

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360341

研究課題名(和文) 仕事関数と電界制御による粒子表面の精密電荷付与と複合場における粒子運動の同時解析

研究課題名(英文) Simultaneous Analysis of High-Precision Electrostatic Charging on Particles Caused by Work Function with Electric Field Control and Particle Movement in Multiple Fields

研究代表者

松坂 修二 (Matsusaka, Shuji)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：10219420

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円、(間接経費) 4,410,000円

研究成果の概要(和文)：粒子と壁の繰り返し接触による摩擦帯電を評価する新しい手法を理論的および実験的に検討した。粒子帯電を定式化するためにコンデンサーモデルを適用した。実験では、振動板の上に粒子を供給し、その表面を移動させたのち、粒子の電荷をファラデーカップで測定した。粒子の挙動は、ズームレンズを取り付けた高速度カメラで観察した。振動板を移動した距離あるいは粒子と壁の接触回数に関数である粒子帯電のプロファイルは、平衡と緩和に関係するふたつのパラメータによって決定される理論とよく一致した。また、粒子帯電の特性は、外部電場によって得られたパラメータの値で十分に評価できた。

研究成果の概要(英文)：A new method for characterizing particles triboelectrically charged through repeated contact with a wall has been studied both theoretically and experimentally. The condenser model was applied to formulate the particle charging. In the experiment, particles that were fed on a vibration plate could travel on the surface, and the charge on the particles was measured using a Faraday cup. Particle behavior on the oscillating plate was observed using a high-speed camera with a zoom lens. It was found that the profile of particle charge as a function of distance travelled on the vibrating plate or the number of particle-wall contacts agreed well 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 values of the parameters obtained by external electric fields.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：プロセス工学・化工物性・移動操作・単位操作

キーワード：粒子 接触帯電 表面電荷 電界 静電気力

1. 研究開始当初の背景

二つの異なる物質を接触させると、表面電位差に起因して電荷が移動するが、接触表面を分離しても、移動した電荷が残留する現象を接触帯電という。粒子帯電は接触条件に大きく依存するが、基本的には表面で生じる現象であり、比表面積の増加とともに静電気の影響が強く現れる。粉体操作では、帯電粒子に働く電気影像力が強くなると壁に付着しやすくなり、流動性の低下や、偏析の原因にもなる。また、粒子が過剰に帯電すると、放電や着火の原因にもなるので対策が必要である。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、静電粉体塗装、静電分離、粒子配列、計測などの技術に応用できる。

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。傾斜板上で粒子を流動させて帯電量を測定するカスケード法は操作が簡単であり、粒子帯電評価法として比較的好く用いられているが、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に支配されるので、個々の粒子の運動が妨げられないように、振動などの外力を加える必要がある。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る方法、振盪カプセルを利用する方法なども提案されている。振動以外では、空気輸送を利用して粒子を管壁と接触させる方法、粒子に遠心力を働かせて壁との接触効率を高める方法も報告されている。また、粒子の接触帯電は材料特性だけでなく、電場の影響を受けるので、外部電場を利用して粒子の帯電を制御することも可能であるが、振動と外部電場を利用した粒子の精密電荷付与法ならびに簡便で効率的な帯電特性評価法は確立していない。

2. 研究の目的

接触表面間の仕事関数差を利用して粒子表面に電荷を精密に付与するために、外部電場を印加した状態で、粒子を壁と連続して接触させる方法を考案する。粒子の帯電と帯電粒子の挙動を同時に解析し、粒子の平衡電荷と平衡への到達難易性を実験結果に基づいて評価する。初期電荷および外部電場の影響を考慮しながら、電荷移動量の測定結果に理論的検討を加えて、各種粒子の評価を含めた精密電荷付与法ならびに簡便で効率的な帯電特性評価法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、実験的検討および理論的検討を行った。傾斜振動板を利用して、重力により粒子を移動させる方法と振動円板を用いて、粒子に周回運動を行わせる方法を実験的に検討し、接触帯電モデルを基礎として理論的に展開した。

(1) 実験装置 I

Fig. 1 に、実験装置の概略構成を示す。本装置は、傾斜振動板を利用して粒子を壁と繰り返し接触させながら、外部電場中で粒子を帯電させるものであり、粒子の帯電特性を詳細に解析できるように、2段階システムを採用した。第1傾斜振動板は、粒子の電荷および粒子流量の調整部であり、第2傾斜振動板は粒子の帯電特性の評価部である。

