

論 文

大気中負インパルス電圧印加時における PET フィルムの沿面放電過程

嶋崎俊行*, 真鍋吉秀*

(1991年4月15日受理)

Surface Discharge Processes on PET Film under Negative
Impulse Voltage in Atmospheric Air

T. SHIMAZAKI* and Y. MANABE*

(Received April 15, 1991)

The surface discharge phenomena on PET film with the thickness from 0.05 to 1.05 mm were investigated under 1/40 μ s impulse voltage in atmospheric air. The 50% flashover voltages V_{50} and the corona onset voltages 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} application. 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 discharge processes in the creeping distance from 0.4 cm to d_c are similar to those of the acrylic plate. However, the surface flashover characteristics and the processes in the creeping distance from d_c to 10 cm differ from those of the acrylic plate. In this region, the negative streamers decrease its length with the decrease in the thickness of PET film. These surface discharge processes are illustrated with the typical photographs, and are explained in connection with the surface flashover characteristics.

1. まえがき

固体誘電体の沿面放電によるフランシオーバ電圧は、固体誘電体の固有容量の影響を著しく受け、その増加と共に低下する。そのため種々の厚さのアクリル板や比誘電率の異なった固体誘電体を用いて、誘電体の固有容量に対する沿面放電現象への影響が、研究されてきた¹⁻³⁾。しかし、この沿面フランシオーバ現象の解明に用いられた固体誘電体は、厚さが1mm以上の比較的厚いものが多く、そのため固有容量が著しく大きい場合の沿面放電現象については、十分に明らかにされていない。

また、放電機構を正確に理解するには、ある特定の条件の現象の観測だけではなく、幅広い条件での観測が必要であるが、従来の観測では固体誘電体の固有容量につ

いても、主としてアクリル板を使用したものであったため、比較的狭い範囲での観測結果(固有容量=0.26~2.6 pF/cm²)であった。そこで筆者らは固体誘電体としてアクリル板およびPETフィルムを用い、正インパルス電圧印加時の沿面フランシオーバ過程を観測し、広い範囲での固体誘電体の固有容量の変化(固有容量 $C_0=2.6 \sim 55$ pF/cm²)によるフランシオーバ特性および過程の変化を明らかにした⁴⁾。

一方、実用的には絶縁破壊電圧が極めて重要であり、これについてはToeplerが求めたGleitbüschelの長さに関する実験式を用いて、Grunwald⁵⁾, Elsner⁶⁾および大木²⁾が計算を行っている。しかし、Toeplerが求めた実験式は背後電極が細長いリボン状の場合のものであって、より一般的である誘電体全面に背後電極が存在するような場合にも適用できるとは限らない。

以上のような観点から、本研究では絶縁物全面に背後電極が存在するような電極配置において、PETフィルムの厚さを種々変化して幅広く固有容量を変え($C_0=2.6 \sim 55$ pF/cm²)、負のインパルス電圧印加時の沿面距離と50%沿面フランシオーバ電圧の関係などを求めた。

キーワード：沿面放電、絶縁破壊、固体誘電体、インパルス

* 福岡大学工学部電気工学科 (814-01 福岡市城南区七隈
8-19-1)

Department of Electrical Engineering, Faculty of
Engineering, Fukuoka University, 8-19-1 Nana-
kuma, Jonan-ku, Fukuoka, 814-01 Japan

またその時の沿面フラッシュオーバ過程をイメージコンバータカメラを用いて観測し、フラッシュオーバ特性と過程を関連づけ、固有容量が著しく大きい場合の沿面放電の機構解明を試みた。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、ほぼ負リーダのみの進展によってフラッシュオーバすることなどがわかった。これらの特性と過程を対応づけ、厚みが比較的厚いアクリル板の結果と比較検討し詳しく述べる。

2. 実験装置と方法

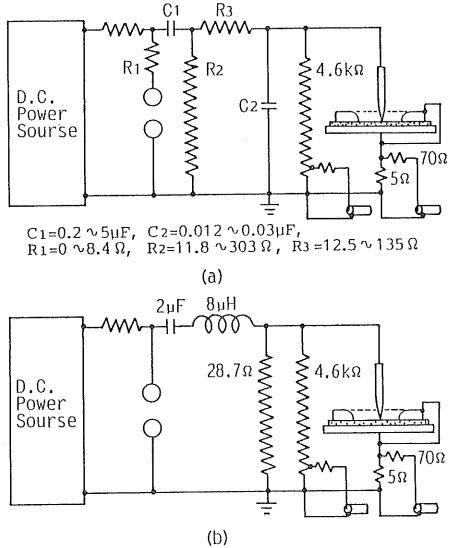


図1 実験回路

Fig. 1 Experimental circuit.

