

帯電した高分子表面と液滴間の多重放電

下川博文¹ ・ 中村貴宣²

¹ 電気電子工学科

² ワイ・エイ・シイ（株）

Multiple Discharge between Charged Polymer Surfaces and droplets

Hirofumi SHIMOKAWA¹⁾, Takanobu NAKAMURA²⁾

Abstract

In the case of the discharge from the pendent drop to the charged polymer surface, an electrostatically stressed liquid surface is distorted into a stable conical shape. This report presents the results of the electrostatic discharge between a pendent drop and the charged polymer surface. It was found that the multiple discharge appears only in the case of the positive charging polymer. This discharge depended on the conductivity or the surface tension of the sample water. It is considered that this multiple discharge is a kind of Trichel pulse corona.

Key Words : Electrostatic discharge, Pure water, Pendent drop, Trichel pulse, Corona noise

1 はじめに

静電気放電現象は科学技術が高度化し、純度の高い材料を使うようになるほど問題化する傾向があり、直接的のみならず間接的に障災害の原因となることは少なくない。通常は帯電物とアースされた導電性の物質、特に金属間で発生するが、液体と金属あるいは、液体と帯電した絶縁物間の放電も考えられる。液体からの放電の例として送電線上の液滴からのコロナ放電、あるいはタンカー洗浄時の噴霧帯電から発生する放電などがある。

金属電極系でつくられる不平等電界からのコロナ放電に関する多くの報告がある^{1) - 8)}。特に、負コロナ放電は初放電に続いて多数の放電が規則的に発生する場合があることが知られている。いわゆるトリチェルパルスと呼ばれている放電で、送電線から発生する場合にはコロナ雑音の一因と考えられている。トリチェルパルスの

形成機構についてのシミュレーションも行われており、 γ_p 作用と γ_i 作用が重要な役割を演じることが明らかにされている^{9) 10)}。

水滴からの放電は金属電極の場合と異なることが知られている^{11) - 15)}。液滴の場合、次の点が金属電極と大きく異なると考えられる。

(1) 液体の導電率は金属に比べて数桁以上小さく、また容易に変化させられる。

(2) 放電時に液滴の変形が伴う。

(3) 変形した液滴からのジェットの噴出が考えられる。液滴から帯電した絶縁物への放電に関する報告例は多くない¹⁴⁾。この場合上記の特徴に加えて、次のパラメータが新たに加わる。

(4) 放電時に帯電体の電位が変化する。

本研究は、種々の純度の水滴と高分子間の静電気放電

について調べたものである。多重放電は高分子側が正帯電のときにのみ発生した。試料水の導電率依存性、表面張力依存性について興味ある結果が得られた。放電電荷量についても詳細に測定した。得られた結果から放電機構について考察する。

2 測定

2・1 試料および荷電方法

使用した高分子材料は厚さ5mm、大きさ $7 \times 7 \text{ cm}^2$ のテフロン (PTFE) である。試料厚を大きくすると高電圧の帯電表面を容易に得ることができる。テフロン試料は荷電の前にアルコール除電した。図1にコロナ荷電装置を示す。上部の16本の針電極と網電極 (メッシュ20) の距離は約10mm、網電極と試料間の距離は約15mmである。針電極に $\pm 13000 \sim \pm 15000 \text{ V}$ を印加し、網電極に \pm 数千Vを印加した。針電極と網電極間でコロナ放電させ、網電極電圧で制御すると均一に帯電した試料表面が得られる。図2に表面電位計 (Trek製341) で測定した2次元表面電位分布の一例を示す。帯電表面はふんい気中の電荷の影響を受けやすいので、取扱いには細心の注意が必要である。

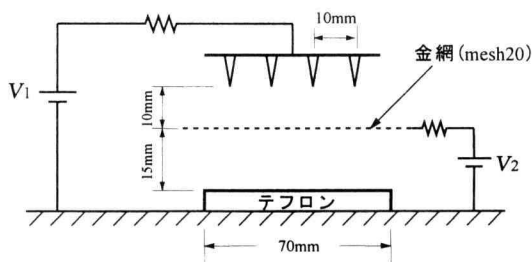


図1 コロナ荷電装置

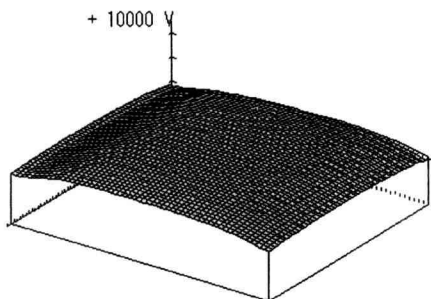


図2 表面電位分布の一例

液体試料は製造時 $18.3 \text{ M}\Omega \text{ cm}$ の超純水である。使用時には約 $10 \text{ M}\Omega \text{ cm}$ に抵抗率は減少していた。水の表面張力はウイヘルミー式 (協和界面科学製CBVP-A3型) を使って測定した。表面張力の調整は高純水にエタノールを適量添加した。

