振動と外部電場を用いた2段階システムによる 摩擦帯電粒子の特性評価

Characterization of Particles Triboelectrically Charged by a Two-Stage System Using Vibration and External Electric Field

水谷 慈^a, 武田 紘一^a, 安田 正俊^{a, b}, 松坂 修二^{a*}

Megumi Mizutani, Koichi Takeda, Masatoshi Yasuda, Shuji Matsusaka

Received 24 August 2013; Accepted 10 October 2013

A new method for characterizing particles triboelectrically charged through repeated contact with a wall has been studied both theoretically and experimentally. A two-stage system consisting of inclined vibrating plates with electrodes was used in this experiment. The first stage possessed functions to control the initial charge and flow rate of the particles. Particle tribocharging was characterized in the second stage. Three types of particles with diameters of less than 100 μm were examined, and each particle charge profile as a function of distance travelled on the second vibrating plate was obtained under various experimental conditions. It was found that the pattern of the charge profiles agreed with the theoretical one, which is determined by two parameters related to equilibrium and relaxation. It was also found that particle tribocharging is well-characterized by the two parameters obtained by external electric fields.

Keywords: Particle tribocharging, Vibration, Electric field, Initial charge, Characterization

1. 緒 言

異なる物質を接触させると、表面電位差に起因して電荷は移動するが、表面を分離しても、移動した電荷が残留する現象を接触帯電という^{1, 2)}。接触表面間には、法線方向だけではなく、接線方向にも力が働くことが多く、相対的な接触位置の変化や熱の発生を伴う場合には摩擦帯電と呼んでいる。帯電は、接触条件によって異なるが、基本的には表面で生じる現象であり、比表面積を大きくすると、静電気の影響が強くなる。

粉体操作では、壁との接触によって帯電した粒子は、電気影像力によって壁に付着しやすくなり、粒子の流れが阻害される^{3~5)}。また、過剰に帯電した粒子は、放電や着火^{6, 7)}の原因にもなるので注意が必要である。しかし、電荷の移動や帯電した粒子に働く静電気力をうまく利用すれば、電子写真⁸⁾、静電粉体塗装⁹⁾、静電分離¹⁰⁾、粒子配列¹¹⁾、計測^{12, 13)}などの応用技術として活かせる。

粒子プロセスを正常に保ち、装置の性能を十分に発揮させるには、帯電の特性評価と制御が必要不可欠である。代表的な粒子帯電評価法として、固気二相流で評価する方法^{14~17)}と粒子を直接評価する方法¹⁸⁾とがあり、前者は粒子を気中に分散させるので、個々の粒子を壁と接触させやすいという特長をもつ。一方、後者は気流を用いないので、付帯設備が不要である。傾斜板上で粒子を流下させて帯電量を測定するカスケード法は、簡便な評価法として比較的よく用いられている。ただし、微粒子は重力よりも付着力に支配される

^a 京都大学大学院 工学研究科 化学工学専攻
(〒615-8510 京都市西京区京都大学桂)
Department of Chemical Engineering, Katsura Campus, Kyoto University
(Kyoto 615-8510, Japan)

^b IMP
(〒630-0222 奈良県生駒市壱分町67-20)
IMP Co., Ltd.
(67-20 Ichibu-cho, Ikoma, Nara 630-0222, Japan)

* 責任著者連絡先 matsu@cheme.kyoto-u.ac.jp

ので、粒子を壁と繰り返し接触させるには、振動などの外力が必要になる。Higashiyama ら¹⁹⁾は、振動フィーダーに摩擦帯電用壁材を取り付けて粒子の帯電を評価し、松坂ら²⁰⁾は、振動による繰り返し接触帯電に外部電場を加えて、帯電の評価と制御の範囲を拡大した。粒子と平板の接触に伴う電荷の移動は、初期電荷と粒子流量に依存するので、これらの条件を調整すれば、さらに詳細な評価が可能と考えられる。

本研究では、前報²⁰⁾で提案した振動と電場を利用する粒子帯電の特性評価と制御法を発展させて、初期電荷と粒子流量を調整し、その後段に同様の機構を備えた装置を配置して2段階システムにすることにより、粒子の摩擦帯電特性を詳細に評価する。

