

強電場における誘電性粒子層の帯電および粒子の浮揚[†]

庄山 瑞季・松坂 修二^{††}

京都大学大学院工学研究科 化学工学専攻, 〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂

キーワード：誘電性粒子層，強電場，帯電，凝集，浮揚

電場を利用すると機械的外力を用いることなく帯電粒子に自発的な運動を行わせることができるので，粒子操作において静電技術が注目されている．本研究では，下部に平板電極，上部に網状電極を用い，下部電極に誘電性粒子（粒子径 100 μm のガラスビーズ）を堆積させて+5 kV の定電圧を印加し，上部電極を接地して上向きの電場を与えた．粒子層には下部電極と同じ極性の電荷が誘導帯電によって付与され，上層の粒子はクーロン力によって浮揚した．粒子の挙動および浮揚過程を高速カメラで観察した結果，一次粒子だけでなく凝集粒子も浮揚することがわかった．誘電性粒子は静電場で分極し，静電相互作用によって鎖状凝集粒子を形成した．粒子の比電荷が小さく，十分なクーロン力が得られない場合，粒子は浮揚しないが，凝集粒子を構成する一次粒子のクーロン力の総和が粒子間付着力および重力を超えると凝集粒子は浮揚した．電場解析および浮揚した粒子の運動解析によって粒子帯電量を求めた結果，構成粒子数の増加とともに浮揚凝集粒子の比電荷は小さくなるが，粒子間付着力は増加することがわかった．

緒 言

粉体プロセスにおいて，粒子の沈着・付着は操作性あるいは生産性の低下を招くだけでなく(Matsusaka *et al.*, 2001)，堆積した粒子が再飛散すると粉塵爆発などの重大な事故にもつながるので(Bunchatheeravate *et al.*, 2013) 対策を講じる必要がある．壁に付着した粒子を除去するために機械的外力を用いることが多いが，静電気力を利用すると帯電粒子に自発的な運動を行わせることができるので，粒子の分離，除去，分級など，多くの単位操作において静電技術に注目が集まっている．

平行平板電極を用いると一様電場が形成され，浮遊する帯電粒子の運動は静電場に支配される．導電性粒子が電極に接すると接触部を通して自由電子が移動し，粒子の極性は誘導帯電によって電極と同極性になる(Cho, 1964)．帯電した粒子のクーロン力が十分に大きい場合，対向電極に向かって浮揚・移動する．対向電極に達した粒子は，その電極と同極性に帯電するので，粒子の帯電符号は反転し，元の電極に向かって移動する．すなわち，粒子は平行平板電極間で往復運動を繰り返す．電気伝導度の高い粒子は，電極との接触において瞬時に誘導帯電を完了するが，電気抵抗の増加とともに誘導帯電に時間を要するようになり(Ohkubo and Takahashi, 1996a; 1996b; Wu *et al.*, 2003; Nader *et al.*, 2009)，往復運動の周期も長くなる．電気抵抗が極めて高い場合，誘導帯電は生じず，接触帯電(Matsusaka *et al.*, 2010; Matsusaka, 2011)の領域に入るが，この条件では粒子は浮揚しない．なお，平行平板間で粒子が往復運動するとき，各粒子の運動は独立しているので，多数の粒子が存在すれば，正あるいは負に帯電した粒子が混在することになる．

水平に置かれた平行平板電極間から任意の極性の帯電粒子を取り出すには，電極に開口部を設ける必要がある(Tada *et al.*, 2004)．上部電極を網状電極に変更すると，下部電極で帯電した粒子は慣性によって網目を通過することが可能になり，その上部には同符号に帯電した粒子のみが存在する．同符号の電荷間には静電反発力が生じるので，単極荷電粒子を分散状態に維持できる．

ただし，帯電粒子の運動はクーロン力，粒子慣性，流体抵抗，重力に支配され，外部電界強度，粒子径，粒子形状，粒子密度，各種表面物性に依存するので，粒子の運動制御性を高めるには条件を統一する必要がある．

静電場の代わりに，異なる位相の交流を複数の櫛型電極に印加すると，粒子は電極から離れる方向に力を受けるので(Masuda *et al.*, 1972)，粒子の運動制御(Matsusaka *et al.*, 2008)，分級(Kawamoto, 2008)，除去(Mazumder *et al.*, 2007; Kawamoto and Uchiyama, 2011)に応用できる．電極の形状や構造を変更して粒子を浮揚させた例も報告されている(Blajan *et al.*, 2015; Adachi *et al.*, 2016)．静電気力を利用すると，機械的外力や流体抵抗を用いることなく粒子を移動させられるので，真空における粒子の除去や粉体試料の採取が可能となり，宇宙開発などの特殊な分野への適用にも期待が高まっている(Kawamoto and Uchiyama, 2011; Adachi *et al.*, 2016)．

外部電場を印加すると，帯電に加えて粒子表面に電荷の偏りも生じる．粒子が自由電子を保有する場合，外部電場によって粒子内に生じる電位差を打ち消すように電子が移動する．これは静電誘導と呼ばれている．粒子が誘電体の場合，電気双極子の整列によって誘電分極が生じる．この現象を利用すると，粒子の分散と凝集の制御が可能になる．絶縁性流体に誘電性粒子を分散させたコロイド溶液(ER 流体, Electrorheological Fluid)では，外部電場と同方向に粒子が鎖状にクラスターを形成するので，流体のレオロジー特性を可逆的に変えられる(Parthasarathy and Klingenberg, 1996)．また，鎖状構造のほかに，電極の表面には粒子層が形成されることも報告されている(Fujii *et al.*, 2002)．分散媒に気体を使用すると重力の影響が相対的に大きくなり，粒子の鉛直方向に作用する力の均衡が崩れて鎖状構造に乱れが生じることも報告されている(Tomizawa *et al.*, 1998)．

