

論 文

シリコーン油中での不平等電界における帶電粒子の挙動

崔 暢 洛*, 神 谷 優*, 八 塚 京 子*, 浅 野 和 俊*

(2001年1月16日受付; 2001年9月28日受理)

Motion of the Charged Particle in Viscous Dielectric Liquid

under Non-Uniform Electric Field

Changrag CHOI *, Masaru KAMIYA *, Kyoko YATSUZUKA * and Kazutoshi ASANO *

(Received January 16, 2001; Accepted September 28, 2001)

The particle motion in an insulating liquid has been carefully investigated in order to establish a system for removing solid impurities from a viscous fluid by electrostatic force. The tilted plane electrode system produces a non-uniform electric field. When a high DC voltage is applied, the charged particle shows up-and-down motion like as under a uniform electric field, but it also moves towards the narrower or wider space between the tilted electrodes. While the particle moves towards a narrower gap side at a relatively lower voltage, it goes towards a wider side at a higher voltage. The particle shows a steady up-and-down motion at a certain position for a particular voltage, and is trapped there. The trapped position is determined by the electric field strength, particle size and weight. With a steel sphere of 1 mm to 2 mm diameter, the electric field strength at the trapped position is about 1.8 MV/m. There is a small dependency of a particle size. The numerical simulation by a computer is performed taking into account of the coefficient of restitution at the collision of the particle and the electrode plate. The coefficient of restitution obtained in air is 0.52 ~ 0.64. The value, 0.6 for the coefficient of restitution is adopted in simulation. When the charge of the particle is 0.4 ~ 0.6 times the theoretical value for a spherical particle, the calculated values agree well with the experimental results.

1. まえがき

プラスチックなどの高分子材料は、種々の用途に合わせた製品を合成できることや加工の容易さから使用量が急増している。しかし、使用済みとなった高分子材料の処理には、焼却する際に有毒ガスが発生する、埋立地の確保が困難などの問題がある。さらに、高分子材料は石油を主原料とするため、その再利用は石油資源保護の上でも大きな貢献をする。

再利用するために廃棄高分子材料を融解・液化させた時、不純物が混在していると、均一な品質を維持することが難しい。また品質が悪ければ再製品の信頼性を損なう。そこで、静電気力を利用する装置が構造が簡単で保守が容易であり、微細粒子に対して大きな力を発揮することに着

目し、静電気力を用いた不純物除去法を模索している。

今まで液化高分子材料と不純物をシリコーン油と球状導電性粒子で模擬して、平等電界下での粒子の基礎的な挙動についてすでに報告してきた¹⁻³⁾。粒子の運動は、粒子が電極に接している時に電界により誘導帶電し、その電荷に静電気力が働くことによる。平行平板電極系の粒子運動は電極間の往復運動となるが、1往復を上昇運動、上部電極での停止、下降運動、下部電極での停止の4つに分けられることが分かった。特に、上部電極で粒子が停止することから、粒子の運動に伴って発生する液流の慣性効果があると考えられた。また、上昇・下降運動を詳しく調べた結果、粒子は電極を離れると加速され、電極直前では電極と粒子に挟まれた粘性流体による減速も確認された。これら詳細な粒子運動の観測結果と粒子の運動方程式を解いた理論的予測値を比較した結果、粒子が持つ電荷量が電界による誘導帶電の理論値の半分程度であることが分かった。これは、粒子と電極間の電荷交換が導体の接触によるものではなく、間に挟まれたシリコーン油の薄膜を通しての放電によること、また、電界が運動開始電圧（静的臨界電圧）を

キーワード：リサイクリング、不平等電界、水平移動、トラップ、反発係数

* 山形大学工学部電気電子工学科 (992-8510 米沢市城南4-3-16)

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Yamagata University, 4-3-16 Jonan, Yonezawa 992-8510, Japan

越えると、電荷交換の緩和過程で粒子に働く静電気力が十分大きくなつた時点で、誘導帶電の理論値に達する前でも運動を開始するためと考えられた。

ここでは、導電性不純物の除去に適した方法の検討を目的とし、運動する粒子を特定の場所に導くことを考え、傾斜平板電極系による不平等電界下での粒子の運動特性を詳しく調べた。また、平等電界で得られた結果、特に粒子の実際の電荷量を考慮して、運動の理論的考察を行つた。

2. 実験装置および方法

図1に実験に用いた傾斜電極系の概略図を示す。傾斜電極系は端部の曲率半径を10 mmとした2枚の真鍮電極からなっている(図1(a))。電極板は粒子が電極端部に移動した時に平板と端部の境目の影響がないよう、NC旋盤加工により一体型に製作した。図1(b)に示すようなアクリル製支持台を用いて電極間の傾斜を作り出した。電極間隔が一

番狭いところを10 mmとし、上部電極の傾斜角度 θ は5°, 10°, 15°とした。本報では、様々な運動パターンが解析しやすかった傾斜角度10°の場合について報告する。支持台表面の沿面放電を防ぐため、電極間には幅1 mm, 深さ1 mmの2本の溝を入れた。

