J. Inst. Electrostat. Jpn.

論 文

振動平板上の粒子の接触帯電と動的挙動の解析 松坂 修二*.1, 久保 恒太*, 水谷 慈*, 安田 正俊*.** (2013年6月24日受付: 2013年11月5日受理)

Analysis of Contact Charging and Dynamic Behavior of Particles on a Vibrating Plate

Shuji MATSUSAKA^{*,1} Kota KUBO^{*} Megumi MIZUTANI^{*} and Masatoshi YASUDA^{*,**}

(Received June 24, 2013; Accepted November 5, 2013)

A device for evaluating particle-wall contact charging has been developed. The device consists of a circular metal plate placed horizontally on the top of a stand and vibrators that enable the plate to oscillate vertically and rotationally. Spherical particles several tens of micrometers in diameter were sparsely distributed on the plate and their dynamic behavior on the oscillating plate was observed using a high-speed camera with a zoom lens; the observation results showed that the particles circulate on the plate with a jumping motion. The particles were charged through repeated contact with the plate. The charge accumulating on the particles was analyzed taking into account the number of contacts. Furthermore, the charge transferred during the contact period and the size of the contact area were evaluated through a theoretical analysis of the experimental data.

1. はじめに

粒子と壁の接触帯電は、粉体操作に伴って生じる基本 的な現象である.複数の粒子が同符合に帯電していると 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、異符号に帯電した粒子が混在する系では、静電引 力によって凝集する.また、金属壁と接する誘電性粒子 (電荷を漏洩しにくい粒子)は、帯電符合にかかわらず、 電気影像効果によって粒子 – 壁間で引力を受けるので、 粒子層を形成しやすい¹³⁾.粒子が過剰に帯電すると、 付着・凝集に加えて放電が生じ、火災や粉塵爆発の原因 にもなる^{4,5)}.しかし、粒子の帯電をうまく制御すれば、 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⁾,トモグラフィー¹³⁾な どの応用技術として活かせる.また、粒子の高精度配列 など¹⁴⁾,先端技術の開発にも期待が寄せられている.

粒子プロセスを正常に保ち,各装置の性能を十分に発 揮させるには,粒子の接触帯電の特性評価と制御が重要 である.接触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が知られている

- キーワード:粒子,接触帯電,振動,動的挙動
 * 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)
 *** IMP
 - (〒630-0222 奈良県生駒市壱分町 67-20) IMP Co., Ltd.
 - (67-20 Ichibu-cho, Ikoma-shi, Nara 630-0222, Japan) ¹ matsu@cheme.kyoto-u.ac.jp

が¹⁵⁾、微粒子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いので、斜面を移動させること が難しい、重力以外の外力として、振動を利用する方法 は効果的であり、振動フィーダーに接触帯電用壁材を取 り付けて、粒子を壁と繰り返し接触帯電させた例も報告 されている¹⁰. この他に,空気輸送を利用して粒子を管 壁と接触させる方法 ¹⁷⁾, 粒子に遠心力を働かせて壁との接 触効率を高める方法¹⁸⁾,振盪カプセルを利用する方法¹⁹⁾, 複数の標準帯電粒子と混合する方法²⁰⁾,傾斜平行平板間 で粒子を壁と連続衝突させる方法²¹⁾が報告されている. また, 粒子の接触帯電は外部電界によって制御すること が可能であり²²⁾,電界を利用して接触帯電の特性を効率 的に得る方法も報告されているが^{23,24},機構が簡単で粒 子の挙動を観察しやすく、粒子を壁と繰り返し接触させ ながら平衡帯電に至る過程を定量的に評価できる装置に 対する要求は依然として強い.

本報では、上記課題に応えるために振動円板を用いる 方法を提案する. 粒子を水平円板上で跳躍させながら, 周回運動を行わせるために,鉛直方向と周方向の振動を 同期できる装置を製作して,基本的な振動特性を調べた のち,粒子の跳躍運動の観察結果と粒子の繰り返し接触 帯電の測定結果を関連づけて,粒子と壁の接触帯電を理 論的に解析する.

