

論 文

一様電界における絶縁液体中の球状導電性粒子の運動

崔 暢 洛*, 八 塚 京 子*, 浅 野 和 俊*

(1999年1月14日受付, 1999年8月27日受理)

Motion of a Conductive Particle in Insulating Liquid
under Uniform Electric Field

Changrag CHOI,* Kyoko YATSUZUKA* and Kazutoshi ASANO*

(Received January 14, 1999; Accepted August 27, 1999)

The environment of our world has been polluted by an enormous amount of plastic wastes that come both from industries and homes. One of the attempt for recycling such plastic wastes is liquefaction to be molded, or to be decomposed to lighter organic compounds which can be used as a fuel or synthesized to make plastic reproductions. In this case, an impurity of liquefied plastics degrades the quality of reproduction. The aim of our research is to seek a suitable way to remove solid impurities from liquefied plastic waste by means of electrostatic force. In the present study, the liquefied plastic is simulated with an insulating liquid, silicone oil. Carbon, glassy carbon and 1 to 2 mm diameter steel, were used as spherical conductive solid impurities. The motion of the particle in silicone oil was observed by means of a video microscope. The threshold voltage, that the particle starts to move, agreed well with theory. Above the threshold voltage the particle motion consists of four stages: upward motion, standing still at the upper electrode, downward motion and again standing still at the lower electrode. In the process of upward and downward motion the particle decelerates before it reaches the electrode. It suggests that the liquid between the particle and the electrode acts as a damper. The standing-still motion on the electrodes can be explained by accompanying liquid flow caused by the particle motion. When the particle reaches the electrode, the pulsed current flows which corresponds to the charge transfer between the particle and the electrode. The particle charge can be calculated by integrating the pulsed current. The results indicate that the charge is transferred by an electric discharge through the oil film between the particle and the electrode.

1. はじめに

近年、産業の発展とともに、廃棄物の急激な増加と資源の枯渇の問題が深刻化している。特に、高分子製品は、その加工の容易さから、スーパーの食品用容器やショッピングパックのように、大量に消費され廃棄されている。高分子廃棄物の中には焼却処理で有毒ガスを発生するなど、焼却に適さないものもある。実際に使用されているプラスチックの種類は多岐にわたり、産業廃棄物並びに一般家庭から大量に出る高分子廃棄物をいちいち材料ごとに分別回収することは事実上不可能に近い。そこで焼却しないときは地下に埋め立てるが、プラスチックは自然界において分

キーワード: 粒子の電界運動、絶縁液体、誘導帶電、リサイクリング、高分子廃棄物

* 山形大学工学部電子情報工学科 (992-8510 米沢市城南 4-3-16)

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

解され難いため、環境保護の上で重大な問題が生じている。さらに、プラスチックは石油を原料としているため、その消費の増大は石油資源の枯渇に拍車をかけている。

このような背景から、廃棄高分子材料を回収し、再利用することが急務として広く認識されてきている。回収・再利用の一つの方法として、分別回収されたプラスチックを単に融解して成形し直すものから、熱分解して気体、液体(生成油)、固体残渣にわけ、燃焼ガス、燃料油、コークス添加剤や、微粉炭として用いるもの等がある。溶融・再形成では、同種のプラスチックを分別・回収する必要があるが、熱分解による再利用方法では、プラスチックの厳密な種類別の分別は特に必要ではない。これらはいずれも有望な処理方法であるが、回収した材料に不純物が付着したり混在していると、再生後の品質に大きく影響を及ぼす。

液化したプラスチックに混入した固形不純物の除去法には、フィルタや重力による不純物の沈降等があるが、我々は、装置の保守が容易で短時間に大量の液化プラスチック

を処理できる方法として、静電気力を利用した除去法を実験的に検討している^{1,2)}。静電気力により微粒子を動かす方法には、帶電粒子が電界により静電気力を受けて運動する電気泳動を利用する方法と、粒子を帶電させることなく、強い不均一電界によって運動させる誘電泳動法がある³⁾。導電性粒子を想定した場合、粒子が電極と接触したときに電界により帶電し電気力によって駆動されて運動するため、粒子の運動を電界で制御することができ、また、強い不均一電界を必要としないので機構が単純である。我々はこれまで、電界による誘導帶電と電気泳動を組み合わせた機構について、様々な用途を想定した研究を行ってきた。その中には、GIS内に混入した粒子の運動を解析し、粒子を静電的に除去する試みに関する物も含まれている^{4,5)}。本論文では、媒質が粘性液体の場合の不純物固体粒子の新しい除去法を模索することを目的として、粒子の電界中での挙動について基本的な研究を行った実験結果を報告する。実験では、液化高分子をシリコーン油で模擬した。混入不純物には炭化物を想定し、球状導電性粒子で模擬して電界下でのその挙動を観察・解析した。電極系は平行平板電極系とし、導電性粒子にはカーボン、グラッシャーカーボン、スチール球粒子を用い、粒子の電極間の往復運動について詳しく調べた。また、粒子運動の解析には粒子

が持っている電荷量を正確に把握する必要があるので、電極と粒子間の電荷交換に伴って外部回路に流れる電流波形を積分して粒子が得た電荷量とし、電界による球粒子の帶電の計算値と比較、検討した。

2. 実験装置および方法

今までの実験でシリコーン油中に室内のほこりが混入すると粒子の誘導帶電が影響を受け、粒子運動が不規則になる現象が見られた。このため、簡易式のクリーンベンチを作製し、実験装置全体をその中に入れて実験を行った。さらに、シリコーン油を満たした容器と電極系を覆う卓上クリーンベンチを作製し、ほこりの影響を極力取り除いて実験を行った⁶⁾。

図1に実験装置の構成図を示す。電極は鏡面仕上げした直径70 mmの2枚の円盤からなる平行平板電極である。下部電極はアクリル板に固定し、上部電極はマイクロメータに取り付けて、電極間の間隔を6 mmから12 mmまで微調整できるようにした。この平行平板電極を透明なプラスチック容器内にいれ、シリコーン油で満たした後、正極性の可変直流高圧電源（東和計測、KT-030KIPS、0～+30 kV、1 mA）を用いて上部電極に電圧を印加した。高圧電源と電極の間では、瞬間に短絡が生じたときの電源装