2. 接触帯電理論

接触帯電理論は、引用文献^{2, 16, 20)}に詳しく記されているので、本実験結果の解析に必要な外部電場を考慮した粒子と壁の繰り返し接触帯電の考え方のみ記すことにする。

物質表面間の電荷移動の駆動源となる電位差 V は次式で表される。

$$V = V_c - V_e - V_b + V_{ex} \quad (1)$$

ただし、

$$V_e = k_e q \quad (2)$$

$$V_b = k_b q \quad (3)$$

$$V_{ex} = k_{ex} z_0 E_{ex} \quad (4)$$

ここで、 V_c は物質表面間の固有の仕事関数差に基づく接触電位差である。 V_e と V_b は、それぞれ電気影像効果および空間電荷効果によって生じる電位差であり、粒子の繰り返し接触帯電では、ともに電荷の移動を阻害する。 k_e と k_b は上記の二つの効果に関係する定数、 q は粒子が保持する電荷である。 V_{ex} は電圧の印加による外部電場に起因する電位差であり、粒子が保持する電荷 q には依存しないので、 V_c と同じように扱うことが可能であり、粒子に正の電荷を与える場合を正と置く。 k_{ex} は定数、 z_0 は表面粗さを考慮した接触表面間距離、 E_{ex} は外部電場の強度である。

接触表面間を移動する電荷が、電位差 V と電気容量 C に比例するとき、1 個の粒子が 1 回の接触で獲得する電荷 dq/dn は次式で表せる。

$$\frac{dq}{dn} = k_c CV \quad (5)$$

ここで、 n は接触回数、 k_c は定数（帯電効率）である。傾斜振動板上の粒子が少なく、空間電荷効果が無視できるとき ($k_b=0$)、 $n=0$ 、 $q=q_0$ の初期条件で q について微分方程式を解くと次式が得られる。

$$q = q_0 \exp\left(-\frac{n}{n_0}\right) + q_\infty \left\{1 - \exp\left(-\frac{n}{n_0}\right)\right\} \quad (6)$$

ただし、

$$q_\infty = \frac{V_c + V_{ex}}{k_e} = \frac{V_c + k_{ex} z_0 E_{ex}}{k_e} \quad (7)$$

$$n_0 = \frac{1}{k_e k_c C} \quad (8)$$

ここで、 q_0 は粒子の初期電荷、 q_∞ は粒子の平衡電荷、 n_0 は平衡値への到達難易性を表す特性値（緩和接触回数）である。

3. 実 験

3. 1 装置および方法

Fig. 1 に実験装置の概略構成を示す。本装置は、傾斜振動板に粒子を定量供給し、斜面の下端から落下する粒子を捕集して、ファラデーケージ法により帯電量を測定するものである。前報²⁰⁾では、一つの傾斜振動板を使用したか、初期電荷および粒子流量の調整のために、傾斜振動板を増やして2段階システムにした。

Fig. 2 に、二つの傾斜振動板を示す。第1傾斜振動板（オーステナイト系ステンレス鋼、幅 15 mm、長さ 80 mm）の上端に、試料粒子を入れる円筒管を取り付けた。粒子を排出するために、円筒管と傾斜板の両方を斜面長手方向に加振した（振動数：300 Hz、壁面の振幅：40 μm 以下）。粒子の排出流量は、円筒管の下端と傾斜振動板の間隙および振動強度を変更する

Fig. 1 Schematic diagram of the setup

Fig. 2 Schematics of the vibrating plates and electrodes

ことによって調整した^{21, 22)}。振動の周波数、振幅、波形の制御には、IMP 製 VST-01 コントロールシステムを用いた。また、斜面の 5 mm 上方に上部電極（長さ 50 mm）を取り付けて、傾斜振動板（下部電極）との間に形成させた静電場（ $\pm 200 \text{ kV/m}$ の範囲）により、粒子と壁の帯電量を調整した。

