

新 碑

THE MICROMERITICS

校方建設計画完工記念号

NO. 18 AUTUMN 1973

細川粉体工学研究所



巻頭言

みち

沢 昌 恭 *
Yasushi Sawahata



北陸は日本の豪雪地帯の一方の雄である。ここ数年来は暖冬異変のせいもあってか屋根の雪おろしをする程のことはなかったが、それでも一夜明ければ50糎を越す庭の積雪を見ることは再々であった。夜明けと共に部屋の中にもれ入る日の光が異様に明るく、蒲団の襟もとが何とはなしに寒々とする朝は、きまって雪が深い。そのよ

うな朝、何はともあれ一番の仕事は、玄関から本通りまでのアプローチの雪かきである。除雪されて細々とした1本のルートが市民社会と自らとを結びつけるきずとなる。だからこの地にあっては、雪の積った朝の雪かきこそが、市民社会へ参加する自らの意志を表わす手段となる。

“粉 砕” 18号 昭和48年 秋季号 目次

【巻 頭 言】	み ち	富 山 大 学 工 学 部	沢 昌 恭	……(1)
【研究報告】	単粒子破砕に及ぼすふんい気中の水分の影響	山 形 大 学 工 学 部	八 嶋 三 郎	……(2)
			神 田 良 照	
			斎 藤 文 良	
【研究報告】	粉粒体のかくはんフローパターンについて	同 志 社 大 学 工 学 部	三 輪 茂 雄	……(10)
			阪 上 雅 保	
【研究報告】	ナウタミキサー内の粉体の運動と混合過程	大 阪 府 立 大 学 工 学 部	矢 野 武 夫	……(14)
			寺 下 敬 次 郎	
【研究報告】	不均一流動化における粒子の挙動	信 州 大 学 織 維 学 部	佐 納 良 樹	……(23)
【研究報告】	流動層組み込み風力分級機の研究	細 川 粉 体 工 学 研 究 所	中 川 文 雄	……(28)
			島 谷 敏 久	
			鈴 木 昭 明	
【グラビア】	枚方建設計画完工記念アルバム		編 集 部	……(34)
【研究報告】	遠心排出型バケット・エレベーターの特性について	九 州 工 業 大 学	上 滝 具 貞	……(37)
	(実験結果の解釈)	山 口 大 学 工 学 部	早 野 延 男	
			山 中 久 人	
			藤 木 俊 介	
			藤 井 康 博	
【研究報告】	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	東 京 大 学 工 学 部	井 上 外 志 雄	……(50)
【研究報告】	ロータリフィーダの閉塞特性	九 州 工 業 大 学	上 滝 具 貞	……(61)
			富 田 佑 嗣	
			伊 達 木 新 三	
			森 島 正 文	
【研究報告】	粉体用連続混合システムの開発	細 川 粉 体 工 学 研 究 所	横 山 藤 平	……(66)
			浦 山 清	

【表紙】 ㈱細川鉄工所 (枚方)

出勤の道を歩く。誰が最初につけたのであろうか、点々と印された足跡は、やがて時間と共に曲りくねった1本の線となり、そしてその幅を拡げてゆく。雪の下が見すかせない雪原にあっては、前者の足跡こそ足もとの安全さを明示する。人々は、自らが歩くことによって安全な道づくりに参加するのである。

粉体工学の世界の一隅に、私が参加する意志を明示したのは昭和32年であった。JISに制定されつつあった試験用粉体の試作をテーマに、通産省の助成を受けて小さなボールミルを廻して以来と云って良い。もち論それ以前にも音波集塵装置やカーボンブラックの造粒装置の工業化試験に参加する機会に恵まれ、粉体あるいは粉体工学に対する目がみ開かれはじまっていたことは否めないにしても、ボールミルから取出される、この手で造った粉体が私と粉体工学とを密接に結びつけたのである。

それ以来、粒度分布の測定とか、粉粒体の混合とか、そして最近では摩砕の問題やメカノケミカルな現象など、私なりの興味と方法とで粉体工学的な仕事をしつつ

けて来たつもりではいるものの、この方面での幾多の先輩、先達の方々の努力の結果としての歩み足跡は、どれほど拡幅し、点を線におきかえることができたか、かえりみて忸怩たることを否定できない。

「粉碎」、この雑誌の創刊の昭和32年は、期せずして私の粉体工学の世界への参加の時に一致する。以来、本刊まで18号、「粉碎」が未知の雪原に印された足跡のような粉体工学の難道の、拡幅と延長とに果されてきた役割には計り知れないものがある。研究の成果を論文の形にまとめあげて寄稿されるこの世界の諸先輩、先達の方々の貢献もさることながら、刊行の実務に当たられて来た編集委員会の先生方ならびに編集事務局の方々の御努力には、ただただ敬服するばかりである。

本誌第18号の巻頭に一言を記す機会を与えられ、私は、ひたすら本誌益々の御発展をお祈り申しあげたい。

* 富山大学工学部 (〒933 高岡市中川町1-1)
TEL 0766-21-2510

	北村 隆	
【研究報告】	水ガラスの白華の検討—温度の影響に関して—	菊水化学工業 岡 長谷川 勝…(71)
		山内 史朗
【研究報告】	Carr の流動性指数に関する考察	細川粉体工学研究所 鈴木 昭明…(80)
		丸子 修
【総説】	粉碎のはなしⅢ—粉碎理論は役に立つのか—	北海道大学工学部 田中 達夫…(87)
【技術報告】	低温粉碎について	大阪ガス 岡 中西 英治…(94)
		細川粉体工学研究所 豊立 勝二
【総説】	流動層からの小粒子の飛び出し	九州大学工学部 篠原 久…(100)
	—飛び出し速度係数について—	田中 勇武
【総説】	沈降速度補正係数について	富山大学工学部 沢島 恭…(106)
		細川粉体工学研究所 彼谷 憲美
【総説】	粉体の充てんとかさ密度	法政大学工学部 川北 公夫…(112)
【解説】	粒度に関する試論(第2回)	
	—平均粒度の意義と名前について—	東京大学工学部 菅沼 彰…(126)
【新製品紹介】	ホソカワ/ミクロンファインミクロンミル, ホソカワ/カーターノンブリッジングホッパー, ホソカワ/カーターデンシファイヤー, ホソカワ/カーターバグファイラー, ホソカワ/カータードラムファイラー	（株）細川鉄工所 粉体機器事業本部…(132)
【技術ニュース】	バグフィルターによる高温ダスト集塵	（株）細川鉄工所 集塵機事業本部…(136)
【ニュース】	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	（株）細川鉄工所 海外事業本部…(139)
【情報】	粉体工業懇話会の活動	編集部…(142)
	ホソカワニュース	…(144)
	“粉碎”誌投稿規定	…(146)

	パウダーテストについて	…(9)
【技術ニュース】	ドーナツ型振動板を備えたフロートロン	…(141)
	新型テーブルフィーダーの登場	…(143)
	ヨーロッパからの通信	…(65)(99)

単粒子破碎に及ぼすふんい気中の水分の影響

Effects of Environmental Water on Single Particle Crushing

八嶋 三郎* 神田 良照* 斎藤 文良*
Saburō Yashima Yoshiteru Kanda Fumio Saitō

An experimental study of the effects of environmental water on single particle crushing under slow rate of compression was carried out by using spheres made of two kinds of glassy materials and six kinds of minerals.

The sphere diameter was 2.0cm and the rate of loading was 3 ton/min for glassy specimens and 0.3ton/min for six kinds of minerals.

A summary of experimental results is as follows, 1) the magnitudes of compressive strength of sphere, fracture energy and new surface produced were decreased with increasing of water on surface of specimen, 2) the relation between compressive strength of sphere and fracture surface energy was similar to the Rabinowicz' equation, 3) the relation between compressive strength of sphere and specific fracture energy of various samples in various environmental conditions satisfied the theoretical relation of $E/M \propto S_s^2$, where E is fracture energy, M the mass of specimen and S_s the compressive strength of sphere, 4) when the metal films (Au, Al, Pb) were prepared on the surfaces of specimens by vacuum deposition instead of environmental water, the magnitudes of compressive strength of sphere changed with the kinds of evaporants.

1. はじめに

単粒子破碎の研究を約10年程続けてきた。研究を進めて行くうちに、いろいろな問題が派生してきた。その一つ一つが深い内容を持っていて、関連する他の分野の科学の進歩をまたなければ、決定的な解答はえられない内容の問題が多い。単粒子破碎を研究する究極の目的は、工業的な集合粉碎の諸現象を理解するための基礎を解明することにあると考えるので、いずれは単粒子破碎と集合粉碎との関係を解くことが重要となる。しかし現状では、そこまで到達することは決して容易ではなく、単粒子破碎そのものの学問としての確立に、まずもって意を注がねばならないと考えている。

ここでは、その一つとして、単粒子の表面状態と破碎の関係について、今までえられた結果の一部を紹介する。具体的には湿式粉碎と乾式粉碎の問題に関連するが、表面の微視的状态を直接目で見て確かめることはできないので、いきおい現象論的にならざるをえないし、隔靴搔痒の感あるをまぬがれないが、湿式単粒子破碎では、乾式単粒子破碎、あるいは真空中での単粒子破碎に比べて、強度などがどの程度変化し、その理由は何によるものかを考察してみることにする。

2. 単粒子破壊強度

単粒子破碎の研究を進めるに当たり、よい手助けとなったのは、岩石力学の分野における平松らの研究¹⁾である。岩石力学では、岩石などのぜい性材料の引張強度を測定するのに、金属材料のような細長い試験片を用いて、一軸引張試験を行なうのは、なかなか困難なので、圧裂試験と称する方法を用いている。これは、Fig. 1

* 山形大学工学部化学工学科

(〒 992 米沢市城南4丁目3番16号)

TEL 0238-22-5181 内 247

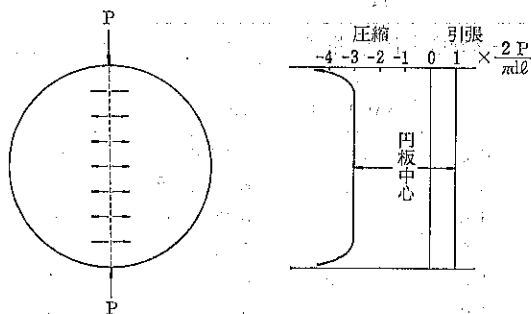


Fig. 1 円板の圧裂試験と円板の中心線に沿った各点の応力状態

に示すように円柱形試験片を材料試験機の加圧板上に横たえて、線接触の状態で荷重を加える方法である。この方法によると、図のように、荷重を加えることによって引張応力のほかに、荷重方向に圧縮応力も生ずる。中心部では引張応力に対して3倍の大きさの圧縮応力が作用するが、ぜい性材料は引張応力に対してはきわめて弱く、一方圧縮応力に対しては非常に大きな抵抗を示すので、圧縮応力によって破壊が行なわれる以前に、引張応力によって破壊される。この方法では、破壊荷重 P から引張強度 S_d (d は disk の意味) が、

$$S_d = 2P/\pi dl \quad (1)$$

として求められ、その値は一軸引張試験から求められる強度にほぼ等しい、といわれている。ここに d は円板の直径、 l は円板の厚みである。加圧の際に加圧板と試験片の線接触の状態を極力正確に保つことが、よい測定結果をえるための大切な点である。

この方法に対して、平松らの研究では、球形試験片を用いる方法を述べている。この方法では、Fig. 2 に示すように球形試験片を点載荷の状態で圧縮すると、Fig. 3 のように、球形試験片の載荷点を含む大円面上には、着力点付近に圧縮応力が作用し、中心付近に引張応力が作用するが、圧裂試験の場合と同じ理由によって、引張応力によって破壊し、破壊荷重 P から、引張強

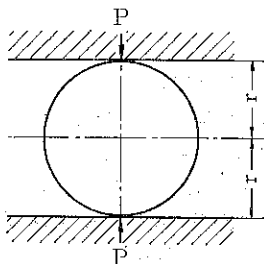


Fig. 2 球形試験片の圧縮破壊

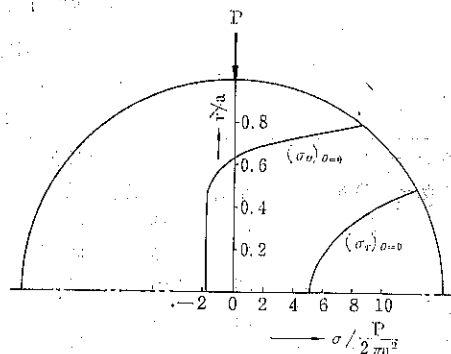


Fig. 3 弾性体の球に点載荷を行なったときの載荷軸上の主応力の分布 (平松良雄, 他: 日鉱誌, 81, 1024 (1965) より引用, $(\sigma_\theta)_{\theta=0}$ = 載荷軸に直交する応力, $(\sigma_r)_{\theta=0}$ = 載荷軸の方向の応力)

度 S_s (S は sphere の意味) が式(2)のように求められるとしている。

$$S_s = 1.4P/2\pi r^2 \quad (2)$$

ここに r は載荷点間距離の $1/2$ である。本報告では、この S_s を球圧壊強度、またこの測定方法を球圧壊試験と称することにする。この平松らの研究の目的は、不規則な形状をした、いわゆる非整形試験片を点載荷の状態で圧縮破壊しても、 r と P さえわかれば、式(2)から引張強度 S_s を求めることができ、いちいち球形に整形しなくとも、不規則な形状のままの試験片で十分に引張強度を測定できることを明らかにすることにあった。

実際に同じ種類のぜい性材料について、上述の圧裂試験、球圧壊試験、非整形試験片を用いる圧壊試験を、多数の試験片を用いて行なってみると、球形試験片を用いた場合の測定結果が、バラツキの少ない、よい測定値を与える。これは、圧裂試験では、破壊面の方向が指定されてしまうので、破壊面を選択する自由度が小であるが、球圧壊試験の場合には、破壊面選択の自由度が大きいためであり、非整形試験片を用いた測定値は、ちょうど両者の中間のバラツキを示す。2~4)

3. 試料と、水中、空气中、真空中における単粒子破砕法

上述の圧裂法、あるいは球圧壊法による引張強度測定の方法(1)、(2)には、試験片の表面の影響は含まれていない。そこで試験片の表面に対する水分の影響を実験的に検討してみると、球形試験片を、水中、空气中、真空中で圧縮破壊した。その試料と試験片、ならびに実験装置、実験方法などについて述べる。

実験にはガラス質試料2種類、天然産試料6種類、合

Table. 1 試 料 の 性 質

項 目 試 料	産 地	密 度 ρ [g/cm ³]	モース硬度 H [-]	仕事指数 W _i [kWh/ton]	ヤング率 Y [Kg/cm ²]	ポアソン比 ν [-]
セキエイガラス	東芝セラミックスK.K	2.20	6.5	14.8	7.24×10^5	0.16
ホウケイ酸ガラス	小倉ガラス工業K.K	2.33	6.5	15.2	6.24×10^5	0.21
ケ イ 石	福 島 県	2.62	6.5	13.3	8.89×10^5	0.16
チ ョ ウ 石	福 島 県	2.55	6.0	12.4	5.99×10^5	0.26
石 灰 石	岡 山 県	2.70	4.0	9.40	6.00×10^5	0.35
大 理 石	山 口 県	2.70	3.0	6.90	5.45×10^5	0.30
セ ッ コ ウ	モ ロ ッ コ	2.80	2.0	6.30	3.96×10^5	0.34
カ ッ 石	韓 国	2.78	1.0	11.8	1.53×10^5	0.33

計8種類の試料を使用している。その性質などを Table. 1 に掲げる。実験には、公称直径2.0cmの球形試験片を使用した。ガラス質試験片は整形後、ひずみを除いたものを購入し、天然産試料の試験片は、塊状試料をダイヤモンドカッターで切削し、グラインダ、研磨といしとカーボランダムを用いて整形している。その仕上げの方法、精度、などについては前報^{5,6)}のとおりである。実験には30tonの材料試験機を用い、球形試験片を圧縮破砕する際の加圧板にはタングステンカーバイドの円板を用いている。その表面の研磨の精度、ヤング率、ポアソン比も前報のとおりである。空气中破砕の実験方法も前報に述べたとおりであるが、水中破砕の際には、材料試験機の加圧部分に水槽を設けて、その中で圧縮破砕した。また真空中破砕では、加圧部分に真空槽を設け、ロータリーポンプ、油拡散ポンプで 10^{-5} Torrに真空吸引して破砕した。水中と真空中の破砕では、他の真空装置を用いて球形試験片表面の脱ガスを行ない、表面を清浄とした後、水中破砕では試験片表面に蒸留水を作用させてから材料試験機にとりつけた水槽に移し、真空中破砕では材料試験機にとりつけた真空槽に試験片を移し、さらに槽内を 10^{-5} Torrに吸引してから破砕実験を行なった。なお、荷重速度は、荷重を加え始めてから破壊するまでの時間を一定とするため、ガラス質試料では3ton/min、天然産の試料では0.3ton/minとした。また水中破砕実験では、エージングの影響を考慮し、試験片の表面に蒸留水を作用させてから、水中破砕実験を終えるまでの時間を約20分の一定に保った。球圧壊強度は、破壊荷重Pと試験片の半径rを載荷点間距離の $\frac{1}{2}$ に等しいものとみなして、式(2)を用いて求めた。

一方、破砕エネルギーEは、球形試験片を圧縮する際に、差動トランスを用いて自動記録させた荷重-変位曲線を破壊点まで図積分して求め、全ひずみエネルギーをもって破砕エネルギーとみなし、真空中破砕の際の破砕

エネルギーを E_v 、空气中破砕の際のそれを E_a 、水中破砕の際のそれを E_w とあらわした。

破砕によって生じた増加比表面積 ΔS_w は、破砕前の試験片の比表面積 S_w と破砕産物の比表面積 S_w の差から

$$\Delta S_w = S_w - S_w. \quad (3)$$

として求めた。破砕前の比表面積 S_w は試験片の直径から幾何学的表面積 $4\pi r^2$ として求め、破砕産物の比表面積 S_w は、破砕産物の粒度分布から、形状係数を6として計算により求めた。ただし、軟質の試料で、載荷点を結ぶ直径を含む大円面で真二つに割れるものは、その幾何学的表面積 $6\pi r^2$ をもって S_w とした。空气中と真空中のすべての破砕実験において、試験片のまわりをカーテンなどでおおい、破砕片が飛散する際に、容器壁等に衝突して、二次破砕を生ずるのを防いだ。

試験片の質量をMとして、単位質量当たりの破砕エネルギーを E/M であらわし、

$$R_i = \frac{\Delta S_w}{E/M} \quad (4)$$

から破砕エネルギー効率 (Rittinger 数) を求め、また

$$r_e = 1/R_i = \frac{E/M}{\Delta S_w} \quad (5)$$

をもって破砕表面エネルギーとした。

4. 水中、空气中、真空中における単粒子破砕実験結果とその考察

Table. 2 と Table. 3 にセキエイガラスと石灰石について、試験片個数と球圧壊強度、破砕エネルギー、各々のふんい気間の破砕エネルギー減少量、ならびに増加比表面積の測定結果と破砕エネルギー効率を掲げた。Table. 2 と 3 を総合的にみると、試験片表面の水分の有無とその量が試験片の強度あるいは破砕エネルギーに大きく影響しているのがわかる。

まず球圧壊強度に着目してみると、その大きさは、真

Table. 2 セキエイガラスについての実験結果

項 目	ふんい気	真空中	空气中	水 中
個 数 N [-]		99	60	50
球 圧 壊 強 度 S_s [Kg/cm ²]		360	275	155
強 度 比 $S_s/(S_s)_a$ [-]		1.31	1	0.56
破碎エネルギー E [Kg-cm]		33.1	21.1	8.64
$E_v - E_a$ [Kg-cm]		1.2×10		
$E_a - E_w$ [Kg-cm]		1.3×10		
$E_v - E_w$ [Kg-cm]		2.5×10		
増加比表面積 ΔS_w [cm ² /g]		10.6	8.08	3.36
リッチンガー数 $R_l = \frac{\Delta S_w}{E/M}$ [cm ² /Kg-cm]		3.84	4.59	4.67

Table. 3 石灰石についての実験結果

項 目	ふんい気	真空中	空气中	水 中
個 数 N [-]		102	105	100
球 圧 壊 強 度 S_s [Kg/cm ²]		50.1	42.3	40.4
強 度 比 $S_s/(S_s)_a$ [-]		1.18	1	0.96
破碎エネルギー E [Kg-cm]		1.23	1.02	0.895
$E_v - E_a$ [Kg-cm]		2.1×10^{-1}		
$E_a - E_w$ [Kg-cm]		1.3×10^{-1}		
$E_v - E_w$ [Kg-cm]		3.4×10^{-1}		
増加比表面積 ΔS_w [cm ² /g]		0.603	0.556	0.556
リッチンガー数 $R_l = \frac{\Delta S_w}{E/M}$ [cm ² /Kg-cm]		5.58	6.20	7.08

空中>空气中>水中の順になっている。この傾向は他の種類の試料についても同様である。このような結果は、後述の破碎エネルギーに関する実験結果と合わせて考えなければならない問題ではあるが、水分の存在によって球圧壊強度が減少する理由の一つに、試験片表面への水分の吸着あるいは濡れによる試験片表面の、表面エネルギーの低下が考えられる。一方、真空中と空气中の破碎強度に関しては、一般に、高圧下での実験では常圧下での実験と比較して、強度が上昇するといわれており、本実験結果においても、真空、空気、水、各々のふんい気中における強度の差が水分のみによる影響とは断定できない面もあるように思われる。

つぎに破碎エネルギーに関する考察を行なってみると、ここに示した2種類の試料ばかりでなく、他の種類

の試料についても同様に、破碎エネルギーの大きさは、真空中>空气中>水中の順となっている。真空中で破碎した場合と、空气中、水中で破碎した場合の荷重-変位曲線を比較してみると、その曲線の形には顕著な相違はみられない。またふんい気によって試料のヤング率、ポアソン比が変わるとも考えにくい。破碎エネルギーには破壊荷重と破壊までの変位が関与するわけであるが、上述の各ふんい気中における破碎エネルギーの減少は、真空中、空气中、水中となるに伴って、破壊荷重と破壊までの変位の両方が、次第に減少する結果によるものであると考えている。

Table. 2, 3には真空中破碎の際の破碎エネルギー E_v と、空气中破碎の際の破碎エネルギー E_a ならびに水中破碎の際の破碎エネルギー E_w の相互の差 ($E_v - E_a$), ($E_a - E_w$), ($E_v - E_w$) をも掲げたが、どれもかなり大きい値を示している。いま、試験片が空气中にあり、水蒸気が吸着していると考え、この試験片を水中に浸漬した場合、水の表面エネルギー ($70 \text{ ergs/cm}^2 = 7.14 \times 10^{-5} \text{ Kg} \cdot \text{cm/cm}^2$) だけ試験片表面の表面エネルギーが低下し、その分だけ破碎エネルギーが減少するものと考えて、試験片の表面積と、水の表面エネルギーから、試験片の表面エネルギーの減少量を概算してみると、その値は、Table. 2, 3の実測の破碎エネルギー減少量 ($E_a - E_w$) の $10 \sim 10^{-1} \text{ Kg} \cdot \text{cm}$ のオーダーに比べて著しく小さく、セキエイガラスでは $10^{-4} \text{ Kg} \cdot \text{cm}$ 、石灰石では $10^{-3} \text{ Kg} \cdot \text{cm}$ のオーダーという結果がえられた。また、このように水の作用により、球形試験片の表面エネルギーが低下するだけではなく、破碎により新しく生成した産物の全表面にも、同様の作用で瞬間的に水分が吸着して、その分だけ、さらに破碎エネルギーが低下するものと仮定して計算してみても、セキエイガラスでは $10^{-3} \text{ Kg} \cdot \text{cm}$ 、石灰石でも $10^{-3} \text{ Kg} \cdot \text{cm}$ のオーダーの減少量となるに過ぎない。(この計算においては、セキエイガラス球の表面積は幾何学的表面積の $4\pi r^2$ とし、石灰石球の表面積は微視的なおうとつを考慮して $2.4\pi d^2$ とした。)

さて、このように空气中破碎と水中破碎における破碎エネルギーの実測値の差 ($E_a - E_w$) が、球形試験片の表面、あるいは破碎により生じた新生表面に対し、水分が作用して表面エネルギーを低下量させるものと考えて計算した全エネルギー低下よりも、はるかに大である。その理由は、現段階では明確にはわからないが、一つには、後に述べるように、機械的方法で測定した、破碎表面エネルギー γ が物理的な方法で測定された固体の表面エネルギー γ' よりも、けた違いに大きいように、測定技術上の問題もあって、水の吸着による表面エネルギーの低下が、単位面積当たり 70 ergs よりもはるかに大

きく測定されているのかもしれないと考えられる点である。また、もう一つの考え方は、試験片表面に存在するマイクロクラックの強度を低下させるのに消費されているのではなからうかという見方である。すなわち、球形試験片を圧縮してゆく場合に、破壊点に近づくにつれて試験片の表面に存在するマイクロクラックが応力の作用によって拡張され、その先端に瞬間的に水分が吸着して、クラックの表面エネルギーを低下させ、クラックの強度を低下させるのに、かなりのエネルギーが消費されているのではなからうか、と考えられる点である。たとえ、このような試験片表面のマイクロクラックのすべてが、破壊により生じた新生表面につながらなくとも、球圧壊強度を低下させる原因となりうるものとも考えることができる。ただし、測定技術上の問題もあって、そのどちらであるのか、あるいは両方が同時におこっているのかは、にわかに決めることはできないと思う。ちなみに、ソーダガラスの直径2.5cmの球形試験片10個につき、荷重方向と直角方向の赤道面におけるひずみを測定したところ、 $7.8 \times 10^{-5} \sim 21.6 \times 10^{-5}$ である。この場合の荷重方向のひずみは $1.1 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^{-2}$ であったが、このひずみ量は試験片表面に存在すると思われる、原子間距離のオーダーを有するマイクロクラックを拡張させるには十分な値であろう。同様の測定を直径2.0cmの石灰石球形試験片11個について試みた結果は、赤道面におけるひずみは $3.6 \times 10^{-5} \sim 11.5 \times 10^{-5}$ であり、荷重方向のひずみは $2.4 \times 10^{-3} \sim 5.0 \times 10^{-3}$ であった。赤道面のひずみはストレングージにより測定したもので、荷重方向のひずみは差動トランスにより測定した。

このほかに、試験片表面におけるメカノケミカルな現象によるエネルギーの消費が考えられるが、現段階ではこれを確かめるまでに至っていない。増加比表面積については、セキエイガラスのような比較的硬質で、破壊まではほぼ弾性的挙動を示す試料に対しては、破壊産物も、真空中>空气中>水中の順に細くなり、生成表面積も増大する傾向にある。石灰石のような軟質試料では載荷点を結ぶ直径を含む大円面ではほぼ真二つに割れるようである。この場合の生成表面積は計算値よりかなり大きくなっているものと思う。なお Table. 2, 3 に見られるように、単位破壊エネルギー当たりの増加比表面積すなわち式(4)のエネルギー効率を求めてみると、空气中単粒子破壊と水中単粒子破壊とでは、エネルギー効率に非常に大きい差があるとはいえないようである。

5. 試験片の破碎表面エネルギーに関する

2, 3の考察

つぎに、単粒子の破碎における破碎表面エネルギーに

関し、2, 3の考察結果を述べる。Rabinowicz⁷⁾は金属の融点における表面エネルギー γ [ergs/cm²] と常温における金属の硬度 H [Kg/cm²] との間に

$$\gamma \propto H^{1/8} \quad (6)$$

の関係があるといっている。きわめて、あらい考え方はあるが、固体の表面エネルギーは固体の凝集エネルギーに関連し、破碎表面エネルギーもまた、この凝集エネルギーに関連するものと考え、また Rabinowicz のいう硬度 H は、本実験における強度 S_c に関連するものとして、本実験より、真空中、空气中、水中でえられた球

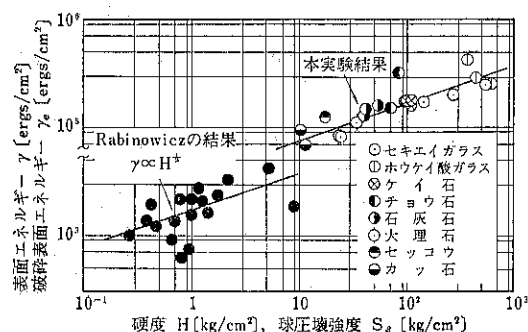


Fig. 4 硬度ならびに球圧壊強度と表面エネルギーあるいは破碎表面エネルギーの関係

Table. 4 固体の表面エネルギー

試料	表面エネルギー γ [ergs/cm ²]	文献
ガラス	5.8×10^3	Davidge ⁸⁾
	5.0×10^3	Zeleny ⁹⁾
	4.6×10^3	Nakayama ¹⁰⁾
	1.2×10^3	Joy ¹¹⁾
ホウケイ酸ガラス	4.7×10^3	Wiederhorn ¹²⁾
セキエイガラス	4.5×10^3	Wiederhorn ¹²⁾
石灰石	9.2×10^4	Joy ¹¹⁾
	3.2×10^4	Joy ¹¹⁾
	1.3×10^4	Joy ¹¹⁾
	2.3×10^3	Gilman ¹³⁾
	9.0×10^2	Joy ¹¹⁾
ケイ石	1.74×10^5	Joy ¹¹⁾
	1.04×10^5	Joy ¹¹⁾
	$1.62 \pm 3.1 \times 10^4$	神保 ¹⁴⁾
	5.6×10^4	Joy ¹¹⁾
	5.0×10^3	Zeleny ⁹⁾
	9.0×10^2	Joy ¹¹⁾
チョウ石	3.5×10^2	Healy ¹⁵⁾
	3.6×10^2	Joy ¹¹⁾

圧壊強度と、破碎表面エネルギー r_e [ergs/cm²] との関係は Rabinowicz の γ と H の関係とともにプロットすると Fig. 4 のようになる。図をみると、本実験よりえられた球圧壊強度と破碎表面エネルギーとの間にも式(6)と同じように、近似的に

$$r_e \propto S_e^{1/3} \quad (7)$$

の関係が成立するようである。この固体の表面エネルギーについては、今までにも多くの測定結果が発表されている。これらの結果を Table. 4 に示した⁸⁻¹⁵⁾。ここに示した表面エネルギーには、物理的測定で求められた値と、機械的測定によって求められた値とがあるが、表面エネルギーは物質によって異なり、また同一物質でも研究者によって異なった値を示している。本実験よりえられた値と比較すると、かなり小さい値となっている。本実験では、ひずみエネルギーを破碎エネルギーにしているのので、この破碎エネルギーのうち、どれだけが正味の仕事に費やされたか、その内容を知ることと共に破碎により生じた真の表面積を求めることが今後の重要な課題になるものと考ええる。現在までのところ、破碎エネルギーのうち、破砕片の飛散運動エネルギーに消費される割合と、破碎音エネルギーに転換される割合を実験的に確かめている。試料の種類によっても異なるが、破砕片の飛散運動エネルギーが破碎エネルギーに占める割合は、ガラス質試料で約40%、破碎音エネルギーの破碎エネルギーに占める割合はきわめて小さく、同じくガラス質試料で10⁻⁴%のオーダーである¹⁶⁾。

つぎに、前報にも述べたように球圧壊強度 S_e と単位質量当たりの破碎エネルギー E/M は、試料を弾性体と考えると、理論的に

$$E/M \propto S_e^3 \quad (8)$$

の関係にある。本測定結果より、各々のふんい気における単位質量当たりの破碎エネルギー E/M と球圧壊強度 S_e を両対数紙上にプロットすると、Fig. 5 のようになり、カッ石試料を除くと、本来同一試料に対して成立する関係が、試験片の種類あるいはふんい気を異にしても同様に成立することがわかった。以上 Fig. 4, 5 の2つの関係より、増加比表面積 ΔS_w と、単位質量当たりの破碎エネルギー E/M との関係を両対数紙上にプロットすると、Fig. 6 のようになる。この場合、両者の関係は一本の直線であらわせるように思われるが、こう配1よりも若干小さいようである。これを破碎における Lewis の破碎エネルギーに関する一般式に関連して考察すると、その指数は2よりも若干小となるのではあるまいか、と考えられるが、これを早急に結論づけるのは無理であって、ここでも破碎産物の真の表面積を測定することが大切な問題となる。

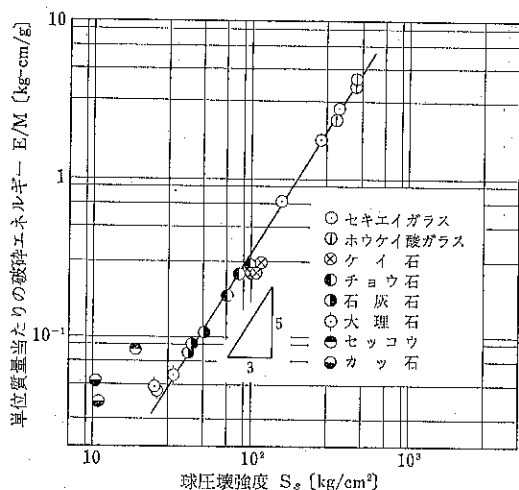


Fig. 5 球圧壊強度と単位質量当たりの破碎エネルギーの関係

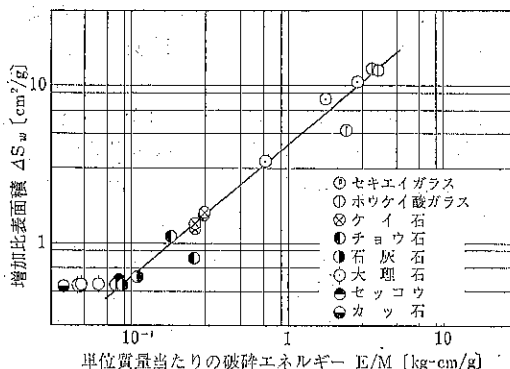


Fig. 6 単位質量当たりの破碎エネルギーと増加比表面積の関係

6. 金属を蒸着した球形試験片の圧縮破碎

つぎに各種の試料の球形試験片の表面に金属を蒸着して圧縮破碎実験を試みている。使用した金属の種類は Au, Al, Pb の3種類であって、蒸着膜の厚さは約1000Åである。試験片を蒸着装置に入れ、10⁻⁵Torr程度に吸引してから金属を蒸着するので、試験片が真空中で保有する表面エネルギーは、金属の蒸着によって、かなり影響されるものと思われる。具体的な機構については、まだよくはわからないが、球形試験片と蒸着金属膜との界面エネルギー、ならびに蒸着金属膜の表面エネルギーが現象に対し支配的な影響を持つようになるのではなからうか、と考えている。ちなみに金属蒸着膜の厚さが約1000Åとなり、その表面がブロック状の金属に近

Table. 5 金属蒸着球破碎実験結果

項 目 試 料	蒸着 種 金 属 類	球 圧 壊 強 度		単位質量当たりの 破碎エネルギー E/M [Kg-cm/g]	増加比表面積 ΔS_w [cm ² /g]	破 碎 表 面 エ ネ ル ギ ー γ_e [ergs/cm ²]
		平 均 値 S_a [Kg/cm ²]	変 動 係 数 C [%]			
ケ イ 石	Au	107	30.2	0.250	1.33	1.84×10^5
	Al	99.3	27.9	0.215	1.90	1.11×10^5
	Pb	98.5	30.8	0.228	1.69	1.32×10^5
チ ョ ウ 石	Au	93.5	36.4	0.259	1.26	2.01×10^5
	Al	93.0	38.0	0.244	1.07	2.23×10^5
	Pb	90.8	34.5	0.252	1.23	2.02×10^5

い性質を持つようになると考えると, Au の表面エネルギーは 2300ergs/cm^2 , Al_2O_3 の表面エネルギーは, 1900ergs/cm^2 , PbO の表面エネルギーは 200ergs/cm^2 程度と考えられる. 実験結果の一例として, 直径 2.0cm のケイ石球とチョウ石球, 各々50個についての測定結果を示すと Table. 5 のようである. 表を見ると球圧壊強度が $\text{Au} > \text{Al} > \text{Pb}$ の順となっている. この順序は, 各金属のヤング率とも相関があるかもしれない. 金属蒸着膜の影響は, 前述の水分の吸着による試験片表面エネルギーの変化とは, 内容が異なることはいうまでもないが, 表に見られるように, 破碎産物の増加比表面積 ΔS_w あるいは破碎表面エネルギー γ_e が, 試験片表面に蒸着した金属の種類によって異なることは興味ある事実である. まだ, 一つの条件下での測定に50個の試験片を用いたにすぎないので, 確かなことはいえないが, この金属を蒸着した球を用いての実験結果を整理してみると, 式(7)と式(8)の関係も満足するのが認められた.

7. おわりに

表面の水分, あるいは金属蒸着膜が, 球圧壊強度に及ぼす影響を, 二, 三の実験結果について報告した. どれも未完成の研究であり, 途中までの経過を報告したにすぎないが, このほかに, 各種試料の球形試験片を双極子能率を異にする有機液体中で破壊する実験も行なっている. これも進行途上のもので, まだ確かな結果ではないが, 全般的にみて, 双極子能率が大きくなると破壊強度が低下するようで, これも有機液体分子の双極子能率が大きい程, 吸着により表面エネルギーが低下する割合が大きいためであろうと考えている.

表面エネルギーが増大すると系が不安定になる. だから逆に壊れやすくなるのではないか, という議論もあるが, 表面エネルギーが増大するということは, 確かに不

安定になることではあるが, だから壊れやすくなる, と考えると, 思考の飛躍がある. 固体の表面エネルギーと強度の間には Orowan¹⁷⁾ の関係があり, これは, 固体の破壊応力 σ と, 表面エネルギー γ と, 表面塑性仕事 P の間には

$$\sigma \approx \left[Y \frac{(\gamma + P)}{C} \right]^{1/2} \quad (10)$$

の関係があるとするものである. ここに Y はヤング率, C は表面の微小クラックの深さである. ぜい性材料では $\gamma \gg P$ なので, $\sigma \propto \gamma^{1/2}$ ということになる. この Orowan の関係は, 本来, 固体内部の Griffith クラックに関係した論議¹⁸⁾ であるが, これを本研究のような固体の表面エネルギーと固体の破壊応力に適用した論議も行なわれている¹⁷⁾. 実際に本研究の一連の実験結果を適用してみると, 式(10)がよく成立することが認められている. しかし, もともと固体内部の Griffith クラックに関する考え方なので, これを固体表面の現象に適用することは慎重にならざるをえない. 式(10)の成立性を検討する場合, われわれは, $\gamma \gg P$ として, 各種試料の γ と σ とを両対数紙上にプロットし, そのこう配が $1/2$ であるかどうかを検するが, これは, 異なる試料の測点を直線でむすぼうとする無謀をあえてしようとするのではなく, 各試料の測点ごとに, こう配 $1/2$ の線を引いてみると, 全体がほとんど平行となるということを意味するものである.

このような試験片の表面についての実験を行なってみると, 表面の不均一性, おうとつの程度, 表面積などがきわめて重要な意味を持っており, しかも, それはかなり微視的なオーダーで, 既にして大きな影響を持つことがうかがわれる. われわれは, かつて球形試験片表面の研摩仕上げる程度を変えて, 球圧壊強度, 破碎エネルギーの測定を行なってみたが, それ程大きな差異は認めら

れなかった。これは思うに、光学顕微鏡、あるいは走査電子顕微鏡で見られるような傷よりも、はるかに微視的な傷が影響をもつことの一つの証左でもあろう。破碎の前と破碎の後の比較になり、途中のプロセスを無視してのこととならざるをえないが、この種の実験データを蓄積してゆくと、単粒子破碎における試験片の表面エネルギーと、破碎表面エネルギーとの関係が求められそうに思われる。これから乾式破碎と湿式破碎のエネルギー効率の比較ができればと考えている。

参 考 文 献

- 1) 平松良雄他：日鉱誌，81，1024 (1965)
- 2) 神田良照他：日鉱誌，85，987 (1969)
- 3) 神田良照他：日鉱誌，86，435 (1970)
- 4) 神田良照他：日鉱誌，86，847 (1970)
- 5) 八嶋三郎他：化工誌，34，210 (1970)
- 6) 八嶋三郎他：化工誌，34，1199 (1970)
- 7) Rabinowicz : *J. Appl. Phys.*, 32, 1440 (1961)
- 8) R. W. Davidge and G. Tappin : *J. Materials Science*, 3, 165 (1968)
- 9) R. A. Zeleny and E. L. Piret : *I & EC, Process Design and Development*, 1, 37 (1962)
- 10) J. Nakayama : *J. American Ceramic Society*, 48, 583 (1965)
- 11) A. S. Joy : The Surface Energy of Solid, Society of Chemical Industry, 14 Belgrave Square London, S. W. I. 1961 p.53
- 12) S. M. Wiederhorn : *J. American Ceramic Society*, 52, 99 (1969)
- 13) J. J. Gilman : *J. Appl. Phys.*, 31, 2208 (1960)
- 14) 神保元二：工業化学雑誌，71，1309 (1968)
- 15) T. W. Healy and D. W. Fuerstenau : *J. Colloid Science*, 20, 376 (1965)
- 16) 八嶋三郎他：化学工学協会東北大会，昭和47年8月（仙台）講演，講演要旨集 p.167.
- 17) 久保輝一郎：メカノケミストリー，22 (1971) 東京化学同人
- 18) 和田八三久：力学物性（実験物理学講座 Vol.10），308 (1968) 共立出版

パウダーテスターについて

細川粉体工学研究所での第7回粉体工学に関する講演討論会で、細川社の鈴木昭明氏の講演はパウダーテスターによる Carr の流動性指数の測定値の背景をさぐるうというまことに興味あるものであった。その際、座長の吉田教授に指名されて、筆者も意見を述べさせていたのだが、それに若干の補足をして、今後その仕事にたづさわる方々の御参考あるいは御批判を得たいと思う。

今まで何人かの方々がいろいろの粉体について測定された結果、流動性指数は圧縮度に最も強く依存するといわれる。本来、粉体が流れるということは、“こわれる”，すなわち、粒子同志の間の結合の強さが、力に対して耐えられぬことを意味する。とすると、結合の強さとは何か。単位面積内に存在する粒子の箇数は空間率を ϵ とし、粒径を d とすると $(1-\epsilon)/\phi d^2$ (ϕ は定数) であり、またその1箇の粒子が隣りに接する粒子の数（配位数）を k 、接点における付着力を H とすると、結局単位面積当りの粉体の付着強度 (Kg/cm^2) は $[(1-\epsilon)/\phi d^2] \times k \times H$ に比例する筈である。もちろん k は ϵ に関係（球では $\epsilon=0.26$ で $k=12$ ， $\epsilon=0.47$ で $k=6$ ）する。

ゆえに圧縮率の高い粉体では充填率 $(1-\epsilon)$ が大きく

したがって恐らく流動性は低いであろう。これが実測値における圧縮率と流動性の間のラフな dependence を表わしていると思われる。しかし、Carr の流動性指数の中に粒度が全く対象となっていないのは面白い。 d については、 H が d に理論的に比例するという事実から、少くとも強度は d に反比例するほど関係が深いと思われるのに……である。

したがって対象とする細かい粉末では、流動性指数は恐らく付着強度に最も深い関係をもっているのではないだろうか。

一方、噴流性指数については特に説明はなかったが、どうも感じとしては、粒子間付着力 $H[\text{Kg}]$ が最も強い関係があるような気がする。というのは、たとえ圧縮率の高いものでも、一旦何かの拍子に粒子同志がはなれ（ H が小さいから）、空気をかかえこんでも一挙にバラバラになるのが噴流だからである。

一度もパウダーテスターで測定した経験のない者がホラを吹くようにで申し訳ないが、しかし全くわけのわからないものの理論的背景をあれこれ考えるのは面白い。

(T. T)

粉粒体のかくはん

—フローパターンについて—

Flow pattern of Particles agitated with a blade

三輪 茂雄*

Shigeo Miwa

阪上 雅保*

Masayasu Sakaue

1. ま え が き

粒状物質を機械的にかくはんするさいのフローパターンについては、矢代と清水¹⁾および矢野と佐藤²⁾などの研究があるが、前者は二重円筒粘度計に関するものであり、後者は、楕形かくはん羽根を有する混合機についてのフローパターンを示したものである。

筆者らは十分広い容器内に楕形かくはん羽根がある場合のフローパターンを調べたところ、従来の研究者の記述で予測できないような流れが観察され、粉粒体の機械的かくはんによる流動状態を考えるうえで興味ある事実

が見出されたので報告する。

2. 実験装置、試料および実験方法

実験装置は Fig. 1 に示す内径196mmの塩ビ製円筒容器のなかに、鉄製のかくはん羽根をとりつけ、容器を20 RPMで回転させるようにしてある。

試料としては宮津の海岸砂で350~210 μ の粒度であり、粒子密度 $\rho_p=2.53\text{g/cm}^3$ である。一部分を黒インキで着色し、表層部に10mmの厚さにおき、あるいは逆に下層において、かくはんした。一定速度で、ある時間回転させた後、かくはんを止め、電気掃除機で上表部から少しづつ注意ぶかく取り除いてゆき、各断面を観察記録した。

3. 下向流と上昇流の存在

Fig. 2 の左半分は初期状態、右半分はかくはん後の縦

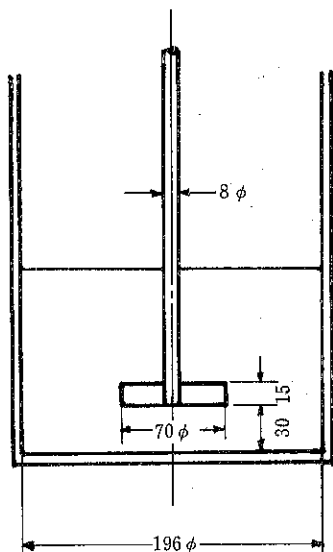


Fig. 1 実験装置

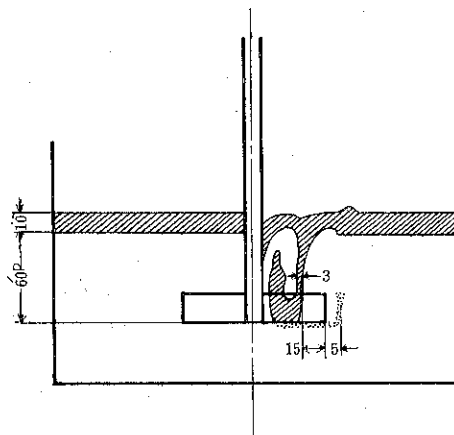


Fig. 2 表層に着色砂をおいてかくはん1分後の状態

* 同志社大学工学部化学工学科
(〒602 京都市上京区烏丸今出川)
TEL 075-211-2311

断面図である。着色砂の分布はかくはん軸に対称である。軸近くの着色砂は軸に沿って下方に動く傾向がみられるが、これは軸のわずかなフレによるものである。また、羽根先端より約15mm内側で下向流が約3mmの幅で現われている。これは羽根のところで反転して軸に近いところで上昇流を生じている。他方、羽根の下側に沿って羽根の先端に向う弱い流れもあり、これは羽根の先端から約5mmのところで上昇流になる傾向もみられる。

Fig. 3 は、下層の砂の動きを調べるために行なったものである。Fig. 2 でみられた羽根先端での上昇流を明瞭にみることができる。これは一度上昇してからUターンして下降流になっており、これはFig. 2 の下降流に合流している。

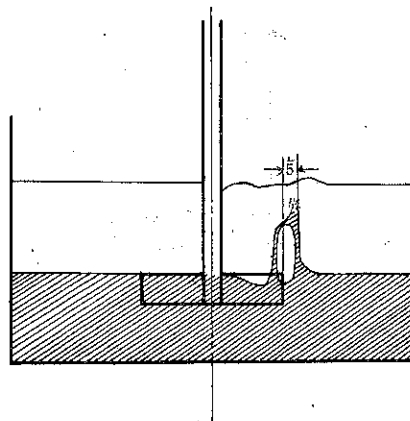


Fig. 3 下層に着色層をおき1分間かくはん後の状態

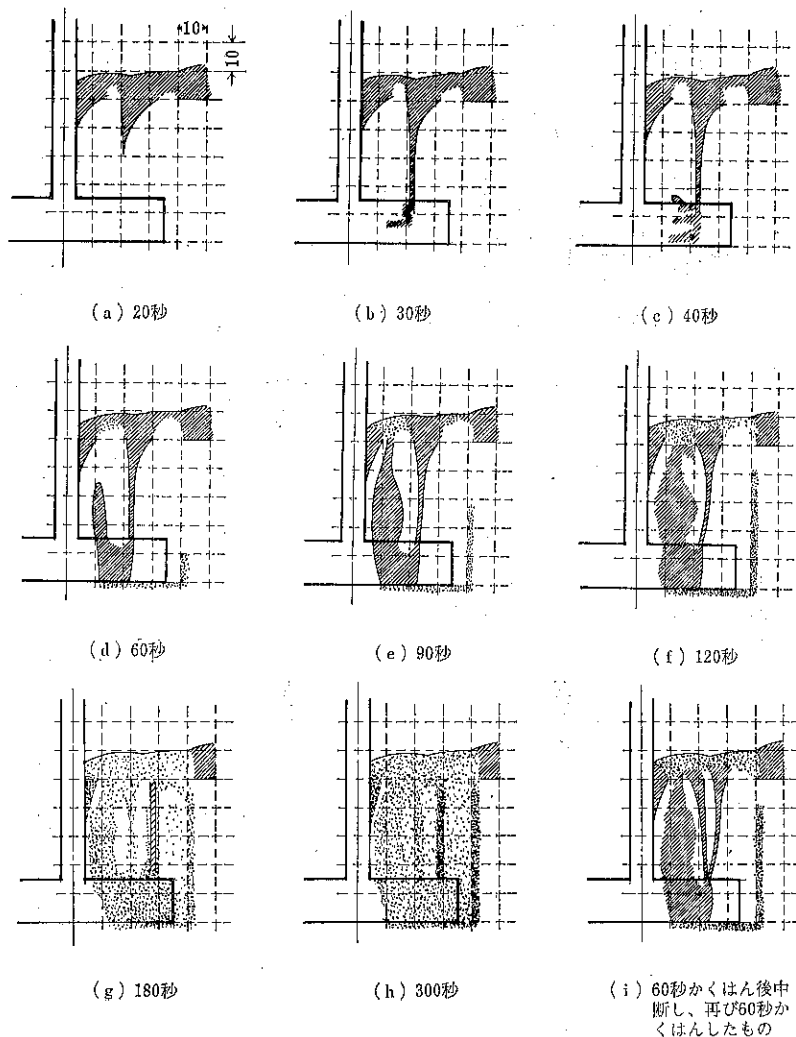


Fig. 4 フローパターンの時間的変化 (上層の動き)

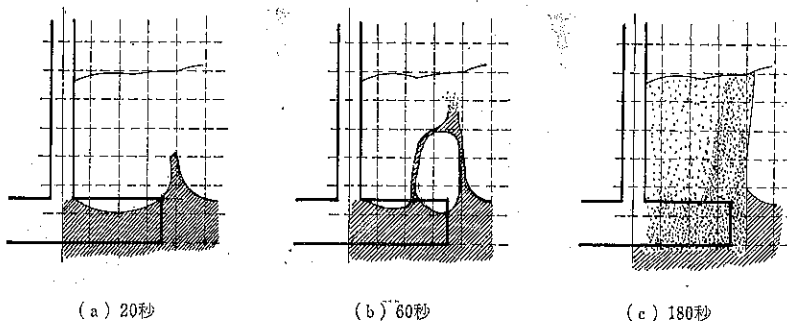


Fig. 5 フローパターンの時間的変化 (下層の動き)

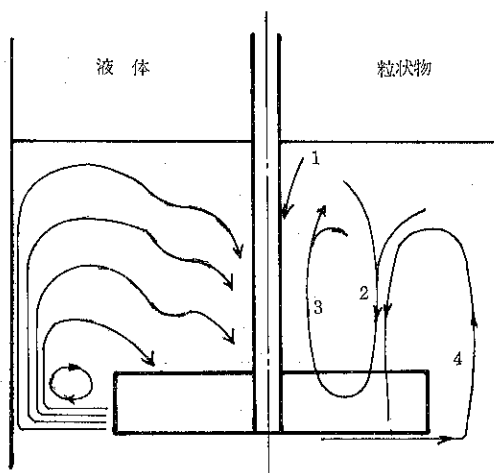


Fig. 6 液体のフローパターンとの比較

4. フローパターンの時間的変化

前の実験で確認した上昇および下降流の時間的変化をもう少し詳しく調べるために、行なった結果をFig. 4に示す。図中の破線は10mm間隔の指標線である。図の(a)~(h)の経過をみると、顕著な下向流がみられ、これが反転して上昇流となるが、下向流は時間の経過とともに

羽根先端へ向って移動してゆく傾向が観察される。ところが、途中でかくはんを中断してやると、(i)に示すように、新たに羽根先端から内側に第2の下向流が生じることがみられる。これは連続かくはんしたときと、中断したときのちがいを示す興味ある事実である。

Fig. 5は下層の動きを時間的に示したものである。以上をまとめて、液体のフローパターンと比較して示した模式図がFig. 6である。液体とのちがいは、3の上昇流の存在である。このようなことが起るのは、液体では流動性がよいために自由に羽根先端へ遠心力によって運ばれて、一方向の流れが生ずるのにたいし、粒状物質では自由に羽根先端へ流れないため、軸方向内側へ向っても押される結果と考えられる。

5. 層高によるフローパターンの変化

ある層高以上になると、表層の粒子は余り動かなくなる。このことを示したのがFig. 7である。もちろんこの実験は120秒後の状況であって、非常に長い時間かければ、変化が現われてくる。

6. 回転数の影響

以上の実験はすべて羽根の回転速度は20 R P Mであつ

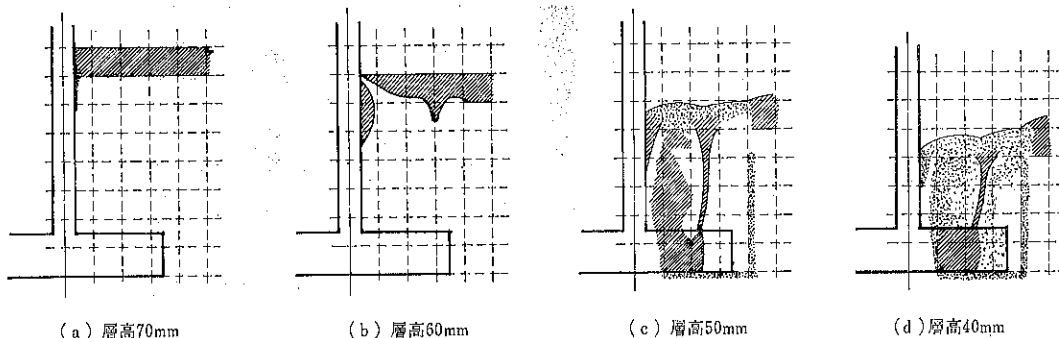


Fig. 7 層高を変えたときの状況 (120秒かくはん後)

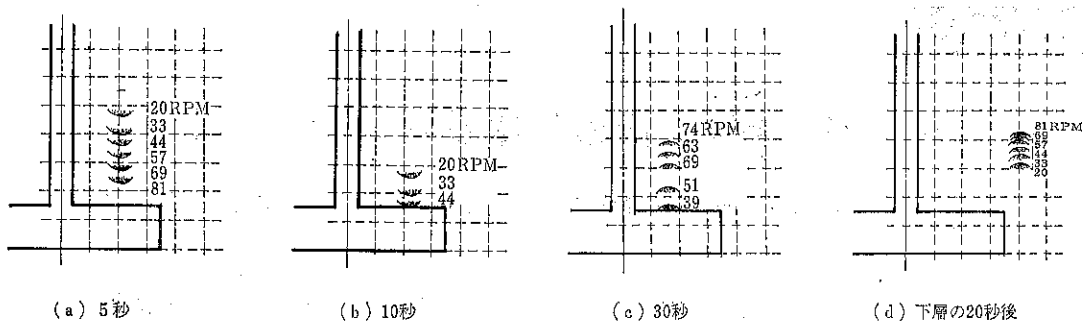


Fig. 8 羽根の回転数の影響

たが、これを変えたときの影響について調べた。Fig. 8 は各時間における下向流の先頭部位置(a)~(c)および下層の上昇流の先頭部位置(d)を示す。移動距離と回転数とはほぼ比例関係がみられる。移動速度は、Fig. 6 の流れ 2 が最大、次に流れ 3、そして流れ 4 がもっともおそい。つまり下向流 2 が砂の運動に支配的な役割を果していることになる。羽根の回転によって、かき除けられたあとに、重力流動によって補充される形で、かくはんが進行すると考えられる。

7. 水平方向の移動

次に、水平方向の移動を調べるために、着色砂を縦断的に、つまり容器の中心軸（かんはんの回転軸に一致）を通り、直径方向に厚み10mmで充填した、かくはん羽根は固定しておき、容器を5 RPMで回転し、2回転後の状態を調べた。前と同様、電気掃除機で注意ぶかく表層から砂を除去して、羽根下端から45, 35, 25, 15mmの位置の状態を写真撮影した。Fig. 9 に示す。なおはじめの充填層高は羽根下端から60mmである。この結果を評価するには、1回転後の状態も必要なので、それをFig. 10に示した。これを見ると砂の動きはスパイラル状になっており、羽根によって押された砂は一部は軸に近い方向に押し上げられて、上昇流を形成するものと考えられ、一方、羽根の後方の空間には上方から重力流動によって補給されるものと考えられる。Fig. 9 (d) をみると、羽根先端から外側への流れの結果も観察される。

参 照 文 献

- 1) 矢代, 清水: 粉体工学, 4, No. 7 (1967)
- 2) 矢野, 佐藤: 粉体工学研究会誌, 9, No. 4 (1972)

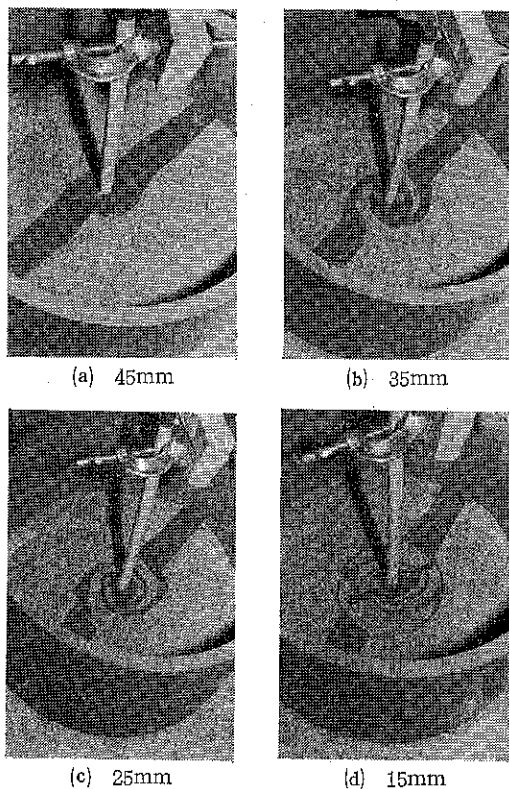


Fig. 9 2回転後の羽根下端から45, 35, 25, 15mmの位置における水平方向の移動

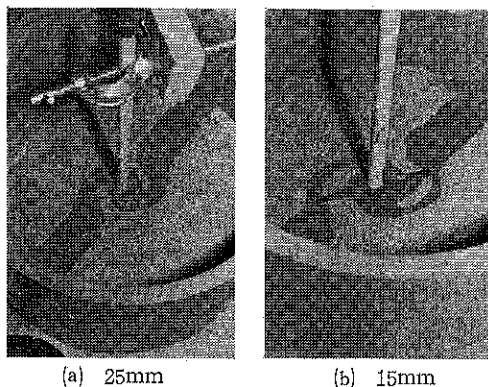


Fig. 10 1回転後の羽根下端から25, 15mmの位置における水平方向の移動

ナウタミキサー内の粉体の運動と混合過程

Flow Pattern and Mixing Process in Nauta Mixer

矢野 武夫*, 寺下敬次郎*
Takeo Yano Keijiro Terashita

Synopsis.

Flow Pattern in a batch type screw mixer is investigated by photographic observation and the measurement of concentration profiles.

Mixing performances (rate of mixing and final mixedness) are obtained experimentally for various ratios of spin revolution speed to planetary rotation speed. As increase in shear stress, the rate of mixing increases while final mixedness remains almost constant. It can be said that such impellers as the screw which produces much shear stress are recommended for the mixing of fine powders.

1. 緒 言

著者らは、固定型混合機の一つである回分式スクルー型混合機（ナウタ・ミキサー）について、混合性能の評価および最適操作条件などを報告した¹⁾。しかしこの種の攪拌型混合機の混合過程および混合特性をより定量的に知るには、混合機内での粉粒体の運動を調べておくことが不可欠である。

回転型混合機、特に水平円筒型混合機内の粉粒体の運動と混合に関しては、運動状態の観察から粒子の軸方向の混合には拡散機構が重要であることを指摘した大山⁷⁾の研究に始まり、沢畠⁸⁾および山口ら⁹⁾の粒子群の循環流と混合速度の関係、さらに Donald ら³⁾の異径2粒子の運動と混合状態との関連などの報告がある。またV型混合機では、沢畠⁹⁾の混合進行過程と循環流との関係、岡田ら⁶⁾の薬剤粉末の運動と混合速度の検討などの報告がある。

一方、固定型混合機内の粉粒体の運動と混合については、攪拌型混合機を用い粒子の通過ひん度から混合領域を明らかにした佐藤ら¹⁰⁾の報告だけのようである。すなわち回転型混合機に比べ、粉粒体の運動が複雑な固定型混合機における粉体の運動と混合に関する研究は少ない。さらに研究の多くは、粒径の比較的大きい粒体を用

いて行なわれ、微粉については調べられていない。

本報では、まず炭酸カルシウムの微粉を用い赤色顔料の弁柄を着色成分として、ナウタ・ミキサー内の粉体の運動と混合過程を写真観察で調べた〔実験Ⅰと呼ぶ〕。

つぎに食塩—炭酸カルシウム系について、まず食塩の場所的な濃度分布およびその時間的变化を追跡し、さらにスクルーの自転および公転の回転速度を変化させ、粉体群の運動と混合過程を調べた〔実験Ⅱと呼ぶ〕。

2. 実験装置および方法

実験装置には、前報¹⁾と同じナウタ・ミキサー（NX—S型）の改造型を用い、その概略を Fig. 1 に示した。すなわち鋼製で内容積が 53.3ℓ、有効容積* が 37ℓの混合機である。さらにこの混合機では、公転 N_p と自転 N_s の回転速度がそれぞれ独立に変化でき N_p と N_s の組合せにより N_s/N_p で約 6～106 の範囲内で自由に変化できるように工夫されている。

実験に使用した粉体試料の物性を Table. 1 に示した。

実験Ⅰでは、弁柄 1kg と炭酸カルシウム 9kg を 3種類の粉体装入方法で混合機内に仕込んで混合実験を行ない、スクルーの一定の回転数ごとに混合機の運転を停止し、混合槽の粉体層表面の写真撮影を行ない粉体群の運動および混合状態を観察した。

* スクリュー羽根上端までの容積。

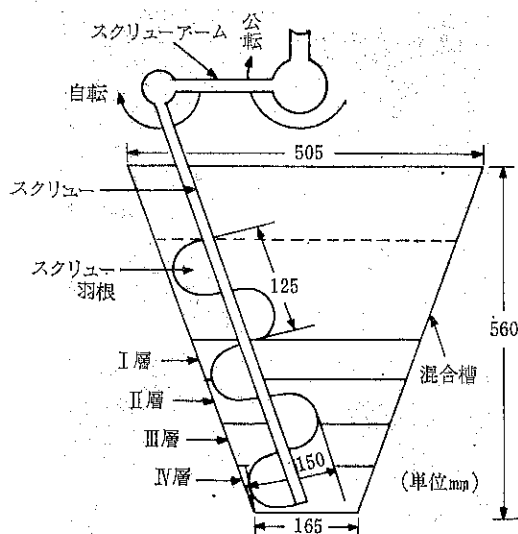


Fig. 1 Experimental apparatus.

Table. 1 Physical properties of tested powders.

粉 体 名	粒 径 (μ)	安息角 (度)	見掛け密度 (g/cc)		真密度 (g/cc)
			最小	最大	
炭酸カルシウム	5	44.5	0.60	1.13	2.71
弁 柄	2	43.0	0.67	1.30	3.36
食 塩	235	34.5	1.37	1.40	2.16

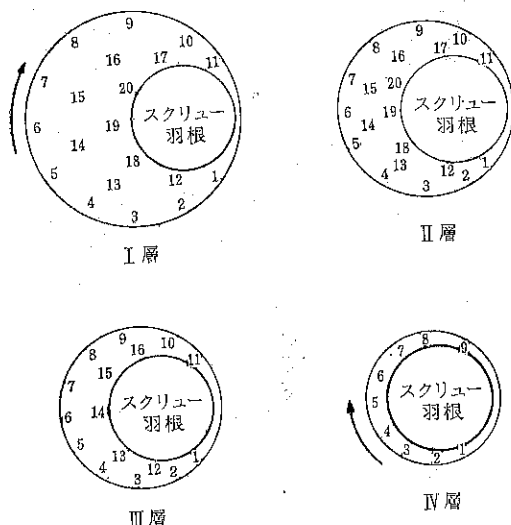


Fig. 2 Sample spot in the mixer.

実験IIでは、「食塩と炭酸カルシウムを重量比で2:98の割合に保ち、粉体装入率を $F^+/V=30.7\%$ (見掛け容積

規準) で混合実験を行なった。サンプリングは、まず Fig. 1 に示したように混合機内の粉体層 ($F^+/V=30.7\%$ 一定) を上部よりほぼI~IV層の部分に大きく分け、さらに Fig. 2 のごとくスクリュー軸を基準として槽壁、中心部および羽根周辺より65個のサンプルを採取した。この場合、I層とII層についてはそれぞれ20個、III層では16個、そしてIV層では9個のサンプルを各々採取した。なおこの実験では特にサンプリングに注意した。すなわち特定の1つの層のサンプリングを行なうと上層の粉体の混合状態が攪拌されるため、1回の混合実験では1層のみの混合状態を調べることにし、他の層のサンプリングはつぎの混合実験で行なった。

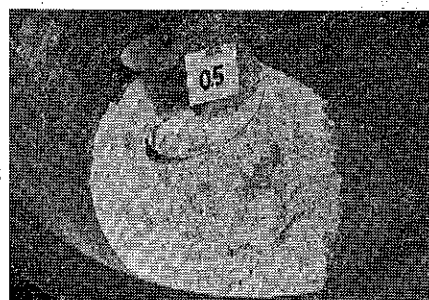
3. 粉体の運動状態を写真観察した結果とその考察

実験Iにおいて公転および自転速度をそれぞれ1.7 r.p.m., 93 r.p.m. の一定に保ち、粉体群の運動状態を写真撮影した結果の一例を Fig. 3~5 に示した。いずれの図においても黒く写っている部分は弁柄であり、白い部分が炭酸カルシウムである。

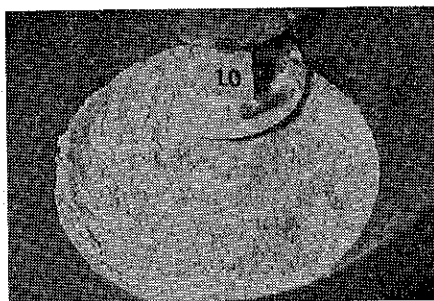
Fig. 3(a) は、着目成分の弁柄を粉体層表面に、その下に炭酸カルシウムを装入した場合(この粉体装入方法を Type-A と呼ぶ) の初期状態である。つぎに0.5回転公転させた状態を Fig. 3(b) に示した。0.5回転の公転では、スクリュー・アームが混合槽の壁に沿って1/2回転移動するため半径方向の粉体の運動が見られると同時に



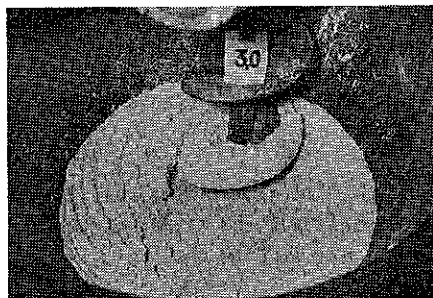
(a) 粉体装入状態 (混合前)



(b) $N_p\theta=1/2$



(c) $N_p\theta = 1$

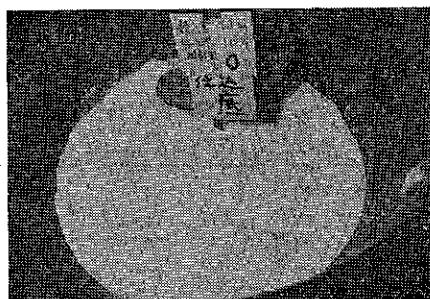


(d) $N_p\theta = 3$

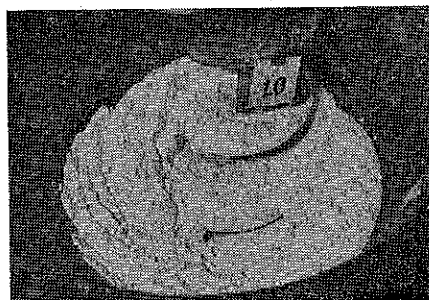
Fig. 3 Photographs of flow pattern.
(Type-A)

に、スクリー羽根の回転にともない粉体層内の炭酸カルシウムが粉体層表面あるいはその近傍にあらわれた。そして粉体層表面に運ばれた粉体は、スクリー羽根周辺に分散されるかあるいは崩れ落ちた。しかし0.5回転の公転であるため、スクリーの公転の影響を受けない場所の弁柄は初期状態を保ったままである。つぎに Fig. 3 (c) に示した 1 回転の公転では、まずスクリーの自転による粉体層内部からの粉体の上昇流れすなわち軸方向の流動が活発になり、多くの炭酸カルシウムが粉体層内部からその表面部に到達し弁柄と混合した。さらにこの粉体の運動がスクリーの公転により混合槽表面の全域に行きわたった。しかし 1 回転の公転では、まだスクリーの回転運動による混合が緩慢であるため、混合状態が良好でない。さらに公転が 3 回転に増加すると、Fig. 3 (d) に見るようにスクリーの遊星運動により粉体群の運動が進み、 $N_p\theta=1$ [Fig. 3 (c)] などの粉体層表面で多く見られた弁柄が炭酸カルシウムに覆われ、粉体層上部の弁柄が槽中央付近を下降する傾向を示し、さらにいったん下降した弁柄が再び粉体層上部に浮上する複雑な粉体の運動が観察された。この複雑な粉体の運動により、回転数 $N\theta$ の増加と共に両粉体はほぼ均一な混合状態に近づいた。

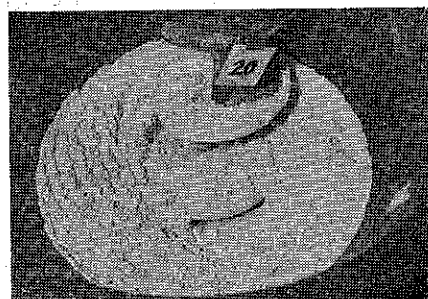
つぎに Fig. 4 (a) には、着目成分の弁柄を混合槽底部に水平に装入し、その上層に炭酸カルシウムを仕込む粉



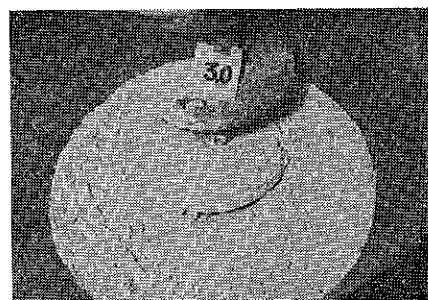
(a) 粉体装入状態 (混合前)



(b) $N_p\theta = 1$



(c) $N_p\theta = 2$



(d) $N_p\theta = 3$

Fig. 4 Photographs of flow Pattern.
(Type-B)

体装入方法 Type-B の混合前の状態を示し、炭酸カルシウムのみが写っている。Fig. 4 (b) には Type-B の公転 1 回転の状態を示した。この状態では槽底部に仕込んだ弁柄は、まだ混合槽表面に現われていない。しかし

Fig. 4 (c) の 2 回転の公転では、スクリーアの自転により混合槽底部に装入された弁柄が、スクリーア羽根の回転と共に粉体層表面近傍まで上昇し、さらにスクリーアの公転によりその移動方向に分散された状態を明瞭に観察できた。さらに Fig. 4 (d) に示した公転の 3 回転後では、粉体装入方法 Type-A の $N_p\theta=3$ の結果とほぼ同じ程度の良好な両粉体の分散状態が得られた。

最後に弁柄を混合槽の壁に沿って垂直方向に仕込んだ粉体装入方法 Type-C の結果を Fig. 5 に示した。まず Fig. 5 (a) の 0.5 回転の公転では、スクリーア・アームが混合槽の壁に沿って回転移動するため、公転の進行方向に着目成分の弁柄が運動していることが観察された。また粉体装入方法 Type-A の 0.5 回転の結果 [Fig. 3 (b)] と同様に、公転の働きを受けない粉体群

は静止の状態を保った。つぎに 1 回転の公転 [Fig. 5 (b)] になると槽壁の弁柄が、スクリーア羽根の回転移動により混合槽中央付近まで流動するため、弁柄の分散範囲が拡大し、混合が進行した状態が観察できた。そして公転 3 回転後の Fig. 5 (c) になると、他の粉体装入方法とほぼ同じような粉体の運動が観察され、見掛上粉体装入方法の異なりによる粉体の運動状態の違いが見られなくなった。

以上のように粉体装入方法を変化させて、ナウタ・ミキサー内の粉体の運動と混合過程を粉体層表面の写真観察で調べた結果、スクリーアの回転により、槽壁あるいは槽底部の弁柄がスクリーア羽根に沿って粉体層を上昇し、層表面で分散され槽中央付近を下降し再び上昇する粉体の運動が認められた。この粉体の運動がスクリーアの公転により混合槽全域に行きわたり混合が促進されると推論できた。しかし混合槽内での粉体群の運動と混合過程をより定量的に知るために、粉体層からの観察では不十分であるので実験 II の方法で検討することにした。

4. 混合機内の食塩濃度分布とその時間的变化

まずいろいろな粉体装入方法における I 層すなわち粉体層表面付近での食塩濃度分布の結果の代表例を Fig. 6 に示した。図中の数値は各サンプリング場所での食塩濃度 C_i を示している。またこの実験条件における完全混合での食塩濃度 C_0 は 2.5 (Vol. %) であることから、各サンプリング場所での C_i が C_0 に近いほど良好な混合状態を示していることになる。

Fig. 6 (a) に示す Type-A のスクリーアの回転初期 ($N_p\theta=1$) における食塩濃度 C_i の濃度分布は、粉体層表面に装入された食塩が、1 回転の公転であるためにスクリーアの半径方向の混合が十分でないことと、スクリーア羽根の回転により粉体層内部からの炭酸カルシウムがある程度浮上したため、低および高部分を含む濃度差を示した。つぎに Fig. 6 (b) に示した公転 3 回転では、まず槽中央付近の食塩濃度が槽壁近傍に比べ完全混合時の濃度 C_0 に近い数値を示し、槽中央部が槽壁付近より早く良好な混合状態に近づいている。さらに混合槽内全域の濃度は、Fig. 6 (b) に見るように C_0 に近い値を示していることから、かなり混合が進行していることがわかる。

つぎに Fig. 6 (c) に示す Type-B の公転 1 回転の状態は、スクリーア羽根近傍をのぞき食塩濃度 C_i がほとんど 0 % 付近の値を示し、混合槽底部付近 (IV 層) に装入された食塩が I 層にほとんどあらわれていない。さらに公転の回転数が増し Fig. 6 (d) の $N_p\theta=3$ では、槽全域の食塩濃度が全般的に低い値を示しながらも $N_p\theta$

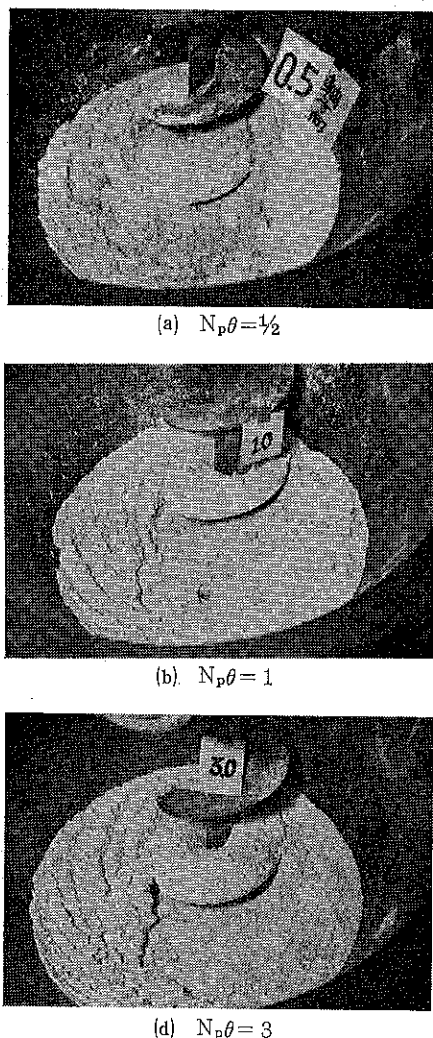


Fig. 5 Photographs of flow Pattern.
(Type-C)

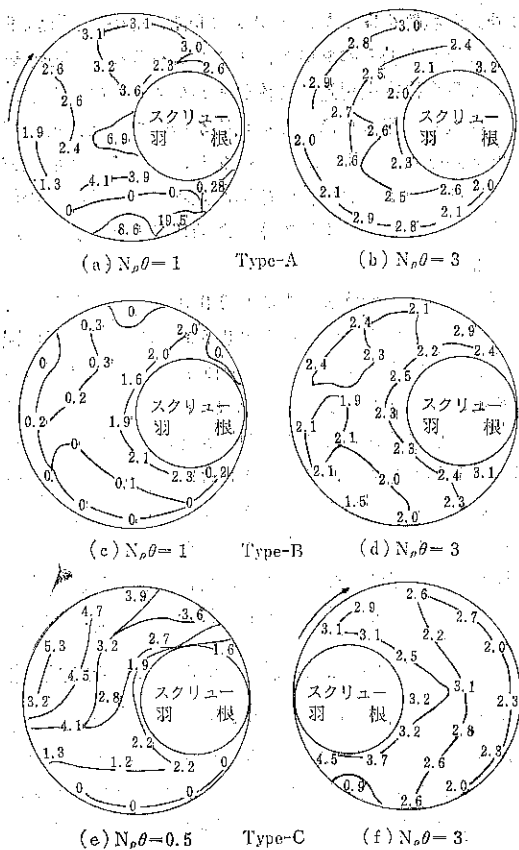


Fig. 8 Concentration profiles in the layer I for various positions of tracer loading.

