

## 粒子分散技術と粉体の付着性に関する一考察 A Study on Particle Dispersion Technique and Powder Adhesiveness

後藤 邦彰  
Kuniaki GOTOH

岡山大学大学院 自然科学研究科 教授  
Professor, Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, Japan

### Abstract

A method for dispersing dry particles is described in the point of view of adhesiveness of particle. In any dispersion method, the dispersion of an agglomeration comprised of smaller particles requires a higher powered dispersion force or separation force. However, the adhesion force between particles decreases with decreasing of particle size. This suggests the difficulties in applying the separation force to the agglomeration increase with decreasing particle size. This presumption leads to the expectation that the agglomeration of nano-order particles could be disrupted easily if an effective method for applying a dispersion or separation force could be found. Based on the presumption, we tried a novel dispersion method involving a coating of large carrier particles with fine particles and a surface cleaning by a sonication in a liquid. In this paper, concept and dispersed results of the method are introduced. In addition to the introduction of the dispersion method, how to express a powder adhesiveness relating to a dry dispersion and the example of an application of the adhesives to evaluation of disperser performance is also described.

### 1. はじめに

粉体を構成する粒子は付着力を持つ。このため、粉体をビンや袋など容器の中に保存すると、複数の粒子が付着した凝集体を形成する。また、粒子が気体中に浮遊した状態であっても、気体のブラウン運動や気流の渦運動などの影響で粒子同士が衝突し、凝集体を形成する。このようにして形成された凝集体（凝集粒子）を分離して、元の粒子（一次粒子）に近い粒子径分布を持つ状態にする操作が分散操作である。

粒子間付着力により形成された凝集体を分散させるためには、付着力を超える分離力（分散力）を凝集体に加える必要がある。この分離力を凝集体に与える装置が分散機である。分散機内で、粒子間付着力を超える分離力がすべての凝集体に加わると、凝集体は一次粒子へと分散する。空気や水などの媒体中で分散した

粒子は、当然のことながら、媒体中に浮遊する。浮遊した粒子は媒体分子のブラウン運動や流れの渦運動などの影響を受け、粒子の再凝集が生じる。このため、粒子を分散させるには、凝集体に分離力を加える操作と、分散を安定化させる操作が必要となる。この「分離」と「安定化」を装置内での滞留時間に対してみた概念図が図1である。付着力を超える分離力が凝集体に作用すると凝集体は瞬時に崩壊し、系内の粒子径は減少する。この後、ブラウン運動などによる凝集が始まる。分散後に理想的な安定化ができると、粒子は分離力が働いた直後の粒子径で分散機より排出される。一方、分散安定化がされず、分散機内での滞留時間が長い場合には、分散機内での流れ場から決まる平衡な粒子径となる<sup>1)</sup>。よって、分散技術としては、いかに凝集体に分離力を作用させるかと、分散した粒子をいかに安定化させるかが重要となる。

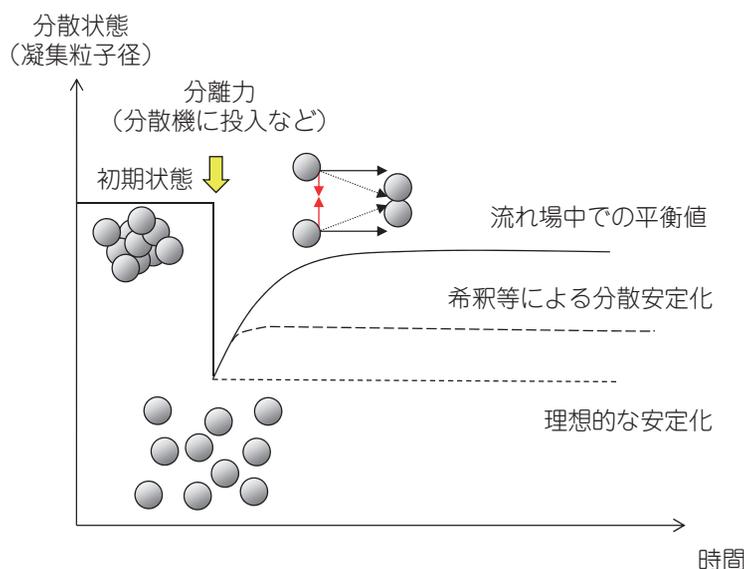


図1 分散状態変化の概念図

Fig. 1 Schematic illustration showing a change of particle size in a disperser.

