振動と外部電場を利用した粒子の摩擦帯電の特性評価と制御

Characterization and Control of Particles Triboelectrically Charged by Vibration and External Electric Field

松坂 修二^{a*}, 伊與田 淳平^a, 水谷 慈^a, 安田 正俊^{a, b}

Shuji Matsusaka, Junpei Iyota, Megumi Mizutani, Masatoshi Yasuda

Received 27 March 2013; Accepted 10 June 2013

The use of vibrations and an external electric field for triboelectrically charging particles has been studied both theoretically and experimentally. The condenser model was applied to formulate particle charging caused by repeated contact with a surface. In this experiment, particles were fed from the top of an inclined vibration plate. The particles could travel on the surface, and they were then dropped from the plate. The charge on the particles was measured using a Faraday cup. It was found that the particle charge depends on the inclination angle, electrode length, electric field strength, vibration direction, and material type. The experimental results agreed well with the theoretical results, showing that this method is suitable for characterizing and controlling the particle charge.

Keywords: Particle tribocharging, Vibration, Electric field, Characterization, Electrostatic charge control

1. 緒 言

粒子の摩擦帯電は、粉体操作に伴う基本的な現象である。粒子が同符号に帯電しているとき、静電反発力によって粒子は互いに分散しようとするが、異符号の電荷が混在する系では凝集し、壁面では帯電粒子の符合にかかわらず、電気影像力によって粒子層を形成する¹⁻³⁾。また、粒子が過剰に帯電すると、放電による火災や粉塵爆発の原因にもなる^{4, 5)}。しかし、粒子の帯電を制御すると、いろいろな分野で応用できる。例えば、電子写真⁶⁾、乾式粉体塗装⁷⁾、電気集塵⁸⁾、静電分級⁹⁾、粒子の運動制御^{10, 11)}、流量計測¹²⁾、トモグラフィ¹³⁾などが挙げられる。最近では、粒子の高精度

配列への応用など、先端技術の開発にも注目が集まっている¹⁴⁾。

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、粒子の摩擦帯電の特性評価と制御が必要である。粒子の摩擦帯電の評価法として、粒子を傾斜板上で流下させて帯電量を測定するカスケード法は広く知られているが¹⁵⁾、微粒子では重力よりもファンデルワールス力や静電気力などの付着力が大きく、重力だけでは流動しないので、振動などの外力が必要になる。振動フィーダーに摩擦帯電用壁材を取り付けて、粒子と壁の帯電を評価した例も報告されている¹⁶⁾。この他に、気流から受ける流体抵抗を利用して管内で摩擦帯電させる方法¹⁷⁾や遠心接触式気中微粒子帯電制御装置を利用する方法¹⁸⁻²⁰⁾も報告されている。

本報では、構造が簡単で粒子の挙動を観察しやすい傾斜振動板を用いて、粒子を壁と繰り返し接触させながら摩擦帯電させる方法を採用するが、粒子表面の電荷制御には外部電場を利用し、粒子の摩擦帯電の特性評価と制御に必要な知見を理論的および実験的に得ることを目的とする。

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, 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

2. 接触帯電理論

粒子が壁に接触すると、接触電位差により電荷が移動する²¹⁾。これは、物質表面間の仕事関数差に基づく接触電位差 V_c に起因するが、電場によって生じる電位差にも依存する。粒子が正あるいは負に帯電すると、周囲に電場を形成し、粒子-壁間には電気影像効果に基づく電位差 V_e が生じる。また、周囲に多数の帯電粒子が存在する場合、粒子群が形成する電場によって粒子-壁間に電位差 V_b が生じる。これを、空間電荷効果という。電気影像効果および空間電荷効果は、接触帯電によって粒子表面の電荷が増えるほど、電荷の移動を抑制する働きが強くなる。すなわち、 V_e と V_b は、 V_c を小さくする方向に作用する。また、電極に電圧を印加して外部電場を形成させると、電位差 V_{ex} がさらに加わる²²⁾。 V_{ex} は正にも負にもできるが、電気影像効果および空間電荷効果を生じる電場に対して逆向きの外部電場をかけると、粒子の帯電を促進できる。したがって、電荷の移動に寄与する電位差 V はこれらの電位差の総和であり、次のように表せる。