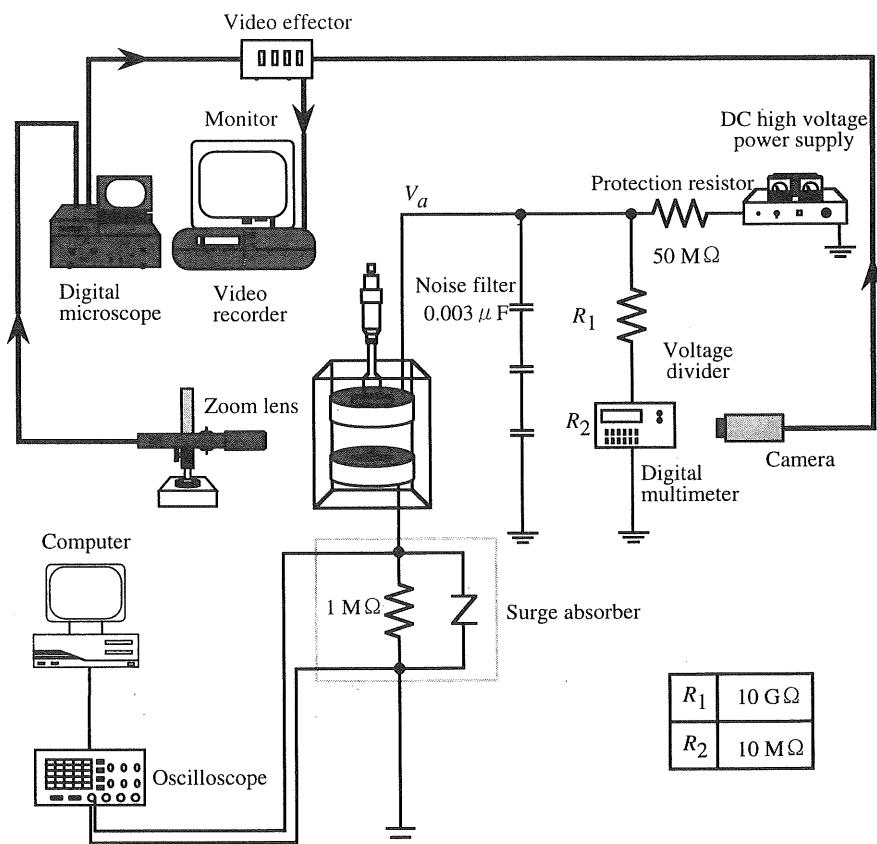


図1 実験装置
Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

置の損傷を防ぐために、 $50\text{ M}\Omega$ の保護抵抗を挿入している。また、直流高圧電源のリップルを抑えるため、高耐圧コンデンサ ($0.003\text{ }\mu\text{F}$) を電源と並列に接続している。印加電圧は、 $10\text{ G}\Omega$ の高抵抗とデジタルマルチメータ（アドバンテスト、R6441B）の200Vレンジの内部抵抗 ($10\text{ M}\Omega$) を用いて $1/1,000$ の分圧比で測定した。

粒子が電極に接触した瞬間に流れる電流波形は、誘導帶電によって粒子が得た電荷を対向電極で放電する瞬間に流れる電流パルスと考えられ、下部電極と接地の間に接続している測定抵抗 ($1\text{ M}\Omega$) の両端からデジタルオシロスコープ (Tektronix, TDS220) を用いて測定し、その波形をパーソナルコンピュータ (NEC, 9801RX) で取り込んだ。過大なパルスによるオシロスコープの損傷を避けるため、サーボアブソーバ (390V) を測定抵抗と並列に接続している。

また、平行平板電極系の上部電極に正極性の高圧電圧を徐々に印加して、下部電極上の粒子が運動を開始するようす、および、電極間を往復運動するようすをデジタルマイクロスコープ (KEYENCE, VH-6200) を用いて観察した。粒子は狭い電極中で速いスピードで運動するので、運動のようすを一旦ビデオテープに録画することにより、

ビデオテープをコマ送りで見ながら運動を詳しく調べることができる。デジタルマイクロスコープのタイミングに同期させた CCD ビデオカメラ（ビクター、TK-1270）により印加電圧の表示を監視し、ビデオエフェクタ（ビクター、TK-C50）を用いて粒子の運動と同じ画面に記録した。これにより、ビデオテープ再生時にそのときの印加電圧を正確に知ることができる。

粒子の運動が速くなると、30コマ/秒の普通のビデオカメラでは粒子の観測が難しかったので、その場合には30~40,500コマ/秒で撮影できる高速度ビデオカメラ（フォトロン、FASTCAM-ultima）を用いて粒子運動の観測を行った。

実験で使用したシリコーン油（東レ・ダウコーニング・シリコーン（株）：SH200, ジメチルポリシロキサン）の動粘度は、 $1 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ (100 cSt), $3 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ (300 cSt), $5 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ (500 cSt) の3種類である。

実験で用いた球状導電性粒子は、カーボン、グラッシャー カーボン（（株）ニラコ），および大きさの異なるスチール粒子の4種類である。図2にカーボン粒子とグラッシャー カーボン粒子をデジタルマイクロスコープで観察した写真を、表1に粒子の諸特性を示す。写真からわかるように、

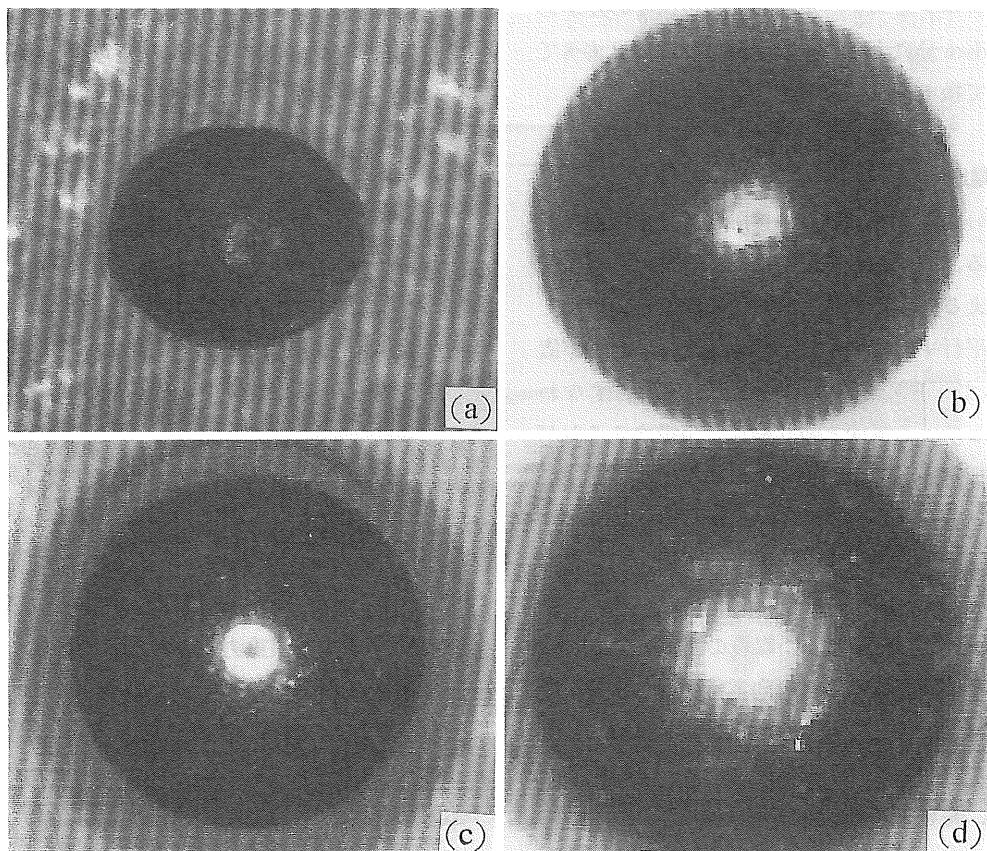


図2 粒子の形状

Fig. 2 The shape of particles.