図1に実験回路を示す。印加電圧波形はほぼ $1/40 \mu s$ の負インペルス電圧で、同図(a)中に示したように回路定数を適宜変化させて、PET フィルムの固有容量の増加によって波形が歪まないようにしている。しかし、PET フィルムの厚さが 0.05 mm の場合にはこの回路では歪むので同図(b)の回路で実験を行った。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 の砲弾型のステンレス棒を、背後電極としては一辺が 30 cm の正方形状の銅平板を使用した。接地側の電極としては PET フィルムの上に内部を円形にくりぬいた環状電極を置き {同図(a), (b)}、その内半径を変化させて沿面距離 d を $0.4 \sim 10 \text{ cm}$ の範囲で変え、 50% 沿面コロナ開始電圧 V_{C50} および 50% 沿面フラッシュオーバ電圧 V_{50} を測定した。 V_{C50} および V_{50} は約 30 回の昇降法によつて測定し、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つて確認した。電荷图形の観測には環状電極を取り除いた電極構成 {同図(c)} で行い、また、そのときの静止写真をイメージインテンシファイヤを取り付けたカメラにより撮影した。放電の進展状況の観測にはイメージコンバータカメラを用い、流し撮り写真の撮影場合には、イメージコンバータの陰極ガラス管面にスリットを取り付け、環状電極の代りに半丸棒電極を置いて観測した {同図(d)}。誘電体としては主として厚さ τ が $0.05, 0.1, 0.25$ および 0.35 mm の 4 種類の PET フィルムを十分に乾燥して用い、 τ が 0.7 および 1.05 mm の場合には 0.35 mm のものを 2 枚および 3 枚重ねて使用し、電圧印加ごとに取り替えた。また、比較のため τ が $1, 3, 10 \text{ mm}$ のアクリル板も必要に応じて使用した。

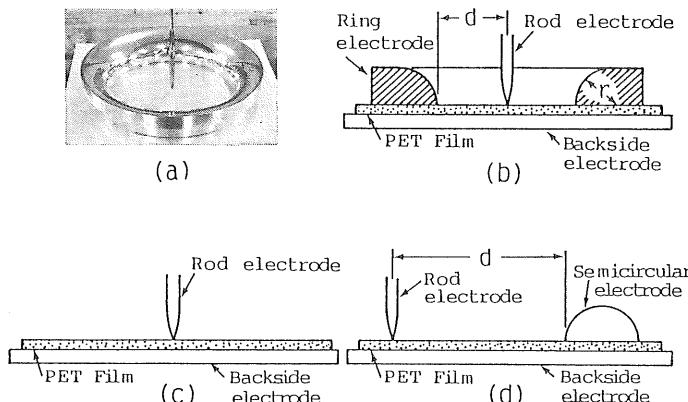
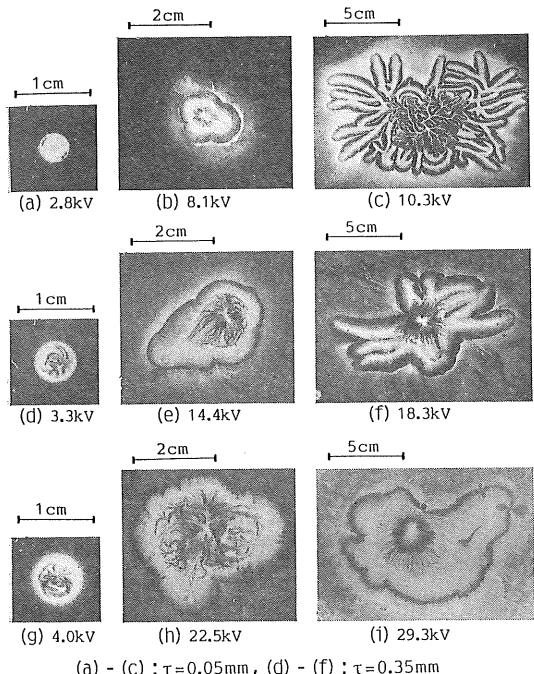


図2 電極構成

Fig. 2 Constitution diagram of electrodes.



(a) - (c); $\tau = 0.05 \text{ mm}$, (d) - (f); $\tau = 0.35 \text{ mm}$
 (g) - (i); $\tau = 1.05 \text{ mm}$

図3 種々の厚さの PET フィルム上の電荷図

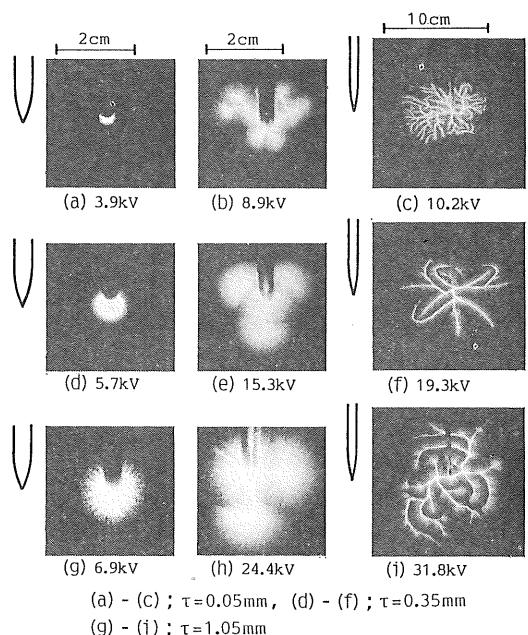
Fig. 3 Dust figures on PET films with various thicknesses.