$\theta = 1$ に比べて C_0 に近づき、IV層に装入された食塩がある程度混合されてI層に到達していると推論できた。したがって着目成分を混合槽底部に装入した Type-B では、スクリーンの自転により粉体にせん断力が作用し粉体の軸方向の上昇運動が徐々に進行し、一方スクリーンの公転により粉体が半径方向に分散し、その結果、着目粉体が表面層付近に到達した時は、ある程度混合が進行していると推定した。

さらに Fig. 6 (e) に示す Type-C の公転 0.5 回転における濃度分布では、スクリーンの通過した部分では粉体が分散されているが、まだスクリーンの攪拌がおよばない部分では C_0 が 0% を示し静止状態を保っている。公転 3 回転の Fig. 6 (f) では、食塩濃度はスクリーンの羽根周辺に近いほど大きな値を示し、槽壁に沿って軸方向に装入された食塩が炭酸カルシウムと共にスクリーンの回転と移動により I 層の中心部に吐出される流動特性を示した。

以上のように、粉体装入方法の異なる食塩濃度の分布状態から粉体の運動や混合状態は、粉体層表面付近の写

真観察 [実験 I] の結果と良好な一致が見られた。そこで以下では、Type-A, B および C における混合槽内部の各層の濃度分布状態を知り、混合機内全体としての粉体の運動および粉体装入方法の違いによる混合状態の差異について調べることにした。

Type-A, B および C の公転 2 回転における内部各層の濃度分布を Fig. 7 にまとめて示した。まず Fig. 7 (a, b) に示す Type-A の III および IV 層では、一部の濃度が C_0 に近い値を示した。このことはスクリーンの攪拌により、槽内部の空隙率が増大することから I 層に装入された食塩が、混合槽内を下降し III 層をへて IV 層に到達した結果であると推定した。すなわち混合槽中央部に、粉体の下降流の存在することを認めた。

つぎに Fig. 7 (c) に示した Type-B の IV 層では、一部の C_0 が小さい値を示していることから、混合槽底部に装入した粉体がスクリーンの羽根内部に入り粉体層を上昇したと結論できた。事実 Fig. 7 (d) に示される III 層での食塩濃度は、スクリーンの羽根近傍が槽壁付近に比べて大きな値を示し、食塩を含む粉体が IV 層から III 層に流動していることがわかった。

さらに Fig. 7 (e, f) に示した Type-C の濃度分布は、低および高濃度域が局所的に見られ、スクリーンの遊星運動による混合がまだ十分でないことを示している。

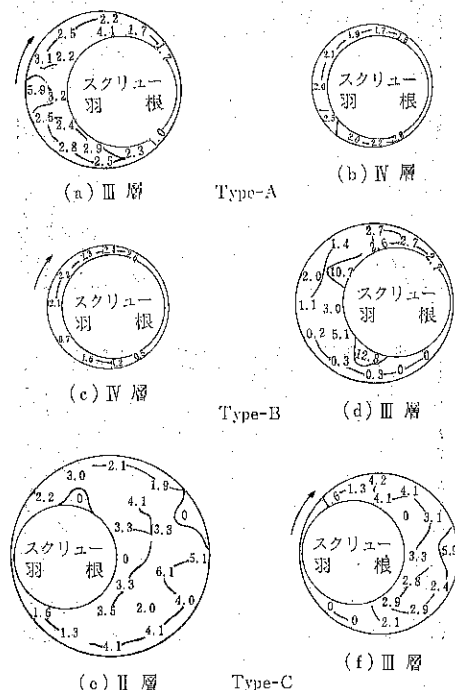
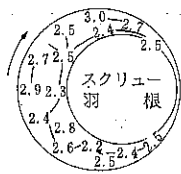
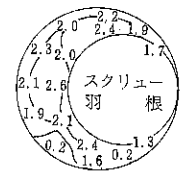


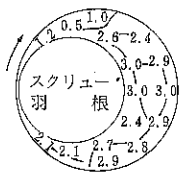
Fig. 7 Concentration profiles in the mixer.



(a) Type-A

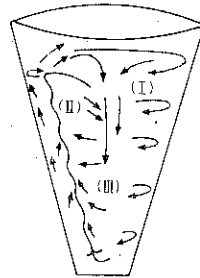
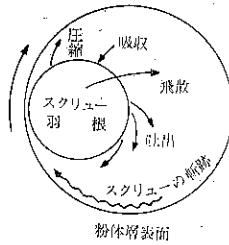


(b) Type-B



(c) Type-C

Fig. 8
Concentration
profiles for various
positions of tracer
loading.



混合槽内部

Fig. 9
Flow pattern in the
Nauta mixer.

最後に粉体装入方法の異なるⅢ層における公転4回転の場合の濃度分布を **Fig. 8** に示した。図から濃度分布は、Type-A が槽全域において C_0 に近い値を、Type-B では C_i が C_0 よりも小さい側にひん度の高い濃度分布を、Type-C では C_i は C_0 よりもかなりばらついた値を示していることがわかった。すなわち Type-A では、スクリーウの遊星運動が十分に作用して、他の粉体装入方法に比べ混合機内の粉体の運動が早くランダムな状態となり混合状態に近づいていると推測できた。

以上の槽内の濃度分布ならびに前節の写真観察結果を総合し、ナウタ・ミキサー内の粉体の運動を検討した結果 **Fig. 9** に示すようなフローパターンが得られた。すなわち

I) スクリューの公転により、混合槽の壁に沿って円運動する粉体の運動と、スクリーウ羽根にともなう粉体の吐出による槽中央付近への粉体の運動。すなわち半径方向の混合。

II) スクリューの自転のせん断力による混合槽底部からの粉体の上昇流および混合表面付近での粉体の飛散。すなわち軸方向の混合。

III) スクリューの遊星運動により、混合槽内の粉体群

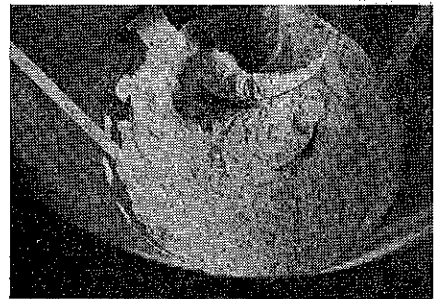
の空隙率の増大にともなう粉体の下降流。そして主に II) の運動に移動する循環流。などが存在する。

5. 混合過程の考察

前節までに述べたようにナウタ・ミキサー内での粉体混合の機構は、スクリーウの自転と公転すなわち遊星運動により粉体群にせん断力が作用し、混合槽内の粉体群が上下に循環することに起因することであることがわかった。

そこで自転と公転の回転速度をいろいろ組合せ、各操作条件で混合機を運転し、粉体層表面の写真撮影を行なった。一例として公転速度 N_p を 2.2 r.p.m. の一定に保ち、自転速度 N_s を 42~180 r.p.m. の範囲6段階に変化させた場合の写真撮影結果を **Fig. 10** に示した。

Fig. 10 での粉体層表面のうず巻のらせん模様を、ここではスクリーウの遊星運動によるせん断面の表面部と



(a) $N_s/N_p=19.0$ ($N_s=42$ r.p.m.)

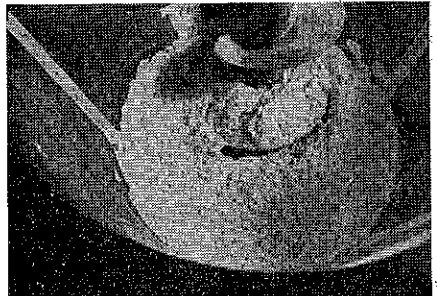
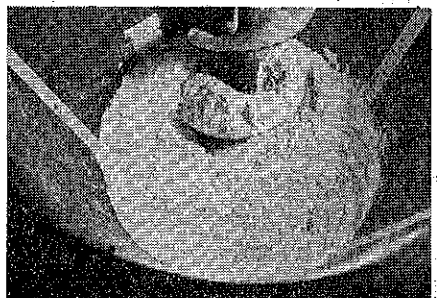
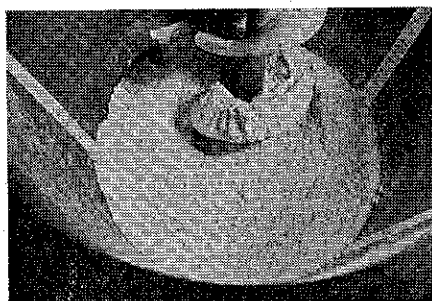


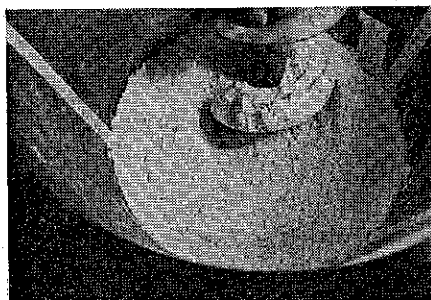
Fig. 10 (b) $N_s/N_p=32.7$ ($N_s=72$ r.p.m.)



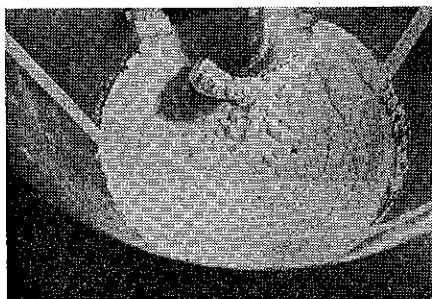
(c) $N_s/N_p=42.2$ ($N_s=93$ r.p.m.)



(d) $N_s/N_p=51.3$ ($N_s=113$ r.p.m.)



(e) $N_s/N_p=65.4$ ($N_s=144$ r.p.m.)



(f) $N_s/N_p=81.8$ ($N_s=180$ r.p.m.)

Fig. 10 Effect of N_s/N_p on the surface condition of powder.

考えた。特に Fig. 10 (d) の N_s が大きくなり ($N_s=113$ r.p.m.) $N_s/N_p=51.3$ 以上になる場合らせん模様が不明瞭になったのは、 N_s が比較的大きくなることによりスクリー羽根によるせん断力が增大することから、粉体の上昇流が増加すると共に層表面での粉体の飛散が増大したためである。すなわち槽内の粉体の運動は公転、自転あるいはその比の N_s/N_p などに変化することがわかった。そこで N_p や N_s および N_s/N_p と、粉体群に働くせん断力の強弱に関係すると考えた粉体層の空隙率との関係を求めた。

混合機槽壁に沿って円周を5等分し垂直方向に目盛をつけ、混合操作中に各測定点の目盛で粉体層高さを実測し空隙率 ε を求め、 ε 対 N_s/N_p あるいは ε と N_s の関係を Fig. 11 と 12 に示した。なおここでの空隙率 ε

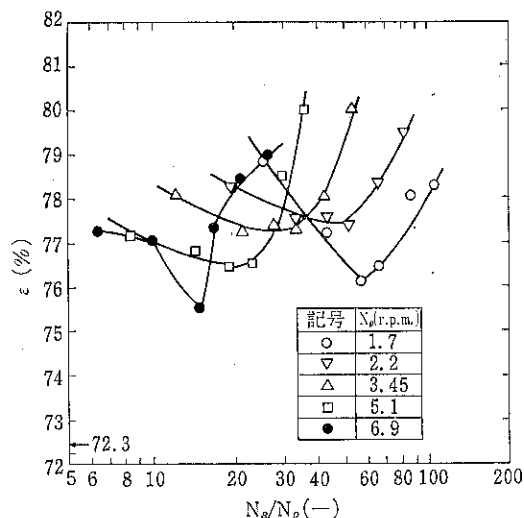


Fig. 11 Effect of void fraction on ratios of spin revolution speed to planetary rotation speed N_s/N_p .

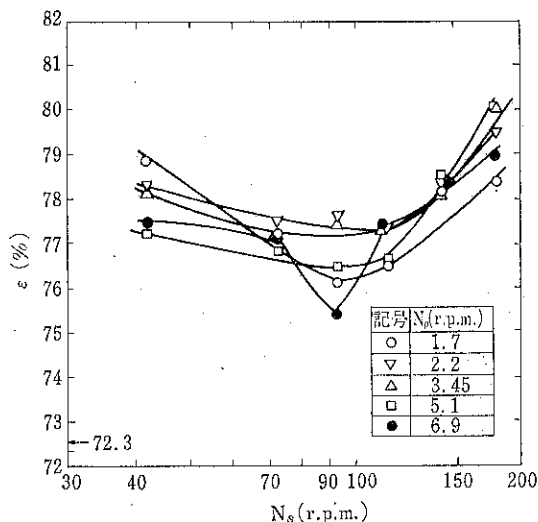


Fig. 12 Effect of void fraction on spin revolution speed N_s .

は、槽壁の5カ所の測定点について5回粉体層高さを実測し、その相加平均より求めた値である。また両図において $\varepsilon=72.3$ の値は、粉体試料を混合機内にランダムに装入した混合前の空隙率をあらわしている。

まず Fig. 11 より空隙率 ε は、それぞれの N_s/N_p の比率の小さい場合大きな値を示すが、ある N_s/N_p で極小値を示しその後直線状に増大する測定結果が得られた。また Fig. 12 より ε は、いずれの N_p の場合にも N_s が93~144 r.p.m. 付近で極小値を示し、その後 N_s の増大と共に空隙率は大きな値を示した。したがって Fig. 11においてそれぞれの N_s/N_p の比率の小さい

範囲で大きな値を示したのは、いずれの N_s/N_p の場合でも N_s が約 93 r.p.m. 以下の場合である。特に N_s が 93 r.p.m. 以下では、自転速度が小さいためにスクリー羽根の回転と共に上昇してきた粉体が、羽根近傍に崩れ落ちるかあるいは分散するのみである。かつスクリーの回転による粉体の吐出も小さいために、槽中央付近への粉体の流動は小さかった。そのために槽内の粉体群は槽壁で高く、槽中央部で低い状態を示した。しかしここでの ϵ は槽壁での粉体高さより求めたために、大きな値を示したと思われる。また空隙率 ϵ が直線状に増大する部分では、まず自転によるせん断力が大きくなり粉体の上昇流が増大することから ϵ は大きな値を示した。つぎにスクリー羽根による層表面での粉体の飛散が活発になり、槽内の粉体群の表面形状は水平状態を示した。したがって空隙率 ϵ は、公転速度よりも自転速度の影響を強く受けていることがわかった。

以上のようにスクリーの回転運動において N_s/N_p あるいは N_s が増大すると、粉体の充填状態をあらわす空隙率も増大しせん断力の作用が強くなったと見なすことができた。

つぎに混合状態と N_s/N_p および N_s の関係を調べることにした。混合速度係数 ϕ 対 N_s/N_p および N_s ならびに最終混合度 M_∞ と N_s/N_p の関係を粉体装入方法 Type-A の場合について Fig. 13, 14 と 15 に示した。

Fig. 13 より混合速度係数 ϕ は、それぞれの N_s/N_p の比率が大きくなるとスクリーの遊星運動によるせん断力が増大すると考えられることから、粉体相互の接触面が増加するためほぼ直線的に増大し、その後極大値をへてやや低下する結果が得られた。また Fig. 14 より ϕ は、いずれの N_p の場合でも N_s が大きくなると自転によるせん断効果が増大するためほぼ直線的に増大し、ある N_s で極大値を示した。したがって本実験範囲では、Fig. 13 および 14 の結果より混合速度係数 ϕ は N_p よりも粉体の上昇流を大きくする N_s の影響を強く受けていることがわかった¹¹⁾。さらに ϕ の値が最大を示した付近は、 ϵ がそれぞれの N_s/N_p あるいは N_s において極小値を示した条件とも近似的に一致することがわかった。しかし最終混合度 M_∞ は、Fig. 15 に示すように N_s/N_p が変化してもほぼ同じ値を示した。また図を省略したが N_p をパラメーターにして M_∞ 対 N_s をプロットした結果より、いずれの N_p でも $N_s=72$ r.p.m. 以上になると M_∞ はほとんど一定の値を示した。したがって空隙率の変化は、最終混合度にほとんど影響をあたえないことがわかった。

このようにせん断力が大きくなると混合速度が増大す

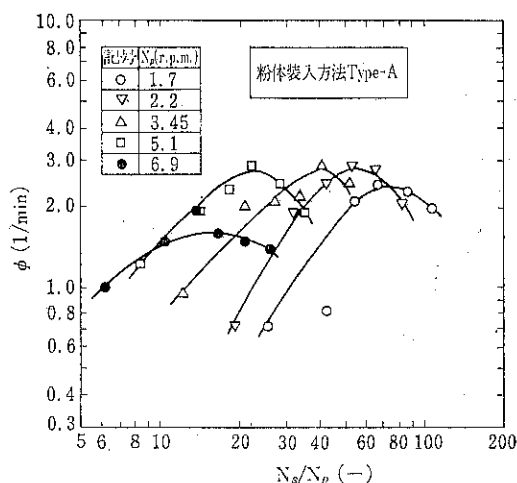


Fig. 13 Effect of rate of mixing on N_s/N_p .

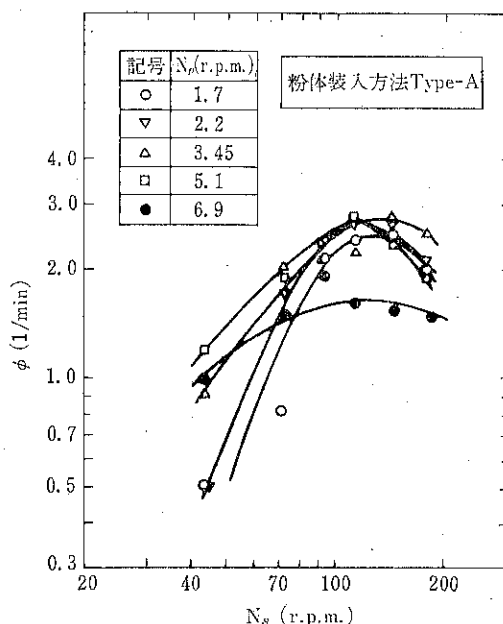


Fig. 14 Effect of rate of mixing on N_s .

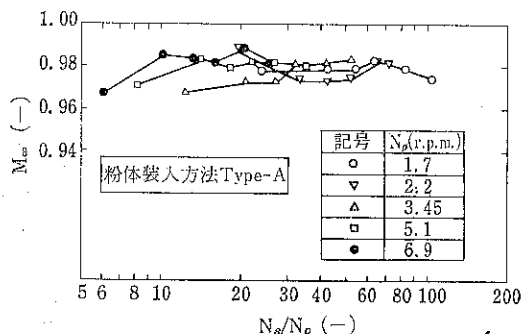


Fig. 15 Effect of final mixedness on N_s/N_p .

るという結論は、Michaels ら⁵⁾ によってフィガー・ブロング型攪拌羽根を用い、湿潤粉体を捏和した場合にも求められている。

粉粒体の混合機構としては拡散、対流およびせん断混合が考えられており、これらの機構が寄与しあって混合が進行するといわれている⁴⁾。このうち水平円筒型などの回転型混合機では、拡散混合が重要であることが知られている¹⁾⁷⁾。これに対しナウタ・ミキサーでは、特に本実験に用いた微粉の場合にはスクリュウの遊星運動によるせん断混合の寄与が大きいと結論できた。

6. 結 論

ナウタ・ミキサー内の粉体の運動と混合状態を微粉を用いて写真観察や混合槽内の濃度分布から調べた。さらに混合過程をスクリュウの自転速度および公転と自転速度の比率などによるせん断力あるいは混合性能と空隙率の関係を検討し、つぎの結論を得た。

1) いろいろな粉体装入方法で混合槽内の運動状態を検討することにより、ナウタ・ミキサー内のフローパターンを Fig. 9 であらわすことができた。

2) 混合過程を調べるために、スクリュウの回転によるせん断力の強弱を空隙率と N_s および N_s/N_p などとの関係から推測し、混合速度係数および最終混合度と N_s および N_s/N_p の関係を求め、せん断力が大きくなると混合速度が増大するが最終混合度への影響はほとんどないと結論できた。さらに ϕ は、 N_p よりも粉体の上昇流を活発にする N_s の影響を強く受けていることもわかった。

3) 固定型混合機における、特に微粉の場合の混合機構としては、スクリュウなどの攪拌によるせん断混合の寄与が大きいことがわかった。

〔謝辞〕本研究は、細川粉体工学研究所の御協力によって行なわれたものである。ここに記して謝意を表わします。

記 号

C_1	: サンプル中の食塩濃度	(Vol.%)
C_0	: 完全混合での C_1 の濃度	
$F+V$	: 粉体装入率 (見掛容積規準)	
	$\left(\frac{W_A/\rho_A}{W_A/\rho_A + W_B/\rho_B} \times 100 \right)$	(Vol.%)
M_∞	: 最終混合度	(—)
N_s	: 自転速度	(r.p.m.)
N_p	: 公転速度	(r.p.m.)
N_s/N_p	: 公転と自転速度の比	(—)
$N_p\theta$	: 公転の総回転数	(—)
ϕ	: 混合速度係数	(1/min)
ϵ	: 空隙率	(%)

引 用 文 献

- 1) Carley-Macauley, K. W. and Donald, M. B.: Chem. Eng. Sci., **17**, 493 (1962) **19**, 191 (1964)
- 2) Donald, M. B. and B. Roseman: Brit. Chem. Eng., **7**, 749 (1962)
- 3) 井上, 山口: 化学工学, **34**, 1323 (1970)
- 4) Lacey, P. M. C.: J. Appl. Chem. **4**, 257 (1954)
- 5) Michaels, R. S. and V. Puzinausks, C. E. P., **50**, 604 (1954)
- 6) 岡田, 穂積, 松田, 福森: 薬学雑誌, **90**, 1532 (1970)
- 7) 大山義年: 理研彙報, **12**, 953 (1933) **14**, 570 (1935) **15**, 320 (1936) **18**, 320 (1936) **18**, 600 (1939) **19**, 1070 (1954)
- 8) 沢島恭: 材料, **16**, 364 (1967)
- 9) 沢島恭: 化学工学, **30**, 1140 (1966) **31**, 1212 (1967)
- 10) 矢野, 佐藤: 粉体工学研究会誌, **9**, 234 (1972)
- 11) 矢野, 寺下, 北山, 峯下: 粉体工学研究会誌, **8**, 263 (1971)



不均一流動化における粒子の挙動

Motion of the particles in an un-homogeneous fluidized bed

佐納 良樹*

Yoshiki SANOH

Abstract

Motion of particles in homogeneous and non-homogeneous fluidized beds was traced with an 8 mm movie camera, using half-cylindrical fluidized bed, in an attempt to obtain basic data for fluidized mixing equipment, which is one of the applications of the fluidized bed. Particle mixing process in both beds was compared and examined.

It was confirmed that far better particle mixing performance can be obtained in un-homogeneous fluidized bed than in homogeneous bed.

It is considered that the foregoing is attributable to the effects of local volute and bubbles, in addition to the stream recirculating throughout the fluidized bed. However, the mixing performance is poor even in an unhomogeneous bed, if it is of the one-sided fluidization type.

摘 録

流動層の応用の一つである流動化混合装置についての基礎資料を得る目的で、半円筒流動層をもちい、8%カメラにより不均一流動層および均一流動層の粒子挙動を追跡した。そして、両者の粒子混合過程を比較検討した。

その結果、不均一流動層の方が、均一流動層より明らかに粒子混合性能が良好であることが確認された。その原因として、層全体に亘る循環流のほかに、局部的な渦ならびに気泡の効果が大きいと考えられる。

しかし、不均一流動層でも片側のみ通気する片側通気流動層の混合性能は不良であるといえる。

1. 緒 言

元来、流動層は出来るだけ均一な流動化状態を実現するために、いろいろな工夫がなされて来っており、その結果として粒子と流体ならびに粒子間に極めて良好な接触が実現している。しかし、最近になって、流動層の応用範囲を拡大する見地からスラッシング、脈動および振動など、今まで異常状態として避けるべきであるとされて

来た現象が注目を集めるようになって来た。

このような観点から眺めると流動層は極めて性能のよい混合装置としての特質を持っており、現にセメント工業においてブレンディングサイロ内での原料の調整、均質化用に不均一ガス流動層がもちいられている¹⁻³⁾。このような流動化混合装置は、従来からの回転型および固定型混合機に比べて大容量の粉粒体を比較的短時間のうちに処理するという利点をもつ。

しかし、流動化による粉粒体の混合に関する研究は極めて限られており⁴⁻⁶⁾、基礎的知見についてはまだ不明な点が多い。

本報告では適切な流動化混合装置の設計ならびに流動化による粉粒体混合の操作条件についての基礎資料を得る目的で、主として8%カメラにより不均一流動層ならびに均一流動層での粒子挙動を撮影、観察し、粒子混合の過程の比較検討をおこなった。

2. 実験装置、試料および実験方法

2.1 実験装置

装置はすべて実験規模のものであり、装置全体の概略および主要部の詳細をそれぞれFig.1およびFig.2に

* 信州大学繊維学部 (〒386 上田市常田3-15-1)

TEL: 02682-2-1215

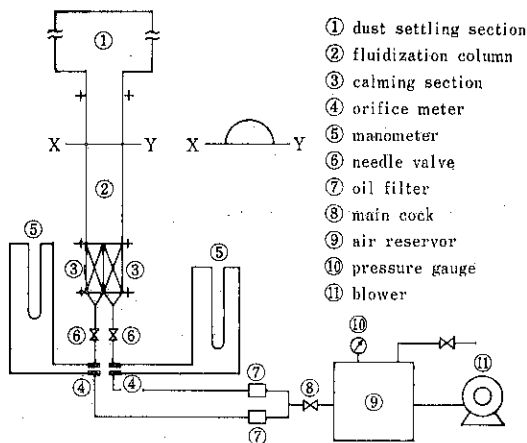


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

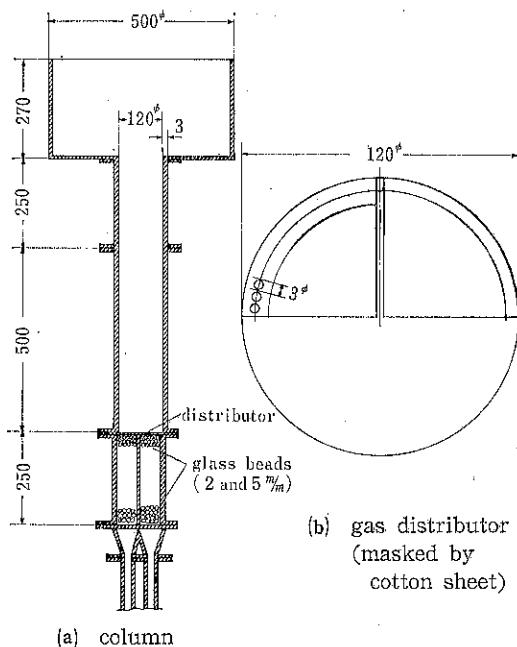


Fig. 2 Dimensions of the fluidization column and gas distributor

示した。

ブローアを出て調圧タンク⑨に導かれた空気はメインコック⑧を経た後、2本の管路に分れ、それぞれ計量されて流動層下部の整流部に吹き込まれる。整流部は内径120φの円筒で、その中央部に挿入した一枚の板によって2分されており、それぞれの区画を流れる空気流量はニードルバルブ⑥によって別々に調節しうる。

さらに流動層本体は Fig. 2 (a) に示したように内径120φ、全高750φの透明塩化ビニル製半円筒である。こ

の半円筒の下部に長さ250φの整流部を設け、ここに2%および5%のガラス球を上、下2層に充填した。さらに半円筒(塔本体)の上部には500φ×270の円筒形集塵部を付設した。

また塔本体の下端と整流部の間には Fig. 2 (b) に示したように多孔板(孔径3φ)に木綿布を貼りつけたものを支持板として挿入した。

なお、流動層に送入される空気流速は、すべて半円筒の断面積基準の見掛け速度をもちいた。

2.2 試料

次に、使用した試料は豊浦標準砂であり、トレーサーとして、同上砂をメチレンブルーで着色したものをもちいた。なお試料の主な性質の実測値は Table. 1 の通りである。

Table. 1 Properties of Toyo-ura Sand

Particle size (μ)	105~297
Density (g/cc)	2.63
Bulk density (g/cc)	1.42
Minimum fluidization velocity (cm/sec)	3.54
Elutriation velocity (cm/sec)	31.50

2.3 実験方法

2.3.1 空気流速の設定

流量調節バルブ⑥により流動層の左半分(低速領域、A領域と呼ぶことにする)および右半分(高速領域、B領域)に流入する空気量をそれぞれ Table. 2 の如く設定した。 U^* は1.5~8の範囲でおこなった*。

Table. 2 Dimensionless fluidizing air velocity

U_A^*	0	1.0	1.5	2.0	3.0
U_B^*	1.5	1.5	—	2.0	4.0
	2.0	2.0	2.0	3.0	5.0
	3.0	3.0	3.0	4.0	—
	4.0	4.0	4.0	5.0	—
	5.0	5.0	5.0	—	—

2.3.2 試料の装入

粒子群の動きを観察し易くするため着色粒子を Fig. 3 のように縦縞または横縞模様装入した。その際、比較的小さな動きを観察するために、それぞれの縞の数を増した Fig. 3 a—(2) または Fig. 3 b—(2) の場合も併用し

* 粒子飛び出し速度 $U_t^* = 9 \sim 10 U^*$

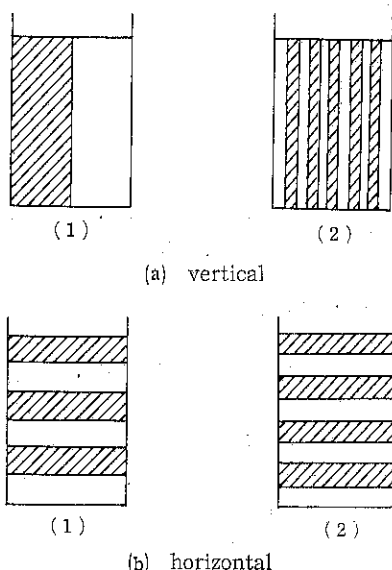


Fig. 3 Charging patterns of the tracer particles

た。ただし模様の数を増すと、当然周囲粒子との色調の平均化が早まり、したがって粒子群の動きをトレースする時間が短かった。また、装入粒子量（着色粒子を含めた全粒子量）は毎回、層高比が1.5に相当する量である。

2.3.3 実験操作

実験に先立ち、バルブ⑥によって所定の流量に調節し、コック⑧を閉じて一旦運転を止める。

つぎに、所定量の試料を装入後コック⑧を開き流動化させ（通気時間は約15秒～2分間の範囲であった）同時に8%カメラで撮影（18コマ/秒）した。このような方法によれば、追跡しうる粒子群の挙動は流動層（半円）の前面に限定されるのは止むを得ない。

撮影したフィルムをニコソ投影拡大器にかけ（倍率は20倍または50倍）必要に応じて映写機で上映し、着色粒子群の縞模様の崩れてゆく状況を追跡した。

また、全体に亘り着色粒子の縞模様が消え、肉眼的に全く均質になったと認められるまでのコマ数を数え、18で除して、これを混合所要時間とみなした。

3. 実験結果および考察

3.1 粒子群のフローパターン

3.1.1 均一流 ($U_A^* = U_B^* = 2.0$)

均一流では流動層底部の全面から気泡が発生するのが見られた。また上層部の粒子は気泡の間を徐々に下降するのが観察された。そして、粒子の下降につれてトレーサーの縞模様がその都度崩壊し次第に混合した。気泡と

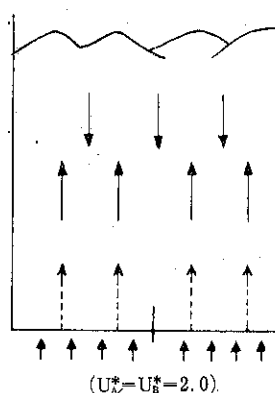


Fig. 4 Homogeneous fluidization

粒子のフローパターンの概念図をFig. 4に示した。図において実線は粒子の流れを表わし、点線は気泡の経路を代表するものとする（以下同様）。また層底中央の区切り線はA領域とB領域の境界を示し、さらに層底下方に画いた矢印及びその長さは空気およびその流量を示すものとする。Fig. 4からわかるように均一流でしかも U^* が4.0程度では粒子群の流れの経路は主として鉛直上方

Table. 3 Down-flow velocity of particles in the circulation and the mixing time

U_A^*	U_B^*	U^*	down flow velocity of particles (cm/sec)	mixing time (sec)	
				horizontal direction	vertical direction
0	1.5	1.5	0.3	—	—
	2.0	2.0	0.5	—	—
	3.0	3.0	1.5	—	—
	4.0	4.0	3.0	about 2 min	about 2 min
	5.0	5.0	4.5	40	40
1.0	1.5	2.5	1.4	—	—
	2.0	3.0	2.6	about 2 min	about 2 min
	3.0	4.0	3.3	20	15
	4.0	5.0	6.4	13	9
	5.0	6.0	6.4	10	7
1.5	2.0	3.5	1.9	17	16
	3.0	4.5	4.5	13	11
	4.0	5.5	5.8	9	9
	5.0	6.5	6.9	7	7
2.0	3.0	5.0	4.8	13	9
	4.0	6.0	8.3	10	8
	5.0	7.0	8.5	7	6
3.0	4.0	7.0	7.5	—	6
	5.0	8.0	—	7.5	6.5
2.0	2.0	4.0	—	17.5	10.5

に向い比較的単純な動きしか示さなかった。したがって均一气流による混合では気泡の効果が大きいといえるであろう。

さらに Table. 3 に示したように縦模様ならびに横模様 (Fig. 3 a および 3 b) のそれぞれの消失時間すなわち混合時間に大きな差異があることと併わせ考えると、均一流での粒子の動きは流動層の軸方向に沿うものが主で、水平方向の動きは前者に比べて可成り不活潑であるといえる。

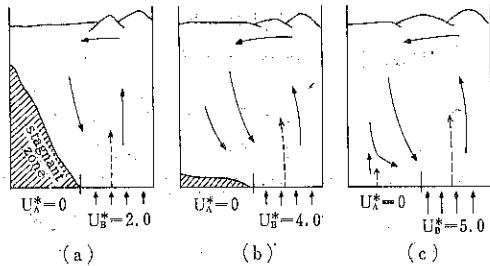


Fig. 5 Un-homogeneous fluidization (one-sided fluidization)

3.1.2 不均一流

(i) 片側通気 ($U_A^* \neq U_B^*$ で、しかも $U_A^* = 0$)

Fig. 5 に片側のみ (B 領域のみ) 通気したときに見られた粒子群のフローパタンの概念図を示した。図にはそれぞれ U_A^* の異なる三つの場合を示したが、いずれも B 領域で粒子は上昇し、A 領域では下降する循環流が見られた。そして U_A^* が小さいときは A 領域の下部に粒子の停滞部が生じた (U_B^* が 4.0~5.0 の範囲で消失した)。また Fig. 5(c) のように U_B^* が 5 程度に大きくなると通気していない A 領域底部からも気泡の発生するのが見られた。

Table. 3 の粒子下降速度に着目して、片側通気の際の下降速度と、次項で述べる“一般的不均一流”すなわち $U_A^* \neq U_B^* > 0$ の場合のそれとを全空塔速度 U^* が等しい条件の下で比較すると、前者の方が後者より小さく、さらに混合所要時間も前者の方が大きいことから、片側通気は一般的不均一流よりも粒子混合性能は劣るといえる。

(ii) 一般的不均一流 ($U_A^* \neq U_B^* > 0$)

Fig. 6~Fig. 9 に一般的不均一流でみられたフローパタンの概念図を示した。すなわち Fig. 6, 7, 8, …の順に U_A^* が大きく、さらに (a), (b), ……の順に U_B^*/U_A^* が大きい。

Fig. 6(a), (b), および (c) はそれぞれ $U_A^* = 1.0$ の場合であるがこのように通気速度が小さいと A 領域下部の

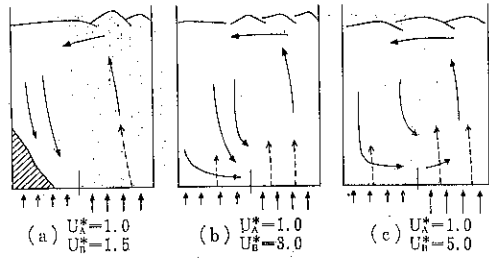


Fig. 6 Un-homogeneous fluidization

比較的狭い部分に片側通気の場合と同様な粒子停滞部が見られた (Fig. 6(a))。著者の別の観察結果⁹⁾によると、流動層内の粒子がその位置を移動させるに必要な流速は $U^* > 1.2 \sim 1.5$ であるから、たとえ、A, B 両領域とも通気していても低速領域の一部に停滞域が生ずることはあり得る。また Fig. 6 (b) および (c) の如く、通気量が比較的多いときは層全体に亘り循環流が起り、また低流速領域にも気泡が発生し、この領域の下部で停滞しがちな粒子を循環流の中へ巻き込んでいるのが見られた。

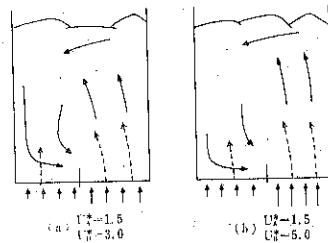


Fig. 7 Un-homogeneous fluidization

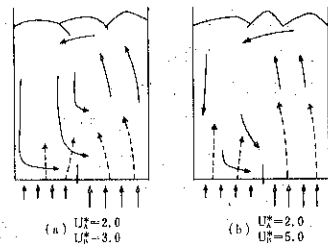


Fig. 8 Un-homogeneous fluidization

また、Fig. 7 および Fig. 8 にそれぞれ $U_A^* = 1.5$ および $U_A^* = 2.0$ での状況を示した。これらを Fig. 6 と比較すると空気吹き込み速度の増大とともに A, B 両領域間の循環流は益々激しくなり粒子ならびに気泡の上昇経路も低流速のときのように必ずしも真直ぐ上方に向わず、さらに A, B 両領域間の空気流速の差により層内に渦の発生が見られた。すなわち渦は粒子群の上昇流と下

降流の境界付近のB領域側に発生し、層頂まで消滅することなく移動した。このような渦は、本実験では $U^* > 5.0$ において観察された。

このように不均一流では層全体に亘る循環流のほかに局所的な渦ならびに気泡の総合効果として粒子の混合がおこなわれていると見なしてよいであろう。

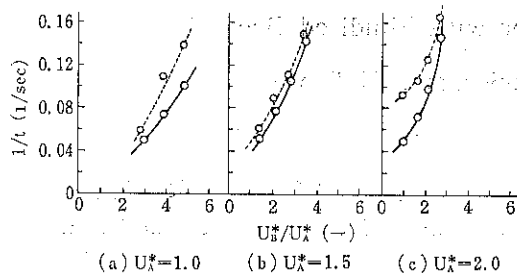


Fig. 9 Relation between U_B^*/U_A^* and $1/t$

3. 2 空気流速および流速比の影響

Fig. 9 は Table. 3 に示した混合時間 (sec) の逆数を A, B 両領域の空気流速比 U_B^*/U_A^* に対して点描した結果である。そして (a), (b) および (c) の順に U_A^* が大きい。

これらの図を比較すると、いずれの流速においても横縞の消失速度は縦縞の消失速度よりも短いといえる。すなわち流動層の、主として上下方向の粒子混合速度は水平方向のそれとほぼ同じであるかあるいは大きかった。また実験範囲内では流速比 U_B^*/U_A^* の増大によって粒子の混合は縦および横方向共に促進されるといえる。しかし、Fig. 9 に直接点描することは出来ないが、Table. 3 の片側通気であられた混合時間の逆数を Fig. 9 の値と仮りに比較すると、片側通気の値の方が他の場合より小さくなるから当然、流速比には最適値が存在すると思われる。

以上の結果は、すべて 8% フィルムの画面の追跡という半定性的処理によるものであるから Table. 3 および Fig. 9 の数値は相対的比較ならびに粒子群の全体的挙動を知るための目安を与えるものである。

4. 結 論

8% 映画撮影により、均一流動層と不均一流動層の粒子群の挙動を把握することができた。その結果、不均一流動層の方が均一流動層より明らかに粒子混合性能が良好であることが確認された。そしてその原因として、循環流のほかに渦および気泡の効果が大きいと推定できた。

しかし、不均一流動層でも片側通気流動層の混合性能は極めて低いといえる。

記 号

U^* : U/U_{mf} , U : $U_A + U_B$, U_A : A 領域 (低速領域) の空気見掛け線速度, U_B : B 領域 (高速領域) の空気見掛け線速度, U_{mf} : 供試試料の最低流動化速度, U_B^*/U_A^* : 無次元化した流速比, t : 混合時間 (sec., Table. 3 参照)。

引 用 文 献

- 1) H. Klein: Zement-Kalk-Gips, **15**, 399 (1962).
- 2) 安藤公二ら: 室蘭工大研究報告 (理工編), **6**, 203 (1968).
- 3) 安藤公二, 岳上広光: 粉体工学研究会誌, **8**, 19 (1971).
- 4) M. Leva: Paper Congr. European Fed. Chem. Engrs. 3rd. London, B30-B37 (1962).
- 5) P. N. Rowe, A. W. Nienow and A. J. Agbim; Trans. Instn. Chem. Engrs. **50**, 310 (1972).
- 6) 佐納, 猪爪, 樋口: 化学工学協会第 5 回秋季大会講演要旨集 p. 65 (1971).



流動層組み込み風力分級機の研究

—ミクロンセパレータN型の特性—

The study of Air Classifier with Fluidized Bed

—Characteristics of Micron-Separator N Type—

中川 文雄* 島谷 敏久* 鈴木 昭明*

Fumio Nakagawa, Toshihisa Shimatani, Teruaki Suzuki

1. 緒 論

性能の良い風力分級機を設計する上で常に考慮に入れておかねばならぬ必須条件として Treasure¹⁾ は4つの条件**を挙げているが、実際の分級機においては設計どおりの力が粉体粒子個々に作用する場合は非常に少ない。特に気末混合比の大きな条件の下における分級では、粒子個々に十分に計算された力が作用しにくく、付着または凝集による、見掛上大きな粒子としての挙動を示したり、粒子同志の干渉の影響を受けたりして、分級ゾーンで十分な分級作用が受けられなく、結果として分級効率が低下する。そこで、既存の風力分級機は分級作用を受けるチャンスを増すことによって分級効率を向上せしめるような構造上の工夫を講じている。その代表的な例に空気による風篩作用を利用して繰返し分級ゾーンへ送り込む構造がある。しかし、風篩機構により多少の

差はあるが、降下する粉末の量および風篩場所によりその効果が異なり、効率の良い分離が行われない。気末混合比が大のとき特にその傾向が顕著である。

気末混合比の高い、高含塵濃度の雰囲気下における分級で、分級性能を上げる一つの方法として、流動層による分離が分級に利用できないか？という観点からいくつかの基礎研究²⁾を行い、遠心力利用風力分級機の一構成要素としてうまく用いれば非常に大きな効果が期待できることがわかった。そこで、遠心力利用風力分級機の一つであるミクロンセパレータに流動層を組み込み、流動

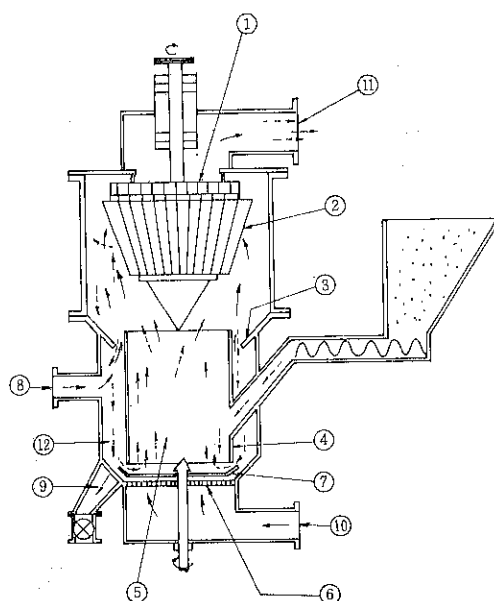


Fig. 1 Experimental Apparatus (Micron Separator N Type)

* 細川粉体工学研究所 (〒573 枚方市招提田通1-9)

** 脚註1) TEL 0720-57-3721.

- 1) 各粒子に作用する明確な力が存在しなくてはならない。
- 2) 分離されるべき粒子全部が入り込み、分離が起る明確な分離帯がなければならぬ。
- 3) 相互干渉が起らないように、また計算された力だけが作用するように、粒子は分級帯に一樣にかつ個々に送り込まれねばならない。
- 4) 一旦分級が起ったならば、以後の操作を妨げないために、また再混合を避けるため、その粉体をできるだけすみやかに作用の場から除去しなければならない。

層によるメリットと遠心力利用風力分級機のメリットとをうまく調和した構造のミクロンセパレータN型を開発した。本実験機における分級特性実験について報告し、併せてその結果について考察してみる。

2. ミクロンセパレータN型の構造と分級機構

Fig. 1に、実験に用いた流動層組み込みミクロンセパレータN型実験機の構造および機内の固気流れを模式的に示した。図中において、点線は粒子の流れを示し、実線は気流の流れを示している。スクリーフィーダで内筒④の内側、流動床部⑤に送り込まれた分級原料は通気板⑥面上に落下する。通気板面上では1次空気による流動化上昇流が平均して噴出しており、また回転攪拌羽根⑦によって攪拌される(1分間に数十回転程度)ため粉体粒子は全面に亘って比較的均一に分散され、上昇気流ののって分級ゾーンであるロータ①の羽根面近傍に達する。ロータ羽根面に達した粒子に、ロータの回転によって誘引された旋回気流による遠心力と、ロータの外から内側へ向かう内向流れによる流体の抗力とが作用し、それらの力のバランスにより分級される。分級作用を受け、気流と共にロータ羽根内に入った微粉は微粉排出口⑩を通り、図示していない空気分離機(バグフィルターやサイクロン等の集塵機)で空気と分離され、捕集される。一方、ロータ羽根面で外周部にふり飛ばされた粗粒は、機胴壁に沿って降下し、中子③と内筒④との環状空間で風篩作用(2次空気の上昇流れによる)を受けた後、粗粉貯溜部⑬に沈降する。粗粉貯溜部に堆積した粗粉は回転攪拌羽根⑦の外端によりその底部より順次かき上げられて通気板面上に循環し、再び流動化上昇流により分散作用をうけて浮上し、分級ゾーンへ再び送られる。また、粗粉貯溜部に堆積した一部は粗粉排出口⑨から回転排出弁を通して粗粉として機外に排出される。従って、粉体粒子が分級ゾーンへ繰返し幾度も送り込まれるような構造を有しているため、分級のチャンスが従来の分級機よりもはるかに多くなっている。なお、内筒と通気板との間隙および粗粉排出量のコントロールにより粗粉貯溜部からの循環量のコントロールが可能である。

3. ミクロンセパレータN型の分級特性

3.1 気末混合比と分級効率

3.1-1 実験条件

○実験に用いた試料：石灰石を衝撃式粉砕機で粉碎した微粉で、その粒度分布を Fig. 2 に示した。真密度 $\rho_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$

○実験機種：ミクロンセパレータMS-4N

○ロータ流入総風量：110 m^3/min

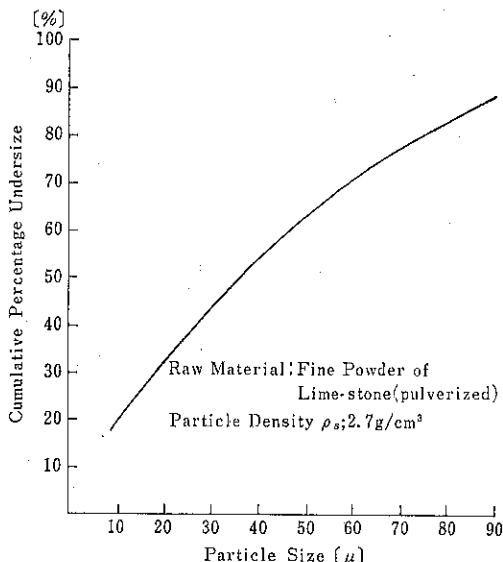


Fig. 2 Size Distribution of Powder Used

○Cut Point : 44 μ (325 MESH)

○ロータ回転数 : 185 R/M

○通気板と内筒との間隙 d : 25 mm

○気末混合比の実験範囲

0.5 ~ 2.6 kg/m^3 (Total Air)

ただし、気末混合比は次のように定義されるものとする。

$$\text{気末混合比} = \frac{\text{単位時間に供給される原料粉体重量} [\text{kg/min}]}{\text{単位時間に供給される1次および2次空気量} [\text{m}^3/\text{min}]}$$

3.1-2 実験結果および結果の検討

実験で得られた分級粉を沈降式の粒度測定および湿式篩で粒度測定を行い、Cut Point における微粉回収率 η_p およびニュートン分級効率 η_N を算出した。ただし、 η_p および η_N は次式で定義される。

$$\eta_p = \frac{\text{微粉中の分級径以下の細粒量}}{\text{原料中の分級径以下の細粒量}} \quad (1)$$

$$\eta_N = \text{微粉回収率 } \eta_p + \text{粗粒回収率 } \eta_c - 1 \quad (2)$$

ここに

$$\eta_c = \frac{\text{粗粉中の分級径以上の粗粒量}}{\text{原料中の分級径以上の粗粒量}} \quad (3)$$

Fig. 3に、気末混合比と分級効率との関係を η_p および η_N で示した。

同図より次のような特性が認められる。

(1) 従来のミクロンセパレータでは分級不可能といわれていた気末混合比の範囲で、非常に良好な分級成果が得られた。たとえば、2.6 kg/m^3 という高い気末混合比の雰囲気下でも $\eta_N = 56\%$ というかなり良好な効率が得られた。

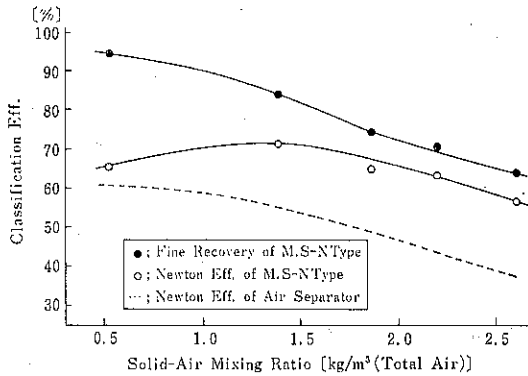


Fig. 3 Relation between Solid-Air Mixing Ratio and Classification Eff.

(2) どんな分級機でも気末混合比が増加するに従って分級効率は低下し、或る点で急激に変化する傾向があるが、本実験における実験範囲内では分級効率の急激な低下は見られない。

(3) 気末混合比の比較的小さい範囲 (1.5 kg/m^3 以下) における η_N はあまり気末混合比に関係なしに約70%前後をキープしている。 η_p が気末混合比の増加と共に減少していることを考慮すると、気末混合比の小なる範囲では微粉中への粗粒の混入が割合として多くなることを示している。その理由として次のようなことが推定される。気末混合比の小なる場合、分級ゾーンであるロータ近傍の含塵濃度が低いため、流動層部で上下方向に加速された粗粒子は慣性により粒子に充分に遠心力が付与されない内にそのままロータ羽根内に飛び込む確率が高い。一方、ロータ近傍の含塵濃度が高い場合は粒子同志の衝突等でかえって羽根内の飛び込みが減少する。従って、気末混合比の小なる範囲では、ロータ羽根数を増す等の手段を講じてやれば微粉中の粗粒の混入は或る程度改善されるものと考えられる。

(4) 本実験の実験範囲 (気末混合比の点で) での分級が可能とされている現存の分級機として、エア・セパレータがある。参考のためミクロンセパレータN型との性能を比較するため、エア・セパレータの性能 (いくつかの文献^{8), 4)} を参考にした推定値) を点線で同図中に示した。ミクロンセパレータN型の性能と比較すると、 η_N で約10~20%の差があり、ミクロンセパレータN型の性能が大巾に良いことがわかる。

3. 2 Cut Point と分級効率

3.2-1 実験条件および結果

実験機種、実験試料およびロータ流入風量等の運転多件は前述の実験 (気末混合比の影響のテスト) と同条件に設定し、Cut Point を変えるためロータの回転数を

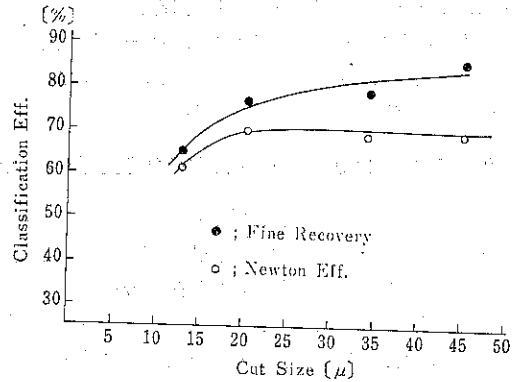


Fig. 4 Relation between Cut Size and Classification Eff.

変えた。実験結果を Fig. 4 に示した。ただし、気末混合比は約 1.4 kg/m^3 、Cut Point の実験範囲は12~44 μ の4水準である。また、Cut Point は次式で表わされる理論分級径 d_{th} である。

$$d_{th} = \frac{1}{u_g} \left(\frac{18 \mu r u_r}{\rho_s - \rho} \right)^{1/2} \quad (4)$$

ここで、 u_g ; ロータ羽根部周速

ρ_s, ρ ; 粉体粒子および気流の真密度

μ ; 気流の粘性係数

r ; ロータ半径 (代表半径)

u_r ; 気流の半径方向流入速度

Fig. 4 に示した Cut Point と効率との関係は同一試料における実験結果であるが、試料の粒度分布を変えた場合の分級結果 (Cut Point 88 μ) の1例を Fig. 5 に示す。これらの結果より次のような特徴が認められる。

(1) Cut Point 20 μ 以上の範囲では Cut Point に関係なく分級効率はほぼ一定で、 η_N で約70%という高い

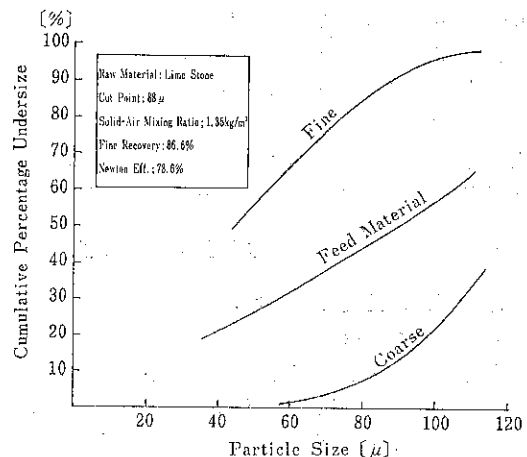


Fig. 5 The Size Distribution of Powder Classified

効率を示す（同一試料における場合）。Fig. 5に示したように、比較的粗い原料を用いて分級径の大なる Cut Point で分級した場合 $\eta_N=78.5\%$ という高い分級効率も得られている。

(2) Cut Point 20μ 以下の範囲では、分級効率は分級径が小さくなるに従って減少する。従って、分級効率を高く保持するためには気末混合比を下げる等の条件変更が必要となる。

(3) 重質炭酸カルシウムを試料とした場合、分級可能範囲についてみると、実験結果および条件等を勘案して、次の範囲と考えられる。

分級可能範囲：15～200 μ

しかし、分散性の良好な粉体の場合は他にも行った実験結果から推定して8 μ 程度までも効率のよい分級が可能であると予想される。

3.3 その他の操作条件の影響

3.3-1 通気板と内筒との間隙 d

通気板と内筒との間隙 d と効率との関係を Fig. 6 に示した、実験結果より、

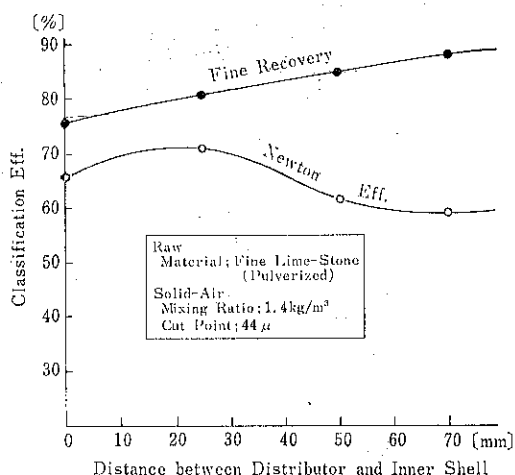


Fig. 6 Influence of Distance between Distributor and inner Shell

(1) $d=25\text{mm}$ のとき η_N は最大となる。すなわち、本実験機における d の最適寸法が 25mm と考えられる。一方、微粉回収率 η_p は d の増大、すなわち循環量の増加に従って大となっている。このことは、循環量が増すことにより分級のチャンスが増す反面微粉中に粗粒が混入するチャンスも増すこととなり、結果的には総合効率である η_N は或る最適寸法で最大値をとることを意味している。

(2) d と循環量との間には相関関係が成立すると考えら

れるので、 d の最適寸法における循環量が最適循環量と考えられる。スケールアップする場合、この最適循環量を考慮に入れる必要がある。スケールアップの考え方としては、通気板と内筒との空間（軸方向の円筒空間）の単位面積を通過する単位時間当りの粉体量（循環量）を一定にする考え方が妥当と考えられる。すなわち、モデルにおける通気板と内筒との空間 $S_0 (= \pi D_0 d_0)$ を単位時間内に M_0 の粉体量が通過すると考え、スケールアップ後の空間 $S_0 (= \pi D d)$ と循環粉体量 M との間には次の関係が成立する。

$$M_0/S_0 = M/S \quad (5)$$

$M/M_0 = f$ (スケール比) を代入して整理すると、

$$d = f (D_0/D) d_0 \quad (6)$$

D_0 および D ; モデルおよびスケールアップ後の内筒径

d_0 および d ; モデルおよびスケールアップ後の通気板と円筒との間隙

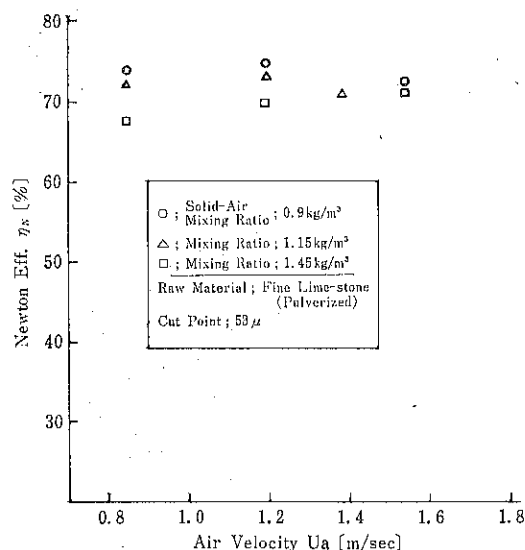


Fig. 7 Influence of Air Velocity u_a

3.3-2 内筒部空塔風速 u_a

Fig. 7に、気末混合比をパラメータにして、内筒部空塔風速 u_a と効率（ニュートン分級効率 η_N ）との関係を示した。空塔風速 u_a の実験範囲は、

$$\text{約 } 0.8\text{m/sec} < u_a < 1.6\text{m/sec}$$

(1) 本実験の範囲内では、空塔風速の影響はあまり認められなく、 u_a の大小に関係なく高い効率を示すが、強いて言及するならば気末混合比の大なる場合、幾分その影響が認められる。すなわち、気末混合比の大なる場合 □印で示している u_a が大になるに従って η_N も幾分

増大する。このことは u_a が大になると、通気板部での空気の吹き出し勢力が強くなり分散効果が大きくなることおよび1次空気量が増すことによって流動層部（内筒部）の気末混合比が小となること等により効率が增大するものと考えられる。

(2) 流動層部の圧損は動力の面から小さい程良いが、 u_a の増大と共に大きく増加する。従って、 u_a 、圧損、および効率等を勘案すると u_a の下限は、本実験の場合約 $u_a > 90 \text{ cm/sec}$ と考えられる。

4. 分級機内の固気流れと分級特性との関連

遠心力利用風力分級機の方級効率を左右する因子として、分級ゾーンの合理的構造と分級ゾーンにおける気粒の合理的流れがあげられることは言うまでもないが、粉体粒子の方級ゾーンに導かれる前および分級後の粒子流れも重要な因子と考えられる。特に気末混合比の大なる場合、分級効率を悪化させる大きな要因は全く分級作用を受けずにショートパスし、粗粉成分としてそのまま捕集される分割の存在である。セメント分級等の大処理分級で通常用いられているエア・セパレータ (Fig. 8 参照) では30~50%以上の分割があるといわれている。

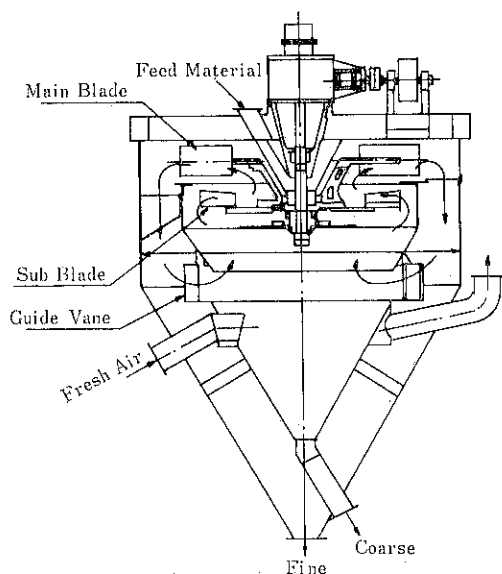


Fig. 8 Air Separator (Sturtevant Type)

本研究において新しく開発したミクロンセパレータN型は Fig. 1 に示したように粉体粒子の方級ゾーンに達するまでの流れおよび分級作用を受けた後の流れに特に工夫をしている。すなわち、次のような特徴を有している。

(1) 新しくフィードされた分級原料は流動層部で吹き上げられ、分級ゾーンであるロータ部まで輸送され、そこで分級作用を受ける。粗粉成分は機胴壁面を降下し、2次空気による風篩作用を受けた後一部は粗粉として捕集され、他は流動層部へ循環する。従って、新しくフィードされた原料がそのままショートパスし、粗粉として捕集されるような現象は見られない。

(2) 分級済粗粉成分降下通路と分級ゾーンに向かう粒子群の通路とを区別しているため、降下する粒子と上昇する粒子との相互干渉がない。

(3) 粗粉成分の一部が抜き出されて粗粉として捕集され、他は流動層部へ再び循環する機構となっているため、分級のチャンスが大巾に増加する。なお、この循環量のコントロールは内筒と通気板との間隙 d および粗粉の排出速度によって行う。

以上のような特徴と、シャープな分級が得られることでよく知られるミクロンセパレータ (Fig. 9) のロータ部の特徴とが相まって、結果として非常に良好な分級性能が得られた。Fig. 10 に、その分級性能の1例を部分分級効率 $\Delta\eta$ で示した。ただし、同図における部分分級効率 $\Delta\eta$ は次式で定義される。

$$\Delta\eta = \frac{\text{単位時間に回収される粗粉中の粒径 } d_p \text{ の粒子の重量}}{\text{単位時間に供給される原料中の粒径 } d_p \text{ の粒子の重量}} \times 100 [\%] \quad (7)$$

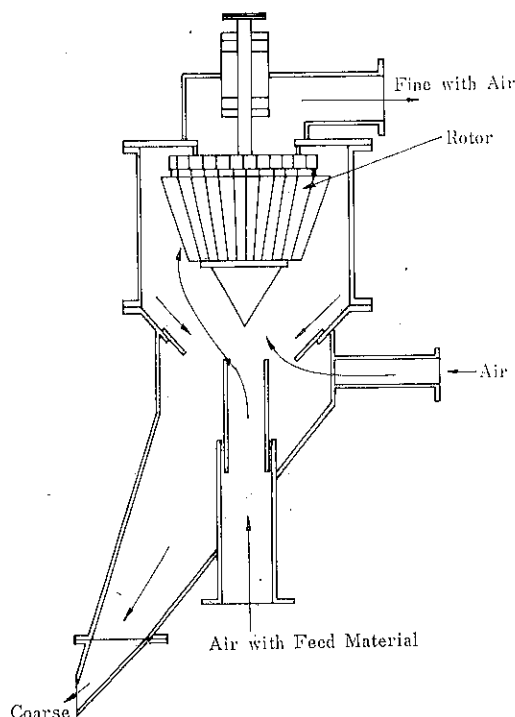


Fig. 9 Hosokawa Micron Separator

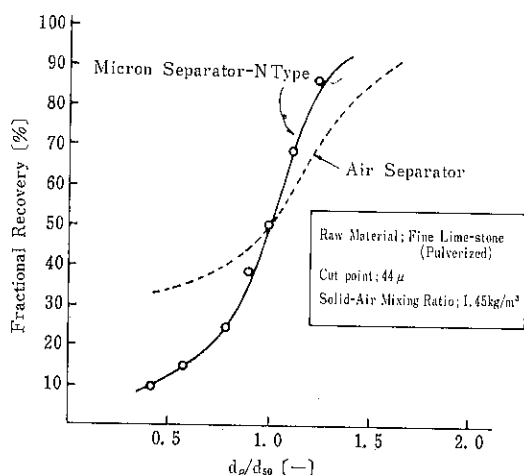


Fig. 10 One Example of the Classification Performances expressed Fractional Recovery Curve

図中、 d_{50} は $\Delta\eta=50\%$ となる粒子径で、Cut Point の代表径に用いることが多い。

また、同図において通常のエア・セパレータと比較するため、同程度の分級条件における分級性能（推定値）をも併せて示した。図より、

- (1) 気末混合比が高いにもかかわらずシャープな分級が行われている。
- (2) 分割の割合についてミクロンセパレータN型と通常のエア・セパレータとを比較してみると、前者がわずかに数パーセント程度であるのに対し、後者は30%以上（推定値）にも達している。この両者の分割の差は前述のような構造上および分級機構上の差に起因するものと考えられ、分割の割合の大小が直接分級性能の良悪に関係していることがよくわかる。従って、特に気末混合比の大なる場合分割をできるだけ少なくすることがとりもなおさず分級性能を向上させるポイントとなってくることがわかる。

5. 結 言

流動層を組み込んだ遠心力利用風力分級機の一つとして新しく開発したミクロンセパレータN型の分級特性およびその分級機構との関連等について検討してきたが、結論としてまとめてみると次のようになる。

- (1) ミクロンセパレータN型は気末混合比の高い範囲で非常に良好な分級成果が得られ、従来の大処理向分級機の性能と比較すると、ニュートン分級効率 η_N で約20%程度の向上が認められる。
- (2) ミクロンセパレータN型は、分級前および分級後の粒子の流れを特に考慮した構造上および分級機構上の特

徴を有しているため、既存の大処理分級機のウィークポイントである分割を大巾に減少させ、しかもミクロンセパレータの特徴であるシャープな分級も得られた。

(3) 粗粉成分の循環量と密接な関係がある内筒と通気板との間隙 d には、最適寸法（実験的に認められる）があり、そのスケールアップについて検討した。

(4) Cut Point と効率 η_N との関係についてみると、本実験の範囲内では Cut Point が変わっても η_N はあまり変化しないで高い効率をキープしている。

分級可能範囲は推定 15~200 μ （重質炭酸カルシウム基準）と考えられる。

〔付記〕

本研究の遂行に当っては株式会社細川鉄工所粉体機器事業本部田中昭夫部長の助言と協力を得た。

尚、このミクロンセパレータN型は同事業本部で商品化が進められ、すでに数機の受託を受けている。参考のため、各型式の仕様を Table. 1 に示す。

Type	Size (Casing Diam) m/m	Operative Air flow [m ³ /min] m ³ /min	Operative Capacity (CaCO ₃ Standard) Ton/Hr
MS-1N	350	10~15	0.9~1.35
MS-2N	510	25~35	2.3~3.2
MS-3N	770	45~65	4.1~5.9
MS-4N	1,100	90~130	8.1~11.7
MS-5N	1,680	175~260	16.0~23.5
MS-6N	2,400	330~500	30.0~45.0
MS-7N	3,000	550~800	50.0~72.0

Table. 1 Types of Hosokawa Micron-Separator N Type

参 考 文 献

- 1) Treasure, C.R.G., Trans. Instn. Chem. Engrs. (London) 43 T199 (1965)
- 2) 鈴木, 中川, 島谷; 粉体工学研究会誌 8, [6] 408 (1971)
- 3) 田中, 桑野, 川合; 化学工学 21 [12] 798 (1957)
- 4) 臼井; 粉体と工業 5 [3] 60 (1973)

(株)細川鉄工所 枚方建設計画完工 記念アルバム



国道1号線枚方バイパスに沿って大阪府がモデル工業団地として造成した中小企業団地（総面積86万 m^2 ）への進出計画が昭和38年この地の分譲を申し込んで以来、全三期に亘る長期建設計画にのっとり、足かけ10年の歳月を要して本年3月完了した。

昭和40年工場用地17,283 m^2 、仮宅用地4,724 m^2 の取得契約以後の建設の足どりを簡単に追ってみる。

第1期計画

- ・細川粉体工学研究所の建設（S.42.8.22～43.3.20）
建築面積 610 m^2 、延床面積1,520 m^2

第2期計画

- ・枚方工場（S.44.1.10～44.5.17）
建築面積 約3,600 m^2 、延床面積約4,340 m^2
- ・独身寮（S.44.1.10～44.5.30）

地上4階地下1階建鉄筋コンクリート造り
建築面積 240 m^2 、延床面積1040 m^2

- ・永宝社（守護神）（S.44.4.1～44.5.17）
第3期計画

・枚方事務所（S.47.4.16～47.12.13）
地上5階塔屋2階、鉄骨コンクリート造り
建築面積 680 m^2 、延床面積3,440 m^2

- ・枚方工場（増築）（S.47.4.16～S.48.2.26）
建築面積 3,810 m^2 、延床面積5,090 m^2

以上総建築面積9,335 m^2 、延床面積15,100 m^2 に及ぶ枚方建設工事がここに終了した。

ホソカワの発展の1ページを飾るこの完工を祝して、いくつかの記念行事が行われ、ここに話上再録してみる。

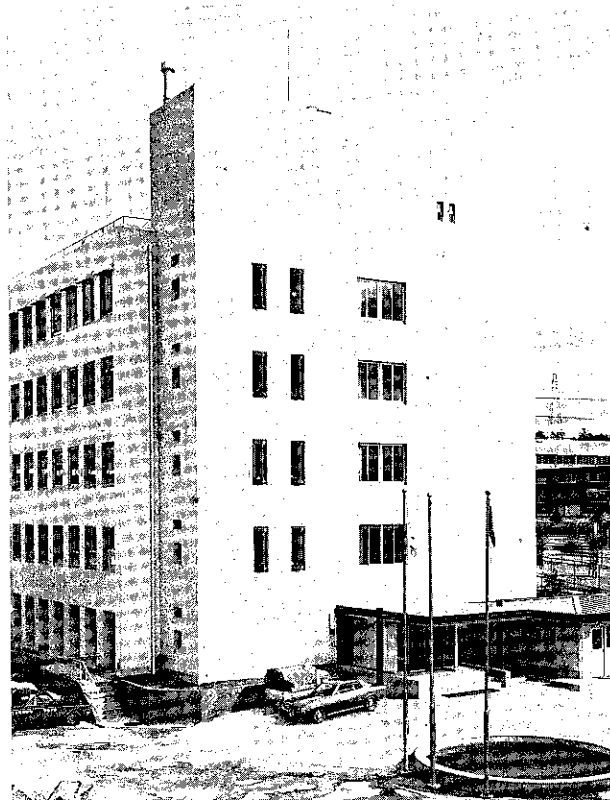
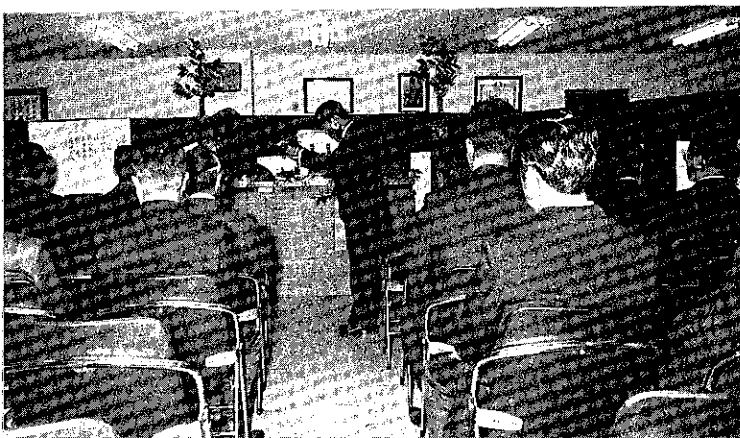
枚方事務所

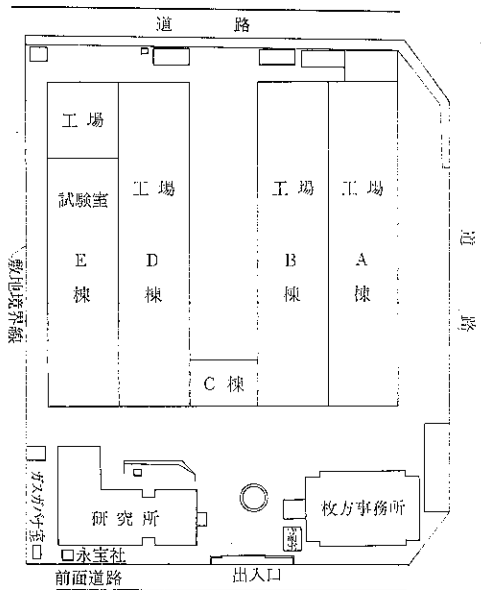
冷暖房、エレベータ、エアーシュータ、コンピュータ、内線電話200本、放送設備等を有し、100人収容の大会議室を有している。

- 1階：総務部および関ホソカワ・トリット社
- 2階：化学機器事業本部 粉体機器事業本部
- 3階：集塵機事業本部
- 4階：役員室および企画部、経理部
- 5階：海外事業本部、コンピューター室、大会議室

枚方事務所および枚方工場竣工式

新しく完成した枚方事務所において竣工式がおこなわれた（4月16日）。柳を献納する細川社長





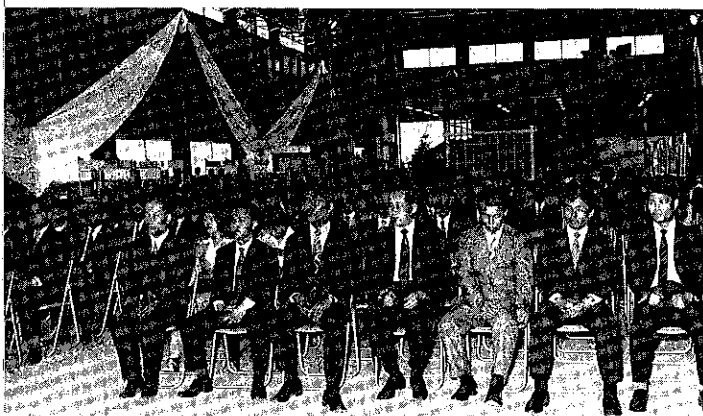
校方建設完成後の全体の建物の配置図

敷地面積 17,283m² (約5,200坪)

総建築面積 9,335m² (約2,800坪)

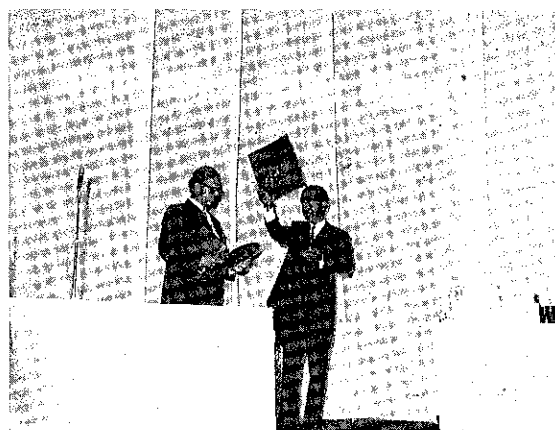
創立58周年記念式典 (4月15日)

従業員および海外より代理店、提携先等の来賓多数を加えて、式典が行われた。それに続いて社員表彰が行われた。



式典に出席された来賓

海外より9ヶ国約20名が招待された。



創立58周年を記念 MicroPul G.m.b.H の Van Allen 氏より記念品が送られた

従業員家族会 (4月15日)

細川厚生会が主体となり、とど自慢、各種舞台、金魚すくい、ゲーム、抽選等盛沢山に企画され、招待された従業員家族は楽しい一日をすごした。



従業員家族会スナップ



記念披露パーティー（4月16日）

新装なった工場内（D棟）に仮設された会場にて記念パーティーがはなやかに催され、千数百名の招待客の歓談に花がさいた。

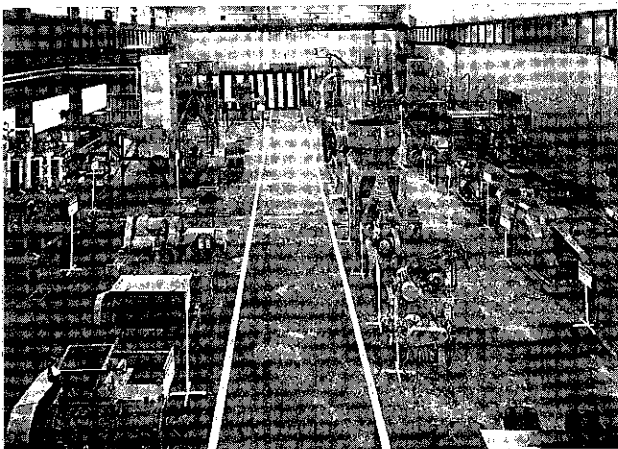


記念披露パーティスナップ

左からホソカワヨーロッパL.T.D King 氏、ナウタ社長と夫人

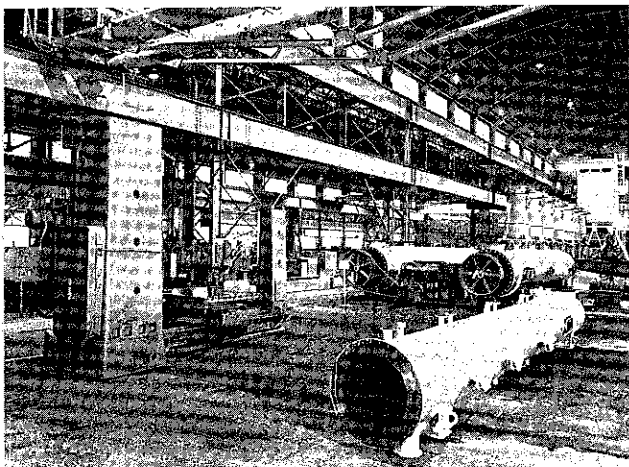


↓ 展示スナップ（E棟会場）



展示会場スナップ（A棟会場）

乾燥機ホソカワ/ストロング ソリッドエアー



展 示 会

展示会場として、E棟、A棟および研究所の3ヶ所に分けて、ホソカワ製品の標準機および新製品を展示した。E棟会場では、主なるホソカワ製品のテスト試験機を展示し、A棟会場では実際スケールでの製品（すべて納入先決定済）および工作機械を展示し、研究所会場では新製品の紹介を行った。

混合機 ナウタミキサー、集塵機 パルスエアークレクター



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)

Experimental Investigation on the Centrifugal Discharge-type Bucket Elevator

上滝 具貞*	早野 延男**
Tomosada Jōtaki,	Nobuo Hayano,
山中 久人**	藤木 俊介**
Hisato Yamanaka,	Shunsuke Fujiki,
藤井 康博**	
Yasuhiro Fujii	

Some dynamic characteristics of a bucket elevator have been studied in this paper.

1) Stationary and non-stationary states of the system (the bucket elevator) are classified as a function of the transporting speed (the running speed of the belt).

2) We find the facts that some portions of granules are always circulating in bucket elevator and they have no contributions to the discharging (flow-out) quantity.

3) From the detailed examination of this circulating granules we could draw out the following conditions quite naturally; a) the critical speed of operation, b) the optimal operating speed and c) the most efficient throat (out-let) clearance.

4) Several formulae for material balances (including flowing-in, flowing-out, circulating and the stored granules in the bottom of the elevator) are shown in stationary and non-stationary states.

5) As the more straightforward approach we measured the filling up quantity of granules in one bucket at each operation speed and also in this experiments the above optimal conditions for operation are improved consistently.