(a) Carbon, (b) Glassy carbon, (c) Steel [diameter: 1 mm], (d) Steel [diameter: 2 mm].

表 1 粒子の特性値
Table 1 Properties of particles.

Particle	Shape	Diameter [mm]	Density [kg/m³]	Resistivity [Ωm]
Carbon	Oval	≈0.6	3500	1.375×10^{-5}
Glassy carbon	Spherical	2.0	1500	$40 \sim 45 \times 10^{-6}$
Steel 1	Spherical	1.0	7900	9.71×10^{-8}
Steel 2	Spherical	2.0		

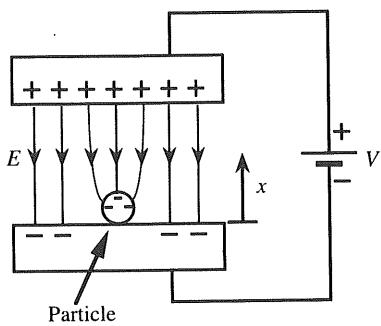


図 3 球状粒子の誘導帶電

Fig. 3 Induction charging of spherical particle.

カーボン粒子は完全に球状ではなく、表面はでこぼこしており、電子顕微鏡で観察した結果からも多孔性であると考えられる。グラッシーカーボン粒子は球形で表面がガラス質の粒子で、密度は実験で用いた粒子の中で最も小さい。スチール粒子はペアリング用の真球度の良いものを用いた。抵抗率はカーボンとスチール粒子で2桁ほどの差があるもののいずれも十分に小さく、本研究の範囲ではすべて導電性粒子として扱える。

3. 運動開始電圧

電極に接している導電性粒子は、接觸している電極と同極性の電荷を得る。粒子の帶電電荷に働く静電力が粒子に働く重力を越えると、粒子は対向電極に向かって運動を始める。図3に平行平板電極系の下部電極上に球粒子が置かれた状態を示す。電気力線は球粒子に集中し、すなわち、粒子は接觸している電極と同じ極性に帶電することがわかる。平行平板電極系では、半径 r の球状導電性粒子が粒子周囲の電界 E によって誘導で得る電荷量 q は、次式で表される^{7,8)}。

$$q = 1.65 \times 4\pi\epsilon r^2 E \quad (1)$$

ここで、 r ：粒子の半径[m]、 ϵ ：媒質の誘電率である。

粒子の持つ電荷に働く電気力は対向電極に向かう方向なので、電界を次第に増加していくと、電気力が重力よりも大きくなつたところで粒子は上部電極に向かって運動を始める。すなわち、電極間の平均電界 E_0 [V/m]と粒子の持つ電荷の積によるクーロン力と、重力による力が等しくなつたときに粒子が運動を開始する。粒子に働く浮力も考慮すると、次式を得る。

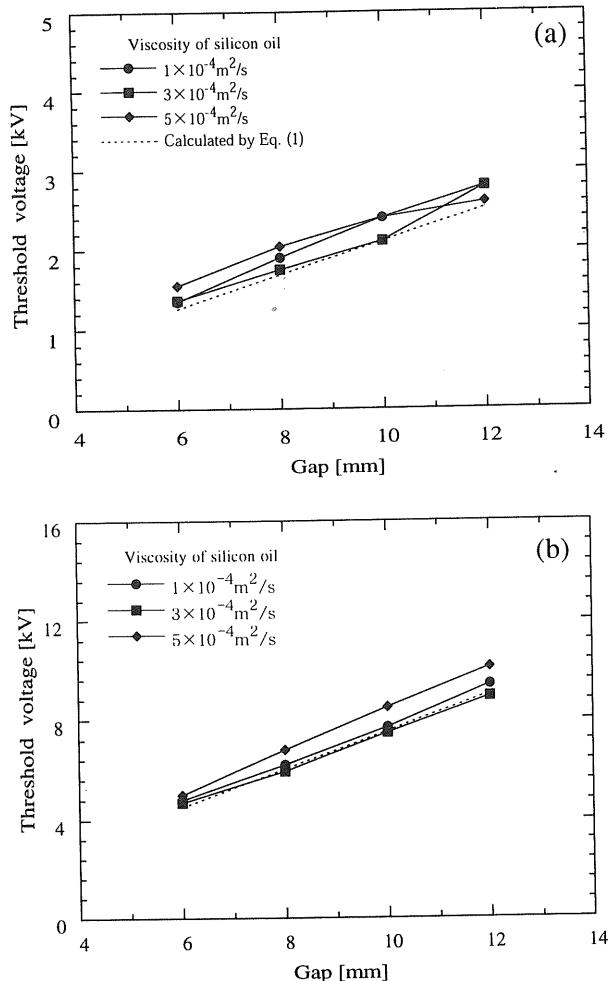


図 4 静的臨界電圧

Fig. 4 Threshold voltage of particle motion.
(a) Glassy carbon [diameter : 2 mm], (b) Steel [diameter : 2 mm].

$$q_0 = E_0 = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_M - \rho_m) g \quad (2)$$

ここで、 ρ_M ：粒子の密度[kg/m³]、 ρ_m ：シリコーン油の密度[kg/m³]、 g ：重力加速度[m/s²]、 q_0 ：粒子が動き始めたときの帶電電荷量[C]

