

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
研究期間：2007～2008
課題番号：19560753
研究課題名 (和文) 微粒子の精密ハンドリングのための表面電荷制御法の開発
研究課題名 (英文) Development of Surface Charge Control Method for Precise handling of Fine Particles
研究代表者 松坂 修二 (MATSUSAKA SHUJI) 京都大学・大学院工学研究科・准教授 研究者番号：10219420

研究成果の概要：

逆円錐台形の微粒子帯電制御装置を開発した。微粒子を気中に分散させて、帯電制御装置の上端から円周に沿うように導入し、下端から円周の流れに沿って排出させた。装置の内壁に2種類の接触帯電用金属板を取り付けると粒子の帯電効率率は90%になり、同装置を2基直列に接続すると98～99%になった。2種類の金属板の面積比を変えると、各金属板に対応する平衡比電荷を上下限として所望の値に制御できた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

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：微粒子，静電気，帯電，制御

1. 研究開始当初の背景

気中に浮遊する微粒子が帯電すると静電拡散や電気影像力によって壁に沈着しやすくなる。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ので、障災害にも注意が必要である。しかし、粒子の帯電をうまく利用すれば、いろいろな分野で技術展開が可能である。電気集塵、静電粉体塗装などは、既に広く利用されており、気相中の分散微粒子の運動制御、粒子流量計測、トモグラフィなど、今後の技術革新につながる研究・開発も行われている。ただし、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、粒子の帯電量の制御が不可欠であり、そのための技術開発が急務である。

2. 研究の目的

粒子を壁と繰り返して接触させると、粒子の帯電量を壁の材質に応じた平衡値に近づけられる。本研究では、粒子を2種類の壁と効率よく接触させて、粒子の帯電量を制御する技術を開発することを目的とする。粒子帯電制御法の理論的検討を行い、試作した装置を用いて系統的に実験を進める。

3. 研究の方法

(1) 理論的検討

粒子が金属壁と接触すると、粒子の電荷は金属壁へと移動するが、1回の接触・分離による電荷の移動量は、物質間の接触電位差、粒子の初期電荷、接触面積等に依存する。粒子が誘電体の場合、壁との接触を繰り返すこ

とによって粒子表面に電荷が蓄積する。1回の接触による電荷の蓄積は、粒子の帯電量の増加に伴って徐々に小さくなり、粒子の帯電量は平衡値に達する。有効接触電位差を基礎とする電荷移動の微分方程式に初期電荷を入れて解くと、粒子の帯電量を接触回数に関数として表せる。しかし、粒子と壁の接触回数の測定および予測は難しいので、管内固気二相流のように、粒子が壁と一定の頻度で接触する場合、粒子の接触回数を移動距離に置き換える方が使いやすい。粒子の単位質量当たりの帯電量（比電荷 \bar{q}_m ）を粒子の移動距離 L の関数として表すと次のようになる。

$$\bar{q}_m(L) = \bar{q}_{m0} \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right) + \bar{q}_{m\infty} \left\{1 - \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right)\right\} \quad (1)$$

ここで、 \bar{q}_{m0} は帯電装置に入る粒子の初期の比電荷、 $\bar{q}_{m\infty}$ は壁との接触による粒子の平衡比電荷、 L_0 は帯電効率に関する特性定数であり、 L_0 が大きいときには、粒子が平衡帯電に達するまでの距離が長くなる。なお、 L_0 および $\bar{q}_{m\infty}$ は粒子と壁の材質、空気の状態、流速等の各種条件に依存する。

(2) 実験的検討

Fig. 1 に実験装置の概略構成を示す。コンプレッサーから供給される空気は凝縮機で水分を除去し、相対湿度は約 10% で一定にした。粉体の供給には、テーブルフィーダーを使用し、微量定量供給の精度を高めるために内径 1 mm 以下の細管を用いて、回転テーブル上に形成させた一定の厚さの粉体層から粒子を連続吸引する方法を採用した。細管はエジェクターの負圧側に接続しており、エジェクター内の高速気流を利用して粉体を気中に分散させた。得られた固気二相流は、ウレタンチューブ（内径 5 mm、長さ 1 m）を用いて帯電制御装置に送った。