第 2 傾斜振動板への粒子の供給は、第 1 傾斜振動板の下端から粒子を落下させることによって行った。第 2 傾斜振動板（オーステナイト系ステンレス鋼、幅 30 mm、長さ 110 mm）では、供給された粒子を十分に分散させるため、第 1 傾斜振動板よりも幅を広くし、粒子の最大移動距離も長くなるように設計した。第 2 傾斜振動板への粒子の供給位置は、上部電極の長さに応じて変更した。すなわち、電極の入口近傍に粒子を供給した。なお、第 2 傾斜振動板では、粒子を跳躍させて繰り返し接触帯電を行わせるため、斜面に対して法線方向に正弦振動を加えた²⁰⁾。振動数は、システムの共振を考慮して 300 Hz で一定とし、壁の振幅は $10 \mu\text{m}$ に設定した。

第 2 傾斜振動板にも斜面の 5 mm 上方に着脱可能な平板電極（長さ：10, 40, 65, 80 mm）を取り付け、粒子帯電に及ぼす電極長さ（粒子の移動距離と同意）

と外部電場の影響を評価できるようにした。粒子に正の電荷を与えるのは、下部電極を正極、上部電極を負極にした場合である。すなわち、粒子が接触する傾斜振動板から粒子に向かって外部電場が形成される場合である。なお、上部電極に電圧を印加し、下部電極を接地（アース）した。また、電気的外乱を防ぐため、上部電極を除く金属構成部材を接地した。粒子の帯電符号と上部電極の符号が異なる場合、粒子は上向きに静電気力（クーロン力）を受けるので、外部電場を強くしすぎると、粒子と傾斜振動板の接触が不十分になるだけでなく、上部電極と接触して粒子に逆符号の電荷を与えるので、本実験では、余裕をみて $\pm 160 \text{ kV/m}$ の範囲とした。

粒子の挙動は、ズームレンズ付き高速度カメラ（Photron 製 Fastcam-Max：解像度 $1 \mu\text{m}$ ）を用いて観察した。振動板の傾斜角を小さくすると、傾斜振動板を長手方向に移動する粒子速度が低下するので、単位長さあたりの粒子-壁間における接触回数は多くなるが、傾斜振動板上の粒子量は多くなり、粒子と壁の自由な接触が妨げられるので、粒子を安定した状態で繰り返し接触帯電を可能にするために、本実験では傾斜角を水平に対して 15° で一定とした。

粒子の電荷は、第 1 傾斜振動板の下端（すなわち、第 2 傾斜振動板への供給位置）および第 2 傾斜振動板の下端で全量サンプリングを行い、ファラデーケージ法で測定した。粒子の比電荷（単位質量あたりの電荷）は、捕集した粒子の総電荷と質量との比で求めた。すべての実験は、室内環境下（気温 $17 \sim 22^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $20 \sim 40\%$ ）で行った。

3. 2 試料粒子

使用した粒子は、アルミナ、マンガンフェライト、樹脂で被覆したマンガンフェライトの 3 種類である。アルミナは電気抵抗率が高く（ $\sim 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$ ）、マンガンフェライト（電子写真用キャリアの母粒子）は、アルミナに比べると電気抵抗率は低い（ $10^4 \sim 10^5 \Omega \cdot \text{m}$ ）。電子写真ではマンガンフェライトの電気抵抗率を高めるために、樹脂で被覆したマンガンフェライトが広く使用されており、本実験でも同様の処理を施した樹脂被覆粒子（アクリル樹脂で被覆したマンガンフェライト粒子）を使用することにした。電気抵抗率はアルミナとマンガンフェライトの中間の値（ $10^8 \sim 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ ）であった。

Fig. 3 に、試料粒子の SEM 画像（Keyence 製 VE-9800 で撮影した画像）を示す。いずれも球状であるが、マンガンフェライトはアルミナに比べて表面の粗

Table 1 Properties of particles used

Particles	$D_{p50}^{(0)}$ [μm]	σ_g [—]	D_{sm} [μm]	ρ_p [kg/m^3]
Alumina	61	1.2	66	2800
Manganese ferrite	68	1.1	70	3000
Manganese ferrite coated with polymer	85	1.2	92	4400