粉体プロセスにおいても静電技術の高度な活用方法に期待が寄せられており，気相中で詳細な基礎研究を行う必要がある．粉体操作では，電極上に多数の誘電性粒子が堆積している可能性が高く，クーロン力による粒子の浮揚・移動にも種々の影響が現れ

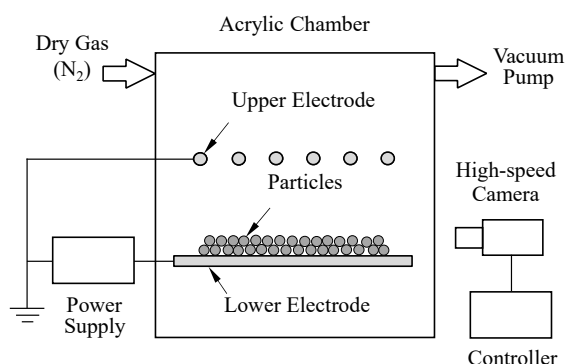


Fig. 1 Experimental setup

と考えられるが、堆積粒子層の帯電・浮揚に関する詳細な報告はほとんど見当たらない。

本研究では、下部に平板電極、上部に網状電極を用い、下部電極に堆積させた粒子を気相中に浮揚させる実験を行い、粒子の帯電と挙動を明らかにすることを目的とする。本報では、基礎研究の第一段階として、試料粒子にガラスビーズを用い、粒子の凝集および浮揚過程を高速度カメラで観察するとともに、電極間の電場解析ならびに浮揚粒子の運動解析によって帯電量を推定して、粒子の凝集・浮揚機構を明らかにする。

1. 実験装置および方法

Figure 1 に、実験装置の概略構成を示す。上部網状電極 ($60 \times 60 \text{ mm}^2$, SUS304, 線径: 0.6 mm , 目開き: 3.63 mm) は着脱式であり、下部平板電極 ($60 \times 60 \text{ mm}^2$, SUS304) と 10 mm 離して取り付ける構造である。上部電極は接地しており、下部電極に粒子を自由落下させて任意の厚さ (最大 2 mm) の粒子層を形成させたのち、直流電圧を増幅器 (Trek 製 10/10B-HS) で $+5 \text{ kV}$ にして、電極間に鉛直上向きの静電場を形成させた。粒子層の表面から静電気力によって浮揚する粒子の挙動を高倍率ズームレンズ (VS Technology 製 VSZ-10100) を備えた高速度カメラ (Photron 製 FASTCAM Mini UX100) を用いて撮影した (5000 fps)。なお、光源にはメタルハライドランプ (Sumita Optical Glass 製 LS-M250) を使用した。

試料粒子は、ソーダ石灰ガラスビーズ (JIS Z 8901 試験用粉体 GBL 100, 質量基準中位径: $D_{p50} = 100 \text{ }\mu\text{m}$, 粒子密度: $\rho_p = 2300 \text{ kg/m}^3$) であり、 120°C で 12 時間以上乾燥させたのち、デシケータ内で粒子を室温まで下げて実験に使用した。本実験の室内環境は温度 $22 \pm 2^\circ\text{C}$, 相対湿度 $50 \pm 2\%$ であった。空気中の水分による試料粒子表面への吸着の影響をできるだけ少なくするため、試験部をアクリル容器 (幅 400 mm , 奥行き 300 mm , 高さ 400 mm) に収納し、 1 kPa 以下の減圧と乾燥ガス (窒素ガス, 純度: 99.99% 以上) による置換を 2 回繰り返す、同乾燥ガス雰囲気下で実験を行った。

2. 電場解析

有限要素法による電場解析シミュレータ (TriComp Mesh Ver.8.0 / Estat Ver.8.0) を使用して、2次元直交座標系静電場を数値計算した。ここでは、電極間に形成される電場を把握するため、粒子が存在しない状態で計算を行うが、§ 4.4 では、粒子層の存在を仮定して詳細な解析を行う。網状電極の寸法および電極間距離は実験装置と同一であり、上部電極および下部電極の電位はそ

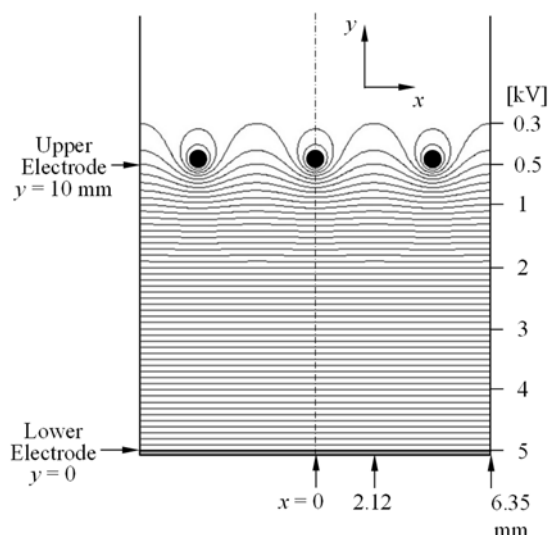


Fig. 2 Electric potential distribution obtained by numerical method

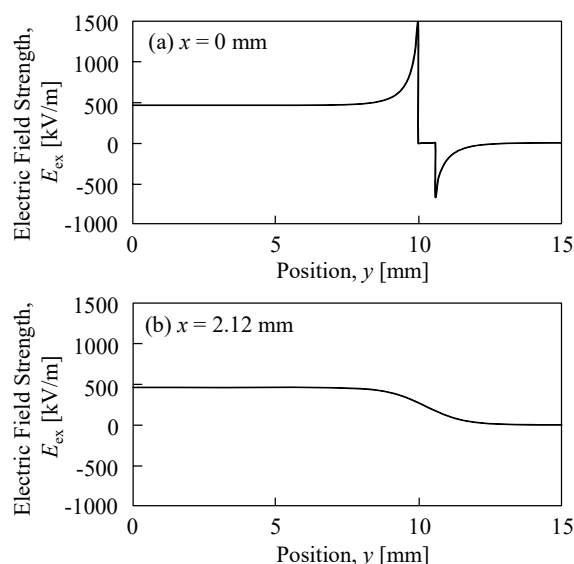


Fig. 3 Profiles of electric field strength

れぞれ $0, +5 \text{ kV}$ に設定した。上部電極の上方 100 mm の位置をゼロ電位 (上部境界条件) とし、左右に周期境界条件を適用した。上部電極表面の計算格子間隔は 0.05 mm に設定した。