図2に実験装置全体の概略図を示す。電極系を透明プラスチック容器に入れ、シリコーン油で満たす。シリコーン油は、動粘度($1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (100cSt), $3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (300cSt), $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (500cSt))のシリコーン油(東レ・ダウコーニング・シリコーン(株): SH200)の3種類を用いた。それぞれ比重は、0.960, 0.970, 0.971である。上部電極に正極性の可変直流高圧電源(東和計測, KT-030K1PS, 0 ~ +30 kV, 1 mA)を接続し、下部電極は電流測定用の抵抗を介して接地する。印加電圧は1/1000に分圧し、デジタルマルチメータ(アドバンテスト, R6441B)で測定した。

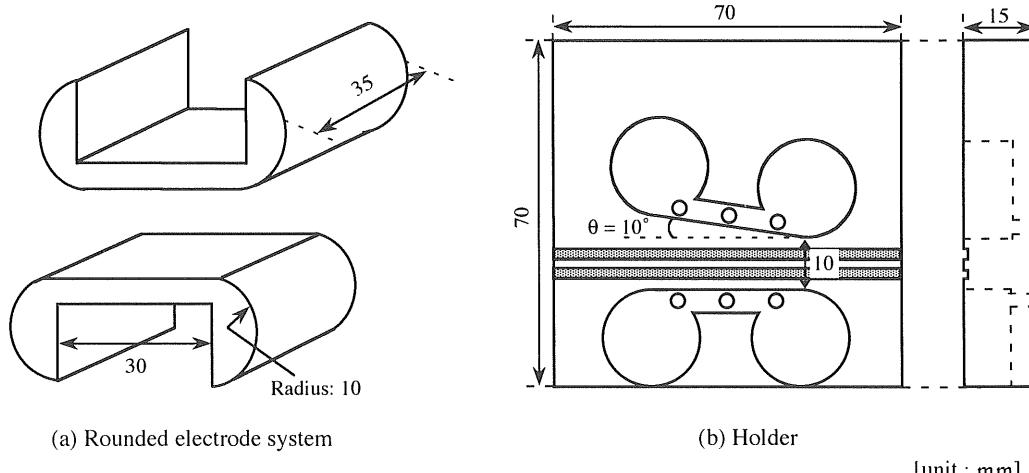


図1 電極系と支持台

Fig. 1 Assembly of rounded electrodes and holder.

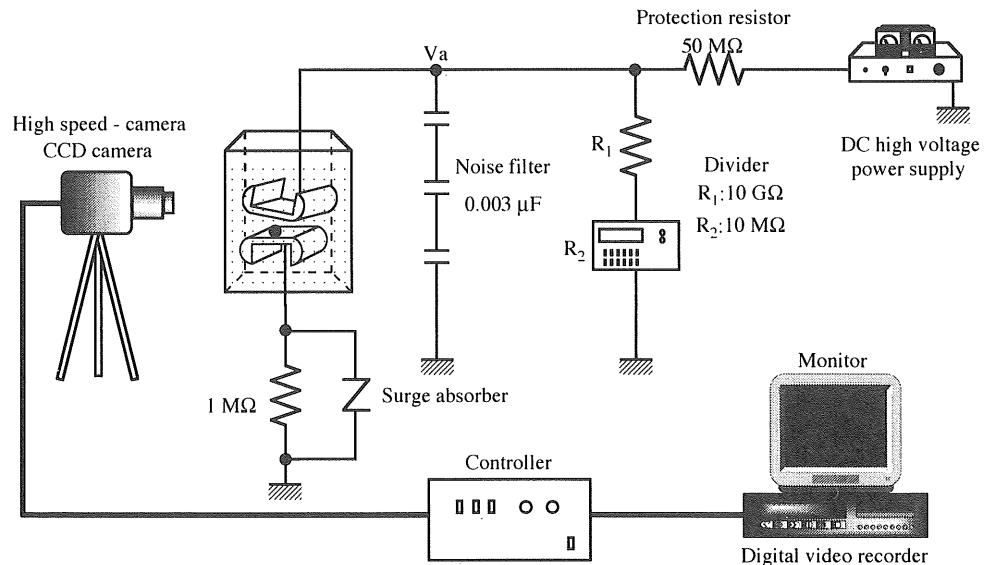


図2 実験装置図

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus.

粒子の運動は高速度ビデオカメラ(フォトロン, RGB Rabbit, 30 ~ 750 frames/s), または, 普通の CCD ビデオカメラを用いて観察し, ビデオに録画した。運動の解析は録画した画面を大型平面テレビに映し, コマ送りしながら粒子の位置の測定を行った。球状導電性粒子には, グラッシャー・カーボンとペアリング用のスチール粒子を用いた。その仕様を表1に示す。

表1 粒子の特性

Table 1 Characteristics of particle.

