- 展 望
- 粒子の特性と粉体粒度
- 粉体の凝集に関する基礎的研究
- 固体粒子の混合
- コメント
- む す び

展 望

森 芳 郎*

1. 緒 言

マイクロメリテックスのシンポジウムをはじめにいたり、一般的な展望について簡単に述べてみたい。マイクロメリテックスとは、Technology of Fine Particlesを意味し、1942年 Dallavalle がギリシア語の語源によって名づけたものである。粉体は個々の粒子の性質をもとにして取り扱いうる場合もあるが、むしろ粒子群全体としての統計的性質によってその挙動が支配される場合が多い。化学工業では粉体の取り扱いにおいて、技術的に困難な問題が多く、このような Technology of Fine Particles の発展が強く望まれている。

2. 化学工業における粉体問題の所在

化学工業における粉体問題は、たとえばセメント、陶磁器、ペイント顔料、薬品、殺虫剤、肥料、食品、燃料、電極、粉末冶金、金属精錬、プラスチック粉末原料、充填剤などあらゆる固体材料を取り扱う製造行程中に所在している。まず無機関係では、セメント原料の粉碎、

焼成、陶磁器原料の粉碎、混合捏和、焼結、亜鉛華、チタン白など顔料の粉末粒度と色調、これらを塗料としたときのシキソトロビー、硫化鉍の流動焙焼とクリンカーの処理、硫安の粒度と吸湿、化成肥料の造粒法、ボーキサイトからアルミナまでの粉碎、晶析、汙過、焙焼、輸送、カーパイトの流動窒化法における軟化溶解の問題など。有機関係では、粉末石鹼の噴霧乾燥、殺虫剤のミクロン程度の微粉碎、医薬品の微粉碎、混合、造粒、カオリンの分級、カーボンブラックの凝集、石油の流動接触分解における触媒の再生循環、微粉炭燃焼における均一な連続供給、製粉における粉碎とグルテン分の分離、砂糖の析出粒度の制御と吸湿固結の防止、高分子材料の重合、高分子粉体原料の熔融紡糸、火薬、ロケット燃料などの能率的混合、造粒、防爆対策などの問題がある。単位操作としては、粉碎、混合、分級、晶析、沈降、汙過、遠心分離、集塵、フラッシュ乾燥、流動焙焼、貯蔵、供給輸送などいずれも粉体に関する取り扱いである。

これらの諸問題は取り扱う物質の種々の性質に応じてそれぞれの問題を含んでいるが、いまこれらの共通点について考えれば、いずれもその固体材料を細かい粉体の状態で取り扱っていることと、それが細かい粉体であるために、かえって種々の困難が生じてくるという二つのことがクローズアップされることがわかる。

3. 粉体の特性

化学工業原料としての固体は多くの場合粉体であるがその必要な理由を挙げれば主として次の四つになると思

* 東京大学工学部化学工学科

われる。

(1) **表面積** 固体が気体や液体と接触して反応する場合、それらが接触する表面積が重要な因子となり、単位重量あたりの比表面積が大きいほど反応速度がはやくなるが、これは比表面積が粒径に逆比例するからである。

(2) **均一な混合** 異種の材料を混合する場合、成分粒子が、細かいほど、混合の均一度を高めることができる。

(3) **異種成分の分離** 原料中に有用成分と不用成分が一体となって存在する場合には、これを細かく粉砕するほどよく分離することができる。

(4) **流動性** 固体原料を細かくすれば、均一な取り扱いが容易になり、特に気体を吹き込んで液体のごとく流動させ、操作を連続化することができる。

以上のような理由によって、固体は粉体として取り扱われるのであるが、次に粉体であるがために、取り扱い困難な問題を生ずる理由としては、次のごとき事項を挙げることができる。

(1) **表面積が大きいこと** 前にも述べたとおり、粉体の比表面積が大きいほど、反応速度が速い。このことはたとえば吸湿、凝集、爆発など望ましくない現象の原因にもなりやすい。

(2) **不連続性** 気体、液体などが連続体としての挙動をするのに対して、粉体は個々の粒子間にはたらく摩擦作用の不連続のために全体としての挙動にも著しい不連続性を生じやすく、ホッパーの架橋による閉塞や flooding の突発など多くの困難を生ずる。

(3) **粒子形状と粒度分布の不規則性** 粉体は個々の粒子の形状および粒度分布が不規則である場合が多くこのために流動性、流体透過率、熱伝達率、電気の接触抵抗、物質移動係数などが変動しやすい。

(4) **飛散性** 粒子は終端速度以上の気流によって飛散するがその速度は粒径の自乗に比例し、粒径が小さくなると急激に飛散しやすくなる。

4. 粉体工学の体系化

粉体に関連した問題は前述のごとくはなはだ多く、実際上きわめて重要であって、個々の問題についてはかなりよく研究が進められている。化学工学でも粉体に関する操作は技術的に困難であり、しばしばプロセスの隘路を形成しその打開如何がプラント全体の死命を制することもあるほどである。したがって工場現場からの要望もあって、この方面からする個々の問題の研究は最近かなり進んだ。しかしながら粉体の科学としては、前述のような困難のために流体や連続固体に比べて基礎理論に立

脚した体系化ははなはだ遅れている。これまでの粉体の取り扱いには二つの異なった分野に分けられて来た。一つは Dallavalle の Micromeritics で、他は Topochemistry である。Micromeritics は主として粉体の物性と力学的性質を中心として体系化したもので粉体の粒径測定、粒度分布、物理的諸性質、工業的应用問題などの広範囲にわたる資料を一つにまとめたものである。これに対して Topochemistry は粉体表面の微細化学現象を対象として、たとえば固体触媒や吸着剤、粉末冶金、水硬現象、粉体反応などをその応用面としてもつものである。これらに対して最近牧島氏は粉体の問題は、粉体系の特徴をよく吟味した上で、統一的に取り扱わねばならないとして、前述の二つを包含した粉体の分野の問題を次の4種に分けて論じている。

(1) **内部摩擦による現象** 粉体が粒子の集合状態あるいは分散状態において、粒子相互間あるいは粒子流体間の摩擦を伴って生ずる力学的現象であって、静力学的現象と動力学的現象にわけられる。動力学的現象はたとえば、サイクロンや空気輸送のごとく粒子が運動する場合と、汜過のごとく粒子層が動かず流体の運動が主となる場合がある。静力学的現象には、粉体の堆積状態に関するもの、すなわち空隙率、安息角、粉体内部圧力などの問題が含まれている。

(2) **接触現象** これは粒子間の接触面を通して起こるもので電気伝導、熱伝導、物質移動などがあげられる。

(3) **散乱現象** 粒子の表面で光、音波などが反射散乱される現象であって、たとえば硫酸銅の青い結晶を粉砕すると白くなるのは光の散乱現象のためである。

(4) **表面現象** 粒子表面で他物質との交渉が生じ、比表面積が特に大きく役立つ現象である。例としては吸着、粉塵爆発、晶出、溶解、焼結、再結晶などが挙げられる。

以上は粉体問題の科学的な面からの体系化であるが、これに対してロンドン大学の Rose 氏は製造工業における粉体問題の重要性を強調し、次のような粉体技術者 (powder technologist) 養成のためのカリキュラムを提案している。

(1) 粉体材料の工業的利用： 粉末冶金、窯業、燃料、薬品、殺虫剤、肥料など粉体を取り扱う製造プロセスの概説

(2) 粉体の数学的性質： 粒度分布、平均粒径、粒子の形状係数、粉碎における粒度変化の統計的理論など

(3) 実際の粉体の諸特性： (2) の補足として実際の粒子の形状、粒度分布、凝集、内部摩擦、流動性、粉体内部の応力分布、粉体の電気的性質など

(4) 粒度, その他の性質の測定法: 篩分法, 沈降法, 風篩法, 吸着法, 透過法, 遠心法, 顕微鏡的方法など

(5) 粉体工学の単位操作: 晶出, 吸着, 粉碎, 分級, 混合, 乾燥, 焼結, 造粒, 分散, 輸送

(6) 工業塵埃, 空気および水汚染, 爆発など: 労働および公衆衛生法規, 爆発火災の防止法, 有害ガスおよび粉塵の除去法, 河川の汚濁対策

(7) 粉体に関する表面物理化学: 凝集, 付着, 分散, 触媒, 吸湿性, 粉碎性などに関連する諸性質と表面構造の関係を理解するための表面物理化学

(8) 統計: 正規分布その他の分布関数, サンプルリング, 誤差論, 混合の均一性の試験法など

(9) 粉体を取り扱う工場の設計と建設法: 集塵, 混合, 沈降, 貯蔵, 輸送, 粉末冶金, 錠剤製造などに関する機械装置の理論と工場の設計建設

(10) 実験: 粒度測定, 粉碎, 輸送, 集塵, 磁気分離, 流体中の粒子の運動, ホッパーからの粉体の流出などに関する実験

要するに粉体の個々の粒子の性質と粒子間の相互作用の関係を統計理論や表面物理化学によってこれを理解し, 工業上の粉体諸問題を適正に取り扱うための理論と技術を確実に体得した粉体技術者の養成を以上のカリキュラムによって達成しようというのである。

粉体の諸問題は先に述べたようにきわめて広範囲にわたっているが, 個々の特殊問題は以上のような体系中のどこかにその関連を見出して, 解決の緒口をつかむことができるであろう。そのような意味で上述のような体系全般に亘って高い水準の研究が一様に進められ, 内容の充実することが望ましい。従来, 粉体問題はその複雑さと困難さのために, ややもすれば特殊な問題の解決にとらわれて全般の見透しは誤まられがちであったが, 絶えずこのような全般的な関連を頭において個々の問題を取り扱い, 考えていくなれば, いわゆる視野の拡大によって他の問題から得られる種々のヒントにより案外容易に問題が解決できることもあるであろう。最近このような総合的考察と体系化に向かって進んでいることはまことに意義深いことであり, 注目すべき動向と考えられる。