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

ただし、

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

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

ここで、 k_e 、 k_b は、それぞれ電気影像効果および空間電荷効果に関する定数、 q は粒子の電荷である。接触によって移動する電荷が、電位差 V と電気容量 C に比例するとき、1 個の粒子が 1 回の接触で得る電荷 dq_c/dn を次式で表す。

$$\frac{dq_c}{dn} = k_c C V \quad (4)$$

ただし、

$$C = \frac{\epsilon_0 S}{z_0} \quad (5)$$

ここで、 n は接触回数、 k_c は定数、 ϵ_0 は気体の誘電率、 S は接触面積、 z_0 は粒子表面の粗さを考慮した接触表面間距離である。

また、粒子表面の電荷は、時間 t とともに減衰すること知られている。帯電粒子の電荷の減衰 dq_r/dt は次式で表せる。

$$\frac{dq_r}{dt} = -k_r q \quad (6)$$

ここで、 k_r は電荷の減衰に関する定数である。粒子と壁の接触頻度 f_c を用いると、Eq. (6) を Eq. (4) と同じ次元で扱える。すなわち、

$$\frac{dq_r}{dn} = \frac{1}{f_c} \frac{dq_r}{dt} \quad (7)$$

したがって、粒子に蓄えられる正味の電荷は、Eqs. (1)~(7) より次式となる。

$$\begin{aligned} \frac{dq}{dn} &= \frac{dq_c}{dn} + \frac{dq_r}{dn} \\ &= - \left\{ \frac{(k_e + k_b) k_c \epsilon_0 S}{z_0} + \frac{k_r}{f_c} \right\} q \\ &\quad + \frac{k_c \epsilon_0 S (V_c + V_{ex})}{z_0} \end{aligned} \quad (8)$$

Eq. (8) を $n=0$ 、 $q=q_0$ の初期条件で q について解くと次式が得られる。

$$q = q_0 \exp\left(-\frac{n}{n_0}\right) + q_\infty \left\{1 - \exp\left(-\frac{n}{n_0}\right)\right\} \quad (9)$$

ただし、

$$q_\infty = \frac{V_c + V_{ex}}{k_e + k_b + \frac{k_r z_0}{k_c \epsilon_0 S f_c}} \quad (10)$$

$$n_0 = \frac{1}{\frac{(k_e + k_b) k_c \epsilon_0 S}{z_0} + \frac{k_r}{f_c}} \quad (11)$$

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数（緩和接触回数）である。

傾斜振動板に粒子が点在しているような場合、空間電荷効果を見捨て簡略化する ($k_b=0$)。また、粒子の電気伝導性が低い場合、電荷の減衰項も見捨て簡略化する ($k_r=0$)。したがって、Eqs. (10), (11) はそれぞれ次のように表せる。

$$q_\infty = \frac{V_c + V_{ex}}{k_e} \quad (12)$$

$$n_0 = \frac{z_0}{k_e k_c \epsilon_0 S} \quad (13)$$

Fig. 1 Schematic diagram of setup

3. 実験装置および方法

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供給し、下端から落下する粒子を捕集して、帯電量を測定するものである。粒子どうしの接触をできるだけ少なくし、粒子が壁と自由に接触できるようにするため、壁面に対する粒子の投影面積比は0.1未満とした。振動板を任意の傾斜角に設定したのち、電気的外乱を防ぐため、上部電極を除く主要な金属構成部材を接地（アース）した。圧電素子を用いて傾斜板に振動を加えるが、圧電素子の取り付け位置および向きを変えると、斜面に対して接線方向（長手方向）あるいは法線方向に加振できる。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。同システムに含まれる非接触式振動センサー（感度 $0.1\ \mu\text{m}$ ）を用いると、振動の波形も計測できる。

