



粉体特性評価法の高度化と先進粉体ハンドリング技術への展開

Advancements in Powder Characterization Methods and Developments in Advanced Powder Handling Technology

松坂 修二

京都大学大学院工学研究科 教授

Shuji MATSUSAKA

Professor, Graduate School of Engineering, Kyoto University, JAPAN

抄 録

粉体ハンドリングは、付着性、流動性、帯電性などの粉体特性と密接に関係している。これらの特性は、複数の要因が複合的に影響するため、理論的な手段だけで予測することは難しく、評価試験が必要である。また、諸特性を平均値や代表値で示すだけでは不十分であり、分布やプロファイルが得られるようにすべきである。評価試験には、粉体の取り扱い工程と同様に、振動や静電気あるいは各種外力が必要である。本稿では、これらの要件を満たす粉体特性評価法を解説したのち、振動を利用した粉体ハンドリングの事例として、粉体供給装置、粉体攪拌装置、気泡流動層など、革新的な機構を備えた装置を紹介する。さらに、静電気を利用した粒子の浮揚、分散、混合技術も紹介する。

ABSTRACT

Powder handling is closely associated with several powder characteristics, including adhesiveness, flowability, and chargeability. Predicting these characteristics solely through theoretical means is challenging due to the combined effects of multiple underlying factors, thereby necessitating evaluation tests. Moreover, expressing these features solely in terms of average or representative values is inadequate; therefore, methods for obtaining distributions or profiles are recommended. The evaluation tests, similar to powder handling processes, require the application of vibration, static electricity, and various external forces. This article describes powder characterization methods that satisfy these requirements, then presents examples of powder handling applications that employ vibration incorporating innovative mechanisms such as powder feeders, powder agitators, and bubbling fluidized beds. Additionally, it introduces technologies that utilize static electricity for particle levitation, dispersion, and mixing.

1 はじめに

粒子の基礎物性は、粒子径、粒子形状、粒子密度、比表面積など、個々の粒子が単独で示す特徴や性質であり、それぞれの定義に従って数値で表せる。こ

れに対して粉体特性は、粒子-粒子間、粒子-平板間など、同種あるいは異種物体間で示す特徴や性質であり、定義づけが難しく、数値化しても幅があり、相互の素材や表面性状に加えて、温度・湿度などの環境条件にも依存するので、正確に評価するには条

件を細かく設定しなければならない。

粉体ハンドリングと密接に関係するのは、粒子の基礎物性よりも粉体特性である。その代表例は、付着性、流動性、帯電性であり、いずれも複数の基礎物性が複合的に影響するため、理論的な手段だけで各特性を予測することは難しい。論文や書籍に特性値が記されていたとしても、諸条件に依存することを理解した上で、一つの目安として利用するのがよい。したがって、多くの粉体を異なる条件で扱う場合、適切に行われた特性評価試験の結果で判断しなければならない。

昨今、製品の開発・改良に対する考え方は多様化しており、機能や品質をさらに向上させるには、研究・開発段階だけでなく、生産段階でも識別感度が十分に高い粉体特性評価試験を行う必要がある。評価試験の操作や手順はできるだけ簡単な方がよいが、諸特性を平均値や代表値で示すだけでは不十分であり、分布やプロファイルが得られるようにすべきである。

本稿では、粉体ハンドリングに関係する特性として、付着性、流動性、帯電性を取り上げ、これまでに得られた知見を紹介するとともに、新しい粉体ハンドリングへの展開を考える。

2 粉体特性評価

2.1 付着性

付着力は、法線方向に粒子を引き離すときに必要な力 (pull-off force) として定義される。代表的な付着力は、ファンデルワールス力、液架橋力、静電気力であり、いずれも粒子径と正の相関を示す。すなわち、付着力は粒子径の増加とともに大きくなり、粒子径の減少とともに小さくなる。しかし、粉体ハンドリングでは、粒子径を小さくするほど付着の影響が強くなることを経験する。これは、重力や慣性力など、質量に関する外力 (すなわち分離力) を同時に考えなければならないことを意味する。付着力は粒子径の1~2乗に比例するが、質量は粒子径の3乗に比例するので、重力や慣性力に対する付着力の割合は、粒子径の減少とともに大きくなる。

凝集粒子や粉体層の引張破断応力は、ルンプの式 (Rumpf, 1970) に代表されるように、粒子間付着力に比例し、粒子径の2乗に反比例するので、粒子径

の減少とともに大きくなる。

一次粒子だけでなく凝集粒子や粉体層でも、粒子径を小さくするほど付着の影響が強くなる現象に対して付着性の概念が用いられているが、評価試験では粒子-平板間の付着力を測定することが多いので、質量に関する分離力を考慮の上、付着性を判断しなければならない。

一般に、粉体を構成する粒子は、粒子径、粒子形状、表面粗さが一定ではない。したがって、付着力にも分布が存在することを理解しておかなければならない。付着力の分布を効率的に求めるには、一度に多数の粒子を平板に付着させて、分離力を大きくしながら、残存粒子あるいは分離した粒子を計数するのがよい。また、粒子の分離機構が単純で、操作や手順は簡単な方がよい。これらの要件を満たす試験法として遠心法と気流法がある。

(1) 遠心法

粒子を遠心力で分離する場合、粒子径には制約がある。数 μm 以下の粒子を分離するには超遠心機が必要である。また、数十 μm 以上の粒子では重力の影響が無視できなくなる。一般に、粒子を付着させる平板は、遠心力が付着力と対抗するように配置する。重力の影響が無視できるとき、質点モデルの適用が可能になり、付着力は粒子分離時の遠心力に等しいと考えてよい。

遠心力が付着力と直交するように平板を配置する場合、粒子が転がらずに滑走して分離すれば、最大静止摩擦係数の導入によって付着力は解析できる。しかし、粒子径よりも平板との接触領域が小さく、粒子の分離が力のモーメントに支配されるときには、質点モデルではなく、剛体モデルを用いなければならない (Matsusaka et al., 1997; Shimada et al., 2022)。なお、粒子を付着させる平板の向きは、鉛直と水平に限定する必要はなく、[図1](#)に示すように、任意の傾斜角 β において、粒子分離時の力のモーメントは定式化できる (Kinugasa et al., 2022)。

[図2](#)は、 β をパラメータとして、粒子の分離率 η と角速度 ω の関係を示したものであり、使用された試料は非球形銅粒子である。 β を小さくすると分離力のモーメントは相対的に大きくなるので、 ω が小さくても粒子は分離できる。

異なる傾斜角で得られた2つの ω 値を力のモーメントの均衡式に代入すると、2つの未知数、すな

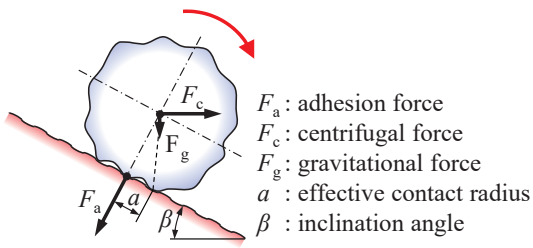


図1 遠心機内に設置した傾斜平板上の不定形粒子に対する剛体分離モデル

Fig. 1 Rigid-body separation model for an irregularly shaped particle on a tilted plate placed in a centrifuge.