形状の異なる二つの帯電制御装置を試作した。一つは円柱形（内径：70 mm、高さ（内寸）：110 mm）であり、粒子を上端から円周に沿うように導入して、下端から円周の流れに沿って排出させた。いわゆる、接線流入・接線流出方式としており、円柱形の帯電装置内で粒子を気流とともに回転させて、遠心力を用いて側壁に押し付けることにより、粒子と壁の接触効率を高めるものである。しかし、装置内の粒子および気流の速度は下流に行くほど低下するので遠心力は減少し、側壁への粒子の押し付け力も小さくなる。遠心力の低下を防ぐには、装置出口に向かって半径を小さくし、速度の低下分を補う必要があるため、円錐台形の帯電制御装置も試作した。粒子導入側の装置内径および高さは円柱形装置と同じく、それぞれ 70 mm および 110 mm とし、粒子排出側の装置内径は 40 mm にした。

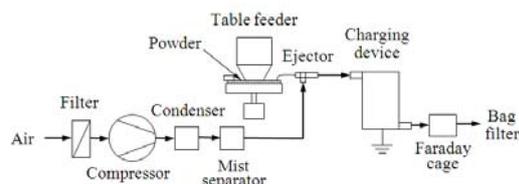
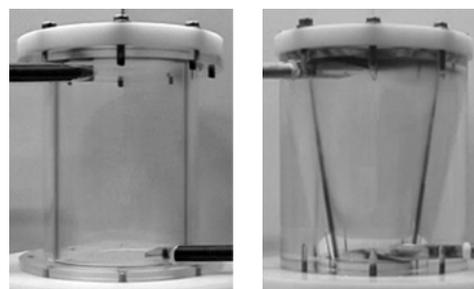


Fig. 1 Experimental apparatus

なお、粒子の運動状態が外部からでも観察できるように、透明アクリル樹脂で装置を製作した（Fig. 2 参照）。粒子の帯電実験は、装置内面（上下面および側面）に厚さ 0.05 mm の接触帯電用金属薄板を取り付けた。金属の材質は、汎用性および帯電性を考慮して、銅、真鍮（C2801P）、ステンレス鋼（SUS304）の 3 種類とした。帯電列は、（正側）真鍮 \approx 銅 $>$ ステンレス鋼（負側）であり、2 種類の金属による帯電制御実験では、真鍮とステンレス鋼を用い、側面を 2 分割あるいは 4 分割して、隣り合う金属の材質が異なるように配置した。上下面には、側面に取り付けた金属に合わせて、扇形に分割して金属薄板を取り付けた。装置内のすべての金属薄板を接地（アース）してから実験を行った。帯電装置に粒子を送る輸送管（内径 5 mm）に粒子沈着層を形成させないようにするため、空気平均流速は 30 m/s に設定した。また、気流中の粒子濃度は、粒子同士の相互干渉の影響が現れないように、粒子と空気の質量流量比（混合比）を ≈ 0.001 にした。帯電装置の性能を評価するため、装置の入口および出口に吸引式ファラデーケージを取り付けて比電荷を測定した。1 回の比電荷の測定で捕集した粉体は約 30 mg である。

装置形状を決めるための予備実験では、質量基準中位径 $D_{p50} = 35 \mu\text{m}$ 、粒子密度 $\rho_p = 3500 \text{ kg/m}^3$ の粉体（樹脂被覆粒子、球形）を使用し、粒子帯電制御実験では、 $D_{p50} = 10 \mu\text{m}$ 、 $\rho_p = 4000 \text{ kg/m}^3$ の粉体（無機酸化粒子 Al_2O_3 、球形）を用いた。



(a) Cylindrical shape (b) Inverted truncated conical shape

Fig. 2 Experimental apparatus

4. 研究成果

(1) 装置形状と帯電性能

円柱形および円錐台形の帯電装置の内面に銅板を取り付けて装置を鉛直に保持し、粒子 ($D_{p50} = 35 \mu\text{m}$) を上端から導入した。円錐台形の装置では、遠心力の低下を防ぐため、出口部の装置内径を小さくしており、粒子を上端（大径側）から導入するので、逆円錐台形で実験を行った。

円柱形装置から排出される粒子の比電荷は 0.037 mC/kg であり、逆円錐台形では 0.10 mC/kg であった。銅板との接触によって粒子は負に帯電するが、その絶対値は逆円錐台形の方が大きく、円柱形のものよりも帯電性能が高いことが分かった。

装置内の粒子の運動状態を調べるため、装置内面の金属板を外して、透明アクリル樹脂の外側からデジタルビデオカメラで観察した結果、粒子は螺旋状に下降しながら安定に排出されていることが分かった。円柱形装置では、粒子は側壁に沿って螺旋状に1回転しており、装置内の粒子の移動距離は 0.22 m であった。

