大気中 PET フィルムの正インパルス 沿面フラッシュオーバー過程

正員 嶋崎 俊行 (福岡大)

正員 眞鍋 吉秀 (福岡大)

Surface Flashover Processes on PET Film in the Atmosphere under Positive Impulse Voltage

Toshiyuki Shimazaki, Member Yoshihide Manabe, Member (Fukuoka University)

The surface discharge phenomena on PET film with the thickness from 0.05 to 1.05 mm were investigated in the atmosphere under $1/40 \mu\text{s}$ positive impulse voltage. The 50% flashover voltage V_{50} and the 50% corona onset voltage V_{c50} were measured varying the creeping distance from 0.4 to 10 cm. The surface discharge phenomena were observed with an image converter camera together with an image intensifier under V_{50} .

As the results of this investigation, it has been found that the V_{50} - d characteristics are divided into two regions at a certain creeping distance d_c depended on the thickness of PET film. The V_{50} - d characteristics and the surface flashover processes in the creeping distance from 0.4 cm to d_c are similar to those of acryl resin plate. However, the surface flashover characteristics and processes in the creeping distance from d_c to 10 cm differ from those of acryl resin plate. In this region, the filamentary streamers decrease its length with the increase of specific capacitance of dielectric plate. These surface flashover processes are illustrated with the typical photographs, and are explained in connection with the surface flashover characteristics.

キーワード：沿面放電，フラッシュオーバー電圧，誘電体，フラッシュオーバー過程

1. ま え が き

沿面放電では単一の誘電体に対するものよりフラッシュオーバー電圧が著しく低下する。そのため高圧機器の絶縁設計においては、沿面フラッシュオーバー電圧がどのような因子によって、どのように影響されるかを明らかにすることは極めて重要なことである。そのため、これらに関する多くの研究が報告されている⁽¹⁾。例えば、固体誘電体に対する沿面フラッシュオーバー電圧はその固有容量の影響を著しく受けることから、比誘電率や厚さの異なった絶縁板を用いて⁽²⁾⁽³⁾、固有容量に対する沿面フラッシュオーバー現象への影響が調べられている。しかし、沿面フラッシュオーバー過程などの解明に用いられた絶縁板は、厚さが1 mm以上の比較的厚いもの

が多く⁽⁴⁾、そのため固有容量が著しく大きい場合のフラッシュオーバー過程などについては、明らかにされていない点も多い。

本研究では誘電体の固有容量の影響を、更に詳細に明らかにするために、厚みが比較的薄い PET フィルムを用いて固有容量を著しく増加させ、固有容量と50%沿面フラッシュオーバー電圧の関係を広い範囲で測定した。また、そのときの沿面フラッシュオーバー過程をイメージコンバータカメラを用いて観測した。その結果、PET フィルムの厚さによって決まるある沿面距離を境として、沿面フラッシュオーバー特性および過程が互いに異なると共に、固有容量が著しく大きくなると沿面ストリーマの進展長が極めて短くなり、ほぼ正リードのみの進展によってフラッシュオーバーすることがわ

かった。これらの特性と過程を対応づけ、電界計算による結果および厚みが比較的に厚いアクリル板の結果とを比較検討し、詳しく述べる。

2. 実験装置および方法

図1に実験回路を示す。印加電圧はほぼ $1/40 \mu\text{s}$ の正インパルスで、図中に示したように回路定数を適宜変化して、波形が絶縁物の固有容量の増加によってひずまないようにしている。図2に電極構成を示す。実験はすべて大気中にて行い、高圧側の電極としては直径が5 mmで、先端の曲率半径が0.28 mmの砲弾形のステンレス鋼棒を、背後電極としては一辺が30 cmの正形状の銅平板を使用した。接地側の電極としては絶縁板の上に内部を円形にくりぬいた環状電極を置き、その内半径を変化して沿面距離 d を変え、50% コロナ開始電圧 V_{C50} および 50% フラッシュオーバー電圧 V_{50} を測定した。 V_{C50} および V_{50} は約30回の昇降法によって測定し、コロナ発生の有無は主として電流波形から判別したが、雑音との区別が難しい場合には電荷図によって確認した。絶縁板は一辺が22 cmの正形状のPET (ポリエチレンテレフタレート) フィルムで、厚さ τ が0.05, 0.1, 0.25, および0.35 mmの4種類を用い、 τ が0.7および1.05 mmの場合には τ が0.35 mmのPETをそれぞれ2枚および3枚重ねて使用した。またPETフィルムは十分に乾燥したそりのないものを使用して、重ね合せるときには十分に密着するように注意し、電圧印加ごとに取替えた。放電状況の観測にはイメージコンバータカメラ (TRW製, 1D3S20) を用い、流し撮り写真の撮影

図1 実験回路
Fig. 1. Experimental circuit.

