

論 文

粘性絶縁液体中で平行平板電極間を運動する
導電性粒子の挙動

崔 暢 洛*, 八 塚 京 子*, 浅 野 和 俊*

(2000年3月31日受付, 2000年7月21日受理)

Motion of a Conductive Particle between Parallel Plate Electrodes
in Viscous Dielectric Liquid

Changrag CHOI,* Kyoko YATSUZUKA* and Kazutoshi ASANO*

(Received March 31, 2000; Accepted July 21, 2000)

When the plastic waste is melted or liquefied for the purpose of reproduction, impurities must be removed to get high quality material. The electrostatic force seems to be the most suitable force to remove such impurities from liquefied plastics. In this research, the motion of spherical particles between parallel plate electrodes, simulating the motion of impurities in viscous liquefied plastic, has been carefully investigated with a high-speed camera. The particle motion is classified into four stages: settling on the lower electrode, moving upward, settling on the upper electrode and moving downward. The particle leaving one of the electrodes, gradually accelerates, and then decelerates before it collides the counter electrode. This deceleration could be explained by the damper effect of silicone oil layer between the particle and the electrode. It was found that a particle settles on the electrode for a while, even on the upper electrode against gravitational force. Settling time abruptly shortened with higher applied voltage. A numerical calculation of the average velocity revealed that the charge on the particle is about one half of that predicted by induction charging.

1. まえがき

近年, 機能性の高い高分子材料は, 工業分野のみならず日常生活でも幅広く用いられている。しかし, 使用後は現在で約 75 %が埋立か焼却処理され, 再利用は約 25 %に留まっている。材料によっては焼却時にダイオキシンなどの有毒ガスを発生するので, 分別回収してそれぞれの材料に適した廃棄法で処理することが望まれるが, 種類が多く, 数種のプラスチック部品を組み合わせた製品もあり, 材料ごとの回収は事実上不可能に近い。焼却しない廃棄プラスチックは埋め立て処理されるが, 埋立地不足や環境保護の上で重大な問題が生じている。また, 原料である石油資源が枯渇の危機に瀕していることも良

く知られるところである。

日本では, 一般廃棄物のリサイクルを進めるために 1996年に“容器包装リサイクル法”が公布され, 2000年までに容器包装メーカーやその他の利用者に対して, 廃棄プラスチックの再資源化が義務づけられ, 高分子材料の再利用が緊急の課題となっている。

再利用法の一つに回収した廃棄高分子材料を液化し, 再成形する方法があるが, 液化した高分子中に不純物が混入していると再製品の品質低下を招く。不純物の除去法にはフィルタ法や重力による沈降法があるが, フィルタの交換等のメンテナンスが容易ではなく, 特に微粒子の除去は難しい。さらに, 液化高分子の粘度が高いと微粒子の除去に時間がかかる。これに対して静電気力を利用する方法は, 実用化された静電気応用機器から類推しても, 構造が簡単で保守が容易であり, 短時間に大量処理が可能であると考えられる。小さい粒子で静電気力の効果が大きいことも有利な点である。

我々はこれまで, 液化高分子をシリコーン油で模擬し,

キーワード: リサイクリン, 球状導電性粒子, 誘導帯電, 粒子往復運動, 電極上粒子停止

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

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

混入不純物に炭化物を想定し、電界で誘導帯電した導電性粒子の電界下での運動を調べてきた。前報では、誘導帯電した粒子が動き始める電圧（静的臨界電圧）は理論値と良く一致すること、粒子の往復運動に予想に反して上部電極でも停止する現象が含まれることを示した。また、対向電極手前で粒子は減速すること、粒子-電極間の電荷交換に伴う電流パルスを積分しても、粒子の電荷量の一部でしかないことも示した。

本報では、平行平板電極系で粒子の電界運動をさらに詳しく実験的に検討し、単純な運動モデルによる計算との比較から、粒子の持つ電荷量の推定を行った。

2. 実験装置および方法

実験装置は前報と同様である(図1)。電極は鏡面仕上げした直径 70 mm の 2 枚の真鍮円盤からなる平行平板電極系で、マイクロメータで電極間隔を 6~12 mm の範囲で変えた。透明プラスチック容器に電極系を入れ、シリコン油で満たした後、正極性または負極性の可変直流高圧電源(東和計測, KT-030K1PS, または AKT-050K1N)

