

論 文

正インパルス電圧印加時における 電解質水溶液の沿面放電過程

嶋 崎 俊 行*, 真 鍋 吉 秀*, 常 安 暁*

(1990年6月6日受理)

Surface Discharge Processes of Electrolytic Aqueous Solution under Positive Impulse Voltage

T. SHIMAZAKI,* Y. MANABE* and I. TSUNEYASU*

(Received June 6, 1990)

The mechanism of surface discharge along electrolytic aqueous solution in the creeping distance of 0.4 to 10 cm was investigated in the atmosphere with 1/40 μ s positive impulse voltage. The 50% flashover voltages were measured, and the surface flashover processes were observed with an image converter camera, varying the creeping distance, the thickness and the resistivity of electrolytic aqueous solution. As the results of this investigation, it has been found that the flashover characteristics and processes depend on the creeping distance and the resistivity of electrolytic aqueous solution. In the electrolytic aqueous solution with high resistivity the positive leaders proceed the filamentary streamers toward the cathode electrode intermittently from their tips until the flashover occurs. But the filamentary streamers decrease remarkably their length with the decrease of resistivity of electrolytic aqueous solution. These surface flashover processes are illustrated with the typical photographs and the surface flashover characteristics are discussed on the basis of clarified discharge processes.

1. まえがき

電気設備では汚損湿潤すると、絶縁破壊電圧が低下するので、ラッシュオーバ事故が発生する恐れがある。そのため、海岸地区の発電所では高電圧部を屋内式にしたり、屋外に施設されたものは活線洗浄装置などによつて、またブッシング類などに対してはシリコン樹脂を塗布するなど、塩害防止対策がなされている。しかし、これらの対策では経済的に極めて不利となり、またUHV送電になるとさらに技術的にも塩害対策の困難性が増大するので、特に電気所では重塩害に耐える超大型がい管類の開発が大きな課題となっている。

一方、このような導電性皮膜が固体絶縁物表面に形成された場合の沿面ラッシュオーバ現象については、電解質水溶液を用いて、多くの研究がなされてきた¹⁻⁴⁾。しかし、導電性沿面の放電では固体絶縁物表面の汚損湿潤

状況や印加電圧の波形、極性など、多くの因子が放電現象に影響を与え著しく複雑となるため、明らかにされていない点も多い。

沿面放電の機構を明らかにするためには、広い範囲での放電特性の測定と同時に、放電の進展過程を詳細に観察し、比較検討しそれらを対応づける必要がある。そこで本研究では、沿面距離、電解質水溶液の濃度およびその厚みを広い範囲で変化させ、正インパルス電圧印加時の50%沿面ラッシュオーバ電圧、50%沿面コロナ開始電圧などのラッシュオーバ特性を測定し、その時の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た。その結果ラッシュオーバ過程は電解質水溶液の濃度によって変化し、水溶液の抵抗率が大きい場合の正リーダーは、その先端からフィラメント状の1次正ストリーマを発生して進展するが、水溶液の抵抗率が小さくなると、1次正ストリーマなしで正リーダーは進展するようになり、その発光も持続的になることなどがわかった。これらの沿面ラッシュオーバ過程を詳細に述べると共に、ラッシュオーバ特性と対比した結果についても述べる。

キーワード：沿面放電、絶縁破壊、汚損面、電解質水溶液

* 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, Jyonan-ku Fukuoka, 814-01 Japan

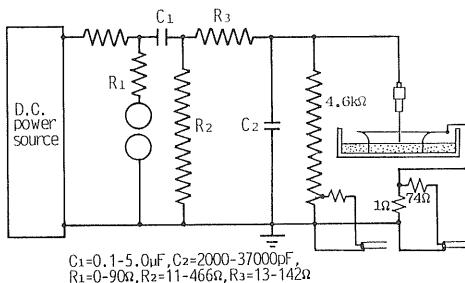


図1 実験回路

Fig. 1 Experimental circuit.

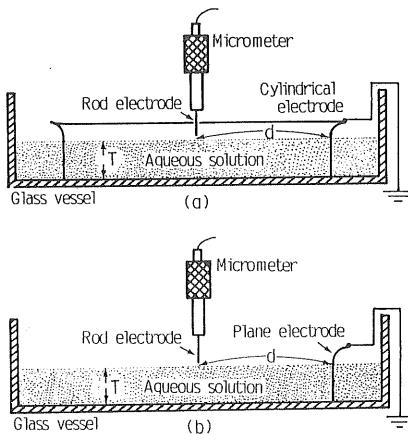
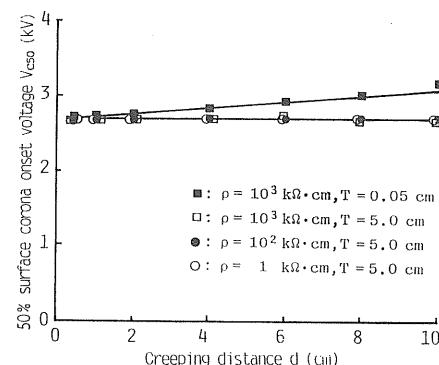


図2 電極構成

Fig. 2 Constitution diagram of electrodes.