これらのうち、本稿では「いかに凝集体に分離力を作用させるか」に着目する。この凝集体に分離力を作用させる、という操作は、付着した粒子を分離することであるので、その分離のし易さ、し難さは、「付着性」として表現される。また、この「付着性」という表現は、分散のし易さだけでなく、例えば、粒子の管内輸送やホッパー等の保存容器からの排出、供給装置など、特に、乾式での粉体単位操作において、その操作性の良否を決める特性としても使われる。そこで本稿では、凝集・分散に限らない付着性の一般的な考え方について概説し、その付着性を基にした凝集粒子分散法に対する一考察を紹介する。また、分散機性能を表すための指標としての付着性評価方法についても紹介する。

## 2. 付着性に基づく粒子分散の一考察

凝集粒子の分散の前に、一般的な付着性を考えるにあたって、図2に示す粒子径  $x$  の球形粒子が固体表面の下側に付着した状態を考える。この粒子には、固体壁との間に付着力  $F_v$  が鉛直上向きに作用する。この状態を考えると、分離力は鉛直下向きに作用する重力  $F_g$  である。支配的な付着力  $F_v$  として次式で表される van der Waals 力を仮定すると、 $F_v$  は粒子径の1乗に比例するので、 $F_v$  を表わす線は、横軸に粒子径、縦軸に力とした両対数グラフ上では、傾き1の直線とな

る。一方、重力  $F_g$  は式(2)のように、粒子径の3乗の関数であり、傾き3の直線となる。

$$F_v = \frac{A}{12z^2}x \quad (1)$$

$$F_g = \frac{\pi}{6}x^3\rho_p g \quad (2)$$

式(1)中の  $A$  は Hamaker 定数と呼ばれる粒子材質に依存する定数、 $z$  は分離距離と呼ばれ、粒子接触点での表面間距離を表す。また、式(2)中の  $\rho_p$  は粒子密度である。

付着力を表す直線(実線)と重力(=分離力)を表す直線(破線)は、両者の傾きの違いにより、交点  $x_c$  を持つ。この交点  $x_c$  以上の粒子径では付着力よりも重力の方が大きい、すなわち、粒子は固体壁に付着せず分離(=落下)する。一方、この交点  $x_c$  以下の粒子径では重力よりも付着力の方が大きく、粒子は固体壁に付着した状態となる。交点  $x_c$  より大きい粒子と小さい粒子を比較すると、小さい粒子は付着しやすく、「付着性が高い」ことになる。このように、「付着性」は付着力の大小だけでなく、実際の単位操作あるいはプロセス中で粒子に働く分離力の大小も反映した表現であると考えられる。

この図2の例と同様に、粒子凝集体の分散においても小さな粒子の分離は難しいことは実プロセスで観測される。凝集粒子の分散の場合、図2で例とした重力は分離力としては働かず、例えば、以下の式であらわ

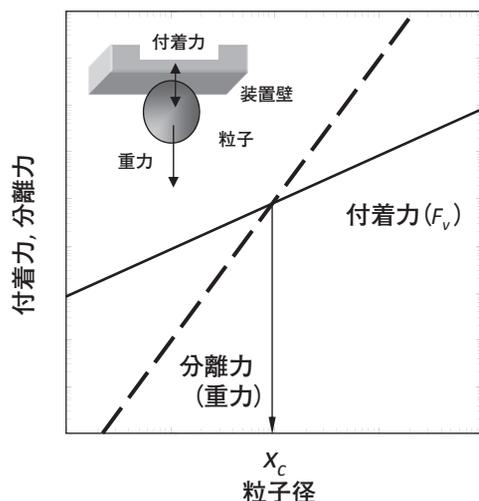


図2 付着力と分離力の比較模式図

Fig. 2 Conceptual diagram showing comparison between adhesion force and separation force. This diagram explains a definition of adhesiveness.

される物体との衝突による衝撃力  $F_i$  や急激な加速により付着している2粒子（粒子径： $x_A$  と  $x_B$ ）に生じる力  $F_d^{2,3)}$  などが分離力として作用する。

$$F_i = m_p v_i / \Delta t \quad (3)$$

$$F_d = 3\pi\mu u_r x_A x_B \frac{(x_A - x_B)}{(x_A^2 - x_A x_B + x_B^2)} \quad (4)$$

ここで、 $m_p$  は粒子質量、 $v_i$  は粒子の物体への衝突速度、 $\Delta t$  は衝突時の接触時間を、また、 $\mu$  は流体粘度をそれぞれ表す。

ここに挙げた例のように、多くの分離力は粒子径が大きいほど大きく、粒子径の減少と共に小さくなる。この分離力の粒子径依存性が、重量と同様、付着力の粒子径依存性よりも大きい場合、その両者の関係は図2と同様になり、小さなものほど分離し難くなる。仮に、分離力の粒子径依存性が無い、すなわち、粒子径に依存しない分離力を作用させることができれば、図2中でその分離力は水平線となり、付着力の小さな微小粒子から順に分離する。例えば、van der Waals力が支配的な付着力である場合、付着力の粒子径依存性は粒子径の1乗の関数となるので、分離力が粒子径に全く依存しない場合や粒子径の1乗以下の関数で表される場合には、交点  $x_c$  以下の粒子径では分離力が付着力を上回り、小さな粒子ほど分散し易いことが予想される。