粒子が運動を始めると ($E = E_0$) の粒子の電荷量 q_0 は (1) 式で与えられているので、上式に代入して、粒子が運動を開始する電界

$$E_0 = \frac{\sqrt{(\rho_M - \rho_m) g}}{1.65 \times 3 \epsilon} \quad (3)$$

を得る。この式に電極間隔 d [m]をかけて、粒子の運動開

始電圧（静的臨界電圧） V_s が求まる。

$$V_s = d \frac{\sqrt{r(\rho_m - \rho_m)g}}{1.65 \times 3\epsilon} \quad (4)$$

ただし、このモデルでは対向電極は無限遠に置かれていると仮定されている。

図4に直径2mmのグラッシーカーボン、スチール粒子の静的臨界電圧を示す。シリコーン油で満たされた平行平板電極系で下部電極中央部に粒子を置き、印加電圧を徐々に上げながら、粒子の運動を顕微鏡ビデオカメラで観察・録画して、粒子が上部電極に向かって浮き始める瞬間の電圧を静的臨界電圧として測定した。上式(4)の計算結果と実験結果を比較するにあたって、実際の電極間隔を無限大にすることはできないので、電極間隔を6mmから12mmまで2mm間隔で変えて粒子の影響についても考慮できるようにした。図中の破線は、 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ のシリコーン油に対して、式(4)より計算した結果である。シリコーン油の粘度による密度の差は、1%程度と小さく、静的臨界電圧の計算値に差がほとんどないので、粘度 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ に対する計算値で代表させた。この結果より、静的臨界電圧は電極間隔と比例関係にあることがわかる。また、式(4)から求めた値と実験値を比較すると、グラッシーカーボンでもスチール粒子でも実験値の方がやや高めであるが、ほとんど一致している。このことから、静的臨界電圧での粒子の帶電量は、電極上に置かれた導電性球粒

子の電界による誘導帶電の式(4)より計算できることがわかった。スチール粒子はグラッシーカーボン粒子より約5.3倍密度が高く、 V_s の計算値はグラッシーカーボン粒子の約3.6倍であり、実験値の比3.21～3.56とほぼ一致している。シリコーン油の粘度が高くなるほど各粒子の静的臨界電圧が高くなっているが、これは、粒子が運動を開始するときの粒子のわずかな動きに対する粘性抵抗の影響と考えられる。

図5にカーボン粒子の静的臨界電圧を示す。カーボン粒子は理論値よりかなり低い電圧で動き始めた。粒子形状の

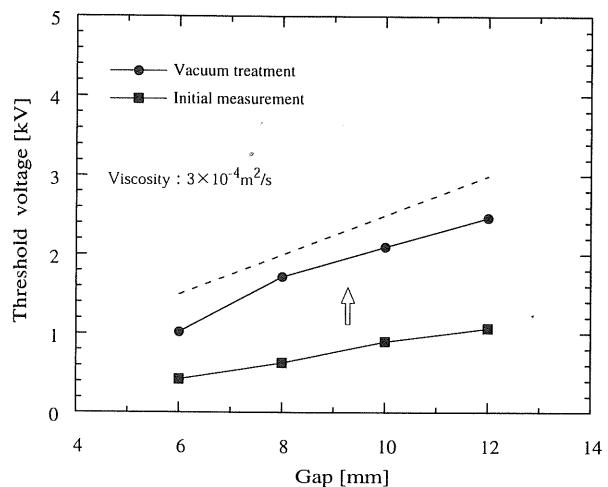


図5 静的臨界電圧（カーボン粒子）

Fig. 5 Threshold voltage of particle motion (Carbon).

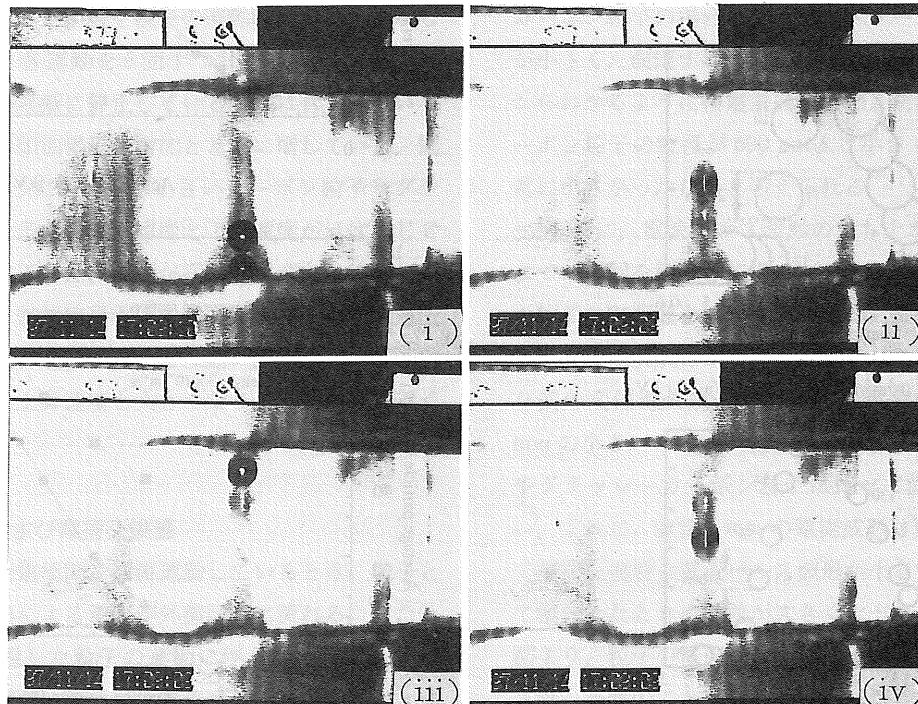


図6 粒子の上下運動

Fig. 6 Pictures of up-and-down motion of particle.

(i) Settling on lower electrode, (ii) Upward motion, (iii) Settling on upper electrode,
(iv) Downward motion. Glassy carbon, Viscosity : $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, Gap : 10 mm, V_a : 6 kV.

写真(図2(a))より推測できるように、カーボン粒子は多孔性であり、空気が穴に充填されて見かけ上の密度が小さかったためと考えられた。そこで、カーボン粒子をシリコーン油を満たした容器に入れ、真空装置内に置いて減圧・放置した後、再度実験を行った結果、理論値に近づくことがわかった。これは、減圧により空孔内の空気がシリコーン油で置きかえられたためと考えられる。

4. 粒子の運動

印加電圧が静的臨界電圧を越えたところで、粒子は下部電極から上部電極に向かって運動を始めるが、上部電極に達して接触すると、粒子は持っていた電荷を上部電極に放電し、再び誘導帶電により前とは逆の極性に帶電して下部電極に向かう力を受ける。このようにして、図6に示すように電極間で上下運動を繰り返す。このような運動は実験