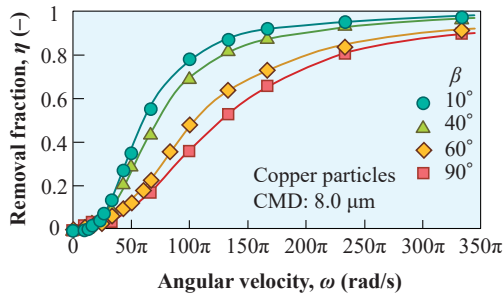


図2 傾斜角をパラメータとした粒子の分離率 (Kinugasa et al., 2022)

Fig. 2 Particle removal fraction as a parameter of the inclination angle. Reproduced under the terms of the CC BY-NC-ND license.

わち付着力 F_a と有効接触半径 a が得られる。図3の $\beta = 10^\circ$ と 90° の実験線を用いて解析された F_a と a を η の関数として図3に示す。個数基準中位径が $8 \mu\text{m}$ の非球形銅粒子では、 $0.2 < \eta < 0.8$ において $0.02 < F_a < 0.17 \mu\text{N}$ 、 $a \approx 1 \mu\text{m}$ である。

(2) 気流法

粒子を付着させた試料平板を矩形流路の内壁の一部として組み込み、流路の風量を増加させると、平面近傍のせん断流に応じて粒子が分離するので、分離率から付着強度分布が得られる。

図4に、 $10 \mu\text{m}$ のPMMA粒子に 15 nm の TiO_2 粒子を異なる割合で混合し、メカノフュージョン法で調製した複合粒子の代表的SEM画像および各試料の分離率を示す。グラフの横軸下側は流路断面平均流速であり、分かりやすい物理量ではあるが、異なる大きさの流路に適用するには、同図上側に記すように、壁面気流せん断応力で考えるのがよい。ナノ

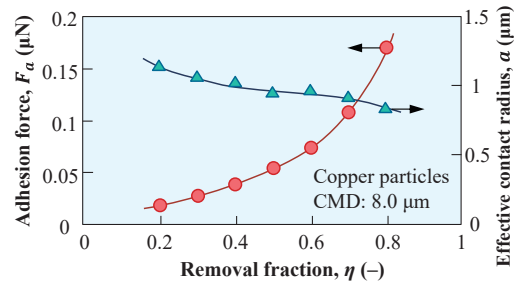


図3 剛体分離モデルで得られた付着力と有効接触半径 (Kinugasa et al., 2022)

Fig. 3 Adhesion force and effective contact radius obtained by the rigid-body separation model. Reproduced under the terms of the CC BY-NC-ND license.

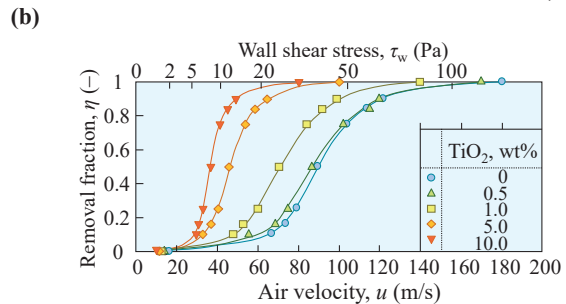
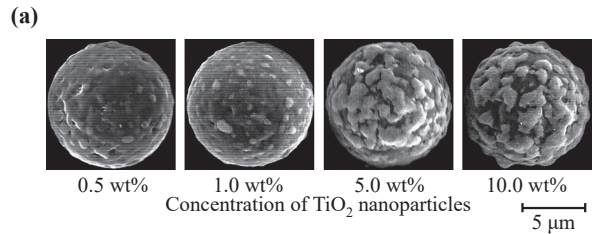


図4 (a) ナノ粒子でコーティングされた粒子のSEM画像; (b) 異なる条件でコーティングされた粒子の分離率 (Jiang et al., 2006a)

Fig. 4 (a) SEM images of particles coated with nanoparticles; (b) Removal fractions of coated particles under different conditions. Reprinted with permission from Elsevier B.V.

粒子の添加量を増やしていくと、試料粒子は低流速で分離されており、粒子の表面処理による付着力の低減効果を定量的に評価できる。なお、粒子の付着力は平板の粗さにも依存するため (Jiang et al., 2008)、実プロセスと同じ表面粗さの試料平板を用いて評価試験を行うのがよい。

気流法は機械的駆動部を持たないので、電場・磁場などが存在する系でも支障なく測定でき (Toizumi et al., 2010; Matsusaka et al., 2015)、拡張性に優れた方法といえる。

2.2 流動性

粉体は、平板上に堆積させることも、重力を利用して斜面を移動させることも可能であるが、粒子の基礎物性や操作条件によって移動のしやすさは異なる。この特性を流動性といい、工業的には、貯蔵、排出、供給、輸送、攪拌、充填、分散など、多くの単位操作に関する。粉体の流動性は、付着性に加えて摩擦の影響が加わるため、理論的な手段だけで予測することは難しく、評価試験が必要である。高応力下での評価には、主にせん断試験が行われる。低応力下では、安息角や圧縮度などの測定あるいはレオロジー試験が行われるが、大きな凝集体が形成されない条件下で試験を行うことは非常に重要であり、そのための試験法として振動細管式流動性試験と振動せん断式流動性試験がある。

(1) せん断試験

高応力下で試験を行う場合、粉体層を圧密する必要があり、圧密法の違いによって定荷重せん断試験と定容積せん断試験に大別される。前者は、分銅で垂直応力 σ を定めて、粉体層の破壊に必要なせん断応力 τ を測定する。異なる重さの分銅を用いてせん断試験を行うと τ - σ の関係、すなわち破壊包絡線 (PYL: Power Yield Locus) が得られる。後者は、サーボモータを使って粉体層の高さを定めており、1回のせん断過程における σ の変化を利用して τ を測定するので、PYL と圧密崩壊線 (CYL: Consolidation Yield Locus) が直ちに得られる。