Particle	Shape	Diameter [mm]	Specific gravity [-]
Glassy carbon	Sphere	2.0	1.5
Steel	Sphere	1.0, 1.5, 2.0	7.86

3. 実験結果

すでに報告してきた通り, 下部電極に置かれた導電性粒子は誘導帶電によって帶電し, 静電気力が重力に打ち勝つと, 静電気力により電極間を往復運動する。この時の印加電圧を静的臨界電圧と呼ぶ。平等電界中では粒子が同じ場所を上昇運動, 上部停止, 下降運動, 下部停止の4つの運動を繰り返すが, 不平等電界中では上部停止と下部停止の時間は短かった。粒子の速度が遅い時には電極上での停止が観測できたが, 粒子速度が速くなると見られなくなったことから, 不平等電界中の実験で印加電圧が比較的高かったためと考えられる。実際, もっと重要なことは, 電極上を水平方向に移動することである。図3, 図4に不平等電界下での粒子の運動の様子を示す。粒子を

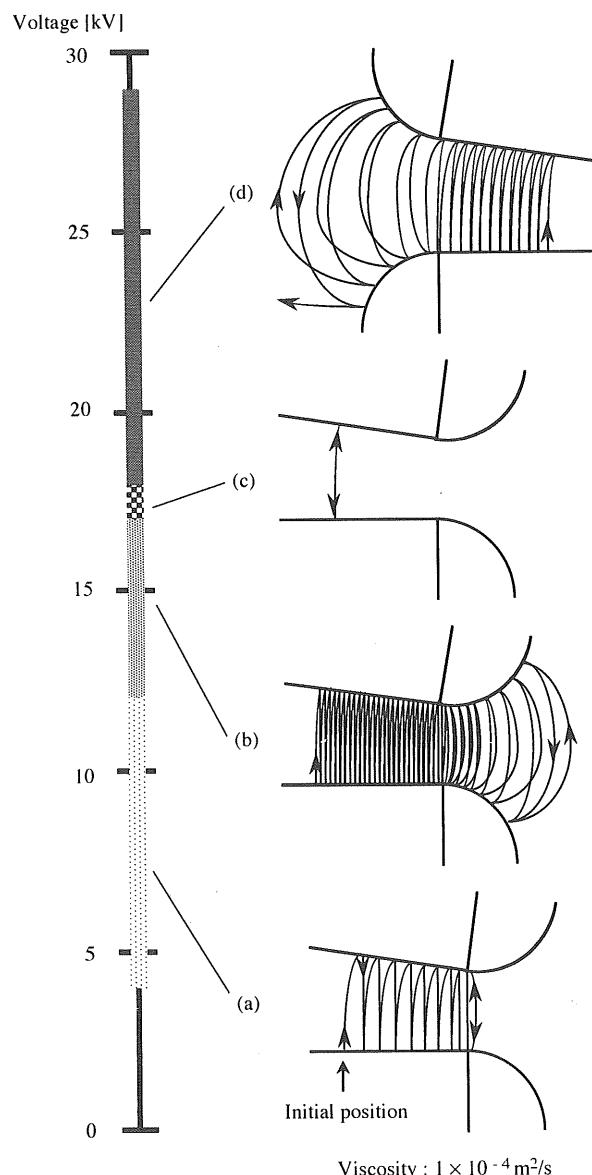


図3 グラッシャー・カーボン粒子の運動
Fig. 3 Motion of glassy carbon particle.

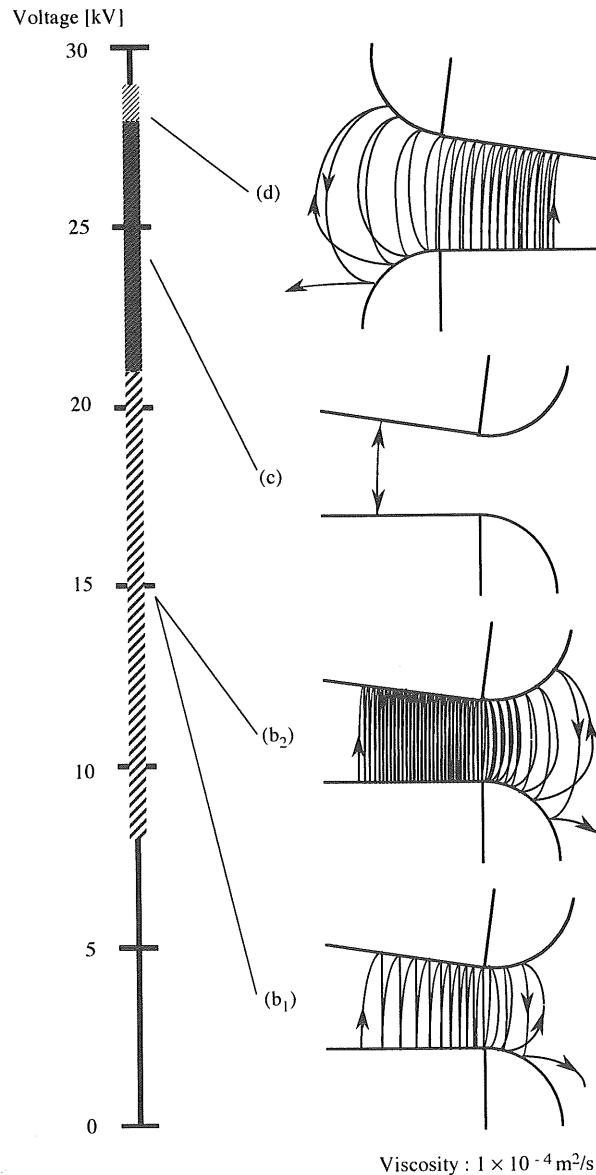


図4 スチール粒子の運動 (直径: 1 mm)
Fig. 4 Motion of steel particle (Diameter: 1mm).

