

# 粉体—21世紀の工学—粉体工学は面白いのか

## Funtai/Powder – Promised technology in 21st century – How interesting is the Powder Technology

増田 弘昭

Hiroaki MASUDA, Dr.

京都大学名誉教授

Professor Emeritus, Kyoto University

神戸学院大学・ライフサイエンス産学連携研究センター客員特別研究員

Invited Special Research Fellow

Cooperative Research Center of Life Sciences, Kobe Gakuin University,

### 1. はじめに

昨年、粉体工学会が50周年を迎え、筆者は表記のような題目で講演を行う機会を与えられた。「粉体工学は21世紀の工学」という言葉は、恩師の（故）井伊谷鋼一京大名誉教授の口癖であり、先生はそれが当たっているかどうかを確認する必要の無い立場にあった。しかし、我々はそれを実際のものにする努力をしなければならない。最近、「ナノ粒子」や「微粒子」という言葉がテレビのコマーシャルでも聞かれるようになって、粉体工学がこの21世紀において重要な位置を占めつつあることが実感されはじめた。

ここでは、筆者の研究の幾つかを紹介しながら、上記講演内容を一部簡略化して纏めて見たい。

### 2. 何故粉体か

粉体技術は今から1万年以上も前にアルタミラ洞窟に描かれた壁画、植物の種子の食料化、さらには化粧品や火薬など、人間が生きていく上での必須の技術として発達して来たものであり、人類の生活と文化の形成に深く係っている。気相中での微粒子を扱う工学には、粉体工学と並んでエアロゾル工学があるが、この分野は1869年のチンダル現象をはじめ、物質の核化（霧の発生）、微粒子のブラウン運動、光のミー散乱など、自然現象を優雅に解き明かす近代科学として発展してきた。しかし、1952年12月から翌年の2月にかけてのいわゆるロンドンのスモッグ事件により、このようなエアロゾル科学も人類の生存に係る工学として、

また、その後の公害防止技術として大きな力を発揮し始めた。

エアロゾル、粉体、コロイドを結びつける古くからの実用例として、「硯と墨」が典型的である。木の枝や油を燃してエアロゾルを発生させ、微粒子である煤を集めることによってできた粉体から、古より培ってきた粉体技術によって固体である墨を作る。これを使うときは硯で磨って、もとの微粒子が水に分散したコロイドとして使う。これら一連の微粒子技術は現代を支える先端工業技術に広く応用されており、その高度化はナノ粒子の今後の実用化に欠かせない技術として期待されている。ところで、「粉体」という言葉は長い間、国語辞典にも取り上げられず、粉体に携わる者の間ではそのことが時折話題になったものである。しかし、1995年初版の小学館の国語辞典「大辞泉」には「ふんたい【粉体】固体が粒子になって多数集合している状態。……」と記載されている。「こな【粉】」は古くからあるので一応満足していたものの、やはり「ふんたい【粉体】」が国語辞典に取り上げられたのは喜ばしいことである。

とにかく、粉体は古くから役立ってきたわけで、身の回りにもいろいろな粉体があるが、このように多くの物質がなぜ粉体として利用されているのであろうか。同志社大学の日高教授によると、化学便覧に記載されている約3000種の物質について、有機物質の75%、無機物質の60%がそれぞれ固体だそうである。このように物質の多くが（常温、常圧で）固体であることがそれらを粉体として使う大きな動機であろう。さらに、約20年前にDuPont社のDavies博士らが行っ

た調査では、DuPont 社の生産物の60%以上が粉粒体であったそうである。中間品もいれると、扱う物質の80%以上が粉粒体とのことである。さらに神戸学院大学の福森教授によると医薬品の80%以上が粉体プロセスを通して生産されている。

いろいろな固体を粉砕し粉体として利用するのは、これらを流体（液体，気体）のように扱いたいからであり，さらに液体や気体よりも高度な機能を持たせたいからでもある。同じ固体物質でも粒子にすれば異なる機能を持たせることができるし，任意な形状の固体にもできる。一方，いろいろな物質を晶析や核化によって粒子としておけば，保存が容易で長期間にわたって安定である。このような粒子化において，とくに粒子の大きさの違いは，それだけでいろいろな機能をもたらす，粉体材料の粒子径による変化は物質に係らず将来にわたって追究すべき価値のある研究対象といえる。同じ物質でも微粒子であれば工業上別の材料として役立つことが多い。このような事情により，最近になって粉体・粒子の分野での新しい材料に関する研究開発が非常に活発に行われていることは周知の事実である。

### 3. 主要粉体技術の体系

粉体を液体や気体のように扱うのは粉体工学に係る者として，大きな夢のひとつである。微粒子やナノ粒子も1個だけを扱うのでは殆ど役には立たない。しか

し，粒子が非常にたくさん集まった粉体は，流体とは異なり，いかに多くの粒子が集まっても個々の粒子の特性が関係した離散的なものであり，流体工学とは違う難しさがある。現在，粉体は多くのいわゆるノウハウによって実用されているが，その体系化と基礎現象の発掘は研究対象として非常に興味深いものといえる。