Figure 2 に、電位分布の2次元数値計算結果を示す。上部電極の近傍では電位勾配は不均一であるが、下部電極の近傍を含めた電極間の大部分では電位勾配は一定であった。

Figure 3 は、鉛直方向の電界強度 E_{ex} の数値計算結果を示したものである。同図 (a) は $x = 0$ に沿った電界強度のプロファイルであり、上部網状電極は $y = 10\text{--}10.6 \text{ mm}$ に位置する。上部電極の近傍では大きな不平等電界が形成されており、同電極の下側は約 $+1500 \text{ kV/m}$, その上側は電極の網目を通じた電気力線が下向きにまわり込むので負に転じたが、上部電極から少し上下に離れると電場は一様であった。同図 (b) は、 $x = 2.12 \text{ mm}$ の位置における電界強度のプロファイルである。上部電極の網目近傍では電界強度は緩やかに変化した。上部電極から少し上下に離れると、Fig.3(a) と同様に電場は一様になった。

本報では、下部電極から浮揚する粒子の運動解析に着目しており、この領域の電界強度は水平方向の位置によらず一定 ($E_{ex} = 463 \text{ kV/m}$) であった。

3. 帯電粒子に作用する力の解析法

3.1 浮揚粒子の運動に基づく粒子帯電量の推定

静電気力 F_e によって浮揚した凝集粒子は、重力 F_g および流体抵抗 F_d を受けながら運動する。凝集粒子を構成する一次粒子の数（構成粒子数）を n 、一次粒子の質量を m_p 、凝集粒子の浮揚速度を v_p 、時間を t とおき、上向きを正にとると、凝集粒子の運動方程式は次式となる。

$$nm_p \frac{dv_p}{dt} = -F_d - F_g + F_e \quad (-F_d - F_g + F_e \geq 0) \quad (1)$$

ただし

$$m_p = \frac{\pi D_p^3 \rho_p}{6} \quad (2)$$

ここで、 D_p は粒子径、 ρ_p は粒子密度である。ガスの粘性係数を μ 、凝集粒子の抵抗形状係数を κ_d とおくと、粒子レイノルズ数 $Re_p < 2$ のストークス域において、流体抵抗 F_d は次式で与えられる。

$$F_d = 3\pi\mu v_p D_p \kappa_d \quad (3)$$

なお、粒子が運動方向に直鎖状に凝集している場合、抵抗形状係数 κ_d は構成粒子数 n に依存する (Lee and Leith, 1989)。

$$\kappa_d = \begin{cases} 1.00 (n=1) \\ 1.03 (n=2) \\ 1.07 (n=3) \\ 1.10 (n=4) \\ 1.13 (n=5) \end{cases} \quad (4)$$

重力加速度を g とおくと、凝集粒子に作用する重力 F_g は次式となる。

$$F_g = nm_p g \quad (5)$$

静電気力 F_e は、外部電場から受けるクーロン力 F_{ex} と電気影像力 F_i から成り、前者は上向き、後者は下向きに作用する。すなわち、

$$F_e = F_{ex} - F_i \quad (6)$$

ただし

$$F_{ex} = nq_p E_{ex} \quad (7)$$

ここで、 E_{ex} は電界強度、 q_p は一次粒子の電荷である。凝集粒子が導体の近傍に位置するとき、気体の比誘電率を ϵ_{rg} 、真空の誘電率を ϵ_0 、粒子内仮想点電荷の電極表面からの距離を y_{pi} とおき、重ね合わせの原理を適用すると電気影像力 F_i は次式で表せる。

$$F_i = \frac{nq_p^2}{16\pi\epsilon_{rg}\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_{pi}^2} \quad (8)$$

凝集粒子が誘電体（ここでは誘電性粒子層を想定）の近傍に位置するとき、誘電体の比誘電率を ϵ_{rs} とおき、重ね合わせの原理を適用すると F_i は次式で表せる (Weber, 1950)。

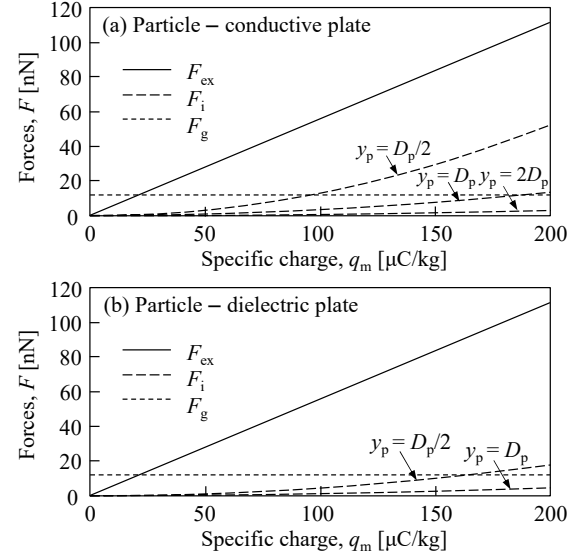


Fig. 4 Forces acting on particle ($D_p = 100 \mu\text{m}$, $\rho_p = 2300 \text{ kg/m}^3$, $E_{ex} = 463 \text{ kV/m}$)

$$F_i = \frac{nq_p^2}{16\pi\epsilon_{rg}\epsilon_0} \cdot \frac{(\epsilon_{rs} - \epsilon_{rg})}{(\epsilon_{rs} + \epsilon_{rg})} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_{pi}^2} \quad (9)$$