Fig. 3 SEM images of the particles used
 1 alumina
 2 manganese ferrite
 3 manganese ferrite coated with polymer

Fig. 4 Particle size distributions

さが大きい。また、SEM 画像では、アルミナおよびマンガンフェライトは白く見えるが、樹脂で被覆したマンガンフェライトは黒く見える。なお、樹脂の被覆が不十分な箇所は、マンガンフェライトの表面が露出しているので白い。SEM のアプリケーションソフトウェアを用いて、2 次元画像の面積比から 1 個粒子の樹脂被覆率を計算すると、40%～90%であり、平均値は76%であった。

Fig. 4 に、SEM画像から得られた1000個の粒子の個数基準粒径分布を示す。アルミナの個数基準中位径 $D_{p50}^{(0)}$ は $61 \mu\text{m}$ 、幾何標準偏差 σ_g は1.2であり、マンガンフェライトは $D_{p50}^{(0)} = 68 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_g = 1.1$ 、樹脂被覆マンガンフェライトは $D_{p50}^{(0)} = 85 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_g = 1.2$ であっ

た。粒子単位質量あたりの電荷（比電荷）から粒子表面電荷密度に換算する場合、面積平均径（ザウター平均粒径 D_{sm} ）と粒子密度 ρ_p が必要になる。これらの粒子物性を **Table 1** にまとめて示す。なお、試料粒子の内部には空隙があるので、粒子密度は真密度よりも小さい。

4. 実験結果および考察

4. 1 第1傾斜振動板

Fig. 5 に、第1傾斜振動板を通過した粒子（樹脂被覆マンガンフェライト）のオンライン測定値（すなわち、ファラデーカップ内の積算電荷の経時変化）を示す。粒子流量は $8 \sim 11 \text{ mg/s}$ であるが、各測定時の粒子流量は一定にしているので、電荷は時間に正比例した。なお、比例係数は、外部電場に依存する。他の粒子においても、電荷は時間に対して正比例し、比例係数は外部電場によって調整できた。

Table 2 に、第1傾斜振動板にかかる外部電場を $-200 \sim 200 \text{ kV/m}$ の範囲で変化させて得られた粒子表

Fig. 5 Charge collected in a Faraday cup
 (manganese ferrite coated with polymer)

Table 2 Ranges of initial charge of particles
 ($E_{ex} = -200 \sim 200 \text{ kV/m}$)

Particles	Initial charge [$\mu\text{C}/\text{m}^2$]
Alumina	$-0.58 \sim -0.11$
Manganese ferrite	$-0.87 \sim 0.87$
Manganese ferrite coated with polymer	$-0.91 \sim 2.11$

面電荷密度（すなわち、第2傾斜振動板に供給される粒子の初期表面電荷密度）の範囲を示す。電荷の調整範囲は、材料に依存するが、帯電符号の違いも含めて任意の値に調整できることが分かった。

4.2 第2傾斜振動板

4.2.1 傾斜振動板上の粒子の観察

ズームレンズ付き高速度カメラを第2傾斜振動板の斜面に対して法線方向および接線方向に配置し、斜面を移動する粒子の挙動を観察した結果、個々の粒子が跳躍運動を繰り返しながら、斜面長手方向に移動することが分かった。跳躍高さは2mm以下であり、粒子の表面形状の不均一性により、粒子は多少ランダムに運動することもあったが、長手方向への平均跳躍距離は0.6mmであり、粒子と平板の接触回数 n は粒子移動距離 L に比例することが分かった。したがって、粒子表面電荷密度 q_s は、Eq. (6)を基礎として、次のように書き直せる。

$$q_s = q_{s0} \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right) + q_{s\infty} \left\{1 - \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right)\right\} \quad (9)$$

ただし、

$$q_{s\infty} = \frac{V_c + V_{ex}}{k_e \pi D_p^2} = \frac{V_c + k_{ex} z_0 E_{ex}}{k_e \pi D_p^2} \quad (10)$$