図1に筆者の考える主要粉体技術の体系を示す。「粉体・粒子を作る」，「ハンドリングする」，「測定・評価する」の三つが主体で，これらは相互に関係する。粒子系単位操作と粒子系化学反応は目的とする粒子・粉体をつくるための基礎技術である。これらの重要性はいうまでも無いが，とくに粒子系化学反応は工業規模での実用化を目指したものであるべきで，その後のハンドリングに耐えうるものでなければならない。各技術は扱う粉体・粒子をできるだけ抽象化し，可能な限り広い範囲のいろいろな粉体に適用できることを目指すことが重要である。実際に役立つものを作るには，さらに固体化・物体化，構造化，成膜といった基本技術の開発が必要である。このような体系を発展させていくには，できるだけ多くの「粒子系基礎現象」，例えば，静電気帯電，付着，凝集，衝突，沈着，破碎，核化，光散乱，燃焼……などを解明しておくことが，特に大学では最も重要な課題といえよう。いつ役に立つのか分からないような基礎研究が，その後社会に対して重要な役割を果たした例は，先に述べたエアロゾル科学でも見られたように非常に多い。な

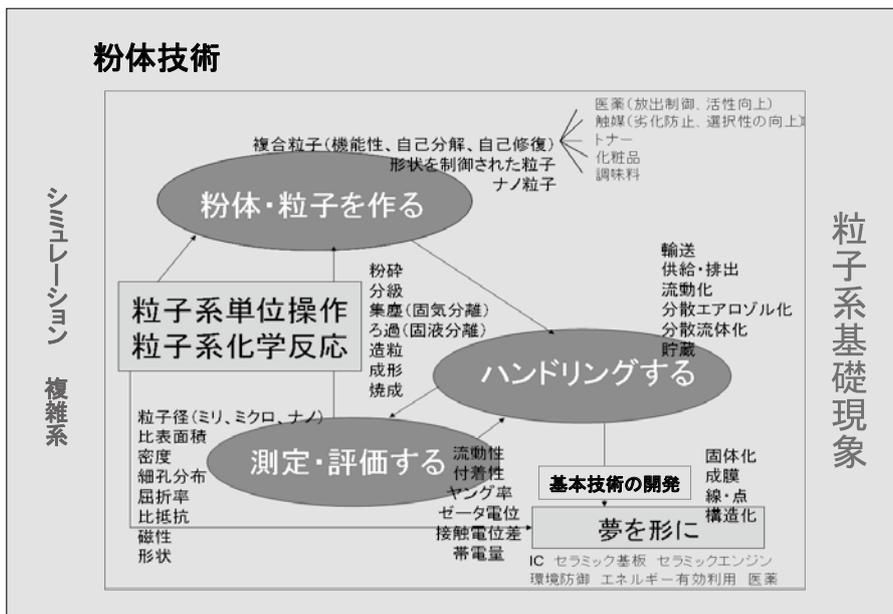


図1 主要な粉体技術の体系

お、多数の粒子を扱うこの分野は、多くの基礎現象が複雑に絡み合った複雑系であり、これらの知見を統合するシミュレーション技術の発展も欠くことのできないものである。

#### 4. 粉体工学は面白い

粉体は扱い難く、いろいろなトラブルの原因としてあげられ、学生や一般技術者にとってはさほど面白くも無さそうである。実際、筆者が学部学生の頃に習った粉体工学で印象に残っているのは、ジョークラッシャーによる粒子破碎の解析だけである。しかし、粉体工学を研究するようになって幾つかの面白い問題に出会うことが出来た。以下では、先に述べた体系の中の一例として筆者が経験した事項のうち、粉体工学はなかなか面白いと感じたところを幾つか述べる。

##### 4.1 ハンドリング

粉体のハンドリング操作としては、輸送、供給・排出、分散エアロゾル化、分散流体化（コロイド）および貯蔵があげられる。このうち、筆者が最初に経験したのは供給であり、夏休みに当時京都大学の4年生であった増田富良氏と枚方の細川鉄工所にお世話になり、いろいろな粉体供給機の静特性と動特性を測定したことである<sup>1)</sup>。一見、理解できない動特性を示したのがテーブルフィーダーであり、その後、かなり詳しく検討することになった。図2の写真のように、ホッ

パーの下のテーブル上に粉体層が堆積している。このテーブルを回転させると、それまで静止していたテーブル上の粉体層が水平方向に張り出し、黒く写っている部分を粉体がゆっくりと移動してスクレーパーで排出される。テーブルの回転を止めると粉体層の張り出しも止まる。スクレーパーの位置を半径方向に移動させると粉体層の山の大きさが変わり、流量が調節される。内側に移動させると流量は多くなり、外側にすると少なくなる。スクレーパーの位置をステップ的に内側に移動させると、流動性の良い粉体の流量変化は1次遅滞的に次第に増加していくのに対し、流動性の悪い粉体ではスクレーパーの位置を変えた瞬間に大流量が供給され、次第に減少して定常値になる、いわゆる微分要素的な変化をする<sup>2)</sup>。なぜこのような変化をするのか、どのような機構で粉体がテーブル上に張り出してくるのか、不思議であった。

これらの現象はほぼ解析できたが<sup>3)</sup>、DEMの盛んな今日では可視化シミュレーションができれば、流体とは異なる粉体の流れの特徴を良く現した教材として有効であろう。とくに、このフィーダーは若い学生諸君に粉体の面白さを感じさせることの出来る現象を今でも含んでいると思う。

このほか、粉体の気中分散<sup>4,5)</sup>（分散エアロゾル化）、空気輸送などにも面白い現象があったが、ここでは割愛する。これらの研究を通して、静電気などの基礎現象に興味を持つことになった。これらは4.4節で述べる。