3. 実験結果および考察

3.1 電荷图形および静止写真

図3および図4はそれぞれ種々の電圧を印加した場合の硫黄および光明丹による電荷図⁹と、石英レンズを装着したイメージインテンシファイヤにカメラを取り付けて撮影した静止写真を示したものである。図同の(a)～(c)は PET フィルムの厚さ τ が 0.05 mm、同図(d)～(f)は 0.35 mm、同図(g)～(i)は 1.05 mm の場合である。

図3(a), (d), (g)は Polbüschel の場合の電荷図で、この場合の電流波形は 1 発のパルスのみである⁸。この場合には τ に関係なくそれぞれの τ で電荷図はほぼ円形となる。同図(b), (e), (h)は Gleitbüschel の場合の電荷図で電流パルスは 2 発以上発生し、いずれの τ の場合でも進展する長さが方向によって異なり円形ではなくなる。また τ が 1.05 mm の場合には印加電圧は 22.5 kV {同図(h)} であるが、 τ が 0.35 mm になると 14.4 kV {同図(e)}, 0.05 mm では 8.1 kV {同図(b)} となり、 C_0 の増加と共に低い印加電圧で 2 発以上の電流パルスが発生する。同図(c), (f), (i)は電流パルスが多数発生した場合で、Gleitstiel がかなり進展した場合の電荷図を示したものである。この場合の τ が 1.05 mm {同図(i)} では τ



(a) - (c); $\tau = 0.05 \text{ mm}$, (d) - (f); $\tau = 0.35 \text{ mm}$
 (g) - (i); $\tau = 1.05 \text{ mm}$

図4 沿面放電の静止写真

Fig. 4 Static photographs of surface discharge.

が 1 mm のアクリル板の場合⁹ と同様な图形となるが、 τ が 0.35 mm では数本の枝状の图形 {同図(f)} となり、さらに τ を 0.05 mm に減少させると、枝の幅がさらに細くなり、またその数が増加するようになる {同図(c)}。このように τ を減少、すなわち固有容量を増加させると電荷图形の形状は著しく異なるようになることがわかる。なお図3における中心部の線状の图形はバックディスクチャージによるものと思われる。図4(a), (d), (g)は Polbüschel の場合の静止写真である。この場合には棒電極先端から放射状に広がる拡散的な発光外観をした負ストリーマが認められるが、 τ が小さくなるほどその発光域の半径は小さくなる。なお写真上部の発光のない部分は棒電極により影になった部分である。同図(b), (e), (h)は電流パルスが 2 発以上出始めた場合で、この場合には最初に発生した負ストリーマ先端部と棒電極先端の間には強く発光した細いチャネルの「負リーダ」¹⁰ が形成され、その先端付近からさらに扇状の新たな負ストリーマが進展する。しかして τ を小さくするほどこの扇状に進展する負ストリーマの大きさは小さくなる。同図(c), (f), (i)は多数の電流パルスが発生した場合の Gleitbüschel の写真である。 τ が 1.05 mm の場合には細いチャネルの負リーダから進展する拡散的な発光の負ストリーマの発光が良く認められるが {同図(i)}。 τ の減少と共に負ストリーマの進展長は短くなる。また、 τ が 0.05 mm では印加電圧が他の τ に比べ低いにもかかわらず、枝分れ

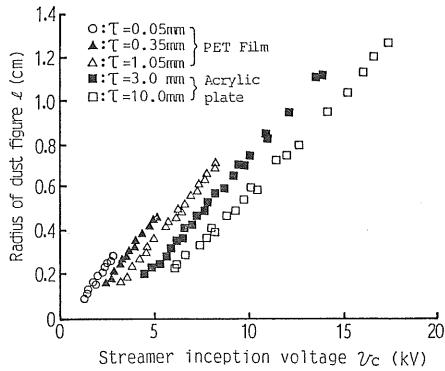


図5 電荷図の大きさ

Fig. 5 Radius of dust figures.

した多数の負リーダが進展する {同図(c)}。

図5は同様に環状電極を取り除き、電流パルスが1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 と電荷图形の最大半径 l との関係を、種々の厚さのPETフィルムおよびアクリル板に対して示したものである。PETフィルムに対しては τ が 0.05, 0.35 および 1.05 mm, アクリル板に対しては、1, 3 および 10 mm について測定した。なお、PETフィルムとアクリル板のそれぞれ 1.05 mm (固有容量 $C_0 = 2.6 \text{ pF/cm}^2$, 比誘電率 $\epsilon_s = 3.1^{11)}$ とした計算値) および 1.0 mm ($C_0 = 2.6 \text{ pF/cm}^2$, $\epsilon_s = 3.0^{11}$ とした計算値) の $l-v_c$ 特性は、材料の違いがあるにもかかわらず良く一致する。そこで τ が 1 mm のアクリル板の場合については図示していない。同図からそれぞれの τ については、 v_c と l の間にほぼ比例関係が成立することがわかる。また v_c-l 直線の勾配は τ によって異なるが、 v_c-l 直線を負の方向へ延長すると、それぞれの v_c-l 直線がほぼ一点で交わることから、