最初下部電極の中央部に置くと、グラッシーカーボン粒子では印加電圧の増加とともに以下のような4つの運動パターンを示した。図にはそれぞれの運動パターンの模式図と、そのパターンが観測される印加電圧の範囲と一緒に示してある。

- (i) 電極間隔の狭い方に移動して、電極間隔が一番狭いところでトラップされる(図3(a))。
- (ii) 電極間隔の狭い方に移動し、最端部を通り越して曲率のある電極端部で往復運動をしつづける(図3(b))。
- (iii) 初期位置から多少移動して中央部にトラップされ、その場所で往復運動を繰り返す(図3(c))。
- (iv) 電極間隔の広い方に移動し、電極端部に出て落ちる(図3(d))。

図4の直径1mmのスチール粒子では20kV付近までは電極間隔の狭い方向へ移動するが、グラッシーカーボン粒子とは異なり、電極の一番狭いところへのトラップや電極端部での継続的な往復運動は観察されず、2~3回端部で往復運動した後、電極外に落ちる(図4(b₁)、図4(b₂)。図(b₁)と(b₂)は本質的には同じパターンであるが、電極間での往復回数が大きく異なることを表している。スチール粒子が曲率端部で安定な往復運動しない理由は比重が大きいため、下部電極への接触位置のわずかなずれが運動方向を変えるためと考えられる。

印加電圧をさらに上げていくと、スチール粒子でもグラッシーカーボン粒子と同様、ある位置でトラップされたたり(図4(c))、電極間隔の広い方へ移動することが観測され

た(図4(d))。直径2mmのスチール粒子でも、平坦部では直径1mmのスチール粒子と同様な運動をするが、重力が静電気力による力よりさらに大きいため電極端部での往復運動は観察できず、電極端部に出た瞬間電極外へ落ちる。シリコーン油の動粘度が高くなると、粒子に働く粘性抵抗力が大きくなるため粒子の運動速度は遅くなる。

図5にスチール粒子の印加電圧によるトラップ位置を示す。図のように、下部電極上の変曲点に原点を取り、原点から電極間隔が広がる方向にトラップ位置をとった。スチール粒子のトラップ位置は印加電圧の増加とともに大きくなる。すなわち、原点から電極間隔が広いところへ遠ざかっていく。直径1mmのスチール粒子がトラップされる電圧範囲は、直径の大きい他の粒子に比べて広いことが分かった。

4. 実験結果の考察

傾斜電極内の下部電極上に置かれた粒子は往復運動を行いながら電極間を水平方向にも移動する。グラッシーカーボン粒子とスチール粒子は若干運動の様子が異なるが、印加電圧が低く粒子の運動速度が遅い時は電極間隔の狭いところへ、すなわち電界が強い方向へ、また、印加電圧が高く粒子の運動が速くなると電極間隔の広い方へ移動していく。粒子が電界が強いところへ移動する現象には誘電泳動力がよく知られているが⁴⁾、本実験では逆に電界の弱い方向に移動していく運動(図3、図4のPattern(d)参照)も観察されており、誘電泳動力では説明できない。

このように粒子が電極間を水平方向に移動するのは、粒子に働く静電気力や重力の他に粒子が上部電極

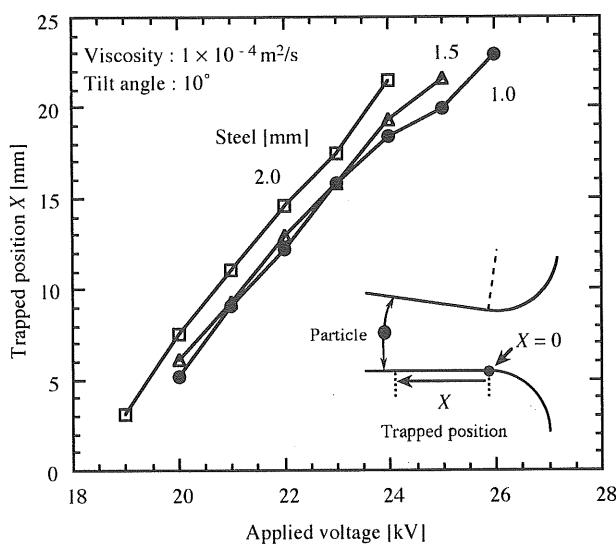


図5 トラップ位置
Fig. 5 Trapped position.