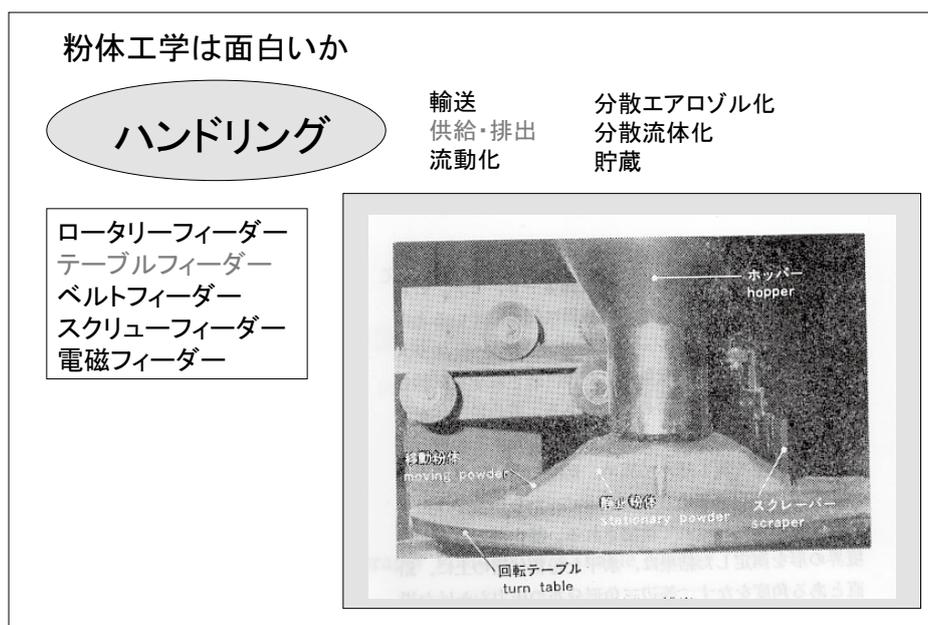


図2 粉体ハンドリング（テーブルフィーダー）

## 4.2 粒子系単位操作

粒子系単位操作としては現在のところ粉碎、分級、混合、混練、固気分離、固液分離、造粒、成形、焼成などがあげられるが、図3に示すバーチャル・インパクターはエアロゾルの分級を精度良く行って、希望の粒子径範囲の試験用エアロゾルをえるために設計・製作して検討したものである<sup>6)</sup>。詳しくは文献6を参照していただくとして、中心軸付近と壁付近にはフィルターを通してろ過した空気（クリーンエア。それぞれコアエア、シースエアという）を流している。コアエアは微粒子が粗粒側（直進下方向）に行くのを防ぎ、シースエアは粗粒子が微粒側（側方、横方向）に分級されるのを防ぐ。シースエアは粒子がインパクター壁面に沈着するのを防ぐ効果もある。新しいインパクターの上半分のこのような構造は、結局のところクリーンエアを使って部分分級効率を数式的には1次変換することになっており、理論上はいくらでもシャープな分級ができることになる。筆者の経験では $1\mu\text{m}$ と $1.1\mu\text{m}$ は完全に分けられる。ただ、処理量がそれに応じて小さくなってしまう。このようなインパクターを直列2段にすれば、粗粒側、微粒側、中間域の3種のエアロゾルが発生できるので、粒子径をある範囲に限ったエアロゾルをテストエアロゾルとして使える。2段を1つのインパクターに組み込むこともできるが<sup>7)</sup>、同じインパクターを2段にする方がきれいに行くようである。

後に粉体の分級に利用するための基礎研究も行っ

た。図4は処理用を上げるためにインパクター断面を矩形にしたものを使って、内部のエアロゾル流をみたものである<sup>8)</sup>。矩形であるので、写真の左側がコアエアに、右側がシースエアの役をする。しかし、前後の側面にはクリーンエアを入れていないので粒子の沈着が起こる。この形式のインパクターは構造もいろいろ考えられて面白い<sup>9)</sup>。最初の研究は筆者がドイツ留学中に行ったもので、図面を描きマイスターに製作してもらって一人で優雅に実験した。大体予想通りに進んだが、クリーンエアを導入しない場合の50%カット径が理論線から少しはずれた。何回実験しても同じことが起こる。或る時なんかの話で、この研究所は海拔450m程度の所にあることを知り、さっそく気圧を測定してカニンガムのスリップ補正を修正してみるとカット径は理論と完全に一致した。カニンガムのスリップ補正の正しさと先人の偉大さを感じたものである。

## 4.3 測定評価

最近では粒子径の測定法も大きく進歩し、世界的にも国際規格ISOが整備されつつあるし、それにともなってJIS化が着々と進められている。特に、レーザー回折・散乱法の開発は急速に進んでおり、測定の迅速性、再現性、測定粒子径範囲の広さなど多くの優れた特徴から色々な所での実用が広がっている。これにより、化学機械プロセスの管理など相対的な測定は格段に進歩している。ただ、機器間の差異など適切な機器の調整は必要である。