逆円錐台形装置では、粒子は2回転してから排出されており、粒子の移動距離は 0.35 m であった。逆円錐台形装置の帯電性能が円柱形のものより高くなったのは、壁との接触移動距離が長かったためと考えられる。なお、装置の小径 (40 mm) を上に、大径 (70 mm) を下にして、下端から粒子を導入し、上端から排出させる円錐台形（正立）の実験も行ってみたが、粒子の上昇螺旋運動は安定しなかった。したがって、以降の実験では、装置内の粒子の運動が安定しており、帯電性能が高い逆円錐台形装置を用いることにした。

Fig. 3 は、質量基準中位径が $10 \mu\text{m}$ の粉体を、逆円錐台形装置に導入して実験を行ったのち、帯電用金属薄板を外して、その表面を観察したものである。装置の上半分には粒子沈着層は見られないが、下半分には筋状の粒子沈着層が形成されている。これは、装置の上端から接線方向に導入した気流の速度が、下方で低下したためと考えられる。なお、粒子沈着層は筋状のパターンを形成しているが、これは粒子沈着と再飛散が同時に生じるときに見られる現象であり、沈着層を形成する粒子は気相中の粒子と入れ替わるので、長時間にわたって装置内に粒子が留まることはなく、排出される粒子の比電荷に大きな影響はない。また、逆円錐台形装置内を粒子が2回転してから排出されるときの粒子の移動軌跡を、ビデオの録画をもとに展開して模式的に示すと Fig. 4 のようになる。Fig. 3 の写真と比較すると、粒子が壁と接触しながら移動するところには、粒子の衝突・摩擦によって沈着層は形成されておらず、粒子は装置内の帯電用金属壁と直接接触していたことが分

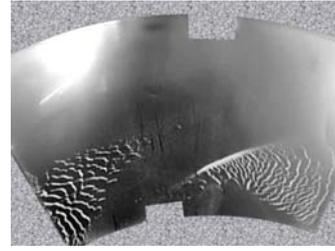


Fig. 3 Metal surface after experiment

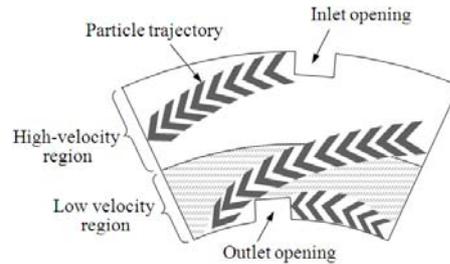


Fig. 4 Schematic sketch of particle trajectory on the metal surface

かる。

(2) 平衡帯電量と帯電効率

Fig. 5 に、逆円錐台形帯電装置を直列に2基連結して、各装置の入口および出口で測定した粒子の比電荷を粒子の移動距離に対して示す。試料は質量基準中位径 $10 \mu\text{m}$ の粉体であり、帯電用金属薄板はステンレス鋼および真鍮である。粒子は、帯電装置に入る前にエジェクター、ウレタンチューブを通過して、正符号に強く帯電していたが、ステンレス鋼との接触によって粒子の比電荷は減少し、真鍮との接触では符号が正から負に逆転していた。また、図中の実線は Eq. (1) の計算結果であり、計算に使用した帯電特性定数 L_0 および平衡比電荷 $\bar{q}_{m\infty}$ の各値は真鍮が $L_0 = 0.14 \text{ m}$, $\bar{q}_{m\infty} = -0.53 \text{ mC/kg}$ 、ステンレス鋼が $L_0 = 0.17 \text{ m}$, $\bar{q}_{m\infty} = -0.67 \text{ mC/kg}$ である。比電荷の測定位置は装置の入口と出口に限定されるので測定数は多くないが、各位置での測

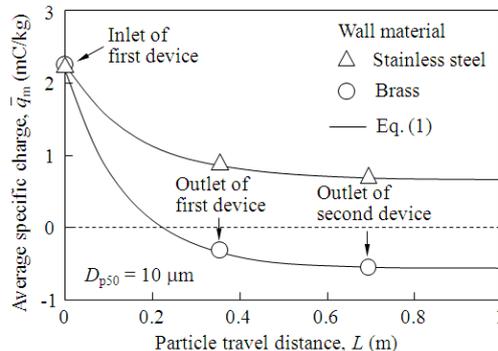


Fig. 5 Average specific charge of particles

定値は計算結果とよく一致しており、粒子の比電荷は粒子の移動距離に対して指数関数的に変化して平衡比電荷に漸近するものと考えられる。平衡比電荷 $\bar{q}_{m\infty}$ は粒子および金属表面の仕事関数に依存し、帯電特性定数は粒子と壁の有効接触面積および接触頻度に依存する。真鍮を用いたときの帯電特性定数 L_0 がステンレス鋼 (SUS304) のときよりも少し小さくなったのは、真鍮の方がステンレス鋼よりも硬度が低く、接触時の有効接触面積が大きかったためと考えられる。次に、本装置の帯電効率 γ_q を次式を用いて評価する。