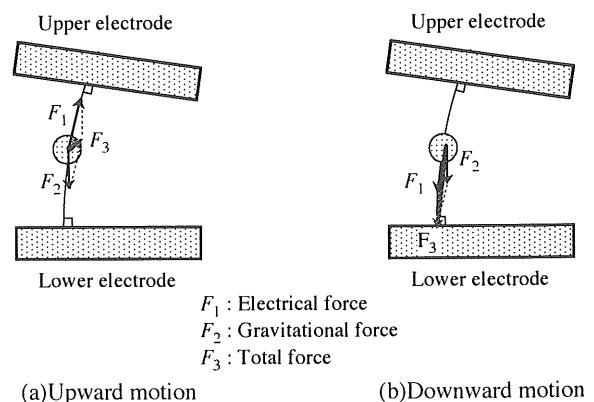


図6 合力の向き
Fig. 6 Direction of resultant force.

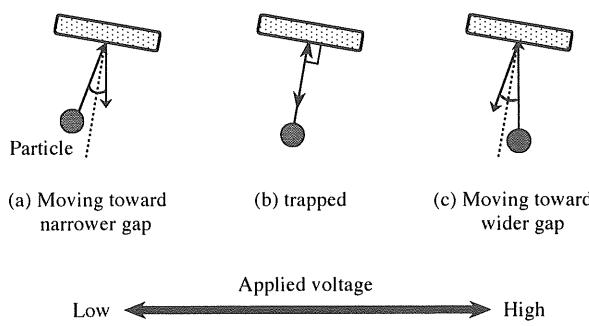


図7 粒子の反発運動方向

Fig. 7 Direction of restitution motion.

に衝突した時の反発作用の結果と考えられる。粒子の運動速度が遅い場合、粒子に働く流体抵抗や慣性力は小さく、上昇・下降運動とともに、粒子は電荷に働く静電気力と重力の合力の方向へ運動する。上昇時の合力の向きは図6(a)のようになり、下降時は図6(b)のようになる。電極での衝突反発現象は上部・下部両電極で起こる。本実験の電極系形状から、粒子の速度が小さいときには、下降時の合力が図6(b)のようであるため、粒子は下部電極に対してほぼ 90° で衝突するのに對し、上部電極での衝突角度は図7の(a)のようになり、粒子はずっと電極間隔が狭い方向に動く。粒子に働く静電気力が大きくなると速度も大きくなるため、慣性力や粘性力を無視することはできなくなる。粒子の速度が速くなつて慣性力が増すと、図6(b)から分かるように、まず下部電極で電極の広い方へ反発するような侵入角度となり、反発された粒子は上部電極で図7(c)の様な角度で衝突する。それ以後は、上・下電極どちらでも、粒子は電極間隔が広い方向に反発されるようになる。図6の粒子に働く合力が電極面で垂直になる位置がトラップ位置となる。これより、衝突時の速度が大きくなると電極での反発作用が重要な意味を持つことがわかる。以上、定量的なことは数値計算で求める。

5. 理論的検討

前節で考察したように、傾斜電極の平坦部での運動を大別すると電極間隔の狭い方向への水平移動、ある位置でトラップされた上下運動、電極間隔の広い方向への水平移動に分けることができる。特に、重要なのはトラップ状態での運動である。この運動を表す基本的な運動方程式はニュートンの運動方程式であるが、図8の座標系で表すと次のようになる。

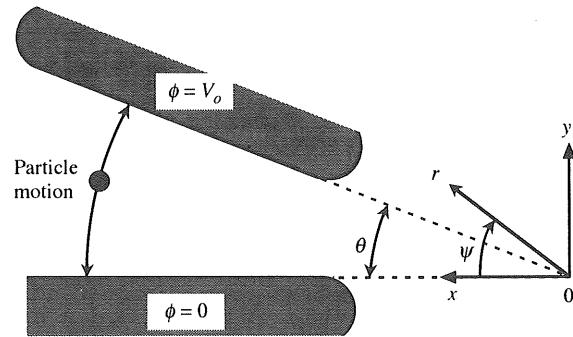


図8 傾斜電極に対する座標系

Fig. 8 Coordinate system for tilted electrode.

$$M \frac{d^2y}{dt^2} + 6\pi a \eta \frac{dy}{dt} = q E_y - (M - m) g \quad (1)$$

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + 6\pi a \eta \frac{dx}{dt} = q E_x \quad (2)$$

但し、 a :粒子半径 [m], M :粒子の質量 [kg], m :粒子の体積に対応する絶縁油の重さ [kg], x , y :仮想原点からの距離 [m], η :液体の粘性係数 [Pa · s], g :重力加速度 [m/s²]

図8で電極が原点近くまであるとした場合、電界強度は円筒座標系のラプラスの式を用いて求められる。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \psi^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