ここで、 q_{s0} は粒子の初期表面電荷密度、 $q_{s\infty}$ は粒子の平衡表面電荷密度、 L_0 は平衡値への到達難易性を表す特性値（緩和移動距離）である。

4.2.2 電気影像効果と空間電荷効果

傾斜振動板上の単位面積あたりの粒子数は 1mm^2 あたり5個以下であり、壁面に対する粒子の投影面積比 r_s は3%以下であった。空間電荷効果は、周囲の帯電粒子が形成する電界に起因するものであり、粒子が金属平板上に分散している場合、帯電粒子が形成する電界は粒子と壁の間で閉じており、粒子群の鏡像効果も含めると、振動板近傍の電界強度の平均値 E_b は次式で表せる。

$$E_b = \frac{2n_s q}{\epsilon_0} \quad (11)$$

ここで、 n_s は単位面積あたりの粒子数である。一方、1個の帯電粒子の電気影像効果による粒子-壁間の電界強度 E_e は次式で表わせる²⁾。

$$E_e = \frac{2q}{\epsilon_0 \pi D_p^2} \quad (12)$$

したがって、周囲の粒子が形成する電界と単一粒子の電気影像効果の比の値 α は次式となる。

$$\alpha = \frac{E_b}{E_e} = n_s \pi D_p^2 = 4r_s \quad (13)$$

すなわち、 α は投影面積比 r_s に比例する。粗い推算ではあるが、本実験における r_s は3%以下であり、周囲の帯電粒子が形成する電界の影響は小さいといえる。

4.2.3 粒子の帯電プロフィール

Fig. 6に、粒子の帯電プロフィール（粒子の表面電荷密度と移動距離の関係）を外部電場の強度をパラメーターとして示す。試料粒子は樹脂被覆マンガンフェライトであり、同図(a), (b), (c)は、粒子の初期電荷が正、ゼロ、負の場合に該当する。いずれの場合も、粒子の移動距離とともに電荷は平衡値に漸近し、外部電場により平衡値が変わることが分かった。初期電荷がゼロの粒子を供給すると移動距離の増加とともに粒子は帯電するが、正あるいは負の初期電荷をもつ

Fig. 6 Relationship between the surface charge density of particles and the distance traveled (manganese ferrite coated with polymer)

Fig. 7 Summarized particle charge profiles
(manganese ferrite coated with polymer)

粒子では、移動距離の増加とともに電荷が減衰する場合があります。粒子の電荷の符号が逆転すると帯電に転じる。一連の電荷の移動は連続的であり、除電と帯電を統一した機構で考える必要がある。帯電理論では、電位差 V を電荷移動の駆動源と考えており、除電と帯電の区別を行うことなく、ひとつの指数関数式で表わしているので実験結果とは矛盾しない。

Fig. 6 の実線は、Eq. (9) の理論式を帯電プロファイル毎にフィッティングさせたものであり、フィッティングパラメーターは、平衡表面電荷密度 $q_{s\infty}$ と緩和移動距離 L_0 の二つである。これらのパラメーターは帯電特性を定量的に表すうえで必要不可欠であり、推算の精度を高めるには、粒子の初期電荷と平衡電荷の差を大きくする方がよい。本研究で提案した2段階システムでは、粒子の初期電荷を変更できるので、その効果を十分に引き出せる。

Fig. 7 は、外部電場が 0 および ± 160 kV/m の場合の実験結果をまとめたものである。同図の実線は、Fig. 6 で得られたフィッティングパラメーターの平均値を用いているので、個々の帯電プロファイルの実験結果と多少外れるところも見られるが、初期電荷の影響を含めて、全帯電プロファイルがうまく表されている。これらの結果から、平衡表面電荷密度は初期電荷によらず、外部電場に依存すること、緩和移動距離 L_0 は外部電場に依存せず、一定の振動条件下では、定数として扱えることが分かった。アルミナおよびマンガフェライトにおいても、同様に Eq. (9) の指数関数式で帯電プロファイルが表されることが分かった。

4. 2. 4 平衡表面電荷密度

Fig. 8 に、3種類の試料粒子の平衡表面電荷密度と外部電場の関係を示す。いずれの場合も、平衡表面電荷密度は外部電場に対して線形関係にあり、Eq.