2. 実験装置および方法

図1に実験回路を、図2に電極構成を示す。溶液は純水およびこれに種々の量の塩化カリウム(KCl)を加えた電解質水溶液を用い、これらをガラス製の容器(両幅20cm、高さ0.5あるいは10cm)に入れた。高圧側の電極としては、マイクロメータに取り付けた先端が半球状で直径が0.5mmのタンゲステン棒を、接地側の電極としては、図2(a)に示したような厚さ0.3mmの銅箔で作った種々の内半径d(=沿面距離)の円筒電極を用いた。ただしこの円筒電極の上側は丸みをつけて円筒電極側から放電が起らないようにしている。印加電圧はほぼ1/40μsの正極性インパルス電圧で、タンゲステン棒電極は液面から常に0.5mm離し、沿面距離dを0.4~10cmまで変化し、約30回の昇降法により50%沿面コロナ開始電圧および50%沿面フラッシュオーバ電圧を種々の水溶液の厚さに対して測定した。なおコロナ発生の有無は電流波形で判別した。また印加電圧波形は水溶液の濃度増加により変歪しないように、図1中に示したような回路定数の異なる3種類の回路を実験条件に応

図3 V_{C50} - d 特性Fig. 3 V_{C50} - d characteristics.

じて使用した。

放電状況の観測には、イメージインテンシファイヤ(日立電子製、HS-690)を装着したイメージコンバータカメラ(TRW製、1D3S20)を用い、水溶液表面に対して約60°の角度から撮影した。また、流し写真の撮影の場合にはイメージコンバータの陰極側ガラス管面にスリットを取り付け、棒電極先端から一方向のみがスリットの視野になるようにし、また環状電極の代りに、図2(b)に示したような幅10cmの平板電極を用いて観測した。

3. 実験結果および考察

3.1 沿面フラッシュオーバ特性

図3に水溶液の抵抗率 $\rho=10^3$ (純水)、 10^2 および $1\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合の50%コロナ開始電圧 V_{C50} と沿面距離 d の関係を示す。なお、この時の水溶液の厚さ T は、 $\rho=10^3\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合には0.05および5cm、 $\rho=10^2$ および $1\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合には5cmで、棒電極先端は常に水溶液表面から0.5mm離してある。またこの場合の V_{C50} の標準偏差は0.08~0.12kVであった。同図からわかるように、 d を0.4cmから増加すると、 V_{C50} は $\rho=10^3\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ 、 $T=0.05\text{cm}$ の場合にはほぼ直線的に上昇する。しかし、その上昇率は著しく小さく、約30V/cmである。他の場合には d が増加しても、 V_{C50} はほぼ一定と変わらず、約2.7kVとなる。この V_{C50} の値はギャップの長さを0.5mmとした気中棒対平板ギャップの場合での測定値と良く一致する。したがって $\rho=10^3\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ 、 $T=0.05\text{cm}$ 以外における V_{C50} に対しては、水溶液のこの程度の抵抗は問題にならないものと考えることができるので、 V_{C50} は d の影響を受けないものと思われる。 $\rho=10^3\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$ 、 $T=0.05\text{cm}$ の場合は、 T が極めて小さいため正負電極間の水溶液の抵抗値は著しく大きくなるので、 V_{C50} はわずかであるが、 d

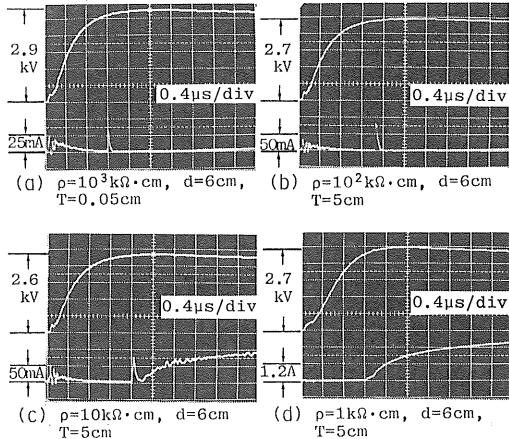


図4 沿面コロナ開始時の電圧-電流オシログラム

Fig. 4 Oscillograms of voltage and current at surface corona inception.

の増加と共に上昇するようになる。しかし、正負電極間の抵抗値がさらに大きい固体絶縁物の場合⁵⁾に比べると、この場合の V_{C50} は d の全範囲においてかなり低い。

図4は V_{C50} 測定時のディジタルメモリによる電圧-電流波形の写真である。水溶液の抵抗率 ρ によって電流波形が著しく変化することがわかる。すなわち、 $\rho=10^3$ オよび $10^2 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ のように、比較的水溶液の抵抗率が大きい場合には電流波形はパルス状となるが [図4(a), (b)], $\rho=10$ オよび $1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合では、パルス状の電流の発生直後から、持続的な電流が流れる [図4(c), (d)]。また $\rho=10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合には、その持続的な電流部分に多数の振動が含まれ、 $\rho=1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合には、 $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合に比べて 20 倍以上の極めて大きく持続的な電流が流れる。そのため(d)図では電流感度を $1/20$ 程度に低めているので、パルス状の電流は認められなくなる。以上のように ρ が小さくなるにつれて、沿面コロナ発生直後、正極と水溶液の間は導電性のチャネルによって橋絡され、しかも V_{C50} のような低い電圧にもかかわらず、長時間このチャネルは維持されていることがわかる。また、さらに ρ が減少すると、持続的な電流が著しく増加することから、正極と水溶液間を橋絡した導電性のチャネルは、さらに大きな導電性をもつようになるものと思われる。したがって、これが後述する 50% 沿面フランシオーバ電圧やフランシオーバ過程に著しく関係するものと考えられる。