1. はしがき

粉粒体の連続垂直輸送に用いられるバケット・エレベーターは、塊状のものから粉状のものまで輸送材料の適用範囲が広く、粉粒体輸送プロセスの一環として使用さ

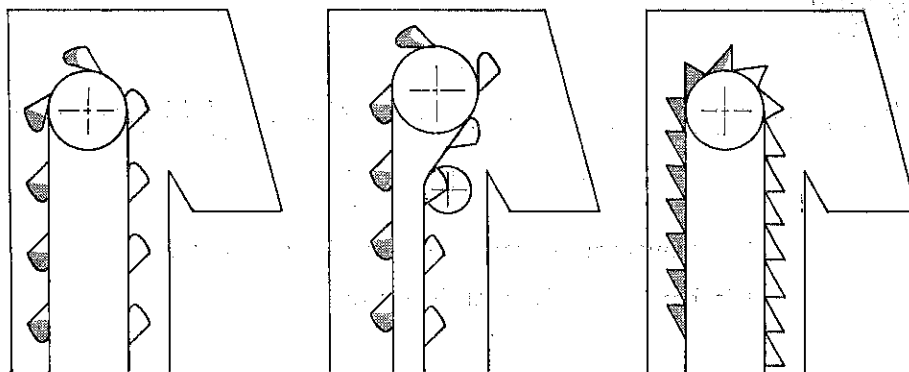
れているようである。しかし、その設計および使用条件に関しては、これまで基礎的な資料等^{1), 2), 3), 4)}が少なく、経験による部分が多いように思われる。

バケット・エレベーターは構造上の差異によって、つぎの三つの型式に分類されているようである。Fig. 1(a)の遠心排出型は粘着性が少なく、こわれにくい粉粒体の輸送に適しており、(b)の完全排出型は吸湿性の輸送材料に用いられ、(c)の誘導排出型は輸送量が大きく、こわれ易い粉粒体に適する型式と言われている。今回は、これ

* 九州工業大学

** 山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台2557)

TEL 0836-31-5100



(a) 遠心排出型

(b) 完全排出型

(c) 誘導排出型

Fig. 1 パケット・エレベーターの三つの排出型

らのうち構造が簡単で広く用いられている「遠心排出型」のパケット・エレベーターを使用し (Fig. 9), 二, 三のパラメーターを変化させて実験を行い, 種々の角度からこの装置の最適な輸送条件について検討を行った。

i) 限界輸送速度の存在 パケット・エレベーターに粉粒体を定量で供給する際, 供給量に比し輸送速度 (ベルトの周速) が小さ過ぎるときには, 供給量が輸送量を上回り, このため材料が供給口 (負荷箱) にたまり (この状態ではパケット・エレベーターは一種の積分素子としての機能を持っている), エレベーターは過負荷のため停止することになる。速度が増加するにつれて輸送量も増加するので, 供給口付近に堆積する量は減少して行き, 堆積量は一定となり, 供給量 Q_i は排出量 Q_o と等しくなる所が存在するので, この状態に到達したときの速度を「限界輸送速度」, U_{cr} と呼ぶことにする。すなわち, 限界輸送速度を境として, 周速度がそれより大きければ, パケット・エレベーターは排出量から見て定常的な運転状態となっている。したがって, この装置は少なくともこの限界速度以上で使用することが望ましいと考えられる。

ii) 最適輸送速度の存在 定常運転状態においてもパケットによってすくわれた輸送材料は必ずしも全部排出されないで, 再び供給口にもどる量 δQ が存在することはこれまでも指摘されていた²⁾ようであるが, 今回の実験では輸送速度をほとんど零の状態から, 相当の高速 (170m/min) まで広範囲に変化させることによって, もどり量 δQ の変化の状態を観察し, δQ は輸送速度が大き過ぎても小さ過ぎても増大し, δQ が最小となる速度範囲の存在が確かめられた。さらに, この「もどり量」 (洩れ量, 循環量または無効排出量とも呼ばれているが, 以後は現象を説明する立場から適宜使い分けて

使用する) δQ の発生メカニズムについて詳細に検討し, その結果, δQ には主として低速運転状態での「もどり量」 (低速洩れと略称) と高速運転状態で現われる「もどり量」 (高速洩れ) の二種類の形式の存在を写真の記録などにより確認することができた。最適な輸送状態であるためには「もどり量 δQ_o 」が最小となる速度で運転するのが望ましいので, この速度を「最適輸送速度」, U_{opt} と呼ぶことにする。パケット・エレベーターを粉粒体輸送システムの一要素と考えた場合, 定常状態が保持されていることが望ましいのは当然なので, ここで用いている最適という表現は, いわゆる定常状態 (平衡状態) での最適化条件 (optimizing condition) を意味している。

iii) 最適な「もどり部間隙」の存在 つぎに, パケットが上昇して内部の粉粒体が放出時の初速方向と重力との合力の方向に投げ出される状態を考えてみると, 粒子群の接線速度は一樣とならずこのため小さい接線速度で放出された粒子群は「もどり部」の仕切板に衝突して有効排出量に寄与できないことになる。また, 放出の際の粒子群の速度分布はベルトの線速度によっても変化するので, この「もどり部間隙」, h_T についても最適な寸法が存在するものと考えられる。以上より,

1) ベルトの周速度 (u : 輸送速度) と有効排出量 Q_o 。

2) $\frac{\delta Q_o}{Q_i} = \frac{\delta Q}{Q_i}$ と輸送速度 u

3) $\frac{\delta Q_o}{Q_i}$ と「もどり部間隙」, h_T

について考察を行い, これから最適な輸送条件を見出す方向で検討を行なうことにする。今回は, 性質において極めて対象的な二種類の材料 (砂, ナイロンチップ) を使用し, パケットのピッチ P , 形状などは一定として実

験を行なったが、開回路系としての立場からはバケットのピッチ、形状などの影響についても、今後検討を要する問題と考えられる。

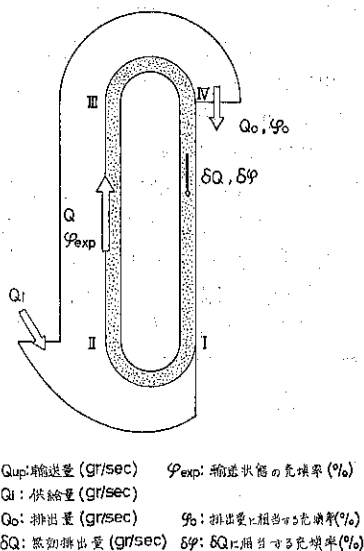


Fig. 2 バケット・エレベーターにおける輸送状態

2. 輸送状態の詳細

2.1 バケット・エレベーター内の輸送状態と排出状態

バケット・エレベーターにおける粉粒体の輸送状態をモデル的に表わせば、Fig. 2のようになる。図の区間Ⅰ—Ⅱで粉粒体はバケットによってすくい上げられ、Ⅱ—Ⅲの間を垂直に運ばれる。(上昇過程: Up-ward-stroke) 区間Ⅲ—Ⅳでバケット内の粉粒体は放出され、その一部は(十分に加速されていない場合には)仕切板によって妨げられて排出されず、Ⅳ—Ⅰのバケット下降側に落下し(下降過程: Down-ward-stroke)、負荷箱の所に堆積して再びⅠ—Ⅱの間でバケットによってすくわれる過程を繰り返しているわけである。ここで「もどされた量」、 δQ は循環していることになるので「循環量」とも呼ばれ、また排出という立場から見れば、排出量に寄与していないので「無効排出量」と呼ぶのが適当と考えられる。

「はしがき」でも触れたように、この「もどり量」、 δQ の内容はベルトの速度 u によって変化し、低速の場合にはⅢ—Ⅳで放出された大部分が下降過程側に落下するので「低速もれ」と呼ぶことにする。高速になるにつれて、バケット内の粒子群は十分に加速されるのでFig. 3に示されるように区間Ⅲ—Ⅳの全体に涉って放出さ

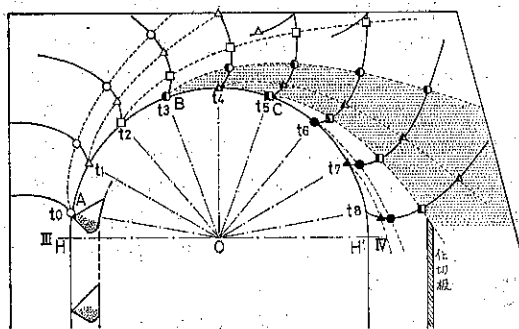


Fig. 3 バケットから放出された粒子群の軌跡

れ、一部は天井板の部分に衝突しバケットの上昇過程側にもどされるようになり、この傾向は周速 u の増加と共に著しくなるので「高速もれ」と呼ぶのが適当と考えられる。 δQ のうち「低速もれ」による部分を δQ_{low} (略して δQ_l またはバケットの下降側に落下するので δQ_{down})と記し、「高速もれ」による部分を δQ_{high} (または δQ_h)と書けば、 δQ は

$$\delta Q = \delta Q_{low} + \delta Q_{high}$$

と書くことができる。上に述べた δQ_l 、 δQ_h の発生のメカニズムから考えて当然これらの量は u の関数とな

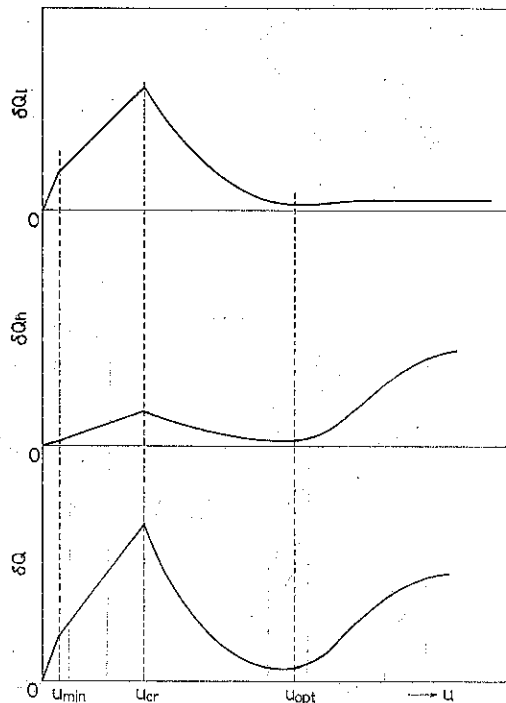


Fig. 4 もれ量 δQ 、 δQ_h 、 δQ_l の u による変化 ($\delta Q = \delta Q_l + \delta Q_h$)

いま、概念的に δQ_L , δQ_H などの u による変化を示せば Fig. 4 のようになるものと考えられる。図中の u_{cr} , u_{opt} などについては「はしがき」でも述べたように、それぞれ限界速度及び最適輸送速度を示している。（ u_{cr} 及び u_{opt} については後に、§ 4, § 5 で詳細な検討を行なうことにする。）この段階で明確に指摘できることは、 δQ_L と δQ_H とは u と共に δQ 中に占める割合が変化して行くことである。

以上は、Fig. 2 によってエレベーター内での粉粒体の挙動について概観したわけであるが、もどり量及び排出量などについての定量的な考察を行なうためには、区間Ⅲ-Ⅳでの放出から排出に至るまでの過程についてもう少し詳細に調べておくことが必要である。

Fig. 3は、ベルトの周速がある値以上になったときの粒子群の放出状態を示したものである。粒子が遠心力を受ける区間はⅢ-Ⅳなので、この区間に入ればパケット内の粒子群は外側に押し出されて溢れ出る現象が観察される。(Fig. 3の点A)この溢れ出る量及び溢出が開始される角度は、ベルトの周速及び充填率(充填率 ϕ は装置の関係上、上昇過程(Ⅱ-Ⅲ)の間で測定)によって変化する。溢出量は上昇過程側に落下するもので、 ϕ が大きければ低速でも発生し「はしがき」で触れたパケット下降側に落ちる「低速もれ」とは異なった現象であるが、有効な排出量とはならない点では共通している。

つぎに粒子群の軌道について考察する。(Fig. 3)
たとえば、時刻 t_0 でA点から放出された粒子は破線に

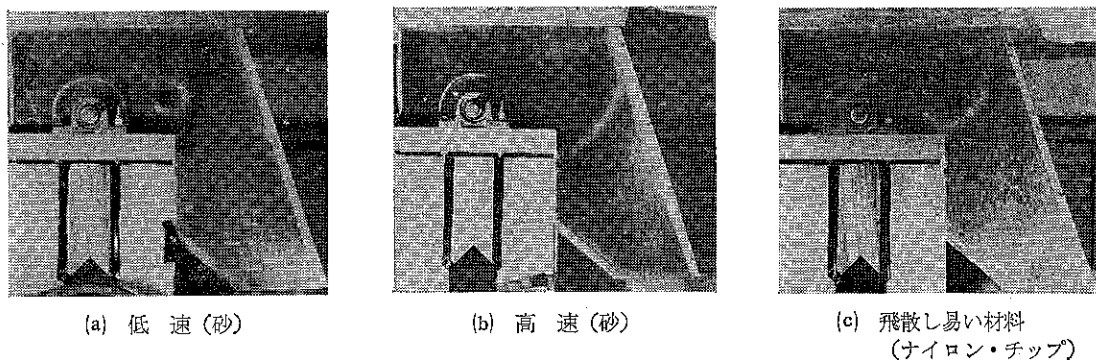


Photo. 1 粉粒体粒子群の放出状態 ($h_T=19.3\text{cm}$)

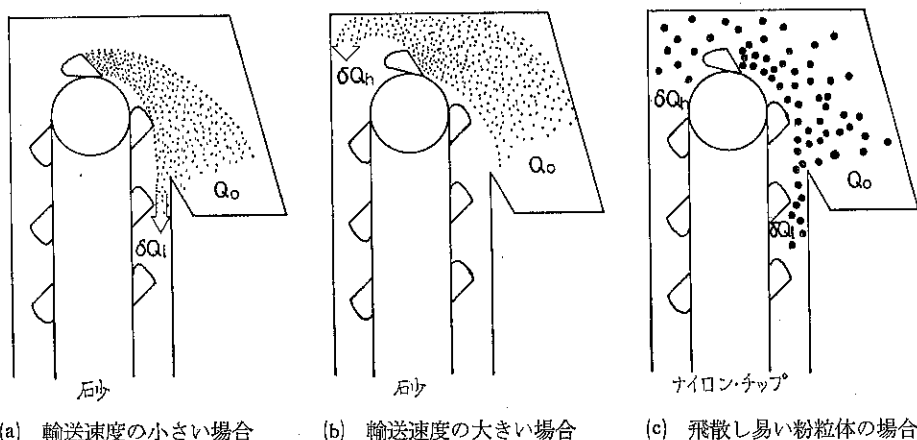


Fig. 5 無効排出量 δQ の輸送速度および材料の違いによる発生状態

沿って天井板に衝突するが、 t_1, t_2 で放出された粒子もそれぞれの軌道を飛んでいるわけで、同一時刻での各粒子の位置を結べば図中の実線群が求められる。Photo 1はこの状態を記録したものであるが、(a)の低速の場合では放出速度が小さいため、白い縞の部分は伸び切った形とはならないが、高速で撮影された(b)については白い縞は半径方向に十分発達した形状となっている。(c)はとくに比重が軽く飛散し易い材料としてナイロン・チップを選んだ場合を示したものである。

粒子群は、以上のような放出過程をたどることになるが、バケット・エレベーターの常用回転数では大部分の粒子群は Fig. 3 の $\angle BOC$ の範囲で放出されるようになっており、これらの粒子群はそのまま出口に到達するので有効に排出される。排出量 Q_o と最適周速度との関係については、§ 5 の主題となっている。

Fig. 5 は、以上のような粒子群の放出運動の結果を流量という立場からマクロな意味でまとめたもので、低速、高速でのもどり量の特徴が示されている。同図-(c)は飛散性の大きい粒体の場合を示しており、この場合は周速がかなりの値に達すれば、バケットの上昇、下降両過程側にもどされる量が同時に発生することを意味している。この節を終える前に、排出量に関する二、三の式について簡単に述べる。いま Q_o を質量流量 (gr/sec) とすれば、これはバケット 1 ケの容積 v (cm^3) とベルトの周速 u (cm/sec) に比例し、バケット間のピッチ p (cm) に逆比例すると考えられるので、一先ず

$$Q_o \sim \frac{vu}{p} \quad (1)$$

と書いておき、つぎに比例定数について考える。まず考えられることはバケット内の粉粒体の堆積量 (充填率 φ で示すことができる。) と粉粒体の見掛け密度 ρ (gr/cm^3) などが比例定数の主なる内容なので

$$Q_o = k (\rho \varphi v) \frac{u}{p} \quad (2)$$

と書けば、 $(\rho \varphi v)$ は u なる速度におけるバケット 1 ケ内の粉粒体の正味の質量に等しい。ここで k は主として π のど部の間隙、 h_T (このパラメーターの影響については、改めて § 6 で検討を行なう。) に関する量であり、 h_T (Fig. 9) を一定としておけば常数と考えられる。式(2)中の ρ, v, p 及び k は装置によって決まる量なので、

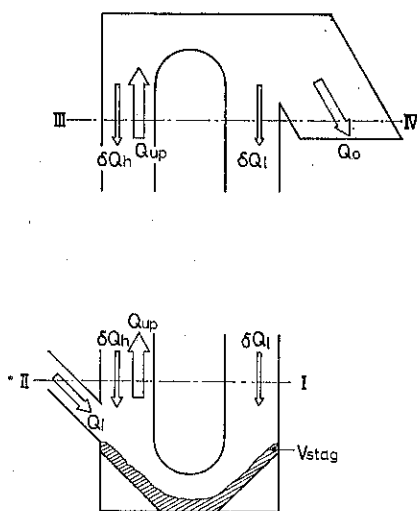
$$k \frac{\rho v}{p} \text{ を } K \text{ とおけば排出量 } Q_o \text{ は}$$

$$Q_o = K \varphi u \quad (3)$$

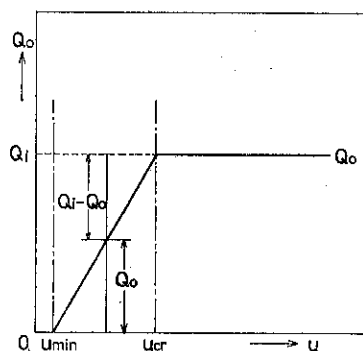
となる。ここで充填率は % で示されている。次節ではこの φ ともどり量 δQ などを中心として、material balance の問題について考察を行なう。

2.2 物質収支と充填率

この節では、これまで述べてきたいくつかの事実を物質収支の立場から検討し、ついで、排出量に直接関係するバケット内での粉粒体の充填状態について考察を行なう。Fig. 6・(a)の水平線 I—II より下の部分に対する連続の式は



(a) 滞留状態を考慮したすくい上げ過程 (I~II) 及び放出過程 (III~IV) での物質収支



(b) 流量と輸送速度

Fig. 6 流量と物質収支との関係

$$\underbrace{Q_i + \delta Q_i + \delta Q_h}_{\text{流入}} - \underbrace{Q_{up}}_{\text{排出}} = \underbrace{\frac{dV_{stag}}{dt}}_{\text{滞留量の変化}} \quad (4)$$

$$\delta Q = \delta Q_i + \delta Q_h \quad (5)$$

と書ける。(V_{stag}: 負荷箱に滞留している量)

つぎに、III-IVより上部についての物質収支の式は

$$\underbrace{Q_{up}}_{\text{flow-in}} - (\underbrace{\delta Q_i + \delta Q_h}_{\text{flow-out}}) - Q_o = 0 \quad (6)$$

$$\delta Q = \delta Q_i + \delta Q_h \quad (7)$$

となる。式(6)を

$$Q_{up} = \delta Q + Q_o$$

として、式(4)に代入すれば

$$Q_i + \delta Q - (\delta Q + Q_o) = \frac{dV_{stag}}{dt}$$

となり、

$$Q_i - Q_o = \frac{dV_{stag}}{dt} \quad (8)$$

と簡単な式にまとめられるので、この式を用いて Fig. 6 (b)の各速度範囲における流入、流出量及びもどり量などの増減の経過について考察する。

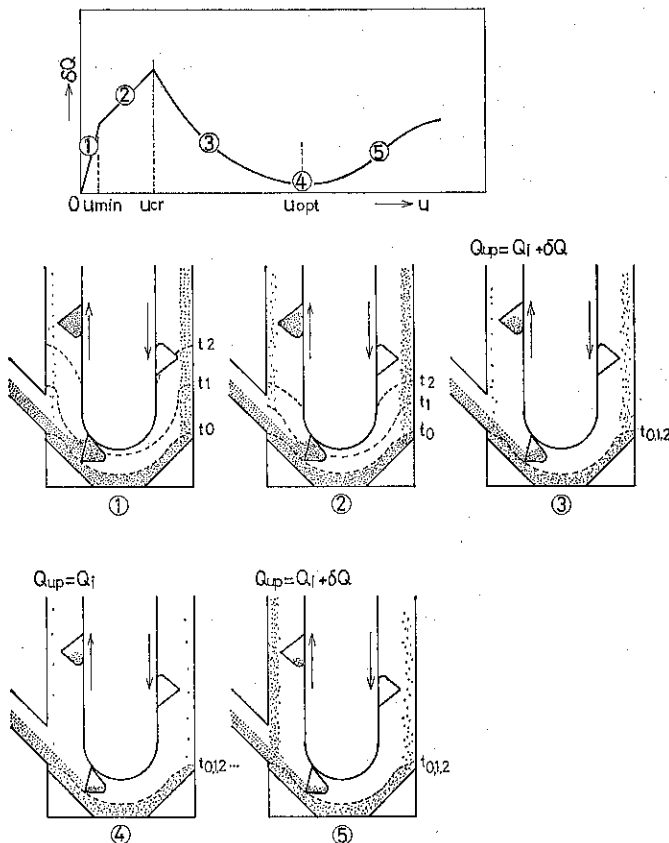


Fig. 7 もどり量 δQ 及び負荷箱での滞留量 Q_{stag} の時間的経過

i) 速度区間 $0 < u < u_{min}$ について この領域では排出量 Q_o は存在しないので式(8)は

$$\frac{dV_{stag}}{dt} = Q_i \quad (9)$$

となり、積分すれば負荷箱に滞留する量は

$$V_{stag} = V_{so} + Q_i t \quad (10)$$

となるので (V_{so}: 初期滞留量)、ベルトの周速に関係なく、時間の経過と共に堆積する一方となる。(Fig. 7・①にこの状態が示されており、 $t_0 \rightarrow t_1 \rightarrow t_2$ と堆積量が増加して行き運転不能となるので、当然この速度区間は非定常状態である。)

ii) $u_{min} < u < u_{cr}$ での状態について Fig. 6・(b)よりこの区間では、

$$Q_i > Q_o, \quad \Delta Q = Q_i - Q_o \quad (11)$$

なので、式(8)は

$$\frac{dV_{stag}}{dt} = \Delta Q \quad (12)$$

と書けるが、 ΔQ は u と共に減少しているの、負荷箱内部の滞留量も減少することになる。(Fig. 7・②, 非定常状態)

iii) $u_{cr} < u$ での状態 u が一度び限界速度 u_{cr} を超えれば、 u に関係なく流入量=流出量となっている (Fig. 6・(b)). したがって、(8)式の左辺 $Q_i - Q_o$ は零となり、積分すれば

$$V_{stag} = \text{const} \quad (13)$$

となって、滞留量も速度によらず一定となる。(Fig. 7-③, ④及び⑤) u によらず、 $Q_i = Q_o$ なる状態が保たれているので、この状態を定常状態と仮称することにする。(この現象は、このような装置に特有なものであって、所謂、流体力学で用いられる定常状態とはその意味が異なるが、現象説明の便宜上この用語を使用する。)

ここで、 u によらず $Q_o = Q_i$ となる一見、奇異な現象を検討するため、式(6)まで戻って考えることにする。式(6)を書き換えて

$$\begin{aligned} Q_{up} &= Q_o + (\delta Q_i + \delta Q_h) \\ &= Q_o + \delta Q \end{aligned}$$

とすれば、もし、ミバケット内の粉粒体の量がベルトの周速 u に無関係に一定ならば、 Q_{up} は当然 u と共に増加することになるが、実測より Q_o は一定なのでこの増加分は δQ (もどり量) の増加によって補われる筈である。事実、 u と共に Q_{up} も δQ も観察によれば (δQ の方は直接測定でき

ない変量であり、所謂、内部状態変数または unobservable (といわれる量である)、変化しているので、充填率 φ が u に依らず一定という前提が問題となって来る。すなわち、 φ は一定ではなく

$$\varphi \equiv \varphi(u), Q_{up} \equiv Q_{up}(\varphi, u)$$

$$\text{及び } \delta Q \equiv \delta Q(\varphi, u) \quad (14)$$

という立場で現象を見直すことが必要と考えられる。以下では、 φ を上昇過程(Ⅱ-Ⅲ)で測定した結果に基づいて考察を行なうことにする。

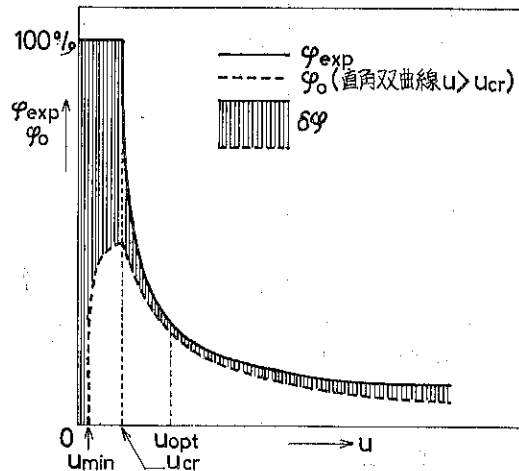


Fig. 8 輸送速度 u と充填率 φ_{exp} , φ_0 の関係

Fig. 8 の実線は上昇過程Ⅱ-Ⅲの中間で測定された充填率 φ_{exp} を示している。(実測した φ という意味で今後は φ_{exp} と書くことにする。測定法については § 3 で述べられている。) 以下で説明しようとするのは主として定常状態 ($u_{cr} < u$) でのもどり量 δQ の u による増減に関するものである。その目的とする所は $u_{cr} < u$ では、 Q_0 が一定なので、もし、 δQ が最小となるような u が存在すれば、

$$u \times Q_{up} = u \times (Q_0 + \delta Q)$$

は消費動力に比例することから、そのような u は最も経済的な輸送速度 (最適輸送速度 u_{opt}) となるわけで、結局、この節は § 5 の記述に対する一つの根拠を示すものとなっている。実測した量を左側に、推定しようとする

Table. 1 推定量と実測量との関係

実 測 し た 量	中 間 的 な 量 (関係式を用いて算出した量)	推 定 し よ う と す る 量
u (ベルトの周速)	Q_{up} (昇送量)	δQ (もどり量)
φ_{exp} (上昇過程の充填率)	φ_0 (換算充填率)	$\delta \varphi$ (循環率)
Q_0 (排出流量)		

量を右側に列記すると Table 1 のようになる。

Table 1 中の Q_{up} , φ_0 , $\delta \varphi$ などとはつぎのようにして導くことができる。 Q_{up} については、 K を装置常数として § 2.1 の式(1), (2)を導いた時の考察より

$$Q_{up} = K \varphi_{exp} \cdot u \quad (15)$$

と書ける。 φ_0 (換算充填率) は、Table 1 において初めて表われた量であるが、これは式

$$Q_0 = K \varphi_0 \cdot u \quad (16)$$

を用いて定義された量であって、その意味は排出時におけるバケット内の粉粒体の充填状態 (実測不可能) に対応するものである。もし、 φ_0 が実際に測定された充填率であれば、式(15)と式(16)との常数 K は当然異なるものと考えられるが、ここでは両方の K を同じ値に保つように φ_0 の値が換算されているので、 φ_0 は排出時の充填率に対応するものという表現が適当と考えられる。このような換算を行なう理由は、われわれの目的が δQ の絶対値を求めることではなく、増減の傾向 (とくに δQ の最小値の存在の確認) を把みたいからに外ならない。(式(15)から式(16)を差引けば左辺はもどり量 δQ に等しくなる)

これまでに述べた所より、 $u_{cr} < u$ では Q_0 は u に依らず一定なので、式(16)は

$$\varphi_0 \cdot u = \frac{Q_0}{K} = \text{const} \quad (17)$$

と書き直せば、これは φ_0 と u に関して直角双曲線を表わしている。(Fig. 8 の破線)

$\delta \varphi$ (循環率) を求める手続きはつぎの通りである。式(15)から式(16)を引けば

$$\begin{aligned} Q_{up} - Q_0 &= \delta Q = K \cdot (\varphi_{exp} - \varphi_0) \cdot u \\ &= K \cdot \delta \varphi \cdot u \quad (18) \end{aligned}$$

となり、 $\delta \varphi(u)$ は δQ の内容に関係しているので、上記の表現を使用した。ただし、 φ_0 が換算された充填率であることから、 $\delta \varphi$ についても δQ の増減の傾向との対応関係についての考察に限定されていることは勿論である。(Fig. 8 の斜線を入れた部分は $\delta \varphi$ を示す。) $u_{cr} < u$ の範囲では $\delta \varphi$ が最小となる速度 u の存在が認められ、この位置は § 5 での最適速度 u_{opt} の現われる位置との対応は良好である。

Fig. 8 の $0 < u < u_{cr}$ での φ_{exp} , φ_0 , $\delta \varphi$ などについてはつぎのような解釈が可能と考えられる。

いま、区間 $0 < u < u_{cr}$ をつぎの二つの部分に分けて考察する。(Fig. 8)

i) $0 < u < u_{min}$ 速度がこの範囲では φ_{exp} は殆んど一定 (Fig. 8 の実線) である。 φ_0 の方は Fig. 16・(b) より $Q_0 = 0$ となっているので式

$$Q_0 = K \varphi_0(u) \cdot u \quad (19)$$

より、 $\varphi_o(u) = 0$ となる。したがって、式(18)より $\delta\varphi$ は

$$\delta\varphi = \varphi_{exp} - \varphi_o = \varphi_{exp} = \text{一定} \quad (20)$$

となる。

ii) $u_{min} < u < u_{cr}$ この程度の速度範囲では φ_{exp} は殆んど変わらない。(φ_{exp} はⅡ-Ⅲの垂直上昇過程での値) 一方、 Q_o の方はこの範囲では、 a を常数として

$$\begin{aligned} Q_o &= Ka(u - u_{min}) \\ &= Ka \left(1 - \frac{u_{min}}{u} \right) \cdot u \end{aligned} \quad (21)$$

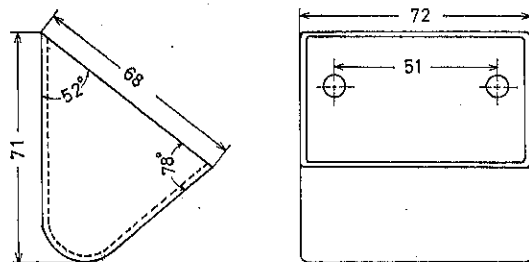
と表わされるので、式 $Q_o = K\varphi_o(u) \cdot u$ と比較すれば

$$\varphi_o(u) = a \left(1 - \frac{u_{min}}{u} \right) \quad (22)$$

が成立する。 φ_o 及び $\delta\varphi$ などの u による変化は、かなり複雑な関係となっているが、循環率 $\delta\varphi$ の変化の状態はもどり量 δQ の変化と一致しており、また material balance の立場からも矛盾はない。この節では、実験結果に対する定性的な解釈に重点を置いて述べて来たが、以下の諸節では最適な運転条件を求めるために定量的な取扱いを行なうことにする。

3. 実験装置および方法

実験装置は、バケット・エレベーター、補助ホッパ



バケットの容積 V	117 cm ³
バケットの重量	23.84 g
バケットの間隔 P	17.5 cm
バケットの総数	27

Fig. 10 バケットの形状

一、供給用ホッパー、シュートより構成されている。(Fig. 9)

バケットはプラスチック製でFig.10のような形状をしており、バケット間隔(ピッチ) P は 17.5cm である。ベルトの線速度 u は 0~170m/min (388rpm) まで連続的に変化可能で、バケット・エレベーターのどの部間隙 h_T はプーリー中心から下方に測定した値とし、この実験では 0~19.3cm まで約 3 cm 刻みで変化させた。使用した粉粒体の物性は Table 2 に示されている。

Table 2 実験試料の物性

	灰砂	ナイロンチップ 円筒型(d,h)
平均粒子径 d (mm)	0.30	$d = 2.61$ $h = 2.43$
風乾密度 ρ (g/cm ³)	1.280	0.752
比重量 γ (g/cm ² s)	2.15	1.00
安息角 α (°)	31.7	26.7

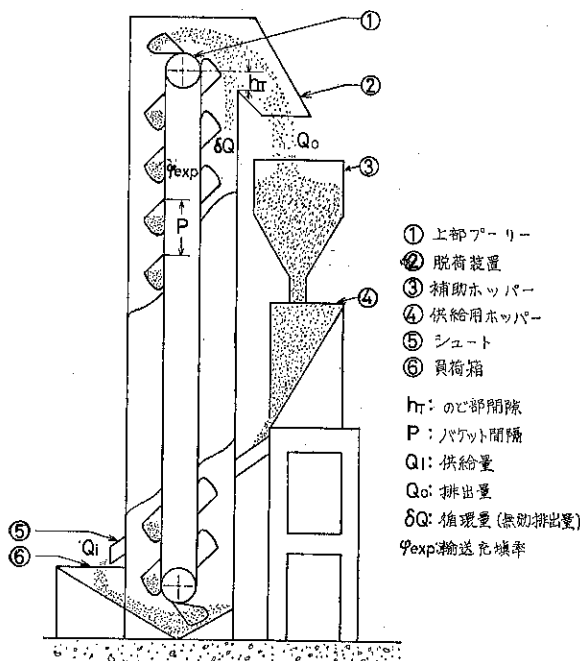


Fig. 9 実験装置

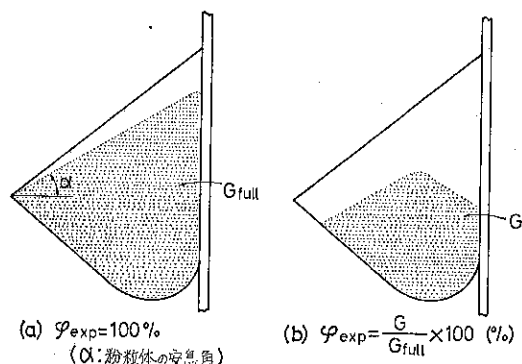


Fig. 11 バケット内の粉粒体の充填状態

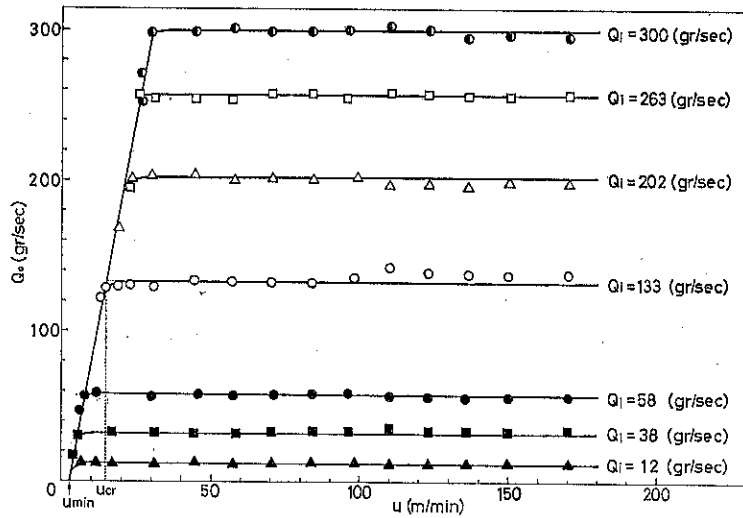


Fig. 12 輸送速度 u と排出量 Q_o の関係 (砂, $h_T=19.3\text{cm}$)

供給量 Q_i の調節は供給用ホッパー (角形非対称ホッパー) のスリット (側面スリット) の断面積を変化させて行ない, スリットより流出する材料を一定時間計測し単位時間当たりの流出質量をもって Q_i (gr/sec) とした. また排出量 Q_o はエレベーター出口での平均流出量を示している. 輸送充填率 φ_{exp} は, 運転状態の観察から粒体が一箇のバケットに Fig. 11(a) のように充填されたときが最大の充填率となることが認められたので, この状態を100%としてその質量が G_{full} であるとし, バケット・エレベーターが定常状態になったとき, 一時運転を停止してバケット内の粉粒体の質量 G を測定することによって, $\varphi_{\text{exp}} = \frac{G}{G_{\text{full}}} \times 100\%$ として求められる. (Fig. 11(b))

4. 限界輸送速度 (u_{cr}) について (ベルトの周速度 u と有効排出量 Q_o の関係より)

この場合, δ のどの部間隙, h_T は排出量に影響を及ぼさないと考えられる 19.3cm に固定し, 供給量 Q_i をパラメーターとして周速度 u を変化させて実験を行なった. (Fig. 12, Fig. 13) 図より, 最小速度 u_{min} 以下では全く排出されず, 垂直に持ち上げられた粉粒体はすべてバケットの下降側に落下して負荷箱に戻されることになる. ($Q_o = 0$, $Q_{\text{up}} = \delta Q_{\text{down}}$) $u_{\text{min}} < u < u_{cr}$ の範囲では, Q_o は u に比例して増加する. 比例する範囲は Q_i によって異なるが, この範囲では図より $Q_i > Q_o$ なので, 粉粒体は $Q_i - Q_o = \delta Q$ の割合で時間の経過と共に負荷箱に堆積し, ついには運転不能の状態となる. (非定常状態)

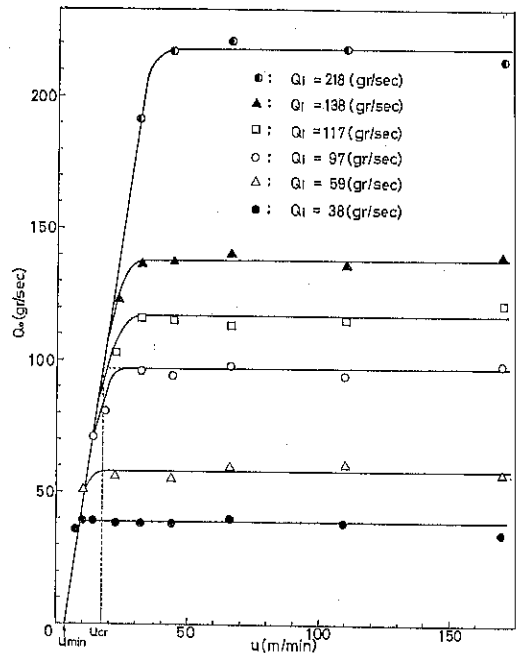


Fig. 13 輸送速度 u と排出量 Q_o の関係 (ナイロンチップ, $h_T=19.3\text{cm}$)

一方, 周速が上記の u_{cr} (限界輸送速度) を超えれば, 排出量 Q_o は u とは無関係にそれぞれ $Q_i = Q_o$ となり完全な定常状態が実現される.

以上より, バケット・エレベーターは限界輸送速度 u_{cr} 以上で運転することが必要となる.

さらに, u_{cr} と Q_i の関係を調べるために, Fig. 12,

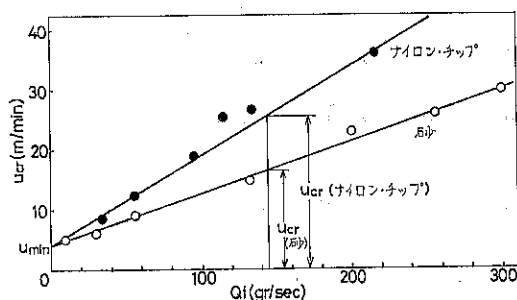


Fig. 14 限界輸送速度 u_{cr} と質量流入量 Q_i の関係 ($h_T=19.3\text{cm}$)

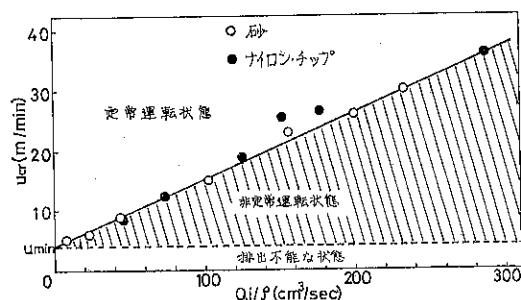


Fig. 15 限界輸送速度 u_{cr} と容積流入量 Q_i/ρ (cm^3/sec) の関係 ($h_T=19.3\text{cm}$)

Fig. 13 を書き直せば Fig. 14 が得られる。この Fig. 14 の横軸は質量流量 Q_i (gr/sec) であり、これを見掛け密度 ρ (gr/cm^3) で割って容積流入量 (cm^3/sec) としたものが Fig. 15 である。Fig. 15 では輸送される粉粒体の密度による差が除かれて、Fig. 14 での二つの直線の傾斜はほとんど一致することになり、Fig. 15 はこの実

験に用いられたバケット・エレベーターの輸送状態を最も端的に表わしているものと考えられる。たとえば、Fig. 14 では同じ供給量 Q_i (gr/sec) に対して、 u_{cr} (ナイロン・チップ) $> u_{cr}$ (砂) となっているが、

これは見掛け密度の方は ρ (ナイロン・チップ) $< \rho$ (砂) なので同じ質量に対してはナイロン・チップの方が供給される容積は大となり、このことはバケット・エレベーターが容積型の輸送装置であることから納得される。

5. 最適輸送速度 u_{opt} について (輸送速度 u と無効排出率 $\frac{\delta Q}{Q_i}$ の関係より)

すでに § 2 において述べたように、 $u > u_{cr}$ の状態すなわち定常運転状態においても無効排出量 δQ が存在している (Fig. 2)。この δQ は (18) 式から Q_o と φ_{exp} を測定することにより求められる。また、 δQ は Q_i によっても変化するので、輸送速度 u と循環量 δQ との関係を調べ最適な輸送速度を見付け出すという目的に対しては、入力流量 Q_i の影響を除くため δQ を Q_i で割った量 $\delta Q/Q_i$ (入力流量当たりの無効排出率) とベルトの周速 u との関係を検討するのが適当と考えられる。

Fig. 16 (a) および (b) に、 u に対して $\delta Q/Q_i$ の変化する状態が示されている。Fig. 16 の $u \sim \delta Q/Q_i$ 曲線に最小値が表われる理由についてはつぎのように説明される。

まず、 u の小さい範囲では Fig. 5 (a), photo. 1 (a) で示されるようにバケットから排出される瞬間に粒子群の持つ接線速度 u が小さいので、* のど部、の手前 (下降側) に放出される粒子群 (δQ_i) が多いけれども、 u

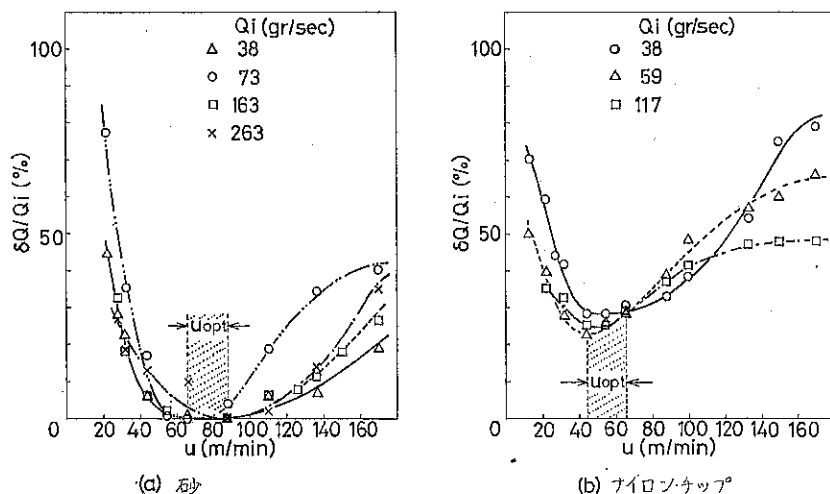


Fig. 16 輸送速度 u と無効排出率 $\delta Q/Q_i$ の関係 ($u > u_{cr}$, $h_T=19.3\text{cm}$)

の増加と共に粒子群は仕切板を飛び越えるようになり、このため δQ_i (無効排出量) は減少してくる。u の増加と共にこの傾向は顕著になり $\frac{\delta Q}{Q_i}$ はさらに減少の傾向をたどるけれども、ベルトの周速がある値よりも大となれば、Fig. 3, Fig. 5・(b) 及び photo. 1・(b) などに示されるようにバケット内の粒子群はエレベーターの頂点に到達する前に放出され、周速 (粒子に対しては放出時の接線方向の速度) が過大のため、上昇バケット側に戻される粒子群が存在するようになり (δQ_h の原因)、上記のベルトの周速が小さい場合の δ のもれ量、(無効排出量) とは、そのメカニズムにおいて異なるけれども、結果としてやはり δQ が増大することになる。

以上が、 $\frac{\delta Q}{Q_i} \sim u$ 曲線に最小値が現われる現象論的な説明であるが、無効排出率 $\frac{\delta Q}{Q_i}$ が大きいということは単に動力の面からの損失に止まらず、とくに δ の高速でのもれ量、が大きい場合には輸送される粉粒体の破碎、エレベーター天井付近でのライニングの摩耗、ライニングへの粉体の付着などを惹き起こすことにもなり好ましくない状態である。

結局、最適な輸送速度 u_{opt} とは「無効排出率 $\frac{\delta Q}{Q_i}$ が最小となる周速度である」とするのが妥当と考えられる。

Fig. 16・(a) 及び (b) は、それぞれ砂とナイロン・チップに対する実験の結果であるが、砂の場合については最適な周速度の範囲 ($\frac{\delta Q}{Q_i}$ の最小の範囲) は、

$$66\text{m/min} \leq u_{opt} \leq 88\text{m/min} \\ (110\text{cm/sec} \leq u_{opt} \leq 147\text{cm/sec})$$

となっている。図よりこの範囲では $\frac{\delta Q}{Q_i}$ は (Q_i によらず) ほとんど零に近い値となっており、排出効率の面からは最も好ましい状態といえる。念のため文献 1 の経験式 $N = \frac{30}{\sqrt{R}}$ より周速 u を求めると、 $u = 50\text{m/min}$ (83 cm/sec) となり経験式からの周速は少し小さいようである。(R: プーリー半径, [m])

Fig. 16・(b) のナイロン・チップの場合についても $\frac{\delta Q}{Q_i} \sim u$ 曲線の傾向は砂と同様であるが、この場合の最適な周速の範囲は、

$$44\text{m/min} \leq u_{opt} \leq 66\text{m/min} \\ (73\text{cm/sec} \leq u_{opt} \leq 110\text{cm/sec})$$

となっている。(この場合は経験式からの値 50m/min と一致している) しかし、砂の場合と明瞭に異なる所は、最適な周速の範囲においても無効排出率 $\frac{\delta Q}{Q_i}$ の値が

零とはならず、約 20% の値を持つことである。この原因については、photo. 1・(c) (そのモデルとしての Fig. 5・(c)) に示されているようにナイロン・チップは比重が小であり形状も大きいので、バケットから放出された後の粒子群の軌跡の空間的分布は複雑であり、下降バケット側へのもれ量 (低速もれ) と上昇バケット側へのもれ量 (高速もれ) とが、つねに共存しているためと考えられる。

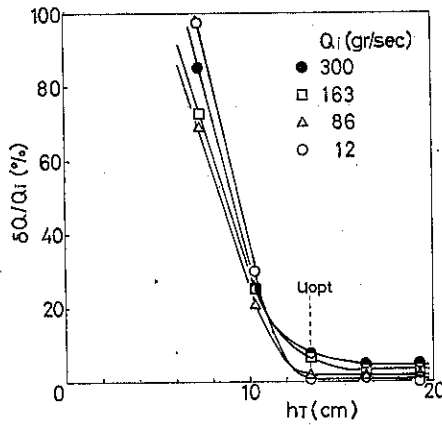
6. 最適な δ のど部間隙、 h_{opt} について

(h_T と $\frac{\delta Q}{Q_i}$ の関係より)

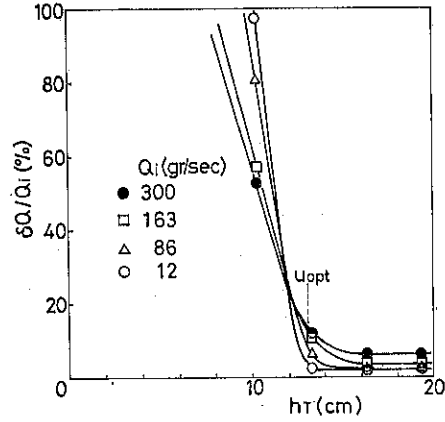
これまでの実験においては δ のど部、の間隙 (Fig. 9 の " h_T ") の影響についてはとくに触れなかったが、その理由は仕切板を充分下げて粒子の排出運動の軌跡に対して、この仕切板がほとんど影響を与えないような状態 ($h_T = 19.3\text{cm}$) で実験を行なったからに外ならない。しかし、このような立場からだけ考えるのであれば、 δ のど部、の間隙を規定する "仕切板、などはむしろ無い方がよいことになるが、実際問題としてはバケットの下降側のカバーを外す訳には行かないので、この問題は、前述した無効排出率 (循環量) $\frac{\delta Q}{Q_i}$ の面から考察して最適な h_T が存在するとすれば、それはどのようなものかという扱え方で検討を行なうのが妥当と考えられる。

h_T が小さい場合には、エレベーターの頂上付近 (Fig. 3 の B C 間) より放出された粒子群でも、 δ のど部、により排出が妨げられ下降バケット側へのもとり量 δQ_i が多い。しかし、 δ のど部間隙、 h_T を大きくして行くにつれ δQ_i (無効排出量) は小さくなって行く。そして、それ以上 h_T を大きくしても δQ_i は一定で (無効排出率 $\frac{\delta Q}{Q_i}$ が最小)、初めに述べたようにこの位置が最適な δ のど部間隙、 h_{opt} と定義される。

この報文の目的とする所は、総合的な立場からバケット・エレベーターの最適な運転状態を見出すことにあるので、この節での最適な h_T の求め方についても、前節までの取扱いと矛盾しない方向で進めることが必要と考えられる。このため、この節ではベルトの周速については、最適な周速 (55m/min 及び 88m/min の 2 点) を選び、この状態での δ 無効排出率、 $\frac{\delta Q}{Q_i}$ と δ のど部間隙、 h_T との関係について実験を行なった。結果は、砂については Fig. 17 に、ナイロン・チップについては Fig. 18 に示されているように予想通り、 δ のど部間隙、 h_T を上げると $\frac{\delta Q}{Q_i}$ は減少し、ある点 (砂、ナイロン・チッ

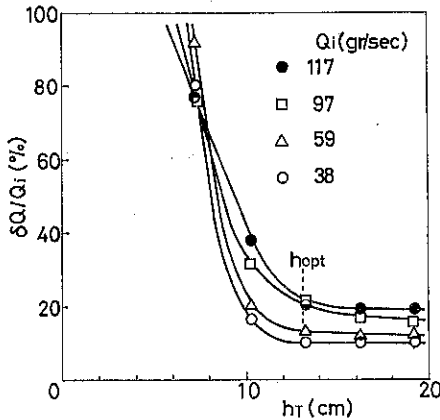


(a) $u=55$ m/min

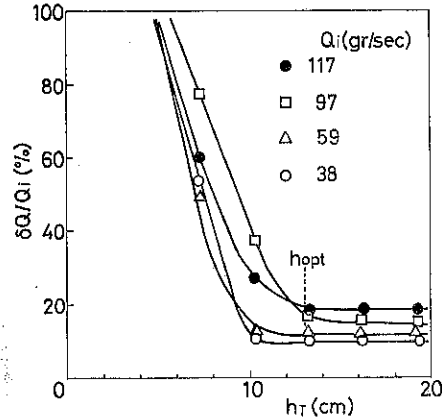


(b) $u=88$ m/min

Fig. 17 のど部間隙 h_T と無効排出率 $\delta Q/Q_i$ の関係 (砂, $u > u_{cr}$)



(a) $u=55$ m/min



(b) $u=88$ m/min

Fig. 18 のど部間隙 h_T と無効排出率 $\delta Q/Q_i$ の関係 (ナイロン・チップ, $u > u_{cr}$)

プ共に約13cm) 以上では $\frac{\delta Q}{Q_i}$ は一定となっている。(前節までの実験では $h_T=19.3$ cm としているので, Fig. 17, 18では横軸の右端に相当) とくに飛散し易い輸送材の場合については, シーリングの問題などもあり, h_T は小さい方が良く考えられるので, $\frac{\delta Q}{Q_i}$ が飽和する最小の h_T の値をもって最適な『のど部間隙, h_{opt} とするのが適当と考えられる。

一方, 経験的には『のど部間隙, h_T はバケットのピッチに等しく取れば (他の部分の寸法についても経験値を採用した上でのことであるが), 下降バケット側へのもれ量 (Down-ward leakage) は先行バケットの背面に衝突する割合が多くなり, この作用により排出の効率が改善されるといわれてきているが¹⁾, 本実験に用いたバケットのピッチ $P=17.5$ cm よりも, Fig. 17, 18よ

り求められた h_{opt} は13cm となっているので, 単に P (バケット・ピッチ) $=h_T$ (のど部間隙) とする従来の経験則には問題が残ると思われる。

7. む す び

遠心排出型のバケット・エレベーターについて実験を行ない, 以下の事柄を明らかにすることができた。

1) もどり量 δQ を検討することによって, 合理的方法で最適な運転条件を求めることができた。また, 排出量に直接影響を与える『のど部間隙, についても δQ の考察より, 最適寸法 h_{opt} を決定することが可能である。以上をまとめて三次元的に表わしたものが Fig. 19 に示されている。図中の斜線の部分が最適な輸送状態に対応している。

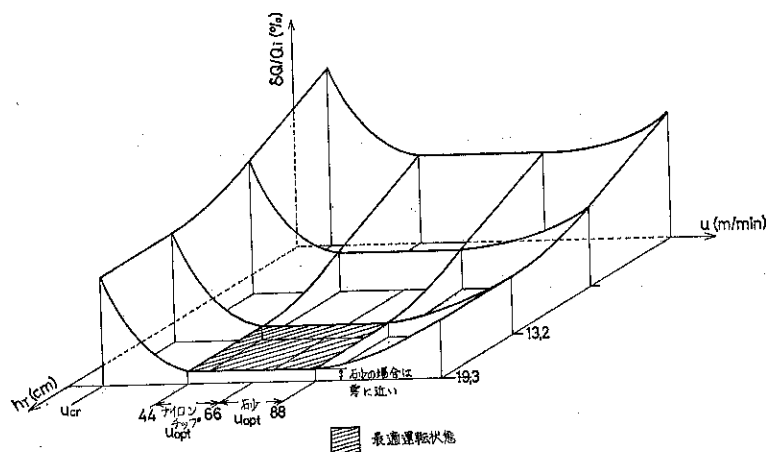


Fig. 19 バケット・エレベーターの最適輸送状態

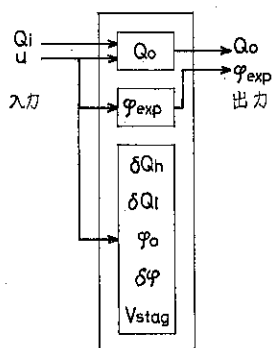


Fig. 20 ダイナミック・システムと考えた場合の各変数間の関係

2) バケット・エレベーターをダイナミック・システムと考えれば、入・出力及び内部状態変数間の関係はFig.20のように表わすことができる。

3) 最適 ϕ のど部間、 h_{opt} はバケットのピッチよりも幾分小さい方が望ましい。

記号表

d : 平均粒子径	[mm]
G : バケット内粉粒体質量	[gr]
G_{full} : バケット内粉粒体質量の最大値	[gr]
h_{opt} : 最適のど部間隙	[m]
h_T : のど部間隙	[cm]
$K : \frac{\rho v}{60p}$ (装置の常数)	[gr/60cm]
N : プーリー回転数	[rpm]
P : バケットのピッチ	[cm]
Q_i : 供給流量	[gr/sec]
Q_o : (有効) 排出量	[gr/sec]

Q_{up} : 垂直輸送流量	[gr/sec]
R : プーリー半径	[m]
u : 輸送速度 (ベルトの周速度, 線速度)	[m/min]
u_{cr} : 限界輸送速度	[m/min]
u_{min} : 最小輸送速度	[m/min]
u_{opt} : 最適輸送速度	[m/min]
V_{so} : 負荷箱の初期滞留量	[gr]
V_{stag} : 負荷箱に滞留している量	[gr]
v : バケット (1 個の) 容積	[cm ³]
α : 粉粒体の安息角	[°]
r : 粉粒体の比重量	[gr/cm ² ·sec ²]
δQ : 無効排出流量 (循環量, もどり量)	[gr/sec]
δQ_i : バケット下降側もどり量 (低速もれ)	[gr/sec]
δQ_h : バケット上昇側もどり量 (高速もれ)	[gr/sec]
$\delta \phi$: 循環率	[%]
ρ : 粉粒体の見掛け密度	[gr/cm ³]
ϕ_{exp} : 輸送充填率	[%]
ϕ_o : 排出流量に相当する充填率	[%]

引用文献

- 1) 真島卯太郎: チェーン・コンベヤ, 工学図書
- 2) 井伊谷鋼一 編集: 粉体工学ハンドブック, 朝倉書店
- 3) 植松時雄 他三名編集: 流体・固体輸送工学ハンドブック, 朝倉書店
- 4) 寺本四郎 編集: 食糧工学ハンドブック, 朝倉書店

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

A Trial Computer Simulation of the Movement of Balls in the Vibration Mills.

井 上 外 志 雄*
Toshio Inoue

Synopsis

Vibration mills are coming into steady use in various industrial fields. However, a considerable difficulty is met with in determining the grinding characteristics through experimental programs, especially in the cases where scale-up problems are involved, because their grinding mechanism is not so simple but connected with a number of variables. In order to supplement the shortcoming of experimental works, the author tried to make a computer simulation of the one-dimensional vibration mill. Even though this series of simulation did not result in a full success on account of the inherent nature of movement of balls in a vibrating shell, some effective results as shown in Table 1 and Fig. 2 are obtained for the cases with a limited number of balls, which are suggestive of the grinding characteristics of vibration mills.

要 旨

振動ミルは現在広い工業分野に定着しつつあるが、その粉碎メカニズムはかなり複雑で、変数が多いため、実験によってその特性を十分に把握すること、とりわけ振動ミルの大型化に伴う問題点を理解することが困難である。そこで実験の不足を補う意味で、一次元振動ミルに対する電算機シミュレーションを試みた。振動容器内におけるボールの運動の性質上、このシミュレーションは充分の成功に至らなかったが、ボールの数が少ない場合には Table 1 および Fig. 2 に示すような結果が得られ、振動ミルの特性に関する示唆が得られた。

1. 緒 言

振動ミルは近年、機械工学技術の発達によって新たな脚光を浴び、すでに微粉碎の領域を中心として定着するに至っている。振動ミルがはじめて世に現われたのは1910年代のことであるから、振動フルイとほぼ同じ位の歴史をもっているわけであるが、実用化がはるかに遅れた最大の理由は、重量物を高速振動させることに對し、

材料や機械要素の耐疲労設計技術がついて行けなかったことにあると思われる。振動ミルは、ボールミルに比して粉碎容器の単位容積当り処理能力が格段に大きいこと、微粉碎が容易であること、粉碎ふん囲気を制御しやすいこと、など、いくつもの特長をもっている。昔使われていたシェーキングスクリーンやトロンメルのかかりのものが現在は高速の振動フルイ (vibrating screen) にとって代わられていることを憶えば、現在の回転ミル**に對し、振動ミルがその座を奪うことも、あながち考えられないことではない。

* 東京大学工学部付属総合試験所

(〒113 東京都文京区弥生2-11-16)

TEL 03-812-2111 (内線6393)

** 回転式のボールミル、ロッドミル、ペブルミル

しかし一方、いかなる仕様を満足させる振動ミルが作られたとしても、振動ミルが万能であるとは考えにくい点がある。たとえば粉砕効率であるが、条件にもよるであろうが、筆者らの実験によると、中程度の細度における振動ミルの粉砕効率は意外に低い。とくに、大型化による比処理能力や粉砕効率の低下が心配である。最近、かなり大型の振動ミルが製造されているので、この辺の正確な比較データを知りたいものである。振動ミルは回転ミルにとって代わるかも知れない装置であるだけに、その詳細の特性を調べ、大型化にともなう問題なども明らかにしたいところである。しかし、振動ミルは回転ミルなどに比して変数の数が多く、実験の労が多いわりに得るところが少ない。とりわけ寸法効果について実験的に確かめることはきわめて困難である。そこで、実験の不足を補う意味で簡単な電算機シミュレーションを行なったので、その結果について報告することにする。はじめにお断りしなければならないが、実はこのシミュレーション実験は所期の成果を十分に収めるまでには到らなかったのである。不成功の原因などは以下の記述によって明らかにされてゆくが、このシミュレーションによって、振動ミルの特性について今まで気付かず、改めて認識した点も多く、また今後筆者と同じような誤りを犯す人もないとはいえないと思うので敢えて発表させていただく次第である。

2. 目的および方法

当初このシミュレーションを企てた目的は、主として振動ミルの特性、とりわけ寸法効果についての知見を得ることにあった。実際の振動ミルの大部分は円運動を採用しており、また円筒形の容器を用いているので、2次元または3次元空間におけるボールの運動をシミュレートすることができればもっともよいが、これはかなり難かしそうである。そこで百歩譲って、ボールをその外径に等しい太さの円筒容器につめて、これを円筒の軸方向に直線往復運動をさせる模型を想定した (Fig. 1)。円筒容器は中のボールの衝突にかかわりなく、外部から加えられた単振動を行なうものとした。このようなミルの容器をいろいろな条件で振動させたとき、内部のボールはどのような運動をし、どのような具合に衝突をし、ミル内部のどの部分でどのようなエネルギー消費を示すかを調べるのがテーマである。

モデルの中で粉砕の模様を詳細に表現するのは骨が折れそうなので、第1近似として次のような仮定をした。すなわち、容器上下壁とボール、あるいは相隣るボールとボールが接近したとき、それらの内に介在する粉体粒子がおしつぶされるわけであるが、その粒子の大きさは

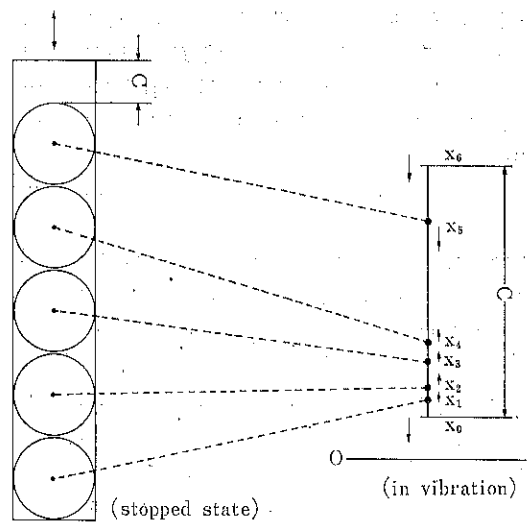


Fig. 1 Model of the one-dimensional ball mill.

ゼロとみなした。そして、壁とボール、またはボールとボールが衝突したとき、衝突前の速度と衝突後の速度との間には、マクロ的に (1 a), (1 b) 式のような力学法則がなりたつものと考えた。

$$u'_1 = \frac{(m_1 - em_2)u_1 + (1+e)m_2u_2}{m_1 + m_2} \quad \dots\dots (1 a)$$

$$u'_2 = \frac{(m_2 - em_1)u_2 + (1+e)m_1u_1}{m_1 + m_2} \quad \dots\dots (1 b)$$

(1 a), (1 b) 式における反撥係数 e が 1 であれば衝突は完全に弾性的であり、0 であれば完全に塑性的である。そして、この衝突で消費されるエネルギーは (2) 式により求められ、衝突前の速度差が同じであれば、衝突がより塑性的であるほど大きく、初期の速度エネルギーのより多くの部分が熱エネルギーに変換されることとなる。その過程で、変換エネルギーの一部が粉砕エネルギーとなるであろう。

$$\begin{aligned} \Delta T &= T - T' \\ &= (1 - e^2) T \\ &= \frac{1 - e^2}{2} \cdot \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (u_1 - u_2)^2 \quad \dots\dots (2) \end{aligned}$$

反撥係数 e は粉砕の条件によって変化するであろうが、落錘衝撃粉砕実験によって、その数値なり、数値の分布なりを実際に求めることは、比較的容易と思われる。衝突によって消費されるエネルギーは、粉砕エネルギーに関係しているはずであるから、容器内部におけるエネルギー消費の分布状態を知ることができれば、振動ミルの設計や操作条件の設定に大いに役立つに相違ない。

上・下壁の位置 (高さ) をそれぞれ x_0 および x_{n+1} で

表わし、その間にある n 個のボールの位置を $x_1, x_2, \dots, x_n$ で表わすこととする。下壁(底)の振動中心を座標原点にとり、ボールの直径を計算の便宜上 0 とすれば、(3)、(4)式によって壁面の運動を表わすことができる。

$$x_0 = a \sin(\omega t - \theta) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$x_{n+1} = a \sin(\omega t - \theta) + c \quad \dots\dots\dots(4)$$

粉碎容器はボールに比して、はるかに質量が大きいと考え、(1 a)、(1 b) 式をボール(添字 1)と壁(添字 2)の衝突にあてはめると、

$$m_1 \ll m_2 : \quad \dots\dots\dots$$

$$u'_1 = e(u_2 - u_1) + u_2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$u'_2 = u_2 \quad \dots\dots\dots(6)$$

となり、また同じ大きさのボール相互の衝突では、

$$m_1 = m_2 :$$

$$u'_1 = \frac{(1-e)u_2 + eu_1}{2} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$u'_2 = \frac{(1-e)u_1 + eu_2}{2} \quad \dots\dots\dots(8)$$

となる。

一方、ボールは壁との衝突によってある速度 $u_1 = \frac{dx_1}{dt}$ を得ると、次の衝突までは放物線を画いて飛行する。すなわち、衝突後の時間を τ とすれば、

$$x'_i = x_{i,0} + u_{i,0}\tau - \frac{1}{2}g\tau^2 \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$u'_{i,0} = u'_{i,0} = u_{i,0} - g\tau \quad \dots\dots\dots(10)$$

ボールと壁との間の衝突時刻を求めるためには、方程式、

$$x_0 - x_1 = 0 \quad \text{あるいは} \quad x_n - x_{n+1} = 0$$

を解かねばならない。正弦関数あるいは余弦関数は、チェビシェフ展開などの多項式によって近似されるので、単振動をする壁と(9)、(10)式にしたがって飛行するボールとの出合いの時刻および位置(x)は、高次方程式の根として近似的に求められる。衝突現象を逐一追いかける今の場合、直接解を求める方法では計算時間がかかりすぎるので、単振動の一周期を数十～数百の区間に分割し、各区間で線型補間する方法を採用した。これによって交点の座標(x, t)は、2次方程式の根として近似的に求められた。

ボールとボールの衝突については、交点の座標(x, t)は1次方程式の解として容易に求められ、問題はない。

計算の方法は次の通りである。

①初期データとして、ボールの個数、振幅、振動の周波数を決める。②初期位相角、各ボールの位置と速度を適当に与える。③相隣るボール同士および上下端のボールと壁との衝突しうる時刻を求め、そのうちのもっとも早い衝突事象のみを取り上げて記録し、衝突に関与した

ボールの速度を更新する。このとき、どのボールまたは壁の間で衝突が起きたか、衝突位置はどこか、その衝突によってどれだけのエネルギー消費が生じたか、などを同時に記録に留める。④あらかじめ設定した回数まで③をくり返す。

3. 結果および考察

Table 1*(A)～(F)の1)および2)はプリントアウトされた条件データと衝突データのラインプリント出力例である。このままでは結果がわかりにくいので、衝突事象の全体的な統計結果をプリントアウトさせた。その例をTable 1(A)～(F)の3)および4)に示す。また、計算結果を磁気テープに出力し、その必要部分を編集・再処理して壁とボールの軌跡をX-Yプロットに画かせることとした。Fig. 2に2, 3の結果から一部分のみを拾って示す。

ボールの個数が少ない場合は、このように問題なく計算結果が得られたが、ボールの個数が5個位になると、このシミュレーションはうまくいかないことがわかった。その理由は次の通りである。すなわち、ボールの数が増すにしたがって、衝突の時間間隔が短くなり、計算機が浮動小数点演算によって計算しうる数値範囲の限界を超えてしまうのである。計算の方法をいろいろと工夫してみても、本質的にはこの問題は解決されることがなく、それは振動ミルにおける衝突現象の本質にかかわるものであると認識した。これはボールを平らな台の上に落した時、ボールの反撥高さが等比級数的に減少しながら、次第に反撥周期が短くなり、有限時間内に振動が止まってしまうこと、その間の反撥回数はしかし無限大であることと対比してみれば、容易に理解できる。すなわち振動ミルにおけるボールの運動をこのような方法でシミュレートした場合、ごく限られた時間内に非常に多数回、場合によっては無限回の衝突を記録しなければならないこととなり、非常に大きな計算時間を要するばかりか、計算続行不可能となってしまうのである。

このようなわけで、数十個のボールがある場合のシミュレーションなどは到底不可能であった。また計算可能限界に対し、ボール数および反発係数が大きく影響することがわかった。

ボール数が非常に少ない Fig. 2 の結果を見ても、振動ミルの粉碎容器内部で、ボールはバラバラに運動しているのではなく、一団となって運動する傾向が強いことがわかる。これは高速度写真などによる普通の円運動型ボールミルにおける観測結果とも一致している。

ミル内におけるエネルギー消費に注目すると Table 1

* 本文末に掲示

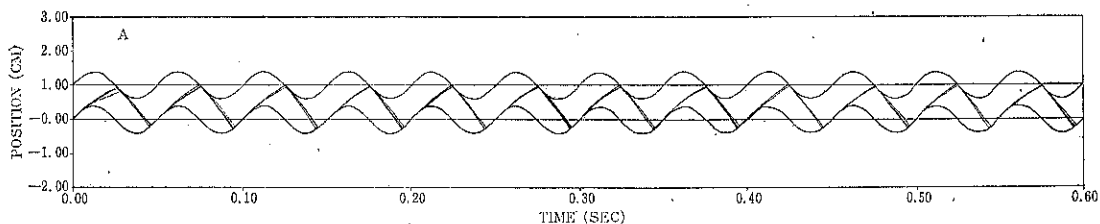


Fig. 2 (A) Movement of balls in the one-dimensional ball mill model.

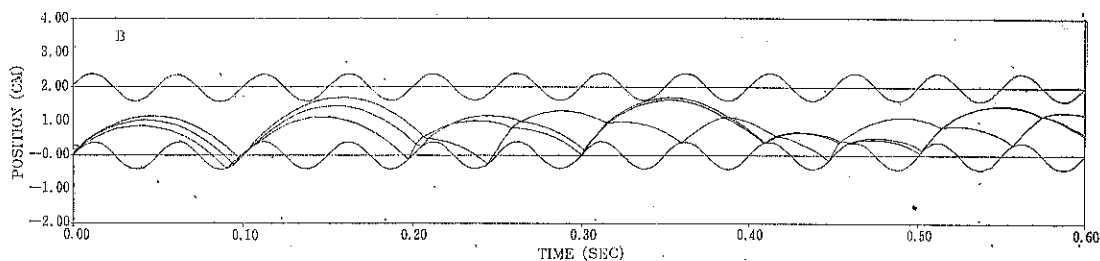


Fig. 2 (B) Movement of balls in the one-dimensional ball mill model.

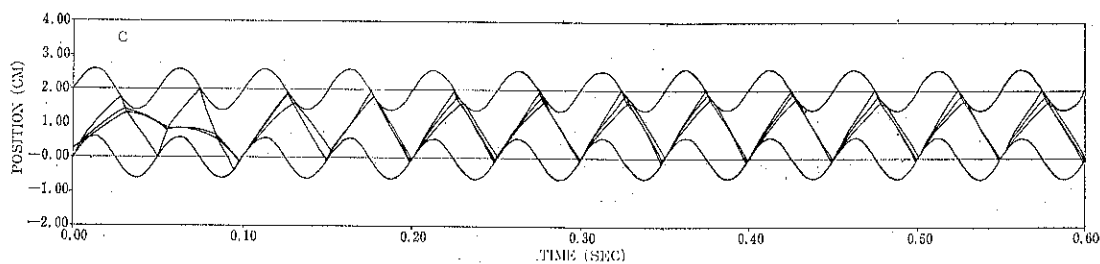


Fig. 2 (C) Movement of balls in the one-dimensional ball mill model.

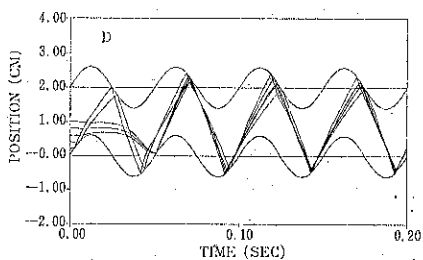


Fig. 2 (D) Movement of balls in the one-dimensional ball mill model.

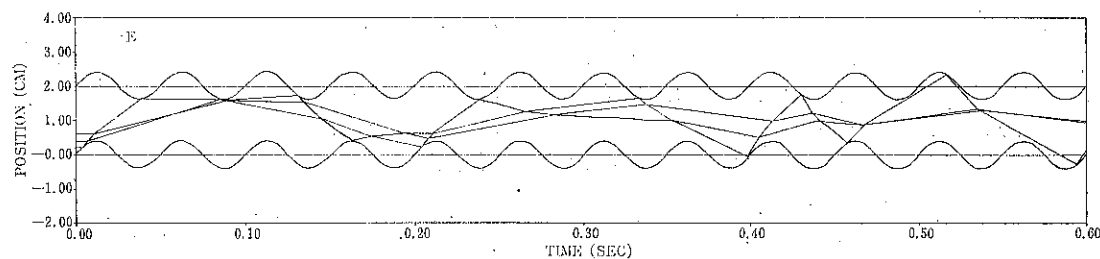


Fig. 2 (E) Movement of balls in the one-dimensional ball mill model.

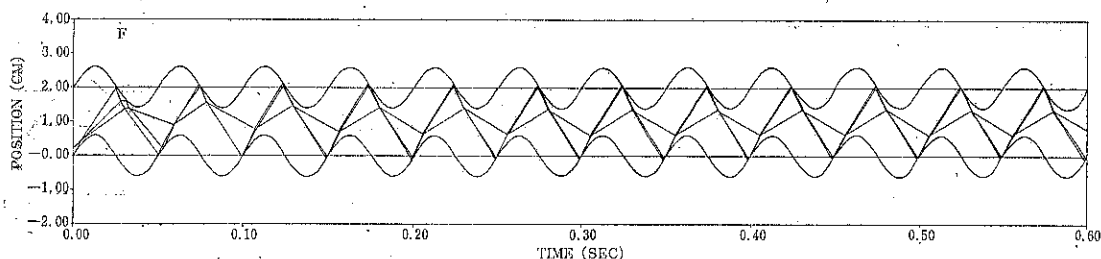


Fig. 2(F) Movement of balls in the one-dimensional ball mill model.

ど Fig. 2 を対照して調べてみるとわかるように、大きい飛翔のあとの第1の衝突は概して大きな速度差をもつて行なわれるので、大きなエネルギー消費=粉砕をもたらすことは当然であるが、そこにごく近接したボールがあると、そのあとの反発時にもかなり大きなエネルギー消費があることが認められる。エネルギー消費は衝突前の相対速度の大小によって決定されるので、理論的には振りの大小とは無関係である。このような近接ボール群あるいは壁面と近接ボール群、ごく短時間における多重衝突は総体として大きなエネルギー消費の原因となり、しかもボール数の増大とともに多重衝突の回数は階乗的に増大し、このビビリ現象はきわめて複雑なものとなる。Table 1 および Fig. 2 の D のデータで、ボール数が5個ともなると、1秒当りの粉砕容器の振動回数が30回にすぎないのに対し、その内部での衝突回数は900回にもおよぶことがわかる。

データ E および F は無重力状態におけるボールの運動を示したものである。またデータ B の条件ではビビリ現象により衝突時間間隔 $\rightarrow 0$ となり、計算続行不可能となった。

ボール数をあまり増すことができなかったため、十分な結果が得られなかったが、Table 1 の各データ毎の末尾にあるエネルギー消費についての統計は多少の興味を惹く。LOCATION NO. は下側の壁と一番下のボールとの間を1とし、壁とボールおよびボールとボールの間に順次番号をつけたものである。それぞれの LOCATION NO. での衝突頻度、1回当りの平均エネルギー消費量、エネルギー消費量の合計、その総合計量に対する百分率の順に記載されている。POWER DRAFT は総合計エネルギーを時間で除した商である。データ A のような例でも、Fig. 2 を見ると大部分のエネルギー消費は壁とボールの間でなされているように見られがちであるが、直観とはうらはらに、ボール間の反撥によっても大きなエネルギー消費が起こることに注目すべきである。

充分に確認してはいないがいくつかの試行によると、ボールの軌跡は初期のボール配置および速度によってはあまり影響されず、数周期ののちにはほぼ同一のパターンに収束するようであった。

4. む す び

振動ミルの粉砕特性を解明するための一助として電算機によるシミュレーションを試みたが、十分な成功を見るには至らなかった。当初は振動条件、反撥係数、ボールの個数などを変えて振動ミルの特性を明らかにして行きたいと考えていたが、ボール数を増すと計算が著しく困難となり断念せざるを得なかった。しかし、それでもなお、振動ミルの粉砕機構を示唆する2, 3の知見が得られたと考えたので、敢えて報告した。シミュレーションに使用した計算機は東京大学工学部オンライン実験用計算機、FACOM 270-20 および FACOM 230-25 (ともに32KW) である。計算機の使用にあたり、工学部総合試験所の藤崎研究室にお世話になった。ここに謝意を表したい。

記 号

- a : 粉砕容器の振動振幅
- c : 粉砕容器の上下壁面の間隙
- e : 反撥係数
- g : 重力加速度
- m : 質量
- T : 質点系の運動エネルギーの和
- t : 時刻
- u : 速度 (衝突前)
- u' : 同上 (衝突後)
- x : 粉砕容器の上下壁またはボールの座標位置 (衝突前)
- x' : 同上 (衝突後)
- ω : 粉砕容器の振動角速度
- θ : 位相角

Table 1 (A) Record and Statistics of the simulation results.

1) GIVEN CONDITIONS			
NUMBER OF BALLS	"	3	"
MASS OF EACH BALL	"	100.00	g
ACCELERATION OF GRAVITY	"	980.00	CM/S ²
TOTAL CLEARANCE	"	1.00	CM
COEFFICIENT OF REPULSION	"	0.50	"
AMPLITUDE OF VIBRATION	"	0.40	CM
REVOLUTIONS PER MINUTE	"	1200.00	RPM
INITIAL PHASE ANGLE	"	0.60	RAD
MAX. NUMBER OF COLLISIONS	"	300	"
GAP ON COLLISION AT WALLS	"	0.00001	CM
DIVISION IN HALF CYCLE	"	300	"
INITIAL POSITION AND VELOCITY OF BALLS			
BALL No.	POSITION	VELOCITY	
1	0.100	0.000	
2	0.200	0.000	
3	0.300	0.000	

2) RECORD OF COLLISIONS

No.	TIME (SEC)	PLACE (CM)	LOCATION NO.	ENERGY (ERG)
1	0.197146E+02	0.980950E+01	1	0.962523E+05
2	0.328517E+02	0.195700E+00	2	0.104283E+06
3	0.445517E+02	0.212475E+00	1	0.293092E+05
4	0.504186E+02	0.287544E+00	3	0.409092E+05
5	0.594377E+02	0.295540E+00	2	0.408650E+05
6	0.759003E+02	0.329137E+00	1	0.388771E+04
7	0.988808E+02	0.459264E+00	3	0.196017E+03
8	0.260490E+01	0.495374E+00	4	0.193645E+06
9	0.265948E+01	0.901964E+00	3	0.204681E+06
10	0.270444E+01	0.898349E+00	8	0.610662E+05

291	0.623703E+00	0.970504E+00	3	0.277812E+02
292	0.624906E+00	0.100466E+01	4	0.228543E+06
293	0.624912E+00	0.100410E+01	3	0.254445E+06
294	0.624917E+00	0.100409E+01	4	0.875173E+02
295	0.624934E+00	0.100280E+01	3	0.380364E+04
296	0.625461E+00	0.965299E+00	2	0.175267E+06
297	0.625519E+00	0.965561E+00	3	0.801742E+05
298	0.625765E+00	0.961569E+00	4	0.446371E+05
299	0.626187E+00	0.933069E+00	3	0.680883E+04
300	0.626341E+00	0.923377E+00	2	0.421520E+04

3) SPECIAL DISTRIBUTION OF ENERGY ON COLLISIONS

LOCATION NO.	FREQUENCY	FREQ. PCT.	AVE. ENERGY (ERG)	CUM. ENERGY (ERG)	ENERGY PCT. (ERG)
1	63	21.00	0.01510	0.9515	28.23
2	99	33.00	0.01179	1.1629	34.21
3	98	33.00	0.00818	0.8092	24.02
4	39	13.00	0.01144	0.4464	13.24
TOTAL	300	100.00	0.01123	3.3701	100.00
					TIME 0.63 SEC
					POWER DRAFT 5.38 WATTS

4) ENERGY DISTRIBUTION ON THE RECORDED COLLISIONS

ENERGY LESS THAN (Joule)	PCT. ** NUMERICAL BASIS **	CUM. PCT.
0.1000E+03	0.00	0.00
0.2000E+03	1.67	1.67
0.4000E+03	2.00	3.67
0.8000E+03	2.00	5.67
0.1600E+04	0.33	6.00
0.3200E+04	2.00	8.00
0.6400E+04	4.00	12.00
0.1280E+05	3.67	15.67
0.2560E+05	6.00	21.67
0.5120E+05	9.00	30.67
0.1024E+06	9.67	40.33
0.2048E+06	4.33	44.67
0.4096E+06	4.67	49.33
0.8192E+06	8.67	58.00
0.1638E+07	11.33	69.33
0.3277E+07	22.67	92.00
0.6554E+07	8.00	100.00

Table 1(B) Record and Statistics of the simulation results.