図2 電極構成
Fig. 2. Constitution diagram of electrodes.

の場合には、スリットを取付け、環状電極の代わりに半丸棒電極を置いて観測した[図2(C)]。

3. 実験結果および考察

〈3・1〉 電荷図形の形状と大きさ 図3は種々の電圧を印加した場合の電荷図を示したもので、(a)~(c)図はPETフィルムの厚さ τ が1.05 mm, (d)~(f)図は0.25 mm, (g)~(i)図は0.05 mmの場合である。なお、この場合には図2(b)で環状電極を取除いた電極配置になっている。図3(a), (d), (g)は電流パルスが1発のみ、すなわち Polbüschel の場合の電荷図である。この τ が1.05 mmの場合[(a)図]はストリーマ1本の径が太く、しかも枝と枝との間隔が広い。しかし、 τ が0.25 mm[(d)図]から0.05 mm[(g)図]と小さくなるとストリーマは細く、その間隔も狭くなる。従って、絶縁物の固有容量 C_0 の増加と共にストリーマの径は細くなり、その枝と枝との間隔が狭くなることがわかる。(b), (e), (h)図は電流波形のパルスが2発の場合で、沿面コロナストリーマが棒電極先端から2度発生した場合である。 τ が1.05 mmの場合には印加電圧が15.4 kV[(b)図]であるが、 τ が減少して0.25 mmの場合には8.8 kV[(e)図]、0.05 mmの場合には2.2 kV[(h)図]となり、 C_0 の増加と共に低い印加電圧で2発目の沿面コロナストリーマが発生する。(c), (f), (i)図には電流パルスが多数発生した場合、すなわち Gleitbüschel の電荷図を示している。これから電荷図先端部のストリーマは τ が1.05 mmの場合には明確に認められるが、 τ が小さくなると共に細く短くなり、 τ が0.05 mmの場合には更に著しく短くなるこ

(a)~(c) $\tau = 1.05 \text{ mm}$, (d)~(f) $\tau = 0.25 \text{ mm}$
 (g)~(i) $\tau = 0.05 \text{ mm}$

図3 種々の厚さのPETフィルムの電荷図
Fig. 3. Dust figures on PET films with various thickness.

図 4 円周上単位長さあたりのストリーマの枝数

Fig. 4. Number of branches of streamer per unit length of circumference.

とがわかる。

図 4 は環状電極を取除いた電極配置で、固有容量 C_0 と円周上単位長さあたりのストリーマの枝数 n の関係を、電流パルスが一発のみの場合(図 3(a), (d), (g) に対応)の電荷図形から求めたものである。ここで、円周上単位長さあたりの枝数 n は電荷図先端部の円周上のストリーマの数を求め、それを図形の最大半径の円周で除したものである。同図から C_0 の増加と共に n は増加し、 C_0 が $2.6 \sim 55 \text{ pF/cm}^2$ での n の平均値は $5.7 \sim 20.1 \text{ 本/cm}$ まで増加する。なお、それぞれの τ に対する固有容量 C_0 は PET の比誘電率 ϵ_s を 3.1 として計算したものである。また n (本/cm) と C_0 (pF/cm^2) の関係は両対数目盛でほぼ直線

$$n = 3.8 C_0^{0.42} \quad (\text{本/cm}) \quad (1)$$

が成立する。このことから Polbüschel 発生時の円周上単位長さあたりのストリーマの枝数 n は、 C_0 すなわち τ のみに依存することがわかる。なお、電流パルスが一発のみの場合のストリーマ発生時の瞬時電圧 v_c は、同じ C_0 すなわち同じ τ でも後述するが(図 5), 若干の幅がある。従って同じ τ では v_c が高いと、ストリーマの進展長が増し、放電電荷量も大きくなるので、ストリーマの枝数は増加する⁽⁶⁾。しかし本研究ではストリーマの枝数をストリーマが進展した最大長さを半径とした円周で除しているの、 v_c が異なっても同じ C_0 であれば v_c と n の間には何らの関係も認められなくなり、 n はストリーマ発生時の瞬時電圧にも関係しない。