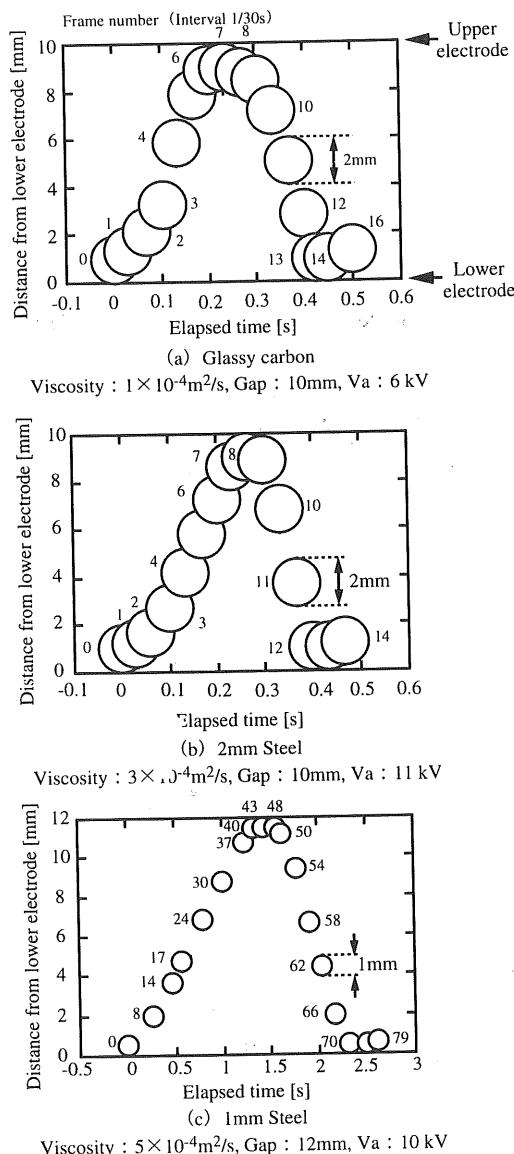


図7 粒子の一往復
Fig. 7 Analysis of particle motion.

で用いたいづれの粒子でも観察されたが、ここでは理論的解析の容易な球粒子のグラッシーカーボンとスチールに焦点を絞った。

横軸に経過時間を、縦軸に粒子の位置を示した上下往復運動のようすを図7に示す。粒子の位置は、ビデオテープ

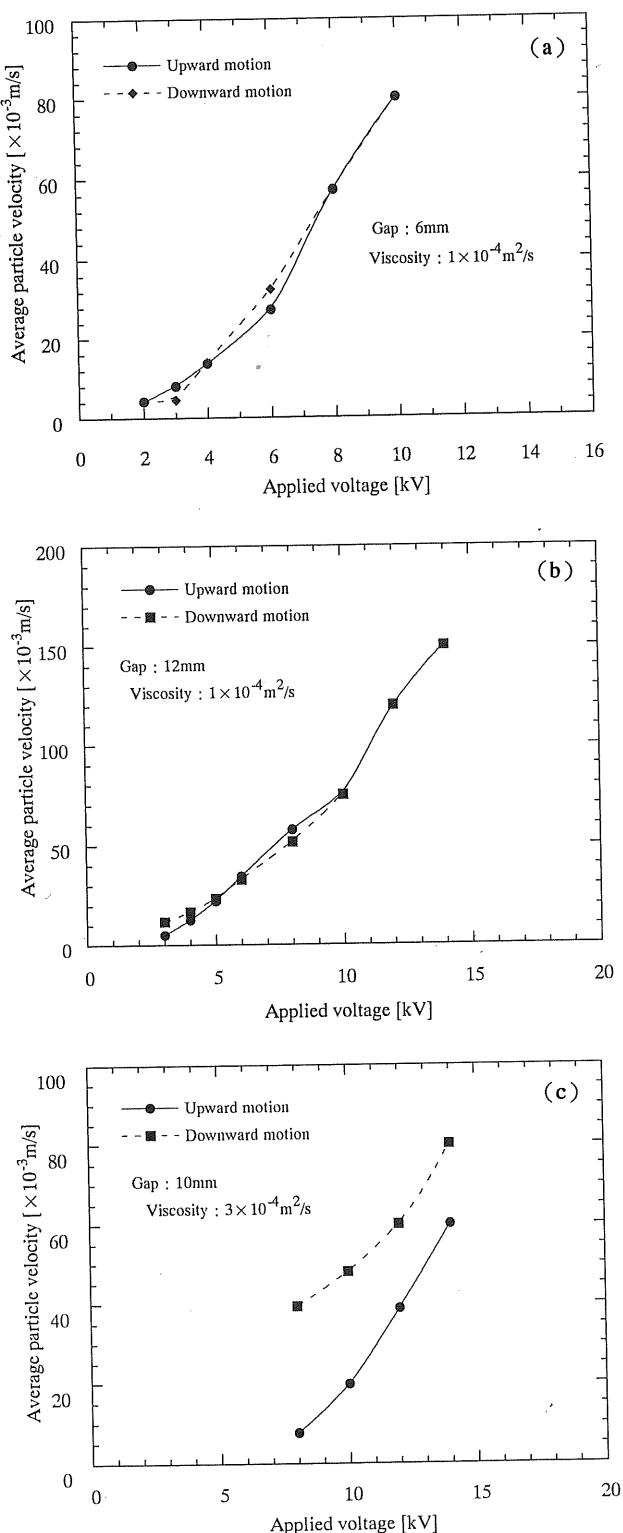


図8 平均運動速度
Fig. 8 Average velocity of particle.
(a) Carbon, (b) Glassy carbon, (c) Steel [diameter : 2 mm].

をコマ送りで再生しながらモニタ上で読み取った。図は粒子の連続した往復運動の1往復分を表している。横軸は下部電極から粒子が離れる瞬間を $t=0$ とした。粒子は上部電極から下部電極に戻り、 $t=0$ になるまで電荷交換のために下部電極上にしばらく静止し、 $t=0$ で対向電極に向かって再び運動をはじめる。図には、一往復して再び下部電極から少し浮き上がるまでを示した。縦軸は 0 mm が下部電極、最大値の位置が上部電極を示している。図中、粒子の脇に添えられた数値は、 $t=0$ からのコマ数（1コマ $1/30$ 秒間隔）である。

図より、粒子は大きく分けて、上昇運動、上部停止、下降運動、下部停止の四つの運動を繰り返しながら電極間を往復する。また、密度の高いスチール粒子でも上部電極にしばらく止まっていることがわかる。電極上で粒子が静止する現象は空気中では見られなかった⁴⁾ もので、液体固有の現象と考えられる。詳しいことは今後解明する必要があるが、粒子と一緒に動いた液体が粒子を電極に押しつける作用がこの停止作用をもたらしているものと推定される。密度の大きいスチール粒子では上昇速度に比して下降速度が速いのに対し、密度の小さいグラッシーカーボン粒子では上昇・下降に要する時間はほぼ等しい。これは重力の影響が小さいことを意味する。

図 8 に各粒子の平行平板電極での平均運動速度を示す。粒子の運動速度は、粒子が上部電極、または下部電極から対向電極に達するまで動いた距離、すなわち、電極間隔から粒子の直径を引いた距離を粒子の運動時間で割って示した。この速度は、各運動を 5 回ずつ計算した平均値である。これには、両電極に静止している時間は含まれていない。粒子の速度は印加電圧の増加とともに増していく。図 7 でも示されたように、密度の小さいカーボン粒子やグラッシーカーボン粒子では上昇速度と下降速度がほぼ同じである。スチール粒子では、密度が高いため浮力を比べて重力が大きいので、静的臨界電圧を越えたすぐ後の印加電圧では下降速度が上昇速度よりかなり速い。しかし、印加電圧の増加とともに上昇速度も大きくなり、下降速度に近くなる。