2. 接触帯電理論

接触帯電理論は、参考文献^{25,20} に詳しく記されてい るので、ここでは、本実験結果の解析に必要な粒子と金 属壁の繰り返し接触帯電の定式化について簡単に記す. (3)

粒子 - 金属壁間における電荷移動の基本的な駆動源 は、表面間の仕事関数差に基づく接触電位差 V_{e} である が、粒子が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_{e} 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、接触帯電によって蓄積する粒子表面の電荷の 増加とともに電荷の移動を抑制する働きが強くなるの で、電荷の移動に寄与する電位差 V は次のように表せる. $V = V_{e} - V_{b}$ (1)

$$v = v_{\rm c} - v_{\rm e} - v_{\rm b}$$

ただし,

 $V_{\rm h} = k_{\rm h} q$

$$V_{\rm e} = k_{\rm e} q \tag{2}$$

ここで, k, k, は, それぞれ電気影像効果および空間電 荷効果に関係する定数 (1/F), 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 と表面間の電 気容量 C に比例するとき, 1 接触あたりの移動電荷 dq/ dn は次式で表せる.

$$\frac{\mathrm{d}\,q}{\mathrm{d}\,n} = k_{\mathrm{c}}CV\tag{4}$$

ただし,

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{z_0} \tag{5}$$

ここで, *n* は接触回数, *k*.は定数(-), *e*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.

粒子表面の電荷は、時間とともに減衰することが知ら れているが、粒子が誘電体の場合、繰り返し接触による 電荷の移動に比べて減衰の影響は無視できるので、粒子 帯電の基礎式は式(1)~(5)より次式となる。

$$\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}n} = -\left\{\frac{\left(k_{\mathrm{e}} + k_{\mathrm{b}}\right)k_{\mathrm{c}}\,\varepsilon_{0}\,S}{z_{0}}\right\}q + \frac{k_{\mathrm{c}}\,\varepsilon_{0}\,S\,V_{\mathrm{c}}}{z_{0}}\tag{6}$$

式 (6) $\epsilon_{n=0, q=q_0}$ の初期条件でqについて解くと次 式が得られる.

$$q = q_0 \exp\left(-\frac{n}{n_0}\right) + q_\infty \left\{1 - \exp\left(-\frac{n}{n_0}\right)\right\}$$
(7)

ただし,

$$q_{\infty} = \frac{V_{\rm c}}{k_{\rm e} + k_{\rm b}} \tag{8}$$

$$n_0 = \frac{z_0}{\left(k_e + k_b\right)k_c\varepsilon_0 S} \tag{9}$$

ここで、 q₀ は粒子の初期電荷、 q∞ は粒子の平衡電荷、 n₀

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. 実験装置および方法

図1に,実験装置の概略構成を示す.本装置は,振動 金属円板上に供給した少量の粒子を振動により壁と繰り 返し接触させて帯電を行わせるものであり,時間を追っ て帯電粒子を吸引サンプリングすることにより,比電荷 (粒子単位質量あたりの電荷)の経時変化が得られる.

図2は、振動円板の平面図と断面図である.円板は直 径150mmの合金製で接地してあり、振動源の圧電素子 を固定するために、円筒状の縁が設けられている.円板 の裏面には振動吸収部があり、円板の振動が支持台によ って阻害されないように設計されている.なお、対角に 取り付けられた二つの圧電素子によって、円板は周方向 および鉛直方向に同位相で加振されるが、加振状態にお いても壁面は水平に維持される.

圧電素子の振動周波数,振幅,波形(正弦波)は, IMP 製 VST-01 コントロールシステムで制御した.周方 向および鉛直方向の振動は,1辺10mmの微小立方体(振 動測定用ターゲット)を円板上の任意の位置に取り付け て,その上面と側面で,2つの非接触式振動センサー(感 度 0.1 μm)を用いて同時計測した.