このことは、一般的に分散が困難とされる微小粒子

も、作用させる分離力を変えると分散し易くなることを示唆する。しかし、流体運動や粒子の運動に起因する分離力は一般に、体積や投影面積など粒子径の1乗以上の関数となる。このため、van der Waals力で付着した粒子は小さいものほど分散し難い。微小粒子分散のためには、粒子径に依存しない、または、依存性が低い（＝力が粒子径の1乗以下）となる作用力を考える必要がある。そのひとつとして、物体で凝集粒子を挟み込むなど機械的な力を粒子に直接作用させる方法が考えられる。小粒子を大粒子と共にボールミルなどの混合・粉砕装置により乾式で混合する操作は、そのひとつである。小粒子を大粒子と共に混合すると、微小粒子が大粒子表面上に付着し、粒子層を形成することは、造粒・コーティング操作として知られている。また、混合条件を適切に選択すると、微小粒子は単一粒子層の状態で付着することも知られている。ここで、微小粒子の変化に着目すると、混合機投入前には微小粒子同士が付着した凝集体を形成しているので、コーティング操作は微小粒子の凝集体を分散し、大粒子表面上に付着・保持させる操作であると言える。また、単一粒子層が形成された場合には、微小粒子の凝集体は一次粒子にまで分散されていることになる。

そこで、乾式混合操作により大粒子上に形成した微小粒子の単一粒子層を、液中で大粒子から剥離・分離できれば、微小粒子の液中分散が達成できると考えられる<sup>4)</sup>。この付着した微粒子を大粒子から剥離・分離するプロセスは、固体汚染物質の湿式洗浄<sup>5)</sup>と同じプロセスであり、超音波洗浄が利用できると考えられる。すなわち、図3にフローチャートを示したように、第1ステップとして、分散対象となる微小粒子を大粒子と乾式で混合することで、大粒子上に微小粒子が付着した被覆粒子を作成し、この被覆粒子を液中に投入して超音波ホモジナイザーにより超音波洗浄することで、微小粒子を大粒子から剥離できれば、微小粒子を液中に分散させることができると考えられる。このプロセスにおいて、乾式混合時に単一粒子層を形成することができ、かつ、その単一粒子を大粒子から完全に剥離することができれば、微小粒子の完全分散を達成できるはずである。このとき大粒子は、ナノ粒子で構成された凝集体を分散する分散作用を持つと同時に、ナノ粒子を液体中へ分散する時のキャリアとして働く。そこで、大粒子を「キャリア粒子」と称する。

実際に試料粒子（＝分散対象粒子）として個数中位

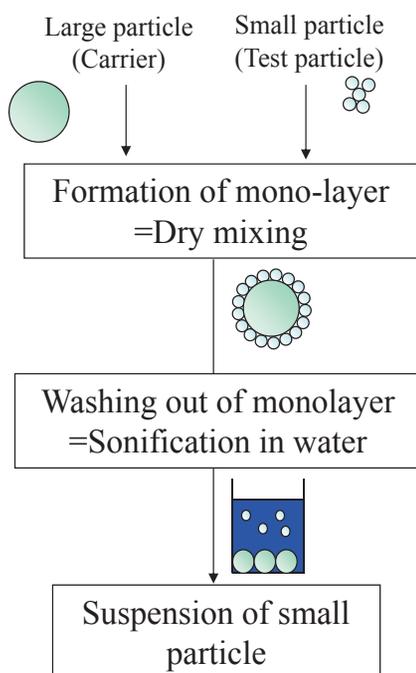
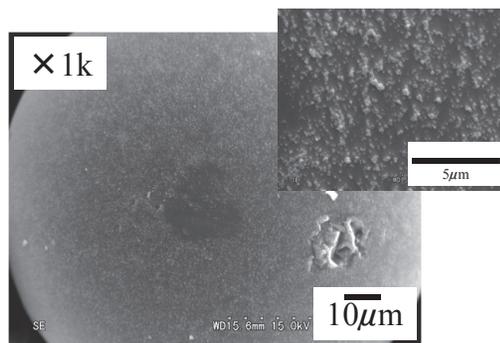


図3 乾式混合と湿式洗浄の組合せによる粒子の分散手順

Fig. 3 Dispersion procedure involving a dry coating and wet surface cleaning.

径 74 nm の球形シリカ粒子を、キャリア粒子には中位径  $137.5 \mu\text{m}$  の球形ガラスビーズをそれぞれ用い、メノウ製乳鉢により手で 10 分混合した時のシリカ粒子の付着状態を図 4-a) に示す<sup>4)</sup>。ここで、微小粒子とキャリア粒子の混合質量比  $M$  (= 混合したシリカ粒子量と、キャリア粒子表面を最密充填で単一層被覆するのに必要なシリカ粒子量との比) は 0.25 とした。図からわかるように、球形シリカ粒子はほぼ単一粒子として付着している。この混合後のシリカ粒子が付着したキャリア粒子を  $50 \text{ cm}^3$  の純水中に投入し、130 W の出力を持つ超音波ホモジナイザーで 30 分間超音波照射した結果、図 4-b) に示すように、ほぼ全てのシリカ粒子がキャリア粒子表面から除去されていた。超音波分散後、粒子懸濁液を静置し、キャリア粒子を重力沈降させ、上清みを取り出すことで、シリカ粒子懸濁液を分離して得られた液中でのシリカの粒子径分布測定結果の一例を図 5 に示す。同図中には、SEM 観察結果を画像解析して得られた一次粒子径分布、および、乾式混合せずにシリカ粒子を直接、液中に投入し、超音波照射した場合の結果も合わせて示した。ここで試行した乾式混合と液中超音波を組み合わせたキャリア粒子法で得られる粒子径分布は、SEM



a) 乾式混合後 (右上は拡大写真)



b) 超音波洗浄後

図4 微粒子付着状態の電子顕微鏡写真

Fig. 4 SEM images of carrier particle surface used in a dispersion procedure shown in Fig.3.