Figure 4 に、外部電場から受けるクーロン力 F_{ex} と電気影像力 F_i の理論計算結果を粒子の比電荷（単位質量あたりの電荷） q_m の関数として示す。ここでは、電気影像力の影響が最も現れやすい壁近傍の一次粒子を対象としており ($n = 1$)、 F_i は y_p をパラメータとして表した。参考のために、粒子に作用する重力 F_g も併記した。同図 (a) では、粒子が導体近傍に位置する場合を想定しており、Eq. (8) を用いて電気影像力 F_i を計算した。同図 (b) では、粒子が誘電体の近傍に位置する場合を想定しており、Eq. (9) を用いて F_i を計算した。誘電体の比誘電率には $\epsilon_{rs} = 3$ を用いた。この値は、ガラスビーズをゆるく充填した粒子層の比誘電率と同程度であり、本実験において粒子層から帯電粒子が浮揚することを考慮したものである。Fig. 4 の計算結果から、導体は誘電体と比べて F_i の値は大きい、 $y_p > 2D_p$ では F_i は F_{ex} に比べて十分小さいことがわかる。

本実験における帯電粒子の運動解析では、外部電場から受けるクーロン力 F_{ex} 、重力 F_g 、流体抵抗 F_d を考慮し、帯電量の関数として粒子の理論軌跡を求め、高速度カメラで撮影した粒子軌跡を $y_p > 2D_p$ の範囲においてフィッティングを行い、粒子の帯電量を推定する。

3.2 粒子間付着力の推定

帯電した凝集粒子が粒子層の表面からクーロン力 F_{ex} によって浮揚する限界条件は、下向きに作用する重力 F_g と付着力 F_a の合力に対する力の均衡で決まる。すなわち、

$$F_{ex} = F_g + F_a \quad (10)$$

付着力として、ファンデルワールス力、液架橋力、電気影像力、分極による静電気力などが考えられるが、各付着力に対する影響因子は非常に多く、付着力を理論的に推定することは難しい。付着力の実測も試みられているが (Matsuyama et al., 2008; Takeuchi, 2006; Matsusaka et al., 2015)、本報では、§3.1 に記した方法で粒子帯電量を推定し、Eqs. (5), (7) を用いて F_g , F_{ex} を求め、Eq. (10) に代入して付着力 F_a を推定する。

4. 実験結果および考察

4.1 粒子の凝集と浮揚

Figure 5 に、粒子層の表面近傍を正面から撮影した静止画を示す。下部電極に電圧を印加すると、同図 (a) に示すように、一次粒子または鎖状凝集粒子が連続して浮揚していた。静電場は鉛直上向きであり、粒子は正に帯電していることがわかる。粒子は下部電極への電圧の印加によって帯電したので、粒子層の表面と下部電極との間の粒子層を介して電荷が移動したことになる。一次粒子間の付着力には、各種条件の違いによって分布があり、付着力の小さい粒子から順に浮揚するものと考えられる。同図 (b) に示すように、構成粒子数が 20 を超える凝集粒子が形成されて浮揚することもあった。一次粒子の帯電量が比較的小さく、十分な分離力が得られない場合でも、帯電粒子が鎖状に凝集してクーロン力の総和が大きくなると、浮揚は可能と考えられるが、構成粒子数の増加とともに下部粒子に加わる重力も大きくなるので、浮揚が難しくなる場合もあった。

Figure 6 に、浮揚した粒子の構成粒子数を離散累積分布 $F(n)$ で示す。標本の大きさは 400 である。本実験条件では、一次粒子として浮揚することが多く、構成粒子数が増加するほど存在確率は減少したが、粒子の浮揚は力の均衡に依存するので、粒子径、粒子密度、粒子形状、表面粗さ、接触状態、粒子の帯電特性などの諸因子の影響も受けるものと思われる。

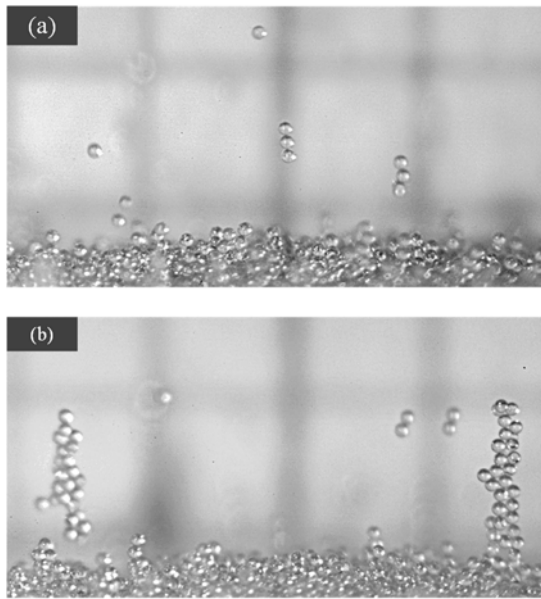


Fig. 5 Snapshots: (a) levitation of primary particles and chain agglomerates and (b) formation of large agglomerates

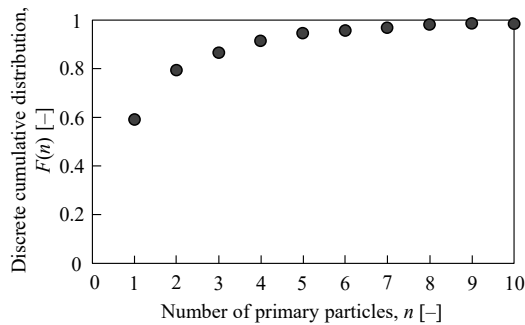


Fig. 6 Number of primary particles in levitating agglomerate

4.2 浮揚粒子の運動

Figure 7 に、粒子層の表面から浮揚する一次粒子の様子を 2 ms 間隔の連続画像として示す。外部電場によるクーロン力が粒子の浮揚の駆動源であり、粒子は鉛直上方に加速している。高速度カメラによって撮影した浮揚粒子の高さの経時変化は明瞭であり、粒子の浮力および帯電量は、重力と流体抵抗を考慮した運動解析によって推定できる。