図5は $d=5\text{cm}$ で、 $\rho=10^3$, 10^2 , 10 オよび $1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合の、種々の濃度の溶液に対する 50% 沿面フランシオーバ電圧 V_{50} と溶液の厚さ T との関係を示したものである。なお、この場合の V_{50} の標準偏差は 0.10

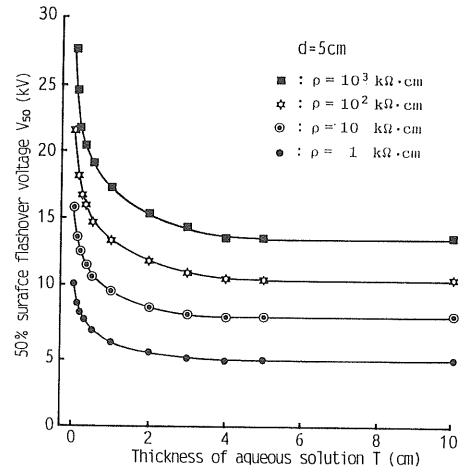
図5 V_{50} - T 特性

Fig. 5 V_{50} - T characteristics.

$\sim 1.21 \text{ kV}$ であった。同図からわかるように、 V_{50} は ρ が大きいほど高く、また T を増加すると、最初 V_{50} は急激に低下する。しかし、その低下率は次第に減少し、 $T=5 \text{ cm}$ 以上になると、それぞれの ρ に対する V_{50} はほぼ一定となる。また、 $T=0$ すなわちガラス板のみの V_{50} の測定値は約 42 kV である。したがって、 ρ が小さいほど T の増加による $T=0$ からの V_{50} の低下は著しく大きい。例えば、 $\rho=10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合、 $T=0.05 \text{ cm}$ の V_{50} は 27.5 kV に低下するのに対して、 $\rho=1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合には 10.1 kV に低下する。以上のことから、 ρ の大小によって異なるがごくわずかでも溶液が存在すると V_{50} は著しく低下し、しかも ρ が小さくなるほどその低下率は大きくなることがわかる。

図6は $\rho=10^3$ オよび $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の V_{50} と d との関係を、種々の T に対して示したものである。同図から各々の T に対する V_{50} と d の関係はほぼ直線になり、 T が薄いほど V_{50} は高く、しかも直線の勾配も大きくなることがわかる。また図に示していないが、 $\rho=10^2$ オよび $1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合もほぼ同様の傾向を示し、 V_{50} と d の関係はほぼ直線になる。したがって V_{50} (kV) と d (cm) の関係は

$$V_{50}=A+kd \quad (\text{kV}) \quad (1)$$

で表わすことができる。ここで k は直線の勾配で T オよび ρ によって変化し、それぞれの ρ に対する k と T の関係を両対数グラフで示すと図7のようになる。同図からわかるように、それぞれの ρ に対して k と T の関係はほぼ直線で示され、またその直線の勾配は ρ に関係なくほぼ一定になる。したがって k は

$$k=BT^{-0.2} \quad (2)$$

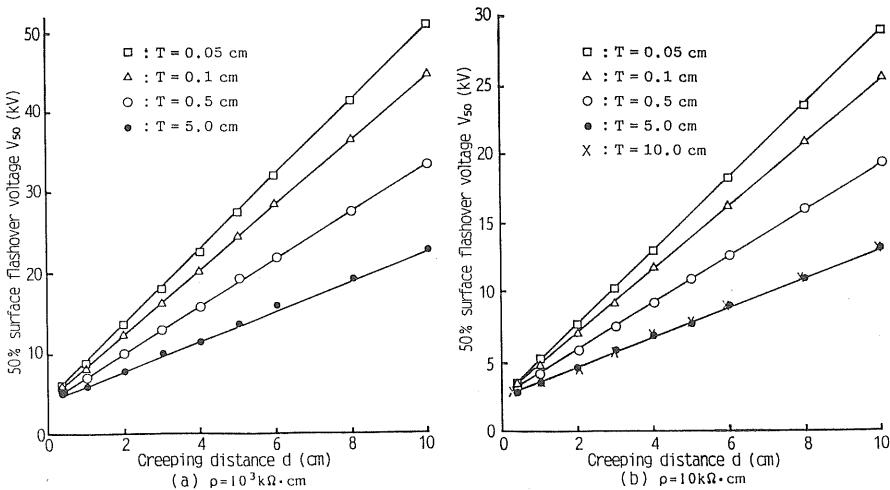


図6 V_{50} - d 特性
Fig. 6 V_{50} - d characteristics.

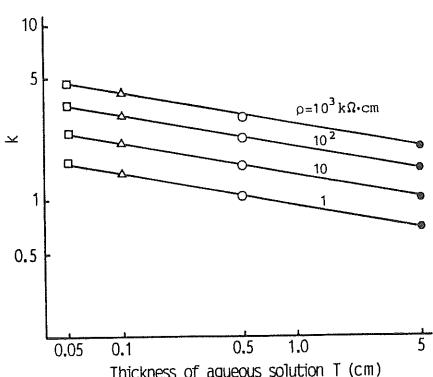


図7 定数 k と電解質水溶液の厚みの関係

Fig. 7 Relation between constant k and thickness of electrolytic aqueous solution.

