誘電体沿面における正ストリーマの電荷密度分布

正 員 白 坂 行 康 (武蔵工大)

正 員 湯 本 雅 恵 (武蔵工大)

正 員 堺 孝 夫 (武蔵工大)

1. ま え が き

長ギャップ気中放電や沿面放電において、リーダやフラッシュオーバー形成の前駆現象としてストリーマ進展のあることが広く知られている。

ストリーマ進展機構に関する研究は、1939 年ごろ Meek 氏らによってストリーマ理論が提案されたのが最初で、以後、誘電体沿面のストリーマ進展によって形成され蓄えられた残留電荷像をダスト図形法を用いて観察し、放電進展機構について考察した報告⁽¹⁾、針対平板電極系の間に写真乾板や感光フィルムを挿入しておき、気中を進展していたストリーマをそれらの上まで進展させ、ストリーマ進展による発光で感光された像を観測することによってストリーマ進展機構を推測した報告⁽²⁾⁽³⁾、また他の放電図形よりも極めて高い分解能を持つ液晶フィルム上でストリーマを進展させ、得られた図形から正ストリーマの構造について推測した報告⁽⁴⁾など数多く行なわれてきた。しかし、図形の観察などからストリーマ進展機構を定性的に説明した報告が多く、定量的な研究としてはストリーマ進展速度に関する報告⁽⁵⁾、ストリーマ進展により誘電体沿面に形成され蓄えられた電荷から正ストリーマ先端の電荷量を推測・測定した報告⁽⁶⁾⁽⁷⁾などがあるものの数少ない状態である。

一方、長ギャップ気中放電や沿面放電の進展過程をイメージコンバータカメラを用いた高速度写真で観察した研究⁽⁸⁾などから、ストリーマがリーダやフラッシ

オーバーに先行して進展していることが示され、リーダやフラッシュオーバーを導く極めて重要な要因であると考えられている。

ストリーマ進展機構を解析するためには進展時の単一のストリーマについて、先端の電界、そのときの電離量、進展速度などの各要因を同時にかつ定量的に測定することが望まれる。しかし、ストリーマ進展が高速であること、進展場所の再現性が小さいことなどの問題から、進展時の単一のストリーマについて前記の諸量を測定することは非常に困難である。そこで、誘電体沿面の正ストリーマによって形成され蓄えられた電荷を測定し、進展時を類推する試みがなされてきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾。これらの報告から、大気中において進展する正ストリーマ先端の単位長さあたりの電荷量は約数十 pC/mm であると考えられているが、この値は気圧を多少変えても変化せずば一定である⁽⁹⁾。ストリーマは気圧を変えることにより、その太さ、伸びの長さなどが変化することが経験されている。従って、正ストリーマの進展機構を解析するためには、先端の電荷量を測定するだけでは不足の点が多く、単一の正ストリーマの進展方向における電荷密度分布を知ることが望まれる。

そこで本論文では、まず正ストリーマの進展方向における電荷密度分布を測定し、その結果をまとめている。次に、液晶フィルムを用いた高分解能の図形観測から推測した正ストリーマの構造についての報告⁽⁴⁾などを参照し、その構造を電気的な量で解析した。すなわち、誘電体沿面の単一の正ストリーマ進展により形成され蓄えられた電荷の面電荷密度分布を、高分解能微小面積表面電位計(川口電機製作所, Model S-208)で測定し、また電子計算機を用いた電界分布のシミュレーションの結果を比較する。これまでに得られた結

Charge Density Distribution of a Positive Streamer on a Dielectric Surface. By Yukiyasu Shirasaka, Member, Motoshige Yumoto, Member & Takao Sakai, Member (Musashi Institute of Technology).