図 5 は同様に環状電極を取除き、電流パルスが一発のみ発生した場合について、ストリーマ発生時の電圧瞬時値 v_c と電荷図形の最大半径 l との関係を、 τ を種々変化させた場合について示したものである。ここで種々の τ の瞬時電圧 v_c に対する l の分布を 1 本の直線で統一すると、 v_c (kV) と l (cm) との間には

図 5 電荷図の大きさ

Fig. 5. Radius of dust figures.

$$l = 0.26 v_c - 0.2 \quad (\text{cm}) \quad (2)$$

がほぼ成立する。ただし、厳密にそれぞれの τ について見ると、 v_c に対する l の分布はほぼ原点を通る直線となる。またそれぞれの τ に対する測定値の分布の範囲は τ によって異なり、例えば τ が 1.05 mm の l は $1.0 \sim 1.8 \text{ cm}$ の範囲であるが、 τ が 0.05 mm では $0.23 \sim 0.5 \text{ cm}$ の範囲となり、 τ が小さくなるほど低い v_c でストリーマが発生し、また電流パルスが二発以上発生する電圧も τ が小さいほど低くなる。本実験結果は C_0 が $2.6 \sim 55 \text{ pF/cm}^2$ のものであるが、 C_0 がこれより小さくなるアクリル板⁽⁶⁾での測定値ともほぼ連続する。従って、これは種々の τ に対して(2)式が適用できることを示している。

〈3・2〉 50%沿面コロナ開始電圧 V_{c50} と 50%沿面フラッシュオーバー電圧 V_{50} 図 6 に V_{c50} と沿面距離 d の関係を示す。 d がほぼ 2 cm 以下の範囲では d の影響が著しく、 d の増加と共に V_{c50} は急激に上昇するが、 d がこれ以上になると d の影響は小さくなり、 V_{c50} はほぼ一定になる。また PET フィルムの厚さ τ の増加と共に V_{c50} は上昇するが、 τ が 0.7 および 1.05 mm ではほぼ同程度になる。

図 7 に τ を種々変化した場合の、 V_{c50} と d の関係を示す。それぞれの τ に対する $V_{50}-d$ 特性は、ある沿面距離 d_c を境として異なることがわかる。なお、この d_c は τ に依存し、 τ が減少するほど小さい。 d が $0.4 \text{ cm} \sim d_c$ の範囲における V_{50} には τ による差異は認められず、 V_{50} (kV) は d (cm) の増加と共に直線的に上昇し、

$$V_{50} = 18d \quad (\text{kV}) \quad (3)$$

が成立する。しかし d が d_c を超えると、 V_{50} は τ にも関係するようになり、その増加と共に上昇するようになる。 d が $d_c \sim 10 \text{ cm}$ の範囲では、

図 6 50%沿面コロナ開始電圧
Fig. 6. 50% surface corona onset voltages.

図 7 50%沿面フラッシュオーバー電圧
Fig. 7. 50% surface flashover voltages.

$$V_{50} = A + 0.77d \quad (\text{kV}) \quad (4)$$

がほぼ成立する。ここで A は τ によって決まる定数で、 τ が 0.05, 0.1, 0.25, 0.35, 0.7, 1.05 mm の場合 A はそれぞれ 5.7, 8.0, 9.3, 10.8, 14.6, 18.4 となる。以上のように、 d が d_c 以下では (3) 式が、 d が d_c 以上では (4) 式が成立し、この d_c を境として V_{50} - d 特性の異なる二つの領域に分けることができる。そこで d が 0.4~ d_c (cm) の範囲を C 領域、 d_c ~10 cm の範囲を A' 領域と呼ぶことにする。ところで、(4) 式の定数 A と C_0 との関係を両対数グラフに描くとほぼ直線となり、