を用い、上部電極に直流高電圧を印加した。印加電圧は 1/1000 に分圧して測定した。

粒子が電極に接触すると電荷交換に伴うパルス電流が流れる。電流波形は下部電極と接地間に挿入した 1 MΩ の測定抵抗とデジタルオシロスコープ (Tektronix, 2430A) で検出し、パーソナルコンピュータ (NEC, 9801RX) に波形を取り込んだ。オシロスコープを過大電圧から保護するため、サージアブソーバ (耐圧 390 V) を並列に接続している。

狭い電極間で粒子が高速に往復運動するので、高速度ビデオカメラ (フォトロン, FASTCAM-ultima) を用いて粒子の運動を撮影した。高速度カメラを電流パルスでトリガして撮影を開始し、一旦ビデオテープに録画して、コマ送りしながらテレビ画面上で粒子運動を詳細に調べた。

シリコン油 (東レ・ダウコーニング・シリコン: SH200) は、動粘度, $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (100 cSt, 比重: 0.960), $3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (300 cSt, 比重: 0.970), $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (500 cSt, 比重: 0.971) の 3 種類を用いた。

球状導電性粒子には、グラッシーカーボン (ニラコ) と

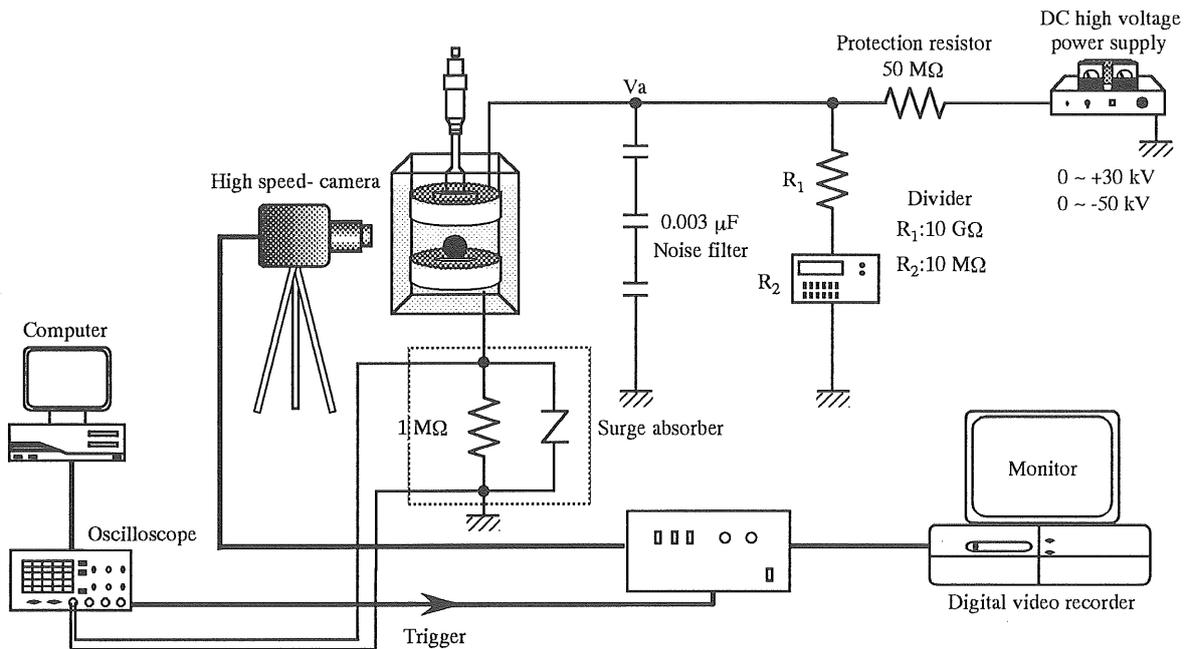


図1 実験装置図
Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

表1 粒子の特性
Table 1 Characteristics of particle

Particle	Shape	Diameter [mm]	Weight [mg]	Specific gravity [-]	Specific gravity [-] (nominal)	Resistivity [Ωm]
Glassy carbon	Sphere	2.20	7.9	1.4	1.5	$40 \sim 45 \times 10^{-6}$
		2.25	8.9	1.5	1.5	
		2.31	9.9	1.5	1.5	
Steel	Sphere	1.0	4.27	8.2	7.8 ~ 7.9	9.71×10^{-8}
		2.0	32.5	7.8	7.8 ~ 7.9	