Fig. 8 Equilibrium surface charge density obtained by fitting Eq. (9) to the experimental results

Table 3 Characteristic values of particle charging

Particles	E_{ex0} [V/m]	L_0 [mm]
Alumina	470	52
Manganese ferrite	17	5
Manganese ferrite coated with polymer	-24	16

(10) の平衡帯電の理論式と整合する。平衡表面電荷密度 $q_{s\infty}$ がゼロになる外部電場の強度 E_{ex0} は、Eq. (10) より次式となる。

$$E_{ex0} = -\frac{V_c}{k_{ex} z_0} \quad (14)$$

このとき粒子は帯電していないので、電気影像効果は生じておらず、 E_{ex0} を摩擦帯電の特性値として取り扱うことが可能になる。したがって、Fig. 8 の実験結果から得られる x 切片（すなわち、 E_{ex0} ）により、帯電特性を定量的に評価できる。

Table 3 に、3種類の試料粒子の E_{ex0} の値を示しており、粒子を相互に接触させた場合、数値が大きいものほど負帯電性を示す。帯電列で表わすと、（正側）樹脂被覆マンガフェライト > マンガフェライト > アルミナ（負側）の順になる。

4. 2. 5 緩和移動距離

3種類の試料粒子の緩和移動距離 L_0 を Table 3 に併せて示す。アルミナの緩和移動距離は大きく ($L_0 = 52$ mm)、マンガフェライトは小さい ($L_0 = 5$ mm)。樹脂被覆マンガフェライトは、両者の間に位置する ($L_0 = 16$ mm)。粒子の平均跳躍距離に実験値 (0.6 mm) を代入すると、緩和接触回数は、アルミナ： $n_0 = 87$ 、マンガフェライト： $n_0 = 8$ 、樹脂被覆マンガフェライト： $n_0 = 27$ になり、平衡値に達するのに必

要な接触回数の違いを示すこともできる。

ここで、粒子の電気物性に着目する。§ 3.2に記したように、アルミナは電気抵抗率が高く、マンガンフェライトはそれに比べると低い。樹脂被覆マンガンフェライトはそれらの中間であり、電気抵抗率および緩和移動距離（あるいは緩和接触回数）の順番は一致する。電気抵抗率が大きい場合、摩擦帯電によって獲得した表面の電荷は移動しにくく、粒子表面全体が帯電するのに要する粒子-壁間接触回数は多くなると考えられる。電気抵抗率が小さい場合、粒子表面の電荷が移動するので、比較的容易に均一に帯電する可能性がある。特に、金属のような導電性の粒子が電極と接触する場合、表面は完全に均一である。この種の帯電は誘導帯電と呼ばれている²³⁾。本実験で使用したマンガンフェライトは金属のような性質を示さないが、誘導帯電による電荷の蓄積量を試算してみる。平行平板電極に接触した金属球の表面電荷密度 q_{sl} は次式で表わされる²³⁾。

$$q_{sl} = 1.65 \epsilon_0 E_{ex} \quad (15)$$

$E_{ex} = 160 \text{ kV/m}$, $\epsilon_0 = 8.86 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ を代入すると $q_{sl} = 2.3 \mu\text{C/m}^2$ が得られる。マンガンフェライトの測定結果はこの値に比べると小さかった。また、誘導帯電では瞬時に電荷が移動するが、本実験では帯電は徐々に進行していた。したがって、金属の誘導帯電をそのまま導入することはできないが、電気抵抗率との相関を考えると、粒子表面で何らかの電荷移動が生じていた可能性が高く、これらのことを考慮して、今後さらに検討していく必要がある。

5. 結 言

外部電場を印加できる二つの傾斜振動板から成る粒

子摩擦帯電特性評価システムを開発した。第1傾斜振動板で初期電荷と粒子流量を調整し、第2傾斜振動板で粒子と壁の繰り返し接触による帯電特性を評価した。粒子の挙動の観察および帯電特性の実験結果に理論的考察を加えて、以下の結論が得られた。