5. 電流波形および電荷交換量

粒子が平行平板電極間を往復運動しているとき、粒子と電極間の電荷交換による電流が外部回路に流れる。また、外部回路には帶電した粒子の運動に伴う変位電流も流れ。帶電粒子の運動に伴う変位電流は、粒子の帶電量と運動速度に比例する。通常、導体と導体の接触による電荷交換は非常に速いため、電流は鋭いパルス波形を示す。図 9 にグラッシーカーボン粒子が電極に達したときの電流パル

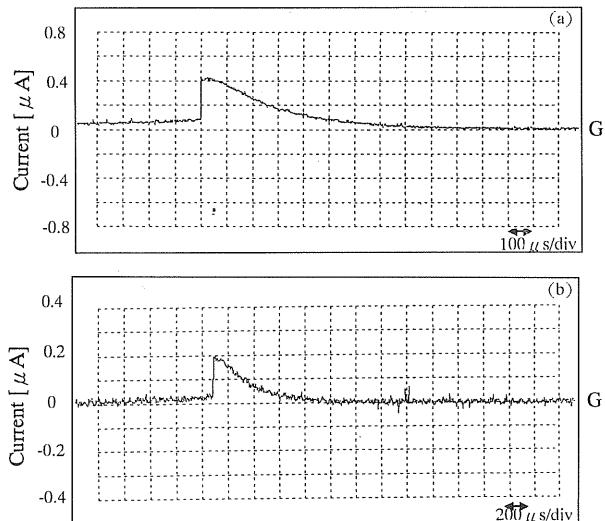


図 9 電流波形

Fig. 9 Current waveform.

Glassy carbon, Gap : 8 mm, V_a : 10 kV. (a) Viscosity of $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, (b) Viscosity of $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

ス波形の例を示す。電流波形は粒子が電極に接触した瞬間に立ち上がり、徐々に減衰する。印加電圧が高いときは、粒子の運動速度が速くなるとともに、電流パルス波形の立ち上がりより前で粒子の運動による変位電流成分が見られるようになる。同じ印加電圧でもシリコーン油の粘度が低い方が変位電流成分も大きく、粘性抵抗が小さいために粒子の速度が速くなった結果と考えられる。また、電流波形のピーク値はシリコーン油の粘度が低いほど大きい。カーボン粒子の場合は、オシロスコープの感度よりも電流が小さく、測定することができなかった。これは、式 (1) からわかるように帶電量は粒径の 2 乗に比例するので、カーボン粒子の粒径が $600 \mu\text{m}\phi$ と小さく、帶電電荷量が非常に小さかったためと考えられる。

図 10 に、電流パルス波形の立ち上がりから平坦になるまでの区間を積分して求めたグラッシーカーボンとスチール粒子の電荷量を示す。電荷交換による電流成分と運動による変位電流成分が一緒に観察されたときには、立ち上がり前の変位電流成分を無視して電荷量を求めた。直径 1 mm の小さいスチール粒子では直径 2 mm のスチール粒子やグラッシーカーボン粒子に比べて値のばらつきが大きい。これは、直径 1 mm の電流波形は変位電流の値に比して電荷交換時の電流パルス波形が小さく、変位電流を除いて積分したときに誤差が大きくなつたためと考えられる。図より、粒子の電荷量は印加電圧とともに増加していく。また、当然のことながら印加電圧が等しければ、電極間隔が狭いほど、粒子が持つ電荷量は高くなることがわかる。図 11 に直径 2 mm のグラッシーカーボンと粒径の同じスチール粒子の電荷量を比較する。グラッシーカーボン粒子

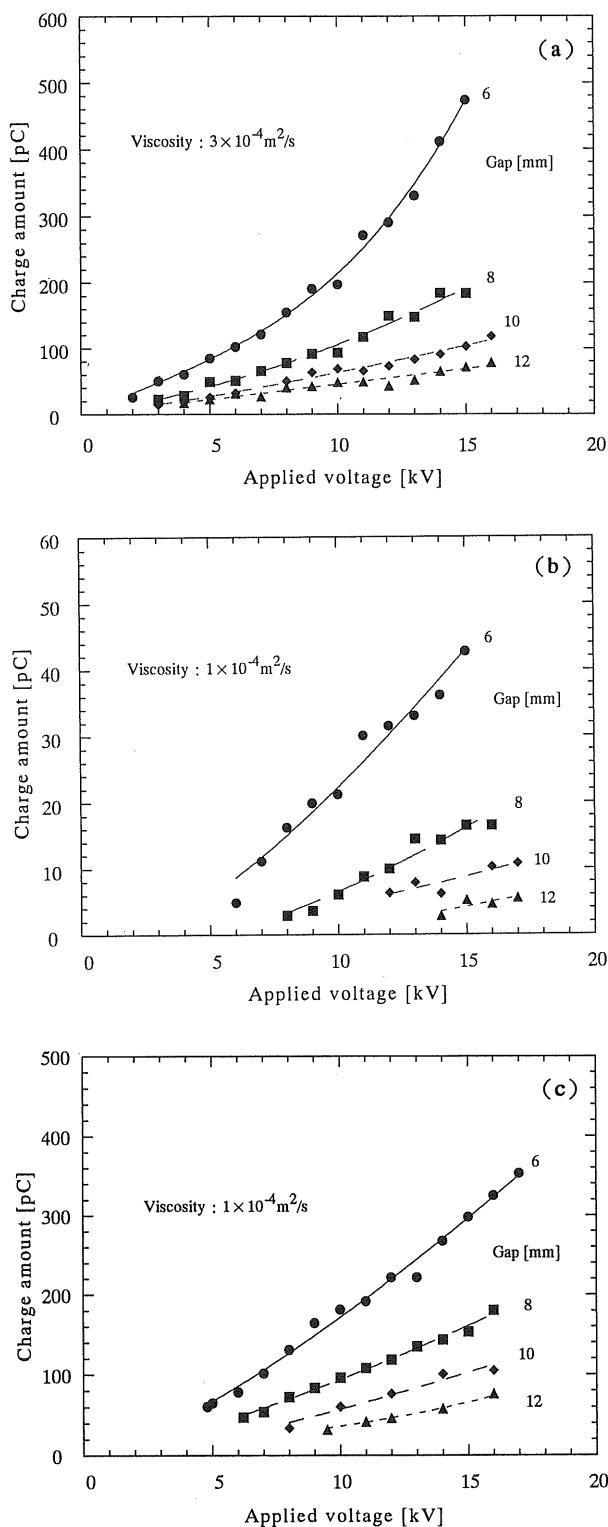


図 10 粒子の電荷量と印加電圧の関係

Fig. 10 Dependency of charge amount of particle on applied voltage.
(a) Glassy carbon, (b) Steel [diameter: 1 mm], (c) Steel [diameter: 2 mm].

