遠心接触式気中微粒子帯電制御装置の開発

Development of Electrostatic Charge Controller for Particles in Gases Using Centrifugal Contact

松坂 修二, 安藤 康輔, 田中 良敬

Shuji Matsusaka, Kosuke Ando, Yoshitaka Tanaka

Received 7 December 2007 ; Accepted 8 February 2008

The control of electrostatic charge on particles in gas-solids flow has been studied both experimentally and theoretically. Micrometer-sized particles dispersed in air were charged with a charge control device, which consisted of an inverted truncated cone. Particles were introduced into the charger from the tangential direction on the top, flowing spirally downward and discharged from the bottom. The particles were electrostatically charged by contacting with the side wall because of the centrifugal force. The performance of particle charging was evaluated by analyzing the average specific charge of particles. It was found that the particle charging efficiency of a single device is about 90%, and 98–99% for a tandem system. The charge on particles was able to be controlled by contact with two different metal plates attached to the inner wall. Furthermore, to predict the charge on particles, an equation as the function of (i) the particle travel distance, (ii) the area fractions of the two metal plates, and (iii) the electrostatic properties was derived from the contact charging theory.

Keywords : Electrostatics, Particle charge controller, Contact charging, Gas-solids flow, Centrifugal force

1. 緒 言

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^{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ので^{4, 5)}、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ると、いろいろな分野で応用技術として活かせる。電気集塵⁶⁾、静電粉体塗装⁷⁾などは、既に広く用いられており、気相中の分散微粒子の運動制御^{8, 9)}、粒子流量計測¹⁰⁾、トモグラフィ¹¹⁾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る。

一般に、粒子の帯電は接触帯電とコロナ帯電に大別

されるが、機械的な操作を行うと、粒子は壁との接触によって帯電し、その平衡帯電量は両物質の静電特性に支配される^{12~14)}。粒子を2種類の壁と一定の比率で接触させると、それぞれの平衡値を上下限として、粒子の帯電量を任意の値に制御できる¹⁵⁾。例えば、低濃度固気二相流において、材質の異なる2種類の管を交互に連結した複合管を用いると、管内を移動する粒子の帯電量をある範囲に保てる。また、所望の帯電量の粒子を得る装置として、複合管を利用することも可能である。ただし、粒子の初期電荷が変動する場合には、その影響を取り除くため、ある程度、複合管を長くしなければならない。

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ことを目的としており、複合管を用いない新たな方法を提案する。すなわち、円筒状の装置の一端から粒子を接線方向に導入し、螺旋状に粒子を旋回させたのち、他端から円周方向に気流とともに排出させる。装置の構造は簡単で、2種類の接触帯電用金属薄板の着脱も容易であり、装置内を

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) TEL 075-383-2685
Department of Chemical Engineering, Katsura Campus,
Kyoto University
(Kyoto 615-8510, Japan)

移動する粒子は、遠心力によって壁に押しつけられるので、壁との接触効率は高められる。試作した装置の粒子帯電性能を評価するため、系統的に実験を行うとともに、粒子帯電制御法の理論的検討も行う。

2. 粒子の繰り返し接触帯電理論

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 n の関数として表せる^[12-14]。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 L 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^[15]。

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

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 は帯電効率に関係する特性定数であり、 L_0 が大きいたときには、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、空気相の湿度、流速等の各種条件に依存する。

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。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(MFOV-1, Sankyo Pio-tech Co., Ltd.)を使用し、微量定量供給の精度を高めるために、内径1mm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(VRL50-080808, Nihon Pisco Co., Ltd.)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

Fig. 1 Experimental apparatus

チューブ(内径5mm、長さ1m)を用いて帯電装置に送った。

帯電制御装置として、形状の異なる二つの装置を試作した。一つは円柱形(内径:70mm、高さ(内寸):110mm)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旋回させて、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70mmおよび110mmとし、粒子排出側の装置内径は40mmにした。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0.05mm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

Fig. 2 Particle charging devices

Table 1 Performance of particle charging device
(wall material: copper, powder: $D_{p50}=35\mu\text{m}$)

Shape of charging device	$\bar{q}_m(\text{mC/kg})$	$L(\text{m})$
Cylinder	- 0.037	0.22
Inverted truncated cone	- 0.10	0.35