水平円板への粒子の供給にはふるいを使用し,粒子ど うしが重ならないようにした.円板の単位面積あたりの 粒子の質量(表面粒子密度)は0.0036~0.043 kg/m²であ り,壁面に対する粒子投影面積比(面積平均径を用いて 換算した値)は0.030~0.35 であった.壁面上の粒子の 挙動は,ズームレンズ付き高速度カメラ(Photron 製 Fastcam-Max:解像度1µm)を用いて,1秒あたり2000 フレームで録画し,低速再生によって観察した.光源に は、メタルハライドランプ(Sumita 製 LS-M250)を使 用した.

粒子の電荷は、ファラデーカップ(IMP 製 IF-02)内 に粒子を吸引サンプリングし、エレクトロメーター (ADC 製 8252)で測定した.粒子の比電荷は、測定し た電荷と捕集粒子の質量の比から求めた.

試料粒子は球状アルミナ粒子であり,個数基準中位径 $D_{pso}^{(0)}$ は 61 µm,幾何標準偏差 σ_s は 1.17,面積平均径(ザ ウター平均粒子径 D_{sm})は 65 µm であった.粒子内には 空隙があり,平均粒子密度 ρ_p は 2800 kg/m³ であった.な お,空隙は粒子表面には現われていなかった.試料粒子 は 120°C で 24 時間以上加熱乾燥し,デシケーターで室 温まで下げて,室内環境下(温度 15~20°C,湿度 15~ 25%)で実験を行った.

4. 実験結果および考察

4.1 振動円板の基本特性

図 3(a) は、振動数を変えながら、一定(最大)電圧 を圧電素子に加えて、回転振動の中心から75mmの位 置で、振動円板の周方向の振幅を測定した結果を示した ものである。同図より、振幅は振動数によって大きく変 化することが分かった。粒子-壁間にはファンデルワー



図 3 円板の振幅および加速度に及ぼす振動周波数の影響 Fig. 3 Effects of vibration frequency on vibration amplitude and acceleration of the circular plate.

ルス力,電気影像力などの付着力が働くので,粒子を壁 と繰り返し接触させるには,振動を効果的に利用して粒 子を跳躍させる必要がある.振動によって粒子が受ける 外力は,壁面の振幅Aと振動数f、に依存するので,図3 (a)の測定結果を次式の振動加速度αで評価する.

$$\alpha = A \left(2\pi f_{\rm V} \right)^2 \tag{10}$$

図 3(b) に,壁の振動加速度と振動数の関係を示す.300 Hz で振動加速度が最大になったので,これ以降,この 共振振動数を実験に使用した.なお,振幅は圧電素子に 加える電圧によって変えられるので,振動加速度の調節 は容易である.

図4(a)は、振動円板の異なる場所で、周方向の振幅を 測定した結果を示したものである。周方向の振幅は、当 然のことながら、振動の中心で最小になり、半径外向き に距離が増加するにしたがって大きくなる。図4(b)は、 鉛直方向の振幅の測定結果であり、半径外向きに距離が 増加すると振幅は小さくなった。これは、対角に位置す る2つの振動子が水平円板を鉛直方向に単振動させたた めである(図2(b)参照)。以上の結果から、振動円板の 中心では、鉛直方向の振動が強く、中心からの距離が大 きくなると周方向の振動が強くなることが分かった。

本実験では、周方向と鉛直方向の変位を同時に測定し ており、時刻を合わせて各変位をプロットするとリサー ジュ曲線が得られる.図5は、連続する6周期分の測定 結果を示したものであるが、1周期毎に得られたリサー ジュ曲線はほぼ同じであり、周方向と鉛直方向の振動が 同期していることが分かる.また、水平円板は周方向斜 め上方に変位したのち、逆向きに戻るという運動を繰り 返すことも分かった.



図4 円板上の振幅の変化

Fig. 4 Variation of amplitude of vibration on the circular plate.



- 図5 リサージュ曲線(回転振動の中心から 50 mm)
- Fig. 5 Lissajous curves (50 mm away from center of rotational oscillation).





(a) 0.008 kg/m²-plate

(b) 0.04 kg/m2-plate

図6 円板上の粒子 Fig. 6 Particles on the circular plate.