$$A = 26C_0^{-0.39} \quad (5)$$

がほぼ成立する。従って、(4) 式に (5) 式を代入すると、

$$V_{50} = 26C_0^{-0.39} + 0.77d \quad (\text{kV}) \quad (6)$$

となり、(6) 式は PET フィルムに対する A' 領域の V_{50} を C_0 と d の関数として示した実験式である。なお C 領域における V_{50} は τ 、従って C_0 に無関係である。以上の結果を τ が比較的厚いアクリル板⁽⁷⁾、すなわち C_0 が比較的小さい場合 ($C_0 = 2.6 \sim 0.5 \text{ pF/cm}^2$) と比較すると、アクリル板の場合も V_{50} - d 特性は τ

図 8 フラッシュオーバー時間
Fig. 8. Flashover time.

によって決まるある沿面距離 d_c を境として、ほぼ 2 本の直線によって示され、 d が d_c 以下での V_{50} は PET フィルムの場合と同様に (3) 式で与えられる。しかし、 d が d_c 以上になるとその特性は (6) 式とは異なり、

$$V_{50} = 18.4 + kd \quad (\text{kV}) \quad (7)$$

となる⁽⁷⁾。ここで、 k は τ すなわち C_0 によって決まる定数で $k = 1.8/C_0$ である。以上のことから (6) 式の PET フィルムの場合には V_{50} - d 曲線において、縦軸との交点を示す右辺第 1 項は C_0 の関数で C_0 の増加と共に減少し、その直線のこう配を示す第 2 項 d の係数は常に一定である。しかし、(7) 式のアクリル板の場合には逆に縦軸との交点は常に一定で、直線のこう配は C_0 によって決まることがわかる。なお、 C_0 が 2.6 pF/cm^2 程度、すなわち τ が 1 mm 程度では (6) 式および (7) 式の各項はほぼ等しくなり、PET フィルムおよびアクリル板の V_{50} - d 特性はほぼ一致する。ところで、両者の C_0 がほぼ同じになる 2.6 pF/cm^2 程度では前述の電荷図形の半径 l 、50% コロナ開始電圧 V_{c50} 、また後述のフラッシュオーバー時間やフラッシュオーバー過程も d の広い範囲で両者はよく一致する。従って、PET あるいはアクリルという材料の違いによる影響はないものとみなされるので、 2.6 pF/cm^2 程度の C_0 を境として、 V_{50} - d 特性が異なるものと考えられる。

図 8 は τ が 1.05 mm の場合の V_{50} 印加時のフラッシュオーバー時間 t_f と d との関係を示したものである。この場合には、 t_f - d 特性はほぼ同じ C_0 のアクリル板の場合とほぼ同様となり⁽⁷⁾、 d_c 程度を境としてその特性が異なる。すなわち、 d が d_c ~10 cm の範囲では d の増加と共に t_f は増加する。例えば d が 2 cm の場合には t_f は 0.8~2.2, 平均 1.3 μs であるが、 d が 10 cm になると 2.0~4.8, 平均 3.0 μs と増加する。しかし、 d が 0.4 cm~ d_c の領域では d が増加す

ると t_f は減少し、しかもその変動幅も A' 領域に比べて大きい。例えば、 d が1.0 cmでは0.75~6.2 μ s、平均2.1 μ sとなり、 d が2 cmの場合に比べて t_f の変動幅も平均値も大きくなる。この傾向は他の τ における t_f - d 特性についてもほぼ同様となり、 d_c を境として特性が異なる。

〈3・3〉 50%コロナ開始時の電界強度の計算 図9は50%沿面コロナ開始電圧 V_{c50} を印加したとして、 $d=5$ cmの場合の種々の τ に対する高電圧側棒電極先端のごく近傍の電界強度 E_0 (絶対値)と固有容量 C_0 との関係を電荷重畳法により計算したものである。同図から E_0 は C_0 の増加と共に増加することがわかる。例えば、 C_0 が2.6~55 pF/cm²に増加すると E_0 は770~1,180 kV/cmまで増加する。また図10は同様に $d=5$ cmの場合の V_{c50} を印加したとしたときの、 τ が1.05および0.05 mmについて、絶縁物表面の電界強度 E (絶対値)を高圧側の棒電極からの距離 r を横軸として示したものである。 r が増加すると最初 E は急激に低下するが、 r の増加と共にその低下の割合は減少するようになる。また、 τ が0.05 mmのほうが1.05 mmに比べて棒電極先端近傍の電界強度は大きい、 r の増加に対する E の低下率は τ が0.05 mmのほうが大きいので、 r が0.2 mm程度では τ が1.05 mmの場合とほぼ同程度の電界強度となり、それ以上の r では τ が0.05 mmのほ