ベアリング用スチール粒子 (直径1mm, 2mm) を用いた。グラッシーカーボン粒子の公称直径は2mm, 密度 1500kg/m^3 であるが, 個々の粒子直径をレーザスキャンダイアメータ (KEYENCE LS-3001, LS-3030) で精密測定した。これと化学天秤 (Shimadzu, TYPE L-160DTP) で重量を測定して密度を算出した。結果を表1に示す。

3. 実験結果

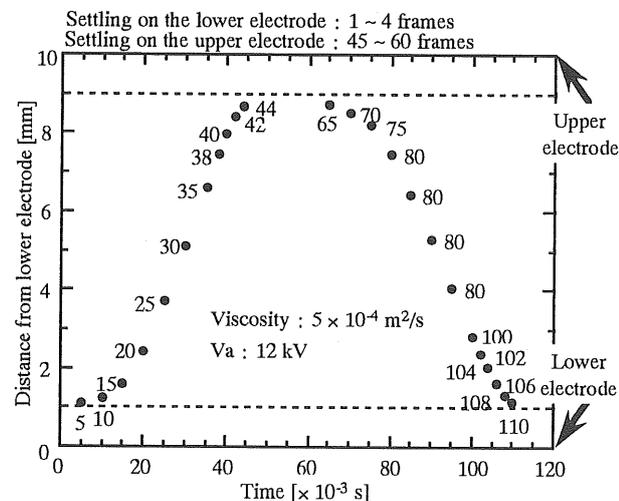
3.1 粒子の運動

静的臨界電圧を超えた印加電圧では, 誘導帯電した粒子が電極間で往復運動する。図2にグラッシーカーボン粒子とスチール粒子の代表的な一往復の例を示す。下降運動した粒子が下部電極に接触した瞬間を0秒として時間軸を取った。図中の黒丸は粒子の中心位置を示している。このような図から粒子の運動の詳しい解析を行った。前報¹⁾と同様, 粒子の1往復の運動は下部停止, 上昇運動, 上部停止, 下降運動の4つに大別され, 粒子が電極を離れ

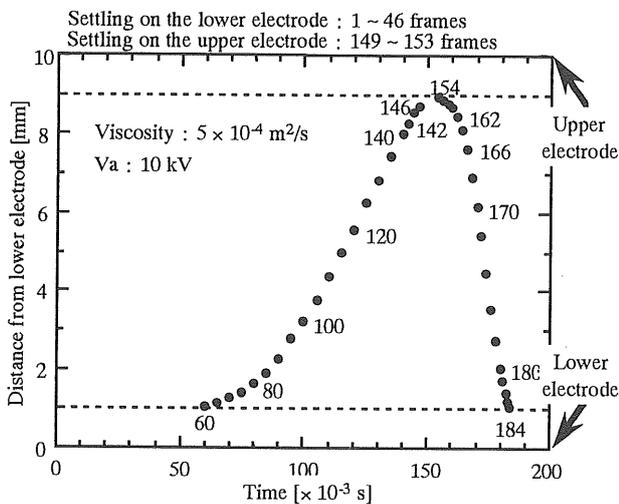
るときにはゆっくりと加速して, 対向電極直前で減速する。対向電極手前での減速は印加電圧が低くシリコン油の粘度が高いほど著しかった。