1) GIVEN CONDITIONS					
NUMBER OF BALLS		3			
MASS OF EACH BALL		100.00		G	
ACCELERATION OF GRAVITY		980.00		CM/52	
TOTAL CLEARANCE		2.00		CM	
COEFFICIENT OF REPULSION		0.50			
AMPLITUDE OF VIBRATION		0.40		CM	
REVOLUTIONS PER MINUTE		1200.00		RPM	
INITIAL PHASE ANGLE		0.00		RAD	
MAX. NUMBER OF COLLISIONS		300			
GAP ON COLLISION AT WALLS		0.00010		CM	
DIVISION IN HALF CYCLE		500			
INITIAL POSITION AND VELOCITY OF BALLS					
BALL NO.	POSITION	VELOCITY			
1	0.100	0.000			
2	0.200	0.000			
3	0.300	0.000			
2) RECORD OF COLLISIONS					
NO.	TIME (SEC)	PLACE (CM)	LOCATION NO.	ENERGY (ERG)	
1	0.1965934E+02	0.9009905E+01	1	0.9625625E+05	
2	0.3285444E+02	0.1971065E+00	2	0.1082881E+04	
3	0.4454142E+02	0.2124816E+00	1	0.2931827E+05	
4	0.5040027E+02	0.2875532E+00	3	0.6091202E+05	
5	0.5941039E+02	0.2955486E+00	2	0.4087646E+05	
6	0.7066647E+02	0.3291306E+00	1	0.3897515E+04	
7	0.8882535E+02	0.4591440E+00	3	0.7970769E+05	
8	0.9230196E+01	-0.3292523E+00	1	0.2267937E+06	
9	0.9511959E+01	-0.1455247E+00	2	0.2414891E+06	
10	0.9696174E+01	-0.1719686E+00	1	0.1691419E+06	
中 略					
80	0.7311513E+00	0.9750490E+00	2	0.1016099E+05	
81	0.7639348E+00	0.3950294E+00	1	0.4789931E+05	
82	0.7668102E+00	0.3200646E+00	2	0.5106727E+05	
83	0.7876481E+00	-0.3988990E+00	1	0.9270363E+05	
84	0.7944443E+00	-0.5266402E+01	3	0.1322288E+05	
85	0.7945706E+00	-0.2401850E+00	1	0.1806645E+05	
86	0.7965068E+00	-0.1579139E+00	2	0.1884134E+05	
87	0.7966803E+00	-0.1619444E+00	2	0.1983183E+06	
88	0.7968279E+00	-0.1498076E+00	2	0.6518332E+05	
89	0.7968681E+00	-0.1461298E+00	3	0.2140591E+06	
90	0.7969134E+00	-0.1465620E+00	2	0.4811181E+05	
91	0.7970117E+00	-0.1485786E+00	1	0.8278256E+05	
92	0.7970665E+00	-0.1427020E+00	2	0.3822049E+05	
93	0.7971871E+00	-0.1383955E+00	1	0.4486813E+06	
94	0.7972668E+00	-0.1297609E+00	2	0.6368148E+04	
95	0.7977219E+00	-0.1103330E+00	2	0.1097687E+04	
96	0.7985724E+00	-0.7125064E+01	1	0.5785159E+03	
97	0.8001475E+00	0.6531034E+02	2	0.8002162E+02	
98	0.8006217E+00	0.3134494E+01	1	0.1688957E+04	
99	0.8008311E+00	0.4207963E+01	2	0.1021067E+03	
100	0.8011367E+00	0.5706685E+01	1	0.2243710E+02	
101	0.8029304E+00	0.1133697E+00	2	0.3541053E+06	
102	0.8023119E+00	0.1120473E+00	2	0.9383322E+06	
103	0.8023165E+00	0.1149892E+00	1	0.1382574E+06	
104	0.8023350E+00	0.1164443E+00	2	0.6212160E+04	
105	0.8027264E+00	0.1339112E+00	3	0.2827043E+06	
106	0.8025984E+00	0.1234921E+00	2	0.1254838E+06	
107	0.8027104E+00	0.1337477E+00	1	0.7643925E+05	
108	0.8028678E+00	0.1461391E+00	2	0.1289692E+05	
109	0.8029537E+00	0.1805049E+00	3	0.7893965E+04	
110	0.8033355E+00	0.1683804E+00	2	0.9709955E+02	
111	0.8391445E+00	0.1608420E+01	4	0.5608199E+04	
112	0.8708235E+00	0.1290117E+01	3	0.1797497E+04	
113	0.8831897E+00	0.873196E+00	2	0.7290377E+03	
114	0.1001444E+01	0.7230486E+01	1	0.1819094E+06	
115	0.1001820E+01	0.1101148E+00	2	0.4236604E+06	
116	0.1002133E+01	0.1061323E+00	1	0.1409265E+06	
117	0.1002398E+01	0.1018180E+00	3	0.2372893E+06	
118	0.1002586E+01	0.1419363E+00	2	0.1819094E+06	
119	0.1002901E+01	0.1427709E+00	1	0.7415706E+05	
120	0.1003128E+01	0.1707629E+00	3	0.7223461E+04	
121	0.1003526E+01	0.1858376E+00	2	0.1783429E+05	
122	0.1003819E+01	0.2036577E+00	3	0.2320495E+04	
123	0.1038695E+01	0.1604418E+01	4	0.9051363E+04	
124	0.1052646E+01	0.1505819E+01	3	0.2192288E+04	
125	0.1090907E+01	0.4157786E+00	2	0.9323047E+03	
126	0.1099631E+01	-0.1832920E+01	1	0.9074274E+06	
127	0.1099833E+01	0.2247434E+02	2	0.4379518E+06	
128	0.1099999E+01	0.1422144E+03	1	0.1484553E+06	
129	0.1100111E+01	0.5811351E+01	2	0.6049984E+04	
130	0.1102608E+01	0.2075694E+02	3	0.2437254E+06	
131	0.1102897E+01	0.7035270E+03	2	0.1308183E+06	
132	0.1106280E+01	0.7030799E+00	1	0.6662748E+05	
133	0.1106789E+01	0.3767488E+00	2	0.8801289E+04	
134	0.1107449E+01	0.4043791E+00	3	0.5630295E+04	
135	0.1109394E+01	0.5089413E+00	2	0.8782904E+02	
136	0.1120289E+01	0.1182819E+00	1	0.3356326E+06	
137	0.1120374E+01	0.1866815E+00	2	0.3352696E+06	
138	0.1120364E+01	0.1771775E+00	1	0.1280096E+06	
139	0.1120642E+01	0.3794659E+00	2	0.4241177E+04	
140	0.1120939E+01	0.5765437E+00	3	0.2399989E+06	
141	0.1120979E+01	0.5767977E+00	2	0.1121314E+06	
142	0.1122109E+01	0.4379331E+00	3	0.3804208E+02	
143	0.1124701E+01	-0.1663543E+00	1	0.2663690E+06	
144	0.1124296E+01	0.1146315E+00	2	0.1479436E+06	
145	0.1124301E+01	0.1149637E+00	3	0.8144013E+05	
146	0.1126743E+01	0.1166999E+00	2	0.4712776E+03	
147	0.1128372E+01	0.1635017E+01	4	0.6047395E+05	
148	0.1130243E+01	0.6024561E+00	3	0.1807142E+05	
(以下計算続行不可能)					

(以下計算続行不可能)

Table 1 (C) Record and Statistics of the simulation results.

1) GIVEN CONDITIONS

NUMBER OF BALLS	=	3	-
MASS OF EACH BALL	=	100.00	G
ACCELERATION OF GRAVITY	=	980.00	CM/S2
TOTAL CLEARANCE	=	2.00	CM
COEFFICIENT OF REPULSION	=	0.50	-
AMPLITUDE OF VIBRATION	=	0.60	CM
REVOLUTIONS PER MINUTE	=	1200.00	RPM
INITIAL PHASE ANGLE	=	0.00	RAD
MAX. NUMBER OF COLLISIONS	=	200	-
GAP ON COLLISION AT WALLS	=	0.00100	CM
DIVISION IN HALF CYCLE	=	200	-
INITIAL POSITION AND VELOCITY OF BALLS			
BALL NO.	POSITION	VELOCITY	
1	0.100	0.000	
2	0.200	0.000	
3	0.400	0.000	

2) RECORD OF COLLISIONS

NO.	TIME (SEC)	PLACE (CM)	LOCATION NO.	ENERGY (ERG)
1	0.1307608E-02	0.3916192E-01	1	0.7146697E-06
2	0.3912535E-02	0.3981260E-00	2	0.1759936E-05
3	0.391331E-02	0.1362326E-00	3	0.1766889E-06
4	0.3991626E-02	0.3930297E-00	2	0.3224321E-05
5	0.8697012E-02	0.214671E-03	1	0.6128336E-06
6	0.2801708E-01	0.1778943E-01	4	0.3028396E-06
7	0.3076031E-01	0.1422920E-01	3	0.4562757E-06
8	0.3179665E-01	0.1326785E-01	2	0.2496618E-06
9	0.4126247E-01	0.1229110E-01	3	0.1380529E-06
10	0.5001485E-01	0.7121091E-02	1	0.9248461E-06
11	0.5224139E-01	0.6190876E-00	2	0.6367419E-06
中 略				
190	0.5596542E-00	0.2503428E-01	1	0.3933892E-06
191	0.6000232E-00	0.6210920E-01	3	0.6496579E-06
192	0.6002663E-00	0.5222299E-01	2	0.5362105E-06
193	0.6006742E-00	0.2177727E-01	1	0.2189973E-06
194	0.6009310E-00	0.1076945E-00	3	0.2137192E-05
195	0.6014135E-00	0.1353663E-00	2	0.5755782E-05
196	0.6017849E-00	0.1677933E-00	3	0.1140774E-05
197	0.6246566E-00	0.2074879E-01	4	0.7900387E-06
198	0.6260324E-00	0.1870844E-01	3	0.7409522E-06
199	0.6272276E-00	0.1827935E-01	4	0.2145252E-06
200	0.6276379E-00	0.1662604E-01	2	0.3933627E-06

3) SPECIAL DISTRIBUTION OF ENERGY ON COLLISIONS

LOCATION NO.	FREQUENCY	FREQ. PCT.	AVE. ENERGY (JOULE)	CUM. ENERGY (JOULE)	ENERGY PCT. (JOULE)
1	37	18.50	0.02411	2.10020	26.00
2	65	32.50	0.03762	2.4585	31.93
3	63	32.00	0.03111	1.6912	25.86
4	34	17.00	0.03672	1.2486	16.21
TOTAL	200	100.00	0.03850	7.7063	100.00

TIME 0.63 SEC

POWER DRAFT 12.27 WATTS

4) ENERGY DISTRIBUTION ON THE RECORDED COLLISIONS

ENERGY LESS THAN (JOULE)	PCT. **	CUM. PCT. NUMERICAL BASIS **
0.2000E-05	0.00	0.00
0.4000E-05	0.50	0.50
0.8000E-05	0.00	0.50
0.1600E-04	0.50	1.00
0.3200E-04	0.00	1.00
0.6400E-04	0.50	1.50
0.1280E-03	0.00	1.50
0.2260E-03	3.00	4.50
0.5120E-03	2.50	7.00
0.1024E-02	5.00	12.00
0.2048E-02	7.50	19.50
0.4096E-02	7.00	26.50
0.8192E-02	7.50	34.00
0.1638E-01	1.50	35.50
0.3277E-01	16.00	53.50
0.6554E-01	32.00	72.50
0.1311E-00	24.50	100.00

Table 1 (D) Record and Statistics of the simulation results.

1) GIVEN CONDITIONS					
NUMBER OF BALLS	=	5	-		
MASS OF EACH BALL	=	100.00	G		
ACCELERATION OF GRAVITY	=	980.00	CM/SEC ²		
TOTAL CLEARANCE	=	2.00	CM		
COEFFICIENT OF REPULSION	=	0.80	-		
AMPLITUDE OF VIBRATION	=	0.60	CM		
REVOLUTIONS PER MINUTE	=	1200.00	RPM		
INITIAL PHASE ANGLE	=	0.00	RAD		
MAX. NUMBER OF COLLISIONS	=	200	-		
GAP ON COLLISION AT WALLS	=	0.00001	CM		
DIVISION IN HALF CYCLE	=	500	-		
INITIAL POSITION AND VELOCITY OF BALLS					
BALL NO.	POSITION	VELOCITY			
1	0.200	0.000			
2	0.400	0.000			
3	0.600	0.000			
4	0.800	0.000			
5	1.000	0.000			
2) RECORD OF COLLISIONS					
NO.	TIME (SEC)	PLACE (CM)	LOCATION NO.	ENERGY (ERG)	
1	0.263564E-02	0.195343E+00	1	0.981453E+05	
2	0.4160367E-02	0.391318E+00	2	0.158995E+06	
3	0.583228E-02	0.583332E+00	3	0.128786E+06	
4	0.591786E-02	0.406193E+00	1	0.414734E+05	
5	0.1689975E-02	0.771023E+00	4	0.104316E+06	
6	0.179429E-02	0.534334E+00	2	0.692699E+05	
7	0.975409E-02	0.953580E+00	5	0.844964E+05	
8	0.101271E-01	0.776009E+00	3	0.578216E+05	
9	0.125109E-01	0.949381E+00	4	0.482438E+05	
10	0.245315E-01	0.201269E+01	6	0.344041E+06	
中 略					
191	0.2218075E+00	0.2021607E+01	3	0.376160E+06	
192	0.222261E+00	0.205986E+01	4	0.344238E+06	
193	0.222729E+00	0.1917507E+01	2	0.284615E+06	
194	0.222782E+00	0.206642E+01	5	0.304092E+06	
195	0.223431E+00	0.195010E+01	3	0.268017E+06	
196	0.223612E+00	0.195331E+01	4	0.242911E+06	
197	0.223932E+00	0.208020E+01	6	0.132614E+06	
198	0.224712E+00	0.1968170E+01	5	0.217082E+06	
199	0.225164E+00	0.196457E+01	6	0.885731E+05	
200	0.225164E+00	0.196457E+01	3	0.865012E+05	
3) SPECIAL DISTRIBUTION OF ENERGY ON COLLISIONS					
LOCATION NO.	FREQUENCY	FREQ. PCT.	AVE. ENERGY (JOULE)	CUM. ENERGY (JOULE)	ENERGY PCT. (JOULE)
1	22	11.00	0.03019	0.6641	13.34
2	35	17.50	0.03099	1.0246	21.78
3	46	23.00	0.03006	0.9227	18.53
4	37	18.50	0.02262	0.8822	17.72
5	36	18.00	0.02829	0.9205	18.78
6	22	11.00	0.02343	0.5155	10.55
TOTAL	200	100.00	0.02490	4.9795	100.00
TIME 0.23 SEC					
POWER DRAFT 22.02 WATTS					
4) ENERGY DISTRIBUTION ON THE RECORDED COLLISIONS					
ENERGY LESS THAN (JOULE)	PCT. **	CUM. PCT. NUMERICAL BASIS **			
0.4000E-05	0.00	0.00			
0.8000E-05	0.50	0.50			
0.1600E-04	0.50	1.00			
0.3200E-04	0.50	1.50			
0.6400E-04	1.50	3.00			
0.1280E-03	4.50	7.50			
0.2560E-03	4.00	11.50			
0.5120E-03	8.00	19.50			
0.1024E-02	6.50	26.00			
0.2048E-02	4.50	30.50			
0.4096E-02	0.50	31.00			
0.8192E-02	2.50	33.50			
0.1638E-01	10.00	43.50			
0.3277E-01	20.50	64.00			
0.6554E-01	29.50	93.50			
0.1311E+00	6.50	100.00			

Table 1 (E) Record and Statistics of the simulation results.

1) GIVEN CONDITIONS

NUMBER OF BALLS	=	3	-
MASS OF EACH BALL	=	100.00	G
ACCELERATION OF GRAVITY	=	0.00	CM/S ²
TOTAL CLEARANCE	=	2.00	CM
COEFFICIENT OF REPULSION	=	0.50	-
AMPLITUDE OF VIBRATION	=	0.40	CM
REVOLUTIONS PER MINUTE	=	1200.00	RPM
INITIAL PHASE ANGLE	=	0.00	RAD
MAX. NUMBER OF COLLISIONS	=	300	-
DIVISION IN HALF CYCLE	=	20	-
INITIAL POSITION AND VELOCITY OF BALLS			
BALL NO.	POSITION	VELOCITY	
1	0.200	0.000	
2	0.400	0.000	
3	0.600	0.000	

2) RECORD OF COLLISIONS

NO.	TIME (SEC)	PLACE (CM)	LOCATION NO.	ENERGY (ERG)
1	0.4179851E-02	0.2000000E+00	1	0.6873988E+05
2	0.7294072E-02	0.4000000E+00	2	0.1753231E+05
3	0.1144637E-01	0.6000000E+00	3	0.9349943E+05
4	0.3831134E-01	0.1613495E+01	3	0.2233091E+05
5	0.4466475E-01	0.9999998E+00	2	0.3020796E+03
6	0.8803026E-01	0.1592323E+01	1	0.4522766E+04
7	0.8370839E-01	0.1611271E+01	4	0.1965038E+05
8	0.8619009E-01	0.1599907E+01	3	0.1323871E+05
9	0.8816349E-01	0.1567442E+01	2	0.1639459E+05
10	0.9109911E-01	0.1584035E+01	3	0.1482929E+04
11	0.1311400E+00	0.1721357E+01	4	0.6483498E+05
12	0.1382106E+00	0.1544220E+01	1	0.6301598E+05
.....				
251	0.2834747E+01	0.1381218E+01	2	0.7227554E+05
252	0.2834933E+01	0.1381845E+01	3	0.1162064E+06
253	0.2835182E+01	0.1369022E+01	2	0.1470097E+05
254	0.2836907E+01	0.3042941E+00	1	0.2498213E+06
255	0.2859712E+01	0.3102509E+00	2	0.2204488E+06
256	0.2867009E+01	0.8982100E+00	3	0.7493258E+05
257	0.2903594E+01	0.1651118E+00	1	0.1105391E+06
258	0.2912127E+01	0.8973947E+00	2	0.1838174E+06
259	0.2916298E+01	0.7392139E+01	4	0.1210238E+06
300	0.2928333E+01	0.1637480E+01	3	0.2250992E+06

3) SPECIAL DISTRIBUTION OF ENERGY ON COLLISIONS

LOCATION NO.	FREQUENCY	FREQ. PCT.	AVE. ENERGY (JOULE)	CUM. ENERGY (JOULE)	ENERGY PCT. (JOULE)
1	44	14.67	0.01288	0.5668	23.71
2	97	32.33	0.00583	0.6630	27.73
3	102	34.00	0.00426	0.6392	26.70
4	57	19.00	0.00917	0.5226	21.86
TOTAL	300	100.00	0.00797	2.3905	100.00

TIME 2.93 SEC

POWER DRAFT 0.82 WATTS

4) ENERGY DISTRIBUTION ON THE RECORDED COLLISIONS

ENERGY LESS THAN (JOULE)	PCT. ** NUMERICAL BASIS **	CUM. PCT.
0.1000E-05	2.00	2.00
0.2000E-05	1.00	3.00
0.4000E-05	1.67	4.67
0.8000E-05	0.67	5.33
0.1600E-04	1.33	6.67
0.3200E-04	3.33	10.00
0.6400E-04	2.33	12.33
0.1280E-03	2.33	14.67
0.2560E-03	3.67	18.33
0.5120E-03	5.33	23.67
0.1024E-02	3.00	26.67
0.2048E-02	8.67	35.33
0.4096E-02	9.00	44.33
0.8192E-02	18.67	61.00
0.1638E-01	23.67	84.67
0.3277E-01	13.00	97.67
0.6554E-01	2.33	100.00

Table 1 (F) Record and Statistics of the simulation results.

1) GIVEN CONDITIONS

NUMBER OF BALLS	=	3	-
MASS OF EACH BALL	=	100.00	G
ACCELERATION OF GRAVITY	=	0.00	CM/S ²
TOTAL CLEARANCE	=	2.00	CM
COEFFICIENT OF REPULSION	=	0.50	-
AMPLITUDE OF VIBRATION	=	0.60	CM
REVOLUTIONS PER MINUTE	=	1200.00	RPM
INITIAL PHASE ANGLE	=	0.00	RAD
MAX. NUMBER OF COLLISIONS	=	200	-
GAP ON COLLISION AT WALLS	=	0.00100	CM
DIVISION IN HALF CYCLE	=	200	-
INITIAL POSITION AND VELOCITY OF BALLS			
BALL NO.	POSITION	VELOCITY	
1	0.100	0.000	
2	0.200	50.000	
3	0.400	0.000	

2) RECORD OF COLLISIONS

NO.	TIME (SEC)	PLACE (CM)	LOCATION NO.	ENERGY (ERG)
1	0.1319102E-02	0.1000000E-00	1	0.2023799E-06
2	0.4000001E-02	0.3999999E-00	3	0.4667500E-05
3	0.4000001E-02	0.8001201E-00	3	0.1839444E-06
4	0.4014499E-02	0.400538E-00	3	0.455448E-05
5	0.2323885E-01	0.1880992E-01	4	0.8518216E-06
6	0.2785267E-01	0.1558193E-01	3	0.7507202E-06
7	0.3003162E-01	0.1369741E-01	2	0.3265713E-06
8	0.3101349E-01	0.1167951E-01	4	0.1120879E-06
9	0.3353973E-01	0.1379859E-01	3	0.1357696E-06
10	0.5037761E-01	0.2993900E-01	1	0.7475297E-06
11	0.5154562E-01	0.2582493E-01	2	0.8022193E-06
12	0.5333658E-01	0.2455928E-01	1	0.2286509E-06
13	0.5890113E-01	0.5129462E-01	3	0.2376712E-06
中 略				
190	0.7986667E-00	-0.9909775E-01	1	0.8841810E-06
191	0.7990293E-00	-0.4440194E-01	2	0.9798676E-06
192	0.7993186E-00	-0.5030475E-01	1	0.3416862E-06
193	0.8006765E-00	0.2082703E-01	2	0.1263908E-02
194	0.8051529E-00	0.4336676E-00	3	0.5980111E-06
195	0.8028663E-00	0.6371635E-00	2	0.1686222E-06
196	0.8236667E-00	0.2099046E-01	4	0.8841811E-06
197	0.8240293E-00	0.2084393E-01	3	0.9198675E-06
198	0.8243186E-00	0.2050308E-01	4	0.3916875E-06
199	0.824679E-00	0.1809108E-01	3	0.1263938E-05
200	0.8301529E-00	0.1367373E-01	2	0.3980182E-06

3) SPECIAL DISTRIBUTION OF ENERGY ON COLLISIONS

LOCATION NO.	FREQUENCY	FREQ. PCT.	AVE. ENERGY (J/CM ²)	CUM. ENERGY (J/CM ²)	ENERGY PCT. (J/CM ²)
1	33	16.50	0.05925	1.9553	21.47
2	65	32.50	0.03903	2.5369	27.86
3	64	32.00	0.03264	2.5595	28.11
4	34	17.00	0.06042	2.0543	22.56
TOTAL	200	100.00	0.04553	9.1059	100.00
TIME 0.83 SEC					
POWER DRAFT 10.97 WATTS					

4) ENERGY DISTRIBUTION ON THE RECORDED COLLISIONS

ENERGY LESS THAN (J/CM ²)	PCT. ** NUMERICAL	CUM. PCT. BASIS **
0.5120E-03	0.00	0.00
0.1028E-02	0.50	0.50
0.2048E-02	15.50	16.00
0.4098E-02	0.00	16.00
0.8192E-02	1.00	17.00
0.1638E-01	1.50	18.50
0.3277E-01	17.50	36.00
0.8554E-01	71.00	67.00
0.1311E-00	32.00	100.00

ロータリフィーダの閉塞特性

Feed Stoppage Characteristic of Rotary Feeder

上滝 具貞*

Tomosada Jotaki

伊達木新三**

Shinzō Dateki

富田 侑嗣*

Yūji Tomita

森畠 正文***

Masafumi Morihata

Summary

Effect of powder head in a feed tank upon performance of a rotary feeder and its feed stoppage characteristic are investigated using P. V. C. powder of mean size of 163 μm . Back pressure for the feeder is changed from 0 to 4000 mmAq, the head in the feed tank from 300 to 2100 mm and the revolution of the feeder from 10 to 210 rpm. When the back pressure is not applied, the feed rate increases with an increase in head within 1200 mm and saturates above it. The feed stoppage occurs when gauge pressure at the feeder inlet reaches nearly half a value of the product of bulk specific weight and head in the tank. The feed rate in large revolution range can be improved by applying the back pressure above the stoppage pressure.

摘 録

粒径 163 μm の P. V. C. パウダーを使ってロータリフィーダの閉塞特性、ヘッド特性を実験的に研究している。背圧はフィーダ出入口差に関して最大 4000mmAq、供給タンク内の粉体ヘッドは最大 2100mm の範囲内で、ロータリフィーダ回転数は 10 から 210rpm の間で変化させている。フィーダ出口が大気開放の場合、供給量に及ぼすヘッドの効果は 1200mm 以内ではヘッドの増加と共に増えるがこの付近から飽和する。閉塞はすべての回転数についてフィーダ出入口差圧が 100 から 700mmAq の間で生じる。閉塞状態でのフィーダ入口圧は回転数に無関係でヘッドにほぼ比例し、供給タンク内の粉体圧分布は液体的である。この場合比例定数は粉体の見掛け比重量の約半分に対応している。閉塞領域を越えて背圧を増加すると、供給量の回転数特性において右下りの部分がフィーダ出口大気開放の場合より改善されることがある。

1. 序 論

ロータリフィーダは、回転式ドアとよく似た原理であるが、垂直方向の落下型供給器であって定量供給と上下二室の気密保持ができることが特長とされている。筆者らは既にその回転数特性、背圧特性および漏気量と圧力損失などに関して、粉体と粒体の両方につき実験的、理論的研究を行なった¹⁾。その際、粒径 150 μm のガラスビーズの供給量の背圧特性について、ヘッドが 565mm のとき背圧 200 mmAq 付近で閉塞し供給量が零になり、その前後では背圧に反比例的に変化することを報告した。なお、この閉塞は粒径約 6.6mm の大豆では発生していない。本報告はこのような閉塞現象を中心にして、背圧特性、ヘッド特性に関して同一のロータリフィーダを使っての実験的研究について述べるものである。

2. 実験装置と方法

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。供試ロータリフィーダの主な仕様を Table 1 に示す。粉体は供給タンクから補助タンクへ落下充填され、補助タンクの粉体は実験中供給タンク内の粉体のヘッドが一定となるように供

* 九州工大 (〒804 北九州市戸畑区仙水町)

TEL 093-871-1931

** 横浜ゴム

*** 関西電力

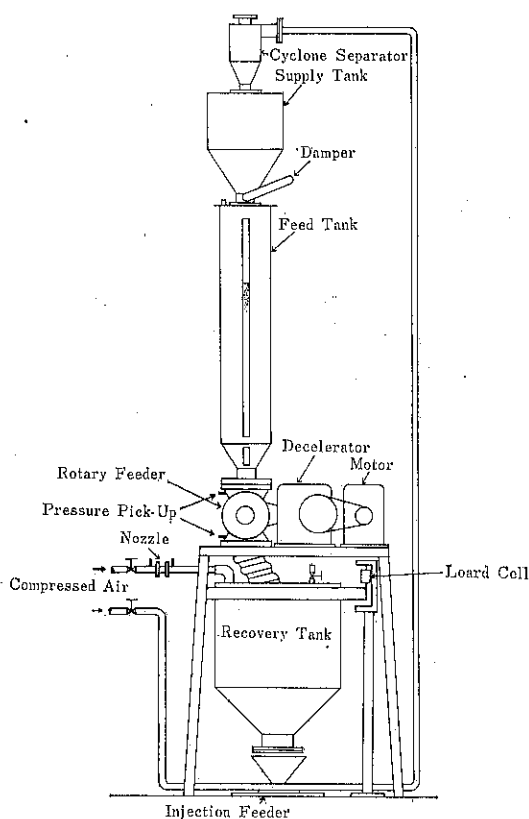


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

Table 1 Specification of rotary feeder

Radius of Rotor	75 mm
Number of Vane	8
Longitudinal width of inlet	150 mm
Transverse width of inlet	82 mm
Clearance	10/100
Total volume of wheel room	1.6 l/rev

給される。ロータリフィーダと捕集用タンクはフレキシブル管で接続され、捕集用タンクに排出される粉体はロードセルにより計量される。背圧特性はコンプレッサの加圧空気を密閉された捕集用タンクにかけて調べられ、その空気流量は四分円ノズルにより計られる。ロータリフィーダ前後の圧力は水柱もしくは水銀柱マノメタにより計測される。供給タンクは内径405mm、高さ2200mmであり、供給タンク内の粉面はタンクに設けられたスリット状の窓を通じて一定に保たれるよう監視される。捕集用タンク下部に位置するインゼクションフィーダは供給タンクおよび補助タンクへの粉体の返し用である。

ロータリフィーダ回転数 n は 10 から 220rpm の範囲で、供給タンクのヘッド H は 300 から 2100 mm の範囲で変化させている。ここで背圧 Δp とはロータリフィーダ出口圧と入口圧の差と定義する。したがって捕集タンクの弁を開いて大気開放にしている場合はロータリフィーダ入口の方が出口より高いので Δp は負となる。この Δp をコンプレッサを使って 0 から 4000mmAq の範囲で変化させている。以下ではこのようにフィーダ出口をコンプレッサにより加圧することを逆圧をかけるともいう。使用した粉粒体の粒径と見掛け比重量を Table 2 に示す。

Table 2

	Particle size	Bulk specific weight kg/m ³
P. V. C powder	166 μ m	524
pellet	3.22mm	585

3. 実験結果

3.1 供給量と背圧

Fig. 2 は粉体の代表の P. V. C パウダーと粒体の代表のペレットについて、ヘッドが 2100mm の場合の供給量 G を背圧 Δp に対してプロットしたものである。粉体では $n=60$ rpm は G が最大で、容積効率 $\eta_v=77\%$ 、粒体では G は最大ではないが $\eta_v=100\%$ である。粒体では G は Δp の増加と共に減少の傾向があるが、実験範囲内で零にはなっていないのに対し、粉体では比較的小さな Δp で G が零になって供給不能の現象が生じている。更に興味深いことは、粉体の場合、捕集用タンクの大気開放状態より閉塞までの Δp の上昇区間では G は減少の傾向がみられるのに対し、閉塞終了後の G はその開始前よりも大きく、ある程度 Δp が大きくなって緩やかな減少の傾向がみられることである。粒体では他の回転数、ヘッドについても閉塞現象はみられなかった。

Fig. 3 は粉体について $H=2100$ mm のとき n をパラメタとして G を Δp に対してプロットしたものである。図によると閉塞を生じさせる Δp は n にあまり関係して

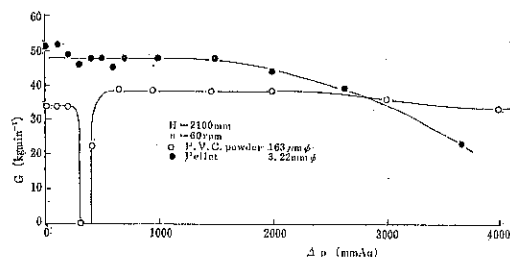


Fig. 2 Feed rate for P. V. C. powder and pellet versus back pressure.

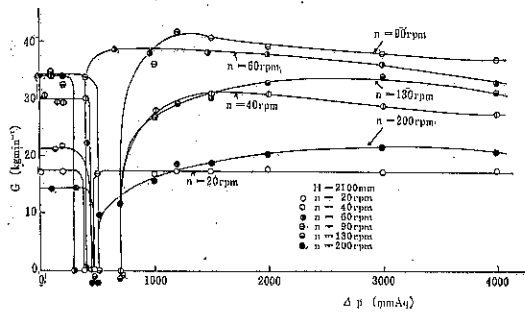


Fig. 3 Feed rate for P. V. C. powder versus back pressure.

いないことがわかる。供給タンク内を大気開放の場合 $n=60\text{rpm}$ で G は最大となり、逆圧が加えられる場合もこの回転数付近を境として現象が変化している。すなわち $n < 60\text{rpm}$ では G は閉塞領域以外ではほとんど Δp に関係していない。これに対して $n > 60\text{rpm}$ では Δp と共に G は大体増加の傾向が見られる。これは Δp による空気流によって供給タンク内の粉体が流動化され、フィーダへの落下初速度が増すため G が同じ n に対して増加するものと考えられる。なお、 $n < 60\text{rpm}$ の場合 Δp に関係しないのは、流動性の如何にかかわらず低回転のため η_v が 100% に近いためであるといえる。

Fig. 4 は $n=60\text{rpm}$ の場合ヘッドをパラメタにして G を Δp に対してプロットしたもので、閉塞領域前後ではヘッドが大きい場合 G がわずかに大きいようである。なお図からわかるように、 $H=300\text{mm}$ の場合 Δp の小さな値でも閉塞が生じている。後述するように、閉塞に最も重要な影響を与えるのはフィーダ入口の圧力であるが、この圧力は回転数が同じであれば与えられた Δp に対してヘッドがある値よりも大きくなるとヘッドに関係なく同じ値をとると考えられる。閉塞は供給タンク内の粉体重量のフィーダ入口圧による保持、架橋と考えられるのでヘッドが小さい場合には小さな Δp で閉塞が生ずると推察される。

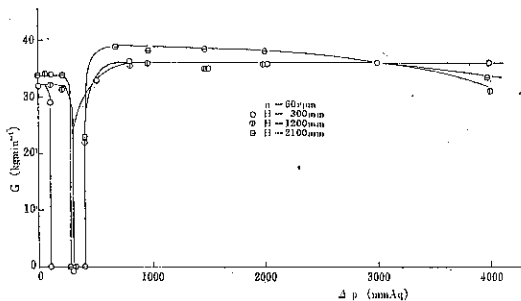


Fig. 4 Feed rate for P. V. C. powder versus back pressure.

3.2 供給量とヘッド

Fig. 5 は大気開放の場合 n をパラメタとして G をヘッドに対してプロットしたものである。図より $H=1200\text{mm}$ 以上ではほとんど G はヘッドに無関係であることがわかる。 G を供給タンク底部粉体圧に置き換えてみれば Janssen の関係と同じであることがわかる。逆圧をかけない場合 H がもし G に影響を及ぼすとするれば粉体のフィーダへの落下初速度と考えられる。周知のごとく粉体圧は Janssen の式によってあるヘッド以上になると飽和するので、この速度が粉体圧に比例するとすればその比例限度が 1200mm に対応する粉体圧といえる。つまり G に対する H の効果は粉体圧の飽和ヘッド内においてのみと思われる。Fig. 6 はこの場合の背圧 ($-\Delta p$) を H をパラメタとして n に対してプロットしたものである。この場合捕集用タンクは大気開放であるからフィーダ入口圧の方が出口圧より高い場合である。

G の n に対する関係は Fig. 7 で示すように大気開放の場合の ($-\Delta p$) の n に対する関係と同じ傾向である。これは $n=60\text{rpm}$ 付近で G が最大となりしたがって置

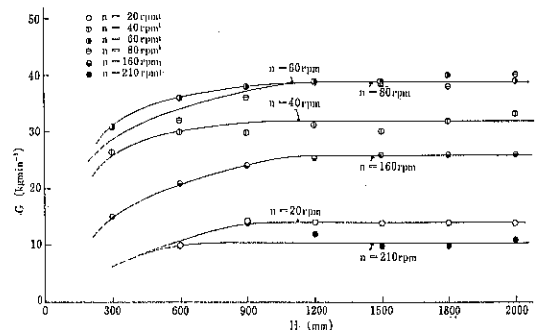


Fig. 5 Feed rate for P. V. C. powder versus head in the feed tank when the recovery tank is open to the atmosphere.

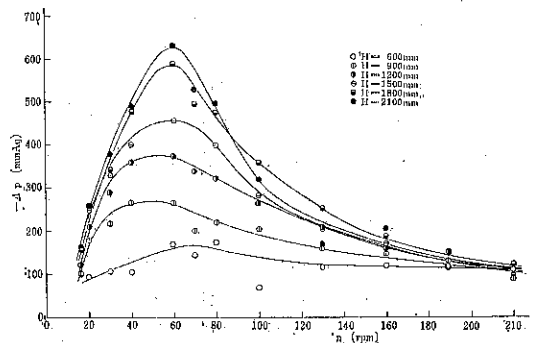


Fig. 6 Pressure drops for P. V. C. powder versus revolution of the feeder when the recovery tank is open to the atmosphere.

換空気量も最大となり、この空気がフィーダ入口部でいわばロータリフィーダによって圧縮され圧力が上昇するためといえる。HはGには大きな効果を及ぼさないのに対して $(-dp)$ に対して影響しているのは、Hが大きいほどフィーダを上へ抜ける漏れ空気流に対する抵抗が大きいためである。

3.3 供給量と回転数

Fig. 7は dp をパラメタとしてGを n に対してプロットしたものである。点線は捕集用タンクを大気開放のときで、 dp は負であり各 n に対して一定ではない。逆圧をかけることによって大気開放の場合よりGが大きくなりうるということがわかる。これは前述のように、 dp により供給タンク内の粉体が流動化されるためといえる。大気開放の場合より小さいのは、供給タンク内が十分に流動化されてなく、フィーダ入口部ではむしろ粉体圧とフィーダ入口圧により粉体が圧縮され漏れ空気によるバブリング現象などが生じているためと思われる。なお $n > 60 \text{rpm}$ では n の増加と共に dp が大きい場合ほど漏れ空気量が増大し、ロータリフィーダの密封効果が悪くなる。

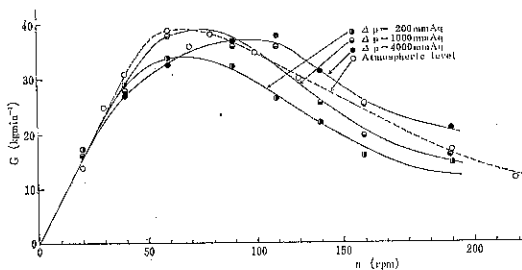


Fig. 7 Feed rate for P. V. C. powder versus revolution when the back pressure is applied.

3.4 閉塞現象

閉塞現象は粉体の場合に特有のものであり、供給タンク内の粉体のヘッドに関係し回転数にあまり関係していないことがわかった。また閉塞時における漏れ空気量は約 $5 \times 10^{-2} \text{m}^3 \text{min}^{-1}$ でありフィーダ入口面積で換算した速度は 0.11ms^{-1} である。他方、供試粉体粒子の浮遊速度は 0.6ms^{-1} であるのでフィーダ入口部での漏れ空気による落下粉体保持による閉塞とは考えがたい。供給タンク内での見掛けの通過速度は 0.017ms^{-1} であるが粉体があるために実際には更に大きい。この割合は、粉体の見掛け比重と真比重の比に関係するとすれば $1400/524 \approx 2.7$ であり、この程度では供給タンク内粉体の浮遊状態による閉塞は生じえない。フィーダ入口部で浮遊速度に達するためには約 $28 \text{m}^3 \text{min}^{-1}$ の漏れ空気

流が必要で、この条件は $n \geq 200 \text{rpm}$ 、 $dp \geq 4000 \text{mmAq}$ の場合に実現する。Fig. 3で $n = 200 \text{rpm}$ で dp が大きいとき減少効果がみられるのはこのためであろう。供給タンク内が浮遊状態になるには、更に大きな漏れ空気量が必要である。要するに本実験での閉塞現象は漏れ空気流によるとは考えられず、背圧による供給タンク内粉体の静的つり合いによると考えられる。すなわち閉塞に最も大きな寄与をしているのは、供給タンク内の粉体ヘッドとフィーダ入口圧力であるといえる。

Fig. 8は閉塞領域付近の実験結果を示すもので、回転数を一定にして dp を閉塞開始から上下に増減したときのフィーダ入口部の大気との差圧 dp' を各ヘッドに対してプロットしたものである。矢印の範囲は一つの実験で得られた閉塞時の dp' の範囲であり黒い点は閉塞開始点を示す。斜線は平均の閉塞範囲である。閉塞は各ヘッドに対してほぼ同じ dp' で開始しているといえる。閉塞の範囲はHが大きい場合ほど広い。閉塞開始点の範囲についても同様である。拡がりのばらつきは静的つり合いが、漏れ空気流やフィーダ等の震動による動的攪乱により不規則に乱されるからである。

Fig. 9は閉塞時の dp' をHに対してプロットしたものである。 n には無関係のはずであるが、図は 60rpm

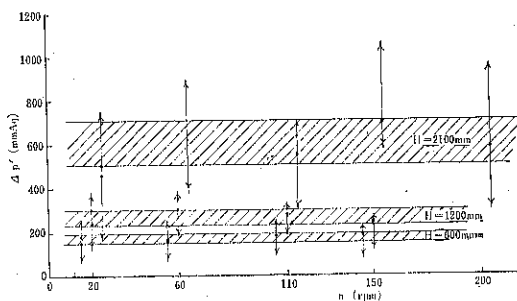


Fig. 8 Feed stoppage characteristic for P. V. C. powder.

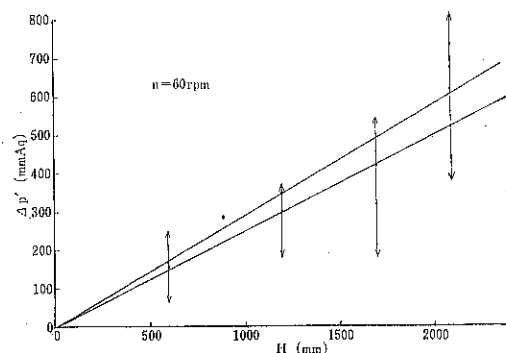


Fig. 9 Feed stoppage characteristic for P. V. C. powder.

の場合のデータを示した。 $\Delta p'$ はHとほぼ比例関係にあるといえる。Janssenの理論によるとHに対して飽和傾向が見られるべきであるが、供給タンクの閉塞についてはこのような傾向はないといえる。3.2節で大気開放の場合 1200mm で飽和が推測された。つまり閉塞時の供給タンク内の粉体層は液体のような圧力分布を有することがわかる。 $\Delta p'$ とHの比例定数は約 260kgm^{-3} となる。これは見掛け比重量の約半分に対応している。すなわちこの場合の閉塞は $\Delta p'$ が粉体の見掛け比重量と粉体のヘッドの積の約半分 $\gamma_s H/2$ のとき生じていることになる。

閉塞現象には粒度も影響するであろうし、仮に上述の仮説が成り立つとしても、実際にはフィーダによる圧力損失 Δp 、漏れ空気量QおよびヘッドHの関係を必要とする。これは今後の課題としたい。

4. 結 論

本研究の結果として次のことが結論できるであろう。供給タンク内粉体層の高さはフィーダ出口が大気開放のときこの高さが、Janssen の関係から推定されるような、タンク底部の粉体圧を飽和させる高さ以上であれば供給量に影響しない。逆圧をかけることによって供給量は容積効率が100%以下の領域、特に供給量の回転数特

性が右下りの部分で改善されうる。背圧が300~700mm Aq の範囲で供給量の閉塞が生じ、閉塞状態でのフィーダ入口圧は粉体のヘッドと見掛け比重量の約半分との積の値に近い。

本研究は長副、森脇および西田の各氏らの協力の下に行なわれたもので、同氏らに深甚の謝意を表する。

「記号欄」

G	供給量 (kgmin^{-1})
H	供給タンク内のヘッド (mm)
n	ロータリフィーダ回転数 (rpm)
Δp	ロータリフィーダ入口圧と出口圧の差 (mmAq)
$\Delta p'$	ロータリフィーダ入口のゲージ圧 (mmAq)
Q	漏れ空気量 ($\text{m}^3\text{min}^{-1}$)
V ₀	一回転ロータ容量 (ℓ/rev)
γ_s	液体の見掛け比重量 (kgm^{-3})
η_v	容積効率 ($\frac{G}{nV_0\gamma_s} \times 10^3$)

「引用文献」

- 1) 上滝, 富田: 粉体工学研究会誌, 7, No. 6, 534 (1970).

ヨーロッパからの通信

POWTECH '73に出展して



POWTECH '73 は Powder Advisory Centre のスポンサーにより S. 48. 3. 27~3. 29 の3日間ハロゲ

イトのロイヤルホールにて開催された。入場は入場招待券持参者のみに限られていて、一般公開ではありません。POWTECH は展示会とコンフェレンスからなっていて、展示の方では約110社がこれに参加した。日本からの参加は細川鉄工所のみで日本人の間ではあまり知られていないのか某社のドイツ駐在員の人が一人来られたのが唯一の日本人入場者でした。しかし、一般公開でないために、非常に密度の高い展示紹介ができて多数の引合があった。

出品された機械で特に目新しいものはありませんでしたが、傾向としては各社とも輸送やハンドリングに力を入れているようでした。各社ともそれぞれの分野で専門化する傾向にあり、総合的なシステムエンジニアリングを旗印としているのは細川とスターテ・バントの2社のみでした。

次回は1975年に約1.5倍のスケールで開催されるそうです。(T・S)

粉体用連続混合システムの開発

Development of the continuous mixing system of powders

横山 藤平* 浦山 清* 北村 隆*
Tohei Yokoyama Kiyoshi Urayama Takashi Kitamura

1) はじめに

化学工業をはじめ広い分野において、固体(粉粒体)を混合する操作は、古くから用いられてきた技術である。しかしながら、この混合操作を連続化する試みは一部を除いて遅々として進んでいない。これは、回分操作で行なえば、時間さえかければ混合するという安心感もあるであろうし、又、連続化する場合、粉粒体を定量的に供給排出したり、混合の精度をあげる技術が非常に難しいことも原因するであろう。しかしながら、人件費も高くなり省力化が叫ばれ、又公害規制も厳しくなり粉塵発生防止が必要な現在、人手も少なく済み、装置のシールも完全におこなえ、製品が均一で装置も小型化できるなど多くのメリットをもった混合操作の連続化は今や再検討されるべき時期でもある。この様な観点から、当研究所では一昨年来、粉体混合の連続システム化について研究を続け、ようやく、昨年来、独自の混合装置並びに連続定量供給システムについて、一応の目途を得ることが出来たので、ここに紹介する。

2) 装置の概要とその特長

本装置は、付着性の強い微粉にも適用出来る様に開発したもので、A、B二成分を混合するテストプラントである。そのフローシートを Fig. 1 および Photo. 1 に示す。

A系列の方は、原料タンク(貯蔵タンク) 1.8m³、計量ホッパー 0.6m³、B系列は、原料タンク 0.9m³、計量ホッパー 0.3m³で、これらのホッパーは円筒平底で薄いつばり翼が付いていて、ブリッジを防止する機構になっている。原料タンクからは、ダンパーが開くと重力落下で計量ホッパーに原料が入ってくる。計量ホッパーか

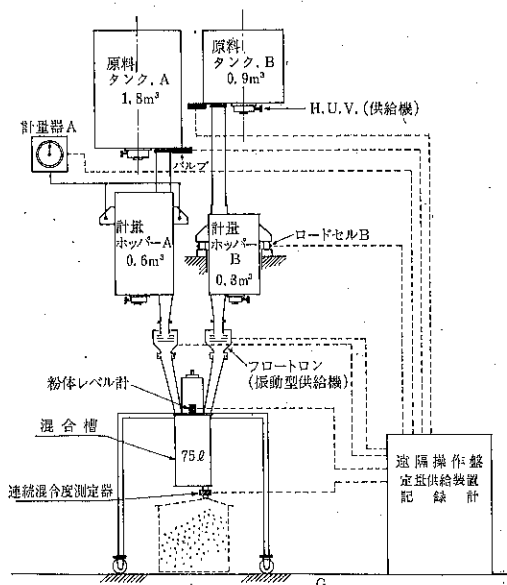


Fig. 1 連続混合システムフローシート

ら混合機へのフィーダーは、当社のフロートロンを微粉にも適用出来る様に改良したものをを用いている。混合機は、容積97ℓ、有効容積75ℓで、混合機の排出口には混合度検知器が付いていて、混合度を連続測定し、振動型テーブルフィーダーによって排出される。

本システムの特長として次の3点があげられる。

- a) 定量供給制御機構
- b) 特殊羽根混合機
- c) 混合度検知機構

次にそれぞれについて説明する。

a) 定量供給制御機構

これは、定量供給できるフィーダー、ホッパーぐるみ原料の重量を計量する部分、自動制御部分からなっていて、loss in weight 方式で定量供給する。

まず原料タンクから、一定量の原料を計量ホッパーに

* 細川粉体工学研究所

(枚方市招提田近1-9) Tel. 0720-57-3721

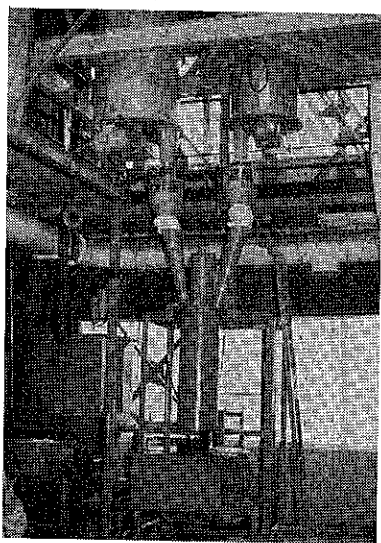


Photo. 1 連続混合プラント

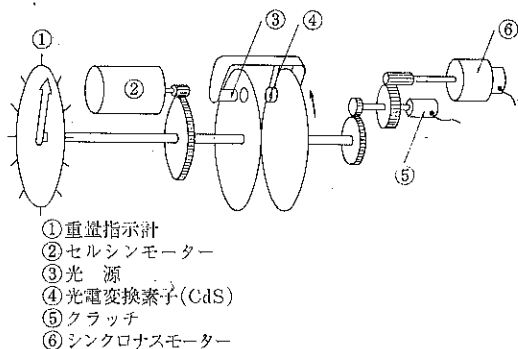


Fig. 2 定量供給制御装置の概略

貯め、連続的に重量を計量しながらフィードする。この時重量が時間と直線的に減少する様に自動制御される。この制御の方式は、Fig. 2 に概略を図示してあるが、いわゆる loss in weight 方式で制御していて、シンクロサモーターで光源及び受光部を流量に見合った等角速度で回転させ、重力指示計の針と同軸の円盤にあけてある穴を通して受光部 (CdS) に光を投射する。すると、実際の重量と、基準として等角速度で回転している光源及び CdS との角度差が、光の投射量の多少によって表われ、それを CdS の起電力の相違からフィーダーの電圧を変化させて、設定値になる様に制御する。

フィーダーは当社のフロートロンを微粉でも定量的に供給できる様に改良したもので、Photo. 2 に示すように多段のドーナツ状の板の間から粉を強制振動させてフィードする機構である。

計量は、A系列は機械的な秤 (max. 2 ton) で計量し

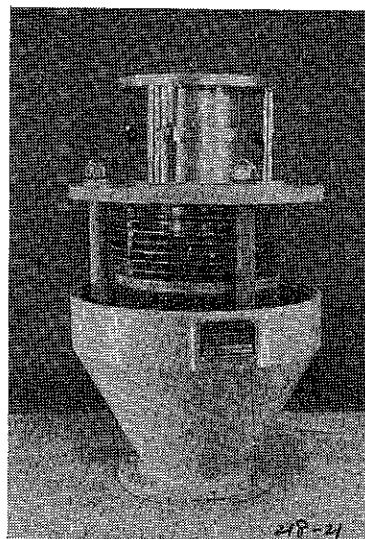


Photo. 2 フロートロン改良型

差動トランスで重量を電圧に変換して、制御部門及びレコーダーに入れる。B系列は、ロードセル(max. 500kg)で電氣的に測定しているので、そのまま制御部門とレコーダーに入れる。計量部門には、上下のレベルスイッチがついていて、重量が lower level に達すると自動的にダンパーが開き、原料タンクから原料を供給し、重量が upper level になるとダンパーが閉じる。lower level, upper level は自由に設定出来る。

計量ホッパーへの原料の仕込みの際に、粉体の静止時と仕込み時の見掛け比重及び粉体圧が違うことによって起こる流量の変化をなくすために、B系列の方は、計量ホッパーを Fig. 3 の様に上下二室にし、供給時のショックを消し、見掛け比重が一定になる様にしている。又、その際には、一時制御が切れて、光源と円盤の穴が同じ位置を保持したまま重量計の指針といっしょに逆回転するようになっており、この短時間の仕込みは、別に設定されたフィーダーの電圧でもって混合機への供給は持続することができる。

Fig. 4 に、連続的に計量された原料重量の変化を図示してある。まず、 g_2 の重量の粉体を $w = \frac{g_2 - g_1}{t_2 - t_1}$ の流量で混合機に原料を供給する様にセットする (即ち、Fig. 2 に示した光源、CdS の回転速度をセットする) 同時に upper level, lower level の重量もセットする。(Fig. 4 では、upper level = g_2 , lower level = g_1 である) 供給を開始して、制御しながら直線的に lower level まで原料が減少すると、上の原料タンクから再び原料を upper level まで短時間で仕込み、再度この過程を繰り返す。レコーダーには、これが三角波のようになって表われる。この三角波状の図の流量と総供給

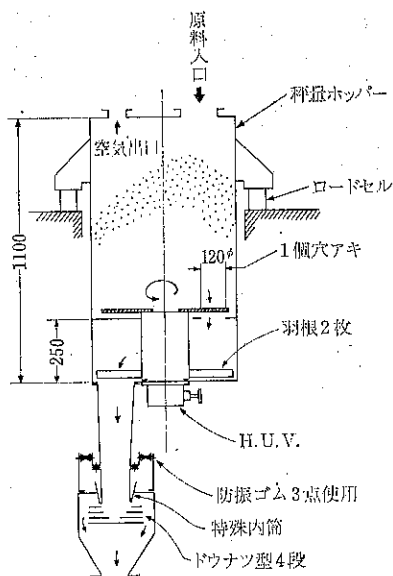


Fig. 3 ロードセル型計量ホッパーとフロートロン

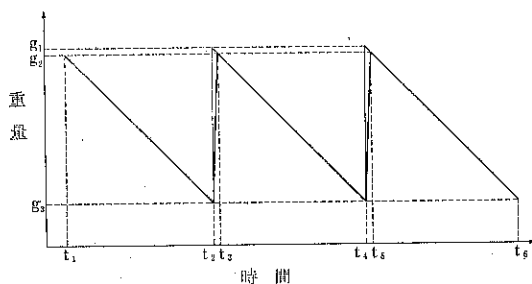


Fig. 4 原料重量の時間的変化

量は次の様にして求める。

$$\text{流量は、} \frac{g_2 - g_3}{t_2 - t_1} = \frac{g_2 - g_3}{t_4 - t_3} = \frac{g_2 - g_3}{t_6 - t_5}$$

時間 t_1 から t_6 までの総供給量 G は、計量ホッパーへの原料の仕込時間が短いので (30秒～1分) 制御している時と同じ流量で流れているとみなして、斜線部を延長して計算すると、

$$G = (g_2 - g_3) + (g_1 - g_3) + (g_1 - g_3) \text{ となる。}$$

この loss in weight 方式は、実際に重量を測定しているの、total 量の誤差が少ないことを特徴とする。瞬間の流量には若干の誤差が出るが、これは秤のスケールによって誤差が少なくなるし、又、下の混合機に滞留時間があるので、その滞留時間の $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ であれば、その影響は十分にカバーできる。

b) 特殊羽根混合機

本装置の混合機は、大阪府立大学の矢野武夫教授の御指導によって、炭酸カルシウムの微粉の様な、付着性の強い混合しにくいものにも適用出来る様に、リボンとタ

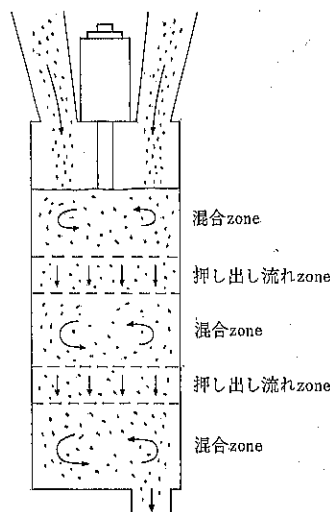


Fig. 5 混合機内の混合状態

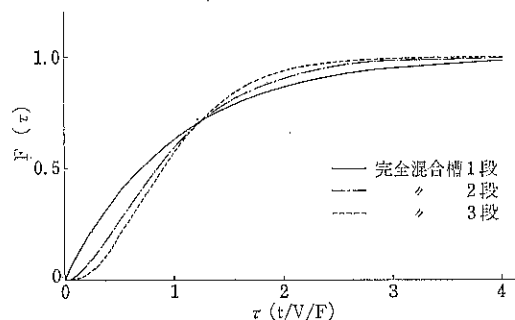


Fig. 6 完全混合槽の過渡応答曲線

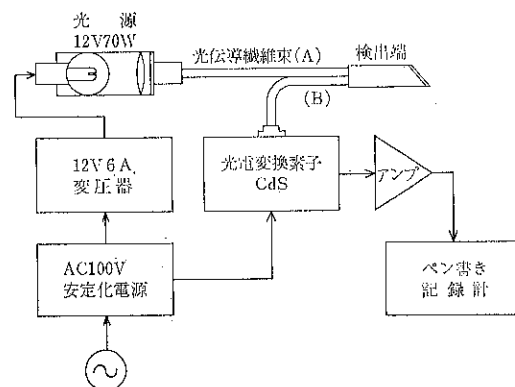
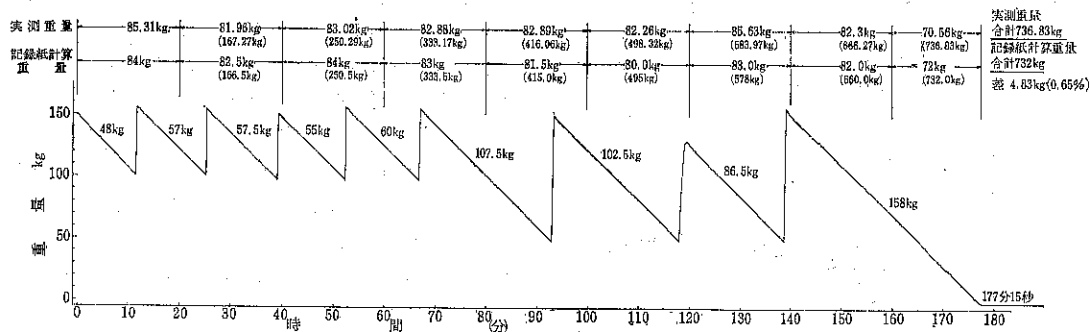


Fig. 7 混合度測定装置フローシート

ービンを併わせた様な特殊な羽根を用いている。この羽根が三段に別かれていて、Fig. 5 に示す様に、羽根の部分ではきめ細かく混合し、羽根と羽根の間では押し出し流れになる様になっていて、連続混合にはよくない back mixing や short pass のない構造である。即ち



運転時間 177分15秒 実測供給能力 = 736.83kg/177分15秒 = 249kg/hr
 記録能力 = 732kg/177分15秒 = 248kg/hr

Fig. 8 連続混合機B系列, 供給テスト

この混合機は、完全混合槽三段分に相当し、その step response (過渡応答) は Fig. 6 に示す様な曲線を描く。Fig. 6 は正規化してあるが、横軸は時間を滞留時間で割ったもの、縦軸は step 幅を 1 に正規化したものである。

又、この混合機は、羽根の間隔と羽根の段数が変わえられる構造である。

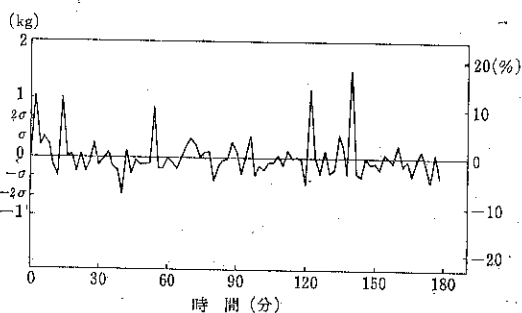
c) 混合度検知機構

現在用いている混合度検知器は、混合後の連続的に排出する材料に照射した光の反射率の違いを利用して連続的に混合度を検知するもので、Fig. 7 にその略図を示してあるが、12Vのランプの光を光学繊維を通し、排出口を流出する粉体の表面で反射させ、その反射光の多少を光学繊維から CdS にもってきて、CdS における電圧の変化を増幅してレコーダーに入れている。これの微小な変化で混合度を、この平均値で混合比が測定出来る。現在はこれを記録のみに用いているが、これをフロートロンにフィードバックすれば混合比を、混合機のモーターにフィードバックすれば混合度を制御することも可能である。

3) テスト例

a) B系列供給テスト

長時間に渡って行なった供給テストの結果を Fig. 8 に示す。原料は炭酸カルシウムの微粉 ($D_{50}=3.5\mu$)、秤はロードセル型、設定値 250 kg/hr、運転時間は 177 分15秒、この間フロートロンから出る粉の重量を袋に入れて、その重量を実測した。その実測値は合計 736.83 kg (249 kg/hr)。記録紙の上から読んだ重量は 732 kg (248 kg/hr)、誤差は 4.83 kg (0.65%) であった。以上より記録紙上の重量と実測値とが良好な一致を示すことが確認された。又、設定値は 250kg/hr であったが、



$\bar{x}=8.314 \text{ kg}/2\text{min}$ $\sigma=0.339 \text{ kg}$ (4.08%)

Fig. 9 定量供給テストの平均値に対する誤差 (2分間)

177分15秒では 738.54kg で、実測値との誤差は 1.71kg (0.2%) であった。この誤差はグラフでいえば三角波の縦の直線部分即ち、原料タンクからの原料の仕込時に一時制御が途切れた時に出た誤差に原因すると思われる。

次に、2分間ごとに実測した重量の平均値からの誤差を計算した一例を Fig. 9 に示す。ここで誤差が10%を超える時は原料の仕込時に流動化した粉体がフラッシング現象を起こしたもので、この実験結果から計量ホッパーを二重底に改良した。現在はこのフラッシング現象をほぼ押さえることができる。又、現在使用している秤のロードセル型がフルスケールで 500 kg であって、このテストの標準偏差は 0.339 kg、これはフルスケールに対して 0.068 % となり秤の誤差範囲にはいってしまう。従って秤がこの流量には合っていないわけで、従って秤を小さくするか、流量を多くして、短時間に計量ホッパーからの供給を行なえば、瞬間流量の精度は良くなるものと考えられる。

b) 混合テスト

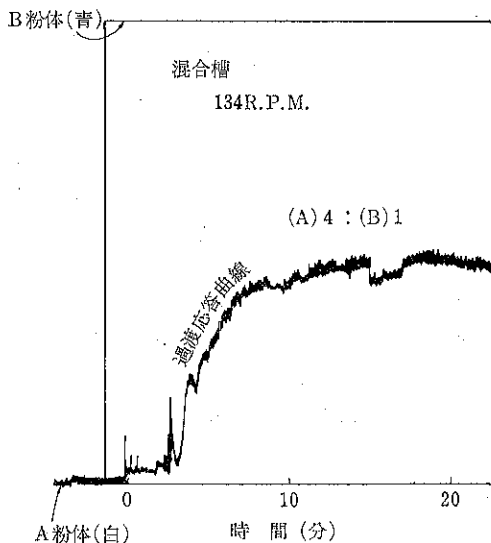


Fig. 10 混合度指示記録

Fig. 10 は、炭酸カルシウム ($D_{50}=3.5\mu$) の粉を、片方はそのまま、もう一方を mirori blue で着色して、混合比 4 : 1 で混合実験した場合の混合度を連続的に測定した記録である。流量は A (白) が 240 kg/hr, B (青) が 60 kg/hr, 合計 300 kg/hr である。まず白い粉だけを流し、level に達したら青い粉を加えて流したもので、いわゆる過渡応答を調べた結果である。このグラフで定常状態になった時に、白 : 青が 4 : 1 の位置にきていないのは、光の反射率と混合比の関係が linear になっていないからである。又、白だけの時をみればわかる様に、細かい変動があるが、これは空隙率の影響のためと思われる。又、定常状態になってから一部だけ曲線が落ちこんでいるのは、排出のテーブルフィーダーが混合機レベルによる ON-OFF 動作になっているので、

静止時と流動時の空隙率の違いによるものである。もちろん排出を連続化することは可能である。

この曲線の傾向は前に Fig. 6 に示した完全混合槽三段の曲線に似た傾向を示している。従って本装置の混合機は、連続混合に適した構造をもつことが確認された。

この曲線で混合度は定常状態になった時の上下の微小な振れで求められ、混合比はあらかじめ混合比とレコーダー上の位置を検定しておけば、レコーダーを見るだけで判定がつく。又、混合比と電圧の関係を linear にする回路を組むことも可能である。

4) 終 り に

現在のプラントはテストプラントでもあり、なお改良の余地が多いと思われるが、原料、操作条件など各ユーザーの要求に適した実用できる混合システムを開発していくことを今後の研究目標としている。例えばもっと微量の定量フィーダーが必要なユーザーもあろうし、炭酸カルシウムより付着性の強い粉を扱う場合もあろう。

又、混合度の測定に関しては、可視光線では区別出来ないものを混合することあろう。この様な時には、例えばフィルターを付けて波長を限定したり、紫外線や赤外線領域の波長を利用したり、或いは静電容量の違いを利用して混合度を測定することも、現在研究中である。

本プラントは、現在、混合操作の連続化を検討されているユーザーの方々に試験装置として御利用いただければ幸甚である。

「附記」

本連続混合装置は、大阪府立大学工学部矢野武夫、佐藤宗武両先生の基礎研究結果に準拠した。なお実用化装置開発に当り、懇切な御指導をいただいた。ここに紙面を借り深甚の謝意を表します。



水ガラスの白華の検討—温度の影響に関して—

Efflorescence of Sodium Silicate Solution about
the Influence of Temperature

長谷川 勝*

Masaru Hasegawa

山内 史朗*

Shiro Yamauchi

abstract

Using the class C—1 refractories, the effect of temperature to efflorescence formation of No. 3 sodium silicate solution and reagent Na_2CO_3 was investigated.

Efflorescence of sodium silicate solution has tendency to formation straightly. In winter or in low temperature long needle is occurred, and in summer or in high temperature efflorescence is not formed according to the glassy hardening.

Efflorescence of reagent Na_2CO_3 has tendency to formation non linearly, as in low temperature mustache like, and as in high temperature lump like formed.

when growing velocity is low, the efflorescence is monohydrate which is in weathered phase, while at high velocity, ten hydrate which is in stable phase of solution.

It may be hard decided that efflorescence does not occur in summer in all cases.

摘 要

市販C—1類耐火レンガを基体とし、3号水ガラス・試薬 Na_2CO_3 を用いて、白華の生成に対する温度の影響を検討した。水ガラスの白華は直線状に生成する傾向があり、冬及び低温では長針状、夏及び高温では乾燥速度が速くガラス状に固化するため、白華とはならない。試薬 Na_2CO_3 の白華は非直線的に成長し、低温ではひげ状、高温では塊状となる。白華の生長速度の違い時には風化安定相の1水塩の白華となり、速い時は液相安定相の10水塩となる。白華が夏には発生しにくいという事は一般的に言えない。

1. ま え が き

セメント製品の大きな問題である白華について、その成因を追求するため、前報¹⁾において筆者らは、市販C—1類耐火レンガを生成基体とし、3号水ガラスを白華成分とした場合の水ガラス濃度および基体形状と白華との関係について報告した。その結果水ガラスの系では、白華成分は水ガラスとしてではなく、空気中の CO_2 との反応により生ずる炭酸ソーダであり、液が濃厚な時には、水ガラス中のけい酸ソーダの解離度が小さいのと、

系の粘度が高い^{2,3)}などの理由により、短期には炭酸化が進まず、したがって、炭酸ソーダの針状白華も生成せず、希薄溶液の場合とは異なった現象を起す事を観察した。さらに V/S、すなわち基体の体積と表面積との比が大きくなると、基体の大きさに比例して、基体中の溶質が一定濃度に到達する時間が長くなる結果、白華生成時期が遅くなり、しかもその時期が溶質の飽和濃度に達する時期と一致する事を見出した。ここで白華現象を、単に毛細管の集合体からの、溶質の表面での析出と考えるなら、乾燥速度が早い程早く生成するはずである。一般にセメント等の白華が夏には発生し難い事が知られ^{4,5)}、その原因として乾燥速度が早いと、毛細管表面まで溶質が供給されず、管口より内部で析出するた

* 菊水化学工業㈱中研 (愛知県犬山市羽黒新田)

TEL 0568-67-1414

め、外見上の白華とはなりにくい等といわれている。外部に塩が析出しない事はすなわち内部で生成したためといえるが析出しない原因のすべてが乾燥速度に関係するという事はできない。いうまでもなく乾燥速度を早めるための手段が温度を上げる事であれば、溶質の解離度・安定相・溶解度に変化をもたらす、送風によって毛管に圧がかかり、圧力分布が変化するからである。われわれは、前報に続いて、C-1類耐火レンガを基体とし、水ガラスと炭酸ソーダを使用して、種々の乾燥条件の下での白華を検討したので報告する。

2. 実験および結果

2.1 平均気温 (20°C) 状態における白華の生成

2.1.1 実験方法

C-1類耐火レンガを、約3.0×3.0×4.0cmの長方体に切り取ったものを試験基体とし、市販3号水ガラスの10, 20, 30%, 水溶液および試薬 Na_2CO_3 の10, 20%水溶液を試験体下部から静かに含浸させる。これをガラス板上にのせ恒温恒湿室中 20°C, 80% (相対湿度) の条件下で風乾させ、含浸前後の重量を測定し、試験体中の気孔の液による充填割合を求めた。一定時間ごとに重量を測定し、白華生成を観察、生成した白華粉体を、粉末X線回折によって同定した。

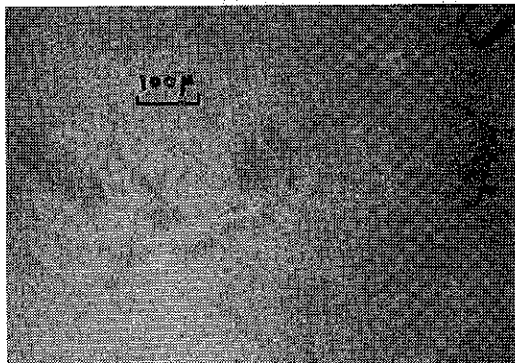


Photo. 1 First efflorescence at 20°C
(Sodium silicate solution)

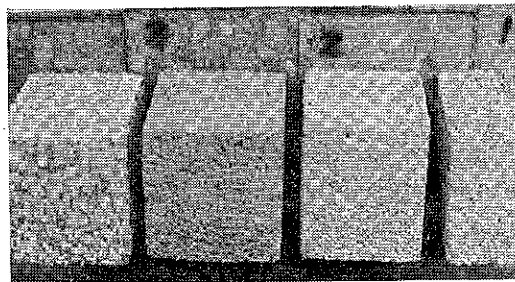


Photo. 2 Formation of efflorescence at 30°C
No. 1, 2, 3, 4 from right

2.1.2 結果

乾燥した試験基体のそれぞれに、肉眼観察では白華状態は認められない。しかし顕微鏡で観察すると、No. 1, 2の基体にごく少量の短い透明結晶が表面に、析出していることが認められる。(Photo. 1) これは 30°C の室中에서도風化せず、そのまま安定であった。長さは約 0.2 mm 程度で、しかも透明であるため、明らかでないがおよそ 20~21 日目から発生し、その後約 20 日間で生成したものである。この基体を、30°C の室中に放置すると、しだいに全面が白色化する (Photo. 2) が、これは発生していた結晶が風化したのではなく、新たに基体内部から、白華成分が析出したものであろう。すなわち 20°C 80% (相対湿度) よりも 30°C 60% の方が基体内の平衡水分が少ない。また 10% 水ガラスの乾燥減量はそれぞれ 20°C と 30°C で 78% と 82% であることから説明できる。一旦乾燥した基体に下部から静かに水を含浸させ、さらに 20°C, 80% の恒温室で乾燥させた。1 および 2 回目の乾燥曲線を、Fig. 1 の曲線 I, II で示した。2 回目の乾燥では、白華が図に示すように 10% 液で 130 時間、20% で 160 時間頃から発生し始め、発生後、5 日間で約 1.5 cm に生長する。250 時間目の状態を Photo. 3 に示した。白華を顕微鏡観察すると Photo. 4 に示したように長い針状であり、前報の白華と形態・性状はおおむね一致し、30°C 室中放置で、白色風化する。30% 液では、ほとんど

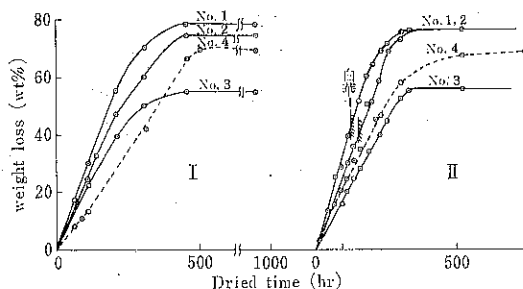


Fig. 1 Drying curve at 20°C

No. 1.	Sodium silicate solution 10%
No. 2.	" 20%
No. 3.	" 30%
No. 4.	Reagent Na_2CO_3 20%

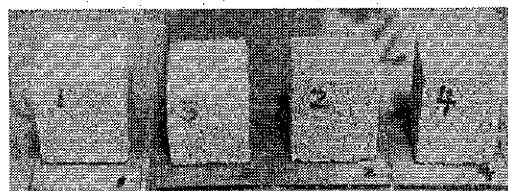
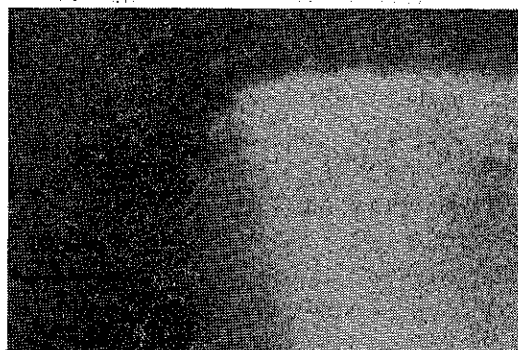
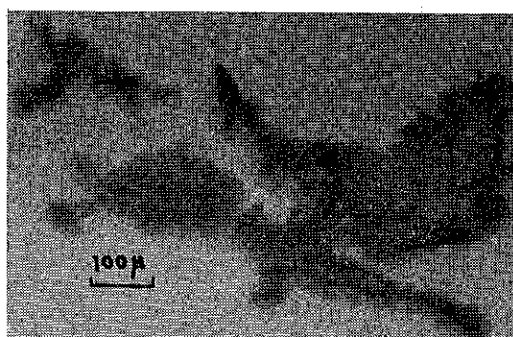
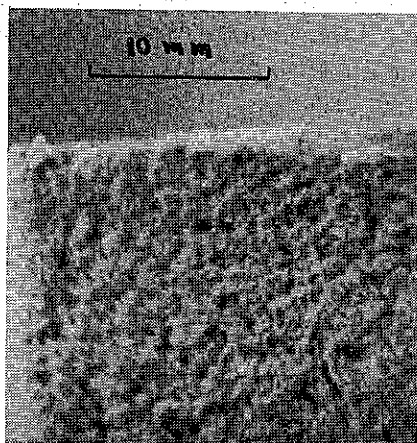


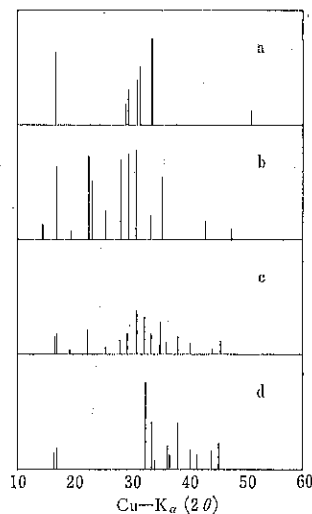
Photo. 3 Efflorescence at 20°C
No. 1, 2, 3, 4 from left

Table. 1

試料 No.	溶 液 (%)	V (cm ³)	S (cm ²)	V/S (cm)	Pore の 充填率 (%)	乾燥完了時間		平均乾燥速度	
						1 回 目	2 回 目	1 回 目	2 回 目
1	3号水ガラス	10	38.0	68.1	0.558	67.0	400	0.526	0.712
2		20	36.4	66.5	0.548	68.0	450	0.495	0.715
3		30	31.9	61.4	0.520	58.7	450	0.365	0.451
4	炭酸ソーダ	20	34.7	64.5	0.538	60.0	500	0.365	0.397

Photo. 4 Efflorescence at 20°C
(Sodium silicate solution)Photo. 6 Microscopic Photograph of efflorescence at 20°C (reagent Na₂CO₃)Photo. 5 Efflorescence at 20°C
(reagent Na₂CO₃)

ど発生せず、また Na₂CO₃ 20%液では、2回目に基体の陵の一部にわずかしが発生しなかった (Photo. 5, 6). このほか Na₂CO₃ の10%液では、2回目の乾燥により、ひげ状の白華が生成した。Table. 1 に各測定値を示した。なおVについて (重量/かさ比重) の値、各辺を測定して求めた値との間に1.5%程度の差があるが、ここでは後者の値で示した。また、気孔の充填率は、1

Fig. 2 Crystal variation by weathering of
Na₂CO₃ hydrate formed at 25°C

- a : no weathering
- b : after one day, 10·H₂O Hydrate
- c : after two days, 10·H₂O/1·H₂O=6/4
- d : after four days, 1·H₂O Hydrate

回目の含浸による結果から求めた。

2回目の乾燥による白華について、発生後さらに、

25日を経たものの X 線回折の結果は、Fig. 2 d と同じ $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ の回折線であり、このほかわずかに 3/2 水塩が認められる。X 線回折後の試料の脱水量は 21% (wt%) であった。この脱水がすべて炭酸ソーダの結晶水によるものとする と 3/2 水塩の脱水量に相当するが、やや大きい値を示したことは恐らく吸着水によるものであろう。脱水量と、 $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ の x との関係を図 3 に示した。

Na_2CO_3 の水和物には 10, 7, 3/2, 1 水塩の 4

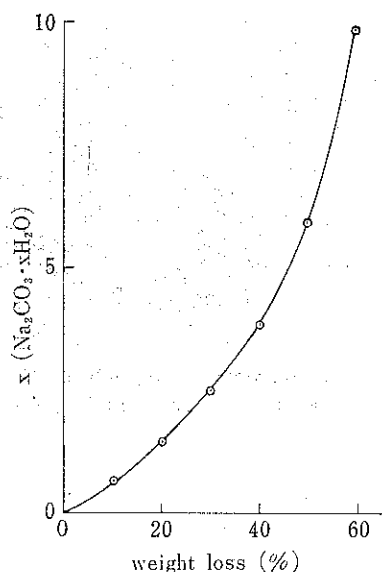


Fig. 3 Relation between x of $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ and weight loss (%)

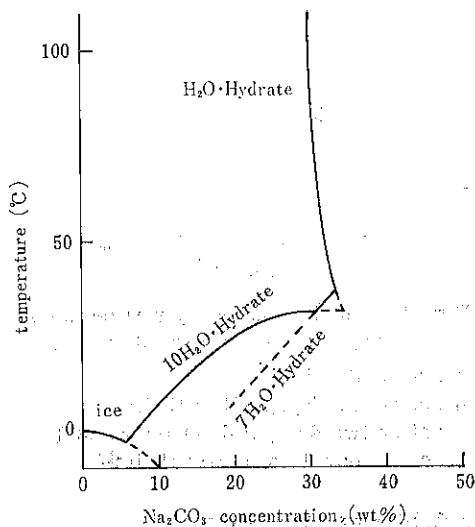


Fig. 4 Stable region of Na_2CO_3 hydrate:

つの形態が知られており、これらはいずれも 60°C 以上の加熱で無水塩となる。その安定領域は、Fig. 4 に示すとおりであり⁹⁾、 32°C 以下では 10 水塩、 $32\sim 35^\circ\text{C}$ で 7 水塩、 35°C 以上で 1 水塩となる。試薬 Na_2CO_3 を蒸留水に溶かし、 25°C および $33\sim 34^\circ\text{C}$ で析出させた後の風化による結晶形変化を、X 線的に検討すると、 25°C で析出したものは Fig. 2 a であり、10 水塩と比較してピークの数が少ない。これは時間とともにピークの数、位置、高低にかなりの変化を生ずるが、 2θ が 16.7° と 30.9° のピークは常にあり、その他のピークも 10 水塩のピークに含まれる。 $19\sim 22^\circ\text{C}$ で 1 日風乾しておくとはほぼ完全な 10 水塩の形となり (Fig. 2 b)、さらに風化が進行すると、しだいに 1 水塩のピークが現われ、2 日後で、10 水塩と 1 水塩の割合が、およそ 6 : 4 (ピークの高さから) になり (Fig. 2 c) 4 日後には完全に 1 水塩になる (Fig. 2 b)。 $33\sim 34^\circ\text{C}$ での析出結晶は、状態図では 7 水塩が安定相であるが、X 線回折では明らかに、1 水塩に一致した。初めの乾燥により生成した白華が風化しないのは、これが最終的に安定な相のためと考えられ、おそらく 1 水塩の形で存在するものであろう。同じ 20°C でも、2 回目に生成したものは、前記のようにその性状から、10 水塩と考えられる。

これは風乾による結晶形変化の実験からも明らかである。すなわち 1 回目の白華は約 20 日間で 0.2mm ときわめて遅く、水溶液からの結晶生成時には 10 水塩であっても、析出後の白華としての生長過程で、1 水塩となるものであろう。これに比べて 2 回目のように速やかに生長すれば、結晶生成時の 10 水塩のままであり、そして風乾により白色風化し 1 水塩になると考えられる。

2. 2 高気温状態 ($25\sim 35^\circ\text{C}$) での白華の生成

2.2.1 実験方法

$25\sim 35^\circ\text{C}$ の室内において検討を行ったもので、2.1 項と同様に C-1 類耐火レンガを切りとったものを試験基体とし、3 号水ガラス 10% 水溶液を試験体下部より静かに含浸させ、その後、 $25\sim 35^\circ\text{C}$ の室内の直射日光を避けた場所に静置、乾燥し、その乾燥曲線と白華の状態を測定した。さらに他の試験体に、試薬 Na_2CO_3 の 5, 10, 20, 30% 水溶液を含浸させ、同様の測定を行なった。なお、1 回目の乾燥で白華が少ないか、あるいは生成しない時には乾燥完了後、さらに底面より静かに水を含浸させ、くりかえして測定を行なった。

2.2.2 結果

水ガラス系の測定で得られた乾燥曲線を Fig. 5 に、各測定値を Table 2 に示した。No. 2 ($V/S=0.53$) の基体では、乾燥完了までに 96 時間を要し、前報の場合に比べて ($V/S=0.54$ で約 170 時間)、かなり早い。1 回目

Table. 2

試料 No.	V (cm ³)	S (cm ²)	V/S (cm)	Pore の 充填率(%)	乾燥完了時間		平均乾燥速度	
					1 回目	2 回目	1 回目	2 回目
1	13.2	35.3	0.374	67.0	53 ^{hr}	58 ^{hr}	mg/hr.cm ² 2.32	mg/hr.cm ² 2.30
2	35.1	66.2	0.530	68.0	96	96	1.83	2.24
3	107.4	139.4	0.770	63.0	170	159	1.44	1.85

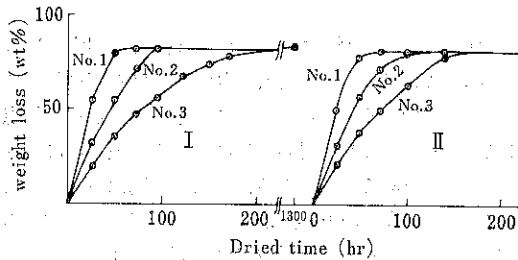


Fig. 5 Drying curve of 10% sodium silicate solution

No. 1. V/S=0.37
No. 2. V/S=0.53
No. 3. V/S=0.77

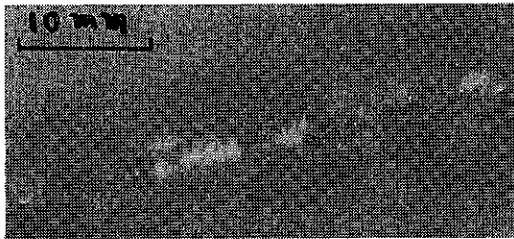


Photo. 7 Efflorescence at high temperature (Sodium silicate solution)

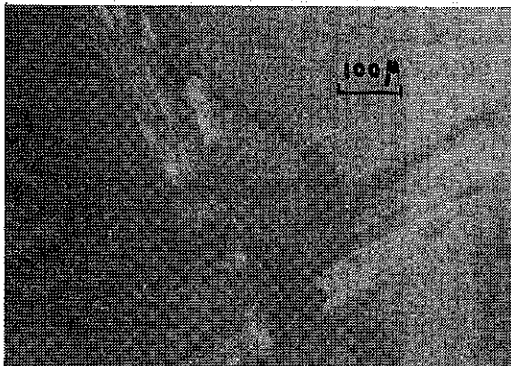
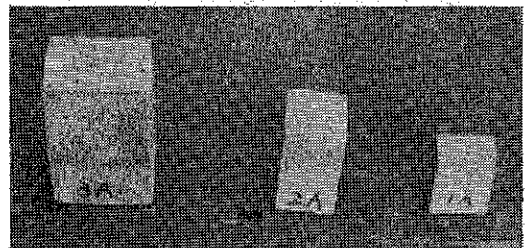


Photo. 8 Microscopic photograph of efflorescence at high temperature (Sodium silicate solution)

の乾燥完了時では、どの基体からもまったく白華は生成しなかったが、さらに1300時間放置後ではNo. 2とNo. 3の基体にPhoto. 7に示すように、雑草状の1~2mmの白華が認められた。これはごく少量で約20cm²のところに点々と7カ所発生したのみであり、およそその発生面積は約0.07cm²である。発生時間は、400~450時間の範囲である。顕微鏡観察すると(Photo. 8)生長方向に直線条痕が入り、さらに細い単位の針状晶が集合して1個の白華を形成しているように認められる。当然この白華は30°Cで全く風化せず原形を保つ。4回吸水乾燥をくりかえしたが表面より、針状に生長するものは1回目のみで、それ以後は多少白色部分は多くなるがこれらは細かい粉体状で均一発生でなく、規則性はない。(Photo. 9) この生成状態について考えてみると、前報における

Photo. 9 Efflorescence at high temperature (Sodium silicate solution)
No. 1, 2, 3, from right

低温状態での乾燥では、V/S=0.5で約70時間の乾燥後、針状晶が速やかに生成した。したがって、90時間程度で液状のときは十分炭酸化は、進行するはずである。もし炭酸化が進行し、乾燥が速く、基体内部で析出したのであれば、数回の含水で、しだいに基体表面まで押し上げられ白華析出するはずである。すなわちここでは乾燥が早い10%の液でも炭酸化が進行する前に液濃度が上昇しガラス状で固化したものと思われる。ガラス状で固化する場合完全に毛細管を閉塞し新たな水に対しても容易に溶解が進行しない。したがって4回の吸水でもごく微量の白華生成しか認められない。一方乾燥状態

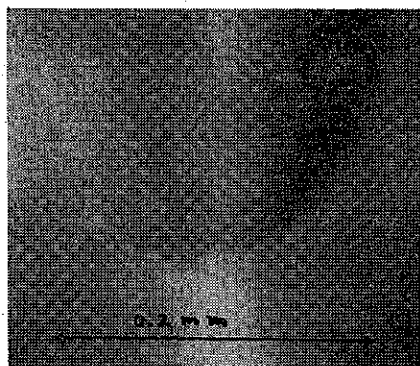


Photo. 10 Glassy hardening of sodium silicate solution in capillary

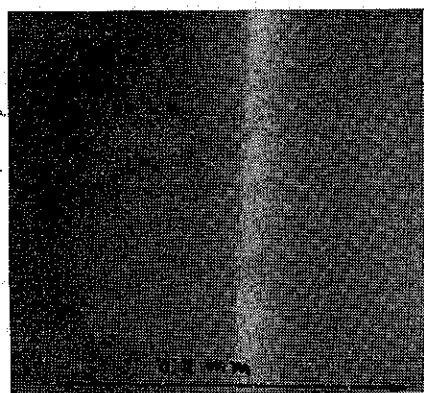


Photo. 11 Carbonation of sodium silicate solution in capillary.