$$\gamma_q = \frac{\bar{q}_m - \bar{q}_{m0}}{\bar{q}_{m\infty} - \bar{q}_{m0}} = 1 - \exp\left(-\frac{L}{L_0}\right) \quad (2)$$

本装置の帯電率は1基で約90%、2基連結すると98~99%であった。

(3) 初期電荷の影響

輸送管の一部を真鍮管に取り替えて、粒子の初期電荷を変えたのち、帯電装置内でステンレス鋼と接触させたときの粒子の比電荷を Fig. 6 に示す。同図は、装置の入口と出口における粒子の比電荷を粒子の移動距離に対して表したものであり、帯電装置を通過させることによって比電荷が平衡値に漸近することが分かる。同図の3本の実線は、Fig. 5 の計算と同じく $L_0 = 0.17$ m, $\bar{q}_{m\infty} = 0.67$ mC/kg を用いて計算したものである。いずれの実験結果も計算結果と一致しており、初期電荷が異なる場合においても、粒子の帯電量を統一的に評価できる。

(4) 2種類の金属壁による粒子の帯電モデルの検討

帯電装置の内面を分割して、2種類の金属AとBを交互に並べて接地したときの粒子の帯電モデルを考える。金属Aが装置の内面を占める比率を r_A 、金属Bのそれを r_B とおく ($r_A + r_B = 1$)。粒子は帯電装置内を螺旋状に回転するので、粒子は2種類の金属と交互に

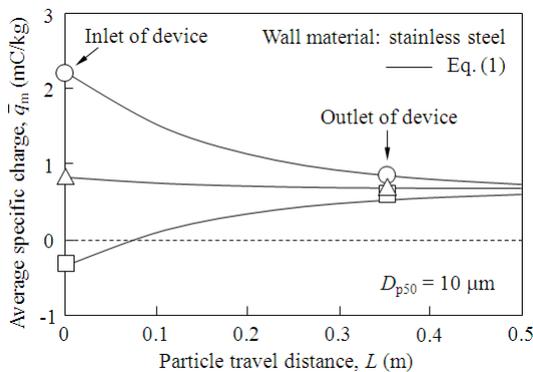


Fig. 6 Effect of initial charge on particle charging

接触する。Fig. 7 に、この状態を模式的に示す。粒子が金属 A, B と接触するときのそれぞれの有効接触長さを定数 $\Delta L_A, \Delta L_B$ で与えられるものとし、A と B から成る一組の有効接触長さを ΔL ($=\Delta L_A + \Delta L_B$) とおく。帯電装置内には n 組が直列に並ぶことになり、その途中の k 組目の終点における粒子の移動距離を L_k ($=k\Delta L$) とおく。組目の金属 A と B の終点における比電荷 $\bar{q}_{mAk}, \bar{q}_{mBk}$ は、Eq. (1) を適用すると次の漸化式で表せる。

$$\bar{q}_{mAk} = \bar{q}_{mBk-1} \exp\left(-\frac{\Delta L_A}{L_{A0}}\right) + \bar{q}_{mA\infty} \left\{1 - \exp\left(-\frac{\Delta L_A}{L_{A0}}\right)\right\} \quad (3)$$

および

$$\bar{q}_{mBk} = \bar{q}_{mAk} \exp\left(-\frac{\Delta L_B}{L_{B0}}\right) + \bar{q}_{mB\infty} \left\{1 - \exp\left(-\frac{\Delta L_B}{L_{B0}}\right)\right\} \quad (4)$$