で与えられ、これは接地側の電極を平板にした場合の実験結果とも一致する⁶⁾。ここで B は ρ によって決まる定数で $\rho=10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合には 2.53 になる。

ところで(1)式の A は ρ によって異なるが、同じ ρ であれば T に関係なく一定となり、 $\rho=10^3, 10^2, 10$ および $1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合の A はそれぞれ 4.5, 3.5, 2.5 および 1.5 となる。そこで ρ が $10^2, 10$ および $1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の V_{50} に対して、それぞれ $4.5/3.5, 4.5/2.5$ および $4.5/1.5$ 倍して d に対する V_{50} を新たにプロットし直すと、 V_{50} - d 特性はほぼ $\rho=10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合のそれに一致するようになる。したがってある ρ に対する V_{50} がわかっているれば、別の異なる ρ に対する V_{50} はそれを ρ に対するある倍率を掛けければ求めることができる。

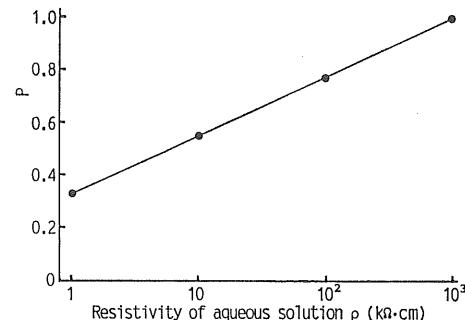


図8 倍数 P と電解質水溶液の抵抗率の関係
Fig. 8 Relation between multiple P and resistivity of electrolytic aqueous solution.

図8は $\rho=10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合の V_{50} を 1 としたとき、それぞれの ρ に対する V_{50} に一致するような倍率 P 、すなわち $1, 10, 10^2$ および $10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の ρ に対してそれぞれ $1.5/4.5, 2.5/4.5, 3.5/4.5$ および $4.5/4.5$ の P と ρ の関係を片対数グラフで示したものである。この関係はほぼ直線となり、

$$P=0.097 \ln \rho + 0.33 \quad (3)$$

で表わされる。そこで(1), (2)式から $\rho=10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合の V_{50} を求めると、

$$V_{50}=4.5+2.53 d T^{-0.2} \quad (4)$$

となる。したがって、(4)式を P 倍すると

$$\begin{aligned} V_{50} &= (4.5+2.53 d T^{-0.2}) (0.097 \ln \rho + 0.33) \\ &= (0.44 \ln \rho + 1.49) + (0.25 \ln \rho + 0.84) d T^{-0.2} \end{aligned} \quad (5)$$

となり、(5)式は $\rho=1 \sim 10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}, d=0.4 \sim 10 \text{ cm}, T=0.05 \text{ cm} \sim 10 \text{ cm}$ の範囲の V_{50} を ρ, T および d の

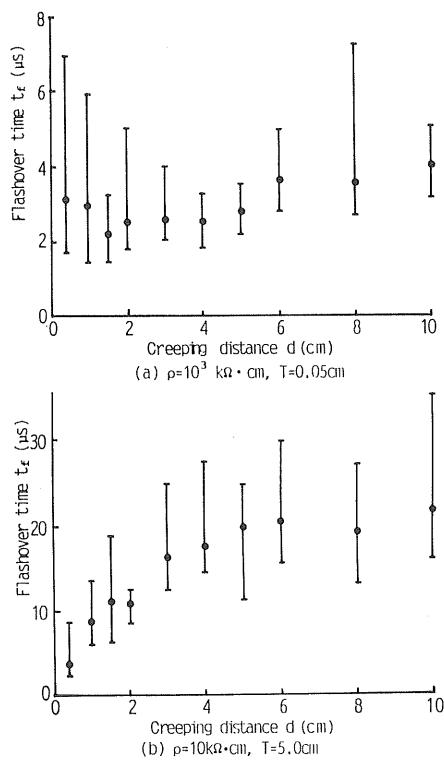


図9 フラッショーバまでの時間と沿面距離の関係
Fig. 9 Relation between flashover time and creeping distance.

関数として表わすことができる。なお T が 5 cm 以上の場合には T を 5 cm として計算する。

図9は種々の d に対する V_{50} 印加時のフラッショーバ時間 t_f の平均値とその変動幅を示したものである。同図(a)の $\rho=10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, $T=0.05 \text{ cm}$ の場合には、 $d=1 \text{ cm}$ 程度を境として特性が異なる。すなわち、 d が 1.5 cm 以上では、 d の増加と共に t_f は増加するが、 d が 1 cm 以下の範囲では、 d が減少すると逆に t_f は増加するようになる。例えば $d=1.5 \text{ cm}$ の場合の t_f は 1.5 ~ 3.3, 平均 2.2 μs であるが、 $d=0.4 \text{ cm}$ になると 1.6 ~ 7.0, 平均 3.2 μs と増加する。なおこのような特異な傾向を示す t_f-d 特性は $\rho=10^3$ オよび $10^2 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, $T=0.05 \sim 5 \text{ cm}$ の範囲でみられた。しかし、(b)図に示した $\rho=10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, $T=5 \text{ cm}$ の場合には d の増加と共に t_f は次第に増加するようになる。また t_f は d が小さい範囲を除くと、 $\rho=10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ に比べて著しく大きく、例えば $d=5 \text{ cm}$ の場合には $\rho=10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の t_f は 2.1 ~ 3.5, 平均 2.8 μs であるが、 $\rho=10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ では 11.2 ~ 25.0, 平均 20.0 μs と数倍大きくなる。このような t_f-d 特性は $\rho=10$ オよび $1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, $T=$