うが逆に低くなる。従って、 r が0.2 mmを超え、これより大きくなると共に、絶縁物表面の電界強度 E が同程度の値となる棒電極からの距離 r は、 τ が大きいほど大きくなる。このことから、それぞれの τ に対する V_{c50} を印加し沿面コロナストリーマが発生進展する場合、絶縁物の厚さ τ が大きいほどその進展長は長くなることが予想される。一方、沿面コロナが光学的あるいは電流として観測し得るには、電極先端の電界のみならず、その先端よりやや負極方向へ離れた点での電界がある強さに達することが必要であろう。しかし、電界強度 E は棒電極先端から離れるにつれて、 τ が小さいほど、すなわち C_0 が大なるほど急激に低下する。そのため電極先端より離れた点での電界がある一定の値になると、観測し得るような沿面コロナが発生するものとすれば、棒電極先端近傍の電界強度は τ が小さいほど、すなわち C_0 が大きいほど高くなると考えられる (図9)。ここでの電界強度は絶対値について述べたが、ストリーマのより詳細な進展については、電界の方向についても考慮する必要があると思われる。なお、この計算での電位の誤差は最大 1.8×10^{-2} V以下であった。

〈3・4〉 V_{50} 印加時の沿面フラッシュオーバー過程

以上述べたように、PETフィルムの V_{50} - d 特性および t_f - d 特性は、 τ によって決まるある沿面距離 d_c を境として互いに異なる。また d が $d_c \sim 10$ cmの範囲では、PETフィルムの場合での V_{50} は(6)式が、アクリル板の場合には(7)式が成立し、2.6 pF/cm²程度の C_0 を境として互いに V_{50} - d 特性が異なる。このように、 d および C_0 によって沿面フラッシュオーバー諸特性が異なっているので、フラッシュオーバー過程も各領域で相違するものと考えられる。ここでは、それぞれの領域のフラッシュオーバー過程をイメージコンバータカメラを用いて観測した結果について詳細に述べる。なお、各々の条件にて数十枚以上の写真を撮影したが、現象の再現性は良く、同一条件では本質的に異なるような現象が観測されるようなことはなかった。

(1) A' 領域の沿面フラッシュオーバー過程 この領域の代表的観測例として、図11および図12に d が5 cm、 τ がそれぞれ0.35および0.05 mmの流し写真と電圧-電流オシログラムを示す。 τ が0.35 mmの場合、 V_{50} を印加すると、まず棒電極先端から、多数のやや細いフィラメント状の一次正ストリーマ(PPS)⁽⁷⁾が進展するが、進展と共に急激に速度を減じ、約1.2 cmの距離まで達すると進展を停止する〔図11(a)〕。その後、端子電圧の上昇により再び棒電極先端からPPSが進展し、PPS幹部には二次正ス

図9 棒電極先端のごく近傍の電界強度
Fig. 9. Field strength of rod electrode tip.

図10 絶縁物表面の電界強度
Fig. 10. Field strength on dielectrics.

図 11 沿面放電の流し写真とオシログラム
Fig. 11. Streak photographs and oscillogram of surface discharge.

図 12 沿面放電の流し写真とオシログラム
Fig. 12. Streak photographs and oscillogram of surface discharge.