第1傾斜振動板は金属製であり、その上端に、粒子を投入する円筒管を傾斜振動板と微小な隙間を設けて取り付けられた。容器および傾斜板は、斜面長手方向に加振し、粒子は円筒管底板の中心に設けられた微小孔から定量供給した。粒子流量は、振動強度および円筒管の下端と傾斜振動板の隙間で調整した。第1傾斜振動板には、上部電極を取り付けており、下部電極（傾斜振動板）との隙間に静電場を形成させた。壁との接触によって得られる粒子の帯電量は静電場によって調整し、粒子の比電荷は、ファラデーケージ法で測定した。

第1傾斜振動板で質量流量および電荷の調整が行われた粒子は、第2傾斜振動板に移動する。第2傾斜振動板は、第1傾斜振動板と同様に金属製であるが、表面に異なる壁材を取り付けることが可能である。なお、第2傾斜振動板では、粒子を跳躍させながら繰り返し接触帯電を行わせるために、斜面の法線方向に加振した。第1傾斜振動板、第2傾斜振動板ともに振動の制御には、IMP製 VST-01 コントロールシステムを使用した。

第2傾斜振動板では、粒子帯電に及ぼす電極長さ（言い換えれば、粒子の移動距離）と外部電場の強さの影響を評価するために、長さの異なる平板状の上部電極を取り付けて電圧を印加した。下部電極は接地し、上部電極との間に外部電場を形成させた。なお、上部電極を除くすべての金属構成部材を接地し、粒子の帯電実験に影響を与える可能性のある電気的外乱を防いだ。粒子の電荷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を受ける。外部電場を強くし過ぎると、

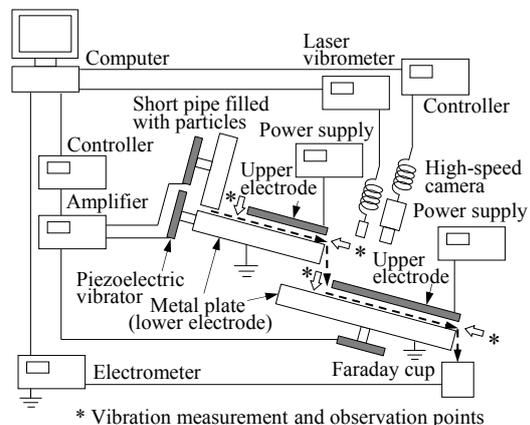


Fig. 1 Schematic diagram of the setup

粒子は跳躍時に上部電極と接触するので、これを避けるために電界強度は一定範囲内とした。

第2傾斜振動板を通過した粒子の電荷は、ファラデーケージ法で測定し、傾斜板の前後の粒子の電荷の差から繰り返し接触による電荷移動量を求めた。また、第2傾斜振動板にエレクトロメーターを接続し、電流を一定間隔でコンピューターに取り込み、時間積分によって電荷移動量を求めた。この値を粒子質量で割って、単位質量あたりの電荷移動量を求めた。

第2傾斜振動板上の粒子の挙動は、上部電極の出口に、顕微高速カメラを設置し、斜面に対して法線および接線方向から観察した。

(2) 実験装置 II

Fig. 2 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周回運動を行わせながら壁と繰り返し接触させて帯電を行わせるものであり、任意の経過時間後の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）の経時変化を求めた。円板は接地し、振動源の圧電素子を固定するために、円筒状の縁を設けた。円板の裏面には振動吸収部を設け、円板の振動が支持台によって阻害されないように工夫した。なお、対角に取り付けた二つの圧電素子によって、円板を周方向および鉛直方向に同位相で加振するが、加振状態においても壁面は水平に維持できる。周方向および鉛直方向の振動は、非接触式振動センサー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。壁面上の粒子の挙動は、ズームレンズ付き高速カメラを用いて録画し、低速再生によって観察した。粒子の比電荷は、ファラデーケージ法で測定した。