白坂行康: 正員, 武蔵工業大学 (現在, 日立製作所)

湯本雅恵: 正員, 武蔵工業大学

堺 孝夫: 正員, 武蔵工業大学

果の概要および今回の手法と結果を以下に述べる。

2. 正ストリーマの線電荷密度分布

〈2.1〉 実験方法 正ストリーマを発生させるための容器の概略を図1に示す。間隔が 90 mm の針対平板電極の間に正ストリーマ進展により形成された残留電荷を蓄えるアクリル板 (100×100×3mm) を傾けて挿入する。アクリル板の傾ける角度を大きくするほど発生する一つ一つのストリーマの間隔が広くなり、残留電荷測定において隣接するストリーマの残留電荷による影響を小さくできる。そこで実験では、すべて 75° 傾けて測定を行なった。

アクリル板を設置後、容器内を油回転ポンプで排気し、市販の乾燥空気あるいは窒素と酸素の混合気体を容器内へ注入する。アクリル板および気圧の設定を終えたのち、針電極 (先端の曲率半径はおよそ 50 μm 以下) に波高値が 8 kV で $10 \times 10,000 \mu\text{s}$ の開閉サージ領域の正インパルス印加し、アクリル板表面で Polbüscher 領域の正ストリーマを発生させる。その後、電荷が蓄えられたアクリル板を容器内から取出す。この蓄えられた電荷について、ストリーマの進展方向における電荷密度分布を測定するため、電荷の帯電しているアクリル板を表面電位計に挿入する。その外観を図2に示す。図において、電荷像がわかりやすいように、電荷図形にした後のアクリル板とプローブの外観を示した。

残留電荷分布を測定後、電子写真用のトナーで可視化した図形の概略を図3 (A) に示す。測定では潜像の状態であるが、ストリーマの伸びた方向に対し直角方向にプローブをスキャンできるようにアクリル板を設置する。

図1 実験容器の概略
Fig. 1. Test chamber.

図2 試料とプローブの外観
Fig. 2. A view of PMMA plate and the probe.

図3 電荷密度測定
Fig. 3. Measurement of charge density along a streamer.

微小プローブをストリーマ先端近傍の断面方向 (y 方向) に走査させた場合、検出電極表面に生ずる電界分布の概略図と放電図形の概略とを図3 (B) に示す。プローブの走査位置を $R_1, R_2, R_3, \dots$ と 0.2mm または 0.5mm 間隔で移し、繰返し測定する。測定した各 R 軸上の表面電位と等価的な容量から、ストリーマの進展方向における各点の単位長さあたりの電荷量を得る⁽⁶⁾。

〈2.2〉 結果 R 軸上各点における単位長さあたりの電荷量を求めることにより、図4に示したようなストリーマの進展方向における電荷密度分布を得ることができる。なお、残留電荷の測定には約2時間が必要とするが、アクリル板の表面抵抗が極めて大きいので、放電停止時の正ストリーマの電荷分布をそのまま記録していると考えられる。

図 4 正ストリーマの進展方向における電荷密度分布

Fig. 4. Charge density distributions along a positive streamer.

図 4 には、気圧を 4.8×10^{-4} Pa 一定とし、酸素の分圧比を違えて発生させた正ストリーマの進展方向における残留電荷密度分布の測定結果を示してある。電荷図形から求めたストリーマ先端を $x=0$ とし、針電極に向かって x を正とし横軸に示した。また、縦軸はストリーマ上の各点における線電荷密度 (PC/mm) を示す。曲線 A, B, C は窒素と酸素の分圧比をそれぞれ 94:6, 92:8, 80:20 (乾燥空気) として発生させた正ストリーマの残留電荷について測定した結果で、R の記号で添えた各数値はそれぞれの分圧比におけるストリーマの平均的な伸びを示す。

同図より、酸素分圧が高くなるに従ってストリーマの伸びは短くなり、また単位長さあたりの残留電荷の減衰量の多くなることがわかる。これより、ストリーマ進展中あるいは停止後、正味の正電荷が消滅するプロセスにおいて、酸素分子の寄与していることが予想される。今後、電子の酸素分子への付着過程などを考慮に入れたストリーマの進展機構を明らかにする必要がある。

3. 正ストリーマの電荷図形

前章において、ストリーマの構造を考慮せずに、長さあたりの量として平均的に電荷密度分布を扱ってきた。しかし、分解能が $5 \mu\text{m}$ 以下と考えられている液晶フィルム上の放電図形を観測した研究から、正ストリーマの中心にプラズマコラムと呼ぶにふさわしい正味の電荷のない部分があるという報告⁽⁴⁾がなされている。

電子写真用のトナー (リコー, RICOPY PPC トナータイプ 1700) を用いて可視化した正ストリーマの

図 5 正ストリーマの電荷図形

Fig. 5. Discharge figure of positive streamer.