せん断試験に使用される粉体充填セルは、形状や大きさが一定とは限らず、この違いが σ の測定値、ひいては PYL や CYL に影響を及ぼす。原理上、せん断面に作用する垂直応力 σ_s を測定しなければならないが、分銅を用いるとき、粉体層最上面に作用する垂直応力 σ_U を代用することが多かった。せん断面より上部の粉体層を高くすると、粉体とセル側壁の摩擦によって σ_s と σ_U の差が大きくなる。ヤンセンの式を用いて、 σ_s を近似的に求めることは可能であるが、セル構造を工夫し、その下部にロードセルを取り付けると σ_s が正確に得られる (Shimada et al., 2018a)。

図 5 に、せん断面より上部の粉体層高さ H_{PU} をパラメータとする定容積せん断試験の結果を示す。同図 (a) は σ_U 基準であり、 τ の最大値は一致しているが、 σ_U の値は大きく異なる。一方、同図 (b) は

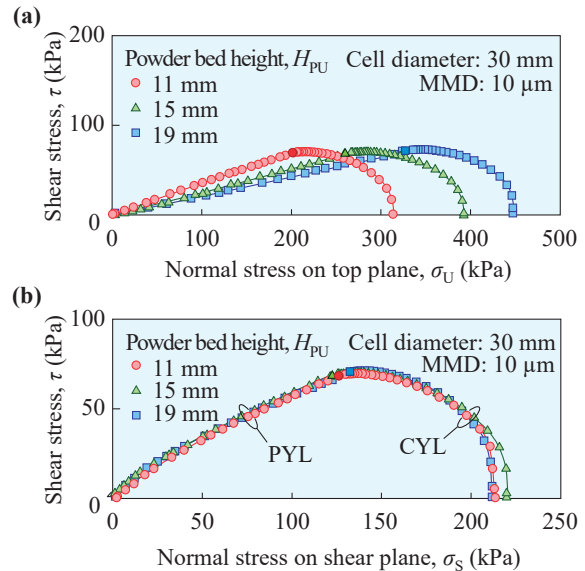


図 5 (a) 粉体層上面垂直応力 σ_U 基準のせん断試験結果；
(b) せん断面垂直応力 σ_s 基準のせん断試験結果
(Shimada et al., 2018a)

Fig. 5 (a) τ - σ_U plots; (b) τ - σ_s plots. Adapted under the terms of the CC BY-NC-ND license.

σ_s 基準であり、3つの試験結果は良好に一致している。セル径を変更した場合も同様であり、 σ_s 基準ではセル径の影響を受けない (Shimada et al., 2018a)。すなわち、せん断試験の結果を正しく評価するには、 σ_s を測定できる装置を用いなければならない。

定容積せん断試験は、粉体層の高さをサーボモータで定めるので、粉体層の空隙率 ε を任意の値に設定できる。図 6 に、5つの異なる ε 値で得られた τ - σ_s の関係を示す。同図 (a) は 2次元表示であり、同図 (b) はロスコー状態図として知られる 3次元表示である。これらの結果は 5回のせん断試験で得られており、定荷重せん断試験と比較して試験時間を大幅に短縮できる。

また、ナノ粒子で構成される微粉体は、かさ密度が極端に小さく、従来の薄型セルでは均質な粉体層を得にくい。せん断面垂直応力の測定が可能なセルを用いると、粉体層の形成に必要な高さを確保できるので、適切なせん断試験が行える。

図 7 は、ナノ粒子を用いて行われた定容積せん断試験の結果をフローファンクションで示したものである。流動性の評価基準として $f_c (= \sigma_1/f_c)$ 、ここで、 σ_1 : 限界応力状態を示すモールの応力円の最大主応力、 f_c : 単軸崩壊応力) を用いると次のように分類

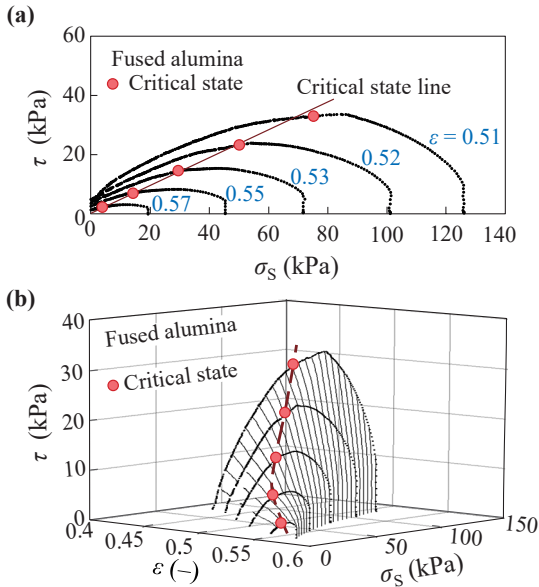


図6 (a) せん断試験結果の空間率依存性; (b) τ - σ_s - ϵ の3次元表示 (Shimada et al., 2018b)

Fig. 6 (a) τ - σ_s plots as a parameter of ϵ ; (b) Three-dimensional diagram. Reproduced under the terms of the CC BY-NC-ND license.

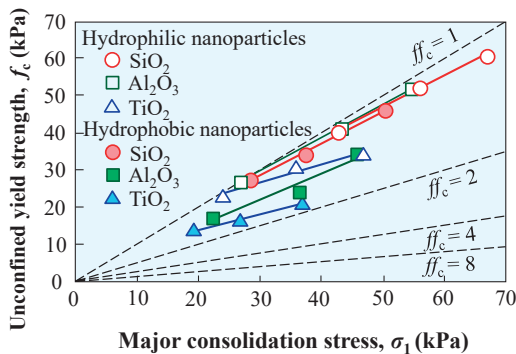


図7 親水性および疎水性ナノ粒子のフローファンクション (Shimada et al., 2020)

Fig. 7 Flow functions (f_c - σ_1 plots) of hydrophilic and hydrophobic nanoparticles. Reproduced under the terms of the CC BY-NC-ND license.