4.2 水平円板上の粒子

図6は、粒子を水平円板に0.008と0.04 kg/m²で供給し て撮影した画像である. 0.008 kg/m²の場合, 粒子は十分 に分散しているが、0.04 kg/m²では粒子どうしの接触がみ られる. 粒子量をさらに増やすと粒子は多層に堆積し, 粒子を壁と自由に接触させることが難しくなる. 壁面に少 量の粒子を供給して振動を加えると、個々の粒子は跳躍 しながら周回運動を続けることが分かった.図5に示し たリサージュ曲線から分かるように,壁が周方向および高 さ方向に規則的に振動するので,周方向斜め上方に粒子 を繰り返して跳躍させることが可能になったと考えられ る. なお、粒子が壁面上を転がり続けたり、滑り続けたり する様子は観察されなかった.また、粒子の周回運動に ともなって遠心力が働くが、1回の跳躍距離が非常に短い ので、粒子が水平円板の半径外向きに広がる現象は見ら れなかった. 個々の粒子に着目すると、粒子表面の非球 形性のために、粒子はある程度ランダムに移動するが、 壁面上の粒子の分散状態が時間とともに大きく変ること はなかった. なお、以降の実験では、帯電粒子のサンプ リングおよび粒子と壁の接触回数の解析のための観察を 回転振動の中心から 50 mm の位置で行うことにした.

4.3 粒子の接触帯電に及ぼす表面粒子密度の影響

図7に、粒子の比電荷に及ぼす表面粒子密度(円板単位 面積あたりの粒子質量)の影響を示す。加振時間は10sで



図7 接触帯電に及ぼす表面粒子密度の影響 Fig. 7 Effect of surface particle density on contact charging.



図8 粒子の比電荷の経時変化 Fig. 8 Specific charge of particles as a function of time elapsed.

あり,表面粒子密度の増加とともに粒子の比電荷は減少し た、同図の上側に、壁面に対する粒子の投影面積の比を記 しており、投影面積比が 0.05 以下であれば、接触帯電への 影響は小さいことが分かった. 粒子の比電荷が減少する主 な要因として,帯電粒子群が形成する電界の影響(空間電 荷効果)が考えられる.本実験条件とは異なるが、Šupuk et al²⁷⁾も粒子量の増加に伴って帯電量が減少することを実 験および計算で示しており,空間電荷効果に言及している.

図8に、表面粒子密度が0.010と0.015 kg/m²における 粒子の比電荷の経時変化を示す. 粒子の初期比電荷はほ ぼゼロであり、振動により粒子が壁と繰り返し接触する と、粒子の比電荷も増加することが分かる.この実験結 果を帯電モデルと比較する.本実験のように、十分な振 動強度のもとで粒子が壁と繰り返し接触する場合、単位 時間あたりに粒子が壁と接触する回数 dn/dt は、経過時 間によらず一定と考えることが可能であり、接触回数n は時間 t に比例する. したがって, 粒子の比電荷 gm と 時間 tの関係は、式(7)を基礎として次のように表せる.

$$q_{\rm m} = q_{\rm m0} \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) + q_{\rm m\infty} \left\{1 - \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right)\right\}$$
(11)

ここで, qm0 は粒子の初期比電荷, qm∞ は粒子の平衡比電 荷, to は平衡値への到達難易性を表す特性値(緩和時間) である.図8の実線は、式(11)をフィッティングさせ

表1 実験結果に式(11)をフィッティングさせて得られたパラメーターの値 Table 1 Parameter values obtained by fitting Eq. (11) to the experimental results.



図9 粒子-壁間接触の時間間隔分布 Fig. 9 Distribution of time intervals of particle-wall contact.

F [-] 1

Cumulative distribution function

た結果であり、実験結果は帯電モデルと良好に一致した. 表1に、計算に使用したフィッティングパラメーターの 値をまとめて示す.表面粒子密度が大きいとき,平衡比 電荷 qm∞ は小さくなり、緩和時間 to は大きくなった。粒 子の帯電は粒子表面に関係するので、参考のために、同 図の右側に面積平均径 65 µm を用いて換算した粒子の表 面電荷密度も記しておく.