残留電荷図形を図 5 に示す。黒くなっている部分がトナーの付着している部分で、正ストリーマの中心にはほとんどトナーの付着していない部分が現われている。液晶フィルムを用いた放電図形と同様に、図 5 の電荷図形からも正ストリーマの中心に正味の電荷の少ない部分のあることが予想される。

前述のように、正ストリーマの構造に関する研究は放電図形などからその構造を定性的に推測した報告があるにとどまる。正ストリーマの進展機構を解析するために、正ストリーマの構造を電気的な量で検討することが必要である。

正ストリーマの構造を量的に考察するために、正ストリーマ進展により形成され絶縁板上に蓄えられた残留電荷の進展と直角方向の電荷密度分布について測定し、またカーブフィッティング法を用いて電界分布と計算による電界分布とを一致させることを試みた。電界分布の測定には高分解能微小面積表面電位計 (川口電機製作所, Model S-208) を用いた。計算においては、まず面電荷密度分布を仮定し、その電荷分布のプロブ近くに形成する電界分布を電子計算機を用いて計算し、測定結果と合わせる方法である。以下に電界分布の測定原理と類推の結果を示す。

4. 測定原理

〈4.1〉 検出回路 単一の正ストリーマの単位長さあたりの電荷量はおおよそ数十 pC/mm⁽⁶⁾⁽⁷⁾ である。また電荷図形などから、大気中を進展する正ストリーマの太さはおおよそ 1 mm 以下と考えられている。このような正ストリーマの進展で形成され、アクリル板上に蓄えられた微少な電荷の分布を解析するために、

図 6 測定回路

Fig. 6. Measuring circuit.

検出電極の直径が 0.1 mm の高分解能微小面積表面電位計を用いて、電荷が検出電極表面に形成する電界を測定した。電界分布の測定はストリーマの進展方向と直角な方向について行なった。

図 6 に測定回路の概略を示す。図中、 ϵ_1 はアクリル板とプローブ間の気体の誘電率、 ϵ_2 はアクリル板の誘電率をそれぞれ示す。

アクリル板上に蓄えられている電荷によって形成される電極表面における電界の平均値を E とすると、検出電極に誘導される電束密度 D は

$$D = \epsilon_1 E \quad (1)$$

となる。回路の各パラメータのうち C_v は 635 Hz で振動する可変容量で、その大きさは容量 C_i より十分小さい。また、 C_i は検出電極と電荷との間の漂遊容量より十分大きいので、検出電極の電位は電荷のもつ表面電位に対しほぼ接地電位とみなせる。

(1) 式に示した電束密度 D が面積 S の検出電極に誘導されることにより、測定回路から出力される電圧 V_0 は

$$V_0 = A \frac{dC_v}{dt} \left(\frac{\epsilon_1 E S}{C_i} \right) \quad (2)$$

となり、検出電極表面の平均電界 E に比例した出力が得られる。なお、 A はアンプの増幅率を含めた系全体の比例定数である。測定回路では検出電極の面積 S が大きいほど測定感度は良くなるが、電界分布を平均化してしまう面積が大きくなり、電界分布の測定精度は悪くなる。測定に用いた表面電位計は検出電極の直径が 0.1 mm で面積 S が小さいため、微小な面積での電界が測定可能となり、精度の高い電界分布を測定できる。

〈4・2〉 表面電位計の分解能⁽¹⁰⁾ 正ストリーマによる残留電荷が形成する電界分布を測定するための電極系を図 7 (A) に示す。接地電極 G_2 上に、残留電荷が蓄えられた厚さ l (≈ 3 mm) のアクリル板を置く。アクリル板表面からギャップ d を隔てた高さで、直径 0.1 mm の検出電極を有したプローブをスキャンさ

図 7 分解能の解析

Fig. 7. Analysis of a resolution power.