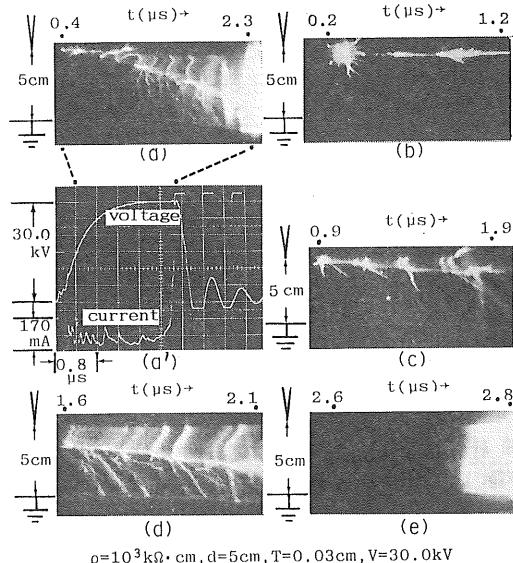


図10 沿面放電の流し写真とオシログラム

Fig. 10 Streak photographs and oscillogram of surface discharge.

0.05 ~ 5 cm の範囲でみられた。以上のように ρ によって t_f-d 特性は著しい差異を示し、 ρ の減少によって t_f は著しく増加することがわかる。なお、 t_f の T に対する影響を測定するため、種々の ρ に対して T を 0.05 ~ 5 cm まで変化したが、 t_f は T を変化しても同程度で、 T の違いによる変化は認められなかった。

3.2 沿面フラッショーバ過程

以上述べたように、 V_{50} は沿面距離 d 、水溶液の抵抗率 ρ およびその厚み T によって大きく変化する。また、 V_{50} 印加時のフラッショーバ時間 t_f も ρ および d によって変化する。そのためフラッショーバ過程もこれらの実験条件により変化することが予想される。ここではイメージコンバータカメラによる代表的な観測結果を示し、それぞれの条件に対するフラッショーバ過程について詳しく述べる。

図10に $\rho=10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, $d=5 \text{ cm}$, $T=0.03 \text{ cm}$ の場合の V_{50} 印加時のイメージコンバータカメラによる観測写真と電圧-電流波形を示す。

電圧印加直後、まず正極先端からフィラメント状の1次正ストリーマ (PPS)⁵⁾ が発生し、その PPS の幹部には、持続的な発光をする2次正ストリーマ (SPS)⁵⁾ や正リーダ (PL) が形成される [図10(b)]。その後、端子電圧の上昇と共にこれらは負極に向って次第に進展し、PL はその先端から多数の PPS を間欠的に発生しながら、約 $2 \times 10^6 \text{ cm/s}$ の速度で進展する [図10(a) ~ (d)]。PL が負極に到達すると、直ちにフラッショーバ

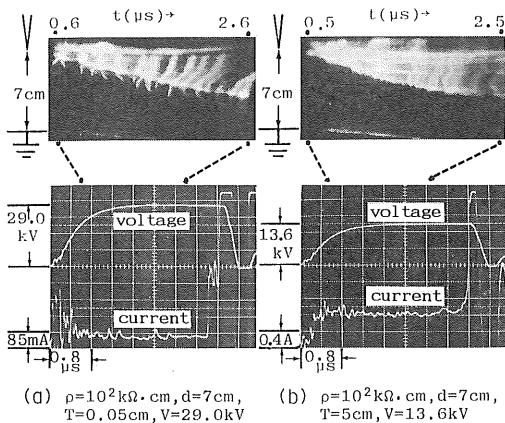


図 11 沿面放電の流し写真とオシログラム

Fig. 11 Streak photographs and oscillogram of surface discharge.

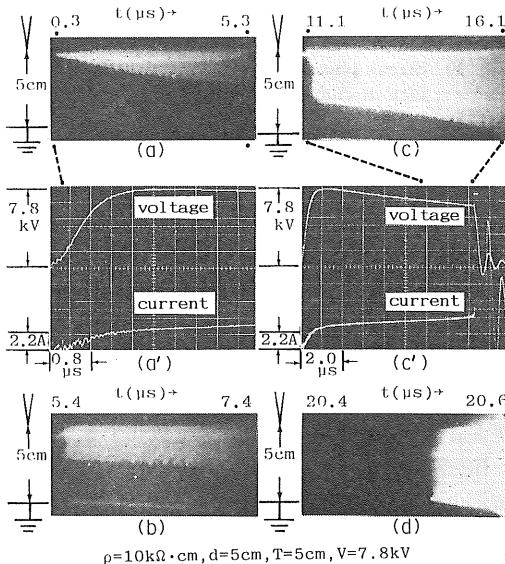


図 12 沿面放電の流し写真とオシログラム

Fig. 12 Streak photographs and oscillogram of surface discharge.