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5mm）に粒子沈着層を形成させないようにするため、空気の流れは30m/sに設定した¹⁶⁾。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¹⁷⁾。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30mg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（無機酸化物粒子 Al_2O_3 、球形）を用いた。

4. 実験結果および考察

4. 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。

Table 1 に、装置出口で測定した粒子の比電荷 $\bar{q}_m$ を示す。円柱形装置から排出される粒子の比電荷は -0.037mC/kg であり、逆円錐台形では -0.10mC/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。

Fig. 3 Metal surface after experiment

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0.22m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0.35m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（40mm）を上、大径（70mm）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¹⁸⁾、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かる。

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

Table 2 Characteristic values of particle contact charging ($D_{p50} = 10 \mu\text{m}$)

Wall material	$L_0(\text{m})$	$\bar{q}_{m\infty}(\text{mC/kg})$
Brass	0.14	-0.53
Stainless steel	0.17	0.67

Fig. 5 Average specific charge of particles

4.2 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 Table 2 に示すとおりである。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

Table 3 Particle charging efficiency $\gamma_q(D_{p50} = 10 \mu\text{m})$

Wall material	Single device	Tandem device
Brass	92 %	99 %
Stainless steel	87 %	98 %

Fig. 6 Effect of initial charge on particle charging

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 L_0 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¹⁵⁾を用いて評価する。

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

得られた帯電効率を Table 3 にまとめて示す。本装置の帯電効率は 1 基で約 90 %、2 基連結すると 98~99 % に達していた。

4.3 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 Table 2 の値 ($L_0 = 0.17 \text{ m}$, $\bar{q}_{m\infty} = 0.67 \text{ mC/kg}$) 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。

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

4. 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巡回するので、粒子は2種類の金属と交互に接触する。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 ΔL_A 、 ΔL_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 $\Delta L (= \Delta L_A + \Delta L_B)$ 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。 k 組目の金属AとBの終点における比電荷 $\bar{q}_{mA_k}$ 、 $\bar{q}_{mB_k}$ は、§2の帯電理論のEq. (1)を適用すると次の漸化式で表せる。

$$\begin{aligned} \bar{q}_{mA_k} &= \bar{q}_{mB_{k-1}} \exp\left(-\frac{\Delta L_A}{L_{A0}}\right) \\ &+ \bar{q}_{mA_\infty} \left\{1 - \exp\left(-\frac{\Delta L_A}{L_{A0}}\right)\right\} \end{aligned} \quad (3)$$

および

$$\begin{aligned} \bar{q}_{mB_k} &= \bar{q}_{mA_k} \exp\left(-\frac{\Delta L_B}{L_{B0}}\right) \\ &+ \bar{q}_{mB_\infty} \left\{1 - \exp\left(-\frac{\Delta L_B}{L_{B0}}\right)\right\} \end{aligned} \quad (4)$$

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 $\bar{q}_{mB_k}$ 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。

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

ただし、

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

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 、 $\bar{q}_{mB_k}$ 、 $\bar{q}_{mB}^*$ を、それぞれ L 、 $\bar{q}_m$ 、 $\bar{q}_{m^\infty}$ 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。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、

$$\begin{aligned} \bar{q}_{m^\infty}^* &= \bar{q}_{mA_\infty} \left(1 - \frac{r_B L_{AB0}}{L_{B0}}\right) + \bar{q}_{mB_\infty} \frac{r_B L_{AB0}}{L_{B0}} \\ &= \frac{\bar{q}_{mA_\infty} r_A L_{B0} + \bar{q}_{mB_\infty} r_B L_{A0}}{r_B L_{A0} + r_A L_{B0}} \end{aligned} \quad (9)$$

Eq. (8)で表される粒子の比電荷 $\bar{q}_m$ 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Table 2の値を使用した。同図のパラメーターは、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. 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)

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。計算に必要な値は Fig. 8 と同様に Table 2 の値を使用した。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、二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。

4.5 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 Table 2 の値および $L = 0.35$ 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

Fig. 10 Comparison between experimental and theoretical results

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。 $r_B = 0.5$ 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. 結 言

低濃度固気二相流における粒子の帯電量を制御するために、遠心接触式粒子帯電制御装置を試作した。装置形状および基本的な運転条件を決めるための予備実験では、質量基準中位径 $35 \mu\text{m}$ の試料粉体を使用し、粒子帯電制御の検討では、質量基準中位径 $10 \mu\text{m}$ の試料粉体を用いて実験した。また、接触帯電用金属板として、主に真鍮とステンレス鋼の薄板を使用した。実験の検討および理論的検討によって得られた結論は以下のとおりである。