せ、検出電極表面の電界を測定する。

ここで、微細な分布を検出するのに必要な分解能について検討してみる。ストリーマの進展方向と直角方向 (y 方向) の電荷密度分布を $\sigma(y)$ とする。図 5 に示した電荷図形を参考にし、かつ分解能を解析しやすいようにするために、 $\sigma(y)$ として図 7 (B) に示すような空間波長 λ ($=1/f$, f : 空間周波数) で繰返す分布を、(3) 式のように仮定した。

$$\sigma(y) = \frac{\sigma_0}{2} (1 + \cos \omega y) \quad (\omega = 2\pi/\lambda) \quad (3)$$

表面電位計の分解能は (3) 式に示した電荷密度分布に対し、表面電位計からの出力がどの程度対応しているかによって求めた。

電荷密度分布 $\sigma(y)$ の測定において、ギャップ d は小さいほど分解能は向上するが、電荷がプローブへ逆放電を起こしてしまうため、 d をある値以上に保つ必要がある。本実験においては、平均的な電荷密度による電界の概算と経験上から $d = 0.4$ mm⁽⁹⁾ 一定で測定した。なお、実験的に逆放電などによる残留電荷分布の乱れは生じないことを確かめてある。

電荷密度分布 $\sigma(y)$ を (3) 式で示した場合、得られる表面電位計の出力は

$$V_0(y) = V_{00} + V_0' \cos \omega y \quad (4)$$

で表わされる。

出力電圧 $V_0(y)$ の平均値 V_{00} は電荷密度分布 $\sigma(y)$ の平均値 $\sigma_0/2$ に対応し、振幅 V_0' はギャップ d と検出電極面積 S による平均化のため、 V_{00} より小さ

図 8 レスポンス関数

Fig. 8. Response function.

くなる。

ここで、分解能のレスポンス関数 η を

$$\eta = \frac{V_0'}{V_{00}} \dots \dots \dots (5)$$

とし、各空間周波数において η を計算した。計算結果を図 8 に示す。横軸は電荷密度分布 $\sigma(y)$ の空間周波数 f 、縦軸は分解能のレスポンス関数 η である。

空間周波数 f が大きくなるに従って η は徐々に減少し、分解能が低下していることを示す。分解可能な範囲を、一般的な周波数特性から 3 dB 減少した範囲までとすると、 η の値で約 0.7 以上となり、図 8 から空間周波数 f にして約 0.09 mm^{-1} 以下(空間波長 λ にして約 $1/0.09 = 11.1 \text{ mm}$ 以上)で分解可能となる。

大気中の正ストリーマの太さは、電荷図形などから 1 mm 以下と考えられており、中心の電荷の少ないと予想される部分の幅はおよそ 0.2 mm 程度しかないので、前述の残留電荷測定条件では正ストリーマの構造を解析することは困難である。しかし、減圧した気中でのストリーマは太くなることが知られており、更に酸素中の正ストリーマは空気中のストリーマよりも太いことを経験している。正ストリーマの構造解析において、ストリーマを太くし、表面電位計の相対的な分解能を向上させるために、減圧した酸素中で正ストリーマを発生させ、その残留電荷の電荷密度分布について解析することが妥当であろう。

5. 正ストリーマの電荷密度分布

〈5.1〉 残留電荷が作る検出電極表面の電界 4.0 × 10⁴ Pa の酸素中で生じた 1 本の正ストリーマ進展により形成され、アクリル板上に蓄えられた残留電荷が形成する検出電極表面の電界について測定した結果を図 9 に示す。測定には前章で解析した分解能を持つ高分解能微小面積表面電位計を用い、ストリーマの進展方向と直角方向に微小プローブをスキャンした。図 9 に示した分布はストリーマの進展方向を R 軸とし、ストリーマ先端のほうから 1 mm 間隔で測定した断面方向の表面電位計の出力電圧より求めた検出電極表面の電界分布を示す。測定後、電子写真用のトナーで可視化した電荷図形の一例を既に図 5 に示してある。電荷図形から電界分布を測定した正ストリーマの伸びは 17.5 mm であった。