3.2 平均運動速度

グラッシーカーボン粒子とスチール粒子の平均運動速度を図3に示す。平均運動速度は, 粒子が一方の電極から対向電極に達するまでに動いた距離, 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求めた。粒子の運動時間には両電極での停止時間は含まれていない。粒子の平均運動速度は印加電圧とともに増加する。グラッシーカーボン粒子の密度 (1500kg/m^3) は, シリコン油の密度 (960kg/m^3) より大きいので, 下降平均運動速度が上昇平均運動速度より大きくなることを予測していたが, 動粘度 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ では下降平均運動速度が上昇平均運動を若干上回るものの, 3 および $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ では上昇平均運動速度が下降平均運動速度を上回った。測定誤差の可能性を確かめるため数十回以上測定を繰り返したがい

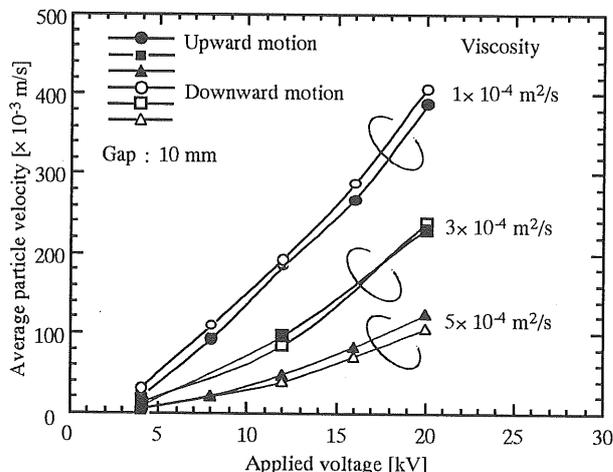


(a) Glassy carbon [weight : 9.9 mg], (250 frames/s)

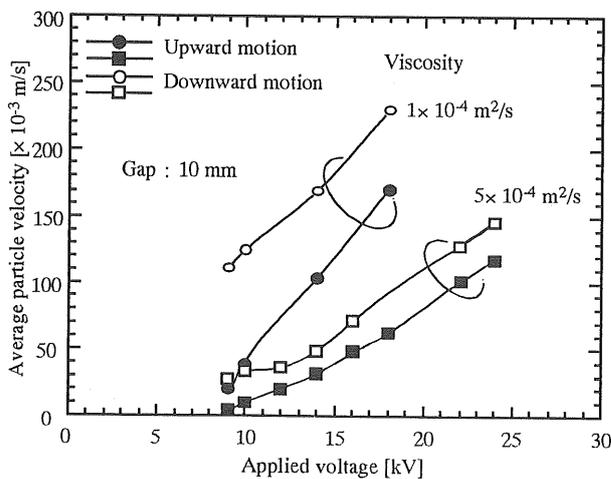


(b) Steel [diameter : 2 mm], (125 frames/s)

図2 運動の様子
Fig. 2 Particle motion



(a) Glassy carbon [diameter : 2.31 mm, weight : 9.9 mg]



(b) Steel [diameter : 2 mm, weight : 32.5 mg]

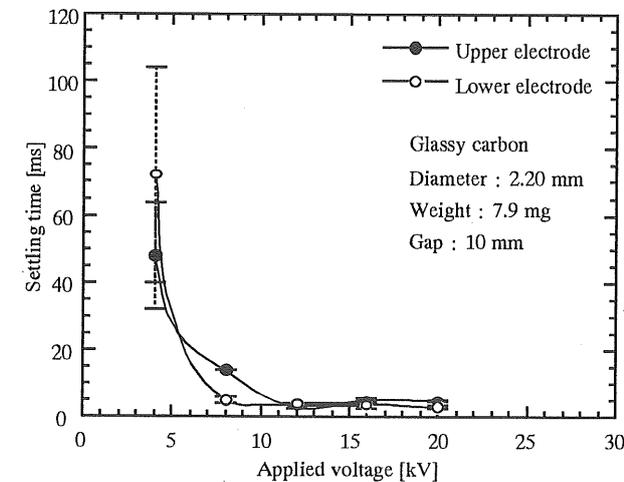
図3 平均運動速度
Fig. 3 Average particle velocity

ずれも同じ結果が得られ、間違いでないことが確かめられた。さらに印加電圧をあげると、粒子に働く静電気力が重力よりかなり大きくなり、上昇平均運動速度と下降平均運動速度はほぼ同じ値を示す。