$$l = k_1(v_c + 6.8) - 0.93 \text{ (cm)} \quad (1)$$

がほぼ成立することがわかる。なおここで k_1 は τ すなわち C_0 に依存する定数で、 k_1 と C_0 との関係を片対数グラフで表すとほぼ直線となり、

$$k_1 = 0.1 + 0.00674 \ln C_0 \quad (2)$$

がほぼ成立する。(1)式は $0.26 \sim 55 \text{ pF/cm}^2$ の広範囲の C_0 に対して使用できる。なお、正極性電圧印加時¹⁴⁾の場合に比べると、同程度の v_c に対し l は約 1/3 となり、正極性電圧印加の方のストリーマの方が進展しやすいことがわかる。

3.2 50% 沿面コロナ開始電圧 V_{C50} と 50% 沿面ワッシャーオーバ電圧 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 V_{C50} に対する d の影響が著しく、

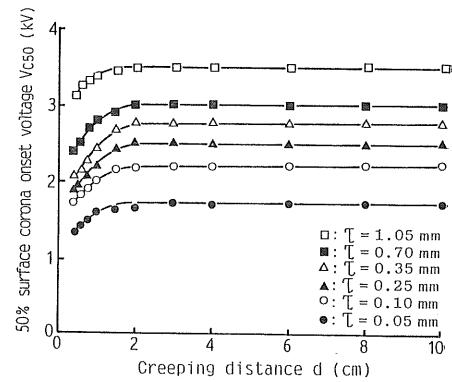


図6 50% 沿面コロナ開始電圧

Fig. 6 50% surface corona onset voltages.

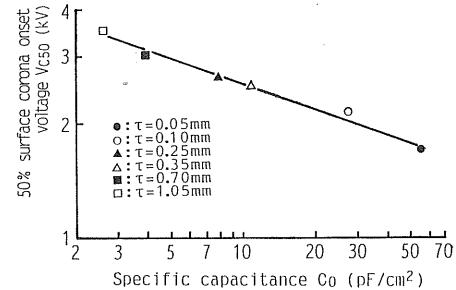


図7 50% コロナ開始電圧と固有容量との関係

Fig. 7 Relations between 50% corona onset voltages and specific capacitance.

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 の影響はほとんどなくなり、 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。そこでこの V_{C50} がほぼ一定となる d での V_{C50} と C_0 との関係を図7に両対数グラフで示すと、ほぼ直線となり V_{C50} (kV) と C_0 (pF/cm²) の関係は

$$V_{C50} = 4.6 C_0^{-0.23} \text{ (kV)} \quad (3)$$

で表わすことができる。また、この式による V_{C50} はアクリル板¹⁰⁾の τ が 1 および 10 mm の場合とも良く一致することから、(3)式は広い範囲の固有容量に対して適用できることを示している。

図8に d を 0.4~10 cm まで変化させた場合の種々の厚さの PET フィルムに対する V_{50} と d との関係を示す。 d が 10 cm から 1.5 cm 程度までの範囲では、 V_{50} は d の減少と共に低下し、その関係は

$$V_{50} = A + k_2 d \text{ (kV)} \quad (4)$$

で示される。ここで A および k_2 は τ によって決まる定数で τ が 0.05, 0.1, 0.25, 0.35, 0.7 および 1.05 mm の場合、 A はそれぞれ 21.3, 19.2, 14.9, 13.5, 10.3

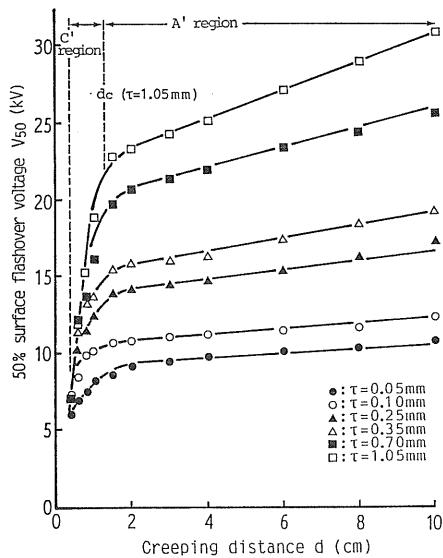


図 8 50% 沿面フラッシュオーバ電圧

Fig. 8 50% surface flashover voltages.