a) After dry coating (right side an enlargement image)

b) After wet surface cleaning by a sonification

観察結果である一次粒子径分布と、粒子径の小さい領域では一致しないが、ピークの粒子径はほぼ一致し、また、超音波照射のみの場合よりも、一次粒子径分布に近い分布となっていることがわかる。

ここで、キャリア粒子法と超音波照射のみの場合を比較すると、キャリア粒子法では超音波照射時にキャリア粒子、すなわち、大粒子が存在していることが違いとして挙げられる。大粒子と微小粒子の混合物に超音波照射した場合、大粒子の運動により微小粒子の分散が促進することが予想される。そこで、キャリア粒子法に用いたものと同じ粒子のガラスビーズを同量、シリカ粒子と共に、直接液中に投入し、超音波照射させた場合の結果も図 5 に示した。大粒子と共に超音波分散した場合、微小粒子だけの場合よりも粒子径分布は若干微小粒子側に移動するが、その変化量は小さく、また、キャリア粒子法により得られる粒子径よりも大きい。よって、キャリア粒子法で、微粒子凝集体は、液中での超音波照射ではなく、乾式混合によって主に分

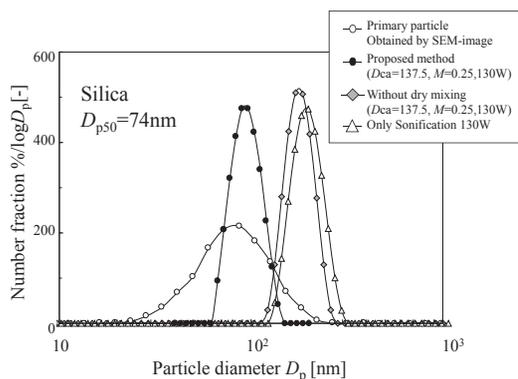


図5 液中分散結果の一例  
Fig. 5 Typical dispersion results.

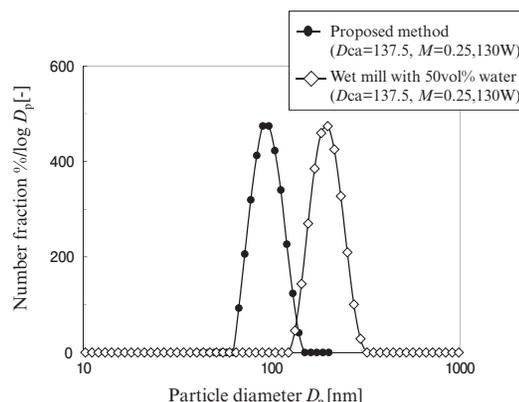


図7 乾式混合と湿式混合での分散状態比較  
Fig. 7 Comparison of dispersion results obtained by dry mixing and wet mixing.

Large body for mixing beads

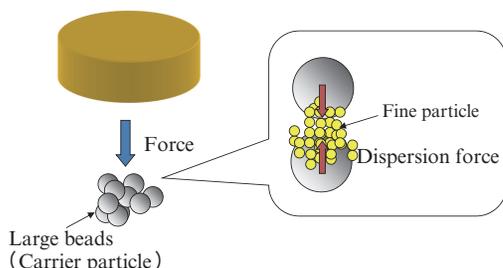


図6 力の伝播の模式図  
Fig. 6 Conceptual illustration explaining a force propagation from a large body used in a coating or a mixing to fine particles.

散されたと考えられる。

別の観点で、キャリア粒子法と超音波照射のみの場合での、超音波照射前の粒子の状態に着目する。キャリア粒子法では超音波照射前にはガラスビーズにシリカ粒子が付着した状態、すなわち、大-小粒子の凝集体であると言える。一方、超音波照射のみの場合には、微小粒子同士の凝集体である。よって、キャリア粒子法と超音波照射のみの場合の違いは、凝集体を構成する粒子径の組み合わせであると言える。この組み合わせの違いにより超音波照射後の分散状態が異なるので、ここで試行したキャリア粒子法は、微小粒子凝集体を超音波照射により分散しやすい凝集体に組み替える操作であると考えられる。

次に、キャリア粒子法の操作を力の伝播から考える(図6)。提案した操作は、乳棒によりガラスビーズに力を与え、その力に誘起されたガラスビーズの運動によりシリカ微粒子凝集体を分散させる分散力を発生させている。この乳棒を攪拌棒と考えれば、この力の伝