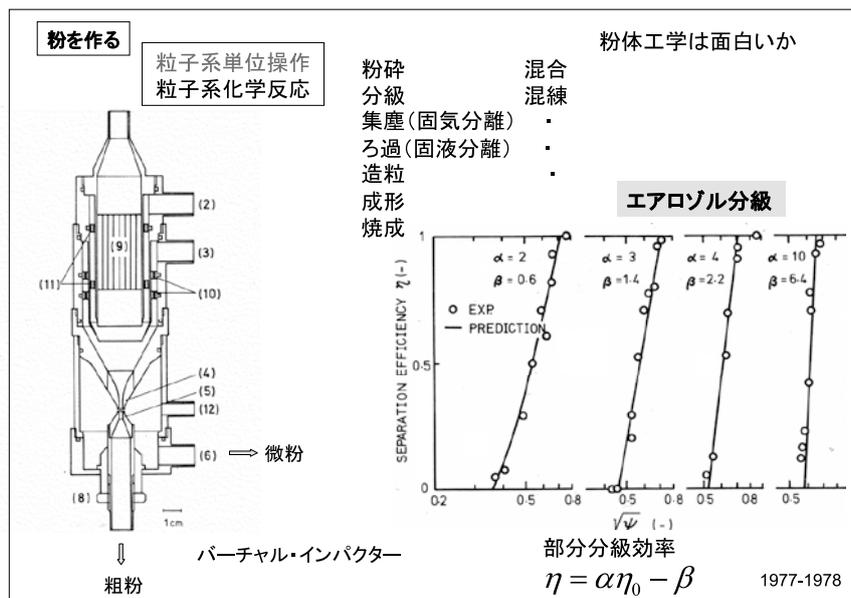


図3 粒子系単位操作（微粒子分級，バーチャルインパクター）

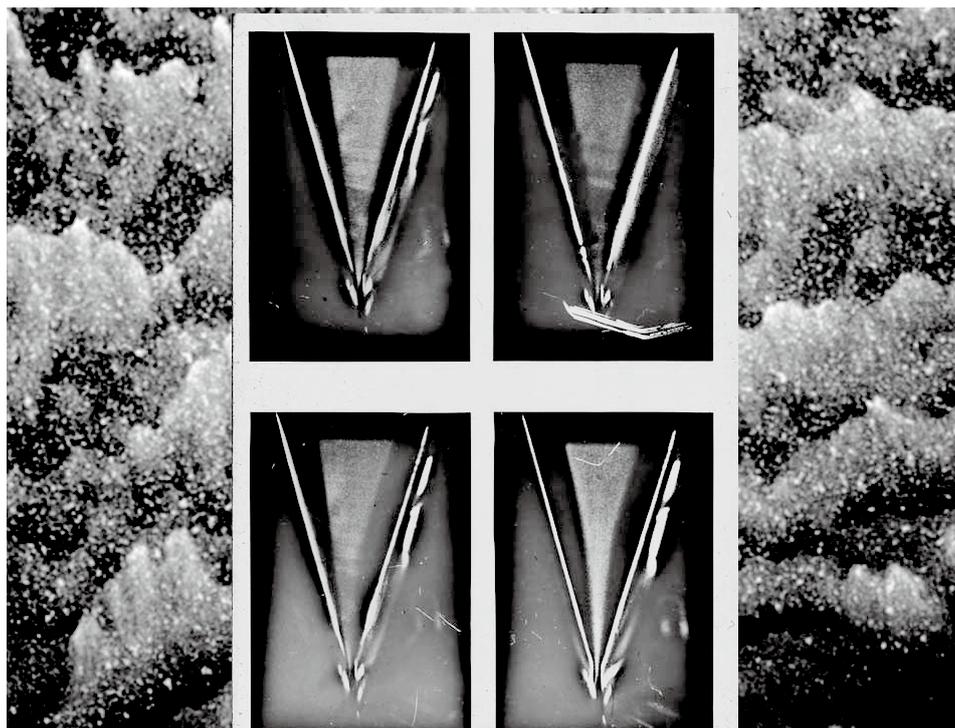


図4 バーチャルインパクトター内エアロゾル流 (矩形ノズル)

どんな測定機器でも絶対的な測定を行うには難しい問題がある。例えば、同一機種でも装置が異なれば測定結果が異なる場合もあるし、再現性は良くても測定するサンプル粒子の数(サンプルサイズ)が少ないまくり返し測定すれば、全体に偏った測定結果になる。このような問題を解決するためには標準粉体(あるいは標準粒子)が必要になってくる。特に、サンプルサイズの問題はある程度、粒子径分布の広い粉体を用いて検定しなければ正しいところは分からない。井

伊谷教授を中心として国際微粒子研究協会(IFPRI)の要請を受けて行った数年にわたる検討の結果、1 μm以上650 μmまでの2種類4段階、合計8試料の粒子が試験的に製造された。例えば標準粒子MBP1-10は粒子径が1 μmから10 μmの範囲にほぼ対数正規分布に従って分布しているチタン酸バリウム系のガラスビーズである。図5のバックにその電子顕微鏡写真を示す。粒子は球形で、標準となる粒子径分布は電子顕微鏡写真の画像解析によっている<sup>10)</sup>。幸