4.4 粒子と壁の接触回数を考慮した粒子帯電の解析

表面粒子密度が 0.010 kg/m²において、粒子の跳躍運 動を高速度カメラで観察し、個々の粒子が壁と接触する 時間間隔を求めた. 図9に、粒子-壁間接触の時間間隔 分布を示す.分布の平均値は、16.3 ms であり、この値 の逆数(すなわち,平均接触頻度:毎秒61回)を用い ると,経過時間を接触回数に換算できる.粒子の比電荷 q_m を平衡値 q_{mx} で標準化した q_m^* (ただし, $0 \le q_m^* \le 1$) と粒子の接触回数nとの関係を図10に示す。同図の実 線は、初期比電荷を $q_{m0} = 0$ とおき、緩和時間 $t_0 = 2s \delta$ 緩和接触回数に換算した no = 122 を用いて計算した結果 である. すなわち,

$$q_m^* = \frac{q_m}{q_{m\infty}} = \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{n}{122}\right) \right\}$$
(12)

式(12)の接触回数nに122を代入するとqm*は0.632 になる. また, 式 (12) を時間 n=0 において n で 微分す ると次式が得られる.

$$\frac{\mathrm{d}q_m^*}{\mathrm{d}n}\bigg|_{n=0} = \frac{1}{122} \tag{13}$$

すなわち、初期電荷がゼロのとき、1回の接触帯電は最

Surface particle density: 300 400

図10 振動円板との繰り返し接触による粒子帯電の解析結果 Fig. 10 Analysis results of particle charging by repeated contact with the circulate plate.

終的な接触帯電の1/122に相当する.また、1回の接触 面積は粒子の表面積の1/122と考えることも可能である。 面積平均径が65 umの粒子の表面積は1.33 × 10⁻⁸ m² にな るので、1回の接触面積は1.09×10⁻¹⁰ m²と試算される。 球形粒子を想定すると有効接触半径は 5.9 μm になる. 平 衡比電荷が 62 μC/kg のとき (表 1 参照),表面電荷密度に 換算すると1.88 μC/m²となり、1 個の非帯電粒子が1回の 接触で獲得する電荷は 2.05 × 10⁻¹⁶C と試算される.

以上の解析結果から、振動円板を利用すると、粒子の 繰り返し接触帯電の基本的な特性を評価できることが分 かった. 粒子の跳躍運動の観察結果と関連付けて粒子帯 電を理論的に解析すると、1回の接触による電荷移動量 と接触面積を解析できることも分かった.

5. まとめ

粒子と壁の繰り返し接触帯電を定量的に評価するため, 振動円板を利用した装置を製作し,基本的な振動特性を 把握したのち、粒子を供給して実験を行い、帯電特性を詳 細に解析した.得られた結論は以下のとおりである.

- (1) 水平円板に圧電素子を取り付けて、壁面周方向お よび鉛直方向に振動を加えた結果,2つの振動が 同期していることをリサージュ曲線で確かめた.
- (2) 壁面の粒子は跳躍しながら周回運動を続けること が可能であり、粒子-壁間で繰り返し接触帯電を 行わせることができた.
- (3) 粒子の供給量を増やすと、粒子の比電荷は減少す ることが分かった.
- (4) 平衡比電荷および平衡値への到達難易性を表す特 性値(緩和時間)で規定する指数関数式を用いて,

粒子の繰り返し接触帯電を表すことができた.

(5) 粒子の跳躍運動の観察結果から、粒子と壁の接触 頻度を求め、粒子の帯電と接触回数の関係を明ら かにするとともに、粒子帯電モデルを基礎として、 1回あたりの接触面積、移動した電荷および表面 電荷密度を推定できた。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 23360341 の助成および文部科学 省(MEXT, S0901039)の支援を受けた.