5. 粉体工学最近の進歩

以上粉体問題全般について述べたのであるが, 次に粉体工学最近の進歩について述べてみたい。

(a) 粒子の形態と粒度分布について まず粒子の形状については電子顕微鏡による観測と種々の平均粒径および比表面積などの関係についての研究が著しい進展を示し, また多くの異なった原理にもとづく粒度測定の方法

方法や装置で同一材料を測定した結果の相互関係から粒子の微細構造まで吟味されているが, これらについては後ほど京都大学化学研究所, 水渡英二氏のお話がある。

(b) 粉体の架橋について Janssen, 青木らの研究がすぐれている。青木らは付着性および非付着性粉体の架橋について多くの実験を行ない, 流出口径を D , 粉体層の底圧を P , 粉体充填密度を γ とすれば P/γ の最大値 $(P/\gamma)_m$ と D とは比例関係にあり, 流出係数を $\zeta = (P/\gamma)_m/D$ として各種のホッパーについて ζ の値を大きい方から順に並べてみると, それらは付着性粉体の架橋傾向列と全く同一になることなどを明らかにしている。

(c) 凝集 粉体の凝集については Rumpf 氏らの研究がある。粒子は粒子相互の接触や衝突によって凝集し, また管路や器壁に付着する。Rumpf 氏は凝集の原因を付着水分による毛細管作用, 再結晶による粒子間の架橋, 帯電や Van der Waals 力による粒子間の引力, バインダーによる付着力などに分類し, 多くの場合, 見掛け結合強度は, 粒径に逆比例することなどを算定している。また各種粉体取扱装置の付着, 凝集に関する諸問題や造粒技術について多くの研究を積まれている。Rumpf 氏はドイツの Technischen Hochschule Karlsruhe 化学工学科機械的操作関係の担当教授であり, のちほど 'Some basic studies of agglomeration' と題してお話をしていただけるはずである。

(d) 流動化 粉体の取り扱いについては, aeration の応用の進歩がめざましい。粉体の取り扱いが気体, 液体に比べて困難であるおもな原因は流動性が悪いからである。最近粉体にガスや空気を吹き込み, これを流動化し液体と同じように取り扱う技術的進歩が著しく airslide, jetfeeder, aeration unit などの利用がめざましい。

(e) 粉碎 粉碎における粒度分布については, 従来最大値がただ一つであるような単純な分布を考え, 粉碎の進行とともにその山が全体的に細かい方へ移行していくという考え方が多かったがこのような推定は誤りであり, 粒度の細かい方への移行は連続的でなく一つの山から他の山へ不連続的に移行することが Heywood らによって指摘された。粉碎がある程度まで進行すれば, それ以上の粉碎が著しく困難になり, いわゆる粉碎限界粒径の存在することがこれまで多くの人々によって認められており, その原因についても緩衝作用, 粒子のモザイク構造, 粉碎速度と凝集速度の相殺など種々の機構が考えられている。最近高橋氏らはミクロン以下まで粉碎した粒子の電子顕微鏡観察によって, その限界粒径の明瞭な存在を確認し, しかも X 線実験によってこの程度

の粉碎によっても結晶構造がかなり変化することを示し、その構造変化と塵肺における毒性との関係をも言及している。粉碎エネルギーについては、従来多くの研究が行なわれているが、最近開回路ボールミルの所要動力が、ボールおよび壁面への微粉付着が生じはじめる領域とそれ以前とはいかなる関係があるかなどについて鈴木氏は多くの実装置について実験を行ない顕著な成果を挙げている。また Rose 氏のボールミル、振動ボールミルに関する成果は一般に高く評価されている。非常に細かい超微粉砕については最近ジェット式粉砕機の性能が注目されるようになった。筆者らの実験によれば、その処理量が所要動力の 2.5 乗に比例し、動力を高めると急激に処理量が増大することがわかった。

(f) 固体混合 固体混合については、最近多くの研究が行なわれているが、その混合機構は Convective, Diffusive の 2 種から成り、場合によってはこれら二つがかなり明瞭に各段階にわかれること、混合速度係数によって混合機の能率がよく表わされることなどが明瞭にされた。このような混合機構の解析と各種混合機の性能について Weidenbaum 氏は近く出版予定の Perry のハンドブックの原稿の要約を送ってこられ、それについてのちほど大山教授が代ってお話される予定である。Weidenbaum 氏はアメリカの Corning Glass Works の研究者である。

6. 結 語

以上 Micromeritics 全般の展望として、粉体工学の意義、化学工業における粉体問題の所在、粉体の諸特性、粉体工学の体系化、それに粉体工学最近の進歩について述べた。ここで述べなかった集塵、汙過、その他の機械的分離操作も当然マイクロメリテックスの領域に入るのであるが、その工業上の重要性にかんがみ、今回は別のシンポジウムで討議が行なわれる。

粒子の特性と粉体粒度

水 渡 英 二*

1. 緒 言

粉体を構成する粒子の大きさと分布、さらにその形態が粉体材料の性質に及ぼす影響は誠に大きい。一般に粉体と称せられるものも、その粒子の大きさは肉眼的なも

のから数 μ の超微粉体に至るまであり、形状も多種多様である。これらの粉体粒度を測定する方法や装置が数多く研究されている。粉体の粒度測定には、異なった原理にもとづく方法や装置で同一試料を測定した結果の相互関係を明らかにすることが重要であり、それによって粉体粒子の性質や状態、さらに単独の測定法では得られない粒子の微細構造まで知ることが可能である。そのために各測定法の誤差を最小に止める条件の研究と、測定結果の物理的意味に対する十分な理解が必要である。

まずわれわれの考案した粒度測定装置を述べ、各種の粒度測定法により種々の粉体の粒度を測定し、その結果から粉体粒子の形態、表面状態、二次的な集合状態などの粒子の特性と粉体粒度の関係を吟味する。

2. 考案した粒度測定装置

沈降法と透過法の新しい装置を数種考案して製作し、本実験には主としてこれらを用いた。

2・1 沈降天秤式自動粒度測定器 (Sedimentograph, II 型)

筆者ら¹⁾は沈降天秤を用いた自動記録式測定装置を考案し、Sedimentograph と名付けた。試料粉体の所要量は 6~7gm であり、沈降管の長さは微粒子用 2cm、一般用 8cm、粗粒子用 30~100cm と簡単に交換でき、記録用ドラムの回転速度は 1 回転 15min, 30min, 1hr, 3hr, 6hr, 12hr の 6 段に変速できるので、測定しうる粒度範囲はかなり広い。

2・2 トーション秤式自動粒度測定器 (Sedimentograph, III 型)

天秤の感度を上げるためにトーション秤を用いた装置

A: 沈降管 F: ラチェット板
C: 天 秤 H: ペ ン
D: マグネット K: 回転ドラム
W: トーション線 L₁, L₂: ランプ

Fig. 1 Sedimentograph III の原理図

* 京都大学化学研究所

を作った²⁾。原理図を Fig. 1 に示す。試料所要量は 1 ~ 2gm でよく、階段数は 50 で、1 段階の沈降量は 10mg である。

2・3 恒圧通気式平均粒度測定装置

空気透過法の装置としてよく利用されている Blaine 法は、粉体層の両端における空気の圧力差および通過する空気量が限定されるので広範囲の粒度の測定は困難であり、Lea-Nurse, Gooden-Smith (Subsieve Sizer) などの方法は排気ポンプまたはコンプレッサーの補助装置を必要とし流速の測定範囲があまり広くない。これらの点を補った新しい装置を製作した³⁾。その構造を Fig. 2 に示す。

A: 粉体充填筒
I: コック
Fig. 2 恒圧通気式比表面積測定装置

2・4 自動式平均粒度測定装置 (Autosizer)

空気透過方式に自動計算回路を付加してスイッチ一つ押せば、測定操作を自動的に行ない、短時間に平均粒子径がメーターに直示される装置を作り、Autosizer と名付けた⁴⁾。

2・5 直示式平均粒度測定装置 (Permeasizer)

圧力計による直示式平均粒度測定装置 Permeasizer を作った。従来の空気透過法の装置では圧力差を一定としたときの透過速度を測定しているのに反し、一定流速の空気を粉体充填層に通じて、そのときの圧力降下を測定するものである。原理図を Fig. 3 に示す。

A, B: 送風シリンダー, C: 三方コック, D: 粉体充填筒, E: アネロイド気圧計, F: クラッチギヤー, M: 同期電動機
Fig. 3 Permeasizer の原理図

Fig. 4 重質炭酸カルシウム-N
(カーボンレプリカ法による電子顕微鏡写真 ×10,000)

Fig. 5 重質炭酸カルシウム-N の粒度分布

3. 測定方法およびその吟味

3・1 電子顕微鏡法 (統計的粒子径)

主として電子顕微鏡写真を撮影した。単なる投影像のみでなく、シャドウイング法やカーボン・レプリカによるスケガラ法などにより粒子の立体的形態、表面構造および凝集状態などを正確につかみ、粒度を議論するときの基本とした。

個々の粒子径の取り方としては、球体に近いものは円形相当径をとればよいが、短形や棒状のものは二軸平均径または外接矩形相当径を用い、一般には定方向径 (Green 径) を用いた。なお、単なる集合体、凝集体の区別は困難であるので、測定は一次粒子について行ない、

単粒子の推定は Power 測定法によった。

粒度分布曲線から平均粒子径と標準偏差とを計算した。1 例として重質炭酸カルシウムの電子顕微鏡写真 (カーボン・レプリカ法) Fig. 4 から求めた粒度分布図と、それから計算した種々の平均粒子径を Fig. 5 に示す。モード径 d_{mod} が最小で d_4 ($\sum nd^4 / \sum nd^3$) が最大で両者の間にかかなりの差がある。粒度が比較的均一で正規分布に近い試料ではこの差は小さいが、分布の広いときには d_{mod} と d_4 の比は 10 倍以上にも及ぶことがある。

Fig. 6 酸化鉄 T (電子顕微鏡写真 ×20,000)

Fig. 7 酸化鉄 T の粒度分布

Fig. 8 自動粒度測定器による沈降曲線とそれから得られた粒度分布図

Fig. 9 炭酸カルシウム A
(カーボンレプリカ法による電子顕微鏡写真 ×100,000)

このように種々の平均粒子径のうち透過法や吸着法による比表面積との比較は $d_s (\Sigma nd^3 / \Sigma nd^2)$ を、沈降法による有効径との比較には d_i を用いた。ただし粒度が均一であれば d_s と d_i との差は大きくない。なお、粒子の形態が球体または立方体から著しくはずれてくると、単粒子径のとり方で粒度分布曲線の形が異なり、したがって平均粒子径も異なってくる。たとえば Fig. 6 に示した酸化鉄 T の柱状粒子について定方向径、二軸平均径、外接矩形相当径による粒度分布曲線は Fig. 7 のごとくで、それから求めた平均粒子径 d_s の値は 1.29μ 、 0.83μ および 0.46μ でかなり異なった。

3・2 液相沈降法 (有効径)

沈降法の基礎となるのは Stokes 式である。

粒子の大きさ d に応じた沈降時間と沈降量との関係、すなわち沈降曲線を求め、それを解析して粒度分布曲線 (重量分布) をうる。前述の沈降装置-自動粒度測定器により自動的に画かしめた沈降曲線およびそれから得た粒度分布曲線の一例を Fig. 8 に示す。

沈降法による粒度測定で最も重要な問題は、粒子の凝集をなくし単粒子に分散して沈降することである。これが大きな誤差の原因となるので、分散媒および分散剤の吟味が必要である。

まず Fig. 9 に示す炭酸カルシウム A について分散媒を水とした懸濁液に対する種々の分散剤の影響を検討した。ある分散剤の種々の濃度を加え、沈降自動粒度測定器により粒度分布曲線を得て、それから見掛けの平均粒度を求め、一方目盛付き試験管中を沈降せしめ最終の沈降体積すなわち沈降比容を求めた。この両

者と分散剤濃度を図示すれば Fig. 10 のごとく沈降比容が最小の場合に平均粒子径 (見掛け粒度) が最小になる。さらに種々の分散剤について、沈降比容したがって見掛け粒度が最小になる濃度、すなわちその分散剤の最適濃度は表 1 のごとくである。

これから解るようにメタリン酸ナトリウム (Graham 塩) の 0.2% 溶液が分散剤として最良で、それによる平均粒度 1.4μ は電子顕微鏡による値 (1.51μ)、透過法 (1.45μ)、液層吸着法 (1.5μ) による値と大体一致するので、ほとんど完全に分散していることがわかる。この 0.2% メタリン酸ナトリウム水溶液は CaCO_3 のみならず、多くの塩類 (CaWO_4 , MgCO_3 , BaCO_3 , BaSO_4 など

表 1 分散剤とその最適濃度(分散媒:水)

分散剤	濃度	沈降比容 [cc/g]	空隙率 [ε]	平均粒度 [μ]
メタリン酸ナトリウム	0.2%	1.6	0.765	1.4
メタリン酸カリウム	0.2 "	1.7	0.783	1.4
水 ガ ラ ス	0.5 "	1.8	0.795	1.5
ピロリン酸ナトリウム	0.01 mol	2.0	0.815	2.9
クエン酸ナトリウム	0.01 "	2.2	0.832	3.4
リン酸ナトリウム	0.01 "	2.4	0.864	3.8
酒石酸ナトリウム	0.1 "	3.0	0.877	3.8
硫酸ナトリウム	0.01 "	3.1	0.882	—
酢酸ナトリウム	0.01 "	3.1	0.884	—
塩化ナトリウム	0.1 "	3.1	0.884	3.8
水酸化ナトリウム	0.1 "	3.2	0.885	4.1
な し	—	3.4	0.911	—

ど), 酸化物 (CuO , ZnO , Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , ZrO_2 , PbO , Pb_3O_4 , Fe_2O_3 など) および粘土鉱物, 鉱石粉砕物にも最適であった。

セメントの場合⁵⁾には分散媒として水は使用できないので一般に白灯油が用いられる。分散剤として適当な界面活性剤とその濃度を試験した。オレイン酸濃度 0.005~8mol で比表面積が最大となり, ここでセメント粒子は最もよく分散され, これより多くとも少なくとも凝集が起こる。この濃度は液相吸着法により求めたオレイン酸分子がセメント粒子の表面で単分子層をつくる濃度と一致する。他の界面活性剤のうち Petrobase 1B 0.2%, SA No. 6 (Alkyl naphthalein sulphonide) 1.0% が良好なものであった。なお, カーボン, グラファイトについてはエチルアルコールに 0.2% オレイン酸ソーダが, 塩化ビニールには水に 0.3~1% Monogen が適していた。

3.3 空気透過法(比表面積)

透過法の基本となるのは Kozeny-Carman 式であるが, 一番問題となるのは粉体層のつめ方である。ここでは種々の粉体について空隙率と比表面積との関係を調べた。その結果は Fig. 11 のごとく空隙率が小さくなるほど, 比表面積が大となり次第に一定値に近づき, この値が他の測定法による値と一致した。したがってできるだけ緊密につめた状態で測定すればよい。圧力差は大きい方がよいが透過時間が短かすぎて測定誤差が増すおそれのあるときは圧力差を適当に小さくした。充填層の長さはあまり大きいと不均一になり誤差の原因となるので 0.5~1.5cm になるよう粉体量を選んだ。

3.4 液相吸着法(比表面積)

試料粉体 2gm を真空中で 300°C 数時間加熱処理し, 適当な濃度のステアリン酸のベンゼン溶液 30cc を加えて振盪し, 12 時間放置して吸着平衡になった後, 遠心器にかけ粉体を完全に沈降させ, 上澄液中のステアリン酸の濃度を測り, その吸着量を求めた。

Fig. 10 クエン酸ナトリウムの分散効果

Fig. 11 透過法における空隙率 ϵ と比表面積の関係

BET 式により単分子層吸着量の値を求め, ステアリン酸分子の断面積を $21\text{\AA}^2$ として粉体の比表面積 S_w , さらに平均粒子径 ($d_{ad}=6/\rho S_w$) を求めた。なお, 吸着質としての種々の脂肪酸, 種々の溶媒, 温度などの影響について吟味した⁶⁾。

4. 各種粉体の粒度の測定結果

以上のような電子顕微鏡法, 液相沈降法, 空気透過法, 液相吸着法の四つの方法を用いて種々の粉体の粒度を求めた結果を表 2 に総合した。セリサイト, カオリン, 細砂は天然物, 炭酸カルシウムの重質, セメント, ろう石粉砕クレーは粉砕物で不定形であるが, 他のものは化学反応により製造された粉体で, 球状(粒状), 棒状(紡錘状), 板状など一定の形態をしているものが多い。

各測定法はそれぞれ原理を異にしており, 得られる粒度の物理的意味も同じでないで, 同一粉体であっても測定法が異なれば結果は必ずしも一致していない。粉体粒子の特性と粉体粒度との関係として得られたおもなも

Fig. 12 硫酸バリウム-L (電子顕微鏡写真 $\times 1,500$)

のは次のごとくである。

(a) 粒子の形態が球体に近く、比較的粒度の均一な粉体

各測定法による値は大体よい一致を示す。亜鉛末 N,

炭酸カルシウム-U, 硫酸バリウム-L (Fig. 12), ガラス球などがその例である。このような場合でも粒子径が 0.5μ 以下になると沈降法ではブラウン運動などによる誤差が大きくなり、また透過法では層流域での Kozeny Carmen 式では誤差が大きくなるので分子流を考慮する必要がある⁷⁾。

(b) 粒子の形態が球体から著しくはずれた粉体

顕微鏡法では粒子径の取り方により粒度のかなり異なることは前に酸化鉄 T の棒状粒子について述べた。酸化鉄 T, 炭酸カルシウム, PC, A, B, L も棒状または紡錘体であるが、二軸平均径によるものが他の測定法の結果とよい一致を示した。しかし他の方法でも球状粒子と仮定して求めた値であるから形態が著しく球状からはずれたときは必ずしも一致しない。特にカオリン、セリサイト (Fig. 13) などの薄片状粒子では、各測定法の値には比例的関係は見られるが絶対値は非常に異なる。この

表 2 各種粉体の各種測定法による粒度比較

No.	試料	顕微鏡法			沈降法		透過法	吸着法
		形態	平均粒度 d_1	標準偏差	平均粒度 d_2	平均粒度	標準偏差	
1	亜鉛末 -H	粒状 G*	2.37	1.36	4.09	5.3	3.6	3.7
2	酸化亜鉛 -S	針状 G	0.481	0.168	0.600	0.56	0.31	
3	酸化鉄 -T	棒状 M	0.492	0.31	0.836	0.56	0.21	0.62
4	" -N	(二次) G	{ P 0.297 S 11.23 }	{ P 0.155 S 10.6 }	{ P 0.520 S 14.8 }	12.1	5.2	1.44
5	" -K	粒状 G	0.106	0.043	0.147			0.64
6	酸化チタン-TF-53C	粒状 G	0.141	0.052	0.175	0.56	0.18	0.302
7	" I-R	棒状 M	0.330	0.174	0.420	0.56	0.17	0.424
8	" I-A	粒状 G	0.130	0.056	0.172	0.30	0.17	0.339
9	" F-A	" G	0.155	0.041	0.174	0.44	0.32	0.343
10	" , クロノス	" G	0.136	0.056	0.174	0.46	0.23	0.187
11	" Dupon	" G	0.316	0.09	0.382	0.52	0.31	0.48
12	" TR-88	" G	0.300	0.108	0.387			0.309
13	炭酸カルシウム-S	粒状 G	0.057	0.027	0.066			(0.194) 0.065*
14	" -PC	紡錘形 G	0.276	0.101	0.322			(0.632) 0.212*
15	" -A	" M	1.06	0.53	1.51	1.40	1.0	1.5
16	" -B	" M	1.51	0.78	1.90	1.84	1.2	1.6
17	" -L	" M	2.16	0.97	2.98	2.62	1.7	2.6
18	" -U	" G*	3.5	0.46	3.78	3.62	0.47	3.3
19	" -局方-S	紡錘形 M	5.2	1.2	5.9	4.18	2.92	5.0
20	" -重質-H	粒状 G	4.6	2.5	6.7	4.9	3.6	3.4
21	" -重質-N	" G						
22	硫酸バリウム -S	粒状 G	0.30	0.13	0.31	0.49	0.24	
23	" -L	" G	4.2	1.4	5.50	5.23	1.49	5.60
24	セメント -B					10.2		6.3
25	" -C					11.4		7.5
26	" -No. 1					11.0		7.1
27	" -No. 2					10.7		7.2
28	" -No. 3					8.0		5.8
29	セリサイト -F	薄片状 M	0.98	0.43	1.34	4.1	3.9	0.66
30	" -205	" M	1.13	0.62	1.78	5.1	3.8	0.78
31	関白カオリン	板状 G	0.61	0.29	0.89	0.56	0.27	0.26
32	蠟石粉砕クレー (製紙用)	板状 G	2.2	1.9	6.1	4.6	3.1	1.6
33	" (農薬用)	" G	8.2	7.3	21.2	14.6	13.6	2.8
34	細砂 -1	粒状 G*	119	16	128			143
35	" -2					13.3	8.01	12

G: 定方向径

M: 二軸平均径

* 光学顕微鏡

+ 分子流補正

Fig. 13 セリサイト (電子顕微鏡写真 $\times 6,000$)

Fig. 14 酸化鉄 N
(電子顕微鏡写真 左 $\times 2,000$, 右 $\times 20,000$)

ような薄片状粒子では、顕微鏡による厚さの測定が困難なために投影像の二軸平均径によっているので、体積または重量平均径に換算すればはるかに小さい粒度を示すことになる。形状が不定で不均一な粉体では、各測定法による値は一致しないことが多い。分級の不完全な粉砕物などはこれに属し、一般に透過法または吸着法、顕微鏡法、沈降法の順に大きな粒度が得られる。

(c) 強固な凝集粒子

顕微鏡法のところで述べたように凝集粒子でも Power 法に従って単粒子の径を求めている。しかし沈降法では凝集粒子を 1 個の粒子とした結果が出ている。酸化チタンはその例で、製造過程の焼成工程により一次粒子が 2, 3 個凝集している。したがって顕微鏡法による粒度が最小で、透過法と吸着法による粒度がそれに次ぎ、沈降法による値が最大である。

酸化鉄 N はシュウ酸鉄の分解により生成したもので Fig. 14 のように母塩の短形板状形態を残した形骸粒子である。生成した酸化鉄の単粒子（一次粒子）を求めると $d_1 = 0.297$ となるが、もし形骸体（二次粒子）の大きさを求めると $d_1 = 11.23$ となる。沈降法では後者が求まり、吸着法では前者の値となる。透過法では中間の値となった。

Fig. 15 炭酸カルシウム粒子の平行連晶構造
(カーボン・レプリカ法による電子顕微鏡写真 $\times 10,000$)

また炭酸カルシウムの紡錘形のあるものは Fig. 15 に示すように生成初期に生成する正方体結晶の凝集粒子（平行連晶構造）である。かかる場合には吸着法による値が他の方法による値と異なる。この他一般に粒子表面に凹凸や亀裂のある場合も同じである。

〔付 記〕 本実験は主として荒川正文君のなしたものでその努力に感謝する。

文 献

- 1) 水渡英二, 荒川正文: “化研報告”, 19, 43 (1949), 22, 7 (1950)
- 2) 荒川正文: “粉碎”, 5, 14 (1960)
- 3) 水渡英二, 荒川正文, 高橋允: “工化誌”, 59, 307 (1956)
- 4) 荒川正文, 水渡英二: “材料試験”, 7, 267 (1958)
- 5) 水渡英二, 荒川正文, 荒川照: “セメント技術年報”, 7, 126 (1953)
- 6) 水渡英二, 荒川正文, 荒川照: “日化誌”, 75, 596, 599 (1953)
- 7) 荒川正文, 水渡英二: “工化誌”, 63, 556 (1960)

粉体の凝集に関する基礎的研究*

Hans Rumpf**

粉体の凝集現象と、凝集における粒子の結合機構 ——はしがきとして

化学工学の分野における、粉体の処理は重要な操作であるが、凝集現象を除外して取り扱うことは不可能である。この凝集現象は、たとえば、汙過、集塵のごとき機械的分離操作においては、粒径の増大という面から、好都合ではあるが、他方また、粉体の一次粒径を問題とする、分級、粉碎、あるいは混合などの操作においては、

* Some Basic Studies of Agglomeration

** Technische Hochschule Karlsruhe

それぞれの効果を減殺せしめるという面から、きわめて好ましくない現象ではある。

最近、粉体の処理にあたって、防塵、逸散損失の防止、充填材としての特性を良好ならしめる点、粉体の付着防止などの、種々な利点を目的として、原料、中間製品、あるいは最終製品を、人為的に凝集せしめて整形する、いわゆる、造粒操作が採用されるようになった。しかし、それぞれの用途によって、造粒体の形状、寸法その他の諸性質に対する要求は異なり、したがって、適当性質の造粒を行なうための条件の選択は、粉体自身のもつ造粒性と関連して重要な問題であり、さらに、造粒された粒が、使用状態で受ける荷重に耐えうる強度をもつべきであることは、すべての性質に優先して考慮されなければならない要素であることは当然のことである。

粉体粒子の凝集するに際して、粒子間を結合する機構としては、

a) Fig. 1a に示すごとく、焼結、化学反応、熔融などによって生ずる、物質そのものによる架橋現象

b) Fig. 1b に示すごとく、部分的な液体による架橋現象、あるいは、Fig. 1c に示すごとく粒子間隙すべてに液体が充満しているような、流動性をもった液体による粒子間の作用力、すなわち、毛細管結合力

c) 粘結剤、あるいは、吸着層によるごとき、粘着力あるいは付着力による、固定した架橋結合

d) 粒子間距離 $100 \text{ \AA}$ 程度、あるいはそれ以下で作用する、Van der Waals の力とか、静電荷による相互の引力のごとく、物質分子の特性による、粒子間引力

e) 粒子間の閉鎖状結合、機械的なからみあい現象などが考えられよう。

凝集粒の強度を問題とするにあたり、本報告で、特に抗張力を取りあげた理由は、いかなる場合においても、凝集粒を破壊にみちびく原因が引張り応力であり、かつ、粒子の凝集に支配的な役割を演ずる粒子の結合機構を仮定することによって、近似的に抗張力を計算できるという二点にある。

強度計算にあたり、粒子間の結合が、粒子どうしの接

触のみによる場合と、粒子間に、強度を支持する物質の介在する場合とに区分されねばならないのは当然である。

凝集粒の理論的抗張力

I 部分的な結合による凝集

a) 基礎的關係 理論的な平均抗張力を導出するために、凝集粒のモデルを考え、(1) 応力断面における粒子間結合数はきわめて多く、(2) その結合部は、断面ならびに空間の方向に統計的分布をなしており、(3) 凝集粒中の粒子の分布は統計的であって、(4) 凝集に有効な粒子間結合力は、その平均値の近傍に分布する値をもつものと仮定する。Fig. 2 の点線で示す理想的破断面と、実線で示す実際の破断面に対して、凝集粒を構成する粒子が、均一粒径 d なる球であるものとし

σ_z = 抗張力

n_F = 単位断面積当りの平均粒子数

k_0 = 破断面にある粒子 1 個当りの結合の数

H = 接点の結合力

ϵ = 凝集粒全容積 ϵ に対する空隙率

ϵ_F = 破断面の空隙率

とすれば、統計的にみて、 $\epsilon = \epsilon_F$ でなければならないから、平均配位数、すなわち、ある球と隣接する球群との接点数の平均を k とすれば、Fig. 2 の点線から、

$$\sigma_z = n_F \cdot k_0 \cdot f_0 / O_m \cdot H \quad (1)$$

ここに、 f_0 / O_m は、結合の空間的分布に対する投影係数である。

したがって、粒を構成する球が均等分布であると仮定して、 n_F 、 k_0 および f_0 / O_m を計算すれば、抗張力 σ_z は

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

で表示され、これが基本式である。

粒径分布の測定から d が、また、充填率の測定から ϵ が求められるが、Smith が鉛の均一粒径粒子で測定した空隙率と配位数の関係から

$$k \cdot \epsilon = 3.1 \approx \pi$$

とすれば、(2) 式は次のごとく表現することができる。

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

b) 種々の結合に対する抗張力 毛細管結合力あるいは液体架橋、Van der Waals の力、静電荷などを計算すれば、抗張力を導出することができる。

1) 毛細管結合力あるいは液体架橋の

Fig. 1 Bonding mechanisms of size enlargement

Fig. 2 The ideal (---) and real (—) fracture area

場合 Fig. 3 のとき液体架橋を次元解析し, α を液体の表面張力, δ を接触角, β を液環の作る扇状角とすれば,

$$H = \alpha \cdot d \cdot f(\delta, \beta) \quad (4)$$

Fisher¹⁾ は計算によって $f(\delta, \beta)$ を求めたが, Newitt ら²⁾, Batel³⁾ らは, 粒子表面が完全に濡れた場合 ($\delta = 0$), β が 10° から 40° の間に変化するとし, 次の関係を求めている。

$$f(\delta, \beta) = 2.2 \sim 2.8$$

2) Van der Waals の力による場合 Lippschitz の理論から, Fig. 4 のごとく, 粒子間距離 $a < 1000 \text{ \AA}$ の範囲で, 二球の結合力は,

$$H = \frac{A}{24} \cdot \frac{d}{a^2}$$

で求められ, 定数 A は第一近似として単位体積当りの酸素原子数によって決定される。石英の場合 $A = 10^{-12} \text{ dyn} \cdot \text{cm}$ である。

以上の関係から, 抗張力 σ_z は (5) 式で求められる。

$$\sigma_z \approx 8.3 \cdot 10^{-20} \frac{1}{a^2 \cdot d} \quad [\text{kg/cm}^2] \quad (5)$$

粒子表面の含水率は, Van der Waals の力による粒の抗張力に影響を与え, その下限は, 粒子表面の単分子吸着層としての含水率から, 上限は, 変形が可能になる厚みの含水率の範囲と考えられる。

3) 静電気による結合 イオン結晶格子のごとく, 正負の荷電をもつ粒子が交互に配列していると仮定し, 球の表面電荷が最大, かつ一様に荷電されている場合を計算すれば,

$$\sigma_{z\text{max}} = 16 \cdot 10^{-5} \quad [\text{kg/cm}^2]$$

程度の値となるが, この値は, 他の結合機構による値よりもはるかに低く, 粒の強度に対しては支配的ではない。

II 力を荷担する物質が介在する凝集

a) 流動性をもった液体

1) 凝集粒の空隙が完全に液体で充満されている場合

この場合の毛細管圧力 p_K は, 空隙毛細管の平均水力半径を m , 液の表面張力を α , 接触角を δ とすれば,

$$p_K = (\alpha/m) \cos \delta \quad (6)$$

粒子の比表面積を O とすれば

$$m = \alpha/O(1-\epsilon) \quad (7)$$

粒径が均一であれば,

$$O = 6/d \quad (8)$$

したがって, 次式が求められる。

$$p_K = 6 \cdot \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \cdot \frac{\alpha}{d} \cdot \cos \delta \quad (9)$$

一方, Hains⁴⁾ と Newitt ら⁵⁾ は, $\delta \approx 0^\circ$ の場合, 表面

Fig. 3

Fig. 4

積平均径 d を用い, 砂-水系の実験から, 毛細管吸込圧を次式のごとく求めている。

$$p_E \approx 8 \cdot \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \cdot \frac{\alpha}{d} \quad (10)$$

一粒に加えられる引張り力が, 液体の表面張力にうち勝ち, さらに, 毛細管圧力が減少した場合, $\cos \delta = 1$ と考え粒の円周を U , 断面積を F とすれば

$$\sigma_z = p_K + \frac{U\alpha}{F} \quad (11)$$

$$\sigma_z = p_K \left(1 + \frac{U}{Fm} \right) \quad (12)$$

断面 F 内の粒子数はきわめて多く, したがって, $m \ll U/F$ から,

$$\sigma_z \approx p_K \quad (13)$$

実験式を用いることにより, この場合の抗張力は

$$\sigma_z = 8 \cdot \frac{1-\epsilon}{\epsilon} \cdot \frac{\alpha}{d} \quad (14)$$

液体架橋に関して求めた (2), (4) の 2 式と, 空隙内の完全充満に関して求めた (14) 式とから

$$\frac{\sigma_{zB}}{\sigma_{zC}} = \frac{9 \cdot k \cdot \epsilon}{64 \cdot \pi} \cdot f(\delta, \beta) \quad (15)$$

$k \cdot \epsilon \approx \pi$, ならびに, $f(\delta, \beta) = 2.2 \sim 2.8 \approx 2.5$ から

$$\frac{\sigma_{zB}}{\sigma_{zC}} = 0.31 \sim 0.39 \approx 0.35 \quad (16)$$

2) 空隙が部分的に液体で充満されている場合 空隙部分の ϕ だけに液体が充満し, 部分的には架橋による結合, 部分的には空隙内に液が充満しており, 完全に液体の充満した面がない場合には, $\phi = \psi_B$ と考え, 液体の分布が均一の理想化された状態であると仮定すれば $\sigma_z = \sigma_{zB}$, そして, さらに液体が加えられてゆき, 完全充満の $\phi = \phi_c$ においては, $\sigma_z = \sigma_{zC}$ となる。この中間の領域での力の移動は, Fig. 5 の線 -1 にみられるように, 架橋の破壊が発生せず, 予定された σ_{zB} の値まで連続的に σ_{zB} が増加する場合は, 強度は液量の増加と直

Fig. 5

Fig. 6 Theoretical tensile strength of agglomerates
 curve 1 fluid bridges
 curve 2 completely filled void volume

線関係をもち、 $\psi=1$ に対する σ_{zc} に到達する。 $\sigma_z > \sigma_{zB}$ で架橋が切断すると、強度は、空隙の完全充満部分のみによることになり、 $\sigma_z = \sigma_{zB}$ で、($\psi = \psi_B$, $\sigma_z = 0$) と ($\psi = 1$, $\sigma_z = \sigma_{zc}$) の間に引いた、直線 -2 にのることになる。

b) 固定している結合 結晶化の過程にある塩類とか、加圧造塊時における、Van der Waals 結合に対しては、抗張力の大きさば算定が可能である。この場合、

きわめて高い圧力によって粒子表面が一定距離内に接着されるときは、結合力は粒径とは無関係であるものと、あらっぽい考えではあるが、推定しえよう。

III 理論計算結果の総括

Fig. 6 は、横軸に粒子の粒径を、縦軸に抗張力をとって示した以上の計算の結果である。

図中、水平線で二分した、I の領域は、加圧造塊のごとく、粒子表面の接触によって結合がなされる範囲、下側の II の領域は、塩類の晶出などによる、やや弱い結合の範囲を示すものである。

造粒体を構成する粒子の径によって強度が変化する、種々の結合機構の相違による強度の変化が、図中の傾斜線であって、 10μ 以下の粒子では、Van der Waals の力が支配的である。ここに示した、限界を示す傾斜線は、粒子間距離 $a=30\text{\AA}$ の計算値であり、B 領域は、吸着層の影響で Van der Waals の結合力が、きわめて大きくなった場合を、C 領域は、毛細管力による二つの機構、すなわち、1 では液体架橋、2 では完全充満の場合を、それぞれ示す。この上の D 領域は、焼結、あるいは、粘結剤を用いた場合に対する強度範囲を示す。

このような計算結果は、造粒体の大凡の強度の推定を可能とし、また、種々の造粒法によって期待される粒の強度に関し、その方向づけとして、有効な結合機構の予測と、そしてまた、今後に残された研究課題を示唆するものといえよう。

実験の結果と考察 ならびに結論

毛細管結合力による造粒体の強度に関する詳細は別報にゆずる⁵⁾として、ここでは、風篩分級した石灰石粉体を用い、液体の表面張力 $\alpha=72\text{dyn/cm}$ 、粒の空隙率 $\varepsilon=0.35$ に対して Table 1 に示すような粒径範囲のものを、 $800\text{mm}\phi$ の造粒機によって造粒し、実験した結果について述べる。

5μ 以下の粉体の場合は、形のそろった造粒が不可能であったため、粗石英粉体を $1/3$ 程度混合することによ

Fig. 7 Tensile strength of limestone pellets

り整形した。この場合、強度は石英粒子の外周を包囲する石灰石粒子のみについて考えればよい。

理論計算で求めた抗張力 σ_{zC} と σ_{zB} とは、Fig. 7 の実線のごとく、両対数プロットで粒径に対し 45° の勾配となり、 σ_z の実測値を、粒子長径分布の最大値 d_1 と、表面積平均径 d_0 とに対してプロットした。図中、縦線は d_1 に対する、また、矩形は d_0 に対する σ_z の分布で、黒い矩形は、 σ_z の平均値を示す。実測値は、部分的に σ_{zB} より高く、つねに、 σ_{zC} より低い値を示し、理論値の 45° の勾配に対し、かなりよく対応している。

Fig. 8 は、液体の充満率 ϕ と粒の空隙率 ϵ を変化せしめた場合の実験結果で、 $\phi_B = 0.2$ の理論値を参考線として挿入した。実験1は、含水粒を室温で乾燥したもの、実験2は、粉体と水の割合を任意に変化させたものについての、それぞれの結果で、実験1の測定値が ϕ に関してさほどの影響を受けていないのは、乾燥による架橋結合の弱まりのためと考えられ、実験2の結果は、理論線によく対応している。

圧壊試験は容易であるが、試験当初に発生する亀裂の影響で荷重の測定が不正確なものとなるが、これまでに行った10コの実測では、 σ_z の値が $0.3 \sim 0.9 \text{ kg/cm}^2$

Fig. 8

Table 1

Fraction	d_1	d_0
<5 μ	3.45	3.81
5~10 "	5.6	7.63
10~20 "	11.3	13.5
15~25 "	18.0	18.5
25~40 "	28.4	28.5
40~60 "	48.5	39.6

の範囲で σ_D / σ_z の値は、およそ1.44の一定値を示している。ただし、うち4点が1.23付近に一群となっておりこれについての説明は、まだなされていない。

[沢 昌 恭* 抄訳]

参考文献

- 1) Fischer, R. A.: *J. Agric. Sci.*, 16, 492 (1926)
- 2) Newitt, D. M., Conway-Jones, J. M.: *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 36, 422 (1958)
- 3) Batel, W.: *Forschungsbericht des Wirtschafts-u. Verkersministeriums von Nordrhein-Westfalen*, Düsseldorf, 1956, Nr. 262
- 4) Hains, W. B.: *J. Agric. Sci.*, 15, 529 (1925)
- 5) Rumpf, H.: *Staub* 19 (1959), 150-160

* 理化学研究所化学工学研究室

固体粒子の混合*

Sherman S. Weidenbaum**

I. 固体混合の基礎

A. 固体接触の目的

固体を混合する装置は多くの操作に用いられている。飼料、駆虫剤など、各成分の混合をおもな目的とする場合が多い。他の目的では、たとえば石灰、砂糖の冷却あるいはカレンダーにかける前に可塑性を予熱するなどがある。固体を混合して、粒度を下げたい場合もある。そのいずれの場合でも固体の混合がおきているのである。

B. 固体混合に影響を与える粒子（組成）の性質

- (1) 粒度分布
- (2) 見掛け密度
- (3) 真密度
- (4) 粒子の形状
- (5) 表面の性質： 表面積、荷電
- (6) 流動特性： 安息角など
- (7) 碎け易さ
- (8) 凝集の状態
- (9) 湿度、水分含有量： ダストを少なくするため
に液体を添加するなど
- (10) 密度、粘度、表面張力： 添加する液について
- (11) 各成分の許容温度

以上混合する粒体の諸性質の検討をまず混合機選定の第一段階とすべきである。

C. 器内の混合度

1. 混合度の測定

ある成分のものを他のものにコーティングする場合をのぞき、理論的な混合の終点は各粒子がそれぞれきちんととなり合うことではない。むしろランダムな動きによる理論的な最終状態とは、ランダムに混合物が配列されることである。個々の粒子が簡単に識別できて数えられるときには、ある個数（粒子数）のスポットサンプルによって偏差はランダムとした場合の理論値によって予知できるので、どの程度ランダムな混合に近づいたかのメジャアにできる。

粒子の識別がむずかしくて、実際には数がかぞえられ

ぬときには、それぞれの方法による分析を行ない器内の均一性をきめればよい。どのような方法を選ぼうとも、たとえば重量を、容量をはかり、電気的方法を用い、粒子を数え、光学的方法を用い、などしても、もし混合度の当否に問題がある場合には、統計的手法によってデータの解析を行なわねばならない。

2. 評価

固体混合物が次段に処理される場合、たとえばガラス、可塑性の製造においては、次段の工程における効率、コストがその前段の固体混合に支配されることが多い。このような場合には、製造工程に及ぼす影響をしらべるために固体混合度を知っていなければならない。

3. 分離の問題

粒子の性質に大幅の差異があると混合はきわめて困難となる。

長く混合していると荷電を帯びやすく、分離するので、混合時間を正確に決めて時間をかけすぎぬようにすることが大切である。

ダストとして粉体が飛散するのも一種の分離とみなせる。集塵機はあまり強く引きすぎぬようにせねばならない。

ペースト状で、流動性にとぼしい（安息角が大きい）粘稠質の粒子が加えられれば、他の粒子間に架橋が起こって、良好な混合を達成する。

II. 装 置

A. 混合の機構

小さな尺度のランダムな運動（拡散）と、大きな尺度のランダムな運動（対流）および剪断が混合の基本的な機構である。拡散的な混合は新しく展開された面に粒子群が分散する際に、また個々の粒子の内部の動きが著しい場合に起きる。単純な回転混合機は前者の作用を与え、インパクトミルでは後者の作用を与えているのである。

通常の瞬間混合機では、局部的混合の外に、粒子群相互が交換するようにしなければならない。これができるのは対流あるいは剪断によってである。リボン型混合は対流、単純な回転混合機は剪断作用である。

B. 固体混合機の形式

図1参考

C. 混合機の性能

固体混合機を選択を行なう前になすべきことは各性能の検討である。すなわち

- (1) 混合の一様性
- (2) 混合時間

混合機とその作業容量が適正であれば、回分式

* この論文は近く McGraw-Hill Co. から改訂出版される Perry の Chemical Engineers' Handbook の原稿をもとにしている。

** Corning Glass Works, Corning, N.Y., U.S.A.

混合の実時間は通常 15 分以下である。

(3) 装入, 排出

(4) 動力 (表 2)

ふつう動力以外のことに重きがおかれているので, 混合機を選ぶ際には動力をよく考えないことが多い。粉体を装入した混合機を静止状態から動かすとすれば, 十分な動力を与えてやらねばならない。速度を変えるのがのぞましいならば, これも動力をきめる際には考慮に入れておくべきである。

(5) 洗 滌

一つの混合機で, 全く異なるものをくりかえし混合しなければならぬときには, 洗滌の難易, 回数が重要となる。各回分操作について多くの時間がかかるならば, 何台かの小さな混合機を考えた方がよい。

(6) 凝集の破碎, 摩碎 (表 1)

(7) ダストの発生

(8) 静電気

静電気をさける方法は (a) 少量で表面積の著しく大きい特定の固体を加える。(b) 液体を加える。(c) 混合機の構成材料を適正なものとする。(d) 湿度を調整する。(e) 電荷がなるべくたまりぬように各成分を調合する。

(9) 保 安

(10) 装置の摩損

(11) 製品の汚染

(12) 加熱, 冷却

(13) 操作の費用

(14) 操作の融通性

(15) 真空, 加圧

(16) 液注入の方法 (表 1)

D. 装置の選定

1. 概 要

上述の検討を行なって混合機を選定するが, 全体のプロセスのうちで混合機がどんな位置を占めるかを考えておかねばならない。

(a) 2 重円錐型

(b) V 型

(c) 水平円筒型

(d) 2 重円錐型 (長軸)

表 1 回転式内装破碎機の代表速度

混合機の型式	周辺速度 [ft/min]
リボン型	280
タービン型	600
V 型 a) ビン型	1,700
b) 液体注入式	3,300
複軸ローター	<1,300
単軸ローター	6,000~9,000
各種のミル	2,500~20,000

(e) リボン型

(f) 垂直スクルー型
(遊星運動型)

(g) 回分式ミューラー
(図示は逆回転型)

(h) 連続式ミューラー

(i) 複軸ローター (熱交換型)

(j) 単軸ローター

(k) タービン

図1 各種の固体混合機

2. パイロットテスト

次のことに注意する。(a) 試験機が大きいほど、大きい混合機の性能推定はたしかになる。試験機は各寸法を相似のものとする。(b) 発表されている固体混合機のスケールアップのデータを評価する。(c) できれば実操作の原料をつかう。(d) 試験機と実際の混合機との構成材料のちがいに注意する：電気的な影響などのため。

3. 連続混合

次の場合には連続混合は不利である。(a) 方式の変更が多いことが予想されるとき。(b) 製品の組成の変動が許容範囲をこえるであろうとき。(c) 各成分が必要とする精度では計量できぬとき。(d) 温度、圧力のサイクルが複雑であるとき。

4. 価格

表3を参考されたい。

表2 商用固体混合機の所要動力と回転数
(作業容量は大体 50 ft³)

固体混合機の型式	作業容量 [ft³]	馬 力		回 転 数 [RPM]		摘 要
		本 体	内 部 駆 動	本 体	内 部 駆 動 軸	
1. 容器回転型						
邪魔板なし						
2重円錐型	54	7½	—	8	—	100 lbs/ft³ のものを基準にとり、粉体の最大見掛密度は 55 lbs/ft³
V 型	50	5	—	13.7	—	
邪魔板つき						
水平円筒型	50	20	—	11.1	—	高能力用 (100 lbs/ft³)、著しく負荷が大きい場合 (150~200 lbs/ft³) には、20 HP で最大作業容量は 35 ft³
水平回転軸、2重円錐型	56	25	—	11.5	—	混合機は傾けられる。後部で装入し、容量は混合したコンクリートを基準にとっている。
2. 集塵防止、容器回転型						
2重円錐型	54	7½	摘要参考	18	摘要参考	内部駆動の馬力は粉体の性状、回転数による。適当な試験を行なってきめる。
V 型	50	5	5 (ピン型の破砕機)	13.7	945 (周速は1730 ft/min)	粉体の最大見掛密度は 55 lbs/ft³
同上			7½ (液体注入式)		1055 (周速は3320 ft/min)	
3. 固定容器型、桶型						
リボン型						
(C 社)	50	—	12	—	28	所要馬力は見掛密度 50~60 lbs/ft³ のものを基準にとり、平均混合時間 3~10 分について 10 HP/ton (粉体によっては 3~18 HP/ton)
(A 社)	46	—	10	—	37	見掛密度 30 lbs/ft³ を基準にとる。
3軸リボン型	50	—	混合用駆動軸 20 供給用駆動軸 7½ (全馬力)	—	各軸は速度可変	この混合機は回分式では 300 ft³/hr、連続では 900 ft³/hr の仕様であり、見掛密度を 70 lbs/ft³ にとっている。
垂直スクリュウ型	52.9	—	5	—	スクリュウ: 64.4 遊星運動部: 2.2	馬力は見掛密度 37 lbs/ft³ を基準にとっているが、ものによって変えられる。最大は 10 HP、重量は 4410 Lb
ミューラー類						
回分式; 皿静止、ローラー一回転	40	—	60	—	24 (ローラー回数転)	見掛密度 60~70 lbs/ft³ を基準にとる。
連続式; 皿静止、ローラー一回転						前出の画の如く、連続式のミューラーは単に 2 台の回分式ミューラーの皿を結合したものにすぎない。したがって、60 HP、40 ft³ の回分式をつなげれば、容量 80 ft³、125 HP の連続式となる。125 ton/hr の能力を有し、平均滞在時間は 2.5 分。ローラーの回転数は 24 RPM である。
単軸ローター			摘要参考			この連続機では、ものによるが 5~100 HP、500~4,000 RPM に対して 25~600 lbs/min を処理できる。
複軸ローター			摘要参考			この連続機では、ものによるが 5~40 HP、200~300 RPM に対して 200~500 lbs/min を処理できる。
熱交換、複軸ローター	49.2	0	5—15	—	20—100	輸送量と混合作用は、中空スクリュウ外部のリボンの形状とそのピッチによって異なる。
タービン	50	—	50		周速 600 ft/min	
4. 容器、内部が共に回転する型式						
逆回転型ミューラー	45	*	*	6.75—8.75	28—35	* 25 HP のモーター 1 台で内、外共に駆動する。
	**60—90	20	25	5.65	20	** 回分の容量は粉体の性状によって異なる。

表3 各種固体混合機の価格
(1960年基準)

固体混合機の型式	容 量 [ft ³]	n
1. 容器回転式		
邪魔板なし		
2 重円錐型		
A 社		
軟 鋼	13—40	0.36
	54—325	0.65
304 不 銹 鋼	13—40	0.32
V 型		
B社 (この値は同社の2重円錐型と同一)		
炭 素 鋼	1—200	0.47
不 銹 鋼	1—200	0.49
邪魔板つき		
水平円筒型, 炭素鋼		
ライナーなし	15—70	0.52
ライナーつき	13—110	0.73
	35—170	0.72
2 重円錐型 (長軸)	56—210	0.65
2. 凝集防止, 容器回転型		
V 型		
ピン型の破砕機 (炭素鋼)	1—75	0.41
ピン型の破砕機	1—75	0.45
液体注入式 (炭素鋼)	1—50	0.39
液体注入式 (不銹鋼)	1—50	0.43
3. 固定容器型, リボン型		
リボン型, C社		
規格炭素鋼	25—300	0.52
規格304不銹鋼	25—300	0.59
D 社		
炭素鋼 (モーター, 駆動装置を含まず)	11—94	0.56
3軸リボン型 (モーター, 変速機を含む)	25—50	0.31
不銹鋼, 重荷重	3—50	0.48
垂直スクリュウ型 (遊星運動型)		
軟 鋼	7—100	0.10
304 不 銹 鋼	7—100	0.14
ミューラー		
皿静止, ローラー回転, 炭素鋼	6—60	0.69
連続式ミューラー (皿静止, ローラー回転)	6—120 (実回分容量)	0.66
	連続処理量 11 ~170 ton/hr, 滞在時間 2.5分	
複軸ローター (熱交換式)		
炭 素 鋼	2.7—49 (実回分容量)	0.34
タービン	2½—100	0.70
4. 容器, 内部が共に回転する型式		
逆回転型ミューラー		
炭 素 鋼		
掻きとり羽根のみ	5.5 to 45	0.50
ミューラー共	5.5 to 45	0.55
不 銹 鋼		
掻きとり羽根のみ	5.5 to 45	0.54
ミューラー共	5.5 to 45	0.60

$$c_2 = c_1(Q_2/Q_1)^n \quad (c: \text{価格}, Q: \text{容量})$$

(原文では c_1 の値をあげられているが, わが国に
そのまま適用できぬので, n のみを記載した。)

References

- 1) A. I. Ch. E. Standard Testing Procedure for Solids Mixing Equipment, American Institute of Chemical Engineers, 25 West 45 St., New York 36, New York
- 2) Bullock, H. L.: *Chem. Eng.*, April 20, 1959
- 3) Danckwerts, P. V.: *Research*, Vol. 6 (1953) pp. 355—361
- 4) Fischer, J. J.: *Chemical Engineering*, Aug. 8, 1960
- 5) Kirk, R. E. and Othmer, D. F.: eds. "Encyclopedia of Chemical Technology," Vol. 9, Reinhold, N. Y. 1952
- 6) Lacey, Q. M. C.: *J. Appl. Chem.*, 4, 257—68 (1954)
- 7) Quillen, C. S.: *Chem. Eng.*, June 1954
- 8) Scott, R. A.: Chapter on Mixing of Solids in "Chemical Engineering Practice" eds. H. W. Cremer and T. Davies, Vol. 3, p. 362, Butterworths, London (1957)
- 9) Weidenbaum, S. S.: Chapter on Mixing of Solids in "Advances in Chemical Engineering," eds. T. B. Drew and J. W. Hoopes, Jr. Vol. II, Academic Press, N. Y. (1958)
- 10) Work, L. T.: *C. E. P.*, Vol. 50, No. 9, Sept. 1954

[遠藤一夫*抄訳]

コ メ ン ト

井伊谷鋼一 (名古屋大学) 水渡氏のご講演に関し
て一言コメントしたい。100 μ 以上の粗粒についてはあ
まり問題はないが, それ以下になるといろいろの問題が
生じ, とくに数ミクロン以下の微粒領域は取り扱いが困
難となってくる。たとえば, 付着や凝集のような特性も
微小粒子においてその影響が大きく, しかも測定 of 困難
が未解決であるから, その研究が望まれる次第である。
粒度測定や分級の場合において, 粗粒表面や器壁面への
微粒子の付着現象は, その結果に誤差を与える一つの原
因である。乾式法の場合には, 静電的現象の影響も見逃
すことはできない。粒子の弾性的反発の問題は高速を用
いる装置では無視できない顕著な影響のあることがある
から注意を要する。しかしこれら一見好ましくないよう
にみえる特性を逆に利用することによって, 分級技術の
新しい発展が試みられている。現在の一般的な事情は数
ミクロン以上の粒子については一応の成果がえられてお
り, 今後1ミクロン以下の領域を開拓しようとしている
ところであろう。

粒度測定装置として製品化しているものは多数ある
が, それらのうち乾式のマイクロメログラフは5 μ 以下
が50% (重量基準) 以上となると, 凝集のためうまくい
かないようであるし, パーコの乾式遠心沈降法はいろい
ろの原因のため鋭い分級は望めないようである。一方
Goetz のスペクトロメータは1 μ 以下の粒子に適してい
るが, 煙霧体の測定が目的であるから, 工業的に使用す
るときには試料の分散法に考慮を払う必要がある。コー

* 北海道大学 工学部

ルターカウンターは粒子の体積を測定するが、やや手間と熟練を要し、不便であるとともに分散媒が導電性をもつことを必要とし、湿式法共通の分散剤選択の問題がある。一般に種々の粉末に適当した分散剤が発表されつつあることは好都合であるが、さらに広くこの地味な仕事の成果が集積されて公表されることを願うものである。さらに実際の生産現場で粉体を取り扱う場合、その粉体は必ずしも完全に分散しているわけではないから、それぞれの場合のある程度凝集した実際の使用状態の粒度分布やそれに相当した密度が知りたいわけであって、この点に測定上一つの困難が存在する。

高橋 浩(東京大学) 固体粒子を細かくする操作に対しては単に量的な取り扱いのみでは不十分で、質的考慮たとえば粒子の粉碎過程における結晶構造の変化、表面状態の変化などの考慮が必要である。クレーの粉碎について、カオリンの例について述べると、カオリンを機械乳鉢で粉碎すると、粉碎のごく初期にもとのカオリン結晶は分解してきわめて微細な結晶となり、引続いてこれらの微細結晶は凝集していくと同時に、カオリン結晶の規則的な構造がくずれていき、ついに無定形に近い状態になる。これと併行して粒子の大きさは次第に大きくなるという現象が見られる。粉碎の初期に生ずる微細結晶を凝集させるのは、粒子表面に吸着された水が媒介となるところの水素結合力のためと考えられる。微粉碎過程において、本来の結晶構造、性質を変えないで、微細化する限度はどのくらいの大きさか、ということが問題となるが、到達する限度は、粉碎の方式にもよるが、粉碎されうる理想的大きさは、たとえばクレーでは $200 \text{ \AA}$ といえるし、また一般には $100 \text{ \AA}$ ないし 0.1μ 程度と考えられる。このような粉碎初期における微結晶の生成および凝集は、ボールミルによる粉碎の場合にも認められる。完全に水のない雰囲気中で粒子を衝撃力で粉碎し、生成した微結晶部分をただちに系外に取り出せば、構造の変化は少ないものと考えられる。さらに粉碎が表面の性質を著しく変える例として、タルク、雲母などにおいて、きわめて短かい時間の粉碎によって、これらのものが本来のハイドロホビクな性質から、ハイドロフィリックな性質に変わることも認められる。総括的には粉碎工程では固体粒子は粒径が小さくなると同時に、粒子自体に多かれ少なかれいくらかの質的な変化が起きているということが出来る。