斜面の 5 mm 上方に、透明電極（ITO 導電フィルム）を取り付け、 $\pm 1\text{ kV}$ の範囲内で電圧を印加して、静電場（最大 $\pm 200\text{ kV/m}$ ）を形成させた。ここでは、粒子が正に帯電しやすくなる外部電場の向きを正とおくことにする。すなわち、粒子の摩擦帯電用傾斜振動板を正極、透明電極を負極として形成される電場の向きを正とする。また、傾斜振動板上の粒子の挙動は、高速度カメラ（Photron 製 Fastcam-Max：解像度 $1\ \mu\text{m}$ ）で観察した（本実験では、1 秒あたりの取り込みフレーム数は4000とした）。

Fig. 2 に、粒子の摩擦帯電用傾斜振動板と電極の詳細を示す。振動板は、長さ： 80 mm 、幅： 15 mm で、その表面に板状あるいはシート状の摩擦帯電材を取り付けることも可能である。本実験では、金属壁（ステ

Fig. 2 Vibrating plate and electrodes

Fig. 3 Particles used for experiment

ンレス鋼 SUS304 の基板）を直接用いることを基本とするが、高分子と金属の複合シート（表面は厚さ $25\ \mu\text{m}$ のポリイミド、裏面は厚さ： $12\ \mu\text{m}$ の銅）を基板に取り付けた実験も行った。試料粒子は、無機酸化物（アルミナ粒子）と電子写真用トナーの帯電制御に用いるキャリア（マンガン-フェライト粒子）である。

Fig. 3 に、各試料粒子の SEM 写真を示す。いずれ

Fig. 4 Particle size distributions (alumina particles, $D_{p50}^{(0)} = 61\ \mu\text{m}$, $\sigma_g = 1.17$; manganese ferrite particles, $D_{p50}^{(0)} = 85\ \mu\text{m}$, $\sigma_g = 1.15$)

Fig. 5 Vibration displacement as a function of time elapsed

も球状ではあるが、マンガン-フェライト粒子はアルミナに比べて表面の粗さが大きい。

Fig. 4 は、各試料粒子の粒子径分布である。アルミナ粒子は、個数基準中位径 $D_{p50} = 61 \mu\text{m}$ 、幾何標準偏差 $\sigma_g = 1.17$ 、粒子密度 $\rho_p = 2800 \text{ kg/m}^3$ 、マンガン-フェライト粒子は、 $D_{p50} = 85 \mu\text{m}$ 、 $\sigma_g = 1.15$ 、 $\rho_p = 4700 \text{ kg/m}^3$ であった。粒子の帯電実験は、温度 $15 \sim 20^\circ\text{C}$ 、湿度 $15 \sim 25\%$ で行った。

4. 実験結果および考察

4. 1 装置の基本特性

Fig. 5 は、斜面を法線方向に加振して、表面変位の経時変化を測定したものであり、良好な正弦振動が得られることが分かった。なお、主振動と直交する方向の振動は小さく、その振幅は主振動の10%未満であった。斜面に対して接線方向に振動を加えた場合にも良好な正弦振動が得られ、主振動と直交する方向の振動は、同様に10%未満であった。

Fig. 6 は、傾斜板の振幅と振動数の関係を示したものである。共振により、 280 Hz 近傍で振幅は最大になった。振動を利用して斜面上の粒子を効率的に移動させるために、粒子の帯電実験は共振振動数で行っ

Fig. 6 Amplitude of vibration as a function of frequency

Fig. 7 Effect of inclination angle of plate on particle charging

た。また、予備実験の結果、斜面に対して接線方向に振動を加える方が、法線方向に振動を加えるよりも、粒子の帯電量が多くなることが分かったので、接線方向の加振による粒子帯電実験を基本とし、法線方向の加振は比較のために行った（§4.5参照）。

4. 2 粒子の帯電に及ぼす傾斜角の影響

Fig. 7 に、水平に対して 20° 、 30° 、 40° に傾斜角を変えて、 200 kV/m の外部電場で粒子帯電実験を行った結果を示す。粒子単位質量あたりの電荷（比電荷）は、傾斜角の増加とともに減少した。傾斜角を大きくすると振動板上の粒子の移動速度は大きくなるが、粒子-壁間の接触が不十分になり、粒子帯電の効率は低下した。また、傾斜角を小さくしすぎると、振動板上の粒子数が過度に多くなるので、粒子と傾斜板の接触の安定性と粒子帯電の効率を考慮して、これ以降の実験では傾斜角を 20° に固定した。