播と分散力の発生はビーズミルと同じである。そこで、ここまで乾式で行っていた混合操作を、液を添加して行えば、本法と湿式ビーズミル分散との擬似的な比較が可能であると考えた。そこで、質量比で50%となるように純水を添加して、乳鉢で混合し、その後、超音波照射した結果を図7に示す。液添加した場合の分散結果は、乾式混合よりも悪いことがわかる。違いは前述のように、混合時の液添加のみであるので、この結果は湿式ビーズミルによる粒子分散において、液体の存在が分散性能を低下させている可能性を示唆する。

この乾式混合と湿式混合の違いは、微粒子の存在状態であると考えられる。すなわち、乾式混合では混合操作中も微粒子はガラスビーズに付着しているのに対し、湿式混合では液体中に浮遊するものと考えられる。ビーズミルでは、ビーズ粒子同士の衝突・接触により微粒子が分散するので、ビーズに付着する乾式操作の方が、ビーズ衝突・接触時にビーズ間から逃げる液体中に浮遊する湿式操作よりも、微粒子にビーズからの分散力が伝わりやすいものと考えられる。湿式ビーズミルは実プロセスでも使用され、その分散効果が認められているため、この「液中ではビーズからの力が伝わりにくい」という予測に疑問が残る。しかし、Nishiura et.al<sup>6)</sup>はシミュレーションから、ビーズの接近時に生じる媒体の伸長流れの分散効果を指摘している。よって、伸長流れが、現在使用されている湿式ビーズミルでの主要な分離力を生じさせると考えると、液中での攪拌混合ではビーズ衝突により生じる力が伝わりにくいとする予測と矛盾しない。

この液中での攪拌混合ではビーズ衝突により生じる

力が伝わりにくいという予測が正しければ、ビーズと微粒子が付着する、若しくは、液中であってもビーズの接近・衝突時に微粒子が逃げない状態で混合すると、分散状態が良くなると考えられる。この液中で微粒子が逃げない状態は、図8-a)のように、キャリア粒子間に液膜が形成する程度の少量の液を添加することで実現できる。そこで、少量の液を添加して混合を行い、その後、液中での超音波分散を行った。その結果、図8-b)に示すように、シリカ質量に対する添加液質量割合  $S$  が10%以下では、添加量0、すなわち乾式混合時とほぼ同じ個数中位径の分散状態が得られた。このことより湿式ビーズミルでも、ビーズ間の接触点近傍にナノ粒子が選択的に存在する条件で操作すると分散効果が向上することが示唆される。このように、付着性、すなわち、付着力と分離力のバランスから考えると、分離力をいかにかけるかが分散操作には重要であり、分散し難い微小粒子の分散操作を考える際、従来法で分離力を上げるといった改良の方向だけでなく、粒子径に依存しない分離力を与える方法を考

る、という異なった視点での分散法の検討が可能となる。

なお、ここでは気相中での分散と液相中での分散を区別せずに記述している。当然のことながら、気相中と液相中では支配的な付着力が異なる場合があるし、凝集粒子を分離した後の分散安定化に使うことのできる諸現象も異なる。また、気体と液体では粘度が異なるので、同じ操作でも分離力の大きさは異なるし、利用できる分離力も異なる。しかし、「凝集粒子の分離力を加える際の考え方」については同じであると考え

### 3. 付着性評価と分散機性能の表記

ここまでは、付着性から分散操作の改良法を考えてきた。分散操作に限らず、実プロセスでの操作を考える際には、増田<sup>7)</sup>が指摘しているように粉体物性を把握することが重要である。その際、操作結果と関連する粉体物性（これを、粉体の特徴を表す物性と区別する意味で粉体操作物性と称す）を用いることが必要である。粉体操作物性は、対象とする粉体操作と同じ現象が支配要因となる規格化された操作を操作対象の粉体に加え、その結果として現われる挙動を定量化することにより評価できる。

そのような粉体の分散に関する粉体特性の一つに、図9に示す装置を用いた分散度（Dispersibility）評価法がある<sup>8)</sup>。分散度評価のために、まず、高さ  $H$ （原論文では24インチ）より、粉体  $m_0$ （原論文では10g）を一度に時計皿（原論文では直径4インチ）の上に円筒を通して落下させ、皿の上に残った重量  $m_r$  を測定する。供給量と時計皿上に残った重量より飛散量  $(m_0 - m_r)$  を求め、供給量に対する飛散量の比  $(= (m_0 - m_r) / m_0)$  を分散度と呼び分散性の指標とする。本方法は、Carrにより提案された流出特性（Floodability）を評価する試験一つとして提案されたものである。Carrによると、分散度が50%以上では分散性が良いとされている。この方法は、規格化された操作、すなわち、静止空間で重力により粉体を落下させる操作から考えて、例えば、ホッパーからの排出時の粉体の分散（この場合、“飛び散り”と表現した方が分かり易いと思われる）結果を表現するのに適していることが予想される。