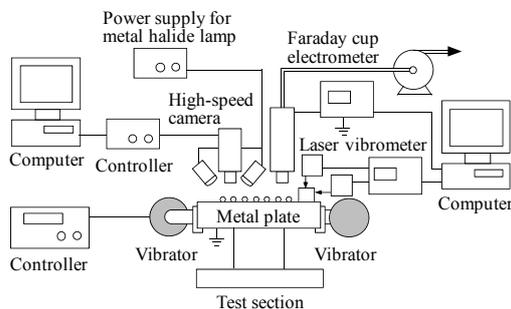


Fig. 2 Schematic diagram of the setup

(3) 理論的検討

物質表面間の電荷移動の駆動源となる電位差は、物質表面間の固有の仕事関数差に基づく接触電位差、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、外部電場

に因する電位差から成る。粒子の繰り返し接触帯電では、電気影像効果および空間電荷効果は電荷の移動を阻害するが、外部電場を変えることによって、粒子に正あるいは負の電荷を与えることが可能である。

接触表面間を移動する電荷が、電位差と電気容量に比例するとき、粒子が1回の接触で獲得する電荷は定式化が可能であり、粒子の初期電荷を与えて解くと、粒子の電荷は接触回数に対して指数関数式で表せる。同式のパラメータは、粒子の平衡電荷、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。

4. 研究成果

(1) 実験装置 I で得られた研究成果

ズームレンズ付き高速カメラで、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2 mm 以下であり、粒子と平板の接触回数は粒子移動距離に比例することも分かった。したがって、粒子の電荷は、接触距離の関数として表すことが可能になった。

Fig. 3 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。各測定時の粒子流量は一定のため、電荷は時間に正比例するが、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ることを検証した。

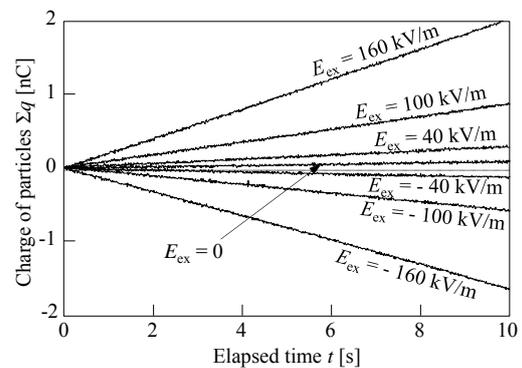


Fig. 3 Charge collected in a Faraday cup (manganese ferrite coated with polymer)

Fig. 4 は、外部電場を0および±160 kV/m に設定して得られた粒子帯電プロファイル（粒子の表面電荷密度と移動距離の関係）をまとめたものである。同図の実線は、理論計算結果であり、初期電荷の影響を含めて、帯電プロファイルの実験結果と整合する。これらの実験的および理論的検討結果から、平衡電荷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

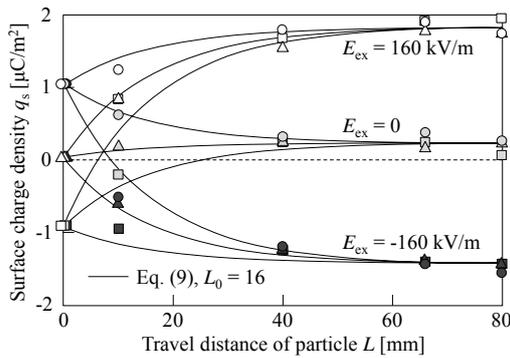


Fig. 4 Particle charge profiles (manganese ferrite coated with polymer)

が分かった。アルミナおよびマンガンフェライトにおいても、帯電プロファイルを経験関数式で表せることを検証した。

Fig. 5 に、3 種類の試料粒子の平衡電荷と外部電場の関係を示す。いずれの場合も、平衡電荷は外部電場に対して線形関係にあり、平衡帯電の実験結果は理論式と整合した。同図の実験結果から得られる x 切片の値により、帯電特性を定量的に評価できるようになった。