を検討する目的でガラス管で内径約 0.2mm の毛细管を作り、10%水ガラス液を管の一方の端に少し入れ風乾させた所、管の開口部に近い方は速に乾燥、液表面の凹面を残してガラス状に固化、一方管の内部に液面をもつ側は乾燥が遅く炭酸化が比較的進行する結果、白華類似のひび結晶を残しながら液面を後退させ、ある所で固化する。この両端を (Photo.10, 11) に示す。全体的に生じないことについての説明は或る程度可能であるが、1回目に針状晶の発生する理由は明らかでない。

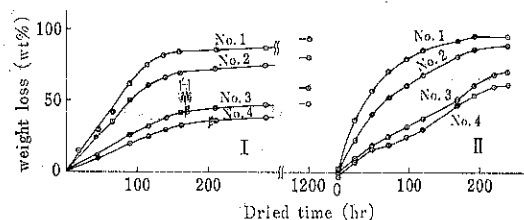


Fig. 6 Drying curve of Na_2CO_3 solution

No. 1. Na_2CO_3 5% No. 3. Na_2CO_3 20%
No. 2. Na_2CO_3 10% No. 4. Na_2CO_3 30%

試薬 Na_2CO_3 水溶液で得られた乾燥曲線を Fig. 6 に、Table. 3 に測定値を示した。水ガラス液が規則的に一定値まで乾燥するのに比較してこの系ではなかなか終点に到達しない。これは恐らく炭酸ソーダの吸湿性に影響されるものであらうと考える。つまり昼間はある程度まで乾燥しても夜間湿度が上がると再び吸湿すると考えられるのでこの条件では完全乾燥まで到達し難いものと考えられる。1回目の乾燥では No. 3, No. 4 の基体に約 170 時間から透明球状に点々と浮き出し始め、240 時間附近から白くなり、レンガの上に白い金平糖をばらまいたような状態になった (Photo.12)。顕微鏡観察 (Photo. 13) では丸い玉が溶け合ったような形の塊状透明晶であ

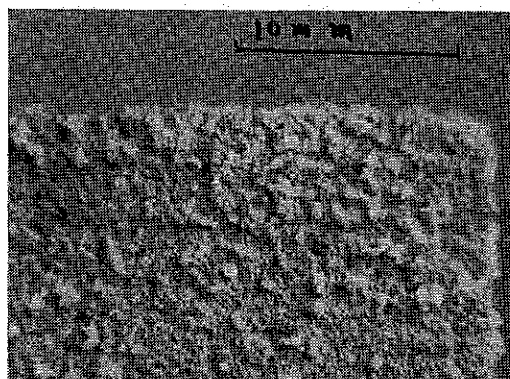


Photo. 12 Efflorescence at high temperature (Reagent Na_2CO_3)

Table. 3

試料 No.	溶液(%)	V (cm^3)	S (cm^2)	V/S (cm)	Pore の 充填率(%)	乾燥完了時間		平均乾燥速度	
						1 回目	2 回目	1 回目	2 回目
1	5	48.0	80.1	0.60	64.8	160 ^{hr}	190 ^{hr}	mg/hr. cm^2 1.24	mg/hr. cm^2 1.32
2	10	41.8	72.9	0.573	65.0	160	190	1.01	1.13
3	20	41.1	71.9	0.571	63.3	—	—	—	—
4	30	42.6	74.0	0.576	58.2	—	—	—	—

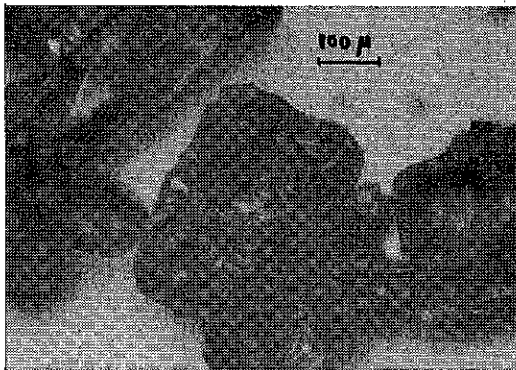


Photo. 13 Microscopic photograph of efflorescence at high temperature (Reagent Na_2CO_3)

り、 30°C の空气中で全く風化しない。冬期の針状白華が密集して発生するのに比べ発生点は少ないが、1つの発生点当りの発生量は多い。冬期針状晶の大きいので長さ15mm、巾0.1mm厚みおよそ0.01mm程度であるから、その体積は $1.5 \times 10^{-5} \text{cm}^3$ 、一方Photo.12の白華を径0.4mmの球状と仮定すると体積は $2.7 \times 10^{-4} \text{cm}^3$ で

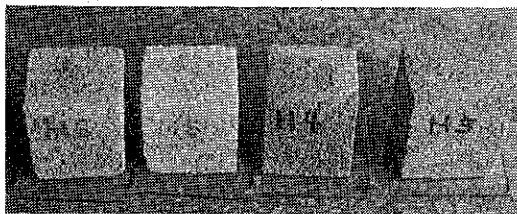


Photo. 14 Efflorescence at high temperature (Reagent Na_2CO_3) from right No. 1, 2, 3, 4.

あり10倍以上の大きさである。2回目吸水以後はしだいに白華の量が増えるが球状にはならず全体に白く不定形の粉末状である。2回目乾燥後を(Photo.14)に示す。2回目に発生した白華のX線回折のピークはほぼ1水塩に一致する。5%では全く生成せず10%で頭部にごくわずかしこ発生しないのはやはり乾燥が早く内部で溶質が晶出するためであると考えられる。

2. 3 低気温状態 (10°C) での白華の生成

2.3.1 実験方法

C-1類耐火レンガを2.1項と同様の大きさに切りとり、3号水ガラスの5, 10, 20, 30%水溶液、試薬 Na_2CO_3 の、5, 10, 20%水溶液を試験体底部より静かに含浸させ 10°C の恒温恒湿槽中で乾燥させ、乾燥曲線及び白華の生成を観察した。なおこのときの湿度は80~90%である。

2.3.2 結果

Fig. 7 に乾燥曲線を、Table. 4 に測定値を示した。

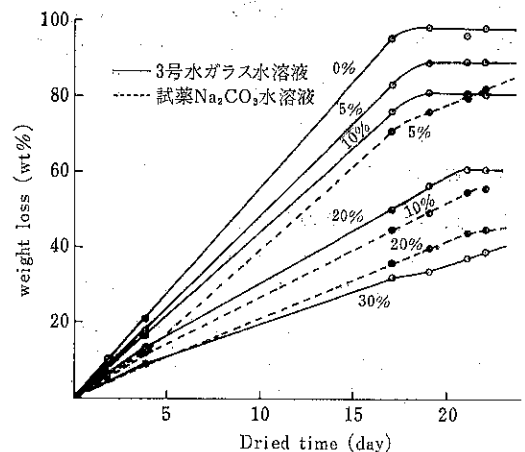


Fig. 7 Drying curve at 10°C

Table. 4

溶液濃度 (%)		V (cm ³)	S (cm ²)	V/S (cm)	Pore の 充 填 率 %	乾燥完了時間 hr	常均乾燥速度 mg/cm ² hr
3 号 水 ガ ラ ス	0	50.3	98.0	0.572	81.6	427	0.589
	5	48.3	85.1	0.568	64.8	447	0.457
	10	51.1	88.2	0.580	68.3	452	0.439
	20	46.9	84.2	0.556	67.6	495	0.312
	30	50.3	87.7	0.573	58.2	—	—
炭 酸 ソー ダ	5	44.8	81.8	0.548	65.2	—	—
	10	48.1	85.9	0.522	65.9	—	—
	20	49.9	87.5	0.571	57.2	—	—

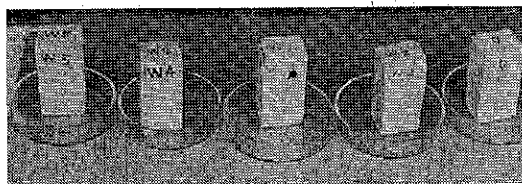


Photo. 15 Efflorescence at 10°C
(sodium silicate solution)
from right 0, 5, 10, 20, 30wt%

肉眼観察では、発生の時期は明らかでないが、17日の状態は、3号水ガラス10%では約10mm、5%で約5mm、20%で約2mmの針状白華が認められた。これらを**Photo.15**に示した。これらの結晶のX線回折の結果は、ほぼ10水塩である。形態は透明針状であり、30°Cの室中に放置すると容易に風化し、白色粉末状となりもろくくずれ易くなる。生成後の白華粉末のX線回折結果は、ほぼ10水塩に一致する。Na₂CO₃の5、10%溶液では、初期に試験体表面に透明球状のものが付着した状態であるが、この場合乾燥の完了は容易でないため、最終状態の形態は、明らかでない。

3. 結果の考察

2.1, 2.2および2.3の実験結果から10%の3号水ガラス水溶液について、乾燥完了時間と、平均乾燥速度とを、V/Sに対してプロットすると、**Fig. 8, 9**となる。参考として、前報の結果を加えた。20°Cの恒温室よりも、冬期の方が乾燥の早いのは、明らかに湿度の影響であろう。冬期における20%では、既に液が濃すぎてガラ

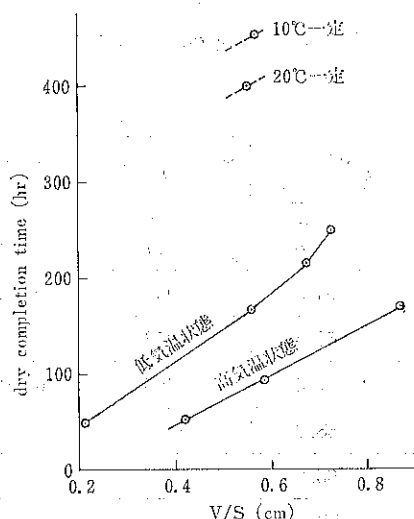


Fig. 8 Relation between V/S and dry completion time.

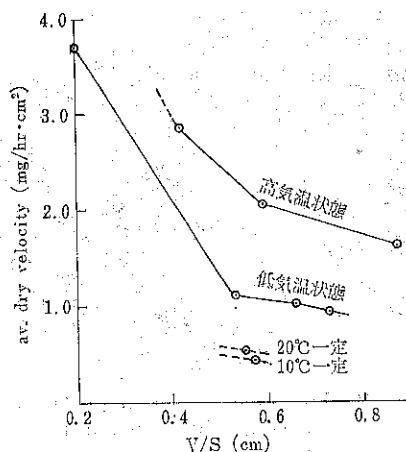


Fig. 9 Relation between V/S and av. dry velocity.

ス状に固化する結果、一次的白華は認められなかった。これより乾燥の遅い、10および20°Cの場合、20%で白華しているのは、炭酸化が進行するためであろう。20°Cにおいて、1回目で発生しないのは乾燥が遅いためではなく、むしろ湿度の影響であり、Na₂CO₃液が冬期には、ひげ状で発生するにもかかわらず、10および20°Cの湿度の高い場合には出にくい事と関連するものと考えられる。夏期の高湿時は、乾燥速度の速い事は確かであるが、Na₂CO₃の場合、白華の発生が認められた。これらは部分的に塊状発生のため少なく感じられるが、一つの塊りの体積が大きいため、全体量として比較すると必ずしも冬期白華より少ないとはいえない。水ガラスの場合は、ガラス状で固化するので、いわゆる白華状にならないという特殊な例であり、高温時に発生がないと断定することはできない。

基体内部から連続して溶液が供給され、表面で溶媒が蒸発し、溶質が晶出するというのであれば、乾燥速度が早い程白華も早く発生する筈である。この関係を棒状の基体から多量の溶液を蒸発させる実験で確認した。**(Photo. 16)**に示したように、フラスコ内に約1/3の10% Na₂CO₃液を入れ、棒状に切り取った試験基体の一端を底部につけ、フラスコの口もとを密閉しない程度にガラス板で被覆した。これによって液は基体を上昇し、頂部に至る。水分はフラスコ内の部分からはほとんど蒸発せず、ガラス板より上の部分のみから発散する。液から水分の蒸発している面、すなわち、液表面の溶質濃度が最も高くなる部分は、低温状態ではレンガの表面であり高温状態ではやや内部になる。溶質の飽和点を過ぎると結晶が析出する。この析出した結晶は、毛管を完全には塞がないので、溶液は基体と析出結晶の間隙を通して蒸

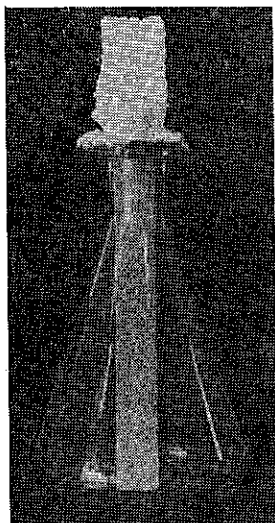


Photo. 16 Efflorescence formed by continuous supply of solute

発し、より表面近くに溶質を晶出させ、ついには毛管の開口端よりも外に晶出するようになる。溶液の量によっては写真のように、外部に盛上ってくる。このように溶質が多量に連続供給されるときは、常に白華は容易にしかも全面に多量に生成する。この場合は、点状に生成することなく、断続的な供給の場合とは生成機構も異なる。一回のみの供給の場合には、含浸された液は、初めレンガ表面までにじみ出ている。乾燥が少し進むと液面はすぐ内部に移行し、液面は太い毛細管からしだいに細い方へと後退していく。そして液面の管径は、毛細管が連通していれば、表面にでている毛細管以外は大体一定のはずである。さもないと、接触角一定では細い管の液面の圧が太い管の圧より小さい事になるから必然的に同じ管径の所まで液面は移動する。この条件が、白華の発生する時点まで成立すると、白華結晶の径に相違がある

ことの説明は、困難である。白華結晶の生長方向に、条痕がしばしば認められることから、あるいは、より細かい単位の構造体の集合によって、一個の白華結晶が構成されるなどとも想定されるが、確認のためには更に検討が必要である。

4. ま と め

C-1 類耐火レンガを試験基体とし、水ガラスおよび、炭酸ソーダの白華についていろいろの乾燥条件下で検討し、次の結論を得た。

1. Na_2CO_3 は 32°C 以下では溶液中で 10 水塩が安定であるが、空气中でしだいに 1 水塩に風化する。従って比較的低温で速かに生長し、風化が進行し難い低温の条件下では 10 水塩の白華となり、生長速度の遅い、あるいは、風化の早い場合には $3/2$ あるいは 1 水塩の白華となる。
2. 水ガラス系の白華は針状直線的な結晶であり、炭酸ソーダの白華は曲線状の結晶である。
3. 夏期において白華は生成しないと断定できない。結晶の晶出速度は、乾燥速度に比例するが、温度および湿度それぞれが、生成に影響を与えることが大きい。さらに生長の条件は、乾燥速度、基体機構、および溶質の性状などが関連する。

参 考 文 献

- 1) 長谷川, 山内; 粉砕, No.17, 55 (1972)
- 2) 浮橋 寛; 旭ガラス研報, 9, [2], 162 (1959)
- 3) " " 8, [1], 22 (1958)
- 4) T. Ritchie; J. Amer. Ceram. Soc., 38 [10] 362 (1955)
- 5) T. Ritchie; J. Amer. Ceram. Soc., 38, [10] 357 (1955)
- 6) 理化学辞典, p.802 岩波書店 (1971)



Carr の流動性指数に関する考察

鈴木 昭明* 丸子 修*
Teruaki Suzuki Osamu Maruko

§1. はじめに

粉体の流動性を何かで表現しようとする試みは、従来から必要とされ、いろいろな方法がとられてきた。例えばオリフィスまたは特別な装置からの流出速度、フルイからの流出速度で表わす法、振動スパーテル法、回転円筒法、あるいは安息角、内部摩擦角などで直接示す試みがなされている。しかしこれらの流動性の表し方は、いずれも粉体の一つの流動特性から流動性の値を定めたり、ある特定の操作における粉体の挙動に着目して流動性を求めている点で、普遍的な粉体の物性値、あるいはそれに近いものとしての流動性かどうか問題があると考えられる。

1965年、Chem, Eng 誌に掲載された R. L. Carr¹⁾ の流動性の評価に関する提案は粉体の流動性に関係ある特性値、例えば安息角など数種類を測定し、これらを総合して流動性に関する評価を得点制で表し数値で表現したものである。Carr の方法では理論的に裏づけに欠ける

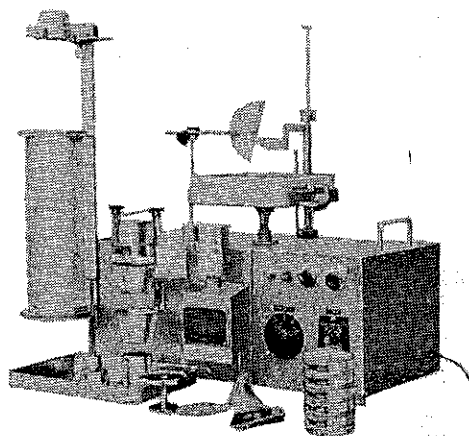


Photo. 1 パウダーテスター

* 細川粉体工学研究所

(〒573 枚方市招提田近1-9)

TEL 0720-57-3721

きらいはあるが、多くの因子を総合的に考慮した点、流動性を数値で表現した点、比較的簡単な手法を用いている点などを筆者らは高く評価した。筆者らはこの流動性の評価の方法に着目し、Carr は彼が提示した流動性の評価をするための測定値を一つづつ手製の道具で測定しているが、これを、サイズ、仕様など Carr¹⁾ の文献に示されていないところは規定し、可能なところは機械化し、一つの装置パウダーテスター⁴⁾⁵⁾としてまとめた。最初の一台が試作されて以来、2年7ヶ月を経過し、この間250台が製作され、国外にも45台が送られている。

§2. Carr の流動性指数と噴流性指数¹⁾²⁾⁸⁾

Carr の流動性指数と噴流性指数は次の7種の測定値により求められる。

- 1) 安息角 (Angle of Repose)
- 2) 圧縮度 (Compressibility)
- 3) スパチュラ角 (Angle of Spatula)
- 4) 凝集度 (Cohesiveness) または均一度 (Uniformity)
- 5) 崩潰角 (Angle of Fall)
- 6) 差角 (Angle of Difference)
- 7) 分散度 (Dispersibility)

Carr によれば以上7種の測定値のうち前4種は流動性に関係する因子であり、後3種は噴流性に関する因子である。ここでいう噴流性とは架橋とは逆に空気を含みやすい微粉が急激に流動化されて供給装置の出口または間隙からあふれだすフラッシング現象の生じやすさの度合を示すものである。

ここでは詳細な測定法は紙数の都合で省略するが、安息角、圧縮度、スパチュラ角と均一度または凝集度の4つの値を求め、Table. 1 にしたがって点数に換算し、それぞれ25点満点とし加成性を仮定し合計100点満点で表される流動性指数を得る。噴流性指数も同じように崩潰角、差角、分散度を測定し、それに先の流動性指数の4つから Table. 2 にしたがって噴流性指数を求める。これらのもとになる7個の測定値は、粉体の流動性または

Table. 1 粉体の流動性指数表

流動性の程度	流動性指数	架橋防止対策	安息角		圧縮度		スパチュラ角		均一度*		数値集中度**	
			度	指数	%	指数	度	指数	—	指数	%	指数
最も良好	90~100	不 必 要	<25 26~29 30	25 24 22.5	<5 6~9 10	25 23 22.5	<25 26~30 31	25 24 22.5	1 2~4 5	25 23 22.5		
良 好	80~99	不 必 要	31 32~34 35	22 21 20	11 12~14 15	22 21 20	32 33~37 38	22 21 20	6 7 8	22 21 20		
かなり良好	70~79	バイブレーターが必要な場合がある	36 37~39 40	19.5 18 17.5	16 17~19 20	19.5 18 17.5	39 40~44 45	19.5 18 17.5	9 10~11 12	19 18 17.5		
普 通	60~69	限界点、架橋あり	41 42~44 45	17 16 15	21 22~24 25	17 16 15	46 47~59 60	17 16 15	13 14~16 17	17 16 15	>6	15
あまり良くない	40~59	必 要	46 47~54 55	14.5 12 10	26 27~30 31	14.5 12 10	61 62~74 75	14.5 12 10	18 19~21 22	14.5 12 10	6~9 10~29 30	14.5 12 10
不 良	20~39	強力な対策が必要	56 57~64 65	9.5 7 5	32 33~36 37	9.5 7 5	76 77~89 90	9.5 7 5	23 24~26 27	9.5 7 5	31 32~54 55	9.5 7 5
非常に悪い	0~19	特別な装置と技術が必要	66 67~89 90	4.5 2 0	38 39~45 >45	4.5 2 0	91 92~99 >99	4.5 2 0	28 29~35 >35	4.5 2 0	57~79 >79	4.5 2 0

* 粒状または粒状の粉で均一度が測定できる場合はこの値を使用する。

** 凝集性の強い微粉で凝集度が測定できる場合はこの値を使用する。

Table. 2 粉体の噴流性指数表

噴流性の程度	噴流性指数	防 止 対 策	流 動 性		崩 潰 角		差 角		分 散 度	
			表2による指数	指数	度	指数	度	指数	%	指数
非常に強い	*80~100	ロータリーシールが必要	>60 59~56 55 54 53~50 49	25 24 22.5 22 21 20	10 11~19 20 21 22~24 25	25 24 22.5 22 21 20	>30 29~28 27 26 25 24	26 24 22.5 22 21 20	>50 49~44 43 42 41~36 35	25 24 22.5 22 21 20
かなり強い	60~79	ロータリーシールが必要となる	48 47~45 44 43 42~40 39	19.5 18 17.5 17 16 15	25 27~29 30 31 32~39 40	19.5 18 17.5 17 16 15	23 22~20 19 18 17~16 15	19.5 18 17.5 17 16 15	34 33~29 28 27 26~21 20	19.5 18 17.5 17 16 15
傾向がある	40~59	ロータリーシールが要求されることがある	38 37~34 33	14.5 12 10	41 42~49 50	14.5 12 10	14 13~11 10	14.5 12 10	19 18~11 10	14.5 12 10
するかも知れない	25~39	流動の速さや投入の状態によっては、R. S. が必要	32 31~29 28	9.5 8 6.25	51 52~56 57	9.5 8 6.25	9 8 7	9.5 8 6.25	9 8 7	9.5 8 6.25
な し	0~24	不 必 要	27 26~23 <23	6 3 0	58 59~64 >64	6 3 0	6 5~1 0	6 3 0	6 5~1 >1	6 3 0

【付記】表2, 3は Carr 氏および Mc Graw-Hill 社の承認を得て, Chemical Engineering, Jan. 18 (1965), 166頁および187頁より転載したものです。

噴流性により大きく変化するが、流動性、噴流性以外の要素の影響も受け、またお互に独立した値でもない。流動性、噴流性に関係ある特性値をそれぞれ4つの別な方法で得て、これらを適用範囲を広げ、平均する意味で指数を合計しているものと思われる。

粉体プロセスにおける流動現象は、粉体自身の基礎的な物性、例えば粒子比重、粒子形状、粒度分布、粒子間付着力などと、粉体のおかれた状態を示す値、例えば空隙率、配位数、粉体圧、その他などから、いづれは解明

できるものと考えられるが、現状では一、二の簡単なものをのぞいて、直接こうした基礎物性と状態変数から推定することは困難である。

したがって現状では、定められた方法での流動性に関係ある特性値を測定したり、実際のプロセスでの現象に近い特定な装置での流動特性を測定し、これを流動性を示す数値、あるいは流動性指数として粉体プロセスの流動現象を推定するのに用いられている。

こうした流動性を示す測定値や流動性指数は実際のプ

プロセスでの流動現象に近い測定の方法をとるほど、その値を用いての流動現象の推定が容易になるが、一方プロセスでの流動現象も色々あって、特定の現象のみにしか適合しなくなったり、粉体の物性としての流動性を表わすものとして普遍的でなくなる。

Carr の流動性指数はそれを構成する四つの特性値の性格からいって、流動層とか、篩網面上での粒子の運動などの動的なものではなく、静的な状態、架橋現象、ホッパー出口の粉体の挙動のような限界応力状態での流動現象を推定するのに適すと考えられる。また4つの異なる測定値からの得点を合計することにより、特定の流動現象でなく、より一般的なものへの適用、総合的な意味での流動性を表わすことが特徴だと言える。

しかしながら、この Carr の流動性指数がどの程度粉体の物性としての流動性に適合しているかは明確でない。またこの Carr の流動性指数が実際の粉体プロセスでの流動現象にどう応用できるかも明らかでなく、わずかに Table. 1 に示される「流動性の程度」と「架橋防止対策」の欄がある程度で、しかも Carr¹⁾²⁾³⁾の文献にもこの点については記述がない。

§ 3. Carr の指数に関する従来研究

Carr の流動性指数は前述のごとく理論的な根拠があって表現されたものではなく、流動性指数を構成する4つの測定値にしても、この4つを選ぶこと自体が適当であるかということも疑問がある。またそれぞれの測定値のランクの分け方、指数の定め方についても、Carr の文献には記述が少なく詳細には不明であるが、その基準は流動性の絶対的な基準を別に出すことができない以上多分に彼自身の経験と主観にたよらざるを得なかったと思われる。したがってこの流動性指数が理論的な真の流動性をいかに表わしているかと言うことよりも、使用上の Carr の指数の意義、妥当性を検討すべきであると思われる。

Carr の流動性指数とそれを構成する4つのそれぞれの測定値との間の相関性を調べるのが行なわれている⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾

Carr の流動性指数およびそのもとになる4つの測定値とも流動性を完全に表わすとは限らないので、こうした方法で、Carr の流動性指数、または4つの測定値を評価することは問題があるが、安息角、圧縮度などは従来から流動性を示す目安として用いられているし、それらが Carr の指数に対してどれだけ寄与しているか、まだ流動性の大小、どの部分でそれらの測定値が特徴づけられているかは明らかになる。

三輪氏の実験結果⁷⁾ (Fig. 1, Fig. 2) においても安

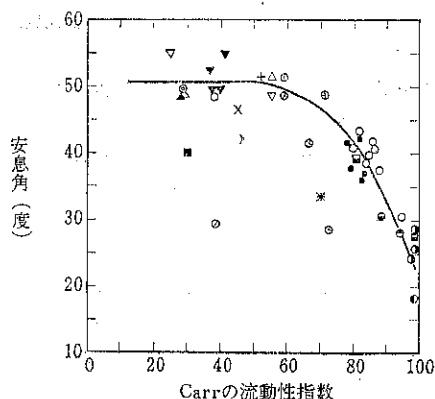


Fig. 1 Carr の流動性指数と安息角⁷⁾

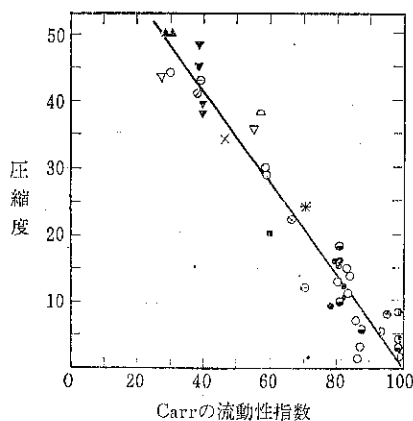


Fig. 2 Carr の流動性指数と圧縮度⁷⁾

息角は流動性指数の大きなところ、すなわち一般的には付着性の少ない流動性の大きい粒体に近い方で流動性指数と相関が強い。従来から安息角は流動性の目安として用いられて来たが、特にさらさらした流れやすい粒体の範囲で有効である。それに対して流動性指数の小さいところ、すなわち付着性のある粉体では凝集性、圧縮度がよりよい対応を示している。特に圧縮度は流動性指数全域に対して良い相関度を示しており、圧縮度のみで大きな流動性指数の推定ができるほどである。

矢野氏⁸⁾⁹⁾らは粉体の混合において粉体での流動性と混合速度係数および最終混合度との関連を調べるために流動性の尺度として Carr の流動性指数を取りあげ、これを検討し流動性指数と4つの測定値との関連を同様にして調べている。矢野氏らの結果では (Fig. 3, Fig. 4) 流動性指数とスパチュラ角が最もよい対応を示し、安息角、圧縮度の順である。これはこの研究が混合操作を対象とし、サンプルが比較的流動性のよい粒体が多く、流動性指数の大きな範囲に限られたためと思われる。

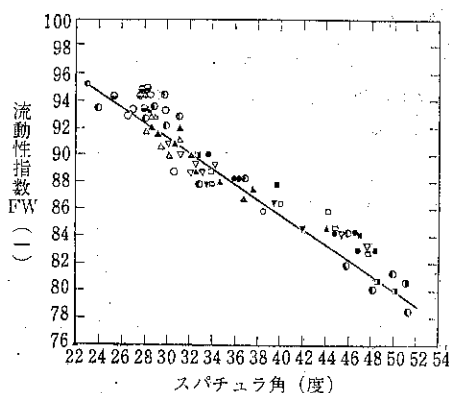


Fig. 3 流動性指数とスパチュラ角⁸⁾

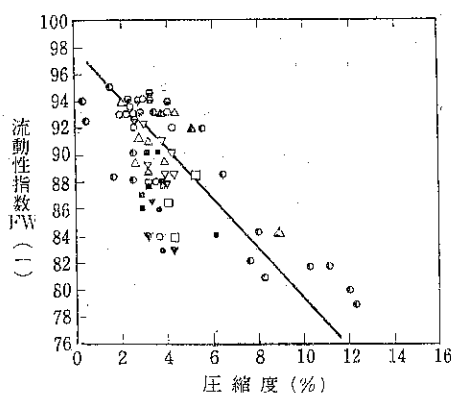


Fig. 4 流動性指数 F_W と圧縮度⁸⁾

Carr の流動性指数は4つの流動特性に関する測定値を用いて多角度から検討することになり、広い範囲でたとえ流動性を完全に表わさなくともその傾向を大過なく得るようにしていると思われる。

佐藤氏¹⁰⁾らは Carr の指数をチェックするため53種類のサンプルについて感覚的な指数との相関性を見だしている。すなわち、粉体をあつかう現場および試験研究担当の12人に対して流動性について感覚的判定——流動性の良否をホッパーやドラム缶からの取出しや流出状態についての経験をもとに取扱上において架橋防止対策を必要と感じているかどうかをひとつの目安にして10段階に分割し、まったく経験からの区分を行う——を行なってパウダーテスターの結果と比べた。Fig. 5 に示すごとくパウダーテスターによる流動性および噴流性の数的表現は実用上から見て、一応感覚的なものを数的に表現しているものとみなしてよいと思える結論している。

矢野氏⁹⁾らの研究では粉体の流動性と混合速度係数および最終混合度の関係を知るために Carr の流動性指数がその尺度となり得ることを確認した上、流動性指数が大なるほど混合速度係数が大きくなることを確認し

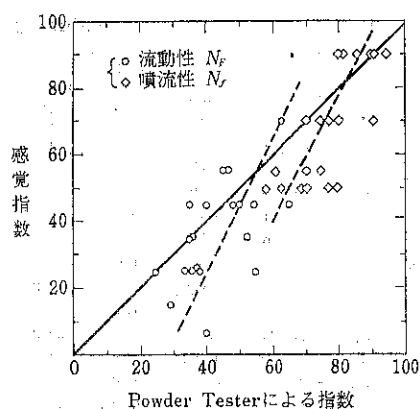


Fig. 5 Carr の指数と感覚指数の関係¹⁰⁾

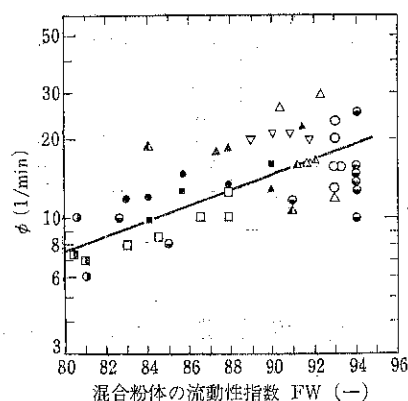


Fig. 6 混合速度係数 ϕ と混合粉体の流動性指数⁸⁾

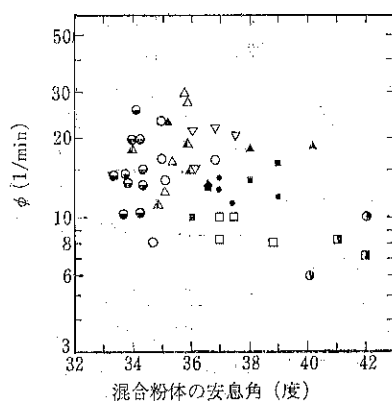


Fig. 7 混合速度係数 ϕ と混合粉体の安息角⁸⁾

た。しかも混合速度係数は安息角よりも、Carr の流動性指数により大きな相関性を持つことを明らかにしている。これは混合速度に影響する流動性の尺度として安息角よりも Carr の流動性指数の方が適していることを示し意義がある。(Fig. 6, Fig. 7)

Table. 3 実験に用いた試料の性質

No.	試料名	記号	見かけ比重		圧縮度		安息角		スパチュラ角		凝集・均一度		流動性指数	限界流出長さ mm
			ゆみ	固め	測定値	指数	測定値	指数	測定値	指数	測定値	指数		
1	けいそう土	I	0.119	0.331	64	0	51	12	80	7	90.9	0	19	80
2	けい石	V	0.235	0.480	51	0	55	10	87	12	57.8	2	24	38
3	炭酸カルシューム	N	1.06	1.76	49	2	50	12	66.5	12	59.6	2	28	14
4	石 棉	J	0.144	0.33	55.4	0	43	16	63	12	99	0	28	64
5	炭酸カルシューム	K	0.572	1.25	54.5	0	45	15	72	12	77	2	29	28.5
6	炭酸カルシューム	M	1.04	1.67	88	3.5	49	12	63	12	34.5	7	35.5	18
7	タルク	S	0.625	1.19	47.2	0	50	12	72	12	21	12	36	28.5
8	けい砂	U	0.882	1.47	39.9	2	48	12	62	12	16.5	12	38	19
9	けい石	W	0.850	1.40	39.2	2	45	15	67	12	16.5	12	41	23
10	タルク	Q	0.302	0.652	53.7	0	40	17.5	66.5	12	25.8	12	41.5	35.5
11	炭酸カルシューム	L	1.22	1.85	34	7	49	12	54	16	47.3	7	42	23
12	酸化チタン	E	0.438	0.825	48.9	0	43	16	56.5	16	11.5	12	45	44
13	酸化亜鉛	G	0.617	1.02	39.9	2	43	16	58.5	16	27.5	12	47	31.5
14	澱粉	D	0.655	0.920	27.8	12	46	14.5	75	10	2.74	15	51.5	30
15	炭酸カルシューム	O	1.47	1.82	19	18	47	12	57	16	38.9	7	53	6.5
16	P V A	F	0.324	0.360	28.2	12	40	17.5	61	14.5	0.6	15	59	26.5
17	ポリエチレン	A	0.290	0.412	29.6	12	43	16	56.5	16	3.67	15	59	13
18	タルク	R	1.15	1.49	22.6	16	37	18	49	16	△ 8.0	20	70	9
19	けい砂	T	1.24	1.48	16	19.5	38	18	46	17	△ 1.6	25	79.5	3.5
20	炭酸カルシューム	P	1.687	1.671	0.239	25	39	18	33	21	△ 1.77	23	87	>3.5
21	砂	X	1.603	1.640	2.26	25	38	18	31	22.5	△ 1.58	24	89.5	2
22	ジルコンサンド	C	2.960	3.110	4.72	25	36	19.5	30.5	22.5	△ 1.4	25	92	>1.5
23	ジルコンサンド	B	2.940	3.050	3.5	25	32	21	29.5	24	△ 1.4	25	95	>1
24	ポリスチレンビーズ	Y	0.675	0.675	0	25	4	25	12.5	25	△ 1.58	24	99	>1.5

(△均一度)

§ 4. Carr の流動性指数と架橋に関する一つの試み

当研究所においてもパウダーテスター試作以来、流動性指数を測定したサンプルの数は450点以上にのぼっている。しかしながらそれらの数値と実際のプロセスでの流動現象との関連が確認されたものは残念ながら数少ない。Table 1 に架橋防止対策の欄があるように、Carr がこの流動性指数に最も期待したのも架橋のできやすさ、またその強さとの結びつきであろう。Carr は流動性指数の求め方を示し、それにより粉体を分類したが、実際プロセスでの流動現象と関連づけたものはTable 1 の欄以外にはない。

筆者らは24点のサンプルを選び流動性指数と架橋のでき易さとの関係をしらべた。24点のサンプルの流動性指数及びその内訳はTable 3 の通りである。またこれらの流動性指数と4つの測定値との関係はFig. 8 A, B, C, D に示す通り、従来のものと同様な関係を示す。

架橋のできやすさは、実際のホッパーに近いもので測定したかったが、便宜上Fig. 9 のような測定器具を作った。すなわち、一端が広く他端へ行くほどせまくなる流出口を有する流出板とその下に開閉できる底板を有する容器に試料の粉体を一様に入れた後、下の底板を静かに開く。試料の粉体は開口幅の大きい方から流出され、

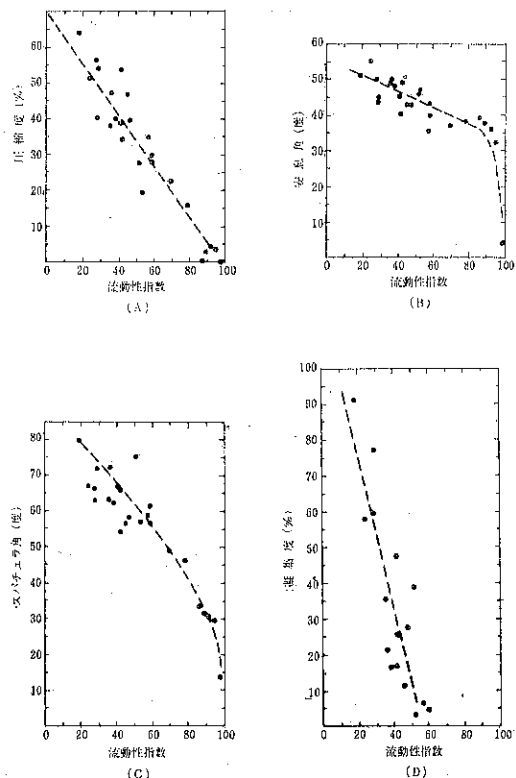


Fig. 8 実験した試料の流動性指数と4つの測定値

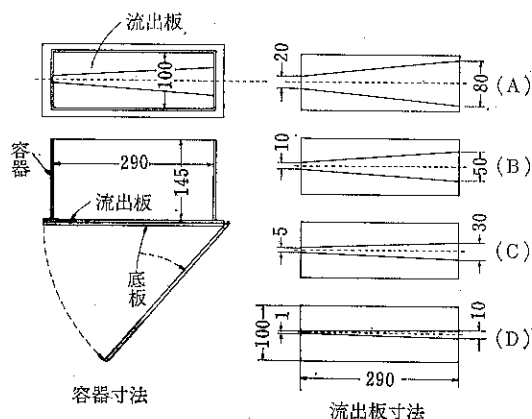


Fig. 9 実験装置

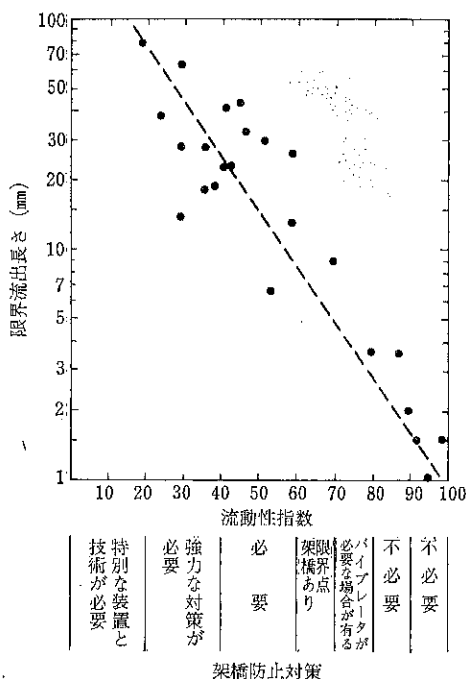


Fig. 10 限界流出長さ（mm）と流動性指数

途中で開口幅が小さくなるので架橋を作り流出がとまる。この時の開口幅の大きい端から架橋している粉体の側面までの距離を測定して、これからこの位置の流出口の幅を算出して、「限界流出長さ」とした。測定は3度行い、近い2度の平均値をとった。

Carrの流動性指数と限界流出長さとの関係をFig. 10に示す。Carrの流動性指数が大きくなるほど限界流出長さは小となり、ほぼ架橋のできやすさを表現していると思われるが、バラツキもかなりあり、Table. 1のように区分で評価の方が適切であると考えられる。

圧縮度 (Fig. 11)、スパチュラ角 (Fig. 12)、安息角 (Fig. 13) とも限界流出長さに対し流動性指数と似た

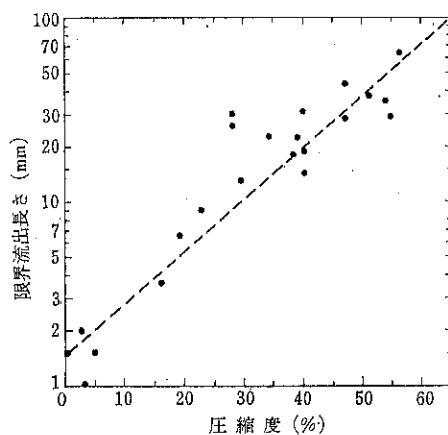


Fig. 11 限界流出長さ（mm）と圧縮度（%）

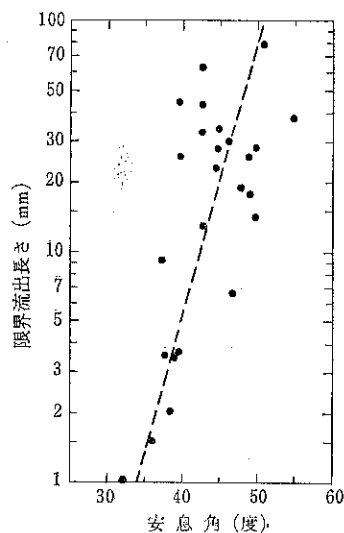


Fig. 12 限界流出長さ（mm）と安息角（度）

対応を示している。スパチュラ角、および安息角はサンプルに対して変化の範囲がせまく、一方限界流出長さの測定もバラツキが出るので、流動性指数、圧縮度に比べて架橋のしやすさを推定しにくい。

§5. む す び

パウダートスターによる Carr の流動性指数の応用としては (i) 品質管理 (特性値の測定) への応用, (ii) 設計, 取扱への応用, (iii) 流動性の基準としての応用などがあげられる。

現在使用されているパウダートスターの多くは (i) 品質管理上の問題に使われていると推定される。この場合、必ずしも流動性指数で比較されるのではなく、その基となる測定値のいくつかを対象とされる。同一物質での流動性の比較には適応しやすい。

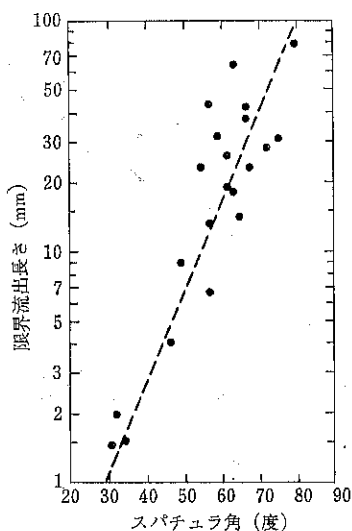


Fig. 13 限界流出長さとスパチュラ角

(ii) 設計・取扱への応用は総合的な評価という点で、必ずしもプロセスでの流動現象と一致しない場合もあるが、大まかな区分は可能であり、パウダーテスターでの値が要注意な場合には、更に別な方法、すなわち実際のプロセスに近い方法で再検討したり、十分に架橋その他のトラブルを予測した設計、取扱方をあらかじめ検討しておくのがよい。

(iii) 流動性の基準としての応用では、Carr の流動性指数が理論的に裏づけられたものでもなく、完全に粉体の流動性を表わしているとは考えられないので、そのまま流動性の基準として用いるには問題がある。しかし

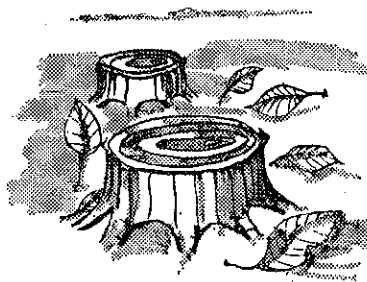
矢野氏の混合での実験のように、あらかじめチェックされたサンプルがプロセスでの流動現象において、流動性指数とよりよい相関を示すような場合、流動性の基準として充分使用し得るものと思う。

粉体の流動性に関しては、流動性の定義をどうするか、それをどう測定するか、定義された流動性の表現がプロセスでの流動現象、粉体の基礎物性とどう結びつくか、等の基本的な問題が多い。パウダーテスターについても、最初に述べたように既に 250 台が使用されているが、同じ問題の内にある。

筆者らは実際のプロセスでの現象と結びつけた、パウダーテスターのデータが数多く蓄積され、パウダーテスターでの流動性、噴流性指数の適用可能な範囲、その適用についての方法、信頼性など明らかにされて来ることを願うものである。

参 考 文 献

- 1) R. L. Carr : Chem. Eng. 72, Jan. 18, 163 (1965).
- 2) R. L. Carr : Chem. Eng. 72, Feb. 1, 69 (1965).
- 3) R. L. Carr : Chem. Eng. 76, Oct. 13, 7 (1969).
- 4) 横山, 浦山 : 粉体工学研究会誌, 6, 264 (1969).
- 5) 横山 : “粉砕” No. 14, 102 (1969).
- 6) 三輪, 竹内 : “粉砕” No. 15, 8 (1970).
- 7) 三輪, 清水 : “粉砕” No. 16, 103 (1971).
- 8) 矢野, 寺下, 山崎 : “粉砕” No. 16, 96 (1971).
- 9) 矢野, 寺下, 山崎 : 粉体工学研究会誌, 9, 83 (1972).
- 10) 佐藤, 井上, 宮田佐々木 : 粉体工学研究会誌, 9, 90 (1972).



粉碎のはなしⅢ—粉碎理論は役に立つのか

Applicability of Comminution Theories

田 中 達 夫*

Tatsuo Tanaka,

1. ま え が き

前に粉碎のはなしを少々脱線気味に本誌に書かせて貰ったことがある。最近号から編集会議で審査される規定になったというわけではないが、本稿では一層マジメに考えていることを述べたい。

本誌16号に松居先生の多年の力作である『粉碎理論』に関する基礎的な研究の総括が掲載されている。たしかに物性論的に粉碎理論は Kick, Rittinger の昔にさかのぼるまでもなく、1952年の Bond¹⁾ の時代から見ても飛躍的に深く研究され、またさらに深く広く進行中であるように思われる。

しかし、どうも筆者の直感ではこのような基礎的研究が実際の粉碎機の設計とか操作上の定量的指針に直接応用されるようには思えないし、たとえ使われたとしても、ごく初期の段階での定性的な判断がせいぜいではないかと思われる。

物性論的立場としては粉碎に使われる正味のエネルギーこそ特定の物質の粉碎性に直接対応するものであることは誰でも否定はしないだろうが、現実はそのよりも粉碎機の損失を含めた Bond の Work Index の方がはるかに便利なものとして、ひろく使われているのは御承知の通りである。

筆者自身このような『科学』と『技術』の間の本質的な谷間を残念に思うし、そのいずれに偏することも、粉碎学の健全な発展に寄与するところが少ないようにも思い、大いに悩んでいるといった方がよいかも知れないが、この際お互いの立場に『寛容と調和』を強調してみても一向に意味が判らないし、『決断と実行』を唱えてもヘマをやるのが必定である。やっぱり手探りで冷静

にこのギャップを一つづつ埋めてゆくのが正道であろう。

2. 粉碎現象と解析

たとえばボールミルで、ある物質を粉碎するとしよう。現象的には、ある条件で一定時間ボールミルを動かすと、一定のエネルギーを消費した結果ある細かさに粉碎された碎製物がえられる。昔はこの細かさ、すなわち比表面積とか粒度分布を測り、仕事量とか時間に対してプロットするなどの纏め方をしたけれども、この一つの結果から他の条件またはスケールアップされたときの粉碎曲線を予知することは全く不可能である。これは条件が変わったときに、共通に取扱うことのできる因子がはつきりしていないからである。もう少し詳しくいえば、粉碎現象（われわれが直接みることのできる）は、実はたまたま選ばれた一箇の粒子が破壊して細かい細片（それらの一つ一つはまた何回か破壊を受けるだろう）に分れたものを寄せ集めたものと、一方では全くこわれないうちに残った粒子の混合物を併せてとり出してみていることに外ならない。つまり粉碎機の中でも常に粉碎されるとは限らないことを正直に記述すべきであって、このこわされる割合は確率で表現できる。この確率は恐らく物質や粒径の関数であり、また特定の粉碎機構に対して与えられるものであって、単位時間にある粒径の粒子が選択されて粉碎を受ける確率を Selection Function とか Rate Function と呼び、 $S(x)$ であらわすことにする。

一方えらばれてこわれた粒子は、その物性によってきまった粒度分布を示すであろう。この単粒子の破壊特性はまさしく物性に直接関係するもので、材料科学の範疇に属するものである。単粒子破壊の結果生じる粒度分布を累積篩下で表わしたものを Breakage Function、頻度分布（前者の微分）で表わしたものを Distribution Function という。

* 北海道大学工学部合成化学工学科

(〒063 札幌市北12条8) TEL 011-711-2111

粉碎現象はこの2つの関数を使って数学的に記述できる。いうなれば、一方では確率的な速度過程、すなわちボールミルの中で粒子群がどのような運動をしボールにぶつかるかというような化学工学が比較的得意とするような分野と、一方では前述のような物性的な分野の破壊機構という2つに支配されているわけで、この2つの組合せによってボールミルの条件をかえ、物質を変えたときの粉碎現象はいろいろと変化してくる筈である。だからこの2つの関数を充分に研究するならば、どのような粉碎機におけるどのような物質の粉碎結果をも予測することが可能になる筈で、特定ミルのスケールアップはもちろん、頭の中で考えた新しい粉碎機的设计も可能になる筈である(いまはそこまで行っていないが)。

ではどのようにこの2つの関数を使って粉碎現象を記述できるのか、面倒くさい式はなるべく省くとしても要するに誰でも納得できる物質収支に関する微分方程式をたてればよい。すなわち、ある粒径をもつ粒子の重量の単位時間当りの変化は、その時間内でその粒径から粉碎されてそれよりも小さい粒径に移行して減少する量と、その粒径より大なるすべての粒子の中で選択されたものが、単粒子破壊されて特定の分布をもち、その中で今考えている粒径におちこむものをすべて加えた量との差であって、それを式で書くと次のようになる²⁾。

$$\frac{\partial^2 D(x, t)}{\partial t \partial x} = - \left(\frac{\partial D}{\partial x} \right) S(x) + \int_x^{x_m} \left(\frac{\partial D}{\partial r} \right) S(r) \frac{\partial B(r, x)}{\partial x} dr \quad \dots\dots\dots(1)$$

$D(x, t)$ はたとえばボールミルで t 時間粉碎したときの碎製物を直径 x のふるいでふるったときの通過量分率で、日常われわれが実際に測定している量である。 $S(x)$ が前述の Selection Function, $B(r, x)$ が Breakage Function で、積分変数である粒径 r の単粒子を砕いたときの x に対する篩通過量分率である。この式はややこしいからサラリと横目で見ただいて結構であるが、要するに $S(x)$ とか $B(r, x)$ の数学的な関数型がきまり、初期条件を与えれば何とか積分ができ、 $D(x, t)$ すなわち粉碎現象を時間的に追ってゆけることがわかるであらう。

これが最近世界的に注目され始めた速度論の基礎であり、要は $S(x)$, $B(r, x)$ を別々にしっかりきめることである。ボールミルとジェットミルで同じ物を碎けば恐らく $B(r, x)$ はほぼ同じで $S(x)$ は全く違ったものだろうし、ボールミルで異種の物質を碎けば $S(x)$ よりも $B(r, x)$ の方が変わるかも知れない。むしろ $S(x)$ も物質の影響がないという保証はない。その辺を明らかにすることが、粉碎工学の大変大切な要素になると思う。

3. 碎製物の粒度分布の時間的变化

詳細な数学的誘導は一切省いて、われわれが得た一つの結果を示すと次のようになる³⁾。ためにしに

$$B(r, x) = (x/r)^m \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$S(x) = Kx^m \quad \dots\dots\dots(3)$$

とおく。 m は定数で両方の関数に共通と仮定する。 K は速度定数であって、ある粉碎機のメカニズムに対して定まる定数と考える。これを(1)式に入れて積分すると

$$R(x, t) = R(x, 0) \exp(-Kx^m t) \quad \dots\dots\dots(4)$$

となる。ただし $R = 1 - D$ で篩上である。 $R(x, 0)$ は $t = 0$ すなわち碎料の粒度分布であり、粉碎の初期では碎製物の細かさは碎料のそれに影響を受ける。もし t が充分長く、碎製物で問題にする粒径 x が小さいとき、たとえば1cm位の碎料から100ミクロン以下の碎製物を得るような場合には、 $R(x, 0) \approx 1$ と考えられるので

$$R(x, t) = \exp(-Kx^m t) \quad \dots\dots\dots(5)$$

となって、歴史的に有名なロジン・ラムレー分布が得られ、また曾て中条氏⁴⁾の指摘するように(図1) $\exp$ のベキが粉碎時間 t に比例するという事実によく一致する。しかし過去の実験的研究の中には、イイイヤ t のベキは1ではなく0.8~1.5であると指摘する方もある筈で、この際小さいことだと思うけれども、(2)(3)式の m を共通にした強引な仮定を一步ひき下って²⁰⁾

$$B(r, x) = (x/r)^m \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$S(x) = Kx^n \quad (\text{一般に } m \neq n) \quad \dots\dots\dots(3')$$

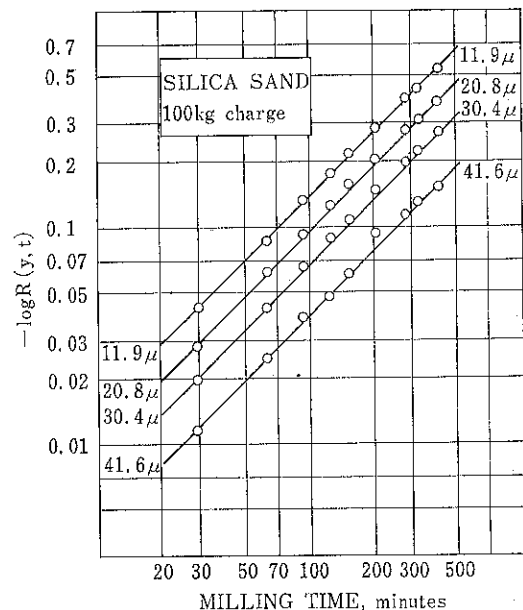


図 1

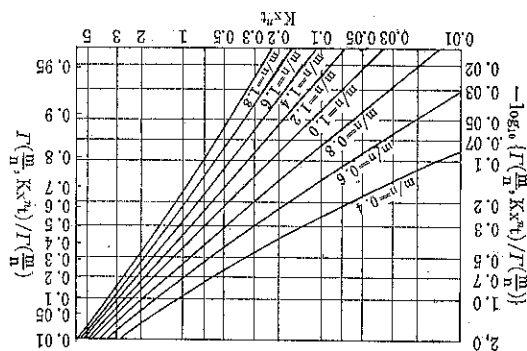


図 2

とすると、これだけのことで(1)式の積分はトテツもなく厄介になるが、結論的には解析的な近似解がある。

$$R(x, t) = R(x, 0) \Gamma(m/n, Kx^n t) / \Gamma(m/n) \quad (6)$$

$\Gamma(m/n)$ はガンマ関数、 $\Gamma(m/n, Kx^n t)$ は第2種不完全ガンマ関数と呼ばれ、その結果を Rosin-Rammler 型の点綴で示すと図2のようになって、近似的に t のべきが1よりも大きくなったり、小さくなったりすることがわかり、それは (m/n) によって一義的に決まる。 m や n は恐らく物理的に意味のある数であり、粉砕のメカニズムや材料物性によって定まる値であろう。偶然にも $m \approx n$ となる範囲が多いだろうことは中条氏の論文から推察される。

ともかく、 B や S にこのような関数型を仮定することによって、ボールミルのような集合的粉砕の実験結果を一応説明することができそうである。しかし、(2)(3)式(または(3')式) はあくまでこちらに都合のよい仮定であって、今までの話ではそれらが正しいことは必ずしもいえない。両方とも間違っただけでも結果が実験に合うことだってあるのだから。

4. 破砕関数と選択関数

単粒子の破砕による粒度分布について確率的に扱った Gilvarry⁵⁾ の有名な研究があるが、その後 Meloy らのも巧妙な理論を展開して次の式を誘導した。

$$B(r, x) = 1 - \left(1 - \frac{x}{r}\right)^r \quad \dots\dots\dots(7)$$

すなわち r なる大きさの単粒子がこわれたときに、 x という大きさのふるいを通過する重量分率が $B(r, x)$ で、前節の Breakage function (破砕関数) である。ベキ r は一定値で $r=10$ といわれるが、物理的には r に入る亀裂の数ということになる。

また Callcott ら⁷⁾ は

$$B(r, x) = 1 - \exp(-x/r) / 1 - \exp(-1) \quad \dots\dots\dots(8)$$

を理論的に導いているが、いずれも数値的には(2)式で近

似できる曲線になっている。しかし $B(r, x)$ に与える力の影響などが全く入っていないが、この点で松居先生や八嶋先生の基礎研究に深く期待せねばならぬ。

これに対し、Selection Function 選択関数については全く理論的な仕事はなく、2~3の実験的な結果が示されたにすぎず、いずれも(3)式の形であとは実験値に合わせて定数を決めた程度である。

筆者⁸⁾の研究室でボールミルのような粉体層に衝撃力が加えられる場合の $S(x)$ を大胆な仮定の下に理論的に誘導した結果、 $S(x)$ は次式で与えられた。

$$S(x) = 0.276(\rho k^{-2} F^{3/2} f N / W) x^{3b/2} \quad \dots\dots\dots(9)$$

ρ は固体の密度、 k は強度 (10式)、 F は力、 N はボール数、 f は一箇のボールが単位時間に粉体層に当たる回数、 W は砕料の重量 (ホールドアップ) である。ただし固体の強度 σ が粒径 x の関数で、一般に次式があてはまる。

$$\sigma = kx^{-b} \quad \dots\dots\dots(10)$$

粒径 x が大きいほどその粒子は弱いので x のベキはマイナスがつき $b=0.2 \sim 0.9$ (平均 0.5) といわれる⁹⁾。 k も b も物質に固有な値である。(9)式は実験定数は含まないが中条氏のデータとか Austin ら¹⁰⁾ の最近の研究者の実験値とはまあよろしい一致がみられチョット不思議な気がするが、さらに工業的なチューブミルのデータともそんなに外れない。

$b=0.2 \sim 0.9$ とすれば(9)式の x のベキは1をはさんで $0.8 \sim 1.35$ となり、これは(2)式の m に相当し、速度定数 K が(9)式の括弧内の値によって変化すると考えられるので、この式はボールミルのスケールアップを可能にする筈のものであるが、さてどんなものであろうか。

ためしに中条氏²⁾が93cmの直径のボールミルで珪砂粉砕を行った実験値から $x=100\mu$ に相当する $S(100\mu)$ を求めると $12.7 \times 10^{-4} (\text{sec}^{-1})$ となるが、平均的に $b=0.5$ として(9)式によって計算すると $3.24 \times 10^{-4} (\text{sec}^{-1})$: また Bowdish¹¹⁾ の10インチ内径のボールミルでは前者が $7.07 \times 10^{-4} (\text{sec}^{-1})$ 後者が $9.82 \times 10^{-4} (\text{sec}^{-1})$ 。また全国のセメント工場のチューブミルのデータから筆者が最近計算してみた一例は、 $S(x)$ でなくて、 $K \approx 2.1 \times 10^{-5} [1/\mu \cdot \text{sec}]$ 、(9)式による計算値の $K = 1.27 \times 10^{-5} [1/\mu \cdot \text{sec}]$ というふうにまあまあよい一致が見られた。もう少し brush-up すればもっとよくなるような気がする。

5. Work Index とは何か

すでに周知のように1952年粉砕の第3番目の法則として Bond の法則⁴⁾が提出されたが、粉砕の仕事量 W [KWH/t]

$$W = W_i \left(\frac{\sqrt{R}-1}{\sqrt{R}} \right) \sqrt{\frac{100}{x_p}} \quad \dots\dots\dots(11)$$

x_p は砕製物の代表径, R は粉碎比で, W_i を Work Index といい, $x=\infty$ の大きさから 100μ まで砕くに必要なエネルギーということになっている。この仕事指数は物質に固有のものとされ, JIS規格でもこれを採用し, 各工業界でも多くの測定が行われているようである。

もし W_i が粉碎機に無関係に物質固有のものであれば粉碎機の効率は常に一定であり, たとえばジェットミルがスケールアップされると効率が上昇するというようなことはあり得ないことになる。果して本当に W_i は粉碎機の種類や操作条件を変えても一定なのであるか。

実際問題として, せまい操作範囲で W_i が実験的に一定とみなしうることはあろう。出てきたデータをワヤクチャに算術平均してしまえば, 何となく一定値みたいな気がしないでもないが, 理屈 (速度理論と古典仕事則) をこねまわした結果¹²⁾ 次のような関係が導き出された。

$$W \approx (\lambda/K) (x_0)^{-m} \quad \dots\dots\dots(12)$$

W は (KWH/ton) すなわち単位質量当りの仕事量, x_0 は砕製物の仮想、最大径である。 λ はその粉碎機のある条件における砕料の単位重量当りの動力である。 K はすでに何度も出てきた速度定数である。

(11)と(12)式を比較すれば Work Index W_i は (λ/K) に比例すると考えてよい。ゆえに W_i が一定であるためには λ と K のそれぞれにおよぼす操作条件の影響が同じでなければならない。もともと λ は力学的, 機械的なものであり, K は確率論的なものであるから, 一般的にはこれら両者が比例するということは考えられないであろう。実際にそうであるかはともかく, W_i が変化しないという保証はない。

ところがボールミルをスケールアップしてミル直径 D を大きくすると, 理論的に $\lambda \propto D^{0.5}$ であり, (9)式括弧内すなわち K は, F と f に対する D の影響を考えると $K \propto D^{0.6}$ になって, 結果的には W_i は $D^{-0.1}$ と, D の影響をあまり受けないことになる。ボールミルに関する限りこうではあるが, だからといって W_i がどんな場合にも一定とはいえない。現にジェットミルは大型化すると大変効率がよくなる事実があり, 二律排反というのか, このことを認める限り W_i = 一定を否定することと同義である。

6. スケールアップと速度理論

では仕事指数 W_i という便利だけれども工学的にはややタヨリないものを使わないで, スケールアップはでき

ないだろうか。 (12)式をちよっとひねると次のような簡単な関係が得られる¹²⁾。

$$F/KW = x_0^m \quad \dots\dots\dots(13)$$

F は砕料の処理量 (ton/hr) W は粉碎機内の砕料のホールドアップである。 K , x_0 はそのまま前と同じである。だから砕料に比べて砕製物の細かさ x_0 が十分に小さいとき, その砕料 F を粉碎する機械は, K という速度定数をもつときの粉碎条件で W というホールドアップを保有することが必要になる。逆にそのような W をもつ粉碎機を作ればよいことになる。だから小型のテストミルの結果 (添字 0 をつける) と同じ砕製物を得るためには

$$W = W_0 (K_0/K) (F/F_0) \quad \dots\dots\dots(14)$$

によればよい。

一例としてチューブミルのスケールアップを考えてみよう。その前に, それではホールドアップ W をえ同じならどんな形のチューブミルでもよいかどうかということである。細長いキセルみたいなミルでも, 太短いタイコのお化けみたいなミルでも同じ W を保有できるが, 経験的にチューブミルはそんな変なのはなくてややスマートである。しかし, 直径 D と長さ L をはっきり決めるフィロソフィはない。

結論的にいうと, D は砕料にはあまり関係なくて, 実は粉体の流れが支配するのである。要は F (ton/hr) をミル内のホールドアップ W のレベルを最適に保ちつつ, 入口から出口まで定常的に送り出せるにふさわしい直径があるわけで, この直径を次のように理論的に導くことができる¹⁸⁾。

$$D_c = \sqrt{4F/\pi\phi v\rho_a(1-U_0f\varepsilon)} \quad \dots\dots\dots(15)$$

$$D_0 = \sqrt{4F/\pi\rho_a f\phi v(1-U_0)} \quad \dots\dots\dots(16)$$

D_c はこれ以下の直径ではダメだという臨界径, D_0 は粉碎には最適であろうというミル径である。ここで ϕ はミルの仕切板のスリットの開孔面積率 (普通は10%前後) f はミル内媒体占有面積率, ε はその空間率, v はスリットを通過する粉体のスピード, ρ_a は粒子のかさ密度, U_0 は恐らくミルの幾何学によってきまるところの, 砕料が媒体の空間を埋める割合 (普通25%くらい) で, 連続ミルの場合フィードをとめても一定量の砕料が残留することを示したものである。

論より証拠。実際の工場で長年の歴史をもっているチューブミルのデータは, 恐らくエンジニアの良心にバックアップされてたとえ変テコな形のミルでもその最高の性能を上げるように optimize された結果と考えてよいだろう。日本全国のセメント工場のデータを抽出して使った実際のミル直径と (16)式による D_0 とを比較すると

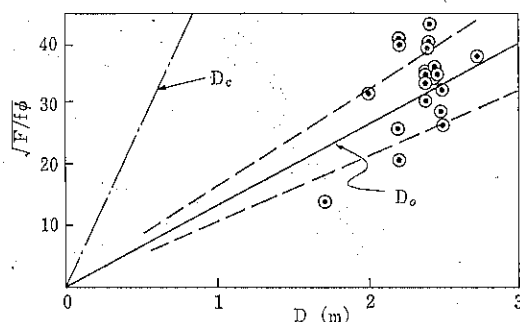


図 3

図3のようにまア理論線をはさんで±20付近に並んでいるようである。

こうして D_0 がきまれば、一方でホールドアップ W が判っている限りミルの長さ L は簡単に求まる。式では

$$L_0 = \phi v (1 - U_0) / K x_0 m \varepsilon \quad \dots\dots (17)$$

すなわちミル長さは速度論が直接関与している。だからミルのプロポーシオンは、流れと粉砕速度の連立解として粉砕の要求に応じて独自にきまるものである。

$$\left(\frac{L_0}{D_0}\right) = \frac{\{\phi v (1 - U_0)\}^{3/2}}{K x_0 m \varepsilon} \sqrt{\frac{\pi \rho_a f}{4F}} \quad \dots\dots (18)$$

実際のミルの (L/D) を使って (18) 式より計算した速度定数 K が、前にも述べたように (9) 式の括弧内で与えられた K とかなりよい一致を示したことは、逆に K を (9) 式 (もう少し補正して) で求めて、要求された duty を満足するチューブミルをロジカルに設計することが可能になるのではないだろうか。要は速度定数 K をいろいろの粉砕機、いろいろな物質について実験的に求めるならば、Work Index のような冒険的な要素を含んだものよりもはるかに信頼性があり、何と云っても論理的合理的という安心感がある。

まああらっばいチューブミルに関する限り、Work Index を使ってもとにかく形になり、その上 adjustable な因子がかなりあるから全然使いものにならぬということはずないであろう。(もっとも Work Index をアメリカのものを使って日本の同じ名の原料を粉砕したらナンボ調節してもどうにも長さが足らず失敗した例がある。ソモソモおかしい話であるが)。

しかしデリケートなジェットミルなどではそのようなラフなことは許されないだろう。森・神保先生¹⁴⁾ らによれば、ジェットミルでは、一般に粉砕能力 F と馬力 P の間になり立つ次の関係で

$$F \propto P^\sigma$$

指数 $\sigma = 2.5$ となり、チューブミルや振動ミルの 1.05 前後の σ とは比較にならないほど大きいことが指摘されている。たしかに実験もしくは経験的にジェットミルの場

合このような事実を指摘する人は外にもかなりいる。一方、一昨年ヨーロッパの粉砕シンポジウムで会ったイタリアの技術者は、 $\sigma = 1.35 \sim 1.75$ 位ではないかといったが、最近段々値引きされてきたようである。それでもやはり大型化すると効率は増加するのは事実である。

筆者ら¹⁵⁾ が、粉砕速度理論を開回路システムの解析に応用し、さらにそのシステム理論をジェットミルのメカニズムに適用した結果¹⁶⁾、理想的には

$$F \propto P^{2.0} \quad \dots\dots (19)$$

が成立し得ることがわかった。ただしこのようになるためには幾何学的相似を保ち、ミル内の気流のフローパターンが相似、かつアルキメデス渦になるという理想的条件下の話である。

さらにジェットミルの速度定数 K に対して分子運動論の理屈を借用すると、ジェットミルのスケールアップには限界があって、固体の容積濃度が 0.1 になる前にミルの性能はガツタリと落ちるであろうことを予測した¹⁷⁾。少くとも幾何学的な相似性を保ってスケールアップする限り、これはたしかであると思われミルの形を変えてゆくなどの工夫と考察を要するであろう。粉砕機を造るのはむづかしい。しかし、よい粉砕機を造るほどむづかしいことはない。と英文法の例文にありそうな捨てゼリフを残して行つた 10 数年前の Rose 教授を思い出す。

7. 開回路粉砕と速度理論

開回路粉砕方式の基本的なダイアグラムは図4に示す通りである。粉砕による砕製物は分級機に送られ、ふるわれた粗粒は戻って砕料と混合して再び粉砕される。この回路を定常に操作するための静特性の解析は、筆者らが¹⁸⁾ 1957年頃に発表して以来、多くの人達によっても研究が行なわれてきた。

しかし当時は、フローシートは画けても回路を構成する各ユニットの装置の設計はできなかったのであるが、粉砕速度論の応用によって、また計算機の適用によっていろいろの分級特性に対応する回路の設計が可能になった⁸⁾。