実際の上下電極が原点で接触することはないが、近似的に原点近くまで伸びていると仮定すると、 z 方向、 r 方向の電位の変化はないから、解は次のように求められる⁵⁾。

$$\phi = C_1 \psi + C_2 \quad C_1, C_2: \text{積分定数} \quad (4)$$

境界条件を $\psi = 0$ の時 $\phi = 0$, $\psi = \theta$ の時 $\phi = V_o$ とすれば

$$\phi = \frac{V_o \psi}{\theta} \quad (5)$$

となる。これより電界強度は次のように求まる。

$$E_\psi = -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \psi} = -\frac{V_o}{r \theta} \quad (6)$$

円筒座標を直角座標に変換すると式(1), (2)の電界強度が求まる。

$$\begin{aligned} E &= E_x \mathbf{i}_x + E_y \mathbf{i}_y \\ &= \frac{-y V_o}{\theta (x^2 + y^2)} \mathbf{i}_x - \frac{x V_o}{\theta (x^2 + y^2)} \mathbf{i}_y \end{aligned} \quad (7)$$

均一電界中の平板上に置かれた導体粒子の帶電量は理論的に求められている⁶⁾.

$$q = 1.65 \times 4 \pi \varepsilon a^2 |E| \quad (8)$$

但し、 ε ：媒質の誘電率 [F/m]

図8内の電界は均一ではないので、厳密には式(8)を用いられないが、近似的に式(8)が成り立つとする。

下部電極上粒子の誘導電荷量

$$q_1 = -1.65 \times 4 \pi \varepsilon a^2 |E_y| \quad [C] \quad (9)$$

上部電極下面で停止している粒子の誘導電荷量

$$q_2 = 1.65 \times 4 \pi \varepsilon a^2 \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad [C] \quad (10)$$

この誘導電荷を持った粒子に電界が作用すると静電気力となる。これは式(1), (2)で表されるように電荷と電界の積である。この静電気力は厳密には広い空間では正しいが、電極上では $0.832 q E$ となることが知られている⁷⁾。しかし、この影響範囲は非常に小さいと考えられるので全体を $q E$ として計算する。

式(5)で分かるように平坦部での等電位面は角度に比例している。しかし、実際の電極は端部に曲率を持つため、電位分布が異なってくる。その確認のために実際の電極系モデルでの電位分布を電荷重畠法を用いて数値計算により求めた。その結果を図9に示すが、粒子トラップの起きる平坦部では角度に比例しており、式(5)が使えることが確認された。

図5に示したように、トラップ位置は電圧の増加とともに直線的に増加している。そこで、トラップ位置での電圧を式(6)を用いて電界強度に変換した。図10はその計算結果である。式(7)は電極を延長してその交点を原点とした x について解かれており、実験では前述のように平坦部と円筒

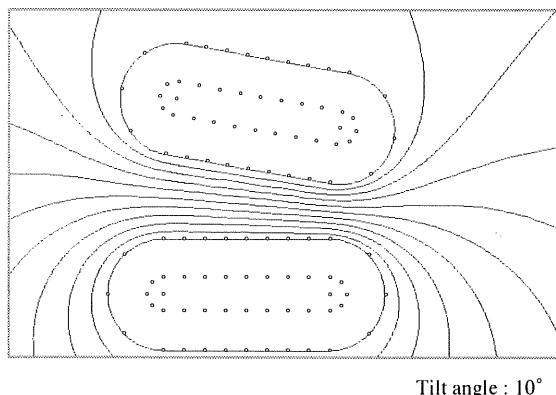


図 9 等電位面

Fig. 9 Equipotential surface.

部の境目を原点としてデータを得たので、図5中の $X = 0$ は $x = 56.71$ mm である。すなわち、

$$x = 56.71 + X \quad [\text{mm}] \quad (11)$$

と書ける。図10から、粒子がトラップされる位置は電圧によって変化するが、トラップ位置での電界強度はほぼ一定であることが分かる。その平均値を表2に示す。今のところ、この数値の持つ物理的意味は不明であるが、粒子径が異なってもそれがトラップされる位置の電界強度は一定という興味深い実験結果が得られた。

実験で得られた粒子運動を、運動方程式を用いてシミュレーションを行った。言語としては Turbo C を用いてパソコンで計算を行った。電界強度は図9に示したような電荷重畠法による電界分布を用いた。

傾斜電極内の粒子の運動では粒子が電極に衝突する時の反発係数が粒子の運動を決定する重要なパラメータになる。しかし、シリコーン油のような粘性液体内での反発係数の測定は困難であるので、空気中でスチール粒子の反発係数を求めた。その結果、反発係数は 0.52 ~ 0.64 であったので、反発係数は 0.6 とし、入射角と反射角が等しいと仮定して数値計算を行った。