Figure 8 は、粒子層の表面で直鎖状に凝集して浮揚する様子を 10 ms 間隔の連続画像として示したものである。下部電極に電圧を印加すると誘導帯電によって粒子の帯電量は増加し、粒子は鉛直上方に移動し始めるが、電極間の静電場によって粒子は分極するので、鉛直方向に隣接する粒子間には引力が作用し、下部の粒子は上方に引き上げられる。この繰り返しの結果として鎖状凝集粒子が形成される。凝集粒子を構成する粒子のクーロン力は上向きに作用するので、最下部に位置する粒子には上部のクーロン力の総和が加わる。同図では、9 個の一次粒子のクーロン力が 10 個目の粒子との付着力を超えたために力の均衡が崩れて浮揚した。なお、鎖状粒子の形成過程において、粒子層表面の粒子は垂直方向に移動するだけでなく、水平に隣接する粒子の上に移る場合もあった。

Figure 9 に、外部電場によって生じた粒子内の電気双極子および電気双極子間の相互作用力を模式的に示す。二つの電気双極子

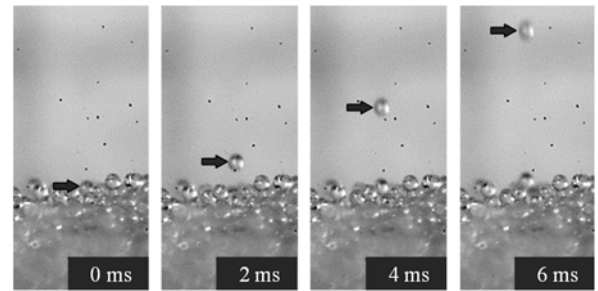


Fig. 7 Levitating particle

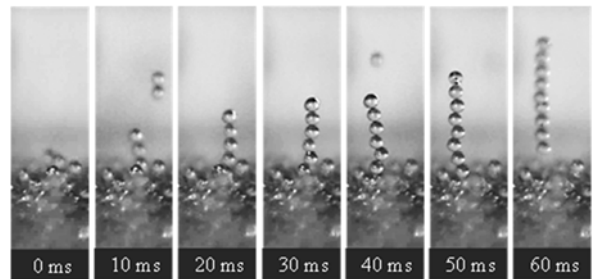


Fig. 8 Agglomeration and levitation

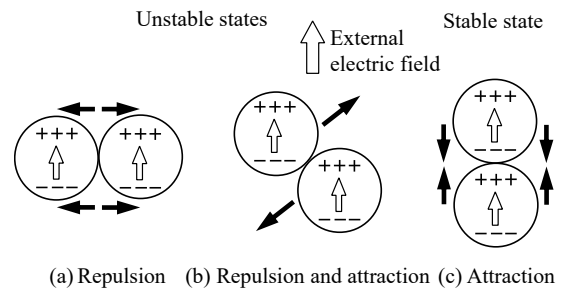


Fig. 9 Interaction between dipoles

を水平に配列すると粒子間には斥力が生じ、鉛直に配列すると引力が生じる。また、引力と斥力の和が傾斜して作用する中間的配列もある。斥力は粒子間相互作用を低減するので粒子の移動を容易にし、引力は安定な状態を持続させるので、鎖状凝集粒子は外部電場と同じ方向に形成される。

4.3 浮揚粒子の帯電量と粒子間付着力

Figure 10 に、粒子の浮揚高さの経時変化に関する計算結果（実線）および実験結果（**Figure 7** の観察実験で得た 0.2 ms 間隔の測定値）を示す。計算結果は帯電量をパラメータとしており、§ 3.1 の粒子の運動解析によって求めた。実験結果は、0.134 pC の計算結果と良好に一致しており、本手法によって帯電量を適切に推定できることがわかった。

Figure 11 に、浮揚する一次粒子の帯電量（比電荷の平均値および標準誤差、標本の大きさは 30）におよぼす粒子層の厚さの影響を示す。粒子層の厚さが 0 のとき、すなわち、一次粒子が下部電極に接触しているとき、浮揚粒子の比電荷は約 170 $\mu\text{C}/\text{kg}$ であったが、厚さ 0.5 mm 以上の粒子層から浮揚する場合には、粒子の比電荷は約 90 $\mu\text{C}/\text{kg}$ に減少した。粒子層の有無による比電荷の違いは粒子の付着力に関係しており、誘導帯電に基づく電気影像力の影響によるものと考えられる。導体との接触による電気影像力は、誘電体との接触によって生じるものより大きいので、粒子の浮揚に必要なクーロン力および対応する比電荷も大きくなければならない。なお、Fig. 4 の計算結果において $y_p = D_p/2$ の電気影像力がクーロン力より小さかったため、電気影像力は浮揚に影響しないと考えるのは正しくない。仮想点電荷が粒子の重心にある場合、電気影像力は $y_p = D_p/2$ の計算結果に等しいが、誘電性粒子の誘導帯電は瞬時に完了するのではなく、時間を要するので、仮想点電荷は帯電の進行過程において粒子の重心よりも下方にあり、電気影像力の方がクーロン力より大きいと考えられる。時間の経過とともに、仮想点電荷は粒子の重心に近づき、クーロン

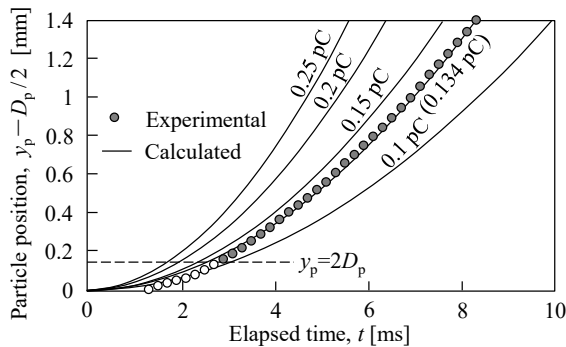


Fig. 10 Particle position as a function of elapsed time with a parameter of particle charge