2・2 測定装置

図3は放電現象の測定装置の概略図である。水滴の形状は直径約2.5mmの半球である。高分子表面を数千V以上に帯電させた場合に、水滴をゆっくりとマイクロメータを使って接近させる (数mm程度) と変形の後放電する。放電後には、再びもとの形状に復帰する。放電時の過渡電流を抵抗 R (100Ω) の電圧降下としてデジタル・オシロスコープ (ソニーテクトロニクス製DSA601, 500 MS/s , 32kwords) で測定した。放電時の水滴の様子は高速度カメラ (ナック製MEMRECAMci, 2000 コマ/s) で観測した。

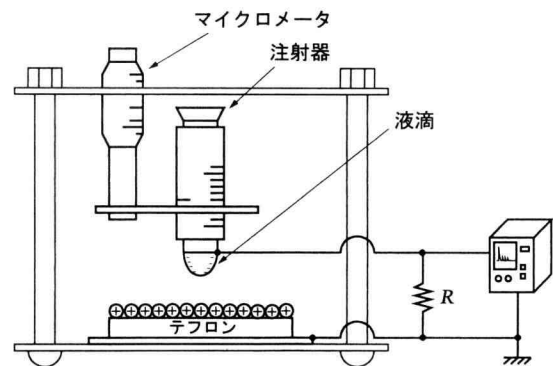


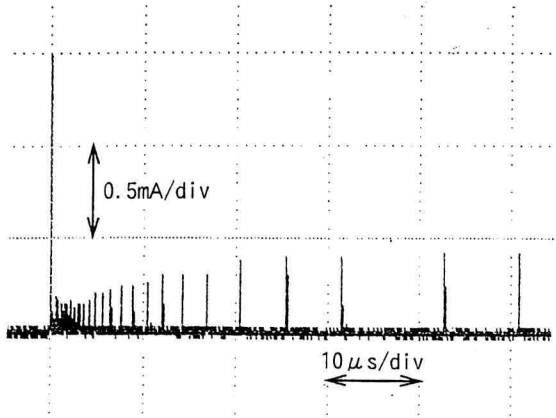
図3 放電電流の測定装置

3 結果

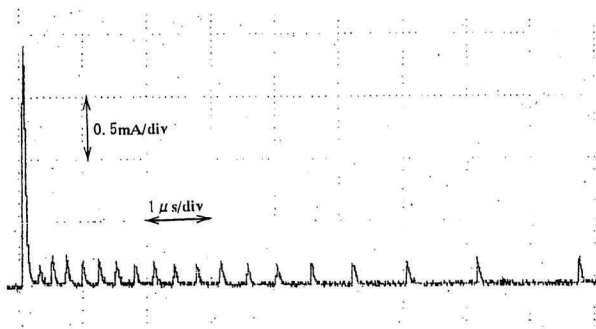
3・1 高純水の放電電流波形

帯電電圧が $+7250 \text{ V}$ 時の超純水による放電電流波形の一例を図4に示す。図4(a)は長時間領域 ($55 \mu \text{ s}$ まで) の電流波形である。最初の大きな放電 (初放電) に続いて小さな放電 (小放電) が数十回発生することがわかる。図4(b)は(a)図の短時間領域を示したものである。初放電が起きた後、次の小放電が完全に独立して発生する。各放電は急峻な立ち上がりを示し、数十 ns で終了する。さらに、小放電の電流値は徐々に大きくなり、また放電間隔は増加することがわかる。

帯電電圧が -7230 V 時の高純水の放電電流波形を図5



(a) 長時間領域



(b) 短時間領域

図4 高純水の放電電流波形 (正帯電の場合)

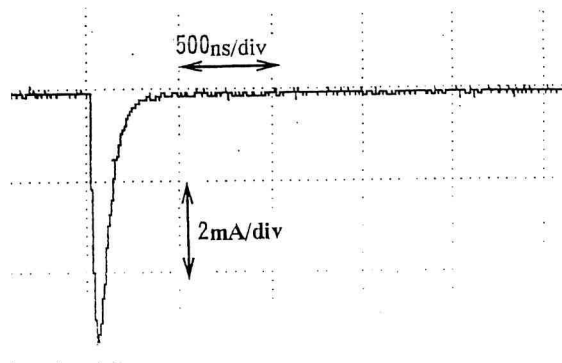


図5 高純水の放電電流波形 (負帯電の場合)

に示す。正帯電時とは大きく異なり、単発放電しか発生しない。つまり、液滴から高分子帯電表面への多重放電は高分子表面が正帯電の場合に発生する現象である。

3・2 帯電電圧依存性

図6は放電後に測定した表面電位分布の一例である。放電の跡が電位孔として検出される。この電位孔の体積から放電に関与した電荷量を算出することができる。

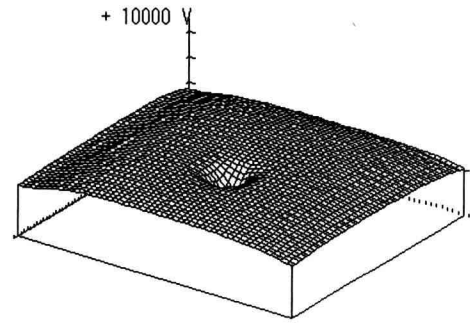


図6 放電後の表面電位分布の一例

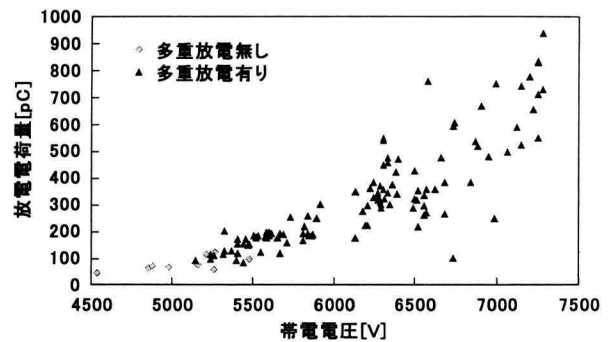


図7 放電電荷量の帯電電圧依存性

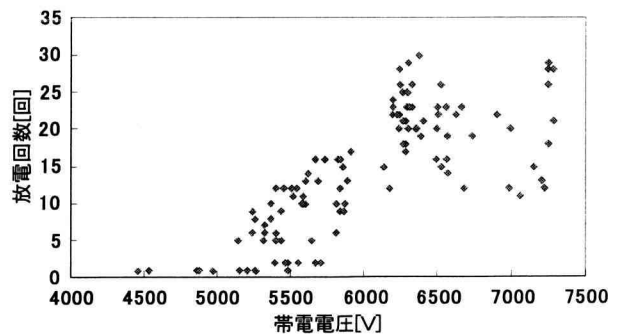
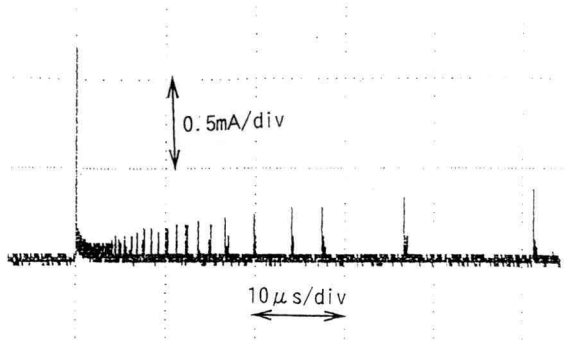


図8 放電回数の帯電電圧依存性

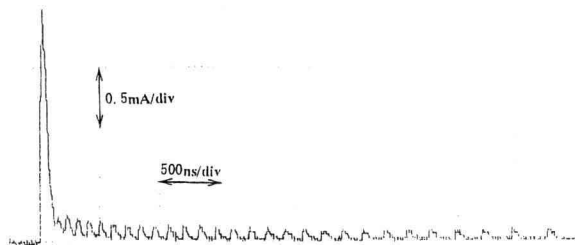
+4500Vから+7500Vまでの放電電荷量の帯電電圧依存性を図7に示す。放電電荷量は+4500V～+5000Vでは数十pCであるが、帯電電圧の上昇とともに大きくなり、+7300Vでは600pC～950pCで1桁以上の増加を示す。さらに、同図から帯電電圧が+5500V以上になると確実に多重放電が発生し、+5000V以下では多重放電は観測されないことがわかる。

放電回数と帯電電圧の関係を示したのが図8である。

帯電電圧の上昇とともに放電回数は増加し、数十回に達することがわかる。

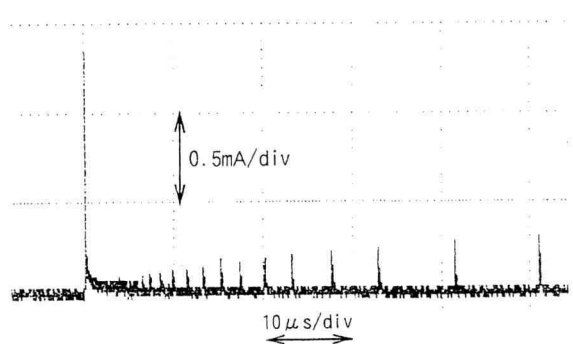


(a) 長時間領域

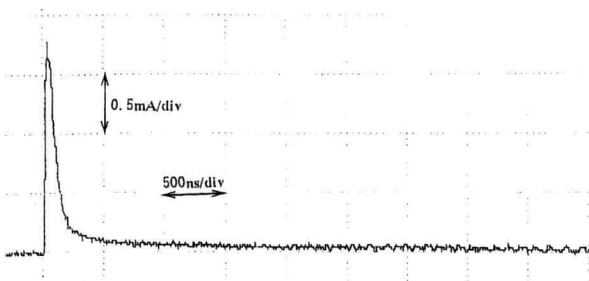


(b) 短時間領域

図9 蒸留水の放電電流波形



(a) 長時間領域



(b) 短時間領域

図10 水道水の放電電流波形

3・3 試料水の抵抗率の影響

1 MΩ cm程度の抵抗率の蒸留水から発生する放電電流波形の一例を図9に示す。帯電電圧は+7140Vである。高純水と同様に初放電に続いて小放電が数十回発生する。図4の高純水の場合と比較すると、長時間領域では違いは明確ではないが、短時間領域において放電の重なりがみられ、初放電が終わる前に小放電が発生している。さらに、各小放電の大きさは小さくなっている。

数kΩ cm程度の抵抗率の水道水の場合の放電電流波形の一例を図10に示す。帯電電圧は+7230Vである。高純水と同様に初放電が起こってから小放電が数十回連続して発生することがわかる。明確な違いは短時間領域の電流波形に現れている。小放電は重なり合い、初放電の波尾が長く続くように見える。短時間領域の小放電は極めて小さくなっている。

これらの結果から、多重放電は試料水の純度に依存し、高純水になるほど顕著に現れることがわかる。

3・4 表面張力の影響

純水とエタノールの混合液の導電率および表面張力の測定値を表1に示す。エタノール濃度が2.4%から7.0%変化しても導電率に変化はほとんどみられない。表面張力は純水の場合72.8dyne/cmであるが、エタノールを2.4%混入すると61.5dyne/cmに、7.0%混入すると52.9dyne/cmに減少する。

図11は多重放電に与えるエタノール濃度の影響を、帯電電圧+6000Vについて示したものである。時間領域は短時間側である。同図から、表面張力の低下とともに小放電は大幅に減少することがわかる。特に、エタノール濃度が7.0%になると小放電は短時間領域では観測されない。

多重放電は試料水の表面張力に密接に関係していることが明らかになった。

表1 純水とエタノール混合液の特性値

濃度 (%)	導電率 (μS/cm)	表面張力 (dyne/cm)
2.4	0.9~1.0	61.5
4.8		57.1
7.0		52.9

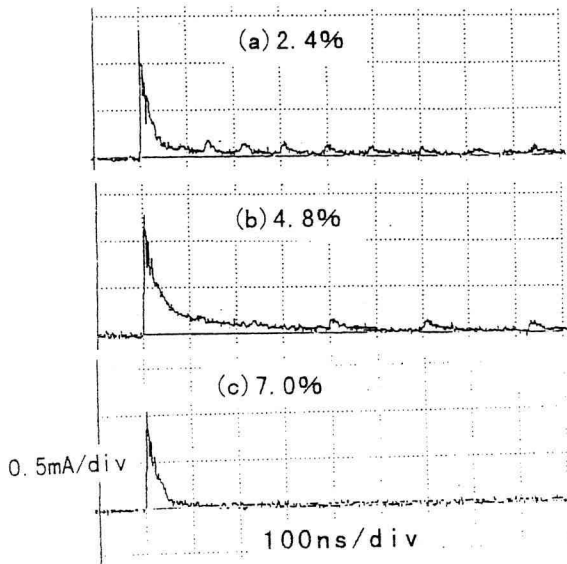


図11 エタノール濃度の影響

4 検討

水滴と正帯電高分子表面間で発生する多重放電は一定電圧以上で発生すること、および試料水の純度と表面張力に依存することが明らかになった。

本章では放電の累積電荷量の試料水純度依存性、各放電の放電時間の特徴、金属電極との比較についてさらに検討を加える。最後にそれらの結果から放電機構について考察する。

4・1 多重放電の累積電荷量

放電電流波形の面積から各放電の電荷量 Δq を求めることができる。累積電荷量は各放電の電荷量 Δq を加算して求めたものである。

図4の高純水の放電電流波形から求めた累積電荷量の変化を図12に示す。階段状になっているところはパルスが

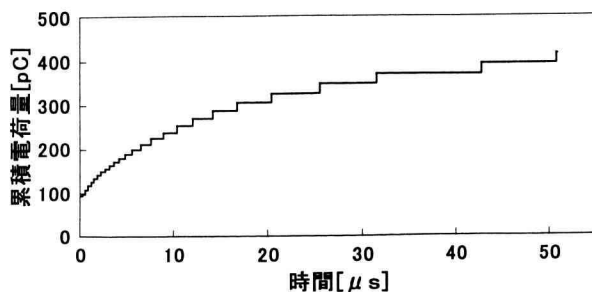


図12 累積電荷量の変化 (高純水)

発生した時刻である。初放電の電荷量は93.8 pCで、累積の電荷量は放電後小刻みに増加する。後半になるほど Δq が増加するのは、図4で小放電の大きさが増大することに対応している。累積電荷量は50 μ sまでの測定範囲では416 pCである。また、この時の電位分布から算出した放電電荷量は約712 pCであった。用いたデジタル・オシロスコープのメモリー容量の都合上、50 μ s以上の測定は行うことができなかったが、多重放電は50 μ s以上続くものと考えられる。

図9の蒸留水の放電電流波形から求めた累積電荷量の変化を図13に示す。蒸留水の場合は高純水と同様な変化を示し大きな違いはみられなかったが、小放電の後に更に小さな放電が2~3回続くことがあった。初放電の電荷量は83 pCで、50 μ sまでの累積電荷量は485 pCである。電位分布から算出した放電電荷量は648 pCであった。

図10の水道水の放電電流波形から求めた累積電荷量の変化を図14に示す。水道水の場合、初放電と小放電が短時間領域では重なり合うため分離は困難である。このため、5 μ sまでを初放電として電荷量を求めると310 pCなり、高純水および蒸留水に比べて非常に大きく算出

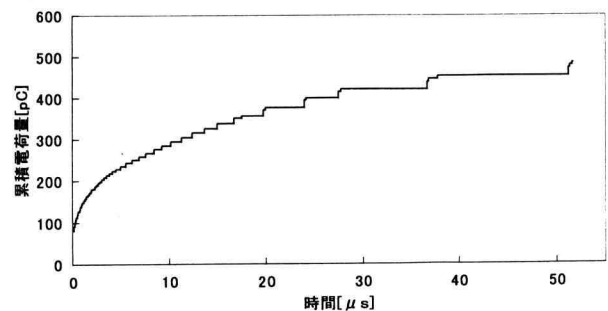


図13 累積電荷量の変化 (蒸留水)

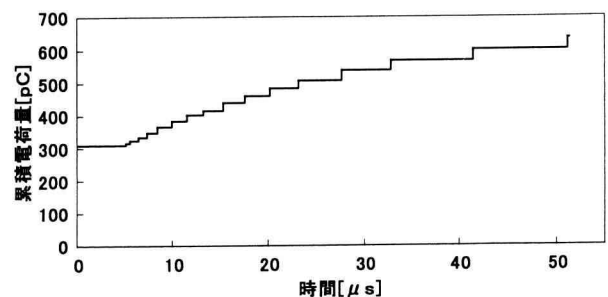


図14 累積電荷量の変化 (水道水)

される。50 μ sまでの累積電荷量は635 pCである。電位分布から算出した放電電荷量は595 pCであった。5 μ s以降の累積電荷量の変化は高純水および蒸留水の場合と本質的な違いはみられない。

4・2 放電時間からみた放電の特徴

個々の放電の放電時間 Δt を電荷量 Δq と電流の最大値 I_m 使って次式で定義する。

$$\Delta t = \frac{\Delta q}{I_m} \quad (1)$$

3種類の純度の試料水について、放電時間 Δt の放電発生時間依存性を示したのが図15である。同図から、高純水と蒸留水については Δt はどの放電についてもほぼ等しく、約50 nsであることがわかる。一方、水道水では高純水および蒸留水に比べて大きくなる。特に放電発生時間が数 μ s以上では約150 nsと3倍近く大きくなっている。このことから小放電は試料水の純度に強く依存していることがわかる。

電荷の緩和時間は液体の導電率に反比例することが知られている。高純水と蒸留水の導電率の違いは数倍であるが、水道水の導電率はさらに2桁から3桁大きい。水道水では放電時間 Δt が長くなることの原因は放電時の電荷移動が容易であることが関係することが示唆される。しかし、その機構の詳細は不明である。

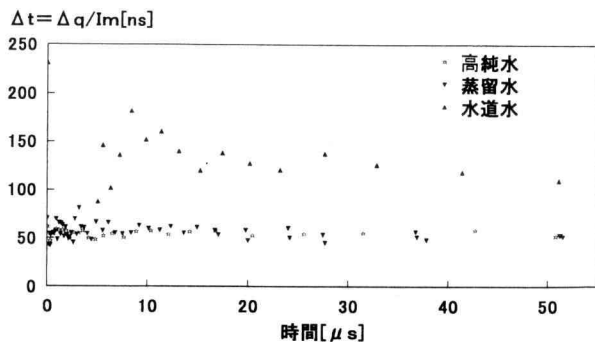


図15 放電時間の Δt の水の純度依存性

4・3 金属電極との比較

高電界下において、液体表面はコーン状 (Taylor cone) に変形したのち放電することが知られている¹⁶⁾。放電時の水滴先端の様子を高速度カメラで撮影した一例

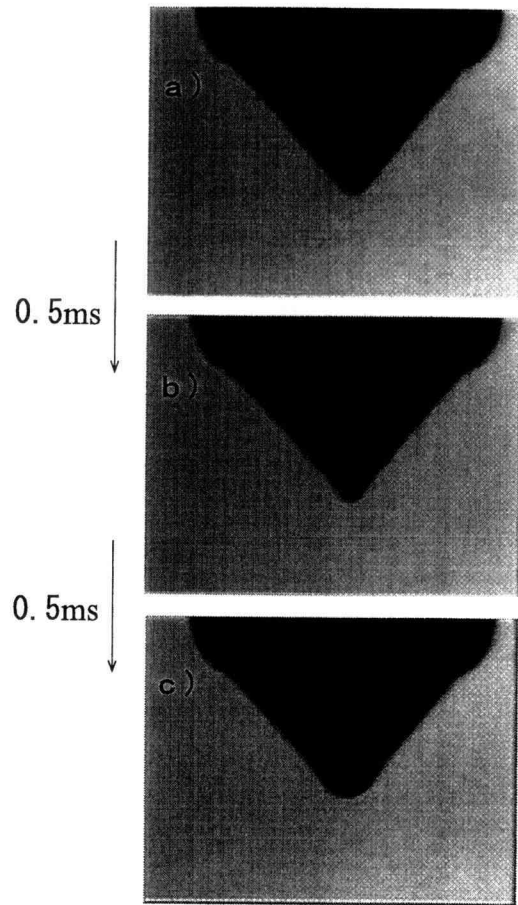


図16 水滴の形状変化

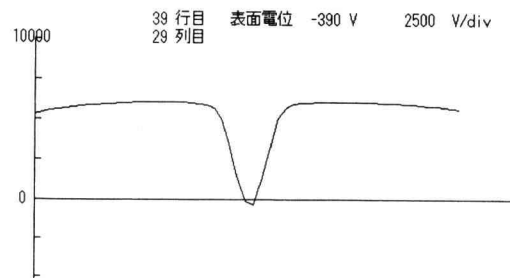


図17 放電後負電位が得られる場合の一例

を図16に示す。毎秒2000コマで撮影したもので、コマ間は0.5msである。またシャッタースピードは1/12000である。同図から、放電時にテイラーコーンが形成されることがわかる。この場合コーンの角度は約80°であった。水滴の垂れ具合によってこの角度は変化する。これは水滴の重力に起因するものと考えられる。放電時には水滴の一部がジェット状に噴出する可能性が考えられる。しかし、高速度カメラでは直接観測することはできなかった

た。図17は放電後の表面電位分布を一次元で示した一例である。放電の真下で負の電位を示していることがわかる。負の電位が現れるのは希であったが、放電に伴い水滴がジェット状に噴出したことを示しているものと考えられる。

高分子帯電表面のかわりに、電圧を印加した平板電極と水滴間で同様な放電を測定した。電極系を図18に示す。印加電圧が+7000Vの場合について放電電流波形の一例

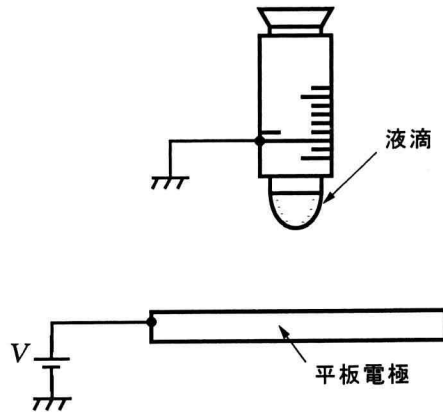


図18 水滴-平板電極系

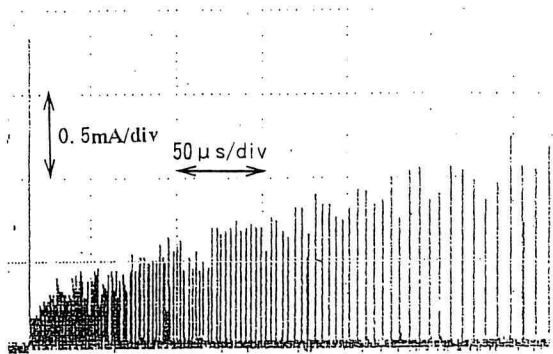


図19 水滴-平板電極系の放電電流

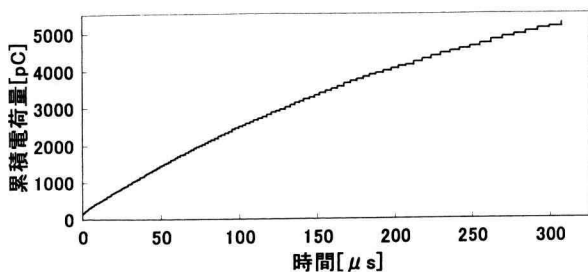


図20 累積電荷量の変化 (水滴-平板電極系)

を図19に示す。高分子帯電表面の場合と同様に、初放電に続き多数の小放電が発生している。平板電極の電位が変化しないために小放電が長時間持続するものと考えられる。

図19から求めた放電電流波形の累積電荷量が図20である。高分子帯電表面の場合に比べて累積電荷量は数倍大きくなっている。

高分子帯電表面と水滴間の放電は途中で停止すること、放電電荷量が制限されることが大きな特徴であることがわかる。

水滴のかわりに、図16のテイラーコーンを模擬したコーン状金属電極と高分子帯電表面間で放電を測定した。電極系を図21に示す。コーン状電極の角度 θ は図16と同様に 80° とした。平板電極の電位が+7000Vの場合の放電電流波形の一例を図22に示す。先端からコロナ放電が発生し、破裂音が持続した。また、時折火花放電が観測された。放電間隔は約 $13\mu s$ と水滴場合と比べて非常に大きく、各放電の大きさがそろっていることがわかる。これは負コロナ放電によるトリチェルパルスであると考えられる。

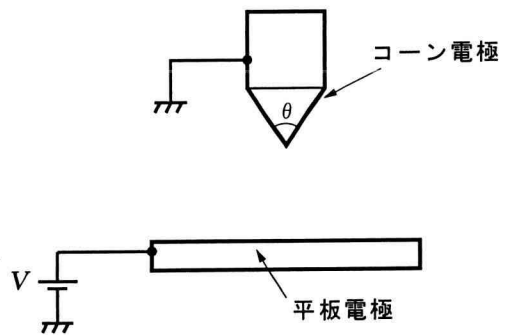


図21 コーン状金属電極-平板電極系

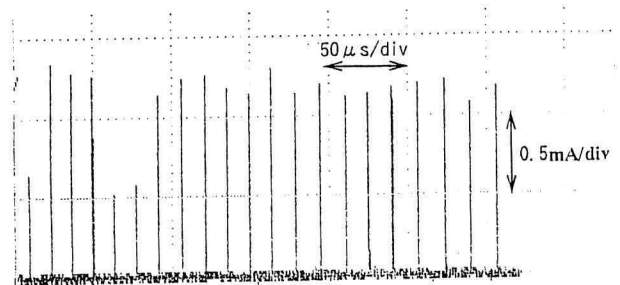


図22 コーン状金属電極-平板電極系の放電電流

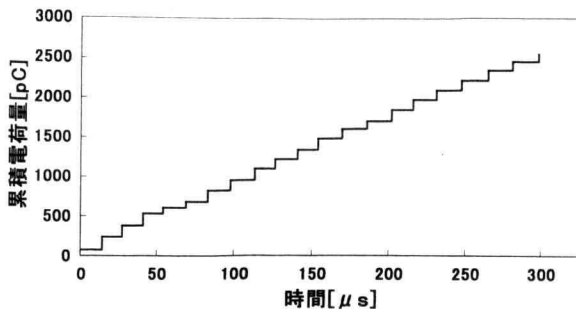


図23 累積電荷量の変化 (コーン状金属電極—平板電極系)

図23は図22から求めた累積電荷量の時間変化である。各放電の電荷量が同じ程度の大きさを持つため、累積電荷量は直線的に増加する。

4・4 放電機構の検討

水滴から高分子帯電表面への放電には次のような特色を持っている。

- (1) 多重放電は高分子表面が正の場合、つまり負コロナ放電時に発生する。
- (2) 本研究の条件下では帯電電圧が+5000V以下では単発放電である。
- (3) 放電電荷量と放電回数は帯電電圧が大きくなるにつれ増加する。
- (4) 試料水の純度に依存し、高純水になるほど多重放電は顕著になる。
- (5) 試料水の表面張力に依存し、表面張力が低下すると多重放電の回数、大きさとも減少する。
- (6) 表面電位の変化から算出した放電電荷量は放電電流波形から求めた累積電荷量とよい一致を示す。
- (7) 各放電の時間 $\Delta t = \Delta q / I_m$ は試料水の純度に依存する。
- (8) 放電時に水滴はコーン状に変形し、先端からジェットが噴出している可能性が大きい。
- (9) 金属電極と比べて放電は早期に終了し、放電電荷量は小さい。

本研究で観測された多重放電は負コロナ放電であることから、基本的にはトリチェルパルスであると考えられる。しかし、金属製の不平等電極で観測されるトリチェルパルスに加えて、水滴のコーン状への短時間の変形、水滴の導電率と表面張力、ジェットの発生、高分子帯電

表面の電位の変化、が複雑に影響を与える放電である。したがって、従来の理論では十分に説明できないことが多い。

液体の種類、表面張力および導電率を考慮した放電機構の詳細な解明は今後の課題として残されている。

5 まとめ

本報告で得られた知見を以下のまとめると、

- (1) 高分子帯電表面と水滴間の多重放電は、水滴が負電位の場合のみ発生する。
- (2) 試料水の純度が増加するほど多重放電は激しくなる。
- (3) 水の表面張力が低下すると小放電の回数、大きさとも減少する。
- (4) この多重放電はテイラーコーンからのトリチェルパルス的一种である。

参考文献

- 1) Trichel, G. W. : Phys. Rev., Vol. 54, p1078(1938)
- 2) Amin, G. A. : J. Appl. Phys., Vol. 25, p627(1954)
- 3) 円城寺, 篠原 : 電学誌77, p895(1957)
- 4) 円城寺 : 電学誌80, p463(1960)
- 5) Nygaard, K. J. : J. Appl. Phys., Vol. 37, p2850(1966)
- 6) 牛田, 生田, 八束 : 電学誌88, p137(1968)
- 7) 細川, 三好 : 電学誌96, p365(1976)
- 8) Cross, J. A., Morrow, R. & Hnddad, G. N. : J. Phys. D: Appl. phys., Vol. 19, p1007(1986)
- 9) Morrow, R. : Phys. Rev. A, Vol. 32, p1799(1985)
- 10) Morrow, R. : Phys. Rev. A, Vol. 32, p3821(1985)
- 11) Loeb, L. B. : "Electrical Coronas" p248(1965)
- 12) Barreto, E. : Aerosol Science, Vol. 2, p219(1971)
- 13) 杉本, 東山, 浅野 : 平成7年度電気関係学会東北支連大, p307(1995)
- 14) 下川 : 静電気学会講演論文集'98, p233(1998)
- 15) 東山, 本木, 杉本 : 静電気学会講演論文集'00, p137(2000)
- 16) A.G.Bailey : "Electrostatic Spraying of Liquid" p44(1988)