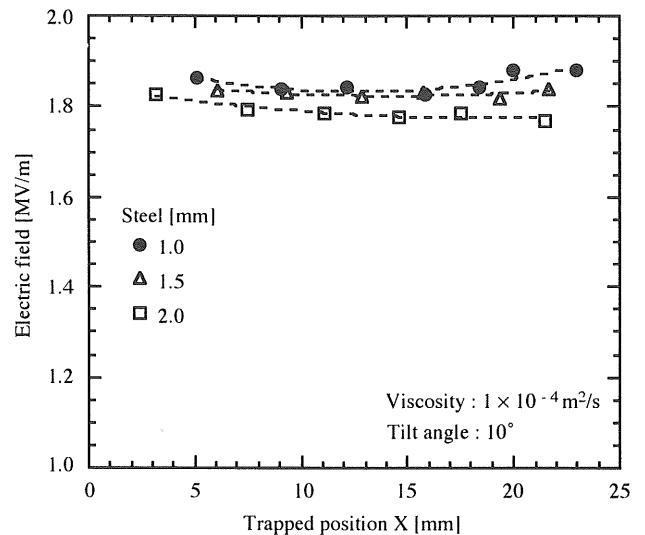


図 10 トラップ位置と電界強度

Fig. 10 Dependency of trapped position and electric field.

表 2 トラップ位置での電界強度

Table 2 Electric field at trapped position.

Particle	Diameter [mm]	Electric field [MV/m]
	1.0	1.85
Steel	1.5	1.83
	2.0	1.79

図11に粒子運動の数値計算によるシミュレーション結果の例を示す。図中の縦の灰色の線は粒子運動の軌跡を表し、その横の矢印は軌跡の進行方向を示す。印加電圧が一定の場合、粒子が最初に置かれた場所によって電極が広いところ(図11(a)), または狭いところに移動し(図11(b)), 粒子のトラップ位置はその中間の位置にあることが分かる。この過程を繰り返すことによって粒子のトラップ位置を数値計算で求めた。

図12に、直径 1 mm のスチール粒子の場合のトラップ位置と印加電圧の関係を、実験値と理論値で比較する。図中の実線は数値計算による結果である。計算では粒子の帶電量に式(8)の理論値を用いている。トラップ位置は、理論値が実験値に比べてかなり電極間隔が広いところに位置していることが分かる。

このトラップ位置の測定の難しさはその再現性にある。1回の実験で電圧を変化させた時はほぼ直線的に変化するが、常に同じ直線を表すとは限らない。この図には3回の実験結果を同時に示してある。

トラップ位置が実験値と合うように粒子の電荷量が式(8)の理論値より小さいと仮定し、計算し直した結果を図13に示す。粒子が持つ電荷量が理論値の約 0.4 ~ 0.6 の時、ト

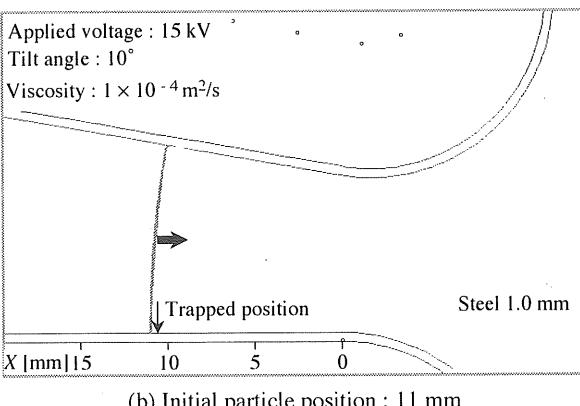
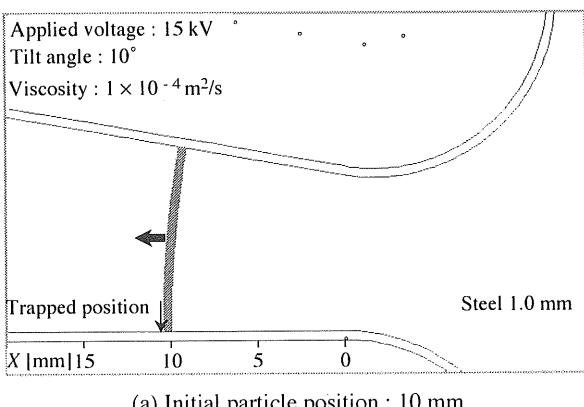


図 11 シミュレーションによる粒子の水平移動
 Fig. 11 Horizontal movement of particle by simulation.

ラップ位置の実験値と理論値がほぼ一致することが分かった。この結果は平等電界中の平均運動速度に合わせて粒子の電荷量を推定した時の値とほとんど一致している²⁾。これより、粒子がトラップされる時の印加電圧は十分高く、放電を介した電荷緩和が終了する前に粒子が静電気力の作用により動き始め、電界による誘導帶電電荷量に達しないと考えられる。

以上の計算は粒子がトラップされる電圧範囲の広いスチール粒子に対する結果であるが、密度の軽いグラッシャーカーボンでも同様の計算は可能である。しかし、グラッシャーカーボン粒子の質量はスチール粒子より小さいので、粒子に働く3つの力（重力、慣性力、静電気力）の内静電気力