トリーマ (SPS)⁽⁷⁾ および正リーダ (PL) が形成される。PL は、その頭部から間欠的に PPS を発生しながら約 1.6×10^6 cm/s の速度で進展し、更に進展して PPS が負極に到達するところになると、PL は急速に進展して負極に達し、直ちにフラッシュオーバーする [図 11 (b)]。この場合 PL チャネルからフラッシュオーバー時の強烈な発光を伴うアーク柱への移行は、PL チャネルの負極側から進む [図 11 (c)]。また PL 頭部からの PPS 発生時に、その起点から発光波 (LW) が正極へ向かって進展するので PL の発光は間欠的に強くなる [図 11 (a), (b)]。以上のフラッシュオーバー過程は、 τ が 1 mm 以上 (C_0 が 2.6 pF/cm² 以下) のアクリル板での場合のそれとほぼ同様になるが、 τ が 0.35 mm の PET フィルムの場合には、PPS の発生頻度は大きい、PPS の進展長はかなり短くなる。

τ が 0.05 mm となって著しく C_0 が増加すると、PPS の進展長は更に短くなり、流し写真では PPS の発生が認めにくくなる。この場合には V_{50} 印加直後、棒電極先端から強い発光域が進展する [図 12 (a)]。この発光域は前述の PL に比べて著しく持続的な発光をし、しかもその先端から発生進展する PPS が認め

られないが、これが負極に到達すると直ちにフラッシュオーバーするので、 τ が 0.35 mm の場合と同様に PL と呼ぶ。この PL は約 3×10^6 cm/s の速度で進展し [図 12 (a)]、負極に達すると直ちにフラッシュオーバーし [図 12 (b)]、負極側からアークに移行する [図 12 (c)]。この場合の流し写真では PPS の発生が認められない。しかし、電荷図 [図 3 (g) ~ (i)] によると著しく短い、棒電極先端および PL 先端から PPS は発生進展しているので、この場合にも PL の先端から極めて短い PPS が進展しているものと思われる。また、 τ が 0.35 mm の場合の電流波形はパルス状の成分が多い。しかし τ が 0.05 mm の場合には接続的な電流成分をもった波形となり、 τ が 0.35 mm の場合に比べて 10 倍近い電流が流れ、その値は十数 A になる [図 11 (d), 図 12 (d)]。以上のように、 A' 領域における PL はその頭部から PPS を間欠的に発生し、これが負極に到達するとフラッシュオーバーする。この A' 領域の過程は、PL 先端から PPS を間欠的に発生しつつ進展する点では、アクリル板すなわち C_0 が 2.6 pF/cm² 以下の場合の A 領域とよく似た過程になる。しかし、この PET フィルムすなわち C_0 が 2.6 pF/cm² 以上の場合には、 C_0 の増加と共に PPS 進展長が著しく短くなり、またアクリル板の場合の V_{50} - d 特性⁽⁷⁾ と異なるので、アクリル板の場合の A 領域と区別して、PET フィルムではこの領域を A' 領域と呼んだ。

(2) C 領域の沿面フラッシュオーバー過程 この領域の代表的観測例として、図 13 に τ が 0.35 mm, d が 0.6 cm の場合の流し写真と、電圧-電流オシログラムを示す。この場合のフラッシュオーバー過程はアクリル板の場合とほぼ一致する⁽⁷⁾。すなわち V_{50} を印加すると、まず棒電極先端から PPS が進展し、負極に到達する [図 13 (a), (b)]。PPS が到達した到達点には負グロー (NG) が形成され、この NG の発光は長

図 13 沿面放電の写真とオシログラム
Fig. 13. Streak photographs and oscillogram of surface discharge.

時間持続する〔図 13(b)〕。その後 PPS 幹部には SPS が形成され、先行の PPS チャネルに沿って次第に負極に向かって進展する。端子電圧が上昇している間 SPS はその全長にわたって持続的な発光をするが、端子電圧が波高値に近づいて、その上昇速度が低下すると SPS は発光が弱くなる。しかし、SPS は更に進展を続けるので、ある長さの発光域が負極へ移動するようになる〔図 13(b)〕。その後 SPS が負極に到達すると、その正極側端が正極に向かって進展し、SPS によって正負両極間が橋絡されると直ちにフラッシュオーバーする。また、両極からほぼ同時にアークに移行する〔図 13(c)〕。この場合の電流波形を見ると、電圧印加後一発のみのパルスが発生し、その後極めて微弱な電流が流れるのみでフラッシュオーバーする。