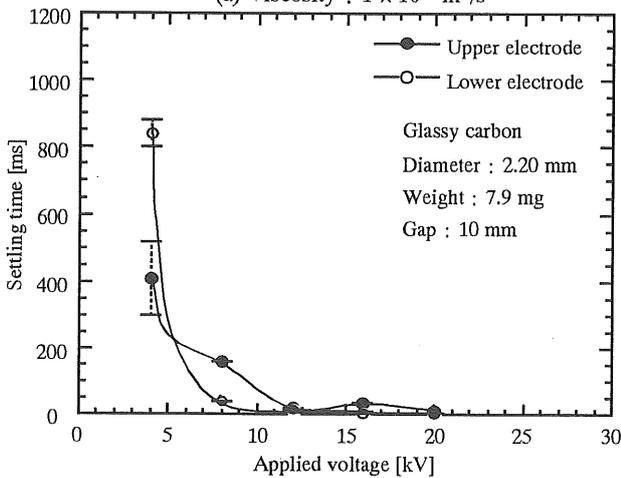
スチール粒子の密度はシリコン油の8倍と大きく、常に下降平均運動速度が大きい。また、シリコン油の粘度が高いほど上昇・下降平均運動速度の差は小さい。

3.3 停止時間

図4にグラッシーカーボン粒子の電極上停止時間を示す。停止時間は印加電圧の増加とともに急激に短くなる。静的臨界電圧を少し超えた電圧では下部停止時間が上部停止時間より長いものの、それ以上の印加電圧では予想に反して上部停止時間が長い。また、図4(b)に示すようにシリコン油の粘度が $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ と高くなると、停止時間は $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ の場合の10倍も長くなった。直径2mmのスチール粒子では、密度が高いため下部停止時間は長く、上部停止時間は極めて短い。



(a) Viscosity : $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$



(b) Viscosity : $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

図4 停止時間

Fig. 4 Settling time

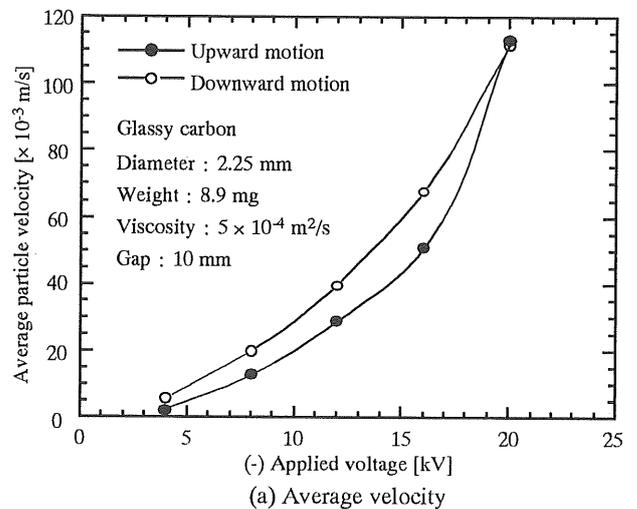
3.4 電極の極性の影響

以上の結果は上部電極に正極性の電圧を印加した場合であるが、極性効果を調べるために負極性の直流高電圧を印加して、粒子の運動を調べた。平均速度および電極上停止時間を図5に示す。図5(a)の平均速度の曲線と図3(a)の動粘度 $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ の曲線を比較すると、上部電極が正の場合(図3(a))には上昇平均運動速度が下降平均運動速度を上回ったのに対し、上部電極を負とすると(図5(a))下降平均運動速度が上昇平均運動速度を上回った。さらに図4(a)と図5(b)を比較して、上部電極が正の場合とは異なり、上部電極が負の場合には測定範囲のすべての印加電圧で下部停止時間が上部停止時間を上回った。

