であります。日本は適切な国際的ふれあいの中で始めて生存を許される、資源も、食糧もない国です。技術で立たなければならぬ国であるが故に輸出偏重に傾いたのが過去の歴史でありましょうが、徳川鎖国300年の後の急速な近代化の中で、止むを得ない現象であったかも知れませんが、今や、日本は、国際化揺籃の時代は終わった、ということをご自ら認識しなければなりません。正に水平展開の時代、それは世界はみんなのもの、みんなは世界の中に生きている、との認識だと思えます。日本は世界と協力して、それぞれの特徴、持ち味、伝統を生かした分業の中から、新しい先端技術を生み出し、世界経済に活性を与え、相互に繁栄する道を求めていかなばなりません。

私は、粉体技術、粉体工学というものが、まだまだこれからの学問であり、技術であるとともに、開花の前の蕾のように若々しい生命のエネルギーを感じるが故に、21世紀にかけての先端技術として、世界に水平展開し、新しい日本の技術展開の一つの源泉になってもらいたいと切望するものであります。

我々の細川粉体工学研究所は此の度、世界一の規模と内容を誇る新しい研究所、粉体技術センターを枚方の地に竣工させる運びとなり、今後とも、みなさんのお役に立ちうる体制を整えてまいりました。そしてまた、ホソカワミクロン株式会社の創立70周年記念の事業に併せて、その設備と新しい技術を広く御披露することになりました。

一方また、この機会に併せて、本年4月に我々ホソカワグループの世界各国から、日、米、加、豪、英、独、蘭、シンガポールの8カ国の技術者、研究者を集めて、国際研究開発会議を開催いたします。これは日本の国際水平展開とともに、育ちゆく粉体工業、粉体技術の国際水平分業を進める一つの大きな試みと考えます。そしてホソカワミクロングループ会社はみなさん方の一層の御指導、御後援を得て、粉体技術をもって、日本の国際化揺籃の時代から足を踏み出し、貿易摩擦とか、為替相場の変動等を越えて国際的水平展開と水平分業を進め、21世紀にかけての新しい国際化時代を築いていきたいと考えるものであります。

粉碎誌30号発刊にあたり、21世紀へ向けての、私なりの所感を述べさせていただきます次第、みなさん方の御理解を得られれば、何よりの幸いと存じます。粉体技術、粉体工学に携わるみなさん方の益々の御健闘を祈って止みません。

微粉碎された種々の Si_3N_4 粉体の特性

Characteristics of Various Si_3N_4 Powders Modified by - Comminution Grinding

菅野 善則*
Yoshinori Kanno

Abstract

The characteristics of various Si_3N_4 powders modified by grinding were investigated and the results were obtained as follows:

- (1) The α -type Si_3N_4 which is stable in the lower temperature region has a large Rittinger's number than the β -type one which has a stable structure in the higher temperature. These Si_3N_4 powders can be finely ground down to $0.01\mu\text{m}$ in the specific surface area diameter.
- (2) The increase of specific surface area and lattice strain, and the fragmentation of crystallites were remarkably affected by the physico-chemical properties of the original powders.
- (3) The crystal compound having a short interatomic distance is liable to generate the large residual strain.
- (4) The surface energy of the ground powders increased remarkably.

著者摘録

Si_3N_4 粉体を例として、粉碎が粉体特性にもたらす効果を追求し、以下のことが明らかになった。

- (1) 低温安定型の α の方が高温安定型の β より Rittinger 数は大きく、比表面積径 $0.01\mu\text{m}$ 領域まで微粉碎可能であり、この領域まで粉碎限界は出現しない。
- (2) オリジナルの状態で保有する結晶の物理化学的特性が比表面積の増加曲線に大きく反映し、同時に格子歪みの増大や結晶子径の微細化にも影響を与える。
- (3) 格子間の原子の充填密度が高く、原子間距離の短い結晶構造の化合物ほど歪みが残留しやすい。
- (4) 粉碎により粉体の表面活性は著しく増大する。

1. 結 言

近年、材料開発が各方面で活発に行われている。その中の一分野であるファインセラミックスにおいて、原料粉体の調製技術が最終製品である焼結体の性能を左右する大きな要因になっていることは自明の理である。かくして原料粉体に対する関心が高まり、活性粉体の調製や活性（易焼結性）の原因の解明が重要な研究課題となっ

てきた。また、活性粉体の特性を焼結性との関連においてキャラクタライズすることができれば、高性能の活性粉体を製造することにより、一層優れた焼結体を合理的に製造することが可能になる。

一般に焼結原料としては①微細粒子で狭い粒径分布をもつこと、②比較的均一な球状粒子であること、③凝集粒子が少ないこと、が望まれている。そこで以上の条件を満足する手段として粉碎による処理プロセスが挙げられる。さらにまた粉碎操作は上記の①、②、③の条件を満足する以外に粉体をメカケミカルに活性化し、焼結の駆動力を助長させ、上記の①に関連して生ずる焼結のた

* 工業技術院名古屋工業技術試験所
(〒462 名古屋市北区平手町1-1)
Tel. (052) 911-2111 (代)

めの物質移動距離の短縮によって焼結速度が増大することと考えられる。

すなわち、反応に関与する固体の活性化状態は、反応の機構や反応速度に影響するが、それがまた同時に焼結性に対しても何らかの影響をもっていると考えられる。特に粉碎処理による場合、格子欠陥、比表面積、格子不整（格子歪み、格子かく乱）などが増大し、系の自由エネルギーが増大すると期待される。この自由エネルギーの増大はとりもおさず焼結の駆動力となる過剰エネルギーの増大に結びつき、易焼結性を示すことが暗示される。

しかしながら粉碎による微粉体製造の場合、俗に Building-up process と称されるイオン、原子から核生成と成長の2つの過程によって粒子をつくる方法と比較すると不純物が混入しやすいという決定的な弱点がある。そこで本研究では、この不純物の混入に最大限の注意を払い、窒化ケイ素 (Si_3N_4) セラミック製のボールとポットを用い、酸素の混入を防ぐために精製メタノールを媒液として Si_3N_4 粉体の振動ボールミル粉碎を行った。

2. 実験方法

2.1 試料および粉碎方法

使用した Si_3N_4 粉体は SiCl_4 (四塩化ケイ素) 窒化法、すなわち液相法によりシリコンイミドを合成したのち、イミドの熱分解を経て調製された $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ (α 率89%、非晶質相なし) および $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ (β 率100%、非晶質相なし)、さらに金属シリコンの窒化法、およびシリカ還元法により製造した $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ (共に α 率97%、非晶質相あり) である。各試料を 400°C で脱気処理したのち、10g 秤量し、窒素雰囲気下で振動ボールミルのポットに充填し、市販のものを蒸留したのち、さらにモレキュラーシーブ 4A で脱水処理した精製メタノール 200ml を媒液として、20, 50, 120 時間、それぞれ振動ボール粉碎処理 (振動数 29.5s^{-1} , 振幅 3mm) した。

2.2 粉体の物性測定

(1) 粉碎処理された試料はポットより取り出し、室温下で真空乾燥し、窒素中に保存した。粉体の物性としては比表面積および格子歪みを算出した。比表面積の測定は 200 あるいは 230°C で脱気処理したのち、液体窒素温度における窒素ガス吸着による BET 法によった。また格子歪みの算出は粉末 X 線回折パターンの半価幅の広がりから Hall の式を適用して行い、格子歪みおよび結晶子径の微細化を区別した。なお、粉末 X 線回

折はシリコンを標準として、 $\text{Cu-K}\alpha$ 線により加速電圧 40kV 、加速電流 20mA 、ゴニオ走査速度 0.25 ($^\circ/\text{min}$) で行った。

(2) 双子型恒温壁熱量計 (東京理工製 TIC-22I) を用いて、 25°C における Si_3N_4 粉体のトルエンへの浸漬熱を測定した。その測定法は以下のものである。粉碎処理された Si_3N_4 とメタノール媒液よりなるスラリー状の混合溶液をガラスアンプル中に移し、 120°C 、 10^{-5} Torr で3時間脱気処理したのち、アンプルを封じ熱量計にセットした。系が熱平衡に達するまで一晩放置したのち、アンプルを破壊して浸漬熱を求めた。なお、トルエンの脱水にはモレキュラーシーブ 4A を用いた。ここでスラリー状の混合溶液を直接真空脱気処理したのは非常に不安定な表面層が酸素や水分子によって汚染されるのをさけるためである。また浸漬熱の算出に必要な試料重量は測定前の総量より測定後のガラスの量を差し引いて求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 Si_3N_4 の結晶形と比表面積の増加量

イミドの熱分解および後処理の工程で調製された $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ 、 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ を用いて、結晶形の違いによる比表面積の増加傾向の違いを Fig. 1 に示す。Fig. 1 の $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ と $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ は同一調製法において結晶化温度のみが異なっているものであるが、一般に認められているように、結晶形によって比表面積の増加傾向は著しく異なってくるのがわかる。これは前報¹⁾において考察したように、原子間距離の長い α 型の方が破壊されやすかったことを意味している。また両試料とも粉碎時間の増大につれて比較的単調に比表面積が増加し、同一機構で新生面の生成が起こっていると考えられる。

一方、120 時間処理した試料の比表面積は、球状粒子と仮定した場合、 $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ において $0.013\mu\text{m}$ 、 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ において $0.019\mu\text{m}$ と算出された。ただし、キシレンを媒液としたピクノメーター法で得られた粉体密度は α 型、 β 型 それぞれ、 3.12 、 3.20 (g/cm^3) である。したがって、振動ボールミル粉碎によりサブミクロンの超微粒子が生成し、breaking-down process によっても超微粒子の製造が可能であることが判明した。

Fig. 1 では比表面積 $0.01\mu\text{m}$ の領域まで粉碎限界が現われていない。一般に粉碎操作にはその平衡状態が存在することが知られている。すなわち、いったん微細化された粉体の表面相互間に働く引力や、機械的な圧力・摩擦熱などによる粒子の凝着 (再凝集しそれが固着する状態)、さらには粒子間のすべりや粒子自体の弾性変

形、粒子表面の格子欠陥・結晶粒界の不整の発生によって応力が緩和される、と考えられている。しかし Fig. 1 より判断するに限り、共有結合性の強い Si_3N_4 においては、拡散係数が小さく、再結晶化の活性化エネルギーが大きいと容易に凝着さらには再結晶化が起きないのではないかと考えられる。したがって、難焼結性化合物の代表とされる Si_3N_4 においては、微細化粉碎により、超微粒子領域近傍まで細分化される可能性がある。

3.2 種々の $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ の比表面積増加量

同じ α 型 Si_3N_4 でも合成経路によって粉碎され方が異なってくると考えられる。そこで初期の粉体特性が著しく異なっている二種の α 型、すなわちシリカ還元法により製造した試料（以下、Toshiba と記す）と金属シリコンの窒化法により製造した試料（以下、Starck と記す）を選び、粉碎による比表面積の増加傾向の違いを調べた。その結果を Fig. 2 に示す。なお Fig. 2 には、イミドの熱分解法で合成された Fig. 1 の $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ の例（以下、Ube と記す）も点線で併記した。

その結果、Starck 粉体の比表面積はほぼ粉碎時間に比例して直線的に増加する傾向を示した。一方、Toshiba 粉体では Rittinger 数は Starck 粉体よりも大きく、粉碎の初期段階において、Rittinger 数がわずかに大きくなり、粉碎後期には Starck 粉体と同様な比表面積の増加傾向を示した。

Fig. 2 の特徴的な比表面積の増加の様子について考察する。未処理の Starck および Toshiba 粉体の透過

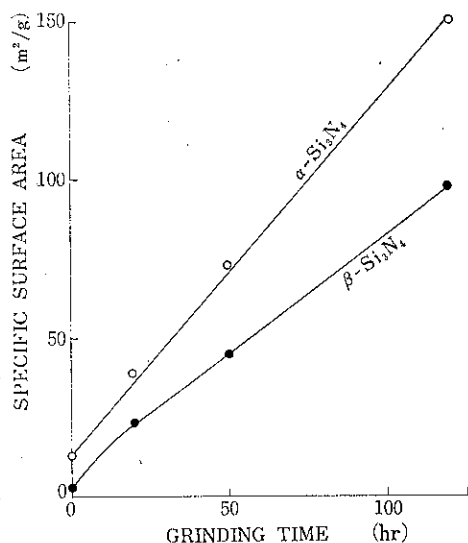


Fig. 1 Variation of specific surface area of α - and β - Si_3N_4 powders with grinding time

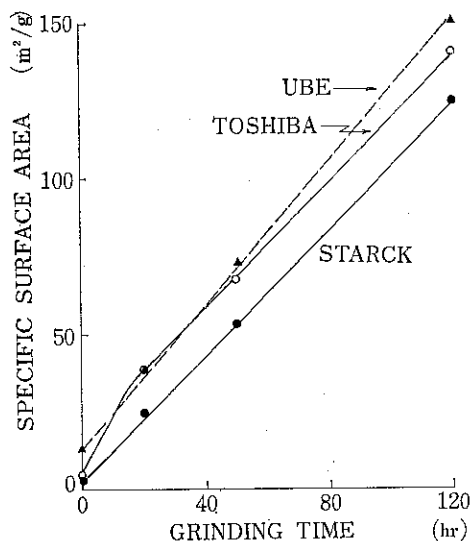


Fig. 2 Variation of specific surface area of various $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ powders with grinding time

電顕観察より得られた写真を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、Toshiba 粉体は微細な 1 次球状粒子が集合して、 $1\mu\text{m}$ 近くの大きな 2 次球状粒子を形成しているものが多数みられたが、Starck 粉体では結晶性が完全な針状粒子が多数みられ、他に不規則形状の単一粒子がみられた。したがって Fig. 2 に示した粉碎初期における Toshiba 粉体の一時的な Rittinger 数の増大は大きな凝集 2 次粒子が解砕されて、多数の 1 次粒子が生成したことによって生じた比表面積の一時的な増大の結果と考えられる。また、キシレンを媒液としたピクノメーター法で得られた粉体真密度は Starck 粉体で $3.14\text{g}/\text{cm}^3$ 、Toshiba 粉体で $3.10\text{g}/\text{cm}^3$ である。したがって Toshiba 粉体の場合、真密度が小さいことより結晶格子欠陥等の応力集中源がより多く存在し、粉碎初期において一時的に粉碎効率が上がった可能性がある。よって Fig. 2 より以下の事項が推論される。すなわち、結晶内

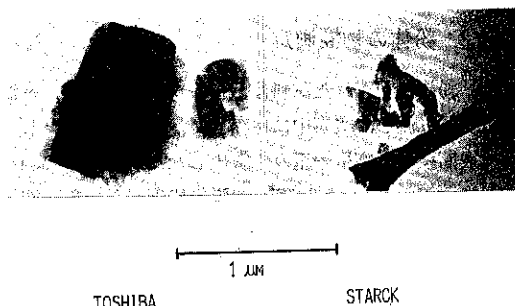


Fig. 3 TEM microphotographs

に存在する不安定性は粉砕処理の初期段階においてのみ影響を与え、粉砕後期においては新生面の発生が $[\text{SiN}_4]$ 四面体の原子間の切断により単調に進行し、粉砕時間の増大と共に粉体の微細化が単純に進行するのではないかと考えられる。

次に3種の $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ について粉砕後期（ここでは20時間以降に限定）における比表面積の増加傾向に関して議論を展開する。すなわち、Fig. 3より粉砕処理20時間以上ではUbe粉体においてRittinger数が大きく、ToshibaおよびStarck粉体はほぼ同じと考えられる。この差が何に帰因するかについて考えてみる。

蒸留精製した無水メタノール溶液による非晶質、 $\alpha\text{-}\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ 粉体の粉砕処理において、比表面積の増加率の序列は $\alpha\text{-}\beta\text{-}$ 非晶質 Si_3N_4 であることを前報¹で明らかにした。また $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ の比表面積の増加率は非晶質のその2倍強であった。このことはとりもなおさず、同じ $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ でもその結晶相さらには非晶質相の含有率によって粉砕能が異なってくることを意味している。2.1の実験の項で記したように、Ube粉体は非晶質相を含有せず、ToshibaとStarck粉体は非晶質相を含有している。したがってFig. 3の3種の $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ の20時間以上処理における比表面積の増加量の差は非晶質相の含有率に関する情報を反映し、逆に単純に $[\text{SiN}_4]$ 四面体の結合の切断によって比表面積が増加する領域では粉砕操作により従来困難であった固体中の非晶質相の定量に関する知見を得ることができる可能性を秘めている。実際 Si_3N_4 の場合も非晶質相の定量に関する知見は重要であり、焼結体の緻密化に寄与する粉体パラメータを完全に把握するためにも必要になってくる因子である。

3.3 粉砕による $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ の格子歪みと結晶子径の変化

微粉砕による機械的エネルギーにより粉体内部に誘起されたメカノケミカル効果を粉末X線回折法により調べた。StarckおよびToshiba粉体について粉砕時間による結晶子径の微細化および結晶格子歪みの増大をTable 1に示した。

Table 1よりStarck粉体の場合、未処理試料は格子歪みが存在せず、粉砕処理により格子歪みが発生する。さらに処理時間が増加するにつれて、徐々に格子歪みが増大し、同時に結晶子径の微細化が進行した。また、振動ボールミル微粉砕による活性化は初期に結晶子径の微細化が優先的に起こり、ある程度微細化が進行すると格子歪みの増大が進行しやすくなると考えられる。

一方、Toshiba粉体の場合、未処理試料において、

Table 1 Crystallite size and lattice strain of ground Starck and Toshiba powders

grinding time[h]	Starck		Toshiba	
	crystallite size[nm]	lattice strain[—]	crystallite size[nm]	lattice strain[—]
0	86	0	146	1.2×10^{-3}
20	64	8.7×10^{-5}	102	1.2×10^{-3}
50	59	4.1×10^{-4}	74	1.2×10^{-3}
120	53	1.2×10^{-3}	53	1.2×10^{-3}

潜在的に大きな格子歪みが存在し、粉砕時間が増大しても格子歪みの増大はみられず、結晶子径の微細化のみが顕著に現われた。さらに120時間処理した場合、両試料共にほぼ同じ格子歪み、結晶子径を示し、微粉砕による投入エネルギーによりほぼ同等な活性化処理が行われたと考えられる。さらに、このことは微粉砕による格子歪みの増大はある値に漸近し、微粉砕によって新生面は引き続き生成されるが、粉体内部に蓄えられた格子歪みはある値以上には増加しないことを意味している。したがって、ある限界値以上に格子の正規位置よりずれた場合には、徐々に非晶質化して行くものと推察される。

3.4 結晶形による活性化の相違

$\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ 、 $\beta\text{-Si}_3\text{N}_4$ について粉砕によるメカノケミカル活性化処理がいかに粉体特性を変化させるかについて調べた。Fig. 4は粉末X線回折パターンの解析から算出した格子歪みおよび結晶子径の変化を粉砕時間に対し

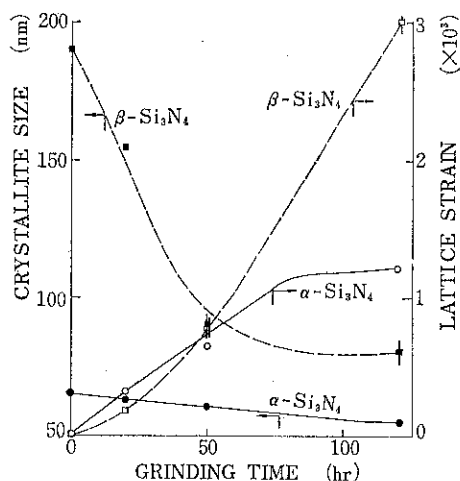


Fig. 4 Variation of crystallite size and lattice strain of α - and β - Si_3N_4 powders with grinding time

てプロットしたものである。

Fig. 4より α - Si_3N_4 は粉碎による格子歪みの増大が小幅であり、また結晶子径の微細化も小さい。一方、 β - Si_3N_4 は粉碎による格子歪みの増大も大きく、それと同時に結晶子径の微細化もかなり進行した。 α 型と β 型における格子歪み増大量の差は結晶構造の差により生じたものと考えられる。すなわち、高温安定型の β - Si_3N_4 は原子が密な充填構造をとることから、単一破碎ではなく繰返し破碎を受けることにより硬直な構造内に発生した歪みが残留しやすく、結果的に格子不整の増大につながったと推察される。一方、比較的すきまのある充填構造をなす低温安定型の α - Si_3N_4 型では残留歪みの解消が少なからず生じやすく、結果的に残留歪みの小幅な増加にとどまったと想像される。ただし、格子間の原子の充填密度と構造の硬直性および歪みの残留の難易度との間には一義的な関係は存在しないと考えられるが、ここでは1つの定性的な解釈法として推論した。

なお、ここで推論した原子の充填密度と歪みの残留の難易度との関係については、もう1つの事実が得られている。それは SiC 、 Si_3N_4 、 SiO_2 セラミック粉体の振動ボールミル粉碎による実験で、格子内残留歪みは SiC が最大であり、以下 Si_3N_4 となり、 SiO_2 の場合、ごく微少の歪みにとどまっていた²⁾。したがって原子の充填密度の高い、原子間距離の短い結晶構造の化合物ほど粉碎による格子歪みの増大が大きくなる傾向があると考えられる。

一般に、焼結用原料粉体が微細になればなるほど焼結過程における粉体表面性状の果たす役割が大きくなることから、微粉碎によって微粒子化した粉体の表面エネルギーを知ることは重要である。しかも焼結の駆動力は表面エネルギーだと言われているので表面状態についての知見が必要と考えられる。そこで本項ではさらに浸漬熱測定から表面性質の検討をした。

微粉碎により活性化された Si_3N_4 粉体は微量水分子と反応してアンモニアが生成し、その結果、比表面積が著しく低下することが判明している¹⁾ので、本研究では浸漬液としてトルエンを用いた。 α - Si_3N_4 、 β - Si_3N_4 について、トルエンに対する浸漬熱の粉碎時間による変化を求め、Fig. 5に示す。その結果、粉碎処理により著しく表面の活性化が進行していることが判明した。また、未処理の粉体において α 型の方が β 型よりわずかながら表面エネルギーが高いと考えられる。一般的に Si_3N_4 の焼結においては β 型より焼結性が良く高 α 化を目ざした粉末調製が行われている。よって浸漬熱の測定結果はこの事実をうらづけている。

一方、Fig. 4, 5より、粉碎処理20時間では、 α -、 β - Si_3

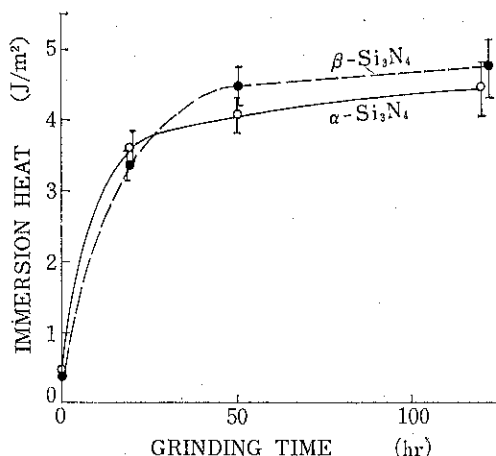


Fig. 5 Variation of immersion heat of α - and β - Si_3N_4 powders in toluene with grinding time

N_4 ともに格子歪みがまだ小さいにもかかわらず表面活性は著しく増加しており、このことは粉碎による活性化が表面層から起こっていることを示している。さらにFig. 5では粉碎処理50時間以上において β 型の方が α 型より表面活性が高くなる逆転現象がみられる。この結果の解釈に関する詳細は不明であるが、Fig. 4に示した格子歪みの変化と傾向的に一致し、長時間粉碎による β 型の表面活性の増大は格子歪みの著しい増大に帰因するのではないかと推察される。

なお、本研究で使用した熱量計は恒温壁型であり、短時間に終了する熱変化の測定には精密である。しかし、粉碎された試料の場合、測定に長時間を要し、発熱量の算出にはかなりの不確定性が入り込んでくることはさげられない。したがってFig. 5の浸漬熱はかなりの誤差を含むと考えられる。

4. 結 言

低温では熱力学的に分子ができるだけ集合した方が安定になる。粉碎による新生面の生成はこの安定化に反する仕事をすることを意味するので、その仕事分が表面に過剰エネルギーとして蓄えられることになる。この熱力学的過剰エネルギーは、自然の状態では表面積をできるだけ減少させようとする方向に張力が働き、その結果、焼結原料粉体の緻密化が促進されることになる。粉碎によるセラミックス原料粉体の活性化処理の意義はこの点にあり、粉体同士の接触サイト数の増加と合わせて、焼結体作製のプロセスとして重要と思われる。

本研究では Si_3N_4 粉体を例として、粉碎操作が粉体特性にもたらす効果を追求した。その結果、以下のことが明らかになった。

(1) 低温安定型の α - Si_3N_4 の方が高温安定型の β - Si_3N_4 よりも Rittinger 数は大きく、比表面積径 $0.01\mu\text{m}$ 領域まで微粉砕可能であり、さらにこの領域まで粉砕限界は出現しない。

(2) 同じ α 型でも Rittinger 数は異なり、そのオリジナルにおいて保有する結晶の物理化学的特性が比表面積の増加曲線に大きく反映され、それと同時に格子歪みの増大や結晶子径の微細化にも反映される。

(3) 微粉砕による活性化は主に初期に結晶子径の微細化を促進させ、さらに引き続いて格子歪みの増大を誘起し、その歪みの増大は化合物によってある限界が存在する可能性が指摘された。また、格子間の原子の充填密度が高く、原子間距離の短い結晶構造の化合物ほど歪みが

残留しやすい傾向がある。

(4) 粉砕により表面活性は著しく増大し、長時間粉砕では格子歪みの大きい β 型の方が、それが小さい α 型よりも高い表面活性を示した。

付 記 この研究は、科学技術庁振興調整費による補助を受けて行った。

謝 辞 助言をいただいた当所五部・桑原好孝主任研究官に謝意を表する。

引用文献

- 1) 管野善則；粉砕，(29)，4 (1985)
- 2) Y. Kanno；Powder Technology, 44, 93 (1985)

特許一言メモ

No. 68

国際出願 その(1)

——増えてきつつある国際出願——

PCT による特許出願制度ができてから7年になるが、この PCT の効果もあって、国際出願も増えてつつある。過去4年間にわが国において受理された国際出願は、下

指定国	アメリカ	西ドイツ	イギリス	フランス	合 計
1981年	401(件)	—	—	—	431(件)
1982年	444	432(件)	400(件)	341(件)	479
1983年	439	408	381	357	465
1984年	575	546	512	440	633

PCT (Patent Cooperation Treaty)：特許協力条約

表に示すとおりである。

なお、1985年4月現在で PCT 加盟国は39カ国となっている。

PCT の効果として、①日本語による特許庁への出願(但し、あとで出願指定国へ各国語の翻訳文提出を要す)、②方式の統一により出願先国毎の方式配慮が解消、③手続繰延べによる特許管理上の利点、④国際調査報告の利用により特許可能性の判断が得られる、⑤外国出願費用の節減、などがある。

(特 許 室)

ガス圧勾配を利用した粉体嵩密度の制御

The Use of Gas Pressure Gradients to Control Powder Packing Density

A. G. McLean*

菅沼 彰**
Akira Suganuma

松本 幹治***
Kanji Matsumoto

青木 隆一****
Ryuichi Aoki

Abstract

This paper outlines the use of gas pressure gradients to control powder packing density. In particular, the use of this technique will be illustrated by the variation in bulk density exhibited by a powder bed subjected to varying gas pressure differentials created by applying a vacuum to its base. It is proposed that the same compaction effect may be induced by applying positive gas pressure differentials across a bed of powder. The use of this technique to conveniently and rapidly measure the true packing density of a powder bed is discussed. It should be noted that this method of compaction is only applicable to fine powders which generate significant gas pressure gradients when gas flow is induced through them. The application of this powder compaction technique to the transportation and storage industries as well as to the chemical and pharmaceutical industries is also discussed.

Control of powder bed packing density is frequently required in industry. Further, during transportation and storage of powders, the maximization of powder packing density would lead to reduced unit costs and in some cases allow these powder operations. The characterization of powders also requires the attainment of high packing density for measurement of the true powder bed packing density. To achieve high packing densities various methods have been used to date which employ the use of tapping and vibration.

著者摘録

ガス圧勾配を利用した粉体嵩密度の制御，特に容器底部を真空にして粉体層内にガス圧勾配を形成した場合の嵩密度の変化について報告する。圧密効果は粉体層にかかる正の圧力差でさまる。この方法によって真の嵩密度を簡便迅速に測定できる。ただしこの圧密法は，ガスを透過させた時に大きな圧力勾配が発生する微粉体にも適用できる。この圧密法はまた，輸送・貯蔵業界，更には化学工業，製薬工業等で応用できる。

* Department of Mechanical Engineering,
University of Wollongong
(P. O. Box 1144 Northfields Avenue,
Wollongong, N. S. W. 2500 AUSTRALIA)

**東京大学工学部化学工学科
(〒113 東京都文京区本郷7-3-1)
Tel. (03) 812-2111 (代表)

***横浜国立大学工学部化学工学科
(〒240 横浜市保土谷区常盤台156)
Tel. (045) 335-1451

****東京水産大学食品工学科
(〒108 東京都港区港南4-5-7)
Tel. (03) 471-1251

工業界ではしばしば粉体充填密度制御が必要になる。更に、粉体の嵩密度を最大にすることは粉体の輸送・貯蔵コストの低減につながり、場合によっては、これによりはじめて粉体の操作が可能になる。粉体キャラクタリゼーションの面でも、粉体の真嵩密度測定のために高い嵩密度の実現が求められている。高い嵩密度を得るためにはこれまでタッピングや振動などを利用する方法が用いられてきた。

1. 緒言

よく知られているように、粉体層内ガス透過には流れの方向にそった粉体層内ガス圧力の勾配が伴う¹⁾。このガス圧勾配は、粉体層に作用する体積力をつくりだす。この体積力は、ガス流の方向に応じて、粉体層の嵩密度を増大または減少させようとする。特に粉体層が拘束されている底面に向うガス流は、常に嵩密度を増大させる。このようなガス流を形成させるためには、粉体層頂部に正のガス圧を加えるか、または層底部に真空圧を作用させればよい。この方法の実施結果を述べるに先立って、まず理論的解析を行う。

2. 理論的解析

2.1 粉体層内のガス透過

粉体層内のガス透過については多くの研究、特に Carman や Ergun の研究、Leva の成書¹⁾ などがあ。しかしここでは、標準的な機器で容易に測定できる粉体特性値を用い、粉体層を連続体とみなしてガス流とそれに伴う圧密作用を解析することにした。

粉体層内に厚さ dz の粉体層円板を想定して力の釣合を考える (Fig. 1)。

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{K\sigma_z \tan \phi}{R} = \rho_z g - dp/dz \quad (1)$$

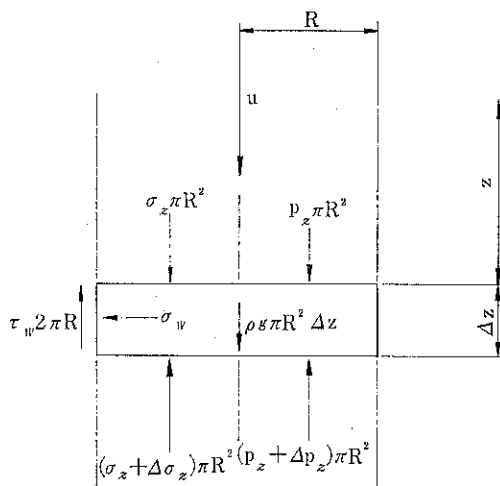


Fig. 1 Vertical Equilibrium of a Layer with Superimposed Powder Gas Flow

ただしここに、 $\tau_w = K\sigma_z \tan \phi$ である。上式を変形すると(2)式を得る。

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{K\sigma_z \tan \phi}{R} = \rho_z \left[g - \frac{1}{\rho_z} \frac{dp}{dz} \right] \quad (2)$$

(2) 式を吟味すると、ガス圧勾配の作用を受ける粉体層は、大きさが $g - (1/\rho_z)(dp/dz)$ の“有効重力”を受けて圧密されることがわかる。ここで、正方向のガス流は負の圧力勾配と組になっていることに注意しなければならない。

ガス流速と圧力勾配との関係に d'Arcy の方則を適用すれば、

$$u_z = -c_z \frac{dp}{dz} \quad (3)$$

(3) 式を用いて(2)式の dp/dz を消去すると(4)式を得る。

$$\frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{K\sigma_z \tan \phi}{R} = \rho_z \left[g + \frac{u_z}{\rho_z c_z} \right] \quad (4)$$

粉体の嵩密度 ρ_z 及び(3)式右辺の透過度 c_z と、圧密応力 σ_z との間には次のような関係がある²⁾。

$$\rho_z = \rho_\theta \left[\frac{\sigma_z}{\sigma_\theta} \right]^b \quad (5)$$

$$c_z = c_\theta \left[\frac{\sigma_z}{\sigma_\theta} \right]^a \quad (6)$$

(5)式、(6)式における定数 σ_θ の値は、定数 ρ_θ と定数 c_θ の値を σ_θ に対応して正しく選びさえすれば、任意の値でよい。(5)式と(6)式により(7)式を得る。

$$\rho_z c_z = \rho_\theta c_\theta \left[\frac{\sigma_z}{\sigma_\theta} \right]^{a-b} \quad (7)$$

代表的な粉体では、 $a \sim 10b$ 、 $b \sim 0.01$ である²⁾ から、(7)式右辺の $a-b$ は 0.1 程度の小さな値になり、第一近似としては(4)式中の $\rho_z c_z$ にかえて定数 $\rho_\theta c_\theta$ を用いることができる。この定数 $\rho_\theta c_\theta$ は、粉体を特定すると値が定まり、その粉体をガスが透過する際の圧密効果はこの値に大きく影響される。

2.2 圧密作用の大きさの程度

ここで、(2)式と(4)式の右辺中に [] で括った部分に対応する“有効重力”の相対的な大きさを吟味してみる。先ず第一のケースとして、(2)式において嵩密度 1000 kgm^{-3} 、厚さ 5 m の粉体層に 600 mmHg の差圧がかかる場合を考えると、“有効重力”は重力の約2.5倍になることがわかる。

次に第二のケースとして、(4)式の表現で考えてみる。粉体層の $\rho_\theta = 1500 \text{ kgm}^{-3}$ 、 $c_\theta = 5.05 \times 10^{-9} \text{ m}^4 \text{ N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、

粉体層を透過するガス流速を 0.001 ms^{-1} とするならば、“有効重力”は重力の約14倍になる。

以上二つの典型的な例からわかるように、ガス圧勾配とそれに伴うガスの流れは、便利な粉体の圧密手段として利用できる。圧密効果については次章に述べる。

3. 実験

Fig. 2 に示す装置を用い、粉体層の底部に真空圧を作用させて発生させたガス圧勾配を利用して、種々の粉体を圧密した。粉体層底部に作用させる真空圧の程度による粉体層嵩密度変化の代表例を、Fig. 3 と Fig. 4 に示す。これらの図はいずれも、粉碎した燐鉱石 (200# 通過分80%, $\rho_s = 2955 \text{ kgm}^{-3}$) の嵩密度を、粉体層にガス圧勾配を作用させることによって約20%増大させるこ

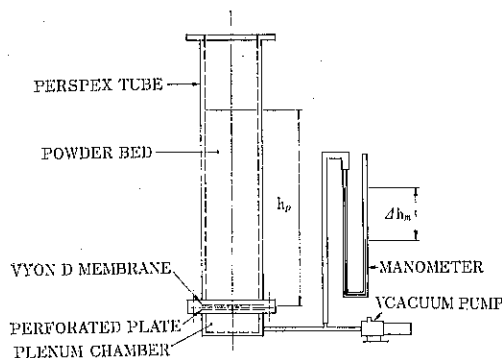


Fig. 2 Schematic of Vacuum Compaction Apparatus

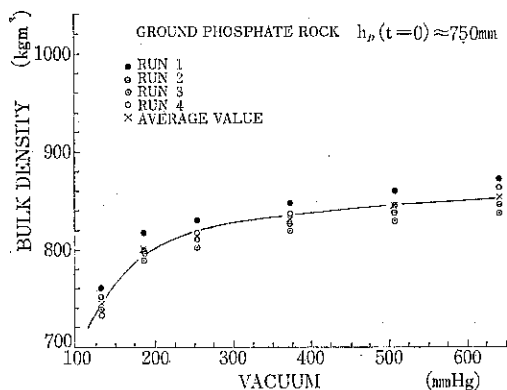


Fig. 3 Observed Variation in Packing Density due to Varying Vacuum Gas Pressure Gradients Across the Bed (Ground Phosphate Rock, 80% - 200 mesh, $\rho_s = 2955 \text{ kgm}^{-3}$)

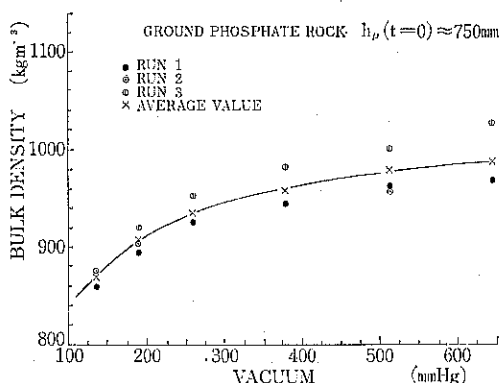


Fig. 4 Observed Variation in Packing Density due to Combined Effects of Gas Pressure Gradients and Vibration (Ground Phosphate Rock, 80% - 200 mesh, $\rho_s = 2955 \text{ kgm}^{-3}$)

とが可能であることを示している。Fig. 3 は、粉体層にガス圧勾配のみを作用させた結果である。これに対して Fig. 4 は、粉体層に振動とガス圧勾配とを作用させた結果である。二つの図を比較してみると、振動を受けた粉体層の方が嵩密度は高い。実験に使用した粉体の場合、初期層高 750 mm で、振動を受けた粉体層の嵩密度は約15%高い。

ここでは簡潔のために記述を省略したが、以上の傾向は、フライアッシュ、セメント、粉炭、微粉炭などを含む他の粉体でも同様である。これらの試験結果については直接、第一著者に照会してほしい。

4. 粉体層真嵩密度の測定

粉体層の充填密度は、投入方法、放置時間、加える振動やタッピングの程度などに依存することが知られている。そのため、ゆるみ嵩密度、最少流動化嵩密度、振動嵩密度、タッピング嵩密度など、種々の嵩密度の報告が必要になる。不幸なことにこれらの嵩密度の測定値の多くは、非常に微妙に測定者、測定方法、測定器具などに依存する。しかしながら粉体層を代表する一つの充填密度は、高い圧密作用を受けた時に粉体層が示す“真の嵩密度”であろう。したがってこのような充填密度を、簡便に、正確に、高い再現性をもって測定する方法が必要である。このような目的にそった測定方法の例としては、タッピングの衝撃によって“真嵩密度”の測定に必要な圧密を行う方法を挙げることができる³⁾。この文献では、粉体層圧密のために必要なタッピングの衝撃力についての定量的な解析もなされている。

ガス圧勾配と振動やタッピングとを組合わせることにより、粉体の“真嵩密度”を簡便かつ迅速に測定することができる。この方法で測定される“真嵩密度”の値は、以下に列挙するような各種のパラメータに依存し、したがって粉体層に対するこれらのパラメータの影響を解析することができると期待される。

- ・ガス圧勾配の符号
- ・ガス圧勾配を作用させる速度
- ・ガスの組成
- ・ガスの湿度
- ・粉体層の含水率
- ・ガス及び粉体層の温度
- ・粉体充填の方法
- ・容器の壁面摩擦特性及び形状
- ・その他

さらにまた、圧密過程で粉体層が受ける振動やタッピングの強度と到達最大嵩密度並びに到達速度の関係も観測できるであろう。タッピングによる衝撃力の増大は一般に、最終到達嵩密度を増大させる³⁾。本報では、これら数多くのパラメータの影響に関するこれ以上の具体的な記述は行わないが、著者等の主要な関心の一つは、将来これらのパラメータの影響を明らかにすることである。

次に典型的な嵩密度測定装置内でガス圧勾配によって形成される“有効重力”の大きさの程度を検討する。粉体層高は 200 mm、通常の“真嵩密度”は 1500 kgm⁻³とみてよいであろう。粉体層に 700 mmHg の真空圧を作用させたとすると“有効重力”は約 7 G になり、1000 kPa の圧力差 (正) を作用させた場合には約 70 G の“有効重力”が発生する。後者はタッピングの衝撃力³⁾に匹敵する。更にガス圧勾配と振動とを組合わせた圧密法は、タッピング法に対して、ガス圧勾配の圧密作用が時間的に連続的であるという大きな利点を有している。

5. 応 用

ガス圧勾配を利用した粉体の嵩密度制御技術の応用としては数多くのものが考えられるが、以下はその例である。

- (1) 第 4 章で述べた、“真嵩密度”の測定
- (2) 粉体の輸送に際して、粉体嵩体積を減少させる。より小さく、より軽い容器の使用は粉体の輸送コストの低減をもたらす。更に、嵩体積の減少により、積出作業や輸送中の発塵も抑制されるであろう。
- (3) 輸送中や貯蔵中に空気または空気中の水分に触れると、変質したり酸化したり、時には危険になるような粉体がある。粉体嵩密度を増大させれば、パージ用のガス量を削減することができる。

- (4) 化学工業や薬品工業においては、粉体嵩密度の制御がプロセスに好影響をもたらす。

6. 結 言

この論文では、ガス圧勾配を利用した微粉体嵩密度の制御について解析した。ここに報告した技術は、粉体の“真嵩密度”測定、粉体の輸送や貯蔵、化学工業や薬品工業における各種の応用などをはじめとして、きわめて幅広い利用範囲を有する。

7. 謝 辞

この論文に示した実験データは Wollongkong 大学において、当時 Illawarra Mutual Building Society の奨学生として在学中であった学生、Mr. G. Carter によって得られたものである。同氏の労に深く謝意を表したい。またこの論文は、A. G. McLean が名古屋大学工学部化学工学科、神保元二教授のもとで研究中にとりまとめたものである。*

*菅沼脚注

A. G. McLean が東京大学工学部化学工学科青木隆一教授 (当時) のもとに滞在中に、菅沼らの研究³⁾に興味を持ち、相互の情報交換と討論をした。それがこの研究を日本の学会・業界に発表する契機になった。論文は先ず A. G. McLean によって英文で起草され、菅沼がこれを日本語の論文に書換えた。“書換え”にあたっては、第一著者の意向をできるだけ尊重して忠実に“翻訳”することを原則にした。しかし、タッピング³⁾に関する解釈や用語法について、著者らの間にいくつか見解の相違が残っていたので、翻訳者としてではなく共著者の立場で微修正を加えた部分もある。

使 用 記 号

<i>a</i>	(6) 式の実験定数	[—]
<i>b</i>	(5) 式の実験定数	[—]
<i>c</i>	d'Arcy の法則, (3)式における透過係数	[m ⁴ N ⁻¹ s ⁻¹]
<i>g</i>	重力の加速度	[ms ⁻²]
<i>h_p</i>	粉体層の厚さ (Fig. 2)	[m]
<i>K</i>	粉体圧係数	[—]
<i>p</i>	ガスの圧力	[Pa]
<i>R</i>	シリンダーの動水半径	[m]
<i>u</i>	ガスの空塔速度	[ms ⁻¹]
<i>z</i>	粉体層深さ方向の座標 (Fig. 1)	[m]
<i>φ</i>	壁面摩擦角	[rad]

ρ	粉体の嵩密度	[kgm^{-3}]
σ	粉体層圧密の程度を示す直応力	[Pa]
τ_w	壁面せん断応力	[Pa]
Δh_m	水銀マンオメーター差圧 (Fig. 2)	[mmHg]

添字

e 実験定数

z $z=z$ における値

引用文献

- 1) Leva, M.: "Fluidization", McGraw-Hill Book Co., New York, (1959)
- 2) Arnold, P. C. et al: "Bulk Solids: Storage, Flow and Handling", TUNRA Ltd., The University of Newcastle, Newcastle, 2nd Edn. (1980)
- 3) Suganuma, A. et al: "Bulk Density Measurement by a New Tapping System", KONA/Powder Science and Technology in Japan, No. 1, 14-18 (1983)

特許一言メモ

No. 69

国際出願 その(2)

——米国特許，外国からの取得は日本が一番——

米国で昨年1年間に認可された特許権は72,651件，うち約4割の30,488件が外国からの申請であった。内訳では，日本が11,648件と最も多くてその3分の1以上を占め（全体では約14%），次いで西独の6,403件，英国の2,423件，フランスの2,283件，カナダの1,323件，スイ

スの1,219件となっている。このほか，共産圏の国からもソ連の216件，中国の118件，東ドイツの74件，ブルガリアの22件，キューバの1件などが米国特許を取得している。（朝日新聞60.4.11より）

（特許室）

特許一言メモ

No. 70

外国出願 その(3)

——韓国への出願も日本が一番——

工業発展のめざましい韓国では工業所有権も毎年15%の増加を続けており，1984年度韓国での総出願件数は四法（特許・実用新案・意匠・商標）合わせて64,032件。これは，特許・実用新案では世界第7位，商標は同6位の実績である。

韓国の工業所有権の総登録件数は1984年で218,240件（特許18,287件，実用新案27,590件，意匠56,620件，商

標115,743件）となった。このうち外国人の登録件数は29.9%，国別では日本の25,088件，米国の19,250件，西独の5,675件の順で，日本からの出願が全登録件数の11.5%，外国人登録件数の38.4%と実に4割近くを占め，日本企業の韓国市場重視の姿勢がうかがえる。（日刊工業60.7.16より）

（特許室）

技術報告

ホソカワミクロン

ミニテーブルフィーダ (MTF-1) の特性

Characteristics of Hosokawa Micron Mini-table Feeder (MTF-1)

水井 克也*

Katsuya Mizui

1. はしがき

水道の水を出す時、蛇口のパルプを開ければ水が出て閉めれば水が止まる。大きく開ければ水量が多く、小さくすれば少量になる。又、その水量も殆ど一定で途中で調節するようなこともない。この液体では日常当り前のことが粉体の場合には当てはまらない。砂時計の砂のように均一の丸みをもった粒子なら供給にはさ程問題はないが、平均粒径が約 $100\mu\text{m}$ 以下の微粉を定量供給する場合問題になることが多い。特に比重の軽い粉体や付着性の強い粉体を扱う時は、架橋現象やフラッシングなどによって定量供給はおろか連続供給も困難となることがある。この他、凝集性の強い粉体、僅かに水分を含んだ粉体、そして形状が突起状、繊維状でひっかり易い粉体なども取扱いにくい粉体である。又、供給自体は特に問題はなくとも、スクリーフィーダ等で供給すると粒子が破壊され問題となることもある。

ここでは、このような平均粒径が約 $100\mu\text{m}$ 以下で、他の供給機では取り扱いが難しい粉体をスムーズに、しかも定量性良く、そして粒子を壊さずに供給するために開発した装置につき、その概要と機能について報告する。

2. 装置の概要と動作原理

Photo 1 に装置の外観を、Fig. 1 に動作原理図を示す。

テーブル②は本体ケース①の上面にあって自転しており、その上に接して回転しないで滑るようにしたテーブルスパーサ③が中心軸にはめられている。

一方、ホップ⑥は上部から別の支持系によりテーブルの芯からは偏心した位置にサポートされる。このホップ⑥のシュート部外側に同芯で、しかもテーブルスパーサ③に接近した位置に、フィードパイプ④が別駆動方法に

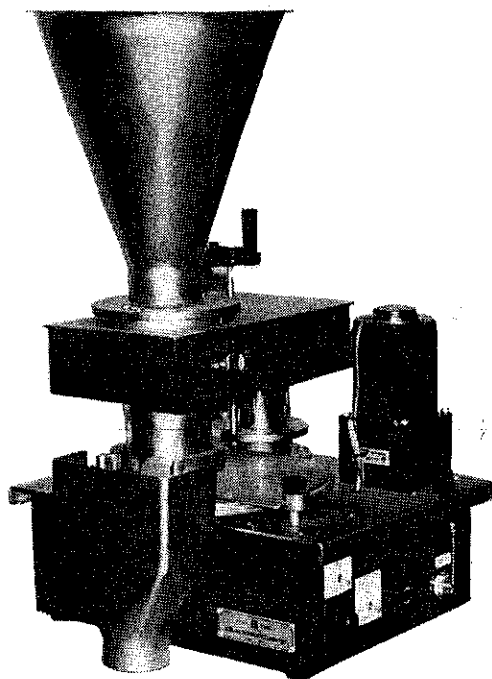


Photo 1 装置の外観

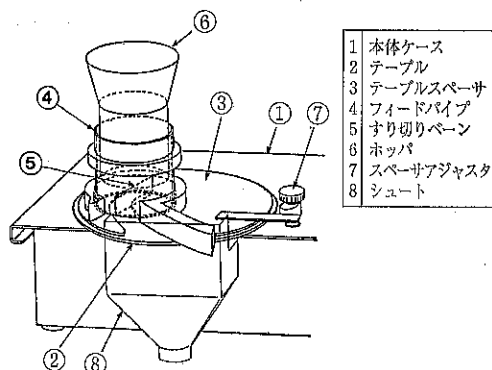


Fig. 1 テーブルフィーダ動作原理図

より自転可能な機構で支持されている。フィードパイプ

* 嵯峨川粉体工学研究所

(〒573 大阪府枚方市招提田近1丁目9)

Tel. (0720) 57-3721

④の下端にはすり切りペーンが直径位置にはめられている。

ホッパー⑥に入れられた粉体はテーブルスパーサ③の上でフィードパイプ④の底にはいるが、テーブルスパーサ③には一部粉が排出しやすいように切り欠き部があり、フィードパイプ④、すり切りペーン⑤が回転することにより、この部分の粉体がテーブルスパーサ③の切り欠き溝に充填される。テーブル②は定速回転しているため、粉体はその回転に応じた速度で移動し溝にそって排出される。

3. 実験方法と供給精度の評価方法について

Fig. 2 は実験装置のレイアウトであるが、試作した粉体供給機から供給排出した粉体を電子天秤で受け、その出力をレコーダーやパソコンで記録する自動計測方法

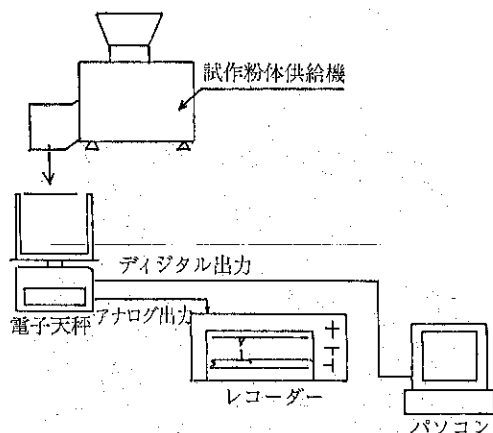


Fig. 2 実験装置のレイアウト

によった。レコーダーでの記録は電子天秤上に乗った粉体の積算重量であり時間と共に増加するため、その直線性が問題となる。又、パソコンでのデータ入力に積算重量と時刻をデジタルで採取し、1分間毎の供給重量に換算してデータ処理した。

電子天秤の分解能は1/24000であるが、デジタル表示部分での読取り限度は0.1g (Max. 2400g)である。

注) 正確に供給精度を評価するためにはサンプリング時間の標準偏差も加味し次式²⁾によるのが良いが、本報では傾向を見ることが目的のため割愛した。

$$\sigma_w = \frac{m}{\tau} \sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\tau}{\tau}\right)^2}$$

ここで、 σ_w : 供給量全体の標準偏差

σ_m : サンプリング量の標準偏差

σ_τ : サンプリング時間の標準偏差

m : サンプリング量の平均

τ : サンプリング時間の平均

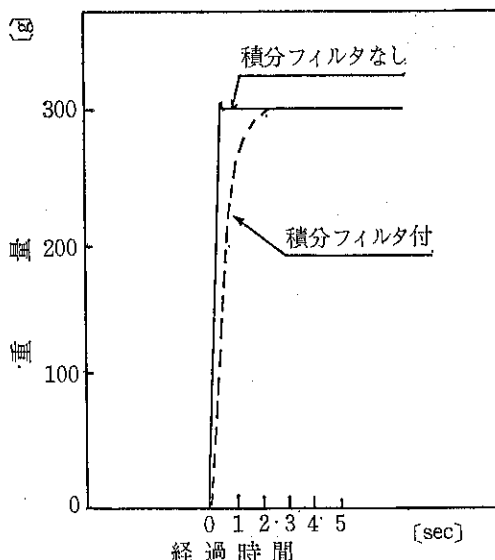


Fig. 3 (a) 電子天秤の上10cmから重りを落下させた時のレコーダー出力例

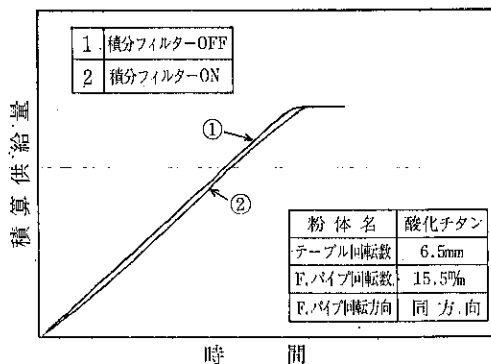


Fig. 3 (b) 積分フィルターの効果

読取り時間遅れは約0.6秒程あるが、この影響は無視した。

Fig. 3 (a), (b) は、レコーダーでの応答速度の状況を示し、以下積分フィルタなしの状態で測定した。

使用粉体は堺化学製・酸化チタンを用いたが、その特性は以下の通りである。

品番 R-310 (ルチル形)

平均粒径 0.7 μ m (コールターカウンター測定)

流動性指数 36 (流動性不良一パウダテスト測定)

また、稿末の各種粉体によるテストにおいては別記の粉体によった。

供給精度の評価方法については、変動係数 (Coefficient of variation CV) を採用する。

この変動係数は標準偏差^{注)}を平均値で割った量で、普通百分率で示し、JIS規格¹⁾にも定められている。

サンプリング数 10ヶ
サンプリング時間 1分間

$$\text{標準偏差 } S = \left[\frac{1}{9} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{変動係数 } CV = S / \bar{x}$$

手順1 変動係数の計算基準

ここでの変動係数は供給スタートしてから一定時間経過した後の連続した10点(10分間)を手順1に従って算出した。

4. 実験結果と考察

4.1 フィードパイプの回転方向について

Fig. 4(a)はフィードパイプの回転方向をテーブルの回転方向に対して、同方向、逆方向に変えた場合の供給の1例で、Fig. 4(b)はそれらの解析例である。

これから、フィードパイプの回転方向はテーブルと同方向がよく、また回転比(フィードパイプ回転数/テーブル回転数)は約3~5以上になると供給が安定してくることがわかる。以下同方向としてテストする。

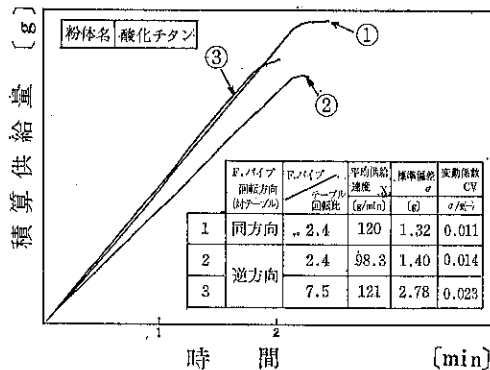


Fig. 4(a) フィードパイプの回転方向の効果

4.2 フィードパイプ、テーブルの速度比の効果

Fig. 5 は、回転比(フィードパイプ回転数/テーブル回転数)に対する時間当たり供給量(供給速度)と変動係数の影響である。又、Fig. 6 は、Fig. 5をプロットし直したもので、回転比と固定した時のテーブル回転数と変動係数の傾向を示している。これから回転比が約

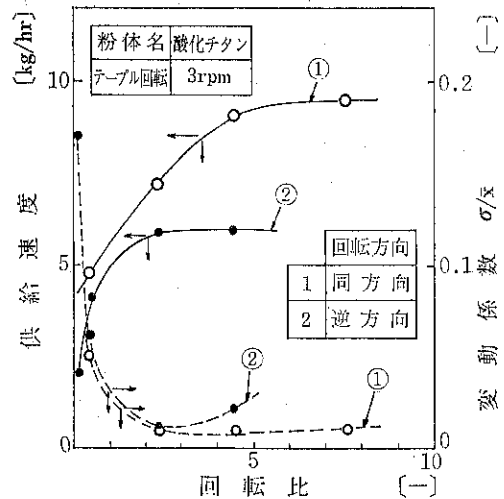


Fig. 4(b) フィードパイプの回転方向の効果

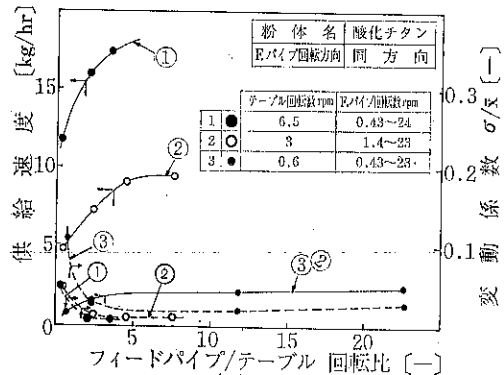


Fig. 5 回転比に対する供給速度と変動係数の関係

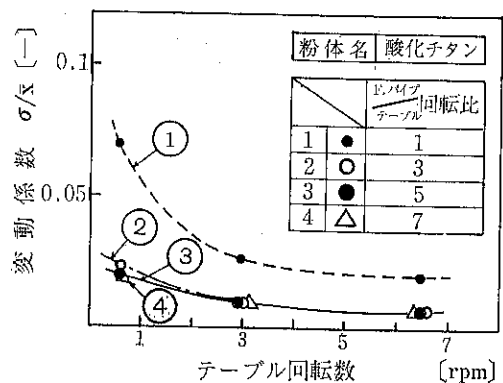


Fig. 6 回転比固定時の変動係数の変化

5以上で変動係数が安定することがわかる。

4.3 供給量、供給精度の再現性

Fig. 7 は Fig. 6 に対応するもので、回転比を固定した時のテーブル回転数と供給能力の関係を示している。

供給機としては直線的に変化するものが取り扱う上で都合が良く、ここでは回転比3のものが良いようであるが、この能力はスパーサの形状と密接な関係にあり一概には言えない。

Fig. 8 は、供給精度の再現性を見たもので、生試料一旦、手で押し固めたものをほぐしてから投入したもの等の供給例を示している。

長期保存粉は全体が平均的に充填されているが、部分的に固めたものは、疎な部分と密な部分に充填されるため供給能力は低下し、結局ある線で落ちつくようである。

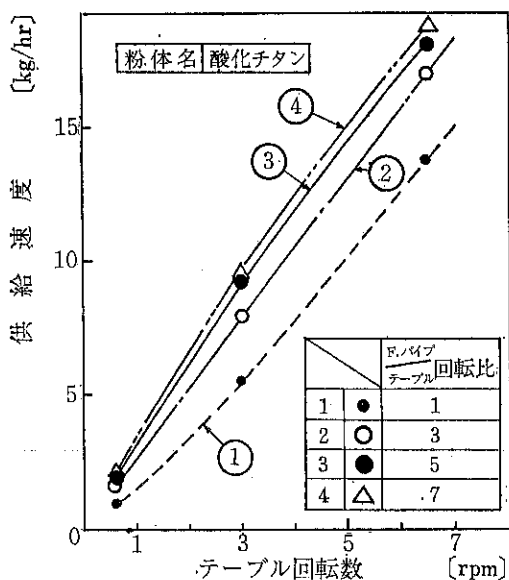


Fig. 7 回転比固定時の供給速度の変化

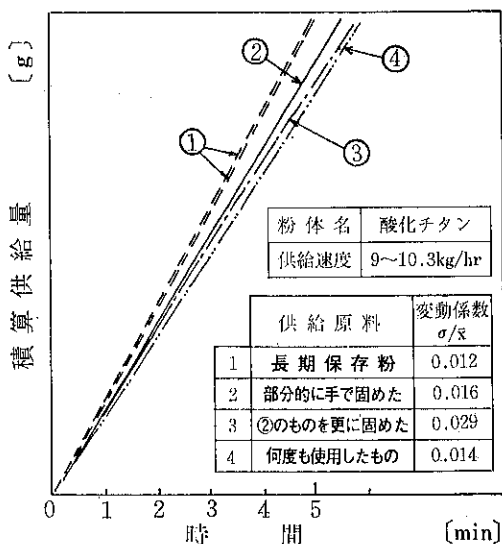


Fig. 8 供給精度の再現性について

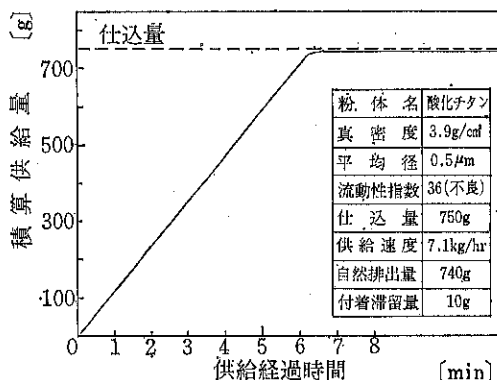


Fig. 9 酸化チタン 750g を仕込んだ時の供給例

また、Fig. 9 に酸化チタン 750g 仕込んだ時の供給例を示す。ここで自然排出量とは何も手を加えずに供給機から排出した量を言い、付着滞留量とは（仕込量－自然排出量）である。これからほとんどの原料が排出され供給機に残らないことを示している。

しかし、粒径が2～3mm以上で樹脂ペレットやフレーク状のものはテーブルスパーサとフィードパイプ、あるいはすり切りペーンとの間に噛み込むため、このような材料には本機は適していない。

5. 各種粉体による供給例

Table 1 は各種粉体の供給例を一覧表にまとめたものである。特に表中 13.5% WB の炭酸カルシウム粉体については、ある程度まで加湿した潤滑粉体にも適用できたことが特徴である。従来からのコイルスクリー型定量フィーダーではコイルスクリー部分に団子状に

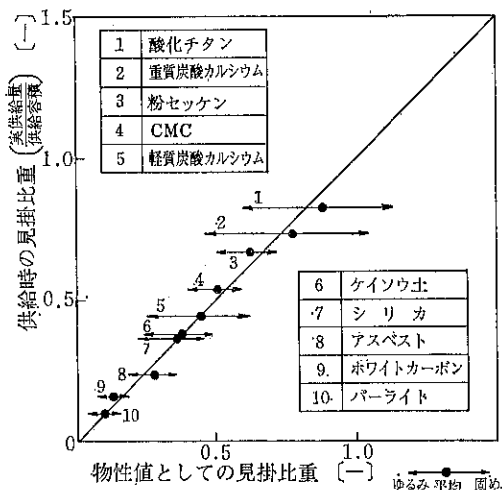


Fig. 10 供給時見掛比重の変化について

Table 1 各種粉体による供給例

粉 体 名	粉体物性		供 給 例						
	平均粒径 [μm]	流動性 指 数 [—]	コイルスクリュ型フィーダ			ミニテーブルフィーダー			
			供給速度 [kg/hr]	標準偏差 σ [g/min]	変動係数 $\frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100$ [%]	供給速度 [kg/hr]	標準偏差 σ [g/min]	変動係数 $\frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100$ [%]	供給状況 —
重質炭酸カルシウム	4	17	4.7	2.37	3.04	4.4	2.05	2.8	良 好
”		17				8.7	1.41	1.0	”
加水 8.5% WB		24	4.6	8.19	10.8	6.1	5.25	5.2	”
” 13.5% WB		26	3.4	12.16	21.6	7.5	9.62	7.7	”
軽質炭酸カルシウム	6.5	22				4.9	1.31	1.6	”
パーライト	8.6	21.5				1.0	0.29	1.7	”
酸化鉛 (PbO)	5	28				16.8	3.1	1.1	”
タルク	0.9	29	1.2	1.68	8.6	0.83	0.68	4.9	”
亜鉛華	1.9	29	3.8	6.89	11.0	4.4	3.45	4.7	”
ホワイトカーボン	10	35	1.4	0.93	3.9	1.7	0.58	2.1	”
CMC	90	36				5.9	1.09	1.1	”
シリカ	280	40	3.8	1.52	2.4	4.1	0.88	1.3	”
ケイソウ土	32	42				4.1	1.8	2.7	”
アスベスト	360	47				2.6	1.33	3.1	”
粉セッケン	>100	56.5				7.4	1.57	1.3	”
マイカ (リン片状)	約 5 mm	64.5	3.0	4.01	8.0	3.7	1.4	2.3	”

くつつき、供給不可能であった。

また、Fig. 10 は 4.4 で使用した各種粉体の供給時の実見掛比重と物性値としての平均見掛比重の比較である。供給時の見掛比重とは実際に供給した粉体重量をテーブルスペーサの溝断面とテーブルの回転によって形成される供給容積で除した見掛比重を言い、物性値としての見掛比重はパウダーテスターで別途測定したゆるみと固め、および平均見掛比重である。図では参考までに横線で示している。

これらはテーブル回転数を一定 (3 rpm) にした時の各種粉体によるデータであるが、供給時の見掛比重は全てゆるみと固め見掛比重の間に入っており、しかも、それらの平均見掛比重と良い相関にある。

すなわち、パウダーテスターによって粉体の見掛比重を測定する際、ゆるみと固めの見掛比重を測定するが、このフィーダーはその平均見掛比重程度にまで充填し定容積にして供給していることになる。従って、この弱す

ぎもせず強すぎもしない適度な力が定量性の安定に寄与していると思われる。

6. ミニテーブルフィーダ MTF-1 の仕様と供給能力範囲

Table 2 MTF-1 の概略仕様

名 称	ホソカワミクロン ミニテーブル フィーダ
型 式	MTF-1
テーブル径	270 mm
ホッパー容量	7 l
概略供給能力	1~15 l/hr (見掛容積基準)
モ ー タ	定格 40W
電 源	100V AC, 50/60 Hz
粉接部材質	SUS 304
概 略 寸 法	400×400×620 H
重 量	~40 kg

Table 2に本機の仕様を、Fig. 11に概略の供給能力を示す。尚、本図は選定の際の目安として作成したものであり、実際の供給能力は粉体の物性等により変化する。また、供給範囲の変更には変速部のギヤーを交換する方法の他、テーブルスペーサーの厚みや溝幅を変える方法もある。

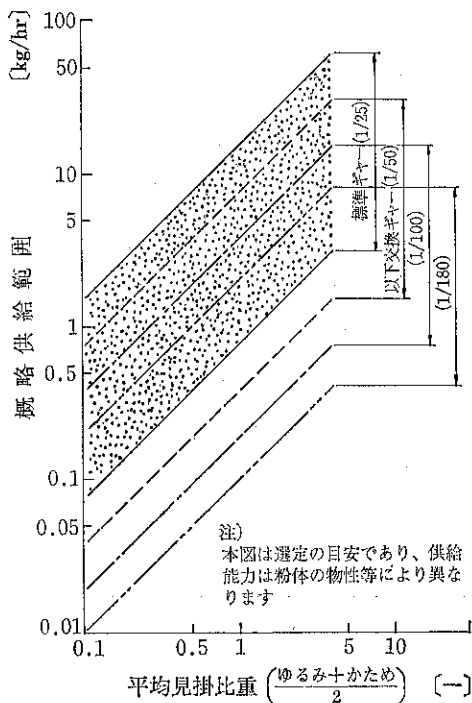


Fig. 11 MTF-1の概略供給能力図

7. 結 論

以上のことから、本供給機は次のような特長を有すると考える。

- (1) 定量性が高い。
- (2) 供給量は無段で幅広く調節できる。
- (3) ほとんど全量排出でき、ホップに残らない。
- (4) 発塵しない。
- (5) 付着、凝集性の強い微粉体の供給に適している。

8. おわりに

酸化チタンを中心に本供給機の特性について評価してきた。紙面の都合上、他の粉体による個々の詳細な特長は割愛したが、従来、定量供給が難しいとされてきた付着・凝集性の強い微粉体用として本供給機が利用できるものと思う。今後、この供給機の適用範囲を明確にして使い易いてがるな供給機に仕上げて行きたい。

参 考 文 献

- 1) JIS Z8101「品質管理用語」
- 2) 増田：粉体と工業，6，〔5〕38 (1974)



傾斜回転円板による異形粒子の分離実験

An Experiment on Separation of Differently Shaped Particles on an Inclined Rotating Disk.

篠原 邦夫*
Kunio Shinohara

松岡 英司*
Eiji Matsuoka

1. はじめに

形状の異なる粒子を乾式で連続的に分離する方法の一つとして、以前より、僅かに傾斜させた回転円板が用いられ¹⁾²⁾、主に球形および非球形粒子の二成分分離が行なわれてきた。その際、固定スクレーパー³⁾⁴⁾や傘型回転盤⁵⁾を用いることも試みられている。

本報では、形状の異なる多成分粒子混合物の分離特性を知るために、最も基本的な傾斜回転円板のみによる、一般形状粒子の分離実験を行なった。そのため、回転円板上での粒子の速度分布や、捕集された混合物の円板周辺部での重量分布を測定した。その際、種々の形状の粒子や材質の異なる円板を用い、供給位置、供給量、傾斜角、回転数などの操作条件の効果を検討した。その結果、いくつかの参考データが得られたので報告する。

2. 実験試料と装置

分離実験に用いた粒子は、Table 1 に示す三種類で、楕円体を想定してシャドウグラフにより三軸方向直径を測定した。中軸径を代表粒子径とし、短軸径と中軸径との比を分離に関与する形状指数と定義した。楕円体に近く、粒子径および形状指数の分布幅が比較的狭い単成分粒子としてポリスチレンペレット、多成分粒子としてシリカゲル顆粒を用い、球形粒子として鉄球を使用した。Fig. 1 は、50 個のポリスチレンペレットと 100 個のシリカゲル粒子について、楕円体を仮定して算出した粒子重量基準の残留分布であり、粒子径は対数正規分布に近いことがわかる。形状指数については、Fig. 2 に示すような分布があり、ポリスチレンペレットに比較しシリカゲル粒子は分布幅が広い。更に、四種類の円板材料と

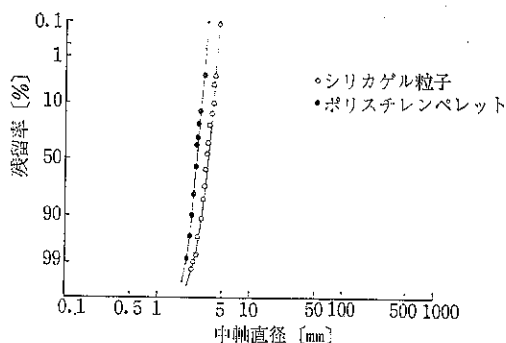


Fig. 1 重量基準の粒子残留率

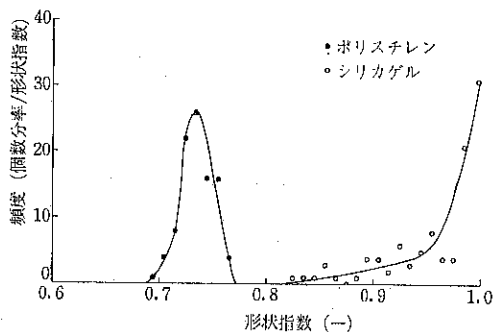


Fig. 2 粒子形状指数の分布

の壁面摩擦係数（最大静止摩擦角として滑り角を採用）の測定値は、それぞれ Table 2 のようであった。

次に、使用した実験装置は、Fig. 3 に示すように、直径 50cm の円板が手前（Y 軸の負方向）に自由に傾斜でき、無段変速モータ（安川電機製、カップモータ）により任意の速度で定速回転が持続できる。回転数は、光電式回転検出器によりユニバーサルカウンタで読み取った。粒子は、ホッパーからオリフィス板を二枚通過させ

* 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) 716-2111 (内線 6592)

Table 1 粒子の三軸直径と形状指数

試料	長軸径(mm)	中軸径	短軸径	形状指数	密度(g/cm ³)
ポリスチレンペレット	3.36	2.65	1.94	0.732	1.06
シリカゲル粒子	3.51	3.35	3.21	0.960	1.17
鉄球	1.56	1.53	1.53	1.00	7.21

Table 2 壁面静止摩擦係数

壁面材質	ポリスチレン	シリカゲル
アルミ	0.52	0.48
スリガラス	0.66	0.59
ガラス	0.70	0.61
塩化ビニル	0.79	0.66

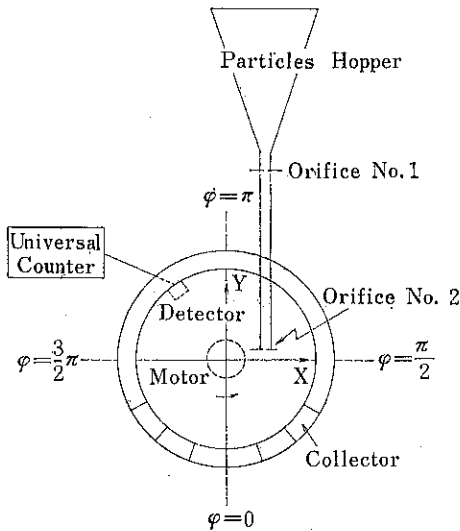


Fig. 3 分離実験装置の概略図

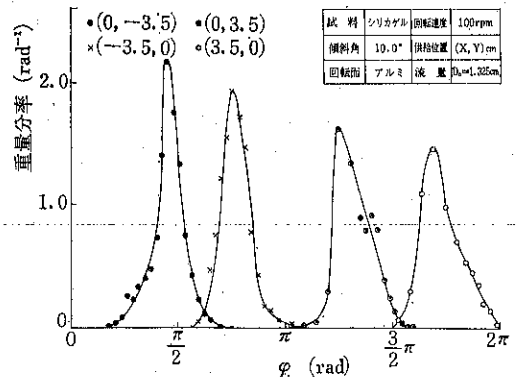
て一定流量（オリフィス直径 D_0 で示す）で供給された。これは、粒子が供給管内を円滑に流下し、回転面に垂直に 5 mm の高さからの飛び散りを少なくするためである。分離後の粒子は、円板周辺部に設置された紙製サンプラー（中心角が $5^\circ \sim 10^\circ$ 間隔で仕切られている）に捕集された。

また、回転円板上の粒子の速度分布を測定するために垂直上方 1 m 位の所にカメラを設置し、 6×6 版フィルムを使用し、シャッター速度を二、三変化させて粒子のずれを撮影した。そのネガをシャドウグラフにより拡大し、ぶれている粒子の長さを計り、シャッター時間で除して粒子速度を算出した。また写真により粒子の移動方向もほぼ推測できた。

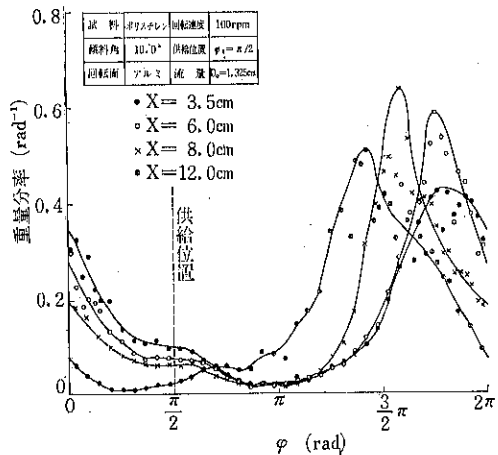
3. 実験結果と考察

3.1 供給位置による差異

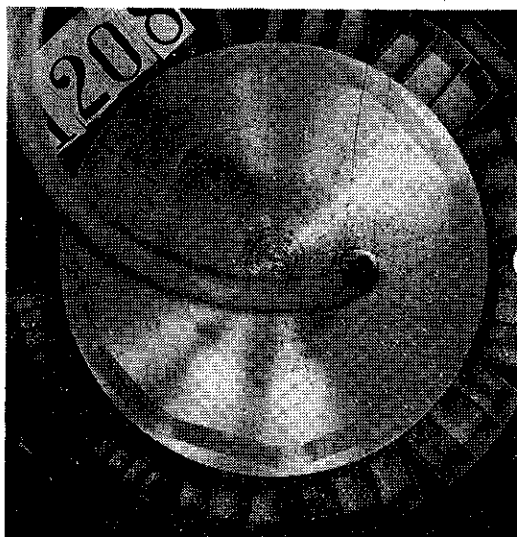
操作条件としては、前述の如く種々あるが、まず供給位置について検討した。Y 軸の負方向（円板下方）から回転中心の左回り方向に角度 φ をとると、各円周位置での捕集粒子の重量分率は、 φ の異なる四カ所の軸上で供給すると、Fig. 4 (a) に示すようになった。 $\varphi_0 = \pi/2$ に供給された粒子は、上方に運ばれ、 $\varphi = \pi$ 付近では上向き



(a) 供給位置（軸）の角度 φ_0 による
Fig. 4 供給位置による差異

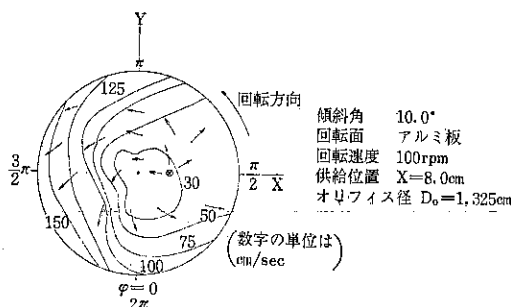


(b) X 軸上の位置による
Fig. 4 供給位置による差異



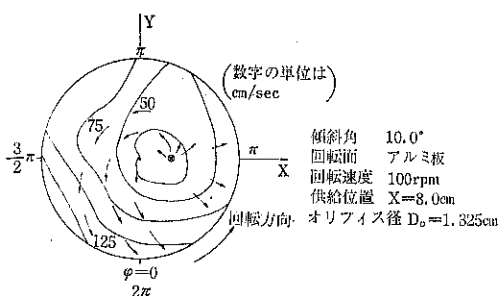
(a) 写真

Fig. 5 粒子の回転板上速度分布



(b) ポリエステレンペレットの場合

Fig. 5 粒子の回転板上速度分布



(c) シリカゲル粒子の場合

Fig. 5 粒子の回転板上速度分布

の遠心力と下向きの重力を受けるため半径方向の作用力が最小になり、 $\varphi=3\pi/2$ 以上になるまで回転板上に滞留しやすい。その後、半径方向力が最大となる $\varphi=2\pi$ 付近で、ほぼ回収されている。また、 $\varphi_0=0$ に供給された粒子は、主に $\pi/2$ 付近で回収される。従って、供給から捕集までの円周方向角度の開きが大きくとれ、その

結果、粒子濃度が低く、単一成分の捕集幅が狭くできることから、 $\varphi_0=\pi/2$ または $3\pi/2$ 付近が形状分離のための供給位置角度に適しているであろう。

そこで、 $\varphi_0=\pi/2$ の正の X 軸上で中心から供給位置を変化させてみると、Fig. 4(b)のように、円板の周辺部に近い供給位置ほど遠心力の作用が大きくなり、 $\varphi=2\pi$ から $3\pi/2$ へと、より早い段階で回収されることがわかる。よって、分離領域が広く、後ほど分離力が増大すると考えられる $\varphi_0=\pi/2$ 、 $X_0=3.5\text{cm}$ を標準供給位置とした。

3.2 粒子の板上速度分布

前述の写真撮影により求めた回転板上の粒子速度分布を Fig. 5 に示す。これらは等速度線図であり、個々の粒子の軌跡は示されていないが、矢印により大まかに粒子の移動方向がわかる。(b)の等速度線の間隔は(c)のそれよりも狭いが、これは、前者がポリスチレンペレットの場合で、後者のシリカゲル粒子より扁平なため遠心力の効果が顕著になるためであろう。

また、板上の速度分布の形は対称でなく多少複雑であるが、粒子供給点から左回りに円板の約 $3/4$ の領域が粒子の滞留、言い換えれば分離過程に役立っており、次第に粒子速度が上がり回収されやすくなる点も都合が良いと言える。

3.3 供給量の影響

粒子供給量の分離に及ぼす影響を調べたのが Fig. 6 である。ホッパーのオリフィス径 D_0 とともに回収粒子の分布幅が増大する傾向があり、特に $D_0=2.01\text{cm}$ では顕著になる。これは、円板上の滞留粒子の濃度が高くなり、運動が相互に干渉されるためであろう。従って、

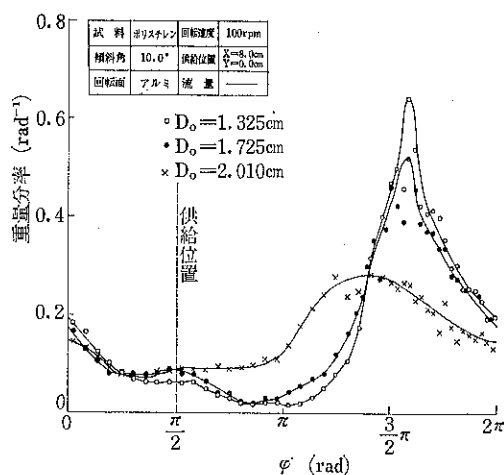


Fig. 6 粒子供給量の影響

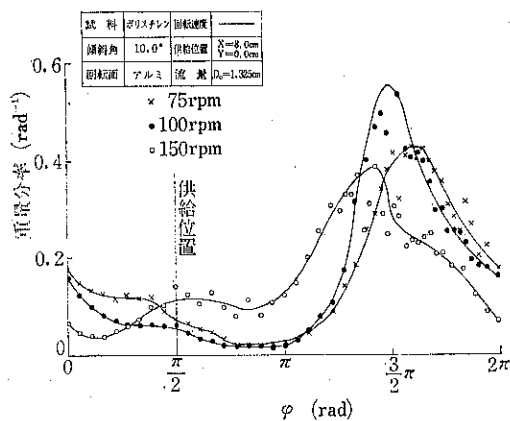
他の分離実験では、 $D_0=1.325\text{ cm}$ を標準としている。

3.4 回転数の効果

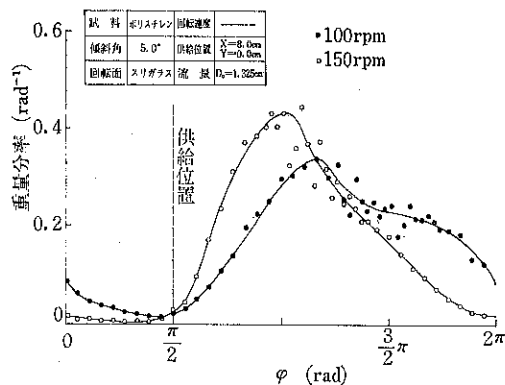
回転数を増加すると、円板上で作用する遠心力が増大し、粒子はより早く回収されるが (Fig. 7 参照)、分布の形にあまり変化は見られない。二つのピークが現れる場合もあるが、壁面材料の効果に関連して後節で考察する。

3.5 傾斜角の効果

回転板の傾斜角が増大すると、重力により落下しやすくなり、回収位置が下方すなわち φ が 2π の方へ増大し、 $\varphi=\pi$ 付近では粒子は回収されにくくなる (Fig. 8 参照)。また、供給位置以下の角度に最初にピークが現れやすくなるのも、同様に円板上を落下しやすい粒子が増加するためである。



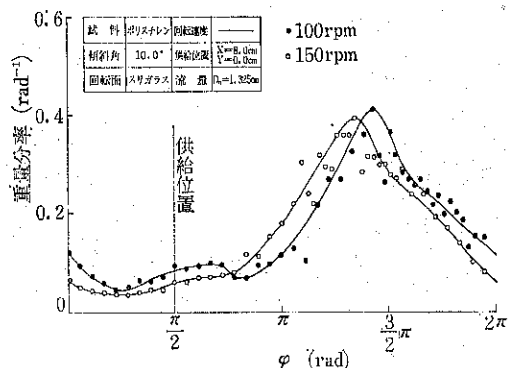
(a) アルミ板
Fig. 7 回転数の効果



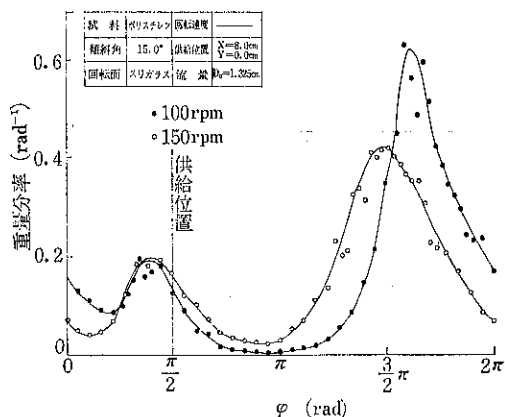
(b-1) スリガラス板
Fig. 7 回転数の効果

3.6 円板材質の影響

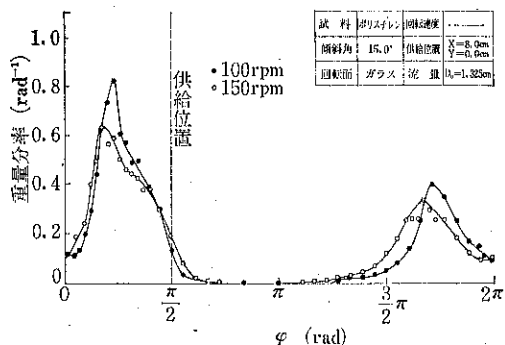
回転板の材料による影響を見ると、Fig. 9 (a)に示すように、ポリスチレンペレットの場合には、壁面摩擦係数の大きなものほど (Table 2 参照) 分布幅がやや狭まる傾向があり、二つのピークが現れる。これは、摩擦



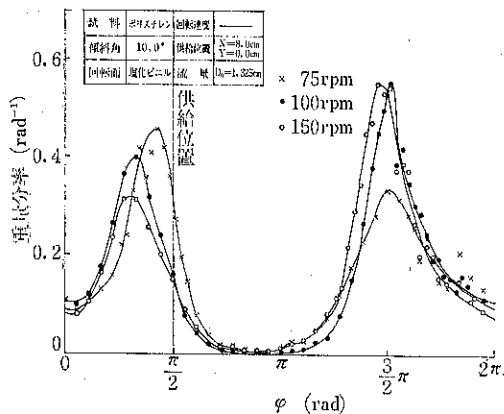
(b-2) スリガラス板
Fig. 7 回転数の効果



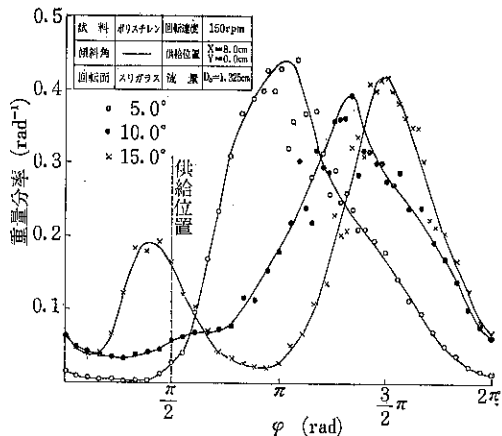
(b-3) スリガラス板
Fig. 7 回転数の効果



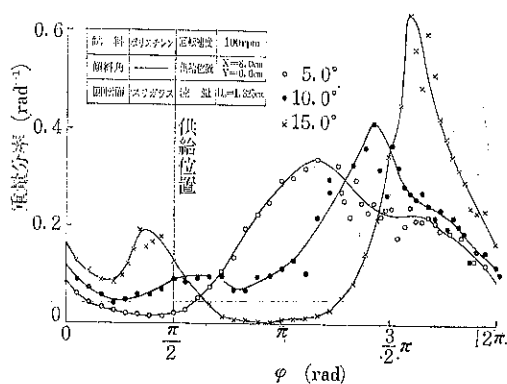
(c) ガラス板
Fig. 7 回転数の効果



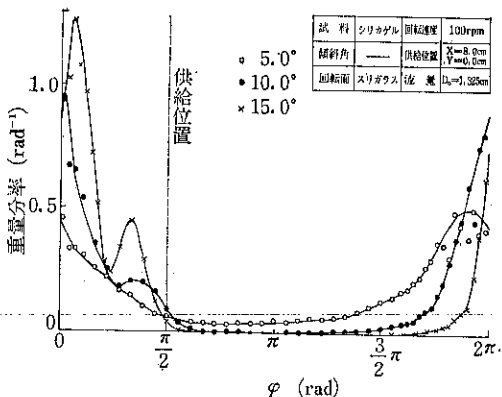
(d) 塩化ビニル板
Fig. 7 回転数の効果



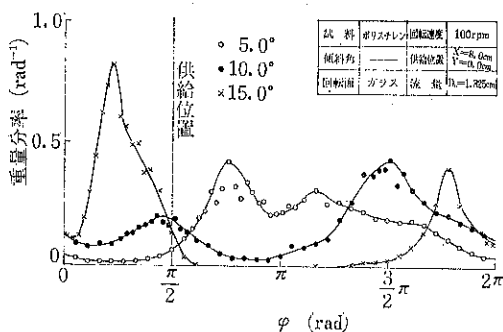
(c) 150 rpm
Fig. 8 傾斜角の効果



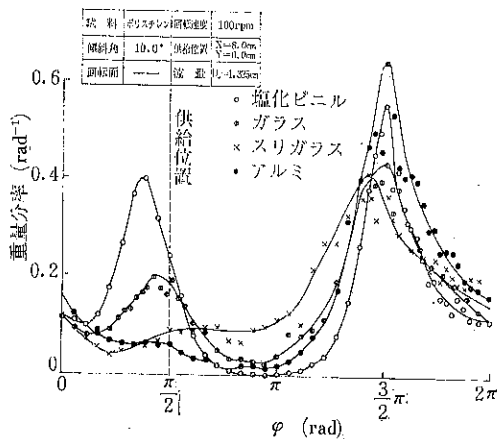
(a) ポリスチレン, スリガラス
Fig. 8 傾斜角の効果



(d) シリカゲル粒子
Fig. 8 傾斜角の効果



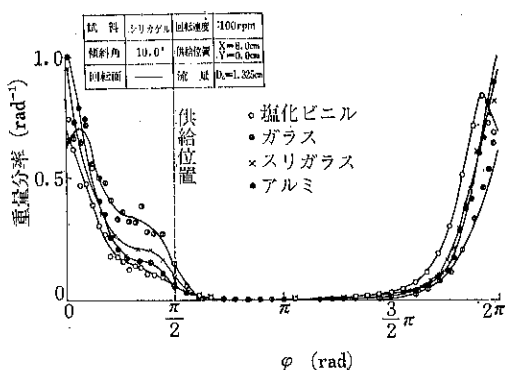
(b) ガラス板
Fig. 8 傾斜角の効果



(a) ポリスチレンペレット
Fig. 9 円板材質の影響

係数が大きいほど、回転運動を持續しやすく、ポリスチレンのような扁平な粒子ほど飛翔しやすいため供給直後に衝撃などで直接 $\varphi=0$ 方向に流下する割合がふえ、第二の小ピークが現れたと考えられる。一方、シリカゲル

粒子の場合には、Fig. 9 (b)のように、材質の影響はあまり顕著ではなく、ピークも $\varphi=2\pi$ 付近に一つあるだけであり。これは、シリカゲル粒子がより球形に近く、



(b) シリカゲル粒子
Fig. 9 円板材質の影響

回転運動しやすいため摩擦係数の影響は小さくなり、あまり飛翔しないためであろう。

3.7 粒子形状による差異

形状の異なる三種類の粒子 (Table 1 および Fig. 2 を参照) では、Fig. 10 に示すように、球形の鉄球は供給位置からほとんどそのまま流下し $\varphi=0 \sim \pi/2$ の間で回収されるが、次第に扁平になるシリカゲル、ポリスチレンペレットほど $\varphi=2\pi$ から $3/2\pi$ へと回収角度が減少している。これは扁平な粒子ほど飛翔や滑り運動を生じやすく、その結果、回転運動の場合に比較し遠心力の

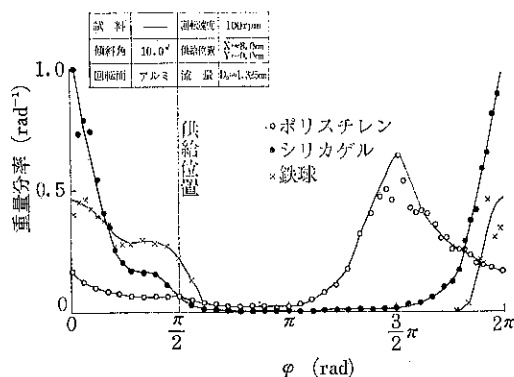


Fig. 10 粒子形状による差異

効果が顕著になるためであろう。従って、形状指数の異なる粒子を、回転板周囲の回収位置の差異により分離、捕集することが可能になることがわかった。

4. おわりに

粒子物性としては、2節でも述べたとうり、粒子径と粒子形状および壁面摩擦係数しかここでは取り上げていないが、無論、その他に弾性係数など重要な因子がある。粒子径や形状にも種々の定義があり、その中で分離現象の記述に何が最も適当か、また粒子径の大小や粒度分布の形などの基本的特性について、更に検討を要するであろう。

ここでは、主に粒子の形状分離操作の観点から、その中の幾つかについてしか実験できなかったが、その組合せは数多く、解析の裏付けなしにこれ以上の定量的評価はなかなか困難である。従って、上記の考察には不十分な点があるかもしれないが、実験結果は真に事実であり、できるだけ多くの例を上げた。これらが、実際に傾斜回転円板による粒子の形状分離の可能性を考える際、参考になれば幸いである。なお、形状分離機構については、単一粒子の板上運動に基づき、現在、種々の場において、著者らにより解析が試みられている⁶⁾。

引用文献

- 1) Carpenter, F. G. and V. R. Deitz: J. Res. Nat. Bur. Standards, **47**, 139-147 (1951)
- 2) Riley, G. S.: Powder Technol., **2**, 315-319 (1968/69)
- 3) Sugimoto, M., K. Yamamoto and J. C. Williams, J. Chem. Eng. Japan, **10**, 137-141 (1977)
- 4) 古閑二郎, 遠藤茂寿, 杉本益規, 山口賢治: 化学工学論文集, **8**, 285-290 (1982)
- 5) 山本健市, 杉本益規: 粉体工学会誌, **22**, 626 (1985)
- 6) 篠原邦夫: 投稿中。

二次元ホッパーにおける流動時の 空気圧およびかさ密度の分布

Distribution of Air Pressure and Bulk Density during Flow of Solids in a Plane Hopper

竹下 武成* 渡辺 始* 渥美 邦夫*
Takenari Takeshita Hajime Watanabe Kunio Atsumi

Abstract

The fundamental study was performed for the dynamic state of granular materials in a plane hopper. The bulk density and the air pressure distributions were measured when sands or glass beads were steadily flowing down through the hopper.