青木 隆一(横浜国大) 私はバルクの粉体の挙動について、工学的な見地からいろいろ検討しておりますが、粉体取り扱いに関する粉体の基礎的な諸性質のうち、

粉体の付着力は内部摩擦係数とともに、粉体の流動性を支配する特性値であり、付着性粉体の挙動に関してはこれが決定的な因子となっているように思われます。しかし付着力の原因には種々の因子があり、材料によりまた環境によってそれらの因子の影響の仕方が異なってくるので、その表現法ならびに定量的な測定法は現在の段階では、なおきわめて不十分なものと思います。

バルクの粉体の取り扱いにおいて付着性は、粒子の凝集、壁面への付着および粉体層の固結現象の3種類に大別して粉体取り扱いの各場合に依りて考慮されるべきだと思います。もちろん、これらの間に密接な関係はありますが。

付着力に対する各種の原因および個々の付着現象に関してはかなり細かな研究がすでに行なわれてきており、たとえば付着液、吸着層による付着、帯電による付着、微粒子における分子力、Van der Waals 力による付着、固相反応などによる付着などについて解明されつつありますが、これらが総合されて、ある粉体のある動作に対して付着性がいかに作用するか、その大きさはどのようにして表現され測定されるべきであるかということは実用上きわめて重要であると思います。

たとえば、貯槽、供給装置、輸送機その他混合機、粉碎機、乾燥機などの中で、粉体が付着性のゆえに閉塞を起こさないだろうか、取り扱い上温度や圧力がかかっても大丈夫であろうか、などという問題の際に材料の付着力を測定して判定ができれば非常に便利であります。粉体の剪断試験、あるいは滑り角測定を行なえば、理論的には粉体の摩擦係数と付着力が同時に測定できるわけですが、測定誤差が多くほとんど実用にならない場合がしばしばあります。

現在までのところ、付着性の表示として簡単に安息角を使用している人もあります。たしかに、付着性粉体においては付着力が安息角に大きく影響を及ぼしていますが、安息角の測定方法にもいろいろ問題があり、また付着力と安息角が比例的な関係にあるとは断言できません。私の経験でも付着性粉体がホッパー内で架橋を起こして閉塞する場合の流出口の限界寸法と材料の安息角との関係を調べたところ、材料ごとに異なった結果がでて、閉塞の有無を材料の安息角によって予知することは不可能でした。

このように個々の問題に対処してみると付着性の一般的表現はきわめて困難であるとも思われてきますが、せめて前述の粒子の凝集、壁面への付着、粉体層の固結、に3大別してなるべく一般的な量的表現を得たいと考えている次第であります。

北浦 嘉之(大阪府立大学) わが国の固体粒子混合の研究は、ただいまご講演の大山先生の1933年の論文にはじまり、その後大山・遠藤、矢野・蟹瀬・佐納、森・神保、境野、水科などの研究者が多くの研究を行ってきた。その研究分野は固体混合度の表示法、混合速度式の解析という基礎的分野から各種混合機の特長、適用範囲などの応用研究の範囲にわたっており、現在世界におけるこの方面の研究に相当重要な寄与を行ってきた。

しかし、“固体混合”という化学工学の一つの単位操作は一応、技術としてようやくまとまりつつありますがまだ科学とか工学として学問的に体系づけられているとはいえない状態である。

ここで一、二の最近の研究と固体混合の将来の方向を簡単に述べてみたい。

まず固体混合度の表式については、大山、Lacy その他により、実験結果の記述を容易にするための現象論的表式が提出されたが、最近の統計論の進歩をとり入れて無秩序に配列する不連続な粒子間の無作為置換の模型とし、混合度を理論的に表示する試みが緒につき、Oleniczak が彼の学位論文で扱っている。

また、粉粒体の粒度分布および物性特性は混合研究の基礎であります。未開発なことが多く水渡教授のご考案になる自動粒度測定器などは、この分野に有用な役割を演じるものと思う。

さらに、混合速度については相当多くの実験的研究結果が蓄積されている。たとえば最近矢野らは回分式の他にリボン式連続混合機の混合速度の研究を行なっている。しかし、混合速度の理論的研究は、とくに粒度分布あるいは物性の差による混合とは逆方向の分離過程については現在まだ考慮されていない。

現状では、たとえば水平型回転混合機で回転軸方向の混合を、一次元拡散現象と類似に扱ったLacy, Fischerらの研究があるのみである。この問題は各種混合機内の粒子運動の種類に関する実験的知識、理論模型の設定、統計理論の進歩などによって発展していくものと考えられる。

また工業的にはプロセスの中にある混合機の位置の考察も必要で、良好な混合物もつぎのプロセスまでの輸送、堆積中に分離するような現象にも留意すべきであると思われる。

H. E. Rose (Univ. of London) 私はこの機会を利用して振動ミルに関する最近の興味ある研究結果につ

いて述べたいと思う。

最初に振動ミルの概略を説明すれば、スプリングで支持したミル本体中に粉碎媒体(ボール)を入れ、砕料を加えたものを適当な方法、たとえばアンバランス・シャフトの回転によって振動させることによって粉碎を行なうものである。

振動ミルの性能と諸因子の関係をみるに、

- 1) 粉碎速度は振動数の増加とともにきわめて急速に上昇する。たとえば1500rpmから3000rpmと振動数を2倍にすれば、粉碎速度は実に10倍になるのである。
- 2) 粉碎速度は粉碎媒体の比重に比例する。
- 3) 粉碎媒体充填率の影響は、

- i) 媒体対砕料の比率一定の条件のもとで、充填率を40%から80%に増せば粉碎速度は2倍になる。すなわち

媒体単位量あたりの粉碎量 $\propto$ 媒体充填率

- ii) 当然のことながらミル全体の砕料ホールドアップは媒体充填率に比例する。

結局、ミルの処理能力は媒体充填率の2乗に比例する。

- 4) ミル本体に与える振動は円振動が最も効果的である。
- 5) ミル重量、スプリングの強さ、振動数の関係が共振状態にあるとき、損失動力は最小になる。

以上の事実から、振動ミルの設計にあたっては、できるだけ高振動数で、しかもそれが共振条件に近くなるようにすべきであるが、2), 3) の条件もあってミルはかなり重いものになるから大型ミルの製作には困難が伴なう。われわれの理論によって計算した結果によると、直径1m、長さ1mのミルを3500rpmで振動させるミルを用いると、ブレン値3000cm²/gのセメントを35t/hの速度で生産することができ、消費電力は共振点をはずして運転したとき1tあたり25kWh、共振条件下では16~18kWhとなるものと考えられる。しかしながら、このような大型ミルに毎分3500回の振動を与えることは容易でなく、特に共振条件下ではその振動が直接に機械の基礎をゆすぶることになって、到底耐えることができない。高速の振動に耐えるスプリングその他の材料がないこととともに、この辺に振動ミルの大型化を困難にする事情があるのである。

[菅 沼 彰* 抄訳]

* 東京大学 工学部

む す び

吉 田 哲 夫*

粉体を取り扱う装置は工業の発展とともに存在し、長い歴史をもっているのであるが、粉体を対象とする学問の歴史は比較的浅く、特に日本においてはここ10年くらいのものであらうと思われる。森教授は日本ならびに諸外国における粒体工学の最近の進歩についてきわめて明確に説明した。

装置内における粉粒体の挙動を明確につかむことは装置の設計、操作にぜひ必要であるが、それには理学者のち密な基礎的研究による協力が非常に必要になってくる。この意味からここに理学者である水渡教授の「粒子の特性と粉体粒度」に関する講演は非常に有益であり、同一の粉粒体でも用いた諸種の粒度測定法によってえられた結果に相違があらわれるのは粒子特性によるものであることを実験によって示し、その結果を整理した点に見るべきものがある。なお同教授および共同研究者の労作になる粒度測定装置が日本はもちろん欧米においても実用されていることは本講演に一層の実をあたえた。

Rumpf 教授は「粉体の凝集に関する基礎的研究」の演題のもとに理学者のなした分子や粒子に関する基礎的研究成果を工学分野の strength の流域に引入れ、実際

の装置内における粒子のき動を工学的に解明する方法の一端をしめした。工業装置において凝集や分離の粒子特性を上手に利用したり、それを避けたい場合が多くある。このような場合になぜこのようになるのか、どうすればこれが避けられるのかをもっとつき詰めて知りたいが今日ではまだ漠然としてそのよって来るところを掴み難い。Rumpf 教授の研究はこの未開の工学の原野に一つの燈りをつけたことになる。

次に粉体の混合もやはりこうした工学研究の未開の分野であり、とくに日本では固体の粉碎に比べて研究者の数がすくない。このシンポジウムにおいて Weidenbaum 博士からなにか新しい混合速度式の展開でも聞けるものと期待したが、大山教授によって代読された「固体粒子の混合」に関する彼の論文は一般解説の域を出なかったことはいささか聴者の期待に反したようである。しかし同博士の論文に添記された「実用混合機の回転速度と必要馬力」などの表は直接われわれに利益をあたえるものである。

Commenter として、井伊谷教授は最近におけるアメリカでの粒度測定法を紹介し、合わせて粒子の静電特性を述べ、物理化学者である高橋博士は粉碎時の粒子の質的变化について興味ある自己の実験結果を要説した。青木博士は Rumpf 教授のさきの論文に関連して粒子の周囲の微粉の作用などについて自己の見解を説明し、北浦教授は固体混合について欧米および日本の最近の研究を総括し、今後における必要な研究分野を暗示した。最後に Rose 教授は振動ミルの特徴ならびに最適運転条件をしめし、他のミルと比較しての優れた性能について解説した。

* 大阪市立大学工学部