の方がスチール粒子に比べて電荷量が大きい。また、シリコーン油の粘度が低いほど、電荷量は大きくなることがわかる。

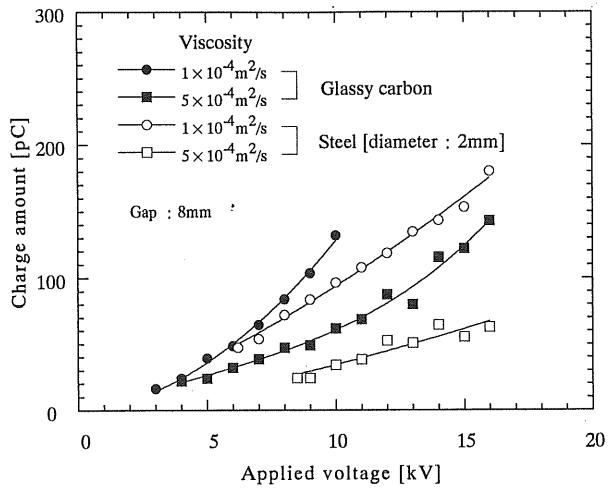


図 11 シリコーン油の粘度と電荷量

Fig. 11 Effect of viscosity of silicone oil on particle charge amount.

6. 結果に対する検討

6.1 粒子の運動

粒子の運動は上昇運動、上部停止、下降運動、下部停止の四つの運動に分けられる。結果のところで述べたように、上部・下部停止は空気中では見ることができない特徴的な運動パターンである。上部・下部停止の原因の一つは流体力学的影響である。粒子が対向電極に向かって運動するとき、粒子の運動方向と同方向にシリコーン油の流れが粒子の周辺に生じ、粒子が電極に達しても、その流体の流れが停止するまでにしばらく時間がかかる。その液体の流れが粒子を電極に押しつけると考えられる。流体力学のもう一つの影響は図 7より求めた液中の粒子運動速度の変化である。粒子と電極間にはさまれた液体を押し出す力が必要となるために電極付近で減速すると考えられ、すなわちこれはダンパー作用になるといえる。図 12 は図 7 (a) と (b) からフレーム間で計算した平均速度の変化を示したものであるが、特に上昇運動では電極近くの減速の度合が大きい。我々はこれまで、気体中で電界下の導電性粒子の運動について実験的および理論的解析を行ってきた^{4,5)}。空気中ならば粒子がどんどん加速されるから到達電極において速度が最大となり、そこで反発係数が問題となる。そのため、静的臨界電圧の他に動的臨界電圧という量が新たに定義された。これに対し、液中の場合、到達電極付近で大きく減速するので、反発係数という考え方があてはまらなくなる。

6.2 電荷交換

スチール粒子が真鍮の電極と接触した場合、電荷交換に必要な時間を金属の時定数から推測するとおよそ 10^{-18} s である。ところが、図 9 に示された電流波形から求めた時定数は大体 $300 \mu\text{s}$ である。グラッシーカーボンの導電率

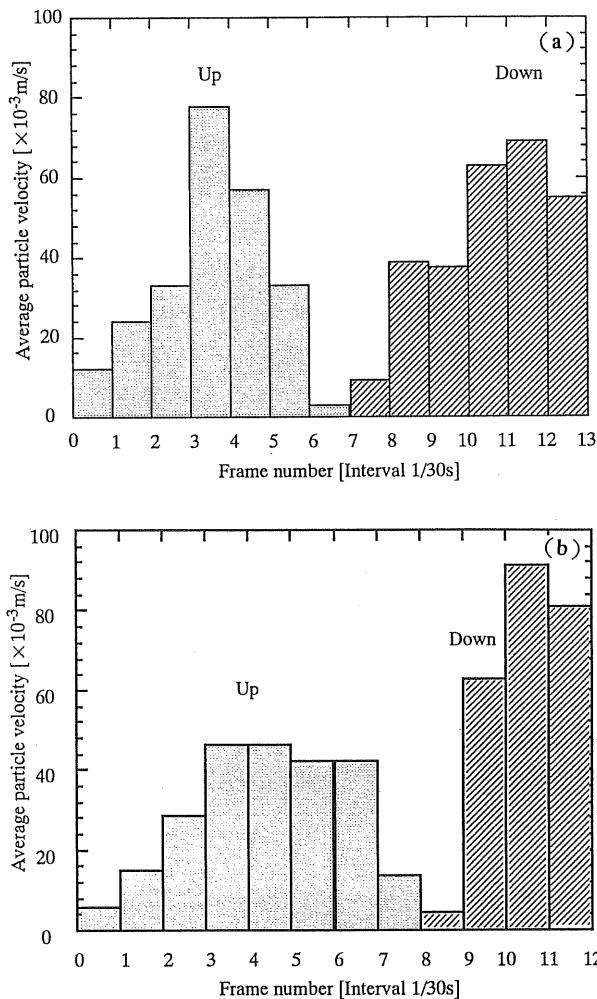


図 12 電極間での運動速度の変化
Fig. 12 Particle velocity in up and down motion.
(a) Glassy carbon, (b) Steel [diameter : 2 mm].

はスチールよりおよそ 3 柄小さいがそれでも、電流波形による時定数とは 10 柄以上も違う。このことは電荷交換時に粒子と電極間に油膜が存在し、これを介しての電荷交換のため、時定数が大きくなつたと考えられる。シリコーン油の緩和時定数は非常に大きく、数 10 秒とか数 100 秒の単位であるので、この油膜を通しての導電現象による電荷交換とは考えられないで、この電流は油膜の絶縁破壊現象にともなうものと推察される。これはグラッシーカーボンで 7kV 付近から電極と粒子の間で火花放電が観察されたことによっても証明される。現在、電荷交換が行われる時期が、接触時なのかどうかを高速度カメラによる測定データをもとにして調査中である。

6.3 粒子の電荷量

実際の電流波形から求めた各粒子の電荷量は、印加電圧とともに単調に増加することがわかつた。また、シリコーン油の粘度が低いほど粒子の電荷量が大きくなつた。しかし、グラッシーカーボン粒子で電極間隔 6 mm の場合、印加電圧 7 kV 付近までは直線的に帶電量が増加するが、そ