本稿で対象としている気流により凝集粒子が分離・分散する過程に対しては、図10-b)に示すように、気

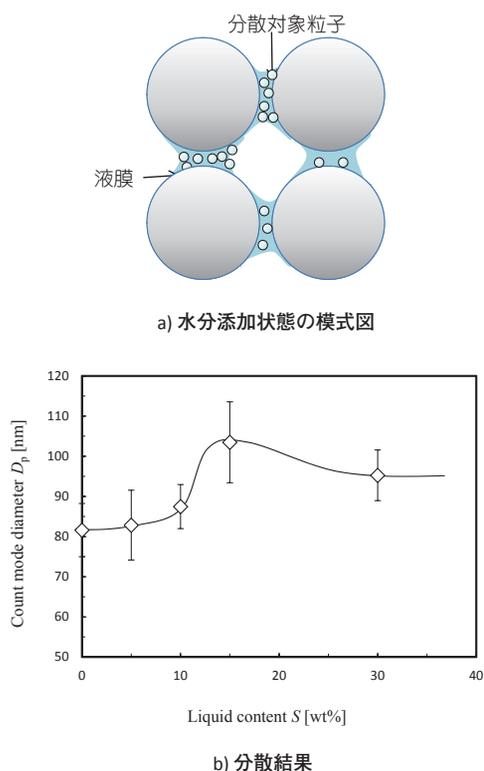


図8 水添加量に対する分散状態変化

Fig. 8 Particle size change with a water content  
 a) Schematic diagram of liquid bridge formed by an addition of water  
 b) Dispersion results

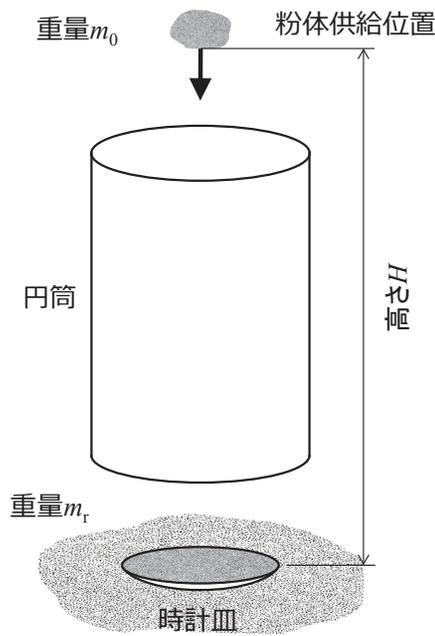


図9 分散度評価法

Fig. 9 Evaluation method for dispersibility.

流により粉体層からの粒子が凝集粒子として飛散する過程が類似していると考えられる。この気流により粉体層から粒子が飛散し始める流速より付着性、分散性を求める方法も、分散に関わる付着特性を表す指標として提案されている<sup>9)</sup>。この方法は粒子の飛散現象を利用したもので、実験では図11-a)に示す装置を用い、粒子充填率 $\phi$ を変えて粒子が定常的に飛散を開始する最低流速(=飛散開始気流流速) $u_c$ を求める。次式を用いると、この飛散開始気流流速 $u_c$ より飛散開始時に粉体層表面に働く気流せん断応力 $\tau_c$ が計算できる。

$$\tau_c = C_f \frac{\rho_a u_c^2}{2}$$

$$C_f = 16/Re \quad (Re < 2300) \quad (5)$$

$$C_f = 0.0791 Re^{-1/4} \quad (Re \geq 2300)$$

ここで、 $\rho_a$ は気体の密度、 $Re$ はレイノルズ数(= $\rho_a u_c D$ ,  $\mu$ : 気体の粘度、 $D$ : 流路の水力相当直径)である。この気流せん断応力 $\tau_c$ と粉体引張破断強度 $\sigma$ の間には次式が成立することが報告されている<sup>10)</sup>。

$$\tau_c = k\sigma \quad (6)$$

$k$ は比例定数であり、例えばフライアッシュ(JIS Z8901 No.10)では0.38である。一方、引張破断強度 $\sigma$ は次のように表わされる<sup>11)</sup>。

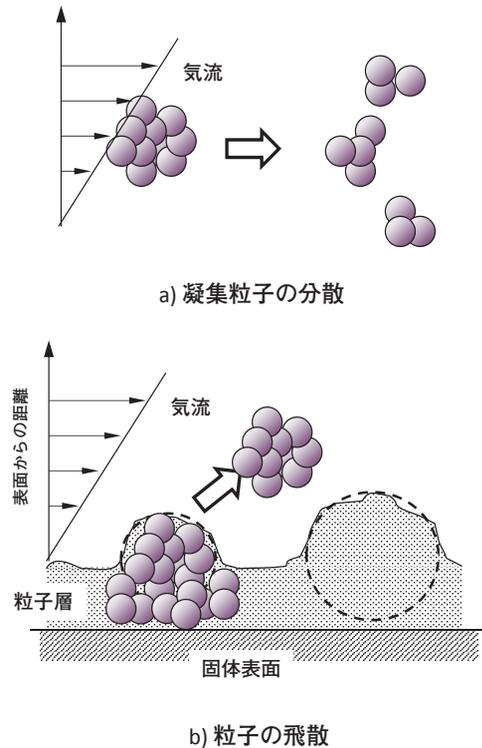


図10 気流による凝集粒子分離の概念図

Fig. 10 Conceptual illustrations showing a separation of particle agglomeration by an air flow.