および 9.1, k_2 は 0.96, 0.71, 0.46, 0.31, 0.21 および 0.11 となる。しかし、 d を更に減少させると V_{50} は (4)式による計算値より低下し、

$$V_{50}=18.4 d \text{ (kV)} \quad (5)$$

で計算した $V_{50}-d$ 曲線にはほぼ一致するようになる。しかし、(5)式の V_{50} の計算値に一致する d は τ が小なるほど小さく、 τ が 0.05 mm の場合には d は 0.4 cm になる。以上のことからそれぞれの τ に対する $V_{50}-d$ 特性は、ある沿面距離 d_c を境として互いに異なり、 d が d_c 以上では(4)式が、 d が d_c 以下では(5)式がほぼ成立し、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。そこでここでは d が 0.4 cm ~ d_c の範囲を C' 領域、 d_c ~ 10 cm の範囲を A' 領域と呼ぶこととする。なおこの d_c は τ に依存し、 τ が減少するほど小さくなる。

ところで、(4)式の定数 A および k_2 に対する C_0 との関係を、それぞれ図 6 から求め両対数グラフに描くと、ほぼ直線となり、それぞれ

$$A=27.8 C_0^{-0.29} \quad (6)$$

$$k_2=1.8 C_0^{-0.65} \quad (7)$$

がほぼ成立する。したがって(4)式に(6)、(7)式を代入すると、

$$V_{50}=27.8 C_0^{-0.29}+1.8 C_0^{-0.65} d \text{ (kV)} \quad (8)$$

となり、(8)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¹⁰⁾、すなわち C_0

が比較的小さい場合 ($C_0=2.6 \sim 0.26 \text{ pF/cm}^2$) と比較すると、アクリル板の場合も $V_{50}-d$ 特性は、 τ 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すことができ、 d が d_c 以下での V_{50} は PET フィルムの場合と同様に(5)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(8)式とは異なり

$$V_{50}=18+k_3(d+3.7) \text{ (kV)} \quad (9)$$

となる⁶⁾。ここで k_3 は C_0 によって決まる定数で、

$$k_3=1.8 C_0^{-0.66} \quad (10)$$

である。以上のことから、 $V_{50}-d$ 曲線において、その直線の勾配を示す d の係数 k_3 は PET フィルムの場合とアクリル板の場合とはほぼ同じ値となるが、縦軸との交点を示す値は PET の場合(6)式で示され、(9)、(10)式から求めたアクリル板の場合の値 $6.66 C_0^{-0.66}+18$ とは異なる。なお C_0 が 2.6 pF/cm^2 程度すなわち τ が 1 mm 程度では(8)および(9)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 V_{50} がほぼ同じになる 2.6 pF/cm^2 程度では前述の電荷图形の半径 l 、また後述のフランシオーバまでの時間やフランシオーバ過程も d の広い範囲で良く一致する。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 9 は V_{50} 印加時の電圧印加後からフランシオーバまでの時間 t_f と d との関係を示したものである。同図(a)は τ が 1.05 mm の場合で、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、 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 1.5 cm の場合には t_f は 1.2 ~ 4.2、平均 2.25 μs であるが、 d が 10 cm になると 1.9 ~ 5.4、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 を増加させると 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 0.6 cm では 0.6 ~ 13.7 μs 、平均 4.1 μs となり、 d が 1.5 cm の場合に比べて t_f の変動幅も平均値も大きくなる。しかし同図(b)に示すように τ が 0.1 mm となると t_f は d の増加と共に増加するようになり、 d の減少と共に t_f が増加する領域はなくなる。

3.3 V_{50} 印加時の沿面放電過程

以上述べたように PET フィルムの $V_{50}-d$ 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 τ によって t_f-d 特性が異なる。このように、 d および C_0 によって沿面放電諸特性が異なっているので、沿面放電過程も相違するものと考えられる。ここで

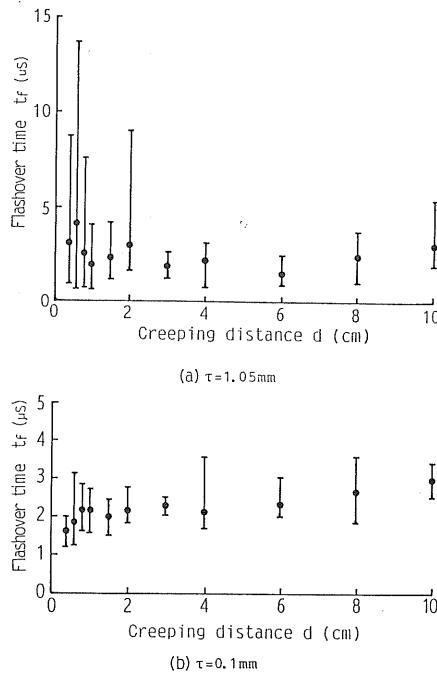


図 9 電圧印加後からフランシオーバまでの時間
Fig. 9 Flashover time.