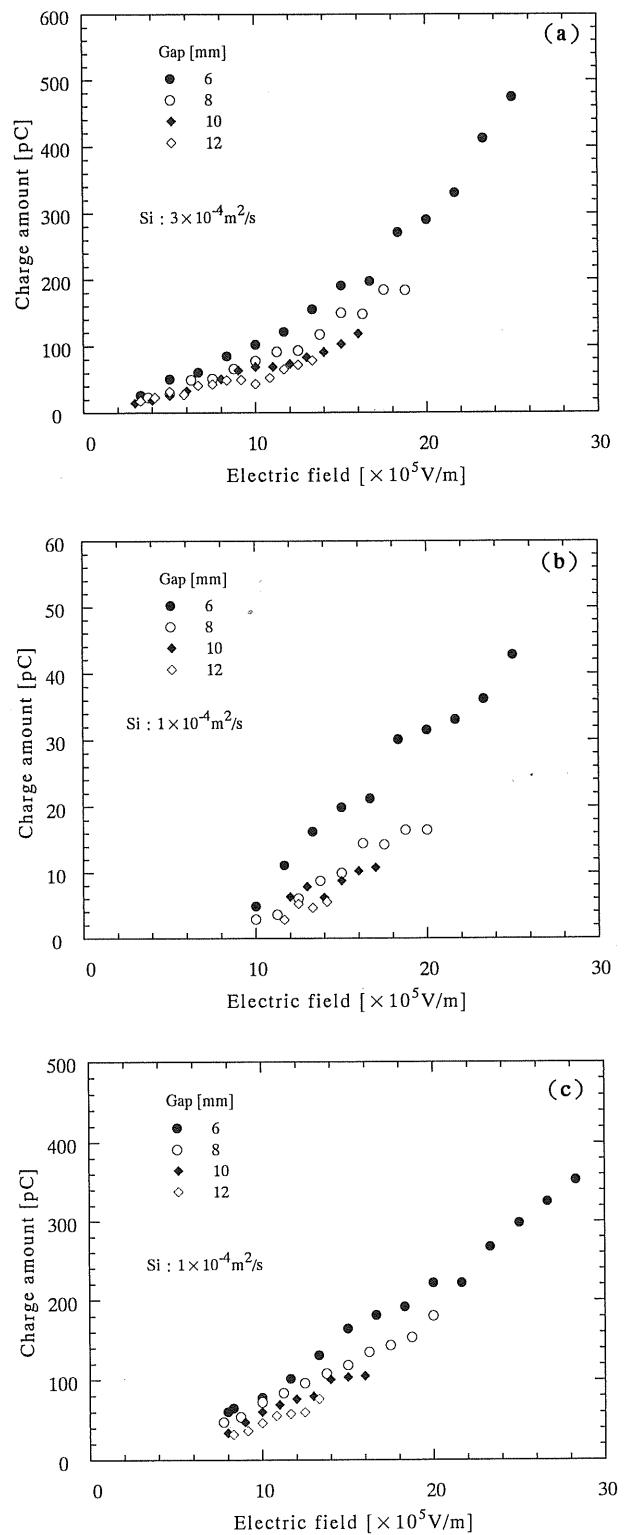


図 13 粒子電荷量の印加電界依存性
Fig. 13 Dependency of particle charge amount on applied electric field.
(a) Glassy carbon, (b) Steel [diameter : 1 mm], (c) Steel [diameter : 2 mm].

れ以上になると印加電圧の 2 乗で増加しているように見える。横軸を電界強度で目盛ったのが図 13 である。図 13 (a), (b), (c) ともに同一電界強度ならば電極間隔が小さいほど電荷量が大きい。式 (1) から推定すると電界強度

が同じならば同一電荷量になるはずであるが、実際にはこのように電極間距離の影響が出ている。式(1)で求めた電荷は、図13の値よりもはるかに大きい。これより、火花放電による電荷交換が十分大きくなないと、電流波形として十分に検出されていない可能性が示された。今後、粒子の帶電量を粒子の運動、電流波形からそれぞれ求め、比較・検討していく必要がある。また、粒子径の小さいスチール粒子では帶電量のばらつきが大きいが、帶電量が小さいので電流波形に比して変位電流成分が大きくなり、帶電量の測定値に与える影響が大きかったためと考えられる。

7.まとめ

液化高分子中に混入した不純物を静電気的に除去する方法を模索するため、液化高分子を模擬したシリコーン油に球状導電性粒子を入れ、平行平板電極間での粒子の挙動の観測を行った。印加電圧、シリコーン油の粘性といったパラメータを変化させて、それらのパラメータが粒子の挙動に及ぼす影響を調べた。さらに、粒子が電極と接触する際の電流波形および電荷量を求め、理論値と比較した。このとき、理論値と実験値の比較しやすい真球状の粒子についてデータの解析を行った。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- (1) シリコーン油中での導電性粒子の静的臨界電圧は実験値と理論値がほぼ一致した。
- (2) 静的臨界電圧を越えた後の粒子は上昇運動、上部停止、下降運動、下部停止の四つの運動を繰り返しながら電極間を往復運動する。
- (3) 粒子が電極で停止する運動は、粒子の運動とともに粒子周辺にシリコーン油の流れが生じ、粒子が電極に達しても、すぐにはその流れが治まらないため、流れが停止するまでの間、粒子が電極に押し付けられているためと考えられる。
- (4) 粒子の運動は、単なる加速運動ではなく、電極に

到達する前に減速することがわかった。これは、粒子と電極の間にはさまれた粘性流体が押し出されるときに、ダンパーとして作用することで説明される。

(5) 粒子と電極間での電荷交換による電荷量は電界と共に増加していくが、理論的予測値よりもはるかに小さい。また、シリコーン油の粘度が電荷量に影響を及ぼすこともわかった。粘度が低いほど、電荷量は大きくなる。

(6) 粒子と電極間での電荷交換は、間に挟まれたシリコーン油の油膜を通しての放電によって行われていると考えられた。

以上の結果より、さらに、粒子の帶電量を粒子運動から計算し、そのときの電流波形から求めた結果と比較・検討する必要が示された。また、今後、不均一電界中での粒子運動についても、実験および解析を行う予定である。

なお、本研究は、一部、文部省科学研究費（基盤研究(B) (2)）「プラスチック転換絶縁液体中に混入した微粒子の静電除去法の研究」の補助を受けた。

参考文献

- 1) 八塚京子、浅野和俊：静電気学会講演論文集'97, p. 277, 静電気学会 (1997).
- 2) 浅野和俊：プラスチック転換絶縁液体中に混入した微粒子の静電除去法の研究、科学研究費（基盤研究(B) (2)）研究成果報告書[08455482], (1998)
- 3) H.A. Pohl : J. Appl. Phys., **22** (1950) 869
- 4) K. Asano, K. Yatsuzuka, Y. Higashiyama : J. Electrostat., **30** (1993) 65
- 5) 安納憲次、東山禎夫、浅野和俊：電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p. 217 (1990)
- 6) 崔暢洛、八塚京子、浅野和俊：電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p. 19 (1998)
- 7) 静電気学会編：新版静電気ハンドブック, p. 1014, オーム社 (1998)
- 8) A.Y.H. Cho : J. Appl. Phys., **35** (1964) 2561