4. 3 粒子の帯電に及ぼす電極長さの影響

傾斜板の上方に設置する上部電極の長さおよび電界強度を変えて、粒子の比電荷を測定した結果を Fig. 8 に示す。本実験では、粒子の初期電荷は非常に小さく、電場がないとき、粒子の比電荷は電極の長さによらず、ほぼゼロであった。外部電場をかけると、電界強度に応じて粒子の比電荷（絶対値）は大きくなり、電極を長くすると平衡比電荷に漸近した。すなわち、電場がないとき、粒子と壁の仕事関数に基づく接触電位差は非常に小さく、粒子が壁と繰り返して接触してもほとんど帯電しないが、外部電場をかけて粒子-壁間の接触電位差を大きくすると、粒子は壁との接触により帯電する。

帯電モデルを用いて実験結果を考察する。本実験では、粒子の帯電は電極を通過する区間に限られるので、粒子-壁間の有効接触回数は電極の長さ L に比例

Fig. 8 Effect of the length of electrode on particle charging
(comparison between experimental results and theoretical ones calculated using Eq. (14))

Table 1 Parameter values obtained by fitting Eq. (14) to the experimental data

Electric field [kV/m]	$q_{m\infty}$ [$\mu\text{C/kg}$]
0	0
± 100	± 9
± 200	± 18

する。また、粒子の比電荷は、粒子の電荷を質量で割った値であり、粒子の比電荷と電極の長さの関係は、Eq. (9) を基礎として次のように書き直せる。

$$q_m = q_{m0} \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right) + q_{m\infty} \left\{1 - \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right)\right\} \quad (14)$$

ただし

$$q_{m\infty} = \frac{V_c + V_{ex}}{k_e m_p} \quad (15)$$

ここで、 q_{m0} は粒子の初期比電荷、 $q_{m\infty}$ は粒子の平衡比電荷、 L_0 は平衡値への到達難易性を表す特性値（緩和距離）、 m_p は粒子 1 個の質量である。Fig. 8 の実線は、Eq. (14) をフィッティングさせた結果であり、実験結果は理論モデルの計算結果と良好に一致することが分かった。なお、フィッティングパラメーターとして、 $q_{m0}=0$ 、 $L_0=10\text{ mm}$ を用い、 $q_{m\infty}$ は電界強度に比例するものとした (Table 1 参照)。

4. 4 粒子の帯電に及ぼす電界強度の影響

Fig. 9 は、粒子の比電荷と電界強度の関係を電極の長さをパラメーターとして示したものである。実験結果から、粒子の比電荷は外部電場と線形関係にあるこ

Fig. 9 Effect of the strength of electric field on particle charging

とが分かる。前節と同様に、帯電モデルを用いて実験結果を考察する。ただし、外部電場に基づく接触電位差 V_{ex} は、粒子表面の粗さを考慮した接触表面間距離 z_0 と外部電場 E_{ex} の積に比例するものと仮定した。すなわち、

$$V_{ex} = k_{ex} z_0 E_{ex} \quad (16)$$

ここで、 k_{ex} は定数である。

Eqs. (14)~(16) より、次式が得られる。

$$q_m = q_{m0} \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right) + \frac{(V_c + k_{ex} z_0 E_{ex})}{k_e m_p} \left\{1 - \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right)\right\} \quad (17)$$

本実験では、外部電場がゼロのとき、粒子の帯電は非常に小さいので、接触電位差 V_c はゼロとおく。また、初期比電荷 q_{m0} もゼロのとき、Eq. (17) は次式となる。

$$q_m = k_l E_{ex} \quad (18)$$

ただし

$$k_l = \frac{k_{ex} z_0}{k_e m_p} \left\{1 - \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right)\right\} \quad (19)$$

すなわち、電極の長さ以外の操作条件が一定の場合、粒子の比電荷 q_m は、電極の長さ L をパラメーターとして、外部電場 E_{ex} と線形関係で表せた。

4. 5 粒子の帯電に及ぼす振動方向の影響

Fig. 10 は、斜面に加える振動の方向を変えた実験の結果である。電極の長さは 50 mm で、振動を加える方向は、斜面に対して接線方向 (○印) と法線方向 (▲印) の 2 通りである。いずれの実験においても、