は V_{50} 印加時における種々の d および τ に対する沿面放電過程を、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、主として半丸棒電極を接地側の電極とした場合の流し写真によって説明するが、環状電極を用いた場合の駒撮り写真との比較から、半丸棒電極の場合と環状電極の場合とでは放電過程に明確な差はないことを確認している。

3.3.1 A' 領域の沿面放電過程

図 10 に d が 5 cm, τ が 0.35 mm の場合のイメージコンバータカメラによる流し写真と電圧-電流オシログラムを示す。この場合の沿面放電過程は、 τ が 1 mm のアクリル板の場合¹⁰とほぼ同様の過程となる。すなわち、 V_{50} を印加した場合電圧印加直後、棒電極先端から拡散的な発光外観を示す負ストリーマ (NS) が発生し、若干の距離を進展した後停止する。印加電圧の上昇と共にさらに負極先端からは新たな負ストリーマが発生し、先行の停止した負ストリーマの外縁部に達してさらに正極に向かって進展する。その後、この負ストリーマの発光は持続的となりその幹部には細く絞られた負リーダ¹⁰ (NL) が形成される [図 10(a)]。負リーダはその先端から負ストリーマを間欠的に発生しながら、約 $7 \times 10^6\text{ cm/s}$ の平均速度で正極に向かって進展して [図 10(b)], 正極に近づくと進展速度を急速に増し、正極に到達すると直ちにフランシオーバする [図 10(c)]。アークへの移行

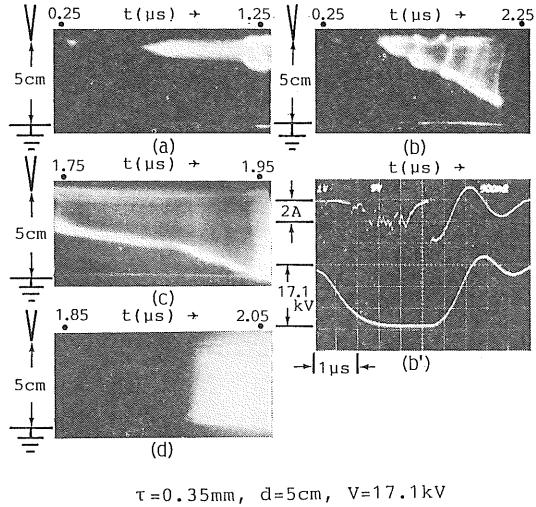


図 10 沿面放電の流し写真とオシログラム

Fig. 10 Streak photographs and oscillogram of surface discharge.

はほぼ同時に両極から起こる [図 10(d)]。しかし、 τ が 1 mm のアクリル板の場合に比べ、 τ が 0.35 mm の PET の場合には C_0 が増加するため負リーダ先端から発生する負ストリーマの発生間隔が短くなり、負ストリーマの進展長も短くなる。また電流波形は、 τ が 1.05 mm の場合は τ が 1 mm のアクリル板の場合とほぼ同様な波形となるが、 τ が 0.35 mm の場合は電流パルスの発生間隔が短くなる [図 10(b')]。

図 11 に d が 5 cm, τ が 0.05 mm の場合の観測写真と電圧-電流オシログラムを示す。 τ をさらに小さくして著しく C_0 を増加させると、負ストリーマの進展長は著しく短くなり流し写真では負ストリーマの発光が認めにくくなる。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。この発光域は前述の負リーダのようにその先端から発生進展する負ストリーマは認められないが、これが正極に到達すると直ちにフランシオーバするので、 τ が 0.35 mm の場合と同様に負リーダと呼ぶ。この負リーダはその先端を強く発光させながら、 τ が 1.05 および 0.35 mm の場合とは異なり、ほぼ連続的に正極に向かって約 $7 \times 10^6\text{ cm/s}$ の平均速度で進展し [図 11(a), (b)], 正極に向かって 3.5 cm 程度進展した後停止する。また最初に発生した負リーダが進展している間にも、新たな別の負リーダが棒電極先端から発生し、先行の負リーダチャネルとは別の経路を進展し、しかも前に発生した負リーダより更に進展するようになる [図 11(b)]. 図 11(e) はこれらの進展状況を示した 5 駒の駒撮り写真であるが、同図の 3 駒目で進展した負リーダが 4 駒目および 5 駒目では見当たらず、また 3 駒目あるいは

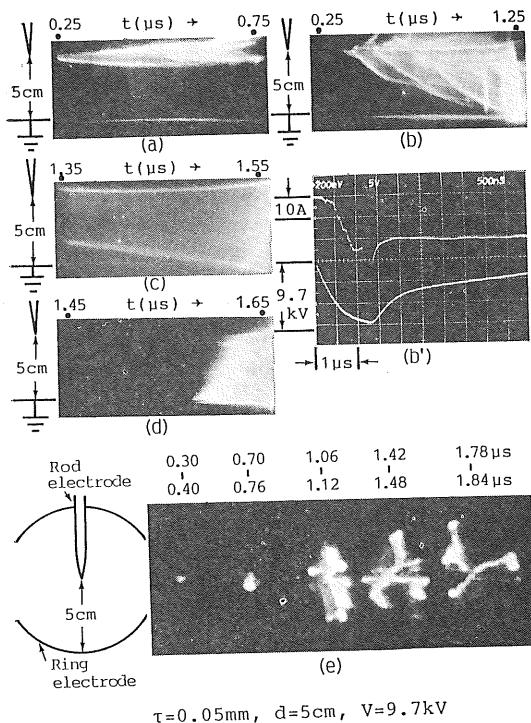


図 11 沿面放電の流し写真、駒撮り写真およびオシログラム

Fig. 11 Streak photographs, frame photographs and oscillogram of surface discharge.