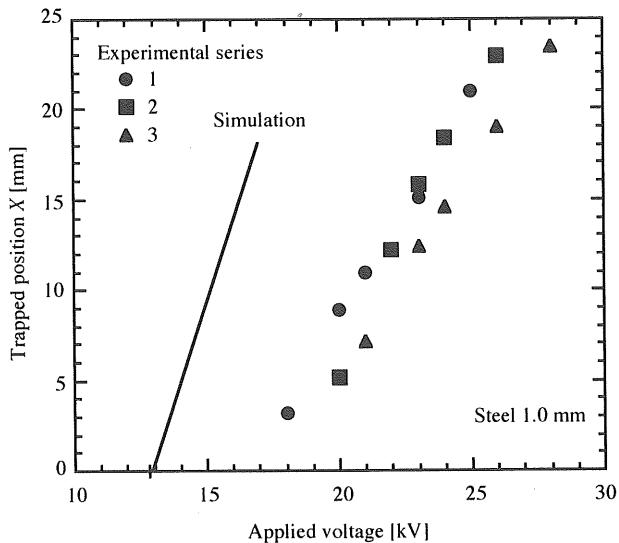


図 12 トラップ位置の実験値と理論値の比較
 Fig. 12 Comparison of experimental trapped position and calculated one.

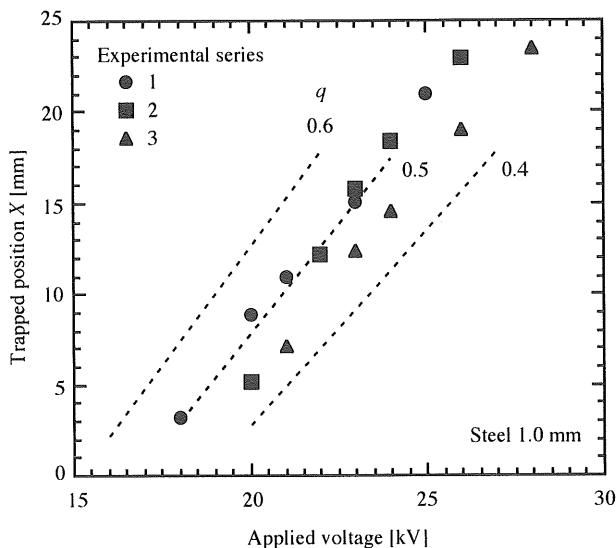


図 13 粒子電荷量の推定
 Fig. 13 Estimation of particle charge.

の影響を大きく受ける。グラッシーカーボン粒子で粒子がトラップされる電圧範囲が狭いのは、こういった理由によると考えられる。

6. まとめ

液化高分子中に混入した不純物を静電気力を用いて除去する方法を確立するため、不均一電界下での粒子の運動を詳しく調べた。以下に得られた結果をまとめる。

- (1)誘導帶電により電荷を得た粒子は、静電気力、重力、慣性力の合力により傾斜電極系の水平方向に移動しながら電極間を往復運動する。
- (2)粒子は印加電圧が低い時は電極間隔が狭い方に移動し、印加電圧が高い時は電極間隔が広い方に移動する。その中間に、粒子がトラップされる条件がある。トラップ位置は印加電圧の増加とともに電極の広いところへ移動する。
- (3)粒子の移動方向には、粒子に働く静電気力と重力、慣性力および電極と衝突する時の反発作用が関与している。
- (4)粒子のトラップ時の電界強度はほぼ一定で、粒子径で多少変化するが、約1.8 MV/mである。
- (5)粒子のトラップ位置について実験値とシミュレーションによる値との比較を行った。実際の粒子のトラップ位置は計算値よりかなり電極が狭いところである。実験値に合わ

せて粒子の電荷量を推定した結果、電荷量は理論値の約0.4～0.6であることが分かった。この値は平等電界中の粒子運動速度に対しての電荷量の推定結果とほぼ一致する。

(6)密度、大きさが異なる粒子を電圧によって電極系の水平方向に分ける原理を用いると粒子の分別が可能であることが分かった。今後はこの結果をもとに実用的な電極系の設計を行う。

参考文献

- 1) 崔暢洛、八塚京子、浅野和俊：静電気学会誌、**23** (1999) 235
- 2) 崔暢洛、八塚京子、浅野和俊：静電気学会誌、**24** (2000) 262
- 3) C. Choi, K. Yatsuzuka and K. Asano : IEEE Trans. IA, **37**(2001) 785
- 4) Herbert A. Pohl : J. Appl. Phys., **22**(1951) 869
- 5) M. Zahn : *Electromagnetic Field Theory*, p.272, Krieger Pub., Malabar, Florida (1987)
- 6) 静電気学会編：新版静電気ハンドブック，p.1012，オーム社 (1998)
- 7) 静電気学会編：新版静電気ハンドブック，p.1198，オーム社 (1998)
- 8) K. Asano, C. Choi and K. Yatsuzuka : *Proceedings of 2000 IEEE-CEIDP*, p.73, Victoria, BC (2000)
- 9) C. Choi, K. Yatsuzuka and K. Asano : *Proceedings of 2000 IEEE-CEIDP*, p.77, Victoria, BC (2000)
- 10) 浅野和俊、八塚京子：静電気学会講演論文集'99, p.135, 静電気学会(1999)