できる。 $1 < ff_c < 2$: 非常に流れにくい, $2 < ff_c < 4$: やや流れにくい, $4 < ff_c < 10$: 流れやすい。ナノ粒子の測定結果は $1 < ff_c < 2$ の範囲にあり, 非常に流れにくいことが分かる。特に, 液架橋の影響を受けやすい親水性ナノ粒子は, 疎水性ナノ粒子よりも流動性が低い。

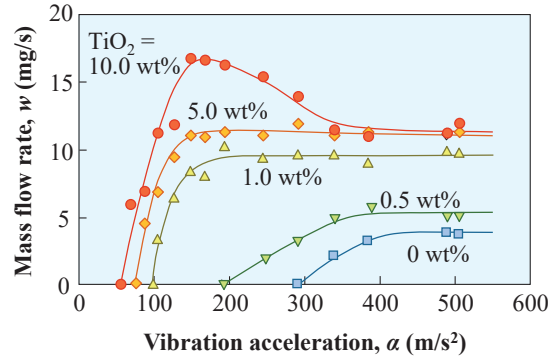


図8 異なる条件でコーティングされた粒子の流動性プロファイル (Jiang et al., 2006b) 一部改変

Fig. 8 Powder flowability profiles of coated particles under different conditions. Adapted with permission from SCEJ.

(2) 振動細管式流動性試験

鉛直に設置された細管に粉体を入れると, 重力だけでは排出されないが, 外力として振動を水平方向に加えると, 振動加速度の増加に伴って下端から排出されるようになる。振動細管式流動性試験に要する時間は 1 min 程度であり, 排出流量と振動加速度の関係 (すなわち流動性プロファイル) を用いて評価する。細管内には粉体の流動状態を阻害する機器が存在しないため, 粉体固有の特性が得られやすく, 微小な排出口を用いているため, 流動性の識別感度は非常に高い。

図8に, 10 μm の PMMA 粒子に 15 nm の TiO_2 粒子を異なる割合で混合し, メカノフュージョン法で調製した複合粒子 (図4(a) 参照) の流動性プロファイルを示す。細管の振動加速度を大きくすると, 粉体は流動を開始し, 排出流量は増えるが, 外力によって圧密されると排出流量は減少する。ナノ粒子の添加量を多くすると, 流動開始加速度は低下し, 排出流量は増えるので, 静止摩擦および動摩擦に関する流動性はともに改善されている。

振動細管法は, 測定に必要な粉体量が少なく, かつ識別感度が高いので, 電子写真用トナー, 粉末食品, 医薬品, エネルギー関連材料など, 多くの分野で利用されている (Matsusaka et al., 2009; Sawamura et al., 2009; Ishii et al., 2011; Kudo et al., 2020)。

(3) 振動せん断式流動性試験

繊維状粒子は絡みやすく, 振動細管法で排出しにくいとき, より強い外力を与えられる振動せん断流

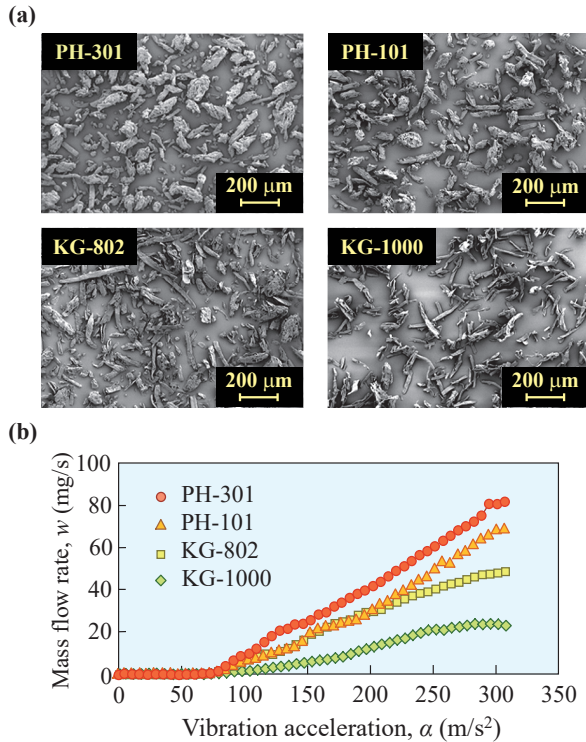


図9 (a) 粒子のSEM画像；(b) 粒子形状による粉体流動性プロファイルの変化 (Horio et al., 2014) 抜粋
Fig. 9 (a) SEM images of particles; (b) Variation in powder flowability profile due to particle shape. Adapted with permission from Elsevier B.V.

動法を適用する。本法は、粒子を充填した円管の下端に隙間を設けて底板を配置し、円管の振動によって粉体排出部に振動せん断場を形成させるものである。図9に、4種類の繊維状粒子のSEM画像と各試料の流動性プロファイルを示す。振動細管法とは異なり、振動加速度を大きくしても排出流量が減少せず増加するのは、振動せん断場の流動促進効果が高いためであり、同図に示すように、各試料の流動性プロファイルから流動性の違いを定量的に評価できる。

ナノ粒子で構成される微粉体は、かさ密度が極端に小さく、難流動性粉体に位置づけられるが、図10に示すように、強い外力を与えられる振動せん断流動法を用いると、流動性の違いを定量的に評価できる。

2.3 帯電性

帯電粒子に作用する静電気力は、粒子の挙動に大きな影響を及ぼす。粒子群が同符号に帯電すると粒

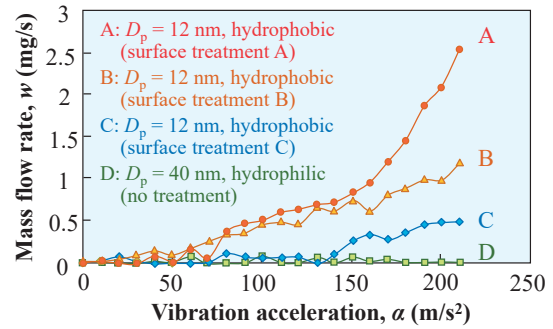


図10 表面改質によるナノ粒子の粉体流動性プロファイルの変化 (Zainuddin et al., 2012) 一部改変
Fig. 10 Variation in powder flowability profile of nanoparticles due to surface modification. Adapted with permission from John Wiley & Sons.