4駒目で見当たらない負リーダが、それぞれ次の4駒目あるいは5駒目で負極先端から新たに進展していることがわかる。したがって、その後何発目かに発生した負リーダが正極に到達すると、直ちにフラッシュオーバ {図 11(e)}、正極側からアーケへ移行することがわかる {図 11(d)}。この場合の流し写真では負ストリーマの発生は認められないが、静止写真 (図 4) によると極めて短いが棒電極先端および負リーダ先端から負ストリーマは発生進展しているので、この場合にも負リーダ先端から極めて短いが、負ストリーマは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 になるとやや階段状にしかも連続的に電流が増加し、 τ が 0.35 mm に比べて 10 倍近い電流が流れ、そのピーク値は 20 数 A にもなる {図 11(b')}。

以上のように、 A' 領域における負リーダはその頭部から負ストリーマを間欠的に発生し、これが正極に到達すると直ちにフラッシュオーバする。この A' 領域の過程は、負リーダ先端から負ストリーマを間欠的に発生しつつ進展する点では、アクリル板における d が d_e 以上のフラッシュオーバ過程¹⁰⁾と良く似た過程になる。しかし、

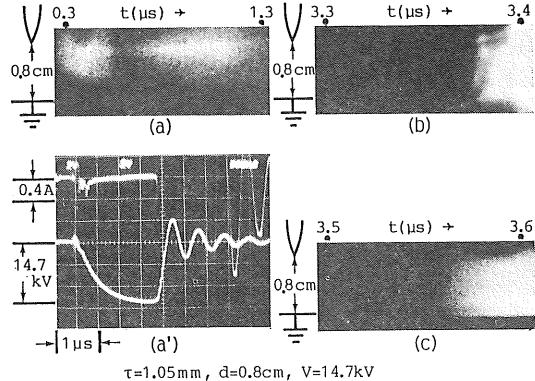


図 12 沿面放電の流し写真とオシログラム

Fig. 12 Streak photographs and oscilloscope of surface discharge.

この PET フィルムの場合には C_0 の増加と共に負ストリーマの進展が著しく短くなり、しかもアクリル板の場合の V_{50-d} 特性と異なるので、アクリル板の場合に呼んだ A 領域と区別して、PET フィルムでこの領域を A' 領域と呼んだ。

3.3.2 C' 領域の沿面放電過程

図 12 に d が 0.8 cm で τ が 1.05 mm の場合の流し写真を示す。この領域の沿面放電過程はアクリル板の場合¹⁰⁾と同様の過程となる。すなわち電圧印加直後まず負極先端から、拡散的な発光外観を示す負ストリーマが発生し、若干の距離を進展した後停止する。その後、端子電圧の上昇に伴って再び負極先端から負ストリーマが進展するが、この負ストリーマは端子電圧が波高値に達するころには発光が弱くなり、負極には暗部が広がって発光域が正極の方に進展する。この発光域が正極に達すると、その到達点からフィラメント状の1次正ストリーマ (PPS)¹⁰⁾ が進展する。その後、1次正ストリーマの発生点からは負極へ向かう2次正ストリーマ (SPS) が進展し、これが負極に到達するとフラッシュオーバが起り、アーケに移行する。以上のようなフラッシュオーバ過程は、アクリル板および PET フィルム、またはそれらの厚みが違ってもほぼ同じになる。

なお、ここで d が $0.4 \text{ cm} \sim d_0$ の範囲を C' 領域としたのは、この範囲での V_{50-d} 特性が針対平板ギャップの場合¹²⁾の C' 領域のそれと大差なく、また V_{50} 印加時のフラッシュオーバ過程もほぼ同じになるからである。

3.4 沿面放電特性および過程に対する τ の影響

前述のように、沿面放電特性および放電過程はある沿面距離 d_e を境として互いに異なる。これは τ が 1 mm 以上のアクリル板の場合とほぼ同様になる。しかし、 τ が 1 mm から更に減少し、 C_0 が著しく増加すると、負

ストリーマの進展長が著しく減少し、 d が d_c 以上の放電特性および過程は、 τ が 1 mm 以上の場合と異なってくる。ここでは τ の減少による放電特性および過程への影響について述べる。

V_{C50} は d の増加と共にほぼ一定となり、 τ によってほぼ決まる(図6)。そのため d が増し V_{50} が上昇しても、 V_{50} 印加時の最初に発生する負ストリーマおよび更に負極先端から発生する2発目の負ストリーマの進展長は、 d にあまり関係しない。 C' 領域では1発目および2発目の負ストリーマによって形成された負電荷が、正極に到達することがフラッショーバの条件である。そのため d が増加して d_c 以上になると、1発目および2発目により形成された負電荷は正極に到達し難くなるので、更に負ストリーマが負リーダ先端から発生進展するようになる。このように1発目および2発目の負ストリーマの進展長が、その後の放電過程に著しい差を生じ、そのため V_{50} や t_f は d_c を境として変化する。