Fig. 10 Effect of vibration direction on particle charging
(alumina particles on stainless steel plate)

粒子の比電荷は電界に対して比例関係にあるが、接線方向に振動を加えた方が、粒子の比電荷の絶対値は大きい。

振動方向の違いによる粒子帯電への影響を考察するため、ズームレンズを取り付けた高速度カメラで粒子の挙動を撮影し、低速再生で観察した結果、斜面に対して接線方向に振動を加えると、粒子は前後に回転と滑りを伴いながら斜面と接した状態で移動するが、法線方向に振動を加えると、回転しながら跳躍運動を繰り返すことが分かった。すなわち、法線方向に振動を加えた場合、粒子と壁の接触は不連続になり、接触効率が低下するので、粒子の帯電量が小さくなったと考えられる。

4. 6 粒子の帯電に及ぼす材質の影響

Fig. 11 は、傾斜板にポリイミドシートを取り付けてマンガンフェライト粒子を摩擦帯電させたときに得られた実験結果である。基本的な帯電特性は **Fig. 10** と同様であるが、 x 軸との交点は負の値を示した。

Fig. 11 Effect of vibration direction on particle charging
(manganese ferrite particles on polyimide substrate)

実験で得られた比電荷が平衡比電荷とみなせる場合、 x 切片の値は重要な意味をもつ。平衡比電荷を表す **Eq. (15)** に接触電位差 V_{ex} と外部電場 E_{ex} の関係を表す **Eq. (16)** を連立させて V_{ex} を消去し、 $q_{m\infty}=0$ のとき $E_{ex}=E_{ex}^*$ とおくと、次式が得られる。

$$V_c = -k_{ex} z_0 E_{ex}^* \quad (20)$$

k_{ex} と z_0 の扱いは実験系に依存するが、**Eq. (20)** は接触電位差 V_c が E_{ex}^* (同図の x 切片) と線形関係にあることを示しており、摩擦帯電特性の定量評価値として E_{ex}^* の利用が考えられる。

5. 結 言

粒子の摩擦帯電の特性評価と制御のために、傾斜振動板に外部電場を印加して、粒子を摩擦帯電させる方法を提案し、理論的および実験的検討を行った結果、以下の結論が得られた。

- 1) 振動板の傾斜角を大きくすると粒子の移動速度は大きくなるが、粒子-壁間の接触は不十分になり、帯電の効率は低下する。また、傾斜角を小さくしすぎると、振動板に溜まる粒子が増えるので、粒子と傾斜板の接触の安定性と粒子帯電の効率を考慮して、傾斜角を決める必要がある。
- 2) 粒子の比電荷は外部電場の強度を変えることによって容易に調節できる。また、電極を長くすることにより、平衡比電荷に近づけることが可能である。
- 3) 斜面に対して接線方向に振動を加えると、粒子は前後に回転と滑りを伴いながら斜面と接した状態で移動する。法線方向に振動を加えると、粒子は回転しながら跳躍運動を繰り返すので、粒子と壁の接触は不連続になり、接触効率の低下により、粒子の摩擦帯電の効率も低下する。
- 4) 外部電場を伴う傾斜振動板上を流下する粒子の比電荷は、帯電理論によって説明できる。すなわち、粒子の比電荷は、電極の長さをパラメータとして、外部電場と線形関係で表せる。
- 5) 比電荷と電界強度の関係は材料によって異なるので、粒子の帯電特性の定量評価に電界依存性を利用できる。また、振動と外部電場を用いる本法は、粒子帯電の制御にも有効である。