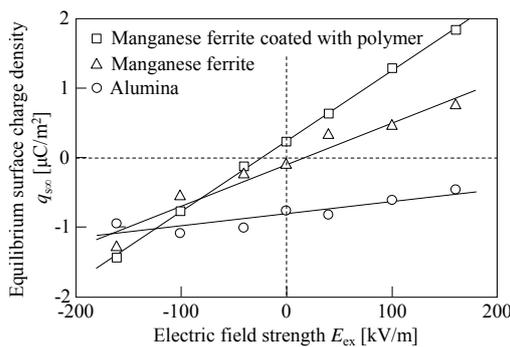


Fig. 5 Equilibrium surface charge density obtained from the experimental results

(2) 実験装置 II で得られた研究成果

金属円板上の対角に位置する二つの圧電素子によって、円板を周方向および鉛直方向に同位相で加振した結果、振動金属円板上に供給した少量の粒子は、安定した状態で周回運動を行いながら壁と繰り返し接触することをズームレンズ付き高速カメラで観察した。また、個々の粒子が壁と接触する時間間隔を画像解析により求めた。Fig. 6 に、粒子-壁間接触の時間間隔分布を示す。分布の平均値の逆数（すなわち、平均接触頻度）を用いると、経過時間を接触回数に換算できる。粒子の比電荷を平衡値で標準化した値と粒子の接触回数との関係を Fig. 7 に示す。同図の実線は、初期電荷がゼロ、緩和時間（2 s）を緩和接触回数に換算した値を用いて計算した結果である。すなわち、1 回の接触帯電は最終的な接触帯電の 1/122 に相当し、1 回の接触面積は粒子の表面積の 1/122 と考えると、面積平均径が 65 μm の球形粒子の 1 回の

接触面積は $1.09 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 、有効接触半径は 5.9 μm になる。平衡比電荷が 62 $\mu\text{C}/\text{kg}$ のとき、表面電荷密度に換算すると 1.88 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ になり、1 個の非帯電粒子が 1 回の接触で獲得する電荷は $2.05 \times 10^{-16} \text{ C}$ と試算される。上記の解析結果から、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。

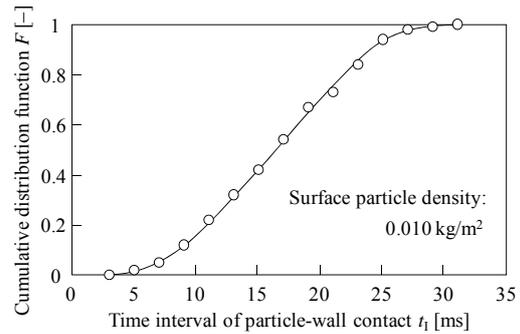


Fig. 6 Distribution of time intervals of particle-wall contact

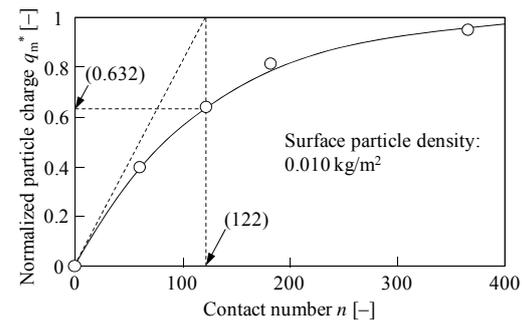


Fig. 7 Analysis results of particle charging by repeated contact with the circulate plate

本研究では、接触表面間の仕事関数差を利用して粒子表面に電荷を精密に付与するために、外部電場を印加した状態で、粒子を壁と連続して接触させる方法を考案し、実験的検討を行った。粒子の帯電と帯電粒子の挙動を同時に解析し、粒子の平衡電荷と平衡への到達難易性を実験結果に基づいて評価した。初期電荷および外部電場の影響を考慮しながら、電荷移動量の測定結果に理論的検討を加えて、各種粒子の評価を含めた精密電荷付与方法ならびに簡便で効率的な帯電特性評価法を確立した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

- ① 松坂 修二, 久保 恒太, 水谷 慈, 安田 正俊; 振動平板上の粒子の接触帯電と動的挙動の解析, 静電気学会誌, 査読有, 37, 273-278 (2013)