し、ほぼ同時に両極からアーカーに移行する [図 10(e)]. また、PL 先端からの PPS の発生直後には、その発生点から正極に向かう発光波が多数認められ [図 10(a), (d)], PL は発光波の進展により間欠的に発光を繰り返す. 以上の過程は水溶液が無い場合、すなわちアクリル板だけの場合の沿面フラッシュオーバー過程⁵⁾とほぼ同様の過程となり、この場合の電流はパルス状になる [図 10(a')].

図 11 に $\rho=10^2 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, $d=7\text{cm}$ の場合の V_{50} 印加時の流し写真を示す. 同図(a)の $T=0.05\text{cm}$ の場合には

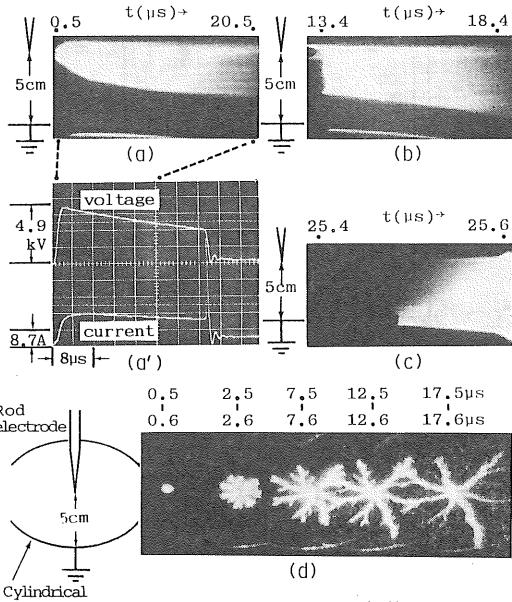


図 13 沿面放電の流し写真、駒撮り写真およびオシログラム

Fig. 13 Streak and frame photographs, and oscillogram

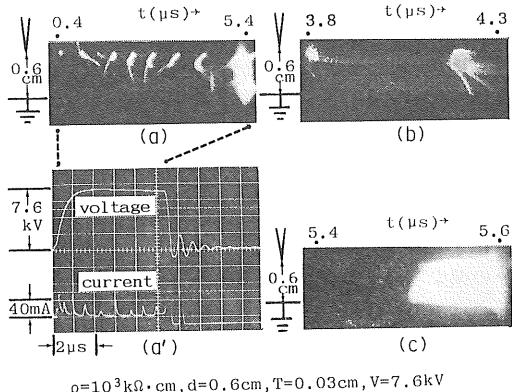
前述の場合と同様に、PL はその先端から間欠的に PPS を発生しつつ進展するが、 ρ が減少すると PPS の進展長は著しく短くなり、電流も持続的になる. また同じ ρ でも T が増加し同図(b)の $T=5\text{cm}$ になると、PPS の進展長はさらに減少するが、PL の発光は強く、やや持続的となり、電流も $T=0.05\text{cm}$ の場合に比べて約 10 倍程度大きい持続的な電流が流れるようになる.

図12は $\rho=10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, $d=5\text{cm}$, $T=5\text{cm}$ の場合の流し写真と電圧-電流波形である. さらに ρ が減少すると、PPS は全く認められないようになる. すなわち、電圧印加直後正極先端から強い発光域が発生進展する [図12(a)]. なおこの発光域は後退するように、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ことから、前述の場合と同様に PL と呼ぶ. この PL は前述のその先端のみが発光しているものと異なり、全長にわたって持続的な発光を持続し、ほぼ連続的に負極に向って約 $5.6 \times 10^5 \text{ cm/s}$ の、やや遅い速度で進展する [図 12(a)]. PL 先端から間欠的に進展する PPS は全く認められない、しかし、PL は正極向けの発光波を前述の場合と同様に間欠的に発生しながら進展する [図 12(a), (b)]. 図 12 (a') の電流波形では持続的な電流と発光波の進展による小さな振動がみられる. その後 PL が負極に達すると、直ちにフラッシュオーバーし、アーカーに移行する [図 12(d)].

図 13 に $\rho=1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, $d=5\text{cm}$, $T=5\text{cm}$ の場合の

観測写真を示す。この場合にはさらに V_{50} は前述の場合より低下するが、電圧印加直後正極先端から強い発光の PL が発生進展する {図 13(a), (b), (d)}。しかし、前述のような PPS や正極に向かう発光波は進展しないので、同図 (a') の電流波形では全く振動がみられない。その後 PL は全長にわたって強い発光を持続し、約 1.8×10^5 cm/s のやや遅い速度で進展し続け {図 13(a), (b)}, 負極に達すると直ちにフラッシュオーバし、負極側からアーカーに移行する {図 13(c)}。PL が発生すると、その直後から 10 A 以上の大さく、しかも持続的な電流が流れるので {図 13(a')}, この場合の PL は、前述の場合のそれより極めて導電性が高いものと考えられる。したがって、PL が進展すると、浴面距離が実質的に短くなったものとされ、印加電圧波尾における電圧の低下分が補償されるのでフラッシュオーバ時間は著しく長くなるものと考えられる。