ここで、 $\bar{q}_{mA\infty}, \bar{q}_{mB\infty}$ は、金属 A, B との接触による粒子の平衡比電荷であり、 L_{A0}, L_{B0} はそれぞれの帯電特性定数である。初期条件として粒子の比電荷を \bar{q}_{m0} とおき、Eqs. (3), (4) を連立して漸化式を解くと、比電荷 \bar{q}_{mBk} は、粒子の移動距離と各金属の表面積比の関数として表せる。

$$\bar{q}_{mBk} = \bar{q}_{m0} \exp\left(-\frac{L_k}{L_{AB0}}\right) + \bar{q}_{mB}^* \left\{1 - \exp\left(-\frac{L_k}{L_{AB0}}\right)\right\} \quad (5)$$

ただし、

$$\bar{q}_{mB}^* = \bar{q}_{mA\infty} \left\{1 - \frac{1 - \exp\left(-\frac{r_B \Delta L}{L_{B0}}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{\Delta L}{L_{AB0}}\right)}\right\} + \bar{q}_{mB\infty} \frac{1 - \exp\left(-\frac{r_B \Delta L}{L_{B0}}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{\Delta L}{L_{AB0}}\right)} \quad (6)$$

また、

$$L_{AB0} = \frac{L_{A0} L_{B0}}{r_B L_{A0} + r_A L_{B0}} \quad (7)$$

金属 A, B の個々の静電気特性が保たれた状態で、各組の金属板のサイズを小さくしていくと、金属 A と B は、それぞれ r_A ($=1-r_B$) と r_B の比率で完全混合の状態になり、 $L_k, \bar{q}_{mBk}, \bar{q}_{mB}^*$ を、それぞれ $L, \bar{q}_m, \bar{q}_m^*$ に置き換えて、 $\Delta L \rightarrow 0$ の条件を加えると、離散系に適応させた Eq. (5) を連続系として取り扱える。

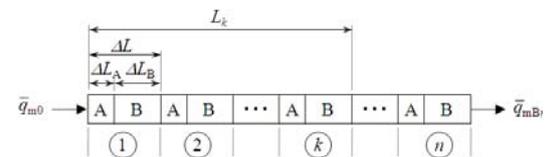


Fig. 7 A model of particle contact charging with metal A and B in the device

すなわち、

$$\bar{q}_m = \bar{q}_{m0} \exp\left(-\frac{L}{L_{AB0}}\right) + \bar{q}_{m\infty}^* \left\{1 - \exp\left(-\frac{L}{L_{AB0}}\right)\right\} \quad (8)$$

ただし、

$$\bar{q}_{m\infty}^* = \bar{q}_{mA\infty} \left(1 - \frac{r_B L_{AB0}}{L_{B0}}\right) + \bar{q}_{mB\infty} \frac{r_B L_{AB0}}{L_{B0}} \quad (9)$$

Eq. (8) で表される粒子の比電荷 \bar{m} は、粒子の移動距離 L の関数として与えられており、帯電の理論式 (Eq. (1)) と同型である。ただし、Eq. (8) の平衡比電荷と帯電特性定数は、2種類の金属の帯電特性定数 L_{A0} 、 L_{B0} および表面積比 r_A 、 r_B に依存する。

Fig. 8 に、Eq. (8) の計算結果を示す。金属 A が真鍮、金属 B がステンレス鋼であり、計算に必要なそれぞれの帯電特性定数および平衡比電荷は、Fig. 5 の実験結果に基づく値を使用した。同図のパラメータは、金属 B の表面積比 r_B であり、 $r_B=0$ (真鍮のみ) と $r_B=1$ (ステンレス鋼のみ) の計算結果は Fig. 5 の計算結果と同じであるが、 r_B の値を変化させたとき ($0 < r_B < 1$) の粒子の比電荷が計算できる。なお、粒子の移動距離を長くすると平衡比電荷に近づくため、粒子の帯電量を安定に保つには、粒子の移動距離を長くする方がよい。

Fig. 9 は、Eq. (8) の計算結果を金属 B の表面積比 r_B に対して示したものである。比電荷は、金属 B の表面積比とともに大きくなるが、線形になるとは限らない。これは、2つの金属の帯電特性定数に依存しており、Eq. (8) を r_B で微分すると容易に解析できる。すなわち、 $L_{A0} < L_{B0}$ のとき、 \bar{q}_m の増加率は r_B とともに大きくなり、 $L_{A0} = L_{B0}$ のとき増加率は一定 (すなわち、線形関係)、 $L_{A0} > L_{B0}$ では、 r_B を大きくすると \bar{q}_m の増加率は小さくなる。Fig. 9 では、粒子の移動距離 L をパラメータとして示しており、移動距離が増加すると平衡比電荷に漸近する様子が分かる。