<http://www.iesj.org/html/journal/articles/papers/37/37-6-273.pdf>

- ② Mizutani, M., M. Yasuda and S. Matsusaka; Characterization of Particle Electrostatic Charging in Vibration and Electric Field, Chemical Engineering Transactions, 査読有, 32, 2083-2088 (2013)
DOI: 10.3303/CET 1332348
- ③ 水谷 慈, 武田 紘一, 安田 正俊, 松坂 修二; 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, 粉体工学会誌, 査読有, 50, 832-839 (2013)
<http://dx.doi.org/10.4164/sptj.50.832>
- ④ 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, 査読有, 50, 632-639 (2013)
<http://dx.doi.org/10.4164/sptj.50.632>
- ⑤ Bunchatheeravate, P., J. Curtis, Y. Fujii and S. Matsusaka; Prediction of Particle Charging in a Dilute Pneumatic Conveying System, AIChE Journal, 査読有, 59, 2308-2316 (2013)
DOI: 10.1002/aic.14025
- ⑥ Matsusaka, S; Control of particle tribocharging, KONA Powder and Particle Journal, 査読有, No.29, 27-38 (2011)
<http://dx.doi.org/10.14356/kona.2011007>

〔学会発表〕(計 13 件)

- ① 水谷 慈, 安田 正俊, 松坂 修二; 振動と電界を利用した微粒子の帯電特性評価と帯電制御, 粉体工学会秋期研究発表会, 2013 年 10 月 8 日, 大阪
- ② 水谷 慈, 武田 紘一, 安田 正俊, 松坂 修二; 振動と電界を用いた微粒子の接触帯電特性評価および帯電制御手法の検討, 化学工学会秋期大会, 2013 年 9 月 17 日, 岡山
- ③ Mizutani, M., M. Yasuda and S. Matsusaka; Characterization of Particle Electrostatic Charging in Vibration and Electric Field, Proceedings of The 11th Italian Conference on Chemical and Process Engineering, Milan, 3rd June 2013
- ④ 水谷 慈, 安田 正俊, 松坂 修二; 振動と電界を利用した微粒子の帯電特性評価, 粉体工学会春期研究発表会, 2013 年 5 月 22 日, 東京
- ⑤ Wei, D., S. Matsusaka; Adhesion Characteristics of Charged Fine Particles, 化学工学会第 78 年会, 2013 年 3 月 17 日, 大阪
- ⑥ 松坂 修二, 伊與田 淳平, 久保 恒太, 水谷 慈, 安田 正俊; 第 50 回粉体に関する討論会, 2012 年 10 月 30 日, 京都
- ⑦ Bunchatheeravate, P., Y. Fujii, J. Curtis and S. Matsusaka; Electrostatic Charging of Particles in a Straight Pipe, Abstracts of AIChE 2012 Annual Meeting, Pittsburgh, 1st

November 2012

- ⑧ Wei D. and S. Matsusaka; Characterizing the Effect of External Electric Field on Adhesion Force between Charged Particles and a Substrate by Airflow Method, Abstracts of The 7th International Conference on Applied Electrostatics, Dalian, 17th September 2012
- ⑨ Matsusaka, S. and K. Sato; Charge Control of Particles in Air Using Centrifugal Force Acting under Applied Electric Field, Abstracts of European aerosol Conference, Granada, 6th September 2012
- ⑩ 藤井 祐輔, P. Bunchatheeravate, 松坂 修二; 粒子の初期電荷の制御による管内気二相流の帯電評価, 第 29 回エアロゾル科学・技術研究討論会, 2012 年 8 月 29 日, 北九州
- ⑪ Matsusaka, S; Electrostatics and Particle Technology, Proceedings 5th Asian Particle Technology Symposium (APT2012), Singapore, 3rd July 2012
- ⑫ Matsusaka, S; Measurement and Control of Particle Tribocharging, Proceedings of 2012 Electrostatics Joint Conference, Ontario, Canada, 12th June 2012
- ⑬ 松坂 修二, 佐藤 和歩, 伊與田 淳平, 電界を利用した遠心接触式気中微粒子帯電制御装置の開発, 化学工学会 第 77 年会, 2012 年 3 月 16 日, 東京

〔図書〕(計 1 件)

- ① 松坂 修二; 4.8 静電気, 粉体工学ハンドブック, 粉体工学会編, 朝倉書店 (2014)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 帯電量測定方法及び測定装置
発明者: 佐藤和之, 村井康亮, 村山隆二, 井上圭, 森谷 修司, 大西 敏一, 竹内 達夫, 松坂 修二
権利者: キヤノン, 松坂 修二, IMP
種類: 特許
番号: 特許願 2012-152071
出願年月日: 24 年 7 月 6 日
国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

松坂 修二 (Matsusaka, Shuji)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 10219420