図14は $\rho=10^3\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, $d=0.6\text{ cm}$, $T=0.03\text{ cm}$ の場合の流し写真と電圧-電流波形である。この場合には PPS の発生はより間欠的となり、PL の進展も不連続となる {図 14(a)}。PPS が発生すると、その幹部には PL が形成されるが、その発光はやがて消滅する。しかし新たな PPS は先行の PL 先端から発生進展するので、PL は完全に消滅したのではないことがわかる。このような進展を繰り返したのち PL が負極に到達すると、直ちにフラッシュオーバする {図 14(c)}。 $T=0$ 、すなわち固体誘電体板の場合には、必ず最初に発生進展した PPS および 2 次正ストリーマが、負極に到達し正負両極間にグロー状のチャネルによって橋絡される⁵⁾。しかし、この場合には正極直下 0.5 mm の所に水溶液があるので、最初のコロナは固体絶縁板の場合より発生しやすい。そのため最初の PPS の発生時の電圧が低く、PPS は負極まで到達しない。また印加電圧が高く、電圧上昇率が大きい場合には先行の PPS の空間電荷による電界緩和効果があっても、次々と新たな PPS が発生し PL も進展しやすい。しかしこの場合には印加電圧が低く、電圧上昇率がかなり小さいので PPS の発生はより間欠的になるものと考えられる。



$\rho=10^3\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$, $d=0.6\text{ cm}$, $T=0.03\text{ cm}$, $V=7.6\text{ kV}$

図 14 沿面放電の流し写真とオシログラム
Fig. 14 Streak photographs and oscillogram of surface discharge.

以上述べた種々の条件に対する沿面フラッシュオーバ過程を分類すると、表 1 のようになる。フラッシュオーバ過程は ρ の違いにより変化し、 ρ が 10^2 および $10^3\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ で d が 1 cm 以上の範囲では、PL はその先端から PPS を発生しつつ進展する (A過程)。しかし d が 1 cm 以下になると PPS の発生が極めて間欠的になり、そのため PL も不連続な進展をするようになる (A'過程)。また ρ が 10 および $1\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ では PPS は全く進展せず、 d によってフラッシュオーバ過程は変化しない。 ρ が $10\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合の PL は、全長にわたって発光し、発光波のみを発生して進展するが (B過程)， ρ が $1\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ での PL はさらに強く発光し、PPS も発光波も進展しない (C過程)。なお T が増加すると、PPS の進展長は減少する。

3.3 ρ および T によるフラッシュオーバ特性および過程の変化

溶液の抵抗率 ρ が $10^3\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ で、溶液の厚み T が 0.05 cm の場合における幅 1 cm 、長さ 1 cm の抵抗値は $2 \times 10^4\text{ k}\Omega$ になる。これはアクリル板の表面抵抗率に比べると著しく小さいが、この場合にも PL 先端から間欠的に PPS が発生進展する放電過程となり、アクリル板での過程⁵⁾ とほぼ同様になる。しかし、アクリル板

表 1 沿面放電過程の分類

Table 1 Classification of surface discharge processes.

ρ	T	$0.4 \leq d \leq 1\text{ cm}$	$1 \leq d \leq 10\text{ cm}$
$10^3\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	$0.03\sim 5\text{ cm}$	Process A'	Process A
$10^2\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	$0.03\sim 5\text{ cm}$	Process A'	Process A
$10\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	$0.03\sim 5\text{ cm}$	Process B	Process B
$1\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	$0.03\sim 5\text{ cm}$	Process C	Process C

の場合に比べると、PPS の進展距離は短く、発生頻度も少ない。また水溶液を通してより多くの電流が流れるので、PL の導電性も高くなり、この場合の V_{50} はアクリル板の場合のそれに比べて低くなる。このようなフラッシュオーバ過程は、溶液の抵抗率 ρ が 10^3 , $10^2 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合に見られるが、溶液の厚み T の増加と共に PPS の進展距離は著しく短くなる。溶液の厚み T の増加は正負電極間からみた抵抗を減少させるので、溶液の抵抗率 ρ の減少と同様に PPS の進展距離を減少させる効果を示すが、 T が 2 cm 程度以上になると、 T の増加による V_{50} の低下率は著しく減少することからもわかるように、これ以上 T が増加してもフラッシュオーバ過程に大きな変化はない。これは水溶液表面からほぼ 2 cm 以内を電流は流れていることを示しており、したがって正負電極間からみた抵抗は溶液の厚み T および抵抗率 ρ によって決まるが、 T よりも ρ の変化による方がフラッシュオーバ特性および過程に大きな影響を与えるものと考えられる。

さらに ρ が低下して $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ になると、全く PPS の発生は見られなくなる。しかし、PL の発光は全長にわたって強くなり、やや持続的な発光をするようになる。しかも PL 先端からは間欠的に発光波が正極に向って進展し、電流波形にも多数の振動が見られる。このことは PL 先端から負電荷の供給が行われ、この発光波の進展により PL はさらに導電性を増すものと考えられる。また数アンペア以上の持続的な電流が流れることからも、PL の導電性は前述の ρ が $10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合よりも大きい。したがってフラッシュオーバ時間もやや長くなる。