τ を減少させると、 A' 領域では最初に発生する負ストリーマおよびその後間欠的に発生進展する負ストリーマの進展長が短くなる。一方 τ を減少させると 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 の減少と共に電流は増大し、 τ が 0.05 mm の場合にはそのピーク値は 20 数 A 以上にもなる。そのため負リーダはその発光を強め、その導電性を著しく高める。アクリル板の場合には負ストリーマの進展によって、負リーダが形成され進展するが、PET フィルムの場合には負ストリーマの進展長は著しく小さくなる。しかし、 C_0 が著しく大きくなるので、負ストリーマの進展と共に極めて大きな充電電流が流れ、これが負リーダ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。

また、 C' 領域でのフラッショーバの条件は、負ストリーマによって形成された負電荷が正極に到達することであったが、 τ を減少させると負ストリーマの進展長は小さくなるので、 τ の減少と共に C' 領域の過程でフラッショーバする沿面距離は小さくなる。そのため A' と C' 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。

4. む す び

固有容量が著しく増加した場合の沿面放電特性や放電過程を、PET フィルムを用いて観測し、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) 電荷図形および静止写真図形は τ が 1.05 mm の場合にはアクリル板の場合と同様な図形となるが、 τ が

0.35 mm の場合の電荷図では枝分れした図形となり、さらに τ が 0.05 mm になると、枝の幅がさらに細くなり、また、その数が増加する。また、静止写真では τ の減少と共に負リーダ先端から進展する負ストリーマの進展長は短く、また負リーダの本数も多くなる。

(2) 負ストリーマが 1 発のみ発生した場合の、ストリーマ発生時の電圧瞬時値 v_c とそのときの電荷図の最大半径 l との関係は(1)式で与えられる。同式は 0.26~55 pF/cm² の広い範囲の C_0 に対して使用できる。

(3) d が 2 cm 以上における V_{C50} は、アクリル板の場合も含めた 0.26~55 pF/cm² の広い範囲の C_0 に対して(3)式で与えられる。

(4) $V_{50}-d$ 特性は τ によって決まるある沿面距離 d_c を境としてほぼ 2 本の直線によって示され、 d が 0.4 cm~ d_c の範囲を C' 領域、 d_c ~10 cm の範囲を A' 領域と呼ぶと、 V_{50} は C' 領域では(5)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(8)式で示され、アクリル板の場合と異なる。

(5) t_f-d 特性は τ が 0.25 mm 以上ではアクリル板の場合とほぼ同様となり、 d_c 程度を境としてその特性が異なり、 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。しかし、 d が 0.4 cm~ d_c の領域では d を増加させると t_f は減少する。しかし、 τ が 0.1 mm 以下となると、 t_f-d 特性は d の増加と共に t_f は増加するようになり d の増加と共に t_f が減少する領域はなくなる。

(6) A' 領域の沿面フラッショーバ過程は、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負ストリーマの進展距離は短く、その発生間隔も小さくなる。特に τ が 0.05 mm の場合は負ストリーマの進展長はさらに短くなり、負リーダはその先端を強く発光させながら、連続的に正極に向かって進展するようになる。

(7) C' 領域の沿面フラッショーバ過程は、アクリル板の場合と同様となる。すなわち、負ストリーマ先端部の発光域が正極に到達した後、正極から 1 次正ストリーマおよび正リーダが進展してフラッショーバが起こる。

以上、固有容量を著しく増加した時の、負インパルス電圧印加時の沿面放電特性および過程について述べた。沿面放電は多くの因子によって影響されるため、これを解明するためには種々の実験条件で、しかも幅広く観察する必要がある。従って今後もさらに幅広く、種々の実験条件にて系統的に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き、九州大学原雅則教授ならびに福岡大学常安暢教授に深く感謝の意を表すものである。また、卒業研究として本実験の

遂行に協力頂いた卒論生の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) A. Kawashima and S. Hoh : IEEE Trans. Electr. Insu., EI-13 (1978) 51
- 2) 大木正路：電気学会誌，76 (1956) 28
- 3) 横井良秀，鈴木喜彦：電気学会雑誌，90 (1970) 751
- 4) 鳩崎俊行，眞鍋吉秀：電気学会論文誌 A, 110 (1990) 77
- 5) F. Grunwald : Electrotech. Z. (ETZ), 42(1921)
- 6) R. Elsner and J. Rebhan : Arch. Electrotech., 31 (1937) 398
- 7) 大木正路：高電圧工学, p. 221, 極書店 (1982)
- 8) 川島章弘：電気学会論文誌 A, 99 (1979) 169
- 9) 辻村 寛，中村 賢：電気学会放電研資 ED-72-6(1972)
- 10) 鳩崎俊行，常安 暢，赤崎正則：電気学会論文誌 A, 105 (1985) 71
- 11) 電気学会：電気材料便覧 (1973)
- 12) 鳩崎俊行，常安 暢，赤崎正則：電気学会放電研究会資料 ED-76-54 (1976)