- (1) 第1傾斜振動板に印加する外部電場により、粒子の初期電荷を所望の値に設定でき、粒子排出部の間隙と振動強度により、第2傾斜振動板に供給する粒子量を調整できる。
- (2) 第2傾斜振動板の斜面に対して垂直に振動を加えると、粒子は跳躍しながら斜面を移動するので、粒子を壁と繰り返し接触帯電させられる。また、粒子供給量を少なくし、振動板に対する粒子の投影面積比を小さくすることによって、空間電荷効果を無視できる条件で粒子の帯電特性を評価できる。
- (3) 実験で得られた粒子の帯電プロファイル（粒子表面電荷密度と移動距離の関係）は、理論的に導出された指数関数式で表せる。帯電プロファイルの二つのパラメーターは、初期電荷の設定を変更して、平衡電荷との差を大きくすると容易に決定できる。
- (4) 平衡電荷は外部電場と線形関係にあり、平衡電荷がゼロになる外部電場の強度により、粒子の帯電特性を定量的に評価できる。
- (5) 緩和移動距離は外部電場に依存せず、粒子の電気抵抗率と相関する。

[謝辞] 本研究はJSPS 科研費23360341の助成ならびに文部科学省（MEXT, S0901039）の支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

Nomenclature

C	: capacitance between contact bodies	[F]	k_e	: constant in Eq. (2)	[1/F]
D_p	: particle diameter	[m]	k_{ex}	: constant in Eq. (4)	[-]
$D_{p50}^{(0)}$	: count median diameter of particles	[m]	L	: length of electrode or travel distance of particles	[m]
D_{sm}	: Sauter mean diameter	[m]	L_0	: characteristic length of particle electrification	[m]
E_b	: strength of electric field arising from charged particles	[V/m]	n	: number of particle collisions	[-]
E_e	: strength of electric field arising from image charge	[V/m]	n_s	: surface number density of particles	[1/m ²]
E_{ex}	: strength of external electric field	[V/m]	n_0	: characteristic number of particle electrification	[-]
E_{ex0}	: strength of external electric field for $q_{s\infty}=0$	[V/m]	q	: charge on a particle	[C]
F	: particle size distribution function	[-]	q_s	: surface charge density	[C/m ²]
k_b	: constant in Eq. (3)	[1/F]	q_{sl}	: surface charge density caused by induction charging	[C/m ²]
k_c	: constant in Eq. (5) (i.e. charging efficiency)	[-]	q_{s0}	: initial surface charge density	[C/m ²]
			$q_{s\infty}$	: equilibrium surface charge density	[C/m ²]

q_0	: initial charge on a particle	[C]	V_e	: potential difference arising from image charge	[V]
q_∞	: equilibrium charge on a particle	[C]	V_{ex}	: potential difference arising from external electric field	[V]
r_s	: projected area ratio of particles on plane surface	[—]	z_0	: critical gap between contact bodies	[m]
t	: elapsed time	[s]	α	: ratio of electric field ($=E_b/E_e$)	[—]
V	: total potential difference	[V]	ε_0	: absolute permittivity of gas	[F/m]
V_b	: potential difference arising from space charge	[V]	ρ_p	: particle density	[kg/m ³]
V_c	: contact potential difference based on surface work functions	[V]	σ_g	: geometric standard deviation of particle diameter	[—]