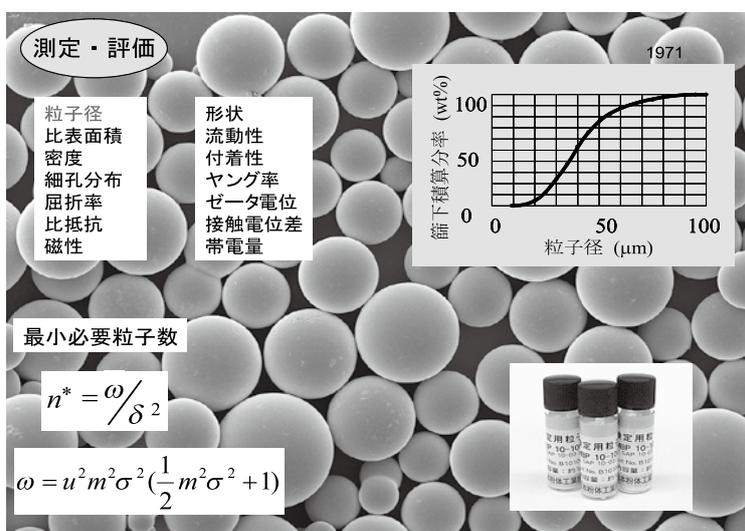


図5 測定と評価 (検定用標準粒子)

い、現在までに MBP1-10と MBP10-100の2種類が検定用粒子として日本粉体工業技術協会から頒布されている。なお、これらは多分散の粉体粒子であるので、計測粒子数が少ないと標準となる粒子径分布に誤差(不確かさ)を生じる。測定粒子数が少ないとどの程度の誤差を生じるのか、あるいは誤差を所望の範囲に抑えるには何個ぐらいの粒子を測定すればよいのかという疑問が最近の測定機器の進歩によって現実の問題になってきた。

この問題は筆者が京都大学・化学工学教室の研究生になった当初、井伊谷教授から与えられたテーマである。当時は問題の意味を考えるのに1ヶ月ぐらいかかったと思う。道を歩いていると考えていた。結論として、この問題は対数正規分布を仮定すれば、後は平均と分散の同時分布を求めることで完全に解析的に解ける。ポアソン分布とか統計的な仮定は全く必要にならない<sup>11, 12)</sup>。なお、測定機器を検定するための標準粒子の開発は、より小さい nm オーダーの粒子を開発対象として進んでおり、現在30nm-300nm が検討されている。

次に、図6は粒子の静電気帯電を支配する接触電位差の測定に関する研究結果の一例である。基準の金属との接触電位差が測定できれば、粒子の帯電に対する有効仕事関数が求められる。いろいろな粒子についてデータが集積されれば、帯電を利用する技術に即した材料開発も可能になるであろう。右上の図はアルミナ

粒子の表面をステアリン酸でコーティングした粒子の接触電位差がコーティング厚さによってどのように変化するかを測定した結果であり、変化はポアソンの式で完全に説明でき、しかもコーティング厚さが10~20nm もあれば粒子の静電特性は表層の成分でコントロールできることを示している<sup>13)</sup>。

左下の図は銅フタロシアニンの官能基を置換した誘導体について、接触電位差の変化傾向が分子軌道法による計算とほぼ合うことを示している<sup>14)</sup>。銅フタロシアニンの H を Cl で置換すると、新しい物質はいっそう負側に帯電し、さらに Cl を Br で置換するともっと負に帯電するようになる。材料をうまく構成して粒子が一体どこまで強く帯電するようにできるのだろうか。面白い問題があるように思えるが、その研究のためには測定・評価が今まで以上に重要になってくるであろう。しかし、帯電しやすい絶縁性の粒子の接触電位差の測定には解決しなければならない多くの難しい問題があり、興味深い分野である<sup>15,16)</sup>。その他、試料のサンプリングにおいて、特に乾式で扱う粉体では流路途中に付着してしまつて母集団とは違うものを測定に掛ける危険性があり、正確な測定を行うためには付着させないで粒子を輸送する技術の開発が必要である。

#### 4.4 粒子系基礎現象

いろいろな粉体技術の応用を広げて発展させていくためには、出来るだけ多くの基礎現象を見つけて明ら

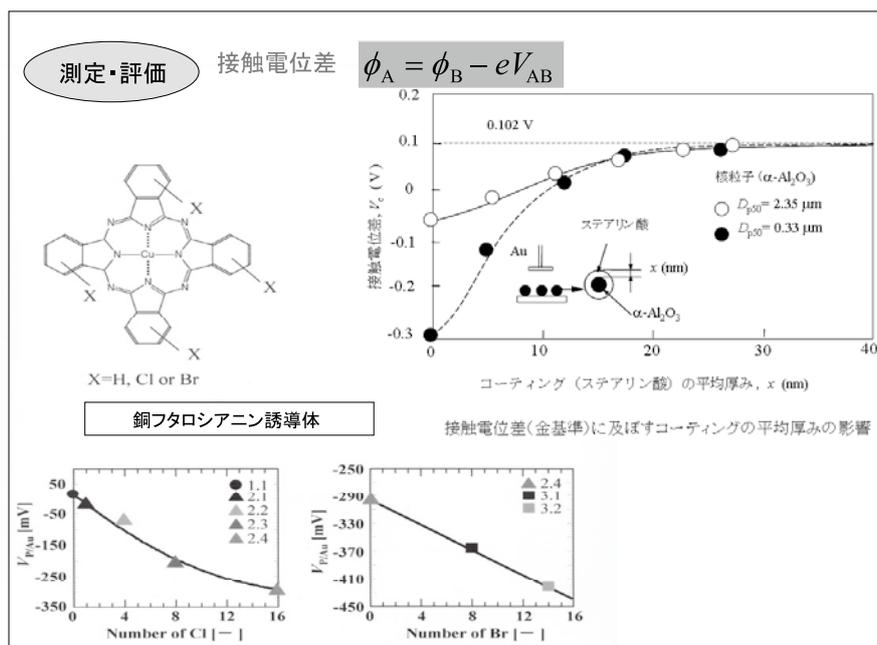


図6 測定と評価 (接触電位差)