- a) Dispersion of agglomeration  
b) Re-suspension of particles from a layer

$$\sigma = \frac{\phi k_n F}{\pi D_p^2} \quad (7)$$

式中の $F$ は粒子間付着力、 $k_n$ は充填率 $\phi$ に依存する粒子の配位数である。配位数 $k_n$ の推定にはRidgway-Tarbackの実験式<sup>12)</sup>を利用することができる。

$$k_n = 13.8 - \sqrt{175 - 232\phi} \quad (8)$$

式(6)を式(7)に代入し、まとめると次式が得られる。

$$\frac{kF}{\pi D_p^2} = \frac{\tau_c}{\phi k_n} \quad (\equiv F_p) \quad (9)$$

上式の左辺は粒子物性である粒子間付着力と粒子径を反映した値となり、実験条件(ここでは充填率)に依存しない特性値であると考えられる。上式から求められる値( $F_p$ と定義する)を実験的に求めた結果を図12に示す。充填率が低い領域では、粒子間付着力 $F$ が充填率により変化する粒子間距離によって変化するため、 $F_p$ は一定とはならないが、充填率の増加に伴い一定値に漸近する。この漸近値を付着特性値 $F_{p0}$

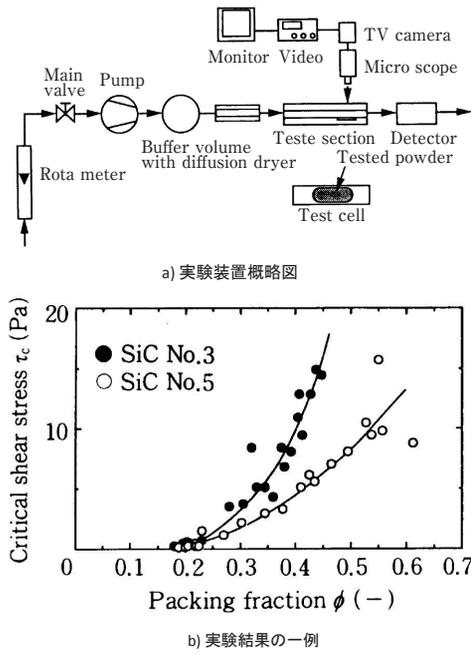


図11 粉体層からの粒子飛散実験  
 Fig. 11 Experiment for a re-suspension of particles from a layer.  
 a) Experimental apparatus  
 b) Typical results

とすることで、気流により凝集体が崩壊する際の指標となる粉体特性を求めることができる。ただし、この方法で得られる特性値は、粉体層表面に働く気流せん断応力  $\tau_c$  に基づくもの、言い換えると分離に要する気流の力を指標としており、飛散時に粒子に働いた分離力に基づくものではないことに注意する必要がある。

この特性値を用いて分散機の性能を表現した例を図12に示す。ここで、試料粒子の分散状態は次式で定義した分散度  $\beta$  を用いた。

$$\beta = \int_0^{D_p^*} f_d dD_p + \int_{D_p^*}^{\infty} f_0 dD_p \quad (10)$$

$$= 1 + F_d(D_p^*) - F_0(D_p^*)$$

式中の  $D_p^*$  は頻度分布の交点の粒径、 $f$  は頻度分布、 $F(D_p)$  は積算粒度分布を表わし、添字 d、0 はエアロゾル状態、一次粒子をそれぞれ表わす。この定義によると、エアロゾル中の粒子がすべて一次粒子となっている状態、すなわち、完全分散状態では一次粒子径頻度分布とエアロゾルの頻度分布は完全に重なり、分散度  $\beta$  は 100% となる。

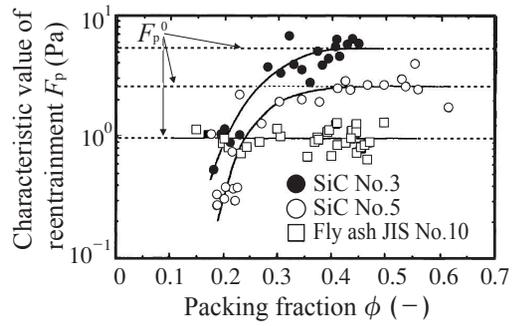


図12 充填率に対する飛散特性値  $F_p^0$  の変化  
 Fig. 12 Re-suspension characteristic value  $F_p^0$  as a function of packing fraction of particle layer.