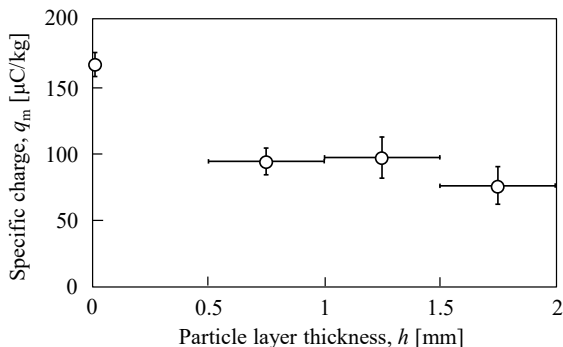


Fig. 11 Effect of particle layer thickness on the specific charge of levitating particle

力が付着力および重力の和を超えたとき、粒子は浮揚すると考えると合理的に説明できる。なお、電極から浮揚した粒子の比電荷は、誘導帯電による金属粒子の飽和帯電量（Cho, 1964）と同程度であり、粒子層から浮揚した粒子では約 1/2 であった。印加電圧を下げると粒子の浮揚が遅れる現象がみられたが、これも誘導帯電の時間依存性によるものと考えられる。

Figure 12 は、厚さ 1.5 ± 0.5 mm の粒子層の表面から浮揚した凝集粒子の比電荷と構成粒子数の関係を示したものであり、構成粒子数の増加とともに比電荷が減少するという結果が得られた。鎖状凝集粒子を形成すると構成粒子のクーロン力の総和が分離力として作用するので、各粒子の比電荷が小さくても、浮揚の要件を満たすことは可能である。

Figure 13 は、凝集粒子の総電荷から推算したクーロン力 F_{ex} と凝集粒子の重力 F_g を Eq. (10) に代入して求めた付着力 F_a を構成粒子数に対して示したものである。粒子間付着力は、構成粒子数の増加とともに大きくなるという結果が得られた。粒子の付着力は各種条件の違いによって異なるので、付着力の大きい粒子を浮揚させるには、クーロン力の総和を大きくする必要があり、構成粒子数を増やすほど浮揚に対して有利であることと符合する。また、同図より、粒子層から一次粒子が浮揚するとき、粒子間付着力が約 40 nN であることがわかるが、下部電極と接している一次粒子が浮揚する場合、粒子の比電荷は約 170 $\mu\text{C}/\text{kg}$ であり（Fig. 11 参照）、粒子-電極間の付着力を Eq. (10) で計算すると 80 nN を超えるので、電気影像力の違いが付着力にも現われている。

4.4 凝集粒子および粒子層内の電位分布

下部電極上の粒子層内およびその近傍の電位分布を評価するため、2 次元直交座標系で電場解析を行った。**Figure 14** に、正方配列で構成される厚さ 1 mm の粒子層に、3 個の一次粒子から成る鎖状凝集粒子が形成された場合を想定して計算した電位分布を示す。各粒子に電荷は与えておらず、粒子の比誘電率として 7

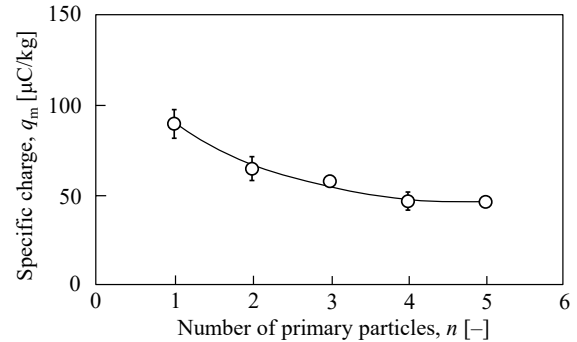


Fig. 12 Relationship between specific charge and the number of primary particles in levitating agglomerate

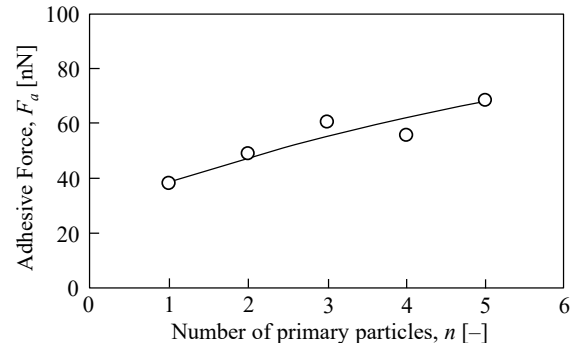


Fig. 13 Relationship between adhesion force and the number of primary particles in levitating agglomerate

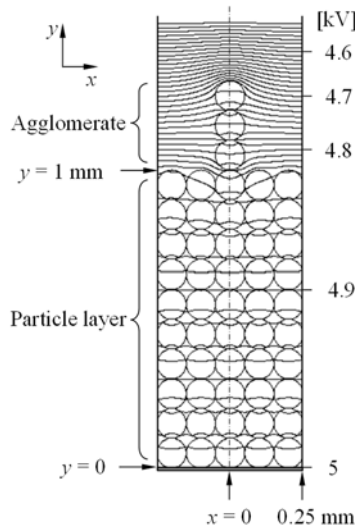


Fig. 14 Electric potential distribution obtained by numerical method

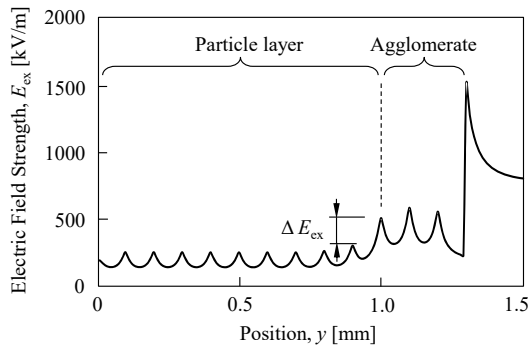


Fig. 15 Profile of vertical electric field strength ($x=0$)