1) 円柱形、円錐台形、逆円錐台形の帯電装置を用いて実験を行った結果、逆円錐台形の装置を鉛直に設置し、上端から粒子を導入して下端から排出させる

方法が、粒子の運動安定性および粒子の帯電効率の両面において優れていた。

- 2) 逆円錐台形装置の内壁に、粒子帯電用金属板を取り付けて粒子の比電荷を測定した結果、装置の帯電効率は約 90 % であり、2 基直列に接続すると 98 ~ 99 % になった。
- 3) 粒子の初期電荷にかかわらず、粒子と金属板との帯電特性に応じた平衡値に漸近した。
- 4) 2 種類の金属板の表面積比を変えて粒子の帯電制

御特性を評価した結果、粒子と各金属板とによって決まる平衡比電荷を上下限として、その間の所望の値に制御できた。また、理論計算によって粒子の比電荷を推算することが可能になった。

[謝辞] 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C)19560753)ならびに科学技術振興機構、京都府地域結集型共同研究事業、「機能性微粒子材料創製のための基盤技術開発」の助成により行われた。ここに記して謝意を表す。

Nomenclature

k : number of units consisting of A and B	(-)	γ_q : particle charging efficiency	(-)
L : particle travel distance	(m)	Subscripts	
L_0 : characteristic length of contact charging	(m)	0 : initial value	
ΔL : length of divided wall	(m)	∞ : equilibrium value	
n : number of total units	(-)	A : wall material A	
q : charge on a particle	(C)	B : wall material B	
q_m : average specific charge (charge-to-mass ratio of particles)	(C/kg)	Superscript	
r : area fraction of a material	(-)	* : limiting value	

References

- 1) Joseph, S. and G. E. Klinzing : "Vertical Gas-solid Transition Flow with Electrostatics", *Powder Technol.*, **36**, 79-87 (1983)
- 2) 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", *Adv. Powder Technol.*, **11**, 221-233 (2000)
- 3) 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)
- 4) Ohsawa, A. : "Computer Simulation for Assessment of Electrostatic Hazards in Filling Operations with Powder", *Powder Technol.*, **135-136**, 216-222 (2003)
- 5) 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)
- 6) 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)
- 7) Bailey, A. G. : "The Science and Technology of Electrostatic Powder Spraying, Transport and Coating", *J. Electrostat.*, **45**, 85-120 (1998)
- 8) 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)
- 9) 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)
- 10) 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)
- 11) Machida, M. and B. Scarlett : "Process Tomography System by Electrostatic Charge Carried by Particles", *IEEE Sensors J.*, **5**, 251-259 (2005)
- 12) Cole, B. N., M. R. Baum and F. R. Mobbs : "An Investigation of Electrostatic Charging Effects in High-Speed Gas-Solids Pipe Flows", *Proc. Inst. Mech. Eng.*, **184**, 77-83 (1969-1970)
- 13) Masuda, H., T. Komatsu and K. Iinoya : "The Static Electrification of Particles in Gas-Solids Pipe Flow", *AIChE J.*, **22**, 558-564 (1976)
- 14) Matsusaka, S. and H. Masuda : "Electrostatics of Particles", *Adv. Powder Technol.*, **14**, 143-166 (2003)
- 15) Matsusaka, S., M. Oki and H. Masuda : "Control of Electrostatic Charge on Particles by Impact Charging", *Adv. Powder Technol.*, **18**, 229-244 (2007)
- 16) Matsusaka, S., W. Theerachaisupakij, H. Yoshida and H. Masuda : "Deposition Layers Formed by a Turbulent Aerosol Flow of Micron and Sub-micron Particles", *Powder Technol.*, **118**, 130-135 (2001)
- 17) Masuda, H., S. Matsusaka, S. Akiba and H. Shimomura : "Electrification of Fine Particles in Gas-Solids Pipe Flow", *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **34**, 91-96 (1997)
- 18) Adhiwidjaja, I., S. Matsusaka, H. Tanaka and H. Masuda : "Simultaneous Phenomenon of Particle Deposition and Reentrainment : Effects of Surface Roughness on Deposition Layer of Striped Pattern", *Aerosol Sci. Technol.*, **33**, 323-333 (2000)