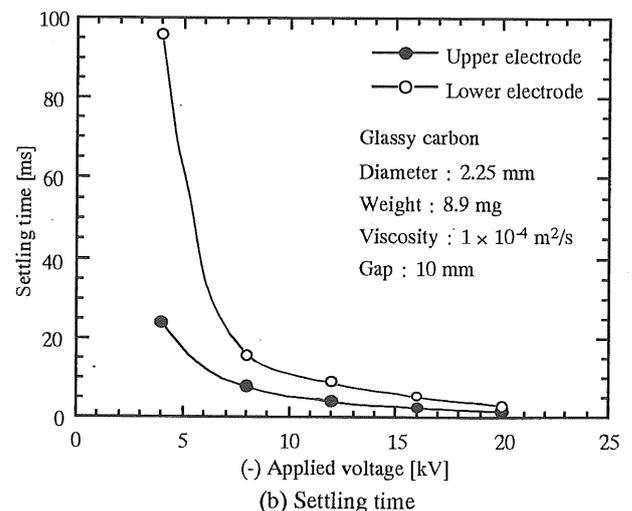
4. 検討

4.1 結果の考察

前報でも述べたように、接触している電極から十分な電荷を得た粒子は、静電気力により加速しながら対向電極に



(a) Average velocity



(b) Settling time

図5 負印加電圧下での粒子の運動

Fig. 5 Particle motion with negative applied voltage

向かい、対向電極手前で減速する(図2)。減速が粒子と電極に挟まれたシリコン油の層のダンパー効果と考えられるのに対し、粒子が電極を離れるときの加速が小さい理由の一つとして、平板電極近傍の粒子に働く力が弱いことがあげられる²⁾。また、電極近傍での粘性抵抗が大きいことも十分に考えられる。

印加電圧が比較的低い時には上昇および下降平均運動速度に差があるが、印加電圧が十分に高くなると差が小さくなる。粒子に働く重力は浮力よりも大きいので、下降時の平均運動速度は常に上昇時の平均運動速度より大きいと予測していたが、上昇平均運動速度が下降平均運動速度を上回る現象が観察された。これは、粒子の密度が小さく、上部電極に正電圧を印加したとき、また、シリコン油の粘度が大きい場合に見られる(図3(a))。これについてはさらに検討する必要がある。

粒子の往復運動時に、粒子は到達した電極上でしばらく停止する。図4から、密度の小さいグラッシーカーボン粒子は上部電極に予想以上に長く停止する。粒子の両電極での停止は、粒子の運動に伴って生じるシリコン油の流動が粒子が電極に達した後もすぐには止まらず、流れが停止するまで粒子が電極に押し付けられるためと考えられる。スチール粒子でも直径1mmの場合には、上部電極でしばらく停止することをすでに報告した¹⁾。印加電圧の増加とともに粒子の停止時間は急激に短くなる。直径2mmのスチール粒子の場合、密度がシリコン油よりかなり大きいため、上部電極で停止することなく下部電極に向かって運動するので、電極面での反発力も運動の解析に含める必要があると考えられる。

印加電圧の極性の効果は、前述のように上昇平均運動速度と下降平均運動速度の差に現れるだけでなく、上部停止時間と下部停止時間の差にも同様に見られた。この原因はまだ分かっていないが、実験装置を取り囲む壁の電位などによる電界分布の非対称性や、放電を介した電荷交換現象に伴う空間電荷の影響が考えられる。

4.2 粒子の運動と電荷量の推定

粒子が電極に接触した瞬間に、粒子が運んできた電荷は対向電極上の反対電荷と中和され、引き続いて粒子が誘導帯電される時にパルス電流が流れる。従って、パルス電流波形を積分して粒子の誘導帯電量が得られると考えていた。しかし、前報でパルス電流の積分から求めた電荷量は実際よりもかなり小さいことが分かった¹⁾。ここでは、最も単純な粒子の運動モデルとして、無限に広がる粘性流体中を粒子が静電気力により加速する場合の運動を記述し、実験結果と比較して粒子の電荷量を推定