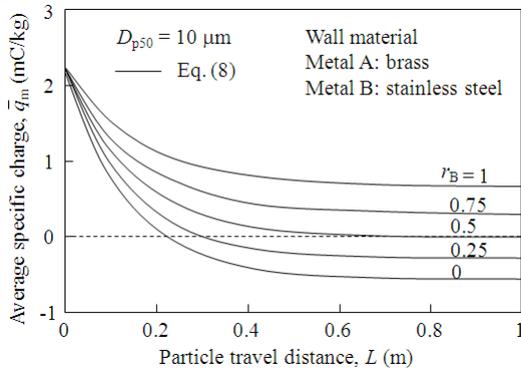


Fig. 8 Relationships between average specific charge and particle travel distance

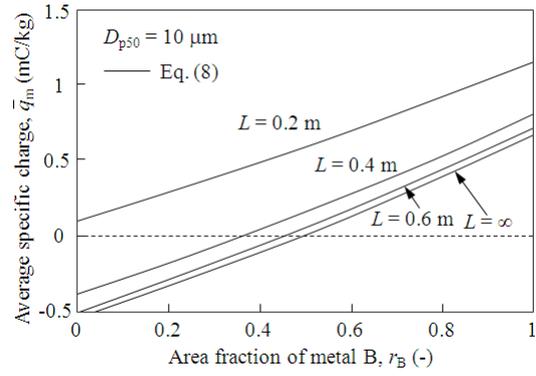


Fig. 9 Relationships between average specific charge and area fraction of metal B (metal A: brass, metal B: stainless steel)

(5) 2種類の金属壁による粒子の帯電実験

Fig. 10 に、装置内面に取り付ける真鍮とステンレス鋼の表面積比を変えた実験結果および Eq. (8) に Fig. 5 の実験結果に基づく値および $L = 0.35$ m を代入して得られた理論計算結果を示す。ステンレス鋼の表面積比 r_B を 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1 と変化させて実験を行っており、装置の側面に取り付ける金属板の枚数は、1枚 (丸印)、2枚 (三角印: 真鍮とステンレス鋼各1枚)、4枚 (四角印: 2種類の金属を交互に配列した状態) であり、粒子が装置から排出される直前に接触する金属の材質が真鍮のとき (白抜き印) とステンレス鋼のとき (黒印) とで区別して表した。

実験結果は理論計算結果とほぼ一致しており、2種類の金属を用いることによって、粒子の帯電量を制御できることが分かった。なお、白抜き印の実験結果は、理論計算結果より少し下側に、黒印は少し上側になる傾向が見られるが、これは理論計算結果が2種類の金属の完全混合状態として計算してあるのに対し、実験では片方の金属と一定区間連続して接触するという違いによるものである。

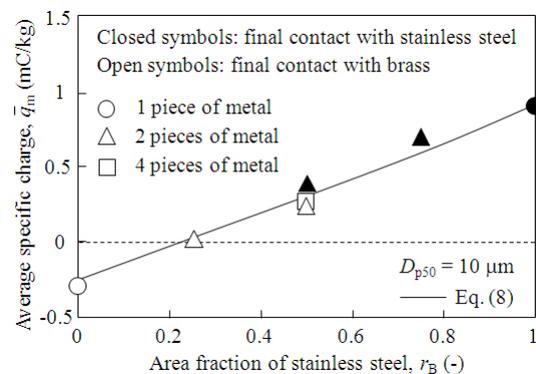


Fig. 10 Comparison between experimental and theoretical results

る。 $r_B=0.5$ において、側壁を4分割した実験結果が、2分割したのものよりも理論計算結果に近くなったのは、同様の考え方により説明できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1件)

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巻, 380-386 (2008) 査読有

[学会発表] (計 3件)

松坂修二ほか、「静電場における遠心接触式粒子帯電」、化学工学会 第74年会, 平成21年3月19日, 横浜

松坂修二ほか、「遠心接触式気中微粒子帯電制御装置の開発」、粉体工学会 第43回技術討論会, 平成20年6月11日, 東京

松坂修二ほか、「微粒子の帯電制御装置の開発」、粉体工学会春期研究発表会, 平成19年5月23日, 東京

[産業財産権]

○出願状況 (計 1件)

名称：粉粒体帯電装置

発明者：加藤基, 竹内達夫, 松坂修二, 安田正俊

権利者：キヤノン株式会社, 京都大学

種類：特許

番号：特願 2009-33988

出願年月日：平成21年2月17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・准教授

研究者番号：10219420

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし