誘電体沿面における正ストリーマと電荷

正 員 堺 孝 夫 (武蔵工大)

正 員 永 田 博 道 (武蔵工大)

正 員 高 田 達 雄 (武蔵工大)

1. ま え が き

沿面放電に関して、中でも空気中における沿面放電について数多くの研究がなされ報告され続けている。沿面放電に関する研究は、現象面から沿面フラッシュオーバー特性を対象とする研究と⁽¹⁾、フラッシュオーバーに先行する沿面部分放電の観察を主体とする研究とに大別できよう。前者については、誘電体沿面の状況と電極位置との関連で実測結果をまとめた報告が多く、静電容量や沿面距離、波頭しゅん度など沿面フラッシュオーバー電圧との関係式を示すのが一般的である⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。

これに対して沿面部分放電に関する研究には 1777 年 Lichtenberg の研究以来、誘導体沿面上に極端な不平等電界を形成させ、それによる部分放電の結果生成され、蓄えられる電荷を観察し、不平等電界における放電進展機構を研究する報告⁽⁵⁾、写真乾板あるいはフィルム上で放電させ、放電時の感光像から放電機構を推測する研究⁽⁶⁾、あるいはこの両者の同時観測を行ない、互いに関係づけようとする研究⁽⁷⁾、液晶面上で同様な実験を行なった研究などがある⁽⁸⁾。しかし、これらの研究は放電の結果生ずる現象を観察し、定性的な結論を得ることを狙いにする内容にとどまるものが多く、定量的結論を得ている研究は少ない。古くは放電の伸びと印加電圧の関係⁽⁹⁾、ストリーマの進展速度に関する報告⁽¹⁰⁾、最近ではそれを補うものとして、放電の伸びと放電電圧との関係⁽¹¹⁾、ストリーマの進展速度に関する報告⁽¹²⁾⁽¹³⁾などが見られるにすぎない。

一方、長ギャップ気中放電機構研究における高速度写真観察において見られるように、正インパルスによるフラッシュオーバーにおいて常に正ストリーマ放電がリーダーあるいはフラッシュオーバー形成に先行し、正ストリーマがフラッシュオーバー前駆現象として極めて重要な役割を果たしているものと考えられ、その放電機構の解析を行なうためには正ストリーマ進展の量的研究が必要である。すなわち、ストリーマ放電現象において、正極性電極方向に進展する電子なだれをスタートさせるための電子供給機構とその量、ストリーマの進展速度、ストリーマ進展時の電離量などを知ることが必要であろう。

1 本の正ストリーマについて、これらの諸量を直接測定することは極めて困難である。そこで、これらに関する量的関係の類推を可能にする意味で、沿面における正極性部分放電時のストリーマ 1 本について、残留電荷量の実測を試みた。

具体的には沿面放電図形を得る場合、Polbüschel 状態における放電の伸びとストリーマの本数と放電電荷量から、放電電極（放電図形の中心）からの距離とストリーマ上に残留している電荷量との関係を類推した。次に、ストリーマによる残留電荷が推測した程度であるかどうかを確かめるため、微小面積上の帯電による表面電位を測定し得る表面電位計を試作し実測した。それらの手法と結果を本論文において報告する。

2. 予備的実験とその考察

〈2.1〉 放電電圧と正ストリーマの伸び 球・平板あるいは針・平板電極間に絶縁板をそう入し、電極間にインパルスを加えて得られる電荷図形⁽¹⁴⁾では、部分放電発生時の瞬時電圧と沿面放電の伸びとの間に相関が見られている⁽¹¹⁾。絶縁板と球または針電極が接して

Surface Charge of Positive Streamer on [Dielectric Material].
By Takao Sakai, Member, Hiromichi Nagata, Member &
Tatsuo Takada, Member (Musashi Institute of Technology).

堺 孝夫: 正員, 武蔵工業大学
永田博道: 正員, 武蔵工業大学
高田達雄: 正員, 武蔵工業大学

第 1 図 電極と誘電体板

Fig. 1. Electrodes and dielectric sheet.

第 2 図 図形の直径 D と放電電荷量 Q Fig. 2. Diameter of discharge figure D and magnitude of discharge Q .

いる場合、部分放電電圧を任意に設定することが困難である。ある大きさの図形を得るには、針あるいは球電極と絶縁板を接触させず、第 1 図のようにギャップを設け、静電的にギャップに分圧された電圧によって放電を開始させると容易である。また、部分放電電流を同図中の容量 C で積分し、 C に発生する電圧から放電電荷量を求めた。

第 2 図は、このような方法で測定された電荷図形の直径 D と放電電荷量との関係を、放電発生時の電源側における電圧上昇率を、パラメータとして示している。いわゆる Polbüsche 領域において、ここで実験された範囲では、電圧上昇率のいかんにかかわらず図形直径と電荷量との間に一定の関係が存在することがわかる。また、この測定においてギャップ長を 0.1~1.0 mm の間で変えて同様の測定を行なったが、この範囲においてギャップ長が電荷図形の伸びに本質的な差を与えているのではなく、放電電圧を定める要因の一つとして働いているのにすぎないこともわかった。

以上の測定はエボナイト板（厚さ 3.0 mm, 比誘電率 2.8）を用いて行なわれたが、この系において放電電荷 Q と図形直径 D の間に $Q \propto D^{2.6}$ の関係が得

られている（第 2 図）。

次に、電荷図形上で観測されるストリーマの本数が、中心からの距離が大になるにつれてどのように増加するかを数えた。これは、前述の放電電荷量 Q がこれらのストリーマ形成に使われたのであり、これらストリーマ上に蓄えられている残留電荷の総和 Q' を求め得るならば、 Q' が Q にかなり近い値になると考えたからである。

得られる電荷図形の中心部を見ると back discharge のため、放電終了直後の電荷分布とは異なっている。また、中心付近ではストリーマが互いに密接する形をとっているため、この部分のストリーマ本数を正確に測定するのは困難である。そこで、注意を周辺のストリーマ先端に近い部分に向けることにする。

第 3 図は、電荷図形における中心からの距離 r と、

第 3 図 放電中心からの距離 r とその円周上に見られるストリーマ本数 n Fig. 3. Number of streamers on the circumference of circle to radius r .

第4図 n と r の関係

Fig. 4. Replot of Fig. 3 in logarithmic scale.

半径 r の円周上で見ることができる正ストリーマ本数 n との関係を示す。第4図はこれらに対数表示に改めた図で、 r の増大と共に n の増加する領域において n が $r^{1.2}$ に比例していることがわかった。ある距離 $r = r_m$ まで本数 n が増加し、その後急減し、電荷図形の半径 $R = D/2$ で零になる。 r が r_m から R までに至る n の関数形は単純な形にならないので、モデル的に r と n の関係を次のように仮定してみる。すなわち、 n は $(r_m + R)/2$ まで $r^{1.2}$ に比例して増加し、その後 n は零になる。これは図形を幾分小さく、しかしストリーマの先端が $R' = (r_m + R)/2$ までそろって伸びていると近似したことになる。

〈2.2〉 残留電荷の長さ方向分布 第1図の電極配置で大気圧中でインパルス電圧を加える場合、沿面放電の継続時間は 50 ns あるいは、それ以下であるから⁽¹²⁾⁽¹³⁾、その間の印加電圧変化は無視できるほど小さいと見てよからう。また、ストリーマ形成から停止に至る際、先端部分の電界が電離を更に進展させることができるある臨界値以下になるので、その点でストリーマが停止すると考えることができる。そこで、ストリーマ先端の電界を形成する主要因が空間電荷にあることを考えると、ストリーマ先端の構造はいずれのストリーマも同じであろうから、正イオン数がある量以下になって停止すると仮定することは妥当であろう。

その量をストリーマの長さあたりの電荷量 q (C/mm) で考えてみる。ストリーマ先端部分の q を q_0 とすると、ストリーマ先端から放電図形の中心に向かっての距離 $(R' - r)$ が増すにつれ q も増加するであろう。モデル的に粗い近似ではあるが、 $(R' - r)$ の k (ある定数) 乗に比例して増加すると仮定するのは不合理でなかろう。すなわち、1本のストリーマの先端から中心に向かって長さ方向に単位長さあたり存在す

第5図 沿面ストリーマ上の電荷分布モデル

Fig. 5. Model of charge distribution along a streamer.

る電荷は次式で示すことができることになる。第5図はそのモデルを表わす。

$$q(r) = q_0 + \rho(R' - r)^k \quad (1)$$

ρ : 比例定数

前述のように、ストリーマの本数 n と r の関係は r と共に増加する範囲において $n \propto r^{1.2}$ であるから、その比例定数を n_0 として

$$n \doteq n_0 r^{1.2} \quad (2)$$

すべてのストリーマ上の電荷を加えれば、残留電荷量 Q' に相当する量になるから

$$Q' = \sum n(r) q(r) \\ \doteq \int_0^{R'} n_0 r^{1.2} \{q_0 + \rho(R' - r)^k\} dr \quad (3)$$

(3)式を次のように書き改めてみる

$$Q' \doteq \int_0^{R'} n_0 q_0 r^{1.2} dr + \int_0^{R'} n_0 \rho (R' - r)^k r^{1.2} dr \\ = Q'_0 + Q'_r \quad (4)$$

Q'_0 は電荷図形上ストリーマのどの部分にも単位長さあたり一定の電荷が存在すると見たとき、その総和に対する量であり、 Q'_r はストリーマ上の位置によって変化する電荷量の総和を表わす。

放電電荷量 Q と残留電荷量 Q' がほぼ等しいと仮定することはできるが、(3)式の q_0, ρ, k は求めがたい。それで先端部分の残留電荷を測定し、 q の関数形を実験的に求めることにした。次に、 q のおおよその値を推測する。

仮に残留電荷が長さあたり均一であるとすれば、近似的に

$$Q' \doteq \int_0^{R'} q n_0 r^{1.2} dr \quad (5)$$

第4図の結果から $n_0 = 3$ (r : mm)、第2図の測定値を引用し、 $2R' \doteq D = 30$ mm、 $Q = 1 \times 10^{-7}$ C、 $Q \doteq Q'$ とすると $q \doteq 4 \times 10^{-11}$ C/mm を得る。当然のことであるが q は $(R - r)$ の関数で、先端ではより小さな値を持つであろう。そこで実測するために、 1×10^{-11} C/mm の帯電量を検出できる装置を試作することにした。

3. 表面電位計による沿面ストリーマ残留電荷量測定

〈3・1〉 測定の目的 前章において沿面正ストリーマ1本のモデルを考えたが、沿面正ストリーマ進展時に形成される正電荷の相当量が誘電体表面に帯電されるとすれば電氣的に検出可能な量であるから、本章における測定目的は、これを実測することにある。

帯電される電荷量は、放電過程に電極に流入する正負電荷量の差から、放電後の中和、気中拡散や漏れ電流による電荷量を差し引いた値である。これらの損失について正確な値を知ることはできないが、ストリーマの先端部分（電子などななどの形成されていた、ごく先端部分を除く）では、ストリーマ進展停止時に近い残留電荷があるものと想像される。従って、 $10^{-11}\text{C}/\text{mm}$ 程度を十分測定できればよい。

次に、ストリーマによる帯電を潜像のまま測定しなければならず、隣接した位置に別のストリーマ帯電があれば、表面電位計による測定では静電的に後者による誘導電位をも加えて測定することになる。それゆえストリーマが密な放電電極直下の中心部分では、正ストリーマ1本の帯電による電位を測定することは困難で、外周部分のストリーマの粗な部分での測定がより容易である。このような測定を行なうために、有効面積の小さなプローブを用いた振動容量形電位計を作製した。

〈3・2〉 帯電電荷測定の原理 電位計に用いる検出用プローブを第6図のように配置し、誘電体板表面と直角方向に正弦波振動を行なわせ、変位電流の出力を増幅し、記録計に導く。プローブの先端を誘電体板表面から、 d_1 の距離に設定し、そのプローブを $d_0 \sin \omega t$ で振動させると、プローブ先端から、誘電体表面までの距離 d_1' は(6)式で表わされる。

第6図 静電電位計による測定

Fig. 6. Measurement by surface electrometer.

$$d_1' = d_1 + d_0 \sin \omega t \quad (6)$$

誘電体板の厚さと誘電率をそれぞれ d_2, ϵ_2 とすると、プローブ直下の電束密度 D' は

$$D' = \epsilon_1 E_1 = \sigma / [1 + (\epsilon_2 / \epsilon_1) (d_1' / d_2)] \quad (7)$$

E_1, ϵ_1 : ギャップ間の電界と誘電率, σ : 帯電電荷密度

プローブの有効面積を S_e とすると、この振動による誘起電流 i は

$$i = S_e (\partial D' / \partial t) \\ = - \frac{S_e \omega \epsilon_2 d_0 \cos \omega t}{d_2 \left[1 + \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 d_2} (d_1 + d_0 \sin \omega t) \right]^2} \sigma \quad (8)$$

検出感度を大にするには S_e, d_0 を大にし、 d_2 を小さくすることが考えられる。しかしながら、測定対象とするストリーマ帯電の幅は、電荷図形などから $0.2 \sim 0.5 \text{ mm}$ あるいはそれ以下になり得るので、 S_e をそれに見合う大きさ以上にすることは分解能の観点から好ましくない。本測定では工作上的困難さもあって、直径 0.45 mm のプローブを用いている。

次に、 d_1 であるが、 d_1 が小さい場合には帯電電荷とプローブ間で放電が生ずるため $(d_1 - d_0)$ をある程度の大きさ以上に保ち、放電を防ぐ必要がある。本測定では、 $d_1 = 1.1 \text{ mm}$ とした。

d_0, ω についてはともに大きいことが望まれるが、 d_0 については d_1 同様の条件が存在する。振動片駆動装置において、振幅が周波数に依存していたので、 d_0, ω については出力が最大になる状態を実測に基づいて選んだ。 d_0 は約 $40 \mu\text{m}$ 、用いた振動周波数は 600 Hz である。

〈3・3〉 ストリーマ帯電幅および隣接ストリーマ帯電による影響とその校正

(1) ストリーマ帯電幅の影響 前節で述べたように、プローブに用いた振動片の直径はストリーマ帯電の幅に比べ十分小さいとは言えない。そこでストリーマ帯電幅と表面電位計出力の関係を知るため、誘電体板上に導電塗料によりストリーマ帯電を模擬した導電路を作り、それに電位 V_s を与え、電位計により測定した。その結果を第7図に示す。

同図から、ストリーマ帯電幅が 0.6 mm 以上の場合には、幅による出力電圧上の差を無視できるが、幅がそれ以下の場合には校正が必要である。具体的には潜像の状態で測定したのち、帯電粉体を板土にふりかけ顕像（ダスト図形）とし、幅が 0.6 mm 以下の場合には出力と幅に相当する電位を第7図のような校正曲線を用いて得る。

(2) 隣接ストリーマ帯電の影響 細いストリー

第 7 図 模擬ストリーマ幅と表面電位計の出力

Fig. 7. Calibration for effect of streamer width by artificial streamer.

第 8 図 模擬ストリーマ間隔に対する校正曲線

Fig. 8. Calibration for effect of space between streamer by artificial streamer.

マ帯電が第 8 図(a)のように孤立して存在している場合、かつプローブの走査方向を線状帯電と直角方向にとった場合、同図(b)のような出力が得られる。しかし、ストリーマが密である場合には隣接ストリーマ帯電の影響を受ける。そこで、ストリーマ間隔 b によって電位計の出力が変化する様子を、図中(c)のような模擬帯電によって測定した。(d)はそのモデル的な図で、単一ストリーマ帯電の測定では V_0 となるべき出力は増加し V_0' となる。図中(e)は、 b と出力増加の関係を示す。相対的に細い帯電ほど隣接ストリーマ帯電の影響を受けやすいことや、約 5mm 離れていれば、この装置において影響を無視することができることがわかる。

ストリーマ帯電について実測の場合には、電位測定後、粉末ふりかけによって電荷図形を得、測定箇所における隣接帯電の存否を確かめ、隣接ストリーマ帯電

がある場合には、その幅を測定し、第 8 図(e)から孤立した場合の出力 V_0 を算出し、次いで(1)項の校正を行なった。

(3) 容量と帯電量 ストリーマ帯電による表面電位を測定するのは、帯電電荷量を知るのが目的である。従って、電位と同時に帯電部分の持つ静電容量を求める必要がある。第 9 図(a)に一次元モデルで示されているように、電荷は誘電体板を通して下部電極との間に持つ容量 C_2 と、ギャップを置いてプローブおよびその保護環との間の容量 C_1 に配分されて電位を保っている。この容量についても、前項同様模擬的に測定した。

第 9 図(a)に示した容量 C_1 の部分については、ギャップ長 d_1 をその板の比誘電率倍した厚さの絶縁板 A [第 9 図(b)] で置きかえ、十分長い模擬ストリーマを作り、それと両絶縁板間の容量を Q メータにより測定した。第 10 図にその結果を示す。帯電先端部分における C_1 , C_2 については帯電についての子細が不明であり決定し難い。それゆえ、ごく先端部分の帯電電荷量を求める際にこの容量を用いる場合、相当の誤差を含むと考えなければならない。

第 9 図 模擬ストリーマによる静電容量測定

Fig. 9. Capacitance measurement for artificial streamer.

第 10 図 模擬ストリーマ幅と静電容量

Fig. 10. Capacitance and width of artificial streamer.

4. 測定法と測定結果

〈4・1〉 測定法 第1図に示した電極配置において、波頭長約 $3\mu\text{s}$ の正インパルスを電極間に加え、誘電体板沿面において Polbüschel 形態の部分放電を発生させる。二現象オシロスコープを用い、第2図に示したように部分放電の発生した時刻から放電発生時の電圧を得る。

インパルス印加後、第6図に示すように誘電体板を電位計プローブ直下に移動し、その表面電位を測定する。

第11図は得られる出力曲線と帯電との関係を示す。インパルス印加後、2.5mm 間隔でプローブを走査することによって得られた出力が図中(b)の曲線1, 2 および 3 で、その後誘電体板を取り出し、電荷図形として見た像が(a)である。図中(b)で太線で示すように、これらの曲線と図形からどのストリーマ帯電に相当する出力かを容易に判断できる。

このような出力を得てから前章において述べた校正を行ない、第10図の容量を用いてストリーマ帯電の単位長さあたりの帯電量を算出する。

〈4・2〉 測定結果 第12図は、このような校正を行なった結果得られた帯電電荷量を示す。パラメー

タは高電圧電極と誘電体板とのギャップ長を変え、インパルスを加えた場合の放電電圧を示す。放電電圧が高くなると放電図形は大きくなるが、ストリーマ帯電の先端近くに注目すると、これらがほぼ同様な分布形態をとっていることがわかる。

5. 考察

ストリーマによる帯電量とモデル式(1)との対応を見るために、帯電量の測定結果について $q(R-r)$ と $(R-r)$ との対数グラフに書き改めた結果が第13図である。

(1)式は近似的に

$$q(R-r) - q_0 = \rho(R-r)^k \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。 $(R-r)$ および $q(R-r)$ は測定可能であるが q_0 および k については仮定に基づく量なので、実験的に求めることにする。

第13図では、 q_0 が 20 pC/mm において実験値を直線近似した図で、各直線のこう配 k は $0.34 \sim 0.48$ である。このように q_0 をそれぞれ仮定し同様にこう配 k を求め、 k のばらつきの最も小さい場合が第13図であった。そこで、ストリーマ帯電量をこの r の範囲において(10)式により近似できる。

$$q'(R-r) = 20 + 32(R-r)^{0.4} \quad (\text{pC/mm}) \quad \dots\dots\dots (10)$$

(10)式は実験式であり、理論的根拠に乏しい。特にストリーマ先端部分の構造が明らかでないため、帯電自体について、またその部分の静電容量についても誤差を含む。従って、 q_0 の存否およびその値 20 pC/mm についても検討を続ける必要がある。

しかしながら、ストリーマ先端近くにおけるストリーマ帯電が、ストリーマ停止時の電荷量と等しい、ないしそれに近い値であるとすれば、ストリーマの先端に近づくにつれ $60 \sim 40\text{ pC/mm}$ の帯電量を残しながら

第11図 表面電位計出力と電荷図形
Fig. 11. Example of detected surface potential and dust figure.

第12図 ストリーマによる残留電荷
Fig. 12. Magnitude of surface charge along streamers.

第13図 放電路先端部分の帯電量
Fig. 13. Magnitude of surface charge along streamer near streamer tip.

ら沿面正ストリーマが進展し、 20pC/mm 前後になると停止することが実測されたことは、沿面放電における電離過程を定量的に考察するうえで、一つの重要なよりどころを与える結果であると言えよう。

ここで取り上げた部分におけるストリーマ放電の進展速度はおおよそ 10^8cm/s 、電極近くでは 10^9cm/s であり⁽¹³⁾、このような速度で $10^{-10}\sim 10^{-11}\text{C/mm}$ ($10^9\sim 10^8$ 個/mm) 以上の電離を行なえる機構が存在することになる。

また、長ギャップ放電における正ストリーマの発生やフラッシュオーバーの定量的研究を行なうためには、気中ストリーマにおける放電量を知ることが重要であろう。これらについては別の機会に報告する。

6. ま と め

沿面正ストリーマが Polbüschel 領域内にある場合、放電電荷量とストリーマ本数から、正ストリーマ 1 本による帯電電荷量を推定し、その結果に基づいてそれらの電荷を検出できる振動形静電電位計を作製し測定した。

その結論として、正ストリーマ先端近く（ごく先端の部分を除く）には $40\sim 60\text{pC/mm}$ の帯電の行なわれていることが明らかになった。この値はストリーマ進展時の機構を研究する場合、量的なよりどころとなる。

終わりに、御討論いただいた鳥山四男 武蔵工業大学名誉教授、プローブ作製上の御指導について村崎 東京

農工大教授、飯田君（現、小谷電機）はじめ本研究を手伝われた本学卒業生の諸兄に感謝いたします。

（昭和 52 年 10 月 4 日受付、同 53 年 5 月 16 日再受付）

文 献

- (1) E. Hueter: "Über Gleitendladungen." *Elektrotech. Z (ETZ-A)* 74, 15 (1953)
- (2) 電気学会編: 放電ハンドブック p. 226 (昭 49)
- (3) R. Elsner & J. Rebhan: "Die Überschlagfestigkeit von Hochspannungsdurchführungen bei Stoß- und Wechselspannung." *Arch. Elektrotech.* 31, 398 (1937)
- (4) 横井, 他: 「空気中における衝撃沿面放電の放電電流について」 *電学誌* 91, 1455 (昭 46)
- (5) Y. Toriyama: "Dust figure of Surface Discharge and its Applications." (1961) Kinokuniya
- (6) E. Nasser, et al.: "Zeitliche Entladungsentwicklung im Ungleichförmigen Feld bei Positiver in Atomsphärischer Luft." *Arch. Elektrotech.* 44, 168 (1959)
- (7) 鳥山, 他: 「沿面放電図形による放電機構の解析(リヒテンベルグのシュリーレン作用)」昭 49 電気学会全大 No. 106
- (8) 曾禰・鳥山: 電気学会放電研資 ED-71-13 (昭 46)
- (9) M. Toepler: "Über die Physikalischen Grundgesetze der in der Isolatortechnik Auftretenden elektrischen Gleiterscheinungen." *Arch. Elektrotech.* 10, 157 (1921)
- (10) 篠原, 他: 「衝撃電圧によるコロナ (第 2 報)」 *電学誌* 51, 738 (昭 6)
- (11) 辻村, 他: 「Dust Figure の特性についての検討」放電研究 No. 55, 104 (昭 49)
- (12) Y. Murooka, et al.: "Nanosecond Surface Discharge study by using dust figure techniques" *J. Appl. Phys.* 44, 1576 (1973)
- (13) 堺: 「沿面放電の進展と表面帯電」昭 51 電気四学会連大 No. 66
- (14) E. Nasser: "Spark Breakdown in air at a positive point" *IEEE Spectrum* 5, 127 (1968)