〈3・5〉 フラッシュオーバー特性および過程に対する τ の影響 前述したように、 d が d_c 程度を境としてフラッシュオーバー特性および過程が互いに異なる。これは τ が 1 mm 以上、すなわちアクリル板の場合とほぼ同様となる。しかし、 τ が 1 mm から更に減少すると PPS の進展長が著しく減少し、 d が d_c 以上のフラッシュオーバー特性および過程は、 τ が 1 mm 以上の場合と異なってくる。ここでは τ の減少によるフラッシュオーバー特性および過程への影響について述べる。

τ が 1 mm 程度の場合 V_{50} を印加すると、電圧印加後最初に発生進展する PPS は約 1.5 cm 進展する。そのため、 A' 領域での d の範囲は 1.5 cm 以上であるので、PPS は負極まで到達することができず、更に新たな PPS が端子電圧の上昇と共に発生進展するようになる。しかし、 C 領域では最初の PPS は必ず負極に到達し、両電極間はグロー状のチャネルによって橋絡され、新たな PPS は発生進展しない。このように最初の PPS の負極到達のいかんが、その後のフラッシュオーバー過程に著しい差を生じ、そのため V_{50} や t_f は d_0 を境として変化する。

τ が 1 mm より減少すると、PPS の進展長が著しく短くなる。〈3・3〉節で述べたように、 V_{c50} を印加した場合、 τ が 1.05 mm より 0.05 mm のほうが印加電圧は低いにもかかわらず、電極先端近傍での電界強度は高い〔図 9〕。そのため τ が小さいほど、より低い電圧で沿面コロナストリーマの発生が可能となり、 V_{c50} は τ が小さくなると共に低下する〔図 6〕。また、電界強度は電極先端から離れるにつれて低下するが、 τ が 1.05 mm より 0.05 mm のほうが τ に対する電界強度の低下率が大きくなるので、同程度の電界強度になる沿面距離は、 τ が 0.05 mm より 1.05 mm のほうが大きい。従って、 τ が小さくなるほど、最初に発生する

PPS の発生電圧は低い、その進展長も短くなる。 V_{50} を印加した場合にも同様に考えられるので、 A' 領域では最初に発生する PPS およびその後間欠的に発生進展する PPS 進展長は、 τ の減少と共に短くなる。一方、 τ が減少すると C_0 が増加する。 C_0 の増加は充電電流を増大させるので、 τ が 0.35 mm の場合は 2 A 程度、0.05 mm の場合には十数 A の持続的な電流が流れる。そのため PL は、その発光を強くしかも持続的にし、その導電性を高める。アクリル板の場合のフラッシュオーバー過程は気中針対平板ギャップの場合のそれとほぼ同様になり、しかも V_{50} を示す実験式も気中針対平板ギャップの場合のそれと同様な形になる。従ってアクリル板の沿面放電における場合にも、PPS からの負電荷の供給が PL の形成と進展に大きく貢献しているものと考えられるが、PET フィルムの場合には PPS の進展長は著しく短い。しかし C_0 が著しく大きくなるので、PPS の進展と共に極めて大きな充電電流が流れ、これが PL の形成と進展に大きな役割を果たすようになる。これがアクリル板と PET フィルムの場合の V_{50} - d 特性の違いとして表れたものと考えられる。

C 領域では最初の PPS は必ず負極へ到達しなければならないが、 τ が減少すると、最初の PPS が到達する距離が小さくなるので、 τ の減少と共に C 領域の過程でフラッシュオーバーする沿面距離は小さくなる。そのため、 A' と C 領域の境界となる沿面距離 d_c は、 τ の減少と共に小さくなる〔図 7〕。この領域では最初の PPS の進展がフラッシュオーバーに大きく影響するが、PPS の進展長は τ が異なっても同一の実験式 (2) で示される。従って、この領域での V_{50} は τ すなわち C_0 に直接関係なく、アクリル板でも PET フィルムの場合でも (3) 式で示されるものと考えられる。

4. む す び

絶縁物全面に背後電極が存在するような電極配置で、固有容量が著しく増大した場合の沿面放電特性および過程を観測し、広い範囲での固有容量の影響について調べた。それらの結果を要約すると以下のようになる。

(1) Polbüschel における電荷図先端部円周上の単位長さあたりの枝数 n は、固有容量 C_0 の増加と共に増加し、 n と C_0 との関係は (1) 式で示される。また、Polbüschel の伸びと発生電圧との関係は (2) 式で示され、これは種々の τ すなわち C_0 に対して適用できる。