物質収支と速度理論を組合わせると、結果的に

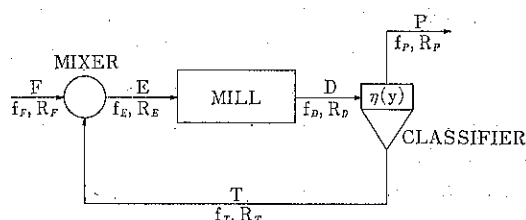


図 4

$$K\tau_0 x_c^m = (1+Cl) \ln \left(1 + \frac{1}{Cl} \right) \quad \dots\dots\dots(20)$$

が得られる。ここで

$$\tau_0 = W/F \quad \dots\dots\dots(21)$$

すなわちミルのホールドアップWを砕料の処理量Fでわった値で、一種の滞留時間のようなもの（ミル内滞留時間 $=W/F(1+Cl)$ ）で、Clはサーキュレーティング・ロード（=戻り粉/フィード）である。x_cは分級機での分離限界径であり、この場合クリーンカット（理想分級）を仮定する。Kは今までイヤほど出てきた(9)式の括弧内の速度定数である。もし $Cl \rightarrow \infty$ にすると(20)式から

$$x_c^* = F/KW \quad \dots\dots\dots(22)$$

となって x_c* は操作可能な最小分離径であり、命題を満足するための臨界条件を与える。この式は閉回路ミルのスケールアップ公式(13)式と全く同じである。だから x_c* を知れば、Kの既知のFの与えられた設計でWが算出され、前節の方法でミルの設計が可能となる。

設計条件から x_c* を知るために図5のようなチャー

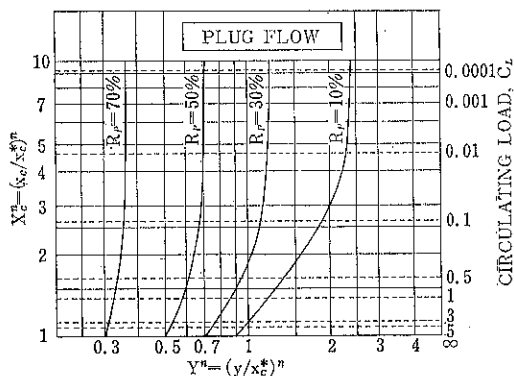


図 5

トを作った。すなわち砕製品の篩上粒度分布で例えば $R_p=70\%$ および $R_p=50\%$ を与える2つの粒径をきめ、その粒径の比を2とする。チャート上に $R_p(70)$, $R_p(50)$ の2つの Reference Curves の間の水平距離が丁度 a^m ($m \approx 1$ の場合が多い) になるような位置をさがす。その点の横軸は x/x_c^* で目盛ってあるから、これから x_c^* が判る。また縦軸は $(x_c/x_c^*)^m$ だから、これから分級機の見分径 x_c が求まる。その上右の縦軸には相当する Cl があるので、与えられたFに $(1+Cl)$ をかければミル内スループットになり、分級機へのロード (ton/hr) になる。

以上は理想分級についてであったが、現実の分級機では必ずしもきれいな分離はできない。このために部分分級効率曲線 η を次の数式モデルで表わす¹⁹⁾。

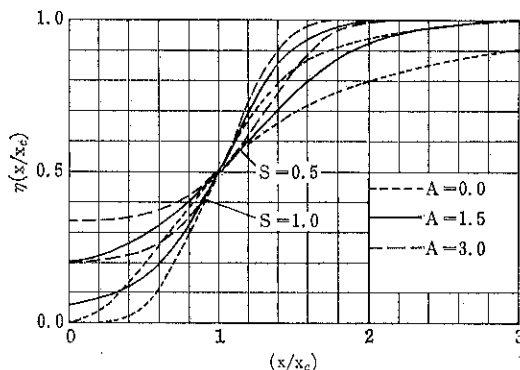


図 6

$$\eta(x/x_c) = 1 / \left\{ 1 + \exp \left[\frac{4S}{A} \left\{ 1 - \left(\frac{x}{x_c} \right)^A \right\} \right] \right\} \quad \dots\dots\dots(23)$$

図6にこれを示す。Sは分級のするどさであり、 $\eta=0.5$ における曲線の切線の勾配である。Aは $x \rightarrow 0$, $x \rightarrow \infty$ における曲線の形をきめる定数である。多くの分級機はこのAとSの組合せでその性能をシミュレートできる。たとえば風力分級では $A=1.5$, $S=1$ 、サイクロンでは $A=0$, $S=0.5$ 、液体サイクロンでは $A=1$, $S=0.5$ くらいである。A, Sを多く組合せたときの製品粒度分布を計算の結果図7を得た。

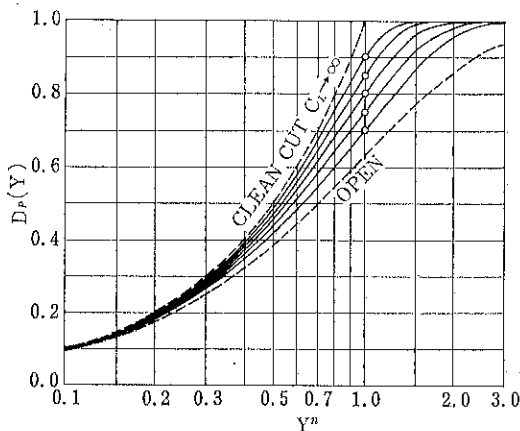


図 7

さて設計で与えられた砕製品の粒度分布を、図8の上に重ねて曲線の一致するものをみつけ、そのときの D_p^* の値をよむ。たとえば $D_p^*=0.8$ になると、使用する予定の分級機のA, Sに対応する $D_p^*=0.8$ から Cl を図8（一例として）からよみとれる。さらに $D_p^*=D_p(X=x_c^*)$ のことであるから、製品粒度分布で $D_p=0.8$ になる粒径 x がそのまま x_c^* となり、後は(22)式によってミルの設計が可能となる。できれば設計の前段階でいろいろのA, Sについて試算し、最も経済的な条件を選定するこ

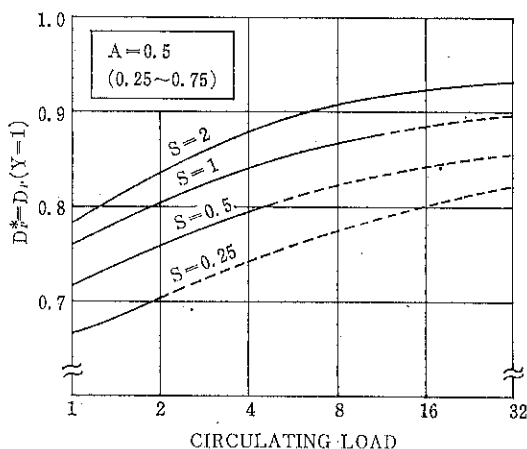


図 8

とも可能である。それらのA, SとCl, D_p^* の関係を示す図については原文を参照していただきたい。

§ おわりに

少しでも粉砕学の理論と実際のギャップを埋めることができるなら、科学的な姿勢を保ちながらも実際の粉砕機の操作や設計に役立ちそうな問題を過去10年近く試みてきた。本来装置設計の段階で「速度 (Rate)」の概念なしに、また「流れ」の知見なしに、その形状や容量を決定することは不可能である。ごく当り前のこのことがらさへ従来とかく見すごされていたことは大いに反省されてよいであろう。

本稿では一切面倒な式を省き結論のみを体系的に述べるに止ったが、詳細については原文を読んでいただき御批判をいただければ幸いである。そして工業界の実際のデータが、速度論の発展のために最大のきめ手になることを考え、少くともこのことに関しては全く無力な大学の研究室から、現場のエンジニアの方々の御協力を期待

している次第である。

(文 献)

- 1) Bond, F.; C.; Min. Eng., 4, 484 (1952)
- 2) Bass : Z. Angew. Math. u. Physik 5, 283 (1954)
- 3) 古谷, 中島, 田中; Ind. Eng. Chem., Proc. Des. Dev. 10, 449 (1971)
- 4) 中条; 化学工学と化学機械; 7, 1 (1949)
- 5) Gilvarry : J. Appl. Phys. 32, 391 (1961)
- 6) Gaudin & Meloy; Trans. AIME, 223, 43 (1962)
- 7) Broadbent & Callcott; Phil. Trans., 249A 960, 99 (1956)
- 8) 林, 田中; J. Chem. Eng. Japan 5, 308 (1972)
- 9) Knudsen; J. Am. Ceram. Soc., 42, 376 (1959)
- 10) Austin & Klimpel; Ind. Eng. Chem., 56, 18 (1964)
- 11) Bowdish; Trans. A. I. M. E. 217, 194 (1960)
- 12) 田中; J. Chem., Eng. Japan, 5, 310 (1972)
- 13) 田中; 同上, 5, 425 (1972)
- 14) 森, 神保; 化学工学, 22, 363 (1958)
- 15) 田中, 中島, 古谷; (Preprint. 3rd Europ. Symposium Comminution) Dechema-Mono. Nr 1292 -1326, Band 69, 515 (1972)
- 16) 田中; Ind. Eng. Chem., Proc. Des. Dev. 11, 238 (1972)
- 17) 田中; 同上, 12 (1973) に掲載予定
- 18) 田中, 小島, 桑野; 化学工学, 21, 358 (1957)
- 19) 古谷, 中島, 田中; Ind. Eng. Chem., Proc. Des. Dev. 12, 18 (1973)
- 20) 中島, 田中; 同上 12, 23 (1973)

低温粉碎について

Cryo-Crushing

中西 英治*

Eiji Nakanishi

豊立 勝二**

Katsuji Toyotake

1. はじめに

最近、脚光をあびつつある「低温粉碎」について、簡単な概説と、二、三の実例をご紹介したい。

先ず最初に、何故低温で粉碎するかということと、低温粉碎の将来性について言及する。

何故低温で粉碎するか

常温では難しいが、低温でやればうまく粉碎出来るという粉碎対象には、次の2種類がある。

第一は熱を嫌う場合。

粉碎すれば、その仕事量に応じて発熱を伴ない、温度が上昇する。そのために、砕料が軟化溶融して粉碎出来なかったり、或は、粉末が得られたとしても、緑茶とか香辛料のように、味、香りが損われるおそれのある場合である。

第二には、低温脆性が利用出来る場合。

ゴムのような弾性体とか、多くのプラスチックや、鉄鋼製品は、低温にすれば硬く脆くなる性質が顕著なので、低温粉碎が有利になり、後述の各種メリットとつながる。そして、この方法によれば、古タイヤとか廃電線のような、金属、繊維、ゴム等の複合材を選択的に粉碎することも可能になる。

低温粉碎の将来性

低温粉碎にはこのようなすばらしい特長のあることが以前から知られていながら、あまり普及しなかった理由は、冷却費が高かったことと、低温技術が不充分であったことによると思われるが、最近、

○従来法では粉碎困難であった物質に対しても、微粉

化の要求が強まって来たこと、

○低温装置用材料をはじめとする低温技術が進歩したこと、

○LNGの輸入に伴ない、その大量の冷熱を利用して液体窒素（ -196°C ）程度までの低温が、工業規模で容易に得られるようになったこと、

等の条件が揃ったので、低温粉碎は、今後急速に発展すると思われる。

2. 低温粉碎の特長

低温粉碎の特長をまとめると、次のようになる。

1. 常温では粉碎できないものが粉碎される。
2. 粉碎の際の発熱による変質が防げる。
3. 微粉末が得られる。
4. 流動性のよい粉末が得られる。
5. 粉碎の所要動力が低減する。
6. 複合材の選択粉碎が可能になる。
7. 粉碎に伴う臭気、粉塵爆発、騒音などの防止が可能になる。

これらの各項目について、以下簡単に概説する。

2-1 常温では割れないものが割れる。

粉碎時の発熱のために、低融点物質を常温で粉碎することは、著しく非能率的であったり、場合によっては不可能なことが多い。また、ゴム等のゴム状弾性体はそのゴム弾性故に、常温での粉碎は極めて面倒で、得られる粉末の粒度も粗い。しかし、これらの物質を低温にすれば、簡単に固化、脆化し、容易に粉碎され、微粉末が得られるようになる。このような例として、熱可塑性プラスチック、ゴム、ワックス等がある。Fig.1に数種のプラスチックについて衝撃強さの温度依存性を示した。

2-2 粉碎の際の発熱による変質が防げる。

化学薬品や医薬品の中には、熱をきらい、空気中では反応性に富むものがある。また食品でもフレーバーの保持がきびしく要求されるものがある。これらを、低温に保って粉碎すれば、熱履歴も受けず、揮発性物質の逸散

* 大阪ガス株式会社総合研究所LNGチーム

(〒554 大阪市此花区西島町9丁目119)

TEL 06-462-1451

** 細川粉体工学研究所

(〒573 枚方市招提田近1-9)

TEL 0720-57-3721

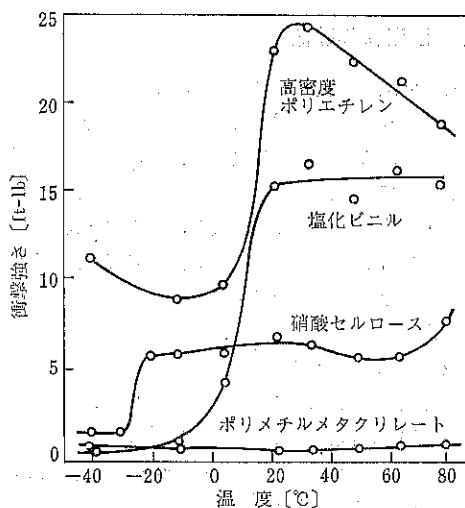


Fig. 1 落重試験による熱可塑性プラスチックの衝撃強さの温度特性¹⁾

が防止されるので、フレーパーが損われることもない。また低温粉碎では冷却剤として、液化窒素や、液化炭酸ガスを用いることが多いが、気化したこれらの不活性ガスを雰囲気ガスとして利用すれば、更に化学反応を抑制し、製品の変質を防止することができる。

2-3 微粉末が得られる。

2-1に述べた熱可塑性プラスチックやゴムでは、常温粉碎で得られる粉末よりも、低温では、はるかに微細な粉末を得ることができる。Fig. 2に温度を変えて、タイヤゴムを粉碎した場合の粒度分布を例示した。

2-4 流動性のよい粉末が得られる。

常温粉碎されたプラスチックを顕微鏡で観察してみると、多くの場合、粉末はひげを有していることがわかる (Fig. 3)。一方、低温粉碎では、角ばってはいるが、

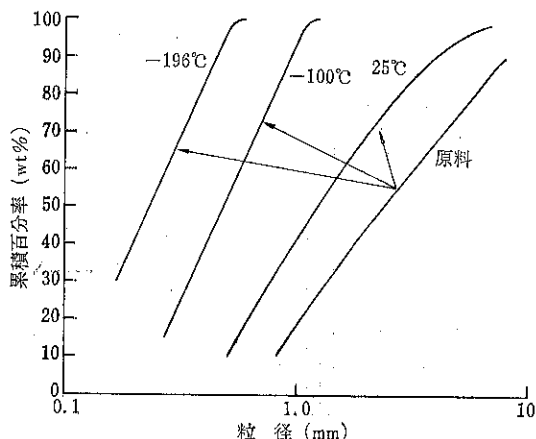


Fig. 2 タイヤゴムの粉碎温度と粒径

ひげはない (Fig. 4)。この違いは常温では主に剪断力で粉碎されているが、低温では、衝撃力により脆性破壊されているためと思われる。このひげは粉末の流動性を損なう大きな要因であり、このひげのない低温粉碎製品は、流動性が著しく改善されている。

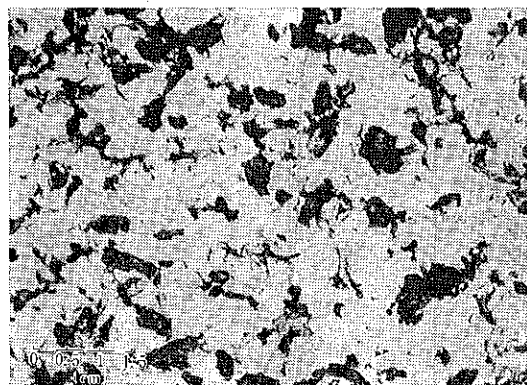


Fig. 3 ポリエチレンの常温粉碎品

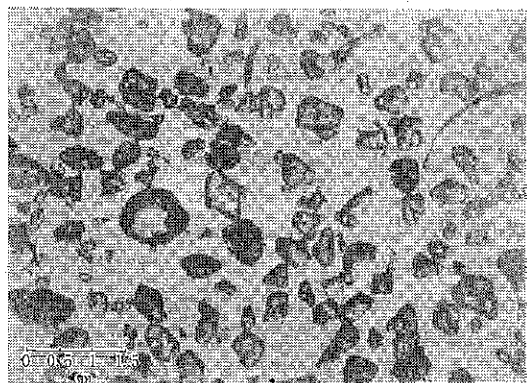


Fig. 4 ポリエチレンの低温粉碎品

2-5 粉碎の所要動力が低減する。

既に述べた如く、多くの物質は、低温にすれば脆くなり、粉碎され易くなる。このため粉碎所要動力は著しく減少する。Fig. 5にポリプロピレンを種々の温度で衝撃式粉碎機により粉碎した結果を示したものである。この場合、同一粉碎機、同一動力のもとで、 -40°C では、常温の20倍程度の粉碎が可能である。

また最近、松居らはABS樹脂、ナイロンについて粉碎のしやすさを表わす指数CEI (Crushing Extension Index) を、各種温度で測定し、これらの物質では、低温ほど粉碎されやすくなることを示した²⁾。

2-6 複合材の選択粉碎が可能になる。

高分子物質の中でも、ポリスチレンは 80°C で、既に脆化しているが、ゴム、ポリエチレン、ポリプロピレン

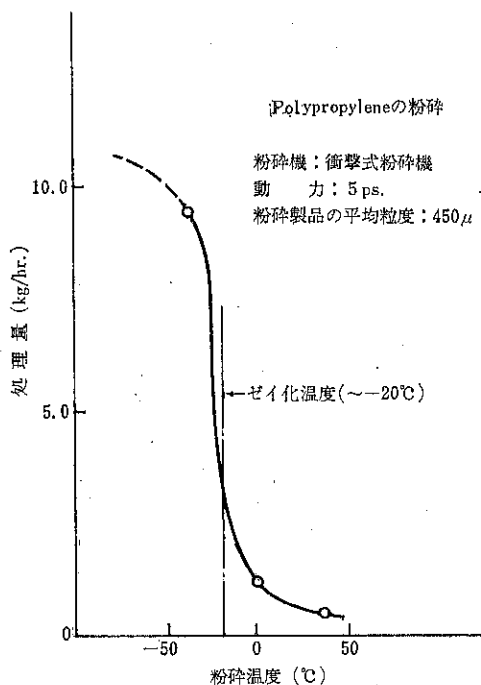


Fig. 5 粉碎温度と処理量の関係

などは、 $-10 \sim -70^{\circ}\text{C}$ において始めて脆化するようになる。また金属においても、炭素鋼は、 -60°C 付近で脆くなるが、銅、アルミニウムなどは、更に低温にしても脆化しない。従って、粉碎温度を選ぶことによって、複合材中の特定の物質だけを、選択的に粉碎する事も可能となる。これを用いると、廃電線から銅の回収、廃自動車から鉄の回収、廃タイヤからタイヤコード、ビードとゴムとの分離、廃プラスチックから特定のプラスチックの選択粉碎と分離、などが可能となり、主として廃棄物処理に応用出来る。

2-7 粉碎に伴う臭気、粉塵爆発、騒音などの防止が可能になる。

既に述べた様に、低温粉碎は不活性ガスの零囲気下で、且つ低温で行なわれるので、反応性が著しく低下し、この為、微粉末製造時には、しばしば遭遇する「粉塵爆発」のおそれが全くない。また、低温粉碎すれば粉碎所要動力が、大巾に低下する為、騒音発生量も少なくなる。その上、低温粉碎装置は一般に、外気の侵入を嫌うので、冷気をリサイクルして使用することが多く、この為、悪臭、粉塵の発生も少なくなる。この様に、粉碎操作から粉塵爆発を無くし、騒音、悪臭、粉塵等の公害を抑制したというのも、低温粉碎の大きなメリットの一つとして数えられよう。これは今後、粉碎を考える場合、ますます重要性を増すものと思われる。

3. 低温粉碎装置

3-1 低温粉碎装置の構成

粉碎しようとする物質、希望粒度により粉碎装置は当然のことながら、それぞれ異なる。この点、低温粉碎の場合も同様である。しかし一般的には低温粉碎装置は、予冷器・粉碎機、製品補集器及び、予冷器・粉碎機への寒冷供給装置から構成される。低温粉碎では、物質の低温での脆性を利用して粉碎することが多いので、粉碎機は衝撃式粉碎機が適している。

3-2 冷却方法及び保冷

冷却方法としては、アンモニアやフロンを用いた機械式冷却法と、液体窒素や、液体炭酸ガスを用いる方法がある。しかし前者は、 $-40 \sim -50^{\circ}\text{C}$ までの温度に限られ、間接冷却となるため、装置が大型となる。後者は直接冷却が可能で、装置も小さく低温液化ガスを粉碎機へ直接注入することもできる。温度も液体窒素では、 -196°C まで達する。従って、最近の低温粉碎では、液体窒素を用いることが多い。低温粉碎では、粉碎コストの大きな部分を冷却コストが占めるので、粉碎対象に最

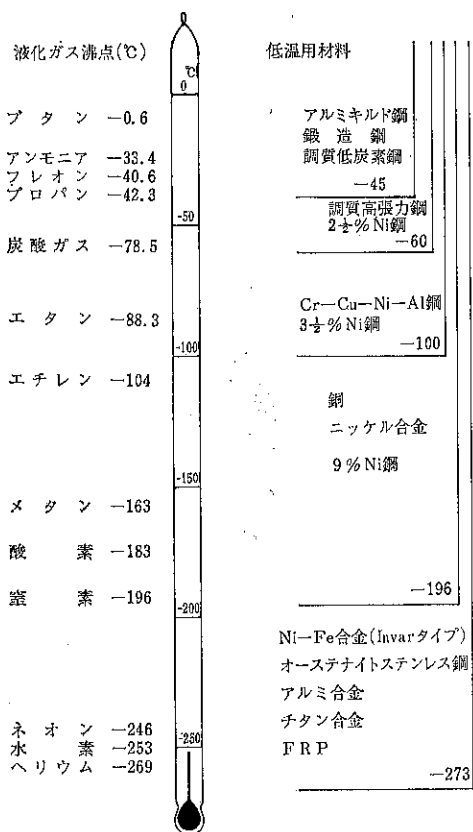


Fig. 6 低温用材料

も適した粉碎機と冷却方法を選定することが重要である。

また寒冷の利用率を向上させ、更には装置の保安管理上、低温部の保冷が必要である。温度レベル及び保冷部の形状により保冷方法は異なるが、真空保冷、ポリウレタンや発泡ポリスチレン、グラスウール等の断熱材による保冷を適宜、選択する。

3-3 低温材料

低温粉碎では、物質が低温で脆くなる性質を利用して粉碎するが、装置自身は低温で破壊されてはならない。従って使用材料は、その温度で低温脆性を示さないものから選択しなければならない。各温度における使用可能金属材料を、Fig. 6に示した。なお、オーステナイトステンレス鋼、銅、アルミニウム等の面心立方格子型の金属は、いかなる低温においても、低温脆性を示さない。

4. 低温粉碎の実例

最近開発されたり、注目された低温粉碎の実例をあげ、参考としたい。

4-1 廃棄タイヤの低温粉碎処理

モータリゼーションの進展により、廃棄タイヤの発生量は年々増加し、昭和48年には、年間35万トンに達すると予想され、深刻な社会問題となっている。タイヤは燃焼させると煤煙、亜硫酸ガス等2次公害発生のおそれがあり、粗大ゴム塊の投棄も禁止されたので、適切な処理法の開発が待たれている。

既に述べた如く、常温では粉碎の難しいタイヤも低温では容易に粉碎され微粉末ゴムが得られ、再利用可能となる。さらに、タイヤ中の繊維や金属は粉碎されず、ゴ

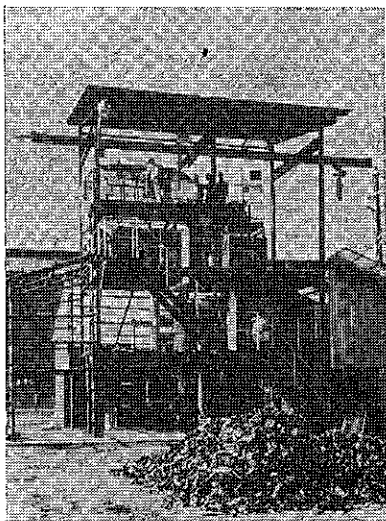


Fig. 7 廃棄タイヤ低温粉碎プラント

ムと分離されるので、製品の純度も高い。

Fig. 7に大阪瓦斯機総合研究所に建設された廃棄タイヤ低温粉碎パイロットプラントの写真を示した。このプラントは、予冷器、粗碎機、微粉碎機、集塵器、篩分機から構成され、敷地面積50m²、総電力50kw、タイヤ処理量250kg/時、粉末ゴム粒度0.5mm以下である。

4-2 廃電線処理

イギリス特許にみられる低温粉碎による廃電線処理装置の1例をFig. 8に示した⁸⁾。廃電線を冷却し、粉碎ロールにかけ、被覆を分離し、銅を回収する。この方法によれば、燃焼法のような大気汚染の心配がなく、銅の回収率も高く、微粉化された被覆材の再利用も可能といわれる。低温粉碎を用いた廃電線処理は、既に日本でも一部商業化されているようである。

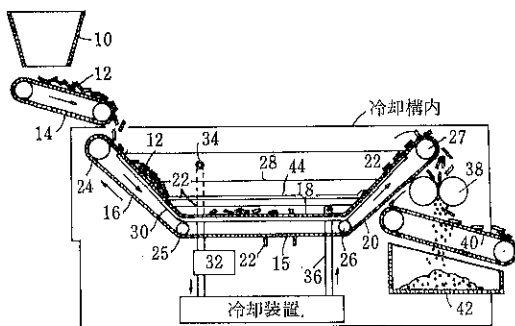


Fig. 8 電線被覆低温粉碎装置⁸⁾

4-3 廃自動車の低温粉碎

低温粉碎の大規模な実例として、廃自動車の低温破碎処理がある。L' Air Liquide 社 (仏)、Georgd 社 (ベルギー)、Klockner 社 (西独) が共同で開発した INCH SCRAP 法は、自動車を丸ごとプレスにかけた後、液体窒素で冷却し、これを低温破碎して、鉄や銅を選別回収しようとするものである。そのフローシートをFig. 9に示した。ベルギーのリュージュに建設されたパイロットプラントは、20~25台/時の処理ができるが、液体窒素の寒冷を有効に利用するため、その冷却トンネルは100mに達する。現在、廃自動車は、常温でシュレッダーにより破碎処理されているが、これに比し、INCH SCRAP 法は、騒音が少なく、消費電力が1/4となり、しかも得られるスクラップの品質がよいと言われている。

4-4 プラスチックの低温粉碎

低温粉碎で今後の大きな発展が期待されている分野に粉末プラスチックの製造がある。粉末プラスチックの製造法には溶剤析出法、常温粉碎法、さらに現在、技術開発段階にある低温粉碎法がある。溶剤析出法は粒度、流

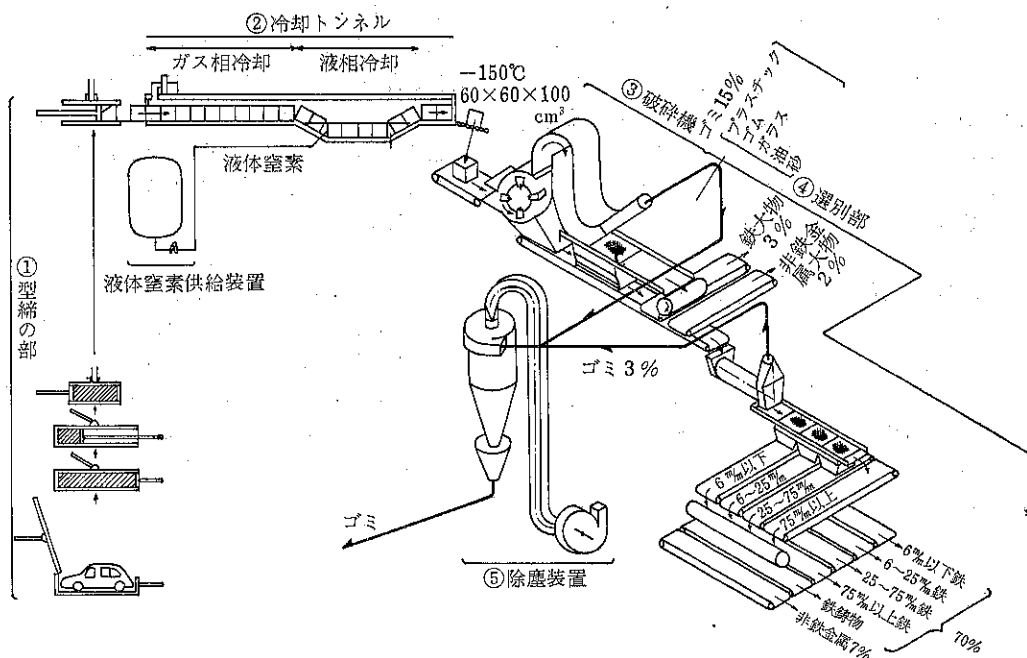


Fig. 9 インチスクラップ法⁴⁾

動性ともかなり良好な粉末が得られるが、製造コストは極めて高い。

常温粉碎法では、微粉末を得ることは困難で、得られた粉末にはひげがあり、流動性に乏しい。低温粉碎法では、微粉末が得られ、ひげもなく、流動性も改善される。

大阪瓦斯㈱及び細川鉄工所は共同研究によりプラスチック低温粉碎機の開発を進めているが、Fig.10に、第1

号試作機 (7.5PS, 衝撃粉碎方式) の写真を示した。この粉碎機使用の1例として、常温では、粉碎不能な軟質プラスチックの粉碎例を示す。Table.1に粉碎条件を、Fig.11に、それに対応する製品粉末の粒度構成を示した。これに見られる通り、7.5馬力の小型粉碎機でも、特性粒度 (篩下累積百分率63.2%) 200 μ のポリ塩化ビニル樹脂粉末 200kg/時の製造が可能である。

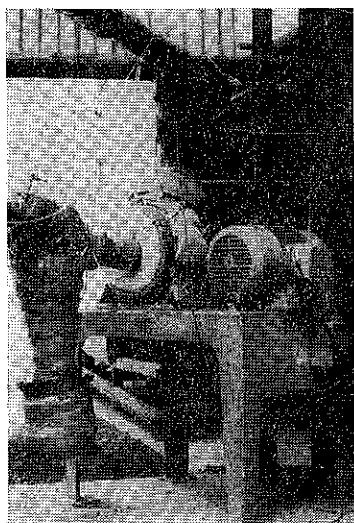


Fig. 10 低温粉碎用第1号試作機

Table. 1 各種プラスチックの低温粉碎

プラスチック	粉碎条件	ローター	粉碎温度	馬力当り	液体窒素
		周速度 m/sec	℃	処理量 kg/Hr·Ps	消費量 kg-LN ₂ /kg
①	ポリ塩化ビニール	61	-50	25	0.4
②	同上	86	-50	5	2.0
③	ポリエチレン	61	-100	10	1.2
④	ポリプロピレン	61	-50	4	2.5
⑤	同上	86	-50	0.3	3.3
⑥	ナイロン12	110	-80	2	5.0

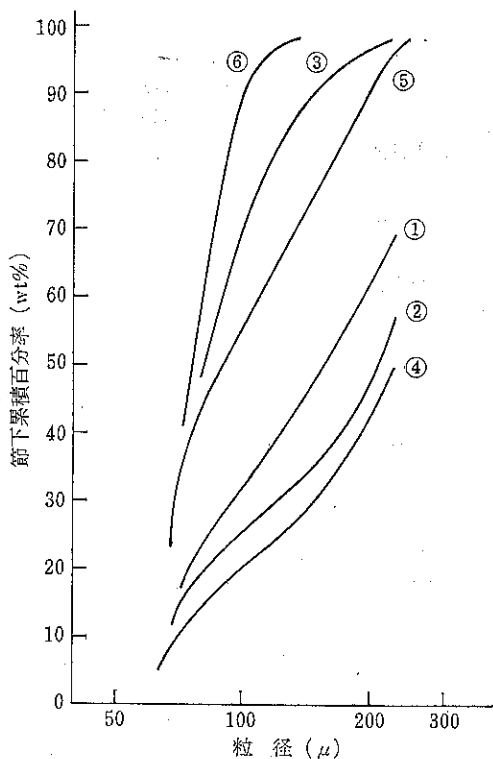


Fig. 11 各種プラスチックの低温粉碎

5. あとがき

以上述べた様に、粉碎に対する要求範囲は急速に拡がりつつある。そして粉碎対象によっては、低温粉碎が、

- ・不可能を可能にする。
- ・動力費を節減出来る。
- ・保安ならびに公害対策の面でも有利である。

等の特長を活かして有力な手段となる。

一方、低温粉碎の経済性を左右する最大の因子は冷却コストである。これは、必要な寒冷をいかに安く入手するかということと、得られた寒冷をいかに上手に活用するかということである。

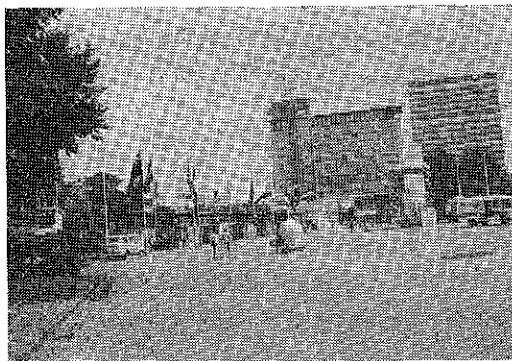
LNG の冷熱利用研究の一環として、時代の要請に応えるべく、大阪瓦斯㈱では、低温粉碎技術については細川鉄工所㈱とその冷却技術については帝国酸素㈱と共同で開発研究を行なっている。

6. 引用文献

- 1) D. R. Reid, R. A. Horsley : Brit. Plastics, 32 p.156 (April, 1959)
- 2) 松居国夫 ; 化学工学, 35, (3), 268 (1971)
- 3) Brit. P.1, 253, 185
- 4) 帝国酸素㈱, 手塚興産㈱ : インテスクラップ国際シンポジウム要録 (1973, 1月)

ヨーロッパからの通信

ACHMA 見聞録



3年毎に開催され、世界的に有名な見本市の1つであるACHEMAが西ドイツのFrankfurtのMesse Gelageで6月20日より1週間開催された。このACHEMAは化学関係機器の展示だけでなく、講演、研究発表、および討論も並行して行われるという特色で

有名である。

会場は1号館から8号館まであり、ホソカワの小間は7号館の出入口に近い所に位置し、乾燥機ミクロンドライアMD-1、粉碎機ビクトリーミルVP-1およびパウダーテスタの3機種を展示した。

化学機器の展示会といってもその種類は理化学機器、計器類より蒸留塔、タービンエンジン、石油化学プラントまで幅広く展示されており、出品物の数は非常に多く、これには驚かされた。傾向としては専門分野における専門単位機械の展示がほとんどで、一社で多数の機械を幅広く出品している会社はなかった。参観者はお祭的なところがなく、全般的に見ながら個人の専門分野を注視しているように見受けられた。東京や大阪での国際見本市のごとく子供連れや小中学生の姿はまったく見られなかった。また、日曜日の参観者の少なかったことも日本では見られぬ現象の1つでした。日本人の参観者の多いのにも驚きました。屋外の道路で、食堂で180°顔を回せば日本人のグループが必ず2、3目に入る程でした。

会期中を通じて多くの有望な引合を受け、ホソカワヨーロッパL.T.D.の将来に明るい希望がもてた。(K. O)

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—

Elutriation of Fines from Fluidized Bed

—Elutriation rate coefficient—

田中 勇武,* 篠原 久 *

Isamu Tanaka Hisashi Shinohara

I. ま え が き

流動層は、1926年、Winkler の水性ガス発生炉として工業化されて以来、反応、乾燥、分級および輸送用などの各装置として化学工業において、多方面にわたり用いられている。しかし、現在でもまだ設計または操作上不明の点が多いので、経験に頼る部分がかなり残されているようである。

流動層は、つぎのような利点を持っている。連続的な取扱いが困難な粉粒体を流体と同様に安定で定常的に流動化させることができる。さらに、粉粒層全体の温度を均一に保つことができ、かつ、その調節を容易に行なうことができるなど種々の長所を持っている。しかし、粉粒体の激しい運動のために、各種の好ましくない現象、たとえば、小粒子の飛び出し、または、粉粒体相互の摩擦および配管・装置の摩食などが派生するので、その応用に制限を受ける場合がある。このような現象を解明することにより、さらに流動層の利点を生かし、応用範囲を拡げて、より最適な設計および運転を行なう必要があると考えられる。

ここでは、流動層からの小粒子の飛び出しについて、現在までの研究経過をふりかえってみると共に、著者らの実験結果の内興味あるものにもふれてみたい。

II. 研究の目的

流動層から粉粒体が飛び出すと、つぎのような種々の問題が生じる。

1. 流動接触分解 (F.C.C.) 等に用いられる高価な触

媒の損失

2. 製品 (ガス体) の中への流動化粒体 (触媒など) の混入
3. 捕集装置を設置する必要性およびそれらの摩耗
4. 製品 (流動化粒体) の滞留時間、反応率、乾燥率などへの影響

しかし、分級または、混合装置として流動層を応用する場合には、供給粒子中の小粒子部分を飛び出させて、所定の粒径または小粒子濃度に揃えることができるという利点もある。

したがって、流動層からの小粒子の飛び出しに関する研究は、重要な研究課題と考えられて、つぎのような目的でなされてきた。

1. 小粒子の飛び出し速度に 関係する 諸因子を調べる⁶⁾⁷⁾¹²⁾¹⁴⁾¹⁶⁾¹⁸⁾¹⁹⁾²¹⁾²³⁾²⁴⁾²⁸⁾³¹⁾³²⁾。
2. 小粒子の飛び出し速度と流動層高さとの関係を調べ、捕集装置の最適な位置を求める¹⁾⁵⁾¹¹⁾¹³⁾¹⁷⁾²⁰⁾²⁶⁾²⁹⁾³³⁾。
3. 小粒子の飛び出し速度を減少させる要因または装置について検討する²⁾⁸⁾⁴⁾⁹⁾¹³⁾¹⁵⁾²⁵⁾²⁷⁾。
4. 小粒子の飛び出しが、粒子の滞留時間や反応率などに与える影響について調べる²²⁾³⁰⁾。

ここでは、1の飛び出し速度に 関係する諸因子について述べ、2～4については、別の機会に説明したい。

III. 研究の経過

関係文献中の実験条件を、Table 1 に表示する。

III-1 回分式流動層

1951年、まず、Leva¹²⁾により、この種の研究が始められた。彼は、Fig. 1 に示すような実験結果を得、この図の直線部分の傾きを k とし、これを飛び出し速度

* 九州大学 工学部 化学機械工学科
(〒812 福岡市東区箱崎)
TEL 092-64-1101

Table 1 Experimental Conditions for Elutriation of Fines from Fluidized Beds

	1951 ¹²⁾	1951 ¹⁴⁾	1955 ³¹⁾
Investigators	Leva	Osberg et al.	Yagi et al.
Column diameter [mm]	33.5	76.2	52
Column height [cm]	122	127	150
Fluidizing fluid	air	Co ₂ , He, air, freon 12	air
Material of particles	sand, Fisher-Tropsch catalyst	glass bead	sand, magnesium oxide glass bead
Fine particle diameter [μ]	41~67	18~36	60~100
Coarse particle diameter [μ]	105~226	58~145	310~1640
Initial or Inlet fines concentration [%]	5.8~20	0.3~5	20
Range of superficial fluid velocity [cm/sec]	17.1~40.5	2~18	70~350
System	batch	batch	batch

	1956 ³²⁾	1960 ²⁸⁾	1961 ²⁴⁾	1967 ²³⁾
Investigators	Yagi et al.	Wen et al.	Thomas et al.	Thiele et al.
Column diameter [mm]	98, 110, 700, 1000	50, 102	101.6	30.5
Column height [cm]	100	208, 183	183	44
Fluidizing fluid	air, high temp. gas	air, He gas	air	air
Material of particles	sand, calcium carbide, pitch coke	glass beads coal powder	glass	glass
Fine particle diameter [μ]	41~270	71~280	60~79	3.3~44
Coarse particle diameter [μ]	—	147	79~295	100
Initial or Inlet fines concentration [%]	0.6~30	4~100	2, 5, 10, 20	3
Range of superficial fluid velocity [cm/sec]	25~160	45.8~122	6~38	10
System	continuous	batch	batch	batch

	1968 ⁷⁾	1970 ¹⁸⁾	1972 ⁹⁾	1971~1972 ^{16,19,21)}
Investigators	Hanesian et al.	Sycheva et al.	Guha et al.	Tanake et al.
Column diameter [mm]	76.2	100	56	31, 67, 150
Column height [cm]	137	300	60	175, 180, 250
Fluidizing fluid	air	air	air	air, water
Material of particles	glass	Al-Si catalyst sand	sand, coke, salt magnetite, Al	glass, sand, Si-Al catalyst, stainless ball, lead ball
Fine particle diameter [μ]	88~595	100~315	277, 359	50~250
Coarse particle diameter [μ]	—	315~400	677, 459	718, 1930
Initial or Inlet fines concentration [%]	—	0~100	35~80	0~70
Range of superficial fluid velocity [cm/sec]	165~210	85~175	$\frac{u}{u_{mf}} = 7 \sim 9$	1~300
System	batch	batch	batch	batch, continuous

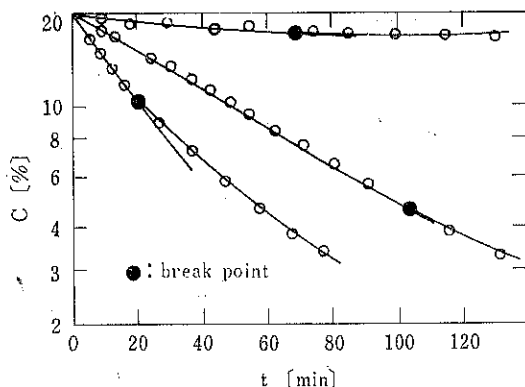


Fig. 1 Relationship between C and t.

係数と称して、次式を導いた。

$$C/C_i = \exp(-kt) \quad \dots\dots\dots(1)$$

しかし、時間 t が経過すると、 C/C_i は直線より偏倚してくるので、彼はこの直線より偏倚しはじめる点を break point と名付けた。しかし、この点と流動化特性との関連は、検討されていない。なお、 k と流速 u との関係は、次式で示されるとした。

$$k \propto u^4 \quad \dots\dots\dots(2)$$

しかし、流速の実験範囲が狭いので、Eq. (2)の適用範囲には限界がある。

ついで、Osberg¹⁴⁾ らも同様な実験を行ない、 k と流速の関係を下記の式で示した。

$$k \propto (u - u_t)^a \quad \dots\dots\dots(3)$$

a は、流動化流体（空気、ヘリウムガス、炭酸ガス、フロンガス）の種類によって、1.2~2.0の範囲で変化している。

ついで、矢木³¹⁾ らは、Leva¹²⁾ が用いた k を修正して、次式で示される修正飛び出し速度係数 K^* を提案し、

$$K^* = kW/A \quad \dots\dots\dots(4)$$

Fig. 2 に示すような精度 $\pm 50\%$ の整理図をえた。彼らのデータの中には、1 m にもおよぶ塔径についての K^* も含まれており、塔径の影響はないことが示された。また、整理図の中には、連続式流動層で得られた値も含まれており、回分式と何ら区別することなく K^* の値を整理できることが明らかにされた。

1960年、Wen²⁸⁾ らは、次式で示される実験整理式をえた。

$$\frac{K^*}{\rho(u - u_t)} = 1.5 \times 10^{-5} \left[\frac{(u - u_t)^2}{gD_p} \right]^{0.5} \left[\frac{D_p u_t \rho}{\mu} \right]^{0.725} \left[\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right]^{1.15} \quad \dots\dots\dots(5)$$

しかし、データの偏倚は $\pm 100\%$ もある。また、流動化

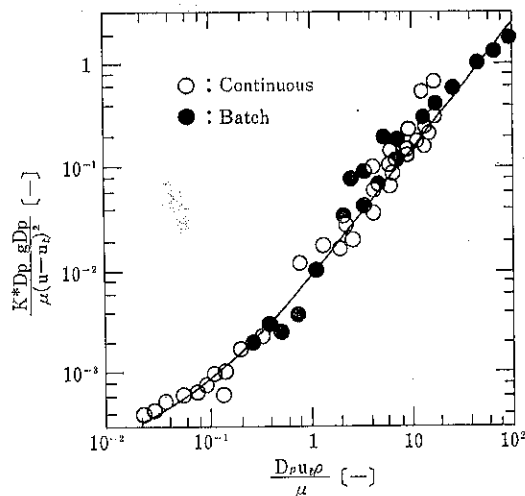


Fig. 2 Correlation by yagi et al ³²⁾

流体として、空気、ヘリウムガスを使用しているが、ヘリウムガスを用いたデータが少なく、それが $(\rho_s - \rho)/\rho$ の指数に影響することが考えられる。

さらに、Wen らは、初期小粒子濃度 C_i の K^* へ与える影響についても検討し、 $C_i \leq 0.25$ であれば、 K^* への影響はないことを示している。

1961年、Thomas²⁴⁾ らは、Leva¹²⁾ が指摘した break point 以後の実験値をも表現できるように次式を提案した。

$$-dc/dt = k'c(1 + ac) \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 k' は一種の飛び出し速度係数であり、 a は、流動層中の混合度を示すパラメーターである。しかし、 k' 、 a の操作条件、粒子物性との十分な相関づけは、なされていない。なお、係数 a を付加しても、整理された結果の精度はあまりよくはない。

1967年、Thiele²⁸⁾ らは、広い粒度分布をもつ粒子群を用いて、小粒子の分離について実験的に検討している。

1968年、Hanesian⁷⁾ らも、広い粒度分布を持つ粒子群を用いて実験を行ない、break point がこの粒子系でも存在することを示し、この点より前と後とを2つの直線で近似し、次式による整理を行なった。

$$C/C_i = b \exp(-k'_1 t) + (1 - b) \exp(-k'_2 t) \quad \dots\dots\dots(7)$$

しかし、 b 、 k'_1 、 k'_2 と操作条件、粒子物性との関係づけは、不十分である。

Sycheva¹⁸⁾ らは、飛び出し量に与える層高（粒子充填高さ）、初期小粒子濃度 C_i の影響を実験的に調べている。

Guha ら⁸⁾ は、次式で飛び出し速度係数を定義した。

$$\ln(C - C_E)/(C - C_E) = k''t \quad \dots\dots\dots(8)$$

上式中の k'' , C_E を数多くの無次元数で関連づけ、非常に複雑な整理式を得ている。しかし精度は±30%であった。

著者ら¹⁹⁾¹⁹⁾²¹⁾は、固一気系、固一液系流動層を用いて実験を行ない、固一液系においても Eq. (4) が成立することを確かめた。それらを整理して得られた結果については後述する。

Ⅲ-2 連続式流動層

1956年、矢木ら³²⁾によって修正飛び出し速度係数 K_0^* が、次式によって算出され、

$$V = K_0^* A C_0 \quad \dots\dots\dots(9)$$

その実験値が前述の Fig. 2 で整理されている。

1971年、著者ら²¹⁾は、流動層の装置構造が飛び出し速度に与える影響について調べた。なお、連続式流動層においては、その検討がなされていない。それで、塔高、塔径、流動層頂部、分散板の影響をはじめ、溢流口の構造ならびに供給口の高さの影響を実験的に調べた。その際、回分式および連続式流動層について得られた飛び出し速度係数を同一方法で整理するために、回分式に適用される、Eqs. (1), (4) と物質収支式とから次式で修正飛び出し速度係数 K_0^* を定義した。

$$V = K_0^* A C_0 / (1 - C_0) \quad \dots\dots\dots(10)$$

用いられた溢流口の構造を Fig. 3 に、その結果を Figs. 4, 5 に示す。Fig. 4 からわかるように、a 型では、溢流口の管径が大きいため F が小さい時に、飛び出すべき小粒子が、溢流粒子に伴なわれやすく、そのため C_0 が大きくなり、従って、 K_0^* が小さくなると考えられる。

このように K_0^* (Eq. (9) の K_0^* の場合にも同じ傾向がある。) は、供給速度 F 、溢流口構造の影響を受けることがわかった。これによって、回分式、連続式における修正飛び出し速度係数が同一方法で整理できないことが明らかになった。しかし、小粒子の飛び出し現象は、回分式、連続式を問わず、原理的にも同一であるはずであるから、Eqs. (9), (10) に疑問があるとして、飛び出し速度の定義式を検討した。

まず¹⁹⁾、連続式および回分式流動層上部における有効充填率を考慮した場合を検討した。その結果、一応、連続式、回分式を問わず、修正飛び出し速度係数がまとめられることが見出された。しかし、層上部における有効充填率の測定方法に難点があるため、この整理方法の精度も、±70%にすぎなかった。

ついで¹⁹⁾、Eqs. (9), (10) において C_0 を用いることに疑問があるとして、流動層内軸方向における小粒子の濃度分布を測定した。その測定装置および結果の一例を Figs. 6, 7 に示す。Fig. 7 より層内のある高さま

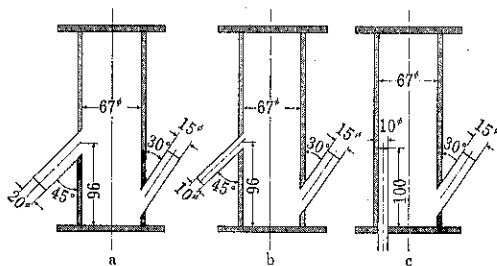


Fig. 3 Structure of overflow pipe

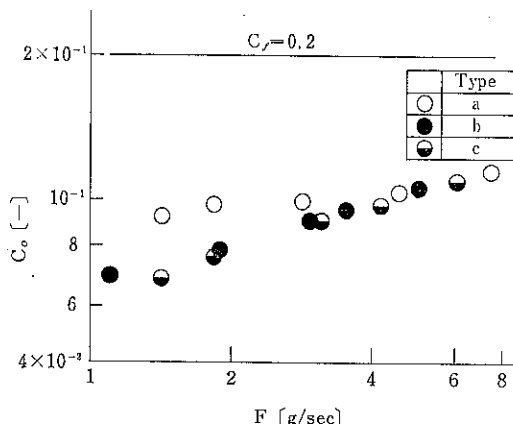


Fig. 4 Effect of overflow pipe structure on C_0 ($u-u_t=25$ cm/sec)

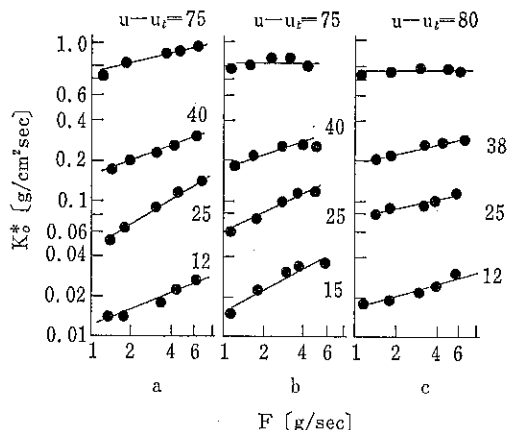


Fig. 5 Effect of overflow pipe structure on K_0^* ($C_0=0.2$)

で、小粒子の濃度は一定 (この小粒子濃度を C_s とする。) であるが、溢流口付近の小粒子濃度は、 C_s よりも大きいことが見出された。ついでこの C_s を用いて、次式で修正飛び出し速度係数を定義した。

$$V = K_s^* A C_s / (1 - C_s) \quad \dots\dots\dots(11)$$

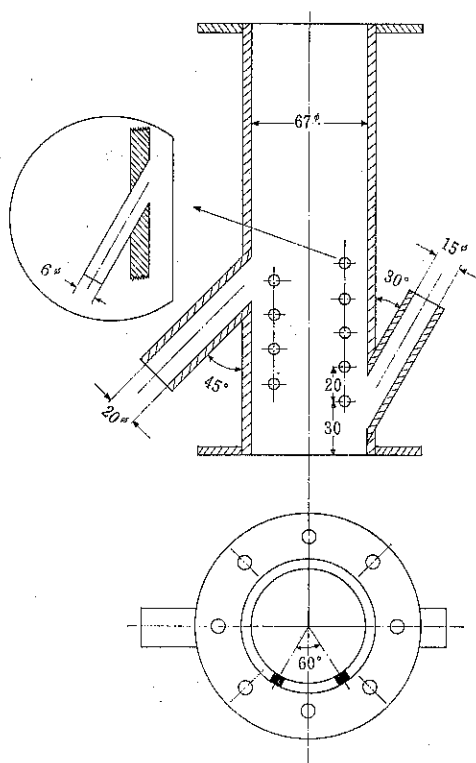


Fig. 6 Measurement apparatus of fines concentration

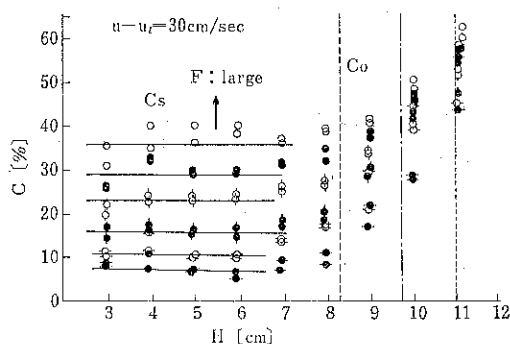


Fig. 7 Longitudinal distribution of fines concentration ($C_f=0.5$)

さらに、実際の流動層操作において用いられる広い粒度分布をもつ粒子群の場合にも、同様にして次式で K_s^* を算出した。

$$V_i = \frac{K_s^* A \left(\int_0^x K_F(x) dx \right)}{\left(1 - \int_0^x K_F(x) dx / \int_0^x K_E(x) dx \right)} \quad \text{.....(12)}$$

なお、Eqs. (11), (12) によって得られた K_s^* は、供給速度 F 、装置構造の影響を受けないことがわかった。さらに回分式流動層で得られた K^* をも整理するために、小

粒子の飛び出しに関係すると考えられた式を無次元化し、それらに基づいて、次式で示される整理式をえた。

$$\frac{K^*}{\rho(u-u_t)} = \frac{K_s^*}{\rho(u-u_t)} = 4.6 \times 10^{-2} R_s^{0.3} F^{0.5} \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{0.15} \quad \text{.....(14)}$$

Eq. (14) の精度は、従来の整理式よりも精度がよく、 $\pm 25\%$ であった。この式によって、大小2粒子群、広い粒度分布をもつ粒子群、固-液系、固-気系、回分式、および連続式の各流動層について、T.D.H.²⁰⁾† 以上の塔高の場合において得られたすべてのデータが整理された。

IV. ま と め

以上のように、飛び出し速度係数は、Eq. (14) によって精度よく整理された。この式が得られた主な原因は、

1. 流動層内の粒子の混合状態を調べ、一定小粒子濃度が存在することを明らかにしたこと。
2. 流動層の装置構造が小粒子の飛び出し速度に与える影響を詳しく調べたこと。
3. 塔高の小粒子の飛び出し速度に与える影響を調べ、T.D.H. の存在を確かめて実験を行なったこと。
4. 粉粒体の代表粒子径 D_p として、風篩法、水篩法によって得られる粒度分布曲線の50%通過粒子径を用いたこと。

などにあると考えられる。

使用記号

A	: 流動層断面積	[cm^2]
a	: Eq. (6) で示される係数	[—]
b	: Eq. (7) で示される実験的係数	[—]
c	: 塔内小粒子濃度	[$\text{g(小粒子)}/\text{g(全粒子)}$]
C_E	: 塔内平衡小粒子濃度	[$\text{g(小粒子)}/\text{g(全粒子)}$]
C_f	: 供給小粒子濃度 (連続式)	[$\text{g(小粒子)}/\text{g(全粒子)}$]
C_i	: 初期小粒子濃度 (回分式)	[$\text{g(小粒子)}/\text{g(全粒子)}$]
C_s	: 層内一定小粒子濃度 (連続式)	[$\text{g(小粒子)}/\text{g(全粒子)}$]
D_p	: 粒子径	[cm]
F	: 粒子の供給速度	[g/sec]

† T.D.H.: 小粒子の飛び出し速度は、ある塔高までは指数関数的に減少し、この塔高以上になると、塔高が増加しても一定で変化しなくなる。この塔高のことを Transport Disengaging Height (略して T.D.H) と称す。

g	: 重力加速度	[cm/sec ²]
H	: 分散板からの流動層高さ	[cm]
k	: 飛び出し速度係数	[1/sec]
k'	: Eq. (6)で定義された飛び出し速度係数	[1/sec]
k_1', k_2'	: Eq. (7)で定義された飛び出し速度係数	[1/sec]
k''	: Eq. (8)で定義された飛び出し速度係数	[1/sec]
K^*	: 修正飛び出し速度係数 (回分式)	[g/cm ² sec]
$\bar{K}_0^*$	: Eq. (9)で定義された修正飛び出し速度係数 (連続式)	[g/cm ² sec]
K_0^*	: Eq. (10)で定義された修正飛び出し速度係数 (連続式)	[g/cm ² sec]
K_s^*	: Eq. (11), (12)で定義された修正飛び出し速度係数 (連続式)	[g/cm ² sec]
$K_E(x)$	: 飛び出し粒子群の粒度分布関数	[1/cm]
$K_F(x)$	: 流動層内粒子群の粒度分布関数	[1/cm]
t	: 時間	[sec]
u	: 流動化流体の空塔速度	[cm/sec]
u_{mf}	: 流動化開始速度	[cm/sec]
u_t	: 粒子の終末速度	[cm/sec]
V	: 小粒子の飛び出し速度	[g/sec]
V_i	: 粒径 x 以下の小粒子の飛び出し速度	[g/sec]
W	: 粒子層内保有量	[g]
x	: 粒子径	[cm]
α	: Eq. (3)の指数	[—]
ρ	: 流動化流体の密度	[g/cm ³]
ρ_s	: 粒子の密度	[g/cm ³]
μ	: 流動化流体の粘度	[g/cm sec]
F_r	: $=(u-u_t)^2/gD_p$ フルード数	[—]
Re	: $=D_p u_t \rho / \mu$ レイノルズ数	[—]

引用文献

- 1) Andrews, J. M. : *Ind Eng. chem.*, **52**, 85 (1960)
- 2) Blyakher, I.G. and V.M. Pavlov : *Intern. Chem. Eng.*, **6**, No. 1, 47 (1966)
- 3) Clouse, E. R. and R. C. Woerner : U. S. Patent 2624697 (Jan. 6, 1953)
- 4) Crank, J. A. and R. L. McIntire : U. S. Patent 2687343 (Aug. 24, 1954)
- 5) Do, H. T., J. R. Grace and R. Clift : *Powder Tech.*, **6**, 195 (1972)
- 6) Guha, S. K. and P. Sen Gupta : *Can. J. Chem. Eng.*, **50**, 602 (1972)
- 7) Hanesian, D. and A. Rankell : *I. E. C. fundamentals*, **7**, 452 (1958)
- 8) Kato, K. and U. Ito : *J. Chem. Eng. Japan*, **5**,

- 144 (1972)
- 9) Kearby, K. K. and W. G. May : U. S. Patent 2719112 (Sep. 27, 1955)
- 10) 国井大蔵 : 流動化法 (日刊工業新聞社) (1962)
- 11) Kunii, D. and O. Levenspiel : *J. Chem. Eng. Japan*, **2**, 84 (1969)
- 12) Leva, M. : *Chem. Eng. Progr.*, **47**, 39 (1951)
- 13) Lewis, W.K., E.R. Gilliland P. M. Lang : *Chem. Eng. Progr. Symposium Series*, **38**, **58**, 65 (1962)
- 14) Osberg, G. and D. H. Charlesworth : *Chem. Eng. Progr.*, **47**, 566 (1951)
- 15) Overcashier, R. H., O.B. Todd and R.B. Olney : *A. I. Ch. E. Journal*, **5**, 54 (1959)
- 16) 篠原 久, 田中勇武, 中原俊輔, 鶴 泰 : 粉碎, No. 16, 33 (1971)
- 17) Soroko, V. E., M. F. Mikhalev and I. P. Mukhlenov : *Intern. Chem. Eng.*, **9**, 280 (1969)
- 18) Sycheva, T. N. and E. V. Donat : *ibid.*, **10**, 172 (1970)
- 19) Tanaka, I., H. Shinohara, H. Hirose and Y. Tanaka : *J. Chem. Eng. Japan*, **5**, 51 (1972)
- 20) Tanaka, I. and H. Shinohara : *ibid.*, **5**, 57 (1972)
- 21) 田中勇武, 篠原久, 広末英晴, 田中安彦 : 九州大学工学集報, **44**, No. 3, 406 (1971)
- 22) 田中勇武, 篠原 久 : 粉体工学研究会誌, **10**, 18 (1973)
- 23) Thiele, E. W. and T. J. Kelly : *Chem. Eng. Sci.*, **22**, 471 (1967)
- 24) Thomas, W. J. Grey and S. B. Watkins : *Brit. Chem. Eng.*, **6**, 177 (1961)
- 25) Tweddle, T. A., C. E. Capes and G. L. Osberg : *I. E. C. Process Des. and Develop.*, **9**, 85 (1970)
- 26) 浦部真一, 平木一郎, 吉田邦夫, 国井大蔵 : 化学工学, **29**, 863 (1965)
- 27) Volk, W., C. A. Johnson and H. H. Stotler : *Chem. Eng. Progr.*, **58**, No. 3, 44 (1962)
- 28) Wen, C. Y. and R. F. Hashinger : *A. I. Ch. E. Journal*, **6**, 220 (1960)
- 29) 山本 寛, 兼子有史 : 第2回秋季大会前刷 (化学工学協会) 261 (1968)
- 30) Yagi, S. and D. Kunii : *Chem. Eng. Sci.*, **16**, 364 (1961)
- 31) 矢木 栄, 青地哲男 : 春季大会前刷 (化学機械協会) 89 (1955)
- 32) 矢木 栄, 青地哲男 : 秋季大会前刷 (化学工学協会) 3 (1956)
- 33) Zenz, F. A. and H. A. Weil : *A. I. Ch. E. Journal*, **4**, 472 (1958)

沈降速度補正係数について

On the Correction Factor of Sedimentation Velocity

沢 畠 恭* 彼 谷 憲美**

YASUSHI SAWAHATA NORIYOSHI KAYA

1. 緒 言

非球形単一粒子が流体中を沈降する場合の実際の沈降速度と、その粒子の球相当径を基準として求められる理論的沈降速度との違いは、それ自体に現象的な興味もたれるばかりでなく、重力沈降法による粒度分布の測定や、集塵・分級・沈降分離・流動化などの工業的操作の面でも検討されなければならない粉体工学的に重要な問題のひとつであろう。しかし、従来この種問題を取扱った研究は、理論的にも実験的にも決して数多いものではなく、ことに実験的検討によってえられたひとつの結果が必ずしも他の検討結果を含めて説明を与えるものでもないと言うウラムが見受けられる。

本稿では、この問題に関して従来発表された、主として実験的研究の結果を概説し、併せて著者らの実験的検討の一端を紹介して各位の参考供することとする。

2. Stokes 径と沈降速度補正係数

直径 d_p なる単一球形粒子が重力場で静止流体中を沈降し、粒子に作用する抵抗に Stokes 則が適用される場合には、その粒子の沈降速度 u_s が粒子の密度を ρ_p 、流体の密度を ρ 、粘度を μ として(1)式で与えられることは既に明らかである。

$$u_s = g(\rho_p - \rho)d_p^2 / 18\mu \quad (1)$$

われわれは、任意の粒度、形状の粒子が Stokes の抵抗則が成立するような条件のもとで流体中を u なる実際の沈降速度で等速沈降する場合に、(1)式概念から導出される粒子の有効径を Stokes 径と称して(2)式で表現する。

$$d_{st} = [18\mu u / g(\rho_p - \rho)]^{1/2} \quad (2)$$

* 富山大学工学部化学工学科 (〒933 高岡市中川園町 1-1) TEL 0766-21-2510

** 現・細川粉体工学研究所

すなわち、不規則形状粒子における Stokes 径とは、その粒子の沈降速度と等しい沈降速度をもつ、その粒子と同密度の球形粒子の直径に等しい値を示すことになる。しかし現実には、不規則形状粒子は“等価な球”という理想的な条件からは、程度の大小こそあれ偏った沈降運動を行ない、その偏倚の要因にも様々なものが推測されることから、実際には計測された実沈降速度 u と、その粒子と等価な球の沈降速度すなわち理論的沈降速度 u_s との比で補正を試みるのが一般に用いられる方法であり、この速度比 λ を沈降速度補正係数 (correction factor of sedimentation velocity) と呼び、(3)式で表わす。

$$\lambda = u / u_s \quad (3)$$

したがって、非球形不規則形状粒子に作用する流体抵抗 R 、抵抗係数 C および粒子の運動の Reynolds 数 Re_s は(3)式の λ を用いて、それぞれ次式のように表わされる。

$$R = 3\pi\mu d_s(u/\lambda) \quad (4)$$

$$C = (24/\lambda)(\mu/d_s u \rho) = 24/\lambda Re_s \quad (5)$$

ここで、 d_s は粒子と等体積の球の直径すなわち球相当径 (equivalent spherical diameter) で、粒子の体積を v_p 、質量を m とすれば(6)式で与えられる。

$$d_s = (6v_p/\pi)^{1/3} = (6m/\pi\rho_p)^{1/3} \quad (6)$$

一般に補正係数 λ の値は、おおむね $\lambda < 1$ であるから、抵抗係数 C の値は球相当径 d_s 基準の Reynolds 数 Re_s 。

$$Re_s = d_s u \rho / \mu \quad (7)$$

に対しては、球の場合より大きい値を示す。

λ の値は球の場合 $\lambda = 1$ になり、 λ と d_s との関係は(8)式で与えられることになる。

$$\lambda = 18\mu u / g(\rho_p - \rho)d_s^2 \quad (8)$$

したがって、(2)、(8)両式の関係から(9)式がえられる。

$$\lambda = (d_{st}/d_s)^2 \quad (9)$$

3. 沈降速度補正係数の実験式

この種問題を検討するに際して、最初に念頭にあがる因子は粒子の球形度である。粒子の幾何学的形状が流体抵抗に及ぼす効果をはじめて実験的に検討した Wadell は、真の球形度 (true sphericity) を (10) 式で定義し、抵抗係数と Reynolds 数の関係を与えた¹⁾。粒子の表面積を S とするとき、(10) 式で与えられる球形度 ψ の意味するものは、粒子と同体積の球の表面積と粒子の表面積の比ということになる。

$$\psi = \pi d_s^2 / S \quad (10)$$

ついで Pettyjohn らも、この ψ をパラメータとして沈降実験を行ない、 $Re < 0.05$ の領域について、

$$\lambda = 0.843 \log (\psi / 0.065) \quad (11)$$

を与えている²⁾。

しかしこれらは、結果が示すとおり球形度 ψ に着目して等方性粒子 (isometric particle) を取扱ったものであり、非等方性粒子であって、その沈降姿勢 (あるいは配向, orientation) が問題になるような場合には適用することができない。

Kunkel³⁾ が球形粒子の連珠や房状結合体ならびに薄片状粒子に関する実験結果を報じたのも Pettyjohn らと同年であったが、この場合には後述する望月⁴⁾の場合と同様に、理論的速度と実速度との関係を (12) 式で定義される偏差 Δ_k で表示した。

$$\Delta_k = 1 - (d_{st}/d_s) = 1 - \sqrt{\lambda} \quad (12)$$

各種モデル粒子を用い、広い範囲にわたってこの問題を取扱ったのは、1949年、Heiss と Coull であった⁵⁾。彼らは、円筒、円板、角板などのモデル粒子を用い、それらの配向も検討の対象に加えて、沈降容器壁のない場合の補正係数 λ_∞ を (13)、(14) 両式のごとく与えた。

- 1) 沈降方向に直角な粒子の投影面積が粒子の寸法によって変化するような配向の場合——例えば円筒形粒子では円筒軸に直角方向に沈降するとき、円筒径 d が同じでも長さ l が変われば投影面積は変化する。これを roundwise fall と呼ぶ。

$$\log_{10} \lambda_\infty = \left[-0.25 \sqrt{\psi} \frac{d_s}{d_n} \left(\frac{d_s}{d_n} - 1 \right) + \log_{10} \left(\frac{d_s}{d_n} \sqrt{\psi} \right) \right] \quad (13)$$

- 2) 沈降方向に直角な粒子の投影面積が、粒子の寸法によって変化しないような配向の場合——例えば同一直径円筒であれば、長さが変わっても投影面積が変わらない flatwise fall の場合である。

$$\log_{10} \lambda_\infty = \left[\frac{-0.270}{\sqrt{\psi} \left(\frac{d_s}{d_n} \right)^{0.845}} \left(\frac{d_s}{d_n} - 1 \right) \right] \quad (14)$$

$$+ \log_{10} \left(\frac{d_s}{d_n} \sqrt{\psi} \right) \quad (14)$$

ここで d_n は、粒子の投影面積に等しい面積を有する円の直径すなわち円相当径 (equivalent circle diameter) で、粒子の投影面積を A_p とするとき (15) 式で与えられる。この粒子径は、Heywood の提案によるところから、時に Heywood 径と呼ばれることもある。

$$d_n = (4A_p/\pi)^{1/2} \quad (15)$$

(13)、(14) 両式は、たしかに Heiss らの実験結果には精度良く適用されるし、幅広い実験から粒子の配向まで考慮して導出されたものとして注目されるが、しかし式の形態が複雑であり、かつ後述する壁面効果を除去するために外挿法を用いるという難点もある。これらに比較するとき、同じパラメータで構成される Singh ら⁶⁾の実験式の方が、はるかに形態的にスッキリしたものであるが、結論のみを報じた短報からは実験の詳細を伺うことができない。

- 1) 粒子主軸が水平に沈降する場合——円筒形粒子の roundwise fall のとき場合

$$\lambda_H = 0.620 + 0.203 \frac{d_s}{d_n} \sqrt{\psi} + 0.133 \left(\frac{d_s}{d_n} \right)^2 \psi \quad (16)$$

- 2) 粒子主軸が垂直に沈降する場合——円筒形粒子の flatwise fall のとき場合注)

$$\lambda_V = 0.844 + 0.273 \frac{d_s}{d_n} \sqrt{\psi} - 0.170 \left(\frac{d_s}{d_n} \right)^2 \psi \quad (17)$$

Reynolds 数の広い範囲にわたって理論的考察を行なった Becker は、粒子に作用する抵抗が粘性抵抗 R_v と慣性抵抗 R_i との和で与えられると仮定して (18) 式の関係を導出した。

$$\left. \begin{aligned} R &= R_v + R_i \\ R_v &= \pi C_v \mu u_s d_p / 8 \\ R_i &= C_i A_p \rho (u_s^2 / 2) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

これらの関係について実験的検討を与え、Becker は d_s 基準の Reynolds 数が $Re_s < 2000$ の範囲において抵抗の補正係数 K および慣性の抵抗係数 C_i に関して、次式のごとき関係を導出した⁷⁾。

$$K = 24 Re_s + C_i^2 Re_s^2 \quad (19)$$

$$C_i = 2.53 - 0.283 e^{2\psi} \quad (20)$$

ここで、 K と λ 、 C_v と C との関係を求めれば、(21)、(22) 両式のごとくになる。

$$K = 1/\lambda \quad (21)$$

注) 原報では (17) 式右辺第 2 項の係数が 9.273 とあるが、これは 0.273 の誤りと考えられる。

$$C'_{\theta} = CRe_s \quad (22)$$

1960年代に入り, Quddus と Nawab らは Overbeck の理論にもとづく Gans の修正係数 δ に関し, 薄い円板状粒子の配向を考慮した実験的検討を与え, その妥当性を検証した⁸⁾.

$$R = 6\pi a\mu(u/\delta) \quad (23)$$

(4)式と(23)式を比較すれば, (24)式の関係が成立することは明らかである.

$$\lambda = \delta(d_s/2a) \quad (24)$$

ここで, Gans が薄円板状粒子に対して与えた δ の値は, 円板半径を a , 円板厚さを b として

1) 円板がその直径の方向に沈降する, edgewise fall の場合

$$\delta = (9\pi/16)[1 - (8b/3\pi a)] \quad (25)$$

2) 円板が円板面に垂直な方向に沈降する, broadside fall の場合

$$\delta = 3\pi/8 \quad (26)$$

(25), (26)両式を(24)式に適用し, edgewise と broadside の, 配向が $\theta = \pi/2$ 異った場合の沈降速度 u_e と u_b との比をとれば,

$$(u_e/u_b) = 1.5[1 - (8b/3\pi a)] \quad (27)$$

となり, $8b/3\pi a \ll 1$ ならば, 両者の比は粒子の大きさや軸比とは無関係に $u_e/u_b = 1.5$ となるというのが Quddus らの結論であり, 実験値として 1.47~1.46 をえている.

一方, 円筒形粒子の円筒軸に直角方向の沈降すなわち roundwise fall の場合 (後述するごとく, 著者らもこの場合について実験を試みた⁹⁾) に関する Burgers 式⁹⁾は, Chakraborty によって実験的に再検討され若干の修正を余儀なくされたが¹⁰⁾, Burgers の提案する流体抵抗の修正係数を λ の形に書きかえれば(28)式のようになる.

$$\lambda = (3d_s/8l)[\log(2l/d) + 0.50] \quad (28)$$

ここで, d は円筒直径, l は円筒長さである.

粉体の粒度分布測定と単一粒子の沈降実験とを関連づけた望月は, 沈降速度のズレを評価するのに Kunkel と同様の偏差を用いた⁴⁾. 彼の評価の手段を d_m とすれば, それは(29)式のごとく表わされる.

$$d_m = 1 - (d_s/d_{s1}) = 1 - (1/\sqrt{\lambda}) \quad (29)$$

以上とは別に, 生物体などに例を見る偏円状粒子に関するモデルシミュレーションには O'Brien の研究がある. 解析結果は, Heiss らの実験値⁵⁾と比較されているが¹¹⁾, O'Brien の定義した円形からの偏りの係数 (form factor) f と λ との関係は(30)式のごとくである.

$$\lambda = (d_n/d_s)[1/(1+f)] \quad (30)$$

また, Wakiya の理論解¹²⁾に関する Hnatow らの

実験的検討¹³⁾, 凝集粒子に関する Stöber らの研究¹⁴⁾も見られるが, 本稿では省略しよう.

以上に概観したごとく, 非球形粒子の沈降速度に関する補正係数には多種多様なものが見られ, 単に球形度のみをもって論ずる不足は当然のことながら, ひとつの結果が他を含めて多くの結果を総括表示できるには至っていないし, また, それぞれの表現を見る時, 粒子の沈降方向の投影面積ないしは円相当径が大きな条件として作用していることが知られ, d_n を中心として多くの要因に関する検討が必要であることは十分に推測せられる.

4. 壁面効果と沈降速度

粒子の沈降運動を取扱う場合, 容器寸法ことに沈降方向に直角な断面積が粒子の大きさに対して, はるかに大なる場合には“無限に広い”状態に近似して問題はあるまいが, 粒子の大きさに比肩しうる有限な大きさの場合には, 粒子の運動には容器壁面の影響が作用するようになる. これを壁面効果 (wall effect) という.

壁面効果の主要因は, 沈降運動する粒子によって排除される流体の流れが, 粒子と容器壁とによって阻害されることにあり, このため一般に, 粒子の実沈降速度 u' は Stokes 式から求められる理論的な値 u_s よりも小さいものとなる. また, 球形以外の粒子では壁面効果とともに粒子形状の効果が影響して現実の速度 u' を与えることになる.

従来の研究においては, この壁面効果を除去するために Ladenberg¹⁵⁾ や Francis¹⁶⁾ の補正式が多く用いられている. これらは, 円筒形沈降容器の直径を D_c , 補正係数を λ' で表せば, それぞれ(31), (32)式のごとくなる.

1) Ladenberg の補正係数

$$\lambda' = u'/u_s = 1/[1 + 2.4(d_p/D_c)] \quad (31)$$

ただし, $d_p/D_c < 0.09$

2) Francis の補正係数

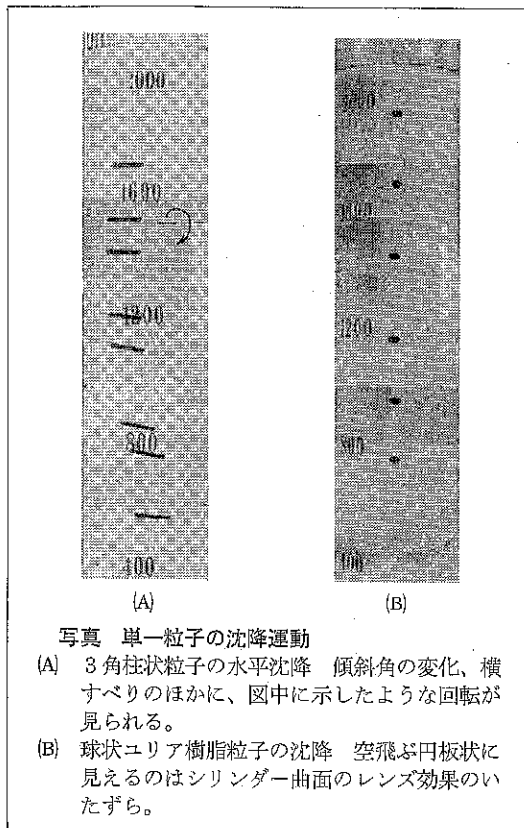
$$\lambda' = u'/u_s = [1 - (d_p/D_c)]^{2.25} \quad (32)$$

ただし, $d_p/D_c < 0.83$

しかしこれらは, ともに球形粒子に関して求められた実験式であり, したがって, d_p には球の直径を用いることになるが, これらの式を不規則形状粒子や非球形粒子に果してそのまま適用して良いのかどうか, また, 適用できるとして, 何をもって粒子の代表寸法 d_p とするかは大いに検討の余地のある処であり, 容器自体その断面が非円形となる場合には問題はより複雑なものとなろう. Heiss ら⁵⁾ は先述したように, 幾何学的に相似な各種形状の粒子を用いた実験の結果から, λ 対 d_s の実測値の点綴に対し, 球相当径が $d_s = 0$ となる補正係数

をもって壁面効果の除かれた係数 λ_∞ としている。この点は上述の難点をカバーするものと解されるであろうが、 $d_s=0$ の物理的意味と外挿法の採用については、さらに検討が求められるのではないかと考えられる。

壁面効果の問題に関して、任意の粒子の運動に対する一般の解法を示したのは Brenner¹⁷⁾ である。彼は、粒子に作用する抵抗に対して、粒子の特性寸法と、粒子の幾何学的形状のみに依存する流体抵抗の対称テンソルの概念を導入して理論的解析を行ない、代表的な場合について根拠を与えている。③1, ③2 両式と対応づけるため、球形粒子が円筒容器中心軸上を沈降する場合の壁面効果について、彼の理論にもとづく補正係数を示せば③3式のようになる。



$$\lambda' = 1 - 2.104(d_p/D_c) \quad (33)$$

③3式の d_p に球の直径を代入するときは、 $d_p/D_c < 0.20$ の範囲で③1, ③2両式の値を近似できることは、著者らの数値計算の結果から明らかであった。

上述したような壁面効果と、粒子自体の形状の効果を分離して粒子の沈降に対する Brenner 理論の応用を試み、円筒形粒子の実験結果に Heiss らの実験結果をも

併せ加えて検討を行なったものに Blumberg と Mohr の報告¹⁸⁾が見られる。無次元沈降速度比と名付けた彼らの結論を示せば③4式のごとくである。

$$\bar{u} = u/(\Delta\rho g v_p/6\pi\mu c) = [(1/\Phi_R) - (1/\Phi_A)]\sin^2\theta + [(1/\Phi_A) - K(c/a)] \quad (34)$$

ここで、 v_p は粒子の体積、 $\Delta\rho = \rho_p - \rho$ であるから、粒子の特性寸法 c を、 $c = d_s/2$ とすれば、③4式の $\bar{u}$ は③3式の λ と同じ意味のものとなる。右辺に示された Φ は粒子形状のみに依存する無限流体の抵抗テンソル、 θ は粒子主軸と重力方向のなす粒子の配向を示す傾斜角であり、 Φ_A , Φ_R はそれぞれ Φ の粒子主軸方向および沈降容器半径方向の成分で、角度 θ に関連する。 $\theta = 0$ または $\theta = \pi/2$ で③4式の右辺第1項は消え、沈降速度補正係数は次式のようになる。

1) 円筒の roundwise fall の場合

$$\lambda_{\theta=0} = (1/\Phi_A) - K(c/a) \quad (35)$$

2) 円筒の flatwise fall 場合

$$\lambda_{\theta=\pi/2} = (1/\Phi_R) - K(c/a) \quad (36)$$

上の両式で、 $c = d_s/2$ とすれば、 $a = D_c/2$ であるから $c/a = d_s/D_c$ であり、壁面効果のテンソル K は、沈降方向の端面効果が無視できる時は Brenner が③3式に与えているごとく $K = 2.104$ となり、③5, ③6両式の右辺第2項は③3式右辺第2項に等しくなる。しかし、抵抗テンソル Φ の値は、わずかな薄い円板状粒子についてのみ円板半径を c として、 $\Phi_A = 8/3\pi$, $\Phi_R = 16/9\pi$ [②5, ②6の両式参照] と求められているだけであり、Blumberg らの解析結果はそれ自体妥当ではあるにしても、③5, ③6両式を用いて λ の測定値から円筒直径が $d=0$ の場合の Φ_A , Φ_R を外挿法によって求めなければならない (Heiss らの場合と同様に) という問題が残る。結局は、粒子形状や配向を変化させて λ を求め、それにもとづいて Φ と粒子の形状や配向との関係を求めるという操作が必要となってくる。要するに、この場合においても λ に関する幅広い情報が広く要求されることになるのである。

5. 著者らの実験的検討について

これまでに概観して来たような粒子の沈降速度とその補正係数に関する学習をへて、著者らは、ひとつは単一粒子の沈降速度について、他のひとつは液相重力沈降法による粒度分布測定上の二・三の問題について若干の実験的検討を行なって見た。

単一非球形粒子の沈降速度補正係数については、円筒形粒子の roundwise fall の場合についてのみではあるが、粒子の沈降方向に直角な断面への投影面積から求められる円相当径の簡単な関数として λ を表現しうる可

能性を見出した¹⁹⁾。これまでの検討結果では、Heissらの円筒形粒子の場合(原報告の Table 4)、Kunkelの連珠の場合(原報告の Table 1)および望月の実験(原報告の Fig. 1および Fig. 2)を含め、数パーセントの誤差内で総括表現の可能な実験式がえられたが、さらに多くの実験を重ねることによって詳細な検討を与え、適当な機会をえて発表したいと考えている。

また、アンドレアゼンピペットを用いる粒度分布の測定については、球形粒子を対象として二・三の興味ある知見をえているが²⁰⁾、ここでは、その中のひとつである分取粒子群の顕微鏡計測による分布の階級最大値について若干の検討を与えることにしよう。

ガラス球3種類とフライアッシュ1種類の計4種の球形粒子系に関する実験の結果えられたものは(42)式であった。

$$D_{cmax} = 1.30 d_{st} \quad (42)$$

ここで、 d_{st} は任意の分取時間に対応する Stokes 径であり、 D_{cmax} は、当該 Stokes 径に対応してピペット球中に分取されたサンプル粒子群を顕微鏡下に計測してえられた粒度分布の階級最大値である。

いま(9)式の関係を介して(42)式を見ると、分取粒子群の最大沈降速度は当該 Stokes 径のその1.7倍近くにも及ぶということになり、しかも、分取に際して任意に選んだ Stokes 径の全範囲にわたって(42)式が成立することは、単に粗大粒の壁面効果のみが影響するような単純なものではないと考えられる。したがって、この問題の解明には別な影響を検討考慮する必要があるが、ピペット先端の吸引領域、粒子の密度分布および粒子の相互干渉効果について検討した結果はつぎに述べるとおりである。

1) ピペット毛管先端の吸引領域について

アンドレアゼンピペットの吸引毛管先端における吸引領域に関する井上、酒田の解析結果²¹⁾から、毛管先端においては液面から先端までの粒子の沈降距離 h に加えて、先端から下方に Δh の深さまで含む領域が検討対象とされなければならないことが知られる。すなわち、ピペットのすくい上げ効果である。

井上らの解析結果によれば、20~30 μ の粒子に対しては、この付加的液深 Δh は2cm程度とされているから、 D_{cmax} なる粒子の沈降速度を u_{cmax} 、当該 Stokes 径のそれを u_{st} とするとき(43)式が成立することは明らかであろう。ただし、 t は粒子の沈降時間である。

$$\Delta h = (u_{cmax} - u_{st})t \quad (43)$$

ここで、 $u_{cmax} = D_{cmax}^2 g \Delta \rho / 18 \mu$ 、 $u_{st} = d_{st}^2 g \Delta \rho / 18 \mu$ の関係から(44)式が導出されるから、

$$D_{cmax} = k d_{st} \quad (44)$$

$$u_{cmax} = k^2 u_{st} \quad (45)$$

なる関係が成立することは明らかである。 k は定数である。したがって、 Δh に関しては(46)式が成立する。

$$\Delta h = (k^2 - 1) u_{st} t = (k^2 - 1) h \quad (46)$$

ここで $u_{st} = h/t$ である。したがって、 $h = 20\text{cm}$ 、 $\Delta h = 2\text{cm}$ とすれば(46)式の関係から $k = 1.05$ と求められ、吸引領域起因の関係としては(47)式が成立せねばならない。

$$D_{cmax} = 1.05 d_{st} \quad (47)$$

2) 粒子の密度分布について

ガラス球試料などでは液中で浮上する中空球が存在している場合も少くない。完全浮上しないまでも、軽質大粒子が存在する場合には(42)式のごとき関係が生ずることは当然である。

いま軽質大粒子の密度を ρ_p' 、 $\rho_p' - \rho = \Delta \rho'$ とすると(48)式の関係が成立しなければならないから、

$$D_{cmax}^2 g \Delta \rho / 18 \mu = d_{st}^2 g \Delta \rho / 18 \mu \quad (48)$$

この関係に(42)式の関係代入すれば $\rho = 1$ として、

$$1.69 d_{st}^2 \Delta \rho' = d_{st}^2 \Delta \rho$$

$$\Delta \rho' / \Delta \rho = 0.5913$$

ガラス球の密度を2.50 g/cm³ とすれば、 ρ_p' の値は

$$\rho_p' = 1.89 \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

となり、 $D_{cmax} = 1.30 d_{st}$ であるためには、内部空隙およそ25%のガラス球が観察されねばならないことになるが、実際にはその様に気泡をもった D_{cmax} は発見することが出来なかった。

3) 粒子の相互干渉効果について

Brenner は等大球が2個併進沈降する場合の相互干渉効果を壁面効果に類比して解析し、2球の中心間距離を l とするとき、この干渉効果にもとづく沈降速度の変化を(49)式で与えた。

$$\lambda' = 1 + 3 d_s / 4 l \quad (49)$$

いま、粒子群の質量を m_p 、懸濁液総量を V_s 、粒子群の個数を n 、平均粒子径を $\bar{d}_p$ 、粒子濃度を C_p とすれば、(50)式の関係が成立する。

$$\left. \begin{aligned} m_p &= \pi n \bar{d}_p^3 \rho_p / 6 \\ C_p &= m_p / V_s \end{aligned} \right\} \quad (50)$$

一方、粒子1個の占有する空間 v_p' は、 $v_p' = V_s / n$ で与えられるから、隣接粒子間距離 l については、

$$l = (6 v_p' / \pi)^{1/3} = (6 V_s / \pi n)^{1/3} \quad (51)$$

また、 $C_p = m_p / V_s = \pi n \bar{d}_p^3 \rho_p / 6 V_s$ の関係から、

$$V_s / n = \pi \bar{d}_p^3 \rho_p / 6 C_p \quad (52)$$

の両式が成立し、結局、 l について(53)式が成立することになる。

$$l = \bar{d}_p (\rho_p / C_p)^{1/3} \quad (53)$$

したがって、(49)式の d_s を $d_s = \bar{d}_p$ とおけば、(49)式は、(54)式のようになる。

$$\lambda' = 1 + (3/4)(C_p/\rho_p)^{1/2} \quad (54)$$

したがって、実験条件としての $C_p = 0.02 \text{ g/cm}^3$, $\rho_p = 2.52 \text{ g/cm}^3$ を上式に代入すれば、 $\lambda = 1.15$ がえられ、球形粒子の場合 $d_s = d_{st}$ であるとして良いから、この場合には、

$$D_{max} = \sqrt{\lambda} d_{st} = 1.07 d_{st} \quad (55)$$

の関係がえられることになるが、この場合でも 1.3 倍よりは小さな値としかならない。

以上に例示するように、考えられる二・三の要因に関する検討の結果は、いずれも実測値よりも影響小であって、アンドレアゼンピペット沈降管径を 5 cm として計算される壁面効果の影響は(3)式を見ても知られるように、これらの影響よりもはるかに小さいものである。したがってわれわれは、この問題に関して上記各効果が相加相乗して影響を及ぼすのか、あるいはさらに別の要因が介在するのか、より詳細な検討を与えなければならないことになる。

6. 結 言

単一粒子の沈降運動に関し、理論的な沈降速度と実際の沈降速度との相違を修正する沈降速度補正係数について、主として実験的研究を中心に、これまでの成果について概観し、著者らの場合についてもいささか言及してみた。

粉体の粒度分布の測定や、粉体工学的諸操作、諸装置に関して、この種の問題の解明は、それらの合理化、適切化、精度の向上などの面で重大な与件となるであろうことは論をまつまい。その崇高な目的の前に、本稿が若干なりとも参考にとされるとしたならば、著者らの幸はこれにつきるものである。

引用文献

- 1) Wadell H. : *Physics*, 4, 403 (1934).
- 2) Pettyjohn E. S., Christiansen E. B. : *Chem. Eng. Prog.*, 44, (2), 171 (1948).
- 3) Kunkel W. B. : *J. Appl. Phys.*, 19, 1056 (1948).
- 4) 望月照一 : 粉体および粉体冶金, 10, (6), 231 (1963).
- 5) Heiss J. F., Coull J. J. : *Chem. Eng. Prog.*, 48, 133 (1949).
- 6) Singh A. N., Roychowdhury K. C. : *Chem. Eng. Sci.*, 24, 1185 (1969).
- 7) Becker H. A. : *Can. J. Chem. Eng.*, 37, 85 (1959).
- 8) Quddus M. A., Nawab M. A. : *Rheologica Acta*, 3, (3), 123 (1964).
- 9) Bergers : 2nd rpt. on Viscosity and Plasticity, *Acad. Sci. Amstardam*, vol. XVI, No. 4, p. 119 (1938).
- 10) Chakraborty A. K. : *Indian J. Appl. Chem.*, 30, 100 (1967).
- 11) O'Brien V. : *A. I. Ch. E. J.*, 14, 870 (1968).
- 12) Wakiya S. : *J. Phys. Soc. Japan*, 12, 1130 (1957); *Res. rept. No. 8, College of Eng., Niigata Univ.* (1959).
- 13) Hnatow M., Pfeffer R., Happel J. : *Can. J. Chem. Eng.*, 47, (1), 12 (1969).
- 14) Stöber W., Berner A., Blascheke R. : *J. Colloid Intersurf. Sci.*, 29, (4), 710 (1969).
- 15) Ladenberg R. : *Ann. Phys. Lpz.*, 23, 447 (1933).
- 16) Francis A. W. : *Physics*, 4, 403 (1933).
- 17) Brenner H. : *J. Fluid Mech.*, 12, 35 (1962); 18, 144 (1964); *Chem. Eng. Sci.*, 18, 1 (1963).
- 18) Blumberg P. N., Mohr C. M. : *A. I. Ch. E. J.*, 14, (2), 331 (1968).
- 19) 沢島, 彼谷 : 材料, 22, 713 (1973).
- 20) 山下, 彼谷, 沢島 : 粉体工学研究会誌, 10, 207 (1973).
- 21) 井上, 酒田 : 理研報告, 39, (4), 175 (1963).



粉体の充てんとカサ密度

Packing and Bulk Density of Powder

川 北 公 夫*

Kawakita Kimio

1 ま え が き

粉体の流動性、圧縮性、熱特性など、粉体の集合体としての基本的な物理的諸性質は、その充てん状態のいかんによって大きく左右される。その意味で、充てん特性は粉体のもっとも基礎的な特性の一つである。

粉体粒子一個一個は、それぞれその粒子特有の物理化学的性質をもっているが、それが集合体としての粉体となると、粉体集合体特性としてもっとも基本的なものは充てん特性である。

粉体の充てん状態を表わす量として一般に使われているのは次の5種類である。

- (1) 見掛け容積 (充てん比体積)
- (2) カサ密度 (見掛け密度)
- (3) 空隙率 (空隙率)
- (4) 空隙比 (空隙比)
- (5) 充てん率 (実積率)

このうち(3)、(4)、(5)は具体的であり、石ころが堆積したようなイメージを描きやすい。ただしこの場合の数値を求めるためには、特別な場合を除き、** 一般には粉体粒子の真密度を測らなければならない。

それに対して(1)と(2)は、どちらかといえば抽象的な物性値であるが、単に容積と重量を測るだけで数値を求めることができるという点で実際に用いられることが多

い。とくに(2)のカサ密度 (Bulk Density) 或は見掛け密度 (Apparent Density) はもっとも普通に用いられる充てん特性の表現手段である。

カサ密度は粉体を取扱っている業者、メーカーや研究者には最も重要な粉体物性であり、場合によっては、取引上や生産上の決定的要素になる場合もある。いいかえれば重要な、気体や液体や固体 (原料としては粉体であっても) であれば密度 (比重) に相当する、基本的な表示すべき性質である。ところが粉体の場合はカサの問題は重要なものであることを知りながら、従来はカサ密度の測定に対して十分な注意が払われなかった。日本工業規格もあるが、必ずしも微粉体について満足すべき結果が得られているとは限らない。

カサ密度の名称

カサ密度はこのようにもっとも普遍的な充てん特性の表現手段であるにもかかわらず、名称の不統一というか、学術用語のうちでこれほど変名の多いものは稀であろう。JISに記載され、国家保証の名称ですら2、3のものを拾ってみると次のようである¹⁾。

- K5101 カサ (顔料)
- K6721 カサ比重 (塩化ビニール樹脂)
- K6891 見掛け*** 密度 (四フッ化エチレン樹脂)
- K6911 見掛け密度 (熱硬化性プラスチック)
- R6126 カサ比重 (人造研削剤)
- Z2504 見掛け密度 (金属粉)

このほかにも、充てん密度、カサ密度、見掛け比重、バルクなどが用いられている。

筆者が本論文の題名として“カサ密度”をあえて使ったのは二つの理由からである。まず第一に外国雑誌からこの種用語を拾ってみると、Bulk Density と Apparent Density が圧倒的に多いことと、Bulk という文字の表現が、筆者は筆者なりに、何がふさわしいような気がした。bulk up は動詞に使ってカサ張るである。次に第二の理由として昭和45年12月の粉体工学研究会東京談話会にて筆者が行なった当日の参加者による名称投票の結果、このカサ密度が一番得票数が多かったことに

* 法政大学工学部 (〒184 東京都小金井市梶野町3丁目7-2) TEL 0423-81-5341

** 川北式 $C = (V_0 - V) / V_0 = abP / (1 + bP)$ より $P/C = 1 / (a \cdot b) + P/a$ の関係から容易に a が求まる (グラフ法にて)。ここに C はカサベリ度、 V_0 は初期容積、 V は加圧下の容積、 P は圧力、 a および b は粉体の特性定数である。この a は初期空隙率を現わしているので、真密度がわかっていなくても空隙率は求まる。詳細は川北: 粉体圧縮式に関する考察, 材料科学 Vol. 7, No.3 p. 30~32 (1970), 参照。

*** 中山著: 模範常用辞典 (昭和42年) p. 719 によれば見掛けのケは不必要。

よるものである。

そもそも粉体の充てん状態には、もっとも密な圧粉体の状態から、もっとも疎な流動層の状態までいろいろな段階がある。

筆者はかさ密度を粉体の充てん状態に従って次のように考えている。

- a. 静かさ密度：フルイから粉体試料が均一に雪の降るように受器に入った場合のもっとも疎な状態のかさ密度。
- b. 漏斗・ダンパーかさ密度：ダンパーを手早く全開して受器に試料を入れた場合の疎充てんのかさ密度（日本工業規格法）。
- c. 振動かさ密度
 - i) 横振動かさ密度：後述するように比較的疎に近い充てん状態を保っているときのかさ密度。
 - ii) 縦振動かさ密度：相当の圧密をとまうので、横振動に比較してより密な充てんの場合のかさ密度。
- d. タップ・かさ密度：タッピング（タップ上下の距離は通常1.2cm）を行なって粉体の見掛容積が一定になるときのかさ密度であり、相当圧密の状態である。上記c, ii) とdは圧密かさ密度であり、配位数（接触点の数）が相当大となっていることは当然である。

R. L. Carr²⁾ は粉体の流動性に関連して、ゆるみかさ密度、固めかさ密度、平均かさ密度、動のかさ密度、流れかさ密度の5種類をあげているが、それ以外にもタップ密度とか圧粉密度など、いろいろの種類のかさ密度があるために、いちいち断わらないとどのような充てん状態なのかかわからないのである。

これらのうちで、どのかさ密度を採用すべきかは、実際に即した状態の密度を測定しなければならないであろう。たとえば、単に自重だけで推積している状態と、装置の中で流動している状態とは異なるであろうし、袋詰めにしたばかりの状態と、これが長時間トラックで運搬された後の状態とは密度もおのずから違ってくるであろう。

ある操作が加わったときに密度がどのように変化するかということも調べる必要があるであろうし、粉体内部における密度分布の状態を簡単に測ることができればその価値は大きいであろう。とくにホッパーやフィーダーの内部を流れている粉体の任意の場所における時々刻々のかさ密度変化を簡単に測れるような方法の開発研究が望まれる。

2 静かさ密度（疎充てんかさ密度）

さて静的なかさ密度にふれてみたい。これは誰でも容器と計量器があれば容易にはかることができる。粉体容器を V 、重量を M とすると、

$$\text{かさ密度} = M/V$$

によって簡単に値はでてくる。しかしかさ密度の測定値は常にバラツキを伴うのである。

普通どこ研究室でも、工場でもかさ密度の測定は M/V の V を一定にしておいて、 M を測るのである。この V は容器の体積であると同時に、粉体を入れた場合には粉体の体積でもある。すなわち、特別な、容器の壁面作用などのない限り粉体の充てん体積である。

ここで大切なことは粉体を容器に入れるやり方である。すなわち、充てん方法が大きく問題になってくる。これによって M の重量に差異がでてくる。

まず Fig. 1 のように粉体を上部より容器に流し入れ、山盛りになったところで、手ですりきって、直ちに重量を測っている。（Photo. 1）工場現場ではこのようなやり方は普通にやっている。

この場合、実は〔I〕のプロセスが大きく測定値バラツキの原因になっているのである。また〔II〕のすりきる方法であるが、手ですりきるか、ガラス棒ですりきるか、薄い金属板や名刺などですりきる場合とで測定値のバラツキがおこる。つまり〔I〕、〔II〕共通していえることは粗充てんの状態がどの程度密充てんの方

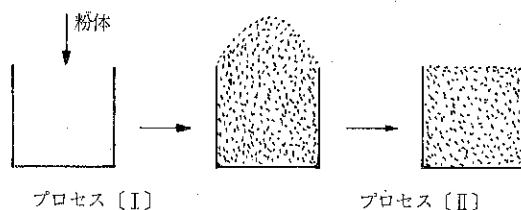


Fig. 1 簡易なかさ密度測定

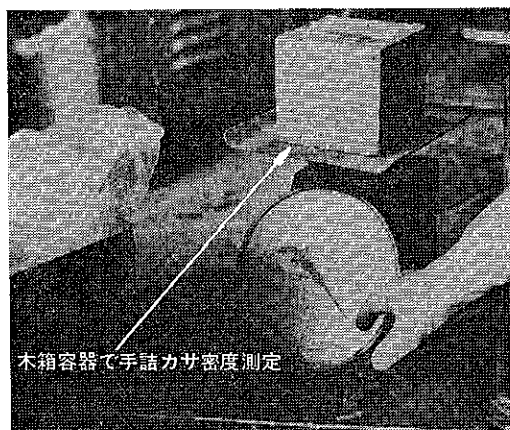


Photo. 1 簡易なかさ密度測定

かという問題である。Table. 1 はコムギ粉の充てん方式によるかさ密度の変化を示してある。また Table. 2 は容器の大きさとかさ密度の関係を示したものである⁴⁾ 次にこれらのかさ密度変動因子について更に検討してみたい。

Table 1 コムギ粉の充てん方式によるかさ密度の変化

	かさ密度 (水分12.60%)	かさ密度 (水分13.60%)
A	0.531 0.530 } 平均 0.530 0.520 }	0.388 0.390 } 平均 0.389 0.389 }
B	0.578 0.577 } 平均 0.578 0.578 }	0.419 0.420 } 平均 0.419 0.419 }
C	0.756 0.758 } 平均 0.757 0.757 }	0.746 0.748 } 平均 0.748 0.749 }

A : 高さ 10cm の位置から 1 l 箱に手フルイで落とす。
B : 高さ 50cm の位置から 1 l 箱にホッパーで落とす。
C : 手詰め。

Table. 2 ネエビー・ビーンズの容器の大きさとかさ密度の関係

容器の 直 径 D (cm)	容器の 容 量 (ml)	D/ $\bar{d}$ *	かさ密度 (緩) (g/ml)	S.D.** (%)	かさ密度 (密) (g/ml)	S.D. (%)
2.1	18.3	3.5	.74	1.23	.79	.89
3.3	64.5	5.5	.81	.63	.84	.75
5.2	204	8	.83	.36	.86	.57
6.5	327	10	.82	.81	.87	.57
8.5	615	13	.82	.36	.86	.41
12.5	978	19	.82	.72	.88	.27

* $\bar{d}$: ネエビー・ビーンズ (いんげん豆の一品種) の粒子径 (0.65cm)

** 標準偏差

3 カサ密度変動因子

かさ密度を変える因子は何であるか。つまり、 M/V を変動さす因子である。これにはまず粒子それ自体に関係するファクター、容器に依存するファクター、推積と推積後処理に関係するファクターが考えられる。いまこれを表示すると Table. 3 のようになる⁵⁾。

Table. 3 より明らかにいえることは、粒子については形状、粒度分布、弾性、反発力、粒径、凝集性、表面物性などがあげられる。特に粒度分布については正確に関係していることが明らかである。

次に容器であるが、これはサイズがもっとも大きい変動因子であることは明らかである。

Table. 3 充てん状態変動因子

変 動 因 子 (Vが変わる因子)	定量的証拠あり		定性的証拠あり		証拠なし	
	実験的	理論的	実験的	理論的	実験的	理論的
1. 粒 子 形 状 粒 径 粒 度 分 布 質 量 弾 性 反 発 力 表 面 物 性		○	○	○		
2. 容 器 形 状 サイ ズ (大 小) 弾 性 表 面 物 性	○		○	○	○	○
3. 堆 積 堆 積 の 強 さ	○			○		
4. 堆 積 後 処 理 振 動 圧 密 圧 縮 圧 密	○			○		

さて推積と推積後処理であるが、推積の強さ、振動圧密、圧縮圧密が直接影響があることは表より明らかである。

また本質的に考えて、かさ密度に関係する因子を筆者の考え方でまとめてみると次のようになる。

かさ密度関係因子

(1) 粉体粒子生成の歴史 (粉体の履歴書)

- (イ) 粒度依存性
- (ロ) 付着力
- (ハ) 形状依存性
- (ニ) 粒子表面活性
- (ホ) その他

(2) 集合体としての影響

- (イ) 充てん状態 (接触点の数)
- (ロ) 充てん速度
- (ハ) 充てん方式
- (ニ) 集合体内部の粒子相互作用 (ブリッジ現象などを含む)
- (ホ) その他

(3) 受入れ容器の影響

- (イ) 容器の体積
- (ロ) 容器の形状
- (ハ) 容器の構成物質

- (二) 内部表面の状態
- (四) 壁面作用
- (六) その他

ここでカサ密度に影響するファクターを一つずつ消してゆくことにする。

まず容器は一定のものを使用する。次に充てん方法や速度を定常条件にしてやる。

そうすることにより余計なファクターは消去され、主として上記(1)が関係因子として残り、粉体粒子そのもののもつ物性のみがきいてくることになる。すなわち **Table. 3** から明らかなように粒度分布などは直接関係してくることになる。

4 カサ密度測定の意義

まずカサ密度を測定することによる利点を考えてみよう。カサ密度は勿論重量・体積の特性値であり、充てんの粗密状態を間接的に表現している点で重要な物性値である。

常識的にいって、一般にフワフワした粉体はカサ密度が小さい。これは見掛け容積は V/M であるから、 V が大となれば、カサ密度は当然小さくなる。すなわちフワフワ度の常識的判定に役立つ。同時にサラサラした粉体は常識的にいってカサ密度は大である。カサ密度が大であれば大体常識的、定性的にサラサラした粉体である。まず常識的、定性的にフワフワ度やサラサラ度が認識できる。

次に真の密度がわかっておれば空隙率がでてくる。カサ密度を d_B 、空隙率を n とすると、

$$d_B = \frac{W(1-n)}{V_\infty} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに V_∞ は粉体の実質体積である。すなわち真の密度 d_T を測るときの体積に等しい。(1)式から

$$n = 1 - \frac{d_B V_\infty}{W} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$= 1 - \frac{d_B}{d_T} \quad \dots\dots\dots(3)$$

さて空隙率が求まれば、どのようなことが判るか。この点について考察してみたい。

一般的に空隙率と平均粒子径の関係は、P. S. Roller²⁰⁾ によっても確かめられているが、**Fig. 2** のようになっている。すなわち、ある粒子径 (10~50 μ) のところで空隙率は段々増大してくる。つまり臨界粒子径がある。臨界粒子径以上では空隙率はあまり変化がない。特に付着力の小さい粉体については、筆者の研究した範囲では、このような事実がある。

粒子径をできるだけ揃えてカサ密度を測定し、真の密度をハンドブック、あるいは測定で求め、これから空隙

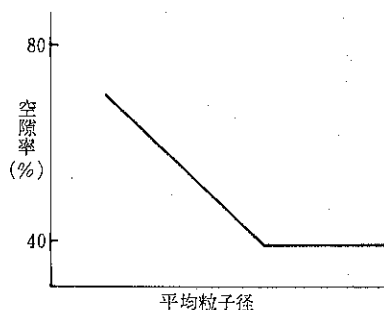


Fig. 2 空隙率と平均粒子径の関係

率を前述の式によって求めた結果、大体40~48%位の値を示すと、粒子の形状は球に近いものである。この事実は筆者、Mecke 早川、林、Graton, Fraser, 牧島、種谷、久野などによって認められている⁶⁾。従って粒子形状にもカサ密度は関係をもつ場合がある。

つぎにカサ密度と空隙率、安息角、付着力の関係にふれてみたい。安息角と空隙率との関係は一般的関係式を導くことは無理としても、大体同一種の粉体であれば常識的にいって安息角が大きいものは空隙率も大きいというごく定性的なことはいえる。

カサ密度は要するに充てん状態に関係するから、次のことが常識的にいえる。

カサ密度→小 のとき
 ⇒大
 空隙率→大
 ⇒小
 安息角→大
 ⇒小
 付着力→大
 ⇒小

空隙率について筆者は一種の簡単な実験を行なったので、それをここに参考のため紹介しよう。粒子の理論的配列構造と実際の食い違いである。

いま充てんについて一種のモデル実験を試みる。すなわち、同大の球状ガラス粒子を容器に入れて空隙率を測定してみる^{36~38)}。そうするとだいたい空隙率は38~40%である。一方理論的には同大球の配列は **Table. 4** に示され、ちょうど接触点の数が8の場合に相当する^{11~18)}。また非常にまるい球状ガラス粉体をピストン圧

Table. 4 充てん特性 (同大球)

充てん形態	接触点の数	空隙率(%)
Cubic	6	47.64
Orthorhombic	8	39.54
Rhombohedral	12	25.95
Tetragonalsphenoidal	10	30.19

Table. 5 ガラス球粉の破壊直前の空隙率

平均粒子径(mm)	空隙率 (%)
1.205	36.8
0.920	37.3
0.775	37.3
0.650	37.8
0.545	36.0
0.460	35.2
0.385	37.1
0.324	35.7

Table. 6 Smith の接触粒子数測定結果

算定 個数	空隙率	平均 配位 数	配位数別の粒子頻度								
			4	5	6	7	8	9	10	11	12
1562	0.359	9.14	1	13	77	245	322	310	208	194	192
1494	0.372	9.51	0	14	86	192	233	193	161	226	389
487	0.426	8.06	0	14	69	182	316	212	87	7	0
906	0.440	7.34	3	54	173	309	233	118	14	2	0
905	0.447	6.92	6	73	243	328	200	48	2	0	0

Table. 7 カサ密度 (d_B) と関係粉体物性

カサ密度の大小	関係粉体物性
大小にかかわらず	見掛け容積は逆数 $V/M=1/d_B$
小	充てんの粗の状態
大	充てんの密の状態
小	フワフワの外見
大	サラサラの外見
大小にかかわらず	粒度分布に関係
大小にかかわらず	空隙率が求まる (真の密度 d_T がわかれば) $n=1-\frac{d_B V_\infty}{W}$ $=1-\frac{d_B}{d_T}$
大小にかかわらず	空隙比 e (Void Ratio) が求まる. $e=\frac{V-V_\infty}{V_\infty}$
大小にかかわらず	充てん率 g (実積率) が求まる. $g=\frac{V_\infty}{V}$
大	空隙率小
小	空隙率大
$d_B=d_T$ ($1-0.40\sim0.48$) を規準として、配位数 6~8	空隙率の値より場合によっては (球状か否か) 粒子形状が推定できる
大	通常は安息角小 (同一種の粉体)
小	通常は安息角大
大	通常は付着力小 (同一種の粉体)
小	通常は付着力大
大小にかかわらず	流動性に関係 (Carr の研究)
大小にかかわらず	熱伝導率に関係
大小にかかわらず	バルキングの現象測定に役立つ
大小にかかわらず	コーティング、マイクロカプセル、マイクロバルーンなどのチェック、効果の判定に役立つ。

縮して、粒子がこわれる直前の最も密に充てんしたと考えられる状態の空隙率を測定すると¹⁴⁾、Table. 5 のようにだいたい37%付近である。すなわち、実際上のガラス球粉の最密充てんは37%付近であって、けっして理論上の25.95%にはならない。すなわち、このようなモデルの実験でも理論と実際はなかなか合致しない。W. O. Smith²⁴⁾ は鉛散弾の充てん層をつくり、これに酢酸水溶液を加えて放置後溶液を除き、粒子の接触部に生じた酢酸鉛の白色斑点を数えて Table. 8 のような結果を得ている。すなわち空隙率と平均配位数とはほぼ反比例的関係にある。

付着力について一言すれば、一般的にいって付着力の大きい粉体は、常識的、定性的には安息角も空隙率も大である。

前述した Carr²⁾ の論文では、カサ密度と流動性との関係を定量的に扱っていて、その意味では劃期的であると思うし、それ以外にも熱伝導率との関係などで相關関係が明らかにされている場合もある。

カサ密度と他の粉体物性との相關関係の研究については今後の一層の発展を期待したい。

次にまとめとして、カサ密度と関係粉体物性との相關関係を表示する (Table. 7)。

Table. 7 から明白にいえることは、カサ密度を測定すれば、見掛け容積 (カサ容積)、空隙率、空隙比、充てん率などが定量的に求まる。カサ密度と空隙率の実例をあげると Table. 8 のようなものもある²⁷⁾。造粒物 (Granule (顆粒)) のカサ密度を測る場合がある。この

場合は顆粒1個の粒子に空隙が存在する。いま顆粒内空隙を V_1 、顆粒間空隙を V_2 とすると

$$(V = V_{\infty} + V_1 + V_2),$$

$$d_T = W/V_{\infty} \quad \dots\dots(4)$$

$$d_G \text{ (顆粒子密度)} = W/(V_{\infty} + V_1) \quad \dots\dots(5)$$

$$d_B = W/(V_{\infty} + V_1 + V_2) = W/V \quad \dots\dots(6)$$

また空隙率は次の3種がある。

$$n_1 \text{ (顆粒子間空隙率)} \\ = W_1/(V_{\infty} + V_1) = 1 - d_G/d_T \quad \dots\dots(7)$$

$$n_2 \text{ (顆粒子間空隙率)} \\ = V_2/(V_{\infty} + V_1 + V_2) = V_2/V \quad \dots\dots(8)$$

Table. 8 d_T , d_B , n の関係

粉 体 名	粒子密度 d_T	カサ密度 d_B	空隙率 (空隙率) n %
綿	1.4	0.24 ~ 0.133	98~91
カーボンブラック	1.7	0.4	77
陶 石 粉	2.6	0.77 ~ 0.84	71~68
石 松 子	1.05	0.355~0.389	66~63
フ ラ イ ア ッ シ ュ	2.0	0.72	64
馬 鈴 薯 で ん ぷ ん	1.4	0.52 ~ 0.78	63~64
SiC # 1 0 0	3.2	1.52 ~ 1.82	52~43
米	1.4	0.7	50
鋳 物 砂 5 号	2.5	1.36 ~ 1.46	46~42
セ メ ン ト	3.1	1.2	41
オ タ ワ サ ンド	2.5	1.58 ~ 1.71	37~32
ポリ・スチレンビーズ	0.93	0.60 ~ 0.62	36~33

Table. 9 筆者の付着力の分析的考察

付 着 力 の 内 訳		関 係 因 子	特 長
分 子 間 力 (van der Waals)		粒径, (距離) n に比例 $n=2\sim3$	近接力, 接近すると力は大きくなる。物質固有の性質で外的条件によってほとんど影響されない。
吸着水分子または水分による力	吸着した水分子による力	分子間力に類似か、極性の影響か	雰囲気湿度の影響として現われる。
	粒子間の架橋、凝縮水分の表面張力による力。	粒径, 表面張力, 水分量には反比例的関係	水分の凝縮、蒸発などのくり返し作用でヒステリシス効果かなり大きい力と考えられるが、乾燥状態ではおこり得ない。
静電帯電による力		近接状態では表面帯電密度, (粒径) n に比例 $n=2$	大体 200μ 以下の粒径でおこり, +, -, 中性のものを通常生ずる。湿度大の雰囲気ではほとんどみられないが、小粒子ではみられることもある。反発力, 吸引力ともなる。
複 合 力		機械的なからみあい	分子間力と内部摩擦
		固 結 現 象	析出した微結晶が粒子間をうめたり, 相互拡散をする。水分による力が多いが、水分のない雰囲気でおこる場合はトポ化学系に属する。
		焼 結 現 象	粒子間で分子の相互拡散。
化 学 結 合		水 素 結 合	有機化合物の固結には考えられる。

$$n \text{ (全体空隙率)} = \frac{V_1 + V_2}{V_\infty + V_1 + V_2} \\ = \frac{V_1 + V_2}{V} \quad \dots\dots\dots(9)$$

次に付着力と空隙率の関係について一言したい。

青木²⁶⁾は粉体層の付着力のモデルとして次のように考えた。

- i) 単位面積に存在する粒子は数多い。
- ii) 空隙率 n は粉体層内部 および 接触面で 一様である。
- iii) 荷重を加えても実質部分 (V_∞) の体積は不変である。
- iv) 荷重によって、空隙率の変化が起こり、空隙率の変化により粒子の接触面積、あるいは接触点の数が増加する。
- v) 単位接触面積当たりの付着力は荷重によらず一定である。

付着力 C は単位面積当たりの力として表わされ、単位面積当たりにある粒子の接触点の数、あるいは接触面積の大きさに関係する。接触点も結局は接触面積を問題とすることであり、考えている面における接触点の数を数えることは容易ではないから、これからは、荷重を受けた粉体粒子は接触面積が変わると考える。次に粒子の接触部分は、圧縮応力がきわめて大きくなり、弾性変形のほうが支配的と考える。また、接触面積は単位体積中にある粉体の実質部分の体積に関係していると考えられる。

いま最密充填状態の空隙率を n_∞ 、実質部分の体積 V_∞ をもつ立方体の一边を a_∞ とすれば

$$a_\infty^3 = V_\infty \quad \dots\dots\dots(10)$$

空隙率 n のときの見掛けの実質部分の体積を V 、これと同じ体積をもつ立方体の一边を a とすれば

$$a^3 = V = V_\infty \cdot \frac{1-n}{1-n_\infty} \quad \dots\dots\dots(11)$$

上2式より

$$a = a_\infty \left(\frac{1-n}{1-n_\infty} \right)^{1/3} \quad \dots\dots\dots(12)$$

すなわち空隙率 n の立方体の一つの面における接触面積は最密充填状態の場合に比べ $\left(\frac{1-n}{1-n_\infty} \right)^{2/3}$ 倍になっている。あるいは一つの面における粒子密度が最密充填状態の場合の $\left(\frac{1-n}{1-n_\infty} \right)^{2/3}$ 倍になっていると考える。

最後に個々の粒子の付着性、つまり単位接触面積当たりの付着力が空隙率によって変化しないから最密充填状態の際の付着力を C_∞ とすれば、空隙率 n の場合、付着力 C は次のように表わされる。

$$C = C_\infty \left(\frac{1-n}{1-n_\infty} \right)^{2/3} \quad \dots\dots\dots(13)$$

これより粉体層を考えたときの付着力は、層の充てん

状態によって変わることが明らかである。

5 カサ密度のコントロール

一般にカサ密度のコントロールといえば、粉体の流動性を良くするという目的のためになされる。すなわち、付着力 $\rightarrow$ 小、カサ密度 $\rightarrow$ 大にする方向がある。もちろん粒径、粒度分布のコントロールも直接カサ密度に影響するし圧密、圧縮も同様である。いまカサ密度コントロールの手段をあげると下記の項目で示される。

- (1) 粉体の生成条件を変えること……粒子の形状変化
- (2) 粒径、粒度分布を変えること……粒径の大、小
- (3) 湿度のコントロール……水分の吸着度合
- (4) 異種粉体の混在……流動性、付着力の変化
- (5) コーティング……保存性、水分吸着防止、流動性
- (6) マイクロバルーン……カサ密度減少
- (7) マイクロカプセル……固体同志のカプセル、保存性、医薬品薬理効果
- (8) 真空処理……顔料、セラミックス、カーボンなどはカサ密度増大
- (9) 造粒(顆粒)……流動性増大、付着力減少
- (10) ペレット生成……流動性増大
- (11) タブレット生成……流動性増大

コーティング、造粒、マイクロカプセル、マイクロバルーンなどについては最近、文献や書物²⁵⁾²⁹⁾などで紹介されているので省略し、真空処理について触れておく。

一般に粉砕過程で粉体内部に空気が、容易にはとれないかたちで含まれる場合がある。すなわちカサ密度の値が小さくてくる。これは化学、薬学、セラミック、粉末冶金、顔料、染料などの工場ではしばしばみられる。

この場合 Fig. 3 のような装置で真空と加圧によっ

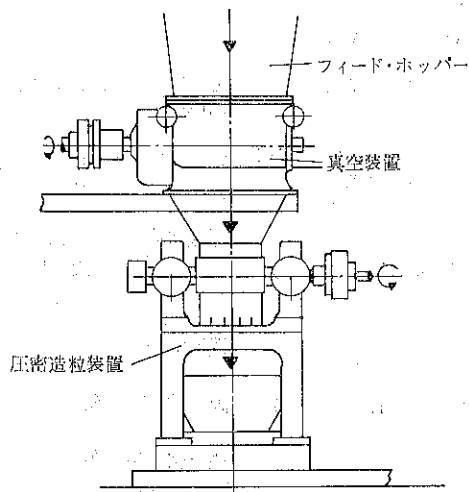


Fig. 3 カサ密度増加真空装置

て、カサ密度の値を大にする方法がとられ、これは粉じん公害とも結びつけて考え将来性がある。

6 カサ密度とバルキング現象

水分によってカサ密度の数値がしばしば変化することがみられる。ケーキング（固結現象）をおこす場合ではないが、

粉体工学において、砂のカサ密度が水分の影響を受けることはバルキング（Bulking）の現象として知られている¹⁵⁾。この現象は粉体中に存在する水分の量と粒子径に関係する。

砂のカサ密度は水分5～8%において最小値を示すことが知られている。この水分量よりも少くとも多くてもカサ密度の値は増加し、最後に水びたしの状態になると、また元の乾燥状態の砂のカサ密度に等しくなることが報告されている¹⁵⁾。

このバルキングの現象を更に説明すると、いま容器に一杯満した砂の体積を V_s とし、水分 $m\%$ を含んだ砂の体積を V_m とすると、バルキング・ファクター V_m/V_s は Fig. 4 のように示される。図より明らかなように

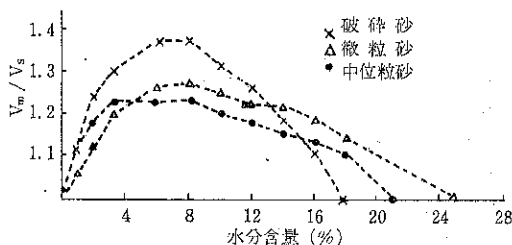


Fig. 4 バルキング現象

水分量5～8%においてカサ密度は最小の値を示すのである。25%をすぎると V_m/V_s は1となり、乾燥状態のカサ密度と等しくなる。

これは一例であり、粉体は砂であるから付着力も余り示さない取扱いが容易なものであるが、カサ密度を測定すれば逆に水分量を推定できる一つのケースとも考えられる。バルキング現象——他の現象でもたとえばコーティング、マイクロカプセルなどの処理をした場合そのようなことがあると思うが——では少くともカサ密度測定がきめ手になる。

7 付着力の正体

前述したようにカサ密度と付着力は無縁ではない。常識的にいって付着力の大きい粉体はカサ密度は小さいことは確かである。しかしどのように関係しているかは具体的には判然としない。もちろん見掛はサラサラしているし、筆者の研究では同大球粉体の場合大体接触点の数

は8（配位数）であり、空隙率は40%付近である。しかし、それでも実際には理論的な最密充填（同大球）25.95%にはならない⁷⁾²³⁾。

付着力の正体について一言しておきたい。まず筆者の考えでは Table. 9 のように思われる。

付着力の正体は分析的に考えると仲々むつかしいが、実際に我々が測定して求められる数値はケース・パイ・ケースであり、複合力にちがいない。前述 Fig. 2 の臨界粒子径に触れたが、この場合単純に考えれば粒子の自重と付着力のバランス状態²²⁾とも考えられる。すなわち

- (a) 付着力 > 自重……臨界粒子径よりも小さい範囲
空隙率大となり、カサ密度も一般には小となる。
- (b) 付着力 = 自重……臨界粒子径
- (c) 付着力 < 自重……臨界粒子径よりも大きい範囲
空隙率は大体一定となり、カサ密度も大となりほぼ一定となる。

(a)の場合については(i)比容積大、(ii)空隙率大、(iii)安息角大、そしてもちろん(iv)カサ密度小という現象になってでてくるであろう。

以上は安息角、付着力とカサ密度に触れたが、もちろん内部摩擦角にも関係を持つことは明らかである。要するに角特性とカサ密度は密接に関係しているであろうが、従来の研究には数式的関係式はあまり見当たらないのである。

最近青木、鈴木は付着力の無視できるような、すなわちバルク性が無視できるような粉体では、安息角と内部摩擦角はほぼ等しくなり、角特性と粒子形状因子との間にある種の相関関係のあることを報告している²¹⁾。

8 いろいろな充てん方法によ体積標準偏差と空隙率⁸⁾

粉体の充てん体積のバラツキに関しては、これまでいささか述べられたものもあるが⁹⁾¹⁰⁾、その再現性を比較したり、またどのくらいであるかという定量的な測定をした報告は見当たらない。われわれは一定容器にいろいろな粉体をいろいろな方法で充てんし、くり返し行なった場合の測定値のバラツキを調べた。

すなわち、この場合は M/V の V のみのバラツキをしらべたわけである。

測定方法は体積目盛りのついたガラスシリンダーに次の(A)～(M)の各方法で各種の乾燥粉体を充てんし、すべて10回くり返して体積を測定した。

(A) 容器の上からロートで注ぎ入れる。この場合ロートの出口の径は5mm、ロートの高さ一定で、容器の底からロートの出口まで約18cm。

- (B) (A)の方法で充てんしたものを容器ごと一たん逆転して元に戻したときの体積をよむ
- (C) (A)の方法で注ぎ入れたものを約1cmの高さで10回タッピングを行なう。ただし手動により木製の台の上で行なった。
- (D) 上記のタッピングを50回行なう。
- (E) (A)の方法で注ぎ入れたものに、上から10g/cm²の加圧に相当する重さの底の平らな棒を静かにのせる。
- (F) 上記(E)の方法に、更に30g/cm²の荷重に相当するように、棒の上に分銅をのせる。
- (G) 上記(F)の方法に、更に分銅を追加して50g/cm²の荷重にする。
- (H) タッピング装置(市販)により(A)の方法で注ぎ入れたものを1cmの高さで10回タップする。
- (I) 上記(H)と同じタッピングを50回行なう
- (J) (A)の方法で注ぎ入れたものを、振動数50cycle/sec. 振幅0.5mmで垂直方向に10秒間振動する。
- (K) 上記(J)と同じ振動を30秒間行なう。
- (L) 上記と同じ装置で、同じ条件で水平方向の振動を10秒間行なう。
- (M) 上記(L)と同じ水平振動を30秒間行なう

ここで、タッピング装置はモータによってカムを回転し、試料台を60回/minの速度で上下させるもので、落下高を調節し、二次的な衝撃を押えることができる。また微振動は電磁型振動装置で正弦波に近い波形がえられる。これは変位、加速度および振動方向の変換ができる。ガラスシリンダーが粉体の容器で内径3cm、容量100ccである。

デシケーター中に保存して乾燥した粉体の100cc近い量を試料として容器に充てんした。なお上記の充てんを行なった際クリープ現象のみられる粉体もあったが、その場合には一定体積になるまで待つて測定した。またすべての個々の測定値はその平均値の $\pm 3\sigma$ 以内であったので、異常な測定値はなかったものとみなした。測定の結果をまとめて図示すると、Figs. 5~8のごとくなる。

これらの図において、試料名の下にふり分けした粒子径を示し、試料名の上の(A)~(M)の記号はそれぞれ上記の充てん方法を示す。またFigs. 5~7における下の欄は、試料を顕微鏡でみた際の粒子の形を示す。上段のヒストグラムは空隙率の平均値($\bar{n}$)を示し、下段のヒストグラムは10回の測定値の試料標準偏差(σ)を示したものである。いずれも単位は%であるが、標準偏差の値は平均値に対して何%のパラツキになるかという値で示してある。

Figs. 5~6 は粉体の粒子が球形または石ころ状の

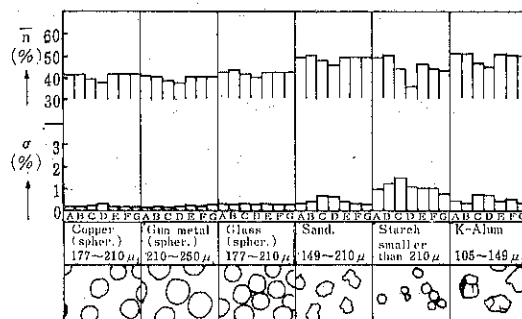


Fig. 5

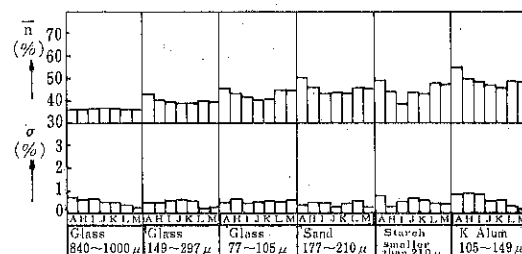


Fig. 6

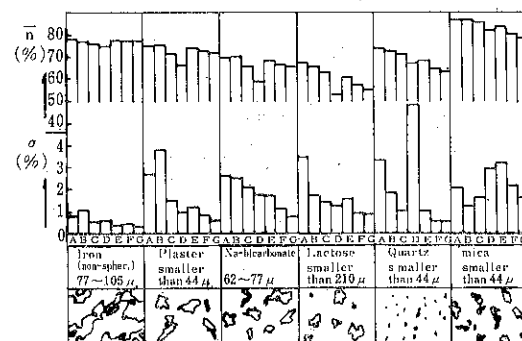


Table. 7

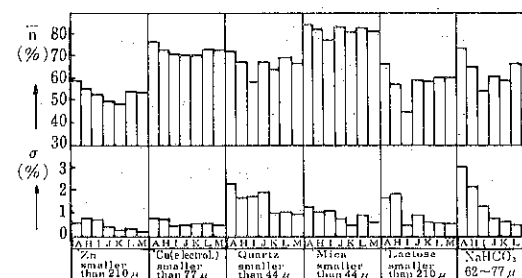


Fig. 8

形をした試料で、いずれも空隙率は40%前後の密な充てんであり、体積測定値のパラツキは小さく平均値の1%以内の程度である。Figs. 7~8 は粒子の形が不規則または微細な粉体で、平均空隙率が大きく、またパラツ

キの程度も前に比べると全体に大きくなっている。なお目盛りの読みの誤差はコンマ数%程度がこれらに付随する。

粒子径の影響

Fig. 9 は粒子径の大小が充てん状態に及ぼす影響をしらべたものである。いずれも粒子径が小さくなると平均空隙率は増大する傾向がある。測定誤差に関しては明確な影響はみられない。(A)の充てん方法はいずれも、粒子径が大きくなると空隙率が顕著に減少しているのは興味がある。特に球形のガラスビーズや砂の場合にいちじらしい。

事前に加えられた操作の影響

Fig. 10 は充てん体積を測定する場合、事前に加えられた操作によって、得られる測定値が異なる場合があることを示す一例である。図で実線は(A)の操作を出発点にしてタッピングしたり加圧した場合の測定値を示し、点線は(B)の操作を出発点にしてその上にいろいろの操作を施した場合を示す。いずれも(A)、(B)両方法の差でいどのものが(C)以下の方法に影響していることがわかる。こ

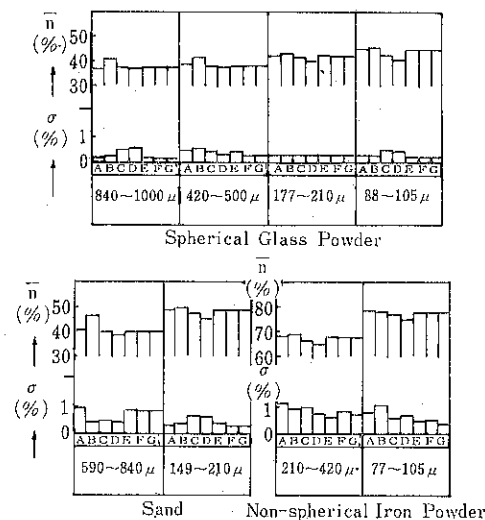


Fig. 9

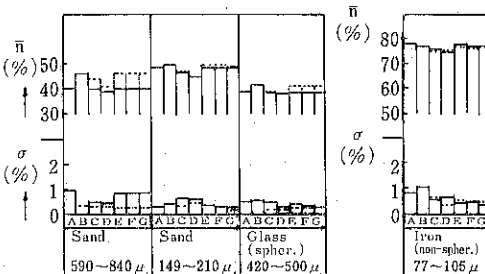


Table. 10

のことからタッピングにしても、加圧圧縮にしても、特に低い加圧における充てん状態を問題にする場合には、事前に加えられた操作を明確にしておく必要があると考えられる。

測定値のパラツキと充てん状態との関係

Figs. 11~13 は測定値の全部を横軸に空隙率、縦軸に試料標準偏差をとってプロットしたものである。(A)~(M)の記号はそれぞれ充てん方法を示す。それぞれの図の曲線は測定値のパラツキの程度を示す一つの目安とし

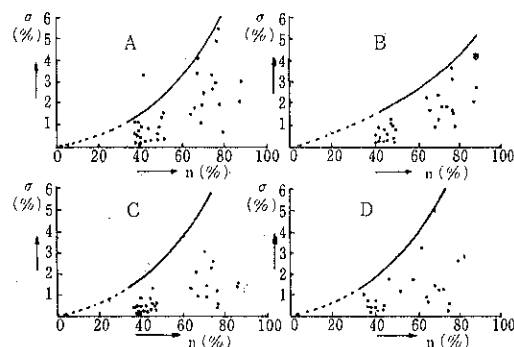


Fig. 11

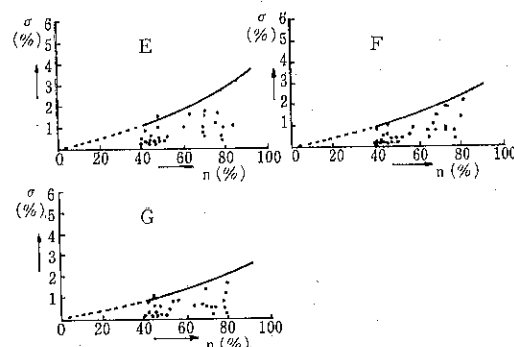


Fig. 12

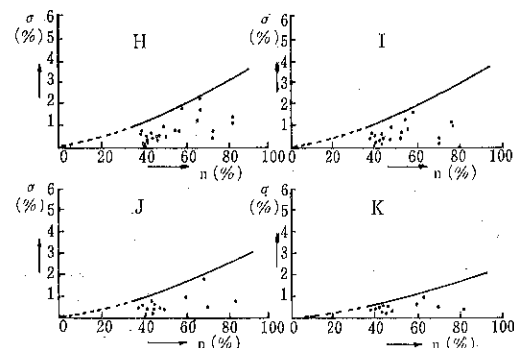


Fig. 13

て、パラツキの最大になると思われる限界線を引いてみたものであって、体積を測定した場合のパラツキの可能性がこの程度内におさまることを示すと考えてよい、一般に空隙率が大きいほどパラツキの可能性は大きく、密な充てんになるほどパラツキは少なくなるといえる。

Fig. 14 の右下のグラフは、この最大限界線をまとめて示したもので、充てん方法によって測定値のパラツキの可能性にかなりの差があるということが出来る。とくに微振動充てんはパラツキの可能性が小さいということができる。

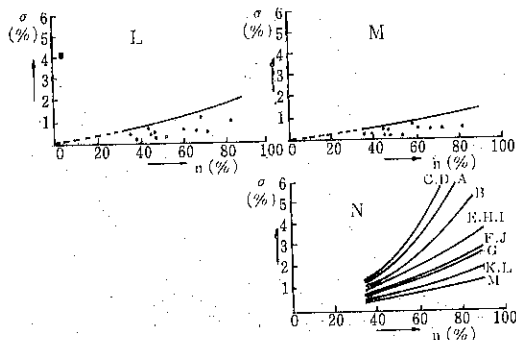


Fig. 14

また(C), (D)と(H), (I)は同じ条件のタッピングであり、前者は手動で後者が装置による違いだけであるが、操作条件が規制されていない手動による場合はパラツキの可能性はるかに大きいということができる。

いろいろな粉体を、色々な方法で容器にくり返し充てんし、その充てん体積を測定したが、体積の値そのものについてもまた測定値の再現性の点についても粉体の種類や充てん方法によって大きな相違がある。

一般的には密に充てんされるほど体積測定値の再現性はよく、圧縮操作の条件が規制されている場合にはその操作が加われば加わるほど再現性がよくなるということができる。またその操作方法のうち筆者の行なった範囲では水平方向の微振動を行なうのが最もよい再現性をうることができた。

粉体の充てんが疎である場合にその体積の値を問題にすることは再現性の点からいっても一般にむづかしいことであるが、特にそれまでに加えられた操作によって値が変動しやすいので、充てんが疎である場合の体積の値を表示する場合にはそれまでに加えられた操作を明記しておかなければ意味をなさないことがある。また水平方向の微振動はあまり密な充てんにならず、しかも再現性がよいという点から、疎(粗)充てんの体積を測定するためには水平振動を少し行なったうえで測るのが適当であると考えられる。

9 日本工業規格におけるカサ密度測定法

従来のJIS規格におけるカサ密度(それぞれ名称は前述のようにちがっているが)の測定は、大体においてダンパーを差しこんだ漏斗に粉体を入れたのち、すみやかにダンパーを引き抜き、試料を受器に落とす方法によるものである。1, 2 の例を記載すると次のようである。

塩化ビニリデン樹脂試験方法 K6722—1964

(Testing Methods for Polyvinyliden Chloride)

じゅうぶんに混合した試料約 120ml を Fig. 15 のダンパーを差しこんだ漏斗に入れたのち、すみやかにダンパーを引き抜き、試料を同図の受器に落とす。

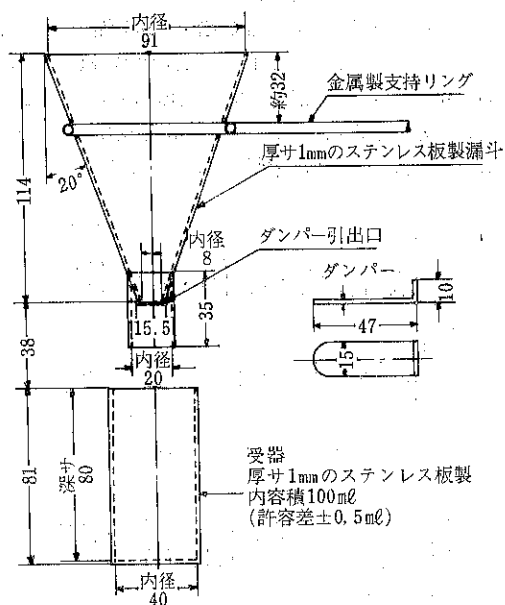


Fig. 15 カサ比重測定装置 (単位mm)

受器から盛り上がった試料は、ガラス棒ですり落としたのち、試料の入った受器の重さを 0.1g まで正確にはかり、つぎの式によってカサ比重を算出する。

$$S_a = \frac{C - A}{B}$$

ここに S_a : カサ比重 (記載のままの表現)

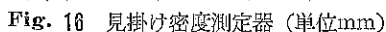
A : 受器の重さ(g)

B : 受器の内容積(ml)

C : 試料の入った受器の重さ(g)

この測定は 3 回行ない、その平均値をとり、小数点以下 1 ケタまで求める。

試験結果の数値の表わし方 試験の結果は規定の数値より 1 ケタ下の位まで求め、JIS Z8401 (数値の求



器に作動を与え、自動的にすりきる方法をとること。すなわち、Fig. 1 のプロセス〔I〕と〔II〕を自動化、定常化することに着目した。また前述の筆者の研究⁸⁾にもあるように、たとえば Fig. 5~14 の結果にみられるように、なるべく粗(疎)充てんの状態に保持してかさ密度を測る方法として、横振動を採用することにも着目した。すなわち、次の諸点(a), (b), (c)を一応試作研究目標にした。

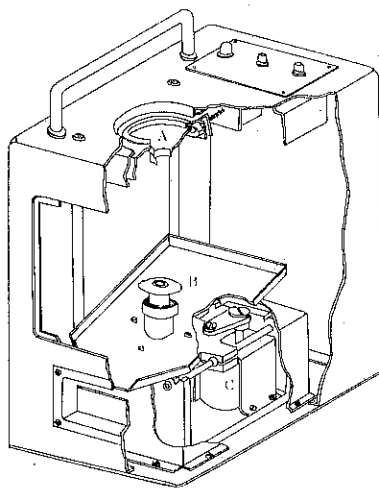
(a) 測定操作を定常化し、個人差による誤差をできるだけなくするため、標準フルイを受器の上におき、これに試料をおき、横振動を与えること。

(b) 粉体の落下状態を定常化し、堆積状態をなるべく一定にすること。

(c) すりきりは自動的にする目的と、筆者の研究結果によって、でき得る限り粗(疎)充てんの状態を保ち、見掛け容積のいちじるしい減少なしに、かさ密度を測る目的で、横振動を採用すること。(横振動はすべて50サイクル、振幅0.5mm)

以上の目標に向かって研究を続けているとき、㈱セイシン企業* の植田社長や同社の伊藤均君らの絶大な協力を得て、これらの点を大体解決できたので、その測定器^{10,17)}を紹介、報告する*。

測定器の主要部分はA, B, Cである (Fig. 17)。A



- A. 標準フルイ付試料粉体導入部
- B. 試料体受器
- C. 集塵バケット (余分粉体集納器)

Fig. 17

* 製造販売元㈱セイシン企業：東京都千代田区麹町4丁目2番地 〒102、電話264-1621 (代)

** 一般にいつて付着力の強い粉体では10メッシュを用いることだけで充分目的は達せられる。

は10, 50, 100メッシュ**の標準フルイを入れる容器で、標準フルイと容器は間隙なくはめ込まれ、横振動に対してガタの生じないよう注意して作られてある。標準フルイの上には一定量の粉体試料を導入、堆積させ、場合によっては飛散性のものもあるので、蓋ができるように作られてある。導入堆積が終れば直ちに横振動を与える。スイッチ・オンして1分以内に試料粉体は受器Bに流れこむ。この流れこむ状況はきわめてスムーズに四方に飛散しないで容器に充てんされる。Cは余分な試料を集納するバケットである。

粉体試料が落下して受器に入る模様を観察すると、付着力のないガラスビーズ球粉や砂のようなものよりも、むしろ付着力のある一般粉体(無機、有機化合物を問わず)の方が受器の方にコンパージして、一種の収斂落下流をおこして受器に堆積される。興味ある、しかも好都合な現象を生ずる。

標準フルイはめこみ容器Aについて更に詳述すると、フルイのメッシュは3種類のうちどれがよいかは試料粉体の粒径や物性を考慮して決める。特別な場合を除き、付着力の特に大きい粉体では10、通常の付着力のものは粒径と物性にもよるが50か、または100が使用目的に合致する。すなわち試料粉体の落下速度と落下状況を定常化するために10か50または100をケース・バイ・ケースで選択すればよい**。なお標準フルイのメッシュは10, 50, 100以外にまだあるので、特別にあるメッシュを落下状況を観察して決めても差支えない。その方が望ましいかも知れない。要は落下速度の定常化を行なうことである。

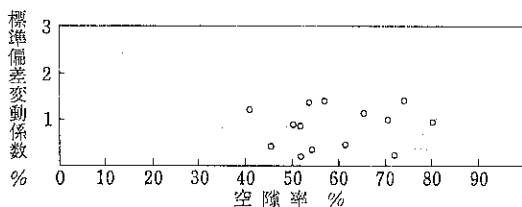
次にB部の試料粉体の受器について述べる。Bの上部にのせてある円形穴あきの覆は、受器が粉体で山盛りになって、横振動50サイクル(振幅0.5mm)を作動さす場合、余分の粉体が周囲に支障なく流れ出すことと、受器の上部のすりきりが個人差がなく非常に定常的にゆくためのものである。

すなわち、自動すりきりの方法としてはこのメカニズムが非常によいことが判った。

B部の受器に試料が充てんされるとき2つの方法がとられることを明記したい。

方法1：薄いプレート(ガラス、金属、紙、厚さ0.5mm位)を用いて、手ですりきる。これは最疎(粗)充てんかさ密度、または静かさ密度を測るために行なう。

方法2：次に横振動作動スイッチをオンにして自動的にすりきる。これはA部を作動しつつ、1分以内で見事にすりきれる。この横振動作動によって横振動かさ密度が測定できる。このときの充てん状態は疎(粗)に近いものであり、筆者によっても実証されている^{17~19)}。



実験試料粉体：アジピン酸，塩化ビニール，ポリビニールアルコール，炭酸カルシウム，水酸化カルシウム，鉄粉，砂，カーボオキシメチルセルローズ（ネオコロイド），硫化亜鉛，タルク，ソレックス，コーンスターチ，タングステン，水酸化アルミニウム。

Fig. 18, 密度標準偏差変動係数と空隙率

さて横振動カサ密度についての実験例の一つをここに示すと、Fig. 18 のように、誤差範囲 1～1.5 % 程度におさえることができた。この種の実験結果については川北、池田：材料22, No.238, 624(1973)を参照されたい。

おわりに

1. カサ密度 (Bulk Density) は実用的に用いられる粉体の基本物性であり、容積と重量の関係を示す最も重要な充てん特性の表現手段である。カサ密度を表わす名称については、見掛密度などいろいろあるが、筆者はカサ密度を採用した。

2. 静カサ密度の測定には、粉体を受器に入れる充てん方法が大きく問題になる。

3. カサ密度変動因子については、粉体粒子それ自体に依存するファクターと堆積状況と堆積後処理などが関係する。

4. カサ密度測定の意義、利点については次のように考えられる。まず見掛比容積が判り、充てんの粗、密の状態が判断できる。また定性的には粒度分布が判る。また真の密度が判っていれば、空隙率が求まる。空隙比、充てん率も求まる。安息角、付着力の大小、また流動性、熱伝導率などの判定に役立つ。パルキングの現象、またコーティング、マイクロカプセルのチェックにも役立つ。場合によっては粒子の形状も推定できる。

5. カサ密度のコントロールについては、人為的には付着力→小、カサ密度→大の方向と方法がとられている。

6. パルキング現象はカサ密度を測定することによって直ちに定量的に認識できる。

7. 付着力の正体については複合的なものであり、角特性とカサ密度は定性的には密接に関係している。

8. いろいろな充てん方法による体積標準偏差と空隙率の関係について研究を行ない、水平方向の微振動はあまり密な充てんにならず、しかも再現性がよいことが判

った。

9. 日本工業規格におけるカサ密度測定法には、付着力の大きい粉体は困難性があり、また個人差もでてくるので考慮を要する。

10. カサ密度測定器の試作研究を行ない、操作の定常化、再現性良好、短時間操作（1分以内）、カサ密度値直読、防塵、耐酸性、器内清掃簡便、サンプル量は少量、そして静カサ密度と横振動カサ密度がともに測れるものが開発された。

終りに臨み、研究に協力された法政大学工学部津々見雄文教授、池田正明君、測定器試作に協力された憐セイシ企業長の植田社長と伊藤均君、その他同社の方々に深く感謝の意を表します。なお、横振動カサ密度に重大な関心をよせられたカールスルーエ大学の Rumpf 教授ならびに東京大学工学部森研究室菅沼博士に敬意を表します。

引用文献

- 1) 津々見：粉砕 No. 15, 46 (1970).
- 2) R. L. Carr : *Chem. Engineering* 72, 163 (1965).
横山、浦山：粉体工学研究会誌 6, 264 (1969).
- 3) 川北、津々見：応用物理 35, 260 (1966).
- 4) 川北、種谷：概論粉体工学（プラント工学社）p. 56～57 (昭和44).
- 5) W. A. Gray : *The Packing of Solid Particles* (Chapman & Hall Ltd.) (*Powder Technology Series*) p. 41 (1968).
- 6) 川北、種谷：概論粉体工学（プラント工学社）p. 50, 52 (昭和44).
- 7) 川北：材料科学 7, No. 3, 30 (1970).
- 8) 川北、津々見：法政大学工学部研究集報 No. 3, p. 36 (1966).
- 9) 久保輝一郎ほか：粉体（理論と応用）丸善刊 212 (1962).
- 10) 種谷、曾根：応用物理 31, 483 (1962).
- 11) 川北、津々見ら：法政大学工学部研究集報, No.2, 47 (1965).
- 12) 川北、津々見：法政大学工学部研究集報, No. 5, 5 (1968).
- 13) 川北：粉体および粉末冶金, 10, 71 (1963).
- 14) 川北：粉体および粉末冶金, 10, 242 (1963).
- 15) W. A. Grey : *The Packing of Solid Particles* (Chapman & Hall Ltd.) (*Powder Technology Series*) p. 66～67 (1968).
- 16) 昭和46年5月14日粉体工学研究会研究発表（名古屋）。特許出願中（出願番号 45-056887）。

(131頁へつづく)

粒度に関する試論 (第2回)

——平均粒度の意義と名前について——

菅沼 彰*
Akira Suganuma

1. 問題提起

1.1 ある試験の答案から

化学工学専攻の大学4年生を対象にしたある試験に際して次のような出題をしたことがある。たまたまこの年は東大以外の大学からの受験者も多く、粉体工学関係の Activity が高い大学に在籍中の学生も多数受験していた。

問 題

同一物質の球形粒子からなる粉体があって、粒子の直径を $D_p(\mu)$ で表わすことにすると、この粉体の個数基準上積算粒径分布は次の式で与えられる。すなわちこの粉体の粒径 D_p は対数正規分布に従う。

$$R_n(\xi) = \int_{x=\ln \xi - \ln D_{p0}}^{x=\infty} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx \quad (1)$$

この粉体について以下の問題を解け。ただし、計算には、対数正規分布に関する公式、

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{D_p^t}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx = D_{p0}^t \exp\left(\frac{t^2 \sigma^2}{2}\right) \quad (2)$$

正規分布に関する Williams の近似公式、

$$\int_{-\delta}^{+\delta} \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx = \left\{1 - \exp\left(-\frac{2\delta^2}{\pi \sigma^2}\right)\right\}^{1/4} \quad (3)$$

を使用するものとし、 $\sigma=0.6$ 、 $D_{p0}=4.0(\mu)$ とする。

- この粉体の重量平均径 $D_{pw}(\mu)$ を求めよ。
- D_{pw} よりも大きな粒子の個数割合 P を求めよ。
- この粉体が充分大量にあるとして、そこからランダムに N 個の粒子を採取して粒径を測定した場合、ランダムサンプリングであるから N 個の粒子中には

D_{pw} よりも大きな粒子が全然含まれていないようなことが起る危険性もある。このような危険性を0.5%以下にするために必要な計測粒子数 N を求めよ。

この試験では受験者に対して試験問題の巾広い選択が許されていたので、全員がこの問題を解こうとしたわけではない。私にとっては大変むずかしそうにみえた反応工学や物質移動、伝熱などの問題を選択してこの問題を回避した受験生の方が多かった。この点についても論じたいことは多いが当面の主題ではないので割愛するとして、提出された答案をみて驚いたことには、解答者の大部分が重量平均径 D_{pw} の定義

$$D_{pw} = \frac{\int_0^\infty D_p^4 \left(\frac{dR_n(\xi)}{dD_p}\right) dD_p}{\int_0^\infty D_p^3 \left(\frac{dR_n(\xi)}{dD_p}\right) dD_p} \quad (4)$$

を間違えて、

$$D_{pw}' = \left[\frac{\int_0^\infty D_p^3 \left(\frac{dR_n(\xi)}{dD_p}\right) dD_p}{\int_0^\infty \left(\frac{dR_n(\xi)}{dD_p}\right) dD_p} \right]^{1/4} \quad (5)$$

としていた。言うまでもないことながら、受験者が重量平均径 D_{pw} と混同した D_{pw}' は“体積平均径”と呼ばれる別種の平均径である。1人や2人ならばともかく、かなりの受験者が重量平均径と“体積平均径”とを混同ないしは取違えたという事実は、著者がこれから論じようとする主題の重要性を象徴していると言えよう。

1.2 名は体を表わすべきである

Tab. 1 は各種平均粒径の定義式と、現在使用されている名前である。ここに D_p は粒径、 $f_n(D_p)$ は粒径 D_p の個数頻度分布関数を表わす。Tab. 1 に並んでいる平均径が、実際に“よく用いられて”いるか否か、そしてそれが本当に有意義であるか否か、これ以外にもっと有意義な平均粒径、代表粒径、平均粒度、代表粒度があ

* 東京大学工学部
(〒113 東京都文京区本郷7丁目3番1号)
TEL (03)812-2111

Tab. 1 各種平均径の定義式と現行の名前

$\int D_p f_n(D_p) dD_p$	長さ平均径 (個数平均径, 算術) 平均径とも言ふ
$\frac{\int D_p^2 f_n(D_p) dD_p}{\int D_p f_n(D_p) dD_p}$	面積長さ平均径
$\frac{\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p}{\int D_p^2 f_n(D_p) dD_p}$	体面積平均径
$\frac{\int D_p^4 f_n(D_p) dD_p}{\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p}$	重量平均径
$\left\{ \int D_p^2 f_n(D_p) dD_p \right\}^{1/2}$	面積平均径
$\left\{ \int D_p^3 f_n(D_p) dD_p \right\}^{1/3}$	体積平均径
$\left\{ \frac{\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p}{\int D_p f_n(D_p) dD_p} \right\}^{1/2}$	体積長さ平均径
$\exp \left\{ \int (\ln D_p) f_n(D_p) dD_p \right\}$	幾何平均径
$\left\{ \int D_p^{-1} f_n(D_p) dD_p \right\}^{-1}$	調和平均径

るのではなからうかというような議論は当面割愛しよう。問題は、ここに示された現行の、たとえば体積平均径という名前が、 $\{\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p\}^{1/3}$ で定義される平均径の名前として果して適当であるかどうかということにある。名は体を表わすと言うが、逆に言えば、名は体を表わすべきであり、命名すべき対象をうまく表現するような名前をつけるべきである。対象をうまく表現するような名前のつけ方、すなわち適切な命名法とはどのような条件を満足すべきであろうか。

命名すべき対象U, V, W, Xがあるととして、仮にAという言葉がUなる対象を意味し得る言葉であったとしても、ただそれだけではAがUの名前として適切であるとはかぎらない。Aという言葉がVという対象をも意味し得る言葉であった場合、AをUの名前とするか、Vの名前にするかは恣意的な選択であり、後からそれを学ぶ者、たとえば学生にとって、AがUの名前であってVの名前ではないのだということは論理のともなわない単なる約束事になってしまうからである。 $\{\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p\}^{1/3}$ は体積の概念を用いて説明できる平均径であることは確かであるが、それだけではこの平均径の名前として体積平均径が適切であると断定するわけにはいかない。何故ならば、体積という概念を用いて説明できる平均径がこれ以外にもいくつか存在するからである。

命名法を論ずるにあたって忘れてはならない第2点は命名規則の統一性である。AをUの名前とする論理、BをVの名前とする論理、CをWの名前とする論理がそれぞれ個別には充分なつくのいくものであっても、Aと

U, BとV, CとWを結びつける論理が互いに別々のものであるのは望ましくない。残る命名対象Xの名前が果してどのような論理でDとなるのか、Eになるのか類推できなくなってしまうようでは困るのである。命名すべき対象U, V, W, Xの名前をA, B, C, Dと定めたその規則を適用して、将来新しい命名対象Y, Zが出てきたときにその名前E, Fが定められるようになっていることが望ましい。長男が一郎、次男が昭二、三男が藤三郎ということになると、末っ子の四男は果して藤四郎であるのか四郎であるのかわからないし、五男が生れたときには改めて名前を考えなければならない。子供の名前ならともかく、平均粒径の命名法としては困るのである。 $\int D_p^2 f_n(D_p) dD_p / \int D_p f_n(D_p) dD_p$ が面積長さ平均径であり、 $\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p / \int D_p^2 f_n(D_p) dD_p$ が体積面積平均径であり、 $\{\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p / \int D_p f_n(D_p) dD_p\}^{1/2}$ が体積長さ平均径であるからには、誰がみても同系列に属するところの平均径、 $\int D_p^4 f_n(D_p) dD_p / \int D_p^3 f_n(D_p) dD_p$ の名前は $\times \times \times$ 体積平均径であるべきであろう。しかるに $[L^4]$ の次元を有する量 $\times \times \times$ の名前を思いつかないからという理由で、全然別の命名論理を採用して重量平均径と称するというのでは、統一性のある命名法とは到底認めがたい。

$\int D_p^4 f_n(D_p) dD_p / \int D_p^3 f_n(D_p) dD_p$ を重量平均径と命名する論理からすれば、 $\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p / \int D_p^2 f_n(D_p) dD_p$ は面積平均径、 $\int D_p^2 f_n(D_p) dD_p / \int D_p f_n(D_p) dD_p$ は長さ平均径と命名されるのが当然であり、そうならば $\int D_p f_n(D_p) dD_p / \int f_n(D_p) dD_p = \int D_p f_n(D_p) dD_p$ は絶対に長さ平均径ではなくて個数平均径と称されるべきである。 $\int D_p f_n(D_p) dD_p$ が絶対に長さ平均径ではないということになれば、 $\{\int D_p^2 f_n(D_p) dD_p\}^{1/2}$ を面積平均径と命名すべきではないし、 $\{\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p\}^{1/3}$ を体積平均径と称するのも適当でない。何故ならば、 $\{\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p\}^{1/3}$ が体積平均径、 $\{\int D_p^2 f_n(D_p) dD_p\}^{1/2}$ が面積平均径であるからには $\int D_p f_n(D_p) dD_p$ は長さ平均径と称さざるを得なくなるからである。

2. 平均粒度の意義

2.1 代表値と平均値

前章では、各種平均粒径に対する現行の名前が必ずしも適切ではないこと、すなわち、名が体を表わしていないことを指摘した。第3章で、より適切と思われる命名法の提案をするのであるが、そのためにはまず、各種平均粒度の意義ないしは意味を明確にしておく必要がある。すなわち、体を表わすような名前のつけ方を検討する準備として命名対象の体を吟味するのがこの章の目的である。

平均値という言葉は非常にあいまいな、巾広い用い方をされる用語である。一番狭い意味は算術平均値であるが、平均的日本人などという表現における平均が何を意味するかは議論のわかれるところであろう。それほどあいまいではないにしても、最頻値、中央値などをも含めて平均値と称する場合が少くない。“よく用いられる平均粒径の表”の中に最頻値や中央値をもとりいれている例は決して珍しくないようである。この場合には代表値という意味で平均値という言葉を使っているのであろう。英語の mean や独語の Mittel には最頻値や中央値などをも含み得るような語感があるのかもしれない（独語の Mittel などは直訳すると中央値そのものになってしまう）が、学術用語としての“平均値”に最頻値や中央値などを含ませるのは不適当であるような気がする。最頻値や中央値などを含む総称としては“代表値”を用いるべきではなかろうか。そのような意味において、“平均値”は“代表値”の一種である。今回の副題にいう平均粒度には、最頻粒度や中央粒度（50%粒度）などを含めないことにする。それではどういうものを“平均粒度”に含めるのかについては次節で述べよう。

2.2 平均粒度

“粒度”の意味、特に“粒径”との区別については前回詳しく論じた。すなわち、粒径は〔L〕の次元を持つ粒度を指し、粒度には粒径以外にもいろいろある。たとえば粒子の面積〔L²〕、体積〔L³〕、質量〔M〕なども粒度である。以下、 x を粒度、〔X〕を粒度 x の次元とする。更に、 y を粒子の量、〔Y〕を粒子量 y の次元とする。粒子量 y としては通常、粒子個数、粒子長さ、粒子面積、粒子体積、粒子重量、のいずれかが用いられる。ただしこれ以外の量が用いられても以下の議論は成立する。すなわち y として何を選んでよい（これが数学の論文であれば、もっと厳密な記述、たとえば y の加成性などの注釈が必要であろうが、ここでは割愛する）。粒度として x 、粒子量として y を採用したときの頻度分布関数を $f_y(x)$ と書くことにする。たとえば y が個数 n 、重量 w ならばそれぞれ、 $f_n(x)$ 、 $f_w(x)$ と書く。