[謝辞] 本研究は JSPS 科研費 23360341 の助成を受けたものである。また、文部科学省 (MEXT, S0901039) の支援を受けた。

Nomenclature

A_v : amplitude of vibration	[m]	q_m : charge-to-mass ratio of particles, i.e. specific charge	[C/kg]
C : capacitance between contact bodies	[F]	q_{m0} : initial specific charge	[C/kg]
D_p : particle diameter	[m]	$q_{m\infty}$: equilibrium specific charge	[C/kg]
$D_{p50}^{(0)}$: count median diameter	[m]	q_r : charge released from a particle	[C]
E_{ex} : strength of electric field	[V/m]	q_0 : initial charge on a particle	[C]
F : particle size distribution function	[—]	q_{∞} : equilibrium charge on a particle	[C]
f_c : frequency of particle collisions	[Hz]	S : effective contact area	[m ²]
f_v : frequency of vibration	[Hz]	t : elapsed time	[s]
k_1 : constant in Eq. (18)	[(F•m)/kg]	V : total potential difference	[V]
k_b : constant in Eq. (3)	[1/F]	V_b : potential difference arising from space charge	[V]
k_c : constant in Eq. (4) (i.e. charging efficiency)	[—]	V_c : contact potential difference based on surface work functions	[V]
k_e : constant in Eq. (2)	[1/F]	V_e : potential difference arising from image charge	[V]
k_{ex} : constant in Eq. (16)	[—]	V_{ex} : potential difference arising from external electric field	[V]
k_r : constant in Eq. (6)	[1/s]	y : vibration displacement	[m]
L : length of electrode or effective travel distance of particles	[m]	z_0 : critical gap between contact bodies	[m]
L_0 : characteristic length of particle electrification	[m]	ϵ_0 : absolute permittivity of gas	[F/m]
m_p : mass of a particle	[kg]	θ : inclination angle of plate	[°]
n : number of particle collisions	[—]	ρ_p : particle density	[kg/m ³]
n_0 : characteristic number of particle electrification	[—]	σ_g : geometric standard deviation of particle diameter	[—]
q : charge on a particle	[C]		
q_c : charge accumulated on a particle	[C]		

References

- Joseph, S. and G. E. Klinzing : “Vertical Gas-solid Transition Flow with Electrostatics”, *Powder Technol.*, **36**, 79–87 (1983)
- 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)
- 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)
- Ohsawa, A. : “Computer Simulation for Assessment of Electrostatic Hazards in Filling Operations with Powder”, *Powder Technol.*, **135–136**, 216–222 (2003)
- 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)
- Schein, L. B. : “Recent advances in our understanding of toner charging”, *J. Electrostat.*, **46**, 29–36, (1999)
- Bailey, A. G. : “The Science and Technology of Electrostatic Powder Spraying, Transport and Coating”, *J. Electrostat.*, **45**, 85–120 (1998)
- Jaworek, A., A. Krupa and T. Czech : “Modern Electrostatic Devices and Methods for Exhaust Gas Cleaning : A Brief Review”, *J. Electrostat.*, **65**, 133–155 (2007)
- 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)
- Nakajima, Y. and T. Sato : “Electrostatic Collection of Submicron Particles with the Aid of Electrostatic Agglomeration Promoted by Particle Vibration”, *Powder Technol.*, **135–136**, 266–284 (2003)
- Yokoyama, N., M. Kanamaru and M. Adachi : “ZnS Nanoparticle Synthesis System with Electrospray Using AC Voltage”, *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **43**, 181–188 (2006)
- 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)
- Machida, M. and B. Scarlett : “Process Tomography System by Electrostatic Charge Carried by Particles”, *IEEE Sensors J.*, **5**, 251–259 (2005)
- Matsui, I. : “Leading-Edge Nanoparticle Synthesis and Manipulation Technology”, *Toshiba Review*, **59** (10), 74–75 (2004)

- 15) Oguchi, T. and M. Tamatani : "Contact Electrification Phenomena and Powder Surface Treatments", *Wear*, **168**, 91-98 (1993)
- 16) 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)
- 17) 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)
- 18) 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)
- 19) Matsusaka, S. : "Control of particle tribocharging", *KONA Powder and Particle Journal*, No. 29, 27-38 (2011)
- 20) 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)
- 21) Matsusaka, S. and H. Masuda : "Electrostatics of Particles", *Advanced Powder Technol.*, **14**, 143-166 (2003)
- 22) Matsusaka, S., H. Maruyama, T. Matsuyama, M. Ghadiri : "Triboelectric Charging of Powders : A review", *Chem. Eng. Sci.*, **65**, 5781-5807 (2010)