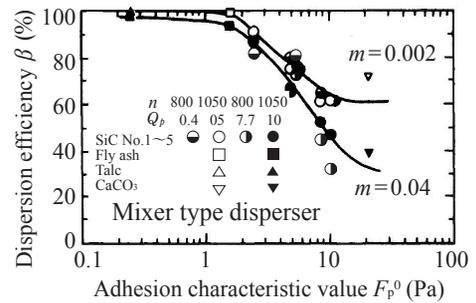


図13 付着特性値  $F_p^0$  と分散度  $\beta$  による分散機性能の表記例  
 Fig. 13 Example for an expression of disperser performance by using adhesion characteristic value  $F_p^0$  and dispersion efficiency  $\beta$ .

このように、ある分散機について、粒子径や材質の異なる複数種の粉体、すなわち、特性の異なる粉体を試料とした分散実験結果を分散度  $\beta$  などで表わし、かつ、分散時の凝集体挙動と類似した、規格化した操作から得られる特性値を求め、両者をプロットすると、試料粒子に依らない分散機の性能曲線を得ることができる。

#### 4. おわりに

本稿では、「付着性」をキーワードとして、分散操作に関しての一考察を紹介した。付着性は、付着力と分離力のバランスで定義される付着状態からの粒子の分離のし易さ、し難さを表す、ということ意識すると、分散し難い粒子、すなわち、付着性の高い粒子の凝集体を分離・分散するためには、付着力を小さくすること、分離力を大きくすることが有効であると考

えられる。この付着性の考え方に基づくと、実プロセス中で経験する「小さな粒子は分散し難い」という事実は、分離力が粒子径に依存し、かつ、その依存性が付着力の粒子径依存性よりも大きいことに起因すると予想できる。よって、粒子径依存性が小さい分離力を凝集粒子に作用させることができれば、付着力の小さな微小粒子の方が分散し易いことになる。このように、付着性から考えると、分散方法を見直すことができる。

一方、分散操作では、その操作の改良、改善だけでなく、既存の分散法の適用範囲、すなわち、分散性能評価も、実プロセスで分散機を選定する際などに重要となる。性能の評価は、試験に使用する試料に依存しない表現、すなわち、測定可能な分散し易さの指標と分散状態の相関で表現できると、分散させたことな

い粉体の分散結果を予想することができる。このような指標を「粉体操作物性」と呼び、評価対象の操作と同じ現象が支配要因となる、規格化された操作を、操作対象の粉体に加え、その結果として現われる挙動を定量化することにより評価できることを紹介した。

ここでキーワードとした「付着性」という言葉は、付着のし易さ、し難さを経験的に、かつ、定性的に表す言葉としてよく用いられている。しかし、技術者の方と話をしていると「付着性」=「付着力」という誤解が散見できた。そこで、その考え方を整理したことが本稿の前半で紹介した研究の発端である。ここで示したように、概念を明確に定義すると、経験的な結果を整理することができ、対象としている操作の改善や評価に利用できるものと筆者は考えている。

#### 参考文献

- 1) 高橋幹二: “エアロゾル学の基礎”, 森北出版, p.p.138-145 (2004).
- 2) Kousaka, Y., Okuyama, K., Shimizu, A. and Yoshida, T.: “Dispersion Mechanism of Aggregate Particles in Air”, *J. Chemical Eng., Japan*, **12**, 1979, 152-159.
- 3) 向坂保雄, 遠藤禎行, 堀内貴洋, 新居田亨: 気流の加速による凝集粒子の分散, 化学工学論文集, **18**, 1992, 233-239.
- 4) Gotoh, K., Kawadu, T., Yoshida, M. and Oshitani, J.: A Method for Dispersing Dry Nano-sized Particles in a Liquid Using Carrier Particles, *Adv. Powder Technol., Adv. Powder Technol.*, **21**, 2010, 34-40.
- 5) Farmer, A.D., Collings, A.F. and Jameson, G.J.: Effect of ultrasound on surface cleaning of Silica Particles, *Int. J. Miner. Process*, **60**, 101-113 (2000).
- 6) Nishiura, D., Wakita, Y., Shimosaka, A., Shirakawa, Y. and Hidaka, J.: Estimation of Power during Dispersion in Stirred Media Mill by DEM-LES Simulation, *J. Chem. Eng. Jpn.*, **43** (10), 2010, 841-849.
- 7) 増田弘昭: フィーダーの動特性とトラブル, 粉体と工業, 1982 (9), 40-48.
- 8) Carr, R.L.: Evaluating Flow Properties of Solids, *Chem. Eng., Jan.*, **18**, 1965, 163-168.
- 9) 増田弘昭, 後藤邦彰: 乾式分散機の性能評価, 粉体工学会誌, **30**, 1993, 703-708.
- 10) 増田弘昭, 松坂修二, 生三俊哉: “矩形空気流路内微粉体層からの粒子の再飛散”, 化学工学論文集, **11**, 1985, 48-54.
- 11) 粉体工学会編: 粉体工学ハンドブック, 朝倉書店, 2014, p.p.252-254.
- 12) Ridgway, K. and Tarback, K.J.: *Brit. Chem. Eng.*, **12**, 1967, 384-388.