トナーによる電荷図形において、ストリーマの幅とトナーの付着が少ない中心の幅とはストリーマ先端より針電極側ほど広がっている。これに対応して、図 9 に示した電界の分布のピークは針電極側で測定したものほど緩やかになり、 $R = 13.5 \text{ mm}$ より針電極側で測定した分布には二つのピークが現われた。

図 9 に示した各電界の分布の中から、 $R = 12.5 \text{ mm}$ (ストリーマ先端から約 5 mm) の位置で測定した分布を図 10 に示す。同図に示された分布は二つのピークを示し、中心にある極小値の位置は電荷図形におけるトナーの付着が少ない中心に対応するので、正ストリーマの中心では正味の電荷が少ないと考えられる。しかし、電荷図形から $R = 12.5 \text{ mm}$ の位置でトナーの付着が少ない中心部の幅は約 0.6 mm で、前章の解析結果を示した図 8 から、空間波長が 0.6 mm ($f = 1/0.6 = 1.7 \text{ mm}^{-1}$) に対応する分解能のレスポンス関数 η は約 0.06 しかなく、図 10 に示した電界分布とアクリル板上の電荷密度分布との間には相当の差異のある可能性がある。そこで、更に詳しい電荷密度分布を得るために、検出電極表面の電界分布をコンピュー

図 9 検出電極表面の電界分布

Fig. 9. Field distributions on the probe.

図 10 検出電極表面の電界分布 ($R=12.5\text{mm}$)

Fig. 10. Field distribution at $R=12.5\text{mm}$ on the probe.

タシミュレーションし、図 10 に示した実測の電界を与える電荷分布を類推した。このときの手法としては有限差分法を用いた。次にその手順を述べる。

〈5・2〉 残留電荷の作る検出電極表面の電界分布のシミュレーション 図 10 に示した分布から正ストリーマの中心の正味の電荷は少ないことが予測されるので、これを単純化するために中心の正味の電荷を零と仮定した。更に、図 5 の電荷図形からトナーの最も付着している部分に正味の電荷のほとんどがあると、図 11(A)にハッチングで示したような R 方向に 2 本の帯状の電荷密度分布を仮定した。この 2 本の帯状電荷の間隔を電荷図形の中心の幅と一致させ、 0.6mm として電荷密度分布を仮定した。この仮定した電荷が形成する断面方向の検出電極表面の電界を計算で求めた結果、図 11(A)に実線で示したような電界の分布となった。破線で示したのは、図 10 に示した実測で得られた電界の分布である。図中において、横軸 y はストリーマの進展方向に対して直角方向を示し、縦軸は電荷密度と電界との大きさを示す。

図 11(A) において、破線で示した実測の分布と実線で示した計算による電界の分布とを比較すると、まず中心において実測の電界のほうが計算によるものより約 40V/mm ほど大きい。この差を小さくするには、中心にも多少正味の残留電荷があることを仮定する必要がある。更に、ピーク値より外側の電界分布

図 11 検出電極表面の電界分布のシミュレーション

Fig. 11. Simulated field distributions on the probe.

においては、実測による電界の分布のほうが計算したものに比べ緩やかに減少している。計算による電界の分布を実測の分布のように緩やかに減少するものとするには、仮定する電荷密度を外側に向かって緩やかに減少させる必要がある。この分布を正ストリーマの進展停止からアクリル板へ帯電する間の電荷の拡散も考え合せ、指数関数的な分布としてシミュレーションした。その結果、実測による電界の分布に最も良く一致して得られたものを図 11(B) に示す。

〈5・3〉 電荷密度分布 前節で述べた残留電荷の作る検出電極表面の電界分布のシミュレーションから、残留電荷の密度分布 (ストリーマ進展方向に対し直角方向) は図 11(B) にハッチングで示した分布が類推された。この結果は、液晶フィルムを用いた放電図形や電子写真用のトナーを用いた電荷図形から推測されたものと同様に、正ストリーマの中心部には正味の電荷の少ない領域があることを示している。しか

図 12 正ストリーマ進展により残留した電荷密度分布

Fig. 12. Charge density distributions of residual charge along a positive streamer.