かにしておくことが望まれる。まだ誰も気が付いていない現象が無いとは限らない。

粒子の帯電は装置の壁面など粒子とは異なる物質と接触あるいは衝突して起こる。図7は松坂らの実験で、落下する弾性球が下の板面と衝突するときの電荷の移動が、球が接触して離れるまでの極めて短い時間の間に起こり、球の帯電量はその間の最大の接触面積に比例していることを初めてはっきりと示したものである<sup>17)</sup>。帯電量が最大接触面積に比例するのは直衝突であるので、その間、球と板面はいつも新しい接触を

するためと考えられる。したがって、電荷の移動は接触時間よりも格段に速くなくてはならない。しかも帯電は速く、電荷の漏洩は遅いと考えられる。これを確かめるにはもっと速い観測技術が必要である。斜め衝突における帯電はさらに興味深く、帯電の符号が逆転することもある<sup>18)</sup>。また、すべりを伴う衝突と転がりの起きる衝突では帯電量も違ってくる<sup>19)</sup>。静電気の研究は何千年も続いているが、まだまだ興味深い基礎現象である。最近、技術の分野でも現象論を嫌う傾向があるようだが、分からない現象があることが研究や発

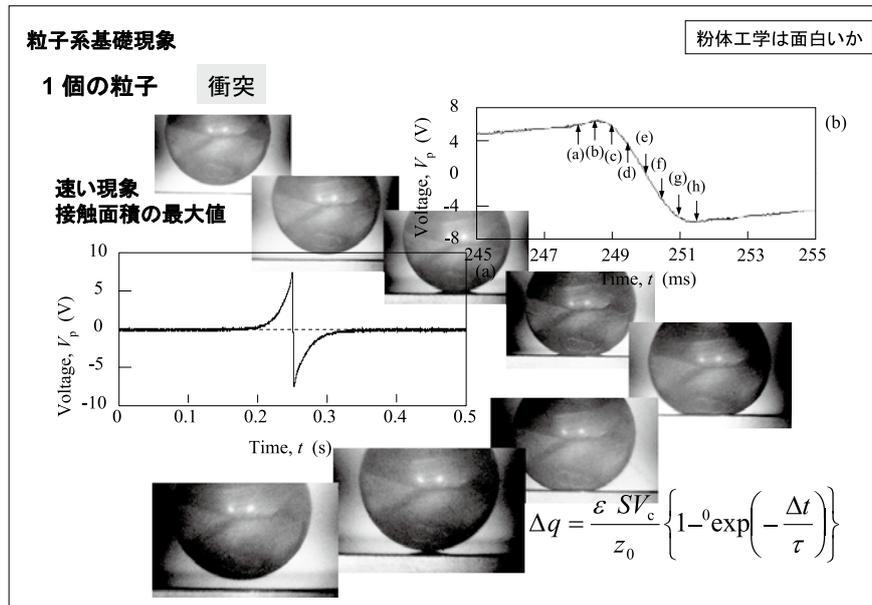


図7 粒子系基礎現象 (粒子の静電気帯電)

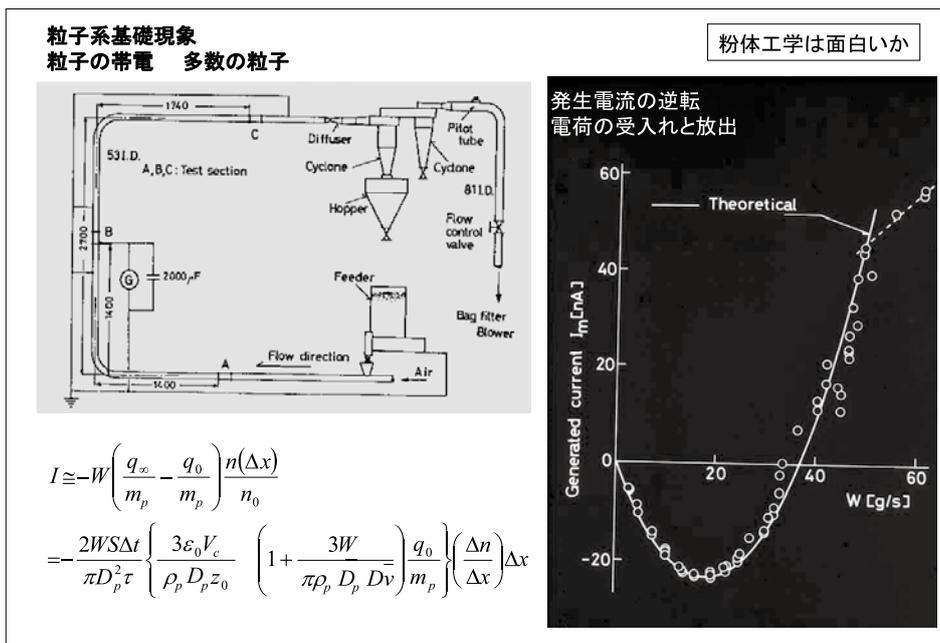


図8 粒子系基礎現象 (バンド部の発生電流)