子間に斥力が作用するため、粒子の凝集は抑制される。しかし、気相中で同符号の帯電粒子が多量に浮遊する系では、粒子群が形成する電場によって粒子は拡散し、周囲の壁に沈着しやすくなる。

異符号の帯電粒子が浮遊する系では、粒子間に静電引力が作用するため、凝集が可能な状態ではあるが、凝集の頻度は粒子間距離に依存する。なお、正の総電荷と負の総電荷が同程度するとき、全体として中和されるので、静電拡散による壁への粒子沈着は抑制される。しかし、帯電粒子が壁に近づくと、電荷の符号にかかわらず、電気影像効果によって壁に付着する。

静電拡散と電気影像効果は基本的な機構が異なるが、ともに壁への付着に関係するので、対策を講じる場合、現象の支配因子を見誤らないようにしなければならない。

粒子は、イオンの付与によって荷電できるが、特別な操作を行わなくても、誘電性（絶縁性）粒子は、異種物質と接触を繰り返すとき、電荷を蓄積して最大値（平衡値）に達する。一方、粒子が予め過剰に帯電している場合、壁との接触によって電荷は減衰して平衡値に至る。異種物質との接触によって変化する粒子の電荷 q は次の指数関数式で表せる (Matsusaka, 2011)。

$$q = q_0 \exp\left(-\frac{n}{n_0}\right) + q_\infty \left\{1 - \exp\left(-\frac{n}{n_0}\right)\right\} \quad (1)$$

ここで、 q_0 は粒子の初期電荷、 q_∞ は粒子の平衡電荷、 n は接触回数、 n_0 は平衡値への到達難易性を表す特

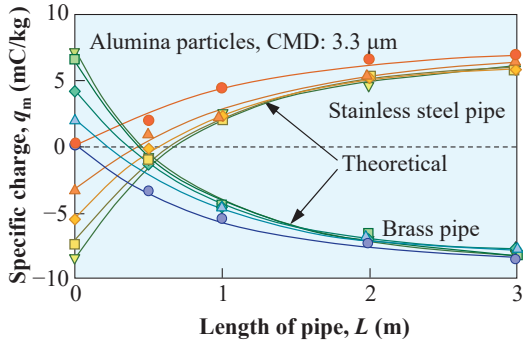


図 11 管内固気二相流における粒子の帯電プロファイル (Matsusaka et al., 2007)

Fig. 11 Charging profiles of particles in gas-solids pipe flow. Reprinted with permission from Elsevier B.V.

性値である。式 (1) の右辺第 1 項と第 2 項は、それぞれ初期電荷の減衰過程と帯電の進行過程を表すが、同式を変形すると次のようになる。

$$q = (q_0 - q_\infty) \exp\left(-\frac{n}{n_0}\right) + q_\infty \quad (2)$$

式 (2) のように、指数関数を一つにまとめると、帯電と除電を同時に扱えることが容易に理解できる。

実プロセスでは、粒子が壁と接触する回数を実測できないため、他の物理量に置き換える必要がある。低濃度空気輸送のような連続操作では、接触回数を粒子の移動距離、すなわち管の長さ置き換え、攪拌のような回分操作では経過時間を用いればよい。

図 11 は、アルミナ粒子の低濃度空気輸送における単位質量あたりの粒子の電荷 (すなわち比電荷) q_m と管の長さ L の関係を示したものである。実線は指数関数式による理論値であり、管の材質によって異なる値に漸近する。 $L = 0$ の初期比電荷 q_{m0} は、帯電プロファイルに関係する重要な値ではあるが、帯電の基礎式の特長値には影響しないので、管の入口に粒子帯電制御装置を組み込んで q_{m0} を変えれば、管の長さを変えずに帯電性を評価できる (Bunchatheeravate et al., 2013)。

図 12 は、粒子帯電制御装置を用いて、 $L = 1$ m の銅管の出口と入口で測定した粒子の比電荷、すなわち $q_{m,OUT}$ と $q_{m,IN}$ の関係を示したものである。測定結果は、理論的に導出される次の線形式 (赤色の実線) と良好に一致している。

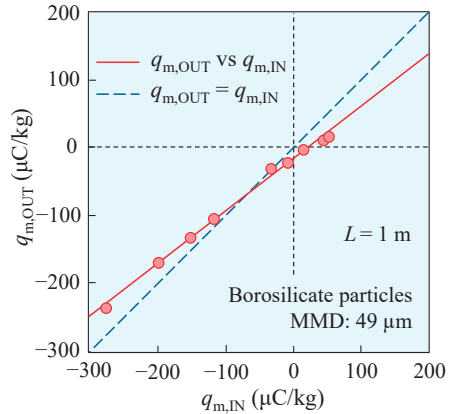


図 12 1 m の銅管による固気二相流の出口と入口でのホウケイ酸ガラス粒子の比電荷 (Bunchatheeravate et al., 2013)

Fig. 12 $q_{m,OUT}$ and $q_{m,IN}$ of borosilicate particles in gas-solids two-phase flow with a copper pipe. Reprinted with permission from John Wiley & Sons.

$$q_{m,OUT} = cq_{m,IN} + d \quad (3)$$

ここで、 c と d は条件によって決まる定数であり、式 (3) の実線と $q_{m,OUT} = q_{m,IN}$ (青色の破線) との交点が比電荷の平衡値 $q_{m\infty}$ である。 $q_{m,OUT}$ と $q_{m,IN}$ の関係を管の長さ L を用いて指数関数式で表すと次のようになる。

$$q_{m,OUT} = q_{m,IN} \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right) + q_{m\infty} \left\{1 - \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right)\right\} \quad (4)$$

ここで、 L_0 は平衡値への到達難易性を表す特性値であり、式 (3)、(4) より L_0 と $q_{m\infty}$ はそれぞれ次のように表せる。

$$L_0 = -\frac{L}{\ln c} \quad (5)$$

$$q_{m\infty} = \frac{d}{1 - c} \quad (6)$$

図 12 の測定結果から得られた c と d の値を式 (5)、(6) に代入し、得られた L_0 と $q_{m\infty}$ の値を式 (4) に代入すると、 q_{m0} をパラメータとして q_m と L の関係が得られる (図 13 参照)。10 m を超える長い管を用いて評価試験を行うことは簡単ではないが、帯電制御装置を用いると、1 本の扱いやすい長さの管で帯電性を評価できる。

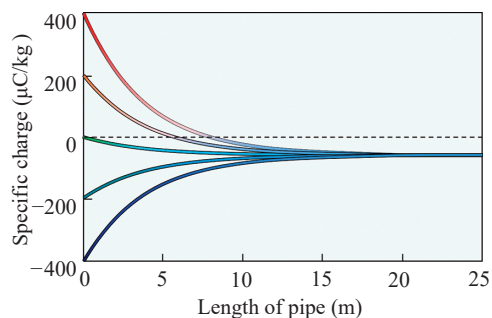


図 13 管内固気二相流における粒子帯電プロファイルの推算 (Bunchatheeravate et al., 2013) 一部改変

Fig. 13 Estimation of charging profiles in gas-solids pipe flow. Adapted with permission from John Wiley & Sons.

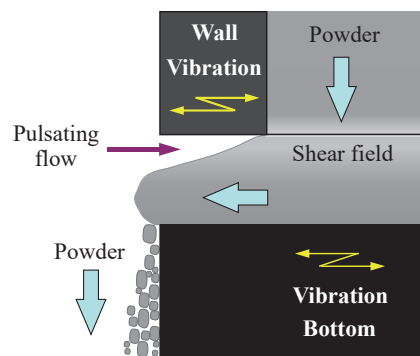


図 14 振動せん断流動を利用した微粒子供給装置

Fig. 14 Feeder for fine particles using vibration shear flow.

3 先進粉体ハンドリング

3.1 振動の利用

一般に、微粉体は付着性が強く流動性が低いためハンドリングが難しい。付着性の影響を低減し、流動性を高めるには、外力を連続して加えられるように、振動を用いるのがよい。2.2 節の流動性の評価において、振動細管法と振動せん断流動法を紹介したが、いずれも振動を用いており、粉体ハンドリングと密接に関係している。

(1) 粉体供給装置

粉体の排出や供給には、以前から振動が用いられてきたが、粗い粒子や塊状の凝集体を対象とする場合、質量効果が大きいので、振動数が比較的低い機械式あるいは電磁式装置を使用できる。しかし、微粉体の流動性を改善するには、質量効果が期待できないので、振動数を高くする必要がある。ただし、超音波領域まで振動数を高くすると、共振状態を有効に利用するための制約が厳しくなる。

振動細管式流動性試験に使用した装置は、振動加速度を一定にすれば、定量供給装置として利用できる (Matsusaka et al., 1995, 1996)、近年では、3次元造形の精密定量供給装置として注目されている (Nagarajan et al., 2019)。一方工業的には、難流動性粉体にも適用可能な振動せん断式流動性試験と同じ機構の装置の方が (図 14 参照)、流動促進効果が高く、操作上の自由度も大きいので扱いやすい (Matsusaka and Yasuda, 2017)。

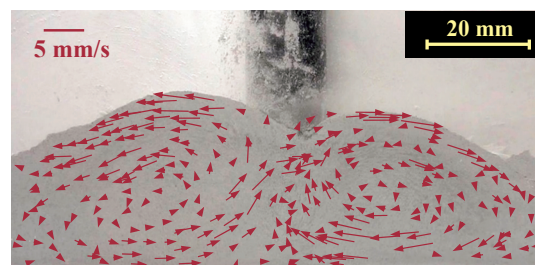


図 15 動画のデジタル処理により得られた粒子速度ベクトル場 (Matsusaka et al., 2017)

Fig. 15 Particle velocity vector field obtained by digital processing of video images. Reprinted with permission from Elsevier B.V.

(2) 粉体攪拌装置

粉体の攪拌には、容器や翼の回転を利用することが多い。しかし、粉体に強い機械的外力を加えると凝集体が形成されて攪拌に要する時間は長くなる。特に、微粉体ではこの傾向が強い。

凝集体の形成を抑制して攪拌の効率を高めるには、適切な大きさの外力を連続して加えるのがよい。すなわち、振動によって粒子が適度に動ける状態にすると、粉体層は重力によって圧密されていく。一方、粒子間の空隙は減少し、空隙から押し出された空気は振動体の表面に集まって上昇する。

図 15 に、粉体層内に設置した円柱状振動体周辺の粒子の動きをベクトル図で示す。同図の振動体は、圧電素子を駆動源として 300 Hz で左右に振動しており、振動体の左右側面では、粒子は空気とともに上昇する。上層に移動した粉体は、空気を多く含むので空隙率は大きいですが、振動によって圧密されると

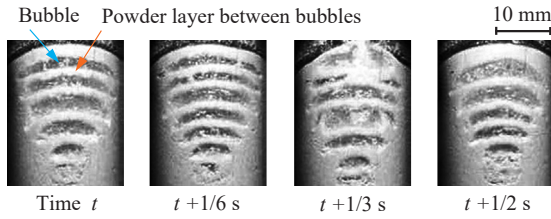


図 16 振動円筒内の粉体層から連続して発生する気泡 (Matsusaka et al., 2013) 抜粋

Fig. 16 Bubbles generated continuously from the powder bed in a vibrating cylinder. Adapted under the terms of the CC BY license.

下降し、2つの安定した循環流を形成する。循環流中に複数の粉体を連続供給すると効率的な混合装置になる。

振動は往復運動に限定されるものではない。2つの振動源を用い、方向と位相を変えると円運動になる。円柱状振動体に円運動を適用すると、振動体を中心として同心円筒状に循環流が形成される (Matsusaka et al., 2017)。なお、循環流の大きさには限りがあるので、流動範囲を広げるには並列処理の考え方を導入し、円柱状振動体を配列すればよい。

(3) 気泡流動層

粉体層内に振動体を設置するのではなく、粉体を充填する容器を振動すると、大きな気泡が連続して発生する。図 16 は、振動円筒内の粉体層から発生する気泡の様子を示したものである。同図では、円筒は前後に振動しており、手前と奥に循環流が存在する。気泡は、振動の開始から停止まで連続して発生し、繰り返し再現される。なお、下部の気泡ほど圧力が高く、気泡の上昇過程において、気泡間の粒子層（隔壁）は圧力差で壊されるため、上部の気泡は下部の気泡を取り込んで水平方向に広がる。

最下部の気泡が上昇するとき、その下方の粉体層は負圧になり、その近傍に外部と通じる微小口を設けておくと、多量の外気が粉体層内に導入されて活発な気泡流動層になる (図 17 参照)。外気を任意の気体に置き換えると、送風機を必要としない気泡流動層として応用範囲は広がる。

3.2 電場の利用

粉体プロセスの自動化では、粒子供給部が操作端として要になる。また、機能性材料の創製では、粒

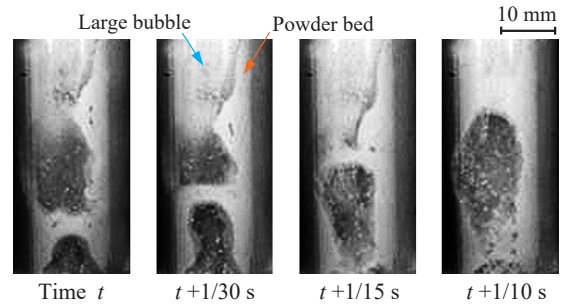


図 17 振動誘発型吸気による気泡流動層 (Mizutani et al., 2013)

Fig. 17 Bubbling fluidized bed caused by vibration-induced air inflow. Reprinted with permission from SCEJ.

子の表面処理が重要な役割を担うことが多く、全粒子表面を処理するために、粒子の気中分散が要求される。従来、粒子の気中分散には高速気流が用いられていたが、昨今では、気流が使えない静止流体系のシステムが増えており、気中分散と定量供給を組み合わせた新たな遠隔操作技術が求められている。

(1) 粒子の浮揚と気中分散

粒子に電荷を付与し、クーロン力によって粒子を浮揚・分散させる技術は、静止流体系での操作を可能にするが、粒子の帯電制御には工夫が必要である。粒子を効率的に帯電させるには、一般的な接触帯電とイオン荷電だけではなく、電場を利用した接触帯電 (Matsusaka, 2011; Bunchatheeravate et al., 2013)、低温プラズマ (Matsusaka, 2019)、紫外線による光電効果 (Shoyama et al., 2022a)、誘導帯電 (Shoyama et al., 2022b) などを利用するのがよい。特に、誘導帯電は粒子を電極と接触させるだけなので取り組みやすい。

誘導帯電は、導電性粒子に限られると思われているが、絶縁材料でも粒子表面の電気抵抗は比較的小さいため、多くの種類の粉体に適用できる。ただし、電極上で帯電した粒子は電気影像効果による引力を受けるため、粒子浮揚の補助手段として電極を振動させるのがよい。

図 18 は、下部平板電極と上部網状電極で構成された装置に、振動を用いて粒子を連続定量供給した様子を示したものであり、上部網状電極に電圧を印加すると、10 ms という非常に短い時間で、粒子は浮揚・分散する。

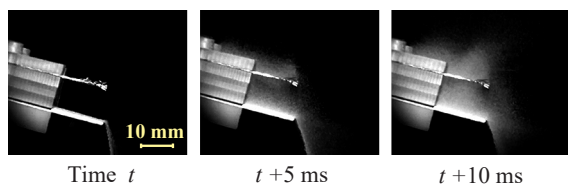


図 18 振動と外部電場を利用した粒子の浮遊と分散 (Shoyama et al., 2022b) 抜粋

Fig. 18 Particle levitation and dispersion using vibration and external electric field. Adapted with permission from Elsevier B.V.

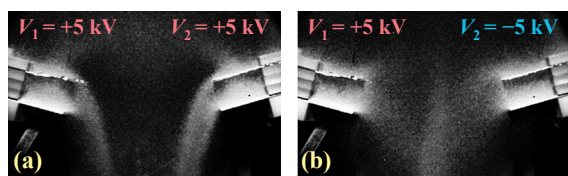


図 19 (a) 静電反発; (b) 静電引力による粒子瞬間混合 (Shoyama et al., 2022b)

Fig. 19 (a) Electrostatic repulsion behavior; (b) Instantaneous mixing of particles by electrostatic attraction. Reprinted with permission from Elsevier B.V.

(2) 気中混合

複数の異なる粉体を同時に気中分散すると瞬時に混合できる。図 19 に、2 方向からセラミックス粉体を連続定量供給し、電圧を印加して気中分散した様子を示す。同図 (a) は、左右の網状電極に正の電圧を印加しており、粒子は浮揚するが、左右の電極による電場と帯電粒子群が形成する電場によって互いに近づけない。同図 (b) は、左側に正の電圧、右側に負の電圧を印加しており、左右の帯電粒子群は互いに接近して混じり合える。しかし、この程度の粒子濃度では、正電荷の粒子と負電荷の粒子が静電引力で凝集する頻度は少なく、分散状態は維持される。ここでは、直流電場の例を示したが、交流電場を用いると、粒子の遠隔操作の可能性はさらに広がる。

4 おわりに

本稿では、粉体ハンドリングに関係する特性として付着性、流動性、帯電性を取り上げ、分布やプロフィールを解析できる評価試験法を紹介した。各試

験を行う上で、振動や静電気あるいは外力の利用法は重要である。振動の利用にあたっては、振幅と振動数に適切な範囲があり、目的に応じて振動の向きを決める必要がある。2つの振動の方向と位相を変えると円運動にもなる。振動の操作変数を再検討するだけでも新たな可能性が見出せる。

また、静電気は複雑で扱いにくいとされているが、条件を整えると有効に活用できる。粒子の荷電は、一般的な接触帯電とイオン荷電だけでなく、電場を利用した接触帯電、低温プラズマ、紫外線による光電効果、誘導帯電など、技術は進歩している。基本的な帯電機構を理解して静電場でクーロン力を利用すると、自由空間における粒子の挙動を遠隔で操作できる。直流電場から交流電場に拡張すると可能性はさらに広がる。

紙面の都合上、いくつかのトピックの紹介にとどめたが、WEBで検索すると、粉体ハンドリングに利用可能なシーズが非常に多いことに気づく。新しい粉体ハンドリングへの展開に向けて、多くの使用事例が報告されことを期待する。

References

- Bunchatheeravate P., Curtis J., Fujii Y., Matsusaka S., Prediction of particle charging in a dilute pneumatic conveying system, *AIChE Journal*, 59 (2013) 2308–2316.
<https://doi.org/10.1002/aic.14025>
- Horio T., Yasuda M., Matsusaka S., Effect of particle shape on powder flowability of microcrystalline cellulose as determined using the vibration shear tube method, *International Journal of Pharmaceutics*, 473 (2014) 572–578.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2014.07.040>
- Ishii K., Suzuki M., Segawa T., Kihara Y., Yasuda M., Matsusaka S., Flowability measurement of pulverized and granulated materials using vibrating tube method, *Advanced Powder Technology*, 22 (2011) 319–323.
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2010.04.002>
- Jiang Y., Matsusaka S., Masuda H., Yokoyama T., Characterizing the effect of surface morphology on particle–wall interaction by the airflow method, *Advanced Powder Technology*, 17 (2006a) 413–424.
<https://doi.org/10.1163/15685520677866119>
- Jiang Y., Matsusaka S., Masuda H., Yokoyama T., Evaluation of flowability of composite particles and powder mixtures by a vibrating capillary method, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 39 (2006b) 14–21.
<https://doi.org/10.1252/jcej.39.14>
- Jiang Y., Matsusaka S., Masuda H., Qian Y., Characterizing the

- effect of substrate surface roughness on particle–wall interaction with the airflow method, *Powder Technology*, 186 (2008) 199–205.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.11.041>
- Kinugasa S., Tanoue S., Shimada Y., Matsusaka S., Detailed analysis of particle–substrate interaction based on a centrifugal method, *Advanced Powder Technology*, 33 (2022) 103793. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103793>
- Kudo Y., Yasuda M., Matsusaka S., Effect of particle size distribution on flowability of granulated lactose, *Advanced Powder Technology*, 31 (2020) 121–127.
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.10.004>
- Matsusaka S., Control of particle tribocharging, *KONA Powder and Particle Journal*, 29 (2011) 27–38.
<https://doi.org/10.14356/kona.2011007>
- Matsusaka S., Control of particle charge by atmospheric pressure plasma jet (APPJ): a review, *Advanced Powder Technology*, 30 (2019) 2851–2858.
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.09.023>
- Matsusaka S., Yasuda M., Vibration shear flow of fine particles and its application for micro-feeding, *Chemical Engineering Transactions*, 57 (2017) 823–828.
<https://doi.org/10.3303/CET1757138>
- Matsusaka S., Urakawa M., Masuda H., Micro-feeding of fine powders using a capillary tube with ultrasonic vibration, *Advanced Powder Technology*, 6 (1995) 283–293.
[https://doi.org/10.1016/S0921-8831\(08\)60518-X](https://doi.org/10.1016/S0921-8831(08)60518-X)
- Matsusaka S., Yamamoto K., Masuda H., Micro-feeding of a fine powder using a vibrating capillary tube, *Advanced Powder Technology*, 7 (1996) 141–151.
[https://doi.org/10.1016/S0921-8831\(08\)60509-9](https://doi.org/10.1016/S0921-8831(08)60509-9)
- Matsusaka S., Koumura M., Masuda H., Analysis of adhesive force between particle and wall based on particle reentrainment by airflow and centrifugal separation, *Kagaku Kagaku Ronbunshu*, 23 (1997) 561–568.
<https://doi.org/10.1252/kakoronbunshu.23.561>
- Matsusaka S., Oki M., Masuda H., Control of electrostatic charge on particles by impact charging, *Advanced Powder Technology*, 18 (2007) 229–244.
<https://doi.org/10.1163/156855207780208673>
- Matsusaka S., Shirai T., Hosoh Y., Yasuda M., Evaluation of flowability of toner particles by vibrating tube method, *Journal of the Imaging Society of Japan*, 48 (2009) 162–169.
<https://doi.org/10.11370/isj.48.162>
- Matsusaka S., Kobayakawa M., Mizutani M., Imran M., Yasuda M., Bubbling behavior of a fluidized bed of fine particles caused by vibration-induced air inflow, *Scientific Reports*, 3 (2013) 1190. <https://doi.org/10.1038/srep01190>
- Matsusaka S., Wei D., Yasuda M., Sasabe S., Adhesive strength distribution of charged particles on metal substrate in external electric field, *Advanced Powder Technology*, 26 (2015) 149–155.
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2014.08.017>
- Matsusaka S., Sato S., Yasuda M., Convection induced by vibrating rod in fine-powder bed, *Advanced Powder Technology*, 28 (2017) 2589–2596.
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2017.07.010>
- Mizutani M., Yasuda M., Matsusaka S., Dynamic analysis of bubbling fluidized bed of fine particles caused by vibration convection and vibration-induced air inflow, *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 39 (2013) 420–425.
<https://doi.org/10.1252/kakoronbunshu.39.420>
- Rumpf H.C.H., Zur Theorie der Zugfestigkeit von Agglomeraten bei Kraftübertragung an Kontaktpunkten, *Chemie Ingenieur Technik*, 42 (1970) 538–540.
<https://doi.org/10.1002/cite.330420806>
- Sawamura S., Haraguchi Y., Yasuda M., Matsusaka S., Flowability properties of matcha varying with particle size and milling methods, *Nippon Shokuhin Kagaku Kogaku Kaiishi*, 56 (2009) 103–107.
<https://doi.org/10.3136/nskkk.56.103>
- Shimada Y., Kawata T., Matsusaka S., Analysis of constant-volume shear tests based on precise measurement of stresses in powder beds, *Advanced Powder Technology*, 29 (2018a) 1372–1378.
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.02.033>
- Shimada Y., Hatano S., Matsusaka S., A new method for evaluating powder flowability using constant-volume shear tester, *Advanced Powder Technology*, 29 (2018b) 3577–3583.
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.08.028>
- Shimada Y., Yamamura K., Matsusaka S., Evaluation of mechanical properties of nanoparticles using a constant-volume shear tester, *Advanced Powder Technology*, 31 (2020) 1007–1012.
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.12.024>
- Shimada Y., Tsubota M., Matsusaka S., Measurement of particle adhesion force and effective contact radius via centrifuge equipped with horizontal and vertical substrates, *Powder Technology*, 397 (2022) 117103.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117103>
- Shoyama M., Sugaya T., Matsusaka S., Effective use of external electric field for charging and levitation of particles under UV irradiation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 58 (2022a) 5287–5291.
<https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3167376>
- Shoyama M., Nishida S., Kai S., Matsusaka S., A novel mixing method for levitated particles using electrostatic fields, *Advanced Powder Technology*, 33 (2022b) 103812.
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103812>
- Toizumi K., Shibai Y., Nakamura T., Matsusaka S., Measurement of adhesive strength distribution between toner and carrier particles by airflow method, *Journal of the Imaging Society of Japan*, 49 (2010) 154–158.
<https://doi.org/10.11370/isj.49.154>

Nagarajan B., Hu Z., Song X., Zhai W., Wei J., Development of micro selective laser melting, the state of the art and future perspectives, *Engineering*, 5 (2019) 702–720.

<https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.07.002>

Zainuddin I.M., Yasuda M., Horio T., Matsusaka S., Experimen-

tal study on powder flowability using vibration shear tube method, *Particle & Particle Systems Characterization*, 29 (2012) 8–15.

<https://doi.org/10.1002/ppsc.201100052>

著者紹介



松坂 修二 Shuji MATSUSAKA

〔経歴〕 1983年、広島大学大学院工学研究科修士課程修了。東レエンジニアリングを経て、1989年、京都大学助手。1993年、京大博（工）。2010年、京都大学大学院工学研究科粒子工学分野教授。

〔専門〕 粉体工学，エアロゾル工学，静電気工学。付着性，流動性，帯電性に関する基礎研究と関連する応用技術の開発を行っている。

〔連絡先〕 matsu@cheme.kyoto-u.ac.jp