を使用した。粒子層内の等電位線の間隔は比較的広いが、鎖状凝集粒子の等電位線の間隔は狭い。すなわち、粒子層内と比べて凝集粒子中の電界強度は大きいので分極しやすいと考えられる。

Figure 15 に、 $x=0$ の位置における鉛直方向の電界強度 E_{ex} のプロファイルを示す。粒子層内には、粒子の配列と同期した周期的電界強度がみられ、各粒子の表面で電界強度が相対的に高くなることがわかった。粒子層の上部に位置する凝集粒子においても周期的電界強度が得られたが、粒子層内に比べて電界強度の値は明らかに大きいので、粒子の分極および粒子間付着力も大きいと考えられる。この影響は粒子層の上部第1層に達しており、凝集粒子がクーロン力によって上方に移動すると、第1層の粒子も引き上げられ、構成粒子数が増えていくことが示唆される。第2層以下の粒子も力学的に安定な状態に推移すると考えられるが、分極に基づく付着力が小さいので、第1層の粒子に引き上げられる可能性は幾分低く、第2層の粒子が第1層の位置に達したとき付着力は大きくなると推測される。以上の検討結果をまとめると、凝集粒子の中段では破断されにくく、粒子層の第1層で破断が生じて浮揚に至る可能性が高い。実際には、粒子層の充填状態は不規則であり、粒子間付着力にも分布が存在するので、現象はより複雑であるが、基本的な粒子の凝集・浮揚機構は説明できたと考える。

結 言

下部平板電極に+5 kV の電圧を印加し、上部網状電極を接地して、下部電極に堆積させた粒子を気相中に浮揚させる実験および電場解析を行い、以下の結論が得られた。

- 1) 下部電極に電圧を印加すると、粒子層の表面と下部電極との間で、粒子層を介して電荷が移動し、粒子は下部電極と同極性に帯電する。帯電粒子は、一次粒子または凝集粒子として対向電極に向かって浮揚する。
- 2) 浮揚する粒子は一次粒子が多い。凝集粒子も浮揚するが、構成粒子数の増加とともに存在確率は減少する。
- 3) 粒子がクーロン力によって上向きに移動し始めると、その下部に隣接する粒子も分極に基づく引力によって引き上げられるので、鎖状凝集粒子が形成される。鎖状凝集粒子が水平方向に隣接する粒子の上へ移動して構成粒子数を増やしていくこともある。
- 4) 下部電極と接触している粒子が浮揚する場合と比較して、粒子層の表面から浮揚する粒子の方が比電荷は小さい。電気影像力は、導体との接触よりも誘電体との接触の方が小さいので、比電荷が小さくても粒子の浮揚に必要なクーロン力が得られる。
- 5) 凝集粒子の比電荷は、構成粒子数の増加とともに減少する。これは、鎖状凝集粒子を形成すると構成粒子のクーロン力の総和が分離力として作用するので、各粒子の比電荷が小さくても、浮揚の要件を満たすためである。
- 6) 粒子の付着力は一定ではなく、種々の要因によって分布が存在する。付着力が大きい場合、構成粒子数を増やすとクーロン力の総和は大きくなるので浮揚に有利である。
- 7) 粒子層の表面に形成される凝集粒子は、粒子層内より電界強度が高く、分極による粒子間付着力は大きくなるので、凝集粒子の中段では破断しにくく、粒子層の第1層で破断が生じて浮揚に至る可能性が高い。

[謝 辞] 本研究は、JSPS 科研費 17H03442 の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

Nomenclature

D_p	= Particle diameter	[m]
E_{ex}	= External electric field strength in y-axis direction	[V/m]
F_a	= Adhesion force	[N]
F_d	= Drag force	[N]
F_e	= Electrostatic force	[N]
F_{ex}	= Coulomb force in external electric field	[N]
F_g	= Gravitational force	[N]
F_i	= Image force	[N]
$F(n)$	= Discrete cumulative distribution	[-]
g	= Gravitational acceleration	[m/s ²]
h	= Thickness of particle layer	[m]
m_p	= Mass of primary particle	[kg]
n	= Number of primary particles in levitating agglomerate	[-]
q_m	= Specific charge (charge to mass ratio)	[C/kg]
q_p	= Charge of primary particle	[C]
t	= Time	[sec]
v_p	= Particle velocity	[m/s]
x	= Horizontal coordinate	[m]
y	= Vertical coordinate	[m]
y_p	= Particle position in y-axis direction	[m]
ϵ_0	= Vacuum permittivity	[F/m]
ϵ_{rg}	= Relative permittivity of gas	[-]
ϵ_{rs}	= Relative permittivity of solid	[-]
κ_d	= Resistance shape factor	[-]
μ	= Viscosity of gas	[Pa·s]
ρ_p	= Particle density	[kg/m ³]