Though the theory developed here is based on many simplifying assumptions, it predicts the experimental facts; the air pressure falls with distance above the exit of the hopper to give a minimum, after which it increases back to atmospheric at the top surface, and the bulk density of the granular materials increases with increasing distance from the exit.

1. 緒 言

粉粒体を貯槽する容器を設計する場合、粉粒体の流動状態を予測することは、操作上はもちろんのこと安全上も重要である。しかし粉粒体の挙動は、粉粒体が流動している場合、同伴空気の負圧も発生し、かなり複雑となる¹⁾。

そこで本研究は、二次元ホッパーを用い、ガラスビーズおよび砂を排出させ、空気圧とかさ密度について測定した。そして、ガラスビーズに関して Ginestra の理論²⁾から数値計算した値と比較検討した。

2. 実験装置および方法

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。装置は内部の流動状態が観測できるように透明アクリル板製で奥行き 20 mm の二次元ホッパー ② と補助ホッパー ① からなり、圧力測定には圧力変換器③、動ひずみ計④、記録計⑤および定電圧装置⑥を用いた。粒子充てんの際には Fig. 2 に示すように二重管の外管をゆっくり引き上げることで、粉体になるべく一定の充てん構造になるよ

うに注意した。そしてホッパーの排出口を開き、流れが定常になった後、空気圧およびかさ密度を測定した。かさ密度においては Fig. 3 に示すように内側の円柱を固

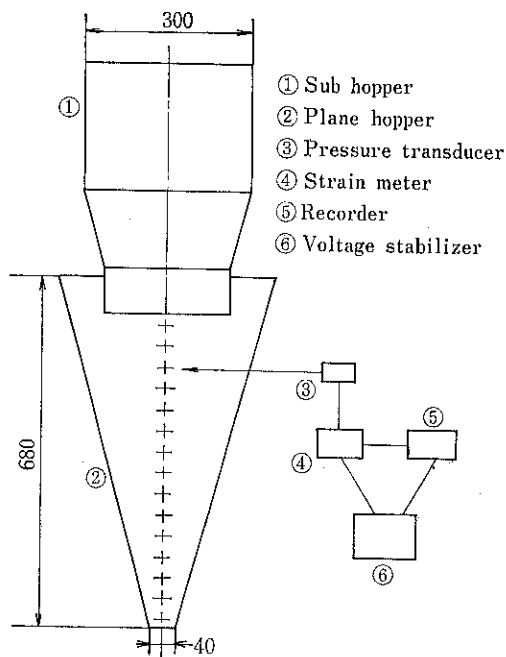


Fig. 1 Outline of experimental apparatus

* 静岡大学工学部化学工学科
(〒432 浜松市城北3の5の1)
Tel. (0534) 71-1171 (内線) 401

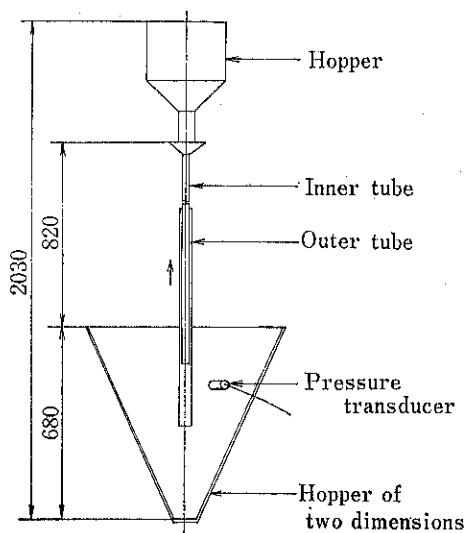


Fig. 2 Charging method of particles

定、外側の円筒容器（内径10mm）を流れが定常になったところで、壁面から挿入して粒子を採取し空間率を測定した。実験条件は粉粒体粒子としてガラスビーズ（50%平均径 $d_s=0.153$ mm）と砂（50%平均径 $d_s=0.458$ mm）を用いて、ホッパー半頂角 α を 7.5° とした。なお Table 1 に粒子の物性を示した。

Table 1 Characteristics of granular materials

Material	Glass beads	Sand
Property		
Mean diameter [mm]	0.153	0.458
Density [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	2.50×10^3	2.69×10^3
Bulk density [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	1.44×10^3	1.61×10^3
Angle of repose [$^\circ$]	25.0	36.9
Coefficient of internal friction [-]	0.448	0.687
Coefficient of wall friction [-]	0.250	0.306

3. 実験結果および考察

3.1 空気圧およびかさ密度分布

Figs. 4, 5 にガラスビーズと砂の排出量 $W=1.18$ $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ と 1.13 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ の場合における中心軸上の空気圧分布とかさ密度分布を示した（最大測定誤差15%）。空気圧の測定は直接、圧力変換器に粉体があたらないように金網をはり、行った。空気圧はホッパー全体に負圧となり、ホッパー出口（ホッパー頂点からの中心軸での距離 $H=15$ cm）から 15 cm $\sim$ 20 cm ($H=30\sim 40$ cm)

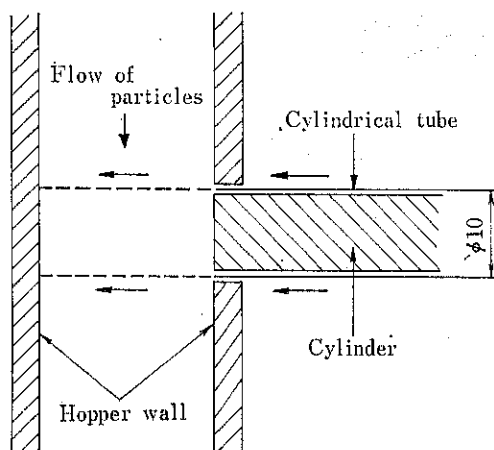


Fig. 3 Sampling method of particles

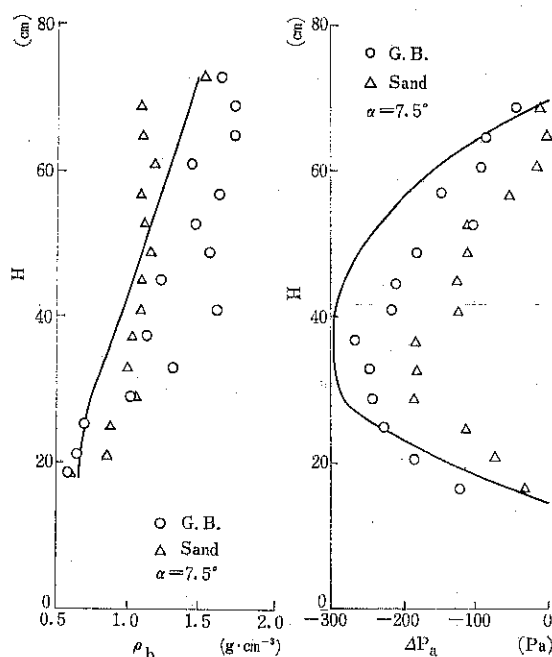


Fig. 4 Air pressure distribution along the central axis of the hopper

Fig. 5 Bulk density distribution of granular materials along the central axis of the hopper

のところで最小値となる分布となった。また、かさ密度は排出口に近くなるほど、小さくなる。ガラスビーズに比べて砂の方が変化が少なく、平均かさ密度は小さい。これは砂粒子の非球形によるものと考えられる。Figs. 4, 5 の実線は Ginestra 等の理論を修正し、数値計算したものであり、次の節で説明する。

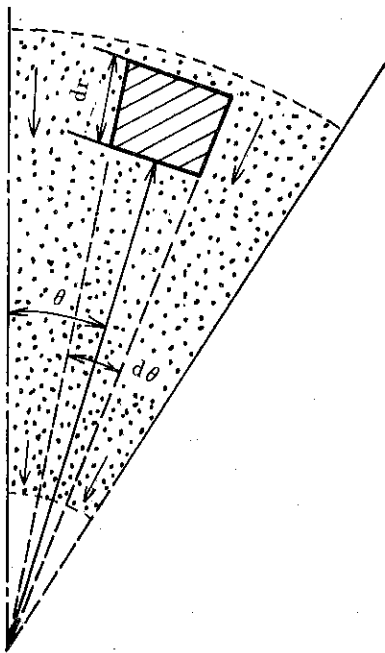


Fig. 6 Radial flow of granular materials

3.2 簡単な数値計算^{2,3)}

Fig. 6 に示したように、粉粒体はホッパーの頂点に向って流れる放射状流れで壁面との摩擦は無視できるものとする、Ginestra によれば、 r 方向の粉粒体と同伴空気の運動方程式は定常状態でそれぞれ次のように表わされる²⁾。

$$\rho_s(1-\varepsilon)v\frac{dv}{dr} = -\frac{1}{r} \cdot \frac{d(r\sigma_r)}{dr} + \frac{\sigma_\theta}{r} - \rho_s(1-\varepsilon)g\cos\theta + F(u-v) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\rho_f\varepsilon u\frac{du}{dr} = -\frac{dP_a}{dr} - \rho_f\varepsilon g\cos\theta - F(u-v) \quad \dots\dots\dots(2)$$

本研究では、(1)、(2)式中の流体抗力 $F(u-v)$ を単一粒子の流体抗力に粒子群中の粒子数をかけたものとして次のようにあらわす。

$$F(u-v) = \frac{3}{4} \frac{C_D \cdot \rho_f}{d_s} (u-v)|u-v|(1-\varepsilon) \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで流体抵抗係数 C_D は次式を用いた。

$$\sqrt{C_D} = 0.63 + (4.8/\sqrt{Re}), \quad Re = \rho_f d_s |u-v|/\mu$$

さらに粉体の平均応力 $\bar{\sigma}$ は r 方向と θ 方向の応力

(σ_r および σ_θ) の相加平均であらわされ、さらに σ_θ は σ_r に比例すると仮定する。実験によれば、高さ方向においてかさ密度(空間率)の変化がみられるので、(1)、(2)式における空間率と粉体応力との関係を知る必要がある。しかし、現時点では理論的および実験的に確実な関係は得られていないので、空間率と平均粉体応力の関係が直線近似で表わされると仮定し、次式で表わす。

$$\varepsilon = \varepsilon_{mf} - m \cdot \bar{\sigma} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで ε_{mf} は応力が生じない時の空間率、 m は $\bar{\sigma}$ と ε との関係係数である。これらの仮定より σ_r は次のようになる。

$$\sigma_r = 2(\varepsilon_{mf} - \varepsilon)/m(1+K) \quad \dots\dots\dots(5)$$

連続式を用いて、(1)、(2)式中の u, v を粒子質量流量 W 、空気質量流量 w で表わす。そして空気の慣性項と重力項を無視し、(5)式を用いて(1)、(2)式を整理すると(6)、(7)式となる。

$$\begin{aligned} & \left[\frac{W^2}{4b^2\alpha^2\rho_s r^2(1-\varepsilon)^2} - \frac{2}{m(1+K)} \right] \frac{d\varepsilon}{dr} = \frac{W^2}{4b^2\alpha^2\rho_s r^3(1-\varepsilon)} \\ & + \frac{2(K-1)(\varepsilon_{mf}-\varepsilon)}{mr(1+K)} - \rho_s(1-\varepsilon)g\cos\theta + \frac{3C_D\rho_f}{16d_s b^2 r^2 \alpha^2} \\ & \times \left[\frac{w}{\rho_f \varepsilon} - \frac{W}{\rho_s(1-\varepsilon)} \right] \left| \frac{w}{\rho_f \varepsilon} - \frac{W}{\rho_s(1-\varepsilon)} \right| (1-\varepsilon) \quad \dots\dots\dots(6) \\ & \frac{dP_a}{dr} = \frac{3C_D\rho_f}{16d_s b^2 r^2 \alpha^2} \left[\frac{W}{\rho_s(1-\varepsilon)} - \frac{w}{\rho_f \varepsilon} \right] \left| \frac{W}{\rho_s(1-\varepsilon)} - \frac{w}{\rho_f \varepsilon} \right| \\ & - \frac{w}{\rho_f \varepsilon} (1-\varepsilon) \quad \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

(6)式を解いて空間率分布を求めれば、(2)式より空気圧分布をさらに $\rho_b = (1-\varepsilon)\rho_s$ よりかさ密度分布を推算できる。理論計算値を Figs. 4, 5 に実線で示し、実測値と比較した。実験結果との一致は十分とはいえないが、ホッパー壁が滑らかなマスフローである粉粒体の流動を上記の理論で表わすことができると思われる。ここで流動時の粉体圧について考えると空気圧とかさ密度変化を考慮に入れた推算方法が必要となる。

4. 結 言

本実験範囲内で次のことがわかった。

流動時には空気の圧力は負圧となり、中心軸方向において最小値をもつ分布を示した。また、かさ密度は中心軸方向に分布が生じ、排出口に向って小さくなる。これらの現象は本理論によってある程度表現することができるが、本報で用いた仮定、特に粉体応力と空間率の間の1次近似と粉体同士の干渉がないとしたことに関しては、さらに考察の必要がある。

使用記号

b : ホッパーの奥行き	[cm]
C_D : 流体抵抗係数	[—]
d_s : 粒子径	[mm or cm]
$F(u-v)$: 粒子群の流体抗力	[g·cm ⁻² ·s ⁻¹]
g : 重力加速度	[cm·s ⁻²]
H : ホッパー中心軸上高さ	[cm]
K : 粉体圧係数	[—]
P_a : 空気圧	[g·cm ⁻¹ ·s ⁻² or Pa]
r : ホッパー頂点からの距離	[cm]
Re : レイノルズ数	[—]
u : 空気の流れ	[cm·s ⁻¹]
v : 粒子の速度	[cm·s ⁻¹]
W : 粉粒体質量流量	[g·s ⁻¹ or kg·s ⁻¹]
w : 空気質量流量	[g·s ⁻¹ or kg·s ⁻¹]
α : ホッパー半頂角	[°]

ε : 空間率	[—]
μ : 空気の流れ	[g·cm ⁻¹ ·s ⁻¹]
ρ_b : かさ密度	[g·cm ⁻³]
ρ_f : 空気の流れ	[g·cm ⁻³]
ρ_s : 粒子の密度	[g·cm ⁻³]
$\bar{\sigma}$: 平均粉体応力	[g·cm ⁻¹ ·s ⁻²]
σ_r : r 方向の粉体応力	[g·cm ⁻¹ ·s ⁻²]
σ_θ : θ 方向の粉体応力	[g·cm ⁻¹ ·s ⁻²]

参考文献

- 1) C. D. Spink and R. M. Nedderman : Powder Technol., **21**, 69(1980).
- 2) J. C. Ginestra, S. Rangachari and R. Jackson : Powder Technol., **27**, 69(1980).
- 3) J. F. Davidson and R. M. Nedderman : Trans. Instn. Chem. Engrs. **51**, 29(1973).

特許一言メモ No. 71

——特許印紙の額面の種類が増えた——

昭和59年7月1日より、特許庁に対して行う工業所有権関係の料金の納付が一部の手続き関係を除き収入印紙に変わった。

この度は、この特許印紙の額面の種類が追加されて以下のとおりとなった。アンダーラインの分が今回新たに加えられたもの。これで、料金の納付手続きのときなど、納付書の所定箇所に貼り切れず別の添付紙面に貼っ

ていたことを思えば、貼る特許印紙の枚数が減って幾分スッキリし、手間も少くなるかも…。

百円 3百円 5百円 千円 3千円 5千円
1万円 3万円 5万円 10万円

(特 許 室)

粉体流量の計測

増田 弘昭*
Hiroaki Masuda

1. はじめに

粉体プロセスにはベルト端から落下する粉体流のように粉体バルクの流れと、微粉炭の空気輸送のように粉体浮遊流とがある。前者を粉体一相流といい、後者は媒体が気体か液体かによりそれぞれ固気二相流、固液二相流などという。粉体一相流の流量計測はほぼ満足に行えるが、二相流とくに固気二相流の流量計測では現在においても未だ十分な精度が得られない。ここでは、粉体流量計測全般にわたって基礎事項をまとめてみることにする。

2. 秤量法

秤量法は粉体一相流の流量計測法のうちで最も信頼性があり、精度の良い方法である¹⁾。この種の流量計ではホッパー・スケールとベルト・スケールがよく用いられている。しかし、ホッパー・スケールには次のような問題がある。

- (1) 粉体流量はホッパー・スケールの設定重量ではなく、実際に受け入れた粉体重量によって決まる。
- (2) ホッパー・スケールから排出される粉体流は間欠的で不連続である。このため、プロセスの連続制御用計測機器としては不適當である。

第1の問題は供給機（フィーダ）とスケール・ホッパー間の粉体滞留量（ホールド・アップという）に関連する。供給粉体流量 W における微小区間 dl でのホールド・アップ dw は次式で与えられる。

$$dw = \frac{W}{v} dl \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 v は粉体の位置 l での平均流速であり、供給端を原点 ($l=0$) とすると通常 $\sqrt{2gl}$ で与えられる。式(1)からわかるように、設定重量に近くなった時、供給

流量 W を小さくすればホールド・アップも小さくなって設定重量と実重量の差を小さくでき、精度が上がる。また、これにより粉体供給の停止がより確実となる。

ホールド・アップによる誤差を避ける別の方法としては粉体の受け入れが完全に終了した後に計量するものがあり、実量計量方式と呼ばれている。

第2の問題、すなわち排出が間欠的であることを克服するには次の二つの方法のいずれかによっている。第一の方法はスケール・ホッパーを2器用いるもので、この方式は二槽式ホッパー・スケールと呼ばれる。第二の方法はいわゆるロス・イン・ウェイト方式であり、粉体流量は時刻 t におけるホッパー質量 $G(t)$ を用いて次式で計算される。

$$W(t) = -\frac{dG(t)}{dt} \quad \dots\dots\dots (2)$$

スケール・ホッパーが空になる前に粉体を追加供給すれば排出流はほぼ連続的にできる。さらに、この方式ではホッパー壁面に粉体が付着残留しても計量誤差にはならない。

以上のように、ホッパー・スケールもある程度連続計測機器として使えるようにできるが、連続計測には原理的に言ってベルト・スケールの方が適している。粉体流量は単位ベルト長あたりの粉体質量とベルト速度の積として求められる。計測はロード・セルを用いることにより完全に連続化され得るが、ベルトのたるみなど機械的構成によって計量精度が変化するという問題がある²⁾。ベルト・スケール全体を秤量する方式もあるが、動的な遅れを生じる。なお、ループ・コンベア・スケールと呼ばれる機種も開発されている³⁾。

3. 力学に基づく流量計

粉体の流れは種々な力を生じる原因となる。これらの力を検出できれば間接的に粉体流量を計測することも可能である。粉体流量計測には粉体流による衝撃力と、慣性力の一環であるコリオリの力が実用されている。衝撃

* 広島大学工学部第3類化学工学教室
(〒724 東広島市西条町大字下見)
Tel. (0824) 22-7111 代

式流量計は傾斜板上に粉体流が落下衝突する際に生じる力を検出するもので、この力は力積と運動量の関係を用いて計算できる。開発初期のものは衝撃力の鉛直成分を検出する方式であったが⁴⁾、現在では水平成分を検出するように改良されている。この改良により、検出板上の付着粉体による零点変動が生じなくなり、実用性が多に向上した。粒子の摩擦、反発特性も衝撃力に関係するので、検定を必要とするが、この流量計は非常にコンパクトであるうえに動特性も良く、粉体プロセスの連続制御用センサーとして世界各国で実用されている。

衝撃力は固気二相流の流量計測にも利用できるが⁵⁾、気体流速と粒子の平均速度を別の方法で測定しなければならないという問題がある。さらに、粒子が力検出部に衝突するためには十分な慣性が必要となる。

以上の衝撃式流量計に対し、コリオリ (Coriolis) 式流量計は間接式流量計であるにもかかわらず検定定数を必要としない。コリオリの力は回転場で生じるみかけの慣性力であり、Fig. 1 に示すように回転する円盤上に粉体が受け入れられてその周辺から排出されるとき、回転に逆う方向に作用する。回転軸に作用するトルクは次式で与えられる。

$$T_1 = \omega (r_2^2 - r_1^2) W \quad \cdots \cdots (3)$$

粉体は半径 r_1 から r_2 において半径方向にのみ流れるようにガイドが付けられている。ガイド翼は $r=r_1$ で粉体の流れが鉛直から水平に変化することによる衝撃力を受け、これによるトルク T_2 が回転軸に作用する。したがって全トルク T は次式のように回転角速度 ω と円盤の半径 r_2 および粉体流量だけで決まる。

$$T = \omega r_2^2 W \quad \cdots \cdots (4)$$

コリオリの力は回転場だけではなく、角周波数 ω の

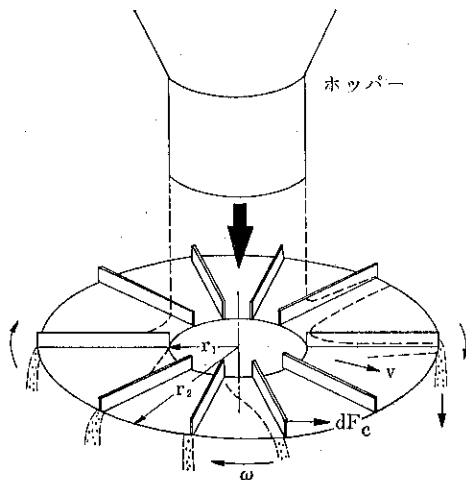


Fig. 1 コリオリ式流量計の原理

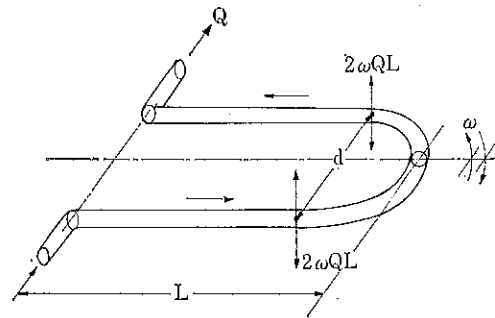


Fig. 2 振動U字管式流量計
(コリオリの力を利用、商品名マイクロモーション流量計)

振動場においても生じる。Fig. 2 に示すように、U字管が入口と出口を結ぶ直線を軸として振動しているとす。このU字管内を流体が流れると、次のようなコリオリの力が生じる。すなわち、流入する流れによるコリオリの力は $2\omega QL$ である。ここで Q は質量流量、 L はU字管の長さを示す。この力はU字管に対し振動とは逆方向 (振動を止める方向) に作用する。一方、流出口に向かう流れによるコリオリの力も $2\omega QL$ となるが、これは振動と同じ方向に作用する。この一対のコリオリ力により、U字管はねじられ、軸回りのトルクは $2\omega QLd$ で与えられる。ここで d は入口と出口を結ぶ距離である。いまU字管のねじり剛性を I_r とし、ねじり角を θ とすると、次式が成立する。

$$2\omega QLd = I_r \theta \quad \cdots \cdots (5)$$

したがって、ねじり角 θ を測定すれば質量流量 Q が求められる。

振動U字管はスラリーの流量計測に適用できるが、粉体一相流や固気二相流には適用できない。粉体流はU字管内につまってしまうし、固気二相流では非常に高濃度でない限りはコリオリの力がU字管に対して有効に伝達されない。

4. 差圧式流量計

粒子が空気輸送されるとき輸送管路に沿った圧力降下は一般に純ガス流のときより大きい。この付加的な圧力降下 (付加圧損) は固気混合比 (質量流量比) に依存する。粉体流量の測定には混合比と付加圧損の関係を知らなければならない。固気二相流の状態での気体流量を求めることが必要である。気体流量の計測にはオリフィスあるいはベンチュリーが適用できるが、オリフィスには摩擦などの問題がある。このため、ベンチュリー拡大管の方が好ましい。拡大管では気流は急激に減速されるが、粒子の方は慣性で飛行するので付加圧損を生じない。

流量計測誤差を伴わないような圧力タップ位置があるが⁶⁾、一般に次式で定義される慣性パラメーターの大きい系ほど誤差が小さくなる。

$$\Psi = \frac{\rho_p^2 D_p u_0}{18 \mu D} \quad [-] \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 ρ_p は粒子密度、 D_p は粒子径、 u_0 は入口での空気流速、 μ は空気の粘性係数、 D は入口内径である。慣性パラメーターは無次元の量であり、誤差は粒子径が大きいほど、また高流速ほど小さくなる。また入口径が小さいほど精度が上がる。

完全に発達した管内流では $du = dv = 0$ 、 $v/u = \text{一定}$ 、などの仮定が近似的に満たされるので、直管部での圧損 ΔP と拡大管での回復差圧 ΔP_a を用いて混合比が算出される。

$$m = K \frac{\Delta P - k \Delta P_a}{\Delta P_a} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 K と k 検定定数である。

直管部での差圧を大きくして測定感度を良くするためにのど部の長いベンチュリーを用いる形式もある⁷⁾。慣性パラメーターも大きくなり好都合であるが、のど部での速度変化に注意が必要である。管内にコア・スロートを挿入して環状の高速流をコアと管壁との間に作る環状ベンチュリーと呼ばれる流量計もあるが、コアの摩りや閉塞の危険性がある。

以上の固気二相流用流量計は混合比10程度以下の流れに適用されるが、さらに高濃度では差圧比が混合比に対して非線形の関数となり計測が困難である。今後、この

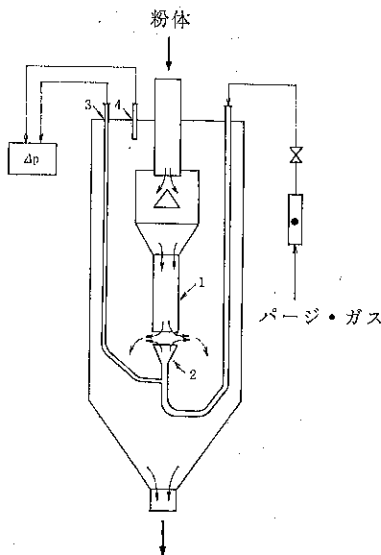


Fig. 3 ガスパージ式流量計

問題に関する検討が必要であらう。

差圧法は粉体一相流にも適用できる。Fig. 3 はガス・パージ式流量計を示す⁸⁾。この流量計は電気系統をプロセスから隔離することが容易であるので、電気絶縁部が放射線で損傷されるような原子炉関係でも利用できるという特徴がある。粉体流は整流パイプ(1)を重力により流下し、ノズル(2)から噴出するガス流によって減速されて吹き飛ばされる。噴出(パージ)ガスの流量は常に一定に保たれている。このとき、圧力タップ(3)と(4)の間の差圧は流下する粉体の流量に比例して増加する。なお、この原理に関しては、粒子の運動に基づくより詳しい検討が必要であらう。

5. 電気的方法

粉体流量の計測に用いられる電気現象には静電帯電、圧電効果、静電容量増加、およびマイクロ波共振がある。また、誘導荷電は金属粒子や液滴などの電気伝導性粒子の測定に用いられ、電磁誘導はスラリーの流量計測に利用される。

粒子の帯電は種々の粉体プロセスにおいて生じるが、その原因は粒子と粉体装置壁面との接触や衝突である⁹⁾。粉じんの流量計測に利用されるが、次のような問題がある。

- (1) 発生電流は接触する両物体の物性に依存する。表面の性質は衝突によって次第に変化し、したがって経時変化がある。
- (2) 発生電流は粒子径および衝突速度に依存する。
- (3) 発生電流は粒子の初期電荷に依存する。

静電帯電は局所的な粒子流量を求めるためにも利用できるが、圧電効果を用いるものは局所的な計測にしか使えない¹⁰⁾。圧電結晶が力を受けると分極して電圧を生じる。Fig. 4 のような構成にしておくと、粒子の衝突ごとに電圧パルスを生じ、粒子の局所フラックスを求めることができる。ただし、センサーに対する衝突効率を別に考慮しなければならない。これは式(6)で定義した慣性パラメータ Ψ の関数である(ただし、 D はセンサーの直径、 u_0 は接近速度など測定系に即した量を用いる)。

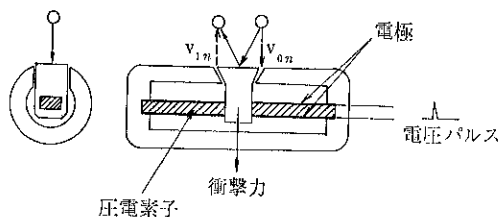


Fig. 4 圧電素子を利用したセンサ

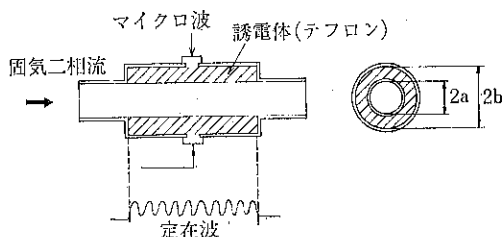
静電容量法は原理的に粒子の容積濃度を求めるものである。粒子の誘電率は空気のそれに比べて2~10倍程度大きいので、コンデンサーの容量が粒子によって増加する。しかし、混合比が10以下の二相流の濃度を静電容量法で求めるのは困難である。というのは、粒子の密度は空気のそれに1,000倍以上であり、混合比10でも容積濃度は0.01以下にすぎないからである。また、水の誘電率は空気の80倍であって、粒子の誘電率よりも10倍程度大きいので誤差の原因になるし、付着粒子の影響も受ける。

電磁誘導はファラデーの法則としてよく知られているもので、流体やスラリーの流量計測に広く用いられている。しかし、流体の比抵抗は $10^4 \Omega m$ 以下でないと、電位差の検出が困難である。スラリーの計測では粒子は一様に浮遊していることが必要であり、粒子濃度が10%を超えると粒子による磁束密度の増加があって感度が高くなるので再検定が必要となる。また、粒子が壁面に沈着すると誤差を生じるなどの問題がある。

マイクロ波共振を利用する固気二相流用流量計の原理を Fig. 5 に示す¹¹⁾。マイクロ波は波長 0.3~30 cm 程度の電磁波であり、振動数は $10^9 \sim 10^{12}$ Hz である。境界条件を与えてマクスウェルの式を解くと、種々の基本解がえられる。これらの基本解に対応する電磁波の伝播モードを固有モードといい、 TE_{mn} 、 TM_{mn} 、 HE_{mn} などの略号で表現される。TM モードは Transverse Magnetic モードの略で、電磁波の伝播方向には磁界成分をもたない。一方、TE モードは Transverse Electric モードを意味し、電磁波の伝播方向には電界成分を持たない。伝播方向に磁界成分も電界成分も持つ電磁波はハイブリッド・モードといい、HE モードはその一種であって電磁界は TE モードのそれで近似される。

Fig. 5 a) は内面をテフロンで被覆した円筒共振管で、マイクロ波の波長は管内を伝播する波が HE_{11} モードになるように決められている。一方、テフロンの外径と内径の比は管内に形成される電界が一様になるように決定してある。固気二相流がこの共振管内を流れると、

a) マイクロ波共振管



b) 測定系

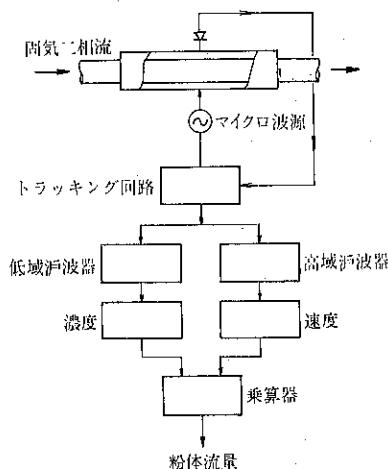


Fig. 5 マイクロ波式固気二相流流量計

共振振動数が小さくなり、その相対変化から容積濃度が求められる。さらに、共振管内には Fig. 5 a) に示したような定在波があって、これが空間フィルターと同じ作用をするので粒子速度も求められる。Fig. 5 b) はその測定系で、濃度と速度はそれぞれ低周波成分および高周波成分としてえられ、粉体流量はそれらの積として算出される。

この方法も、粒子の誘電率に依存しているので、静電容量法と同様の問題がある。

6. 統計的方法

前述のマイクロ波流量計は空間フィルター法による速度計測を行っているが、速度計測にはこの他相関法と呼ばれる統計的方法がある。すなわち、一対のセンサー（静電容量や静電気などの検出用）を輸送管路に沿って、間隔 L だけ離して設置しておき、検出される不規則信号 $f_1(t)$ 、 $f_2(t+\tau)$ から次式によって相互相関を計算する。

$$\phi_c(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T f_1(t) f_2(t+\tau) dt \quad \dots\dots\dots (8)$$

この相互相関 $\phi_c(\tau)$ は、遅延時間パラメータ τ がある値 τ_0 のときに最大値をとる。これは、二つの不規則信号の間に、時間 τ_0 の間隔で強い相関があることを示している。この原因は、固気二相流の濃度むら（クラウドと呼ばれる）であると考えられ、間隔 L を τ_0 で割ればその速度がわかることになる。

問題はクラウドが消滅したり変形したりすると、相関が得られなくなるはずで、間隔 L の決め方がはっきり

していない、この点に関する研究が必要である。

一方、濃度の計測については自己相関を用いる方法が報告されているが¹²⁾、理論的にすっきりしないところがある。しかし、濃度の計測は静電容量法など別の方法もあるので、必ずしもこの方法による必要はない。

7. おわりに

以上の他に、ユニオン・カーバイド社で開発された熱流束付加式流量計などがある。また、局所的な計測法としてはレーザーを用いた流速計がよく利用されている。しかし、プロセス内を輸送される粉体の全流量を計測する方法としての決め手はない。とくに、固気二相流の流量計測には、粒度や濃度が広い範囲に及ぶこともあって、不安が残っている。

今後は、すでに原理のわかっているものについても、詳しい検討を進めて行くことが必要であろう。

引用文献

1) Parkins, E. G. and J. B. Alcorn: Process Tech. Int., 11, 877 (1972)

- 2) Turner, G. A.: Trans. Instn. Engrs., 51, 1 (1973)
- 3) 林彬: “粉粒体のパルクハンドリング技術”, (日本粉体工業技術協会編), p. 387, 日刊工業新聞社 (1985)
- 4) 井伊谷鋼一ら: 粉体工学研究会誌, 3, 424 (1966)
- 5) Barth, W.: Chem. Ing. Tech., 29, 599 (1957)
- 6) Masuda, H., Y. Ito and K. Iinoya: J. Chem. Eng., Japan, 6, 278 (1973)
- 7) 井伊谷鋼一, 後藤圭司: 化学工学, 27, 80 (1963)
- 8) 鏡八留雄, 前田充, 八木英二: 化学工学論文集, 1, 327 (1975)
- 9) Masuda, H. and K. Iinoya: AIChE Journal, 24, 950 (1978)
- 10) Mann, U. and E. J. Crosby: Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. 16, 9 (1977)
- 11) 小林純夫, 宮原俊二: 計測自動制御学会論文集, 20, 529 (1984)
- 12) Beck, M. S. et. al.: Powder Technol., 2, 269 (1968)

特許一言メモ No. 72

——意見書・補正書の指定期間の延長——

特許及び実用新案に関し、特許庁長官あるいは審判長名による補正命令以外のものについて指定期間が延長された。これに伴って拒絶理由通知書に対する意見書及び手続補正書提出の指定期間が従来の40日から60日に延長されたもので、昭和60年4月1日起案のものから適用さ

れている。

これにより、特許実務関係者のスケジュールが少しはたて易くなり、従来より気持の上でも楽になった。

(特 許 室)

アメリカにおける固体混合の最近の動向

Recent Development in Solids Mixing in U. S. A.

L. T. Fan* Yi-ming, Chen* F. S. Lai**

1. 緒 言

固体混合は、工業において広く扱われている一般的なプロセス操作の一つであり、セラミックス、プラスチック、肥料、洗剤、ガラス、医薬品、加工食品、飼料、粉末冶金の製造などに広く用いられている。実際、この操作は、粉粒体を処理する場合にはほとんど常に行われている。製品の品質を満足するいく水準以上にしたり、熱、物質の移動や化学反応の速度をコントロールするためには固体混合の力を借りねばならない。

この総説では、過去10年間、より詳しく言えば、1976年から1985年までにアメリカで発表された混合及び混合プロセスのキャラクタリゼーションに関する研究に焦点を絞った。

1976年以前の研究については、Lacey (1954), Scott (1957), Weidenbaum (1958), Valentin (1965), Venkateswarlu (1966), Clump (1967), Gren (1967), Fan ら (1970), Chen ら (1970), Fan ら (1972), Fan ら (1974), Fan と Wang (1975), Cooke ら (1976), Rowe と Nienow (1976), Williams (1976) などをはじめとして、数多くの解説記事や文献紹介で広く報告されている。過去10年間の中には最近の総説 (Too ら (1978), Fan と Too (1982), Ghar と Gupta (1981),

Canoras ら (1985)) に含まれているものもある。

混合物を分類する場合、二成分系と多成分系に分けると都合がよい。混合プロセスは、ミキサを通過する固体流れの形式に基づいてミキサ中で固体のホールドアップ量が一定となる回分操作、固体が連続的に供給、排出される半回分操作、そして、ミキサへの固体の流入とそれからの流出が同時に行われる連続操作に分類される。

2. 混合のキャラクタリゼーション

この章では、二成分系と多成分系の粒子混合物のキャラクタリゼーションを扱った報告について述べる。

2.1 二成分系

混合の尺度を示す30以上の種々の混合指数が Fan ら (1970) によって紹介されている。混合指数の定義がこのようにいくつもあるのは、混合プロセスと生成する混合物の複雑な性質を記述することが困難なためである。Wang と Fan (1983) は、巨視的及び静的に定義された混合指数では混合物の微視的かつ幾何学的な性質を十分に記述することができないことを指摘している。彼らは、新しい混合指数によって Kenics 静止ミキサ中の横方向の混合について検討したが、この混合指数は、異った粒子間の接触点数に基づいたものである。接触点数に基づいた混合指数を決定するための試みには二種類ある。一つは、配位数サンプリングであり、もう一つはスポットサンプリングである (Too ら (1978))。もしその混合物中の種々の位置での連続的サンプリングが可能であるならば、離散 Fourier 変換 (DFT) は、サンプラーから集めたデータを解釈するのに使うことができる便利な直交変換である (Shin と Fan (1978))。彼らによれば、この指数で、ランダム混合物と規則的な混合物が

*Department of Chemical Engineering
Kansas State University
Manhattan, KS 66506, U. S. A.

**U. S. Grain Marketing Research Center
USDA, ARS
1515 College Avenue
Manhattan, KS 66502, U. S. A.

区別できるので、DFT エネルギースペクトルの最大成分が混合指数として採用できるとしている。また、Fick の拡散方程式に従う混合プロセスにおいて、分散の対数プロットと DFT エネルギースペクトルの最大成分とは直線関係になるということも理論的に確かめられている。

Fan ら (1984) は、二成分粒子混合物を含む三相流動床中の固体混合を実験的に考察した。彼らは、完全分離、部分的相互混合 (intermixing) 及び完全相互混合を含む混合状態を定性的ではあるが解析した。

2.2 多成分系

Wang ら (1977) は、固体混合の均質性の同定にパターン認識のための形態抽出法を適用した。混合物のパターンから抽出されたその特徴は、混合の均質性をキャラクタライズするために使われていた。Lai ら (1978) は、縞の数を増加することによって固体粒状物を含む縞模様の混合物の形成過程を検討した。彼らは、粒子の充填配列と縞模様に応じて混合物を四種類に分類した。

接触点数の概念は、完全混合状態での多成分固体混合に拡張されている (Fan ら (1979))。不完全混合状態での混合を記述するためのディリクレ型多項式モデルが、Too ら (1979) によって、提出された。このモデルのパラメータは、接触点数に基づいた混合指数と定義されている。

Chowhan ら (1981) は、濃度の異なる三種類の付着性の強い医薬品の混合結果と一定濃度の付着性の強い賦形剤のそれとを比較した。彼等はこのデータを、混合指数の立場から解析したが、ここで用いられた混合指数は、サンプルの標準偏差と許容可能な標準偏差との比として定義されるものであった。Partwardhan と Tien (1984) は、固液二相流動床内の固体粒子混合物における定常状態分布を計算する方法を提出した。

二成分及び多成分混合物のキャラクタリゼーションに関する知見について更に知るには、Too ら (1978) による総説が参考になる。

3. 混合プロセスのキャラクタリゼーション

混合プロセスは様々の方法で分類できる。たとえば、装置の機構に基づいて分類されることもあるし、操作方法に基づいて分類されることもある。この章では、固体流れの形式に基づいて分類を行うことにするが、これは便宜上、パッチ操作、セミパッチ操作及び連続操作に分かれる。

3.1 パッチ操作

Fan と Lai (1977) は、混合プロセスの動力学モデ

ルを、静止ミキサ、回転ドラムミキサ及び円錐形ホッパミキサのデータに適用した。本モデルにより、実験で得られた混合物の混合度をかなり適確に推定できるようなのである。本モデルのパラメータ推定値は、粒子径の差、ミキサの構造及び操作条件の関数である。Fan ら (1978) によると、ミキサは、二種類の基本的なミキサ、すなわち、対流型ミキサ (層状供給ミキサ) と拡散型ミキサ (probabilistic branching-model) から合成できるとしている。

回分式流動床内の粒子の横方向の混合については、Fick の拡散方程式に類似した次式がよく用いられる (Shi と Fan (1984))。

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D_0 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

ここで、

C = 固体濃度

x = 拡散方向距離

D_0 = 拡散係数

t = 時間

Shi と Fan (1984) は、ランダムウォーク理論を用いることにより、拡散係数 D_0 の相関関係を求めることを提出した。Kroger ら (1980) は遠心流動床内の混合速度と粒子の分布を考察した。半径方向、軸方向及び接線方向の混合速度が実験的に決定されたが、ここで半径方向とは空気流れの方向、軸方向とは回転軸の方向、接線方向とは流動床の半径方向に対して垂直な方向のことである。彼らは、軸方向の混合が Fick の拡散モデルにより適切に記述されうるという仮定を用い、混合係数により軸方向の混合速度を求めた。実験時の観察により、彼らは、気泡の動きが半径方向の混合を含めて主要な機構であるという結論を導き出した。

Fan と Shin (1979) は、Kolmogorov の拡散方程式を、水平ドラムミキサ内の非理想混合プロセスをモデル化するために適用している。また、Fan と Chang (1979) は、二次元ガス流動床内の粗大粒子の混合と偏析をキャラクタライズするために非定常ランダムウォークモデルを開発した。油谷ら (1983) は、粒子群の微視的な挙動に着目することにより、流動床内の粒子挙動の機構を考察した。確率過程における既知の Ornstein-Uhlenbeck 方程式と、いわゆる粒子速度に関する分配関数とを結合することにより、定常流動状態下での粒子拡散係数に対する解釈がなされてきた。Fan ら (1985) は、粒子の混合や挙動が回分式流動床に関して、従来より拡散挙動が Fick の拡散方程式やこれと類似の式で表わされてきたのに対し、拡散成分と対流成分の両成分によりキャラクタライズできる確率モデルを提案した。

Valenzuela と Glicksman (1984) は、600~800 μm のガラス粒子からなる二次元床内で気泡が自由発生する場合の固体混合の実験的研究を行った。彼らは、トレーサ物質として加熱粒子を用いて、垂直及び水平方向の粒子混合を研究した。

3.2 セミバッチ操作

固形物や粉粒体混合物に関する半回分混合操作は、製薬工業をはじめ種々のプロセス工業でよく用いられているが、この方面に関する研究についての報告例はほとんどない。

3.3 連続操作

粒子群の連続流れを伴う固体の混合は、次式に示される一次元対流混合式で記述されることが多い (Austin ら (1983), Shi と Fan (1985))。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \bar{U}_s \frac{\partial C}{\partial x}$$

ここで、

C = 固体濃度

D = 拡散 (混合) 係数

$\bar{U}_s$ = 粒子の平均的な流れすなわち線速度

この混合式は、ボールミル中の軸混合過程をモデル化するために用いられてきた。Shi と Fan (1985) は、連続ガス流動床内における固体の横方向混合係数をこれと等価な回分式流動床中のそれと関係づけている。

Hang と Hogg (1980) は、拡散混合モデルを用いることにより、斜面上を流れてる粉体の混合について、実験的に検討した。彼らは、拡散係数を一定とするモデルと剪断速度に正比例する拡散係数に関するモデルを線形結合したモデルにより、実際の混合過程が正しく記述できることを結論づけている。Nielsen ら (1982) は、小麦粉からなる流動床の混合と循環流動特性を検討し、混合性能を操作パラメータを変化させて解析した。

Lin と Gidaspow (1980) は、流動床中の固体混合に対して、新しい流体力学的取り扱いの試みを行った。彼らは気体と固体の挙動を示す式を線形化することにより、双曲線拡散式を導出したが、その解は、実験データとかなりよく一致するようである。

4. 考察及び結言

本報は、この10年間にアメリカでなされた固体混合に関する主な研究について述べた。そして、その多くが確率の概念を検討の手段として用いていることが分かった。これは、古典的な因果律に基づいた方法では混合過程固有の複雑な性質が表しにくいからであると考えられる (Too と Fan (1982))。実際、粒子混合系では微視的、巨視的のいずれでもない中間視的性質が重要なた

め、この傾向は今後も続くことであろう (Van Kampen (1981))。

たとえ固体混合操作を回分式、半回分式及び連続操作に分類したとしても、そのうちいずれか一つの操作から作られたモデルや見出された知見の中には、他の操作に適用できるものも含まれているのである。その一例として、回分操作における Fan ら (1978) の合成モデルが、半回分操作や連続操作に対しても等しく適用できることをあげておく。

引用文献

- Austin, L. G., Z. Rogovin, R. S. C. Rogers, T. J. Trimarchi : The Axial Mixing Model Applied to Ball Mills, *Powder Technol.*, **36**, 119-126 (1983)
- Canovas, Gustavo V. Barbosa, Jose Malave Lopez and Micha Peleg : Particulate Segregation, presented at the XI Interamerican Chemical Engineering Congress, San Juan, Puerto Rico, December 1-5, 1985
- Chen, S. J., L. T. Fan and C. A. Watson : Mixing of Solids — A Survey of Literature, Agriculture Research Services, U.S.D.A., ARS 35-51 (1970)
- Chowhan, Z. T. and Li-hua Chi and I-chang Yang : Mixing of Pharmaccutical Solids IV. Effects of Concentration and Material Properties on Multicomponent Mixing of Cohesive Powders, *Powder Technol.*, **29**, 251-256 (1981)
- Clump, C. : Mixing of Solids, in *Mixing, Theory and Practice*, Vol. II, ed. by Uhl, V. W. and J. B. Gray, Academic Press, New York, N. Y., 1967.
- Cooke, M. H., D. J. Stophens and J. Bridgewater : Powder Mixing—A Literature Survey, *Powder Technol.*, **15**, 1-20 (1976)
- Fan, Liang-Shih, S. H. Chern and K. Murogyama : Solids Mixing in a Gas-Liquid-Solid Fluidized Bed Containing a Binary Mixture of Particles, *AIChE J.*, **30**, 858-860 (1984)
- Fan, L. T., S. J. Chen and C. A. Watson : Solids Mixing, *Ind. Eng. Chem.*, **62**, (7) 53-69 (1970)
- Fan, L. T., S. J. Chen, and C. A. Watson : Solids mixing, I & EC Annual Review, ed. by V. W. Weekman, Am. Chem. Soc., Washington, D. C. (1972)
- Fan, L. T., F. S. Lai and C. A. Watson : Solids Mixing, I & EC Annual Review, ed. by Weekman, V. W., Am. Chem. Soc., Washington, D. C.

- (1974)
- Fan, L. T. and R. H. Wang : On Mixing Indices, Powder Technol., **11**, 27-32 (1975)
- Fan, L. T. and F. S. Lai : Application of the Mechanistic Kinetic Model to Data from Conventional Batch Solids Mixers, Powder Technol. **17**, 283-285 (1977)
- Fan, L. T., F. S. Lai, Y. Akao, K. Shinoda and E. Yoshizawa : Numerical and Experimental Simulation Studies on the Mixing of Particulate Solids and the Synthesis of a Mixing System, Computers and Chem. Eng., **2**, 19-32 (1978)
- Fan, L. T. and S. H. Shin : Stochastic Diffusion Model of Non-Ideal Mixing in Horizontal Drum Mixer, Chem. Eng. Sci., **34**, 811-820 (1979)
- Fan, L. T., J. R. Too, F. S. Lai and Y. Akao : Studies on Multicomponent Solids Mixing and Mixtures Part I. Estimation of a Mixing Index from Contact Number for a Homogeneous Mixture. Powder Technol., **22**, 205-213 (1979)
- Fan, L. T. and Y. Chang : Mixing of Large Particles in Two-Dimensional Gas Fluidized Beds, Can. J. of Chem. Eng., **57**, 88-97 (1979)
- Fan, L. T. and J. R. Too : Stochastic Analysis and Modeling of Solids Mixing, presented at proc. Intern. Symp. on Powder Technol., Kyoto, Japan (September 1982)
- Fan, L. T., J. C. Song and N. Yutani : Radial Particle Mixing in Gas-Solids Fluidized Beds, accepted for publication in Chem. Eng. Sci. (1985)
- Ghar, R. N. and P. Sen Gupta : Mixing of Solids in Fluidized Bed, Inst. of Chem. Eng. (Symp. Ser. n 65 ; EFCE Event n 241), Rugby, England, S2. I. 1.-S2. I. 13., 1981
- Gren, U. : Solids Mixing, Brit. Chem. Eng., **12**, 1733-1737 (1967)
- Hwang, C. L. and R. Hogg : Diffusive Mixing in Flowing Powders, Powder Technol., **26**, 93-101 (1980)
- Kroger, D. G., G. Abdelnour, E. K. Levy, and J. C. Chen : Particle Distribution and Mixing in a Centrifugal Fluidized Bed, Fluidization, ed. by J. R. Grace and J. M. Maten, pp. 349-356, Plenum Press, New York (1980)
- Lacey, P. M. C. : Development in the Theory of Particle Mixing, J. Appl. Chem. **4**, 257-268 (1954)
- Lai, F. S., L. T. Fan and Y. Akao : The Convective Mixing Process and Striated Mixtures -An Analytical Study and Computer Simulation of Mixtures of Particulate Solids and the Structure of Solid Mixtures, J. Powder and Bulk Solids Technol., **2**, 38-52 (1978)
- Liu, Y. and D. G. Dasgow : Solids Mixing in Fluidized Beds -A Hydrodynamic Approach, Chem. Eng. Sci., **36**, 539-547 (1981)
- Nielsen, R. H., N. Harnby and T. D. Wheelock : Mixing and Circulation in Fluidized Beds of Flour, Powder Technol., **32**, 71-86 (1982)
- Patwardhan, V. S. and Chi Tien : Distribution of Solids Particles in Liquid Fluidized Beds, Can. J. of Chem. Eng., **62**, 46-54 (1984)
- Rowe, P. N. and A. W. Nienow : Particle Mixing and Segregation in Gas Fluidized Beds-A Review, Powder Technol., **15**, 141-147 (1976)
- Scott, R. A. : Mixing of Solids, in Chemical Engineering Practice, Vol. 3, ed. by Cremer, H. W. and T. Davis, Butterworths, London, 1957
- Shi, Yan-Fu and L. T. Fan : Lateral Mixing of Solids in Gas-Solids Fluidized Beds with Continuous Flow of Solids, Powder Technol., **41**, 23-28 (1985)
- Shi, Yan-Fu and L. T. Fan : Lateral Mixing of Solids in Batch Gas-Solids Fluidized Beds, Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev., **23**, 337-341 (1984)
- Shin, S. H. and L. T. Fan : Characterization of Solids Mixtures by the Discrete Fourier Transform, Powder Technol., **19**, 137-146 (1978)
- Too, J. R., L. T. Fan and F. S. Lai : Mixtures and Mixing of Multicomponent Solid Particles-A Review, J. Powder Bulk Solids Technology **2**, 2-8 (1978)
- Too, J. R., R. M. Rubison and L. T. Fan : Studies on Multicomponent Solids Mixing and Mixtures II. Estimation of Mixing Index and Contact Number by Spot Sampling of a Multicomponent Mixture in a Incompletely Mixed State, Powder Technol., **23**, 99-113 (1979)
- Valetin, F. H. H. : Mixing of Powders and Particulate Solids, Chem. Process Eng., **46**, 181-187 (1965)

- Van Kampen, N. G.: Stochastic Processes in Physics and Chemistry, pp. 57-60, North-Holland, N. Y., 1981
- Valenzuela, J. A. and L. R. Glickman: An Experimental Study of Solids Mixing in a Freely Bubbling Two-Dimensional Fluidized Bed, Powder Technol., **38**, 63-72 (1984)
- Venkateswarlu, O.: Mixing of Solids, Indian Chem. Eng., **8**, 104-106 (1966)
- Wang, R. H., F. S. Lai and L. T. Fan: Application of Pattern Recognition Techniques to Solids Mixing-Feature Extraction, Computers and Chem. Eng. **1**, 171-181 (1977)
- Wang, R. H., L. T. Fan and J. R. Too: Multivariate Statistical Analysis of Solids Mixing, Powder Technol., **21**, 171-181 (1978)
- Wang, R. H. and L. T. Fan: Contact Number as an Index of Transverse Mixing in a Motionless Mixer, Particulate Sci. & Technol., **1**, 269-280 (1983)
- Weidenbaum, S. S.: Mixing of Solids, in Advances in Chemical Engineering, Vol. 2, ed. by Drew, T. B. and J. W. Hoopes Jr., Academic Press, New York, N. Y., 1958
- Williams, J. C.: Continuous Mixing of Solids, A Review, Powder Technol., **15**, 237-243 (1976)
- Yutani, N., and L. T. Fan: Mixing of Randomly Moving Particles in Liquid-Solid Fluidized Beds, Powder Technol., **42**, 145-152 (1982)
- (訳 河原 正佳*)

特許一言メモ No. 73

——出願書類等にコピーの使用が可能となる——

事務用機器の開発・改良及び普及が著しい状況に鑑み、タイプライターその他の印字機若しくは複写機によって作成された出願書類等については、提出された書類の耐久性及び明瞭性が現実に損なわれていない限り、昭和60年6月1日よりそのまま受理されることになった。

そのため、施行規則様式備考の所要の改正が図られると共に、書類の耐久性及び明瞭性に係る方式審査基準が定められることになった。この方式審査においては、以下の要件がある。

願書及び請求書等（商標を表示した書面を除く）並びに特許若しくは実用新案に係る明細書及び図面が次の各号に定める要件を満たすものであればそのまま受理し、その要件を欠く場合、又は手続の進行中にその要件を欠

くものとなった時は、その補正を命じる、というもの。

但し、鉛筆書のもの是不受理。

①黒色で記載されていること。

②閱讀に支障がない程度に鮮明であること。

③図面以外の書面にあっては、手書されたもの若しくはその複写物でないこと。但し、化学式・数式・構造式・記号若しくはこれらに類する記載事項、又は微細な字句訂正であって楷書で明瞭に記載されたものはこの限りでない。（鉛筆書きの図面のコピーはダメ。）

なお、現実にはじみ・かすれ・変色若しくは退色していないこと、又は毀損若しくは汚損されていないこと。

（特 許 室）

* 佛細川粉体工学研究所
（〒573 枚方市招提田近1-9）
Tel. (0720) 57-3721

粒子のキャラクターゼーション

—丸い世界の不規則粒子—

Particle Characterisation—Irregular Particles in a Round World.

B. Scarlett*

1. はじめに

最近では粒度測定に多くの人々が関心を寄せ、またこれに対し多大の努力が払われている。この粒度測定については多数の刊行物が出版され、会議、委員会も活発に催され、また新しい装置が次々に報告されている。プロセス工業から生まれる大多数の生産物は粉体、ペースト、スラリー、乳剤の形をしており、この場合製品の品質は粒度分布に依存している。

エレクトロニクスや原子力などの新しい産業では、粒子状混入物の制御が活発に行われている。また医療分野では微小粒子の利用が重要であることがゆっくりではあるが認識されてきており、おそらくは最も困難ではあるが今後利用する価値の大きい分野になるであろう。粒度測定には正確さと精緻さが必要であり、対象とする粒度の範囲は最小 $10\text{\AA}$ から最大数 cm の大きさまでその差が 10^7 に及ぶ。現代の工業技術は複雑になってきているため、次第にオンラインでの測定や異なった状況の下での測定が必要となってきている。また測定場所が違っても比較のできる測定の必要なことが、商業的には勿論のこと、法律的にも重要となっている。

以上のようなことから、本報告では個々の開発状況を詳細にレビューすることが目的ではなく、このような流れが主としていずれの方向を指向しているのかという見通しについて述べることにする。ここでは重要な三つのトピックスについて検討するが、これらは時として互いに無関係ではなくなるものである。

(a) 測定原理と測定技術の発展における相対的な重要

性

(b) 球相当径、その他の径、及び形状因子の概念

(c) 粒度測定技術の標準化とキャリブレーション

本報告では過去20年間にわたってなされてきた開発状況と今後20年間に生まれると推測される内容について述べる。

2. 測定原理と測定技術

最近の各種測定装置の展示会を訪れば誰でも納得できることであるが、展示されている装置は20年昔と比べると数が増え、精緻化、自動化が進み、価格が高くなっている。それにも拘らず、原理はあまり変わっておらず、むしろエレクトロニクスとデータ処理が進んでいる点が目につく。

粒度測定に関する殆どどの刊行物や調査では、測定技術を同一の物理の原理——特に粒度測定で採られる原理——ごとにグループ分けしている。このように分類すれば通常用いられる殆どどの測定技術が整理できるものの、次第にこのように分類することが困難になってきている。まず第一の理由として、例えば光散乱を原理として用いる方法では同一のパラメータが必ずしも測定できるとは限らないことがあげられる。更に重要なことは、今後最も発展すると思われる方法は幾つか異なった物理原理を一つの装置の中に組み入れるため、そう簡単には分類できなくなるということである。しかし、基本的には用いることのできるメカニズムはごく少数であるが、用い方が多数あるということは事実である。更に検討するため種々の粒度測定システムを Fig. 1 のように分類する。

本表は直接観察、顕微鏡法、物理挙動及びこれと粒子径との関係で分類してある。顕微鏡法を用いれば粒子径と粒子形状の詳細がわかるのに対し、その他の方法では各粒子の単一のスカラー量である相当径しか求められない。

*Professor of Particle Technology
Laboratory of Chemical Technology
Technische Hogeschool Delft
Julianelaan 136, 2628BL Delft
The Netherlands

PARTICLE SIZING METHODS.

		1965	1985	2005	
Particle behavioural	mechanical				sieving
	light				light scattering
	field				electrical sensing zone
	fluid				sedimentation
Direct	microscope				scanning

Fig. 1 Most common particle size methods used over the past twenty years.

い、殆んど全ての粒子挙動は粒度分布に依存しており、たいていは粒度分布の測定に用いられてきた。実際にはこの関係は単純ではないので、真に有用とは言えない。粒度測定は殆んどの場合希薄濃度下で行われるが、これは粒子間の相互作用を防止し、粒子と流体、光ビーム、電界及び静電界、力学的障壁などとの相互作用を利用したものである。このような分野の各々における発展状況を検討することは有益である。ここで主要な点を二つあげると、

- (i) 測定技術が進歩するかどうかは、粒子径と粒子の挙動の関係が理論的に結びつくかどうかにかかっている。仮に、この理論が厳密に球形粒子にしか適用できないのであれば、得られた結果は球相当径で解釈しなければならない。従って、この場合、キャリブレーション用試料には、球形粒子を用いなければならない。
- (ii) 顕微鏡法を用いれば、球相当径で得られるよりも更に複雑なパラメータを求めることが可能である。顕微鏡法で得られる各パラメータが粒子挙動にどのように影響するかがわかってはじめてこの方法が使えるといつてよい。従って、もし適当な理論があれば、間接的な方法を用いてこのようなパラメータを容易に測定することができるであろう。

2.1 粒子の直接観察

光学顕微鏡や電子顕微鏡で直接粒子を観察すれば、直ちに豊富な知見が得られ頭の中で様々の解釈ができる。問題はこの観察によって得られた結果が定量的に表現可能かどうかということであるが、そうなることが望ましい。一般に最近のイメージアナライザーでは粒子表面の各点の位置に関する情報が得られ、数値解法により粒子挙動が解析できる。電子プローブ法を用いれば、異なった粒子の化学組成はおろか同一粒子の異なった場所での

化学組成がわかる。このようにデータを収集し処理するためにはかなりの努力が必要であり、今後20年間は間違いなくこの方面の検討に注力されることであろう。今後のテーマとしてこの進歩に期待したい。

二次元像を測定することにより面積と長さが求まる。単一粒子の場合には二次元投影面積だけが測定できるが、顕微鏡法の用いられた初期の頃にはこのパラメータしか測定されず、面積を球相当径でのみ表していた。もう一方の長さについてみると、粒度測定器の中には最大径、最大 Feret 径、外接円の最大径などが求まるものもあるが、不規則形状粒子の場合、この長さを一義的に決めることは明らかに困難である。このような考え方を拡張すると各粒子について一つ以上の長さを測ることができる。これは例えば最大径と直交する Feret 径や内接円の最大径などがそうである。同様に、各長さの個数の測定にも拡張でき、例えば Feret 径の分布とか、Martin 径の分布なども求めることができる。

Feret diameter

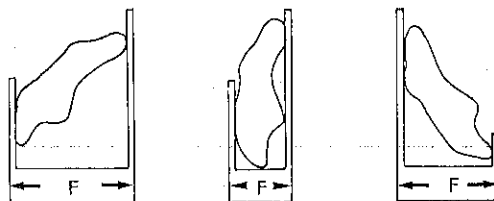


Fig. 2 Feret diameter -an early example of a statistical diameter.

以上のような初期の測定の中にはいくつかの原理が採り入れられていたが、これらは進歩した現代のイメージプロセッサの中にも依然として用いられている。興味深いことに、このような装置のプログラムは以下のような従来手作業で測定していたパラメータを測定するためのものである。

- (a) パラメータとしての投影面積の測定
- (b) 直交する二つの長さの測定
- (c) 外周の測定

初期の自動走査装置は切片長さを測定するもので、これはある一方向でのコード化された長さの全体分布をもとにしたものである。粒子の切片長さの総数は粒子面積に比例し、この切片の総数はFeret 径のそれに比例する。

更にこの概念を拡張すると、各粒子のコード化された長さの数が測定できる。これらの全コード数は等間隔にとられ、種々の場合の分布と粒子状態、粒子配列、粒子間間隔などと関係づけられる。粒子投影像はランダムに選んだ粒子群について求める方が都合がよい。コード数

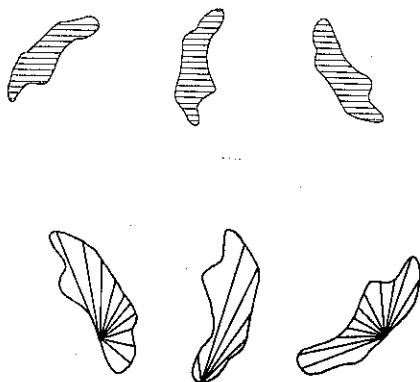
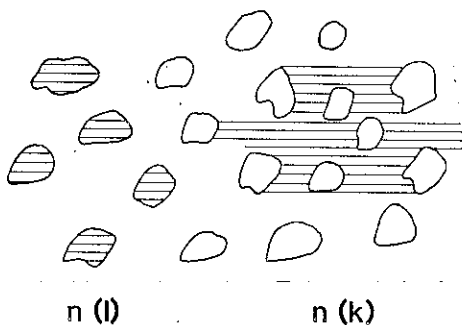


Fig. 3 The total chord distribution -generated in different ways.

Particle and pore chords.



$$\frac{\bar{l}}{\bar{k}} = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}$$

Fig. 4 Chord distributions of particles and of pores.

と粒子配列の三次元特性との関係はステレオロジーの問題である。しかし、やや理解しにくいことではあるが、このようなシステムの主要部分はいずれも粒子そのものではなく、計算機の中でコード化された数値となっている。

コード化された種々の長さを測定する方法が開発されている。最近よく用いられている二つの例をとりあげてみよう。その一つは粒子形状の Fourier 記述でこれは特に Meloy や Boddow によって提案されたものである。この記述を用いると、粒子外周の形状を等間隔の極座標で表すことにより Fourier 級数で表すことができる。ただし、粒子の形状が一義的に決定できるのは、Fourier 級数が完全に求まった場合のみに限られる。半径座標を平均値で表すと、この分布は粒子の長さに関する分布となり、もはや特定のものではなくなる。もう一つの例は、Mandelbroot と Kaye の提案した次元分割

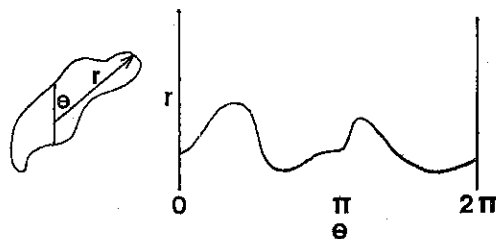


Fig. 5 Fourier description of particle size and shape.

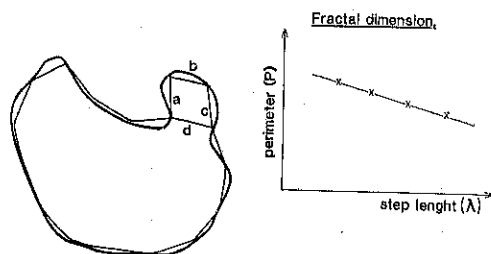


Fig. 6 Fractional distribution of a particle.

Picture point logic.

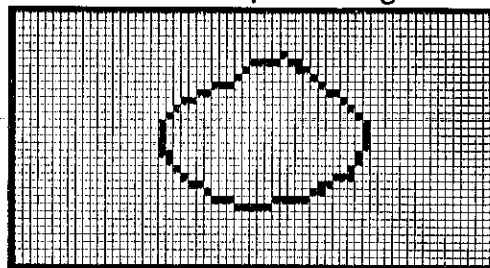


Fig. 7 Picture point logic.

の概念であって、これは各粒子の外周を 1 ステップあたりの長さを変化させて順次移動しながら測り、このステップ長さの関数としてコード化された長さの総数をプロットして求めるものである。

最近の測定装置は画素論理に基づき、多機能のものが多くなっている。一般に、粒子外周の任意の点の座標や、その他の因子が記録できるようになっている。実際には収集した全てのデータが用いられることはまれである。あらゆる問題に対しそうすることは必ずしも必要ではないが、このような点こそが粉体工学の問題のジレンマを端的に物語っているといえる。粒子の配列や形状—例えば球—がわかれば、正確な解析解を求めることによって粒子形状と粒子挙動の関係が得られる。同様に、不規則配列についても数値解法は有効である。しかし、このような解は一義的ではない。もう一つの方法は、粒子挙動やバルク特性と粒子あるいは粒子の配列の平均値

との関係を統計的に求めることである。勿論、これこそが粒度分布を測定する目的であるが、我々が直面している問題は球相当径の分布だけで両者を関係づけるのに十分であるかということと、この分布で粒子挙動が記述できるかということである。

曲率、異方性、表面構造のようなパラメータは粒子挙動を制御する因子ではあるが、その正確な関係は不明で経験的にしか求まらない。今日ではこのようなパラメータを直接測定できるようになったが、不規則形状と粒子挙動を関係づける理論に乏しいのが事実である。逆に言えば、このような理論が発展してはじめて上で述べた諸パラメータを容易に求められる方法が開発できるということである。現在のところ殆んど理論は球形粒子との関係を述べたものであり、従ってそれらは球相当径の概念をもとにしたものに過ぎない。球形粒子の寸法は一つの値だけで定義できるから、統計的に取り扱うためにはこのような寸法の分布として粒度分布を導入すれば十分である。粒度分布は、球相当径に付随した概念であり、不規則な粒子配列を表す理論を進展させる際にはこの概念にのみとらわれる必要はないということをよく認識しておくべきであろう。

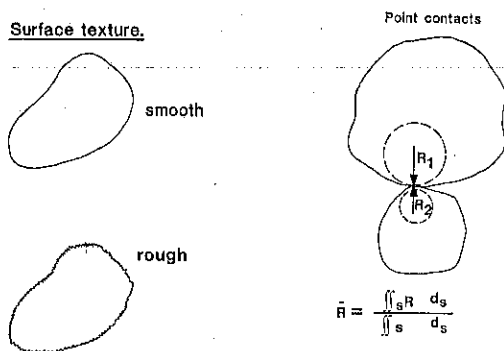


Fig. 8 Curvature and texture are important parameters.

2.2 球相当径の測定

粒子径に依存した粒子挙動を粒度測定の一方法として用いるためには、粒子挙動と粒子径の関係を示す適当な理論があればよい。しかし、種々の理由により利用できる理論には制約が加わる。まず、各粒子が相互に作用を及ぼしあうことなしに独立して動けるよう一般に希薄濃度下で測定が行われている。ただし比表面積、ガス吸着、空気透過はこの意味では例外といえる。このパラメータの測定では球形の仮定は不要であり、粒度分布ではなく平均値のみ求めればよいことに留意すべきであろう。次に、装置の応答が簡素であること、すなわち特定

の応答が一つの粒子径とのみ対応することがあげられる。実際には殆んどの測定技術は Fig. 1 に示した少数の物理原理に基づいているのである。本図から観察、理論、キャリブレーションにより単一球の挙動を正確に記述できることがわかる。

沈降法による粒度測定は、定常沈降過程において容器内に濃度勾配が生じるという伝統的な見地から行われる。この濃度は各時間毎に容器内の固定位置において沈降距離の関数として測定される。本方法ではふつうキャリブレーションは行わず、測定されるパラメータは沈降速度球相当径である Stokes 径である。しかし、往々にしてこの方法は Reynolds 数の高領域で用いられ、この場合には等価な球の直径は小さくなる。更に、装置によれば粒子の沈降距離を測定する際、粒子が加速したり減速したりして Reynolds 数が広い範囲に及ぶことがある。この相当径は測定時の条件と、球形粒子の挙動に關する法則に依存する。

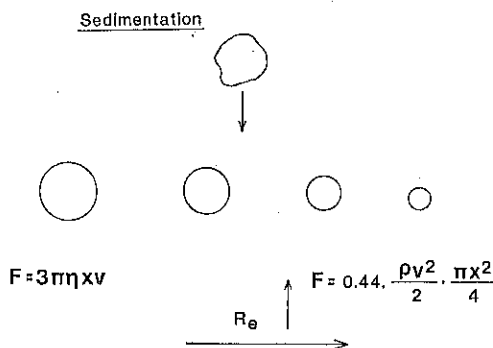


Fig. 9 The equivalent settling diameter depends on the Reynolds number.

光散乱法の場合には、実際の物理挙動と球の直径が結びついている。入射光の波長と関係づけることにより粒子径は Rayleigh 散乱、Mie 散乱、回折などで求められる。球形粒子の挙動はすべての領域にわたって正確に解を求めることができるが、この依存性については複雑であり粒子体積から投影断面積まで考えねばならない。

不規則形状粒子の場合、等価性は形状だけでなく、屈折率、波長などでも変わる。更に悪いことに、この等価性は装置形状それ自身や受光部の設置される角度によって変わる。

電界利用の代表例として電気抵抗法がある。この方法では球相当径は一義的に決まるが、何故そうなるかという点は興味深い。この装置では応答が粒子体積に比例し、形状の影響を比較的受けにくいように工夫されている。勿論、電界やその他の Laplacian 場を用いる装置にこの方法が常に適用できるとは限らず、この効果をう

まく利用できるようにしたのはコールタカウンタ だけである。そこで、他の装置でこれと同じパラメータを同じような方法で測定できないかという疑問が生じる。Stokes 径は、体積相当径と抵抗相当径からなる複合パラメータであり、この結果はしばしば体積相当径に類似のものとされる。体積相当径と抵抗相当径を複合パラメータとしてではなく別々のパラメータとして測定できるように装置を再設計できないものであろうか？ 答は可である。

Andreason が最初に考案した キャリブレーションの 手順を用いた BCR プログラムの篩分法のキャリブレーションの進展の中にこのことが示されている。

まず、篩を通過する粒子を回収しその体積径を 求める。この粒子を用いて篩粒子径と体積相当径の両方が測定できる。このように篩を用いることは二つの利点となるのである。まず、すべての装置を用いて同一のパラメータである体積相当径を測定し、このパラメータで粒度分布を定義する。そして、測定原理にかかわらずすべての装置を用いることにより同一の結果が得られるであろうか。次に第二のパラメータとして何を用いるとよいであろうか。形状係数が二つの長さ——しばしば二つの相当径——の比として定義される。従って粒子形状分布は、分布の皮相として示される篩分手順により求められる。

今後の進歩の状況を推測すると、体積相当径による粒度分布がより一層測定され、形状分布の知見を与えるいくつかの等価な因子が考えられることになるであろう。

根底となっている物理原理のことをよく考えて測定技術を選択することは極めて重要であり、これは適正なキ

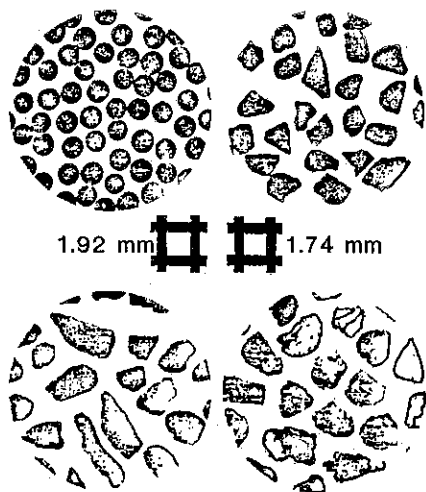


Fig. 10 A sieve may be calibrated by the near mesh particles.

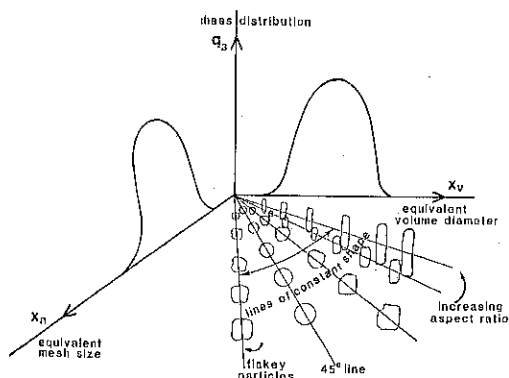


Fig. 11 A shape factor is the ratio of two sizes, distributed as a surface of those two sizes.

ャリブレーションが必要であることと同じほど重要である。その前に考えておかねばならない粒度分布の測定方法がある。キャラクタリゼーションを行う場合、粒子径パラメータだけでなく、粒度分布パラメータも選んでおかねばならない。しかし粒度測定でキャリブレーションを行う場合には、粒度分布パラメータだけでなくこれが記録される様式にも注意する必要がある。文献によっては粒度測定の分類が異なる場合もあるが、粒子の個数を計測する特殊な方法である流体走査法では信号を区別して連続した曲線を描き出し、サンプル粒子を物理的に離散小区分に分割することが行われる。この分類は実は分布関数を求める方法に基づいたものである。測定装置で得られる実際のサイズパラメータがより再現性が良く機能が豊富であれば、この分布関数も更に重要となる。この分布関数が求められる様式によってキャリブレーションの方法も決まってくる。

3. キャリブレーション

粒度測定でキャリブレーションを行う際に三つの基本的な概念がある。まず、第一にそのプロセスのモデルを仮定し測定技術を決める。第二に直径が既知である球を用いて測定装置のキャリブレーションを行う。第三に測定すべき粒子を用いてキャリブレーションを行う。恐らく篩分法はこれら三つの原理を有する唯一の方法であろう。第一の方法にはキャリブレーションはない。測定技術の中には装置の性能と球形粒子の挙動とを結びつけたモデルもあるが、この場合には粒子のキャリブレーションは不要である。篩分法では、これは粒子が通過する四角い網目の空孔を相当径として測定することになる。このような方法を用いる方法としては他に沈降法やレーザ回折法などがある。いずれの場合も球形粒子が容器内で

移動する様式が仮定され、沈降あるいは回折の理論的法則に基づいて球相当径が測定される。

第二のキャリブレーション法では直径が既知である球形粒子を用いて装置の応答性を試験する。節の場合にはキャリブレーションにより目標値と実際の値の間の差を測定する。このような差異は例えばメッシュ網の伸張の程度とか縦線と横線の構成の差によって生じる。球形粒子をレーザ回折装置や沈降法に適用すれば、仮定した場合と実際の場合の両挙動が比較できる。レーザ回折装置の測定ではあらかじめ回折パターンを解析する計算機プログラムの能力を試験しておくことが必要であり、一方、測れるかどうかのポイントである。いずれにおいても、球形粒子の粒径は各々独立した方法で既に求められてきており、解析方法の総合性能を評価する方法として使われつつある。従って、このサンプルは標準試料(reference material)として用いられている。これらいずれの装置も単一粒径の球形粒子群のサンプルには応答性が悪いようである。

電気抵抗法や Mie 散乱エアロゾル測定装置のような流体走査法には特にキャリブレーション用として、球形粒子が用いられる。このような装置の応答性を理論的に記述することはできるが、実用的ではない。球形粒子を用いて装置形状と電子的な増幅で決まる装置定数が決定できる。不規則形状粒子がこのような装置を通過すると、球と同一の粒子径を有すると考えられる粒子によって同一の応答が得られる。粒子の実際の挙動により等価な値が得られる。標準試料はふつう分布が連続している方が便利であるが、一方、キャリブレーション用試料は粒子径が球状粒子に近いものが都合がよい。篩分を例にとると、球形粒子試料の全体的な分布は標準試料によってすべての手順が試験でき、メッシュ寸法に近い粒子を集めると篩の有効メッシュ径のキャリブレーションが行える。最初の場合、球と等価であることは粒子挙動の理論的記述によって表されるもので、二番目の場合には実際に行った実験との比較で表される。いずれの場合も、粒子形状に関しては何も推定できない。

キャリブレーションに対する第三のアプローチは球形でない粒子を使用し、以上の概念を測定すべき粒子に拡張することである。独立した方法により粒子径が測定できない限りこの方法は不可能である。篩分法の場合には BCR 委員会の用いた粒子の計測と重量測定の手順により粒子の体積相当径が求まる。この結果、運動相当径と体積相当径の二つの粒子径が測定できることになる。従って、形状係数が定義できる。既に述べたように二つの粒子径パラメータで分布を示すと最も好都合である。しかし、この粒子径の等価性には差があることを理解して

おかねばならない。球の直径と体積の関係を与える方程式は他の運動方程式と同じように用いられている。一方、球の体積は測定条件や装置形状で変わらないパラメータである。そしてこれは粒子形状とは無関係な粒子固有の特性値であり、長さ標準である直径と同じぐらい粒子の大きさに関する特徴をよく表すものである。体積を相当径に置きかえるのは頭の中で理解しやすい測定の“ものさし”を生み出すためだけである。なお、球形粒子の仮定は必ずしもこの目的のためだけではない。

はじめの二つのキャリブレーション法では粒度測定に制限を加え、球形粒子の挙動の模式化を行っている。この場合、粒子は理論的な球として挙動するということが仮定されているため、球形粒子で起こり得ないような挙動はまったくモデル化できない。第二の場合には、直接実験により粒子の挙動を求めることにより等価性を求めるので、球形粒子では表せない不規則形状粒子の挙動の測定は困難である。このような粒子挙動の簡単な例として不規則形状粒子の沈降があるが、この場合、必ずしも均一速度で沈降するとも限ってはいない。また、不規則形状粒子の回折パターンが軸対象にならないこともその一例である。キャリブレーションの第三の方法でのみ、粒子の体積相当径を測ることにより粒度分布が求まる。

3.1 キャリブレーション用試料

最近、キャリブレーション用の試料として用いられる物質を作ることがさかんに行われている。米国では、国立標準局(NBS)が単分散の球形ラテックス粒子の頒布を行っている。粒度の分布幅をできるだけ小さくするために多大の努力がなされており、中には宇宙で作られるものもある。ヨーロッパでは、単分散のラテックス粒子は Community Bureau of Reference (BCR) で頒布されており、また相当体積径で粒子の大きさを保証した種々の粉砕石英粉も頒布されている。かなりの量の標準粉体が日本の日本粉体工業技術協会で頒布されており、米国では Duke Standards が商業ベースで取扱っている。このようなサンプルを用いる場合には、用途に応じてキャリブレーション用試料が標準(reference)試料用か、試験用ダストかの区別をはっきりつけることが必要である。同じサンプルがいずれの用途にも使われることがあるが、興味の点は異なっている。

キャリブレーション用試料はある測定と別の測定とを橋わたしするものである。粒子径が定義しやすく、その大きさがどれか一つの測定法だけで簡単に求まるという理由から球形粒子がよく用いられている。代表径という一つの数値のみで表せるため、キャリブレーション用試料として均一径の粒子が通常採用されている。この意図

するところは、電気抵抗や光散乱のような測定技術に関して装置を一定にできるところにある。従って、装置の応答が粒子径に比例するという仮定をしておかねばならない。このような試料は個々の粒子を計測するような装置のキャリブレーション、例えば流体走査法のような装置に適している。従って、均一径試料は、全試料をもとに粒度分布を決定するような方法、例えば篩分法、沈降法、回折法にはあまり役立たない。一方、標準試料 (reference material) を用いる場合には、前もって装置のキャリブレーションと操作技術者、各機器、測定手順などが問題ないか点検しておかねばならない。もし希望する値が出ないようなら、これらのうちいずれかに誤りがある。第三のタイプの試料は試験ダストとして作り貯えられている。この試験用ダストは装置やプロセスの性能を評価するために用いられるもので、例えば乾式及び湿式集塵機におけるダストの集塵性能の評価に利用されている。このようなダストは一般に成分ごとにあまり細かく分類せず、例えば AC Fine ダストとか AC Coarse ダストのように区分されるだけである。試験用ダストと標準試料の大きな差は前者が測定方法よりも実際のプロセスに関心があるということである。

4. 球相等径

球相当径という概念は粒度測定の問題としては今日では“すみ石”であり、今後もそうであろう。基本的な粒度分布である体積相当径のそれを用いれば、たいていの粉体の品質管理と再現性については十分にキャラクターゼーションが可能である。しかし、今日問題とされているのは、球形粒子の挙動しか表せない理論とキャリブレーション用試料として球形粒子を用いても、当然のことながら球形粒子の挙動を表すだけのキャラクターゼーションしか行えないということである。球形粒子はいずれの方向にも対称であるため、実際の粒子の特性を表す際に用いられる高次テンソルによる表現のしようがなくスカラー値のみの記述となってしまう。

粒子形状のキャラクターゼーションへのアプローチは更に基本的な考え方である。容易に想像したり定量化で

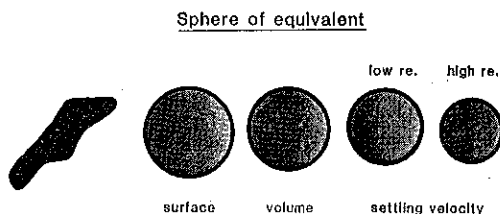


Fig. 12 A particle may have an indefinite number of equivalent diameters.

きる相当球と実際に観察できる複雑な形状の間にはどのような関係が存在するのであろうか。ここで一例として沈降速度球相当径を考えることにするが、これは次の Stokes の法則で表される。

$$F = 3\pi\mu dv$$

Brenner は、粒子挙動が一般的に記述できれば、粒子が運動する際の抵抗は 3 個の抵抗に関するテンソルで表せるとしている。従って

$$\mathbf{F} = -\mu \mathbf{K} \mathbf{v}_0 - \mu \mathbf{C} \mathbf{w}$$

$$\mathbf{T} = -\mu \mathbf{C} \mathbf{v}_0 - \mu \mathbf{Q}_0 \mathbf{w}$$

Stokes の法則はこれらのうちの一つの特殊な場合であって、球形粒子にのみ適用できる。

Hydrodynamic resistance tensor.

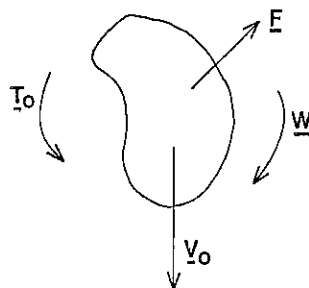


Fig. 13 Particle resistance tensors due to Brenner.

不規則形状粒子の場合には回転しながら沈降したり、垂直に沈降しなかったりする。従ってこのような簡単な例ですら球形粒子はいずれの点にも等価であるとは言えないのである。また、たとえ球形粒子の場合であっても、あらゆる挙動がスカラーで表せるとは限らないので、平均的なスカラー値ですら求めることはできない。例えば、充填層を考えると、空隙構造には必ず異方性が生じる。透過流れに関する Darcy の法則を一般的に表すと

$$q = -K \Delta P / \mu L$$

粒子 1 個あるいはその全体の形状が 1 個や 2 個のスカラーでうまく表せることはなく、多くの特性は正しい形で定義したベクトルやテンソルで記述せねばならない。粒子形状は位置ベクトル $\mathbf{r}$ の軌跡であり、粒子形状と粒子挙動の関係はあらゆる場合の粒子形状を一般的な不変の形で記述すること以外には理解できないことを知っておかねばならない。ここで利用できる方法として次の三つがある。まず、複雑ではあるが粒子形状を記録しテン

ソル量と結びつけることがあげられる。二番目は直接的な測定であり、もう一つは完全な粒子形状を仮定し、測定前に最も簡便な直接的もしくは間接的な形で数学的に変換することである。勿論、ここでいう最も簡便な形というのは場合により異なることはいまでもない。今後このようなアプローチがなされるものと思われる。第三の方法は最もエレガントではあるが、視覚的な方法より理論的な取扱いが必要である。この問題で最も重要な点は個々の特定の形状ではなく一般的な形状に物理法則を導入することであろう。

これは、今のところ不可能ではあるが、粒子挙動を忠実に記述し、各プロセス装置を分離したり結合したりするためには必要である。恐らく、場合にもよるが、このようなアプローチをとる最も重要な理由は、必ずしも不規則ではないが構造が複雑な粒子を扱う機会が増えつつあるためであろう。

5. 結 論

本報告では、次の三つの粒子のキャラクタリゼーションに関する現状を検討した。

- (a) 測定原理と測定技術
- (b) 相当球の概念
- (c) キャリブレーション

どのように上記の三つの因子が相互に影響しあい、そしてこの相互作用に対する理解がどの程度深められたかについて要約してみよう。

(a)についてであるが、今日の洗練された測定技術は主としてごく少数の測定原理に基づいている。いずれも粒子挙動が粒子径に何らかの影響を及ぼすということが粒度測定技術のもとになっている。そうなるためには、粒子径で粒子挙動が説明できる理論がなければならず、そうやって初めて測定結果が粒子径で説明できることになる。

今度は逆にこのような測定により粒子の挙動を推定することができる。粒度測定に関するこれらの基本的な関係を Fig. 14 に示した。もし仮に測定原理が実際の現象と同じものであれば、希薄濃度下の沈降法による測定結果を実際の沈降タンクの設計に応用できるようになり、両者の関係はより簡単となるであろう。この場合、粒子径の概念は沈降データのある状況から別の状況へ移しかえることにのみ用いられることになる。このようなことはできてまればである。実際のプロセスでは簡単な相当径のようなもので制御することは不可能で、複雑な

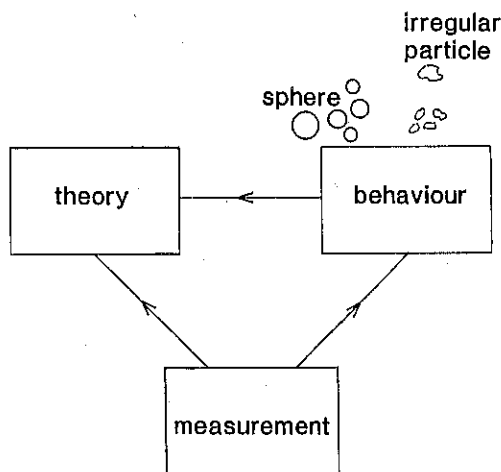


Fig. 14. The relationships between measuring techniques, theories and behaviour.

形の粒子径が関与するため、既存の測定技術で簡単に特定の相当径を決定することはできない。だからこそ、ある状況で粒子径を測れば、これをまったく別の状況に応用できるような理論が必要となるのである。粒子がすべて球形であれば Fig. 14 に三角形で示した関係は健全である。粒子径を特定化すればこの粒子径の測定は便利になり、粒子挙動を説明するさまざまな理論を測定結果に応用できる。球形粒子をキャリブレーション用サンプルとして用いれば、粒度測定と粒子挙動を結びつける装置定数が求まる。

もし粒子が球形でなければ Fig. 14 に示した三角形の三辺のうち、いずれかの辺が問題となる。球形粒子しか扱わない理論を用いれば、測定値は球相当径以外には何も求まらない。同様に、球形粒子についてのキャリブレーションを行えば、粒度測定と粒子挙動を結びつけるものはこの場合、球相当径ということになる。従って相当球を用いると球で表される限られた範囲の粒子挙動や装置設計の推定しかできないということになる。

今日の粒度測定やキャリブレーションには論理的な基礎があるが、これは従来より培われてきたものであり、今後も利用されるであろう。しかし、これを粉粒体工学の分野に適用するには精緻さと具象化の点で限界がある。測定技術の進歩は速くますます洗練されることであろう。測定原理が今後進歩するかどうかは非球形粒子の理論とキャリブレーション技術の進歩いかにかかっている。真の進歩は丸くない世界に見出されるであろう。

サイクロン、湿式スクラバ、バグ フィルタによる集塵技術の現状

State of the Art in the Area of Particle Collection
by Cyclones, Wet Scrubbers and Fabric Filters

Dipl.-Ing. J. Sievert* Prof. Dr.-Ing. F. Löffler*

1. はじめに

様々な工業プロセスにおいて気体中に浮遊する固体粒子をその気体からできる限り完全に分離するという操作が必要になることが多い。このような集塵操作は、粉碎・分級システム¹⁾などにおいて気流中から粉粒体を回収する際に必要であり、また一方、環境汚染に対する規制がますます厳しくなる中で重要性を増してきた排ガスの浄化にとっても重要な操作である。この目的のために現場では、遠心力集塵機、湿式集塵機、汙過集塵機などが一般に使用されている。

これらの中で現在のところ最もよく使用されているのは、円筒状や封筒状フィルタ、あるいはパトローネ型のバグを使った汙過集塵機である²⁾。これらのフィルタは、全集塵効率率が99.9%と非常に高いので主に空気清浄分野で重要であり、多くの装置においていわゆる最終集塵機として使用されている。特に1 μ m以下の微粒子を含む粉塵の分離にはバグフィルタを使う必要がある³⁾。

サイクロン型の遠心力集塵機は近年、少なくとも最終集塵機としての重要性を失ってきた。というのはTA空気⁴⁾に要求される10 μ m以下の粒子に対する集塵効率を得るためにはサイクロンを使用するとエネルギー消費量

が大きいため、多くの場合、フィルタで置き換えられるためである。遠心力集塵機は、たとえば平均粒径が200～500 μ mのプラスチック粉末のような粗粒子や繊維状物質¹⁾の捕集に使用されることが多い。またプラスチック工業においては、サイクロンは色変えの際にフィルタよりも洗浄が容易なために色材粉体の捕集にもよく使われている⁵⁾。

湿式集塵機は最近、相対的にいってあまり使用されなくなっており、特殊なケース、たとえばこげつきを起こしたり粉塵爆発の危険性がある粉体を取扱う場合⁶⁾や、原料がもともと湿式で処理されるような場合⁷⁾に使われるだけである。湿式集塵機の欠点は、その排液をさらに排水処理しなければならないことである。

2. 集塵機の性能評価

集塵装置の集塵性能の評価には、部分分級効率とも呼ばれる、集塵効率 $T(x)$ が通常使用される。集塵効率は粒径による効率の変化を表わし、集塵機の性能についての重要な情報を与える。それによって微粉域における集塵効率を直接に求めることもできる。

集塵効率は各粒径 x に対して集塵機に流入した粉塵量に対する分離された粉塵量の比であり、たとえば集塵機の入口と出口における粉塵の質量流量をそれぞれ $\dot{m}_e(x)$ 、 $\dot{m}_a(x)$ で表わすと次式で計算される。

* Universität Karlsruhe (TH)
Institut für Mechanische Verfahrenstechnik
und Mechanik, Richard-Willstätter-Allee,
Postfach 6380, D-7500 Karlsruhe 1, Federal
Republic of Germany

(注) TA 空気：空気清浄のための技術的な指針で、
1974年8月28日（1983年2月改訂）に制定された西ド
イツ大気汚染防止のための最初の条例で規定された。

$$T(x) = 1 - \frac{\dot{m}_a(x)}{\dot{m}_e(x)} = 1 - \frac{C_{rein}(x)}{C_{roh}(x)} \quad \dots(1)$$

ここで $C_{roh}(x)$ と $C_{rein}(x)$ はそれぞれ特定の粒径 x についての含塵気体と清浄気体中の粉塵濃度を表わす。集塵効率 $T(x)$ はそれを決定する量の種類には無関係であるので、式(1)による $T(x)$ の計算の際には、粉塵濃度 $C(x)$ は質量基準でも個数基準でもいずれのものを使用してもよい。実際には、集塵効率曲線は実験的に、すなわち集塵機の入口と出口の粉塵濃度の測定によって求める方法が一般に用いられている。

このように実験的に求める以外にたとえばサイクロンやベンチュリスクラバのような 2, 3 の集塵装置では集塵効率の粒径による変化を、理論的に求めることができる。集塵効率曲線を求めるための一般的な考え方はまず粒子軌跡を計算することである。集塵効率曲線と含塵気体中の粒子の粒度分布 $q_A(x)$ (頻度) が既知であれば、全集塵効率 ϕ は次式で計算される。

$$\phi = \int_{x_{min}}^{x_{max}} T(x) \cdot q_A(x) dx \quad \dots(2)$$

この全集塵効率と集塵効率曲線があれば、ある集塵機がその要求された条件に適しているか否かの判定ができる。

全集塵効率 ϕ と含塵気体中の粉塵濃度 C_{roh} がわかっていれば、集塵機出口の清浄気体中の粉塵濃度 C_{rein} は、次式で求められる。

$$C_{rein} = C_{roh} (1 - \phi) \quad \dots(3)$$

このようにして計算される集塵機出口の粉塵濃度 C_{rein} は、要求された標準値以下でなければならない。

3. 遠心力集塵機、サイクロン

3.1 構造と機能

遠心力集塵機において、気体からの粒子の分離は、回転流中で粒子に作用する遠心力によって行われる。含塵気体は、遠心力集塵機に流入直後旋回作用を受け、回転流が生じる。この原理を実現するために多くの型式の装置が開発されており、文献 8), 9) にその総説がみられる。

代表的な型式は Fig. 1 に原理的な構造を示したサイクロンである。含塵気体はサイクロンの上部から分離ゾーンに流入するが、その際、気体を接線方向に流入させたり、サイクロンのケーシングの周辺に取り付けた誘導板によって渦流が発生する。気体は分離ゾーンを周辺から内側に向かって流れ、中央に取り付けた出口管を通じて機外に出る。分離ゾーンでの回転流によって気体中の粒子に遠心力が働き、粒子は旋回気流中を半径方向外向

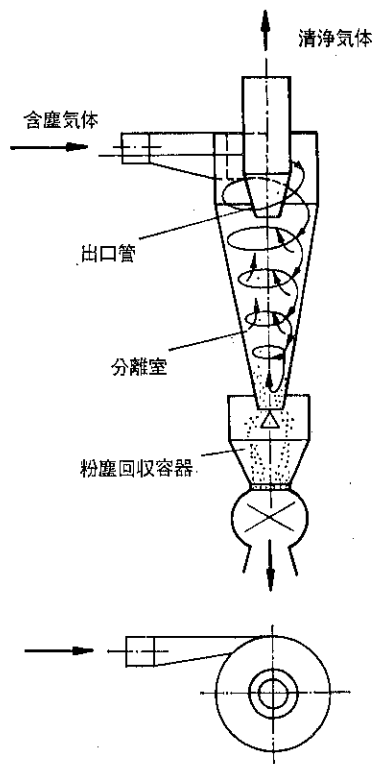


Fig. 1 流れの反転を伴う遠心力集塵機 (サイクロン)

きに運動する。分離された粒子はケーシングの内壁に達して、そこで通常、線状流となって境界層流によって下方に運ばれ粉塵ホップに入る。粉塵が再び巻きあげられないように、このホップと分離室とはしゃ断コーンによって分けられている。分離されなかった粒子は、気流によってその旋回渦の中心に吸い込まれ、出口管を通じて機外に出る。

様々な型式のサイクロンは、入口管の構造 (半径方向、接線方向)、分離室の形状 (円筒形、円錐形)、出口管および幾何学的な寸法によって区別される。サイクロンは、直径 0.02~5m 程度のものが製作されており、圧力は 0.01~100 気圧の範囲で使用されている¹⁰⁾。ここでは構造が簡単で経済的に安価な装置が問題になっている。種々の型式についての総説は文献 (11) にみられる。

3.2 集塵性能

サイクロンの集塵性能は、その構造や処理量、含塵気体の粉塵濃度および粉塵の特性によって影響を受ける。たとえばサイクロンケーシング、あるいは入口管や出口

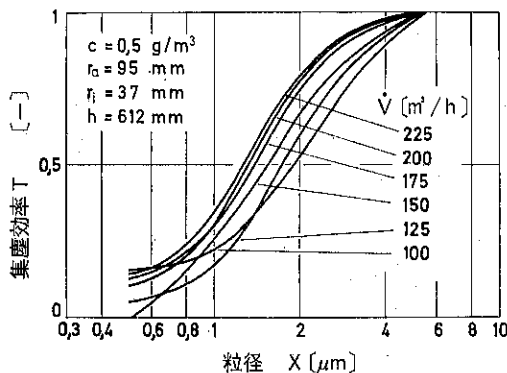


Fig. 2 集塵効率の風量による変化¹³⁾

管の内径を小さくするような構造の変化によって分離ゾーンにおける気体の周速を高め、それによって粒子に作用する遠心力を増大させることが可能である。このようにして粒子の分離効果を向上させることができる¹²⁾。

同様の結果は、サイクロンを通過する気体流量を増加することによっても得られる。たとえば Fig. 2 にはラボ用サイクロンの集塵効率曲線が通過風量 $\dot{V}$ をパラメータとして表わされている。集塵効率が50%の粒子径として定義される分離限界径は $\dot{V}$ が大きくなるにつれて小さくなる。分離限界径と風量の間には次のような関係がよく成り立つ。

$$x_r \sim \frac{1}{\sqrt{\dot{V}}} \quad \dots(4)$$

しかし、サイクロン中の気体の周速を増すと、同時に圧力損失も増大する。一般に

$$\Delta p = \xi \cdot \frac{\rho_f}{2} \cdot v_i^2 \quad \dots(5)$$

ここで v_i は出口管の平均流速、 ρ_f は気体の密度、 ξ は圧力損失係数を表す。全圧力損失の90%までが出口管中において支配的な大きな接線速度を持つ旋回流に帰因していることがサイクロンの実測値からわかっている。

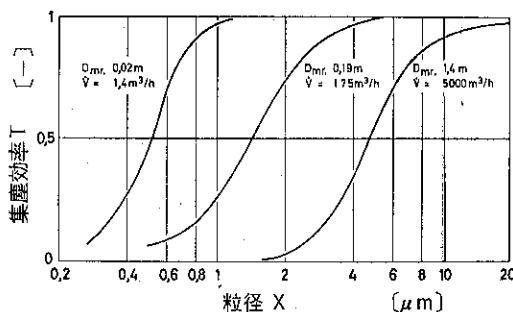


Fig. 3 集塵効率のサイクロン径による変化

る。 Δp の値は通常 500~2000 P_a の範囲にある。

大きな風量の含塵気体を、妥当なエネルギー消費量で効率よく集塵処理するためには、1台の大きなサイクロンを使用する代りに数台の小型のサイクロンを平行に接続して使う方が合理的である。また、サイクロン径を小さくすると分離限界粒子径も細かい方に移行する。Fig. 3 は様々な直径 D のサイクロンの集塵効率の典型的な例を示す。ここで3つのサイクロンは径が小さくなるにつれて風量 $\dot{V}$ を小さくして圧力損失が同じになるように設定されている。このようにして与えられた風量を集塵処理するためには、サイクロンの径を小さくするとサイクロンの台数を増やす必要がある。しかし、実際の集塵操作では直径数 cm、分離限界径 $1 \mu m$ 以下のサイクロンはあまり実用的でなく、主に測定の目的に使用される。サイクロン構造や風量、粉塵濃度による集塵効率の変化については文献 13) に詳しく述べられている。サイクロンの組合せについては、文献 14)、15) に取り扱われている。

3.3 サイクロンの設計

3.3.1 集塵効率

サイクロンを設計する際、清浄気体中の粉塵濃度の許容値と直接結びついた全集塵効率が特に問題となる。この全集塵効率を式(2)によって計算する際に、含塵ガス中の粉塵の粒度分布の他に集塵効率曲線 $T(x)$ が必要となる。

サイクロンの中の流れの状態が複雑であり、その速度分布も十分に解明されていないこともあり、 $T(x)$ を得るための粒子軌跡の計算には現在なおあまりにも多大の労力を必要とする。こういう事情でサイクロン中の流れの状態を簡略化した数多くのモデルが展開されてきた。これらは大別して滞留時間モデルの概念に基づくもの (Leith/Licht¹⁶⁾, Licht/Koch¹⁷⁾) と分離面モデルによるもの (Barth¹⁸⁾, Muschelknautz¹⁹⁾) に分けられる²⁰⁾。

Dietz²¹⁾ および Mothes²²⁾ の新しい計算ではこれら両者の考え方が統合されている。これらのモデルとその考え方についての詳しい検討が文献 (13), (22) になされている。

実際のサイクロンの設計には、高濃度の含塵気体についての集塵効率を推算することもできる Muschelknautz and Mothes のモデルが一般に適している。そこで以下にこれらの研究者の考え方について述べる。

Muschelknautz によって展開された集塵効率の計算方法は、元来 Barth¹⁸⁾ がスパイラル風力分級機について展開した理論に基づいている。この理論から次式で求

められるいわゆる限界粒径 x_{Gr} が得られる。

$$x_{Gr} = \sqrt{\frac{18\mu_F \cdot v_{r,i} \cdot r_i}{(\rho_p - \rho_f) \cdot v_{p,i}^2}} \quad \dots(6)$$

ここで μ_F は流体の粘度、 ρ_p は流体の密度、 r_i は出口管半径、 $v_{r,i}$ 、 $v_{p,i}$ はそれぞれ出口管半径における流体の半径方向と接線方向の速度である。Barthによると粒径が限界粒径 x_{Gr} よりも大きな粒子はすべて分離され、それよりも小さな粒子はすべて出口管から気体と共に排出されることになる。一般にこの限界粒径は集塵効率曲線の中央値である分離径 x_{50} に等しいとみなされる。

式(6)によってサイクロンの分離径を推算することができる。これから明らかなように、出口管径での接線方向速度 $v_{p,i}$ が増大するほど、またその半径方向速度 $v_{r,i}$ と出口管径 r_i が小さくなるにつれて分離径は小さくなる。また、たとえば温度を高めることにより気体の粘度が大きくなると、分離効果は落ちる。 x_{Gr} の正確な計算法については文献(23)に詳しく述べられている。

式(6)を使って集塵効率曲線の全体的な変化を計算することはできないので、Muschelknautz は、様々な構造のサイクロンの集塵効率曲線を実験的に求めた²³⁾。これを使って集塵特性についての第1次推定が可能である。

Mothes の解析モデル²²⁾は直接 Muschelknautz²³⁾と特に Dietz²¹⁾ の考え方に基づいて展開されている。Dietz によって提案されたモデルは、サイクロン中の流れ場と粒子の運動についての新しい知識を取り入れて修正され、粒子の拡散的な輸送に関してさらに展開された。この新しい応用向きのモデルにおいては、粒子の運動は確定的な運動と乱流による偶然的な運動が重ね合わされたものとして把握されている。4つの特徴ある部分に区分した分離ゾーン中の粒子流れの計算は同様にして簡略化された流れのモデルを基礎にしている²³⁾。

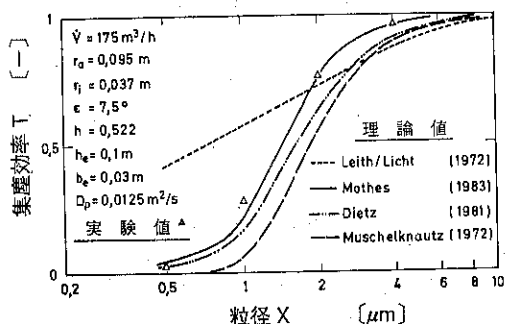


Fig. 4 種々のモデルの比較²⁴⁾ (r_0 : サイクロン半径、 r_i : 出口管半径、 ε : 円錐角、 h : サイクロン全高)

このような考え方の長所は、特に計算の労力が比較的低く、集塵効率曲線全体を求めることができるという点にある。

Leith/Licht, Mothes, Dietz, Muschelknautz のモデルに基づいて実験値を使って求めた集塵効率の比較を Fig. 4²⁴⁾ に示した。これから明らかなように Leith/Licht の考えに基づいた集塵効率の実験値から最も大きくはずれている。その曲線はかなり平らでサイクロンの典型的な変化を表わしていない。それに対して他のモデルによると実際の変化の様子にはかなりよく一致している集塵効率曲線が得られる。Dietz や Mothes の手法によると集塵効率曲線全体を計算することが可能であるが、一方 Muschelknautz による考え方によれば、実測された限界粒径で正規化された集塵効率曲線に適合させた効率曲線が得られる。しかしサイクロンの実際の設計には、両方の考え方が利用されている。

上述の計算法に際してはサイクロン入口での粉塵濃度が充分低く、分離ゾーンで流体の流れ自体に影響を及ぼさないことが仮定されている。Bohnet¹¹⁾によると、この仮定は $C_{roh} = 10 \text{ g/m}^3$ 位まで満足される。

しかし、現場ではサイクロンはもっと高い粉塵濃度で使用されることが多い。一般に含塵気体の粉塵濃度が大きくなると、サイクロンの集塵効率は高くなるが、同時に旋回流中で粒子の分離に必要な遠心加速度が小さくなることが知られている¹²⁾²⁵⁾。さらに粉塵濃度が大きくなると設計の際に考慮に入れなければならない他の分離機構が旋回流中の粒子の分離に影響を及ぼす²²⁾。

Muschelknautz は、ある流体が運ぶことのできる粒子の量は限られているという空気輸送の原理から考えを發展させている¹⁹⁾。すなわち、いわゆる限界固気濃度比 μ_G を超えると、過剰な粉体はサイクロンに流入した直後、内壁に衝突して線状に旋回しながら落下し粉塵タンクに入る。その際、限界濃度比を超えた場合、固気濃度比が 0.05 以下と小さい場合にのみ分離は選択的に影響を受けるが、濃度がさらに大きくなると粉塵は粒度とは無関係にかたまりとして分離されるようになると Muschelknautz は考えている。限界濃度比を超えたためにサイクロンの内壁に衝突した粒子は、すでに入口部で分離されるので、残りの粒子は分離ゾーンで選択的な分離を受けることになる。このようにして高濃度での粒子の分離は、2つの分離過程が前後して起っているものと考えられる。こういう場合のサイクロンの全集塵効率の計算式は文献(23)にみられる。

限界濃度を超えた状態での粒子の分離という考え方の他に、高濃度の集塵の際には微小粒子が大粒子に付着・凝集して分離効率の向上につながるということが予想さ

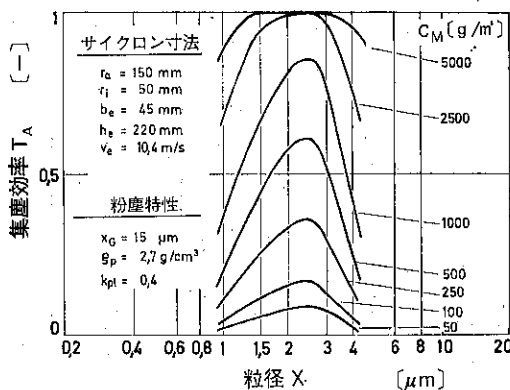


Fig. 5 高濃度含塵気体のサイクロンによる集塵効率の Mothes による計算値²⁰⁾ (b_e : 入口管の幅, h_e : 入口管の高さ, v_e : 入口管での気体流速, k_{pt} : 衝突数)

れる。こういう考え方から出発して Mothes はサイクロンにおける粒子の凝集による分離をも考慮に入れたモデルを立てている。このモデルの基本的な考え方は、質量が小さいためにサイクロン中で滞留時間内に遠心力場で分離されない微小粒子が、問題なく分離される大粒子に付着し、それと一っしょになって気体から分離されるというものである²⁰⁾。

Fig. 5 は $15 \mu\text{m}$ の大粒子と凝集した微小粒子の集塵効率を、大粒子の濃度 C_M をパラメータとして計算した例を示す。これから、粉塵濃度が高いほど、粒子の凝集によって集塵性能が向上することがわかる。Mothes は、サイクロンの全集塵効率を計算するために、粒子の分離は 2 つの分離過程が前後に結合されたものと考えている。凝集のモデルについては、文献 (13) に詳しく記述されている。

3.3.2 圧力損失

サイクロンの全圧力損失は入口管、分離ゾーン、出口管における個々の圧力損失の和として得られる。Bart/Muschelknautz²³⁾ によると全圧力損失 Δp は、次式で求められる。

$$\Delta p = \sum \xi \frac{\rho_F v_i^2}{2} = (\xi_{\text{入口管}} + \xi_{\text{分離ゾーン}} + \xi_{\text{出口管}}) \frac{\rho_F}{2} v_{i2} \quad \dots(7)$$

ここで $(1/2)\rho_F v_i^2$ は出口管のよどみ圧、 ξ はそれぞれの圧力損失係数を表わす。圧力損失係数の計算についての要領が文献 (23) に示されている。

3.4 サイクロンの形状

サイクロンの設計に関連して、集塵効率の計算値と実

測値の差が大きい場合がよくある。これは計算方法が誤っているのではなく、サイクロンの構造がその内部の気流、従って粒子の分離に適していないことが多い。

特に粉塵出口の形状に注意が必要である。すでに分離した粉塵が再び巻き上げられるのを避けるためにしゃ断コーンを取り付ける必要があるが、そのサポートはコーンの下部に配置するようにする。さらに粉塵出口の半径と出口管の半径との比は 1 よりも大きくして分離した粒子の巻き上げを避けるようにすべきである²⁶⁾。

サイクロンの仕上げの際には、分離ゾーンで溶接のつぎ目や、その他の突出部がないように注意しなければならない。そのような内面の凹凸によって 2 次流が発生し、それは粒子の分離に悪影響を及ぼし集塵効率の低下につながる。サイクロンの実際的な形状についての重要なポイントが Krambrock によって示されている^{26,27)}。

4. 湿式集塵機

4.1 作動原理

湿式集塵機中では、粒子はまず洗浄液と接触し、これと結合して気流によって洗浄液と共に分離される。この分離の原理は、重力、慣性力、遠心力といった体積力が小さな微小粒子は分離が困難であるので、まず液滴の大粒子に付着させてからその液体と共に分離するという考えに基づいている⁷⁾。この液滴の分離は通常、衝突板やルーバ型の分離機あるいはサイクロンによって行われる。

4.2 構造

湿式集塵機の型式には多くの種類があるが^{28,29)}、それらはいくつかの基本型にまとめられる。Holzer⁷⁾ は、装置中の流れの状態によって以下のような基本型に分類している。

- 1) 水洗塔、充填塔、段塔
- 2) エジェクタ
- 3) 転流スクラバ
- 4) 回転噴霧塔
- 5) ベンチュリスクラバ

Fig. 6 に 5 つの基本型が 2, 3 特徴的なデータと共に示されている。実験結果から湿式集塵機は非常に微細な粒子の分離にも適しているが、一方圧力損失が大きいこともわかる。一般的な傾向として相対速度が大きいほど、分離性能がよい。いくつかのタイプの湿式集塵機のすぐれた集塵特性は、Fig. 7 に示した集塵効率曲線からも明らかである。

型 式	充 填 塔	エジェクタ	転流スクラバ	回転噴霧塔	ベンチュリスクラバ
限 界 径 (μm) $p_s=2.42 \text{ g/cm}^3$	0.7-1.5	0.8-0.9	0.6-0.9	0.1-0.5	0.05-0.2
相 対 速 度 (m/s)	1	10-25	8-20	25-70	40-150
圧 力 損 失 (mbar)	2-25	—	15-28	4-10	30-200
水 / 空 気 比 (1段につき) (l/m^3)	0.05-5	5-20*	不 定	1-3*	0.5-5
エネルギー消費量 ($\text{kWh}/1000 \text{ m}^3$)	0.2-1.5	1.2-3	1-2	2-6	1.5-6

Fig. 6 Holzer による湿式集塵機の基本型⁷⁾

4.3 理論的解析

集塵性能の計算に関しては、新しい理論的ならびに実験的研究^{80,81)}によって、元来1959年に Barth によって提案されたモデルがよく適合することがわかってきた。そこでは洗浄液は液滴の形をしており、粒子は主に慣性力によって液滴表面に付着すると仮定されている。

集塵機中の粉塵濃度の変化は、次式で表わされる。

$$C = C_0 \cdot \exp [-b \cdot m] \quad \dots(8)$$

従って集塵効率

$$T(x) = 1 - \exp [-b \cdot m] \quad \dots(9)$$

となる。ここで $b = \dot{V}_{\text{洗浄液}} / \dot{V}_{\text{気体}}$ は、水ガス比である。また、パラメータ m は、集塵ゾーンを1回通過する間に1個の液滴で洗浄される気体の体積と液滴体積の比として定義される洗浄気体体積比である。

m を理論的に推定するためには、まず粒子の液滴への付着の計算と分離ゾーンでの液滴の運動軌跡の計算が必要である。Fig. 8は直交流についての1例を示す。

ここで特徴的なことは、ある粉塵粒子径 x_p について m の最大値があること、つまり最適な液滴径があること

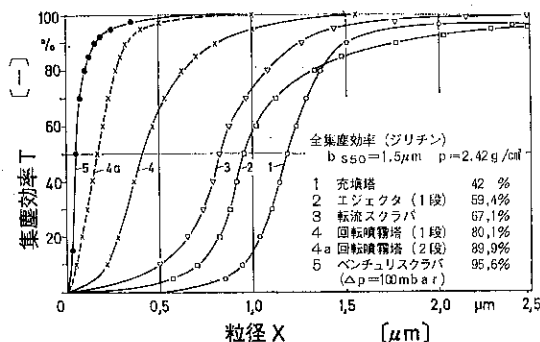


Fig. 7 Holzer による湿式集塵機の集塵効率⁷⁾

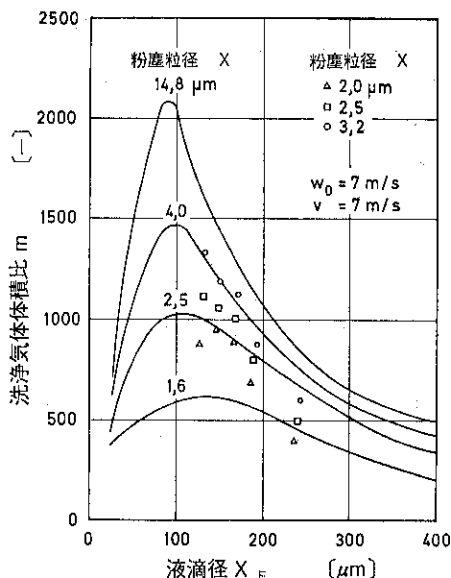


Fig. 8 液滴径 x_F の変化による、洗浄気体体積比 m の理論曲線と実験点³⁰⁾

である。洗浄気体体積比は、液滴径や粉塵粒子径だけでなく集塵機の構造やその中の流れの状態によって変化する。従ってこれらの関係は、湿式集塵機の設計の基礎となる。

5. 汙過集塵機

5.1 作動原理

プラスチック工業においては、汙材を一定時間内に洗浄できるバグフィルタが重要になっている。これらのバ

グフィルタは一般に数 g/m^3 から数 $100g/m^3$ 程度の高濃度の粉塵の分離に用いられ³²⁾、微粒子の集塵効率が非常にすぐれているので特に空気清浄の分野では支配的な役割を演じている。

バグフィルタでの粒子の分離は、含塵気体が多孔質の汙材を通過する際に、粒子に作用する様々な分離メカニズムによってその汙材に捕集されるという原理で行われる。バグフィルタでは汙材として今日主にいわゆるフェルトやウール地の繊維層が使われている。これらの汙材の空隙率は70～90%である。

払落し式フィルタでの粒子の分離は初期の短期間においてのみ繊維層の内部で行われるが、その後粒子は急速に汙布表面で捕集される。そこにいわゆるフィルタケーキが形成され、それは高性能集塵汙材の役割を果たす。この粉塵層が、99.9%というバグフィルタの高い集塵効率の原因となっている。しかしながらバグの表面に成長する粉塵層によって圧力損失が上昇するのでバグについての粉塵を周期的に払い落とす必要がある。この集塵システムの圧力損失は通常 1000～3000Pa である。

5.2 構造

使用されている汙材の形状によってバグフィルタは以下のように大別される³⁴⁾。

- 1) 円筒状フィルタ
- 2) 封筒状フィルタ (表面フィルタ)
- 3) パトローネフィルタ
- (1) 円筒状フィルタ

現在、円筒状フィルタが最もよく使われている。汙過期間中、気流はこのフィルタの外側から内部へ、あるいはその逆方向に流れる。古い型式のバグフィルタでは

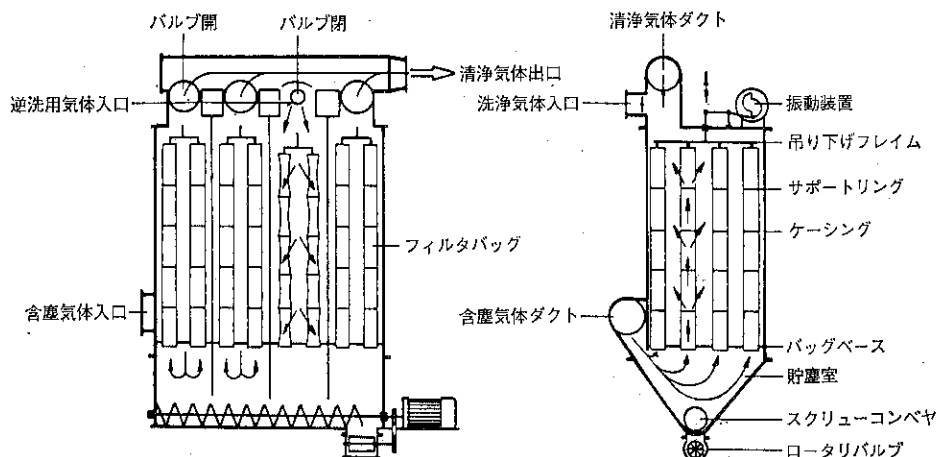


Fig. 9 振動払落し式バグフィルタ³⁵⁾

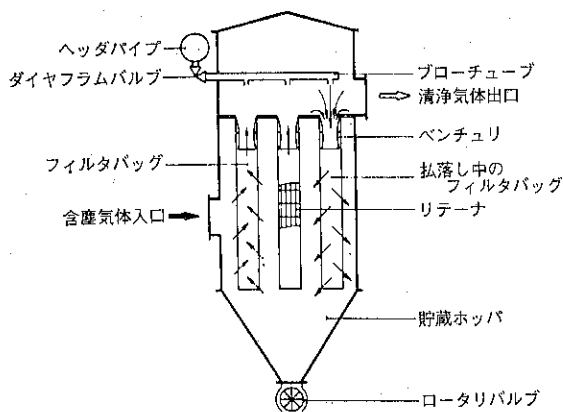


Fig. 10 圧空パルスジェット払落し式バッグフィルタ³⁹⁾

Fig. 9 に示すように円筒状フィルタは多室に分けてセットされていた。含塵ガスは下方から円筒状フィルタの内部に流入し、粒子は主にその内表面で分離される。

フィルタの洗浄の場合には、洗浄中の集塵室への気流をしゃ断する。

フィルタについての粉塵層は、揺動や振動あるいは気体の逆流によって払い落とされる。このようなバッグフィルタは主に多量の含塵空気を処理する際に使用される。機械的な払落しや逆流による洗浄に対して近年は圧縮空気によるパルス洗浄が主流となってきた。この型式のバッグフィルタでは、含塵空気は Fig.10 に示す通りバッグの外側から内側へ流れるのでバッグはリテーナでサポートされている。

バッグの洗浄の際には高圧の洗浄気体が短時間それぞれのバッグに吹き込まれ、それに付着した粉塵が払い落とされる。そのバッグを1本ずつあるいは1列ずつ払い落とすことにより、バッグフィルタを切り換えずに含塵気体を連

続的に処理することができる。洗浄期間は100~200 ms 程度で完了するのでほとんど 100 % の汙布表面が汙過に使えることになる。また、洗浄に関連して多室構造は必要でない。

多量の含塵気体を浄化するためにはパネルタイプのバッグフィルタが適している。バッグは通常直径100~200mm 長さ 2.5~5m で特殊なケースではさらに長いバッグも使用されている。20000 m³/h 以下の比較的小さな風量の含塵気体を処理するためには1本ないしは1列毎にバッグを洗浄する円柱形のバッグフィルタが使われる。この場合、バッグの径は同様に 100~200mm 程度であるが、長さは1.25~3m 位である。フィルタバッグの長さや数の違いにより円柱形のバッグフィルタの汙過面積は 2.5~300m² の範囲にある。

(2) 封筒状フィルタ

封筒状フィルタは円筒状フィルタほどは普及しておらず、主に小風量の気体の除塵に使われている。汙材は Fig. 11 に示すように封筒に似た形をしており、針金でできた平らなサポート枠にセットされる。この場合、流体は常にフィルタバッグの外側から内側に向かって流れ、集塵はバッグの外表面で行われる。

封筒状フィルタの洗浄もやはり圧縮空気のパルスによる払落しが主流になってきている。すなわち、円筒状フィルタ同様に多くのノズルを通して高圧の圧縮空気が吹き込まれ、付着した粉体層が払い落とされる。

封筒状フィルタは汙過面積が 50m² までのいわゆるコンパクトタイプのダストコレクタとして使用されることが最も多い。これらはサイロなどの貯蔵槽からの脱気の除塵や種々の機械の局部集塵、あるいは工場の集塵などに使われている。この型式のダストコレクタの長所はホッパやサイロなどに追加的に可動式フィルタとして設置

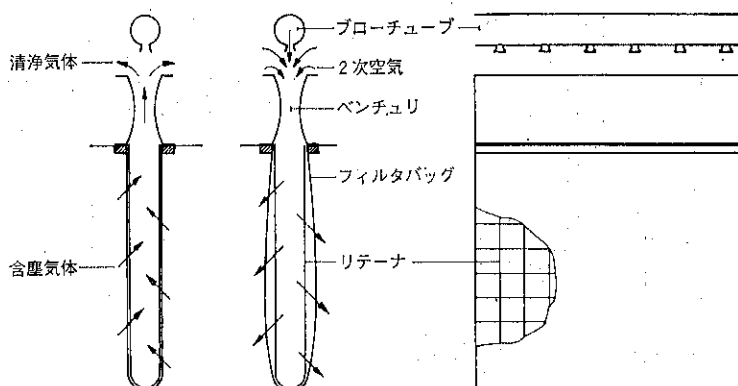


Fig. 11 圧空パルスジェット払落し式封筒状バッグフィルタの作動原理³⁹⁾

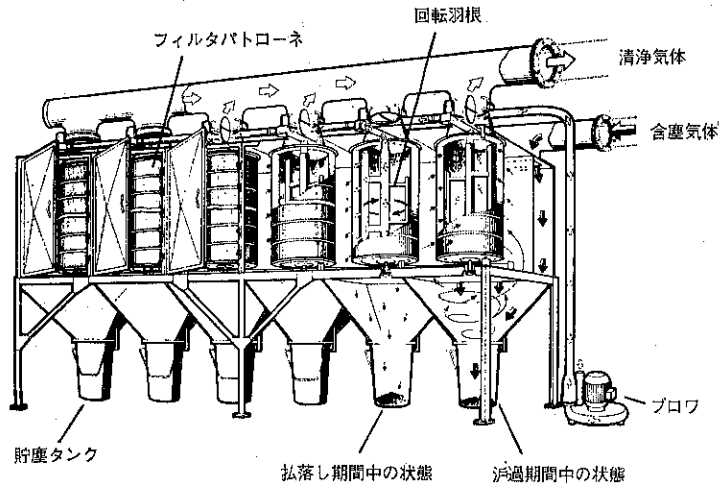


Fig. 12 低圧逆洗式パトローネフィルタ³⁴⁾

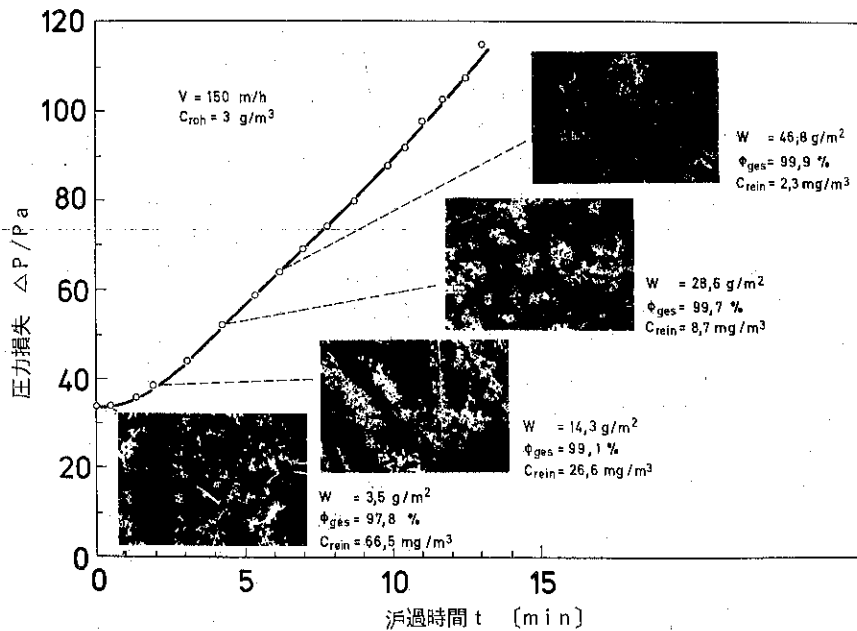


Fig. 13 汉布表面の粉塵層の成長³⁷⁾

することができることである。

(3) パトローネフィルタ

新しく開発されたものに、Fig. 12 に示すようなフィルタパトローネを取り付けたダストコレクタがある。このフィルタパトローネの中には、星形にひだをつけた汉材がセットされており、このフィルタエレメントは外形寸法が小さいにもかかわらず大きな汉過面積をもつようにしてある。現在使用されているフィルタパトローネは、DIN 71459³⁹⁾の寸法に対応したもので高さ 606mm

で 5~20m² の汉過面積をもっている。フィルタパトローネは、内側にはサポートのためのケージがあり、外側は高さ方向にある間隙をおいてベルトで固定されている。

気流は汉過期間中、原則的にはフィルタパトローネの外側から内側に流れる。そしてその外側にフィルタケーキが形成されるのでそれを周期的に払い落とす必要がある。パトローネの洗浄には圧縮空気のパルスまたは Fig. 12 に示すような回転羽根をもつロータが使われる。

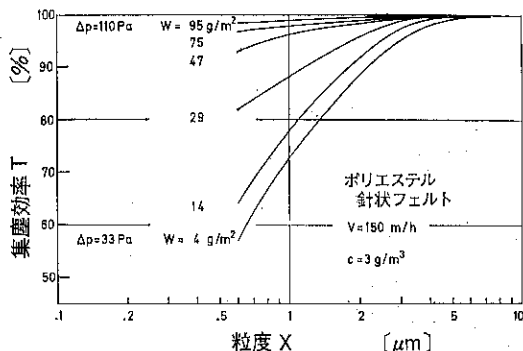


Fig. 14 バグフィルタの集塵効率³⁷⁾

パトロネフィルタもコンパクトタイプのダストコレクタとして比較的少量の含塵気体の集塵に用いられる。フィルタパトロネの高さが低いので、大きな濾過面積を持つ小型のダストコレクタを製作することができる。

5.3 集塵特性

フィルタによる粒子の分離は原理的に2つの濾過過程に分類される。すなわち、新品濾布では粒子はまず濾布内部の単一繊維に付着し、その後粒子は主にいわゆるフィルタケーキと呼ばれる濾布表面上の粉塵層で捕集される。

集塵初期の可逆洗フィルタでは、いわゆる貯蔵型フィルタに類似した状態で粒子の捕集が行われる³⁷⁾。粒子は拡散、慣性力、静電気力といった様々な機構で単一繊維に付着し堆積していく。濾過時間が長くなるにつれて繊維の見掛けの表面積が増大し、最終的に粒子で完全におおわれるようになる。粉塵が堆積することによって集塵効率が向上するが同時に圧力損失が増加する。このフィルタケーキの成長過程は Fig. 13 にみられる。

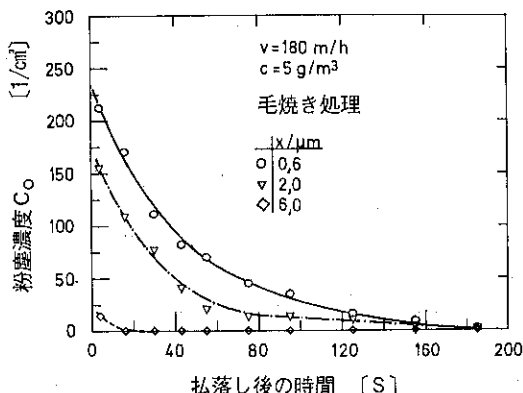


Fig. 15 払落し後の濾過時間の経過に伴うバグフィルタ出口の粉塵濃度の変化

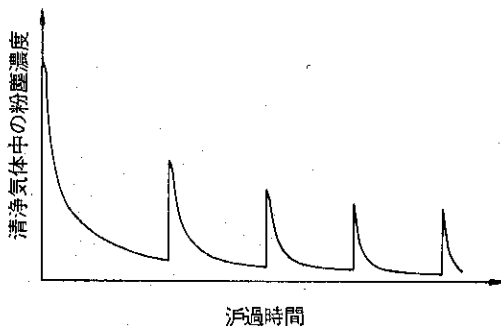


Fig. 16 払落し式フィルタの清浄気体側の粉塵濃度の時間的変化³⁸⁾

同じ条件での集塵テストにおける集塵効率の測定結果から、濾布表面の粉塵の堆積量が増すにつれて全粒度範囲にわたって、集塵特性が向上することが明らかになっている。すなわち 76 g/m^2 の濾布堆積粉塵量で全粒度にわたって95%以上の集塵効率が得られている。それに対応する集塵効率曲線を Fig. 14 に示す。

さらに粉塵を供給して濾布上のフィルタケーキを成長させると、やがて集塵効率は99%を超すようになる。このとき粉塵は濾布表面の粉塵層による幾何学的なしゃ断効果によって分離される。払落しのためには、粉塵が濾布内で捕集されるよりも、濾布の表面の粉塵層で分離される方が都合がよい。粒子の単一繊維層への付着は集塵初期の短い期間にだけしかみられない。このようにして実際にみられる $1 \mu\text{m}$ 以下の粒度範囲における優れた集塵効率を説明することができる。

このようにして粉塵が濾布に堆積すると、集塵効率は大きく向上するものの、圧力損失を下げるために周期的に粉塵層を払い落とす必要がある。その払い落としによる濾布洗浄の直後、濾過が再開されるとき濾布表面には粉塵層がないので、粉塵は濾布の中に侵入し一部は清浄空気側に流れ出す。

さらに、圧空パルスジェットで払落しをするときには、濾布は洗浄過程の終りにリテーナにたたきつけられ、そのときの衝撃によって一部の粒子は濾布からたたき出されて清浄空気側に入り込む。この濾布洗浄期間中の粒子の流れ出しは濾過速度や洗浄用空気圧力などのような運転条件によって強く影響され³⁹⁾、同時に集塵機出口の清浄気体中の粉塵濃度に大きく影響する。

圧空パルスジェットによる払落し直後の粒子の流れ出しの現象をわかりやすく示すために、Fig. 15 にいくつかの粒度に対して払落し後の濾過時間の経過に伴う集塵機出口の粉塵濃度変化の実測値を示す。この図から明らかのように払落し直後、多数の粒子が清浄空気側に流れ

圧である時間が経過して後に高い集塵効率を得られており、これは汙布面での粉塵層の形成によるものと考えられる。

Fig. 15 に示した粉塵濃度の測定結果からわかるように、払落しの度に多数の粒子が清浄気体側に洩れ出ている。払落し式の集塵機に典型的な現象は Fig. 16 に示すように、汉布の清浄気体側の粉塵濃度が短時間ではあるが、ある時間間隔で上昇するということである。圧空パルスジェット払落し式円筒型バグフィルタについての Klingel⁴⁰⁾ の研究によると、清浄気体側の粉塵濃度は汉過速度と洗淨用空気を貯めるヘッダパイプ圧の上昇に伴って増加することが明らかになった。これは、汉過速度やヘッダパイプ圧が大きくなるほど、払落しの際に汉布がそれだけ強くリテーナにたたきつけられ、それによってより多くの粒子が清浄気体側に洩れ出すというように説明できる。従って実際の集塵操作においては払落しの頻度と強度が過剰になると、かえって事情によっては排気中の粉塵濃度の許容値を越すことにもなるので注意しなければならない⁴¹⁾。さらに過剰な払落しを行うと圧空消費量の増大を招き、集塵装置の運転費の増加にもつながる。

5.4 圧力損失

圧力損失は実際の集塵機については集塵効率よりも重要な問題であることが多い。汉布の払落しが不十分であると粉塵の堆積により圧力損失が増大し続け、装置の運転に支障をもたらすことがある。設定すべき集塵操作条件を前もって予測することは一般に不可能である。従って集塵機的设计はもっぱら経験により、つまり実験的に行われているのが現状である。

払落し式集塵機の圧力損失の時間的変化を Fig. 17 に示す。粉塵の堆積と粉塵層の形成により、圧力損失は汉過時間ないしは捕集された粉塵量とともに増大する。いわゆる閉塞状態になると、圧力損失は一定汉過速度の下ではじめ非線型的に増大し、その後直線的に増加する。

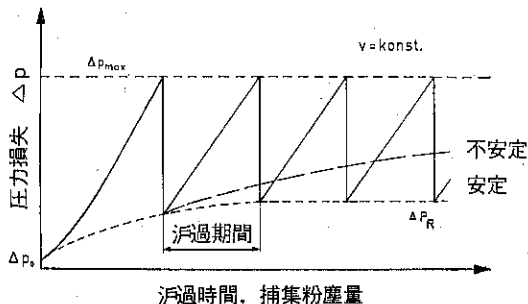


Fig. 17 捕集粉塵量あるいは、汉過時間による圧力損失の変化（風量一定）

ある与えられた圧力損失 $\Delta p_{\max}$ に達すると払落しが行われ、その値は Δp_R にもどるが、粉塵が汉布内に残留するためにそれは最初の圧力損失 Δp_0 よりも大きい。もっとも上述のようにこの残留粉塵が粒子の捕集に寄与する。

それに続く集塵期間では圧力損失は直線的に増大するが、これは粉塵層が急速に成長することによる。集塵が汉布内部で行われる最初の期間では比較的短い。残留圧力損失 Δp_R の時間的変化から安定な集塵操作がなされているか否か、すなわち設定された操作条件が正しいか否か、あるいは汉布の目塞りが増していくので条件を変更しなければならないかが判定できる。

粉塵が堆積した汉布の圧力損失をモデル的に表現するために内部に粉塵を含んだ汉布自体の圧力損失 Δp_1 と、汉布面に形成した粉塵層の圧力損失 Δp_2 を加算するという方法がとられる⁴²⁾。すなわち

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 \quad \dots(10)$$

気流はレイノルズ数 Re が小さい領域 ($Re < 1$) に入るので、 Δp_1 と Δp_2 の計算には Darcy の法則を適用することができる。この法則と物質収支を使って圧力損失について次式が得られている⁴³⁾。

$$\Delta p = \frac{\mu}{B_1} \cdot L_1 \cdot v + \frac{\mu}{B_2} \cdot \frac{C \cdot t \cdot \phi}{\rho_s (1 - \epsilon)} v^2 \quad \dots(11)$$

ここで μ は気体の粘度、 v は汉過速度、 L_1 は汉布の厚み、 ρ_s は粒子密度、 B_1, B_2 はそれぞれ粉塵を含んだ汉布と粉塵層の透過率、 C は含塵気体の粉塵濃度、 t は汉過時間、 ϕ は全集塵効率、 ϵ は空隙率である。

また、式(11)は、次の形で与えられることも多い。

$$\Delta p = K_1 \cdot \mu \cdot u + K_2 \cdot \mu \cdot W \cdot v \quad \dots(12)$$

ここで K_1, K_2 はそれぞれ粉塵を含んだ汉布と粉塵層の抵抗係数、 W は単位汉過面積当たりに捕集された粉塵量を表わす。

式(12)は、汉過方程式として知られ払落し式集塵機的设计のための基礎として多くの研究者によって使用されている。特に式(11)によって重要なファクタの影響を知ることができる。それから明らかなのは汉過速度 v を増加すると、他の条件を一定として圧力損失は急激に増大するが、これは粉塵層の厚さ L_2 、従って堆積粉塵量 W が v に比例することも原因している。このことは、比較的大きな汉過速度に対して Δp を等しくするためには汉過期間 T は $1/v^2$ に比例して短くする必要がある。

式(11), (12)における重要なパラメータは、透過率 B_1, B_2 と抵抗係数 K_1, K_2 である。これらの係数は一定であると仮定されることが多いが、実際は定数でなく種々のパラメータの複雑な関数である。そのためこれらを汉過テストにより実験的に決定する必要がある。

5.5 バグフィルタの設計

バグフィルタの設計は、それに適用できる計算方法が充分でないために今日もなおほとんど経験的になされている。設計の際の目的はまず必要な汙過面積を決定することである。その際に予測される値は、風量と汉過面積の比として表わされる平均汉過速度ないしは単位汉過面積当たりの粉塵負荷量である。従って処理すべき含塵気体の風量が与えられれば、それによって汉過面積を求めることができる。

実際にはバグフィルタの設計に役立つ一連の係数が用いられている。その際、標準的なケースに対して決められた比粉塵負荷量を表わす基本値に経験的に得られた修正ファクタを剰じて設計計算を行う。この修正ファクタはそれぞれの適用条件に応じて最も重要なファクタを考慮に入れ、既に実績のある集塵装置での経験値に基づいて決定されるものである。

設計に際しては通常次のような簡単な式が用いられる。

$$v = v_0 \cdot c_1 \cdot c_2 \cdot \dots \cdot c_N \quad \dots (13)$$

ここで v は許容堆積粉塵量 (設計値)、 v_0 は基本値、 $c_1, \dots, c_N$ は修正ファクタである。基本値は、主に粉塵特性と払落し機構によって変化する標準的な値である。

種々の粉塵についての許容堆積粉塵量は以前はほとんど公表されず、集塵機のメーカーは個々に多くのデータを持っていてそれを設計の基準に使っていたが、VDI ガイドライン 3677⁸⁵⁾ によって初めて許容堆積粉塵量のデータがまとめられた。そこに与えられている値は織布または針状フェルトの機械式払落しに有効である。円筒状フィルタの圧空ジェットパルスによる払落しの場合は Flatt³³⁾ によって新しいデータが報告されている。

この基本値は修正ファクタによって各々の適用条件に合うように修正される。修正ファクタについては Flatt³³⁾ の他、いく人かの研究者^{43,44)} によって報告されている。しかし、このファクタの数や求め方はそれぞれの基本値によって異なり統一されていない。また修正ファクタはある特定の条件に関して表が与えられているだけであるので、やはり追加的な汉過テストが必要となる場合が多い。

引用文献

- 1) Krambrock, W.: Verfahrenstechnik 16, 640-648, (1982)
- 2) Dietrich, H.: Staub-Reinh. d. Luft 42, [9], 331-336, (1982)
- 3) Löffler, F.: Chem.-Ing.-Techn. 48, [1], 26-34,

(1976)

- 4) TA-Luft: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, erste Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutz-gesetz vom 28. 8. 1974/neuer Entwurf Febr. 1983
- 5) Krambrock, W.: Chem.-Ing.-Techn. 51, [2], 104-112, (1979)
- 6) Wicke, M.: Aufbau, Leistung und Betriebsverhalten von Naßentstaubern, Fortschr. Ber. VDI-Z, Reihe 3, Nr. 33, (1970)
- 7) Holzer, K.: Technik der Gas-Feststoffströmung-Sichten, Abscheiden, Fördern, Wirbelschichten: Tagung Düsseldorf, Dez. 1981; Preprints S. 99-112; VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), Düsseldorf, (1981)
- 8) VDI-Richtlinie 3676: Massenkraftabscheider, VDI-Verlag, Düsseldorf, (1980)
- 9) Bohnet, M.: Chem.-Ing.-Techn. 54, [7], 621-630, (1982)
- 10) Muschelknautz, E.: in VDI-Berichte 363, 49-60, (1980)
- 11) Bohnet, M.: Technik der Gas-Feststoffströmung-Sichten, Abscheiden, Fördern, Wirbelschichten: Tagung Düsseldorf, Dez. 1981; Preprints S. 57-76; VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), Düsseldorf, (1981)
- 12) Mothes, H., Sievert, J. u. Löffler, F.: Particle Technology, Proceedings of the 1981 Powtech Conference, Birmingham/England, S. D2/Q/1-D2/Q/13, (1981)
- 13) Mothes, H.: Bewegung und Abscheidung der Partikeln im Zyklon, Dissertation, Universität Karlsruhe, (1982)
- 14) Degner, B.: Bergbautechnik 19 [10], 556-559 (1969)
- 15) Nagel, R.: Staub-Reinh. d. Luft 24, [11], 492-494 (1964)
- 16) Leith, D., Licht, W.: AIChE Symp. Ser. 68, 126, 196-206, (1972)
- 17) Licht, W., Koch, W.: Chem. Engineering 34, [7], 80-88, (1977)
- 18) Barth, W.: Brennstoff, Wärme, Kraft 8, [1], 1-9, (1956)
- 19) Muschelknautz, E.: Chem.-Ing.-Techn. 44,

- [1/2], 63-71, (1972)
- 20) Mothes, H., Löffler, F.: Chem.-Ing.-Techn. **56** [9], 714-715, (1984)
 - 21) Dietz, P. W.: Powder Technology **31**, 221-226 (1982)
 - 22) Mothes, H., Löffler, F.: Chem.-Eng. Process. **18**, 323-331, (1984)
 - 23) Muschelknautz, E.: VT-Hochschulkurs II, Mech. Verfahrenstechnik, 5. Beilage zur Zeitschrift "Verfahrenstechnik", 6 (1972)
 - 24) Mothes, H., Löffler, F.: Fliehkraftabscheider, Zykclone; Skriptum Zum Kurs Staubabscheiden des Institutes für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik an der Universität Karlsruhe, 6. Auflage, Karlsruhe, (1984)
 - 25) Mothes, H., Löffler, F.: 1. Europäisches Symposium Partikelklassierung in Gasen und Flüssigkeiten, Veranstaltung der Reihe PAR-TEC, Nürnberg, Mai, 1984, Preprints: Nürnberger Messe- und Ausstellungsgesellschaft, Nürnberg, S. G2-G 14, (1984)
 - 26) Krambrock, W.: Chem.-Ing.-Techn. **51**, [5], 493-496, (1979)
 - 27) Krambrock, W.: "Aufbereitungstechnik" **12**, [10], 643-649, (1971)
 - 28) VDI-Richtlinie 3679: Naßarbeitende Abscheider, VDI-Verlag, Düsseldorf, (1980)
 - 29) Weber, E., Brocke, W.: Apparate und Verfahren der industriellen Gasreinigung, Bd. 1: Feststoffabscheidung, Verlag-Oldenburg, München, (1973)
 - 30) Löffler, F., Schuch, G.: Filtration & Separation **18**, [1], 70-74, (1981)
 - 31) Löffler, F.: Technik der Gas/Feststoffströmung-Sichten, Abscheiden, Fördern, Wirbelschichten, Tagung Düsseldorf, Dez, 1981. Preprints S. 77-97, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), Düsseldorf, 1981
 - 32) Löffler, F.: Chem.-Ing.-Techn. **52**, [4], 312-323 (1980)
 - 33) Löffler, F., Dietrich, H., Flatt, W.: Staubabscheidung mit Schlauchfiltern und Taschenfiltern, Veiweg-Verlag, Braunschweig (1984)
 - 34) Sievert, J., Löffler, F.: Abreinigungsfilter, Skriptum zum Kurs Staubabscheiden am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik an der Universität Karlsruhe, 6. Auflage, Karlsruhe, (1984)
 - 35) VDI-Richtlinie 3677: Filternde Abscheider, VDI-Verlag, Düsseldorf, (1980)
 - 36) DIN 71459: Filtereinsätze für Trockenluftfilter, Juli 1973
 - 37) Sievert, J., Löffler, F.: Fortschritte und Entwicklungstendenzen bei der Gasreinigung mit Faserfiltern, Proc. zum Kolloquium am Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik, Universität Karlsruhe, S. 30-45, (1984)
 - 38) Löffler, F.: Filtertechnik, Tagung Wiesbaden, April 1983, Preprints S. 65-91 VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), Düsseldorf, (1983)
 - 39) Klingel, R., Löffler, F.: Chem.-Ing.-Techn. **56**, 1, 66-67, (1984)
 - 40) Klingel, R.: Untersuchung der Partikelabscheidung aus Gasen an einem Schlauchfilter mit Druckstoßabreinigung, Dissertation Universität Karlsruhe, (1982), Fortschr.-Ber. VDI-Z. Reihe 3, Nr. 76, Düsseldorf, (1982)
 - 41) Klingel, R., Löffler, F.: Chem. Eng. Process, **18**, 189-198, (1984)
 - 42) Löffler, F.: Staub-Reinh. d. Luft **30**, 518-522, (1970)
 - 43) Menden, G.: Aufbereitungstechnik **25**, [2], 102-108, (1984)
 - 44) Kleinwort, J.: Zement-Kalk-Gips **33**, [11], 590-593, (1980)

(訳 横山 豊和*)

* (株)細川粉体工学研究所
(〒573 枚方市招提田近 1-9)
Tel. (0720) 57-3721

東ドイツにおける粉体工学

Partikeltechnologie in der Deutschen Demokratischen Republik*

Prof. Dr. sc. techn Heinrich Schubert*

1. はじめに

現在の東ドイツ国内での粉体工学の始まりを特長づけることは容易ではない。歴史をさかのぼると、分散系固体物質の取り扱い、すでに中世の技術において重要な役割を果たしていた。しかし、粉体工学というものを分散系固体物質の変化を目的としたプロセスの科学的な解明に関する急速な進歩と密接に結びついた幅広い科学的アプローチの体系化と考えるならば^{1,2)}、東ドイツにおける粉体工学の始まりは1960年代にさかのぼる。その発展の担い手となっているのは、特に大学や工科大学 (Freiberg, Dresden, Merseburg), 科学アカデミー (Dresden, Freiberg, Berlin) ならびに、一連の企業である。また「工業会」のような技術者の組織や、学術的な協会は、たとえば「造粒」、「粉碎」、「粉体層の力学と貯槽」のようないくつかの専門委員会に分かれているが、これらはセミナーや討論会を主催し、常に科学的な情報と経験の交換を図っている。フライベルク鉱山大学では、4年毎に粉体工学に関する大きな学術シンポジウムが開催され、国の内外から参加者があり平行して多くのセミナーが行なわれている。

本報告では最近の研究および開発の成果についての概要を示すが、特に以下の分野について重点的に述べることにする。

1) 粉子集合体の特性

* Bergakademie Freiberg, Wissenschaftsbereich Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik

ただし本報告は、以下のメンバーの協力によるものである。

Dr.-Ing. J. Hanisch, Dr. rer. nat. B. Kubier,
Dr. rer. nat. K. Mühle, Dr. sc. tech. Th. Neeße,
Dr.-Ing. J. Tomas

- 2) 粉碎と機械的な活性化
- 3) 乱流多相流におけるプロセス
- 4) 粉体層の力学と貯槽

2. 粒子集合体の特性

粒度測定技術に関しては東ドイツにおいても、微粉や超微粉の粒度を測定する上で今日世界的レベルにある多くの測定装置、たとえば Sedigraph 500D や Partoscope F, Coulter Counter, Quantimet 720などが使われている。篩分析以外で最も広く用いられているのは沈降法である。沈降法には、種々の業界でなおよく使われている Dallendörfer と Langhammer の沈降式測定装置（アンドレアゼン式の改良型³⁾）や沈降天秤の他に Sedigraph 500D や 5000E のように X 線を応用した沈降式測定装置が用いられている。個々の装置の技術的な発展は、従来はたとえば粉体の低濃度での測定を可能にした Sedigraph 5000 D⁴⁾ の改良型測定セルのような在来の装置の変更や改良と、たとえば粉体の溶解現象から粒度を測定する⁵⁾ というような、非常に特殊な測定法の開発などに限られていた。しかし最近、分散の研究やコールターカウンタでのサンプルの測定ゾーンへの導入についての研究により、サンプルの供給が不適当であるために生じる粒度分析上の誤差を小さくするサンプル供給装置⁶⁾ が開発されている。

東ドイツで電解法によって製造されている正方形の目開きを持つ微粉用の標準篩は高い品質を有している。この篩には 5~100 μ m の目開きをもつものがあり、50 μ m 以下では 5 μ m 毎、それ以上では 10 μ m 毎の目開きを持つ篩が用意されているが、それ以外に 63 μ m の篩もある。これらの篩に特長的なことは、補強用の格子と固有の篩箔とが篩面で重ね合わされていることであり、これによってこの篩は他のメーカーのマイクロシブよりも優れている。これはさらに比較的大きな開口率を持

ち、線径がよくそろっていることでもきわだっている。

最近の粒度測定技術の研究は、単純化した仮定の下に主に手法的な研究に関係するものが目立つ。上述の微粉用標準篩を使った篩分析についてはよく研究されており、Müller ら⁷⁾は、標準篩を 5 μ m まで空気 2 式篩を使って研究し、一方 Bernhardt ら⁸⁾は 40 μ m 以下の範囲で超音波振動を利用した湿式篩について研究している。

沈降法とそれに伴う誤差について研究報告も多い⁹⁻¹²⁾。これらに関して目をひくのは、沈降媒液と分散剤についてまとめた報告¹³⁾で、それには重要な基本的事項の他に、およそ 250 の粉体に適した沈降媒液と分散剤がそれらの主要な物理的特性と共に示されている。

また、個々の要求に対して十分広い測定範囲を保証するために、種々の測定法の組み合わせについて一連の研究が行なわれている。たとえば Heidenreich¹⁴⁾は、微粉用標準篩を電気的検知方法（コールタ原理）に基づいた粒度分析装置 Laborscale とうまく組合わせて良い結果を得ている。もう 1 つの例としては、遠心沈降法と種々の重力沈降法または超音波振動式マイクロシブ、あるいは Laborscale との組み合わせの研究¹⁵⁾が行なわれ、これらの組合せは条件付きで可能であると結論されている。

一方、粒度分析結果をコンピュータで解析する努力がなされている¹⁶⁾。これに関しては、多変数解析装置と様々な測定装置 (Partoscope F, Laborscale) との結合を挙げることができる¹⁷⁾。その他、以前に発表されていなかった研究として、Reyleigh 散乱やレーザー光回折に基づく粒度測定装置の開発に関連したものがある。

3. 粉碎と機械的活性化

この分野における研究および開発の仕事は、東ドイツにおいてかなり以前から重要な役割を果たしてきた。まず、これに関連したものとして粉碎における微視的なプロセス、すなわち単一粒子ならびに粒子層の粉碎についての基礎的な研究が挙げられる。はじめに圧力、打撃や衝撃によるガラス粒子の粉碎が問題となった^{18,19)}。その際、破碎確率分布が多変数の対数正規分布を用いることによって、確率的な大きさとして粉碎エネルギーによって把握できることが明らかになった。そこでは、粉碎エネルギーとは加えられた応力によるエネルギーの中で、粒子がその確率的な強度に応じて破壊される。すなわち不安定な亀裂の伝播に有効なエネルギーと考えることができる。大きさが等しい球の粉碎品を、粉碎エネルギーのクラスに分けると、これらは上限を持つ 3 つのパラメータの対数正規分布によって表現され、ここでパラメー

タはその粉碎エネルギーの関数となる。

エネルギー効率を粒子表面積増加と粉碎エネルギーの比と定義すると、それは衝撃応力や圧縮応力の際には、粉碎エネルギーに無関係となる（破壊工学の相比例）が、エネルギー効率は応力のエネルギーに関係する。この点に注目すると、単一粒子が亀裂の発生に必要なエネルギー（すなわち粉碎エネルギー）を力の作用面で直接に受け取ることができるような機械（たとえばジョークラッシャ、コーンクラッシャ、回転衝撃ブレーカやハンマーブレーカの衝撃ブレードやハンマなど）はエネルギー的に最も効率のよい粉碎機ということができよう。

不規則な形状をした粉碎品の粒度分布は、多数の基本集合体 (Grundkollektive) が混ざった分布を表わしている。これらの基本集合体の各々は、単一粒子粉碎の場合²⁰⁾だけでなく、粉体層の粉碎の場合²¹⁾にも上限を持つ対数正規分布によって近似することができる。基本集合体の数は、粉碎品の粒度によって変化し、これと共に減少する²¹⁾。この対数正規分布の 3 つのパラメータ（平均径 d_{50} 、上限粒度 d_0 、標準偏差 σ_m ）は Fig. 1 に示すように応力仕事に無関係であることが分かっている。基本集合体の中で μ_i % の部分のみが粉碎仕事、あるいは応力仕事と共に変化する。この基本集合体についての十分な物理的意味は、まだ明らかにされていないが、表面の欠陥点の構造、従って粒子の形状が非常に重要な役割を果たしていることは明らかである^{20,21)}。

一部開放形の圧縮装置中での圧縮粉碎の結果が、様々な杵の構造について、選択関数（破碎確率）、応力—ひずみ曲線、粉碎品の粒度分布およびエネルギー効率に関連して計算され比較されている²²⁾。

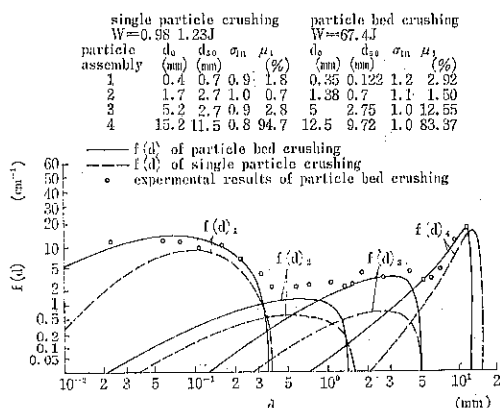


Fig. 1 原料粒度 12.5~16mm の石英粒子の単一粒子粉碎と粒子層の圧縮粉碎による粉碎品の粒度分布（頻度表示）の比較

4. 乱流多相流中のプロセス

東ドイツにおける加工技術に関する研究の中の1つの重要な方向は、乱流状態の多相流中における現象、特に分離過程や懸濁液中の凝集過程（フロック形成）のモデル化および最適化に関連している。

多くの分離装置、たとえば湿式サイクロン、分離槽、向流式水箄装置、風力分級機などでは、分離は高レイノルズ数の状態で起こるので、乱流がこれらのプロセスに大きな影響を与えることになる^{43,44}。この知識に基づいて従来のモデルよりも現象をよりよく表現する分離モデルが展開された⁴⁵⁻⁴⁷。最も重要な結果として分離関数 $T(d)$ の解析的な表現として、次式が得られている。

$$T(d) = \frac{1}{1 + \frac{\dot{V}_F}{\dot{V}_G} \exp\left(-\frac{v_s(d)H}{D_t}\right)} \quad \dots(1a)$$

これを正規化すると

$$T(d) = \frac{1}{1 + \left[\frac{\dot{V}_F}{\dot{V}_G}\right]^{1 - (d/d_{50})^\alpha}} \quad \dots(1b)$$

ここで、 d : 粒径、 d_{50} : 分離径 ($T=0.5$ となる粒子径)、 $\dot{V}_F$: 微粉側流体体積流量、 $\dot{V}_G$: 粗粉側流体体積流量、 $v_s(d)$: 粒径 d の粒子の終末沈降速度、 H : 流出口の高さ（力の作用方向についての微粉出口と粗粉出口

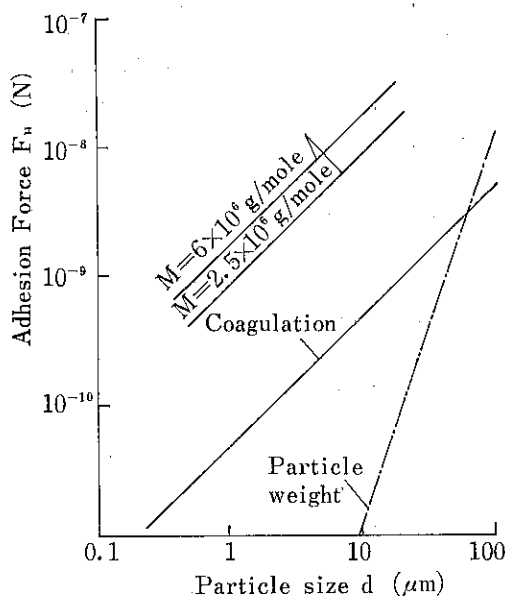


Fig. 3 ガラス粒子の凝集と種々の分子量 $\bar{M}$ を持つ陰イオン性ポリアクリルアミドによるフロッキュレーションの際の粒度による粒子の付着力 F_H と質量との比較

の距離)、 D_t : 乱流拡散係数、 $\alpha: v_s \propto d^\alpha$ における指数である。

このモデルを使って湿式サイクロンと分離槽について分離径と分離精度の計算の基礎が展開された⁴⁸⁻⁵²。式(1a)と(1b)による分離効率の計算値と実験値との比較により、湿式サイクロンでは実際に得られる分離精度は多くの場合、理論値に近いことが分かった。

このモデルに基づいて得られる情報は、小型湿式サイクロンの開発にも使われている⁵³。

フロック反応槽中の乱流においてフロックの粒度分布がみられるが、これは物質系の作用因子、試薬の効果、マイクロ乱流強度などによって影響される。多くの研究の目的は、本質的な作用因子を考慮した、物理的に根拠のあるフロック形成モデルを作ることである。生成したフロックの大きさは、フロック中の粒子間の付着力により大きな影響を受けるので、この現象について多数の研究がなされている⁵⁴⁻⁵⁷。Fig. 3 から粒子の凝集とポリマーフロック形成の場合について、粒径 d の粒子間の付着力 F_H の大きさの目安が得られる。

ポリマーフロック形成の場合には、付着力は物質の種類、特に分子量 $\bar{M}$ と、ポリマーの濃度によって変化する。さらに乱流中の吸着と付着過程における流れの状態、接触時間、ならびに付着粒子に作用する応力などがフロックの大きさに重要な影響を及ぼす。

付着力との関係からフロック強度についてのモデルが展開され、それによって安定なフロック径の上限 $d_{F,max}$ について次の推算式が得られている。

$$d_{F,max} = \left[We'_c \frac{1-P_F}{P_F} \frac{F_H}{\rho d^2} \right]^{1/2} \left(\frac{\nu}{\epsilon} \right)^{1/2} \quad \dots(2)$$

ここで We'_c : 修正された臨界ウェーバ数、 P_F : フロックの空隙率、 ν : 液体の動粘性係数、 ρ : 液体の密度、 ϵ : 乱流のエネルギー散逸である。このモデル式は実験的に確かめることができると思われる^{59,61}。

5. 粉体の流動と貯槽

最近多くの研究が、微粉体の流動特性を把握するために、その測定方法の基になっている仮定に注目している⁶²⁻⁶⁷。その際、Jenike の剪断セルと Carr や Walker のリング剪断セルの結果との対応性が注目されている。これらの研究では種々の測定や解析手法ならびに剪断セルの構造的な開発が検討されている。

多くの報告は、飼料、肥料、核燃料、カリ塩、造粒品などのような様々な粉粒体の流動性に関連している^{62,63}。特にセメント⁶⁴、飼料^{65,68-71}、カリ塩⁷²⁻⁷⁶などの流動特性に及ぼす粒度分布の影響について、系統的に研究する必要性が明らかになっている。

湿潤性微粉体，すなわち単に液体架橋ができる不溶性の物質だけでなく，たとえばカリ塩のように液体架橋の乾燥の際に固体架橋が生じ，ほとんど完全に固まるような，若干溶解性のある物質の流動性を表現するため，物理的な根拠のあるモデルが初めて提出された⁷²⁻⁷⁸⁾。

その他，粉体貯槽の設計に関連した一連の研究^{62,63)}ならびに，その際に粉体の流動性を確率的に特長づけた研究⁷⁹⁾などが注目される。また粉体の流動化特性の表現のために，測定技術の基礎や理論的な計算方法が展開されてきた⁶⁵⁾。実際の応用にとって問題となっているのは，通気したサイロからの排出^{62,63,80)}や通気サイロ中のセメントの貯蔵や均一化特性などである^{63,80-83)}。それ以外に排出補助装置の応用に関する研究^{62,63,70,84)}も行なわれている。貯槽における流動過程のモデル化やスケールアップについての研究^{62,63,80)}も多い。

特に農作物の貯蔵などで，ホップやサイロの取り扱い上特に重要なことは，偏析をさけることである^{63,66-71)}。これに関しては，とりわけ適当な充填装置の開発が重要である⁶³⁾。

引用文献

- 1) Schubert, H.: Die Bedeutung der Partikeltechnologie für den wissenschaftlich-technischen Fortschritt. Chem. Techn. **32** [11] S. 556-562. (1980)
- 2) Schubert, H.: Die Herausbildung der Partikeltechnologie ein bedeutsamer wissenschaftlicher Integrationsprozeß. Freiburger Forschungshefte A 700, S. 11-32. (1985)
- 3) Dallendörfer, R., und L. Langhammer: Eine Variation des Verfahrens nach ANDREASEN zur beschleunigten Bestimmung der Korngrößenverteilung keramischer Rohstoffe. Hermsdorfer Technische Mitteilungen 1 [1] S.4-7. (1960)
- 4) Ullrich, B., Schmidt, D., und M. Störr: Erfahrungen mit einer veränderten Meßzelle für das Röntgensedimentometer Sedigraph 5000D. Silikattechnik **35** [10] S. 312-314. (1984)
- 5) Richter, V., und I. Ilsche: Ermittlung von Feinheitsmerkmalen für Pulver aus deren Lösungsverhalten. Vortrag 2. Fachtagung Granulometrie, Dresden 1981.
- 6) Heidenreich, E., und M. Stintz: Dispersion of Samples and Sample-feeding for Counting Methods. Particle Characterization 1 [1] S. 28-13. (1984)
- 7) Müller, H., Kauter, S., und L. Rudolph: Untersuchungen zur Prüfsiebung bis 5µm mit einem Luftstrahlsieb. Freiburger Forschungshefte A 676 S. 91-104. (1983)
- 8) Bernhardt, C., und K. Husemann: Über Erfahrungen zur Mikrosiebung mit Ultraschall. Chem. Techn. **34** [10] S. 507-511. (1982)
- 9) Bernhardt, C.: Zur inkrementalen Sedimentationsanalyse im Schwerefeld. Freiburger Forschungshefte A 676 S. 36-71. (1983)
- 10) Bernhardt, C.: Koagulationserscheinungen als Fehlerursache bei der Sedimentationsanalyse. Aus: Partikelmeßtechnik, DECHEMA-Monographien Nr. 1589-1615 (Band 79), S. 251-265. Weinheim/Bergstr.: Verlag Chemie GmbH, 1976.
- 11) Helfricht, R., Helfricht, B., und B. Kubier: Zur Anwendung der Sedimentationsanalyse bei der Untersuchung der Trenneigenschaften von Hydrozyklonen in der Kaolinaufbereitung. Silikattechnik **36** [1] S. 17-20. (1985)
- 12) Bernhardt, C.: Particle Size Analysis of Heterogeneous Powders by Sedimentation. Particle Characterization 1 [3] S. 121-126. (1984)
- 13) Bernhardt, C.: Herstellung von Suspensionen für die Sedimentationsanalyse. Methodische Hinweise, Flüssigkeiten und Dispergiermittel. Freiberg: Forschungsinstitut für Aufbereitung, 1984.
- 14) Heidenreich, E.: Zur Kombination der Prüfsiebung mit dem Zählgerät Laborscale. Preprints 2nd European Symp. Particle Characterization, Nürnberg 1979, S. 218-237.
- 15) Dietzsch, B., und R. Heckel: Kombination der Sedimentation im Zentrifugalkraftfeld mit anderen Korngrößenbestimmungsmethoden. Vortrag 2. Fachtagung Granulometrie, Dresden 1981.
- 16) Heidenreich, E.: Mathematical Interpretation of Size Analysis Results Using Computers. Proc. Int. Symp. Powder Technology '81, S. 65-70. Kyoto: Soc. of Powder Technology 1982.
- 17) Stintz, M.: Koppelung der Vielkanalanalyse mit unterschiedlichen Gebern. Dissertatiin A, TU Dresden 1985.

- 18) Baumgardt, S., Buss, B., May, P., und H. Schubert : Zum Vergleich der Zerkleinerungsergebnisse bei der Einzelkornzerkleinerung mit verschiedenen Beanspruchungsarten. *Aufbereitungs-Techn.* **16** [8] S. 397-400, und [9] S. 467-476. (1975)
- 19) Baumgardt, S., Buss, B., May, P., und H. Schubert : On the comparison of results in single grain crushing under different kinds of load. *Proc. Eleventh Int. Mineral Processing Congress, Cagliari 1975*, S. 3-32.
- 20) Klotz, K., und H. Schubert : Crushing of Single Irregularly Shaped Particles by Compression : Size Distribution of Progeny particles. *Powder Technology* **32** S. 129-137. (1982)
- 21) Hanisch, J., u. H. Schubert : Comminution of Irregularly Shaped Particles by Slow Compression : Interpretation of the Size Distributions of Progeny Particles as Mixed Distributions. *Particle Characterization* **1** [2] 74-77. (1984)
- 22) Hanisch, J., und H. Schubert : Compressive Comminution of Particle Beds. *Preprints XVth Int. Mineral Processing Congress, Cannes 1985*, Vol. I, S. 201-212.
- 23) Göll, G., Hausbrand, J., Scheibe, W., u. a. : Untersuchungen zur Beanspruchung von Körnerkollektiven bei vorherrschender Schlagbeanspruchung. *Aufbereitungs-Techn.* **21** [5] S. 231-237. (1980)
- 24) Höfl, K. : Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Leipzig : VEB Deutscher Verlag f. Grundstoffindustrie, 1985.
- 25) Feige, F. : Aspekte bei der Feinzerkleinerung von mineralischen Rohstoffen im Walzenspalt. *Preprints Europ. Symp. Particle Technology, Amsterdam 1980*, Vol. A, S. 570-583.
- 26) Irmer, K., Folgner, T., und K. Höfl : Untersuchungen zur Klinkermahlung auf Wälzmühlen. *Freiberger Forschungshefte A 685* S. 8-17. (1983)
- 27) Feige, F., Verch, H., und A. Krähner : Energiesparende Herstellung von Normzementen in Wälzmühlen mit äußerem Materialkreislauf *Zement-Kalk-Gips* **36** [11] S. 628-632. (1983)
- 28) Bayer, M., Davids, A., und K. Höfl : Neue Ergebnisse auf dem Gebiet der Schwingmahlung. *Freiberger Forschungshefte A 685* S. 24-38. (1983)
- 29) Bayer, M. : Beitrag zur Dimensionierung von Schwingmühlen. *Dissertation A, Bergakademie Freiberg 1984.*
- 30) Kleßling, M. : Beitrag zur Auslegung von Vertikalschwingmühlen. *Dissertation A, Bergakademie Freiberg 1985.*
- 31) Davids, A. : Beitrag zur Naßmahlung in Rohrschwingmühlen. *Dissertation A, Bergakademie Freiberg 1985.*
- 32) Scheibe, W., Husemann, K. und L. Scheer : Untersuchungen zum Zerkleinerungsvorgang in Prallbrechern und Prallmühlen. *Wie/25/*, S. 49-63.
- 33) Husemann, K., Töpfer, E., und W. Scheibe : Beanspruchungsvorgänge in Stiftmühlen. *Aufbereitungs-Techn.* **20** [10] S. 551-558. (1979)
- 34) Husemann, K. : Untersuchungen zu den Grundlagen der Prallzerkleinerung unter besonderer Berücksichtigung der Vorgänge in Stiftmühlen. *Dissertation B, AdW der DDR 1979.*
- 35) Haubold, S., Eibisch, R., Dombrove, H., u. a. : Entwicklung der Durchlaufmahlung von Zement. *Preprints Int. Fachtagung "Fortschritte in Theorie und Praxis der Aufbereitungstechnik" Freiberg 1984*, S. 137-141.
- 36) Espig, D. : Berechnungsgleichungen und Gesetzmäßigkeiten für Gleichgewichtszustände von Mahlanlagen mit Trommelmühlen. *Freiberger Forschungshefte A 658* S. 7-42. (1982)
- 37) Espig, D., und E. Lippek : Fundamental Relationships for the Steady State of Several Grinding Circuits. *Preprints Control '84, Los Angeles 1984*, S. 77-84.
- 38) Dombrove, H., Hoffmann, B., und W. Scheibe : Über Wirkungsweise und Einsatzmöglichkeiten von Mahlhilfsmitteln. *Zement-Kalk-Gips* **35** [11] S. 571-580. (1982)
- 39) Heinicke, G. : Recent Advances in Tribochemistry. *Proc. Int. Symp. Powder Technology '81, Kyoto 1981*, S. 354-364. *The Society of Powder Technology 1982.*
- 40) Bernhardt, C., und H. Heegn : Zur mechanischen Aktivierung in Feinzerkleinerungsmaschinen. *Wie /10/*, S. 213-225.

- 41) Bernhardt, C., und H. Heegn : Einige Ergebnisse zur mechanischen Aktivierung in Feinzerkleinerungsmaschinen. Freiburger Forschungshefte A 602 S. 49-60. (1978)
- 42) Bernhardt, C., und H. Heegn : Structural Changes, Energy Accumulation and Increase of Reactivity - A Contribution to Grinding and Mechanical Activation of Solids. Aus : wie /39/, S. 442-448.
- 43) Schubert, H : Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Bd. I, 3. Aufl. Leipzig : VEB Deutscher Verlag f. Grundstoffindustrie, 1975
- 44) Schubert, H., Heidenreich, E., Liepe, F., und Th. Neeße : Mechanische Verfahrenstechnik, 2. Aufl. Leipzig : VEB Deutscher Verlag f. Grundstoffindustrie, 1986.
- 45) Neeße, Th., und H. Schubert : Modellierung und verfahrenstechnische Dimensionierung der turbulenten Querstromklassierung. Chem. Techn. 27 [9] S. 529-533, (1975) 28 [2] S. 80-83, (1976) 28 [6] S. 273-278, (1976) 29 [1] S. 14-18. (1977)
- 46) Neeße, Th. : Modellierung der turbulenten Querstromklassierung. Dissertation B, Bergakademie Freiberg 1978.
- 47) Schubert, H. : Stand und Entwicklungstendenzen der Hydroklassierung. Preprints 1. Europ. Symp. Partikelklassierung in Flüssigkeiten und Gasen, Nürnberg 1984, S. A2-A27.
- 48) Schubert, H., und Th. Neeße : The role of turbulence in wet classification. Proc. Tenth Int. Mineral Processing Congress, S. 213-239. London : The Institution of Mining and Metallurgy, 1974.
- 49) Neeße, Th., Espig, D., und H. Schubert : Die Trennkorngröße des Hydrozyklons bei Dnnstrom- und Dichtstromtrennungen. Aus : wie /47/, S. H3-H18.
- 50) Schubert, H., und Th. Neeße : A hydrocyclone separation model in consideration of the turbulent multi-phase flow. Preprints 1. Int. Conf. on Hydrocyclones, Cambridge, BHRA Fluid Engineering, Paper 3, S. 23-36. 1980
- 51) Neeße, Th., Dallmann, W., und D. Espig : Effect of turbulence on the efficiency of separation in hydrocyclones at high feed solids concentrations. Preprints 2. Int. Conf. on Hydrocyclones, Bath, BHRA Fluid Engineering, 1984, Paper B3, S. 51-65.
- 52) Schubert, H. : A hydrocyclone separation model in consideration of the turbulent multi-phase flow (in Japanisch). Solids Handling and Processing Industry (Jap.) 14 [6] S. 30-37. (1982)
- 53) UK Patent, GB 2 116 079 A vom 21. 12. 81.
- 54) Mühle, K., Domasch, K., und Th. Neeße : Zur physikalisch begründeten Modellierung des Flockungsprozesses, Teil I : Der Mikroprozeß der Teilchenhaftung durch interpartikuläre Wechselwirkungskräfte. Chem. Techn. 34 [1] S. 14-18. (1982)
- 55) Domasch, K., und K. Mühle : Wie /54/, Teil II : Der Mikroprozeß der Teilchenhaftung durch Brückenbindung mit organischen Polymeren. Chem. Techn. 34 [7] S. 360-363. (1982)
- 56) Mühle, K. : Particle adhesion in coagulation and bridging flocculation. Colloid & Polymer Sci. 263 S. 1-13. (1985)
- 57) Mühle, K. ; Der Mikroprozeß der Teilchenhaftung bei der Flockung. Freiburger Forschungshefte A 720 S. 22-46. (1985)
- 58) Mühle, K., Schulze, H. J., Stechemesser, H., und A. Ivanauskas : Study of the basic steps in flotation and flocculation. Trans. Instn. Min. Metall, Sect. C, Min. Proc. Extr. Metall. 91 [9] S. C112-C116. (1982)
- 59) Mühle, K., Ivanauskas, A., und Th. Neeße : Eine modifizierte WEBER-Zahl für die Flockenstabilität in turbulenter Strömung. Chem. Techn. 55 [10] S. 788-789. (1983)
- 60) Neeße, Th., Ivanauskas, A., und K. Mühle : Ein physikalisch begründeter Modellansatz für die Stabilität von Teilchenaggregaten bei der Flockung. Freiburger Forschungshefte A 720 S. 63-81. (1985)
- 61) Ivanauskas, A., Mühle, K., und K. Domasch : Experimentelle Untersuchungen zur Flockenstabilität in turbulenter Strömung. Freiburger Forschungshfte A 720 S. 82-106. (1985)
- 62) Autorenkollektiv : Physikalische Eigenschaften von Körnungen und Kornschüttungen, Teil II : Kornschüttungen - Physikalische Eigen-

- schaften, deren meßtechnische Erfassung sowie Dimensionierung, Gestaltung und Betreiben von Bunker- und Siloanlagen. Freiburger Forschungshefte A 634 (1980).
- 63) Autorenkollektiv : Schüttgutmechanik und Bunkern. Freiburger Forschungshefte A 703 (1985).
 - 64) Höhne D., und V. Schünemann : Untersuchungen zum Einfluß der Korngrößenverteilungsparameter auf die Fließfähigkeit feinkörniger Schüttgüter. Preprints Europ. Symp. Particle Technology, Vol. B, S. 969-980, Amsterdam 1980.
 - 65) Autorenkollektiv : Fließverhalten feinkörniger Schüttungen. Freiburger Forschungshefte A 694 (1984).
 - 66) Höhne, D., und V. Schünemann : A contribution to the comparability of shear test results. Paper 1st Europ. Symp. on Stress and Strain Behaviour of Particulate Solids, Prague 1984.
 - 67) Horn, M., und H. Sinkwitz : Nomogramme zur verfahrenstechnischen Dimensionierung von Schüttgutbunkern nach JENIKE - ein Mittel zur Senkung des Aufwandes bei der Durchführung und Auswertung von Scherversuchen. Chem. Techn. **35** [9] S. 452-455. (1983)
 - 68) Fürll, Ch., und M. Swierkowski : Verringerung von Entmischungserscheinungen und Futterverlusten beim Befüllen von Trockenmischfuttersilos. Agrartechnik **31** [8] S. 362-365. (1981)
 - 69) Fürll, Ch., und V. Scholz : Lagerung von Trockenmischfutter in Behältern. Agrartechnik **31** [8] S. 353-355. (1981)
 - 70) Mührel, K. : Transport, Umschlag und Lagerung in der Landwirtschaft. Berlin : VEB Verlag Technik, 1983.
 - 71) Fürll, Ch. : Einfluß des Abriebanteils von kompaktiertem Trockenfutter auf die Gestaltung von Lagerbehältern. Agrartechnik **28** [5] S. 200-203. (1978)
 - 72) Tomas, J., und H. Schubert : Zur Modellierung der Festigkeit und des Fließverhaltens von feuchten und leichtlöslichen mineralischen Schüttgütern, Teil I : Schüttgüter mit Flüssigkeitsbrückenbindungen, Teil II : Schüttgüter mit Festkörperbrückenbindungen. Chem. Techn. **34** [3] S. 130-134. und [9] S. 459-464. (1982)
 - 73) Tomas, J., und H. Schubert : Modeling of the strength and the flow properties of moist soluble bulk materials. Aus : wie /16/, S. 118-125.
 - 74) Tomas, J., und H. Schubert : Modellierung der Festigkeit und des Fließverhaltens von feuchten leichtlöslichen Schüttgütern. Aufbereitungs-Techn. **23** [9] S. 507-515. (1982)
 - 75) Tomas, J., und H. Schubert : Zum Fließverhalten von feuchten und leichtlöslichen Schüttgütern. Verfahrenstechnik **17** [1] S. 33-37. (1983)
 - 76) Tomas, J., und H. Schubert : Flow behaviour of moist bulk materials. Paper 1st Euro. Symp. on Stress and Strain Behaviour of Particulate Solids, Prague 1984.
 - 77) Schubert, H. : Kapillarkräfte - Modellierung und Anwendung in der Partikeltechnologie. Aufbereitung-Techn. **25** [1] S. 39-49. (1984)
 - 78) Schubert, H. : Capillary Forces - Modeling and Application in Particulate Technology. Powder Technology **37** S. 105-116. (1984)
 - 79) Sinkwitz, H. : Optimale Bunkerdimensionierung unter Berücksichtigung des stochastischen Charakters des Vorganges der Brückenbildung. Chem. Techn. **34** [12] S. 631-633. (1982)
 - 80) Aßmus, R. : Probleme der Maßstabübertragung bei der Auswertung von Modellversuchen an einem flachbodigen Silo mit Zentralkegel. Chem. Techn. **38** [5] S. 185-186. (1984)
 - 81) Aßmus, R., und O. Gramchow : Model of the assessment on continuous homogenization. Paper CHISA-Congress, Prague 1981.
 - 82) Aßmus, R. : Berechnungsverfahren zur Mischwirkung in kontinuierlichen Homogenisiersilos und ihre Anwendung auf einen pneumatischen Durchlaufmischer. Chem. Techn. **33** [4] S. 184-187. (1981)
 - 83) Aßmus, R., Wellmann, P., und K. Zeig : Control of the outflow stream from silos by means of a new flowmeter. Paper 1st Europ. Symp. on Stress and Strain Behaviour of Particulate Solids, Prague 1984.
 - 84) Scholz, V. : Grundlagen zur geometrischen Anordnung starrer Einbauten in Schüttgutbehältern. Agrartechnik **30** [4] S. 163-166. (1980)

(訳 横山 豊和)

タイにおける粉体工学の役割

Roles of Powder Technology in Thailand

Associate Professor

Dr. Wiwut Tanthapanichakoon*

1. はじめに

いわゆる粉体工学と呼ばれる学問で取り扱われる技術は、タイ国内の種々の産業において昔から広く使われてきたが、その学問の概念自体はタイでは比較的新しいものである。筆者が理解するところでは、粉体工学はパウダーハンドリング、固体材料の粉砕、粉粒体の分離・分級、固体粒子の燃焼や他の固気液物質との反応などいろいろな現象を科学的かつ体系的に取り扱う学問である。もちろん、それは実際的な経験なしには成り立たないが、一方、現象の科学的な解釈やその確認、あるいは、あらゆる事実と理論の体系化がなされなければ、粉体工学は成長することもなく、一つの学問として認められる価値がないであろう。

そうはいうものの、筆者自身、粉体工学に精通しているわけではない。筆者が初めて粉体工学の一端に接する機会を得たのは、京都大学で学生時代を送った1970年代初頭であった。当時、分級や粉砕、汙過などのような粉体工学に関連した単位操作の講義を井伊谷教授や吉岡教授から拝聴した。その後筆者は現在金沢大学助教授の金岡先生に、日本ではなくオースチンのテキサス大学で出会った。そこでまる1年彼と同じ研究室に配属され、エーロゾル工学について彼から学ぶ機会を得たが、その時には、筆者が後に江見教授、金岡助教授の研究室に4カ月間 JSPS（日本学術振興会）基金で訪問することになるとは思ってもいなかった。

お返しに金岡先生はチュラロンコン大学に筆者を訪れ、TPA（タイ・日技術推進協会）主催の大気汚染の計測と制御に関する3日間にわたる講演をされた。後に

そのセミナーのテキストは、TPAによりタイ語で出版するために改訂・増補がなされた。その間筆者は京都での“粉体工学国際シンポジウム1982”に出席する機会を得たが、そのシンポジウムや前回のJSPSによる日本訪問によって粉体工学の分野の多くの日本人研究者だけでなく、数人の外国人研究者とも知己を得ることができた。

しかしながら、タイでも現在分級や粉砕、バルクハンドリングや輸送などの単位操作が鉱山学科や化学工学科などで教えられてはいるものの、残念ながら粉体工学の確立や推進を目指した特定の団体や組織は存在していない。

本稿では、タイとその工業について簡単に紹介し、鉱業や製造業のような分野における粉体工学の役割について述べることにする。これによって読者の方々にタイにおける粉体工学の現状についての一般的なイメージをつかんで頂き、そこでこの新しい学問を確立するために何が必要かということについてご理解がいただければ筆者としては誠に幸いである。

2. タイの概要

a) 位置

タイは北緯5—21°、東経97—106°に位置し、インドシナ半島のほぼ中央部を占めている。タイは北部から西部、南西部にかけてはビルマと、北部から北東部にかけてはラオスと、東部にはカンボジアと、そして南部はマレーシアと接している。シャム湾およびインド洋（アンダマン海）に面している海岸線はそれぞれ1875 km、740 kmあり、首都バンコク Bangkok (Krungthep) はタイのほぼ中央に位置している。

b) 面積

タイ国土の総面積は513,115 km² で日本の国土のおよそ1.4倍である。バンコク市行政区域 (Bangkok と

* Department of Chemical Engineering,
Chulalongkorn University, Bangkok,
THAILAND 10500

Thonburi)の面積は1,565 km²で、東京都の約4分の1の広さである。

c) 人口

国勢調査は10年に1度行われており、最新の調査は1980年に実施された。国務省地方行政局の調べによると、1983年12月末のタイの人口は49,515,074人で1982年に対して1.4%の増加を示している。またバンコクは、地方からの著しい人口流入によって人口は5,018,327人となっており、厳しい交通混雑を引き起こしている。

d) 気候

国全体が熱帯性モンスーン気候で、一年は雨期(6月から10月まで)と乾期(11月から5月まで)に分けられるが、タイのどの地域においても大きな気温差はみられない。11月から2月にかけて幾分涼しくなることもあるが、一年を通じて概して暑く、特に3月から5月まで最も暑さが厳しい。気象台の報告によると、バンコクで1983年の最高、最低、平均気温はそれぞれ32.9°C、24.8°C、28.8°C、また年間降雨量は2,129.5 mm、平均湿度は76.3%であった。

e) タイと日本との経済的関係

両国間の経済的な関係は昔から密接であった。商業においては日本は1960年以来、マレーシアとアメリカ合衆国を抜いてタイの第一の貿易相手国となっている。その割合は最近減少してきたものの、日本は依然としてタイの総貿易額のおよそ20~30%を占めている。

タイにおける海外投資の観点から見ても、日本はBOI(投資委員会)の奨励を受けた産業プロジェクトに対する累積登録資本額の約1/3を占め、諸外国をリードしている。経済および技術協力の分野においても、日本は今では最大の援助供与国としてアメリカ合衆国をしのいでいる。

このようにして日本がタイの国家経済において主役を演じるようになってきた原因としては、両国が歴史的によい関係を持ち、また地理的にも比較的近距離にあること、および日本がタイの主要産物(農作物、水産物、ゴム、スズ等)に大きな需要を持ち、一方タイは日本の機械、工業用原料などに関心を持っているからである。上述の相互補助的な貿易関係の他に、投資に関して日本にとって魅力的なのは、タイの熟練度の高い、そして比較的安い労働力が豊富なことである。一方、タイ自体の工業化を推進するためにタイでは輸入代用品の製造産業や、さらに最近では輸出向けの工業への海外からの投資が奨励されている。このようにして両国相互の利益が基本的に助長されている。

インドシナ半島における急激な政治的変革によってもたらされた国際的な情勢の変化や第2次オイルショックなどの影響があるとはいえ、タイと日本の現在の関係

は、一般的に言ってまだ良好である。貿易と投資に関連した分野では、長年続いている両国間の貿易不均衡、投資に関する計画と現実のギャップ、技術導入や日本のタイ製品輸入強化などが緊急の課題であり、それらを解決するためには相互の努力が必要である。

f) タイ人の日本に対する姿勢

タイと日本は、長い歴史的な文化の交流をはかってきた。第2次世界大戦後、タイの学校では日本について学習しているが、密接な経済協力の結果、日本人の訪問者が多くなり、タイで日本製品が浸透しているためにタイ人にとって日本が身近に感じられるようになってきた。このようにして、タイ国民が日本人をアジアの兄弟と考えており、個人的にみると日本人は礼儀正しく勤勉で、頭がよく親切で能力があることは確かである。

同時にタイ人は西洋のものを崇拝し、それらに感化される傾向がある。このことはタイ人の国民的プライドと相俟って場合によっては日本の経済的支配に対して否定的な姿勢、時として憤りとなることがある。

3. タイにおける粉体工学と関連した工業

元来、農業国であるタイは開発途上国の仲間入りをしようとしている。農業、林業、水産業以外のタイの主要産業としては、商業は言うに及ばず鉱業、製造業、建築、造船などがある。これらの中で鉱業と製造業が粉体工学と関連してここで触れるに値する産業であろう。

3.1 鉱工業

タイの天然資源は、天然ガス、石油、スズ、タングステン、螢石、鉛、褐炭、バライト、石こう、石灰石など30種を超える。GNP(国民総生産)からみると、鉱工業は2%強といったところである。従来から鉱工業生産物の80%以上が輸出されており、その割合は輸出総額の4~5%にのぼっている。

シャム湾の天然ガス、陸地での石油・ガス、タイ北東部での岩塩や灰汁堆積物、北部での褐炭の開発などがタイの鉱工業を大きく発展させると期待されている。

明らかに固体のハンドリング、粉碎、分級、集塵、固体混合などのような広い意味での粉体工学に対する需要が、この鉱工業の分野において量的にだけでなく技術的なレベルにおいて急速に増大するはずである。

3.2 製造業

タイの工業化は1954年の産業推進条例の発布に始まったと言える。当初は輸入品にかわる単純な工業製品に重点がおかれていたが、次第にさらに進んだ製品に力が

入れられるようになってきた。現在では輸出を目指した工業に力がいれられてきている。

GNP（国民総生産）における製造業のシェアは、1960年の13.1%から1970年の16.8%へ、そして1983年の21.0%へと着実に増加してきている。しかしながら、現実にはタイの製造工業は輸入製品に替わるものを製造することに大きな力を注ぎ、投入資本と同様に多くの工業原料を輸入にたよっているので大部分の外貨を消費する部門になっている。

最近、電子部品や機械などのような輸出向けの工業も徐々に拡大してきた。一方、特に天然ガスの有効利用をねらった東部海岸開発計画では、将来にできる石油化学プラントは言うに及ばず、天然ガス分離プラント（1984年11月試運転済）や肥料プラント（目下入札中）、エチレンプラントあるいは工業用水設備や鉄道、港湾のような施設などの建設が検討されている。このようにしてタイの工業化の新しい時代がここ10年以内に訪れると期待されている。

現在のところタイの製造工業は、GNPの割合によって次のようにランキングされる。食品工業（27.8%）、繊維・織物工業（20.4%）、輸送機械（10.4%）、石油精製と石油製品（7.9%）、化学製品（7.7%）、非鉄金属製品（7.1%）などがあげられる。

粉体工学がすでに重要な役割を果たしている分野は、乾燥、固体食品の貯蔵や輸送、あるいは小麦の粉砕機、セメントプラント、粉炭燃料による火力発電所、洗剤プ

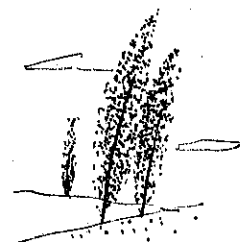
ラントなどである。粉体工学に関連して急速に成長しつつある2つの分野は、a) 発電所やセメントの製造における粉砕石炭粉の燃焼と、b) バッグフィルター、電気集塵機やその他の大気汚染防止装置などによる集塵である。

4. おわりに

タイの工業における粉体工学の役割は今までのところ「伝統的」であったと言える。この20年程の間、タイの教育機関で種々の観点あるいはテーマについて教えられてきたが、粉体工学は学問としてはタイにはかなり新しいものである。特にバンコク地域における大気汚染や、さらに逼迫した工場排気のコントロールを考えると、程度の高い粉体工学の導入の必要性は明らかである。

しかしながら、タイの学会にこの新しい学問の確立と推進がなければ、これから外国技術への依存がますます強くなるような望ましくない状態におちいるように思われる。数年前、ペンシルバニア州立大学のオースチン教授に来て頂きボールミルに重点をおいた粉砕に関する集中コースを開いて頂いたが反響はたいへんよかった。同じことは金岡先生のコースについても言える。このような活動は、単にタイの工業界の人々のレベルアップだけでなく、タイにおけるこの新しい学問の振興にとって非常に重要であると筆者は信じている。時がたたないとわからないことではあるが…。

（訳 横山 豊和*）



*（株）細川粉体工学研究所
（〒573 枚方市招提田近 1-9）
Tel. (0720) 57-3721

韓国粉体工業技術の現況

The Present Situation of Powder Processing Technology in Korea

姜 錫浩*
Suk-Ho Kang

崔 堉植**
Woo-Sik Choi

1. 緒 言

1974年のオイルショック以前には、産業用エネルギーから人工蛋白質、食品に至るまで石油資源のみが人類の全ての関心の対象のように考えられたが、オイルショック以後、エネルギーの供給源は多様化し、世界の趨勢は画期的な新しい転換点の一環として、特に粉体工学に相当な関心が高まり、粉体取り扱い技術の発展が最近10余年間に韓国国内でも大きくクローズアップされた。

粉体工学に関する関心が集まり始めたその理由は、気相および液相資源、すなわち天然ガスおよび石油資源の枯渇が予想され、これの代替を目標に置いたためであろう。したがって、石炭は有煙炭あるいは無煙炭をとわず、さらに低発熱量の土炭までも、エネルギー資源としてまたは化学工業の代替原料として重要視された。また、中小企業のプラスチック加工工業では、充填剤あるいは増量剤として微粉末状の無機物の添加剤をより多く使い、製品のコストをできるだけ低下しようと努力をしている。

当面、問題を解決する際に粉体工学の発展は必須的であろう。粉体工学 (Powder technology, Particulate engineering) は単一粒子として $0.1\mu\text{m}$ から数 cm の大きさの有機物および無機物固体¹⁾ の性質と挙動を調べ、その特性を工業に利用する工学の一分野であるが、現在では固体粒子のみならず液体粒子および液相中に分散している気泡の挙動までも粉体工学の範疇に入れ、取り扱うこともある。したがって、粉体工学の取り扱い範囲は化学工業のみならず、金属工業、農業、鉱業、土木工学および大気汚染等にまで幅広く及んでいる。これら各種産業分野で扱う粉体の単一粒子の共通な基本特性をつかむことが、粒子群 (Bulk solids) のハンドリング

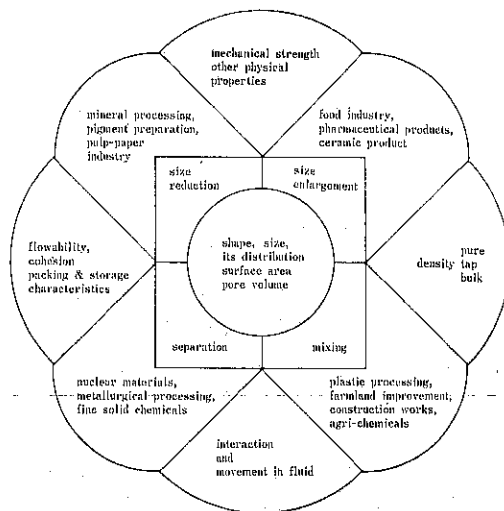


Fig. 1 粉体工学の内容とその関連産業分野

技術の発展へ大きくつながるのである。

Fig. 1 に粉体工学の内容と各種粉体取り扱い産業との関係を表している。図中の各部分を任意に組み合わせることにより球形あるいはさまざまな不規則形状の粒子を考えることができる。粉体の粒子形状を簡便な数値として表現しようとする学問的試図は Wadell²⁾ 以後絶えず行われてきた。Fig. 1 の内部円は粉体工学の核心技術分野を表している。すなわち単一粉体粒子の特性である粒子形状、粒子径と粒度分布および平均粒子径、表面積、空隙体積あるいは空隙率および空隙率分布などの特性値は粒体を取り扱うとき基本的に測定しなければならない物性値であり³⁻⁶⁾、これら基本的な物性値は粉体工学の4大基本操作 (粉砕、造粒、分離(分級)、混合)⁷⁻⁹⁾ の理論を展開したり、また工程の効率化において必須的である。粉砕と造粒操作は粒体の粒度の変化を伴う物理的単位操作であり、分離(分級)および混合操作は粒度の変化がない条件で行われる単位操作である。Fig. 1 の

* 嶺南大学校工科大学化学工学科教授

** 釜山大学校薬学大学製薬学科副教授
(韓国釜山市東萊区長洞山30)

Table 1 粉体形地下資源物量

(単位: 1,000M/T)

品 名	品 位	埋 蔵 量	年間生産量	備考
鉄 鉱 石	Fe 35%	124,203	600(Fe 56%)	a)
タングステン	WO ₃ 5.54%	23,245	5(WO ₃ 70%)	a)
モリブデン	MoS ₂ 0.28%	33,989	0.9(90%)	a)
マンガン	Mn 19.2%	1,078	0.1(40%)	a)
無 煙 炭	4,460 cal/g	600,420	20,2302	b)
石 灰 石	CaO 50.7%	10,047,926	7,931(50%)	a)
カオリン	SK 34<	58,718	550	c)
長 石		5,000	100	c)
珪 石	SiO ₂ +98%	100,000	332(99.5%)	d)
ロウ石	SK±30	10,000	397(SK 32)	d)
タルク		23,900	180	d)

a) 韓国産業銀行統計資料による(1982)

b) 大韓炭鉄協会統計資料による(1982)

c) 韓国動力資源部統計資料による(1979)

d) 韓国商工部統計資料による(1978)

四角形頂点と接している4つの区間には粉体工学技術が主工程または予備工程として採択される各種産業領域を列挙している。すなわち粉体工学の基本理論が利用できる産業としては精密化学工業、製紙工業、食品工業および農耕地改良事業など多種多様であることを指している。

このような産業に応用される粉体技術は先に列挙した基本的粉体物性値と4つの単位操作のみならず、粉体の2次物性値と呼ばれる流動性¹⁰⁾、付着性¹¹⁾、剪断性¹²⁾、その他の機械的物性、各種密度¹³⁾、および流体(気体または液体)内での運動あるいは相互作用特性¹⁴⁾も重要である。2次物性値は粒子径、形状、粒度分布、表面積および空隙率等の基本物性値およびその他の物理化学的条件により決定される性質であり、粉体を取り扱う工程上重要な影響因子なので各工程を効率的に運転できる生産管理技術の要諦でもある。なお、所定の規格に適した品質を維持できる粉体製品を生産するに際しても重要である。

2. 韓国の粉体工業現況

粉体を扱う各種産業を一応粉体工業と定義しておき、韓国の粉体工業現況を述べる。

粉体工業は取り扱う固体物質の根源から大きく二つに分けられる。すなわち Table 1 に示したような地下資源を原料として利用する鉄鋼業、金属精錬業、窯業(陶磁器、ガラス、耐火物、セメント)および燃料工業(特に無煙炭採掘、煙炭製造)等のようにその取り扱う物量が膨大な場合と、Table 2 で示したように各種化学製品(中間製品)および農畜産物加工製品を扱い、より精密な粉体工学的技術が必要な場合とに大別できる。

Table 2 粉体形 製品物量

A. 農畜産物 加工製品

品 名	年間生産量 (kM/T)	資料出所
澱 粉	85	a)
精 糖	758	a)
小 麦 粉	1,444	b)
配 合 飼 料	4,126	b)
粉 乳	30	b)

B. 化学製品

品 名	年間生産量 (kM/T)	資料出所
セ メ ン ト	17,877	b)
各 種 肥 料	2,521	b)
コ ー ク ス	4,638	b)
カーバイト	57	b)
カーボン ラ ッ ク	58	b)
塩 ビ	312	b)
染 料	5	b)
化 粧 白 粉	0.8	b)
殺 虫 剤	57	b)

a) 韓国産業生産年報の統計資料による(1980)

b) 韓国経済企画院の統計資料による(1982)

まず、各級の鉄および非鉄工業は、その該当する鉱石原料の採掘、選鉱、輸送過程は勿論、冶金工程においてもその粉体の基本的特性と2次物性が重要な役割を果たしている。各工程に必要な粉体工学的技術は、しばしば

Table 3 韓国の陶磁器製品需給現況

年度 品目	1977			1978			1979		
	業体数	生産能力 (M/T)	生産実績 (M/T)	業体数	生産能力 (M/T)	生産実績 (M/T)	業体数	生産能力 (M/T)	生産実績 (M/T)
内張タイル	4	45,300	45,300 (4,428)	5	57,300	57,300	8	90,100	90,100 (15,700)
モザイクタイル	12	108,600	105,460 (79,720)	14	143,600	120,200 (60,000)	15	150,800	135,720 (66,520)
クアリタイル	10	61,500	35,400 (7,246)	11	78,500	45,800 (13,800)	11	78,500	62,400 (20,800)
食器類	30	21,770	15,800 (12,000)	31	24,600	22,500 (17,900)	33	28,700	25,830 (20,540)
ノベルティー	7	5,120	3,200 (2,900)	8	5,500	4,130 (3,800)	8	5,500	4,950 (4,950)
衛生陶器	2	12,000	8,000 (1,700)	2	12,000	12,500 (—)	2	18,600	16,740 (2,370)
磚子	2	4,000	2,400 (1,000)	4	4,000	2,700 (1,200)	4	4,000	3,600 (1,870)
其の他	5	5,000	3,000 (1,300)	5	5,000	3,900 (1,400)	5	5,000	4,500 (1,630)
合計	72	263,290	218,560 (11,294)	80	330,500	269,030 (98,100)	86	381,200	343,840 (134,020)

() 内は輸出数量

* 資料：韓国陶磁器工業協同組合の統計による

従来の伝統的操業方法を取っており技術革新の必要性を無視したり、さらに軽視する傾向すらあったが、省エネルギー、操業費の節減および製品品質の高級化が要求されるにつれて漸次その重要性が高く評価されるようになっていく。

いくつか具体的な例をあげてみよう。

① タングステン超軽合金の粉末の粒度分布はその製品の機械的強度に決定的役割を果たすので、超軽工具製作工程中他の操業条件より優先して考慮しなければならない事項¹⁵⁾である。

② 製鉄熔鉱炉内の各種原料投入物が偏析を起こさず、適当な粒度分布を保ちながら炉内に充填されれば熔鉱炉の操業がより円滑になる^{16,17)}。

③ 韓国の家庭において、炊事および暖房用燃料のもとである煙炭の品質を一年中一定水準に維持するため、カロリーが異なる原料炭の配合(混合)技術が重要視され¹⁸⁾、また、各種原料炭(輸入炭)の貯蔵による貯炭資金圧迫などの難点やら、さらに製品の成形技術においても研究開発の余地が多く残されている。

④ Table 3 に韓国の陶磁器製品の需給現況を示す。各種窯業原料の品位向上を図る分離、分級精製技術の迅速な開発が要求される。TVのブラウン管に使われる珪石(SiO_2)の品位を99.7%以上に維持するとか¹⁹⁾、カオリン精製技術の開発²⁰⁾は粉体の物理・化学的表面処理技

術と合せて将来一層粉体工学的処理技術の改善が要求される分野である。

⑤ 韓国の年間セメント生産量はTable 4の需給状況の推移で示したようにおよそ2,000万トンに達している。原料およびクリンカ粉砕時に有機溶媒である粉砕助剤の添加による粉砕費の節減を図る技術の研究は非常に重要である²¹⁻²³⁾。また、韓国の最大地下資源である良質の石灰石をセメント以外の多様な製品、すなわち、各種精密化学製品のフィルタとして開発していくことと合せて、既存石灰石製品の品質向上のための工程開発はもっとも重要である²⁴⁾。

次に、化学工業製品(中間製品)と農水産物製品の製造業は、取り扱う物量の規模について多様な差異がある

Table 4 韓国セメント工業の需給状況推移

年度	生産能力 (1,000 M/T)	生産量 (1,000 M/T)	その他** (1,000 M/T)
1958	—	258	—
1961	720	511	—
1966	2,120	1,884	14
1970	6,919	5,822	19
1975	11,196	10,129	—
1981	23,463	15,181	47

* 資料：韓国洋灰工業協同組合の統計による(1981)

** 白セメント

Table 5 製粉工業の現況 (1981年末現在)

会社名	工場所在地	設備能力 (Bbl)	加工能力 (M/T)	原麦配定比率(%)
大韓製粉	仁 川	11,619	457,800	21.1
東亜製粉	仁 川	4,019	164,100	7.3
	釜 山	5,468	205,500	9.9
大仙製粉	"	2,748	107,700	5.0
三和製粉	仁 川	2,377	84,900	4.3
東林産業	"	4,300	114,300	7.8
第一製糖	釜 山	6,797	286,200	12.4
新韓製粉	"	3,166	116,100	5.8
極東製粉	"	2,563	97,500	4.7
嶺南製粉	"	2,149	77,700	3.9
大王製粉	"	2,043	105,900	3.7
金星製粉	釜 山	2,000	62,400	3.6
大成製粉	"	1,589	57,300	2.9
湖南製粉	木 浦	4,191	22,540	7.6
合 計		55,029	1,959,940	100.0

* 資料：韓国製粉工業協会1981年統計資料より

** 注：協会会員社のみに限る

Table 6 製糖工業の現況 (1981年末現在)

会社名	工場所在地	1日生産能力 (M/T)	年間生産能力 (M/T)
第一製糖	釜 山	2,000	600,000
三 養 社	蔚 山	1,300	390,000
大韓製糖	ソウル	750	225,000
釜山製糖	釜 山	20	6,000
計		4,070	1,221,000

* 資料：韓国製糖工業協会1981年度統計より

Table 7 韓国の肥料生産および消費実績

(単位：M/T)

年 度	生 産 実 績				消 費 実 績			
	窒 素	磷 酸	カ リ	計	窒 素	磷 酸	カ リ	計
1960	6,156	—	—	6,156	87,653	42,784	6,390	136,827
1970	398,364	143,899	50,582	592,845	355,550	124,354	83,061	562,965
1980	727,443	492,549	125,012	1,345,004	448,434	195,532	184,073	828,039
1981	665,869	323,755	178,602	1,168,226	432,262	198,490	199,226	829,978

* 資料：韓国肥料年鑑の統計による (1981)

Table 8 主要プラスチックおよび添加剤の価格現況

分類	製品名	単価(kg)	備考
酸化防止剤	2,6-Di-tert-butyl-4-methyl phenol	2,065	a
"	BHA	13,657	a
発色剤	N,N'-dinitroso-pentamethylene Tetramine	1,500	b
"	P-Toluenesulfonyl-hydrazide	2,700	b
赤外線吸収剤	2-Hydroxy-4-octobenzophenone	10,105	a
"	2(2'-Hydroxy-3'-tert-butyl-5'-methyl phenyl)	13,400	b
加硫促進剤	N-Cyclohexyl-benzothiazyl sulfenamide	2,380	a
"	Dibenzothiazogl disulfide	1,850	b
"	2-Mercaptobenzothiazole	1,650	b
"	N-oxydiethylene-2-benzothiazyl-sulfenamide	2,618	a
平均値		5,197	

注：a；輸入価格，b；国内市販価格

Table 9 韓国の無機顔料需給現況

区分 年度	輸入				輸出			
	1980		1981		1980		1981	
品目	数量(t)	金額(1000\$)	数量(t)	金額(1000\$)	数量(t)	金額(1000\$)	数量(t)	金額(1000\$)
Lithopone	331	255	293	169	30	41	—	—
Titanium white	8,121	11,073	9,925	13,605	3.7	6.3	107	159
其の他着色料	1,141	5,747	1,189	5,863	1,827	2,516	1,396	2,170
調剤顔料	399	3,558	377	3,160	70	39	15	61
計	9,992	19,628	11,784	22,797	1,931	2,802	1,503	2,390

が、より革新的な工程技術の開発が要望されており、それにより製品の品質向上とより効率の高い使用効果に大きく寄与することができるだろう。

これらの産業分野において粉体工学的技術革新のニーズを例にあげると、

① セメントと合せて三粉としてよく知られている Table 5 の製粉、Table 6 の製糖または配合飼料工業は高い外貨を払って輸入した外国産原資材の加工工業であると同時に処理物量も莫大である。また、現在の操業技術自体が旧来式であっても導入技術であってもいまは国際的水準に到達しているけれども、既存技術に満足することなく効率性および経済性を高めるためのたゆみない技術開発が必要な分野である²⁵⁾。特に製粉業界では設備過剰投資により稼働率70%水準にすぎないし、設備の老朽化も高く、近い将来、設備の代替および保守が要請されている。

② 重化学工業製品である各種プラスチック加工原料。Table 7 で示した肥料製品、カーバイト、コークスなども取り扱う物量が膨大であり、品質向上のための

努力が必要である。

プラスチック加工原料の場合、Table 8 に示したように可塑剤および安定剤等少量の副原料を添加する粉体混合工程²⁶⁾技術の重要性はほぼ無視されているし、また、その技術開発に必要な研究投資の必要性が軽視されているようであり、ほぼ全量が日本をはじめ米国、西欧などから輸入しているのが現状である。

③ 現在、精密化学工業の重要性²⁷⁾が高まっている。特にカーボンブラック、染料、Table 9 に示す無機および有機顔料、殺虫剤および化粧品等各種精密化学製品の生産技術および利用技術において粉体工学技術の積極的応用が必要な分野である。

④ 精密化学工業と同様に付加価値が高いカーボン繊維、半導体、その他新素材産業の発展²⁸⁾のため直接あるいは間接的に粉体工学技術の寄与が期待される。

⑤ 大気の子塵汚染問題や産業における作業環境保全のためエアロゾルに関する粉体工学的研究も始まっている²⁹⁾。

以上のように両大産業分野の各々の細分野において、

いまだに加工原料から中間製品にいたるまで輸入が多いが、それを克服して国際競争力を育てるためには粉体工学技術の革新と新しい高度技術の導入が必要不可欠であるという認識が広く拡散していることはもっとも注目すべきことである。けれどもこれを支えてくれる粉体工学技術者の養成と研究開発投資の調達は近い将来解決しなければならぬ問題点である。

3. 韓国内粉体工学の研究現況

いままで述べたように、粉体取り扱い技術は経験にたよって従来の技術を踏襲しても外形的生産目標には大きな支障とはならないという安易な考え方と、粉体の特性が生産品の品質に影響を及ぼしているものの、粉体工学的に解決する案を提示する研究活動が十分でない現在では、粉体工学分野の研究を遂行する専門家あるいは研究機関があまり多くないというように認識されている。しかし、実際においては粉体工学の細分野別には多くの研究が行われているが、いまだにその活動が粉体工学的側面から総合的に知られていなかった。

韓国大学内の教育と研究活動において粉体工学に関連する科目を講義する学科やこの分野の研究を遂行している教授は多くいる。Table 10 に、韓国の大学で粉体工学と関連する講義と研究を遂行している学科と粉体工学関連科目または研究分野をとくに示した。この表からわかるように化学工学科のみが粉体工学講座（最初の講義は1960年ソウル大学工学部において韓泰熙博士が担当した³¹⁾）を開き、粉体工学全般に亘るトピックを講義するのに対し、他の学科では粉体工学の細部各論を講義科目として開いている。取り扱う対象の物質（鉱石・土質）に関連された題目下で粉体工学の内容を講義している。したがって、これら各分野においてもその研究内容が粉体工学的原理を研究方法として導入した場合が多いが、粉体工学のいろいろな問題研究主題として取り扱う場合

は少ない。

1963年から1983年までの間、韓国化学工学会誌に発表された粉体工学関係論文をトピック別に分けると³²⁾、粉体工学紹介論文2編、粉度分布および基本物性10編、流動層に関する論文15編、粉砕4編、浮遊選鉱3編、粉体輸送3編、粉体混合2編、成形および乾燥各15編など総46編の論文が掲載されている。この数字は化学工学に掲載された論文総数548編中の10%程度に該当する。もちろん、この他にも固体反応に関する論文、活性白土の製造工程、吸着剤の製造または吸着剤性能研究などの論文は多数あるが、粉体工学的現象の研究でなく、むしろ粉体工学的研究方法が部分的に応用された内容である。一つ残念なことは粉体取り扱い設備装置の改善に関する研究論文がまだみられないことである。国内の粉体取り扱い装置メーカーが外国産の機械の模造品を製作・販売している実情を考えれば、いまの難しい点を十分理解できるが、この方向での研究がますます期待されている。

韓国内の各種学会誌、例えば大韓土木学会誌、大韓金属学会誌、大韓機械学会誌および大韓鉱山学会誌等にも多少の粉体工学的接近法を使用した主題または副題の論文が見られる。土木学会誌では主に土質に関する研究^{33,34)}が主であり、このような研究結果あるいは研究方法は一般の粉体取り扱い技術にも活用できるのは当然である。鉱山学会誌と金属学会誌には鉱物選鉱技術^{35,36)}に関するものと製錬前処理³⁷⁾および粉末冶金³⁸⁾に関する論文が多い。また、最近の機械学会誌には微粉炭燃焼装置³⁹⁾、液滴エアロゾル⁴⁰⁾等に関連した論文が表れはじめた。韓国内各級研究所にも粉体工学に関連した研究が進行中であり、特に韓国動力資源研究所は無煙炭に関連する現業技術の開発支援と将来に使用される技術開発研究に年間韓国円貨20億円の研究費を使用しており、また韓国エネルギー研究所は核燃料の前処理ならびに後処理工程に関する研究⁴¹⁾が大変活発である。このような研究はまだ広く

Table 10 韓国大学の粉体工学関連学科³⁰⁾

学 科 名 称	学科数	関連講座名または研究分野
鉱山および資源工学科	8	鉱石処理工学、選鉱工学
金属および材料工学	28	選鉱工学、粉末冶金、前処理工程
食品工学科(食品加工工学科を含む)	18	乾燥、成形、混合、粉砕、分離
薬学および製薬学科	21	製剤学、混合、錠剤
窯業および工業化学科	10	粉砕、分離、成形
土木工学科	37	土質力学、土質試験法
化学工学科	26	粉体工学または機械的分離操作
環境工学科	7	大気汚染 水処理工程の凝集現象

Table 11 韓国の専門研究機関の粉体工学研究活動

区分	研究機関名称(所在地)	主粉体工学関連分野
国 立	国立工業試験院(ソウル)および 各市, 道試験所	窯業を始めとした各分野全般
	国立環境研究所(ソウル)	大気汚染(粉塵)
	国立建設研究所(ソウル)	土質工学
	国立農業試験院(水原)	農地改良
政 府 出 資	韓国科学技術院(ソウル)	全般
	韓国動力資源研究所(ソウル, 大田)	石炭, 資源, 金属, エネルギー
	韓国機械研究所(大田, 昌原)	金属, 装置
	韓国エネルギー研究所(大田)	資源開発, 処理
民 間 企 業	韓国化学研究所(大田)	精密化学製品
	浦項総合製鉄技術研究所(浦項)	金属
	雙竜技術研究所(大田)等28カ所の 民間研究所	精密化学製品

公開されていないが, 近い将来開発された研究結果が各種粉体取り扱い産業に公開活用されるだろうし, この分野に従事している技術者の拡散も時間の問題であるので, 粉体工学技術の波及は比較的短い時間内で達成できるものと期待している。

Table 11 は粉体工学関連技術の開発に関係深い韓国内の研究機関を抜萃した。これら国立研究所, 政府出資研究機関, 民間企業の研究所および各種工業協同組合の研究支援事業は将来活性化されるものと期待される。特に浦鉄技術研究所, 雙竜技術研究所, 燃料協同組合, 技術支援団等の民間研究機関は母企業の企業活動に適合する研究テーマを自ら決めて新製品開発等に関連ある研究を活発に行っており, 粉体工学的接近方法への良い適用例が出てくるだろう。

以上で学界, 研究機関および産業界の粉体工学研究活動に対する概略的な現況を述べた。まだこれらの分野の研究結果が該当する学会の研究発表活動で表わされているが, 粉体工学関連研究の活性化のためには少し消極的な方法であり, 専門学会ならびに協会間の交流活動が切実に要望されているし, より積極的かつ総合的な研究活動の集合のためには粉体工学会という専門学会の発足が望ましい。つまり粉体工学とは本来境界領域を扱う関係にある学会のみの所属で決めるのは論理的にも適当でない。しかし, まだ関心を持っている大部分が化学工学技術者を主軸としている韓国の実情としては外国の粉体工学会のように独立した学会をつくることは, 財政上または機構上難しい点が多いので, まず韓国化学工学会内に1984年2月14日付で粉体工学研究委員会を小規模で発足させ, 特に産学協同を強調する活動を展開していくこ

とになり, 将来には規模に応じて独立した粉体工学会が創立されることも期待されている。

いままで韓国の学会活動に企業の参与が微々たるものであったことは事実であり, これが学会の発展を遅延させた一因にもなっている。学会が, ただ学者のみの集まりでなく, 科学技術者間の情報交換の場にまで盛りあげなかったことも原因の一つとなっている。したがって, ただいま発足した韓国の粉体工学研究委員会は外国の学・協会のように産学協同を自ら実践する協会的機能組織として発展させなければならないと痛感している。

4. 結 言

最近, 韓国でも粉体工学に関する理解と関心が非常に高まっており, 韓国化学工学会内に粉体工学研究委員会が他の学会に先がけて発足されその活動を始めた。30年近くの歴史を持つ日本粉体工学会の当初を例とするまでもなく初めは難しいが, “始まりが半”という韓国の諺のように韓国の粉体工学は将来大きく発展するものと期待すると同時に, 今年には韓国化学工学会誌に粉体工学に関する論文がシリーズとして掲載され, 粉体工学関連科学技術者に有益な資料として提供しようと企画している。

1984年10月29日, 30日両日間, 大韓薬品工業協会後援でソウルで開かれた韓・日製剤技術ワークショップ⁴²⁾では固形製剤に関係ある学者および技術者130余名(講師として韓国側4名, 日本側8名)が粉体工学の基礎をどのように製薬技術に活用するかについて議論した。

また, 1986年8月20日慶州で韓国化学工学会粉体工学研究委員会の主催した韓・日粉体工学セミナー⁴³⁾には

150名を超える参加者（そのうち日本側の講師含めて38人）が集まり、大盛況裡で第1回目の共同セミナーを終え、韓国内において粉体工学の関心がますます高まったことをみせてくれた。これを機会にしていままで以上に韓・日の国際交流が盛んになることはまちがいないことと考えられる。

このような国際会議が回をかさねる度にますます内容豊かな、両国間の学者・技術者の密接な交流の場としていくセミナーになることを願う次第である。

参 考 文 献

- 1) 申基喆, 申容喆: 新韓国語辞典, 三星出版社, (1981)
- 2) Wadell, H.; *J. Geology*, **40**, 443 (1932)
- 3) Allen, T.; *Particle Size Measurement*, 3rd ed., Chapman & Hall, London, (1980)
- 4) Dallavalle, J. M. & C. Orr.; *Fine Particle Measurements*, MacMillan, London, (1959)
- 5) 姜錫浩: 韓国化学工学, **8** (4), 78 (1970)
- 6) 姜錫浩: 韓国化学工学, **20** (1), 1 (1982)
- 7) McCabe, W. L., & T. C. Smith: "Unit Operations of Chemical Engineering," 4th ed., McGraw Hill, New York, (1976)
- 8) Brown, G. G.; "Unit Operations," John. Wiley, New York, (1958)
- 9) Kelley, E. G., & D. T. Spottswood, "Introduction to Mineral Dressing," Wiley Interscience, New York, (1982)
- 10) 姜錫浩, 禹文禎: 日本粉体工学会誌, **18** (2), 101 (1981)
- 11) 姜錫浩, 宋希準, 安熙官: 嶺南大学校工業技術研究所研究報告, **6** (1), 75 (1978)
- 12) 朴炳基, 他3人: 大韓土木学会論文集, **3** (2), 45 (1983)
- 13) 林応極: "窯業学基礎実験", 宝晋斋 (1980)
- 14) Davies, C. N. J. *Aerosol Sci.*, **10**, 477 (1979)
- 15) 崔焜: 大韓金属学会誌, **19** (5), 433 (1981)
- 16) 篠原邦夫: 日本粉体工学会誌, **19** (9), 462 (1982)
- 17) 朴錫地: 大韓金属学会誌, **16** (4), 259 (1978)
- 18) 朴泰俊, 他5人: 韓国動力資源研究所研究報告書 KE-82T-32 (1982)
- 19) Aguilera, N. H., & M. L., Jackson: *Soil Science Society Proceedings*, p. 359, (1953)
- 20) 権寧培, 他4人: 韓国機械研究所 UCN-88-183, C (1982)
- 21) Rumpf, H.: *Powder Techn.*, **18**, 3 (1977)
- 22) 金昇圭: 韓国化学工学, **13** (6), 339 (1975)
- 23) 睦榮一, 朴芳森: *ibid.*, **15** (6), 433 (1977)
- 24) 申東郁: 韓国化学工業と技術, **2** (1), 40 (1984)
- 25) 韓国化学工学会: "韓国の化学工業", p. 5. (1974)
- 26) 日本粉体工業協会: "混合・混練技術", 日刊工業新聞社, (1980)
- 27) 韓国化学工学会: "韓国の化学工業", p. 285. (1982)
- 28) 崔亨燮: 大韓金属学会誌, **17** (3), 205 (1979)
- 29) 姜錫浩: 環境と公害 (韓国), **4** (7), 290 (1981)
- 30) 韓国大学年鑑, (1982)
- 31) 韓泰熙: 韓国化学工学, **2** (1), 93 (1983)
- 32) 韓国化学工学会, "韓国化学工学総索引第1集", (1984)
- 33) 姜秉熙, 鄭寅駿: 大韓土木学会論文集, **3** (1), 65 (1983)
- 34) 林鐘石, 金明模: *ibid.*, **4** (3), 11 (1984)
- 35) 李孝淑, 韓奎珍, 金大洙: 大韓金属学会誌, **19** (6), 500 (1981)
- 36) 李応祚: *ibid.*, **6** (4), 234 (1969)
- 37) 尹錫商, 姜基洪: *ibid.*, **18** (2), 159 (1980)
- 38) 千炳斗, 崔昌鉦: *ibid.*, **8** (3), 166 (1970)
- 39) 康憲策: 大韓機械学会誌, **9** (3), 53 (1969)
- 40) 趙慶国: *ibid.*, **18** (3), 202 (1978)
- 41) 徐庚寿: 韓国エネルギー研究所彙報, **2** (1), 34 (1982)
- 42) 大韓薬学会: "韓日製剤技術 work shop—固形剤を中心として", (1984)
- 43) 韓国化学工学会: "韓日粉体工学セミナー", 慶州 (1985)

最近の粉砕技術

Recent Developments in Comminution Technology

井上外志雄*

Tshio Inoue

1. はじめに

粉砕技術の研究課題はエネルギー効果の向上、装置摩耗の減少と製品純度の向上、換業規模の拡大、より細かい製品粒度、とくにサブミクロン領域への挑戦など限りなく、毎年の研究報告も大変な数にのぼる。筆者が果たしてその全貌をとらえているかと考えると、誠に心許ない。しかし粉砕技術の動向に絶えず関心を払い続けて来た一人として、最近の状況を整理してみることとした。

2. ボールミル粉砕技術の展開

ボールミルは大規模微粉砕技術の中で中心的な役割を果たして来た。その装置規模は1950年から1970年代の前半にかけて年毎に大きくなって来た。装置の大型化は工業生産規模の拡大、オートメーションに伴う系統の簡素化などの要請によるものである。しかし、際限のないミルの大型化により、種々の問題が派生して来たこともまた、事実である。その一つはミルの駆動機構上の制約である。とくにトラニオン駆動においてはすでに能力の限界に達したとされている。この対策として、リングモータ駆動方式が登場した。しかし、大型化に対する装置上の問題は解決しても、エネルギー効率的に少し厄介な問題が出て来た。

ミルの寸法（とくに直径）とミルの消費動力ならびにミルの処理能力との関係が Hukki** によって論じられて以来、ミルの大型化は粉砕効率の向上をもたらすと考えられて来た。しかし、セメント協会の粉砕専門委員会の調査*** は予想に反し大型ミルの方がむしろ電力原単

位が高い、という結果を示し、関係者を驚かせた。またパプアニューギニアの Bougenville 鉱山の選鉱工場では設置された大型ミル（5.5m×6.4m）の能力が設計値に達せず、大きな問題として注目を集めた。しかし、同規模の大型ミルでも設計能力を問題なく達成しているミルもあり、Harris と Arbiter^① はその理由を鉱石の性質などの粉砕条件の差異によってと説明している。もしこの解釈が正しいならば、あるいは何らかの他の理由が存在したにせよ、Bougenville の事例はボールミルの大型化に対する設計者への警鐘と見なければならぬ。

3. ローラミル

ボールミルが鉱石やセメントなどの大量粉砕の分野で普及した後も、セメント製造工場においては原料粉砕を中心にレイモンドミルやロッジエミルなどのローラミルが一部に使われていたが、2次にわたるエネルギー価格の高騰を契機に、ローラミルのエネルギー効率における優位性が見直され、ボールミルからローラミルへの回帰が起こった。ローラミルははじめ粉砕粒度の比較的粗い原料粉砕に回帰したが、最近ではさらに大型ミルの開発と内部機構の改善により、クリンカ粉砕にも波及し、セメントミルは再びローラミルの時代を迎えようとしている。

石炭の微粉砕においても設備の大型化に伴って一時はボールミルへの移行の動きが見られたが、最近ではローラミルに似ているが、遠心力によるローラの押しつけを利用したペンデュラムミルの改良と大型化が進み、この分野に取り入れられつつある。

ペンデュラムミルはリング・ローラミルあるいは遠心ミル（centrifugal mill、後に述べる遠心ミルと混同してはならない）とも呼ばれ、石炭、褐炭、陶土などの粉砕に広く用いられている粉砕機である。とくに付着性あるいは滑りやすい碎料の粉砕に優れている。ペンデュラムミルの処理能力は0.5～30 t/hほどであるが、Unger^②

* 東京大学工学部 資源開発工学科
(〒113 東京都文京区本部7-3-1)

Tel. (03) 812-2111 内線7073

** Mining Engineering, 728 (1954)

*** (社)セメント協会粉砕専門委員会報告 S-11 (1979)

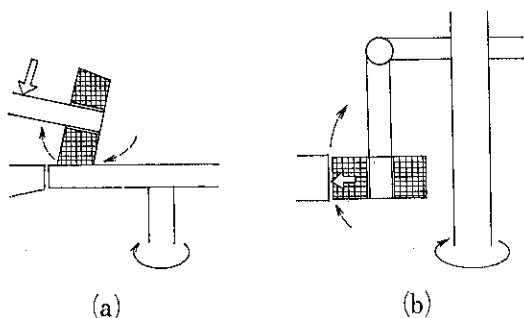


Fig. 1 Grinding mechanism of the roller mill (a) and the pendulum mill (b)

は処理量 10~30 t/h というローラミルとの競合領域におけるペンデュラムミルの優位性について力説している。Fig. 1 に示すように、ローラミルではローラが回転する水平な円板上に油圧、空気圧あるいはパネルより押しつけられる構造であるのに対し、ペンデュラムミルでは固定されたリングの内側から回転するローラがその遠心力によってほぼ水平の向きに押しつけられる構造となっている。Unger によって挙げられたペンデュラムミルの利点は主として次のようなことである。

- (1) 粉砕ゾーンでの空気流速が低いため、ブロウの動力が小さくてすみ、含じん気流による摩耗も減少する。
- (2) 粉砕ゾーンにおける粒子層厚が薄いため、過粉砕が起こりにくく、粉砕効率が高い。
- (3) ローラ自体の遠心力によってローラがリングに押しつけられるため、油圧機構などの故障や保守の問題がなく、またベアリングの負荷ははるかに小さい。
- (4) 3個のローラのリングに対する押しつけ力が釣り合っているため、押しつけ力の不均衡によるベアリング負荷などの問題もない。
- (5) ローラミルではローラの内周と外周で線速度に差があるため、粉砕面での滑りがあり、剪断力による摩耗および動力損失を生ずるが、ペンデュラムミルではローラの全周で線速度は一定である。
- (6) 同一の粒子径に対するかみ角を一定とすれば、ペンデュラムミルの方がローラ径が小さくてすみ。
- (7) ローラミルではディスクの中心からフィードされた粒子が粉砕ゾーンに達するまでにコリオリの力を受け、粉砕ゾーンを速く通過しようとする傾向をもつ。
- (8) 異物、停電対策、摩耗、保守のいずれの面においてもペンデュラムミルの方が優れている。

ペンデュラムミルは現在のところ硬い砕料に対する粉砕力、処理能力などになお限界があると思われる。円筒の内面に沿った細長い粉砕ゾーンをもつゼゴミル (Szeo mill)¹⁵⁶⁾を含め、ペンデュラムミルの今後の発展には興

味が持たれる。

セメント生産におけるローラミルとペンデュラムミルのボールミルに対する優位性は第一に粉砕効率にあることはいままでもないが、ミル内滞留時間が小さいことによる操作性および制御性の良さも見逃すことはできない。粉砕効率が高い理由の一つはボールミルなどにおいては避け難い“空打ち”がないことであろうが、それだけではなさそうである。Schönert¹⁷⁴⁾および Hanish¹⁷⁷⁾は圧縮粉砕における粉砕効率が粒子あるいは粒子層圧縮時の単位面積当たりの力と深い関係にあることを明らかにしている。粒子層を大きな力で押し潰すと、結果的に粉砕比が大きくなり、同時に粉砕効率は増加の傾向を示す。しかし過度な荷重の下では、粉体層の粒子間間隙が狭まり、粒子層の強度が高まるため、粉砕エネルギーの上昇をもたらす。Hanish および Schubert¹⁷⁷⁾はここで粉砕層を混合・攪拌し、粒子を再配列したのちに再び載荷すると、粉砕効率を高めることができる、という結果を示している。Mathieu⁸⁰⁾はペンデュラムミル、ローラミルおよび閉回路ならびに開回路ボールミルによる粉砕産物を比較し、前二者とくにペンデュラムミルの粒度分布がボールミルのそれに比してよく揃っていることを示している。これは粉砕効果の優劣に大きく作用しているものと思われる。

4. 振動ミルと遠心ミル

振動ミルは粉砕装置の一型式としてすっかり定着し、いわば安定期に入ったといえる。同じ粉砕媒体式の粉砕機として古い歴史をもつボールミルやロッドミルなどに比して大きな体積率で粉砕媒体を装填することができ、しかも大きな加速度でこれを運動させることができるので、ミル単位容積当たりの処理能力がボールミル等に対し、はるかに大きくなる、ということで、振動ミルの登場は大いに注目された。また研究の初期に、粉砕媒体単位体積当たりの振動ミルの処理能力はその充填率が80~85%の辺りで共振現象に似たピークを示すことも明らかにされた。振動ミルはその構造特性、とくに粉砕媒体が小刻みに振動するという特徴により、粗粉砕よりはむしろ微粉砕に適した装置として位置づけられ、そのような用途に使用される例が多い。装置が手軽であることもあり、粉砕のメカノケミカル効果の研究などにも広く用いられている。大きな振動加速度のために粉砕媒体粒子による粉砕力が大きい、という特徴を活かして自生粉砕 (autogenous grinding) に応用することも当然考えられるが、報文に見る限り、そのような例はあまり多くないようである。

メーカーのカタログなどを調べてもわかるように、振

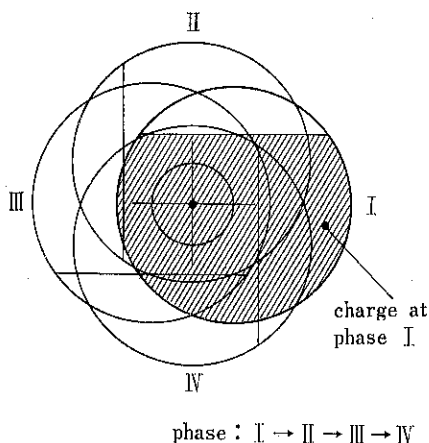


Fig. 2 Motion of the grinding media in the centrifugal mill.

動ミルは大型化してもその処理能力は粉碎媒体の体積に比例して増加しない。とくに砕料粒子が介在する鉄鋼ボール間の衝突反発係数は極めて小さいため、粉碎容器から加えられた振動がボールの自由でランダムな振動をもたらさず、マクロにはほとんどすべてのボールが団塊として運動することが振動ミルのスケールアップ効果と粉碎効率を阻害する原因ではないか、と筆者は考えている⁵⁵⁾。

南ア連邦の Lloyd らによって考案され、西ドイツの Lurgi 社の協力によって開発が進められつつある遠心ミル (centrifugal mill) は外見は振動ミルに似ているが、運動の様態からはむしろ遊星ミル (planetary mill) に近い粉碎装置である。初期の試験機を除き実際の遠心ミルの粉碎容器は自転せず、その直径の 10~40% ほどの (ミル直径による) 回転半径で振動するように設計されている。Fig. 2 に示すように、粉碎媒体および砕料はミルの振動に伴ってその位相からほぼ 90° 遅れた位相をもって移動する。この運動が振動ミルにおけるそれと全く異なることは明白である。遠心ミルの処理能力は少なくともミル容積に比例すると見積られている。また報告されているデータによると振動加速度は約 9 である。φ1.0×1.2m のミルの動力はほぼ 1000 kW に達する⁵⁴⁾。

5. 衝撃粉碎機

高速回転体および高速気流による 2 つの衝撃粉碎方式はマイクロオーダーの粉碎技術の確立に大きな役割を果たして来た。最近ではそれぞれに漸進的な進歩はみられるものの、粉碎限界の厚い壁に直面している。

流体エネルギーミルに関してはいくつかの旋回流を利用した機種に流動層方式が加わり、この種のミルの最大

の問題点であるエネルギー効率の改善効果が注目されたが⁵³⁾、近年は注目すべき報告が見当たらない。

回転円筒または回転翼を用いた衝撃粉碎機もマイクロオーダーの粒子に対しては、つまるところ高速気流式の粉碎機に接近しつつあるように思われる。機械式の強味を活かして、気流中および粒子の運動をいかに制御するかが、この方向への装置の新しい展開のいかに決することになるのではなかろうか。

6. 攪拌ミル

攪拌ミル (agitation mill) は直径 0.3~3 mm ほどの鋼、ガラス、セラミック、ナイロンなどの球を粉碎媒体とし、粉碎とこれからの粉碎媒体粒子とを攪拌・混合することにより、摩擦を行なう装置である。同様の原理は、多くの場合媒体粒子を使用せずに、コロイド粒子を分散させたり、微粉体を解砕するなど、湿式の分散・乳化に古くから応用されて来たが、近年主として湿式の、超微粉碎法として、にわかに脚光を浴びるようになった。

攪拌ミルの構造は円筒形の粉碎容器に対し、軸方向に砕料を通過させながら粉碎を行なうもの、あるいは中心から円筒壁へ向かって砕料を移動させながら粉碎するもの、軸が垂直のもの、水平のもの、というように、多くの変化に富んでいる。攪拌装置もまた、回転軸の周りにインペラを取付けたもの、複数の円盤を取付けたもの、スパイラルを取付けたもの、回転円筒形、回転円錐形などがある。円盤は表面が平滑なものもあるが、幾つかの穴をあけたもの、突起を設けたもの、偏心リング状のもの、など多彩である。回転円筒形の攪拌装置にも、表面が平滑なもの、多数の突起を有するものがある。

粉碎媒体と砕料によって充たされた粉碎ゾーンが幅のせまい隙間になっていて、その片側の壁が高速に回転し、剪断力を発生させる構造のものもある。

攪拌ミルの動力消費は攪拌装置の形状、回転速度、粉碎媒体の寸法と比重、固定壁と回転体との間隙など、多くの因子によって大きく変化し、設計上の自由度がきわめて大きい。Heinrich と Kreitzer⁷³⁾ は種々の攪拌ミルと振動ミルおよびボールミルのミル容積当たりの動力を比較しているが (Fig. 3)、一口に攪拌ミルと言っても低速回転方式のものと Co-Ball ミルのように粉碎ゾーンの形状がスリット状のものとは、比動力 (kW-t) に 100 倍もの開きがあることがわかる。最近の高速回転式の攪拌ミルはボールミルや振動ミルに比してはるかに比動力が大きく、内部の冷却をどのように効率よく行なうかが、装置設計上の大きな問題となっている。Fig. 3 はまた、ボールミルの比動力がミルの寸法によってさば

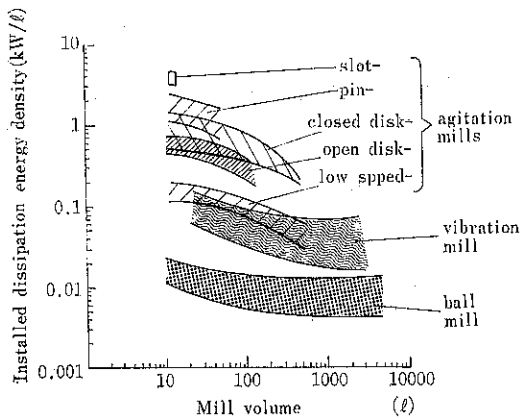


Fig. 3 Relationship between the mill volume and the dissipation energy density of various types of mills (after B. Heinrich and L. Kreitner⁷³⁾).

ど変化しないのに対し、攪拌ミルの場合はミル容積の増大にしたがって比動力が低下する傾向を示している。これは機内の温度上昇を得るための設計上の対策とも受け取れるが、攪拌装置の設計にも大いに研究の余地があると思われる。

転動ボールミルや振動ボールミルと同様、攪拌ミルにおいてもボール径およびその粒径分布は生産性およびエネルギー効率に大きく影響する。1 μm 以下の超微粉碎を狙う場合、0.3~2.0mm のガラス球では、0.3mm のボール径が最も適していることを Mölls と Hörnle の実験結果の引用によって示している。

攪拌ミルが超微粉域においてかなり優れた（微粉砕域におけるそれにほぼ匹敵する）エネルギー効率を示すことは Stehl と Schwedes の研究⁷⁵⁾結果から推し測ることができる。たとえばの粉碎実験結果を示す Fig. 4 に明らかなように、エネルギー消費の増加、すなわち産物粒度の減小にともなう Rittinger 則の意味におけるエネルギー効率の低下はさほど顕著でない。

7. 制御技術

物質収支に基づく粉碎速度式が1960年代の初めに提唱されて以来、これがボールミルやロッドミルなどの粉碎機のモデルとしてすっかり定着した。1970年代に入ってからはこの種のモデルがローラミル、クラッシュなどの他形式の粉碎機に対しても適用され、それらの特性が次第に解明されつつある。粉碎機や粉碎回路の自動制御に対しても、粉碎速度式は重要な基礎となつてはいるが、これを直接の拠所とした粉碎制御技術の研究報告はむしろ少ない。

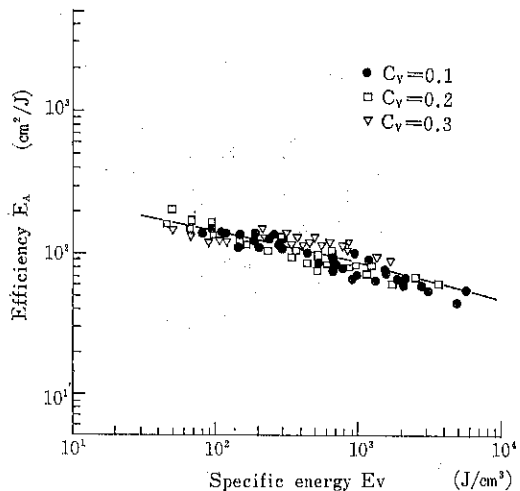


Fig. 4 Relationship between specific energy input and the efficiency of grinding in an agitation mill (after N. stehl and J. Schwedes⁷⁵⁾).

C_v : volumetric solids concentration

ボールミルと分級機を組み合わせた単純な粉碎閉回路であっても、その動特性は決して単純ではない。制御戦略としては、「産物粒度分布を一定に保ちつつ、生産量を最大とする」ことが最も広く受け容れられている。生産量を最大値ではない一定のレベルに保つことは粉碎効率を犠牲にすることになるからである。しかし大容量の可変速モータが実用化され、今後は粉碎回路の制御戦略は大きく変わることが予想される。まず駆動速度が変化したときのミル特性の変化を明らかにすることが必要である。

制御ロジックとしては従来の経験的な方法に変わり、多変数制御などの近代的技術についての研究報告なども散見されるようになったが、今後の研究に俟つところが大きい。

8. むすび

粉碎技術の研究領域は粉碎理論から各種の粉碎機、メカノケミカル効果、制御、等々、非常に大きな幅を持っている。この小論は著者の感ずるままに近年の研究成果の一断面を書き綴ったものに過ぎない。終りに、本稿をまとめるに当たり、とくに目に止まった近年の発展論文のいくつかをテーマ別に列挙し、補遺としたい。

参 考 文 献

【ボールミル】

大 型 化

- 1) Gould, W. D.: Pinto valley concentrator grinding with large diameter ball mills. Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME), **260**, No. 3, 268-274, (1976)
- 2) Rosenblatt, D. B. D. N.: Pinto valley concentrator grinding with large diameter ball mills; wayne d. gould. Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME), **262**, No. 1, 74-76, (1977)
- 3) Reese, A.: Drive motors for large tube mills. Zement-Kalk-Gips, **30**, No. 4, 152-162, (1977)
- 4) Nägeli, W., Ackle, W.: Efficiency test on the large planetary gear of a central ball mill drive. Zement-Kalk-Gips, **31**, No. 12, 619-622, (1978)
- 5) Freiermuth, D., Kirchner, K.: Distribution of ball energy as a function of the milling parameters in ball mills. Chem.-Ing. Techn., **53**, No. 5, 384-385, (1981)
- 6) Harris, C. C., Arbiter, N.: Grinding mill scale-up problems. Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME), **34**, No. 1, 43-46, (1982)

大型ミルの駆動

- 7) Schulz, R.: Controlling the output of a ball mill. Zement-Kalk-Gips, **30**, No. 2, 49-52, (1977)
- 8) Schulz, R.: Possibilities for output control of ball mills. Zement-Kalk-Gips, **31**, No. 2, 90-92, (1978)
- 9) Raukohl, G.: Start-up circuit and output control of ball mill. Zement-Kalk-Gips, **31**, No. 2, 93-94, (1978)
- 10) Meintrup, W., Kleiner, F.: World's largest ore grinder without gears. Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME), **34**, No. 9, 1328-1331, (1982)
- 11) Sabaski, R. E.: Grinding mill drives: systems, challenges, considerations. Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME), **35**, No. 1, 43-47, (1983)

特殊ライナ

- 12) Korpi, P. A., Dopson, G. W.: Angular spiral lining systems in wet grinding grate discharge ball mills. Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME), **34**, No. 1, 57-60, (1982)

- 13) Ebner, J.: Operating cost reduction in ball milling by application of angular spiral lining systems. Aufbereitungs-Technik, **24**, No. 10, 605-609, (1983)

そ の 他

- 14) Freiermuth, D., Kirchner, K.: Distribution of ball energy as a function of the milling parameters in ball mills. Chem.-Ing. Techn., **53**, No. 5, 384-385, (1981)
- 15) Hoenig, S. A.: Technical note—application of electrical technology to monitor the ball milling process and reduce the rate of wear of the grinding media. Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME), **36**, No. 1, 75-76, (1984)
- 16) Kuhlmann, K.: Energy input in cement grinding in ball mills—results of a balance analysis of the grinding circuit. Zement-Kalk-Gips, **37**, No. 8, 421-426, (1984)
- 17) Husemann, K., Haubold, S., Dombrowe, H., Eibisch, R., Clemens, P.: Grinding media classification in tube mills. Zement-Kalk-Gips, **37**, No. 12, 636-641, (1984)

【ローラミル】

- 18) Ranze, W.: Drive motors for roller mills. Zement-Kalk-Gips, **30**, No. 4, 163-169, (1977)
- 19) Schildknecht, W.: Operating experience with large roller mills. Zement-Kalk-Gips, **31**, No. 1, 1-2, (1978)
- 20) Klovers, E. J.: Energy savings with roller mills. Zement-Kalk-Gips, **32**, No. 1, 24-29, (1979)
- 21) Tiggesbaeumker, P., Knobloch, O.: Finish grinding in the roller mill—developments and prospects. Zement-Kalk-Gips, **32**, No. 4, 166-170, (1979)
- 22) Decasper, J.: Comparison between roller mills and ball mills for cement raw material grinding. Zement-Kalk-Gips, **33**, No. 5, 219-222, (1980)
- 23) Feige, F.: Investigations of the grinding of limestone in a high-speed roller mill. Zement-Kalk-Gips, **33**, No. 5, 223-225, (1980)
- 24) Feige, F.: Cement grinding in a roller mill with external material circuit. Zement-Kalk-Gips, **34**, No. 11, 560-562, (1981)
- 25) Henz, F.: Operating experience with a roller

- mill for coal grinding. *Zement-Kalk-Gips*, **35**, No. 8, 398-403, (1982)
- 26) Ackle, W.: New drive system with planetary gearing for roller mills. *Zement-Kalk-Gips*, **36**, No. 2, 87-91, (1983)
- 27) Feige, F., Verch, H., Krähner, A.: Energy-saving manufacture of standard cements in roller mills with external material circulation. *Zement-Kalk-Gips*, **36**, No. 11, 628-632, (1983)
- 28) Hirt, M., Kulzer, W.: Large bevel planetary gear unit for 3500 kw roller mills. *Zement-Kalk-Gips*, **36**, No. 11, 639-644, (1983)
- 29) Unger, W.: Centrifugal mills and roller mills: a comparison. *Zement-Kalk-Gips*, **36**, No. 2, 57-62, (1983)
- 30) Mathieu, E. U.: First results of grinding tests with cement clinker in centrifugal mills. *Zement-Kalk-Gips*, **36**, No. 2, 62-64, (1983)
- 31) Schneider, L. T., Eickholt, H., Blasczyk, G.: The influence of separators on grinding systems—operating results. *Zement-Kalk-Gips*, **36**, No. 12, 676-684, (1983)
- 32) Kersting, F. J.: Mathematical model of a roller mill for fuel grinding and drying in coal-fired power stations. *Aufbereitungs-Technik*, **25**, No. 10, 563-571, (1984)
- 33) Knobloch, O., Tiggesbaeumker, P.: Investigations on identifying the behaviour of heterogeneous materials undergoing grinding in roller mills. *Aufbereitungs-Technik*, **25**, No. 10, 572-579, (1984)
- 34) Leyser, W., Sillem, H.: Planning, construction and operation of a cement grinding plant using an mps vertical roller mill. *Zement-Kalk-Gips*, **37**, No. 2, 83-86, (1984)
- 【振動ミル】
- 35) Inoue, T.: A trial computer simulation of the movement of balls in the vibration mills. *Micromeritics*, No. 18, 50-60, (1973)
- 36) Gallyas, M., Gemesi, J.: Determining the operating parameters of vibrating mills with the aid of radioactive tracers. *Aufbereitungs-Technik*, **17**, No. 10, 503-507, (1976)
- 37) Kuwahara, Y., Saito, F., Yashima, S.: An analysis of selection function of vibration mill. *J. Soc. Powder Tech., Japan*, **14**, No. 6, 319-325, (1977)
- 38) Demel, G.: Practical experience gained with vibrating mills. *Aufbereitungs-Technik*, **18**, No. 9, 449-454, (1977)
- 39) Gock, E.: Measures for reducing the energy requirement during vibration grinding. *Aufbereitungs-Technik*, **20**, No. 6, 343-347, (1979)
- 40) Krycer, I., Hersey, J. A.: A comparative study of comminution in rotary and vibratory ball mills. *Powder Tech.*, **27**, No. 2, 137-141, (1980)
- 41) Ulrich, M.: Residence time distribution in a vibration grinding mill. *Aufbereitungs-Technik*, **22**, No. 2, 72-78, (1981)
- 42) Bernotat, S.: Residence time versus throughput in vibrating mills. *Aufbereitungs-Technik*, **22**, No. 6, 309-311, (1981)
- 43) Krycer, I., Hersey, J. A.: Grinding and granulation in a vibratory ball mill. *Powder Tech.*, **28**, No. 1, 91-95, (1981)
- 44) Daiger, K., Gerlach, J.: On the catalytic effect of vibration grinding on the dissolution rate when directly leaching chalcopyrite-type sulphide ores. *Erzmetall*, **36**, No. 2, 82-87, (1983)
- 45) Suzuki, K., Kuwahara, Y., Mizuno, M.: Vibration milling of silicon nitride powder. *J. Soc. Powder Tech., Japan*, **20**, No. 2, 82-85, (1983)
- 46) Suzuki, K., Tomura, S., Kuwahara, Y.: Grinding characteristics and mechanochemical behaviors of sericite powder with vibration ball-milling. *J. Soc. Powder Tech., Japan*, **20**, No. 3, 122-128, (1983)
- 47) Zisselmar, R.: Dimensioning of tabular vibration mills on the basis of laboratory tests. *Aufbereitungs-Technik*, **25**, No. 10, 553-562, (1984)
- 48) Boyi, C.: Mechanics of grinding media in vibration mill. *J. Soc. Powder Tech., Japan*, **21**, No. 10, 615-620, (1984)
- 49) Boyi, C.: Analysis of vibration mill. *J. Soc. Powder Tech., Japan*, **21**, No. 10, 620-626, (1984)
- 【遠心ミル】
- 50) Bradley, A. A., Hinde, A. L., Lloyd, P. J. D., Schymura, K.: Development of centrifugal milling. *European Symposium particle Te-*

chnology 1980, 153-170, (1980)

- 51) Bradley, A. A., Freemantle, A. J., Lloyd, P. J. D.: Recent advances in mineral dressing—comminution and classification—developments in centrifugal milling. J. S. African Inst. Min. Met., **76**, No. SPEC, 78-80, (1975)
- 52) Grizina, K., Meiler, H., Rosenstock, F.: Centrifugal mill—a new grinding machine for ores and mineral raw materials. Aufbereitungs-Technik, **22**, No. 6, 303-308, (1981)
- 53) Hoyer, D. I., Dawson, M. F.: Some results of laboratory experiments on batch centrifugal ball milling. J. S. African Inst. Min. Met., **82**, No. 5, 125-133, (1982)
- 54) Lloyd, P. J. D., Bradley, A. A., Hinde, A. L., Stanton, K. H., Schymura, G. K.: A full-scale centrifugal mill. J. S. African Inst. Min. Met., **82**, No. 6, 149-156, (1982)
- 55) Bradley, A. A., Lloyd, P. J. D., Stanton, K. H.: The balancing of a centrifugal mill. J. S. African Inst. Min. Met., **83**, No. 10, 229-236, (1983)

【衝撃粉碎機】

流体エネルギーミル

- 56) Huwald, E., Clement, M.: Size reduction and wear in a countercurrent jet mill. Chem.-Ing. Techn., **47**, No. 7, 299-300, (1975)
- 57) Huwald, E., Clement, M.: Investigations on the grinding in an opposite jet mill. Erzmetall, **29**, No. 11, 503-508, (1976)
- 58) Menyhart, M., Miskiewicz, L.: Comminution and structural changes in a jet mill. Powder Tech., **15**, No. 2, 261-266, (1976)
- 59) Tanaka, T.: Theoretical approach to efficiency improvement of jet mills with scale-up and its limit. Aufbereitungs-Technik, **17**, No. 10, 499-502, (1976)
- 60) Pitchumani, B., Venkateswarlu, D.: Studies in fluid energy grinding—part 1—. Aufbereitungs-Technik, **21**, No. 5, 238-244, (1980)
- 61) Pitchumani, B., Venkateswarlu, D.: Studies in fluid energy grinding—Part 2 Aufbereitungs-Technik, **22**, No. 3, 136-144, (1981)
- 62) Häse, U.: Influence of grinding and mill parameters in opposed-jet pulverization of limestone and gamma aluminium hydroxide.

Zement-Kalk-Gips, **34**, No. 11, 563-572, (1981)

- 63) Nied, R.: The fluidized bed counter-jet-mill—recent findings and new applications. Aufbereitungs-Technik, **23**, No. 5, 236-242, (1982)
- 64) Gregor, W., Schoenert, K.: Efficiency of particle acceleration in a jet mill. Chem.-Ing. Techn., **54**, No. 8, 764-765, (1982)
- 65) Honma, T., Hasegawa, M., Kanda, Y.: Jet pulverization using grinding medium. J. Chem. Eng. Japan, **15**, No. 3, 240-242, (1982)

機械式衝撃粉碎機

- 66) Mohanty, B., Narasimhan, K. S.: Fluid energy grinding. Powder Tech., **33**, No. 1, 135-141, (1982)
- 67) Inoue, T., Itoh, K., OKaya, K., Ohta, H., Imazumi, T.: Performance estimation of a high velocity impact comminution system based on single fracture. J. Soc. Powder Tech., Japan, **16**, No. 12, 721-727, (1979)
- 68) Bölöni, I.: Theory, technique and practical application of hammer mills. Aufbereitungs-Technik, **21**, No. 5, 245-252, (1980)
- 69) Hajratwala, B. R.: Particle size reduction by a hammer mill 1: effect of output screen size, feed particle size, and mill speed. J. Pharm. Sci., **71**, 188-190, (1982)

【攪拌ミル】

- 70) Sadler III, L. Y., Stanley, D. A., Brooks, D. R.: Attrition mill operating characteristics. Powder Tech., **12**, No. 1, 19-28, (1975)
- 71) Pokorny, J., Zaloudik, P.: Dry grinding in agitated ball mills. Powder Tech., **15**, No. 2, 187-192, (1976)
- 72) Heinrich, B., Kreitner, L.: Wet grinding systems for fine and superfine comminution in the chemical industry. Aufbereitungs-Technik, **22**, No. 10, 556-562, (1981)
- 73) Heinrich, B., Kreitner, L.: Wet grinding systems for fine and superfine comminution in the chemical industry. Aufbereitungs-Technik, **22**, No. 11, 619-624, (1981)
- 74) Bühler, G.: The Fryma Co Ball mill—a novel wet ball mill with high energy density. Chem.-Ing. Techn., **54**, No. 4, 371-374, (1982)
- 75) Stehr, N., Schwedes, J.: Process technological investigations on a stirred ball mill. Auf-

- bereitungs-Technik, **24**, No. 10, 597-604, (1983)
- 76) Stehr, N., Schwedes, J.: Studies on size reduction in an agitator ball mill. Chem.-Ing. Techn., **55**, No. 3, 233-233, (1983)
- 77) Morohashi, S., Ooi, N., Yashima, S.: Production of fine powders by an agitating mill. J. Soc. Powder Tech., Japan, **21**, No. 8, 476-482, (1984)
- 【モデリング】**
- 78) Gardner, R. P.: Evaluation of a radioisotope tracer method for determination of simulation parameters in open-circuit continuous ball mills. Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME), **258**, No. 1, 46-54, (1975)
- 79) Masson, M. A., Sligar, N. J.: Simulation of pulverized fuel production in a roll-table mill. Trans. Bul. Inst. Min. Met., **84**, No. 826, C192-C192, (1975)
- 80) Mika, T. S.: Application of a distributed parameter model for a continuous grinding mill at steady state. Trans. Bul. Inst. Min. Met., **84**, No. 829, C239-C249, (1975)
- 81) Cutting, G. W.: A practical method for predicting grinding model parameters from laboratory batch tests. Powder Tech., **15**, No. 1, 21-28, (1976)
- 82) Mika, T. S.: A solution to the distributed parameter model of a continuous grinding mill at steady state. Chem. Eng. Sci., **31**, No. 4, 257-262, (1976)
- 83) White, J. W., Winslow, R. L., Rossiter, G. J.: A useful technique for metallurgical mass balances applications in grinding. Int. J. Mineral Process., **4**, No. 1, 39-51, (1977)
- 84) Le-houillier, R., Van-Neste, A., Marchand, J. C.: Influence of charge on the parameters of the batch grinding equation and its implications in simulation. Powder Tech., **16**, No. 1, 7-15, (1977)
- 85) Gupta, V. K.: The estimation of the parameters of the size-discretized batch grinding equation. Powder Tech., **20**, No. 2, 287-288, (1978)
- 86) Fruehwein, P.: Mathematical simulation as a aid in the optimization of size-reduction processes with regard to the particle size distribution of the product. Chem.-Ing. Techn., **51**, No. 2, 129-129, (1979)
- 87) Gardner, R. P., Verghese, K., Rogers, R. S. C.: The on-stream determination of large scale ball mill residence time distribution with sort-lived radioactive tracers. Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME), **32**, No. 4, 422-431, (1980)
- 88) Gallyas, M., Hilger, M., Kolostori, J., Vadasz, M.: Investigations on material flow in closed-circuit cement grinding with radioisotopes. Zement-Kalk-Gips, **33**, No. 5, 240-243, (1980)
- 89) Inoue, T., Imaizumi, T.: Simulation of closed wet grinding process. Fine Particle Processing, ed. P. Somasundaran, 126-147, (1980)
- 90) Inoue, T., Okaya, K., Imaizumi, T.: A dynamic simulation model for the closed circuit grinding. European Symposium Particle Technology 1980, 656-671, (1980)
- 91) Fan, L. S., Srivastava, R. C.: A stochastic model for particle disintegration-1. grinding mechanism. Chem. Eng. Sci., **36**, No. 6, 1091-1096, (1981)
- 92) Finch, J. A., Ramirez-Castro, J.: Modelling mineral size reduction in the closed-circuit ball mill at the Pine Point Mines concentrator. Int. J. Mineral Process., **8**, No. 1, 61-78, (1981)
- 93) Auer, A.: A stochastic model of continuous size reduction. Powder Tech., **28**, No. 1, 77-82, (1981)
- 94) Austin, L. G., Bagga, P.: An analysis of fine dry grinding in ball mills. Powder Tech., **28**, No. 1, 83-90, (1981)
- 95) Gupta, V. K., Hodouin, D., Berube, M. A., Everell, M. D.: The estimation of rate and breakage distribution parameters from batch grinding data for a complex pyritic ore using a back calculation method. Powder Tech., **28**, No. 1, 97-106, (1981)
- 96) Austin, L. G., Van-Orden, D., Mc Williams, B. Perez, J. W.: Breakage parameters of some materials in smooth roll crushers. Powder Tech., **28**, No. 2, 245-251, (1981)
- 97) Austin, L. G., Shah, J., Wang, J., Gallagher, E., Luckie, P. T.: An analysis of ball-and-race milling the hardgrove mill. Powder Tech., **29**, No. 2, 263-275, (1981)

- 98) Bosco-Yu, S. L., Gardner, R. P.: The preparation and use of radioactive tracers for the study of comminution processes homogeneous materials. *Powder Tech.*, **30**, No. 2, 265-275, (1981)
- 99) Gardner, R. P., Lee, H. M., Bosco-Yu, S. L., Rogers, R. S. C.: The preparation and use of radioactive tracers for the study of comminution processes heterogeneous or multicomponent materials. *Powder Tech.*, **30**, No. 2, 277-287, (1981)
- 100) Zisselmar, R.: Grindability testing of materials with different physical properties as a basis for the design of grinding plants. *Zement-Kalk-Gips*, **34**, No. 4, 187-196, (1981)
- 101) Viswanathan, K., Mani, B. P.: Distribution function of comminution kinetics—modelling and experimental study. *Int. J. Mineral Process.*, **9**, No. 4, 385-392, (1982)
- 102) Shoji, K., Austin, L. G., Smaila, F., Brame, K., Luckie, P. T.: Further studies of ball and powder filling effects in ball milling. *Powder Tech.*, **31**, No. 1, 121-126, (1982)
- 103) Austin, L. G., Shoji, K., Bell, D.: Rate equations for non-linear breakage in mills due to materials effects. *Powder Tech.*, **31**, No. 1, 127-133, (1982)
- 104) Rogers, R. S. C.: Closed form analytical solutions for models of closed circuit roll crushers. *Powder Tech.*, **32**, No. 1, 125-127, (1982)
- 105) Gupta, V. K., Hodouin, D., Everell, M. D.: An analysis of wet grinding operation using a linearized population balance model for a pilot scale grate-discharge ball mill. *Powder Tech.*, **32**, No. 2, 233-244, (1982)
- 106) Rogers, R. S. C., Bell, D. G., Hukki, A. M.: A short-lived radioactive tracer method for the measurement of closed circuit ball mill mill residence time distributions. *Powder Tech.*, **32**, No. 2, 245-252, (1982)
- 107) Gardner, R. P., Aissa, M., Verghese, K.: Determination of ball mill residence time distributions from tracer data taken in closed-circuit operation. *Powder Tech.*, **32**, No. 2, 253-266, (1982)
- 108) Klimpel, R. B.: Slurry rheology influence on the performance of mineral/coal grinding circuits—part 2. *Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME)*, **35**, No. 1, 21-26, (1983)
- 109) Narayanan, S. S., Whiten, W. J.: Breakage characteristics for ores for ball mill modelling. *J. Aust. Inst. Min. Met.*, No. 286, 31-39, (1983)
- 110) Yashima, S., Arai, Y., Sano, S.: An analysis of a laboratory hammer screen mill based on a grinding rate equation. *J. Soc. Powder Tech., Japan*, **20**, No. 11, 663-670, (1983)
- 111) Vermeulen, L. A., Howat, D. D., Gough, C. L. M.: Theories of ball wear and the results of a marked-ball test in ball milling. *J. S. African Inst. Min. Met.*, **83**, No. 8, 189-197, (1983)
- 112) Austin, L. G., Brame, K.: A comparison of the bond method for sizing wet tumbling ball mills with a size-mass balance simulation model. *Powder Tech.*, **34**, No. 2, 261-274, (1983)
- 113) Rogers, R. S. C., Shoji, K.: A double-roll crusher model applied to a full scale crusher. *Powder Tech.*, **35**, No. 1, 123-129, (1983)
- 114) Rogers, R. S. C.: The double-roll crusher model applied to a two-component feed material. *Powder Tech.*, **35**, No. 1, 131-134, (1983)
- 115) Austin, L. G., Rogovin, Z., Rogers, R. S. C., Trimarchi, T.: The axial mixing model applied to ball mills. *Powder Tech.*, **36**, No. 1, 119-126, (1983)
- 116) Rogers, R. S. C.: A generalized transfer parameter treatment of crushing and grinding circuit simulation. *Powder Tech.*, **36**, No. 1, 137-143, (1983)
- 117) Voller, V. R.: A note on energy-size reduction relationships in comminution. *Powder Tech.*, **36**, No. 2, 281-286, (1983)
- 118) Viswanathan, K., Mani, B. P.: Scale-up procedure for grinding in ball mills using the distributed fracture model. *Aufbereitungs-Technik*, **25**, No. 10, 589-594, (1984)
- 119) Austin, L. G.: Gaudin lecture—concepts in process design of mills. *Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME)*, **36**, No. 6, 628-635, (1984)

- 120) Kinneberg, D. J., Herbst, J. A.: A comparison of linear and nonlinear models for open-circuit ball mill grinding. *Int. J. Mineral Process.*, **13**, No. 2, 143-165, (1984)
 - 121) Tanaka, T.: Dynamic characteristics of grinding mills. *J. Soc. Powder Tech., Japan*, **21**, No. 9, 553-558, (1984)
 - 122) Rajamani, K., Herbst, J. A.: Simultaneous estimation of selection and breakage functions from batch and continuous grinding data. *Trans. Bul. Inst. Min. Met.*, **93**, No. 2, C74-C85, (1984)
- 【粉砕プロセスの制御】
- 123) Peterson, T. W., White, J. W., Krist, E. E.: Off-line development of a minicomputer process control program for an industrial wet grinding circuit. *Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME)*, **260**, No. 4, 355-361, (1976)
 - 124) Bradburn, R. G., Flintoff, B. C., Walker, R. A.: Practical approach to digital control of a grinding circuit at Brenda Mines, Ltd. *Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME)*, **262**, No. 2, 140-147, (1977)
 - 125) Hastik, W., Meiler, H., Rosenstock, F.: Process control for closed-circuit dry grinding of iron ore. *Aufbereitungs-Technik*, **19**, No. 10, 459-461, (1978)
 - 126) Hietler, J.: Method for the control of grinding plants. *Zement-Kalk-Gips*, **31**, No. 2, 95-96, (1978)
 - 127) Hilger, M., Kolostori, J., Keviczky, L.: Investigations on the application of adaptive control methods for raw meal stabilization and closed-circuit grinding. *Zement-Kalk-Gips*, **31**, No. 4, 175-177, (1978)
 - 128) Olsen, T. O., Lenhartzen, T.: Grinding circuit parameter estimation using the maximum likelihood method. *Int. J. Mineral Process.*, **6**, No. 2, 133-153, (1979)
 - 129) Moys, M. H.: The control of autogenous and semi-autogenous mills: the relationship between measurements of bearing pressure and parameters describing the mill load. *J. S. African Inst. Min. Met.*, **80**, No. 11, 401-408, (1980)
 - 130) Domanowski, A., Derbsch, K., Sommer, H. P.: Considerations on the controllability of grinding-classifying circuits in the cement industry. *Zement-Kalk-Gips*, **33**, No. 4, 188-189, (1980)
 - 131) Steinert, H. E., Spindler, A.: Using programmable control devices for processing the measured variables of the new coal grinding plant at the laegerdorf works. *Zement-Kalk-Gips*, **33**, No. 12, 623-626, (1980)
 - 132) Hilger, M., Hetthessy, J., Keviczky, L., Kolostori, J.: Comparative investigations on the control of closed-circuit ball mills on the basis of operating results. *Zement-Kalk-Gips*, **34**, No. 3, 146-150, (1981)
 - 133) Hulbert, D. G., Woodburn, E. T.: Multivariable control of a wet-grinding circuit. *AIChE J.*, **29**, No. 2, 186-191, (1983)
 - 134) Adel, G. T., Ulsoy, A. G., Sastry, K. V. S.: A theoretical analysis and control study of open-circuit grinding. *Int. J. Mineral Process.*, **10**, No. 1, 25-43, (1983)
 - 135) Seitz, R. A., Kawatra, S. K.: Further studies on the use of classifiers for the control of wet grinding circuits. *Int. J. Mineral Process.*, **12**, No. 4, 239-249, (1984)
- 【メカノケミカル効果】
- 136) Gammage, R. B., Glasson, D. R.: The effect of grinding on the polymorphs of calcium carbonate. *J. Colloid Interface Sci.*, **55**, No. 2, 396 (1976)
 - 137) Lefelshtel, N., Nadiv, S., Lin, I. J., Zimmels, Y.: Production of zinc ferrite in a mechanochemical reaction by grinding in a ball mill. *Powder Tech.*, **20**, No. 2, 211-217, (1978)
 - 138) Schneider, F. U.: Investigations for representing and analyzing active solid phases as a result of intense grinding strain. *Aufbereitung-Technik*, **19**, No. 10, 462-466, (1978)
 - 139) El-Shall, H., Vidanage, S., Somasundaran, P.: Grinding of quartz in amine solutions. *Int. J. Mineral Process.*, **6**, No. 2, 105-117, (1979)
 - 140) Shinozaki, M., Senna, M.: Effects of number and size of milling balls on the mechanochemical activation of fine. *Ind. Eng. Chem.—Fundam.*, **20**, No. 1, 59-62, (1981)
 - 141) Klimpel, R. R., Austin, L. G.: Chemical additives for wet grinding of minerals. *Powder*

- Tech., **31**, No. 2, 239-253, (1982)
- 142) Senna, M., Schönert, K.: Change in the enthalpy and structure of lead peroxide by grinding and pressing. *Powder Tech.*, **31**, No. 2, 269-275, (1982)
 - 143) Nakagawa, H., Takahashi, Y., Sugimoto, I.: The effects of grinding and drying on the solid state stability of sodium prasterone sulfate. *Chem. Pharm. Bull.*, **30**, No. 1, 242-248, (1982)
 - 144) Otsuka, M., Kaneniwa, N.: Effect of grinding on the degree of crystallinity of cephalixin powder. *Chem. Pharm. Bull.*, **31**, No. 12, 4489-4495, (1983)
 - 145) Tsuda, Y., Suzuki, E., Shirotani, K., Sekiguchi, K., Shimizu, K., Iwatsuru, M.: Dimethylamine adducts of sulfonamides and their applicability to particle size reduction. *Yakugaku Zasshi* (J. Pharm. Soc.), **103**, No. 1, 100-109, (1983)
- 【その他】
- 146) Stanley, G. G.: Recent advances in mineral dressing — comminution and classification — considerations in the application of autogenous milling. *J. S. African Inst. Min. Met.*, **76**, pec 53-55, (1975)
 - 147) Yigit, E.: Three mathematical comminution models based on strain energy. *Int. J. Mineral Process.*, **3**, No. 4, 365-375, (1976)
 - 148) Mac Pherson, A. R.: A simple method to predict the autogenous grinding mill requirements for processing ore from a new deposit. *Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME)*, **282**, No. 3, 236-240, (1977)
 - 149) Rooda, J. E., Haaker, G.: A testing procedure for triaxial tests and a numerical method for the calculation of powder flow properties. *Powder Tech.*, **16**, No. 2, 273-280, (1977)
 - 150) Hukki, R. T.: Dry grinding in closed circuit with two-step classification. *Zement-Kalk-Gips*, **30**, No. 5, 199-205, (1977)
 - 151) Bergstedt, L., Fagremo, O.: Some basic factors influencing the use and optimization of autogenous grinding. *Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME)*, **30**, No. 2, 193-197, (1978)
 - 152) Klimpel, R. R., Manfroy, W.: Chemical grinding aids for increasing throughput in the wet grinding of ores. *Ind. Eng. Chem.—Process Design Develop.*, **17**, No. 4, 518-523, (1978)
 - 153) Jinbo, G., Yamazaki, R., Saito, Y., Ito, M., Kosaka, M.: Energy efficiency in cryogenic crushing of non-brittle materials. *J. Soc. Powder Tech., Japan*, **15**, No. 7, 395-402, (1978)
 - 154) King, R. P.: A model for the quantitative estimation of mineral liberation by grinding. *Int. J. Mineral Process.*, **6**, No. 3, 207-220, (1979)
 - 155) Deckers, M., Stettner, W.: Effect of grinding aids with special consideration of the mill conditions. *Aufbereitungs-Technik*, **20**, No. 10, 545-550, (1979)
 - 156) Schönert, K.: Energy aspects of the size reduction of brittle materials. *Zement-Kalk-Gips*, **32**, No. 1, 1-9, (1979)
 - 157) Beke, B.: Efficiency of grinding — present status and outlook. *Aufbereitungs-Technik*, **21**, No. 10, 521-524, (1980)
 - 158) Trass, O.: The Szego grinding mill. *Fine Particle Processing*, ed. P. Somasundaran, 96-112, (1980)
 - 159) Katzer, M., Klimpel, R., Sewell, J.: Example of the laboratory characterization of grinding aids in the wet grinding of ores. *Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME)*, **33**, No. 10, 1471-1476, (1981)
 - 160) Giersiepen, G., Bender, W., Schwedes, J., Elgeti, K.: Size reduction of rubber at low temperatures. *Chem.-Ing. Techn.*, **53**, No. 8, 648-650, (1981)
 - 161) Tsuda, Y., Sekiguchi, K.: Ammonia adducts of sulfonylureas and their application to particle size reduction. *Yakugaku Zasshi* (J. Pharm. Soc.), **101**, No. 1, 55-63, (1981)
 - 162) Huwald, E.: Investigations relating to the design of comminution circuit. *Aufbereitungs-Technik*, **23**, No. 10, 535-541, (1982)
 - 163) Smigerski, H. J.: On the determination of separating efficiency curves of grinding classification. *Aufbereitungs-Technik*, **23**, No. 10, 552-558, (1982)
 - 164) Bassarear, J.: Autogenous and semiautogenous grinding practices. *Mining Eng. (incl. Trans.*

- SME AIME), 34, No. 6, 647-651, (1982)
- 165) Klimpel, R. R.: Slurry rheology influence on the performance of mineral/coal grinding circuits—part 1. Mining Eng. (incl. Trans. SME AIME), 34, No. 12, 1665-1668, (1982)
- 166) Klotz, K., Schubert, H.: Crushing of single irregularly shaped particles by compression: size distribution of progeny particles. Powder Tech., 32, No. 1, 129-137, (1982)
- 167) Klimpel, R.: Laboratory studies of the grinding and rheology of coal-water slurries. Powder Tech., 32, No. 2, 267-277, (1982)
- 168) Tucker, P.: Rheological factors that affect the wet grinding of ores. Trans. Bul. Inst. Min. Met., 91, No. 3, C117-C122, (1982)
- 169) Ellerbrock, H. G.: Energy utilization in cement grinding. Zement-Kalk-Gips, 35, No. 2, 75-82, (1982)
- 170) Decasper, J.: Optimization of cement grinding with grinding aids and higher air flow rates through the mill. Zement-Kalk-Gips, 35, No. 11, 565-570, (1982)
- 171) Dombrowe, H., Hoffmann, B., Scheibe, W.: Mode of action and possibilities for use of grinding aids. Zement-Kalk-Gips, 35, No. 11, 571-580, (1982)
- 172) Hilgard, G., Kuhlmann, K.: Replacement of a large mechanical air separator by a cyclone air separator at the schwelgern blastfurnace cement grinding works. Zement-Kalk-Gips, 36, No. 7, 397-401, (1983)
- 173) Klapdohr, H., Masbaum, G.: Effect of various parameters on energy utilization in the grindability tester. Zement-Kalk-Gips, 36, No. 11, 615-623, (1983)
- 174) Schönert, K., Knobloch, O.: Cement grinding in the twin-roll mill. Zement-Kalk-Gips, 37, No. 11, 563-568, (1984)
- 175) Kuhlmann, K.: Significance of classification in cement grinding—results of a balance analysis of the grinding circuit. Zement-Kalk-Gips, 37, No. 9, 474-480, (1984)
- 176) Cleemann, J.: Influence of mill ventilation on grinding efficiency. Zement-Kalk-Gips, 37, No. 12, 628-635, (1984)
- 177) Hanish, J., Schubert, H.: Compressive Comminution of particle Beds. Proceedings, Int. Mineral Processing Congress, 201-212, (1985)

特許一言メモ No. 74

——ハイブリッドシステム——

IPC (国際特許分類) 第4版において改正された「ハイブリッドシステム」は、現在ごく限られた化学を中心とする技術分野に適用されているのみであるが、今後の改正によっては、より広い範囲に採用されるものと予想される。

「ハイブリッドシステム」とは、特許文献に開示された技術主題に対して付与された IPC 記号に加え、同技術主題に関する情報にインデキシングコードを付与することによって、調査段階においてより詳しく特許文献に

含まれる技術情報を特定できるようにしようとするものの。

これによって、分類記号で示される情報に加えて組成物・混合物の成分や化合物の基を表示したり、用途・応用を特定することが可能となる。以下はインデキシングコード記入の一例で「:」(コロン) 以下の部分がこれに当たる。(例) B29K 1:00 (月報はつめい第237号より)

(特 許 室)

空気輸送の研究におけるわが国の現状

森川 敬信*
Yoshinobu Morikawa

1. ま え が き

わが国において行われた空気輸送に関する研究の概要を紹介する。国際会議のプロシーディング、商業誌に記載されたものまで引用すると、引用数はかなり多くなるので、学会誌または学会の論文集からのみ引用することにした。

2. 流 動 様 式

研究において取り扱われる現象の範囲を簡単に知るために、水平管の場合を例にとりて、Fig. 1 に示してある¹⁾。この図は、平均粒径 $d_K=350\text{ }\mu\text{m}$ の砂が、内径 $d=10\text{mm}$ のガラス管内を輸送される場合であって、図の縦軸は管の単位長さについての圧力降下 $\Delta p/\Delta l$ 、横軸は気流の平均速度 v である。管の中には、浮遊輸送④から、プラグ輸送⑥までの種々の流動様式があらわれる。図の中の μ は、固体粒子と気体の質量流量 G_K および G_L を用いて、

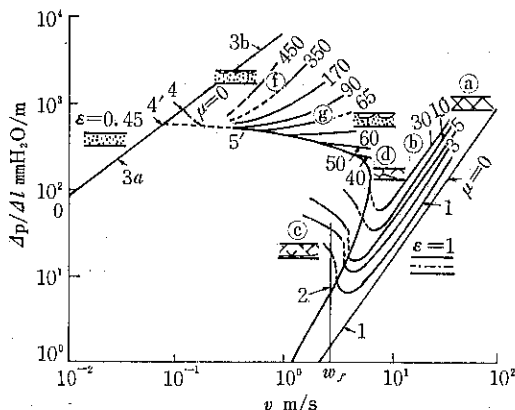


Fig. 1 水平管内の流動様式 ($d=10\text{mm}$, $d_K=350\text{ }\mu\text{m}$)

* 大阪大学工学部産業機械工学科
(〒565 吹田市山田丘2-1)
Tel. (06) 877-5111

$$\mu = G_K / G_L \quad (1)$$

で定義した混合比である。図において、 μ の最大値として 450 が示されている。また図の中の ε は空間率、 w_f は固体粒子の浮遊速度である。

3. 浮 遊 輸 送

今まで多く行われてきた研究は、Fig. 1 の④～⑥の領域に属する流れが対象で、混合比は一般に 40 以下である。ここでは、④～⑥を便宜上、浮遊輸送と呼ぶことにする。

3.1 圧 力 損 失

-(i)-直管の定速部

装置を設計するにあたって、直接に關与する量として、圧力損失がある。二相流の全圧力損失 Δp は、単相流による圧力損失 Δp_L と、気流中の固体粒子に起因して生ずる付加圧力損失 Δp_K の和として、

$$\Delta p = \Delta p_L + \Delta p_K \quad (2)$$

で表わされることが多い。単相流の場合の類推から、

$$\Delta p_K = \lambda_s \frac{\Delta l}{d} \frac{\rho_L}{2} v^2 \quad (\rho_L: \text{空気密度}) \quad (3)$$

あるいは

$$\Delta p_K = \lambda_z \frac{\Delta l}{d} \frac{\rho_L}{2} v^2 \mu \quad (4)$$

とおき、実験値から

$$\lambda_s = a A^b \quad (5)$$

のように、係数 a 、べき指数 b を使い、 λ_s と無次元数 A との関係を求めたり、あるいは係数 λ_z とフルード数

$$Fr = v / \sqrt{gd} \quad (6)$$

の関係を求める方法がとられてきた。

比較的早い時期に、平均分散密度 ρ_{KF0} と、固体粒子の平均速度 c に注目し、固体粒子と管壁との摩擦による圧力損失を

$$\Delta p_K = \lambda \frac{\Delta l}{d} \frac{\rho_{KF0}}{2} c^2 \quad (7)$$

で表わすことが試みられた²⁾。しかし λ がレイノルズ数

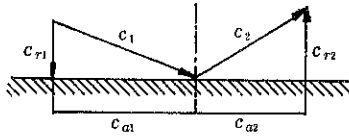


Fig. 2 管壁に衝突し、反発する固体粒子の速度

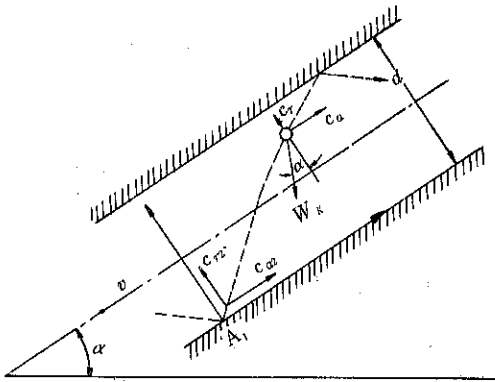


Fig. 3 傾斜管内の粒子の運動

の関数として取り扱われたために、妥当な進展が見られないまま、式(7)の表現は忘れられることになった。

固体粒子が管壁に衝突する速度と、衝突後反発する速度を、Fig. 2 のように管の半径方向成分と管軸方向の成分にわけ、かつ Fig. 3 のように、反発後の任意の時刻における固体粒子の半径方向および管軸方向の速度を考えると、固体粒子と管壁との摩擦および衝突による付加圧力損失 Δp_{KR} は

$$\Delta p_{KR} = \lambda_{KR} \frac{dl}{d} \frac{\rho_K F_0}{2} c^2 \quad (8)$$

で表わすことができ³⁾、損失係数 λ_{KR} はフルード数

$$Fr^* = c\sqrt{gd} \quad (9)$$

の関数となる³⁾。また固体粒子相互の衝突による圧力損失 Δp_{KK} 、傾斜管あるいは鉛直管において、固体粒子群を重力にさからって支えるための圧力損失 Δp_{Kh} も、それぞれ

$$\Delta p_{KK} = \lambda_{KK} \frac{dl}{d} \frac{\rho_K F_0}{2} c^2 \quad (10)$$

$$\Delta p_{Kh} = \lambda_{Kh} \frac{dl}{d} \frac{\rho_K F_0}{2} c^2 \quad (11)$$

で表わすことができ、損失係数は Fr^* の関数である。分散密度は、管の断面積 F と固体粒子の平均速度 c を用い、

$$\rho_{KF0} = G_K / (Fc) \quad (12)$$

によって求めることができる。

水平管について、管径 $d=5, 10, 20$ および 40 cm, 粒

子物性値として、平均直径 $d_K=1.02\sim 8.1$ mm, 密度 $\rho_K=1070\sim 1420$ kg/m³ の 9 種類, 最大混合比 20 まで⁴⁾、鉛直管について、管径 $d=5, 10$ および 20 cm, 粒子物性値として、 $d_K=1.0\sim 7.6$ mm, $\rho_K=1070\sim 7850$ kg/m³ の 8 種類, 最大混合比 30 までについて⁵⁾、広範な測定値を集めた研究がある。この両研究^{4), 5)}は、測定値をほぼなまのままで整理することに終っているの、式(8), (10) および(11)から

$$\Delta p = \Delta p_{KR} + \Delta p_{KK} + \Delta p_{Kh} \quad (13)$$

$$= \lambda_K \frac{dl}{d} \frac{\rho_K F_0}{2} c^2 \quad (14)$$

とおき、 λ_K と Fr^* との関係を求めると、その関数関係は明らかに示される⁵⁾。傾斜管内の流れも、この考えによって、うまく取り扱うことができる^{7), 8)}。

式(3)あるいは式(4)は、ただそのように置かれた式であるが、理論的考察に基づく式(8), (10), (11)および(14)のように表現を変え、固気二相流の取り扱いも、*v. Kármán* のいわゆる変化する定数の科学⁹⁾ から脱却しつつあるといえる。

鉛直管の測定値⁵⁾を検討すれば、 $\lambda_{KR} + \lambda_{KK}$ の値は、フルード数 Fr^* および混合比に無関係に、粒子ごとに一定値をとる¹⁰⁾。管の材料と固体粒子の特性によってきまる定数として λ_g^* が導入されたが¹¹⁾、これは式(4)の λ_g と

$$\lambda_g = \lambda_g^* \frac{c}{v} + \frac{2\beta}{Fr^2(c/v)} \quad (15)$$

の関係がある。上式の β は重力の影響に関する係数。考察によれば、

$$\lambda_g^* = \lambda_{KR} + \lambda_{KK} \quad (16)$$

となり¹⁰⁾、式(14)の λ_K の中で、 λ_{Kh} が占める割合を定量的に明らかにすることができる¹⁰⁾。

このほかにも、圧力損失を取扱った研究は多く^{12)~15)}、また多くの研究は、一定の大きさの固体粒子を用いて実験しているが、大小 2 種類の固体粒子の混合割合を変えて、圧力損失が取扱われた¹⁶⁾。

(ii) 加速損失

さきに述べた広範な実験^{4), 5)}から、加速損失の特性を明らかにする¹⁷⁾。一方、加速損失の理論的な取り扱いも進められ^{10), 18)~21)}、その特別な場合として、固体粒子の速度が定速になった場合を考えると、定速部を対象として出発したときの結果と一致することが示されている。また異なった考え方から出発して、加速損失を表わす同じ式が得られている^{10), 18)}。

(iii) ベンド

現象に関与する因子が多く、それらの広い範囲にわたって行われた研究はないようである。ベンドの損失¹⁴⁾、

だ円ベンドと円ベンドの損失の比較²²⁾、ベンドの最適形状²³⁾、ベンドの損失と加速損失との比較²⁴⁾が取り扱われた。混合比の非常に小さい場合を取り扱う研究が多い中で、混合比30までの損失も取り扱われた²⁴⁾。

(iv) 分岐管、管の断面変化

分岐管の圧力損失あるいは固体粒子の流量分配が取り扱われ²²⁾²⁵⁾²⁶⁾、管路に断面変化のある場合の流れも取り扱われた^{23)27)~29)}。

3.2 輸送条件、動力

水平管内の最小輸送流速³⁰⁾、水平輸送の最適条件³¹⁾、輸送圧力と輸送動力効率³²⁾、振動利用による所要動力低減³³⁾などが取り扱われている。

3.3 固体粒子群の運動

物体まわりの粉体のたい積³⁴⁾³⁵⁾、よどみ点流れでの小さい固体粒子と壁との衝突³⁶⁾、低速流域における流動状

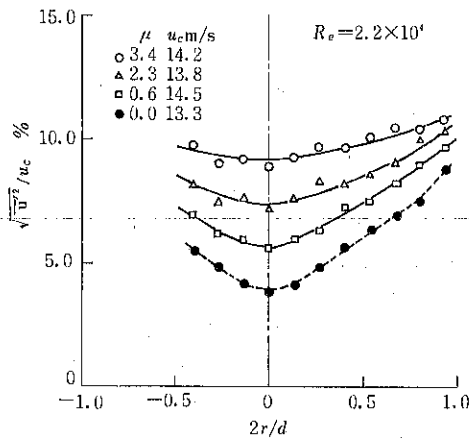
態³⁷⁾が取り扱われたほか、逆に固定された球群を内部にもつ管内の流れ³⁸⁾も研究の対象となった。

3.4 固体粒子の平均速度

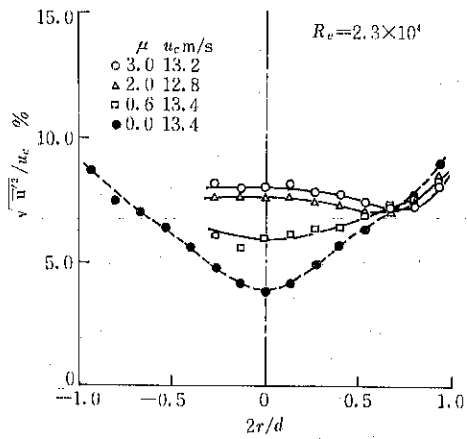
管内の固体粒子の平均速度は、実験的にも理論的にも多くの研究ですでに取り扱われ、その値を求めることができる。理論式の中には、未知の係数 λ_g^* を含むものもあったが、3.1 で述べたとおり、 λ_g^* は定量的に求められる。 λ_g^* を用い、速度比 c/v を求める線図を作ることにもできる³⁹⁾。

3.5 気流と粒子の速度分布、気流と粒子の乱れ強さ、濃度分布

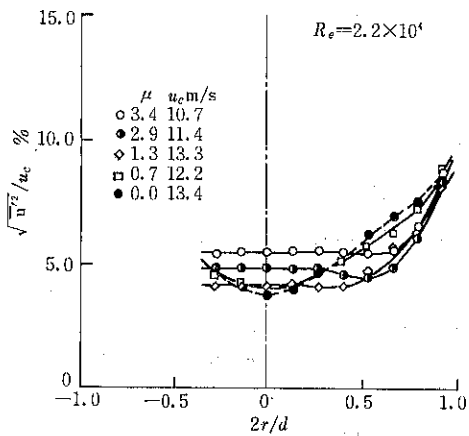
気流と固体粒子の速度分布は、以前から求められていたが、レーザ・ドップラー流速計 (LDV) による測定によって、同じ傾向の結果が得られている。レーザ・ドップラー流速計による測定は、ビトー管や熱線流速計に



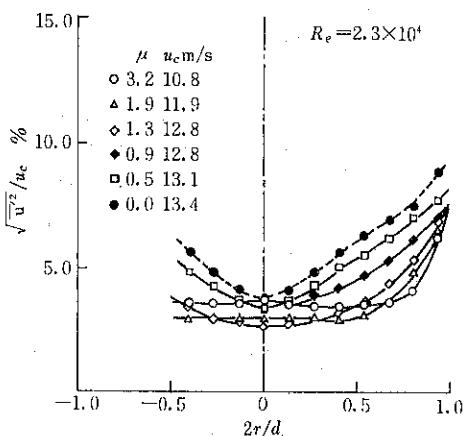
(a) 3 mm 球の場合



(b) 1 mm 球の場合



(c) 500 μm 球の場合



(d) 200 μm 球の場合

Fig. 4 気流の乱れ強さの分布

よる測定と異なり、非接触測定であり、気流の速度と固体粒子の速度を同時に測定する、あるいは固体粒子径と固体粒子の速度を同時に測定するというように、同時測定という大きい特色をもっている。しかし固気二相流への適用に際しては、用いることのできる混合比に制限があり、気体と固体とからの散乱光線による信号判別に工夫が必要である。本節に関連した研究について、いくつかを挙げる事ができる^{40)~45)}。しかしここでは、固体粒子の大きさが、気流の乱れ強さに及ぼす影響を、LDVによる鉛直管内の測定によって調べた結果⁴⁴⁾を紹介するととめる。粒径 $d_K=3\text{ mm}$ のポリスチレン・ペレットを用いれば、Fig. 4 (a)のように、管の全断面にわたって、固体粒子による気流の主流方向の乱れの増加は著しい。図において $\sqrt{u'^2}$ は主流方向の気流の乱れ強さ、 u_c は管軸における気流の速度、 r は管軸から測った半径方向の距離である。図から、管の中心に近づくほど、乱れの増加の割合が大きく、混合比が大きくなれば、断面を通じて乱れ強さが一様になっていることがわかる。粒径が $d_K=1\text{ mm}$ の場合には、Fig. 4 (b)のように、管の中心部で乱れは著しく増加するが、壁面の近くでは、逆に乱れ強さが減少している。すなわち固体粒子は、乱れを助長する効果と抑制する効果とを同時に示している。また混合比が比較的大きい場合、 $2r/d=0.6\sim0.7$ の近くでは、乱れ強さは極小値を示している。粒径がさらに小さくなって、 $d_K=500\text{ }\mu\text{m}$ の場合には、Fig. 4 (c)のように、 $d_K=1\text{ mm}$ の場合と定性的には同じであるが、乱れの抑制される領域が、管壁から管軸へ広がり、管軸での乱れの増加の割合も減少している。粒径が $d_K=200\text{ }\mu\text{m}$ の場合には、Fig. 4 (d)のように、管の全断面にわたって、乱れ強さが抑制されている。混合比の増加とともに、減少しはじめた乱れ強さが、さらに混合比が大きくなると、逆に増加しはじめている。

このように、LDVを用いることによって、他の流速計では測定することのできない特性を知ることができるが、Fig. 4 からわかるように、この測定は $\mu<3.5$ の範囲で行われ、Fig. 1 によれば、ごく限られた領域の現象であることがわかる。固体粒子の速度あるいは濃度分布について、混合比のさらに大きい領域における測定値を得るために、光ファイバプローブを利用することが試みられている⁴⁶⁾。

固気二相流の気流の平均速度の測定に関する限り、ピトー管とLDVによる測定結果には、混合比4.4以下では、ほとんど差が認められない。

LDVによらず、熱線流速計によって、気流の乱れ強さを測定した例もあり⁴⁷⁾、粉じん計とダストチューブにより、水平管内の乱流中の、粉じん濃度分布も測定され

ている⁴⁸⁾。

4. 数値実験

空気輸送の現象を取り扱うには、ほとんどの場合に、実験を必要とする。もし空気輸送の実験による情報を必要としない解析手段があれば、非常に望ましい。このような解析手段として、計算機による数値実験が考えられる。混合比が非常に小さい場合、たとえば Fig. 1 の④における $\mu<2$ の場合について、シミュレーションにより固体粒子の速度分布や濃度分布を取り扱い、実験結果と合うことが報告された^{49)~51)}。その後、空気輸送に無関係に定義される摩擦係数や反発係数を用い、ベンドを含む管路内の固気二相流について解析が行われた⁵²⁾。この解析においては、粒径、密度、反発係数、動摩擦係数が与えられる場合、固体粒子の管内への供給位置から、ランダムに落下する個々の固体粒子の、管内における飛行の過程が、計算機によって逐次求められている。ただし固体粒子が浮遊の状態を維持するための因子を考慮していないので、水平直管において、固体粒子の反発が単純に繰り返されると、固体粒子の壁面に対する入射角は減少し続け、いずれの固体粒子も管底をしゅう動するという結果になっている。この欠点を除くために、固体粒子と管壁の反発に対して、仮想壁面を導入した異常反発を仮定し、水平管に対して空気輸送に近い状態を実現させること、付加圧力損失についても、従来の測定値と一致する傾向の得られることがわかっている⁵³⁾。ただしこの方法の適用は、粒径が 0.5 mm より大きいときに限られる。数値実験は管路に分岐部を有する場合に対しても、試みられた⁵⁴⁾。粉体の鉛直輸送に対し、気体の圧縮性を考慮し、管路に沿う圧力、速度、体積分率について数値解析が行われ、混合比90までの測定値と比較されている⁵⁵⁾。

5. ブロータンク

ブロータンク式空気輸送の、圧力、空気速度などの基礎研究⁵⁶⁾あるいはブロータンク内における固体粒子の流れが取り扱われた⁵⁷⁾。

6. 固体粒子流量計

気体や液体の流量計と同じように、管内を流れている固体粒子の質量流量を求めるための流量計が要求されている。相関流量計を高濃度用に開発されたという報告があり⁵⁸⁾、固体粒子が管内を流れるとき、キャパシタンスの小さい変化に基づいて生ずるキャパシタンス・ノイズを検出するようにして、固体粒子の流量計が考えられている⁵⁹⁾。後者の場合は、粉炭の 800 kg/h までの実験

において、 $\pm 7\%$ の精度が得られている⁵⁹⁾。

7. プラグ輸送

Fig. 1の流動様式③～⑤の範囲での空気輸送は、所要動力の大きいことが欠点である。したがって、所要動力の低減と輸送効率の向上をはかるために、高濃度低速輸送を採用することがある。これは Fig. 1の①や②の流動様式に属している。浮遊輸送においては、気流の速度は $(30\sim 40)\text{m/s}$ で、固体粒子の速度はその $(50\sim 80)\%$ に達する。それに反して、高濃度低速輸送においては、気流の速度は $(2\sim 10)\text{m/s}$ であり、混合比は Fig. 1からわかるとおり、かなり大きい値をとる。

(i) 水平管

管内に形成される単一プラグに対する輸送必要空気圧力⁶⁰⁾、管内に形成される静止粒子層の高さに関する考察⁶¹⁾、プラグの速度⁶²⁾⁶³⁾、プラグの長さ⁶³⁾、圧力損失と輸送特性⁶⁴⁾、プラグの運動⁶⁵⁾などが取り扱われた。二重管方式にする場合、細管に設けた空気噴出孔のピッチの影響についても調べられた⁶¹⁾。プラグ輸送の基礎として、あらかじめ管内に作った固体粒子の静止層を吹抜く場合についても研究された⁶⁶⁾。

(ii) 鉛直管

プラグの形状を保つために、球形ストッパを用い、固体粒子の管内への供給部に振動を加えて、プラグの長さを取り扱った研究⁶⁷⁾、付着粉体に対する圧力損失⁶⁸⁾の研究がある。これらの研究の大多数は、水平管、鉛直管を通じ、一般に混合比の小さい現象を取り扱っている。混合比を大きくした場合について、現象の解明と設計の指針となる研究が望まれる。

8. カプセル輸送

鉛直管における円筒形カプセルの浮遊実験から、カプセルの抵抗係数とレイノルズ数、直径比(カプセル直径/管径)との関係を求め、カプセルのまわりの静圧分布の測定結果をもとに、圧力抵抗と摩擦抵抗の関係を明らかにし、かつカプセル前後の気流速度分布が測定され⁶⁹⁾、二つのカプセルの干渉を検討し、カプセルの直径の2倍以上の間隔があれば、二つのカプセルの干渉がないことが明らかにされた⁷⁰⁾。カプセルの車輪について、摩擦を明らかにするための実験が行われ、かつ円筒形本体の前後に円板(シール板)をつけたカプセルまわりの静圧分布が測定された⁷¹⁾。空気の状態変化を断熱変化と仮定して、数式モデルを構成し、カプセルの走行特性を調べ⁷²⁾、2個のカプセルの走行特性を実験的に調べるとともに、カプセルの停止域の特性を明らかにしている⁷³⁾。また空気の状態変化を等温変化と仮定し、特性曲線法を

用いて、水平管路での解法を示し⁷⁴⁾、他の研究者の測定結果と比較して、定性的な一致を得ている⁷⁵⁾。

カプセルの取り扱いに、特性曲線法による解法を用い、空気の状態変化を等温変化と仮定した場合と、断熱変化と仮定した場合を比較し、両者に大差がないことが示された⁷⁶⁾。

カプセル特性としての、シール特性およびころがり抵抗係数は、送風機の所要能力の算定や走行制御方法の検討などに対して重要であるため、これらのカプセル性能が小形および大形モデルにより測定された⁷⁷⁾。空気の圧縮性およびカプセルと管壁との間のものを考慮した数式モデルを導き、走行するカプセル挙動の解析法が検討された⁷⁸⁾。さらに、制御ゾーン内でのカプセルの速度と、あらかじめ設定された速度パターンとを比較し、調節弁を開閉する、いわゆるサンプル値制御による速度制御システムに関する一連の検討が行われている⁷⁹⁾。

9. あとがき

本稿の表題と書式は、「粉砕」編集事務局のご指定によるものである。予定した内容を、限られた紙数に納めるために、ある部分は詳しく、またある部分は簡略に書かざるを得なかった。

引 用 文 献

- 1) Weber, M.: Strömungsfördertechnik, 91, Krausskopf-Verlag (1974)
- 2) Hariu, O. H., Molstad, M. C.: Indust. Engng. Chem., 4, 1148 (1949)
- 3) Welschhof, G.: VDI-Forsch. -Heft 492 (1962)
- 4) Siegel, W.: VDI-Forsch. -Heft 538 (1970)
- 5) Flatow, J.: VDI-Forsch. -Heft 555 (1973)
- 6) 森川, Segler, G., Hutt, W.: 化学工学, 42, 279 (1978)
- 7) 森川, 辻, 深尾, 森安, 辻野: 機械学会論文集, B, 45, 1632 (1979)
- 8) 森川, 辻, 村上, 平林, 蝶野: 機械学会論文集, B, 46, 884 (1980)
- 9) v. Kármán, Th.: Aerodynamics — Selected Topics in the Light of Their Historical Development. (1954), Cornell Univ. Press
- 10) 森川, 田中: 粉体工学会誌, 21, 87 (1984)
- 11) Barth, W.: Chem. -Ing. -Tech., 30, 171 (1958)
- 12) 越智, 中島, 池森: 機械学会論文集, B, 45, 1850 (1979)
- 13) Hutt, W., Morikawa, Y., Segler, G., Koch, H.: Verfahrenstech. 13, 252 (1979)

- 14) 辻, 森川, 実谷: 粉体工学会誌, 19, 646 (1982)
- 15) 富田, 上滝, 湯谷: 機械学会論文集, B, 49, 1434 (1983)
- 16) 坂本, 森川: 粉体工学会誌, 19, 219 (1982)
- 17) 森川: 粉体工学会誌, 15, 330 (1978)
- 18) 富田, 岩崎, 上滝: 機械学会論文集, 42, 3914 (1976)
- 19) 森本, 山本, 中尾, 田中, 森川: 機械学会論文集, 42, 2787 (1976)
- 20) 山本, 高嶋, 山口, 田中, 森川: 機械学会論文集, 42, 3921 (1976)
- 21) 角南, 守屋, 田中, 森川: 機械学会論文集, 43, 2607 (1977)
- 22) Morikawa, Y., Tsuji, Y., Matsui, K., Jittani, Y.: Int. J. Multiphase Flow, 4, 575 (1978)
- 23) 狩野, 川口, 菅: 粉体工学会誌, 17, 246 (1980)
- 24) 森川: 粉体工学会誌, 19, 284 (1982)
- 25) 森川, 小林, 武田, 上浦: 機械学会論文集, 40, 440 (1974)
- 26) Morikawa, Y., Kondo, T., Hiramoto, T.: Int. J. Multiphase Flow, 4, 397 (1978)
- 27) 阪田: 機械学会論文集, 37, 1560 (1971)
- 28) 出口, 田代, 上滝, 富田: 機械学会論文集, B, 47, 1026 (1981)
- 29) 田代, 富田: 機械学会論文集, B, 50, 360 (1984)
- 30) 越智, 池森: 機械学会論文集, 43, 3816 (1977)
- 31) 富田, 上滝, 井上: 粉体工学会誌, 15, 389 (1978)
- 32) 狩野, 広野, 竹内, 杉山, 月居: 粉体工学会誌, 15, 134 (1978)
- 33) 狩野, 竹内, 山崎, 都築: 化学工学論文集, 7, 126 (1981)
- 34) 狩野, 藤井(史), 藤井(謙), 板倉: 粉体工学会誌, 12, 4 (1975)
- 35) 平野, 狩野, 中谷, 大西, 佐々木, 竹内: 粉体工学会誌, 14, 135 (1977)
- 36) 松藤, 長谷川: 機械学会論文集, B, 46, 1647 (1980)
- 37) 辻, 森川, 杉本, 三好, 中野: 機械学会論文集, B, 48, 656 (1982)
- 38) 辻, 森川, 藤原: 機械学会論文集, B, 50, 202 (1984)
- 39) 森川: 粉体工学会誌, 21, 503 (1984)
- 40) 前田, 菱田, 中村: 機械学会論文集, B, 47, 1563 (1981)
- 41) 前田, 菱田, 中村, 猪飼: 機械学会論文集, B, 48, 69 (1982)
- 42) 前田, 菱田, 松本, 猪飼: 機械学会論文集, B, 48, 88 (1982)
- 43) 辻, 森川, 上地, 川崎, 関口: 機械学会論文集, B, 48, 1901 (1982)
- 44) 辻, 森川, 潮海: 機械学会論文集, B, 50, 1000 (1984)
- 45) 辻, 森川, 高橋, 上地, 潮海: 機械学会論文集, B, 47, 801 (1981)
- 46) 森川, 辻, 田中: 機械学会論文集, B, 51, 2321 (1985)
- 47) 前田, 菱田, 古谷: 機械学会論文集, B, 46, 2313 (1980)
- 48) 湯: 化学工学論文集, 6, 70 (1980)
- 49) Matsumoto, S., Saito, S.: J. Chem. Eng. Japan, 3, 83 (1970)
- 50) Matsumoto, S., Saito, S.: J. Chem. Eng. Japan, 3, 223 (1970)
- 51) Matsumoto, S., Saito, S., Maeda, S.: J. Chem. Eng. Japan, 9, 23 (1976)
- 52) 森川, 辻: 機械学会論文集, 43, 4158 (1977)
- 53) 辻, 森川, 大嶋: 機械学会論文集, B, 49, 1850 (1983)
- 54) 辻, 関, 森川: 粉体工学会誌, 20, 270 (1983)
- 55) 富田, 船津, 東, 白倉, 山本: 機械学会論文集, B, 50, 2361 (1984)
- 56) 富田, 上滝(洋), 上滝(具), 突田: 機械学会論文集, 44, 92 (1978)
- 57) Tomita, Y., Jotaki, T., Makimoto, S., Fukushima, K.: Powder Tech., 32, 1 (1982)
- 58) 森山: 化学工学, 47, 518 (1983)
- 59) 小林, 宮原: 計測自動制御学会論文集, 20, 529 (1984)
- 60) 狩野, 竹内, 杉山, 山崎: 化学工学論文集, 6, 274 (1980)
- 61) 辻, 森川, 白神, 藤原, 近井: 機械学会論文集, B, 49, 1020 (1983)
- 62) 綱川, 中井, 青木: 粉体工学会誌, 16, 249 (1979)
- 63) 森川, 辻, 本田, 野口: 機械学会論文集, 46, 1273 (1980)
- 64) 森川, 辻, 本田, 野口: 機械学会論文集, B, 47, 132 (1981)
- 65) Tomita, Y., Jotaki, T., Hayashi, H.: Int. J. Multiphase Flow, 7, 151 (1981)
- 66) 森川, 辻, 本田, 山崎, 水野: 機械学会論文集, B, 45, 1642 (1979)

(108 頁へつづく)

気・固系流動層の流動特性と粉体物性

山崎 量平*
Ryohei Yamazaki

1. はじめに

流動層は1940年代に入ってから流動接触分解などに用いられるようになって急速にその技術が確立されるに到った。流動接触分解を含め、いわゆる固体触媒反応においては層内の気泡の大きさが反応成績に大きく関与するので、気泡径をコントロールすることが重要であり、このため用いる触媒粒子の粒度調整を行って気泡径のコントロールが行われてきた。また最近では、石炭の流動燃焼、ガス化及び固体廃棄物の燃焼などにみられるように比較的粗い粒子を流動化させる技術が発展しつつあるが、この場合には気泡そのものよりは層内での粒子の混合・偏析、層外への粒子の飛び出し、ガス分散板近傍の粒子の挙動など固体側の流動特性が重要となる。この場合も、使用する粒子の粒径や粒度分布が粒子の流動特性に関与することは勿論だが、石炭や灰の溶融、固結など粒子の付着性が装置運転上のトラブルを引き起こすことがあるので粒子の付着性も看過できない。

本稿では膨大な数にのぼる流動層研究のうち、流動層の流動特性と粉体物性との関係に言及している研究を紹介することによって、この方面の研究の現状を分析することにする。

2. Geldart map

流動層内気泡径を粒子の粒度調整によってある程度コントロールできて粒子の付着性、摩擦特性を含めた粒子物性がどのように層の流動特性に関与するかは現在のところほとんど不明といってよいと思われるが、層の流動状態が粒子によって4つに区分されるという先駆的な

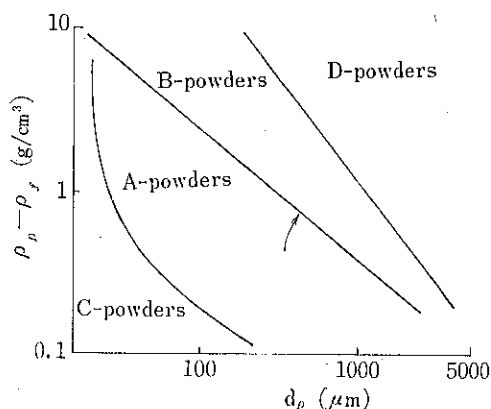


Fig. 1 Geldart map¹⁾

提案が Geldart によってなされた¹⁾。(現在、流動層研究にたずさわる研究者の間で Geldart map としてよく引用される)この map を Fig. 1 に示す。グループ A, B, C, D の粉体と流動特性との関係は Table 1 のようになる。A 粒子と B 粒子との間の境界線は A 粒子では気泡生成ガス速度、 u_{mb} が流動化開始速度、 u_{mf} より大きいということから次のように求められている。

$$(\rho_p - \rho_f)d_p \leq 225 \quad (1)$$

ただし、上式は常温で空気を用いた場合に成立する。ここで、 ρ_p, ρ_f : それぞれ粒子、ガスの密度 (g/cm^3)

$$d_p: \text{粒径 } (\mu\text{m})$$

B 粒子と D 粒子との境界線はそれを決定する根拠がやや乏しいが次式で表わされている。

$$(\rho_p - \rho_f)d_p^2 \geq 10^6 \quad (2)$$

また、A 粒子と C 粒子との境界は従来の実験データに基いて全く経験的に引かれたものである。

Gedart はさらにガスの粘度、密度の影響についても調べ、 u_{mb} が次式で表わされるとした²⁾。

* 名古屋大学工学部化学工学科
(〒464 名古屋市千種区不老町)
Tel. (052) 781-5111

Table 1 Geldart による粉体の分類¹⁾

グループ	代 表 例	特 性
A	触 媒 粒 子 ($\rho_s < 1.4 \text{ g/cm}^3$)	気泡を生成するガス速度以下でも層が均一に膨張する。(層膨張が大) 気泡の分裂と合体の頻度が大. 小気泡(4 cm 以下) の上昇速度は 30~40 cm/s で気泡径によらない. 気泡がほとんど存在しない場合でも層内での粉体の循環が生じる. 最大気泡径が存在する.
B	砂 などの 粒 子 $40 \mu\text{m} < d_p < 500 \mu\text{m}$, $1.4 \text{ g/cm}^3 < \rho_s < 4 \text{ g/cm}^3$	流動化開始速度と気泡生成ガス速度がほぼ一致する ($u_{mf} \approx u_{mb}$). 気泡が無いと粉体の循環なし. 気泡の大きさは層高, 過剰ガス速度, $u - u_{mf}$ と共に直線的に増大する. 気泡の合体が支配的で分裂はあまりない. ガス速度が充分大きいとスラッキングになる.
C	付 着 性 粉 体	通常の流動化が困難. 小さい径の流動層内では粉体はプラグ状で上昇. また, チャンネリングが容易に起こる.
D	粗 粒 子	ほとんどの気泡は濃厚相ガス速度よりも小さい速度で上昇する. 気泡の大きさはグループ B の粒子の場合と同様に層高と過剰ガス速度の関数. 噴流層の形成が容易.

$$\frac{u_{mb}}{d_p \rho_f^{0.06}} \propto \left(\frac{1}{\mu}\right)^{0.347} \quad (3)$$

ここで, μ : ガスの粘度

(3)式で示されるようにガス粘度の影響が大であり, μ が大きくなると, Fig. 1 で示された A・B間の境界は右へ移動することが示されている. また, ガス粘度の影響については, Martin³⁾ が粒径, 密度差に加えて粘性を考慮し, 三次元の map を提案している.

さらに, Mutsers & Rietema^{4),5)} は層内ガス側, 粒子側それぞれに連続の式及び粒子付着力を考慮に入れた運動量の式をたて, 摂動法により A 粒子と B 粒子との境界が次式で与えられるとした.

$$N_F^* = \frac{\rho_p^3 d_p^4 g^2}{\mu^2 C} \leq \left\{ \frac{150(1-\varepsilon_o)}{\varepsilon_o^2(3-2\varepsilon_o)} \right\}^2 \quad (4)$$

ここで, 上式を満たすとき粒子はグループ A に分類され, C は付着力 (G/cm^2) を, ε_o は固定層の空隙率を表わす. 上式で,

$$N_F^* = \frac{\rho_p^3 d_p^3 g \cdot \rho_p d_p g}{\mu^2 C} \\ = A_r / N_{coh}$$

と表わすと A 粒子と B 粒子との境界は

$$A_r = \left\{ \frac{150(1-\varepsilon_o)}{\varepsilon_o^2(3-2\varepsilon_o)} \right\}^2 \cdot N_{coh} \quad (5)$$

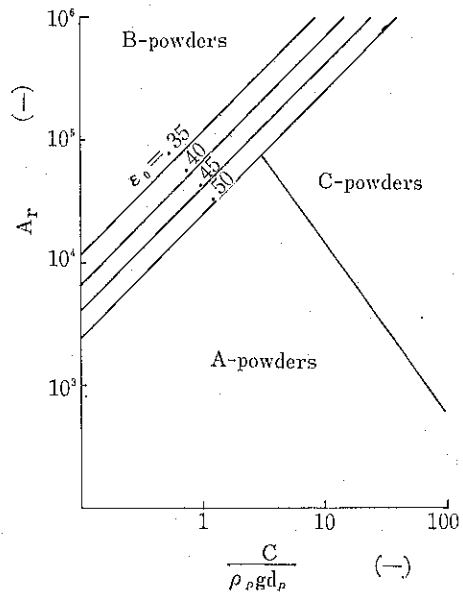


Fig. 2 Rietema による粉体の分類⁵⁾

と表わされる. これを図示したのが Fig. 2 である. また, 図中の右さがりの線は根拠に乏しいが A 粒子と C 粒子の境界を与えている. また, 付着力を考慮した粉体の分類としては外に Molerus の解析もある⁶⁾

3. 流動化開始速度及び流動化開始時の層空隙率

Geldart map や他の map で粒子の大きな分類はできるが、同一グループ内の粒子でも各境界に近い粒子と遠い粒子とは層の挙動は異なる。まず、流動層の基本的な量である流動化開始速度及び空隙率について触れてみる。

今までに流動化開始速度推算式として多数の式が提出されているが、その中で Ergun の充填層圧損式を流動化開始に適用した次式がよく用いられる。

$$\frac{1.75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} Re^2 + \frac{150(1-\epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} R_e = A_r \quad (6)$$

ここで、 $Re = d_p u_{mf} \rho_f / \mu$, $A_r = d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g / \mu^2$

d_p : 粒径, ϕ_s : 粒子の形状係数, ρ_p, ρ_f : それぞれ粒子, 流体の密度, μ : 粘度, u_{mf} : 流動化開始速度;

ϵ_{mf} : 流動化開始時の層空隙率

特に、 $Re < 20$ では u_{mf} は次のようになる。

$$u_{mf} = \frac{(\phi_s d_p)^2 \rho_p - \rho_f}{150 \mu} \frac{\epsilon_{mf}^3}{1 - \epsilon_{mf}} g \quad (7)$$

(6), (7)式は推算精度は極めて良いが粒子の形状係数, ϕ_s や ϵ_{mf} は実測できないことが多いので、上式は実用上、問題がある。そこで、 ϕ_s や ϵ_{mf} を式中に含まない式がいくつか提出されているわけであるが、それらの中、次の Wen & Yu の式⁷⁾がよく用いられる。

$$u_{mf} = [33.7^2 + 0.0408 d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g / \mu^2]^{1/2} - 33.7 \quad (8)$$

上式は (6) 式で粒子に無関係に $1/(\phi_s \epsilon_{mf}^3) = 14$, $(1 - \epsilon_{mf})/(\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3) = 11$ が成立すると仮定してえられる。Wen & Yu の式は推算精度が±35%前後といわれているが、比較的小粒子の場合、実測値との差が100%ぐらいになることもある。

その第1の原因として、 ϵ_{mf} が粒径によって変化することが挙げられる。Chen ら⁸⁾は既往の ϵ_{mf} の実測値の粒径変化を表わす図として Fig. 3 を与えている。このように ϵ_{mf} が粒子の種類によって変化する以外に粒径にも強く依存していることがわかる。

また、 ϵ_{mf} は温度によっても変化する。これについては Botterill ら⁹⁾や筆者ら¹⁰⁾の研究があるが、特に筆者らは硅砂、アルミナ、ガラスビーズ、鉄粉など種々の粒子を用い 900°C までの温度範囲における実験より次の ϵ_{mf} に関する実験式を提出した。

$$\phi_T(\epsilon_{mf}) = \frac{(\epsilon_{mf,T}^3)}{(1 - \epsilon_{mf,T})} \bigg/ \frac{(\epsilon_{mf,o}^3)}{(1 - \epsilon_{mf,o})} = 0.140(T/T_o) + 0.844 \quad (9)$$

$$(d_p > 150 \mu\text{m})$$

$$\phi_T(\epsilon_{mf}) = 0.310(T/T_o) + 0.669 \quad (10)$$

$$(d_p < 150 \mu\text{m})$$

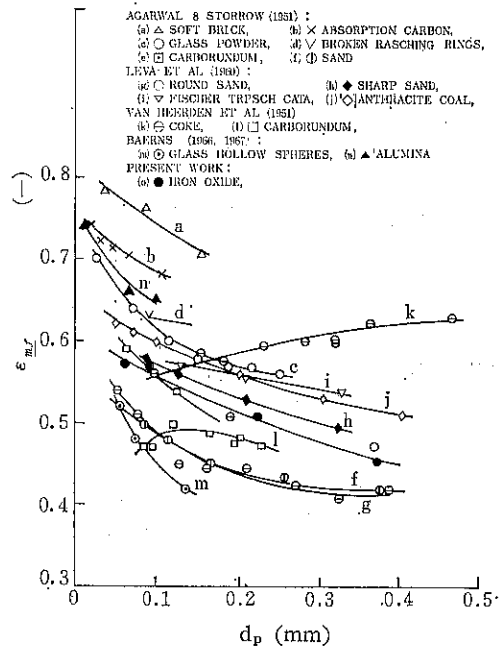


Fig. 3 ϵ_{mf} と d_p との関係⁸⁾

ここで、 $\epsilon_{mf,o}$, $\epsilon_{mf,T}$ はそれぞれ常温時, T_o (K), 温度 T (K) のときの空隙率を表わす。

さらに筆者ら¹¹⁾は比較的、粒径が大きい場合には温度に無関係に $\phi_T(\epsilon_{mf}) = 1$ で、 u_{mf} が次式で与えられることを示した。

$$32 \left(\frac{d_p \rho_f u_{mf}}{\mu} \right)^2 + 1200 \left(\frac{d_p \rho_f u_{mf}}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_f (\rho_p - \rho_f) g}{\mu^2} \quad (11)$$

また、筆者らはこの ϵ_{mf} の温度依存性及び前述の粒径依存性、さらには粒子付着力の温度依存性についての実験結果¹²⁾に基いて、粒子の付着力を考慮した流動化開始現象の解析を行っている¹³⁾。

粒子の付着性が著しく大きくチャンネリングを容易に起こす微粉、いわゆる Geldart map における C 粒子を用いた研究としては古くは Baerns の研究¹⁴⁾があるが、最近常温では Geldart map の B 又は D 粒子に属する粗い粒子を粒子の一部溶融・焼結などが生じる温度域で流動化させ、流動化が停止するガス速度を求める研究がみられる^{15,16)}。

Fig. 4 はその結果の一例で、1650°F 以上の温度で流動化停止ガス速度が流動化開始速度を大きくうまわっていることを示している。尚、Gluckman¹⁵⁾はこの両速度が等しくなる 1650°F が使用している銅粒子の初期焼結温度にほぼ一致すると述べている。

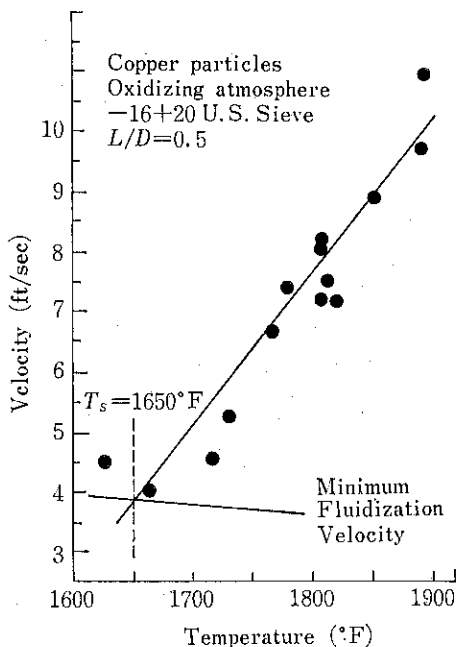


Fig. 4 流動化停止ガス速度に及ぼす温度の影響⁽¹⁵⁾

4. 気泡特性

気・固系流動層の場合には、流動化開始速度（A粒子の場合には気泡生成ガス速度）以上のガス速度で気泡が整流板上で生成し、上昇してゆくため、層は濃厚相と気泡相とからなるいわゆるバブリング状態になる。2項で述べたように、気泡径、気泡上昇速度など気泡特性は粒子のグループによって明瞭なちがいがある。だが、流動化開始現象と同様に同一グループ内の粒子でもこの特性は粒子によって異なる。この差異が粒子のいかなる物性に起因しているかは必ずしも明らかになっているとは言えないが、これら気泡特性について、最近の研究を中心に紹介する。

4.1 気泡径及び気泡頻度

整流板上で生成した気泡は上昇してゆく過程で他の気泡と合体することによって気泡頻度は減少し、気泡径は増大してゆく。ただ無制限に気泡径が大きくなるわけではなく、用いる粒子によってその最大径が決まる。

Davidson & Harrison⁽¹⁷⁾ は次式で示される単一気泡の上昇速度、

$$U_b = 0.711 \sqrt{g D_b} \quad (12)$$

が粒子の終末速度、 u_t に等しくなるとき、気泡の成長が止まるとして、いわゆる次の最大安定気泡径、 D_{bms} について次式を提出した。

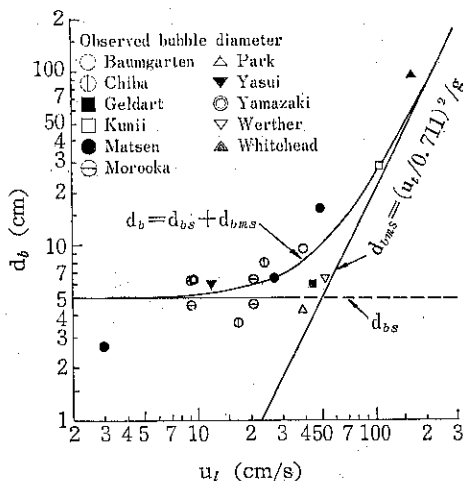


Fig. 5 最大気泡径と粒子終末速度との関係⁽¹⁹⁾

$$D_{bms} = (u_t / 0.711)^2 / g \quad (13)$$

しかし、実際に測定される最大気泡径はこの式による値よりかなり大きい。宮内らは最大気泡径についての堀尾らの結果⁽¹⁶⁾に他の研究者によるデータを加えて、Fig. 5の結果を与えている⁽¹⁹⁾。さらに宮内ら⁽¹⁹⁾はこの気泡径が濃厚相の乱流粘度に基く気泡の合体と分裂の動的平衡値、 d_{bs} と Davidson らの d_{bms} との和で与えられるとした。

$$d_b = d_{bs} + (u_t / 0.711)^2 / g \quad (14)$$

Fig. 5の曲線は上式を示している。

また、堀尾ら⁽²¹⁾は桐原らの二次元流動層内の気泡の分裂頻度についての結果⁽²⁰⁾とB粒子について得られている気泡径推算式⁽²²⁾とを用いて、気泡の合体、分裂両方を考慮した新しい気泡径推算式を提出している。尚、その基礎となった気泡の分裂頻度、 f_s として次式を与えている。

$$f_s = \alpha u_{mf}^{-1.2} \quad (15)$$

ただし、(15)式は3~10cm/sの範囲の u_{mf} をもつ粒子に対して得られている式で、より小さい粒子又はより大きい粒子では気泡分裂頻度が不明である。いずれにしても気泡の分裂現象を支配しているメカニズムについては不明であり、今後の研究によるところが多い。

4.2 気泡の上昇速度

単一気泡の上昇速度については、使用する粒子に無関係に前出の(12)式が成立するとされている。さらに、連続気泡（バブリング状態）の場合には(12)式右辺に過剰ガス速度を加えた次式がよく用いられる。

$$U_a = u - u_{mf} + 0.711 \sqrt{g D_b} \quad (16)$$

ここで、 D_b ；気泡の球相当径

ただし、(16)式が常に成立しているとは言えない。Rowe ら²³⁾は種々の粒子について単一気泡の上昇速度と気泡径との関係をX線撮影による方法で求め、次式で示される速度係数、 K が粒子によって異なることを示した。

$$K = U_b / \sqrt{g D_b / 2} \quad (17)$$

ただし、ここで用いている D_b は気泡の横径である。その結果を Fig. 6 に示す。差異はそれほど大きくないがそれでも粒子の種類のみでなく粒径によっても変化している。さらに、彼らは Fig. 7 に示されるように K と流動化開始時の空隙率、 ϵ_{mf} との関連も調べており興味深い。従って、(16)式中の係数、0.711 は種々の粒子について平均した値とみるべきであろう。また、(16)式は Geldart map の A 粒子では成立しないことは既に述べたが、最近の筒井らの研究²⁴⁾によると (16)式中の $u-u_{mf}$ に 2.7 を乗じると実測に合うとしている。さらに彼らはこれが A 粒子流動層特有の粒子の層内循環流に起因しているとしている。

4.3 気泡の形状

気泡の形状はやはり Rowe ら²³⁾によって粒子によって異なることが明らかにされている。Fig. 8 はその結果

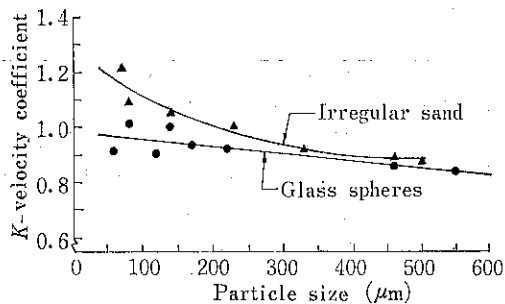


Fig. 6 K と粒径との関係²³⁾

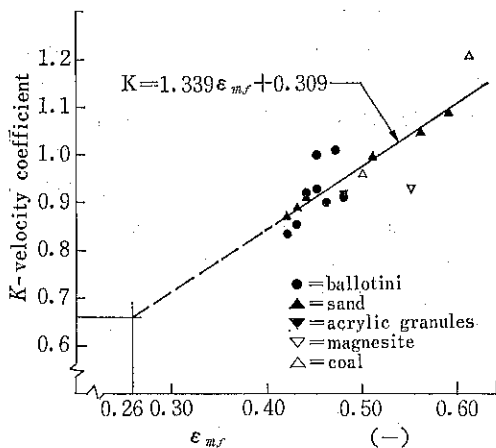


Fig. 7 K と ϵ_{mf} との関係²³⁾

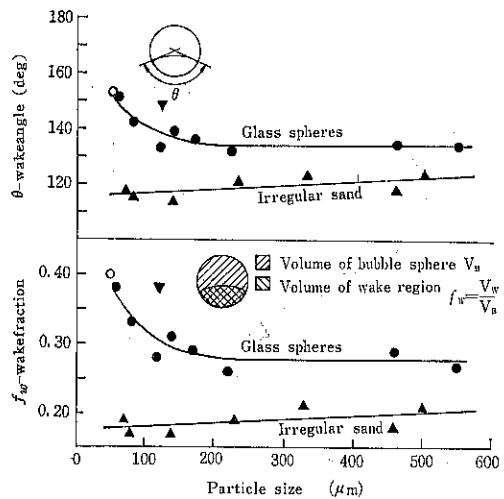


Fig. 8 気泡の形状²³⁾

を示したもので、比較的粗い粒子ではあまり形状に変化はないが、粒径が小さくなるほどウエイクを見こむ角及びウエイク分率が大きくなり、液体中を上昇する気泡の形状に近づいてゆくことが示されている。他の研究としては、Weiland の粘性を考慮した気泡形状に関する理論的研究がある²⁵⁾。

4.4 気泡挙動に及ぼす温度、圧力の影響

気泡の大きさ、頻度、上昇速度など気泡の諸量と温度、圧力との関係を調べることは実用上重要であるのみならず、粒径、粒子密度を一定にして粒子の付着性など粒子の表面特性のみを変化させるので流動化特性と粉体物性との関連を知る上で極めて重要であるといえる。吉田²⁶⁾は MS 触媒粒子 ($d_p = 151 \mu m$) を用いて、二次元層内の気泡径と温度との関係を Fig. 9 のように求めている。同一の u/u_{mf} では温度が高くなるほど気泡径

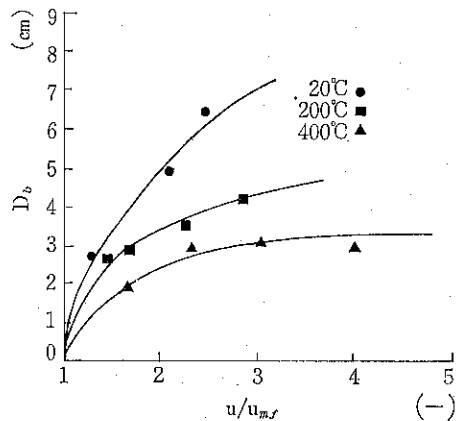


Fig. 9 気泡径に及ぼす温度の影響²⁶⁾

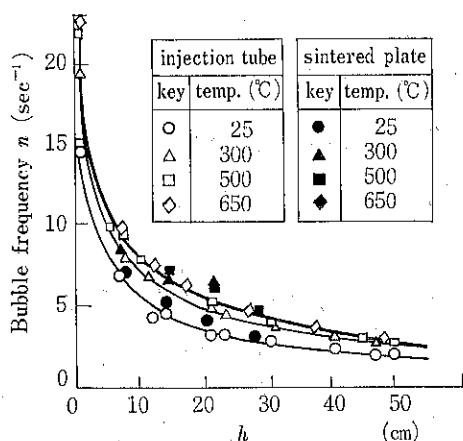


Fig. 10 気泡頻度に及ぼす温度の影響²⁷⁾

は小さくなっている。

また、大竹ら²⁷⁾はシリカアルミナ粒子 ($d_p=96\ \mu\text{m}$) を用いて気泡頻度に及ぼす温度の影響を調べた。その結果を Fig. 10 に示す。ここで横軸、 h は整流板からの高さを示している。同一の h では温度が高いほど気泡頻度が大きくなっている。これらの結果より、温度の上昇に伴い気泡頻度は増大し気泡径は減少することになる。これは高温になるに従って、ガス粘度の増大により(7)式で示される流動化開始速度が減少し、(15)式で示される気泡分裂頻度が増大するためという説明も可能であるが詳細は明らかでない。

圧力の影響については、Rowe ら²⁸⁾が気泡体積、気泡頻度などを80気圧までの圧力範囲で調べているが、圧力に対するこれらの値の変化が複雑なため圧力の気泡挙動への作用機構はまだ明らかでない。

5. スラッグ特性

Geldart map におけるB粒子、D粒子を比較的小塔径のカラム内で流動化させるとスラッキング状態に容易になるが、この状態の場合、層壁の影響がバブリング状態に比べて著しく大きいので壁面上での摩擦特性も関与するなど現象はより複雑となる。しかし、反面、バブリング状態よりも粉体の物性の影響が顕著にあらわれるため流動化特性と粉体物性との関係を調べる上で重要な流動状態といえる。

5.1 スラッキング・タイプ

筆者ら²⁹⁾はスラッキングのタイプとして Fig. 11 のように4つのタイプが存在することを示した。タイプAの特性については Stewart ら³⁰⁾が詳細な研究を行っており、比較的、小粒子で観察される。また、タイプCについては筆者ら^{31,32)}によってそのスラッグ特性が調べられ

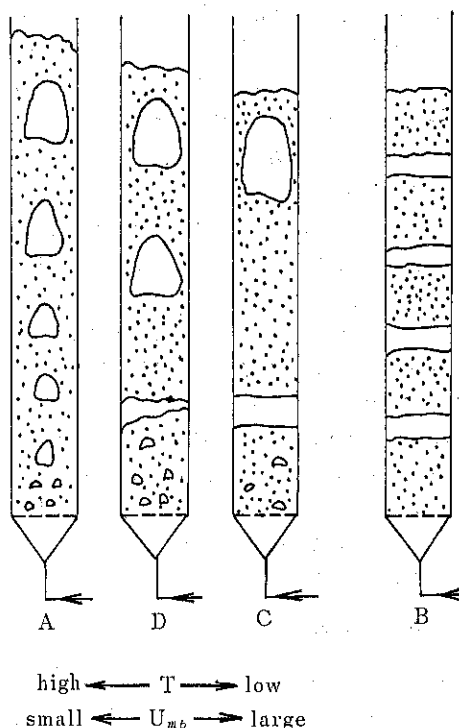


Fig. 11 スラッキングのタイプ²⁹⁾

ており、常温の場合、 $\rho_s d_p^2 > 6 \times 10^{-4}\ \text{g/cm}$ でタイプCが観察されることを明らかにしている。タイプDはA、Cの中間の状態で流動化開始速度（又は気泡発生速度）が小さくなるとC→D→Aと移行し、温度の上昇と共に、C→D→Aを移行することも明らかにしている³³⁾。尚、タイプBについては Stewart ら³⁰⁾がその存在を指摘しているのみであり研究されてない。

5.2 スラッグ頻度

スラッグ頻度やスラッグ長さや粉体物性との関係を扱った研究はあまりないが、筆者ら^{29,33)}は二次元層及び三次元層内のこれらの値を種々の粒子について 860°C までの温度範囲で測定した。Fig. 12 はその一例でスラッグ頻度、 f_s と常温における気泡発生流速及び温度との相関を示している。温度による変化については比較的大粒子の場合に温度の上昇と共にスラッグ頻度は増大しており 4.4 における気泡の場合と類似している。ただ、スラッグの分裂現象は観察されていないので、スラッグ頻度の粒径変化、温度変化はスラッキング・タイプの変化に起因しているといえる。

5.3 スラッキング開始条件

Stewart ら³⁰⁾はスラッキング・タイプがAの場合に、

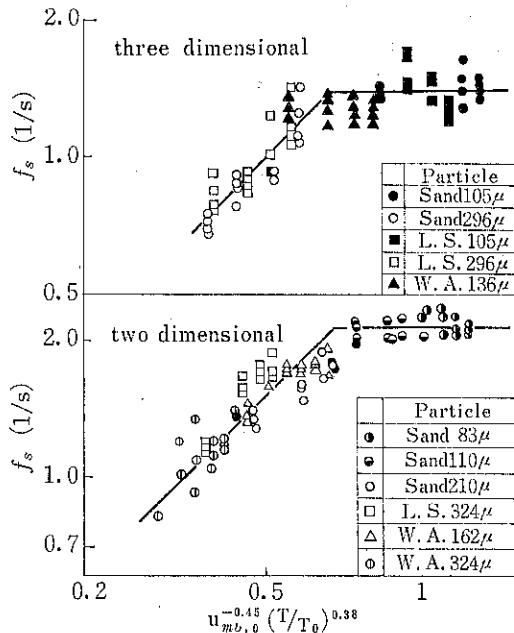


Fig. 12 スラッグ頻度と気泡発生流速、温度との相関^{29,33)}

スラッキングを開始するガス流速、 u_c が粒子の物性に無関係に次式で与えられるとした。

$$u_c - u_{mf} = 0.07 \sqrt{gD} \quad (18)$$

ここで、 D ：塔径

これに対し、Broadhurst ら³⁴⁾は多種類の粒子及びガスを用いて、 u_c について次式を与えている。

$$\frac{\rho_p u_c}{g(\rho_p - \rho_f) D_p} = 51.4 \left(\frac{D}{H_s} \right)^{1.79} \left(\frac{\rho_f}{\rho_p} \right)^{0.09} + 0.00416 \left[\frac{\rho_p (\rho_p - \rho_f) g D_p^3}{\mu^2} \right]^{0.41} \quad (19)$$

ここで、 H_s ：粒子を振動充填した場合の層高

また、Keairns らは(18)式と矢木らの開始条件式³⁶⁾とを結合させて次式で示されるスラッキングを開始する層高 L_c を与えている³⁵⁾。

$$L_c/D = 1.9/(d_p \rho_p)^{0.3} + 0.0025/(u - u_{mf})^2 \quad (20)$$

以上のように、スラッキング状態も粒径、密度又は、それらを含む流動化開始速度と密接に関係しているが、現在のところ、ほとんどが実験式であり、これらの因子がスラッグ特性に及ぼす機構はわかっていない。

6. 流動層の流動化特性と層粘度

流動層の流動状態は気液混相系（たとえば気泡塔）の流動と類似点が多いため、流動層のみかけ粘度を用いて流動特性を評価しようとする研究は古くからあり、種々の方法によりみかけ粘度が測定されている。そのほとん

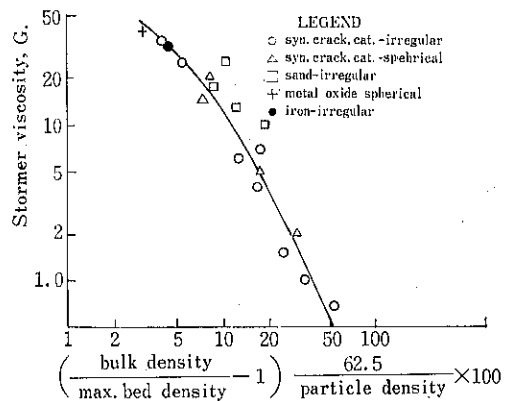


Fig. 13 ストーマ粘度と粒子密度、嵩密度との関係³⁸⁾

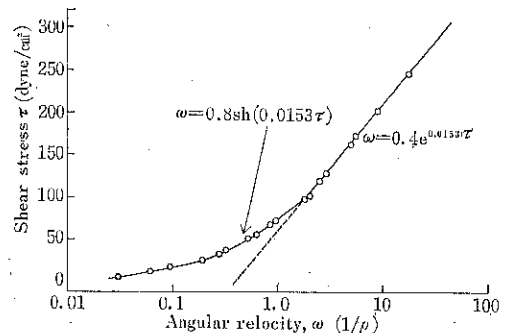


Fig. 14 ガラスビーズの流動曲線⁴²⁾

どはストーマ粘度計、同軸円筒粘度計など液体の粘度測定とほぼ同じ原理の方法を用いている³⁷⁻⁴⁰⁾。

Matheson³⁸⁾はストーマ粘度計を用いてストーマ粘度の値がガス速度に無関係になるときの値を求めて、Fig. 13 で示される粒子密度、層嵩密度との相関をえている。さらに彼はこのストーマ粘度がスラッキングの起こりやすさと強い相関があることを示している。また、Schügerl ら⁴²⁾は同軸回転円筒を用いて粘度測定を行っている。Fig. 14 は粒径 110μm のガラスビーズを用いた場合の流動曲線で、彼らはこの曲線が Eyring model で表現されるとしている。

また彼らはニュートン流体の粘度に相当するみかけ粘度と粒径、ガス速度との相関式を求めている。また、エアライドに類似したオープンチャンネル内の流動からみかけ粘度を測定している研究もみられる^{43,44)}。

流動層内の気泡の挙動から間接的に粘度を求める試みもなされている^{41,45,46)}。Stewart⁴⁶⁾はみかけ粘度が次式で示されるように気泡の上昇速度と気泡の大きさ(高さ)の関係より求まるとした。

$$6\mu_p U_b/a = \rho_b g h_b/2 - \rho_b U_b^2/2 \quad (21)$$

Table 2 Grace⁴¹⁾ および Stewart⁴⁶⁾ による粘度の値

粒 子	平均粒径 (μm)	形 状	粒径分布	Grace の結 果 (poise)	Stewart の 結果 (poise)	Schugerl の実 測値 (poise)
ガラスビーズ	550	球 形	せ ま い	9½	26	—
	460			—	18	12
	220			8½	8	9
	170			7½	8½	8
	140			8	2½	8
	120			8½	7	8
	82			9	1½	6
	60			7	7½	4
砂	500	角ばった形状	ほぼ均一	12	24	—
	460			10	18	14
	330			13	14	12
	230			7	6½	10
	140			9	4½	8
	82			8½	3½	7
	72			8	—	5
合 成 触 媒	52	まるみのある 不規則形状	広 い	4	4	—
マグネサイト	240	角ばった形状	広 い	9	15	10

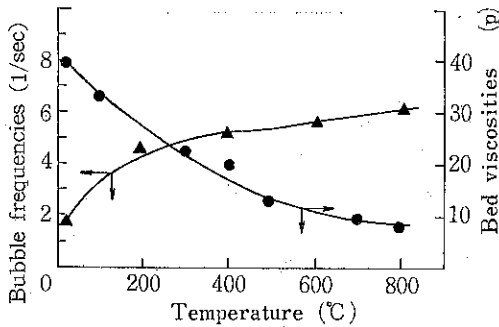


Fig. 15 みかけ粘度に及ぼす温度の影響²⁶⁾

μ_p : みかけ粘度, ρ_b : 濃厚相の密度, h_b : 気泡の高さ, a : 気泡半径, U_b : 気泡の上昇速度
一方, Grace⁴¹⁾ は液体中の気泡の形状とレイノルズ数との実験的関係を求め, 前述の Rowe ら²³⁾ の気泡形状にこの実験的関係を適用して粘度を求めている. 両者とも Table 2 のように彼らの計算結果と直接測定による Schugerl らの結果⁴²⁾ と比較している. これらの値は互いに比較的良好に一致しているが, 気泡の形状がわずかに異っても, 粘度の値が大きく変化する実験的關係を用いている Grace の計算には多少問題があるようである. また, 他の粘度測定法として, 層表面に発生させた波が進行してゆく速度や, その波の波長, 周波数よりみ

かけ粘度を測定している研究もある⁴⁷⁾.

温度のみかけ粘度に及ぼす影響としては吉田²⁶⁾ は Fig. 15 で示される結果を与えている. また, 同図より粘度の減少に伴い気泡頻度が増大することも示されている.

圧力の粘度に及ぼす影響としては, King ら⁴⁸⁾ が落球法を用いて, 20気圧までの圧力範囲で粘度測定を行っている.

流動層みかけ粘度に関する理論的研究としては, ガラス状液体に対してよく用いられる free-volume 理論によって粘度を解析している Hetzler ら⁴⁹⁾, Saxton ら⁵⁰⁾ の研究がある. 以下の粘度の関係式は Saxton ら⁵⁰⁾ によるものである.

ポリビニルアセテート粒子については,

$$\eta = \frac{6.80 \times 10^3 (1 - \epsilon) d_p^3 \eta_0}{(1 + 211 d_p^3 \eta_0) U_o^{3/4}} \quad (22)$$

砂粒子については,

$$\eta = \frac{2.00 \times 10^4 (1 - \epsilon) d_p^3 \eta_0}{(1 + 304 d_p^3 \eta_0) U_o^{3/4}} \quad (23)$$

ここで, d_p : 粒径, ϵ : 層空隙率, U_o : ガス速度

7. その他の流動性の評価法

流動層のみかけ粘度以外に流動層又はエアレートした粒子層の流動性を評価する方法がいくつか提案されてい

る。宮内ら¹⁰⁾は流動層内濃厚相の運動についての循環流理論より乱流動粘度を求め、この粘度より流動性を評価している。また、エアレートした粉体の安息角⁵¹⁾や回転円筒内のエアレートした粉体の動的安息角^{52,53)}を用いる方法も最近、提案されている。さらに、Geldart mapでのA及びC粒子について、層からの粒子の排出速度、層膨張、送風を急に停止したときの層の挙動及び粒子の飛び出し速度などから総合的に粒子の流動性を評価しようとする試みもある⁵⁴⁾。

8. おわりに

本稿では、流動層本体部分の流動特性についてのみ述べ、整流板直上のガス及び粉体の挙動、フリーボード部の粒子の挙動、二塔式流動層に用いられるスタンドパイプ内の流動などについては紙数の都合で割愛した。また、最近、特に関心を集めている乱流流動化、高速流動化など高ガス速度域での流動状態及び物性との関係についても触れなかった。これについては最近の守富らのレビュー⁵⁵⁾を参考にされたい。このように十分なサーベイとはいえないが本稿で紹介した研究より、少し独断じみしてしまうが、流動化開始現象については、ガス密度、粘度のガス側物性と粒子径、粒子密度、粒子形状、粒子の付着性よりなる粒子物性によって充分記述でき、ほぼ解明されたといつてよいと思われる。だが一方、気泡の生成や気泡の合体・分裂などの機構にどのように粉体物性が関与するかについてはまだ不明の点が多い。これらの機構解明には粒子径、粒子密度などの粉体の一次物性をパラメータとした流動化特性に関するデータの蓄積も勿論必要であるが、層空隙率、層みかけ粘度、動的安息角など粉体の高次物性と流動化特性との関係及びこれら高次物性と一次物性との関係についてのより詳細な実験的及び理論的研究も必要であると思われる。

引用文献

- 1) D. Geldart : Powder Technology, 7, 285 (1973).
- 2) A. R. Abrahamsen and D. Geldart : Powder Technology, 26, 35 (1980).
- 3) P. D. Martin : Chem. Eng. Res. Des., 61, 318 (1983).
- 4) S. M. P. Mutters and K. Rietema : Powder Technology, 18, 239 (1977).
- 5) K. Rietema : Inter. Symp. "The Role of Particle Interactions in Powder Mechanics", Eindhoven (1983).
- 6) O. Molerus : Powder Technology, 33, 81 (1982).
- 7) C. Y. Wen and Y. H. Yu : A. I. Ch. E. J., 12, 610 (1966).
- 8) P. Chen and D. C. T. Pei : Can. J. Chem. Eng., 62, 464 (1984).
- 9) J. S. M. Botterill, Y. Teoman and K. R. Yürgeir : Powder Technology, 31, 101 (1982).
- 10) 洪, 山崎, 高橋, 神保 : 化学工学論文集, 6, 557 (1980).
- 11) 鄭, 山崎, 神保 : 化学工学論文集, 11, 115 (1985).
- 12) 神保, 山崎, 洪 : 旭硝子工業技術奨励会研究報告, 38, 123 (1981).
- 13) R. Yamazaki, N. Ueda and G. Jimbo : J. Chem. Eng. Japan, 投稿中
- 14) Baerns, M. : Ind. Eng. Chem. Fundam., 5, 508 (1966).
- 15) M. J. Gluckman, J. Yerushalmi and A. M. Squires : Fluidization Technology Edited by D. L. Keairns, Hemisphere Pub. Corp., Vol. 2, 395 (1976).
- 16) P. Basu : Can. J. Chem. Eng., 60, 791 (1982).
- 17) J. F. Davidson and D. Harrison : "Fluidized Particles", Cambridge Univ. Press (1963).
- 18) M. Horio and C. Y. Wen : AIChE Symp. Ser., No. 161, 73, 9 (1977).
- 19) T. Miyauchi, S. Furusaki, S. Morooka and Y. Ikeda : "Advances in Chemical Engineering 11", Edited by T. B. Drew et al., Academic Press (1981).
- 20) R. Toei, R. Matsuno, M. Oichi and K. Yamamoto : J. Chem. Eng. Japan, 7, 447 (1974).
- 21) 堀尾, 野中 : 化学工学協会第49年会, 333 (1984).
- 22) S. Mori and C. Y. Wen : AIChE J., 21, 109 (1975).
- 23) P. N. Rowe and B. A. Partridge : Trans. Instn. Chem. Engrs, 43, T 157 (1965).
- 24) 筒井, 宮内 : 化学工学論文集, 5, 40 (1979).
- 25) R. H. Weiland : Ind. Eng. Chem. Fundam., 15, 189 (1976).
- 26) 吉田 : 燃料協会誌, 55, 22 (1976).
- 27) T. Otake, S. Tone, M. Kawashima and T. Shibata : J. Chem. Eng. Japan, 8, 388 (1975).
- 28) P. N. Rowe, P. U. Foscolo, A. C. Hoffmann and J. G. Yates : "Fluidization" Edited by D. Kunii and R. Toei, 53 (1984).
- 29) G. Jimbo, R. Yamazaki, G. H. Hong and Y. Oka : "Fluidization" Edited by M. Kwauk

- and D. Kunii, 135 (1982).
- 30) P. S. B. Stewart and J. F. Davidson : Powder Technology, **1**, 61 (1967).
 - 31) 山崎, 沖田, 神保 : 化学工学論文集, **1**, 143 (1975).
 - 32) R. Yamazaki, G. Jimbo and M. Shimizu : Proc. of 2nd PACHEC, 1413 (1977).
 - 33) 洪, 山崎, 神保 : 化学工学論文集, **7**, 109 (1981).
 - 34) T. E. Broadhurst and H. A. Becker : AIChE J., **21**, 238 (1975).
 - 35) 鞭, 森, 堀尾 : 流動層の反応工学, 培風館 (1984).
 - 36) 矢木, 鞭, 青地 : 化学機械, **16**, 307 (1952).
 - 37) J. Furukawa and T. Ohmae : Ind. Eng. Chem., **50**, 821 (1958).
 - 38) G. L. Matheson, W. A. Herbst and P. H. Holt : Ind. Eng. Chem., **41**, 1099 (1949).
 - 39) H. Kramers : Chem. Eng. Sci., **1**, 35 (1951).
 - 40) T. Hagyard and A. M. Sacerdote : I & EC Fundam., **5**, 500 (1966).
 - 41) J. R. Grace : Can. J. Chem. Eng., **48**, 30 (1970).
 - 42) K. Schügerl, M. Merz and F. Fetting : Chem. Eng. Sci., **15**, 1 (1961).
 - 43) W. Siemes and L. Hellmar : Chem. Eng. Sci., **17**, 555 (1962).
 - 44) J. S. M. Botterill and D. J. Bessant : Powder Technology, **14**, 131 (1976).
 - 45) J. D. Murray : Rheol. Acta, **6**, 27 (1967).
 - 46) P. S. B. Stewart : Trans. Instn. Chem. Engrs, **46**, T 60, (1968).
 - 47) R. G. Finnerty et al. : Ind. Eng. Chem. Fundam., **8**, 271 (1969).
 - 48) D. F. King, F. R. G. Mitchell and D. Harrison : Powder Technology, **28**, 55 (1981).
 - 49) R. Hetzler and M. C. Williams : I & EC Fundam., **8**, 668 (1969).
 - 50) J. A. Saxton, J. B. Fitton and T. Vermeulen : AIChE J., **16**, 120 (1970).
 - 51) J. Verloop and P. M. Heertjes : Powder Technology, **7**, 161 (1973).
 - 52) M. R. Judd and P. D. Dixon : Trans. I. Chem. E., **57**, 67 (1979).
 - 53) R. Jackson and M. R. Judd : Trans. I. Chem. E., **59**, 119 (1981).
 - 54) D. Geldart, N. Harnby and A. C. Wang : Powder Technology, **37**, 25 (1984).
 - 55) 守富, 千葉 : 化学工学, **49**, 325 (1985).

(98頁のつづき)

- 67) 青木, 神谷, 村田, 本間 : 化学工学論文集, **5**, 623 (1979)
- 68) 青木, 村田, 本間, 和田 : 化学工学論文集, **6**, 628 (1980)
- 69) 森川, 辻, 蝶野, 杉本 : 機械学会論文集, **B**, **46**, 1100 (1980)
- 70) 辻, 森川, 蝶野, 長谷川 : 機械学会論文集, **B**, **49**, 1450 (1983)
- 71) 森川, 辻, 蝶野, 吉田 : 機械学会論文集, **B**, **50**, 390 (1984)
- 72) 辻, 森川, 蝶野, 井前, 吉川 : 機械学会論文集, **B**, **50**, 2378 (1984)
- 73) 蝶野, 辻, 井前, 吉川, 森川 : 機械学会論文集, **B**, **50**, 2386 (1984).
- 74) 安部, 富田, 上滝 : 機械学会論文集, **B**, **46**, 1281 (1980)
- 75) 安部, 富田, 上滝 : 機械学会論文集, **B**, **47**, 59 (1981)
- 76) 大庭, 中嶋, 近藤 : 日本鉱業会誌, **100**, 501 (1984)
- 77) 久光, 小杉, 武石 : 日本鉱業会誌, **98**, 1135 (1982)
- 78) 小杉 : 日本鉱業会誌, **99**, 377 (1983)
- 79) 柳沢, 小杉 : 日本鉱業会誌, **100**, 405 (1984)

貯槽の overpressure について

森山 龍一*
Ryuichi Moriyama

1. はじめに

工業プロセスの中で粉粒体が多く取り扱われるようになり、その入れ物としてのサイロやビンの役割が重要になっている。特に、有機物の粉粒体を使う場合は先に入れたものが先に出る（mass flow ビンの設計）ことが必要不可欠な条件である。しかし、粉粒体層の流れは必ずしも先に入れた物が先に出るとは限らない。すなわち、funnel flow になることがある。このような2つの代表的な流れは粉粒体を処理する目的によって計画的に使い分けてよいが、その貯槽の壁圧に対する強度の設計の内容は大きく変わってくる。粉粒体層の流れの違いはサイロやビンの壁圧の大きさと密接に関連しており、最大壁圧の予測を適切に評価することが貯槽の設計として重要なことになる。ここでは主に重力で流れる粉粒体の挙動について、その中でも最大壁圧の生じるビンの遷移点（又は流れの遷移点）付近に発生する overpressure について述べる。貯槽からの排出についてはホッパー部に補機を用いて強制排出する問題も含めて考える必要があるが^{1)~5)}、この内容については省略する。

2. 過去のレビューと最近のようす

サイロやビンの研究は1800年代の後半における Janssen らの仕事にさかのぼる。当時は主に供給したときの貯槽の構造的な強度の設計として取り組まれているが、その後1900年代の半頃に粉粒体層の流動と壁圧の関係が主に Jenike らによって指摘されてから、排出時の最大壁圧を基にしたサイロ設計の基礎ができていく。1966年に Walker は排出時の壁圧に対して壁面付近の応力状態を実情にあった形で表現する方法を提案し、そのすぐ後で、この考えをホッパー部に適応した青木ら⁶⁾の式も高く評価されている。1973年に Walters は両者

を含めた形で拡張した理論をまとめているが、ホッパー部に対しては Walters の式より 青木の式が先に出ている点に興味が引かれる。この頃の様子は文献紹介やレビューの形で日本でもかなり詳しく報告されている^{7), 8)}。外国では Arnold らが執筆している Bulk Solids⁹⁾ が Jenike, Walters らの論文を詳しく解説している。その中には、貯槽に関する多くの業績も引用し、具体的な計算例を示している。

さらに、最近では、日本での研究の現状をレビューしたもの¹⁰⁾や粉粒体貯槽の安全を解説したもの¹¹⁾及び具体的な貯槽の設計に関する著書^{12), 13)} 等がある。以上の文献紹介やレビューは近年の貯槽問題を完璧にまとめてあり大いに参考になる。また、この数年間に貯槽に関係した国際会議もかなり多く開かれている。さらに、貯槽の専門誌¹⁴⁾がイギリスで新しく刊行されるなど、サイロやビンに関する国際的な情報も得やすくなっている。しかし、逆に、このような貯槽の問題がなお多く取り上げられているのはサイロの設計に関する問題が解決していないことを示しており、サイロの崩壊や steel サイロの座屈などが報告されている^{15)~18)}。

3. overpressure の予測

サイロやビンへ粉粒体を投入して排出する際、排出前の供給時の壁圧より排出中の壁圧が高いことはよく知られている。排出中の壁圧がビン全体で高くなるのではなく、シリンダー部とホッパー部の遷移点あるいは流れの遷移点の限られた所で最大壁圧を示し、現在でも供給時の圧力の何倍になるかが貯槽設計上重要な値として議論されている。この値は実験的にもかなり多く調べられているが^{19)~28)}、その値は2倍から20倍近くまであり、その隔たりがあまりにも大きく、どれを信じて良いかわかり難い。しかし、このような違いは現実的にありうるもので実験条件によってかなり変化することを意味している。筆者らの実験でもいろいろの条件を変えることによって2倍から16倍まで変わる測定をした (Table 1²⁹⁾)。

* 福岡教育大学 技術科
(〒811-41 福岡県宗像市大字赤間 729)
Tel. (0940) 32-2381

Table 1 Calculated wall pressure ratios²⁹⁾

	Bulk Solid	GB 733	GB 708	GB 501	GB 503	Sand Rape Seed	
Hopper	45°	1.15	1.38	1.78	2.64	1.24	2.19
Angle θ	65°	1.18	1.79	2.22	2.59	1.68	2.67
(C)	70°	1.95	2.03	2.32	2.60	3.13	3.08
	75°	2.58	2.30	2.47	2.70	4.02	3.43
	80°	2.50	2.49	2.30	2.27	2.63	3.27
Hopper	45°	1.27	1.28	1.52	2.29	1.08	1.23
Angle θ	65°	3.46	5.62	4.73	4.00	1.00	3.74
(P)	70°	3.55	6.86	5.41	4.41	1.16	6.31
	75°	3.79	6.17	4.65	—	15.60	4.66
	80°	2.99	5.39	4.35	—	13.21	3.79
Walters		5.73	5.50	5.29	5.20	14.44	8.75
Bransby							
($\theta=80^\circ$)		5.26	4.08	3.84	3.68	7.96	7.31
Eq. 1		2.49	2.83	2.81	2.81	4.17	3.31
Eq. 2		5.92	5.90	5.62	5.43	14.40	8.79
Eq. 3		6.13	6.95	6.70	6.52	15.42	9.65

(P) Peripheral Feeding

(C) Central Feeding

例えば、砂で、75°ビンに対して、周辺へ一様に供給した密充てん層の流れでは、ビンの遷移点のホッパー一部で激しい壁圧変動が生じ、そのピーク値を読むと約16倍（ビンの遷移点より25 mm 下で）にもなった。逆に、中央供給した疎充てん層では約4倍にしかない（Fig. 1）。前者のような高い壁圧の現象は、Cornish³⁰⁾, Bransby³¹⁾, Enstad³²⁾, Richard²⁴⁾ らによっても報告されている。この原因として、Cornish, Bransby, Enstad らはビンの遷移点付近の流れと応力について不連続な流

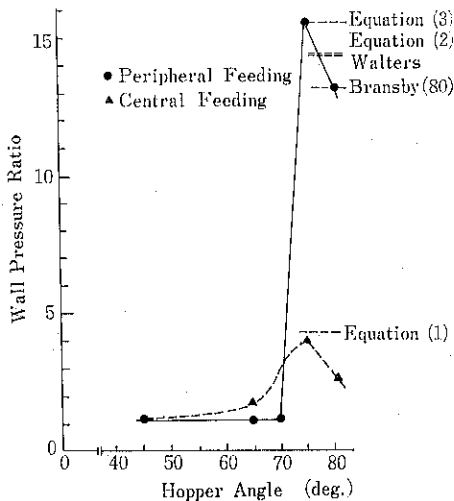


Fig. 1 Wall pressure ratio as a function of the hopper angle for sand²⁹⁾

れを想定し、その増大していくようすを理論的に計算している。これより先に、Jenike³³⁾や Walters^{34), 35)}はス

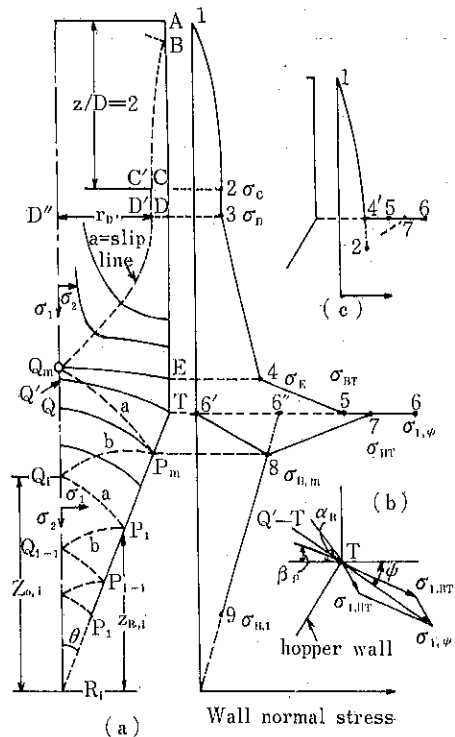


Fig. 2 Stress field and wall-pressure distribution, assumed for a mass-flow bin³⁶⁾

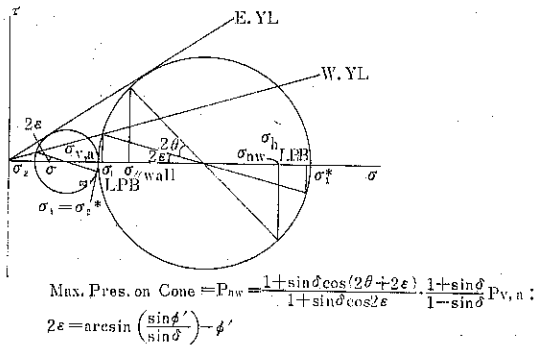


Fig. 3 Schematic Mohr-Coulomb diagram representing the stress situation at the wall of the transition from the cylinder to the cone during local passive bracing³⁷⁾

イチ説によって遷移点の圧が高くなることを説明している。一方、高橋ら³⁸⁾はスイッチや不連続な応力でなくて、連続的な応力状態の変化で説明し、遷移点での主応力が **Fig. 2** の α_R の方向へ変化することを詳しく理論的に解析している。その結果は排出中の圧力が Walker の値よりやや高く出ており、Perry の実験値とうまく一致している。ただ、排出前の供給時の圧力が計算されていないので壁圧比がわからないが、排出中のピーク値の計算例が示されており興味深い。また、Van Zanten ら³⁷⁾はこのピーク圧は passive bracing に基づくものであるとし、その最大壁圧は **Fig. 3** の σ_{hLFB} をとりその計算式を与えた。排出による層の応力の時間的変化を示してビンの遷移点付近の最大壁圧の形成を述べたものもある³⁸⁾。筆者ら³⁹⁾も遷移点での最大壁圧は密充てん層の流れを抑制するために生じるアーチの形成と崩壊に基づくものと考え、条件によっては最大壁圧が供給時の20倍にもなりうると考えている。このような最大圧を避けるために最初から funnel flow の設計をする方法もあるが、やはり、サイロは先に入れた物が先に出る mass flow の設計を基本とすべきで⁴⁰⁾、しかも最大壁圧が発生しないようなサイロの考案がこれからの設計で重要になるだろう。さらに、ビンのシリンダー部側でもこのような最大壁圧が発生するのかどうか興味深い。これは基本的には流れの遷移点とビンの遷移点とは同じ現象をもたらす一致するものと考え、流れの遷移点がビンの遷移点より上流にあればホッパー部における上述のようなことがありうると考えてよい。したがって、ホッパー角が鈍角であれば流れの遷移点がシリンダー部に生じて壁圧が大きくなる。これらの実験は Everts⁴¹⁾、筆者ら⁴²⁾、Shemyakin ら⁴³⁾の実験からもわかる。

さらに、Van Zanten ら³⁷⁾は壁面のわずかな irreg-

ular によっても応力の増大がありうることを指摘しており、ビンの遷移点と同じような考えをしなければならぬとしている。筆者らの実験で、70° ビンへガラスビーズ（粒子径 0.47 mm）を周辺供給して排出すると、ビンの遷移点より上で壁圧の上昇が見られ、その壁圧比は約6倍に達した。しかし、逆に、ホッパー角が鋭角になると流れの遷移点はホッパー部側にあり、シリンダー部側では流れの遷移点に発生するような圧力増大の現象はない。ただ、周辺供給による密充てん層の流れにおいて、active 場から passive 場へ変化する流れが生じ、供給時の壁圧の約2倍になる。逆に、中央供給のように供給時の最初から passive 場になるように疎充てんされた層ではスイッチは発生しないで、殆んど供給したときの壁圧を保ったまま流れる。そこで、シリンダー部でも壁圧が増加するとか、シリンダー部は供給したときのまま流れてスイッチが発生しないとか、かなり議論されているが、これらの現象は上述のことを考えて見てもいろいろありうることになる。

4. 供給時の壁圧

以上のような供給時と排出時の関係、すなわち、排出時の壁圧が供給時の何倍になるかがわかれば、貯槽の設計としては供給時の圧力が正確に予測できればよいことになる。供給時の壁圧は条件によっては Janssen や Reimbert⁴⁴⁾の式がよく合うとも言われている⁴⁵⁾。そこ

Table 2 応力比の実験値と計算値の比較⁴⁶⁾

表 現 式	応 力 比		
	ポリスチレン球	ガラス球	相馬砂
(実験値：投入状態の下限值)	0.55	0.59	0.38
$k_1 = \frac{1 - \sin \delta}{1 + \sin \delta}$	0.553	0.475	0.280
$k_2 = \frac{1 - \sin \delta \cos(\beta - \phi)}{1 + \sin \delta \cos(\beta - \phi)}$	0.587	0.508	0.292
$k_3 = 1 - \sin \delta$	0.712	0.644	0.437
$k_4 = \frac{1 - \sin^2 \delta}{1 + \sin^2 \delta}$	0.847	0.776	0.519
(実験値：排出状態の平均値)	0.93	0.90	0.86
$k_5 = \frac{1 - \sin^2 \phi}{1 + \sin^2 \phi}$	0.948	0.918	0.857
$k_6 = \frac{1 + \sin \delta \cos(\beta + \phi)}{1 - \sin \delta \cos(\beta + \phi)}$	1.52	1.64	2.30
$k_7 = \frac{1 + \sin \delta}{1 - \sin \delta}$	1.81	2.10	3.57

$k_1 \sim k_4$ は静的状態、 $k_5 \sim k_7$ は動的状態である。

$$\beta = \sin^{-1}(\sin \phi / \sin \delta).$$

で、その条件をさぐってみると、一番多く検討されているのが応力比の K の値である。綱川ら⁴⁶⁾は K の値を **Table 2** のようにまとめて、そして Janssen の式の上限值として、

$$K = \frac{1 - \sin^2 \phi}{1 + \sin^2 \phi} \quad \dots\dots\dots (1)$$

を提案した。ただし、 ϕ は壁面摩擦角を示す。その後、松本ら⁴⁷⁾の研究でも Eq. (1) が合うことを示している。筆者らの実験でも、この値はビンの中央へ粒体を供給したときの供給時の壁圧によく合う。しかし、綱川らの論文では供給時でなくて排出時に分類されている。この違いは、恐らく、中央供給の場合、上述のようなビンの遷移点（又は流れの遷移点）を除くと、供給時と排出時の壁圧が殆んど変わらないためと思われる（ガラスビーズの場合）。したがって、どちらに分類してもよいように思える。しかし、周辺供給で密充てんしたときの供給時の壁圧は、Eq. (1) の計算値よりかなり低くなる。この場合は次式がよく合う。

$$K = \frac{1 + \sin \delta \cdot \cos 2\varepsilon_1}{1 - \sin \delta \cdot \cos 2\varepsilon_1} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $2\varepsilon_1 = \pi + \phi - \sin^{-1} \frac{\sin \phi}{\sin \delta}$

δ は内部摩擦角、 ϕ は壁面摩擦角を示す。Van Zanten³⁷⁾らもこの K を使っている。しかし、これらの違いは供給方法の違いによる充てん層の応力状態の差違によるもので、充てん層の応力状態を正確に評価して使用することが大切なことになる。実験によると中央供給に基づく疎充てん状態は周辺供給に基づく密充てん状態の約 2 倍の壁圧になり、同じ試料を用いても実験条件によってこのように大きく変化することがわかる。したがって、多くの過去の実験値の間にばらつきがあるように見えるのも各々の条件の違いによるものと考えられる⁴⁸⁾。そして、実験結果に合わせるために多くの研究者がこの K の値を適切に定めようとしていることがわかる^{49), 50)}。

次に、Janssen の式で大切なことは壁面摩擦係数の値を正確に評価することである。この値に対する検討は、綱川ら⁵¹⁾、Haaker⁵²⁾、Mooms⁴⁰⁾らの報告があるが、Janssen の式を使用するにあたってこの値の変化が大きく影響することがよくわかる。それ故、今後も正確な測定法の確立が望まれる。

5. overpressure の評価

上述の現象は完全な mass flow タイプと funnel flow から mass flow へ変化する過渡的な層の応力状態を含めて述べたことになるが、特に、最大壁圧の発生は funnel flow から mass flow へ切り変わるような流れで起こるように思われる。したがって、サイロやビ

ンの設計としては mass flow と funnel flow を含めた形で総合的に検討する必要がある。この立場から流れを分類して、それぞれの流れから壁圧の計算例を示した高橋ら⁵³⁾の報告は実に興味深い。上述のように完全な mass flow タイプの良さはいろいろあるが、なお、現状では funnel flow ビンの設計も多いようである。このような設計には先の Jenike⁵⁴⁾や Van Zanten⁵⁵⁾らの報告も参考になる。mass flow と funnel flow の境界を与えるホッパー角と物性値との関係は Jenike⁵⁶⁾、Ooms⁴⁰⁾、Everts⁴¹⁾らの研究があり、その例を **Fig. 4**、**Fig. 5** に示す。**Fig. 6** はドイツの設計の基準となっている DIN 1055⁵⁷⁾、米国基準 ACI Code 313-1977 で計算された funnel flow 条件で、ポリエチレンペレット（見かけ密度 580 kg/m³、粒径 3.5 mm）について計算された壁圧を示す⁵²⁾。このように、各考え方にかなりの違いがあることがわかるが、Everts ら⁴¹⁾は DIN の基準が若干低いことを指摘している。また、Martens⁵⁸⁾も

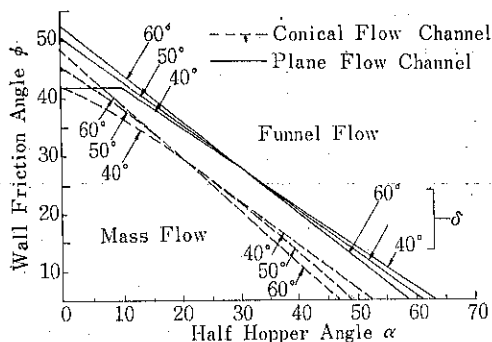


Fig. 4 Limits for Mass-Flow in Conical and Plane-Flow Hoppers⁴⁰⁾

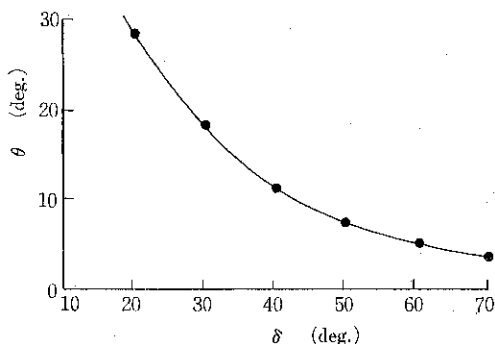


Fig. 5 Relation between the effective angle of internal friction and the angle with the vertical that gives the lowest point of transition to the stagnant zone on the wall of a funnel flow bunker⁴¹⁾

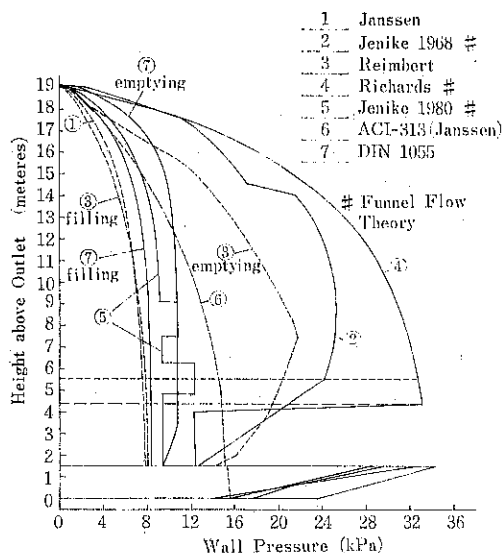


Fig. 6 Wall pressures⁵²⁾

DIN に対する評価も詳しく述べている。実際上は overpressure をどの程度に評価して設計するかが最も重要なことであるが、先の DIN, ACI, 以外にソ連、フランスの Code¹²⁾, Swedish Council for Building Research⁵⁰⁾ も参考になると思われる。さらに、Kendal⁶⁰⁾ の石炭貯槽用の実験的な設計の報告は、この値のとりえ方の 1 例を示しているようにも思われる。なお、現在でもサイロの崩壊がおこっているのは流れの応力状態を的確に評価しないで Code の最小係数に近いものを使用しているためとも思われる。

6. あとがき

上述したように、最近の貯槽に関するレビューは沢山あり詳しくまとめられている。それ故、ここでは、主にサイロから排出する際の overpressure に絡って筆者らの考えを含めてまとめた。現状ではサイロへの供給から排出までの充てん層の応力状態を評価して最大壁圧を避けて設計する方法がありそうに思われるが、まだ、その段階まで進んでいないようである。今後も、いろいろの条件下のデータを出し合って最大壁圧の発生する原因を十分認識しながら、最大壁圧を避けて設計できるようなサイロの考案が検討されていくだろう。

最後に、筆者の勉強不足により誤解している点があると思われまので、ご指摘いただければ幸甚に存じます。

引用文献

- 1) A. R. Reed and C. H. Duffell: A Review of Hopper Discharge Aids, Bulk solids handlings, 3, No. 1, (1983)
- 2) A. R. Reed: The Operating Mechanism of a Vibrating Screen Hopper Discharge Aid, Proceeding of the Second International Conference on Design of Silos for Strength and Flow, Stratford-Upon-Avon Hilton, U. K., Nove., (1983)
- 3) A. Rappen and H. Wright: The Use of Air Cannons to Solve Coal Flow Problems in Both Mass and Core Flow Bunkers with Specific Reference to the Phenomenon of "SILO QUA KING", ibid.
- 4) R. T. Swindermann: The Combination of Mass Flow Design and Flow Aid Devices, Bulk solids handlings, 5, No. 1, Feb., (1985)
- 5) R. Wahl: Achieving Continuous Flow from Bulk Storage, Bulk solids handlings, 5, No. 1, Feb., (1985)
- 6) R. Aoki and H. Tsunakawa: The pressure in a Granular Material at the Wall of Bins and Hoppers, J. chem. Eng. Japan, April, 4th, (1968)
- 7) 鈴木雅之: 貯槽内粉体圧, 粉砕, No. 15, (1970)
- 8) 高橋洋志: 貯槽の粉粒体圧力, 粉体工学研究会誌, 13, No. 11, (1976)
- 9) P. C. Arnold, A. G. Mclean and A. W. Roberts: Bulk Solids, Storage, Flow and Handling, TUNRA, Univ. of Newcastle, (1979)
- 10) M. Sugita and R. Aoki: Recent Advances in Research on Storage of Powders, Proceeding of International Symposium on Powder Technology, The Society of Powder Technology, Japan, (1981)
- 11) 青木隆一: 粉粒体貯槽の安全, 化学工学, 49, No. 7, (1985)
- 12) 日本粉体工業技術協会編, 粉粒体のバルクハンドリング技術, 日刊工業新聞社, (1985)
- 13) 日本建築学会編, 容器構造設計指針案, 同解説.
- 14) International Journal of Bulk Solids Storage in Silos, ISSN 0265-5918, Child Wall University Press Ltd, P. O. Box 78, London, NW11 OPG, England.
- 15) J. E. Sadler: Silo Problems, Proceeding of the

- International Conference on Design of Silos for Strength and Flow, University of Lancaster, U. K., Sept., (1980)
- 16) P. Ansourian : Stability Problems in Axisymmetric Steel Silos, Proceeding of the Second International Conference on Design of Silos for Strength and Flow, Stratford-Upon-Avon Hilton, U. K., Nove., (1983)
 - 17) O. F. Theimer : Failures of Reinforced Concrete Grain Silos, J. Eng. Ind., Tran. ASME, May, (1969)
 - 18) J. Ravenet : Grain and Meal Silos in Latin America, Bulk solids handlings, 4, No. 2, June, (1984)
 - 19) V. Lakshman Rao and D. Venkateswarlu : Static and Dynamic wall Pressure in Experimental Mass Flow Hoppers, Powder Tech., 10, (1974)
 - 20) 中川文雄, 島谷敏久, 鈴木昭明, 横山藤平 : モデルビン壁面における粉体圧の測定, 粉砕, No. 17, (1972)
 - 21) 杉田稔 : 大型貯槽壁圧に加わる非付着性粒体の圧力変動について (その1), 大型穀物サイロの粒体圧測定, 粉体工学研究会誌, 7, No. 6, (1970)
 - 22) 杉田稔 : 大型貯槽壁圧に加わる非付着性粒体の圧力変動について (その2), 流動パターンと動的圧力, ibid.
 - 23) M. G. Perry and H. A. S. Jangda : Pressures in Flowing and Static Sand in Model Bunkers, Powder Tech., 4, (1970/71)
 - 24) P. C. Richards : Bunker Design Part 1 : Bunker Outlet Design and Initial Measurements of Wall Pressures, J. Eng. Ind., Nove., (1977)
 - 25) 綱川浩, 浅野裕三, 青木隆一 : バンカーの鉛直壁部における粒体の応力, 粉体工学研究会誌, 14, No. 9, (1977)
 - 26) U. S. Mukhopadhyay, N. K. Roy and B. K. Jha : Static and Dynamic Pressure Distribution in Steel Storage Bins Handling Fertilizer Raw Material, Proceeding of the International Conference on Design of Silos for Strength and Flow, University of Lancaster, U. K., Sept., (1980)
 - 27) 竹内孝次, 長尾高明, 畑村洋太郎, 中島信行 : 粉体力学における相似則について, 第2報, 中小形サイロ模型実験による確認, 粉体工学会誌, 21, No. 7, (1984)
 - 28) G. P. Deutsch : Pressures on Silo Walls, J. Eng. Ind., Tran. ASME, (1968)
 - 29) R. Moriyama and G. Jimbo : The Effect of Filling Methods on the wall Pressure near the Transition in a Bin, Bulk solids handlings, 5, No. 3, June, (1985)
 - 30) R. J. Cornish : Pressure on a Hopper Wall at a Stress Discontinuity during Mass Flow, Powder Tech., 8, (1973)
 - 31) P. L. Bransby and P. M. Blair-Fish : Wall Strain Mass-Flow Bunkers, Che. Eng. Sci., 29, (1974)
 - 32) G. Enstad : On the Theory of Arching in Mass Flow Hoppers, ibid., 30, (1975)
 - 33) A. W. Jenike, J. R. Johanson and J. W. Carson : Bin Loads Part 3 : Mass-Flow Bins, J. Eng. Ind., Trans. ASME, Feb., (1973)
 - 34) J. K. Walters : A Theoretical Analysis of Stresses in Silos Vertical Walls, Che. Eng. Sci., 28, (1973)
 - 35) J. K. Walters : A Theoretical Analysis of Stresses in Axially-Symmetric Hoppers and Bunkers, ibid.
 - 36) H. Takahashi, H. Yanai and T. Tanaka : An Approximate Theory for Dynamic Pressure of Solids on Mass-Flow Bins, J. chem. Eng., Japan, 12, No. 5, (1979)
 - 37) D. C. Van Zanten and A. Mooij : Bunker Design Part 2 : Wall Pressures in Mass Flow, J. Eng. Ind., Trans. ASME, Nove., (1977)
 - 38) J. Eibl and U. Häußler : Silo Pressure from a Numerical Point of View, Proceeding of 1st European Symposium on the Stress and Strain Behaviour of Particulate Solids, Praha Czechoslovakia, Sept., (1984)
 - 39) 森山龍一, 神保元二 : ビン内ホッパー部の壁圧変動, 化学工学論文集, 12 No. 1 (1986)
 - 40) M. Ooms and A. W. Roberts : The wall/Bulk Solid Interface Condition and Its Effect on Bulk Solids Flow from Storage Silos, Proceeding of the Second International Conference on Design of Silos for Strength and Flow, Stratford-Upon-Avon Hilton, U. K., Nove., (1983)
 - 41) R. Everts, D. C. Van Zanten and P. C. Richa-

- rds : Bunker Design Part 4 : Recommendations, J. Eng. Indu., Trans. ASME, Nove., (1977)
- 42) 森山龍一, 神保元二 : ビン内シリンダー部の壁圧に及ぼす供給方法の影響, 化学工学協会, 第19回秋季大会要旨集.
 - 43) E. I. Shemyakin and S. B. Stazhevsky : Types of Flow of Particulate Solids and Stresses in Bunkers, 1st European Symposium on the Stress and Strain Behaviour of Particulate Solids, Praha, Czechoslovakia, Sept., (1984)
 - 44) A. M. Reimbert : Pressures and Overpressures in Vertical and Horizontal Silos, Proceeding of the International Conference on Design of Silos for Strength and Flow, University of Lancaster, U. K., Sept., (1980)
 - 45) 網川浩, 青木隆一, 小島健二, 松島弘輝 : マスフローホッパーにおける粉体の応力とホッパー出口の最小寸法, 粉体工学会誌, 15, No. 6, (1978)
 - 46) 網川浩 : 石炭サイロの排出口寸法の推算, 粉体工学会誌, 18, No. 6, (1981)
 - 47) 松本幹治, 菅沼彰, 青木隆一 : ビン内における付着性粉体の応力状態, 化学工学論文集, 10, No. 6, (1984)
 - 48) 内海良治, 正路一紀, 篠原邦夫, 田中達夫 : 貯槽における粉粒体の圧力分布測定, 粉体工学会誌, 19, No. 11 (1982)
 - 49) L. Sokal : Wall Loads in Vertical, Silos, Inter. J. Bulk Solids Storage in Silos, 1, 1, (1985)
 - 50) N. K. Latincsics : Silos and Storage Vessels, Bulk solids handlings, 5, No. 1, Feb., (1985)
 - 51) 網川浩, 三枝隆 : 粉粒体の流れ性質の測定, 粉体工学会誌, 15, No. 6, (1978)
 - 52) G. Haaker and Owen Scott : Wall Loads on Corrugated Steel Silos, Proceeding of the Second International Conference on Design of Silos for Strength and Flow, Stratford-Upon-Avon Hilton, U. K., Nove., (1983)
 - 53) H. Takahashi, H. Yanai and T. Tanaka : An Approximate Theory for Dynamic Pressure of Solids on Funnel-Flow Bins, J. chem. Eng. Japan, 12, No. 5, (1979)
 - 54) A. W. Jenike, J. R. Johanson and J. W. Carson : Bin Loads Part 4 : Funnel-Flow Bins, J. Eng. Indu., Tran. ASME, Feb., (1973)
 - 55) D. C. Van Zanten, P. C. Richards and A. Mooij : Bulk Design Part 3 : Wall Pressures and Flow Patterns in Funnel Flow, J. Eng. Indu., Tran. ASME, Nove., (1977)
 - 56) A. W. Jenike : Storage and Flow of Solids, Bulletin of the Univ. of Utah, Nove., (1964)
 - 57) DIN 1055, Part 6, Loads in Silo Bins, Nov., (1964)
 - 58) P. Martens : The Performance of the OLD NO RM and a Progress Report on the Revised Edition, Proceeding of the International Conference on Design of Silos for Strength and Flow, University of Lancaster, U. K., Sept., (1980)
 - 59) J. Hartlen, J. Nielsen, L. Ljunggren, G. Martensson and S. Wigram : The Wall Pressure in Large Grain Silos, Swedish Council for Building Research D2 : (1984)
 - 60) N. O. Kendal : The Practical Design of Silos and Bunkers with Reference to Codes of Practice, Proceeding of the International Conference on Design of Silos for Strength and Flow, University of Lancaster, U. K., Sept., (1980)

国内における粉体力学物性測定に関する最近の研究

大島 敏男*
Toshio Oshima

1. 緒 言

粉体を扱う操作において、付着力や摩擦係数などで代表される粉体力学物性は、流動・閉塞現象などと直接関係するので、他の物性とともによく重要視され、数多くの研究がなされている。これらの研究では、粉体層を連続体あるいは不連続の粒子集合体とみなして理論的または実験的な検討が進められている。このうち、粉体層中の個々の粒子間の相互作用力と粉体層の力学的挙動との関係については椿により“KONA” No. 2 にレビューされている¹⁾。ここでは、粉体の力学物性のうち、付着力と粉体層の崩壊特性の測定に限って、ここ数年間の国内における研究動向を述べることにする。

2. 付着力の測定

粉体層の付着力については、名城大・大塚教授（現学長）を世話人とする粉体工学会粉体物性グループ会において、国内の多数の研究者が共通試料を用い各種試験装置による測定を行い、その結果が粉体工学会誌²⁾と京都で開催された国際粉体工学シンポジウム³⁾で報告されている。本報では、この内容と一部重複するが、それ以降に発表された付着力測定を含めて述べることにする。

2.1 1個粒子の付着力

遠心法による粉末粒子のガラス面に対する付着力が、佐野ら⁴⁾により測定され、ふん囲気の湿度の影響および粒子形状の影響について述べられている。粒子形状が球に近いほど付着力が大きくなる傾向にある。

大塚ら⁵⁾は衝撃分離法によりガラス板と粉末有機物の間の付着力の測定を行っている（装置は“粉碎”，No. 29, p. 41 (1985) に紹介されている）。この方法で得た結果をタッピング法および遠心法による結果と比較し、

付着力に及ぼす温度の影響についても検討が加えられている。室温における三方法の結果は互いにほぼ等しいが、温度の影響は著しいと報告されている。

2.2 粉体層の付着力

粉体層の付着力は、二分割できる容器内に粉体を充填し、適当な圧力で圧密して充填状態（空隙率）を整えた後、容器の分割面で引張り破断を行う方法がほとんどである。この場合、圧密方向と直角に破断する水平引張り破断法と、同方向に引張る垂直引張り破断法とがある。垂直引張り破断法は、応力負荷方向と引張り力を与える方向が同一なため、着付力の測定に適した方向と考えられるが、高空隙率の粉体層に適用し難いなど測定上の困難さがあるので研究例は比較的少ない。

篠原ら⁶⁾は Fig. 1 に示す装置を試作し Fig. 2, Fig. 3 のような精巧な二分割セルを用いてガラスビーズ、石炭、小麦粉の付着力測定を行った。伊ヶ崎ら⁷⁾は篠原らの装置を改良し、セル内の粉体層に電圧が印加できるようにして付着力の測定を行い、電場における粉体層の付着力は電場の存在しない場合に比較して著しく増大することを報告している。矢野ら⁸⁾は電子式上皿天秤を利用した装置を考案し、これは後に島津製作所により商品化

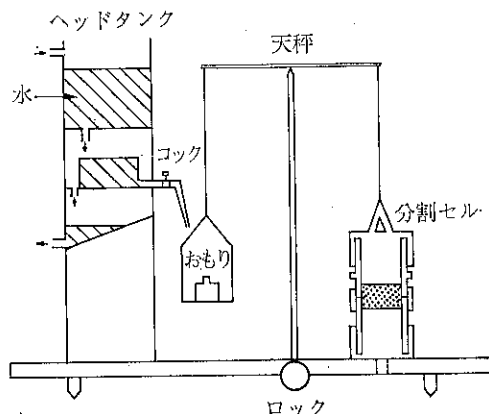


Fig. 1 垂直引張り破断試験装置（篠原ら⁶⁾）

* 姫路工業大学産業機械工学科
(〒671-22 姫路市書写 2167)
Tel. (0792) 66-1661 (代)

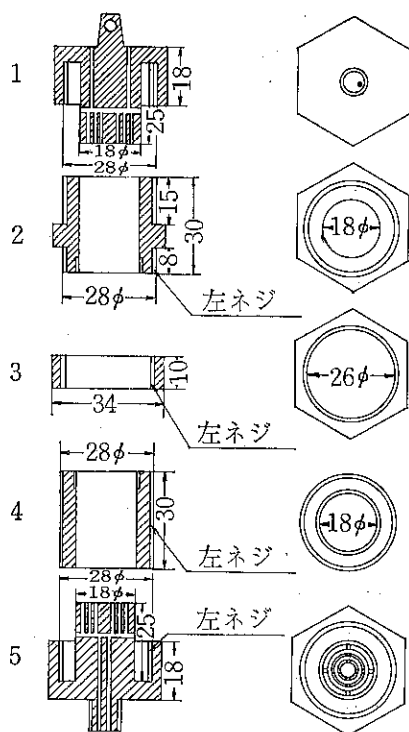


Fig. 2 分割セルの詳細 (篠原ら⁶⁾)

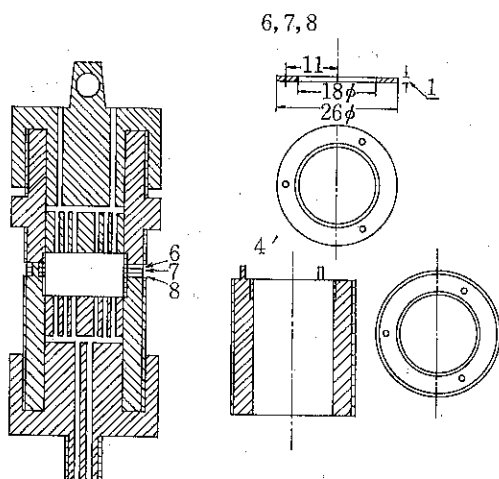


Fig. 3 破断面近傍の空隙率測定装置 (篠原ら⁶⁾)

された。Fig. 4 に示すこの装置を用い、荒川⁹⁾は粉体層の引張り破断強度を求めるとともに、破断面の観察を行い、破断面の充填構造は均質ではなく、破断は全断面で均一には起こらず相対的な付着・凝集力の弱い部分から順に進行することを示した。また荒川¹⁰⁾はこの装置を用い、粉体セルを小型電気炉内に入れ高温での付着力測定

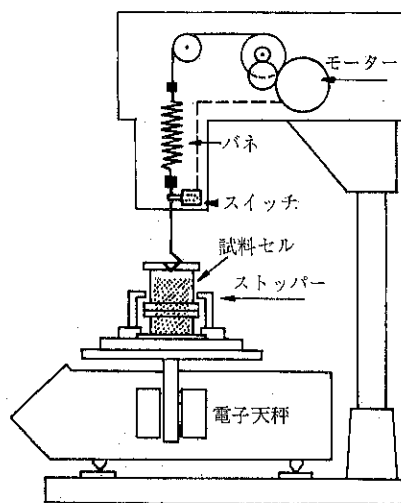


Fig. 4 垂直引張り破断試験装置 (荒川⁹⁾)

を行っている。鈴木ら¹¹⁾は引張り破断試験と、後述の剪断試験が同一のセルで行えるようにしたリングセル式の剪断・引張り試験機を作製し、引張り破断強度を含めた粉体層崩壊曲線を得ている。

一方、水平引張り方式は、空試験のときセル底面の摩擦抵抗をいかに小さくするかに注意が払われてきた。Farley-Valentin 型の装置は、二分割セルの片方を固定台上に置き他方をボールベアリング上に乗せて引張るようにしている。竹中ら¹²⁾はこの型式の試験機により、表面活性剤水溶液で湿らせた炭酸カルシウムの付着力測定を行っている。遠藤ら¹³⁾は含有水分の少ないガラスビーズの引張り強度を測定するとともに、強度を理論的に求めることを試みている。塩上ら¹⁴⁾は二分割セルを外周のヒーターで加熱し (粉碎, No. 29, p. 41(1985) 参照), 有機粉体の付着力の温度による変化を測定し、この結果と粉体の充填性に及ぼす温度の影響との関係について検

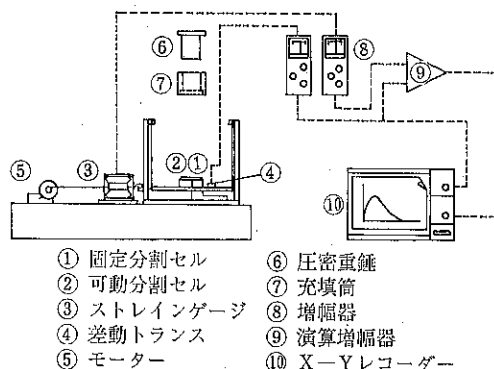


Fig. 5 コヒテスタ

討を行っている。また、この装置による付着力と比表面積との関係についても検討を加えている¹⁵⁾。神保ら¹⁶⁾はセル底面摩擦を減少させるため従来のベアリング型式を改良し、二分割セルを両方ともボールベアリング上に載せた引張り試験機を提案している。

藤井ら¹⁷⁾は、ベアリングを使用しない新しい型式の引張り試験機を開発した。Fig. 5 に示すように3枚の燐青銅板でセルを吊り下げる型式で、試料を充填しない状態で引張ったとき可動セルの自重により生ずる力は演算回路で補正され、記録計には粉体を引張るのに要する応力のみが記録される。この装置はホソカワミクロンよりコヒテスタの商品名で販売されているが、セル底面摩擦を巧妙な方法で除いているので結果の信頼性が高く、付着力測定を要する研究に多く用いられている。この装置は構造上、低圧密荷重・高空隙率の粉体層の付着力測定に適しているが、最近脱着可能なセルを用い、高圧密荷重における測定ができるよう改造が試みられている¹⁸⁾。椿・神保らはこの装置を用いて粉体層付着力に関する一連の研究を進めている¹⁹⁻²⁵⁾。すなわち、付着力に及ぼす凝集性の影響を検討し、凝集粒子が多い粉体層は限界応力以下の低圧密応力では付着力が低下すること¹⁹⁾、粉体層は圧密により、脆性を増し引張り強度は増大するが破断変位は減少するので、破断エネルギーの増大は引張り強度の増大に比べて小さくなると報告している²⁰⁾。また静的引張り強度より小さい繰返し引張り応力により破断が起こり、粉体層にも疲労破壊現象が起こると指摘し²¹⁾、この現象の統計的解析²²⁾、繰返し負荷による変位量増

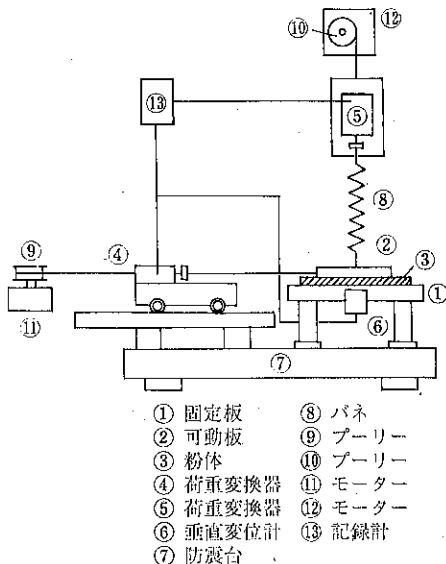


Fig. 6 平行平板型剪断および引張り破断装置 (廣田ら²⁷⁾)

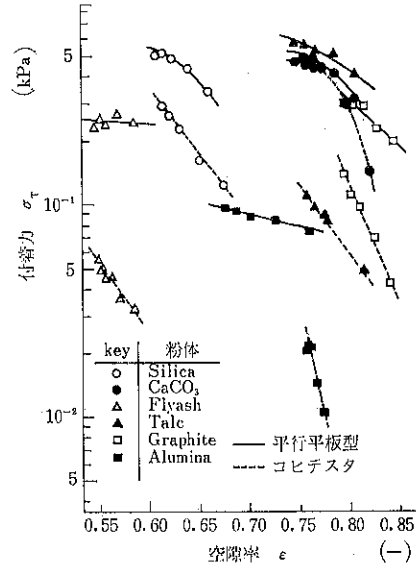


Fig. 7 付着力 σ_T と空隙率 ε の関係

加過程の検討²³⁾、レオロジーモデルによる解析²⁴⁾、クリープ破断現象の検討²⁵⁾などを行ってきた。別に、この装置の測定結果を電気集塵装置の設計に応用する方法が牧野ら²⁶⁾により述べられている。

セルを用いずに粉体層の付着力を測定する装置も使用されている。廣田ら²⁷⁾は粉体層の剪断と引張り破断を同一装置で行うため、Fig. 6 に示すように平行平板間に薄い粉体層を充填し、上部可動板を引き上げ粉体層が破断するときの力を測定する装置を考案した。この装置を用いて炭酸カルシウムなど6種類の粉体の付着力を測定しこの結果を Fig. 7 のようにコヒテスタによる測定値と比較している。この装置はセルによる垂直引張り法と同様、予圧密方向と引張り方向が同じであり、コヒテスタは水平引張り法で予圧密方向と引張り方向が直角となるため、同一予圧密で粉体層の空隙率を等しく調整しても、コヒテスタの方が小さい測定値を示す。廣田らの装置と同様な方法で、白色ワセリンを薄く塗布した円板を粉体層上に載せて適当な荷重をかけた後、垂直に引き上げて付着力を求める装置が福岡ら²⁸⁾により使用されている。温度・湿度を調節した容器内に装置を設置し、種々の湿度において多くの薬品粉末の付着力を測定し、親水性で水に可溶性粉体は湿度の影響が著しいが、親水性で水に不溶性粉体は湿度の影響はおだやかであると報告している。

3. 粉体層の崩壊特性の測定

3.1 定荷重一面剪断試験

内部摩擦角や粘着力の測定および剪断過程の検討には

一面剪断試験法が多く用いられ、国内の剪断試験はほぼこの方法に限られている。この試験法では剪断時の主応力の値が明確でないこと、および剪断セル内の粉体層の垂直応力分布が一律でないことが指摘されていた。

この垂直応力分布の問題を最初にとり上げて、装置を試作し一連の実験的検討を行ったのが寺下・宮南らの研究²⁹⁻³⁸⁾で、これは一時停滞していた剪断試験についての関心を大いに高めるとともに、その後の発展の基礎となった。彼らは Fig. 8 に示す剪断試験機を用い、剪断面近傍の応力分布を測定するため Fig. 9 のようにセル内に微小圧力変換器を取り付けて剪断試験を行った。その結果、载荷垂直応力と比べて実測垂直応力が低く、剪断面内位置による応力分布があることを明らかにした³⁰⁾。そこで载荷垂直応力の代わりに実測垂直応力の平均値($\bar{\sigma}_{z,m}$)を用いることにより、Fig. 10 に示すように内部摩擦係数と剪断付着力は初期空隙率によらず1つの値を

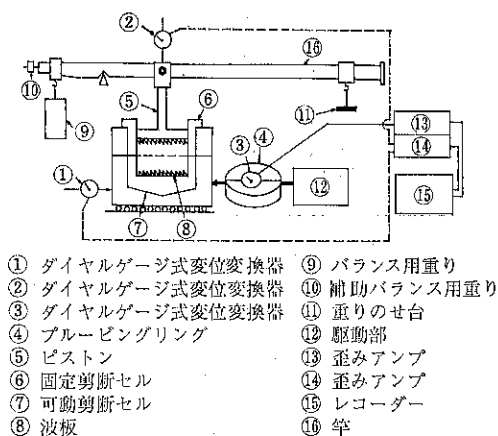


Fig. 8 一面剪断試験機 (寺下ら²⁹⁾)

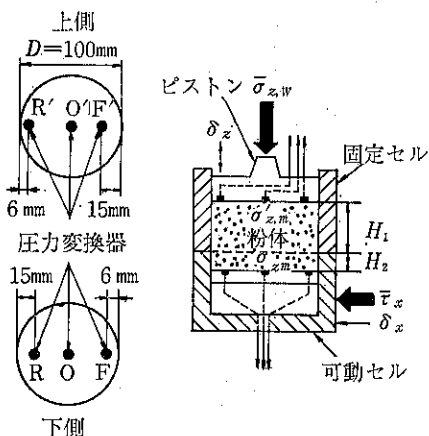


Fig. 9 剪断面近傍における圧力変換器の配置

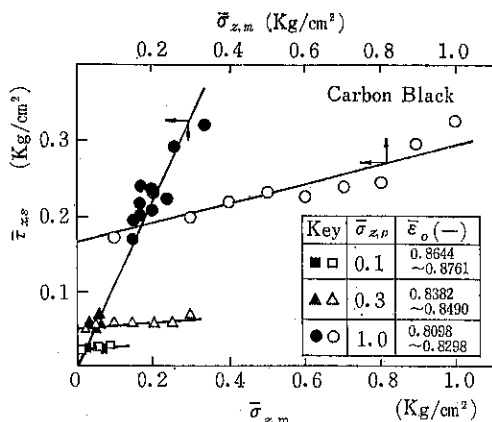


Fig. 10 $\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_{x,s}$ 関係および $\bar{\sigma}_{z,m}$ 対 $\bar{\tau}_{x,s}$ 関係におよぼす初期空隙率 $\bar{\epsilon}_0$ の影響 (カーボンブラック)

示す結果が得られたので、この装置を用いた内部摩擦係数の正当な測定法の提案を行っている³¹⁾。また微粉の剪断試験結果に基づく流動性の検討を行い、垂直応力分布の偏りの大きいものほど、流動性が悪くなることを見出した³³⁾。さらにこの試験機とコヒテスタを併用して測定した結果を Roscoe 状態図上に描くことにより、粉体層の剪断過程におよぼす空隙率の影響を明らかにし、1.7 μm 以上の粗粉とそれ以下の微粉では剪断過程に定性的な差があることを示した³⁵⁾。

このように寺下らの装置は粉体剪断面近傍の粉体圧を直接測定しているので、载荷荷重より実際の剪断面にかかる応力に近い値が得られているが、より正確に剪断面における垂直応力を測定でき、Powder Yield Locus (PYL) だけでなく Wall Yield Locus (WYL) も測定可能のように工夫した Fig. 11, Fig. 12 のような装置が松本ら³⁹⁾により提案された。この装置は下部セル全体が受皿に固定され、その受皿は3個の小型荷重変換器により3点支持されており、剪断面にかかる荷重と下部セル重量および下部セル内粉体重量が直接測定でき剪断面の垂直応力が正確に求められる。豊浦砂、ガラスビー

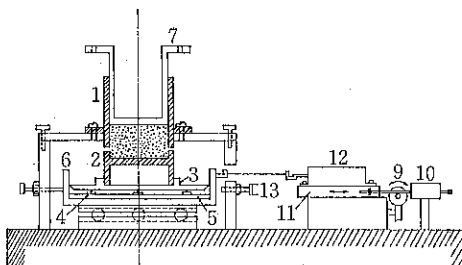


Fig. 11 改良型一面剪断試験装置の概略図 (松本ら³⁹⁾)

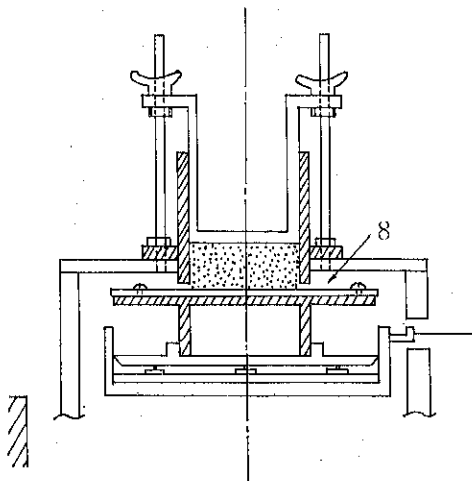


Fig. 12 WYL の測定および定容積剪断時の略図 (松本ら³⁹⁾)

ズ、炭酸カルシウム P-30 を用いて PYL と WYL を測定し、WYL についても剪断面の実際の粉体圧を測定する必要があることを指摘し、またこの装置を用いてランキン定数が測定できることを示している。

野呂ら⁴⁰⁾は上下セルを試験機本体から脱着でき、タッピング充填や高压密充填が可能な剪断試験機を試作した。荷重の検出は松本らの方法と同じで、高い応力が加えられるよう寺下らと同様に挺により垂直荷重を負荷する方法を用いている。この装置を用いて着色粉体を粉体層内に縞状に充填し、剪断時の粉体層の挙動および剪断後の粉体内部の観察を行っている⁴¹⁾。

上述のような円筒セル型試験機では可動セルの変位が大きくなるにつれ、粉体層剪断面の面積が徐々に減少する。この面積変化を避けるため円環状のセル内に粉体を充填し上下いずれかのセルを回転させて剪断を行うリングセルがある。この装置では、回転中心からの半径方向距離に応じて円環内粉体の剪断変位が異なることを考慮して剪断応力を定める必要があるが、変位が大きくなっても剪断面積が変わらない特徴がある。鈴木ら¹¹⁾はリングセル型試験機で剪断試験と引張り試験が行える Fig. 13, Fig. 14 のような装置を作製し、1つの試験機で引張り破断点を含む PYL が精度良く測定でき、引張り強度と剪断強度を1本の曲線で表わせることを示した。また、この試験機を用いて剪断試験中の空間率変化を測定し、垂直応力 σ と予圧密応力 σ_c の比 σ/σ_c によって3種の崩壊状態が存在することを示した⁴²⁾。

リングセルを用いて剪断面近傍の粉体層内部構造を明らかにしようとする試みが山崎ら⁴³⁾により行われている。環状トラフ内に着色粒子と非着色粒子を交互に充填

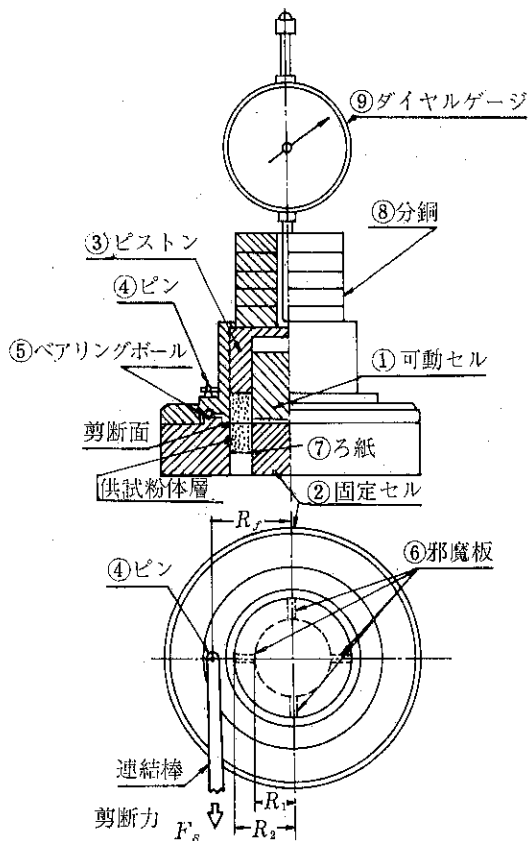


Fig. 13 剪断試験部の概略 (鈴木ら¹¹⁾)

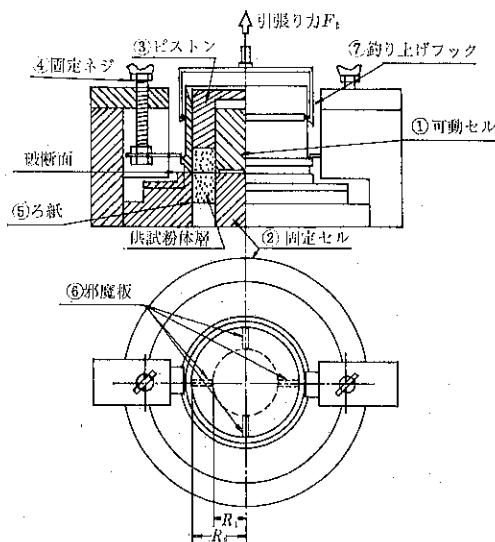


Fig. 14 引張り試験部の概略 (鈴木ら¹¹⁾)

し剪断した後、粉体層をパラフィンで固めて旋盤で切断し、層断面の写真から粉体層深さ方向の粒子の変位を読み取る。この操作を剪断角度を変えて繰り返す行うもので、その結果、粉体層の剪断破壊現象は1つの面で起こるのではなく層をなして滑っていることを明らかにした。

円筒セル、リングセルを問わず、セルに粉体を充填して剪断する試験法ではセル壁面と粉体との摩擦により、載荷垂直応力が剪断面に正しく伝わらないという問題は避けられない。廣田・大島ら⁴⁴⁾は低圧密応力における垂直応力を剪断面にできるだけ正しく負荷するために、角型セル内に充填した粉体層の剪断面と垂直方向に空気を流し、気流の圧力差で粉体層を圧密する剪断試験機を試作した。この装置は空気を下から流せば負の垂直応力範囲の剪断試験や引張り破断力も測定できるという特徴がある⁴⁵⁾。しかし、セル寸法を変えて試験すると結果が異なり、これは壁面摩擦の影響が避けられないことと、壁面で粉体が拘束されるので剪断面に剪断力分布が生じるからであると指摘した。そこでこれらの影響をなくするために、セルに粉体を充填することを止め、先に示した Fig. 6 のように2枚の平行平板間に1~3 mmの厚さの薄い粉体層を作り、予圧密と軽いツイストの後、剪断を行う方法を提案した^{46,47)}。剪断時に平板と粉体層の間の滑りを防ぐため板の表面にブツチを施すが、あるいはサンドペーパーを張り付けている。この方式では載荷荷重が粉体層全面に均一にかかり、剪断応力分布がほとんど生じないという特長がある。また、非接触変位計を設置して剪断過程の微小な垂直方向変位が測定できるようにしてあり⁴⁸⁾、上部平板を垂直に引き上げることで負の垂直応力範囲の剪断と引張り破断力が測定できること²⁷⁾、構造が簡単であるため上下平板にヒーターを埋め込むことができ高温試験が可能である⁴⁸⁾などの特徴もある。ただ粉体層の厚さが薄いので空隙率の測定が困

難で別の圧密試験により求める必要がある。この装置を用いて粉体層の剪断過程における膨張・収縮現象を詳細に測定し、測定結果を Roscoe 状態図と対比させて検討した結果、粉体層の崩壊を判定する基準として粉体層の圧縮応力方向(垂直方向)変位と剪断応力の関係によって表される剪断過程曲線を用いるのが最も良いことを示した⁴⁸⁾。この場合、崩壊基準の値を大きくとると、Fig. 15 のように PYL が次第に CSL に近づくことを明らかにした。また、この装置を用いて粉体の流動性に及ぼす粒子凝集の影響についても検討している⁴⁹⁾。

粉体の剪断試験において Jenike の剪断装置は世界的に普及し、試験法については詳細な手法が定められているが、国内ではこの装置を所有していることが少ないこともあって意外に測定結果が発表されていない。村田ら⁵⁰⁾は Jenike の装置を用い石炭の流動性の測定結果を報告しているが、この報告が学会誌に掲載された唯一のものと思われる。この手法は粉体工学に関する教科書にも掲載され広く知られているが、その特徴である予備剪断を行って後、改めて剪断試験を行うことの意義については検討されていない。これまで述べてきた国内で用いられている剪断試験はすべて、予圧密を行った後、予備剪断なしに直ちに剪断する手法をとっている。廣田ら⁵¹⁾はこの点に着目して、Jenike の装置と前述の平行平板型試験機の両者を使用し、両装置について Jenike の手法通りに予備剪断を行う場合と、予備剪断なしに剪断する場合についての試験を行い、それぞれの測定結果を比較検討した。その結果、予備剪断により粉体層内に剪断面を形成した後、改めて剪断する Jenike の手法は、空隙率の大きい微粉の場合以外は明確な膨張崩壊を示し、結果の再現性が良く、Fig. 16 に示すように両装置ともに同じ結果が得られる優れた方法であることを明らかにした。この手法を用いる限り他の装置を用いても試験結果はほぼ等しい値が得られるものと考えられる。ただ予

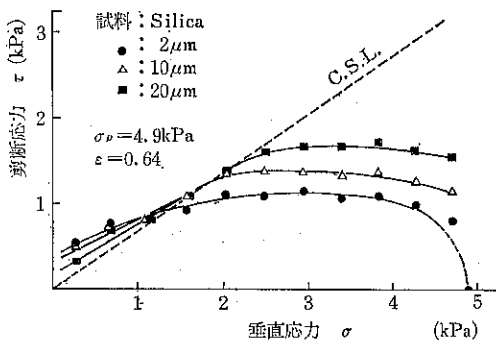


Fig. 15 破壊包絡線におよぼす崩壊基準の影響

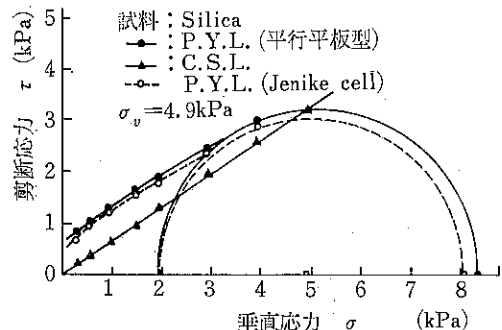


Fig. 16 予備剪断した粉体層の破壊包絡線に及ぼす剪断装置の影響

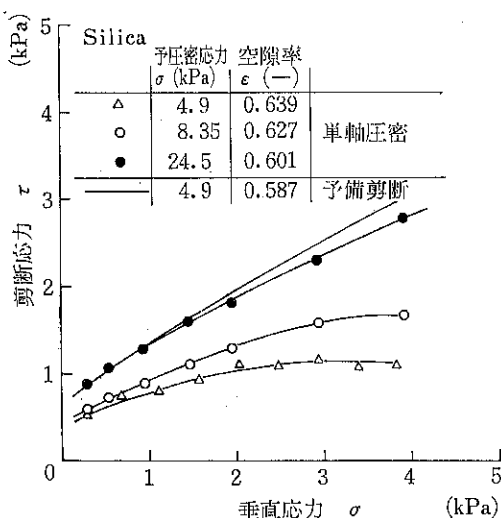


Fig. 17 破壊包絡線に及ぼす圧密方法の影響

備剪断により得られた崩壊面は、Jenike の手法により描かれるエンドモール円から求まる最大主応力よりも遙かに大きい応力で圧密された状態になっていることが Fig. 17 により説明されている。

3.2 定容積一面剪断試験

定荷重一面剪断試験では破壊包絡線を求めるには、粉体層に載荷する垂直荷重を数回にわたり変化させて剪断を行う必要がある、1本の包絡線を求めるのにかなりの時間を要する。粉体層剪断時に膨張崩壊する領域では粉体層を一定容積で剪断すると応力が検出でき剪断変位とともに変化するので、この応力を剪断応力と垂直応力に分けて同時に測定すれば、1回の剪断試験で破壊包絡線が得られる。この方法は綱川・青木⁵²⁾により提案され、その後ハンドルにより圧縮する Fig. 18 のような装置を作製して実験が続けられてきた⁵³⁾。この装置により測

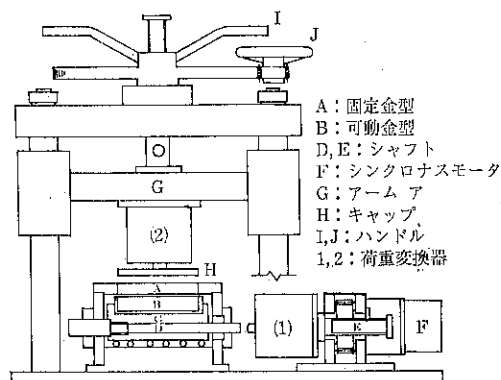


Fig. 18 直接剪断試験器 (綱川ら⁵³⁾)

定した剪断応力 τ と垂直応力 σ とを圧密応力 σ_c で割った正規化崩壊曲線 (Reduced Yield Locus, RYL) は粉体の種類により1本の曲線で表わせる場合と、圧密応力が小さいほど曲線が上方に位置して1本にまとまらない場合がある⁵⁴⁾。また、測定結果から粉体の流動性の表現について検討し、単軸崩壊応力 f_c と粉体のかさ密度 γ の比 $f_c/\gamma g$ で流動性を表現すると良いと報告している⁵⁵⁾。

この剪断法は他の研究者によっても行われ、寺下ら³⁴⁾は先に示した Fig. 8 の装置を改造して定容積剪断を行った。その結果、平均の実測垂直応力に基づく破壊包絡線より求めた内部摩擦係数は、粗粉および微粉ともに定荷重剪断による測定値と一致すると報告している。また、松本ら³⁹⁾も Fig. 11 の装置を一部改造して定容積剪断を行い、粒体については定荷重の結果と一致したが、微粉では収縮崩壊が起こり測定できなかったと報告している。

リングセルによっても定容積剪断が行われている。後藤ら⁵⁶⁾は改良リング剪断試験機を試作し、相馬砂、ガラスビーズ、炭酸カルシウム P-30 について測定を行い、広範囲の応力で短時間の測定ができ、剪断付着力の測定もできると報告している。

最近、野邑ら⁵⁷⁾は Fig. 19 に示すようにボールネジ機構を備えて精密な容積制御ができる定容積剪断装置を試作し、従来の定容積型のような膨張崩壊領域だけでなく、圧密崩壊曲線も測定できる新しい測定法を発表している。

3.3 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験は主応力が直接求められ、その方向が剪断中変化しないという特徴があり、土質工学の分野では古くから広く用いられている。粉体工学の分野では粉体層を疎充填状態で取り扱うことが多く成形が困難なためこの試験法はあまり用いられていない。高木・杉田⁵⁸⁾は粉体貯槽設計の立場から三軸圧縮法に注目し、砂、穀物、小麦粉など8種類の粉粒体について、初期充填かさ密度の違いによる内部摩擦角の変化について検討した。この結果、かさ密度が大きくなると内部摩擦角は大きくなり、なかには10度近くも変わるものがあると報告している。

圧縮成形体ではこの試験法が適しているので、原ら⁵⁹⁾はポリスチレン粉砕物を所定温度で圧縮成形し、三軸圧縮試験により成形体の初期空隙率と破壊機構の関係を調べるとともに、破壊包絡線を表わす式を提出した。また、三軸伸長試験、引張り強度との関係についても検討を行っている⁶⁰⁾。

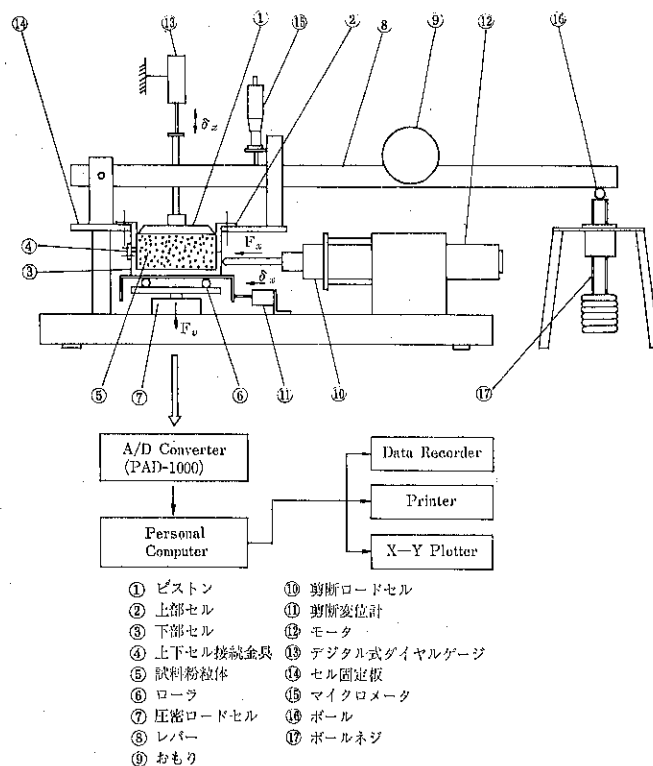


Fig. 19 定容積一面剪断試験装置 (野邑ら⁵⁷⁾)

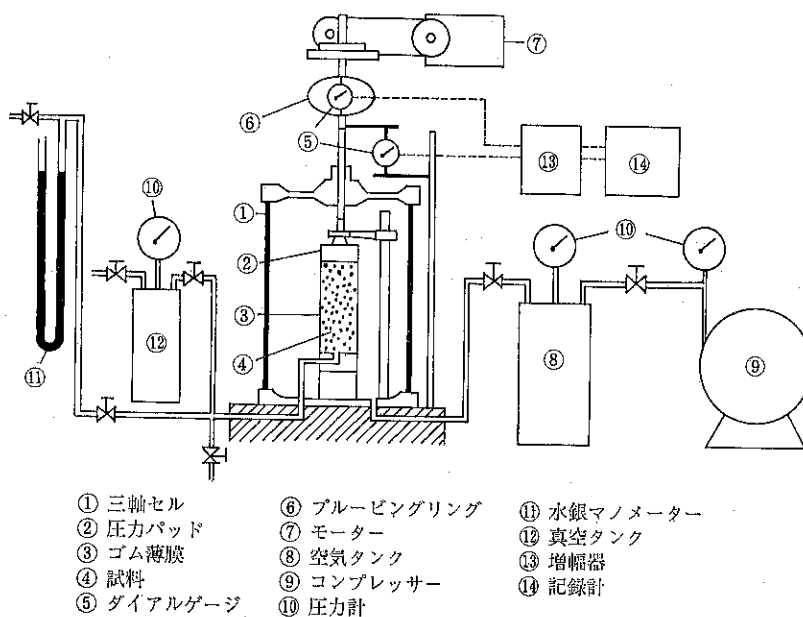


Fig. 20 三軸圧縮試験装置 (寺下ら⁶¹⁾)

一方、高空隙率、低応力での三軸圧縮試験を行うため、寺下ら⁶¹⁾は二分割ガイドリングを用いて薄いゴム膜内に粉体層を充填する方式を用い、Fig. 20 に示す装置により実験した。剪断面の状態は最小主応力 σ_3 が大きいほど明瞭になってくる。最大主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ と σ_3 からモール円を描いて破壊包絡線が求められる。また、この結果を平均実測垂直応力を用いた一面剪断試験の内部摩擦係数と比較し、ほぼ近い値を得ている。最近、横浜国大、清水建設、三井建設の三者で、定容積剪断、三軸圧縮、一軸圧縮による試験結果の比較検討がなされた⁶²⁾。三軸圧縮と剪断試験による内部摩擦角は試料の空隙率に依存し、両試験の測定結果は空隙率の全域では一致しないが、中程度の空隙率では一致した。付着性粉体の流動度については、一軸圧縮と剪断試験の結果はよく一致したと報告されている。

青木ら⁶³⁾は、垂直応力が0付近から負の領域における粉体層破壊包絡線を得るため、前述の吊下げ二分割セル式引張り試験機(コヒテスタ)を用いて擬似三軸圧縮試験を行う方法を提案している。原理は Fig. 21 に示したように、引張り応力 σ_3 の方向と直角方向に圧縮応力 σ_1 を加えて引張り破断を行うもので疎充填・低応力域のPYLが直接測定でき、単純圧縮強度 f_c も直接求めることができる。

3.4 回転型剪断試験機と貫入試験

粉体層の流動特性の評価を行うのに、静的状態から定常流れ状態へ移行する間の物性の時間的変化を調べようとする試みがある。佐藤ら⁶⁴⁾は一定充填状態の粉体層中で下向き円錐形のローターを回転させ、起動時から定常状態へと移行するトルクの時間的変化を測定している。トルクの減衰状態を指数関数で近似し流動性を示すパラメーターを求め、このパラメーターと流動性を示す他の物性値との比較を行っている。

日高ら⁶⁵⁾は粉体層の動的挙動を調べるため貫入試験を行い、粉体層崩壊挙動が静止摩擦角と動摩擦角との角度差により異なり、貫入過程曲線が階段状と連続型の二つのパターンに分かれることを示した。摩擦角度差は箱傾斜法による最大安息角と安定安息角の差 $\Delta\phi$ で表わし、 $\Delta\phi$ が大きいほど階段形状が明瞭になった。この崩壊流動

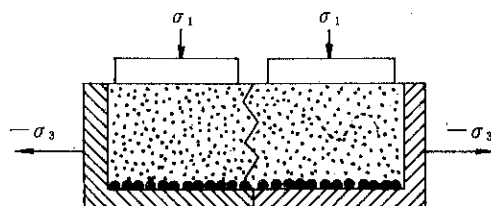


Fig. 21 三軸圧縮・引張り破断

特性をさらに詳しく検討するため、比較的密な粉体層内の貫入過程における塑性化の進行状況を X 線により観察して、粉体層の崩壊流動が一連の周期的な剪断過程から成ることを確かめた⁶⁶⁾。流動過程での不連続挙動の発生機構の理論的検討を行い、不連続の程度と摩擦特性の関係を明らかにしている。さらに、これらの結果に基づいて貫入試験により摩擦角特性の測定ができることを示している。

4. 結 言

粉体層の力学物性について付着力と粉体層の崩壊特性に限って、ここ数年間の国内の研究動向を述べてきた。引用した雑誌等の種類が僅かで、国内で発行されたものだけを調べたので見落している研究も数多いことと思われる。それでも、付着力と崩壊特性に関するものだけでこのように多くの研究がなされている。ただ、これらの力学物性測定値が実際の粉体操作に適用されている例は、貯槽設計に Jenike の装置による結果が使用されているのみであった。最近になって、ようやく力学物性測定値を他の粉体操作に直接適用しようという試みがなされるようになってきた。例えば牧野ら⁶⁷⁾の電気集塵装置とバグフィルターの捕集粉塵払い落しに PYL を使用する試み、混練所要動力や混練状態の評価に付着力や内部摩擦係数を利用する寺下らの一連の研究^{68~72)} などがある。測定についての研究とともに、力学物性値の適用に関するこのような研究がますます盛んになって、粉体操作の定量的検討が各種の装置・操作について可能になることが粉体工学の発展にとっても最も望まれるところである。

引 用 文 献

- 1) Tsubaki, J.: KONA (Powder Science and Technology in Japan) No. 2, p. 78 (1984)
- 2) 大塚昭信, 壇上和美: 粉体工学会誌, 18, 591(1981)
- 3) Otuka, A.: Proceedings of International Symposium on Powder Technology '81, p. 99(1982)
- 4) 佐野茂, 齊藤文良, 八嶋三郎: 化学工学論文集, 10, 17 (1984)
- 5) Otuka, A., K. Iida, K. Danjo, and H. Sunada: Chem. Pharm. Bull., 31, 4483 (1983)
- 6) Shinohara, K., and T. Tanaka: J. Chem. Eng. Japan, 8, 46 (1975)
- 7) 伊ヶ崎文和, 外山茂樹, 牧野和孝, 井伊谷鋼一: 化学工学論文集, 5, 341 (1979)
- 8) 矢野省三, 白波瀬弘, 林田和弘, 荒川正文: 粉体工学会春期研究発表会講演要旨集, p. 78 (1979)

- 9) 荒川正文：材料，29, 881 (1980)
- 10) 荒川正文：材料，30, 878 (1981)
- 11) 鈴木道隆，牧野和孝，井伊谷綱一，渡辺金之助：粉体工学会誌，17, 559 (1980)
- 12) Takenaka, H., Y. Kawashima, and J. Hishida: Chem. Pharm. Bull., 29, 2653 (1981)
- 13) 遠藤茂寿，江見準，金岡千嘉男，川合清一，高田敏夫：化学工学論文集，5, 653 (1979)
- 14) 壇上和美，大塚昭信：薬学雑誌，100, 893 (1980)
- 15) 壇上和美，飯田耕太郎，大塚昭信：粉体工学会誌，19, 530 (1982)
- 16) Jimbo, G., and R. Yamazaki: European Symposium Particle Technology, Preprint p. 1064 (1980)
- 17) 藤井謙治，横山藤平：粉体工学会誌，16, 686 (1979)
- 18) 彼谷憲美，北井宏美，横山藤平：第23回粉体に関する討論会講演要旨集，p. 15 (1985)
- 19) 椿淳一郎，加藤啓一，神保元二：粉体工学会誌，18, 873 (1981)
- 20) 椿淳一郎，加藤啓一，神保元二：粉体工学会誌，20, 63 (1983)
- 21) 椿淳一郎，加藤啓一，竹山俊通，神保元二：化学工学論文集，10, 402 (1984)
- 22) 神谷秀博，椿淳一郎，神保元二：化学工学論文集，11, 186 (1985)
- 23) 神谷秀博，椿淳一郎，神保元二：化学工学論文集，11, 210 (1985)
- 24) 神谷秀博，椿淳一郎，神保元二：化学工学論文集，11, 356 (1985)
- 25) 神谷秀博，古川真一，椿淳一郎，神保元二：粉体工学会誌，22, 618 (1985)
- 26) 牧野和孝，山田昌治，河原正佳，倉光鋼太郎：粉碎，No. 29, 49 (1985)
- 27) 廣田満昭，小林俊雄，大島敏男：粉体工学会誌，22, 271 (1985)
- 28) Fukuoka, E., S. Kimura, M. Yamazaki and T. Tanaka: Chem. Pharm. Bull., 31, 221 (1983)
- 29) 寺下敬次郎，宮南啓，吉田元茂，矢野武夫：粉体工学会誌，15, 515 (1978)
- 30) 寺下敬次郎，宮南啓，山本孝夫，矢野武夫：粉体工学会誌，15, 526 (1978)
- 31) 寺下敬次郎，宮南啓，矢野武夫，山本宜之：粉体工学会誌，15, 583 (1978)
- 32) 宮南啓，寺下敬次郎，尾崎徹，矢野武夫：粉体工学会誌，16, 173 (1979)
- 33) 寺下敬次郎，宮南啓，矢野武夫，岩澤哲：粉体工学会誌，17, 374 (1980)
- 34) 寺下敬次郎，宮南啓，矢野武夫，山本宜之：粉体工学会誌，17, 427 (1980)
- 35) 寺下敬次郎，山本宜之，谷川正芳，宮南啓，矢野武夫：材料，29, 876 (1980)
- 36) 寺下敬次郎，宮南啓，岡嶋雅資，古林和夫：粉体工学会誌，18, 657 (1981)
- 37) 寺下敬次郎，宮南啓，谷川正芳，岩澤哲：粉体工学会誌，18, 896 (1981)
- 38) 寺下敬次郎，小西孝信，古林和夫，宮南啓：材料，33, 1130 (1984)
- 39) 松本幹治，吉田雅裕，菅沼彰，青木隆一，村田博：粉体工学会誌，19, 653 (1982)
- 40) 野邑奉弘，森島直正，辻満彦，藤井利浩：粉体工学会春期研究発表会講演要旨集，p. 1 (1983)
- 41) 野邑奉弘，三崎佳紀，高堰博之，森島直正：粉体工学会秋期研究発表会講演要旨集，p. 14 (1983)
- 42) 鈴木道隆，牧野和孝，上田康男，山中章裕，井伊谷綱一：粉体工学会誌，18, 737 (1981)
- 43) 太田等，山崎量平，神保元二：化学工学協会第19回秋季大会講演要旨集，p. 549 (1985)
- 44) 廣田満昭，大島敏男，橋本信他：粉体工学会誌，16, 198 (1979)
- 45) 廣田満昭，大島敏男，杉原靖弘：粉体工学会誌，18, 678 (1981)
- 46) 廣田満昭，大島敏男，内藤学：粉体工学会誌，19, 337 (1982)
- 47) 廣田満昭，小林俊雄，大島敏男：粉体工学会誌，20, 493 (1983)
- 48) 廣田満昭，小林俊雄，佐野修，大島敏男：粉体工学会誌，21, 137 (1984)
- 49) 廣田満昭，岩本義樹，小林俊雄，大島敏男，粉体工学会誌，21, 69 (1984)
- 50) 村田博之，若林稔，江草忠人，粉体工学会誌，20, 558 (1983)
- 51) 廣田満昭，小林俊雄，田尻浩範，村田博之，若林稔，大島敏男：粉体工学会誌，22, 144 (1985)
- 52) 網川浩，青木隆一：粉体工学研究会誌，11, 263 (1974)
- 53) 網川浩，三枝隆：粉体工学会誌，15, 342 (1978)
- 54) 網川浩：粉体工学会誌，17, 61 (1980)
- 55) 網川浩：粉体工学会誌，19, 516 (1982)
- 56) 後藤昭博，河村光隆，松島弘輝，網川浩：粉体工学会誌，21, 131 (1984)
- 57) 野邑奉弘，三崎佳紀：粉体工学会春期研究発表会講演要旨集，p. 24 (1985)

- 58) 高木史人, 杉田稔: 粉体工学会誌, 16, 277 (1979)
 59) 原隆一, 梅屋慎次郎, 梅屋薫: 材料, 30, 78 (1981)
 60) 原隆一, 梅屋薫: 材料, 31, 929 (1982)
 61) 寺下敬次郎, 小村隆司, 宮南啓: 粉体工学会誌, 22, 11 (1985)
 62) 網川浩, 国井大蔵, 高木史人, 杉田稔, 田村富雄, 宇都宮透, 土師秀人: 第23回粉体に関する討論会講演要旨集, p. 7 (1985)
 63) 青木隆一, 菅沼彰, 元根正晴: 粉体工学会誌, 19, 538 (1982)
 64) 佐藤宗武, 藤本孝志, 宮南啓: 第23回粉体に関する討論会講演要旨集, p. 11 (1985)
 65) 日高重助, 三輪茂雄: 化学工学論文集, 7, 184 (1981)
 66) 日高重助, 桐本豊, 三輪茂雄, 牧野和孝: 粉体工学会誌, 22, 427 (1985)
 67) 牧野和孝, 山田昌治, 河原正佳, 倉光鋼太郎: 粉体工学会誌, 21, 266 (1984)
 68) 寺下敬次郎, 宮南啓, 小西孝信, 吉田純二: 材料, 30, 873 (1981)
 69) 寺下敬次郎, 木村秀夫, 宮南啓, 材料, 31, 883 (1982)
 70) 寺下敬次郎, 宮南啓, 木村照雄: 材料, 32, 958 (1983)
 71) 寺下敬次郎, 宮南啓, 木村照雄, 森正博: 粉体工学会誌, 20, 548 (1983)
 72) 寺下敬次郎, 西村清彦, 神家規寿, 宮南啓: 粉体工学会誌, 22, 634 (1985)

特許一言メモ

No. 75

——周知慣用技術集の発行について——

周知慣用技術とは、それぞれの技術分野においてよく知られる技術であるが、文献化されていない技術などのこと。したがって、これらの技術は、特許出願されても新規性に欠けるため権利化することはできないものである。しかし、実際には事業保護の立場から安全を期して特許等出願を余儀なくされることもあった。このことは、出願の増大を招くほか、審査に携わる審査官にとっても審査件数の増加と、出願技術の新規性・進歩性の判断のための調査に労力と時間を取られることになり、審査の遅れをきたすことになる。

そこで、特許庁が、出願の適正化と審査の促進を図るために各技術分野の工業会等の協力を得て散在する周知・慣用技術を収集し、系統的にまとめて文献化し、庁公報として発行している。これを審査官に配布することによって審査の質の維持と調査負担の軽減を図り、又これを外部に公表することによって出願の新規性・進歩性の判断及び権利範囲の解釈などの資料として利用させ、無

駄な出願を防止させることを目的としている。この周知慣用技術集には技術分野により構成は多少異なっているが、発明の名称、IPC技術内容の説明、図面が掲載されている。この周知慣用技術集は、昭和52年度から作成されており、今までに公表されたものは下記に示すとおりである。

なお、この技術集は、特許庁資料館及び発明協会公報販売所の閲覧所で見ることができる。

木工機械	電線ケーブル関連技術	保護継電器
靴	靴製造に関する技術	繊維関連技術
袋物	紳士服 その(1), (2)	食品製造技術
発泡成形	非金属時計バンド	金属時計バンド
農業機械	化粧品及び類似品	ころがり軸受
接着剤	コンデンサ (その1)	クレーン
(特 許 室)		

無機物とポリマーの粉碎における メカノケミカル現象の相似と対応

久保 輝一郎*
Teruichiro Kubo

1. はじめに

“比較粉体論”の立場から、粉碎における無機物とポリマーのメカノケミカル現象について考察する。無機物と有機ポリマーという異った化学種のものが粉碎という一般的な操作をうける場合に、形態的・組織的・結晶化学的・化学的におこすメカノケミカル変化に対応性がみられる。

粉碎によって無機物は微細化するが、ポリマーは分子量の低下をおこし、それに伴うメカノケミカルな変化を順次考察することとする。

2. 粉碎平衡—限界分子量(限界重合度)

粉碎という手段によって粒子径を減少させる際に、無機物においては粉碎平衡という現象がある。これは粉碎の過程において微細化の工程が、微細粉体の凝集工程とつりあって、一定の限度以上には微細化が進行せずにおこる平衡状態のことであり、一般的に認められる現象で

ある。いま $D=13\text{ mm}$ の鋼製ボールを用いたボールミルで、電解銅粉を 6, 12, 24, 48, 110 時間粉碎すると Fig. 1 に示す結果になる¹⁾。横軸は粒径、縦軸は各粒径以下の粒子総量の全量に対する重量割合 [%] を示す (積算量)。(a)において 0, 6, 110 はそれぞれ摩砕時間を示す。

Fig. 1 (a)に示すように、110時間後に得られた銅粉は二つのフラクションに分けられる (I および II)。

微粒フラクション I …… 60μ 以下の全粒子

粗粒フラクション II …… 60μ 以上の全粒子

I, II のフラクションを別々にとり、(a)の方式で各粒径以下の粒子の全量に対する重量割合を示したものが、(b)の I_0 , II_0 の分布曲線である。この I_0 , II_0 の分布曲線を示す銅粉をそれぞれ同じ条件下で、48時間粉碎すると、粒子の分布はそれぞれ I_{48} と II_{48} になる。すなわち粗粒フラクションは破砕されて微粒になり、微粒フラクションでは粒子が凝集して大きくなるため、ほぼ平行できわめて近接した曲線になる。48時間以上さらに摩

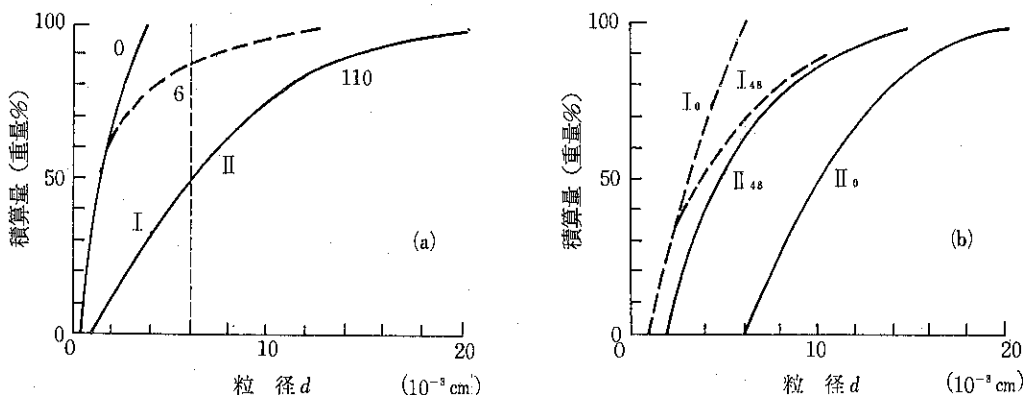


Fig. 1 粉碎平衡を示す粒度累積曲線

* 東京工業大学名誉教授
(〒158 東京都世田谷区野毛 1-12-5)

砕をつづけると、両曲線はさらに接近することが予想される。

この位置が粉碎平衡の成立した点であり、それは粉体の物理化学的性質、粉碎装置、温度、媒体（真空、ガス、液体ならびにその種類）などによって異なる。

一般に粉碎平衡の位置は、粉碎の方式にもよるが、一般に脆性物質では微小粒径の範囲内に、塑性物質では粗大粒径の範囲内になることが多く、物性による差違があらわれ、したがってメカノケミカルな考慮が必要になる。

粉碎平衡に関する実例をつぎに示す。

石英：化学的に安定で等方性に近いとされている石英を摩砕する時の摩砕時間による粒子の大きさと比表面積の関係を Fig. 2 に示す。比表面積・粒子の大きさが飽和値になって粉碎平衡になる。

フッ化カルシウム²⁾：3種の製法でつくった比表面積の異なる CaF_2 を摩砕すると、それが大きいものは摩砕によって直ちに凝集をおこすが、比較的それが小さいも

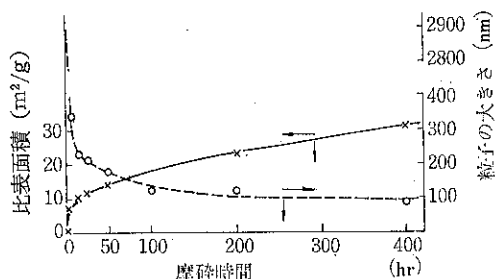
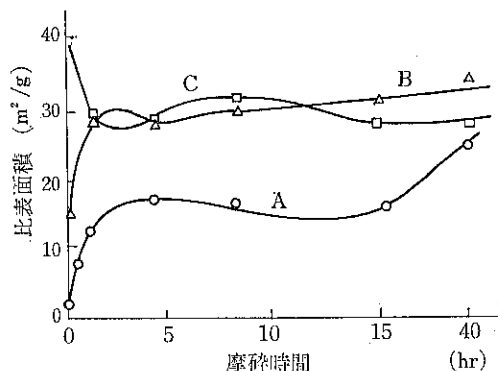


Fig. 2 石英の摩砕と比表面積・二次粒子の大きさ



- A: $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 溶液と $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 溶液からつくった CaCO_3 を HF と作用させてつくった CaF_2 (150°C で乾燥, 800°C 3時間焼成)
 B: CaCl_2 溶液と KF 溶液を室温で反応させて得た CaF_2
 C: CaCl_2 溶液と KF 溶液を 0°C で反応させて得た CaF_2

Fig. 3 フッ化カルシウムの摩砕と比表面積

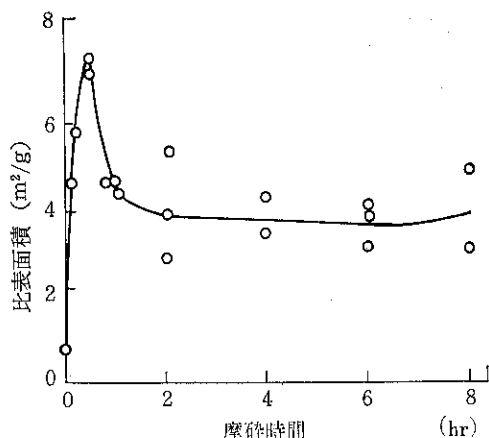


Fig. 4 合成フッ素アパタイトの摩砕と比表面積

のはさらに増大したのち、3試料ともほぼ一定の値に近づく (Fig. 3)。

合成フッ素アパタイト²⁾：摩砕による比表面積の変化と電子顕微鏡で粒子の大きさの変化を測定すると両者の結果は一致し、いったん微細化した粒子が摩砕とともに、窒素吸着量の減少する状態に再凝集し単純な増大曲線を示さない。短時間の摩砕で極大を示しあとは平衡状態になる (Fig. 4)。

このような粉碎平衡のおこる原因としてはつぎのことが考えられる。

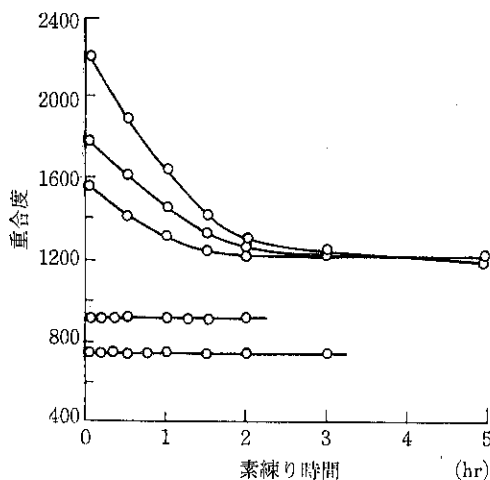
- a) 粒子の凝着：いったん微細化された粉体の表面相互間に働く引力（ファンデルワール力、静電気力、磁気的力）、水膜による凝集力や、機械的圧力・摩擦熱などによる粒子の凝集がおこる。微粉で粒界面積が大きいほど凝着がおこりやすい³⁾。また結晶化の活性化エネルギーの小さいイオン結晶についてもおこりやすい。
 b) 粉碎の応力緩和作用：すなわち微粒子凝集体中で粒子間のすべりや粒子自体の弾性変形によるものおよび粒子表面の格子欠陥・結晶粒界の不整構造の発生によるもの。

これに対しポリマーでは摩砕に相当する素練りなどで限界分子量（限界重合度）の現象がある。

ポリマーが固体状態あるいは溶液状態において機械的応力を受けて崩壊すると、分子量（重合度）が低下する。これは崩壊反応の開始直後では早く、ついでゆるやかになり、ほぼ一定の平衡値になることが、種々の実験方式を用いて認められている。

PVC、天然ゴムの低温素練り：素練り時間とともに重合度は約 1250 で一定になり (Fig. 5)、天然ゴムでは分子量が 70,000—100,000 に低下してほぼ一定となる。

この現象はポリマーのメカノケミカルな崩壊の特長で



ロール回転比 1 : 1.11, ロール間隙 0.5mm, 150°C

Fig. 5 素練りによるポリ塩化ビニルのメカニカル分裂 (後藤邦夫ら)

あって、熱や光や酸化反応による分解と全く異なる。

ポリマーがメカノケミカルにおこす結合の分裂は、引張り応力によるひきちぎりによるもので、ポリマー分子間の凝集エネルギーが大きいとそれに打克つのに必要な引張り応力も大きくなる。ポリマーの凝集エネルギーは、モノマーの種類 (化学組成) と重合度によるから、一定のポリマーでは重合度 (分子量、鎖長) が分裂の引張り応力を定めることになる。したがって一定の応力ではある重合度以下のポリマー分子は分裂をしない。これがその機械的作用条件下での限界分子量 P_l ということになる。

Fig. 5 に示した最終重合度 P_∞ は、重合度分布をもつポリマーの混合物についての平均値であり、 P_l との関係は $P_l = \frac{2}{3}P_\infty$ といわれる。したがって始めから P_∞ 以下の重合度のポリマーは、その条件下ではメカノケミカル分裂をおこさない。

ただし崩壊の最終の分子量 M_∞ (重合度 P_∞) は、同じポリマーでも始めの分子量によって異なる。それは始めの分子量分布 (MWD) が異なるためで、狭い MWD のものではこの効果は表れない。

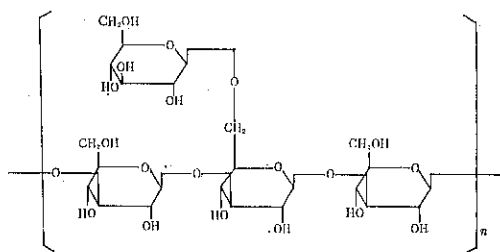


Fig. 6 Schizozan の化学構造式

剪断崩壊は温度、剪断速度、溶液の場合は溶媒の種類や濃度を変えても一樣におこるが、ただ極端な剪断を加えると、結合分裂の効率は著しく減少する。それはポリマーのからみ合いが剪断崩壊によって除かれることによる。したがって限界分子量もこれに関連することになる。

また、ガン治療薬として用いられる Schizozan (水溶性 β -1,3-D-glucan) (Fig. 6) は、3重らせん構造をもつ棒状体であり、これの希薄水溶液に超音波を照射すると、分裂の最低分子量に崩壊し、それ以下では崩壊しない⁴⁾。分裂の確率は鎖の末端部よりも中心部で大きく、一般の高分子と同様である。

ポリマーの機械的崩壊は、鎖中の結合が剪断応力 K によって“ずれ” Δl をおこす時の仕事量 $K \cdot \Delta l$ に比例する引張り応力 F によってひきちぎりをうけておこるものであるから、固体ポリマーのように凝集エネルギーが大きいものは $K \cdot \Delta l$ も大きく、 F も大きくなる。

ポリマーのメカノケミカル分裂は、一般の化学反応とは逆に温度が上るとゆるやかになることが特長である。その原因は機械力による結合の“ずれ”に対する応力の仕事量の減少と、鎖の柔軟性の増大が高温程おこりやすいからである。

3. 粒子径分布と分子量分布

無機物の粉碎に伴う粒子径分布の変化は、メカノケミカル現象を解釈する上で大切な事柄である。それは粒子径の変化に伴う物性変化がおこるからである。すなわち比表面積の変化とともに表面エネルギー・格子不整・無定形層の発生などに伴うエネルギー含量の変化がおこる。

無機物の粉碎中におこる粒子径分布は2種の機構によっておこる。一つは粒子間や粉碎媒体との摩擦によって粒子表面が削られ、ほぼ一定の粒度の微粒子を生じる表面粉碎 (摩擦粉碎) である。他は粒子表面に関係なく、粒子が分割されて粒子径が小さくなる体積粉碎 (静圧縮・衝撃圧縮粉碎) で、この方は粒子径分布の幅が広い。

粉碎の進行に伴う粒子径分布の変化として、ボールミルの場合に粉碎の進行 (消費エネルギーの増加) とともに、始め 600—1600 μm にわたっていた粒子径分布が、上記の二機構によって変化し二つのピークに分れる。これらはさらに粒子径の小さい方へ移動するとともに形が鋭鋭になり、ついで一つのピークに合一する。この場合粒子径の小さい方のピークは表面粉碎、大きい方のピークは体積粉碎によるものであることが化学工学において例示されている (Fig. 7)。

化学工学において粒子径分布を示す式には、Rosin-Rammler 式と Gaudin-Schumann 式とがあるが、こ

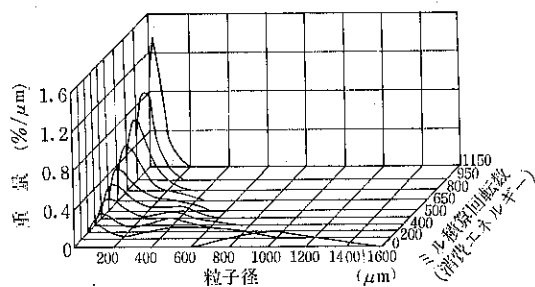


Fig. 7 粉砕の進行と粒子径分布の変化

これらの式は全粒子に対し、ある粒子径 d より大きい粒子の質量比 R を示したものである。

しかし無機物においては、粉砕物質の物性によって単純に上記のように粒子径分布の変化を示すことはできない。たとえば窯業原料（脆性物質）を粉砕する場合には Gaudin-Schumann 式が合うが、黒鉛の真空粉砕ではこの式では粒子径の大きい部分がはずれ、Rosin Rammler 式では小さい方がはずれるが、粉砕の進行とともに合うようになる。このようなことは、物質の結晶構造や物性によって粉砕の全工程が一つの分布式で表わし得ないことを示している。

一例を示すと非脆性物質である銅の粉砕についてみると (Fig. 8), 粒子径割合の連続的变化はおこらず、仲々粉砕平衡に達しない。また >0.100 mm の部分は、はじめ 9% のものがすこし少なくなったのち、35% にもなることである。鉄粉・ニッケル粉の場合も同様な現象が認められる。これらの実験では、はじめに存在しなかった粒子径の大きなものが生成すること、粒子径分布と粉砕時間に一定の関連が認められないことを示している。

粒子径分布が粉砕とともに変化すると、粒子径に依存する諸性質（比表面積・粒子の内部エネルギー・再結晶化（凝集）・無定形層の厚さ・格子不整など）にも差異を生じる。そのため粉砕の進行に伴う比表面積・溶解熱（熱含量）、かさ容積などが単調な増加または減少曲

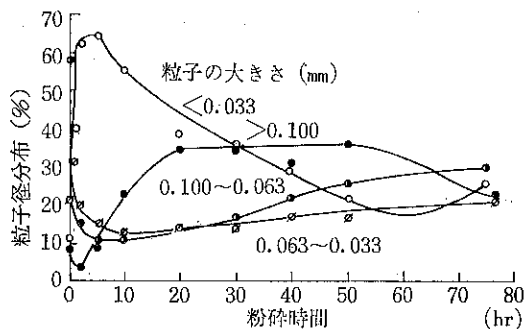


Fig. 7 電解銅粉の粉砕時間と粒子径分布

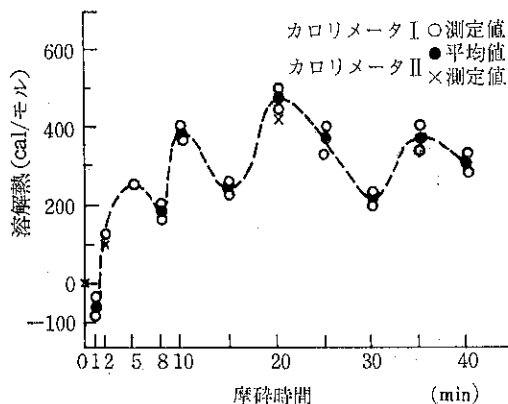


Fig. 9 ZnO の溶解熱と摩砕

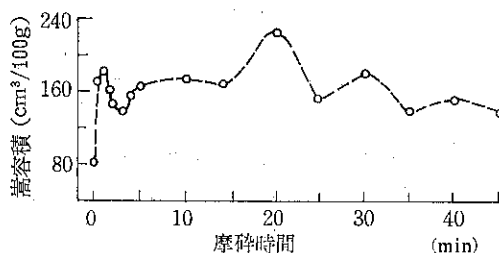


Fig. 10 NaCl の嵩容積と摩砕時間

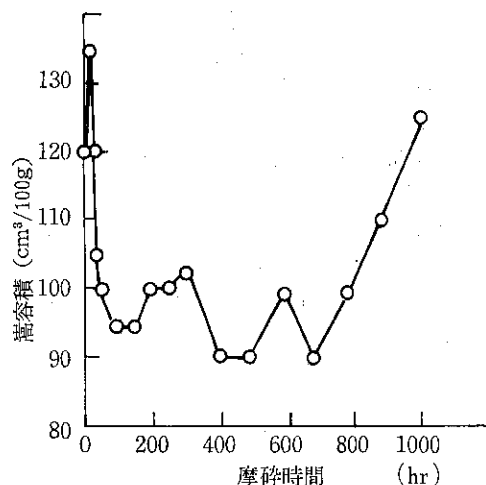


Fig. 11 カオリナイトの嵩容積と摩砕時間

線を示さないで、波状曲線を示すようになる。その例を Figs. 9, 10, 11 に示す。

他方ポリマーの機械的崩壊における分子量分布 MWD の変化については、分裂はより長い鎖状分子におこり易いとされている。これは分裂前後の重合度分布の変化から明かである。

天然ゴムの素練りにおける分子量分布の変化を GPC (Gel Permeation Chromatography) によって測定す

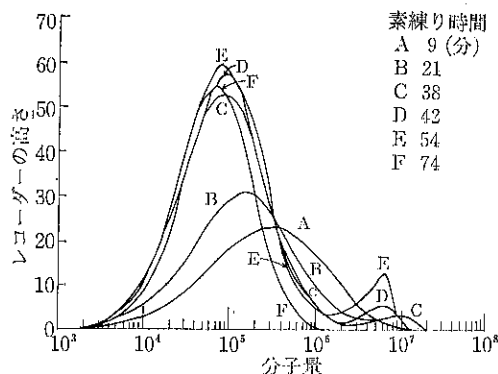


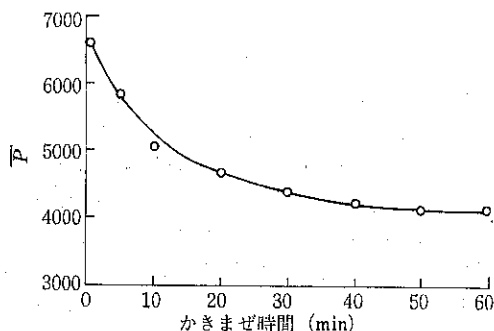
Fig. 12 天然ゴムの素練りの GPC 分析曲線
(素練り時間は分)

ると、分裂の進行とともにピークは低分子側へ移動し最小分子量は同じものになる。高分子側の小さなピークは分裂分子の再結合によるものである (Fig. 12)。

天然ゴムの空気中の素練りの場合の分子量分布を粘度法で求める式 $[\eta] = KM^\alpha$ ($[\eta]$: 固有粘度, M : 分子量, α : 一定のポリマー・溶媒系については定数, K : 定数) では MWD が狭くなると K が減少することが測定されている。

分裂後のポリマーの重合度分布を求める研究の多くは、試料の重合度が均一であるとしているが、実際にはそのようなポリマー試料は得られない。ポリマーの重合度分布 (質量分布) m_p は、統計的計算の結果示された Schulz の分布に従うことが多い。それについてポリマーが機械的に random な崩壊をした後の重合度分布関数を、 P_i 以上と P_i 以下の重合度の場合について検討した式があり、この式は PVC の加熱ロールによる素練りの場合にあてはまることが示されている。

高重合度の PVC ($\bar{P} = 6000$) 溶液を高速かきまぜによって分裂させるときは、 $P = 10^4$ 以上の分子は分裂して



PVC-シクロヘキサノン溶液 (25 g/l),
かきまぜ速度: 50m/scc, 60°C

Fig. 13 かきまぜによる PVC のメカニカル分裂 (後藤邦夫)

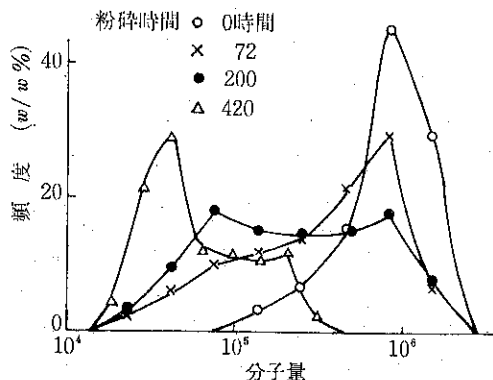
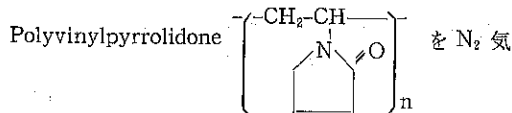


Fig. 14 窒素中でのボールミル粉碎によるポリ
ビニルピロリドンの分子量分布の変化

分布曲線の山は左へ移動して、1 hr では $P = 6000$ 以上にピークをもつ狭い幅の曲線になる (Fig. 13)。分裂は限界重合度 P_i 以上の分子だけにおこり、 P_i になると停止する。



中でボールミルで粉碎すると⁵⁾、分子量分布曲線に始め二つのピークが認められるが、粉碎時間の経過とともに高分子側の 8.5×10^4 のピークは減少し、低分子側のピークは 10^5 から 4×10^4 近くにシフトしながら増大する。これは 8.5×10^5 位の分子量のものから1回の分子鎖切断によって生成した分子は 10^5 以下のものが大部分であることを示す。 N_2 中では 10^5 以下の分子量のものははじめから切断される確率が高いと考えられる。

4. 格子不整の発生—結晶化度の低下

摩砕に伴う結晶構造の変化として、無機物とポリマーにおける格子不整の発生とそれにつづく結晶性の低下がある。

まず無機物においては、これを摩砕するときは微細化による粒子径の減少と同時に、粒子表面に格子不整が発生する。格子不整といわれるものには、結晶格子の面間隔の変化・変動、無定形構造などが含まれる。

面間隔の変化・変動は格子ひずみといわれ、完全および不完全な無定形構造は格子かく乱と呼ばれる。格子ひずみと格子かく乱はX線的にそれぞれ測定できる。

機械的に発生した格子不整の大きさは、原子間距離の平衡値からの変化による増加エネルギー (熱含量の増加) から評価できるが、実験的には定量的に対応する値として溶解熱の測定、半定量的にはX線回折図形の回折線の形状変化などから求められる。

格子不整によって物質のエネルギー含量は増大するが、その増大量は化学結合や結晶格子の様式、格子エネルギー、格子不整の様式などによって相違する。たとえば無機の層状格子において層面の不規則な異動、よじれやc軸に平行な格子膨張がおこっても、エネルギー含量の増大は比較的少ないが、対称性の高いイオン格子や分子格子では、格子定数が増加すると熱含量は著しく増大する。とくに著しい熱含量の増大は完全に不規則な(熱振動のような)格子不整の場合におこる。この場合熱含量の増大はその物質の全結晶化熱に等しいくらいになる。

機械的処理をうけた無機物の粉体の示す不安定状態は加熱によって、位置交換による再結晶化や転位密度の低下をおこして安定状態へ移行する。これは金属酸化物や水和物、Ni 上の金の薄膜を研磨してできた Beilby 層が加熱や放置によって結晶化する現象で見られる。

摩砕による微細化と格子不整の加熱による回復を酸化鉄について示すと (Fig. 15), 格子不整の回復の開始温度は粒子径の増大のそれよりはるかに低い。これは格子不整の回復は短距離の物質輸送(位置交換)の現象であるのに対して、粒子径の増大は長距離のそれであり、タンマン温度以上になる必要があるためであろう。同様なことは摩砕したルチル型 TiO_2 , ZnO , CaCO_3 などでも認められる。

結晶性ポリマーの破砕に伴う結晶構造の変化についても無機物と同様な現象が観察されている。たとえばポリプロピレンをボールミル (10^{-4} Torr, 77K, 24hr) で摩砕すると、X線回折のピークは著しく変化する (Fig. 16, a, b)⁶⁾。a は安定な単斜晶系の図形であるが、b は摩砕によって擬六方晶系の図形になったことを示す。c は b を再結晶温度より低い 358K で 24hr 熱処理したもので、これは単斜晶系の図形であるが、ピークの線幅は広く、無定形部分に対応する地の黒さが増加している。

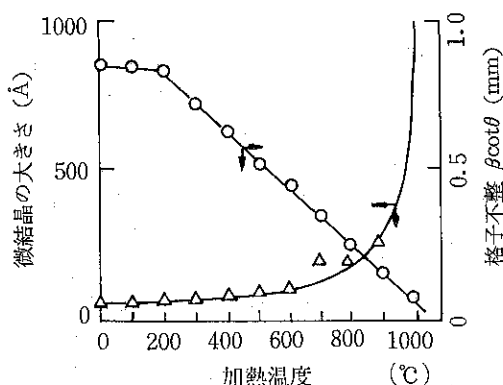
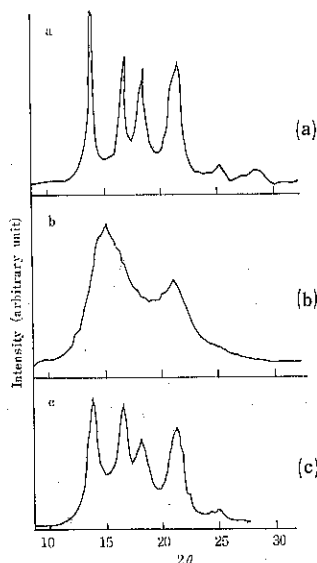


Fig. 15 摩砕した Fe_2O_3 の加熱による格子不整の回復と微結晶の大きさの増大



77K, 20hr 粉砕の前(a), 後(b), (c)381K で 24 hr 破砕した試料の加熱後。

Fig. 16 ポリプロピレンのX線回折図形。

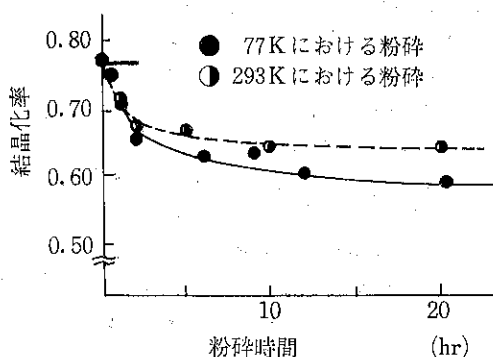


Fig. 17 ポリエチレンの粉砕時間による結晶化度の変化

これから摩砕による結晶変態は可逆的であるが、結晶化度は摩砕によって非可逆的に減少することがわかる。

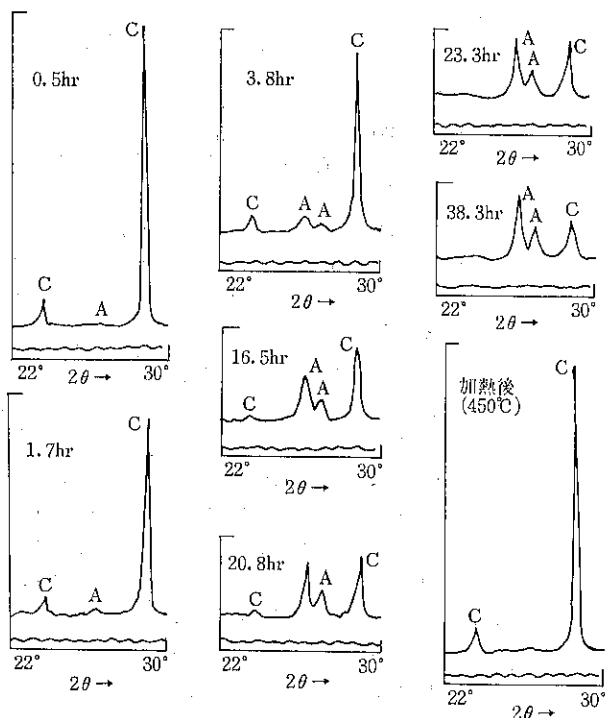
ポリエチレンについても同様なことが認められる。

ポリプロピレン、ポリエチレンの何れの場合でも摩砕によって微結晶の大きさは減少し、その内部での disorder の程度は増大しその両方が回折線の幅の拡大に関係している。さらにこれらの変化は再結晶温度以下での熱処理では回復しないということがわかる。

ポリエチレンの摩砕による結晶化度の低下を Fig. 17 に示す。これは摩砕の初期では大きくそれ以後はほぼ一定である。

5. 結晶学的転移

物質が粉砕によって微細化操作をうけるとときには、前



A—アラル石 (Aragonite) C—方解石 (Calcite)

Fig. 18 方解石の摩砕によるX線回折図形の変化

述のように格子不整・無定形化・中間結晶相などの状態をとり、エンタルピーを増大して不安定相を形成する。そこへ圧縮・せん断・曲げ・延伸などの力が相乗的に加わって、そのエネルギーが不安定相の転移や結晶化の活性化エネルギーを上まわると結晶学的転移が起こる。それらの個々の因子と転移との関係は明かでない。

無機物についての一例を示すと、方解石は摩砕によって Calcite → Aragonite に転移する (Fig. 18)。またこの Aragonite の摩砕物は加熱によって (450°C)、Calcite の結晶形に戻る。

またポリプロピレンやポリエチレンを真空中で低温摩砕すると、無機物質と同様に結晶学的転移をおこす。これを 350K、で24h 加熱すると元の結晶形にもどり、X線回折線の幅が拡大し、バックグラウンドの強さが増加する。これはクリスタライトの大きさの低下 (PP で 120Å → 76Å, PE で 200Å → 90Å)、結晶化度の低下や格子欠陥の増加に起因する。

6. 新生表面の活性と開裂末端基の反応性

無機物の摩砕によって生成した新生表面が活性に富むことは、古くから知られている。その原因の1つは固体の分散度が増大して微粉になり、それがさらに開放性

の空孔や組織をもつ状態になると、比表面積の増大によって活性が著しく増大することである。また他方では結晶格子に欠陥や不整が発生し、それらによって化学反応の平衡状態と活性化エネルギーなどが変化がおこるためである。

それにまして無機物の粉砕によって発生した新生表面は活性を増大させる重要な一つの因子である。無機物はイオン結合性のものが多いが共有結合性をするものもある。それによって新生表面の状態に差違が生ずるが、いまイオン結合・共有結合の両方をふくむシリカの場合を示すとつぎようになる。

ボールミルで石英を摩砕する場合に、球の衝突のエネルギーが石英中の Si-O-Si 結合を切断して一次粒子がさらに微細化され、ラジカルの生成 (homolysis) および荷電をもつ破面が生じる (heterolysis) (Fig. 19)。

まずこのとき電荷をもった2つの部分の生成について考える。これはシリカの脱水や有機化合物との反応などから推定される。石英の構造を二次元的に示した Fig. 20 において、●は Si⁴⁺ イオン、○は O²⁻ イオン、⊙は両者の重

なったものを示す。Si⁴⁺ には 4O²⁻ が配位し、O²⁻ はそれぞれ隣りの2個の Si⁴⁺ に共有されているから、1個の Si⁴⁺ には 1/2 O²⁻ が専属するので、その構成単位は Si⁴⁺(O²⁻/2) で示される。破線のところで新破面ができ Si-O 結合が切れると、Si⁴⁺ に O²⁻ の配位される様式は

破面のD単位 Si⁴⁺(O²⁻/2)₃ + 過剰

破面のE単位 Si⁴⁺(O²⁻/2)₃O²⁻ - 過剰

になり、シリカの内部では Si⁴⁺(O²⁻/2)₄ であるが、破破面にはDとE単位とが露出している。

その時過剰電子をもつE単位から+過剰のD単位へ電子が移行して、ポテンシャル場の減少による新生表面のエネルギー含量の低下をおこすこともある。これは石英の場合にはおこらないが、TiO₂ の時はおこる。

また石英におけるラジカルの生成は ESR によって測

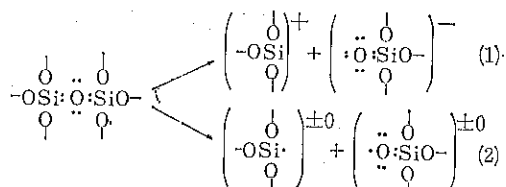


Fig. 19 石英の結合破断の様式

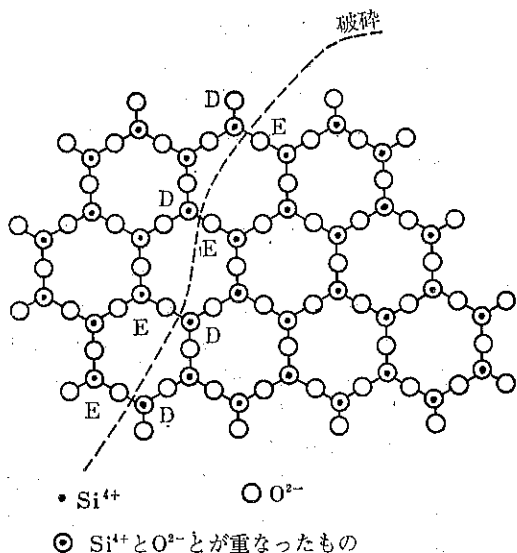


Fig. 20 石英の破碎による新断面の生成

定され、それは 300°C で再結合するが、室温では1カ月以上安定である。ラジカルは塊状の石英表面に存在するシラノール基とシロキサン基が共存することによって認められる。石英粉体に生じたラジカルは粒子の大きさによって異なるが、90-80 μm の粒子では不対電子数/g の値は 2×10^{14} 、63-56 μm では 10×10^{14} である。ZnO, Si, SiC, Ge, MgO, CaO, SrO, α-Al₂O₃, ZnS, カーボンブラック、黒鉛などでもラジカルの生成が認められている。イオンやラジカルの生成による石英表面の活性化の例をつぎに示す。

シリカのイオン性表面の反応については、融解シリカをボールミルで N₂ 気中で有機化合物たとえばメチル-5-ビニルピリジンやジメチルアミノエチルメタクリル酸中で摩擦すると両者間に結合がおこる。それらに含まれるアミノ基などが酸性染料との結合の拠点となって着色する。これは溶媒抽出や真空乾燥しても安定である。摩擦後長時間放置したシリカでは染料溶液と同様に処理しても強固な結合がおこらない。これらは Si-O-Si 結合が分裂してできたイオン性表面の作用である。

同様にスチレン中で摩擦すると $\equiv\text{O}_2\text{Si}^\oplus$ とスチレンが結合し、その末端が正電荷をもってカチオン重合をおこして、シリカ表面はポリスチレンで覆われることになる。また 1-ブタノールとの反応では Si-O-C 結合ができる。

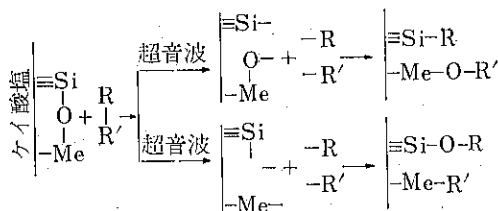
これらの場合ラジカルの反応を考えないのは、スチレンにはラジカル重合を阻止する試薬が加えられていること、1-ブタノールのラジカルへの作用は酸素原子よりもむしろ炭素原子へおこること、シリカの表面改質に効果のあるモノマーは求電子的部分 $\equiv\text{Si}-\text{O}^\oplus$ が触媒的に作

用する重合を起すことなどからである。しかしこのときラジカルの反応を全く無視することはできない。

シリカを He 中で摩擦して活性化したのは、He 中で 260 hr 放置しても活性は変化しない。

またケイ酸塩を有機液体中で超音波処理を行なうと、キャビテーションで生成する小泡の衝撃作用で強い衝撃波が発生し有機分子が分裂して有機ラジカルができる。これが超音波の作用で生成したケイ酸塩の結合の分裂部分と作用して両者の結合体ができる。この結合は両者共官能基をもたず普通の方法では相互に反応しない状況の下でおこる。ケイ酸塩としてはカオリナイト、クリソタイル石綿、合成角閃石と液状炭化水素、ゴムなどの溶液について実験されている (Fig. 21)。

活性表面による吸着性能の増大については、粉碎によって生成した新生表面における色素吸着量や等温吸着曲線の変化が認められている。相馬砂を空気中と水中でボールミル粉碎を行ったときのメチレンブルー (MB) の吸着量を測定すると、吸着量は摩擦の直後で最大で、摩擦後の経過時間とともに減少する (Fig. 22)。また MB 溶液中で摩擦すると時間が長く比面積が大きい程、色素の同一濃度における吸着量が大きく (Fig. 23)、新生表面の吸着活性が大きいことがわかる。



(MeはここではSi, AlまたはMgをあらわす)

Fig. 21 ケイ酸と有機化合物の反応 (超音波)

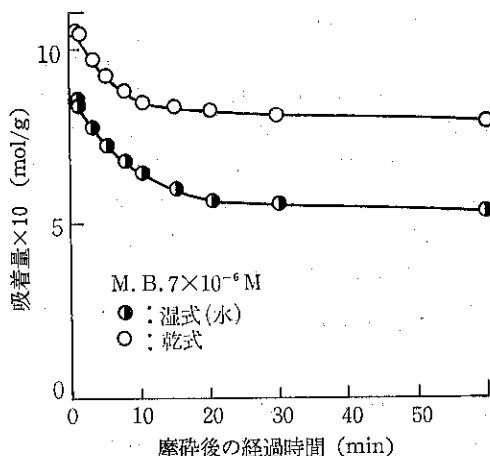


Fig. 22 摩擦後の経過時間と吸着量

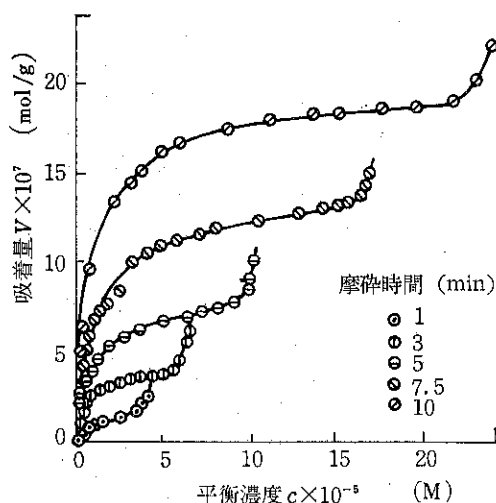


Fig. 23 相馬砂のメチレンブルーの等温吸着曲線 [Wet(M. B.)]

ラジカルによる反応性については、つぎのポリマーの場合と同様に考えられる。

共有結合から成るポリマーの機械的崩壊については、Peterlin, Zhurkov, 相馬純吉のそれぞれのモデルがある。Peterlin モデルは著しく伸張した繊維におけるメカノラジカルの生成を考える。たとえば配向したナイロン糸に応力をかけるとき、(1)生成したメカノラジカルの濃度が応力によって発生したヒズミに依存し、応力を除いても変わらないこと、(2)荷重を再びかけてもヒズミが前の変形の最大値を越えるまでは新しいラジカルは生成せず、その後にはラジカル数は増加すると考える。

結晶性ポリマーの微細構造は結晶相Cと非結晶相Aから成り、両相を貫通するタイ分子がある (Fig. 24)。

いま上下方向に引張り応力を加えると、タイ分子鎖の中最も短いものから分裂してミクロクラックができその表面にメカノラジカルが存在する。その際結晶相中の折りたたみ部分はほどけないでタイ分子だけが分裂すると仮定する。

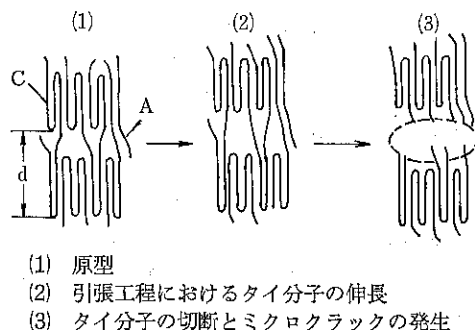


Fig. 24 結晶相Cと非結晶相Aから成るポリマー内でクラックの発生 (d: 長周期)

このモデルは結晶性ポリマーについては、機械的切断の前に大きな変形がおこるから、バルクポリマーの破壊で切断のおこる場所をタイ分子と同様に考える。

非結晶性ポリマーでは、結晶相もタイ分子も存在せず、また加えた応力が集中するような特殊な部位もないから、ラジカルの生成をタイ分子に帰することには無理がある。したがってこれらや他のエラストマーにおけるポリマー鎖の切断については、これ以外のモデルを考える必要がある。ただし加硫ゴムなどの場合は、架橋点間の分子鎖長の一番短いものから分裂して、ミクロクラックが発生すると考えることができる。

Zhurkov モデルでは、固体ポリマーが大きな応力で切断すると、一次末端ラジカル (PE のときは $\text{-CH}_2\cdot$ 、 $\cdot\text{CH}_2$) 2 個が生成する。これは活性が大きいため、近接するマクロ分子から水素の引抜きを行ない、二次生成ラジカル (内部ラジカル) (PE のときは $\text{-CH}_2\cdot\text{CH}\cdot\text{CH}_2\text{-}$) 2 個ができ一次ラジカルは消滅すると考える。

水素の引抜きは固体ポリマー中で低温 (130 K) でもおこり、隣りの原子との結合を弱める。そのため不対電子に対して β 位置の分裂の活性化エネルギーは正常の値の $1/3$ くらいになり分裂しやすくなる。ついで二次生成ラジカルがまた β 位分裂をおこして末端ラジカル $\sim\text{R}_1\cdot$ または $\sim\text{R}_2\cdot$ が再生産されこれが循環的にくりかえされる (Fig. 25)。

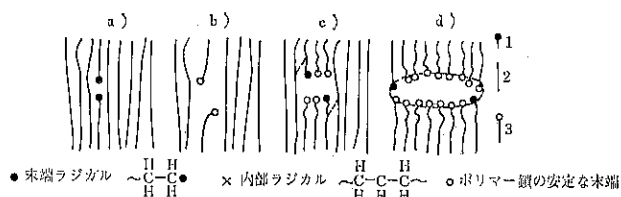
このメカノラジカルによる水素の引抜きは近接したポリマー鎖間すなわち結晶相間でおこりやすいから、一次メカノラジカルは結晶相で生成する。

PE, PP, Polycaprolactum の振動ミルで摩砕したもののついて、切断で生じた基と切断鎖の濃度 (IR), ラジカル濃度 (ESR), ミクロクラック濃度 (X線小角散乱) を測定した結果、 10^8 程度の鎖の切断によって 1 つのミクロクラックが発生することがわかる。生成直後のミクロクラックは微小容積中に活性なラジカルをふくみ、周囲にある反応性物質があると直ちに反応する。

またポリマーが応力をうけると分子中の原子価や原子間距離が変化するためヒズミで励起状態になり化学反応が促進される。

これに対して相馬モデルがある⁷⁾。このモデルでは、タイ分子に集中した応力は結晶相の分子鎖にも一様に働いて、非結晶相と結晶相の両相で同じ確率で分子鎖のずりによる切断がおこると考える。

そのとき鎖状ポリマーのモノマー間の相互作用のエネルギーは、相似の低分子間のそれ (ファンデルワールエネルギー E_v) と同程度とする。二つの鎖状ポリマー A, B 間でずり変形をおこすには、 n 個のモノマーが同時に動くことが必要で、そのためエネルギーは $n \times E_v$ 。



- ポリマー鎖の安定な末端
- 応力をうけたマクロ分子の熱的変動による一次破断で、2ヶの末端ラジカル・の生成
 - 末端ラジカルと接触するマクロ分子との作用、内部ラジカル×と安定な末端基・の生成
 - 内部ラジカル・の切断による安定な原子基と末端ラジカル・の生成
 - マクロ分子鎖の崩壊によるサブミクロクラックの生成

Fig. 25 Zhurkov モデル：サブミクロクラックの発生の機構

である。 n が大きくなると主鎖 $\text{C}-\text{C}$ の結合エネルギー $E_{\text{C}-\text{C}}$ より大きく、 $nE_v > E_{\text{C}-\text{C}}$ となる。このときは長いポリマーが応力によって互にずれるよりも、主鎖切断の方がエネルギー消費が小さいからメカノラジカルが生成する。したがって限界重合度 n_c は、

$$n_c \times E_v = E_{\text{C}-\text{C}}$$

いま $E_{\text{C}-\text{C}} = 83 \text{ kcal/mol}$, $E_v = 1.0 \text{ kcal/mol}$ とすると、 $n_c = 83$ (長さ約 $93 \text{ \AA}$) となり、これから分子量の異なる n -パラフィンや低重合度の PE ($n < 71$) では、メカノラジカルは生成しないが (ESR), $n = 100$ では生成し上記の n_c と大体一致する。したがって $n = 80 \sim 100$ の PE が平行に配列していると鎖のずり移動はおこらず主鎖の切断がおこる。

Peterlin モデルでは、タイ分子が伸びきっても、結晶相の折りたたみ部分がずれて解けるなら鎖は切断されないから、タイ分子の切断には折りたたみ部分は応力で解けないことを仮定している。

このことは相馬モデルによれば、PE の場合普通折りたたみ周期は $100 \text{ \AA}$ であるから説明がつく。

以上のことから Peterlin モデルにおけるタイ分子鎖が切断するとすれば、メカノラジカルは非結晶部分に生成し、Zhurkov モデルにおける水素の引抜きは結晶性部分でおこるから、一次ラジカルはそこに生成する。

この結果、両モデルは相馬の限界重合度の考えから統一的に理解できることになる。

7. 混合摩砕によるメカノケミカル合成

固体状態における混合摩砕によって、新種の化合物・物質を合成できることは、無機物および有機物に共通した事柄である。

無機物の固体混合物間に成立する熱力学的平衡は、混

合物成分の拡散の速度によってきまる。固体が粉碎操作をうけると、構造中にふくまれる空隙・欠陥の数が著しく増して拡散が促進される。たとえばイオン結晶ではイオン伝導性が增大するため、熱力学平衡への到達速度が増大する。

また同時に摩砕による反応性の変化は、粒子径の変化に伴う単位容積当りの表面エネルギーの増加によっても促進される。

そのほか転位・無定形化などの格子不整も反応性の増加に関連する。

これらによっておこる固体混合物間の反応性の増大の例は非常に多い。

すなわち同形の物質、たとえば KCl と KBr , CaCO_3 と MgCO_3 , SrCO_3 , BaCO_3 との混合

摩砕による固溶体の生成、 CaO や BaCO_3 と TiO_2 系の反応によるチタン酸塩の生成、 $\text{CaF}_2-\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ 系の反応によるフッ素アパタイトの生成、金属と S・黒鉛・P・ I_2 などとの混合摩砕による硫化物、炭化物、リン化物、ヨウ化物の生成、 $\text{MO}+\text{WO}_3$ 系の反応でタングステン酸塩の生成、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ と金属酸化物からフェライトの生成、その他ケイ酸塩、モリブデン酸塩の生成など非常に多くの化合物が合成されている。

ポリマーにおいては2種またそれ以上のものを不均一相や溶液系で反応させて、組成と構造の異なるブロックあるいはグラフト共重合体を生成させることができる。これは20年以上も前から行われてきた。

たとえば PE, PS, PVC, PMMA, Poly (Styrene-co-acrylonitrile) に少量のエラストマーを加えてタフネスを改良するとか、天然ゴムに異った活性基をもつポリマー (または充てん剤) をグラフトさせて補強することなどはその例である。このようなポリマーの性質の改変は合成化学的に行われるほか、メカノケミカルに行なうことができる。

すなわち機械的に加えた弾性エネルギーによって、ポリマーにラジカル開裂をおこさせて活性なメカノラジカルを生成させ、周囲の化学物質との反応によって、グラフト重合・ブロック重合・錯体形成反応などをおこさせる。これらの反応ポリマーの機械的活性化・破断・崩壊にいたる超分子構造の再編成などの過程で、メカノケミカル反応をおこすラジカル・の生成によると考えられている。その場合ポリマーの構造、ポリマー間の相溶性、不純物 (天然ポリマーでは重合妨害物・合成ポリマーでは酸化防止剤など)、温度、圧力、機械的崩壊速度の大小、装置などによって反応経過が影響をうける。

反応をおこさせる操作は素練りブレンド・溶融ブレンド・溶媒キャストブレンド・ラテックスブレンドなどに

よる。

メカノケミカルな重合反応は、一端できたブロック・グラフト共重合体がつづいて重合性のラジカルに分裂して、多セグメントの共重合体となり、ゲル化し橋かけ構造をつくり、極めて複雑な構造のものになりその制御はむづかしい。

これらの反応はつぎのいろいろな場合におこさせることができる。

(1)ポリマー——ポリマー系の共重合によって、ブロック共重合体・グラフト共重合体・橋かけ構造・さらに複雑な重合体などが生成する。これらの例は PE-Poly (ϵ -caprolactam), PE-エチルセルロース, PVC-フェノール樹脂, PVC-PMMA, PVC-合成ゴム, 天然ゴム-ポリマーなどの場合の例がある。

(2)ポリマー-モノマー系の共重合によってもブロック共重合体ができる。これらの例としては, PET, Poly (ϵ -Caprolactam) とビニルモノマーとの反応によるグラフト化, 天然ゴムとビニルモノマー, ポリマーと重合性モノマー, Poly (tetrafluoroethylene) 粒子表面上の共重合, セルロースその他の天然ポリマーとモノマーとの反応などが研究されている。また溶液状態のポリマーの超音波の作用による反応についても研究されている。

(3)ポリ縮合についても PET, ポリアミド, セルロース, PVCなどを支持体とする反応がおこり, PET-アミン, Poly (ϵ -Caprolactam) と塩化セバシン酸の反応などが研究されている。

(4)ホモ重合・共重合については, 重合性の小さい化合物に機械的エネルギーを与えて反応をおこさせる例がある。たとえば ACN, St を単独または混合物を摩擦するときのホモ重合体・共重合体の生成量についての研究がある。

8. おわりに

以上思いつくままに無機物とポリマーの粉碎においておこる相似・対応するメカノケミカルな諸現象について比較してみた。機械力が加わる場合に化学結合性の差異や物理的・化学的性質における低分子・高分子性の相違にかかわらず、両者において上述のような諸現象がみられるのは興味が深い。ここで問題となるのは、両者の相互作用に関することで、それぞれの機能性を利用することによって相互作用を増大させ、無機物とポリマーの結合した複合体的物質をつくり得ることである。これは広い応用面が考えられ、これらは今後さらに発展してゆく分野である。ここではそれに触れることはなかったが、これについては拙著「無機物質とポリマーとの相互作用に関する序論」(「無機質とポリマーとの相互作用」の第1章, テクノアイ社刊(1986))にのべてあるので参照していただきたい。

引用文献

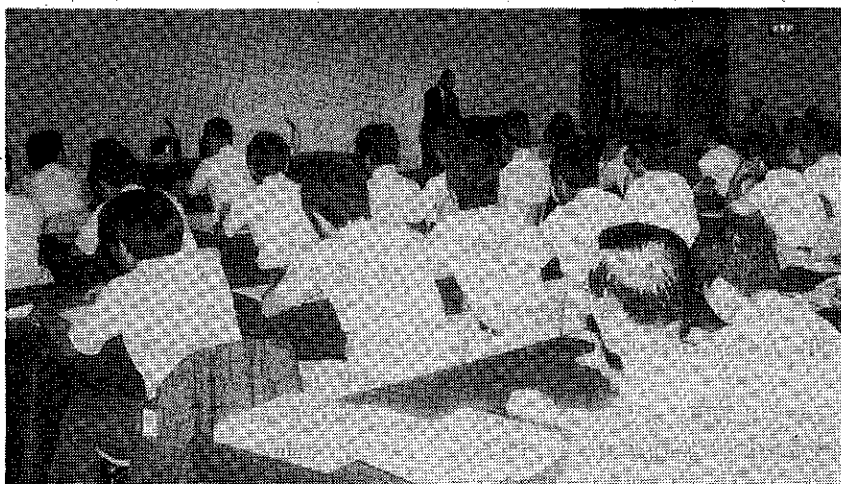
- 1) R. Schrader, W. Dusdorf, Kristall u. Technik, 1 [1] 59 (1966).
- 2) 久保輝一郎, 宮崎高嶺, 工化, 71, 1301 (1968).
- 3) R. Polbe, Chem. Ing. Technik 40, 1057 (1966); W. Pietsch, Can. J. Chem. Eng. 47, 403 (1969); H. Krupp, Advan. Coll. Interf. Sci., 1, 111 (1967); 荒川正文・安田真一, 材料, 26, 46 (1977).
- 4) T. Yanaki, K. Nishi, K. Tabata, T. Kojima, J. Appl. Polym. Sci. 28, 873 (1983).
- 5) 金庭延慶, 池川昭子, 材料, 20, 720 (1971).
- 6) N. Kurokawa, J. Sohma, Polym. J., 11, 559 (1979).
- 7) T. Kawashima, S. Shimada, H. Kashiwabara, J. Sohma, Polymer J., 5, 135 (1973).



第19回 粉体工学に関する講演討論から

—粉粒体の注目すべき物理的挙動とその利用—

編 集 部



粉体技術談話会主催“第19回 粉体工学に関する講演討論会”が昭和60年8月28日（水）東京のサンシャインプリンスホテルで開催された。

“粉粒体の注目すべき物理的挙動とその利用”をテーマに、粉粒体の静電気現象、凝集・分散現象に焦点を絞って活発な講演と討論が行われ、200名を越える出席者のもと盛況裡に終了した。

ここに当日の内容を要約し、報告する。

プ ロ グ ラ ム

◎開 会 換 拶

中 部 大 学 教 授
粉体技術談話会会長

吉 田 哲 夫 氏

◇メインテーマ：粉粒体の注目すべき物理的挙動とその利用

◎セッション1 テーマ：粉体と静電気現象

司 会

大阪府立大学教授

向 阪 保 雄 氏

講演「静電気と粉体現象」

東京大学教授

増 田 閃 一 氏

コメント「サブミクロン粒子の荷電と静電エアフィルタ」

金沢大学教授

江 見 準 氏

コメント「電場における粉体層付着力を中心に」

化学技術研究所

伊ヶ崎 文 和 氏

コメント「粉体の帯電量測定について」

細川粉体工学研究所

横 山 豊 和 氏

◎セッション2 テーマ：粉体の凝集・分散現象

司 会

京都大学名誉教授

吉 岡 直 哉 氏

講演「粉体の凝集・分散現象」

名古屋大学教授

神 保 元 二 氏

コメント「粉体の凝集現象に関する2, 3の研究」

東京水産大学教授 青木隆一氏

コメント「高速気流による粉体粒子の気中分散に関する最近の話題」

東京大学助教授 菅沼彰氏

コメント「磁性粉体の混練と分散状態の評価」

大阪府立大学教授 宮南啓氏

◎開 会 挨 拶

細川粉体工学研究所社長
粉体技術談話会 副会長

細川 益男氏

セッション 1

テーマ：粉体と静電気現象

1) 講演「静電気と粉体現象」(増田閃一) 概要



静電気の引きおこす静電現象の内①荷電(帯電)現象, ②力学現象, ③放電現象にポイントを置き, 幅広く多くの具体例を交えながら, ともしればむしろかしくなる話をわかり易く講演した。

まず静電気現象は, 粉体の呈する現象の一部と位置づけ, まだ十分に理論的に解明されていない分野であるが, 多くの粉体分野で有効利用されている。その応用分野の内一番大きいのはコピー機およびトナー等の関連分野で約3兆円の市場規模である。又, 超 LSI, バイオの分野での超微粒子除去技術も応用分野の一つである。

荷電現象の中で, 演者の長年の経験により特に強調した事は“荷電して欲しいときはなかなか荷電しなく, 逆に荷電して欲しくないとき荷電し, 付着, 凝集のトラブルの原因となる”ことを粉砕を例に述べ, 荷電する場所が粒子の表面か表面下の深い所かが重要であることも併せて強調した。

力学現象については, クーロン力, 細胞融合に利用されているじゅず玉形成力, 各種工業的装置にも適用されている電界カーテン等について具体例をもとに紹介した。

放電現象についてはコロナ放電について述べ, 各種荷電装置の原理と特徴にも言及した。

2) コメント「サブミクロン粒子の荷電と静電エアフィルタ」(江見 準) 概要



エアフィルタの集塵性能を向上させる観点から

①気流中の超微粒エロゾルにどうやって荷電させるか, ②どういう機構でエアフィルタで捕集されるか

という点について実験的に検討

し, その結果を報告した。

すなわち, ステアリン酸のエロゾル粒子を DNA (微

分式電気移動解析装置), Am-241 単極荷電装置を通して多重荷電粒子とした後, DMA(II)に通じ, 任意の荷電数をもつ粒子を取り出すことができるとしている。これらの装置を用いて荷電特性を調べている。

又, 最近注目されているエレクトレットフィルタ(永久分極を起こしている繊維よりなる帯電フィルタ)を用いて, 粒子が荷電しているか否かにより, エアフィルタの性能にどの程度の効果があるかについて, 理論的, 実験的に検討した。

その結果, サブミクロン粒子をこの帯電フィルタで除去する場合, 粒子に荷電を与えることにより効率が大幅に上昇すると報告している。

3) コメント「電場における粉体層付着力を中心に」

(伊ヶ崎文和) 概要



電場における粉体層付着力について, 理論的, 実験的に検討した。その結果, 付着力は印加電界強度のほぼ1乗に比例し, 温度上昇と共に増加することを報告した。又, 粉体粒子の挙動を電氣的に制御することについて検討し,

そのためには他の付着力が作用しない状態で粒子を扱うことが得策であるが, 静電写真法におけるトナーのように正確に調整された条件下においては, 静電気現象を利用した粉体の制御は可能であると述べた。

4) コメント「粉体の帯電量測定について」(横山豊和)

概要



粉体の特性を評価したり, 他の諸現象との関連を把握するため粉体の帯電量を測定する必要性が高まったとし, その帯電量を測定する方法を紹介した。

粉体の帯電量測定法には, 大きく分けて粉体の全帯電量あるいは平均的な帯電量が得られるものと, 個々の粒子の帯電量又は帯電量分布が得られるものがあるとして次表のように分類した。それぞれの測定法について, その原理, 特徴を述べた。

平均帯電量測定	ファラデーケージ法										
	空間電位法										
	ブローオフ法			ケージブローオフ法							
				マグネットブローオフ法							
帯電量分布測定	力の方向				水平方向		鉛直方向				
					x(r)	y(θ)	z				
	直流電界法	気なし	ミリカン法					(ϕ_B)	(E)	(V)	
			直立平行電極法			(E)	(V)		(ϕ_B)	(V)	
		気あり	チャージスペクトログラフ	平行電極型	水平電界式	(VF)			(ϕ_B)	(V)	(E)
				垂直電界式	(VF)	(E)	(V)	(ϕ_B)	(V)		
			円筒型	(E)	(V)		(ϕ_B)	(VF)			
				2重円筒型モニタアナライザ			(E)	(V)		(ϕ_B)	(VF)
		交差電界法			(E)	(V)		(ϕ_B)	(V)		
		スペクトロメータ法			(E)		(E)	(ϕ_B)	(E)		

(E) : 直流電界から受ける力

(ϕ_B) : 交流 " "

(E) : 特殊 " "

(ϕ_B) : 重力、浮力

(V) : 静止気体からの粘性力

(VF) : 気流からの粘性力

5) 討 論 (司会: 向阪保雄) Q: 質問, A: 回答
Q₁: 接触帯電の所で電気抵抗の大きいものは凝集しやすいという説明があったが、プラスチック粉の場合粒子表面は⊕に帯電し、かえって反発があると考えるが、

A₁ (増田): 例えばポリエチレンの粉の場合、壇の中に入れておくと粒子同志が接触して必らず帯電する。これは同種類のポリエチレンでも表面状態が異っているからである。すなわち、表面の電子をトラップする場所の単位面積当たり又は単位エネルギー当りの(電子)密度が表面の場所毎に異っているため、接触すると電子がA点からB点へと移る。又イオンの移動で電子が移る場合もあり、粒子同志が接触すると必らず帯電するといえる。

Q₂: 粉碎の場合の帯電について、特に表面の深い所での不可逆的帯電は起るか。

A₂ (増田): 粉碎の場合の帯電については色々な説があるが、その1つの説は、電気的に中性の物質が破碎されAとBに分れた場合、それぞれ破砕片は電気的に±0の状態ではなくA⁺¹に帯電するとB⁻¹に帯電し、A⁺²であればB⁻²となる。又別の説では、破断面から電子が飛び出して破砕片粒子は⊕に帯電するという。しかし、帯電によって生じた電子又は欠陥がどうい程度のレベルにトラップされているが問題で、シャロー(浅い)トラップの場合電荷は時間と共に消失するが、ディープ(深い)トラップの場合不可逆帯電として残る。従って、何らかの方法、例えば電子ビーム等でディープトラップに電子を打ち込んでやるなどを行わないと不可逆帯電は起らない。

Q₃: 実際の空気中には⊕又は⊖に帯電した粒子もあり、それらが帯電フィルタであるエレクトレットフィルタで

捕集される場合どのように考えるべきか。

A₃ (江見): 空気中の微粒子は無電荷のものが一番多く、⊕および⊖に荷電したものが正規分布に近いボルツマン平衡といわれる頻度分布状態で存在している。講演の中では無電荷の場合と荷電している場合について述べたが、各成分のフラクションに従って捕集効率を計算した値と実在の空気中の実験データとがびたりと一致する。フィルタの繊維と同符号の荷電粒子は捕集されにくいのではないかという点については、エレクトレットの繊維は前面が⊕に帯電し裏面が⊖に帯電しているため、⊕に荷電した粒子は前面で反発し後面で引られる。それらの平均的な効果が捕集効率として表わされる。

Q₄: エレクトレットフィルタの実用化の現状は如何。

A₄ (江見): 工業的に実用化されていないが、圧損が低く捕集効率が高い点からクリーンルームのヘッパフィルタとして使用できるのではないか。経済面で問題となっているものと思う。

Q₅: エレクトレットフィルタは湿度の影響を非常に受け易い点、および粉塵捕集に使うとじゅづ玉状となり普通のフィルタとして使いにくいのではないか。

A₅ (江見): 確にそのような欠点があるが、クリーンルームにおけるヘッパフィルタとして使う場合、循環エア中で用いるため汚れない。又水洗して乾燥すると再生できる特徴がある。

A₆ (増田): エレクトレットフィルタにイオン風を通すとその効果が一時的になくなる。しかし、将来エレクトレットフィルタの材料が水分層を形成しないものになればかなり工業的に利用されるであろう。

セッション 2

テーマ：粉体の凝集・分散現象

1) 講演「粉体の凝集・分散現象」(神保元二) 概要



粉体の凝集と分散に対する関心の高まりの背景について先ず述べ、これらの現象に対する研究の現状と今後の方向について講演した。主な項目として、

- ・付着・凝集のメカニズム
- ・付着・凝集に及ぼす影響因子

と気中および液中における付着力の測定結果

- ・気流中および液体中の凝集粒子の破壊
- ・各種の分散機

微粉体の付着によって形成された凝集体を破壊するためには、まず凝集しあう力とそのメカニズムを知る必要がある。そして破壊のメカニズムについて、加えられた力の大きさとその形式を知る必要がある。

それらの研究はまだ始まったばかりといつてよく、非常に広い分野に亘っていて、現象そのものが複雑で、体系的な研究を妨げている。

2) コメント「粉体の凝集現象に関する最近の2, 3の研究」(青木隆一) 概要



Powder Technology 誌に掲載された粉体の凝集現象に関連する論文3編の紹介を行った。標題は、

- ◎ “添加剤による粉体のバルク特性”

食塩、大豆蛋白、コーンスターチをホストパウダとし、4種の添加剤を混合して圧縮試験によりその効果を評価した。

- ◎ “NaCl コンパクトの圧壊強度に対する粒子間摩擦及び水分の影響”。

- ◎ “サブミクロン粒子を含む粉体の凝集におけるファン・デル・ワールス力の役割”

3) コメント「高速気流による粉体粒子の気中分散に関する最近の話題」(菅沼彰) 概要



高速気流により粉体粒子を分散させる技術について、フルイディクス分級器に取り付けた分散器、スーパーレタのスリット、ターボクラシファイヤに付加したディスプレイノズルおよび湿潤粉体用インジェクタの4種の分散器を紹介し、それぞれの構造、特性について言及した。また、湿潤粉体用インジェクタでの分散実験結果を報告

し、非常に良く分散していると述べた。

4) コメント「磁性粉体の混練と分散状態の評価」(宮南啓) 概要



磁気テープ用磁性塗料粉体をセルフクリーニング形式の連結混練機に入れ、有機溶剤および結合樹脂を一定量供給し、混練を行った。混練および分散状態の評価を混練トルク、磁性塗料としての特性、およびX線マイクロアナライ

ザー(XMA)による観察等によって行った。

5) 討 論 (司会：吉岡直哉)

Q₁: 湿式粉碎においてアルコールを用いるメリットは、

A₁ (神保): 水で反応する場合、又は水に対しぬれの悪いものの粉碎の場合、又は粉碎助剤としてアルコールの方が粉碎速度が向上する場合等が考えられる。

Q₂: ファン・デル・ワールス力を計算するとき、粒子間距離をどの程度に考えたら良いか。

A₂ (神保): 私はファンデルワールス力を計算してもあまり意味がないと思う。即ち、この計算値は完全な球体と球体とがある間隔を保っているときの計算であって、実際はもっと複雑な形状と相対関係を保っていて、現時点では計算できない。付着力に影響しているのは距離よりももっとマクロな接触面積であるとか、接触している接触面の中心と引張り方向とのズレ等であり、それの方が重要であると考えられる。

Q₃: 凝集体の空隙率はどのようにして測るか。

A₃ (植上): 凝集体が固いものであれば透過法を用いて測定したことがある。

A₃ (仙名): 水銀ポロシメータを用いて凝集体の空隙率が測れる。又ピクノメトリを用いても或る程度は測れる。

Q₄: 粒径が小さくなると重力(自重)に比し付着力が大きくなり、付着力が支配的となると聞いたが、その境界はどのように考えたらよいか。

A₄ (神保): 重力(自重)と付着力とが同じオーダーであれば、粒子はくっついたり離れたりの状態で、どれが支配的ということはいえない。通常の微粉はこの範囲である。ただ、どちらかが10倍とか100倍とかのオーダーの差となれば大きい方が支配的といえる。しかし、我々の扱う現象の多くは自重よりも流体抵抗の影響を考えねばならない。通常の流体操作における流体抵抗は重力に近いオーダーであるが、ジェット流体中等のように数10倍の流体抵抗が作用する場合は付着力と流体抵抗との関係になり、支配的となる両者の境界は粒径の小さい方の領域にシフトする。

新製品紹介

ホソカワミクロン ファインシャープセパレータ

東京事業本部*

1. 概 要

ホソカワミクロン ファインシャープセパレータ (FSS-0 型) は、分級操作に必要な供給機、分級機、捕集機、ブロアーをコンパクトにまとめた実験室スケールの分級装置で、コンピュータ制御システムにより操作性の優れた高性能分級機である (Photo. 1)。

近年、ファインセラミック、電子機器、複写機器、医薬品等の最先端技術での超微粉領域の高精度分級が要望されてきた。

ホソカワの分級技術は、昭和30年にミクロンセパレータ (MS 型) を完成以後、永年にわたる分級操作技術の蓄積とたゆまぬ研究開発により、昭和54年にスーパーセパレータ (MSS 型) を完成した。さらに多くの改良を加え、高精度のラボ用機ファインシャープセパレータ (FSS-O 型) を完成した。

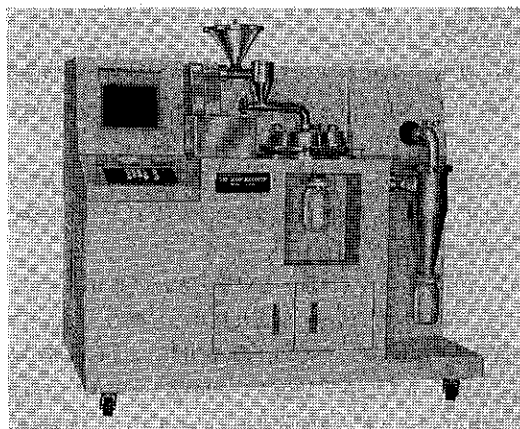


Photo. 1 ホソカワミクロン ファインシャープセパレータ

* ホソカワミクロン株式会社東京支店
(〒170 東京都豊島区東池袋3丁目1-1 サンシャイン60内)
Tel (03) 986-8661 (代)

特に、操作面の充実を図るため、コンピュータ制御システムを独自に開発し、最適運転条件の選定と安定した運転が得られる、非常に使い易いコントロールシステムとした。すなわち、テンキー操作によって、テレビ画面との対話形式で分級操作条件をインプットすることにより、最適運転条件で自動運転・停止ができる。

2. 構 造

ファインシャープセパレータは、特殊分級ロータの高速回転による強制渦流型分級機である。Fig. 1 にその構造を示す。

原料は、スクリーフィーダにより定量供給され、空気輸送で分級機上部より投入される。供給された粉体は、高速回転する分散羽根により、機械的に分散されて、すなわち完全分散状態で分級室に供給される。各粒子には、分散羽根の回転により遠心力が与えられ、旋回状態で分級室上部より入り、分級ロータによる強制渦流に従った粒子軌跡を描き分級される。分級室内では、ルーバーからのジェットエアにより、壁面付近の付着凝集粒子を分散して、整流した旋回気流にのせて、分級ゾーンへ送り込む。高速で回転する分級ロータの遠心力とブロアーの吸引による求心力のバランスによって分級径が決まる。すなわち、分級ロータの回転数とブロアーの

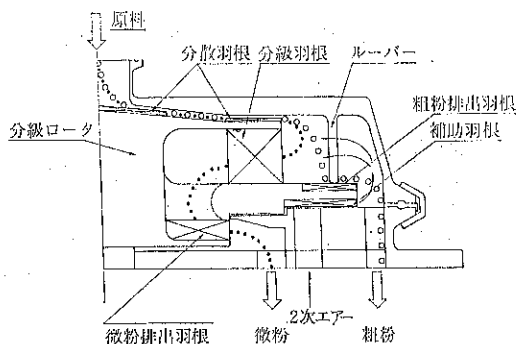


Fig. 1 ファインシャープセパレータ構造断面図

風量の変更によって、分級径が容易に調整できる。

粗粉は粗粉排出羽根により分級室から外へ、速やかに排出され、捕集ビンに捕集される。

微粉は分級ロータを通過した微粉だけを微粉排出羽根により速やかに系外に取り出し、サイクロンにて製品として捕集される。さらに、カートリッジフィルターにより汙過し、清浄空気としてブロアーに吸引、排気される。

Fig. 2 にファインシャープセパレータによる繰り返し分級の原理図を示す。

3. 特 長

(1) サブミクロンの高精度分級が可能

特殊ロータの高速化による強力な分散機構とルーパによる繰り返し分級と分級室内での均一な分級作用力により、サブミクロン粒子のシャープな分級ができる。

(2) コンピュータ制御システムによる全自動運転

任意の分級径をコンピュータにインプットすることにより、コンピュータが操作条件を選定して、最適分級条件で自動運転できる。運転中は、分級ロータの回転数、ブロアーの風量およびスクリュウフィーダの回転数をコンピュータでコントロールしているため、シャープで安定した分級ができる。

(3) 使い易い実験室スケールの分級装置

分級操作に必要な一連の機械、すなわち、供給機・分級機・捕集機・ブロアーとコンピュータをコンパクトにまとめた実験室スケールの分級装置である。

運転操作は、テレビ画面に表示される分級条件をテンキーで入力するだけで、コンピュータが最適運転条件を

選定し、自動運転制御するため、非常に簡単で容易である。ワンタッチで分解・組立ができ、清掃が簡単にできる。

4. 標準仕様

ホソカワミクロン ファインシャープセパレータ (FSS-0 型) の標準仕様を Table 1 に示す。

Fig. 3 に外形図を示す。

5. フローシート

ホソカワミクロン ファインシャープセパレータ (FSS-0 型) のコンピュータ制御システムフローシートを Fig. 4 に示す。

6. 分級事例

ファインシャープセパレータ (FSS-0 型) による各種粉体の分級結果を Fig. 5 に示す。

本図は、原料粒度分布と収率を考慮した微粉と粗粉の粒度分布を合せて図解したものである。微粉と粗粉の粒度分布の交点に分級径である。すなわち、部分分級効率曲線の50%分級径 (原料中の頻度が微粉と粗粉に半々に分かれた点) を示す。図中、分級精度 S (シャープネス) は部分分級効率の (25%径) と (75%径) の比である。

$$S = \frac{d_{25}}{d_{75}} \quad [-]$$

分級性能を評価する値である。

Table 1 ファインシャープセパレータ (FSS-0) 標準仕様

材 質	粉接部 SUS 304
電 源	200/220V, 50/60Hz
所 要 動 力	分級ロータ 1.5kW, ブロアー 1.5 kW, スクリューフィーダ 65W
最 高 回 転 数	7200 r. p. m
使 用 風 量	1~2 m ³ /min
最小理論分級径 ($\rho_s=2.7 \text{ g/cm}^3$ の場合)	1.4 μm
概略処理能力	1~5 kg/hr
概 略 重 量	600 kg
概 略 寸 法	850×1500×1250 H

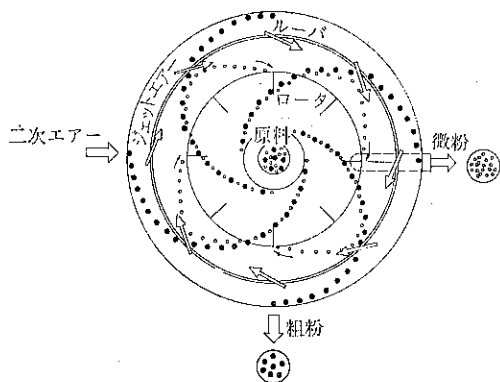


Fig. 2 ファインシャープセパレータによる繰り返し分級原理図

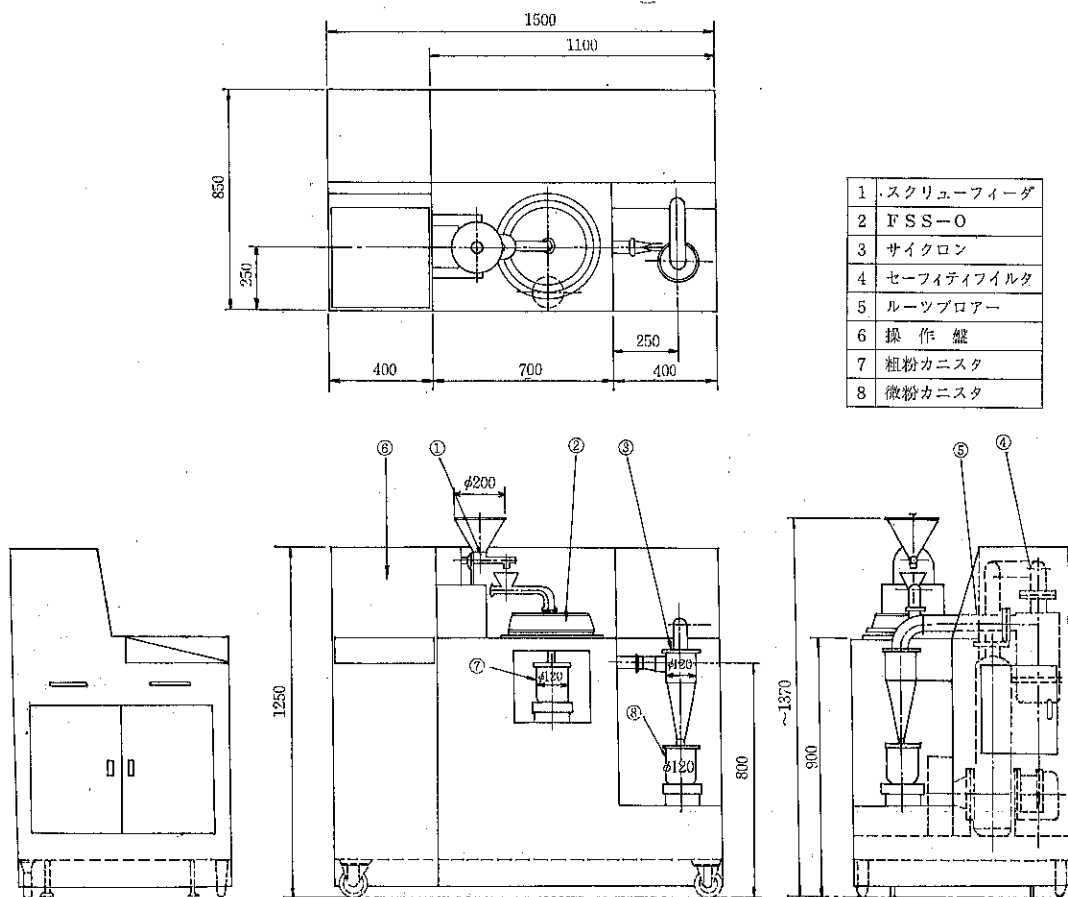


Fig. 3 ファインシャープセパレータ (FSS-O型) 外形図

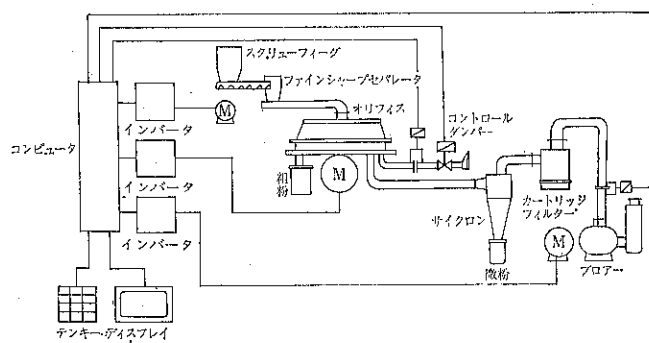


Fig. 4 ファインシャープセパレータ制御システムフローシート

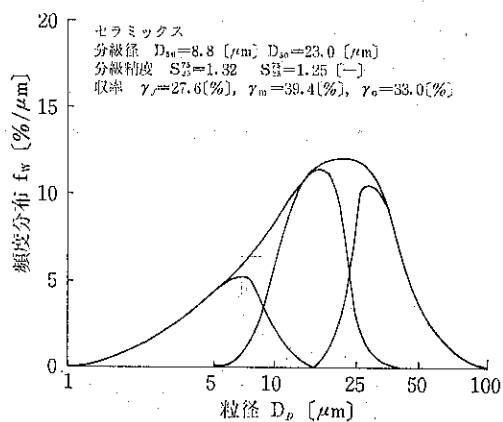
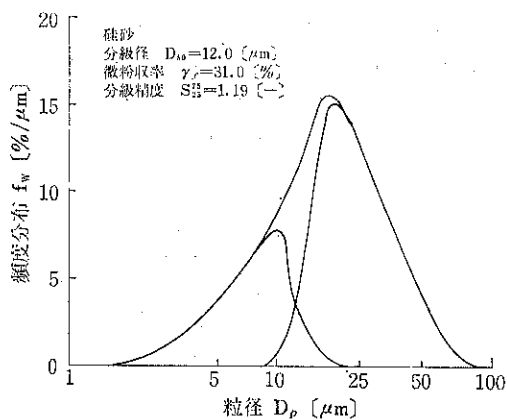
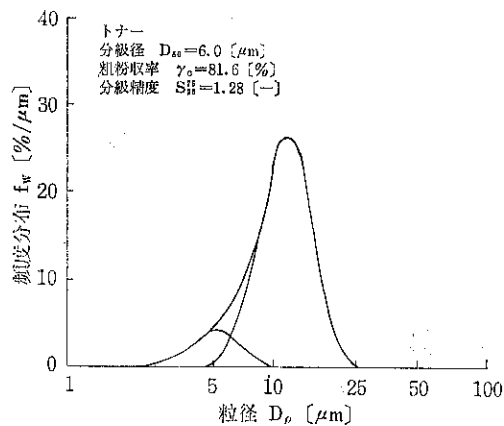
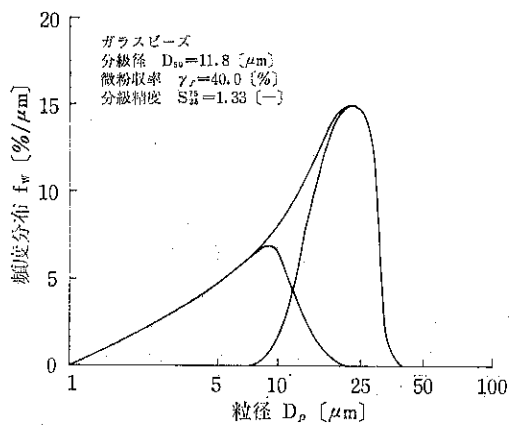


Fig. 5 分級例



新製品紹介

ホソカワ/ソノダイン パルスコンバッション

ドライイングシステム

大阪事業本部*

1. 概要

ホソカワ/ソノダイン パルスコンバッションドライイングシステムは、スラリーあるいは溶液を乾燥して粉末製品を得る乾燥システムで、ホソカワグループの一員である米国の SONODYNE INDUSTRIES INC. 社で開発されたものであるが、日本国内においてはホソカワミクロン㈱が製作、販売していくこととなった。

本システムは Fig. 1 に示すように、被乾燥原料をス

ラリー又は溶液で供給するタンク及びポンプ、高温ガスの衝撃波状パルス流を作る燃焼室、瞬時に水分を蒸発させられ固体状態となった粒子を捕集する一次捕集室、粒子とガスとを分離するサイクロン、排ガスの除塵を行うスクラバ、送風および吸気用ファン等からなっている。ポンプで乾燥部に送り込まれた液状原料は、超音速で流れる高温ガスのパルス波により微細な液滴に分散される。分散され表面積を増加された微小液滴は、 $1,400^{\circ}\text{C}$ 以上の高温ガスにさらされ、一瞬の内に気液の熱交換が行われ、固体粒子となり、一次捕集室およびサイクロンで捕

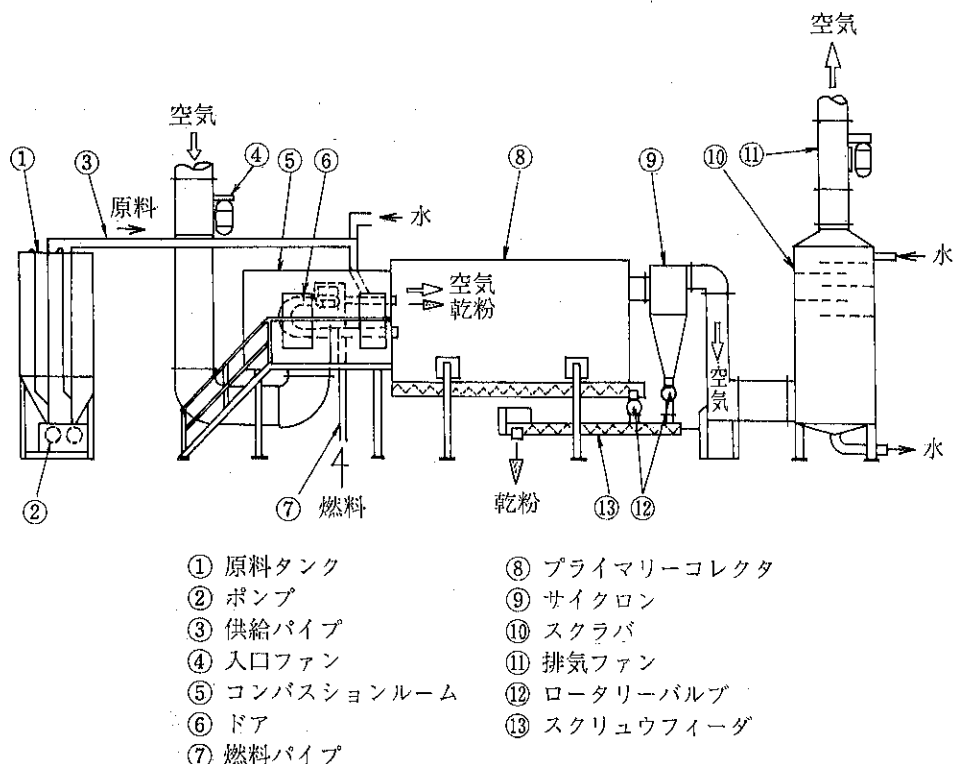


Fig. 1 ホソカワ/ソノダイン パルスコンバッションドライイングシステム例

* ホソカワミクロン株式会社
(〒573 枚方市招提田近1丁目9番地)
Tel. (0720) 55-2221

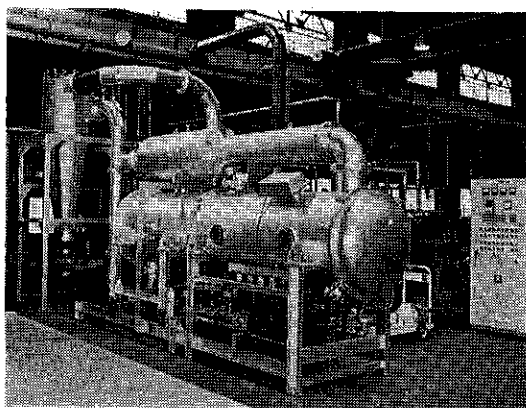


Photo 1 枚方試験所にテスト用に設置された
パルスコンバッションドライイング
システム (型式SD-14)

集される。一方、高温ガスは水分を気化させるために熱を奪われ、通常 $80\sim 100^{\circ}\text{C}$ まで冷却される。燃焼室から吸気口の方へ逆流する熱流 (全体の $10\sim 20\%$) はリターンパイプを通して一次捕集室に入り、補助的に乾燥を促進する他、同伴する希釈空気により排気の露点を下げる役割をしている。

このように高温燃焼ガスを直接利用し、熱効率がよく燃費が少ないため、各種工業廃水処理スラッジ、生活廃水処理スラッジの乾燥、粘度鉱物スラリの乾燥等に幅広く利用されており、米国内において10数台の納入実績を有している。

2. 燃焼装置 (パルスコンバスタ) の構造と原理

Fig. 2 に本システムの心臓ともいう燃焼装置、パルスコンバスタの構造を示した。このパルスコンバスタにおいて、燃料ガスと空気の混合気体を瞬間的に爆発的に燃焼させ、高温ガスの衝撃波状のパルス流を作っている。

吸気および排気を容易にするため、コンバスタ本体は気密のコンバスタールーム内に設置され、送風ファン、吸気ファンによりコンバスタールーム内の圧力が調整される。燃焼室内の燃料ガスと空気の混合気は、点火プラグの火花により点火され、爆発的に燃焼する。燃焼室内の圧力が急上昇し、燃焼高温ガスはテールパイプ、ドライイングコーンの方へ衝撃波状に流れると同時に、一部が吸気口の方へも逆流し、燃焼に必要な空気の流入を一瞬止める。従って、燃焼は一旦止り、次に排気流れの慣性により燃焼室内は逆に負圧となるので、再び空気が燃焼室に入り燃料ガスと混合気を作り、点火プラグの火花で爆

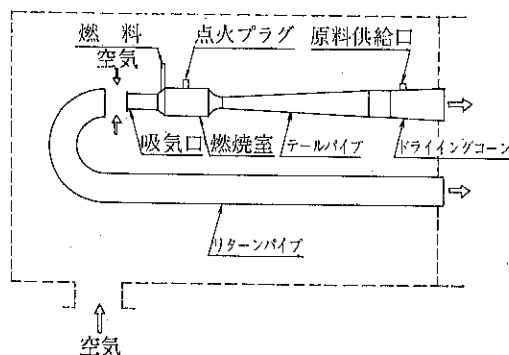


Fig. 2 パルスコンバスタの構造

発的に燃焼する。このサイクル、すなわち爆発、排気、吸気を繰り返して継続する。

燃焼室機壁が高温に加熱されると、その熱で爆発が生じるので点火プラグの作動は必要なくなる。

このように、パルスコンバスタは可動部分のない簡単なバーナで、高温の排出ガスが断続的に音波で噴出する、いわゆる衝撃波状のパルス流が得られる。例えば、型式SD-1のパルスコンバスタは発生熱量 $800,000\text{ kcal/hr}$ で、 $1,450^{\circ}\text{C}$ の高温パルス流を $85\sim 88\text{ Hz}$ の周期で発生させる。燃料は初期の加熱期間は天然ガス、プロパン等のガス体燃料が必要であるが、後は灯油、重油などの液体燃料へ切替えて運転可能である。

3. 特 長

(1) スラリ、溶液から直ちに能率的に乾粉が得られる。

コンバスタで発生する衝撃波状パルス流により原液は強力に分散されるため、低濃度から高濃度まで広く適用できる。

(2) 熱効率がよく、燃料消費量が少ない。

$1,400^{\circ}\text{C}$ 以上の高温燃焼ガスを直接利用するので熱効率高く、燃料の消費量が少ない。実績のデータでは 1 kg の水分を蒸発させるのに $800\sim 900\text{ kcal}$ の熱量で済む。

(3) 所要風量が少なく、電力消費量少ない。

システム中に駆動部分が少ないので電力消費が少ない。

4. 型 式

本システム標準型式を Table 1 に示す。

Table 1 ホソカワ/ソノダイン パルス
コンパクションドライイングシ
ステム標準型式

型 式	バーナー発生熱量	概略蒸発水量
SD-1/4	200,000 kcal/hr	250 kg/hr
SD-1/2	400,000	500
SD-1	800,000	1,000
SD-2	1,600,000 (800,000 kcal バーナー 2 基)	2,000

5. 適 用 例

パルスコンパクションドライイングシステムの代表的適用例を **Table 2** に示す。各種排水処理スラッジの乾燥、粘土鉱物スラリの乾燥、炭酸カルシウム、水酸化アルミ、酸化ケイ素などの工業材料のスラリの乾燥に適用され、その特長を発揮している。

なな、弊社技術開発センターに本システムのテスト機（型式SD-1/4）を設置し、ユーザテストを行っておりますので御利用下さい。

Table 2 パルスコンパクションドライイングシステムの納入例

原 料 名	水分 (WB)		公称能力	バーナー 本 数	燃 料	熱 量 kcal/hr
	原料	乾粉				蒸発水分量 kg/hr
膠質炭酸カルシウム スラリ	%	%	ton/day	本	プロパン 天然ガス 軽油	kcal/kg 840
フィッシュ ミール	80	12	50	2	オイル (スタート時) プロパン	882
アルミ、カルシウム、酸化鉄の ハイドロオキシサイドの排液 $Al(OH)_3$	82	12	50	2	天然ガス	855
生物スラッジ 酸化鉄排液	80	15	25	1	天然ガス	790
カオリン、クレ	40	1	25	1	プロパン	832
イースト他食品 Food Commodities	85	20	50	2	オイル (スタート時) プロパン	882
酸化ウランウム 廃棄物スラッジ	95	5	25	1	天然ガス	908

圧力（室圧・ダクト圧）制御装置

環境事業部*

1. 概要と特徴

本装置は、比較する2室の室圧（設定範囲 $+5.0\text{ mm}$ $\sim -2.0\text{ mmAq}$ ）又はダクト圧（設定範囲 $+250\text{ mm}$ $\sim +5\text{ mm}$ 又は -250 mm $\sim -5\text{ mmAq}$ ）を常時直接受圧し、変化の状況を連続的に表示及び出力を発信して室内の差圧やダクト圧を監視し、併せて所定の圧力に制御が可能な装置となっている。

出力による異常時のランプ・ブザーでの警報と共に、この出力での空気の供給量又は排出量を容易にコントロールすることが可能で、省エネルギー効果が大きい。

検出器及び制御器は高感度で微小な気圧変化にも追従し、また平衡方式なので長期安定であり、全範囲にわたって比例が完全に保持され高精度を発揮している。制御出力は $4\sim 20\text{ mA}$ で直接インバータに接続が可能で、圧力設定ダイヤルで所要の圧力を設定すると一定圧力が容易に確保される。

2. 構成

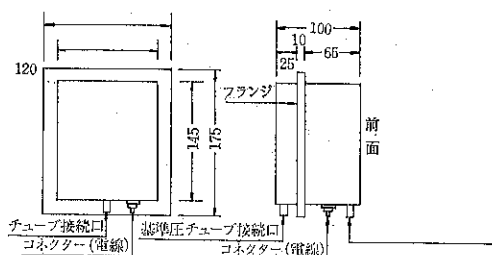


Fig. 1 検出器外形図

- ・検出器
- ・制御発信器（表示：設定、 $4\sim 20\text{ mA}$ 出力）
- ・風量制御装置（ファン容量制御はインバータ、各室の風量制御はホソカワ/タイタス VAV ユニットま

* ホソカワ環境エンジニアリング㈱
 (〒552 大阪市港区市岡2丁目14番15号)
 Tel. (06) 574-7771 (代)

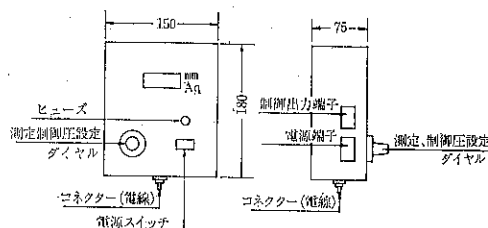


Fig. 2 制御発信器外形図

又はモーターダンパー)
 オプションとして制御発信器に警報装置の組込可能。

3. 仕様

仕様を Table 1 に示す。

4. 作動

4.1 検出

比較する2室の室圧またはダクト圧を直接受圧し、振動受圧板で感知して、電気出力として制御器でデジタル表示となる。

その作動原理を Fig. 3 に示す。

4.2 制御出力

制御出力の電流値は、設定ダイヤルでの設定値による追従方式で、常に室圧またはダクト圧が要求の圧力になるよう変化をする。その電流値の変化は、圧力基準設定値（要求圧力値）より高い場合は時間と共に次第に減少し、低い場合は増加する。また室内圧対象の場合、その割合は圧力値が上限または下限の外に出た場合には時間変化率が6倍に増加する。この時間変化の割合は全範囲（ $4\text{ mA}\sim 20\text{ mA}$ ）の変化時間が上下限の間では約1分10秒より約6分の間で可変となる。従って上・下限外ではこの1/6の時間となる。

Table 1 仕様

測定範囲	I型	+5.0mm~-2.0mm
	II型	+150mm~0mm 又は -150mm~0mm
	III型	+300mm~0mm 又は -300mm~0mm
設定範囲	I型	+5.0mm~-2.0mm
	II型	+125mm~+5mm 又は -125mm~-5mm
	III型	+250mm~+10mm 又は -250mm~-10mm
表示及び警報出力	LED・10進3桁と符号, スイッチ ON と同時, 無圧接点 (AC 100 V, 1A) を閉	
出力電流	DC 4mA~20mA, 負荷抵抗 (外部インピーダンス) 250Ω以下	
電源部	トランス要望により内蔵 (客先供給電流 1φ, 100V, 50/60 Hz)	
時限警報	上限又は下限を一定時間 (15, 30, 60秒等) 連続とび出した場合に警報	
標準寸法	検出器	120w×145H×100D (フランジ寸法 130W×175H)
	制御器	150W×180H×75D
形状	壁面取付型	
所要電力	DC+15V, 0.2A. ±5V, 0.5A, -15V, 0.1A	

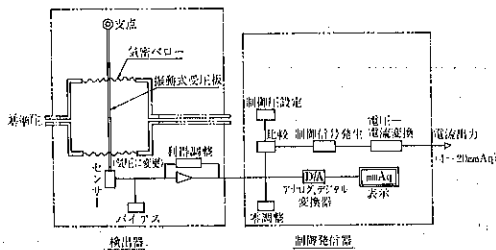


Fig. 3 作動原理図

4.3 警報 (オプション)

室圧またはダクト圧が上限または下限より外側に連続して所定時間 (例えば 15, 30, 60 秒等) を飛び出している時に発生する。従って一瞬の僅かな時間でも、この上, 下限内に戻った場合は, それ以前の時間は積算されない。また, 警報の解除は標準仕様ではリセットボタンでの手動解除となっている。

作動状態の表示 (オプションとして取付可能)

5. 適用例

Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 に本装置の適用例を示す。今後, 本装置の適切な導入により機能はもちろん, 省エネルギーへの貢献度は高まるものと思われる。

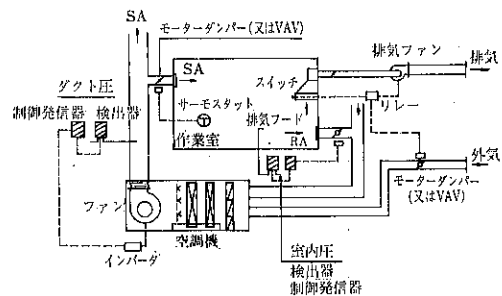


Fig. 4 空調設備, 室圧, ダクト圧制御例

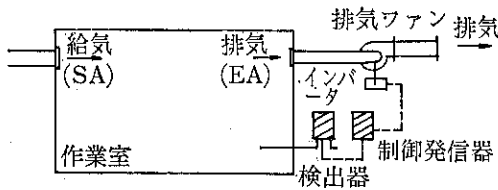


Fig. 5 室圧制御例

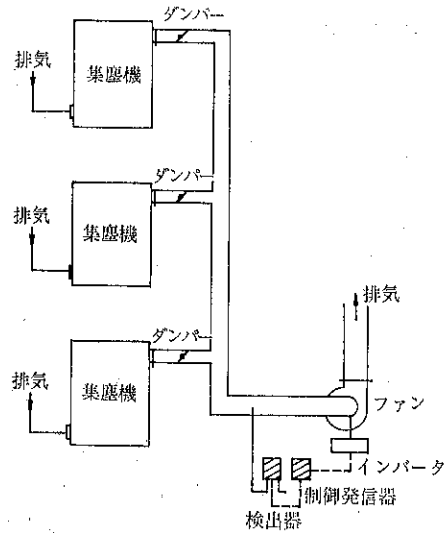


Fig. 6 ファン容量制御例

特許一言メモ

No. 76

——膨大な出願件数と増える未処理件数——

わが国の特許・実用新案の出願件数は他の諸外国に比べ異常ともいえる程多い。昭和59年度に出願されたわが国の特許・実用新案は合計で486,948件で、これは同年に日本を除く全世界でなされた総出願件数にほぼ等しい値である。ここ数年間の状況からして、わが国は出願件数の上では特許王国の座を確固たるものにした感がある。

しかし、これら膨大な出願件数に対して審査処理が間に合わず、年々増える未処理件数に特許庁では頭を痛めている。わが国では、出願に対しては審査請求制度があるため、出願件数イコール審査件数ではなく、審査請求されないものもかなりあり、当初よりは幾分減るが、それでも残りの要審査件数としては相当多い訳である。こうした問題について、特許庁では昭和51年以来「出願・審査請求の適正化施策」ということで取り組んで来ている。その施策内容については次項に移すこととし、過去5年間の審査請求件数と審査処理件数及び未処理件数は

下表のとおり。

審査処理状況表

種別	年別	出 願	処 理	未処理
特 許	昭55	(191,020) 88,697	97,592	190,224
	56	(218,261) 100,222	96,171	194,275
	57	(237,513) 98,922	99,607	193,590
	58	(254,956) 108,212	96,778	205,024
	59	(284,767) 166,088	96,746	274,366
実 用 新 案	昭55	(191,785) 106,861	122,056	253,048
	56	(198,979) 115,191	118,321	249,918
	57	(202,706) 110,692	111,676	248,934
	58	(205,243) 112,306	109,529	251,711
	59	(202,181) 144,501	98,629	297,583

注：出願件数欄は審査請求件数であり、() 内は出願件数を示す。

(特 許 室)

新製品紹介

ホソカワミクロン

ラボミキサ (LV-0)

細川粉体工学研究所*

1. 概要

ホソカワミクロン ラボミキサは実験室用に新しく開発された小型混合機で、ホソカワ/ナウタ ナウタミキサ（リアクタ）と同様な混合原理に基づいている。

即ち、回転する逆円錐形の混合槽の内壁面に沿ってスクリュウが自転する構造となっているため、容器内の粉体はスクリュウの自転により壁面に沿って上昇攪拌されると共に、容器の回転により大きく円運動を行う。また、スクリュウの通っていない部分の粉体は自重で下降運動を起す。このように容器内の粉体は複雑な運動をく

されている。

2. 特長

i) 合理的混合原理より混合時間は極めて短かく、混合比が高くても精密な混合品が得られる。

ii) 混合完了後の偏差変動が少なく、均一な品質のものが得られる。

iii) 小型、軽量のため持ち運びが容易である。

iv) 流動性の悪い粉体あるいは湿った粉体であってもスクリュウと容器を回転しながら排出すると、容易に受容器に排出される。

v) スクリュウの回転数（自転）を必要に応じ、100～200 rpm の範囲で任意に容易に変えることができる。

vi) 無給油式でメンテナンスフリーである。

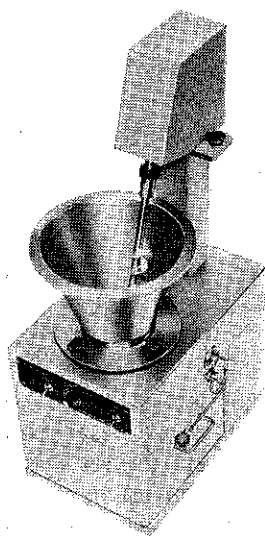
vii) シンプル構造のため分解、掃除が簡単である。

3. 仕様

本機の混合有効容量は 2.5 l で、材質は粉接部 SUS 304 となっている。主な仕様を Table 1 に示す。

Table 1 ホソカワミクロン ラボミキサの仕様

- | | |
|----------|----------------------|
| ・型 式: | L V-0 |
| ・混合容量: | 2.5 l |
| ・モーター: | |
| スクリュウ | スピードコントロールモータ |
| | 100V 50/60Hz 25W |
| 混合容器 | ギヤーヘッド付きモータ |
| | 100V 50/60Hz 25W |
| ・回転数: | |
| スクリュウ | 100～200 rpm (可変) |
| 混合容器 | 4 rpm |
| ・スクリュウ: | φ50×P40 (スクリュウ取り外し型) |
| ・排出口: | φ60 ハンドレバー式 |
| ・混合品受容器: | 300W×300D×200H |
| ・粉接部材質: | SUS304 (パフ #300) |
| ・概略寸法: | 420W×450D×905H |
| ・概略重量: | 15 kg |



り返しながら槽内を隈なく動き回り、短時間で高精度に混合される。

混合された粉体は下部排出口よりレバー操作により受容器に排出される。

また、本機は分解、掃除が簡単にできるよう特に配慮

* 株式会社 細川粉体工学研究所
(〒573 枚方市招提田近1丁目9番地)
Tel. (0720) 57-3721

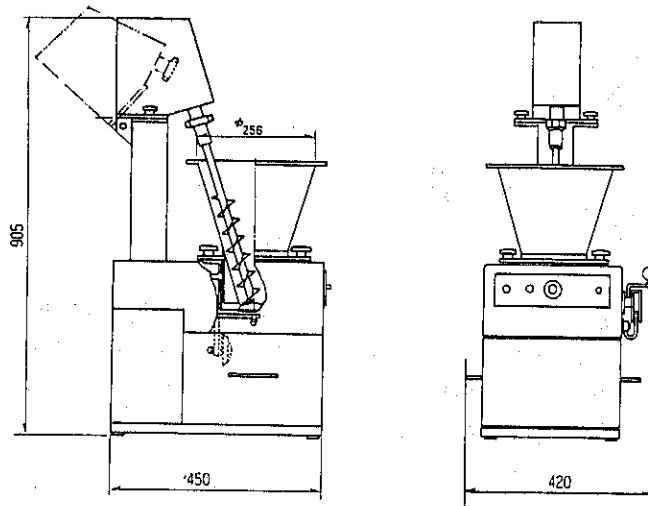
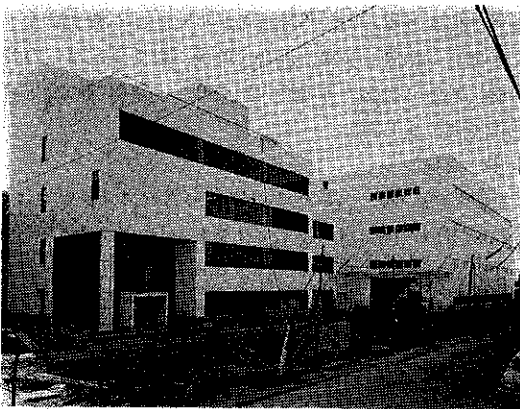


表 紙 説 明

—建設中の技術開発センター—



ホソカワミクロン株式会社創立70周年を記念し、弊社枚方事業所の隣接地に細川粉体工学研究所 技術開発セ

ンターの建設が、本年2月末竣工を目標に急ピッチで進められている。

建物の内容を簡単に紹介すると、

- ◎敷地面積……約4,200m² (約1,270坪)
- ◎建物……鉄筋4階建 (管理棟), 鉄骨外壁スパンコンクリート造り (試験棟)
- ◎床面積……管理棟 約2,000m² (約600坪)
試験棟 約2,000m² (約600坪)

当技術センターでは各種テスト業務の他、測定等顧客のニーズに密接した新技術の開発を中心とした業務のセンターとして利用される。

完成すれば粉体技術の試験研究所としては規模、設備の面で、世界一となる。今後それにふさわしい内容の充実ははかり、粉体技術の発展に寄与していきたい。

ホソカワ ニュース

○第14回食品産業技術功労賞受賞

昭和60年1月26日、当社は食品産業新聞制定の上記功労賞を受賞いたしました。これは、当社集塵機ホソカワ／マイクロ パルスエアー が製粉用集塵装置の開発と普及に努め、食品産業の発展に著しく貢献したことによるものです。

○米国 US フィルターシステムズ社の経営権取得

昭和60年3月、当社は米国アシュランド石油会社の子会社である US フィルターシステムズ社と系列のマイクロパル社ほか粉体技術およびハイテク企業、14社を傘下におさめました。

これにより、ヨーロッパにおいて既に取得したホソカワナウタ社、フリーコ社、イズム社を含めて、ホソカワグループは日本、ヨーロッパ、アメリカに広がる粉体技術の世界的ネットワークを構築したことになります。

○中国「国際化学工業設備展覧会」出展

昭和60年4月3日から9日までの7日間、上記展覧会が中国の上海で開催されました。当社は関連会社のホソカワインターナショナルを通じて、微粉碎機ホソカワ／マイクロ バンタムミルをはじめ粉体処理システムのテクナメーションパネルなどを出展し、盛況でありました。

○中国「国外粉体工業技術交流会」出展

昭和60年4月8日から13日までの6日間、上記展示会が中国の広州で開催されました。この展示会は海外における最新の各種粉体機器を中国国内に広く紹介するために開かれたものです。当社はホソカワインターナショナルを通じて、①超微粉碎機ホソカワミクロン ミクロンジェット、②中砕機ホソカワ／フィッツ フィッツミル、③分級機ホソカワミクロン スーパーセパレータ、④混合機ホソカワ／ナウタ ナウタミキサ（リアクタ）、⑤乾燥機ホソカワ／フィッツ フリッド ベッド ドライヤなどを出展し、多数の来場者に好評を頂きました。

○'85インターフェックス ジャパン出展

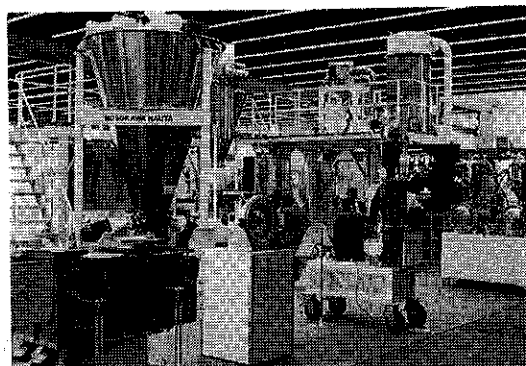
昭和60年4月24日から27日までの4日間、製薬、化粧品、洗剤機器専門の上記展示会が大阪国際見本市港会場

で開催されました。当社は6小間に、①超微粉碎機ホソカワミクロン ミクロンジェット、②中砕機ホソカワ／フィッツ フィッツミル、③混合機ホソカワ／ナウタ ナウタミキサ（リアクタ）、④乾燥機ホソカワ／ナウタ フリッドベッドプロセッサ、⑤造粒機ホソカワ／フィッツチルソネータ、⑥乾式超微粉碎装置の粉体見本、電子顕微鏡写真パネルなどを出展し、有望な商談件数も多数あり盛況でありました。

○第25回西日本総合機械展出展

昭和60年5月25日から28日までの4日間、九州地区で最大規模の上記展示会が北九州市小倉の西日本総合展示場で開催されました。当社は①超微粉碎機ホソカワミクロン ミクロンジェット、②微粉碎機ホソカワ／マイクロ ACM パルペ ライザ、③分級機ホソカワミクロン スーパー セパレータ、④小型集塵機ホソカワ／トリットキャビネット コレクタなどを出展し、盛況でありました。

○西独 '85 アヘマ出展



昭和60年6月9日から15日までの7日間、世界的な化学機械展示会である'85 アヘマ展が西独のフランクフルトで開催されました。当社はホソカワインターナショナルを通じて粉碎、分級、混合、乾燥、粉体測定などの各分野にわたり数多くの機器を出展し、多数の関心を集め盛況でありました。

(出展機種)

- ①超微粉碎機 ホソカワミクロン ミクロンジェット
- ②微 粉 碎 機 ホソカワミクロン パーテックミル
- ③微 粉 碎 機 ホソカワミクロン ピクトリミル
- ④分 級 機 ホソカワミクロン ミクロン セパレータ
- ⑤混 合 機 ホソカワ／ナウタ ナウタミキサ（リアクタ） D2SX 型（サテライトミキサ）
- ⑥乾 燥 機 ホソカワミクロン ミクロンドライヤ
- ⑦混 合 機 ホソカワ／ナウタ ナウタミキサ（リアクタ）の真空乾燥システム

- ⑧粉体特性測定機 ホソカワミクロン パウダテスタ
- ⑨沈降式自動粒度 ホソカワミクロン セジメンピュ
分布測定装置 ータ
- ⑩乾式超微粉碎装置 ホソカワミクロン オングミル
システム
- ⑪ホソカワミクロン 金属微粒子発生装置

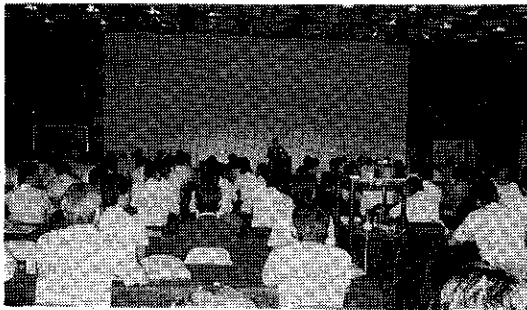
○本部事務所開設

昭和60年6月、当社は国内および海外の関連会社を含めたホソカワグループ全企業を統括するために大阪市の中心部にある御堂筋本町ビル内に本部事務所を開設いたしました。

○枚方新試験所地鎮祭

昭和60年8月7日、枚方事業所内に細川粉体工学研究所の新試験所を建設するために地鎮祭をとり行ないました。これは、来年4月に迎える創立70周年を期して規模、内容ともに世界一の試験所を目指して建設計画が進められていたものです。建物は管理棟4階建（578坪）、試験棟2階建（605坪）、鉄骨、外壁スパンコンクリート造りで、完工は昭和61年2月の予定です。

○粉体工学講演討論会開催



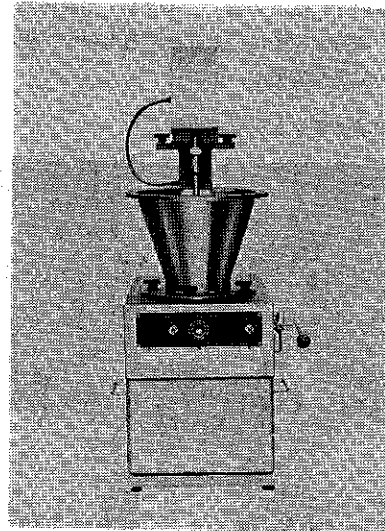
昭和60年8月28日、粉体技術談話会主催の「第19回粉体工学に関する講演討論会」が東京池袋のサンシャインプリンスホテルで盛大に行なわれました。当日は学会、産業界から約200名の参加者があり、「粉体と静電気現象」、「粉体の凝集、分散現象」のテーマについて熱心な講演討論が行なわれました。

○実験室用機器2機種の開発

昭和60年9月、当社は実験室用機器2機種を開発いたしました。そして、'85化学プラントショーに出展し、多数の反響を得ました。

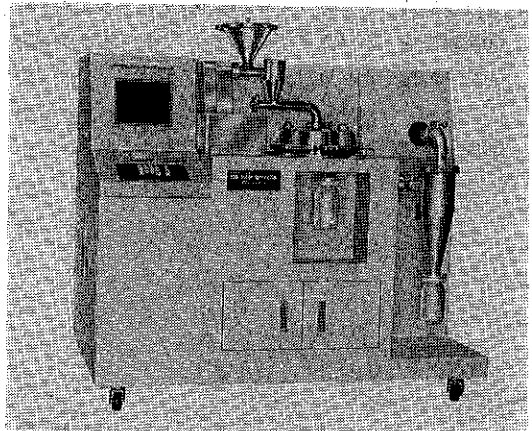
- (1) 小型混合機 ホソカワミクロン ラボミキサ
本機の混合原理はナウタミキサ（リアクタ）と同じですが、回転する逆円錐形の混合槽の内壁面に沿ってスクリュが自転し、短時間で高精度の

混合ができます。



- (2) 分級機 ホソカワミクロン ファイン シャープ セパレータ

本機は高性能分級機として高い評価を得ているホソカワミクロン スーパーセパレータの高精度分級原理を基本にした実験室用分級機で、机大のキャビネットに供給機、分級機、サイクロン捕集器およびマイクロコンピュータなどがコンパクトに組合わされています。



○米国関連会社より乾燥装置の技術導入

昭和60年9月、当社は本年3月にホソカワグループ入りした米国ソノダイン・インダストリーズ社のもつパルス式燃焼乾燥装置「パルス コンパクション ドライイング システム」の技術を導入し、国産化を進めることになりました。そして、'85化学プラントショーに出展し、

多数の注目を集めました。同装置は爆発的に燃焼させた高温ガスの衝撃波によって、スラリーや液体などの被乾燥原料を微細な粒子に分散乾燥するもので、極めて熱効率が高い乾燥装置です。

○'85 化学プラントショー出展



昭和60年9月3日から7日までの5日間、国内最大規模の化学機械装置の専門展示会である'85 化学プラントショーが東京・晴海見本市会場で開催されました。当社は14小間に新製品を含む多くの粉体機器を出展し、活発な商談が行なわれ盛況でありました。

(出展機種)

- ①微粉砕機 ホソカワ/マイクロ ACM パルベライザ 1ACM 型
- ②微粉砕機 ホソカワ/マイクロ パンタムミル
- ③微粉砕機 ホソカワ/マイクロ サンプルミル
- ④分級機 ホソカワミクロン ファイン シャープ セパレータ
- ⑤混合機 ホソカワミクロン ラボミキサ

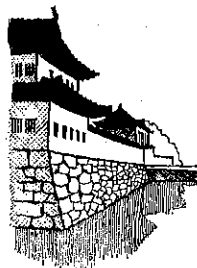
- ⑥混合機 ホソカワ/ナウタ ナウタミキサ(リアクタ) D2SY 型(サテライトミキサ)
- ⑦乾燥機 ホソカワミクロン ミクロンドライヤ
- ⑧乾燥機 パルス コンパクション ドライイング システム(模型)
- ⑨乾燥・混合・輸送・計量システム
- ⑩供給機 マイクロ フィーダ(スイス GERICKE 社製)
- ⑪粉体特性測定機 ホソカワミクロン パウダテスト
- ⑫吊下式粉体層 付着力測定機
ホソカワミクロン コヒ テスタ
- ⑬連続かさ密度 測定機
ホソカワミクロン ミクロン チェッカ
- ⑭沈降式自動粒度 分布測定装置
ホソカワミクロン セジメンピュータ

○第20回近代窯業機械展出展

昭和60年10月18日から20日までの3日間、上記展示会が岐阜県瑞浪市民会館で開催されました。当社はホソカワインターナショナルを通じて、①蛍光 X 線分析試料熔融装置フュージョン ユニット、②供給機マイクロ フィーダ、③粒度分布測定機マイクロ PSA などを出展し、盛況でありました。

○'85 クリーンエンジニアリング ショー出展

昭和60年11月5日から8日までの4日間、上記展示会が東京平和島の東京流通センターで開催されました。当社はクリーンルーム、バイオクリーンルーム、精密空調システムの関連会社であるホソカワ環境エンジニアリングを通じて、①キャスター付小型クリーンユニット、②ホソカワラミガードユニット、③クリーンルーム環境管理制御システムなどを出展し、多数の引合が寄せられ盛況でありました。



“粉碎”誌 総索引 No. 1~No. 30

＜種類別索引＞

(ゴチック数字は頁()内は掲載号数)

〔巻頭言〕

- 紫綬褒章受章の栄光に浴して…細川 永一…… 1 (1)
 細川粉体工学研究所の開設にあたって
 ……細川 永一…… 1 (2)
 細川粉体工学研究所の創設を祝して
 ……亀井 三郎…… 2 (2)
 細川粉体工学研究所の開設を祝う
 ……亀井 三郎…… 3 (2)
 3号発行に当たっての御挨拶…細川 永一…… 1 (3)
 粉碎機の特性と粉体の粒度分布
 ……中川 有三…… 1 (4)
 技術と世界市場……………細川 益男…… 1 (5)
 細川鉄工所と私 (挨拶にかえて)
 ……G. S. Sale…… 1 (6)
 創立46周年を迎えて…………細川 永一…… 1 (7)
 技術尊重の良心……………細川 益男…… 2 (8)
 粉碎雑感……………矢野 武夫…… 1 (9)
 故細川永一会長の死を悼む…………… 1 (10)
 暗中の粉体工学……………吉田 哲夫…… 1 (11)
 粉体とその応用……………岡田 辰三…… 1 (12)
 細川粉体工学研究所の使命…細川 益男…… 1 (13)
 粉体工学の進むべき道…………井伊谷鋼一…… 2 (13)
 何でも粉碎……………吉岡 直哉…… 1 (14)
 粉碎機こぼれ話……………細川 明彦…… 1 (15)
 ヨーロッパの粉体工学の新しい動き
 ……神保 元二…… 1 (16)
 「粉碎」編集委員会発足…………矢野 武夫…… 1 (17)
 編集委員会の発足に当って…………… 2 (17)
 みち……………沢畠 恭…… 1 (18)
 リサイクリング技術について思うこと
 ……吉田 哲夫…… 1 (19)
 粉碎を見直す……………中川 有三…… 2 (20)
 “粉碎”20号によせて
 “粉碎”誌と時のきざみ…田中 達夫…… 3 (20)
 粉体技術への回帰……………狩野 武…… 2 (21)
 見る……………荒川 正文…… 2 (22)
 ある思い出……………田中 達夫…… 2 (23)
 テクノロジ・トランスファーについて
 ……矢野 武夫…… 3 (24)
 本誌25号に寄せて……………中川 有三…… 2 (25)

- 粉体工学揺籃の時代は終わった…細川 益男…… 2 (26)
 温故知新, 以為師……………矢野 武夫…… 3 (26)
 “粉と泥”一粉碎誌への希望…吉岡 直哉…… 4 (26)
 中川会長のあとを受けて…………吉田 哲夫…… 2 (27)
 粉体工学の歩みと国際交流について
 ……井伊谷鋼一…… 2 (28)
 雑感一粉体技術の教育と研究…青木 隆一…… 2 (29)
 粉体技術と国際水平展開…………細川 益男…… 2 (30)

＜研究報告, 研究速報＞

- ジェット粉碎機の粉碎機構について
 ……森 芳郎, 神保元二…… 4 (2)
 MICRO SIZER の試作について (第1報)
 ……細川益男, 松山卓蔵…… 8 (3)
 森本益弘
 ルーバー式分離機の分級特性
 ……井伊谷鋼一, 木村典夫……18 (3)
 微粉碎乾燥機に関する研究 (第1報)
 ……松山卓蔵, 森本益弘……11 (4)
 粉碎粒度分布に関する若干の考察
 ……森 芳郎, 神保元二……17 (4)
 ねじコンペアーの動力と設計方法
 ……植松時雄, 中村貞男……28 (4)
 ベビーサイクロンの集塵性能…新津 靖……32 (4)
 衝撃粉碎における材料の破壊抵抗について
 ……奥田 聡…… 2 (5)
 新しい自動粒度測定器について
 ……荒川 正文……14 (5)
 粉体の円錐状堆積層内の応力分布について
 ……青木 隆一……18 (5)
 微粉碎乾燥機に関する研究 (第2報)
 ……細川益男, 森本益弘……22 (5)
 松山卓蔵
 振動ミルに関する研究
 ……森本益弘, 松山卓蔵…… 3 (6)
 細川益男
 スクリューコンペアーの混合作用
 ……佐納良樹, 中野 敏…… 8 (6)
 矢野武夫
 粒体の空気輸送における直管部及び

- 曲管部の圧力降下
……植松時雄, 森川敬信……11 (6)
- 円筒槽における粉粒体の流速分布について
……大竹伝雄, 東稔節治……9 (7)
黒田博之
- Y型連続混合機……細川永一, 細川益男……13 (7)
横山藤平, 中本正弘
福本史郎
- 空気透過法による新しい直式平均粒度測定装置
……荒川 正文……17 (7)
- 粉粒体の力学……上滝具貞, 早野延男……3 (8)
- 酸化ウラン黒鉛系核燃料における両者の混合条件と
核分裂生成物の挙動との関係
……矢島聖使, 渋谷敏夫……15 (8)
- オリフィスおよびノズルによる粉体の流出量の測定
……森川 敬信……3 (9)
- 垂直面をもつ非対称型ホッパーの
長方形流出口の形状が流出速度に及ぼす影響
……川合 清一……7 (9)
- 円環状オリフィスからの粉体の流出
……大竹伝雄, 東稔節治……3 (10)
- 粉碎用各種媒体の摩耗比較……山内 史朗……6 (10)
- 振動スクリーフイーダーの試作と性能
……松山卓蔵, 中本正弘……16 (10)
- アラジンバッグのテスト
……松山卓蔵, 鈴木昭明……20 (10)
- 高速衝撃粉碎における粉碎能
……奥田 聡, 森田洋二……2 (11)
- 空気流中への粉体の分散法とその大きさの測定
……森島 直正……6 (11)
- 試作回転充填層型スクラバーの装置特性
……吉岡直哉, 江見 準……10 (11)
- ミクロンウルトラシフター
……中本正弘, 松山卓蔵……16 (11)
- 造粒の研究 (第1報)
……松山卓蔵, 鈴木昭明……20 (11)
- ミクロンセパレータによるフライアシュの
分級試験について……谷口 一昭……4 (12)
- バーコ型分級機によるセメントクリンカー
分級粒子群の SO_3 の挙動
……山内史朗, 柳 正光……7 (12)
- 微粉炭燃焼灰超微粒子群の
Microtopography に関する研究
……中村 喜義……11 (12)
- 非等速吸引によるバイジン量の誤差について
……上滝具貞, 金原 清……25 (12)
- 造粒に関する研究 (第2報)
—グラニューライザーによる造粒機構の解析
……向阪保雄, 豊立勝二……29 (12)
- 充填流動層における粒子混合
……青木隆一, 山崎量平……3 (13)
- パルスエアークレクターにおける
汙布試験装置の試作と二, 三のテスト
……横山藤平, 浦山 清……8 (13)
- 試作ヘリカル型ミクロンセパレータの分級特性
……中川 文雄……20 (13)
- 粉碎条件から粉碎量を予測する
(衝撃圧縮粉碎と定常運転ボールミル粉碎)
……松居 国夫……2 (14)
- 粉碎効率の基礎的考察……神保 元二……10 (14)
- 小型閉回路粉碎の一実験 (ミクロンセパレータの
分級性能について)……川合 誠一……18 (14)
- 異粒径球状粒子のタッピングによる分離
……佐納良樹, 清水明夫……26 (14)
- 各種サイクロン分離器の比較実験
……上滝具貞, 金原 清……30 (14)
若菜宏啓, 紫原昌宏
- 顕微鏡法による粒子径測定値の偏りについて
……山内 史朗……40 (14)
- ボールミルによるフライアシュの粉碎実験
およびその品質について……谷口 一昭……44 (14)
- 固体分散エーロゾルの発生に関する二, 三の実験
……木村典夫, 野村英司……50 (14)
桑名三稚
- 粉体層内における液状水移動
……若林嘉一郎, 山口信吉……62 (14)
- ミクロンセパレータ新型ローダの特性
……横山藤平, 中川文雄……68 (14)
甲盛直博
- 湿式汙布集塵機について
……南 孝和, 鈴木昭明……74 (14)
- サイクロン分離器の最小分離粒径について
……上滝具貞, 金原 清……2 (15)
北村 敦
- 粉体の動的流動性指数の測定法
……三輪茂雄, 竹内 和……8 (15)
- 公害と粉碎……中村 喜義……12 (15)
- 風力分級器のシミュレーション
……中島耀二, 田中達夫……2 (16)
- $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, ZrOH_4 の熱処理による
 ZrO_2 粒成長と相転移……山内 史朗……8 (16)
- 回分式堅型リボン混合機の混合特性

……矢野武夫, 佐藤宗武……18 (16)	立石享司
エジェクターフィーダによる粉体の分散	……渡辺 始, 中田好洋……24 (16)
	高橋和士
閉回路粉砕プロセスの解析	……宮南 啓, 矢野武夫……26 (16)
流動層からの小粒子の飛び出し	……篠原 久, 田中勇武……33 (16)
	中原俊輔, 鶴 泰
貯槽内の粉粒体の流下現象	……上滝具貞, 早野延男……50 (16)
	山中久人, 河内山茂
粉体および粉体混合物の流動性指数の測定と	それらの粉体混合への応用
……矢野武夫, 寺下敬次郎……96 (16)	山崎利夫
粉体の動的流動性指数の測定法(続)	……三輪茂雄, 清水慎一……103 (16)
スクリーコンベアの輸送量について	……佐納 良樹……112 (16)
低融点物質の粉砕機, ビクトリーミルの開発と	その性能……鈴木 昭明……117 (16)
逆噴射圧からみたパルスエアロレグターの特性	……谷口 浩, 鈴木昭明……124 (16)
	豊立勝二
誘電特性を利用した粉体の水分測定	……中島裕夫, 倉前正志……2 (17)
	田中達夫
攪拌型粉体混合機内の粉体の流動と混合に関する	実験的研究……矢野武夫, 佐藤宗武……10 (17)
二次元水平円筒型混合機を用いた粒体混合における	密度による分離偏析の研究
……矢野武夫, 寺下敬次郎……22 (17)	武者孝敏
色素吸着法による表面積測定	……諸橋昭一, 川口初男……34 (17)
空気圧による粒子充填層の体積変動	……佐納良樹, 矢ヶ崎孝彦……40 (17)
粉末と包装材質—包装材質面における	粉末の滑り易さの検討……篠崎 勲……46 (17)
水ガラス系硬化体における白華の検討	……長谷川勝, 山内史朗……50 (17)
モデルビン壁面における粉体圧の測定	……中川文雄, 島谷敏久……57 (17)
	鈴木昭明, 横山藤平

単粒子破砕に及ぼすふんい気中の水分の影響	……八嶋三郎, 神田良照……2 (18)
	斎藤文良
粉粒体のかくはん—フローパターンについて	……三輪茂雄, 阪上雅保……10 (18)
ナウタミキサー内の粉体の運動と混合過程	……矢野武夫, 寺下敬次郎……14 (18)
不均一流動化における粒子の挙動	……佐納 良樹……23 (18)
流動層組み込み風力分級機の研究	……中川文雄, 島谷敏久……28 (18)
	鈴木昭明
遠心排出型バケットエレベーターの特性について	(実験結果の解釈)……上滝具貞, 早野延男……37 (18)
	山中久人, 藤木俊介
	藤井康博
振動ミルのボールの運動の電算機による	シミュレーションの試み……井上外志雄……50 (18)
ロータリフィーダの閉塞特性	……上滝具貞, 富田祐嗣……61 (18)
	伊達木新三, 森島正文
粉体用連続混合システムの開発	……横山藤平, 浦山 清……66 (18)
水ガラスの白華の検討—温度の影響に関して	……長谷川勝, 山内史朗……71 (18)
Carの流動性指数に関する考察	……鈴木昭明, 丸子 修……80 (18)
粉砕方程式の解析解について	……中島耀二, 田中達夫……2 (19)
ボールミル粉砕による石英砂の粒度分布変化に	対する試料挿入量およびボール挿入量の影響
……金庭延慶, 池川昭子……12 (19)	新田伸子, 飯島寿子
実験用連続ボールミルにおける粒子の	滞留時間分布について
……富田美穂, 太田 元……28 (19)	井上外志雄, 今泉常正
着色粒子を用いた薬剤粉体の混合研究	—色差論的考察—
……松田芳久, 林 信……35 (19)	岡田寿太郎
密度差による偏析を伴う粉粒体混合過程の	モンテ・カルロ・シミュレーション
……矢野武夫, 荒谷敏朗……42 (19)	寺下敬次郎, 知福博行
リング式剪断試験器による測定値と	

- Carr の流動性指数との関連
 ……横山藤平, 中川文雄……51 (19)
 彼谷憲美
- エアスライドにおける粉粒体の流動特性について
 ……篠原邦夫, 斎藤和男……64 (19)
 田中達夫
- 流動層における粉体の混合および分離
 一気泡の効果……佐納良樹, 猪爪孝……49 (20)
 秋葉育朗
- 流動層における粒子一流体間の伝熱係数について
 ……田中勇武, 篠原 久……58 (20)
 吉原紀幸
- 粉体の壁面付着強度について
 ……篠原邦夫, 花崎芳朗……62 (20)
- 単粒子破碎に及ぼす媒液の双極子モーメント
 ならびに金属蒸着膜の影響について
 ……八嶋三郎, 斎藤文良……70 (20)
- カスケードインパクターの捕集性能
 一付着量と再飛散量の効果について一
 ……上滝具貞, 早野延男……82 (20)
 原田教男
- 電磁式振動円盤型粉粒体供給機(フロートロン)を
 用いた連続定量供給装置の試作およびその性能
 ……矢野武夫, 佐藤宗武……92 (20)
- エジェクター・フィーダによる凝集粉体の分散
 ……渡辺 始, 松野孝好……106 (20)
 中田好洋
- 攪拌流動層における所要動力と混合効果
 ……佐納良樹, 本山安訓……4 (21)
- 2次元ホッパー内の粉体応力の測定
 ……橋本啓治, 福井雄二……10 (21)
 網川 浩, 青木隆一
- 皿型造粒機による最小ペレット生成の
 操作条件について
 ……上滝具貞, 早野延男……17 (21)
 山中久人, 坂口玉雄
- 粉体の低濃度垂直空気輸送の加速領域の流れ
 ……富田脩嗣, 上滝具貞……39 (22)
 湯谷正司
- 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一
 ……田中勇武, 葭村雄二……44 (22)
 篠原 久
- 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
 ……岡野靖彦, 太田 元……52 (22)
- 水平空気輸送における圧力損失, 輸送動力,
 および流動様式との関係
 ……上滝具貞, 富田脩嗣……3 (23)
 湯原英元
- サスペンションからの球形造粒に及ぼす
 界面活性剤の影響……竹中英雄, 川島嘉明……10 (23)
 中島昌弘, 大岸祐子
- 粉粒体の投入速度と粉体圧の影響
 ……高木史人, 杉田 稔……15 (23)
- 粉体のタッピング圧密について
 ……和田憲造, 福永温子……24 (23)
 早野延男, 上滝具貞
- 温度勾配下における湿った粒子層内の
 水分移動現象に関する一考察
 ……倉前 正志……32 (23)
- 高速型衝撃粉碎機による粉碎混合
 ……寺下敬次郎, 矢野武夫……4 (24)
 森 一徳, 橋本正雄
- 付着性粒体の Yield Locus 測定と
 ホッパーの最小出口寸法の決定
 ……網川 浩……17 (24)
- サイロ内の懸垂棒に働く粉粒体のまさつ力
 ……網川 浩, 荒川誠司……33 (24)
- 移動層塔壁での粉粒体の剪断応力特性
 ……油谷暢悦, 上松一則……38 (24)
- 粉体のタッピング圧密について
 ……和田憲造, 中富美鈴……46 (24)
 早野延男, 上滝具貞
- 振動ホッパーからの粉体の流出
 ……川合誠一, 池原和樹……52 (24)
 道井啓右
- オリフィスからの粒子群の排出特性
 一空気圧が背圧として作用する場合一
 ……田中勇武, 杉 正浩……60 (24)
 石蔵利文, 篠原 久
- 湿式球形造粒法によるワックス製剤の調製
 ……竹中英雄, 川島嘉明……88 (24)
 森 晴美
- セメントクリンカ粉碎用閉回路チューブ
 ミル系の空気冷却に関する検討
 ……小沼栄一, 橋 時哉……4 (25)
- 一面剪断試験による内部摩擦係数と剪断付着力
 ……寺下敬次郎, 宮南 啓……14 (25)
 岡嶋雅資
- 圧縮粉体成形物の剪断試験法の提案
 一剪断力に及ぼす圧縮時の2, 3の因子及び

- 滑沢剤の添加濃度の影響
 ……松田芳久, 中川桂子……21 (25)
 谷 咲子
- 連続式流動層による石膏粒子のか焼に
 関する実験的研究
 ……田中勇武, 内田正義……28 (25)
 篠原 久
- リボン羽根型粉粒体混合機の起動トルクについて
 ……佐藤 宗武……6 (26)
- 窒化ケイ素の粉碎処理と結晶構造の乱れ
 ……桑原好孝, 鈴木和夫……4 (27)
- 粉体の空間率および安息角におよぼす湿度の影響
 ……藤原英二, 鈴木道隆……11 (27)
 広田満昭, 大島敏男
- 部分分級効率の新しい測定法…菅沼 彰……16 (27)
- 摩擦帯電によるプラスチック類の
 種別選別装置の試作
 ……中島耀二, 田中達夫……4 (27)
- 湿潤粉体の混合操作における混練状態の評価
 ……寺下敬次郎, 塚口英世……14 (27)
 木村照雄, 神家規寿
 宮南 啓
- ブロータンク内の粒子運動に及ぼすノズル,
 挿入物および空隙率の影響
 ……富田侑嗣, 埴本 茂……22 (27)
- 摩擦帯電によるプラスチック類の
 種別選別装置の条件
 ……中島耀二, 田中達夫……4 (28)
- 湿潤粉体の混合操作における混練状態の評価
 ……寺下敬次郎, 塚口英世……14 (28)
 木村照男, 神家規寿
 宮南 啓
- ブロータンク内の粒子運動に及ぼすノズル,
 挿入物および空隙率の影響
 ……富田侑嗣, 埴本 茂……22 (28)
- 窒化ケイ素粉体の微粉碎とメカノケミストリ
 ……菅野 善則……4 (29)
- 空気により排出される貯槽装置における粉体の残留
 ……内海 良治……9 (29)
- 流動層燃焼装置の流動・燃焼特性
 一律速段階の簡易判別…田中 勇武……15 (29)
- 遠心バランス法による粒度分布測定
 ……荒川正文, 下村 玄……21 (29)
 今村 晃, 矢沢尚彦
 彼谷憲美, 北井宏美
- 微粉碎された種々の Si_3N_4 粉体の特性
 ……菅野 善則……4 (30)
- ガス圧勾配を利用した粉体かさ密度の制御
 ……A. G. McLean, 菅沼 彰……10 (30)
 松本幹治, 青木隆一
- <技術報告>
 ミクロンセパレータの理論と実際
 ……森本 益弘……13 (1)
- スーパーミクロンミル M502 NC 型について
 ……井上貞敏, 田中昭夫……15 (2)
- パーチカルコーンミル解砕(中砕)機
 ……細川 永一……17 (2)
- 粉碎機の無人操作運転について
 ……細川益男, 松山卓蔵……6 (4)
 横山藤平
- 砂を造るの記……………早坂 幹夫……38 (5)
- ガス吸収および集塵用スクラバーの選択
 ……吉田 哲夫……41 (5)
- ホソカワ/マイクロ パルスエアーの実際
 ……鈴木 昭明……12 (9)
- ビクトリーミルの汎用化
 ースリットライナーの適用についてー
 ……鈴木昭明, 安芸良明……68 (17)
- 低温粉碎について……中西英治, 豊立勝二……94 (18)
- 大型貯槽における貯槽形状と粉体圧
 ……杉田 稔……58 (19)
- 高濃度空気輸送装置の試作
 ……浦山 清, 北村 隆……73 (19)
- 試作流動乾燥機「エスカレート・ドライヤー」
 の特性……………横山藤平, 中川文雄… 100 (20)
 彼谷憲美
- 閉回路粉碎システムにおける実質的処理量推算法
 ……佐藤光彦, 横山豊和……42 (23)
- 吊り下げ式付着力測定機による粉体層の破断試験
 ……藤井謙治, 彼谷憲美……46 (23)
 浦山 清, 横山藤平
- 閉回路ボールミルにおける粉碎媒体最適充てん率
 ……小沼 栄一……13 (24)
- エキスパンドメタルの分級性能
 ……大島敏男, 廣田満昭……67 (24)
 田中正男
- 板谷産ゼオライトおよび合成ゼオライトの
 窒素選択吸着による富酸素空気の製造
 ……高坂彬夫, 松田良弘……12 (26)
- 溶融硫黄の固化形態と機械的強度の関係
 ……関口 勲, 中田宏志……28 (29)

ホソカワミクロンミニテーパーフィーダ

(MTF-1) の特性 ……水井 克也……15 (30)

<技術資料, 参考資料, 技術紹介, 技術ノート, 寄書>

ミクロンミルの歴史……………細川 益男……2 (1)

ミクロンミル改造の過程…………井上 貞敏……3 (1)

粉碎機の型式選定……………松山 卓蔵……8 (2)

最近の興味ある粉碎・分級試験例……………20 (2)

ヨーロッパでみた粉体粒度測定法

…………水渡 英二……2 (3)

ハイスイングボールミルについて

…………山内 史朗……33 (3)

Micromeritist in U.S.A. ……田中 達夫……2 (4)

整粒粉碎について……………中川 有三, 松居国夫……4 (4)

微量粉末のX線分析……………斎藤 喜彦……16 (4)

粉体混合に関する一, 二の知見

…………蟹瀬 巖……23 (4)

粉体空気輸送に関する二, 三の知見

—水平管路について—

…………北浦嘉之, 長瀬洋一……25 (4)

ミクロンセパレータの操作因子が分級に及ぼす

影響について……………技 術 部……43 (4)

高圧静電気による粉碎と分級

…………納 五平……25 (5)

ヨーロッパの粉体技術管見……………松山 卓蔵……26 (5)

化学工業と粉碎機……………営 業 部……55 (5)

オートバルパーの特性とその応用

…………技 術 部……58 (5)

異物質分離装置としてのスーパーミクロンミル

…………細川益男, 森本益弘……34 (7)

ミクロンドライヤーの実際について

…………丹羽 久雄……47 (7)

有機化学への振動ミルの応用

…………松山 卓蔵……22 (7)

欧州粉体機器のいろいろ……………吉田 哲夫……29 (9)

ナウタミキサーについて

…………松山卓蔵, 鈴木昭明……12 (10)

粉碎の選択性と粒度分布の先天性

…………中川 有三……31 (11)

ホッパ中における粉体の架橋現象とその対策

…………横山 藤平……34 (11)

石炭乾燥粉碎分級プラント

…………田中昭夫, 鈴木泰弘……57 (12)

ナウタミキサーよりの連続排出法についての実例

…………田中昭夫, 大坪 勲……59 (12)

パルスエアコレクター性能試験

…………鈴木 昭明……61 (12)

微粉末の少量定量供給装置

…………奥田 聡, 伊藤勇吾……32 (13)

井口高行

高速度写真—主として照明用光源について—

…………森島 直正……48 (13)

化工機メーカーにおける専門化およびエンジニ

アリング化の諸問題……………間島淳一郎……57 (13)

ナウタミキサーによる「重油煤濁減し」について

…………築 尚……97 (14)

粉体特性総合測定装置の試作

…………横山 藤平……102 (14)

見掛密度について……………津々見雄文……46 (15)

攪拌型乾燥機ソリッドエアについて

…………鈴木 昭明……54 (15)

パウダーテスターについて…………P. T 係……58 (15)

パウダーテスターの測定における計算の

ノモグラフ化……………神保元二, 羽多野重信……61 (15)

浅川真雄

圧縮におけるBockstiegel式と川北式について

…………川北公夫, 池田正明……66 (17)

混合偏析しやすい粉しにくい粉

…………田中 達夫……93 (19)

タッピング圧密に関する二, 三の考察

…………川北公夫, 池田正明……100 (19)

水銀圧入法ポロシメータによる多孔性物質の

細孔分布について

…………諸橋昭一, 長谷川哲夫……106 (19)

兎山康広

低温粉碎—リンレックスミルについて—

…………阪本有右, 豊立勝二……116 (20)

容器内粉粒体層の底圧について

…………森山龍一, 上滝具貞……122 (20)

板谷産ゼオライトの特性と利用

…………高坂 彬夫……128 (20)

標準粉体の紹介……………山下 憲……144 (20)

カプセル輸送用インゼクションフィーダー

…………上滝洋一, 富田侑嗣……34 (21)

上滝具貞

湿式電気集塵機ホソカワ/マイクロ エレクトロ

フィルの特性とその応用

…………第1環境システム(事)……84 (21)

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……………篠原 邦夫……82 (22)

試験用ダストの発生方法……………山下 憲……91 (22)

フローメトロンへの供給精度について

……浦山 清, 藤井謙治…	105 (22)
ロータリフィーダの洩れ空気…児玉 典夫…	52 (23)
微粉体を対象とした試作連続凍結乾燥機	
……横山藤平, 豊立勝二…	95 (23)
溝口健二, 中井利明	
栗田秀則, 原田雅恒	
カスケード・インパクトの設計法に関する一考察	
……奥田 聰, 山下治寿…	72 (24)
低温粉碎による抹茶製造…	豊立 勝二… 139 (24)
標準粉体の紹介(再録) ……山下 憲一…	142 (24)
分級性能の検討と粉体層の引張り試験	
一その応用の試み	
……藤井謙二, 横山藤平…	48 (25)
セファレキシン結晶の吸湿性	
……金庭延慶, 大塚 誠…	26 (27)
貯槽容器からの粉体の流出を促進する空気圧および	
妨害する付着力に関する最近の研究例	
……湯浅泰伸, 山城光雄…	34 (27)
クリーンルーム・パイオクリーンルームの	
計画について…	環境事業部… 81 (27)
マイクロトラックによる粒度分布測定	
……南 孝和…	98 (27)
PET連続式固相重合システムについて	
……大阪事業本部…	102 (27)
空気輸送における固体粒子の平均速度の計算式	
……森川 敬信…	29 (28)
異方性粉体の粉碎特性と碎製物の評価に関する	
基礎的検討…	横山藤平, 山口期行… 36 (28)
荒川正文, 井本三郎	
林 克巳	
秋田大学鉱山学部物性工学講座の開設について	
……牧野 和孝…	41 (28)
空気輸送における分散密度…	森川 敬信… 38 (29)
有機体粉の付着力におよぼす温度の影響	
……檀上和美, 飯田耕太郎…	41 (29)
砂田久一, 大塚昭信	
傾斜回転円板による異形粒子の分離実験	
……篠原邦夫, 松岡英司…	21 (30)
二次元ホッパーにおける流動時の空気圧および	
びかさ密度の分布…	竹下武成, 渡辺 始… 27 (30)
渥美邦夫	

<総 説>

超微粉碎について…	松山 卓蔵… 7 (1)
工業用篩機, 特に微粉域篩機について	
……細川永一, 横山藤平…	10 (1)

粉碎物の粒度測定法…	荒川 正文… 4 (3)
乾式分級機…	上田 康… 14 (3)
乳化装置について…	美間博之, 大貫延雄… 22 (3)
最近の注目すべき粉碎機…	松山 卓蔵… 36 (3)
医薬品工業と粉体…	神沢得之助… 39 (3)
平均質核燃料の再処理	
……矢島聖使, 岩本多美…	36 (4)
沈降法による最近の粒度測定装置について	
……井伊谷綱一, 木村典夫…	6 (5)
標準フルイについて…	三輪 茂雄… 30 (5)
粉碎の基礎法則に関する2, 3の提案	
……神保 元二…	3 (7)
粉体急速混合機について…	松山 卓蔵… 21 (7)
最近の食品工業における粉碎と粉砕機	
……美間 博之…	23 (7)
粉体オリフィスの設計…	三輪 茂雄… 25 (8)
医薬品と粉体工学…	林 信一… 88 (14)
微粒子の性質に関する二, 三の問題	
……金庭 延慶…	48 (15)
有機粉末の機械化学的变化	
……金庭延慶, 池川昭子…	40 (16)
粉粒体の密度測定…	川北公夫, 池田正明… 81 (17)
粉碎の語Ⅲ—粉碎理論は役に立つか—	
……田中 達夫…	87 (18)
流動層からの小粒子の飛び出し—飛び出し速度	
係数について—	篠原 久, 田中武男… 100 (18)
沈降速度補正係数について	
……沢島 恭, 彼谷憲美…	106 (18)
粉体の充填とカサ密度…	川北 公夫… 112 (18)
サスペンションのレオロジー	
……梅屋 薫…	80 (19)
川北粉体圧縮式の特性定数…	川北 公夫… 112 (19)
粒子層内における熱と水分の同時移動現象に	
関する諸問題…	倉前 正志… 136 (20)
菌体の破壊…	中村 厚三… 36 (21)
微粉体の粒度測定技術…	高坂 彬夫… 40 (21)
ホッパーからの粉粒体の自然流出速度	
……五十嵐平太郎…	58 (22)
カオリン鉱物の精製, 特性とその利用	
……高坂 彬夫…	70 (22)
凝集沈殿式廃水処理システムとスラリー処理	
……矢野武夫, 荒谷敏朗…	55 (23)
粉体と環境汚染…	東畑平一郎… 72 (23)
副生石膏の特性と利用…	高坂 彬夫… 78 (23)
粉粒体層の一面剪断試験	
……宮南 啓, 寺下敬次郎…	22 (24)

製薬工業における造粒

……杉原正泰, 大倉輝明……78 (24)

薬学における圧縮関連研究

……金庭延慶, 今川敏二……94 (24)

粒子の帯電……増田 弘昭… 104 (24)

天然ゼオライトの特性と利用

……高坂 彬夫… 120 (24)

バグフィルターの払落し……榎 淳一郎… 130 (24)

粉体粒子の幾何学形状のフーリエ解析

……後藤 圭司……65 (25)

マイクロコンピュータと粉体の粒度測定

……高坂 彬夫……74 (25)

噴霧造粒法によるマイクロカプセル法

——噴霧乾燥法をめぐる最近の話題

……川嶋嘉明, 林 山陽……89 (25)

竹中英雄

振動中における粉体の充てんおよび流動特性並

びに添加剤を利用した流動性の改善に関する

最近の研究動向……湯浅泰伸, 山城光雄……19 (26)

光透過法による微粉体の粒度分布測定の進歩

……高坂 彬夫……42 (27)

粒子のランダム充填と配位数

……吉本 啓, 後藤圭司……32 (28)

セメント用ボールミルにおける粉砕媒体径の影響

……小沼栄一, 梅木健二……44 (28)

粉粒体の比表面積測定技術……高坂 彬夫……58 (28)

電気集じん装置設計へのコヒテスタの応用

……牧野和孝, 山田昌治……48 (29)

河原正佳, 倉光鋼太郎

回転容器内粉粒体の偏折挙動とその対処について

——連続式回転円筒及び円錐型容器の場合——

……杉本 益規……53 (29)

副生芒硝の特性と利用……高坂 彬夫……76 (29)

粒状物質の形状分離

……古内正美, 後藤圭司……84 (29)

J. K. Beddow

無機物とポリマーの粉砕におけるメカノケミ

カル現象の相似と対応……久保輝一郎… 127 (30)

<解説, 講義, 講座>

分級装置概論……吉岡 直哉……17 (6)

湿式集塵装置(スクラパー)……吉田 哲夫……24 (6)

フィルター集塵……松山 卓蔵……36 (6)

流動浸漬塗装法について

……堀内 光, 松山卓蔵……31 (8)

化学者のための Micromeritics 入門(第1回)

……美間博之, 北森信之……35 (8)

化学者のための Micromeritics 入門(第2回)

……美間博之, 北森信之……18 (9)

化学者のための Micromeritics 入門(第3回)

……美間博之, 北森信之……35 (10)

化学者のための Micromeritics 入門(第4回)

……美間博之, 北森信之……46 (11)

粉粒体のふるい分け機……鈴木 昭明……46 (12)

化学者のための Micromeritics 入門(第5回)

……美間博之, 北森信之……28 (13)

化学者のための Micromeritics 入門(第6回)

……美間博之, 北森信之……90 (14)

粉砕理論……松居 国夫……68 (16)

粒度に関する試論(1)……菅沼 彰……76 (17)

粒度に関する試論(2)——平均粒度の意義と

名前について……菅沼 彰… 126 (18)

統計的推定(第1回)……菅沼 彰……96 (19)

統計的推定(第2回)……菅沼 彰… 111 (20)

湿式球形造粒……川島 嘉明……26 (21)

粉砕技術の考古学……三輪 茂雄……50 (21)

微細粉炭の気体管路輸送……岩淵 可浩……34 (25)

環境アセスメントの実例——火力発電所の建設に関

するアセスメント——若林嘉一郎……56 (25)

多成分粒度系粉体層の空間率予測

……大内山紀男, 田中達夫……94 (29)

粉体流量の計測……増田 弘昭……31 (30)

<文献紹介, 紹介, 特許紹介>

乾燥粉砕装置に関する熱精算……39 (4)

最近の粉砕と粉砕機……美間 博之……45 (5)

粉体の空気輸送に関する最近の特許発明について

……安達 功……43 (6)

東大物性研究所について……斎藤 喜彦……12 (7)

粉砕法則と粒度計算……三輪 茂雄……30 (7)

流路内壁における微粉末の附着について

……田中 達夫……37 (7)

粉砕機械に関する最近の特許発明について

……安達 功……43 (7)

衝撃粉砕の応力理論……田中 達夫……53 (8)

粉砕機械に関する最近の特許発明について

……安達 功……59 (8)

ソ連における粉砕研究……三輪 茂雄……24 (9)

集塵用布フィルター使用の最近の傾向

……向阪 保雄……23 (10)

ソ連における粉砕研究……三輪 茂雄……30 (10)

粉砕に関する最近の特許発明について

原料性質の変化する場合の粉砕過程の制御について	……安達 功……41 (10)
食品エロゾルについて	……中島 耀二……27 (11)
固体混合機における解混合の原因と対策	……光岡幸恵, 井伊谷鋼一……35 (12)
固体混合に関する最近の研究	……講崎 元清……39 (12)
貯槽内粉体圧	……佐藤 宗武……80 (14)
石炭粉砕過程	……鈴木 雅之……21 (15)
セメント粉砕プロセスにおけるエネルギー	……上滝具貞, 富田侑嗣……86 (17)
省力化の問題	……浅井 信義……64 (21)
オーストラリアの粉体工学	……神保 元二……88 (23)
幅広い粉体測定ニーズにこたえる測定室	……細川粉体工学研究所……53 (25)
パルスジェット払い落とし式バグフィルターによる集塵および洗浄効果についての研究	……横山 豊和……66 (29)
粉体の力学的挙動に及ぼす助剤, 添加剤の効果と機械的操作への応用	……内藤牧男, 神保元二……104 (29)

＜特集＞

◎粉体の単位操作と粉体物性

粉体物性測定上の諸問題—粉体の物性は本当に測定できるようになったのだろうか—

……神保 元二……4 (20)

固気混相流装置計画上の諸問題

……狩野 武……11 (20)

貯槽と粉体物性……青木 隆一……21 (20)

粉体物性と集塵技術……吉田 哲夫……33 (20)

粉粒体混合機の混合性能

……矢野武夫, 寺下敬次郎……39 (20)

◎粉粒体の物性とその測定

粉体物性の測定とその意義……荒川 正文……4 (22)

粉体の固結強度の計算……田中 達夫……9 (22)

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……16 (22)

微粒子の性質に関する二、三の問題 (続)

……金庭延慶, 今川敏二……18 (22)

凝集性粉体の流出

一試作した回転ホッパーについて—

……川合 誠……23 (22)

吊り下げ式付着力測定器の試作と測定

……彼谷憲美, 藤井謙治……32 (22)

横山藤平

◎粉粒体プロセス技術の現状

(総 論) 粉砕・分級プロセス

……神保 元二……33 (26)

(総 論) 乾燥プロセス……吉田 哲夫……39 (26)

(総 論) 粉粒体混合プロセス

……矢野 武夫……45 (26)

(総 論) 集じんプロセス技術の現状と将来

……井伊谷鋼一……50 (26)

(総 論) 粉粒体ハンドリングの現状と課題

……狩野 武……54 (26)

(製品紹介)

粉 砕 機……61 (26)

ホソカワ/ミクロン アイスクラッシャ……(63) ホソ

カワ/ミクロン ハンマミル, ハンマブレーカ……(65)

ホソカワ/フィッツ フィッツミル……(68) ホソカワ

/ミクロン フェザミル……(71) リーツ ラバーチョ

ップ……(74) ホソカワ/ミクロン ビクトリミル……(77)

ホソカワ/ミクロン ファインビクトリミル……(80)

ホソカワ/マイクロ パルベライザ……(84) ホソカワ

/マイクロ サンプルミル……(86) ホソカワ/マイクロ

バンタムミル……(87) ホソカワ/ミクロン ファイン

パルベライザ……(88) ホソカワ/マイクロ ACMパ

ルベライザ……(91) ホソカワ/マイクロ アトマイザ

……(95) ホソカワ/ミクロン スーパーミクロンミル

……(97) ホソカワ/ミクロン ファインミクロンミル

……(104) ホソカワ/ミクロン ミクロンジェット……

(106) ダイガス/ホソカワ リンレックスミル……(108)

ホソカワ/ミクロン ディスパミル……(111) リーツ

ディスインテグレート……(113)

分 級 機……117 (26)

ホソカワ/ミクロン ミクロンセパレータ……(118) ホ

ソカワ/ミクロン スーパーセパレータ……(125)

乾 燥 機……130 (26)

ホソカワ/ミクロン ミクロンドライヤ……(131) ホソ

カワ/フィッツ フルイドベッドドライヤ……(137) ホ

ソカワ/ミクロン エスカレートドライヤ……(140) ホ

ソカワ/ビーベックス ソリッドエア……(142) ホソカ

ワ/ビーベックス トーラスディスク……(146) ホソカ

ワ/ミクロン ミクロンミキサ(リアクタ)NXV型……

(149) リーツ サーマスクリュウ……(152)

混 合 機……154 (26)

ホソカワ/ミクロン ミクロンミキサ(リアクタ)……

(155) ホソカワ/ビーベックス タービュライザ……

(163) ホソカワ/ビーベックス リボンブレンダー……

(165) ホソカワ/ミクロン ランミックスシステム……

(167)

造粒機	169 (26)
ホソカワ/ミクロン グラニューライザ	(169) ホソカワ/フイツ チルソネータ
集塵装置	175 (26)
ホソカワ/マイクロ パルスエアー	(176) ホソカワ/トリット 小型集塵機
(183) ホソカワ/マイクロ エレクトロフィル	(188) 湿式集塵機
(192) ホソカワ/タケダ 活性炭脱臭塔	(199)
クリーンルーム, バイオクリーンルーム精密空調システムとその関連機器	200 (26)
ハンドリング装置	224 (26)
ホソカワ/ミクロン エアーコンベヤ	(225) ホソカワ/ミクロン 高濃度空気輸送装置
(229) ホソカワ/クインケンベルグ ディスクエレベータ	(231) ホソカワ/パイブラ ライブピンスクリューフィーダ
(233) ホソカワ/パイブラ ヘビィデューティフィーダ	(236) ホソカワ/マイクロ ロータリバルブ
(240) ホソカワ/ミクロン フロートロン	(242) ホソカワ/ミクロン フローメトロン
(245) ホソカワ/パイブラ ピンアクチベータ	(247)
測定機	252 (26)
ホソカワ/ミクロン パウダテスタ	(253) ホソカワ/ミクロン コヒテスタ
(255) ホソカワ/ミクロン カラコーダ	(257) ホソカワ/ミクロン ミクロン ウォシープ
(258)	
その他の装置および機械	259 (26)
(システム) 粉体処理プラントのシステム例	261 (26)
◎新しい粉体材料と粉体物性	
新材料と粉体特性	荒川 正文 54 (27)
ニューセラミックスについて	作花 済夫 65 (27)
高分子複合材料の現状	井本 三郎 74 (27)
◎超微粉体の物性と技術	
粉の細かさと粉の化学的性質	荒川 正文 70 (28)
粉碎操作による超微粉の生成と応用へのアプローチ	横山 藤平 76 (28)
超微粉の凝集と分級効率	菅沼 彰 82 (28)
超微粉の分級	奥田 聡 85 (28)
サブミクロン粒子の分離	江見 準 93 (28)
クリーンルームの実際	大熊 芳郎 104 (28)
◎粉体を取扱う現場と理論の接点	
テーマ1: 粉はどこまで細かくできるか	
粉碎で粉はどこまで細かくできるか	桑原好孝, 菅野善則 115 (29)
	鈴木和夫
湿式遠心法による微細粒子の分級	田中善之助 119 (29)

閉回路粉碎の現場での実際	小沼 栄一 121 (29)
テーマ2: サブミクロン粒子の物性をいかに測定するか	
サブミクロン粒子粒度測定の問題と展望	荒川 正文 126 (29)
粒度測定はどこまで可能か	向阪 保雄 132 (29)
サブミクロン粒子の粒度測定について	神保 元二 137 (29)
◎世界の粉体工学(工業)の現状	
アメリカにおける固体混合の最近の動向	L. T. Fan 36 (30)
	Yi-ming Chen
	F. S. Lai
粒子のキャラクターゼーション—丸い世界の不規則粒子—	B. Scarleff 41 (30)
サイクロン, 湿式スクラバ, 汙過集塵機の現状	F. Löffler 49 (30)
	J. Sievert
東ドイツにおける粉体工学	H. Schubert 62 (30)
タイにおける粉体工学の役割	W. Tanthanichakoon 70 (30)
韓国粉体工業技術の現況	姜錫浩, 崔堉植 73 (30)
最近の粉碎技術	井上外志雄 81 (30)
空気輸送におけるわが国の現状	森川 敬信 93 (30)
気固系流動層の流動特性と粉体物性	山崎 量平 99 (30)
貯槽の Overpressure について	森山 龍 109 (30)
国内における粉体力学物性測定に関する最近の研究	大島 敏男 116 (30)
＜随筆, 紀行＞	
粉体は魔物?	吉岡 直哉 11 (2)
マニラのハイアライ	細川 益男 31 (3)
もくひろい	北浦 嘉之 32 (3)
会話雑感	上田 敏之 21 (4)
ヨーロッパの乞食と泥棒	細川 益男 22 (4)
無題	細川 明彦 47 (4)
粉の囁き	池森 亀鶴 45 (6)
シカゴと東部の見学旅行から	井伊谷鋼一 46 (6)
ヨーロッパの Micromeritists	田中 達夫 48 (6)

The Spirit of Christmas...J. Robinson.....	7 (6)
英国で私が出会った珍談.....佐藤 功.....	50 (6)
H. E. Rose 教授の思い出.....田中 達夫.....	63 (8)
P. M. C. の一日.....谷口 浩.....	64 (8)

「粉体化学」に対する熱烈な一ファンの声援	
.....矢野 武夫.....	40 (9)

ヨーロッパの粉砕・粉体工学研究	
.....神保 元二.....	42 (9)

オーストラリアの粉砕工場.....横山 藤平.....	46 (9)
水車は廻る.....大貫 延雄.....	51 (9)

NAUTAMIX. N. V. を訪れて	
.....丹羽 久雄.....	47 (10)

粉砕法則に対するある期待.....田中 達夫.....	45 (11)
セイロン印象記「エカイ、デカイ、トウナイ」	

.....森本 益弘.....	54 (11)
粉砕の話 (1).....田中 達夫.....	40 (13)

ずいひつ.....岡田 辰三.....	79 (14)
粉砕の話 (2).....田中 達夫.....	40 (15)

働くよろこび.....岡田 辰三.....	44 (15)
公害問題の一面.....岡田 辰三.....	67 (16)

倉敷にて一新溪園の石臼群.....沢島 恭.....	67 (17)
椿の花と寅彦先生と.....沢島 恭.....	89 (19)

粒度、粒経、粒子径.....沢島 恭.....	74 (21)
粉砕機の系譜.....沢島 恭.....	89 (22)

ウスの話.....沢島 恭.....	70 (23)
こなやの集合体.....田中 達夫.....	94 (23)

アヘマを見て.....彼谷 憲美.....	115 (24)
お粗末な和製英語.....篠原 邦夫.....	88 (25)

欧州粉体工学シンポジウム1980に参加して	
.....横山 豊和.....	98 (25)

POWDER & SOLIDS '81に参加して	
.....藤井 謙治.....	31 (26)

中国での二週間.....寺下敬次郎.....	21 (27)
アヘマ'82に参加して.....横山 豊和.....	89 (27)

米国微粒子学会太平洋地域会議に出席して	
.....横山 豊和.....	54 (28)

<座談会、お説拝聴>

新日本化精工業株式会社をたずねて.....	43 (3)
備北粉化工業株式会社を尋ねて.....	45 (4)

赤穂海水工業株式会社を尋ねて.....	52 (5)
粉砕あれやこれや.....	51 (6)

粉とびある記.....	51 (7)
海外出張よもやまばなし.....	49 (10)

P. M. D. 社 E. L. Timm 技術本部長を囲む	
.....松山 卓蔵.....	57 (11)

<グラビア>

P. M. D. 社、ナウタ社のセールスカンファレンスと	
ロンドンにおけるホソカワフィルムショー	

.....横山 藤平.....	66 (12)
写真で見る細川粉体工学研究所.....	34 (13)

細川鉄工所枚方工場竣工記念アルバム.....	56 (14)
ルーマニア向タルクおよびベントナイト	

粉砕プラント.....	34 (15)
枚方建設計画完工記念アルバム.....	34 (18)

<製品紹介、新製品紹介、技術ニュース>

粉砕機案内.....	17 (1)
微粉域用篩機二種.....細川永一、横山藤平.....	13 (2)

ミクロンミル MoG 型について	
.....井上貞敏、柴田恒静.....	18 (2)

粉砕機案内 (2).....営業部.....	29 (3)
製品案内 (3).....	49 (4)

新製品紹介 (1) オート・バルバ.....	51 (4)
(2) 密閉型パイプ・フィーダー.....	52 (4)

製品案内 (4).....	61 (5)
Y型連続混合機.....	55 (7)

微粉砕乾燥機ミクロンドライヤー.....	56 (7)
マイクロ製品の展望	

.....細川益男、森本益弘.....	44 (8)
ホソカワ/マイクロ パルペライザー S型.....	39 (9)

ホソカワ/マイクロ モニターについて.....	44 (10)
ライブビンスクリューフィーダー、ビンアクチ	

ベータ、ヘビーデューティ フィーダー	
.....鈴木 昭明.....	62 (13)

ホソカワ/ストロングスコット・ソリッドエアー、	
コンティニューエータ、タービュライザー	

.....営業本部.....	101 (14)
ミクロンビクトリーミル、ミクロンフィーダーD型	

.....	62 (15)
-------	---------

ホソカワ/マイクロ エアトロン	
.....谷口 浩.....	127 (16)

ジャンボパルスエアー、ホソカワ/マイクロ	
エレクトロフィル、マリタイム	

.....集塵機(事).....	100 (17)
湿潤粉体の供給機.....化学機器(事).....	109 (17)

試験室用湿式篩分機.....	108 (17)
ホソカワ/ミクロン ファインミクロンミル、ホソカ	

ワ/カータ ノンブリッジングホッパー、ホソカワ/	
カータ デンシファイヤー、ホソカワ/カータ バッ	

グフィルター、ホソカワ/カータ ドラムフィルター	
.....粉体機器(事).....	132 (18)

バッグフィルターによる高温ダスト集塵

……集塵機(事)… 136 (18)

乾燥装置……化学機器(事)… 122 (19)

ホソカワ/マイクロ ACMパルベライザー

…粉体機器(事)… 124 (19)

ホソカワ/ダイガス リンレックスミル……27 (19)

ホソカワ/トリット ダウンドラフトベンチ…50 (19)

カラコーダ (Colocorder) ……63 (19)

トラスディスク ドライヤ……95 (19)

ジャンボパルスエアー (大型ホソカワ/マイクロ
パルスエアー JTP シリーズ)

…第二環境システム(事)… 152 (20)

混合機……化学システム(事)… 156 (20)

ラミマックスシステムについて……環境(事)……57 (21)

粉体流量制御における“フローマスター”の性能

……横山 藤平……75 (21)

トラスディスク……化学システム(事)……88 (21)

中圧空型パルスエアーおよびユニフィルター

……第二環境システム(事)……90 (21)

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… 107 (22)

ランミックス・システム

……化学システム事業本部… 112 (22)

ホソカワ/マイクロ パルスエール P シリーズ

……第二環境システム事業本部… 114 (22)

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部… 116 (22)

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… 118 (22)

超微粉域のための高速ミクロンセパレータ

…第二事業本部… 101 (23)

ホソカワ層流 BC ユニットについて

……環境事業部… 103 (23)

ホソカワ/ミクロン スーパーセパレータ MSS 型

…細川粉体工学研究所… 150 (24)

ホソカワ/ミクロン コヒテスタ

…細川粉体工学研究所… 154 (24)

ホソカワ/フィッツ, チルソネータ,

フルイドベッドドライヤ, マラクセータ

…細川鉄工所… 156 (24)

リーツサーマスキュー, リーツパーチェッパ,

リーツディスインテグレータ

…細川鉄工所… 160 (24)

ホソカワ/ミクロン ミクロンチェッカ (BC-100)

…細川粉体工学研究所… 102 (25)

ホソカワ/フィッツ フィッツミル

…ホソカワミクロン機… 104 (25)

拡がりゆくホソカワ/ミクロン NX ヲキサの用途

…ホソカワミクロン機… 107 (25)

ホソカワミクロン ミクロンジェット

…東京事業本部…93 (27)

ホソカワミクロン ミクロン パーテックミル

について……東京事業本部… 127 (28)

クリーンルーム塵埃集中連続監視管理システム,

ポータブル塵埃計, 発信機内蔵微差圧計

……環境事業部… 130 (28)

微粉末用真空圧縮充填システムについて

……細川粉器サービス機… 134 (28)

ホソカワ東京機器サービス機

沈降式自動粒度分布測定装置 ホソカワミクロン

セジメンピュータ…細川粉体工学研究所… 136 (28)

ホソカワミクロン ミクロンチェッカ

…細川粉体工学研究所… 139 (28)

ホソカワミクロン 金属微粒子発生装置

…細川粉体工学研究所… 140 (29)

ホソカワミクロン ミクロンサーモプロセッサ

…東京事業本部… 144 (29)

ホソカワ/ナウタ フルイドベッドプロセッサ

…東京事業本部… 148 (29)

ホソカワミクロン ロータリバルブ

…ホソカワ東京機器サービス機… 152 (29)

ホソカワミクロン ファインシャープセパレータ

…東京事業本部… 142 (30)

ホソカワ/ソノダイン パルスコンパクション

ドライイングシステム……大阪事業本部… 146 (30)

圧力(室力, ダクト圧)制御装置

……環境事業部… 149 (30)

ホソカワミクロン ラボミキサ (LV-0)

…細川粉体工学研究所… 152 (30)

<ニュース>

東京支店開設に際して……細川 明彦……16 (1)

年間行事……17 (1)

年間行事……22 (2)

東京支店便り……24 (2)

最近の興味ある試験例……45 (3)

年間行事……46 (3)

東京支店便り……47 (3)

最近の興味ある試験例……48 (4)

年間行事……53 (4)

Chemical Age に紹介された

スーパーミクロンミルについて	51 (5)
粉体工学に関する巡回講演会について	62 (5)
最近の興味あるテスト例	62 (5)
年間行事	63 (5)
年間行事	58 (6)
最近の興味あるテスト例	60 (6)
最近の興味あるテスト例	57 (7)
年間行事	58 (7)
年間行事	67 (8)
ホソカワの海外活動	間島淳一郎 52 (9)
年間行事	56 (9)
アメリカ P.M.D 社より	佐藤 功 53 (10)
最近の興味あるテスト成功例	営業部 55 (10)
ホソカワニュース	57 (10)
ホソカワ50年略史	62 (11)
最近の興味あるテスト例	65 (11)
ホソカワニュース	67 (11)
最近の興味あるテスト例	65 (12)
ホソカワニュース	70 (12)
ホソカワニュース	67 (13)
ホソカワニュース	111 (14)
ホソカワニュース	66 (15)
ホソカワニュース	137 (16)
ホソカワニュース	112 (17)
ホソカワ・ヨーロッパ・リミテッドおよび ホソカワトリット株式会社の設立	海外事業本部 139 (18)
粉体工業懇話会の活動	編集部 142 (18)
ホソカワニュース	144 (18)
“粉砕”誌投稿規定	146 (18)
海外活動の紹介	海外事業部 127 (18)
改正された試験用ダスト規格 (JIS Z 8901)	1 (19)
ホソカワニュース	129 (19)
環境問題シンポジウム開かる	第9回粉体工学に関する講演討論会より
	88 (20)
佛細川鉄工所社長 細川益男氏	
紫綬褒章を受章する	126 (20)
海外ニュース	海外事業本部 158 (20)
ホソカワニュース	160 (20)
第10回粉体工学に関する講演討論会開かる	
一連続自動化へのアプローチ	56 (21)
ホソカワニュース	94 (21)
粉砕 総索引 No. 1~No. 21	編集部 97 (21)

第11回粉体工学に関する講演討論会開催

一工学に応用できる粉体物性のつかまえ方と実演	111 (22)
ホソカワニュース	120 (22)
第12回粉体工学に関する講演討論会開催さる	
一固液粉体処理プロセスシンポジウム	14 (23)
ホソカワニュース	109 (23)
ホソカワニュース	164 (24)
粉体工学に関する講演討論会開催さる	3 (25)
ホソカワニュース	111 (25)
ホソカワニュース	271 (26)
第16回粉体工学に関する講演討論会の開催	3 (27)
ホソカワニュース	105 (27)
第17回粉体工学に関する講演討論会催される	3 (28)
ホソカワニュース	142 (28)
第18回粉体工学に関する講演討論会開く	3 (29)
ホソカワニュース	154 (29)
第19回粉体工学に関する講演討論会から	153 (30)
ホソカワニュース	154 (30)
“粉砕”誌総索引	157 (30)
<埋草>	
最近の講演会だより	8 (2)
試験用粉体, JIS 規格制定さる	21 (2)
ゴム製品とサイクロン	13 (3)
ガラス球をつくる	30 (3)
粒度測定機の一工夫	35 (3)
粉も両手に空気	48 (3)
自動秤量装置の一工夫	15 (4)
Ballistic Particle Size separator	37 (5)
粉砕異色10題	54 (5)
Das Permeabilimeter	57 (5)
粉砕機の基礎と伝導ベルト	61 (5)
東京大学物性研究所について	斎藤 喜彦 12 (7)
有機化学への振動ミルの応用	松山 卓蔵 22 (7)
知っていて損ではない製品のいくつか	6, 17, 38, 41 (9)
ニュージーランドのスーパーミクロンミル	50 (9)
燃焼によるプラスチックの鑑別法	56 (11)
粉体随想1ー発火の巻	15 (11)
粉体随想2ートラंकとふろしきと粉体機械	33 (11)
粉体随想3ー架橋と流動について	44 (11)
粉体随想4ー分級機で粉砕	53 (11)
パウダテスト海外へ進出	49 (16)
粉の話ー魚のエサ	39 (17)

粉の話—化粧品—	56 (17)
フンタイ・スリラー	80 (17)
粉の話—おしろいのかおり—	111 (17)
パウダテストについて	9 (18)
ドーナツ型振動板を備えたフロートロン	141 (18)
新型テーブルフィーダーの登場	143 (18)
ヨーロッパからの通信	85, 99 (18)
Rittinger と新選組	11 (19)
コナとオンナゴコロと数学	121 (19)
新型フロートロン—その改良のポイント—	72 (19)
新製品ひとこと—鋳物砂混合機 ホソカワ/ ストロング サンドターボ—	32 (20)
新製品ひとこと—産業廃棄物処理機 アレックス の開発—	109 (20)
新製品ひとこと—粉体輸送機 ホソカワ/クイン ケンベルグ ディスクエレベータ—	83 (21)
新製品ひとこと—火粉検知器 ホソカワ/ミクロン ルミアラーム—	89 (21)
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—	51 (22)

<特許一言メモ>

めまぐるしく改正される特許法 (No. 1)	22 (22)	実用新案の効用 (No. 24)	64 (26)
公開特許公報 (No. 2)	43 (22)	特許表示 (No. 25)	64 (26)
特許協力条約 (No. 3)	119 (22)	特許公報の見方 (No. 26)	76 (26)
特許出願いまむかし (No. 4)	23 (23)	すぐれた発明と考案 (No. 27)	103 (26)
弁理士に依頼しない特許出願 (No. 5)	41 (23)	特許庁への書類郵送について (No. 28)	112 (26)
特許の寿命 (No. 6)	54 (23)	こんなものでも出願できる (No. 29)	116 (26)
登録商標の更新手続 (No. 7)	69 (23)	よい商標とは (No. 30)	182 (26)
公開公報は張り子のトラ (No. 8)	77 (23)	大切な商標の管理 (No. 31)	191 (26)
審査請求のこと (No. 9)	108 (23)	新技術と特許出願 (No. 32)	230 (26)
特許庁工業所有権相談所 (No. 10)	110 (23)	特許料および登録の値上 (No. 33)	232 (26)
弁理士の効用 (No. 11)	32 (24)	出願手数料の値上げ (No. 34)	239 (26)
特許公報の読み方 (No. 12)	59 (24)	各国の特許権存続期間 (No. 35)	244 (26)
ヨーロッパ特許 (No. 13)	71 (24)	商標と商号のちがひ (No. 36)	256 (26)
IPC (国際特許分類) (No. 14)	103 (24)	意匠デザインとは (No. 37)	33 (27)
特許を取得するにはどれくらいの期間が かかるか (No. 15)	114 (24)	INID コードとは (No. 38)	53 (27)
新たに発行される公開公報 (No. 16)	27 (25)	特許庁長官 (No. 39)	64 (27)
新たに発行される再公開公報 (No. 17)	33 (25)	特許でよくいう「ハウタイ」とは (No. 40)	64 (27)
発明の数 (No. 18)	47 (25)	特許でよくいう「イ号」とは (No. 41)	73 (27)
実施態様項 (No. 19)	55 (25)	優先権主張 (No. 42)	80 (27)
一つの特許に付される沢山の番号 (No. 20)	73 (25)	意匠と著作権の違い (No. 43)	101 (27)
特許料金 (No. 21)	97 (25)	“Gマーク”とは (No. 44)	21 (28)
審査請求 (No. 22)	110 (25)	先願主義 (No. 45)	28 (28)
先使用权 (No. 23)	60 (26)	特許の「ゲンボ」 (No. 46)	43 (28)
		商品と区分 (No. 47)	53 (28)
		商標の更新登録 (No. 48)	69 (28)
		出願は積極的に (No. 49)	75 (28)
		“特許”を生きものにたとえると (No. 50)	81 (28)
		どんなものが“特許”になるか (No. 51)	84 (28)
		どんなものが“実用新案”になるか (No. 52)	103 (28)
		出願最多の日本 (No. 53)	126 (28)
		意匠登録とは (No. 54)	129 (28)
		商標とブランド (No. 55)	133 (28)
		“製めん機事件”解決す (No. 56)	141 (28)
		発明者と出願人のちがひ (No. 57)	27 (29)
		サービスマークも商標に (No. 58)	37 (29)
		公開公報をまねたとき (No. 59)	52 (29)
		省力化をめざす特許庁 (No. 60)	65 (29)
		審査のペーパーレス化に向けて (No. 61)	93 (29)
		特許の実施化率は何パーセント? (No. 62)	103 (29)
		企業化は万分の2 (No. 63)	114 (29)
		特許庁への情報提供 (No. 64)	114 (29)
		連合商標とは (No. 65)	136 (29)
		類似意匠とは (No. 66)	139 (29)
		特許表示 (No. 67)	147 (29)

増えてきつつある国際出願 (No. 68)	9 (30)	出願書類等コピーの使用が可能となる (No. 73)	40 (30)
米国特許, 外国からの取得は日本が一番 (No. 69)	14 (30)	ハイブリッドシステム (No. 74)	82 (30)
韓国への出願も日本が一番 (No. 70)	14 (30)	周知慣用技術集の発行について (No. 75) ...	126 (30)
特許印紙の額面の種類が増えた (No. 71)	30 (30)	膨大な出願件数と増える未処理件数 (No. 76)	... 151 (30)
意見書・補正書の指定期間の延長 (No. 72) ...	35 (30)		

<著者別索引>

- | | |
|--|--|
| 青木 隆一..... 18(5), 3(13), 21(20), 10(21), 2(29)
10(30) | 江見 準.....10(11), 93(28) |
| 渥美 邦夫..... 27(30) | 大内山紀男..... 94(29) |
| 秋葉 育郎..... 49(20) | 大熊 芳郎.....104(28) |
| 浅川 貞雄..... 61(15) | 大倉 輝明..... 78(24) |
| 浅井 信義..... 64(21) | 大島 祐子..... 10(23) |
| 安達 功.....43(6), 43(7), 59(8), 41(10) | 大島 敏男.....67(24), 11(27), 116(30) |
| 荒川 正文.....4(3), 14(5), 17(7), 2(22), 4(22),
54(27), 36(28), 70(28), 21(29), 126(29) | 大竹 伝雄.....9(7), 3(10) |
| 荒谷 敏朗.....42(19), 55(23) | 太田 元.....28(19), 52(22) |
| 荒井 誠司..... 33(24) | 大坪 勲..... 59(12) |
| 栗田 秀則..... 95(23) | 大塚 昭信..... 41(29) |
| 安芸 良明..... 68(17) | 大塚 誠..... 26(27) |
| 飯島 寿子..... 12(19) | 大貫 延雄.....22(3), 51(9) |
| 飯田耕太郎..... 41(29) | 岡田 辰三..... 1(12), 79(14), 44(15), 67(16) |
| 五十嵐平太郎..... 58(22) | 岡嶋 雅資..... 14(25) |
| 池川 昭子.....40(16), 12(19) | 岡田寿太郎..... 35(19) |
| 池田 正明.....66(17), 81(17), 100(19) | 岡野 靖彦..... 52(22) |
| 池原 和樹..... 52(24) | 奥田 聰..... 2(5), 2(11), 32(13), 72(24), 85(28) |
| 池森 亀鶴..... 45(6) | 小沼 栄一.....13(23), 4(25), 44(28), 121(29) |
| 石蔵 利文..... 60(24) | 納 五平..... 25(5) |
| 伊東 勇吾..... 32(13) | 蟹瀬 巖..... 23(4) |
| 井伊谷鋼一.....18(3), 6(5), 46(6), 35(12), 2(13)
50(26), 2(28) | 狩野 武.....11(19), 2(21), 51(26) |
| 井上 貞敏.....3(1), 15(2), 18(2) | 兜山 康治.....106(19) |
| 井上外志雄..... 50(18), 28(29), 81(30) | 亀井 三郎..... 2(2), 39(4) |
| 井本 三郎.....74(27), 36(28) | 彼谷 憲美.....106(18), 51(19), 99(20), 32(22), 46(23)
115(24), 21(29) |
| 井口 高行..... 32(13) | 金原 清.....25(15), 30(14), 2(15) |
| 猪爪 孝一..... 49(20) | 金庭 延慶..... 48(15), 40(16), 12(19), 18(22), 94(24)
26(27) |
| 今泉 常正..... 28(19) | 久保輝一郎.....127(30) |
| 今川 敏二.....18(22), 94(24) | 河内山 茂..... 50(16) |
| 今村 晃..... 21(29) | 河原 正佳..... 48(29) |
| 岩本 多美..... 36(4) | 川合 誠一..... 7(9), 18(14), 23(22), 52(24) |
| 岩淵 可浩..... 34(25) | 川口 初男..... 34(17) |
| 植松 時雄.....28(4), 11(6) | 川北 公夫.....66(17), 81(17), 112(18), 100(19) |
| 上田 康..... 14(3) | 川嶋 嘉明.....29(21), 10(23), 88(24), 89(25) |
| 上田 敏之..... 21(4) | 神沢得之助..... 39(3) |
| 上松 一則..... 38(24) | 神田 良照.....2(18) |
| 内田 正義..... 28(25) | 管野 善則.....4(29), 115(29), 4(30) |
| 内海 良治.....9(29) | 北井 宏美..... 21(29) |
| 梅木 健二..... 44(28) | 北浦 嘉之.....32(3), 25(4) |
| 梅屋 薫..... 80(19) | 北村 敦.....2(15) |
| 浦山 清..... 8(13), 66(18), 73(19), 76(21), 105(22)
46(23) | 北村 隆.....66(18), 73(19) |
| | 北森 信之..... 35(18), 18(9), 35(10), 46(11), 28(13)
90(14) |

木村 典夫	18(3), 8(5), 50(14)	神保 元二	4(2), 17(4), 13(7), 42(9), 10(14)
木村 照夫	14(28)		61(15), 1(16), 4(20), 88(23), 33(26), 104(29), 137(29)
清原 英元	3(23)	神家 規寿	14(28)
倉前 正志	3(17), 135(20), 32(23)	菅沼 彰	76(17), 128(18), 96(19), 110(20), 16(27), 82(28), 10(30)
倉光鋼太郎	48(29)	杉田 稔	58(19), 15(23)
桑名 三雅	50(14)	杉 正浩	60(24)
桑原 好孝	4(27), 115(29)	杉原 正泰	78(24)
黒田 博之	9(7)	杉本 益規	53(29)
講崎 元清	39(12)	鈴木 昭明	12(9), 12(10), 20(10), 20(11), 46(12), 61(12), 82(13), 74(14), 54(15), 117(16), 124(16), 57(17), 68(17), 8(18), 28(18)
向阪 保雄	23(10), 29(12), 132(29)	鈴木 泰弘	57(12)
児玉 典夫	52(23)	鈴木 雅之	21(15)
後藤 圭司	65(25), 32(28), 84(29)	鈴木 和夫	4(27), 115(29)
甲盛 直博	68(14)	鈴木 道隆	11(27)
齊藤 嘉彦	18(4), 12(7)	水渡 英二	2(3)
斎藤 文良	2(18), 70(20)	砂田 久一	41(29)
斎藤 和男	64(19)	関口 勲	28(29)
坂口 玉雄	17(21)	W. Tanthanichakoon	70(30)
姜 錫浩	73(30)	高橋 和士	24(16)
崔 隅植	73(30)	高坂 彬夫	127(20), 40(21), 70(22), 78(23), 120(24), 74(25), 12(26), 42(27), 58(28), 78(29)
阪上 雅保	10(18)	高木 史人	15(23)
佐納 良樹	8(6), 26(14), 112(16), 40(17), 23(18), 49(20), 4(21)	竹内 和	8(15)
佐藤 功	50(6), 53(10)	竹下 武成	27(30)
佐藤 宗武	80(14), 18(16), 10(17), 81(20), 6(26)	竹中 英雄	10(23), 88(24), 89(25)
佐藤 光彦	42(23)	橘 晴哉	4(25)
作花 濟夫	65(27)	伊達木新三	61(18), 58(20)
沢畠 恭	67(17), 1(18), 106(18), 89(91), 74(21), 89(22), 70(23)	立石 享司	18(16)
J. Sievert	49(30)	田中 昭夫	15(2), 57(12), 59(12)
H. Schubert	62(30)	田中 達夫	2(4), 48(6), 37(7), 53(8), 63(8), 45(11), 40(13), 40(15), 2(16), 3(17), 2(19), 64(19), 93(19), 3(20), 87(18), 9(22), 16(22), 2(23), 94(23), 4(28)
B. Scarlett	41(30)	田中 勇武	33(16), 100(18), 44(22), 80(24), 28(25), 15(29), 94(29)
柴田 恒靜	18(2)	田中 正男	67(24)
柴原 昌宏	30(14)	田中善之助	119(29)
篠原 久	33(16), 100(18), 58(20), 44(22), 60(24), 28(25)	谷口 浩	64(8), 124(16), 127(16)
篠原 邦夫	64(19), 62(20), 82(22), 85(25), 21(30)	谷口 一昭	4(12), 44(14)
渋谷 政夫	15(8)	谷 咲子	21(25)
島谷 敏久	57(17), 28(18)	檀上 和美	4(29)
清水 明夫	26(14)	Y-ming Chen	36(30)
清水 慎一	103(16)	鶴 泰	33(16)
上滝 具貞	3(8), 25(12), 30(14), 2(15), 50(16), 86(17), 37(18), 61(18), 81(20), 121(20), 17(21), 34(21), 39(22), 3(23), 24(23), 46(24)		
上滝 洋一	34(21)		
下村 玄	21(29)		

塚口 英世..... 14(28)
 津久見雄文..... 46(15)
 網川 浩..... 10(21), 17(24), 33(24)
 椿 淳一郎..... 130(24)
 寺下敬次郎..... 98(16), 22(17), 14(18), 42(19), 39(20)
 4(24), 22(24), 14(25), 45(26), 21(27)
 14(28)
 東稔 節治..... 9(7), 3(10)
 東畑平一郎..... 72(23)
 富田 侑嗣..... 86(17), 61(18), 34(21), 39(22), 3(23)
 22(28)
 富田 美穂..... 28(19)
 豊立 勝二..... 29(12), 124(16), 94(18), 115(20), 95(23)
 139(24)
 知福 博行..... 42(19)
 内藤 牧男..... 104(29)
 長瀬 洋一..... 25(41)
 中井 利明..... 115(20), 95(23)
 中川 有三..... 3(2), 1(4), 4(4), 31(11), 2(20)
 2(25)
 中川 文雄..... 20(13), 68(14), 57(17), 28(18), 51(19)
 99(20)
 中川 桂子..... 21(25)
 中島 耀二..... 27(11), 2(16), 2(19), 4(27)
 中島 裕夫..... 3(17)
 中島 昌弘..... 10(23)
 中田 宏志..... 28(29)
 中田 好洋..... 24(16), 105(20)
 中富 美鈴..... 46(24)
 中西 英治..... 94(18)
 中原 俊輔..... 33(16)
 中村 厚三..... 36(21)
 中村 貞男..... 28(4)
 中村 喜義..... 11(12), 12(15)
 中野 敏..... 8(6)
 中本 正弘..... 13(7), 16(10), 16(11)
 新津 靖..... 32(4)
 新田 伸子..... 12(19)
 丹羽 久雄..... 47(7), 47(10)
 野村 英司..... 50(14)
 羽多野重信..... 61(15)
 橋本 啓治..... 10(21)
 橋本 正雄..... 4(23)
 長谷川 勝..... 50(17), 71(18)
 長谷川哲夫..... 100(19)
 花崎 芳朗..... 62(20)

原田 教男..... 81(20)
 原田 雅恒..... 95(23)
 林 山陽..... 89(25)
 林 克己..... 36(28)
 林 信一..... 88(14), 35(19)
 早坂 幹夫..... 38(5)
 早野 延男..... 3(8), 50(16), 37(18), 81(20), 17(21)
 24(23)
 廣田 満昭..... 67(24), 11(27)
 L. T. Fan..... 38(30)
 福本 史郎..... 13(7)
 福井 雄二..... 10(21)
 福永 温子..... 24(23)
 藤木 俊介..... 37(18)
 藤井 康博..... 37(18)
 藤井 謙二..... 32(22), 105(22), 46(23), 48(25), 31(26)
 藤原 英二..... 11(27)
 古内 正美..... 84(29)
 B. BeKe 64(21)
 細川 永一..... 1(1), 7(1), 1(2), 13(2), 1(3)
 1(7), 13(7)
 細川 益男..... 2(1), 8(3), 31(3), 8(4), 22(4)
 1(5), 22(5), 3(6), 13(7), 34(7)
 2(8), 44(8), 1(13), 2(28), 2(30)
 細川 明彦..... 16(1), 47(4), 1(15)
 堀内 光..... 31(8)
 A. G. McLean..... 4(30)
 堀本 茂..... 22(28)
 間島淳一郎..... 52(9), 57(13)
 牧野 和孝..... 48(29)
 増田 弘昭..... 104(24), 31(30)
 松岡 英司..... 21(30)
 松居 国夫..... 2(14), 4(4), 68(16)
 松田 芳久..... 35(19), 21(25)
 松本 幹治..... 10(30)
 松田 良弘..... 12(26)
 松野 孝好..... 105(20), 41(28)
 松山 卓蔵..... 7(1), 9(2), 8(3), 36(3), 6(4)
 11(4), 22(5), 28(5), 3(6), 36(6)
 21(7), 22(7), 31(8), 34(9), 12(10)
 16(10), 16(20), 16(11), 20(11), 57(11)
 丸子 修..... 80(18)
 美間 博之..... 22(3), 23(7), 35(8), 18(9), 35(10)
 46(11), 28(13), 90(14)
 三輪 茂雄..... 30(5), 45(5), 30(7), 25(8), 24(9)
 30(10), 103(16), 10(18), 50(21)

水井 克也	15(30)	山崎 量平	3(13), 99(30)
溝口 健二	95(23)	山下 憲一	143(20), 91(22), 142(24)
南孝 和	74(19), 98(27)	山下 治寿	72(24)
光岡 幸恵	35(12)	山城 光雄	19(26), 34(27)
道井 啓右	52(24)	山田 昌治	48(29)
宮南 啓	26(16), 22(24), 14(25), 14(28)	山中 久人	50(16), 37(18), 17(21)
武者 孝敏	22(17)	八嶋 三郎	2(18), 70(20)
森 芳郎	2(4), 17(4)	柳 正光	7(12)
森 一徳	4(24)	梁 尚	97(14)
森 晴美	88(24)	湯浅 泰伸	19(26), 34(27)
森川 敬信	11(6), 3(9), 29(28), 28(29), 93(30)	湯谷 正司	39(22)
森島 直正	6(11), 48(13)	油谷 暢悦	38(24)
森田 洋二	2(11)	横山 藤平	10(1), 13(2), 13(7), 46(9), 34(11) 66(12), 8(13), 68(14), 102(14), 57(17) 66(18), 51(19), 99(20), 78(21), 32(22) 46(23), 95(23), 48(25), 36(28), 76(28)
森嶋 正文	61(18)	横山 正	6(4)
森本 益弘	13(1), 8(3), 11(4), 22(5), 3(6) 34(7), 44(8), 54(11)	横山 豊和	42(23), 98(25), 74(27), 54(28), 66(29)
森山 龍一	121(20), 109(30)	吉岡 直哉	11(2), 17(6), 10(11), 1(14), 4(26)
本山 安訓	4(21)	吉田 哲夫	41(5), 24(6), 29(9), 1(11), 1(19) 33(20), 39(26), 2(27)
諸橋 昭一	34(17), 106(19)	吉木 啓	32(28)
矢ヶ崎孝彦	40(17)	吉原 紀幸	56(20)
矢沢 尚彦	21(29)	葭村 雄二	44(22)
矢島 聖使	36(4), 15(18)	若菜 宏啓	30(14)
矢野 武夫	8(6), 1(9), 40(9), 18(16), 26(16) 1(17), 10(17), 22(17), 14(18), 42(19) 39(20), 91(20), 55(23), 3(24), 4(24) 22(24), 3(26), 45(26)	若林嘉一郎	62(14), 56(25)
山内 史朗	33(3), 6(10), 7(12), 40(14), 8(16) 50(17), 71(18)	渡辺 始	24(16), 105(20), 27(30)
山口 信吉	62(14)	和田 憲造	24(23), 46(24)
山口 朝行	36(28)	F. S. Lai	36(30)
山崎 利夫	96(16)	F. Löffler	49(30)
		J. Robinson	7(6)

“粉碎”誌編集委員会

編集委員会査読委員

査読委員長	大阪府立大学名誉教授	矢野 武夫氏
査読委員	中部大学 教授	吉田 哲夫氏
“ ”	愛知工業大学 教授	井伊谷鋼一氏
“ ”	京都大学 名誉教授	吉岡 直哉氏
“ ”	京都工芸繊維大学 教授	荒川 正文氏
“ ”	名古屋大学 教授	神保 元二氏
“ ”	大阪府立大学 教授	宮南 啓氏
“ ”	大阪府立大学 教授	向阪 保雄氏

(御年令順)

“粉碎”誌投稿規定抜萃

1. 原稿の種類

1. 1 研究報告

粉体工学に関連する完結した研究で、他誌に未発表のもの。和文の著者摘録と英文要旨をつけて下さい。また図表の説明は英訳して下さい。なお、研究報告には査読があります。

1. 2 技術報告

粉体工学に関連する工業化試験、工業装置の運転あるいは設計法に関する研究成果をまとめた内容のもの。なお、技術報告にも査読があります。

1. 3 総説(解説および講義も含む)

粉体工学に関連あるいは寄与する分野の解説的記事、この場合特に著者の意見や見解を盛り込んだ入門的わかり易く説明したもの。

1. 4 参考資料

粉体工学に関連する研究や調査などのメモ、記録、あるいは装置の設計、運転、測定等に必要と思われる内容をもつもの。粉体工学に関連する問題に対する意見あるいは討論、本誌に発表された研究論文に関する補遺あるいは意見を記述したもの。

1. 5 文献紹介

粉体工学に関連する文献の紹介、紹介者の意見や批判を適当におりませたもの。

1. 6 随筆

1. 7 その他

2. 原稿の編集

1) 研究報告および技術報告につきましては査読委員の査読結果に従って訂正を求めることがありますので御協力下さい。

2) 原則として年1回発行します。

3) 抜刷を御希望の場合は編集事務局へ御連絡下さい。実費にてお願いたします。

4) 掲載済みの原稿は返却いたします。

5) 掲載しました原稿に対しては若干の稿料を送らせていただきます。ただし、研究報告および技術報告は原則として抜刷100部贈呈し、稿料は支払いません。

◎連絡先

〒573 枚方市招提田近1丁目9番地

㈱細川粉体工学研究所

“粉碎”編集事務局宛 (Tel 0720-57-3721)

原稿募集

“粉碎”誌の原稿を募集いたします。粉体工学に係る研究報告、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62年1月末日

原稿締切 昭和61年8月末日

編集後記

* ホソカワミクロン株式会社創立70周年に際し、本号を記念号とし、特集「世界の粉体工学(工業)の現状」を企画いたしました。外国より6編、国内より5編のレビューを投稿して頂き、充実した内容となりました。外国よりの原稿は当研究所の所員の協力を得て日本語に翻訳し、掲載いたしました。誌面を借り謝意を表します。

* また、“粉碎”誌の総索引を巻末に掲げました。昭和32年の創刊号以来30号を数え、その先人の足跡を振り返って見る時、その偉大さをひしひしと感じ、編集に携る者としての責任を痛感する次第であります。

“粉碎” No. 30 1986年 (非売品)

昭和61年2月25日

印刷

昭和61年3月5日

発行

編集発行責任者

横山 藤平

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

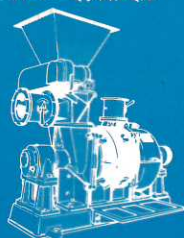
印刷所

ナニワ印刷株式会社

大阪府北区天満1丁目9-19

システムで拓く粉体技術

ホソカワミクロン
スーパーミクロンミル



超微粉碎機

ホソカワミクロン
ミクロンセパレータ



分級機

ホソカワ/ナウタ
ナウタミキサ(リアクタ)



混合機

ホソカワミクロン
マイクロドライヤ



乾燥機

ホソカワ/マイクロ
バルスエアー



集塵機



ホソカワミクロン株式会社は、大正5年に創業以来今日まで、粉体技術一筋に歩み、豊かな経験と確かな技術で、粉体化学機械の『専門化』を目指してきました。この経験を生かして、80年代の多様化するニーズに対応するため、粉碎、分級、混合、乾燥、集塵、供給排出、輸送など各粉体処理単一操作技術の『総合化』によるシステムエンジニアリングを更に推進しております。

粉体技術の**ホソカワ**

ホソカワミクロン株式会社

本社 大阪府枚方市招提田近1丁目9番地 〒573 ☎(0720) 55-2221(代)

支店 東京都豊島区東池袋3丁目1番1号(サンシャイン60) 〒170 ☎(03) 986-8661(代)