展の基本であると思う。

図8は空気輸送の実験での一例である。空気輸送が行っていると、静電気による放電が頻繁に生じるので、どのくらい帯電するのかを静電電圧計で測定しようと試みた。しかし、当然なことなのだが、ごく短時間に2~3万ボルトに達して放電し、データにならなかった。そこで、こわごわ電流を測ってみると、こちらはごく小さい。発生した電荷をどんどん電流として流してしまえば、輸送管の電位は低く抑えられるわけである。この電流測定法を見つけたことでデータが順調に取れることになった。図8の右側にはベンドから発生した電流を示したもので、粉体の流量を多くしていくと電流の符号が負から正に逆転している。一見不思議なこの現象は電荷の収支を取ってみると説明できることが分かった<sup>20)</sup>。静電気現象にはまだまだ面白い

ことがあり、このような現象を一つ一つ納得できるように明らかにしておくことが粉体工学の着実な発展には欠かせないと思う。

寺田寅彦による「自然界の縞模様」が有名であるが、化学機械装置の中にも縞模様が見られる。図9はその一例で、微粒子の沈着と再飛散によって描かれた縞模様である<sup>21)</sup>。図10はインパクター内での縞模様で、冬の京都の北山杉を思わせる。このような沈着と再飛散の基本は粒子の付着力であり、古くから検討されているが、今なお完全な理解は難しい分野である。しかし応用は非常に広く、表面のクリーン化、材料の複合化など現在の先端技術の基礎となっている。沈着・再飛散は一種の相変化であり、図11のように、横軸に粒子の質量中位径をとり縦軸に断面平均流速をとって示すと、例えば粒子径が2  $\mu\text{m}$  の粒子が浮遊し

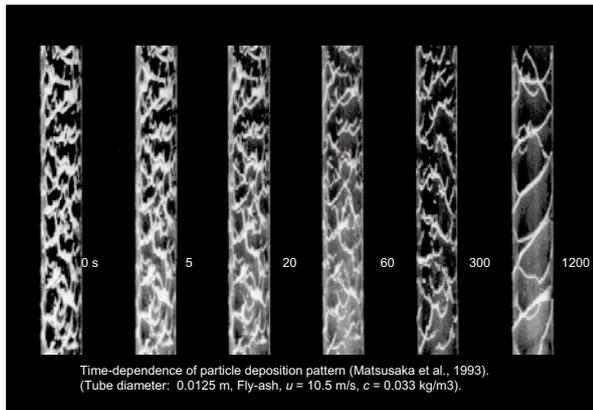


図9 粒子系基礎現象

(沈着・再飛散同時現象、輸送管内の縞模様)



図10 粒子系基礎現象

(インパクター内に沈着した粉体層)

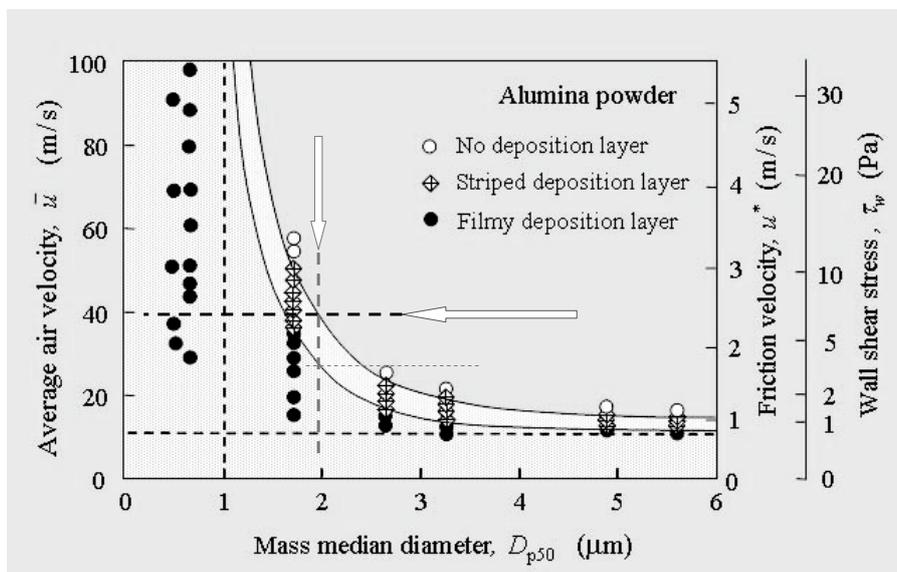


図11 沈着・再飛散同時現象の相図

た空気流は平均流速を下げていくと40m/s 辺りで流路壁面に縞模様を作り、25m/s 辺りで沈着粉体層を作る。逆に流速を40m/s に保った流れでは2.5 $\mu$ m 程度の粒子が縞模様を作り始め、それ以下の微粒子は沈着粉体層を作る<sup>22, 23)</sup>。ちょうど物質の気体・液体・固体への変化と類似している。ただ、粒子は分子ではないので、より一層複雑な問題を与えてくれている。

## 5. おわりに

粉体工学会の50周年記念講演をもとに、粉体工学は面白い可能性を秘めた分野であることを、筆者の経験を通して述べたつもりである。まだ分からないことが多くあり、ここでは述べなかったが100ミクロンを超えるような大きな粒子でも偏析などの面白い現象がある。粉体工学の対象は自然な流れとして、ミクロン、サブミクロンと進んでおり、ナノの領域は極最近になって活発になってきたものといえる。しかし、その基礎はすでにかなり持っており、粉体工学は将来にわたって思わぬ応用を見つけて大きく発展していくものと期待される。