する。

平等電界中の下部電極に置かれた球状粒子が得る電荷量 q_0 は、平均電界を E として次の式で表される^{2, 3)}。

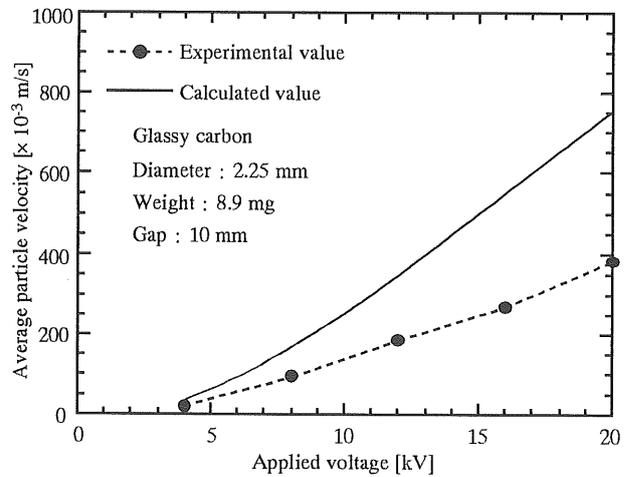
$$q_0 = 1.65 \times 4\pi \epsilon a^2 E \quad (1)$$

ここで、 a : 粒子の半径[m], ϵ : 媒質の誘電率 ($\epsilon_r \epsilon_0$)

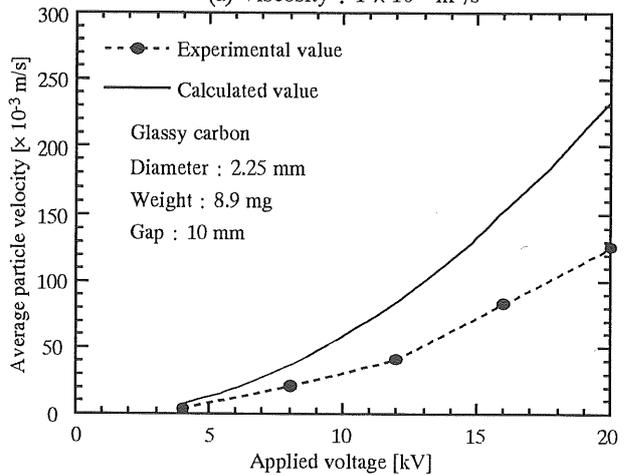
従って、電界 E のもとで粒子速度が小さく、粘性抵抗がストークス抵抗と近似できる場合の粒子の運動方程式は次式で表される。

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + 6\pi a \eta \frac{dx}{dt} = q_0 E - (M - m)g \quad (2)$$

但し、 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 : 下部電極からの移動距離[m], η : 液体の粘性係数 [Pa · s], g : 重力加速度 [m/s²]



(a) Viscosity : $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$



(b) Viscosity : $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

図6 平均速度の比較

Fig. 6 Comparison of experimental and calculated velocities

この式の解は次のように求められる。

$$v_u = \frac{dx}{dt} = \frac{q_o E - (M - m) g}{6 \pi a \eta} \left(1 - e^{-\frac{6 \pi a \eta t}{M}} \right) \quad (3)$$

粒子は電極を離れたのち加速されるが、粘性抵抗のために一定速度に収束する。電極間距離が十分長ければ粒子速度は終末速度に到達するはずであるが、我々の実験では電極間隔が狭いので、対向電極の位置ではまだ終末速度に至っていない。また、電極を無視し、無限に広がるシリコン油中で粒子が運動すると仮定しているので、対向電極前での減速は説明されていない。そこで、第1次近似として(3)式より対向電極に達するまでの時間を数値計算により求め、平均粒子速度を計算して実験値と比較した。

図6に、平均粒子速度の上昇運動に対して、実験値と理論値を比較した。図より、粘度が異なっても粒子の平均

速度は理論値に比べてかなり遅いことが分かる。このため、粒子の電荷量を(1)式の理論値より小さいと仮定して実験値に合うように計算し直した結果が図7である。粒子の電荷量が誘導帯電の理論値の40~60%である時、実験値と良く合っている。電極と粒子の電荷交換が一種の緩和現象とすれば、緩和終了前に静電気力により粒子が動き始めたために電荷量が小さかったと考えられる。粒子と電極間の電荷交換は絶縁液体フィルムを介した放電で行われていると考えられることから、放電開始および終了電圧の影響も考えられる。