Literature Cited

- Adachi, M., H. Maezono and H. Kawamoto; "Sampling of Regolith on Asteroids Using Electrostatic Force," *J. Aerosp. Eng.*, **29**, 04015081 (2016)
- Blajan, M., Y. Mizuno, A. Ito and K. Shimizu; "Microplasma Actuator for EHD Induced Flow," *IEEE T. Ind. Appl.*, **53**, 2409–2415 (2017)
- 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)
- Cho, A. Y. H.; "Contact Charging of Micron - sized Particles in Intense Electric Fields," *J. Appl. Phys.*, **35**, 2561–2564 (1964)
- Fujii, M., S. Oshima and R. Yamane; "Dynamic Simulation of ER Fluid Flow between Parallel Plates," *T. Jpn. Soc. Mech. Eng. B*, **68**, 2028–2035 (2002)
- Kawamoto, H.; "Some Techniques on Electrostatic Separation of Particle Size Utilizing Electrostatic Traveling-wave Field," *J. Electrostat.*, **66**, 220–228 (2008)
- Kawamoto, H., M. Uchiyama, B. L. Cooper and D. S. McKay; "Mitigation of Lunar Dust on Solar Panels and Optical Elements Utilizing Electrostatic Traveling-wave," *J. Electrostat.*, **69**, 370–379 (2011)
- Lee, C. and D. Leith; "Drag Force on Agglomerated Spheres in Creeping Flow," *J. Aerosol Sci.*, **20**, 503–513 (1989)
- Masuda, S., K. Fujibayashi, K. Ishida and H. Inaba; "Confinement and Transportation of Charged Aerosol Clouds via Electric Curtain," *Electr. Eng. Jpn.*, **92**, 43–52 (1972)
- Matsusaka, S.; "Control of Particle Tribocharging," *Kona Powder Part. J.*, **29**, 27–38 (2011)
- Matsusaka, S., H. Maruyama, T. Matsuyama and M. Ghadiri; "Triboelectric Charging of Powders: A review," *Chem. Eng. Sci.*, **65**, 5781–5807 (2010)
- 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)
- Matsusaka, S., D. Wei, M. Yasuda and S. Sasabe; "Adhesive Strength Distribution of Charged Particles on Metal Substrate in External Electric Field," *Adv. Powder. Technol.*, **26**, 149–155 (2015)
- Matsusaka, S. K. Yoshitani, H. Tago, T. Nii, H. Masuda and T. Iwamatsu; "Sampling of Charged Fine Particles by Motion Control under AC Field," *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **45**, 387–394 (2008)
- Matsuyama, T. M. Ohtsuka and H. Yamamoto; "Measurement of Force Curve due to Electrostatic Charge on a Single Particle using Atomic Force Microscope," *KONA Powder Part. J.*, **26**, 238–245 (2008)
- Mazumder, M. K., R. Sharma, A. S. Biris, J. Zhang, C. Calle and M. Zahn; "Self-cleaning Transparent Dust Shields for Protecting Solar Panels and Other Devices," *Particul. Sci. Technol.*, **25**, 5–20 (2007)
- Nader, B. F., G. S. P. Castle and K. Adamiak; "Effect of surface conduction on the dynamics of induction charging of particles," *J. Electrostat.*, **67**, 394–399 (2009)
- Ohkubo, Y. and Y. Takahashi; "Lifting Criteria of an Induction-Charged Spherical Particle in a Field with Horizontally Set Parallel Plate Electrodes," *Kagaku Kogaku Ronbun.*, **22**, 113–119 (1996a)
- Ohkubo, Y. and Y. Takahashi; "Experimental Investigation on Lifting Criteria of an Induction-Charged Spherical Particle in a Field with Horizontally Set Parallel Plate Electrodes," *Kagaku Kogaku Ronbun.*, **22**, 603–609 (1996b)
- Parthasarathy, M. and D. J. Klingenberg; "Electrorheology: Mechanisms and Models," *Mater. Sci. Eng.*, **R17**, 57–103 (1996)
- Tada, T., T. Yamamoto, Y. Baba and M. Takeuchi; "Ion Charging and Electron Charging to an Insulating Toner," *J. Soc. Powder Technol., Japan*, **41**, 636–644 (2004)
- Takeuchi, M.; "Adhesion Forces of Charged Particles," *Chem. Eng. Sci.*, **61**, 2279–2289 (2006)
- Tomizawa, M., T. Aoyama, K. Tanaka and K. Sakura; "Suppression of Tool Shank Vibration by Electrorheological Fluid Dampers," *T. Jpn. Soc. Mech. Eng. C*, **64**, 2287–2294 (1998)
- Weber, E.; *Electromagnetic Fields: Theory and Applications*, Volume I Mapping of Fields, pp. 215–233, John Wiley & Sons, New York (1950)
- Wu, Y. and G. S. P. Castle, I. I. Inculet, S. Petigny, G. S. Sweig; "Induction Charge on Freely Levitating Particles," *Powder technol.*, **135**, 59–64 (2003)

Electric Charging of Dielectric Particle Layers and Levitation of Particles in a Strong Electric Field

Mizuki SHOYAMA and Shuji MATSUSAKA

Department of Chemical Engineering, Kyoto University, Nishikyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto 615-8510, Japan

Keywords: Dielectric Particle Layer, Strong Electric Field, Electric Charging, Agglomeration, Levitation

Applying an external electric field enables electrostatically charged particles to move without any external mechanical forces. As a result, electrostatic-based techniques have attracted considerable attention in the field of particle handling. In this experiment, a plate electrode and a mesh electrode were used for lower and upper electrodes, respectively. Dielectric particles (glass beads with particle diameters of 100 μm) were piled on the lower electrode. A voltage of +5 kV was applied to the lower electrode, and the upper electrode was grounded, producing an electric field directed upwards. Owing to induction charging, the electric charge polarity of the particle layer is identical to that of the lower electrode, leading to particles in the upper layer being levitated by the Coulomb forces. The observation of both the particle behavior and the levitation process using a high-speed microscope camera showed that agglomerates as well as individual particles were levitated. The dielectric particles were polarized in the electric field, the electrostatic interaction between which leads to the formation of chain agglomerates. When the specific charge of the particles was small, the resulting Coulomb force was small, and the agglomerate did not levitate. However, when the magnitude of the total Coulomb force of the primary particles consisting the agglomerate exceeded the interparticle and gravitational forces, the agglomerate levitated. Estimating particle charge based on both electric field analysis and particle trajectory analysis showed that the specific charge of the agglomerate decreases and the interparticle force increases with an increase in the number of primary particles in the agglomerate.