References

- 1) Matsusaka, S. and H. Masuda : “Electrostatics of Particles”, *Advanced Powder Technol.*, **14**, 143-166 (2003)
- 2) Matsusaka, S., H. Maruyama, T. Matsuyama and M. Ghadiri : “Triboelectric Charging of Powders : A review”, *Chem. Eng. Sci.*, **65**, 5781-5807 (2010)
- 3) Joseph, S., and G. E. Klinzing : “Vertical Gas-solid Transition Flow with Electrostatics”, *Powder Technol.*, **36**, 79-87 (1983)
- 4) Adhiwidjaja, I., S. Matsusaka, S. Yabe and H. Masuda : “Simultaneous Phenomenon of Particle Deposition and Reentrainment in Charged Aerosol Flow-Effects of particle Charge and External Electric Field on the Deposition Layer”, *Advanced Powder Technol.*, **11**, 221-233 (1999)
- 5) Yao, J., Y. Zhang, C-H. Wang, S. Matsusaka and H. Masuda : “Electrostatics of the Granular Flow in a Pneumatic Conveying System”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **43**, 7181-7199 (2004)
- 6) Ohsawa, A. : “Computer Simulation for Assessment of Electrostatic Hazards in Filling Operations with Powder”, *Powder Technol.*, **135-136**, 216-222 (2003)
- 7) Nifuku, M. and H. Katoh : “A Study on the Static Electrification of Powders during Pneumatic Transportation and the Ignition of Dust Cloud”, *Powder Technol.*, **135-136**, 234-242 (2003)
- 8) Schein, L. B. : “Recent Advances in Our Understanding of Toner Charging”, *J. Electrostat.*, **46**, 29-36, (1999)
- 9) Bailey, A. G. : “The Science and Technology of Electrostatic Powder Spraying, Transport and Coating”, *J. Electrostat.*, **45**, 85-120 (1998)
- 10) Gupta, R., D. Gidaspow and D. T. Wasan : “Electrostatic Separation of Powder Mixtures Based on the Work Functions of its Constituents”, *Powder Technol.*, **75**, 79-87 (1993)
- 11) Matsui, I. : “Leading-Edge Nanoparticle Synthesis and Manipulation Technology”, *Toshiba Review*, **59** (10), 74-75 (2004)
- 12) Matsusaka, S. and H. Masuda : “Simultaneous Measurement of Mass Flow Rate and Charge-to-Mass Ratio of Particles in Gas-Solids Pipe Flow”, *Chem. Eng. Sci.*, **61**, 2254-2261 (2006)
- 13) Matsusaka, S., H. Fukuda, Y. Sakura, H. Masuda and M. Ghadiri : “Analysis of Pulsating Electric Signals Generated in Gas-Solids Pipe Flow”, *Chem. Eng. Sci.*, **63**, 1353-1360 (2008)
- 14) Matsusaka, S., H. Umemoto, M. Nishitani and H. Masuda : “Electrostatic Charge Distribution of Particles in Gas-solids Pipe Flow”, *J. Electrostat.*, **55**, 81-96 (2002)
- 15) Matsusaka, S., K. Ando and Y. Tanaka : “Development of Electrostatic Charge Controller for Particles in Gases Using Centrifugal Contact”, *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **45**, 380-386 (2008)
- 16) Matsusaka, S. : “Control of Particle Tribocharging”, *KONA Powder and Particle Journal*, **29**, 27-38 (2011)
- 17) Bunchatheeravate, P., J. Curtis, Y. Fujii and S. Matsusaka : “Prediction of Particle Charging in a Dilute Pneumatic Conveying System”, *AIChE J.*, **59**, 2308-2316 (2013)
- 18) Oguchi, T. and M. Tamatani : “Contact Electrification Phenomena and Powder Surface Treatments”, *Wear*, **168**, 91-98 (1993)
- 19) Higashiyama, Y., Y. Ujiie and K. Asano : “Triboelectrification of Plastic Particles on a Vibrating Feeder Laminated with a Plastic Film”, *J. Electrostat.*, **42**, 63-68 (1997)
- 20) Matsusaka, S., J. Iyota, M. Mizutani and M. Yasuda : “Characterization and Control of Particles Triboelectrically Charged by Vibration and External Electric Field”, *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **50**, 632-639 (2013)
- 21) Matsusaka, S., M. Kobayakawa, Y. Hosoh and M. Yasuda : “Micro-feeding of Fine Powders Using Vibration Shear Flow”, *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **49**, 658-662 (2012)
- 22) Matsusaka, S., M. Kobayakawa, T. Yamamoto and M. Yasuda : “Analysis of Vibration Shear Flow of Fine Powders”, *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **49**, 663-668 (2012)
- 23) Cho, A. Y. H. : “Contact Charging of Micron Sized Particles in Intense Electric Fields”, *J. Appl. Phys.*, **35**, 2561-2564 (1964)