粒子量を y で表わした上での x の平均値には次の3種類がある。これらを一括して第1種の平均粒度と定義する。

第1種の平均粒度 $\bar{1x}_y$

$$\bar{1x}_y = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_y(x) dx \quad \left. \begin{array}{l} y \text{ 基準の算術平均値} \end{array} \right\}$$

$$\left. \begin{array}{l} \bar{1x}_y = \exp \left[\int_{-\infty}^{+\infty} (\ln x) f_y(x) dx \right] \quad y \text{ 基準の幾何平均値} \\ \bar{1x}_y = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{1}{x} \right) f_y(x) dx \right]^{-1} \quad y \text{ 基準の調和平均値} \end{array} \right\} \quad (6)$$

ここで y 基準の算術平均値という表現はいささか奇妙な感じを与えるが、ここでは幾何平均、調和平均に対置される意味での算術平均であって、重みつき平均と対置される単純平均という意味ではない。従ってたとえば、重量基準の算術平均や長さ基準の算術平均などを考えてよいのである。

第1種の平均粒度は y 基準で計算した、粒度 x の平均値そのものである。たとえば $y=n$ のときは個数基準の平均値、 $y=w$ であれば重量基準の平均値である。そして、これは重要な点であるが、第1種の平均粒度 $\bar{1x}_y$ の次元は y の選び方とは無関係に個々の粒子の粒度 x の次元、〔X〕と一致する。従って粒度 x の次元が〔L〕である場合、すなわち粒度 x が粒径 D_p である場合には y の選び方にかかわらず、第1種の平均粒度の次元も〔L〕になり、 $\bar{1x}_y$ は平均“粒径”になる。逆に、第1種の平均粒度が平均粒径になるのは、個々の粒子の粒度を粒径で表わした場合にかぎる。

第2種の平均粒度 $\bar{2x}_y$

Tab.1 と Eq. 6 とを比較してみると、Eq. 6 が包含できない平均粒径の系列が存在する。たとえばいわゆる体積平均径や面積平均径、体積長さ平均径がそうである。これらは次のような統一定義によって第2種の平均粒度として一括できる。定義の異なる粒度 x 、 x^* があつて、個々の粒子に関しては次元をも含めて、

$$x = g(x^*) \quad (7)$$

が成立、または仮定されているものとする。 x と x^* は一般に次元を異にするが、場合によっては〔X〕=〔X*〕であってもよい。 x が粒径、 x^* が粒子体積ならば、

$$x = g(x^*) = (\phi x^*)^{1/3} \quad (8)$$

であつて、 x の次元は〔L〕、 x^* の次元は〔L³〕である。ただしここに ϕ は形状係数を表わす。第2種の平均粒度は、

$$\bar{2x}_y = g(\bar{1x}_y^*) \quad (9)$$

で定義される。ここに $\bar{1x}_y^*$ は y 基準の x^* の第1種平均粒度である。従って $\bar{1x}_y^*$ の次元は〔X*〕である。 g の定義から明らかなように、 $\bar{2x}_y$ の次元は〔X〕である。すなわち、 x^* が粒径ではない場合でも、 g の選び方によっては $\bar{2x}_y$ の次元を〔L〕にすることができる。そうすることによって、 $\bar{2x}_y$ は粒径と呼べる数値に変換される。

第1種の平均粒度 $\bar{x}_y$ は粒度 x の平均値そのものであるのに対し、 ${}_2\bar{x}_y$ は別の粒度 x^* の平均値を換算子 g で換算した数値である。いわゆる“体積平均径”は x^* として個々の粒子の体積 v を採り、粒子量を個数で表わして計算した v の平均値、 $\bar{v}_n$ を粒径に換算したものである。

以上で、平均粒度には粒度の平均値そのものであるところの第1種平均粒度と、第1種平均粒度を別の粒度に換算して得られる第2種平均粒度とがあることがわかった。厳密な意味では第1種だけが粒度の平均値であり、第2種は粒度の平均値の関数に過ぎないが、両者を一括して平均粒度を総称することにする。

3. 平均粒度の統一的命名法試案

3.1 第1種平均粒度の命名法

第2章で述べたように、平均粒度には2種類ある。従って命名法もこれに応じた形になっていなければならない。第2種の平均粒度は第1種平均粒度を経由して定義される量であるから、その名前も第1種平均粒度の名前を経由して定めるのが合理的である。従ってまず第1種平均粒度の命名法を定めよう。

すでに述べたように第1種平均粒度 $\bar{x}_y$ は、粒子量を y で表わして計算した粒度 x の平均値であって、算術平均値、幾何平均値、調和平均値のいずれかである。従ってその名前には、 y の名前 $\bigcirc\bigcirc\bigcirc$ 、 x の名前 $\times\times\times$ 及び平均が算術、幾何、調和のいずれであるかを区別する情報が含まれているべきである。そこで、

$$\bigcirc\bigcirc\bigcirc \begin{pmatrix} \text{算術} \\ \text{幾何} \\ \text{調和} \end{pmatrix} \text{平均} \times\times\times$$

を第1種平均粒度 $\bar{x}_y$ の命名法の原則とする。ただしこの原則を適用するに際しては、次に述べる若干の補助規則を考慮した方が語感の良い名前になるようである。

イ) 特に区別を強調する必要がある場合を除いて、平均のとり方が算術平均であるときは単に“平均”として“算術”を省略する。

$$\text{例. } \int D_p f_n(D_p) dD_p$$

粒子量 y は個数、平均のとり方は算術平均、粒度 x は粒径であるから

$$\text{個数算術平均径} \xrightarrow{1} \text{個数平均径}$$

ロ) y が $[L]$ の次元であるときは“長さ”と言うが、 x が $[L]$ の次元であるときは“粒径”又は単に“径”という。ただしこの規則は x として特殊な長さ、たとえば周辺長を採用した場合に“個数平均周辺長”と呼ぶことを妨げないものとする。

$$\text{例. } D_p^2 f_n(D_p) dD_p / \int D_p f_n(D_p) dD_p =$$

$$\int D_p f_{l1}(D_p) dD_p$$

y は長さ、 x は径であり、平均のとり方は算術平均である。

長さ平均径

ハ) 特に区別を強調する必要がある場合を除いて、 y の名前が個数であるときはこれを省略することができる。ただし、個数平均径については省略しない。

$$\text{例. } \exp[\int (\ln D_p) f_n(D_p) dD_p]$$

個数幾何平均径 $\xrightarrow{2}$ 幾何平均径

以上が第1種平均粒度の命名法である。この規則によれば、

$$\int D_p f_n(D_p) dD_p$$

$$\int D_p^2 f_n(D_p) dD_p / \int D_p f_n(D_p) dD_p = \int D_p f_{l1}(D_p) dD_p$$

$$\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p / \int D_p^2 f_n(D_p) dD_p = \int D_p f_{a1}(D_p) dD_p$$

$$\int D_p^4 f_n(D_p) dD_p / \int D_p^3 f_n(D_p) dD_p = \int D_p f_{v1}(D_p) dD_p = \int D_p f_{w1}(D_p) dD_p$$

はそれぞれ、個数平均径、長さ平均径、面積平均径、体積平均径または重量平均径となる。同系列の平均粒径に対しては統一的な名前をつけるべきであるという狙いは十分に果されている。

x が粒径以外の粒度であっても全く同様である。

$$\int D_p^2 f_n(D_p) dD_p \quad (\text{個数}) \text{ 平均面積 } [L^2]$$

$$\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p / \int D_p f_n(D_p) dD_p \quad \text{長さ平均面積 } [L^2]$$

$$\int D_p^4 f_n(D_p) dD_p / \int D_p^2 f_n(D_p) dD_p \quad \text{面積平均面積 } [L^2]$$

$$\int D_p^5 f_n(D_p) dD_p / \int D_p^3 f_n(D_p) dD_p \quad \text{体積平均面積 } [L^2]$$

$$\text{又は、重量平均面積 } [L^2]$$

$$\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p \quad (\text{個数}) \text{ 平均体積 } [L^3]$$

$$\text{又は、(個数) 平均重量 } [F]$$

などである。粒度として沈降速度を用いた場合には、 y が何であるかによって、 $\bigcirc\bigcirc\bigcirc$ 平均沈降速度、たとえば長さ平均沈降速度、重量平均沈降速度などと命名すればよい。単に“平均”となっているのは前述の省略規則イ) によって算術平均を指す。従って幾何平均や調和平均の場合には、重量幾何平均径、重量調和平均沈降速度などと明示する必要がある。

3.2 第2種平均粒度の命名法

第2種の平均粒度 ${}_2\bar{x}_y$ は、別の粒度 x^* の第1種平均値 $\bar{x}_{y^*}$ を x に換算したものである。 $\bar{x}_{y^*}$ の名前(3.1に定めた命名法によってつけた名前)が***であり、 x の名前が $\triangle\triangle\triangle$ であるとき、 ${}_2\bar{x}_y$ の名前は、***を換算して求めた $\triangle\triangle\triangle$ という意味で、

*** $\triangle\triangle\triangle$

とする。*** は一般に Y の名前 $\bigcirc\bigcirc\bigcirc$ 、平均のとり方、 x^* の名前 $\times\times\times$ からなっているので、

$\bigcirc\bigcirc\bigcirc$ $\left(\begin{smallmatrix} \text{算術} \\ \text{幾何} \\ \text{調和} \end{smallmatrix}\right)$ 平均 $\times\times\times$ $\triangle\triangle\triangle$

が $2\bar{x}_y$ の名前になる。3.1 で述べた補助規定イ、ロ、ハはここでも有効であり、特にロの規定は $\triangle\triangle\triangle$ の部分にも適用される。すなわち x が [L] の次元を有する量であるときは $\triangle\triangle\triangle$ を単に“径”とし、“長さ”とは言わないことにする。

$\{\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p\}^{1/3}$ (個数) 平均体積径
個数平均体積を粒径に換算した値という意味である。

$\{\int D_p^2 f_n(D_p) dD_p\}^{1/2}$ (個数) 平均面積径

$\{\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p / \int D_p f_n(D_p) dD_p\}^{1/2}$ 長さ平均面積径
ここで注意しなければならないことは、現行の名前では体積平均径、面積平均径となっているものが平均体積径、平均面積径に変わる点である。その方が正しい言葉の使い方であると著者自身は考えている。平均速度、平均価格、平均体重などの例をみても $\times\times\times$ の平均値は平均 $\times\times\times$ と呼ばれるのが常であり、加重平均、算術平均、単純平均などの例からわかるように、 $\bigcirc\bigcirc\bigcirc$ 平均と言った場合の $\bigcirc\bigcirc\bigcirc$ は平均する対象ではなくて平均のやり方を示するのが普通である。ダウ式平均株価とは株価の平均値であり、平均値を計算するルールがダウ式なのである。

平均体積径は、平均体積から換算した粒径、すなわち平均体積の径という意味であり、英語では多分、

diameter of mean volume

mean volume diameter

であろう。これに対して体積平均径は体積を基準にする計算法で求めた粒径の平均値という意味であって重量平均径と言うときの重量がそうであるように、決して体積の平均値ではない。英語では多分、

volume mean diameter

であろう。weight mean diameter と同じ語法である。粒径以外の粒度についても同様にして命名が可能であり、名前を知ればその数値の意味がすぐわかる。すなわち名が体を表わしている。たとえば個数平均重量沈降速度は第2種の平均粒度であって、粒子重量の個数平均値を沈降速度に換算したものである。これに対して個数平均沈降速度重量と言え、沈降速度の個数平均値を粒子重量に換算したものである。両者が混同される怖れは全くない。この命名法さえ理解していれば、重量平均径という言葉をはじめて耳にしたとしても、それを平均体積径（または平均重量径）と混同する者はいないであろう。

3.3 幾何平均粒度と調和平均粒度の意味

2.2 では算術平均、幾何平均、調和平均を対等に扱って、第1種平均粒度を定義した。しかしながら、算術平均だけを本来の平均値、すなわち第1種の平均粒度と定義し、幾何平均、調和平均は第2種粒度とみなすこともできる。すなわち、 x の幾何平均とは、 $x^* = \ln x$ の算術平均値 $\bar{x}^*$ を求め、それを $\exp(\bar{x}^*)$ として x に換算したものと考え、 x の調和平均とは、 $x^* = 1/x$ の算術平均 $\bar{x}^*$ を求めて $\bar{x} = 1/\bar{x}^*$ と換算したものと考えるのである。 $\bar{x}$ の信頼限界を求めたり、有意差の検定を行ったりする場合には、このように考える方が便利になる。しかしながら命名法を定めるとい立場からすると、幾何平均径や調和平均径を第2種平均粒度とする解釈は都合が悪い。第2種平均粒度とみなした場合の個数幾何平均径、個数調和平均径の名前は、

個数平均対数粒径径

個数平均逆数粒径径

となってしまう、これはいかにも語呂が悪い。しかも、幾何平均、調和平均という用語は広く一般に知られている用語であって、その意味も明確である。従って、命名法を首尾一貫したものにする手段として、幾何平均、調和平均も第1種の平均と考えることにした。

4. 結 論

現行の命名法は首尾一貫せず、体積の平均値を体積平均と言うなどの語法上の誤りをも含んでいる。そのために初心者の中に混乱が起ることもあり、今後において新

Tab. 2 命名法私案による各種平均径の名称

$\int D_p f_n(D_p) dD_p$	個数平均径	第1種平均径
$\frac{\int D_p^2 f_n(D_p) dD_p}{\int D_p f_n(D_p) dD_p}$	長さ平均径	第1種平均径
$\frac{\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p}{\int D_p^2 f_n(D_p) dD_p}$	面積平均径	第1種平均径
$\frac{\int D_p^4 f_n(D_p) dD_p}{\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p}$	重量平均径又は体積平均径	第1種平均径
$\{\int D_p^2 f_n(D_p) dD_p\}^{1/2}$	平均面積径	第2種平均径
$\{\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p\}^{1/3}$	平均体積径	第2種平均径
$\{\frac{\int D_p^3 f_n(D_p) dD_p}{\int D_p f_n(D_p) dD_p}\}^{1/2}$	長さ平均面積径	第2種平均径
$\exp\{\int (\ln D_p) f_n(D_p) dD_p\}$	幾何平均径	第1種平均径
$\{\int D_p^{-1} f_n(D_p) dD_p\}^{-1}$	調和平均径	第1種平均径

しい平均粒度が提案されて用いられるようになった場合の命名にも支障をきたす怖れがある。有機化合物の命名法が整然と定められていて、名前をきけばその物質の構造式がわかり、逆に新物質の構造がわかれば名前がきまるように、平均粒度に関しても首尾一貫した命名法を約

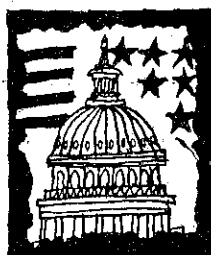
束しておくことが望ましい。ここに述べた命名法は問題提起のための私案に過ぎないが、命名法検討の足場にでもなれば幸である。Tab.2 には Tab.1 と対比させる形で私案による平均粒径の名前を示した。

(完)

(125頁のつづき)

- 17) 川北, 津々見: 法政大学工学部研究集報, No. 3, 36 (1966).
- 18) 川北, 津々見: 応用物理, 35, 260 (1966).
- 19) 川北: 粉体と工業, No. 1, 44 (1969).
- 20) P. S. Roller: *Ind. Eng. Chem.*, 22, 1206 (1930).
- 21) 青木, 鈴木: *Powder Technol.*, 4, 102 (1970/71)
- 22) 荒川: 粉体および粉末冶金, 15, 55 (1968).
- 23) 川北: K. H. Lüdde; *Powder Technol.*, 4, 61~68 (1970/71).
- 24) W. O. Smith: *Phys. Rev.*, 34, 1271 (1929).

- 25) 大塚, 林編: 粉体を中心とした製剤学, 広川書店 (1970).
- 26) 青木, 山藤: 粉体工学研究会誌, 臨時号, p. 33 (1966).
- 27) 三輪著: 粉工学入門の入門 (粉体と工業, 臨時増刊) p. 40 (1971).
- 28) 川北: 粉体と工業, 3, No. 5, 15 (1971).
- 29) 川北, 小石, 種谷: 粉体工学(基礎編) 槇書店 (1973).
- 30) 川北, 池田: 材料22. No.238, 624 (18) (1973).



新製品紹介

ホソカワ/ミクロン ファインミクロンミル

ホソカワ/カーター ノンブリッジングホッパー

ホソカワ/カーター デンシファイヤー

ホソカワ/カーター バッグファイラー

ホソカワ/カーター ドラムファイラー

(株) 細川鉄工所
粉体機器事業本部

1. はじめに

ここ数年超微粉砕領域での粉砕機の大型化が必要とされている。細川鉄工所として長年好評を得ている超微粉砕機 ホソカワ/ミクロン スーパーミクロンミルの特長を生かしより粉砕性能を発揮する大型処理用超微粉砕機 ホソカワ/ミクロン ファインミクロンミルを開発し本格的な生産体制に入っている。現在すでに MF-40 型 (400HP 用) が本年の 3 月に納入され操業中であり、また海外からの引合も多く近く MF-20 型 (200HP 用)、MF-40 型 (500HP 用) が納入予定になっている。この様に粉砕技術も年々たえず発展し、ミクロン単位の超微粉が生産されている。

従って、この取り扱い上困難な超微粉を最小の価格で迅速に取り扱う必要が生じ、この目的のために先年、微粉体の“袋詰め”、“ドラム充填”“減容機”のメーカーである米国カーターエンジニア社と技術導入契約を締結し、ホソカワ/カーターノンブリッジングホッパー、バッグファイラー、ドラムファイラー、デンシファイヤーの四機種を製作販売することになった。これらの機械を使用することにより製品の取り扱いが楽になり輸送のコストが安価になると考えられる。

新製品

2. ホソカワ/ミクロンファインミクロンミル

(特許申請中)

(1) 特長と構造

ホソカワ/ミクロン ファインミクロンミルの構造を Fig. 1 に示す。粉砕機構は従来のホソカワ/ミクロンスーパーミク

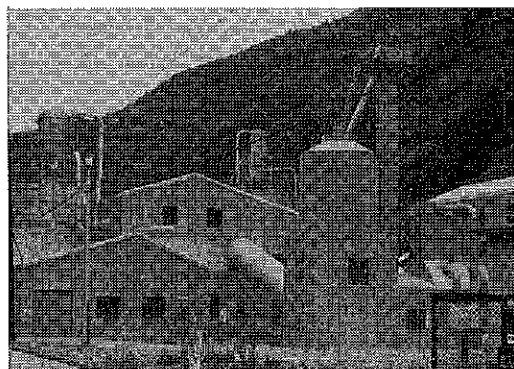


Photo. 1 炭カル粉砕・分級プラント工場全景



Photo. 2 ホソカワ/ミクロン ファインミクロンミル MF-40

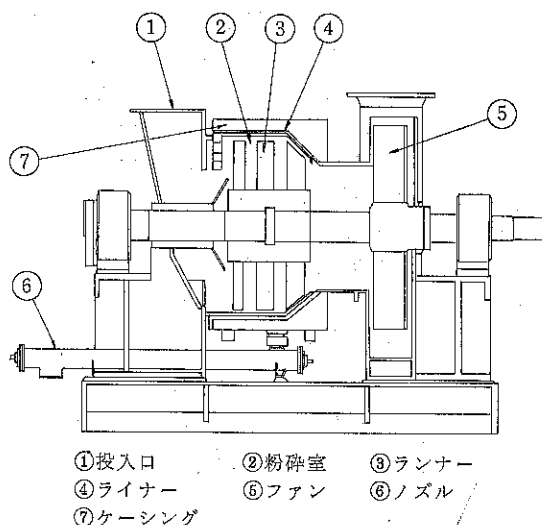


Fig. 1

ホソカワ/ミクロン ファインミクロンミル構造図

ロンを簡略化し、この機構に全く斬新的な考えである偏心効果を取り入れてある。まず、原料が投入口より供給され粉碎室に導かれる。偏心効果により一度ホルドされた原料が急激に圧縮されるためランナーとライナー間の摩砕および粉体相互の衝突が促進されるため粉碎室が1室でも十分粉碎可能であり平均4 μ 以下の超微粉が得られる。この超微粉はファンにより機外に排出され、捕集機で捕集される。また、異物はノズルによって除去される。さらに大型機の欠点である騒音及び不便な取り扱いを解消した。すなわち、ケーシングは二重構造とし、空冷と防音効果の働きをするよう設計されている。又粉碎室内の掃除、点検を容易にするためケーシングはヒンジ式とし簡単に開けることが出来る。

以上の様な構造により同種の粉碎機よりこまかい製品が得られ保守、点検のしやすい取り扱いが簡単な粉碎機である。

(2) 標準形式

Table. 1 に示す。

Table. 1 ホソカワ/ミクロン

ファインミクロンミル標準型式表

	所要動力	標準回転数	風 量	概略重量
	HP	R.P.M	m ³ /mm	t
MF-10	100~150	1,750	60	4
MF-20	200~250	1,450	90	4.5
MF-30	300~350	1,100	120	6.5
MF-40	400~500	950	150	8

Table. 2 粉碎品粒度分布累積通過率 (%)

粒 径	原料名	炭 カ ル
25 μ		99.4%
20		99.2
15		95.8
10		90.2
9		87.9
8		85.2
7		81.4
6		75.0
5		67.2
4		58.3
3		47.7
平均 粒 径		3.2 μ
馬力当りの粉碎能力		2~4kg/PHr

(3) 粉碎品粒度分布

炭酸カルシウムを粉碎した時の粉碎品粒度分布の例を Table. 2 に示す。

技術提携製品

2. ホソカワ/カーター ノンブリッジングホッパー

(Photo. 3)

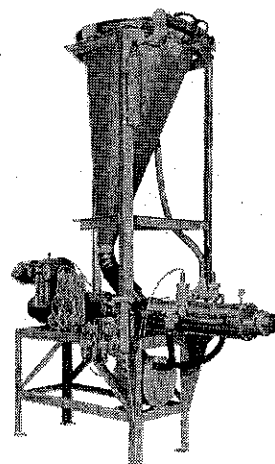


Photo. 3

ホソカワ/カーター ノンブリッジングホッパー
デンシファイヤー

(1) 概要と特長

ノンブリッジングホッパーは扱いにくい微粉のブリッジ防止用ホッパーである。空気を吹き込んだり、電磁振動を与えることなしにホッパーの左右の往復円運動によりブリッジを防止する。この往復運動のためホッパー内

の粉体は振動型の様に詰ることなしにホッパーの内側に滑り落ちる。このホッパーは減容機、袋詰め機、ドラム充填機等の前工程にも使用する。

(2) 標準型式

標準型式を Table. 3 に示す。

Table. 3 ノンブリッジングホッパー
標準型式

直 径 (cm)	長 さ (cm)	容 量 (m ³)
610	1200	0.135
915	1800	0.435
1200	2400	1.01
1500	3000	1.95

材質 SS 41 と SUS 304

技術提携製品

3. ホソカワ/カーターデンシファイヤー

(Photo. 4)

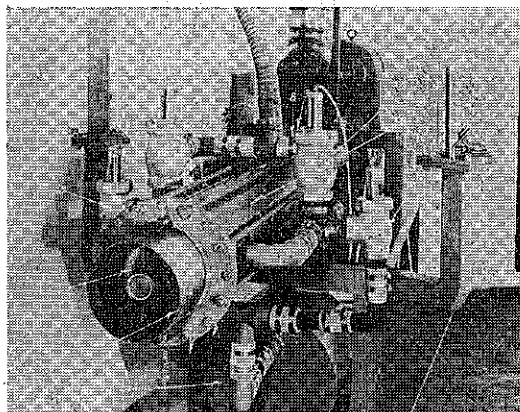


Photo. 4 ホソカワ/カーター デンシファイヤー

(1) 特長と構造

粉体を袋詰めし、またはドラムに充填する前に移動粉

体中から真空機構によって空気を抜き取り、体積を減らす減容機である。概略の構造を Fig. 2 に示す。ノンブリッジングホッパーを通して原料が供給されスクリーンにより輸送される。その輸送中にスクリーンの回りに接近して取り付けられたスリーブとフィルターを通して粉体中の空気が吸引される。Fig. 2 に示すようにスクリーンの回りのケーシングは左右別々の部屋になっており、左側の部屋で粉体中の空気を吸引している時右側の部屋では大気から空気を吸引しスリーブおよびフィルターの洗浄をする。この吸引と洗浄作用をタイマーによ

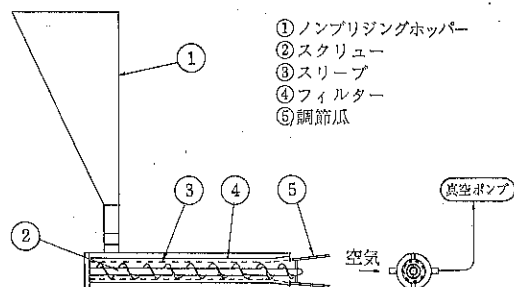


Fig. 2 ホソカワ/カーター デンシファイヤー略図

て自動的に交互に行なうことによりスリーブおよびフィルターの目詰りがなく常に安定した減容作業を行うことができる。

(2) 標準型式と処理能力

標準のスクリーン径と粉体の見掛け密度（供給時基準）を 0.3g/cc とした時の処理能力を Table. 4 に示す。

Table. 4 デンシファイヤーの処理能力

スクリーン径	処 理 能 力
165m/mφ	6,000/Hr
270m/mφ	15,000~36,000/Hr

(3) 適用例

種々粉体の適用例を Table. 5 に示す。

Table. 5 デンシファイヤーの適用例

粉 体 名	スクリーン回転数 R. P. M.	真 空 度 mmHg	原料の見掛け密度 g/cc	処理後の見掛け密度 g/cc	上 昇 率 %
ステアリン酸亜鉛	40	510	0.106	0.295	278
カーボンブラック	40	510	0.067	0.175	261
"	60	510	0.0525	0.186	354
アセチレン	40	510	0.015	0.121	807
"	40	510	0.015	0.127	847
炭 酸 銅	40	510	0.0346	0.159	460
酸 化 銅	40	510	0.0525	0.159	303
タ ル ク	32	510	0.159	0.84	528
"	25	635	0.141	0.525	372
カ オ リ ン	60	510	0.25	0.68	272

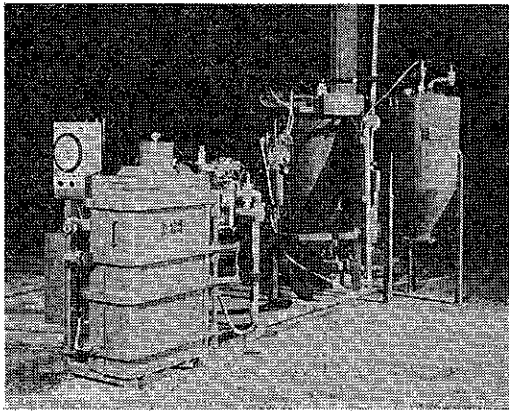


Photo. 5 ホソカワ/カーター バッグファイラー

技術提携製品

4. ホソカワ/カーター バッグファイラー・ ドラムファイラー

(1) 特長と構造

袋やドラムに粉体を詰める際に粉体の嵩(かさ)を減少させつつ充填する装置でありその時発生する粉塵の除去も十分考慮されている。この装置は真空充填であるため普通のパッカーより嵩(かさ)を非常に減少させることができ、操作はすべて自動操作であり運転が非常に簡単である。

原理の略図を Fig. 3 に示す。最初バルブ①が開いており粉体が輸送されて来る。次にバルブ①は閉じ、バルブ②が開き袋に輸送された粉体中の空気抜きが始まる。この輸送と空気抜きの操作があらかじめセットされたタイマーにより一定時間づつ間けつ的に行われ定められた重量になるまで自動的にくりかえされる。充填速度は1~3袋/minであり充填差は25kg詰めで約100g程度であり、バッグおよびドラムの大きさに規定はない。

(3) 適用例

各種の粉体の適用例を Table. 6 に示す。

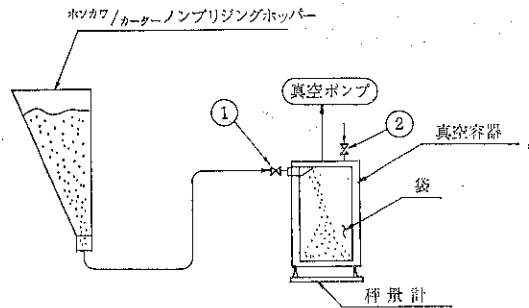


Fig. 3 ホソカワ/カーター バッグファイラー略図

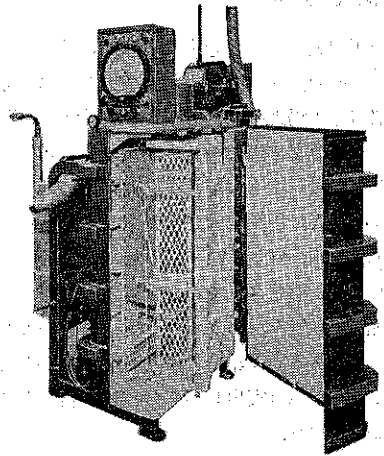


Photo. 6 ホソカワ/カーター バッグファイラー内部

Table. 6

ホソカワ/カーター バッグファイラー・ドラムファイラー適用例

粉 体 名	通常の充 填 g/cc	真空充 填 g/cc	上昇率%
アセチレン	0.08	0.11	138
アスベスト	0.25	0.48	192
活 性 炭	0.16	0.23	144
カーボンブラック	0.13	0.28	214
顔 料	0.26	0.48	185
ステアリン酸亜鉛	0.09	0.12	133
酸化亜鉛	0.32	0.55	172
パーライト	0.10	0.19	190
P V C	0.34	0.62	183
有機染料	0.25	0.50	200

バッグフィルターによる高温ガスダスト集塵

細川鉄工所

集塵機事業本部

1) はじめに

公害問題中大きな部分を占める大気汚染は、各方面の努力によりその防止効果が徐々に表われてきたが、それでも大都市や工場地帯ではスモッグ注意報が頻繁に出、時には警報発令まで出ているのが現状である。当社集塵機事業本部においても大気汚染防止に取組み、各方面に集塵装置を納入、稼動させてきた。特に公害防止条令が改正され、規制が厳しくなってからは、今まで殆どバッグフィルターが使用されていなかった高温排ガスの清浄化に真剣に取り組み、ホソカワ/マイクロパルスエアの大きな特徴である高々集塵効率を十分に生かして、色々な業種に装置を納め実用レベルの技術を蓄積してきたのでここに報告する。

2) 高温排ガス

納入装置について述べる前に、まず高温ガスとはどういった挙動を示すものか大気と比較して考えてみよう。我々が呼吸している大気は、人間の体を基準に考えれば必ずしも快適とはいえない。すなわち、冬は時に氷点下となりインフルエンザを流行させ、梅雨には湿度が高くじめじめと不快で、食中毒を起させたりする。そして夏には気温が時に体温以上となり、事務所には冷房が入る。しかし、バッグフィルターを基準にすると全く理想的なガスといえよう。すなわち、温度(気温)は普通日本では -20°C ~ 40°C の範囲に完全にコントロールされているし、人体に無害という事から当然腐蝕性のガスを含んでいない。ところが高温排ガスとなるとバッグフィルターにとっても、人体に対する大気か、否、それ以上に厄介な物となる。まず、ガス温度は数百度から千度を起える範囲まであり、しかもそれが安定せず大きな幅で変動する場合が多々ある。その上 SO_x 、 HF 、 HCl 等の腐蝕性ガスや水蒸気を含み、汙布をだめにしたり鉄を腐らせたりする場合がある。従って、これら排ガスを処理するには、大気が自然の摂理によりコントロールされているように、人間が十分気をつけて調整してやらないと

色々なトラブルが起る事になる。人間に適材適所という言葉があるように、バッグフィルターに使う汙布材質も目的のガスに適したものを選定してやる事が肝要である。

3) 装置例

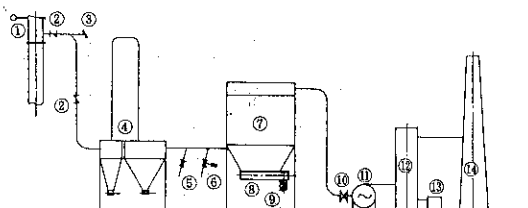
バッグフィルターを高温排ガス中のダスト捕集に使用するには色々コントロールする必要がある事を述べたが以下に実装置例を5つ上げる事によりその具体例を示す。

a) キュボラ排ガス集塵装置

●装置フローの一例 (Fig. 1)

●フロー説明

排ガスはキューボラ炉頂よりダクトで直接集められ、放熱ダクトにより 400°C 前後まで一次冷却



1 汙頂ダンパー 2 エキスパンション 3 爆発安全窓 4 放熱塔 5 手動バタ弁 6 自動バタ弁 7 バッグフィルター 8 スクリューコンベヤー 9 ローターバルブ 10 手動バタ弁 11 ターボファン 12 パックドタワー 13 中和槽 14 排突

Fig. 1

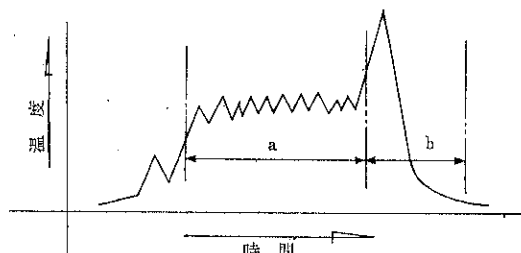


Fig. 2

後、放熱塔（放熱面積 200m^2 ）により 180°C 以下に冷却されて、パルスエアー P I F 3（汙過面積 187m^2 、汙布ノーメックス）によりダスト捕集された後風車（ $400\text{m}^3/\text{Min}$ ）を通過してバックドタワーに入り、ここで SOx を洗滌後排突より清浄ガスとして放出される。

●排ガス温度変化 (Fig. 2)

温度変化に2段階ある。

④段階 数百度を中心にその装置に固有の範囲で上下に変動する。変動はすごく頻繁である。

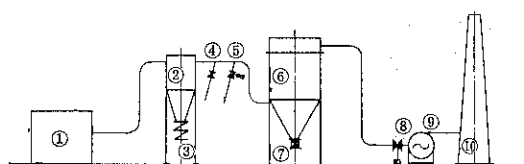
⑤段階 ④段階のレベルを越えて急上昇し（時に千度を越える）、後常温近くまで急降下する。

●腐蝕性ガス

SOx を百数十 PPM 含むが、水蒸気がごく少量であるため装置の腐蝕は少ない。装置全体としては高温、温度急変に対する考慮が必要。

b) 木粉ボイラー排ガス集塵装置

●装置フローの一例 (Fig. 3)



1 ボイラー 2 マルチクロン 3 ダブルダンパー
4 手動バタ弁 5 手動バタ弁 6 バッグフィルター
7 ロータリーバルブ 8 自動バタ弁 9 ターボファン
10 排突

Fig. 3

●フロー説明

ボイラー排ガスはダクトで直接集められ、マルテクロンでダストの一次捕集を行った後、外気を混入して 180°C 以下とし、パルスエアー P I M 3（汉過面積 332m^2 、汉布ノーメックス）によりダスト捕集後風車（ $410\text{m}^3/\text{Min}$ ）を通り排突より清浄ガスとして放出される。風車ダンパー開度は汉内圧により自動調節される。

●排ガス温度変化

温度変化は少なく、変動のしかたもゆるやか。ただし季節的に必要水蒸気量が変わる事に伴い、基準温度が上下する場合がある。

●腐蝕性ガス

木酢を含む。木材を燃焼させる事から水蒸気露点が高い。従って操業条件によっては、バッグフイ

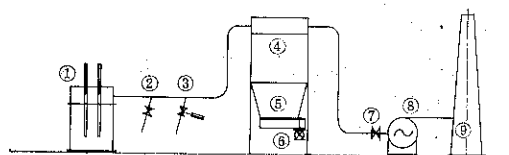
ルターおよびダクトを保温し、水滴の発生、腐蝕を防ぐ必要がある。

c) アーク汉排ガス集塵装置

●装置フローの一例 (Fig. 4)

●フロー説明

排ガスはアーク汉上部密閉フードより直接集められ、外気を混入して 280°C 以下に調整後グラスバッグフィルター（汉過面積 924m^2 、汉布グラスグロス）によりダスト捕集され、風車（ $700\text{m}^3/\text{Min}$ ）を経て排突より清浄ガスとして放出される。



1 アーク汉 2 手動バタ弁 3 自動バタ弁 4 バッグフィルター
5 スクリューコンベヤー 6 ロータリーバルブ 7 手動バタ弁 8 ターボファン 9 排突

Fig. 4

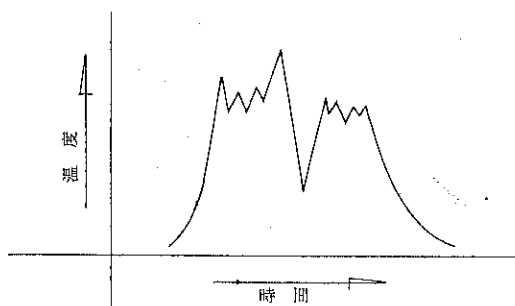


Fig. 5

●排ガス温度変化 (Fig. 5)

温度変化が激しく上図のパターンを数時間おきに繰返す。

●腐蝕性ガス

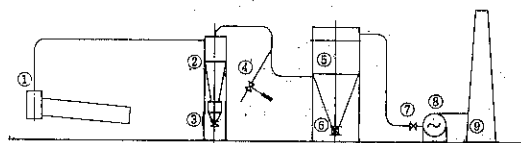
SOx 、 HF 、 HCl を含むが水蒸気がごく少なく装置の腐蝕は少ない。

d) アスファルトプラントロータリーキルン排ガス集塵装置

●装置フローの一例 (Fig. 6)

●フロー説明

キルンより出る排煙はダクトで直接集塵し、サイクロンで一次捕集した後パルスエアー P I M 3（汉過面積 332m^2 、汉布ノーメックス）でダスト捕集が行われた後風車を通り排突より清浄ガスとして放出される。



1 ロータリーキルン 2 サイクロン 3 ダンパー
4 自動バタ弁 5 バッグフィルター 6 ロータリー
バルブ 7 手動バタ弁 8 ターボファン 9 排突

Fig. 6

●排ガス温度変化

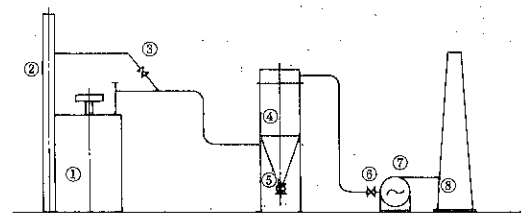
温度は通常 $120^{\circ}\text{C} \sim 140^{\circ}\text{C}$ であるが、1バッチの時間が短い。

●腐蝕性ガス

熱源としての重油燃焼に伴う SO_x 、および骨材乾燥に伴う水蒸気。

e) 石膏焼成釜排ガス集塵装置

●装置フローの一例 (Fig. 7)



1 焼成釜 2 煙道 3 手動バタ弁 4 バッグフィルター
5 ロータリーバルブ 6 手動バタ弁 7 ターボファン 8 排突

Fig. 7

●フロー説明

焼成釜上部よりダクトで排ガスを直接集塵し、バーナー排ガスを混入してガス温度を 150°C 程度

に調整後パルスエアー S P81-8 (汚過面積 70m^2 、汚布コーネックス) によりダスト捕集した後風車 ($90\text{m}^3/\text{Min}$) を経て排突より清浄ガスとして大気中に放出する。

●排ガス温度変化

焼成中水蒸気発生最大の時最もガス温度が高く 150°C 前後になり、水蒸気発生量が減少するにつれて外気が混入する車により温度が低下する。蒸気量最大の時は絶対湿度が 1.90 前後となる。

●腐蝕性ガス

原料となる石膏の産地または製造工程の違いにより発生する腐蝕性ガスの種類、量がかなり異なってくる。ガスとしては HF 、 SO_x およびリン酸が考えられる。水蒸気露結、腐蝕対策を行う事は当然である。

4) おわりに

以上5種類の例を上げたが、バッグフィルターを安定して運転するには当然適正な汚過率を選定する事、ホッパーよりダストがスムーズに排出される事等初歩的な問題にも十分考慮をはらう必要がある。また対象とする装置の特性を十分に知り、その装置およびバッグフィルターに対する安全対策を適切に設ける事が肝要である。幸い我々のパルスエアーは圧力変動がごく少なく、対象装置に対する負荷変動がほとんどないので安心して装置に組込める事は大きな強みと考えるしだいである。

今後も色々な分野にバッグフィルターが使用されていくと思うが、我々メーカーのみの努力では不十分な点多々あり、ユーザー側と十分に検討する事により初めて理想的な装置に近づける事ができ、この点ユーザーの方々のご協力をお願いするものです。



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

関 細 川 鉄 工 所
海 外 事 業 本 部

当社海外事業の一環として、新しい関連会社が二社誕生しましたのでお知らせします。

ホソカワヨーロッパリミテッド (Hosokawa Europe Ltd.)

「世界のホソカワ」を標榜して十数年、当社はその活躍の舞台を広く世界にもとめてきました。英国を含むヨーロッパでも、昭和35年2月「ホソカワ インターナショナル」を設立、38年7月、オランダ NAUTAMIX 社と分級機ミクロンセパレーター等の技術輸出契約を締結するなど、着実に基盤を固めてきましたが、昨昭和48年8月、従来の関係を整理して、当社の全額出資による子会社「ホソカワ・ヨーロッパ・リミテッド」を設立するに至りました。新会社の概要は次の通りです。

本店所在地	英国ロンドン EC2P アイアンモンガーレーン
取締役	細川益男 (取締役会長)、細川明彦、間嶋淳一郎、G. T. キング (専務取締役)
資本金	50,000英ポンド
事業目的	ホソカワ製品の欧州向け販売及びその関連業務

当社の企業特質は、粉碎、分級、混合、乾燥、集塵等々の粉体処理機械の総合メーカーであるとともに、それらの機械を数多く組込んで連続化、自動化したプロセスのシステムエンジニアリングに営業の重点をおいていることですが、このたび発足した「ホソカワ ヨーロッパ」も、日本から輸入するホソカワ製品と、現地で調達する他社製の機械や附属機器を組込んだシステム販売を主目標としています。実は、こういう会社は欧州や米国においてもあまり例がありません。

従来の関係から、本社営業所は英国に置きましたが、広く欧州大陸に活動するため、西ドイツケルン市に支店を

設けています。上記営業方針に沿って当社から佐藤功君 (英国) 及び織田弘太郎君 (西独) が既に赴任しており、現地採用のセールスマンや代理店を駆使して、かなりの実績をあげつつあります。また、業務の繁忙化に伴い、このたび木原雄三君が試験室、技術係員として英国へ赴任するほか、今後とも多数の優秀なホソカワマンの出兵が予定されています。

3月下旬英国ハロゲートで開催された “POWTECH '73”、ドイツフランクフルトで去る6月举行された “ACHEMA” にも出展して、粉体処理エンジニアリング会社として彼地での名声をたかめつつあります。

この会社はまた当社の長期計画に沿う国際化を進めるための技術情報拠点であるとともに、従業員訓練の場でもあります。

ヨーロッパにおいて何かのご用がおありの節は、是非下記へご連絡下さい。

英 国 ; Hosokawa Europe Ltd.
St. John's Estate,
Tylers Green, High Wycombe,
Buckinghamshire,
ENGLAND

Telephone : 049-481-2824

Telex : 51837208

HOSOKAWA HIWYC

ドイツ : Hosokawa Europe Ltd.
c/o MikroPul G. m. b. H.
Welserstrasse, 505 Porz,
GERMANY

Telephone : (02203) 39570
Telex : 418874513
MIK D

ホソカワ・トリット株式会社 (Hosokawa-Torit Co., Ltd.)

当社とザ・トリット・コーポレーション（本社米国ミネソタ州セントポール市）とが、折半出資して設立した合弁会社です。トリット社は、主として小型のスポット集塵機（旋盤、グラインダー等の発塵箇所直接とりつける局所集塵機）を生産して、この分野では、アメリカで50%近い市場占有率を誇るトップメーカーであります。

新会社の概要は、次の通りです。

本社所在地：大阪市港区市岡2丁目（但し、営業所は、当分の間、細川鉄工所枚方事務所内に置く）

資本金：45百万円

取締役：細川益男（社長）、T. H. ピーターソン（副社長）、間嶋淳一郎、東門栄一、その他アメリカ側2名

事業目的：トリット社の技術による小型集塵機の製造、販売

ホソカワ・トリット側の製品ラインにつき、以下紹介します。

(1) キャビネット型集塵機 (Photo. 1)

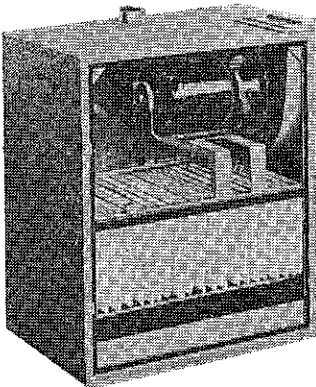


Photo. 1

封筒状の汙布により含塵空気を汙過、集塵する機構で、小型のスチールキャビネット内に吸引ファン、モーターがコンパクトに配置されている。工作機械、木工機械等から出る切削くずや、鋸くず

の集塵に広く用いられています。

(2) サイクロン式集塵機 (Photo. 2)

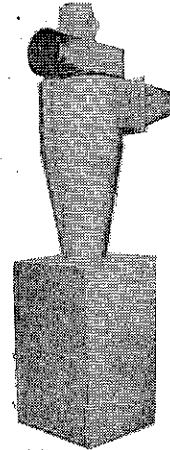


Photo. 2

従来からあるサイクロンと原理的には同じものですが、トリットのものは、上部にブロワー、モーターを備え、下部にダストボックスを設けたコンパクトな設計になっています。

(3) ミストコレクター (Photo. 3)

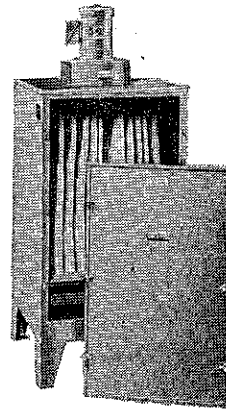


Photo. 3

機械加工、研磨等の作業中に発生するオイルミストの除去等に用いられるもので、ガラス繊維を用いた二段式の汙過層でミクロン以下の超微粒滴も

粉 碎

完全に捕集します。

(4) スイング・アーク・ヒューム・エグゾースター
(Photo. 4)

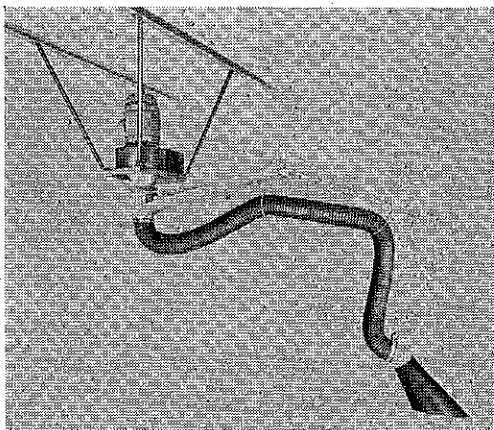


Photo. 4

高温のヒュームやミスト、特に溶接時に発生するヒュームの除去に用いられます。

上述の通り、トリット製品は、ファン、モーター等の必要アクセサリを全て組込んだコンパクトな設計になっており、標準化されたユニットが二百型式以上揃っています。いづれも、各種工場の作業環境の改善と大気汚染防止用の汎用機械であります。

お問合せは、下記へどうぞ：

枚方市招提田近1丁目9

ホソカワ・トリット株式会社

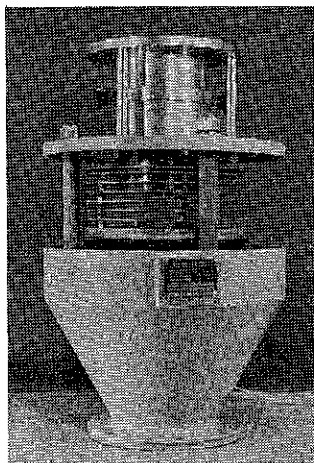
電話 0720-55-2411

または、

細川鉄工所 集塵機事業本部

電話：大阪地区 0720-55-2221

東京地区 03-503-2231



【技術ニュース】

ドーナツ型振動板を 備えたフロートロン

フロートロンの振動円板に、写真に示すようなドーナツ型の円板を設けることによって、処理能力の増大や定量性を向上させることができた。

1) 処理能力の増大

従来のフロートロンの最大排出間隙は、取扱う粉体の安息角により決まる。図1のように振動板の上に一定の間隔を置いてドーナツ型円板を固定すると、排出間隙を2倍または3倍にすることができるので、処理能力が増大する。

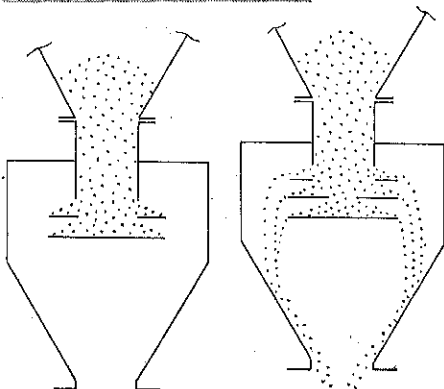


図1

図2

2) 定量性の向上

図2に示すようにドーナツ板の間隙を小さくして数枚を重ねると、その間を流れる粉体はすべて円板の強制振動を受けて流動するので、排出間隙の大きい従来の型のような重力による自由流動部がなくなり、定量性が向上した。

また、この型式は酸化鉄のような磁性のある粉体が振動板に付着するのを防止するのに効果があった。

粉体工業懇話会の活動

編 集 部

粉体工業懇話会が粉体をきづなどとして業界の各企業間、そのみならず学界との協同活動を推進すべく発足してしまい1年半以上を経過し、会員も発足当時の43社より本年8月現在約80社と大きな伸びを示している。

業界の友好親睦、技術的向上発展、等を目標に機能別に分けられた7つの委員会と、単位操作別に区分された十分科会が組織され、学界から参画された顧問の先生方の協力を得て、普通の工業会とはことなる、ユニークな企画がなされ、本格的な活動段階へ入っている。

ここでは粉体工業懇話会の会員には勿論、会員外の各社にとっても関連がある委員会活動の内のいくつかをお知らせする。

依頼試験委員会

粒度分布、粒子密度、比表面積の測定。その他の粉体の物性に関する測定に必要な多くの装置及び機材を用意し京大化研の荒川委員長の世話のもとで、会員及び会員外の各社より依頼される粉体に関する各種の測定の要求に応じられるようになっている。

従来こうした測定は粉体機器メーカー、あるいはユーザー各社で独自に行なわれて来たが、技術、装置、操作などの上に多くの問題があったが、依頼試験委員会の活動により、中立の機関での権威ある測定結果が得られるようになった。荒川委員長の話によれば、最近受ける測定依頼の中には、大いに技術を要する難しいものが多いとのことである。

実物試験委員会

粉体をあつかう機器の計画、設計に際しては、実際に使用されるものと全く同種の機器でのテストデータが望まれることが多い。こうした実物での試験は従来では、粉体機器メーカーが顧客に対して用意している設備を利用する他はほとんど方法がなかった。

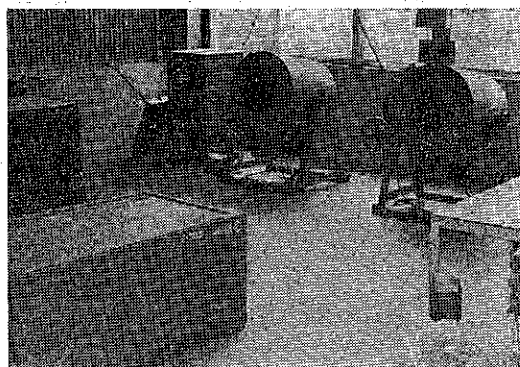
実物試験委員会では中立の立場から、実物装置での試験を斡旋できるように、かねてより準備を進めていたが、この度これが実現した。

会員の内から粉体機器のメーカー、ユーザー合わせて30余

社の協力をえて合計147台の機器が登録され、粉体に関する単位操作のほとんどが、実物装置での試験を行うことが可能となった。

標準粉体委員会

装置性能試験、測定機の検定、粉体物性の基準などに用いられる標準粉体を会員が容易に入手できるようにと計画されている。4月以降JIS Z-8901試験用粉体7種及び8種（関東ローム粉）の生産設備が粉体工業懇話会で整へられ、細川粉体工学研究所の一室に設置されて、6月よりJIS 7種及びJIS 8種に新たにJIS 4種（タルク）も加えて、製造、会員への頒布を開始した。

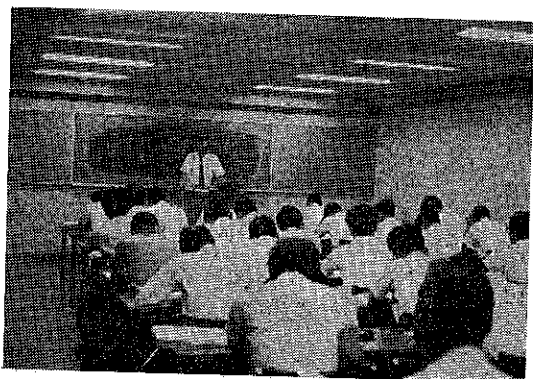


試験用粉体製造設備

更にJISに規定されている他の試験用粉体、また、JISに規格のないもので、標準粉体として使用できそうなもの、たとえばガラスビーズ、溶融アルミナ、炭酸カルシウム、その他なども、基準の設定、製造、会員への頒布を具体化すべく努力がなされている。

教育委員会

最も早く活動が開始された委員会であり、三輪茂雄委員長の精力的な活躍により、昨秋10月、東京において第1回の粉体工学講座が開講されていた、隔月に講習会が計画され本年8月で既に第6回目を数えた。毎回、ユ



粉体工学実用講座

ニークなテーマがとりあげられ、40～50名の受講者がある。今年の予定は10月、12月開催の第7回、8回まで既に企画が完了している。またこの間、大阪においても7月に粉体工学実用講座が2日間に渉って開かれ、多くの聴講者を集めた。

広報委員会

昨秋、化学工学協会、日本能率協会共催の化学プラントショーに粉体工学研究会と共同で出品展示を行ない、C・Pショー粉体コーナーの中心的役割を果たした。今年のC・Pショーにおいても粉体機器コーナーを特設

しユニークな内容の展示を計画している。

また粉体機器要覧(改訂版)の編集、体工学研究会誌における“懇話会”のページなど積極的な広報活動を行っている。

◎粉体工業懇話会へのお問合せは

◎依頼試験の申込みは

◎標準粉体の入手希望は

〒606、京都市、左京区吉田泉殿町1-101

日本材料学会内

粉体工業懇話会 TEL 075-761-7123

◎粉体工学講座(東京)への参加申込は

〒101 東京都千代田区神田錦町3-20(山京ビル)

粉体工業懇話会東京連絡所 03-293-8821

◎実物試験についてのお問合せは

〒804 北九州市戸畑区仙水町1

九州工大機械工学科、教授 上滝具貞

TEL 093-871-1931

〒233 横浜市区大岡2-31-1

横浜国大化学工学科、教授 青木隆一

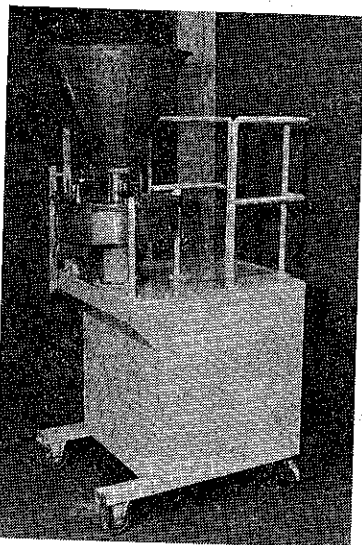
TEL 045-741-3541

〒432 浜松市城北3-5-1

静岡大学工学部化学工学科、教授 狩野武

TEL 0534-71-1171

〔技術ニュース〕



新型テーブルフィーダーの登場

円板が高速で水平の振動をしながら、ゆっくりと回転する型式の新型テーブルフィーダーが開発された(写真)。

従来のテーブルフィーダーは大きな減速比が必要で、減速部分にかなりのスペースをとられた。本型式の減速機構は、モーター直結、あるいはVプーリーにより高速で回るシャフトの偏心効果を利用して、振動と同時に低速回転を得ようとするもので、機構的にコンパクトになりコストも安くできる。その上テーブルが円形の水平振動をするので、粉の排出がスムーズになり定量性も高いという一石三鳥の新型テーブルフィーダーである。

ホソカワ ニュース

○ 枚方事務所、枚方新工場完成

昨47年4月より始まった枚方建設計画第3期工事は、同11月末に枚方事務所が、続いて本年3月には新工場、試験室などが完成した。

新事務所は鉄筋コンクリート5階建、建築面積約680㎡、延床面積約3,400㎡。1階に総務部、2階に粉体機器および化学機器事業部、3階に集塵機器事業部、4階に役員室、経理部、企画部、5階に海外事業部と電算室。昨年12月には各部とも移転を完了し、本年1月から新事務所での業務を開始した。

新工場、試験室は既設工場に並列、鉄筋平屋建、1部事務所棟4階建で、建築面積約3,800㎡、延床面積約5,000㎡。既設工場との間は4階建の工場事務所で、食堂、医務室なども新しく整備された。

○ ㈱ホソカワ・トリット社業務開始

本年6月に設立認可されたホソカワ・トリット社は7月30日、細川鉄工所枚方事務所1階に事務所を開設、出向社員も決定し、いよいよ業務を開始した。

○ '72化学プラントショー

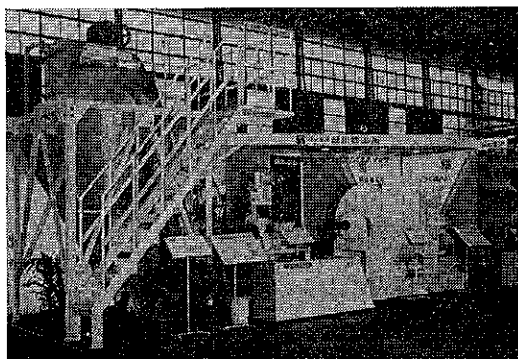
と き：昭和47年10月4日～10月9日

と ころ：東京・晴海・国際見本市会場

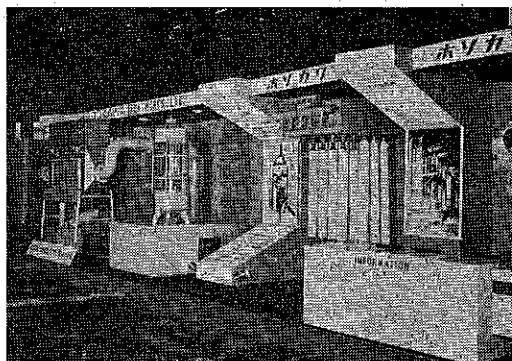
出品機種

粉体機器コーナー

- ① ファインミクロンミル
- ② ミクロンセパレータN型
- ③ ラピッドミキサ



粉体機器展示コーナー



公害防止技術展示コーナー

公害防止機器コーナー

- ① 電気集塵機
- ② VWDスクラバ
- ③ パルスエアー

なお、化学プラントショーと同時に開催された、“化学プラント技術会議”（丸の内東商ビル国際会議場）にて東門常務が「バグフィルタによる集塵技術」のテーマのもとに講演を行った。

○第7回粉体工学に関する講演討論会

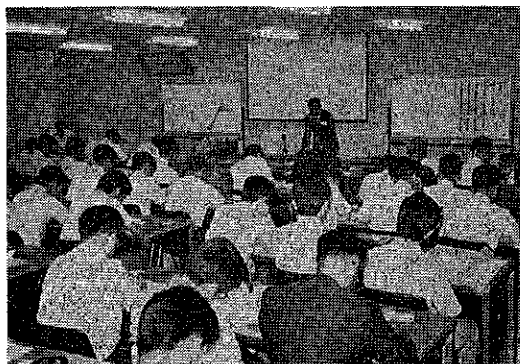
テ ー マ：粉粒体に関する計測と自動化

主催 粉体技術談話会

—昭和48年8月21日

於 枚方事務所5階会議室—

参加人員 約100人



内 容 (敬称略)

第1部 粉体プロセスの二、三の計測—その原理と可能性—

司 会	名古屋大学工学部教授	神保 元二
講 演	北海道大学工学部教授	田中 達夫
コメント	大阪府立大学助教授	向阪 保雄

コメント 京都大学工学部 増田 弘昭

第2部 連続混合プロセスの自動化

司 会 京都大学工学部教授 吉岡 直哉

講 演 大阪府立大学工学部教授 矢野 武夫

コメント 名古屋大学工学部教授 神保 元二

コメント 細川粉体工学研究所所長(代)

横山 藤平

第3部 粉粒体の流動性の評価とその応用

司 会 大阪府立大学工学部教授 吉田 哲夫

講 演 細川粉体工学研究所 鈴木 昭明

コメント 同志社大学工学部教授 三輪 茂雄

コメント 塩野義製薬株式会社 佐藤 文雄

本講演討論会を企画した時点では会場として研究所3階会議室を予定していたが、多数の申込があったので急拠枚方事務所5階会議室に会場を移し、多数の出席者のもと活発な討論が行われ、予定時刻を約20分延長して無事終了した。

○ 海外出張

渡航年月	渡航者名	出 向 地	用 務
47年9月	紫 野	神戸～シンガポール	ノルウェータンカー HOEH ROBIN 乗船 (マリタイム社タンカー 防爆装置試運転、技術修得)
10月	田中本部長 増 田	ルーマニア	ベントナイトプラント 増設商談、 帰途 HOSOKAWA EUROPE 社 (イギリス)、 NAUTA 社 (オランダ)、 Mikro Pul G.m. b.H 社 (西ドイツ) 訪問
12月 48年1月	森 課 長 向井工場長 北浦課長	ソ 連 アメリカ	石炭プラント試運転 Strong-Scott 社、 VIBRA SCREW 社、 MikroPul 社、TORIT 社訪問、生産技術修得
2月	社 長 間嶋常務	欧 州	HOSOKAWA EUROPE LIMITED、 Mikro Pul G.m. b.H. 社 (西ドイツ) 竣工式 参列
3月	稲毛田係長	台 湾	商 談
4月	増 田	台 湾	商 談
6月	田中本部長	ド イ ツ	ACHEMA 展示会、 H. E. L. 出展応援

編 集 後 記

編 集 部

* 今夏の記録的な猛暑も秋の深まっていくにつれ何か忘れられたかの感がするこの頃ですが、読者諸兄にはお元気で御活躍のことと思います。

* 細川鉄工所枚方建設計画が完了しましたことを記念して、本号を“枚方建設計画完工記念号”としました。躍進するホソカワの拠点となるものと思います。

* 編集委員会制へ移行して2度目の発行を迎え、誌面の体裁も幾分変えてみました。また、本号はポリウムもさることながら内容的にも一段と充実し、読者諸兄の御要望に答えることができるものと確信します。

* 編集委員会制の実施を機に次頁に掲げるような新しい投稿規定を作成いたしました。この投稿規定を作成するに当り、特に留意しました点は学術、技術誌の品格を保ちつつかみしもを着ずに気軽に投稿できるという特徴を生かすことです。従って粉体工学に関する記事をできるだけ提供していただき易くするため、原稿の書き方についてうるさい規定を設けないことにいたしました。

原 稿 募 集

“粉砕”誌の原稿を募集いたします。粉体工学に関係する研究報告、技術報告、総説、参考資料、文献紹介、随筆など特徴ある記事をふるって御投稿されることをお願いします。ご一報いただきましたら、原稿用紙をお送りいたします。

次号発行予定 昭和49年9月末日

原稿締切 昭和49年5月末日

“粉 砕” No.18 1973年 秋季号

昭和48年10月15日 印刷

昭和48年10月25日 発行

編集発行責任者 横 山 藤 平

(非売品)発行所 細川粉体工学研究所

大阪府枚方市招提田近1丁目9

印刷所 ナニワ印刷株式会社

大阪市北区川崎町38

粉 碎、誌 投 稿 規 定

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（もし御希望があれば事務局の方で英訳します）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等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に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、測定等に必要な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

2. 原稿の書き方

本誌の特徴として、原稿の書き方についてうるさい規定を設けませんが、編集の都合上次のような点は御協力下さい。

2:1 用紙は細川粉体工学研究所調製のもの（25字詰、10行、約9枚で刷り上り1頁）を用いて下さい。題名、著者名、勤務先および連絡先等は、本文と別に表紙に書いて下さい。用紙の申込があればただちに送付いたします。

2:2 用語、用字は原則として当用漢字、新かなづかいを用い、わかりやすい簡明な表現を望みます。

2:3 英文要旨は250語以内にまとめ、A4サイズ用紙にタイプ打ちまたは活字体でペン書きしていただくよう希望します。

2:4 研究報告および技術報告の原稿の長さは図

表を含めて原則として刷り上り10頁以内にまとめていただくよう希望します。しかし、総説（または講義）等で頁数の多いものについては連載もします。

2:5 図表、数式等に用いる数字・記号などはあまりをおこさぬようはっきりと書いて下さい。特に、記号で大文字と小文字の区別、イタリックとローマンの区別、およびベクトル・マトリックスを意味する記号等は混同しやすく、また Suffix（添字）およびべき指数の位置は明示して下さい。特に混同するおそれのある場合については赤で引出線をつけ指定して下さいなどの御留意を望みます。

2:6 図および表の挿入箇所は左欄に指定し、脚註は欄内下方にまとめて記述して下さい。

2:7 本文中における引用文献の番号は右肩付、たとえば²⁾の形式とし、「引用文献」の欄は「記号欄」の後に配列して下さい。

2:8 図表の番号は Fig.1, Table.5, Photo.3 のように英文でお願いします。

2:9 図表は本文中に挿入しないで、別に綴って下さい。

2:10 原図はできるだけ大きく、はっきりと書き、余白上方に希望縮尺も併せて記入して下さい。

3. 原稿の編集

3:1 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。

3:2 原則として年1回発行します（毎年9月末を予定しています）

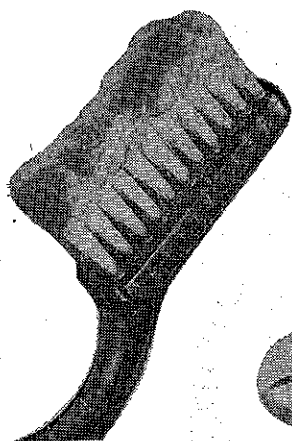
3:3 埋草等の小記事を除き、抜刷を50部贈呈いたします。なお、それ以上御希望の場合は、編集事務局へ御連絡下さい。

3:4 掲載済の原稿は返却いたします。

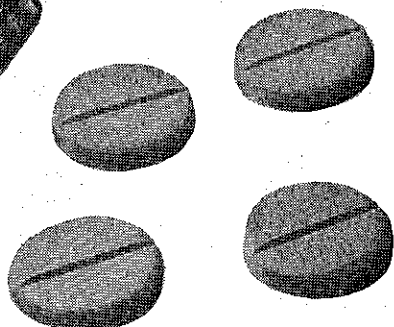
3:5 掲載しました原稿に対しては、若干の稿料を送らせていただきます。

原稿用紙申込または送付先

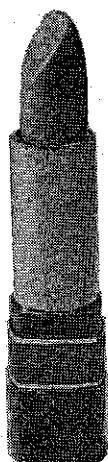
〒 573 ^{ヒラカタシニョグイタシカ}枚方市招提田近1丁目9番地
細川粉体工学研究所
「粉碎」編集事務局宛
(TEL 0720-57-3721)



歯磨



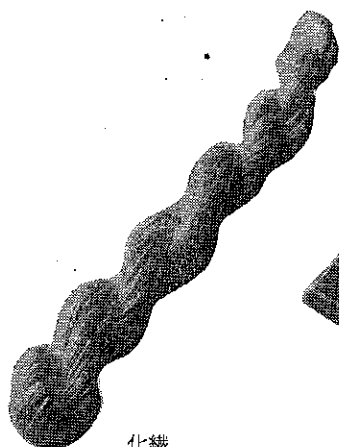
薬品



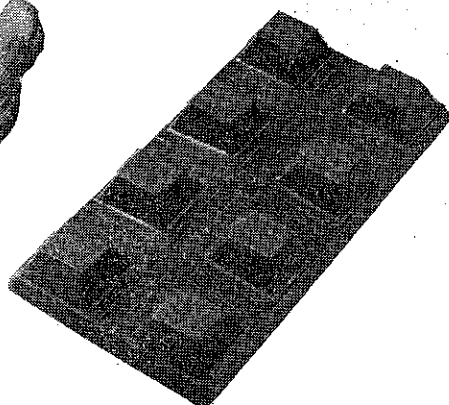
化粧品



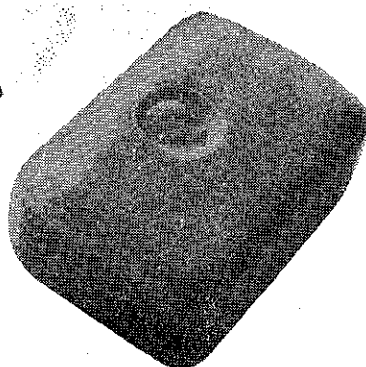
顔料



化繊



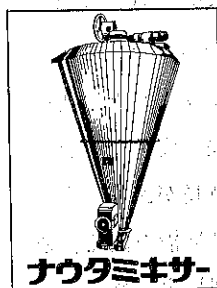
チョコレート



油脂・石鹸

あらゆる分野で活躍する混合機

ナウタミキサは、逆円錐形の容器内部に自・公転するスクリュウを持ち、粉体の運動を無限に拡げ、大容量でも短時間で均一に混合します。しかも、構造が簡単でメンテナンスも容易です。あらゆる分野の混合に広く使用され、用途目的に応じた専用付属品も数多く取りそろえています。



化学装置の総合メーカー

ホソカワ

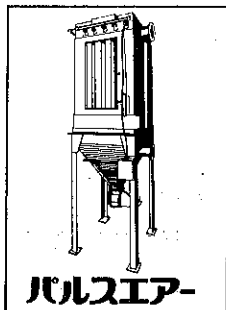
株式会社 細川鉄工所 化学機器事業本部
大阪府枚方市招提町近1丁目9番地 〒573
電話/枚方 (0720) 55-2221・東京 (03) 503-2231

● 営業品目
各種粉砕・分級・篩分・混合・乾燥・集塵
輸送・その他粉体処理装置

もう元にはもどりません

しかし、空気なら可能です

きれいな空気に。パルスエアーがお手伝いします。
パルスエアーは、サブミクロンオーダーの粉塵まで捕集します。しかも、他のバッグフィルタに比べ
通過風速が大きくとれ、圧力損失の変動が少なく
安定した運転ができるところに特長があります。
それはパルスジェット方式の脱塵機構を備え、逆
圧噴射の空気で濾布を効果的に清掃するからです。



パルスエアー

集塵装置の総合メーカー

ホソカワ

株式会社 細川鉄工所 集塵機事業本部

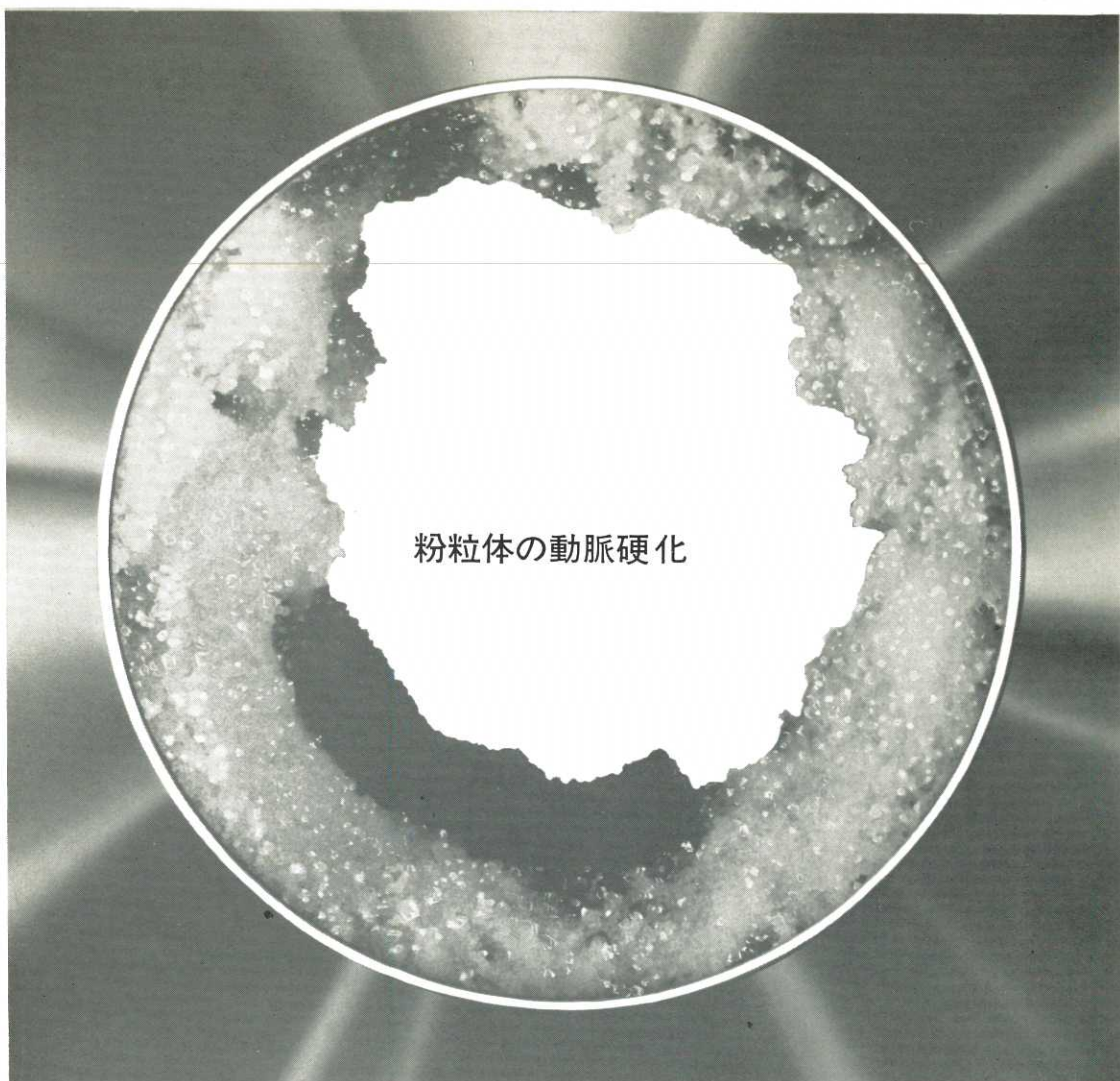
大阪府枚方市稻堤田近1丁目9番地 〒(573)

電話/枚方 (0720) 55-2221・東京 (03) 503-2231

● 営業品目：各種粉碎・分級・篩分・混合
乾燥・集塵・輸送・その他粉体処理装置

◆ 神鋼商事 株式会社

電話/大阪 (06) 202-2231・東京 (03) 272-6451
名古屋 (052) 663-7501・機械部



粉粒体の動脈硬化

かたまった粉体は、頑固です。

スムーズな粉体排出に、ビンアクチベータを
粉体は外気変化に敏感。サラサラした粉体も
つまってしまうと実にヤっカイです。常に、
貯槽内から排出を確実にすることは容易では
ありません。当機は振動パッフルでつまりを
破壊。長時間貯蔵された粉体でもスムーズに
流出し、理想的な粉体排出を実現します。



粉体処理装置の総合メーカー

ホソカワ

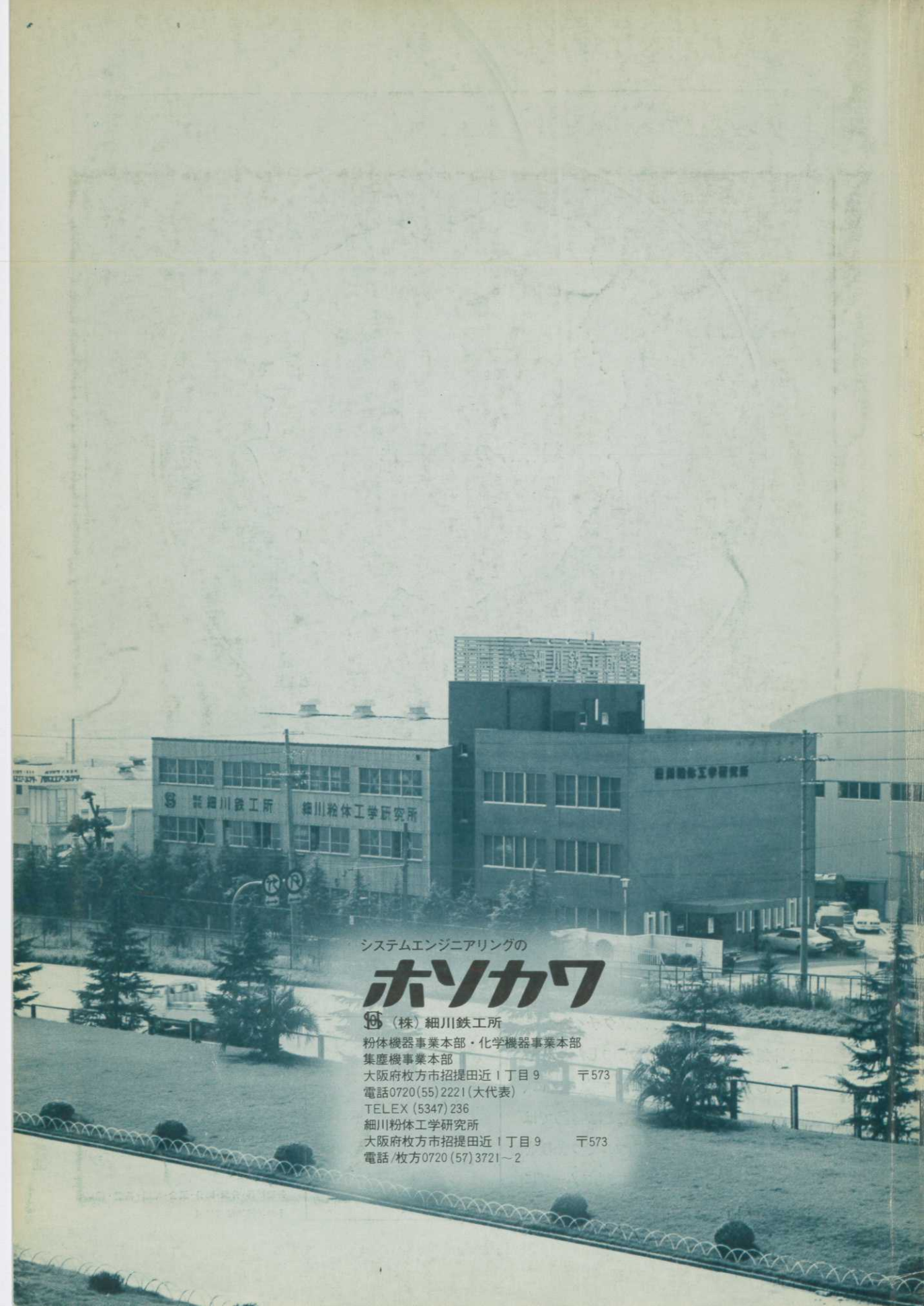
株式会社 細川鉄工所 粉体機器事業本部

大阪府枚方市招提田近1丁目9番地 〒(573)

電話 / 枚方 (0720) 55-2221・東京 (03) 503-2231

●営業品目

各種粉砕・分級・篩分・混合・乾燥・集塵・輸送
その他粉体処理装置



システムエンジニアリングの

ホソカワ

☎ (株) 細川鉄工所

粉体機器事業本部・化学機器事業本部

集塵機事業本部

大阪府枚方市招提田近1丁目9 〒573

電話0720(55)2221(大代表)

TELEX(5347)236

細川粉体工学研究所

大阪府枚方市招提田近1丁目9 〒573

電話/枚方0720(57)3721~2