5. まとめ

前報に引き続き、固形導電性不純物を静電気力を用いて除去する方法を、液化高分子をシリコン油で、固形導電性不純物を球状導電性粒子で模擬し、平行平板電極系での粒子の挙動を調べた。また、平均運動速度の実験結果と数値計算で求めた理論値との比較を行った。以下に結果をまとめる。

(1) 平等電界中で粒子は、下部停止、上昇運動、上部停止、下降運動の4つの運動を繰り返しながら往復するが、粒子密度が小さく媒質の粘度が高い場合に、上昇平均運動速度が下降平均運動速度を上回ることが分かった。この原因についてはまだよく分かってはいない。

(2) 粒子の上部電極停止時間が予想に反して下部停止時間よりも若干長いことが示された。この原因として、粒子の運動に伴ってシリコン油の流れが生じ、粒子を電極に押し付けていることが考えられる。

(3) 印加電圧の極性による効果が、上昇・下降平均運動速度の差や、上部および下部電極停止時間の差に現れた。原因はまだ明確になっていないが、実験装置を取り囲む壁の電位による電界分布の非対称性や、電荷交換が放電を伴うことによる空間電荷の発生が考えられる。

(4) 粒子の平均運動速度について実験値と理論値を比較した結果、実際の粒子の速度は理論値より小さく、これから推定した粒子の電荷量が理論値の半分程度であることが示された。

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) 静電気学会 編: 新版静電気ハンドブック, p. 1012, オーム社 (1998)
- 3) 浅野和俊, 大橋朝夫: 静電気工学演習, p. 18, 朝倉書店 (1985)
- 4) C. Choi, K. Yatsuzuka and K. Asano: IEEE IAS ANNUAL MEETING, p. 1831 (1999)
- 5) 崔暢洛, 八塚京子, 浅野和俊: 静電気学会講演論文集' 99, p. 263 (1999)

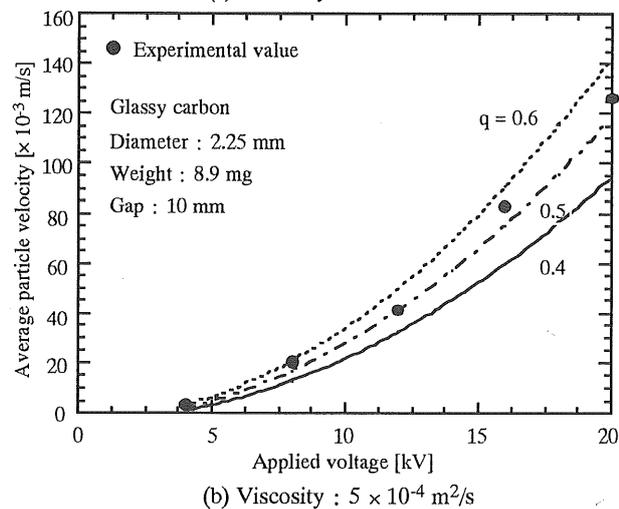
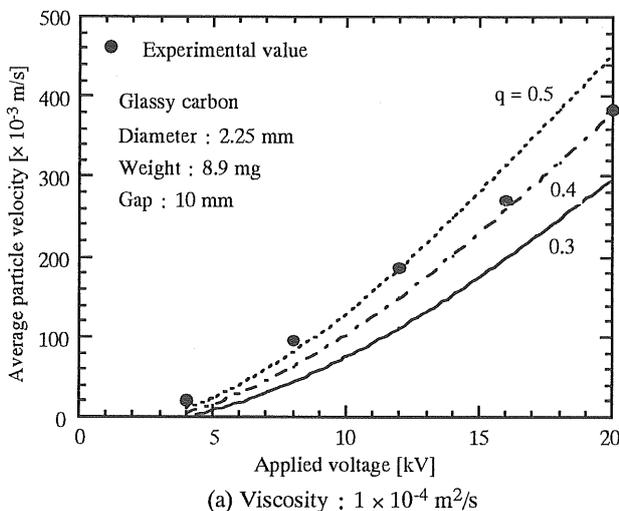


図7 実際の電荷量の推定
Fig. 7 Estimation of particle charge