### 引用文献

- 1) 増田弘昭, 増田富良, 井伊谷鋼一: “各種粉体供給機の実験”, 粉体工学研究会誌, 7, 479-484 (1970).
- 2) 増田弘昭, 増田富良, 井伊谷鋼一: “テーブルフィーダーの特性”, 化学工学, 35, 559-565 (1971).
- 3) 増田弘昭, 井伊谷鋼一: “スクレーパー位置変化に対するテーブルフィーダーのステップ応答”, 粉体工学研究会誌, 9, 227-233 (1972).
- 4) 増田弘昭, 伏代周司, 井伊谷鋼一: “微粉体の気中分散実験”, 粉体工学研究会誌, 14, 3-10 (1977).
- 5) Masuda, H., Gotoh, K.: “Dry dispersion of fine particles”, Colloids and Surfaces, 109, 29-37 (1996).
- 6) Masuda, H., Hochrainer, D., Stöber, W.: “An Improved Virtual Impactor for Particle Classification and Generation of Test Aerosols”, J. Aerosol Sci., 10, 275-287 (1979).
- 7) 増田弘昭, 元岡 司: “2段形式バーチャルインパクトの分級性能”, 化学工学論文集, 8, 717-721 (1982).
- 8) Masuda, H., Motooka, T., Tanabe, T.: “Size Classification of Industrial Sub-Micron Powder by a Virtual Impactor”, Powder Technol., 50, 155-161 (1987).
- 9) Gotoh, K., Masuda, H.: “Development of annular-type virtual impactor”, Powder Technol., 118, 68-78 (2001).
- 10) Yoshida, H., Masuda, H., Fukui, F., Takarada, Y., Sakurai, T., Matsumoto, H.: “Particle size measurement of standard reference particle candidates with improved size measurement devices”, Advanced Powder Technol, 14, 17-31 (2003).
- 11) Masuda, H., Iinoya, K.: “Theoretical Study of the Scatter of Experimental Data due to Particle-Size Distribution”, J. Chem. Eng., Japan, 4, 60-66 (1971).
- 12) Masuda, H., Gotoh, K.: “Study on the sample size required for the estimation of mean particle diameter”, Advanced Powder Tech., 10, 159-173 (1999).
- 13) 吉田英人, 福藺敏彦, 網 浩之, 井口裕司, 増田弘昭: “粉体・金属間の接触電位差に及ぼす粒子の表面処理の影響”, 粉体工学会誌, 29, 504-510 (1992).
- 14) Tanoue, K., Morita, K., Maruyama, H., Masuda, H.: “Influence of Functional Group on the Electrification of Organic Pigments”, AIChE Journal, 47, 2419-2424 (2001).
- 15) 野村俊之, 山田善之, 増田弘昭: “アルコール蒸気を用いた粉体層の除電と接触電位差”, 粉体工学会誌, 34, 418-424 (1997).
- 16) 野村俊之, 谷口格崇, 増田弘昭: “粉体の摩擦帯電特性に及ぼす操作環境条件の影響”, 粉体工学会誌, 36, 168-173 (1999).
- 17) Matsusaka, S., Ghadiri, M., Masuda, H.: “Electrification of an elastic sphere by repeated impacts on a metal plate”, J. Phys. D: Appl. Phys., 33, 2311-2319 (2000).
- 18) Tanoue, K., Yasuda, D., Ema, A., Masuda, H.: “Polarity change in the tribo-charge of particles with and without an initial charge”, Advanced Powder Technol, 16, 569-584 (2005).
- 19) Ema, A., Yasuda, D., Tanoue, K., Masuda, H.: “Tribo-charge and rebound characteristics of particles impact on inclined or rotating metal target”, Powder Technol, 135-136, 2-13 (2003).

- 20) 増田弘昭, 三井直弘, 井伊谷鋼一: “曲管部における固気 2 相流の発生電流”, 化学工学論文集, **3**, 508-509 (1977).
- 21) Indra Adhiwidjaja, 松坂修二, 増田弘昭, “エアロゾル流による粒子沈着層の形成機構”, 化学工学論文集, **22**, 127-133 (1996).
- 22) Matsusaka, S., Theerachaisupakij, W., Yoshida, H., Masuda, H.: “Deposition layers formed by a turbulent aerosol flow of micron and sub-micron particles”, Powder Technol., **118**, 130-135 (2001).
- 23) Theerachaisupakij, W., Matsusaka, S., Kataoka, M., Masuda, H.: “Effect of Wall vibration on particle deposition and reentrainment in aerosol”, Advanced Powder Technol, **13**, 287-300 (2002).

### Captions

- Fig.1 Outline of powder technology
- Fig.2 Powder handling (Feeding ; Table feeder)
- Fig.3 Unit operations for particle system (Fine particle classification; Virtual impactor)

Fig.4 Aerosol flow in the improved virtual impactor (Rectangular nozzle)

Fig.5 Measurement and evaluation (Reference particles for calibration of particle size measurement devices)

Fig.6 Measurement and evaluation (Contact potential difference)

Fig.7 Basic phenomena in particle system (Electrification of particles)

Fig.8 Basic phenomena in particle system (Electric current generated from a bend in a pneumatic conveyor)

Fig.9 Basic phenomena in particle system (Simultaneous phenomena of deposition and reentrainment; Striped pattern in transportation pipe)

Fig.10 Basic phenomena in particle system (Powder layer formed in an impactor)

Fig.11 Phase diagram for simultaneous deposition and reentrainment)