参考文献

- S. Joseph, and G. E. Klinzing: Vertical Gas-solid Transition Flow with Electrostatics. Powder Technol., 36 (1983) 79
- I. Adhiwidjaja, 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 (1999) 221
- J. Yao, 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 (2004) 7181
- A. Ohsawa: Computer Simulation for Assessment of Electrostatic Hazards in Filling Operations with Powder. Powder Technol., 135-136 (2003) 216
- M. Nifuku and H. Katoh: A Study on the Static Electrification of Powders during Pneumatic Trans-portation and the Ignition of Dust Cloud. Powder Technol., 135-136 (2003) 234
- L. B. Schein: Recent advances in our understanding of toner charging. J. Electrostat., 46 (1999) 29
- A. G. Bailey: The Science and Technology of Electrostatic Powder Spraying, Transport and Coating. J. Electrostat., 45 (1998) 85
- A. Jaworek, A. Krupa and T. Czech: Modern Electrostatic Devices and Methods for Exhaust Gas Cleaning: A Brief Review. J. Electrostat., 65 (2007) 133
- R. Gupta, D. Gidaspow and D. T. Wasan: Electrostatic Separation of Powder Mixtures Based on the Work Functions of its Constituents. Powder Technol., **75** (1993) 79
- 10) Y. Nakajima and T. Sato: Electrostatic Collection of Submicron Particles with the Aid of Electrostatic Agglomeration Promoted by Particle Vibration. Powder Technol., **135-136** (2003) 266
- 11)横山奈津子,金丸真広,足立元明:交流電圧による静電噴 霧を用いた ZnS ナノ粒子合成装置の開発.粉体工学会誌, 43 (2006) 181

- 12) S. Matsusaka 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 (2006) 2254
- M. Machida. and B. Scarlett: Process Tomography System by Electrostatic Charge Carried by Particles. IEEE Sensors J., 5 (2005) 251
- 14) 松井 功:世界最先端のナノ粒子技術.東芝レビュー,59 [10] (2004) 74
- 15) T. Oguchi. and M. Tamatani: Contact Electrification Phenomena and Powder Surface Treatments. Wear, 168 (1993) 91
- Y. Higashiyama, Y. Ujiie and K. Asano: Triboelectrification of Plastic Particles on a Vibrating Feeder Laminated with a Plastic Film. J. Electrostat., 42 (1997) 63
- S. Matsusaka, H. Umemoto, M. Nishitani and H. Masuda: Electrostatic Charge Distribution of Particles in Gas-solids Pipe Flow. J. Electrostat., 55 (2002) 81
- 18) 松坂修二,安藤康輔,田中良敬:遠心接触式気中微粒子帯 電制御装置の開発.粉体工学会誌,45 (2008) 380
- 19)明石忠夫,印波真之,松山 達,井田旬一,山本英夫:振盪 カプセルによる粒子群帯電特性の評価,春期研究発表会 講演要旨集, p. 57,粉体工学会(2013)
- 20) 北村智浩, 松山 達, 井田旬一, 山本英夫:2成分帯電法 を用いた粉体帯電, 春期研究発表会講演要旨集, p. 72, 粉 体工学会(2013)
- 21)村上彩子,池野大志,大森正彦,松山 達,井田旬一,山本 英夫:連続衝突による粒子帯電過程の計測,春期研究発 表会講演要旨集, p. 76,粉体工学会 (2013)
- 22) S. Matsusaka: Control of Particle Tribocharging. KONA Powder and Particle Journal, 29 (2011) 27
- P. Bunchatheeravate, J. Curtis, Y. Fujii and S. Matsusaka: Prediction of Particle Charging in a Dilute Pneumatic Conveying System. AIChE J., 59 (2013) 2308
- 24) 松坂修二, 伊與田淳平, 水谷 慈, 安田正俊: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. 粉体
 工学会誌, 50 (2013) 632
- 25) S. Matsusaka and H. Masuda: Electrostatics of Particles. Advanced Powder Technol., 14 (2003) 143
- 26) S. Matsusaka, H. Maruyama, T. Matsuyama and M. Ghadiri: Triboelectric Charging of Powders: A review. Chem. Eng. Sci., 65 (2010) 5781
- 27) E. Šupuk, A. Hassanpour, H. Ahmadian and M. Ghadiri and T. Matsuyama: Tribo-electrification and Associated Segregation of Pharmaceutical Bulk Powders. KONA Powder and Particle Journal, **29** (2011) 208