し、中心部にもわずかではあるが正味の電荷が残留しているものと考えられる。

正ストリーマの構造において、沿面に残留した電荷の中心部分に正味の電荷の少ない領域が現われ、図 11(B)に示したような分布となる要因はまだ不明である。今後、そのような分布となる機構や正ストリーマ進展機構を解析するうえで、このような分布の更に詳しい構造を解析することが必要であろう。

図 9 に示した実測で得られた電界の分布のうち、 $R = 13.5, 14.5, 15.5$ 、そして 16.5 mm の位置での分布をシミュレーションした。その結果、得られた電荷密度分布を図 12 に示す。同図は 1 本の正ストリーマによって形成された残留電荷の面電荷密度分布であり、中心部にある正味の電荷の少ない領域がストリーマの進展方向に伸びていることを示す。

6. ま と め

正ストリーマ進展機構を定量的に解析するため、ストリーマの進展方向および進展方向と直角方向の残留電荷密度分布を測定してきた。その結果、

(1) 単一の正ストリーマにおいて、進展方向の単位長さあたりの残留電荷量 (pC/mm) 分布は、先端付近でピークを示し、針電極に近づくにつれて減少する。その減少の割合およびストリーマの伸びは雰囲気中の酸素分圧に依存した。

(2) 一方、現在用いている表面電位計の測定条件では、正ストリーマの構造を解析するのに不十分であることが予測された。しかし、電子計算機を用いた電界計算で実測による電界の分布をシミュレーションすることにより、ストリーマの進展方向に対し直角方向の面電荷密度 (pC/mm^2) 分布を類推することが可能となった。

(3) 電界分布のシミュレーションから類推したス

トリーマの進展方向に対し、直角方向の電荷密度分布には中心部分に正味の電荷の少ない領域があった。

単一の正ストリーマの残留電荷において、中心部の正味の電荷の少ない領域はストリーマの進展方向に伸びており、この幅は先端に近いほど狭くなっていた。今後、正ストリーマの中心部の正味の電荷だけが特に少なくなっている機構について興味を持たれる。

終わりに、御討論いただきました 本学 伊藤泰郎教授、曾禰元隆助教授、本研究を手伝われた本学卒業生の鈴木君(現、ジャトコ)、岩崎君(現、大日本電線)をはじめ、本学 放電工学研究室の諸兄に感謝いたします。

(昭和 57 年 11 月 15 日受付、同 58 年 5 月 18 日再受付)

文 献

- (1) Y. Toriyama: Dust figure of surface discharge and its applications (1961) Kinokuniya
- (2) E. Nasser: "Spark breakdown in air at a positive point", *IEEE Spectrum*, **5**, 127 (1968)
- (3) E. Nasser, M. Heizler & M. Abou-Seada: "Field criterion for saturated streamer propagation", *J. Appl. Phys.*, **39**, 3707 (1968)
- (4) 曾禰・鳥山・早川・鳥山:「液晶フィルムによる放電図形の解析」, 電学論A, **94**, 523 (昭 49-12)
- (5) Y. Murooka & S. Koyama: "A nanosecond surface discharge study in low pressures", *J. Appl. Phys.*, **50**, 6200 (1979)
- (6) 堺・永田・高田:「誘電体沿面における正ストリーマと電荷」, 電学論A, **98**, 533 (昭 53-10)
- (7) T. Sakai, M. Matsuyama & T. Takada: "Charge density distribution along positive streamer on dielectric surface", *Proc. 5th Int. Conf. on Gas Discharges*, p. 77 (1978)
- (8) 常安:「空気中針対平板ギャップの正インパルスフラッシュオーバーの観察とその機構」, 電学論A, **96**, 63 (昭 51-2)
- (9) 白坂・湯本・堺:「沿面正ストリーマの残留電荷分布測定」, 電気学会放電・絶縁材料合同研資 ED-81-42, EIM-81-59, 31 (昭 56)
- (10) 村崎・松井・河野・大野:「電荷分布測定における電位計の空間周波数特性と解像度の解析」, 電学誌, **90**, 2051 (昭 45-10)