ρ が $1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ になると PL の発光は全長にわたってさらに強烈になり、しかも持続的となる。この場合には電圧印加直後からさらに持続的で極めて大きな電流が流れることから、PL の導電性は前述のものよりもさらに著しく高くなっている。そのためこのような過程でフラッシュオーバするときには、フラッシュオーバ時間が著しく長くなる。また ρ が減少するにつれて放電の色は青白色から赤紫色に変化することから、この場合には溶液の温度上昇により PL (局部アーケ) が発生進展し、フラッシュオーバするような機構が考えられる⁷⁾。しかし、PET フィルムのような薄い固体誘電体の沿面放電では、背後電極との間に極めて大きな静電容量が形成されるので、電圧印加直後から著しく大きく、しかも持続的な電流が流れ、PPS はほとんど進展しないにもかかわらず、PL が進展しフラッシュオーバする⁸⁾。この場合の過程は ρ が $1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合の過程と極めて類似している。このことからいざれにしても溶液から流入する大きくしかも持

続的な電流が、PL の形成と進展に大きな貢献をしているものと考えられるが、この場合のフラッシュオーバ機構についてはさらに詳細な実験と検討が必要であろう。

3.4 d によるフラッシュオーバ特性および過程の変化

溶液の抵抗率 ρ が 10^3 および $10^2 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合には、沿面距離 d を 10 cm から減少した場合、 d が 1 cm 程度までは PL はほぼ連続的に進展し、その頭部から PPS を間欠的に発生しながら進展する。しかし d が 1 cm 程度からさらに減少すると、電解質水溶液の場合には最初に発生するコロナの発生電圧が固体誘電体の場合に比べて低いので、最初の PPS は負極まで到達せず、固体誘電体の沿面放電⁵⁾のフラッシュオーバ過程とは異なる。また印加電圧である V_{50} が低く、したがって電圧上昇率が小さいので、PPS の発生頻度が著しく小さくなり、PL の進展も極めて間欠的になる。そのため d が 1 cm 以上の過程とも異なり、フラッシュオーバまでの時間 t_f も d が減少するにつれてやや長くなる。

ρ が 10 および $1 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合には、 d に関係なく電圧印加直後棒電極先端と溶液の間には、導電性のチャネルが形成される [図 4 (c), (d)]。したがってその後溶液からの電流の流入によって PL は形成されるので、フラッシュオーバ過程は d に関係しない。そのためフラッシュオーバまでの時間 t_f も d の増加と共に増加する。

4. まとめ

種々の濃度および厚さの電解質水溶液のフラッシュオーバ特性を沿面距離を変化して求め、その時の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察し、その過程を明らかにすることにつとめた。その結果について要約すると次のようになる。

- (1) 電解質水溶液の沿面放電による V_{50} は ρ , T および d によって変化し、 V_{50} は(5)式で与えられる。
- (2) フラッシュオーバまでの時間 t_f は T の影響を受けないが、 ρ によって大きく変化する。また d を減少すると ρ が 1 , $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ での t_f は減少するが、 ρ が 10^2 , $10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ では逆に増加する。
- (3) ρ が 10^2 , $10^3 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ での沿面フラッシュオーバ過程は d が 1 cm 以上の範囲では、固体誘電体の場合のように正リーダはその先端から 1 次正ストリーマを発生しながら進展する。しかし T が増加すると 1 次正ストリーマの進展長は著しく短くなる。また d が 1 cm 以下の範囲では 1 次正ストリーマの発生が著しく間欠的となり、そのため正リーダの進展も不連続となる。
- (4) ρ が $10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ の場合には正リーダ先端からの 1 次正ストリーマの発生は全くななり、正リーダは全長にわたって発光を持続し、正極向きの発光波のみを発

生して進展する。

(5) ρ が $1 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$ の場合には 1 次正ストリーマも発光波も進展しないが、正リーダは全長にわたってさらに強い発光を持続し、ほぼ連続的に負極に向って進展する。この場合には正リーダの発生直後から大きく持続的な電流が流れ、正リーダの導電性は極めて高くなるので、ラッシュオーバ時間も著しく長くなる。

以上沿面距離が $0.4 \sim 10 \text{ cm}$ の場合に対する KCl 水溶液および純水の沿面ラッシュオーバ特性および過程を観測し、その結果について述べた。今後はさらに幅広い実験条件で研究を進める予定である。

最後に、卒業研究として本実験の一部に従事された卒

論生の方々に謝意を表します。なお本研究の一部は、福岡大学総合研究所の研究費によるものである。

参考文献

- 1) 松尾寿夫, 大重 力, 柚木謙一, 三田 昇: 電気学会誌, 89 (1969) 1727
- 2) 中尾好隆, 宮城克徳, 服部耐吉: 電気学会論文誌 A, 104 (1984) 115
- 3) F.D.A. Boylett & I.G. Maclean: Proc. Roy. Soc. Lond. 324 (1971) 469
- 4) 西村誠介, 中島好忠: 電気学会論文誌 A, 95 (1975) 57
- 5) 鳴崎俊行, 常安 暢, 赤崎正則: 電気学会論文誌 A, 102 (1982) 219
- 6) 赤崎正則, 常安 暢: 電気学会誌, 88 (1968) 2117
- 7) 赤崎正則, 保刈紫朗: 電気学会誌, 82 (1962) 768
- 8) 鳴崎俊行, 眞鍋吉秀: 電気学会論文誌 A, 110 (1990) 77