(2) V_{c50} 印加時の棒電極先端近傍の電界強度は

C_0 が大きいほど高くなるが、棒電極先端からの距離 r の絶縁物上の電界 E は r が増すにつれて、 C_0 が大きいほど急激に低下する。そのため、それぞれの r に対する E が同程度の値になる r は r が大なるほど大きくなる。このことから V_{C50} 印加時のストリーマの進展長は r が大なるほど長くなる。

(3) V_{50} - d 特性は r によって決まるある沿面距離 d_c を境としてほぼ2本の直線によって示され、 d が $0.4\text{ cm} \sim d_c$ の範囲を C 領域、 $d_c \sim 10\text{ cm}$ の範囲を A' 領域と呼ぶと、 V_{50} は C 領域では(3)式で示され、アクリル板の場合と同じ式となるが、 A' 領域では(6)式で示され、アクリル板の場合と異なる。

(4) A' の領域の沿面フラッシュオーバー過程は、ほぼアクリル板の場合と同様となる。しかし、固有容量の増加と共に PPS の進展距離が短く、その発生間隔も小さくなる。特に r が 0.05 mm の場合は PL 全体が持続的にしかも強く発光し、その先端から発生する PPS は著しく短い。

(5) C 領域の沿面フラッシュオーバー過程は、アクリル板の場合とほぼ同様となる。すなわち、最初の PPS 幹部に形成された SPS によって両電極間が橋絡され、フラッシュオーバーが起こる。この領域では PPS の発生は1回のみである。

(6) アクリル板での A 領域では PL は PPS を通しての負電荷の流入によって形成され進展するが、 C_0 が著しく大きい PET フィルムでは充電電流が PL の形成に貢献する。

以上、固有容量を著しく増加したときの、正インパルス電圧印加時の沿面フラッシュオーバー特性および過程について述べた。沿面放電は種々の因子によって影響され、本論文では固体絶縁物の厚さ、すなわち固有容量がフラッシュオーバー特性および過程に著しく影響することを明らかにした。今後は更に幅広い実験条件にて研究を進める予定である。

最後に、日ごろから懇切丁寧に御指導いただく福岡大学 常安 暢教授ならびに九州大学総合理工学研究科 赤崎正則教授に深く感謝の意を表するものである。

また、卒業研究として本実験の一部に従事された卒業生の方々に謝意を表す。

(平成元年7月24日受付, 同元年10月16日再受付)

文 献

- (1) 例えば Y. Toriyama: Dust figure of surface discharge and its applications (1961) Kinokuniya
- (2) A. Kawashima & S. Hoh: "Lichtenberg figures on various electrical insulating materials", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, EI-13, 51 (1978)
- (3) 大木: 「空気中における誘電体の衝撃沿面閃絡電圧特性」, 電学誌, 76, 28 (昭31-1)
- (4) A. Kawashima & S. Hoh: "Observation of Surface Discharges Using Image Converter Camera International High Voltage Symposium, p. 465 (1975)
- (5) 高木: 「急しゅん衝撃電圧に対する沿面放電の放電電荷量と放電機構」, 電学論 A, 96, 197 (昭51-5)
- (6) 辻村・中村: 「衝撃沿面放電における電流波形と放電図形」, 電気学会放電研究, ED-72-6 (昭47)
- (7) 嶋崎・常安・赤崎: 「大気中正インパルス電圧印加時におけるアクリル樹脂板の沿面フラッシュオーバー過程」, 電学論 A, 102, 219 (昭57-4)

嶋崎 俊 行 (正員)

昭和19年12月23日生。47年3月福岡大学大学院工学研究科修士課程修了。同年4月同大学工学部電気工学科助手, 52年4月同講師, 56年4月同助教授, 現在に至る。主として、気中放電および沿面放電の研究に従事。照明学会, 静電気学会会員。

眞鍋 吉 秀 (正員)

昭和24年11月2日生。47年3月福岡大学工学部電気工学科卒業。同年4月同大学工学部電気工学科助手, 49年4月同大学助手, 現在に至る。この間、主として沿面放電の研究に従事。