

# 有機絶縁材料表面のトラッキング破壊における乾燥帯の形成過程

正員 西田 眞 (秋田大)  
 正員 吉村 昇 (秋田大)  
 正員 能登文敏 (秋田大)

## 1. まえがき

有機絶縁材料の多くは、その表面が湿潤・汚損された場合に漏れ電流が流れ、その後局部的に形成される乾燥帯での放電の発生により部分的に炭化劣化を生じ、最終的にトラッキング破壊に至る<sup>(1)</sup>。国際的な耐トラッキング性試験法の一つである IEC Pub. 112 耐トラッキング性試験<sup>(2)</sup>の場合、一般には印加電圧が高くなるとトラッキング破壊に至りやすくなる、いわゆる電圧加速が認められる<sup>(3)</sup>。しかしながら、ある種の材料では印加電圧を高くすると、逆にトラッキング破壊が生じにくくなるという特異な結果(これを異常特性と称している<sup>(3)</sup>)の得られることが報告されている<sup>(1)(3)(4)</sup>。

トラッキング破壊における異常特性の発生要因としては、乾燥帯の発生位置の印加電圧による変化、更には乾燥帯の形成後、乾燥帯での放電の発生状態の印加電圧による変化が挙げられる<sup>(5)</sup>。すなわち、印加電圧が高いほど乾燥帯は電極間中央部に形成されやすく、印加電圧が低くなるにつれて電極端に形成されやすくなるなど、乾燥帯の形成位置が変化する<sup>(4)(5)</sup>。この乾燥帯の形成位置の電圧による変化が、その後の放電の発生状態、更には最終的なトラッキング破壊特性に影響することは既に報告した<sup>(4)</sup>。

しかしながら、トラッキング劣化過程における異常特性の直接的な原因と見なされる乾燥帯の形成過程に関する検討は少なく<sup>(6)</sup>、いまだその過程が明確になっ

たとは言い難い。このため、乾燥帯の形成過程を詳細に検討することは、トラッキング劣化過程および試験結果の異常特性を明らかにするうえで重要な問題と考える。

本論文では、トラッキング破壊試験における乾燥帯の形成位置の、試料および印加電圧による相違を明らかにすることを目的に、IEC Pub. 112 耐トラッキング性試験法を用い、主に放電発生前における乾燥帯の形成過程について、電解液の温度上昇と蒸発の二つの過程に分けて詳細に検討した。本論文の主な検討項目は次のとおりである。

- (1) 乾燥帯の形成過程と電流波形の関係
- (2) 乾燥帯の形成に要するエネルギー
- (3) 乾燥帯の発生位置と試料の種類および印加電圧の関係

なお、放電発生後トラッキング破壊までの過程については既に報告した<sup>(4)(5)</sup>。

## 2. 実験装置、方法および試料

〈2.1〉 実験装置 トラッキング試験に用いた電源回路を図1に示す。試験方法は、すべて IEC Pub. 112 耐トラッキング性試験方法に規定<sup>(2)</sup>されたものに準じている。回路の短絡電流は1Aであり、電極としては白金刃形電極を用いた。電極間に滴下する電解液は0.1重量% NH<sub>4</sub>Cl 溶液で、その抵抗率は20°Cで400Ω・cmである。滴下量は50滴の平均で21±0.3mm<sup>3</sup>であり、30秒ごとに1滴ずつ試料表面上35mmの高さより滴下した。なお、電解液を介して流れる漏れ電流およびそのときの電圧値の変化はペン書きレコーダ(渡辺測器製、WTR-211型、周波数応答0~70Hzで+2, -5%以下)を用い測定した。

〈2.2〉 実験方法 電極間に電解液を滴下した場

Process of Dry Belt Formation on Surface of Organic Insulating Materials in Tracking Breakdown. By Makoto Nishida, Member, Noboru Yoshimura, Member & Fumitoshi Noto, Member (Faculty of Mining, Akita University).

西田 眞: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科  
 吉村 昇: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科  
 能登文敏: 正員, 秋田大学鉱山学部電気工学科

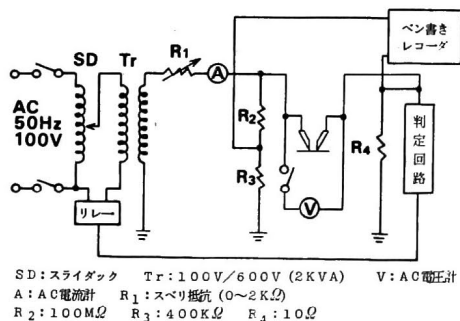


図1 電源回路

Fig. 1. Experimental circuit for IEC 112 method.

合に電解液を介し流れる漏れ電流と、そのときの電圧波形の一例を図2(a)に、乾燥帯形成後放電が発生した場合の電流-電圧波形を同図(b)にそれぞれ示す。(a)図に示すように、電解液を介し流れる漏れ電流は実験に用いた商用周波数 50 Hz の正弦波となる。この正弦波漏れ電流(以下、漏れ電流と略記)が流れたときの電流と電圧の各サイクルごとのピーク値の時間変化を測定した結果の一例を図3に示す。

一般に、試料表面に炭化路が発生する以前の滴下数での漏れ電流は、図3に示すように滴下直後にいったん上昇し、最大値に達したのち緩やかに減少する。その後、最終サイクルでの電流値とは無関係に、いずれの場合も最終的に漏れ電流はほぼ0となり乾燥帯が形成された。なお、漏れ電流の最終サイクルでのピーク値は最小で約 2 mA であった。

一方、試料表面に炭化路が生じている場合、漏れ電流が 2mA 以下まで低下する以前にシンチレーションが発生し、図2(b)の波形と同様な高周波成分を含む電流波形へと連続的に変化することが認められた。また、電解液を介して流れる漏れ電流から高周波成分を含む電流波形へ変化すると同時に、放電の発生に伴う発光が測定された<sup>(7)</sup>。従って、炭化路が発生した場合、正弦波漏れ電流が必ずしも 2mA 以下まで低下しなくとも、図2(b)の放電発生に伴う高周波成分を含む電流波形に変化した時点をもって乾燥帯が形成されたものとみなした。

そこで、電解液滴下後、漏れ電流が 2mA 以下まで低下するか、あるいは高周波成分を含む電流波形に変化するまでの時間、すなわち乾燥帯の形成過程に要する時間  $t_s$  を、次のように分類した。

- (1) 温度上昇時間  $t_R$ : 電解液の滴下後、漏れ電流が最大となるまでに要する時間。
- (2) 蒸発時間  $t_V$ : 漏れ電流が最大となった後、

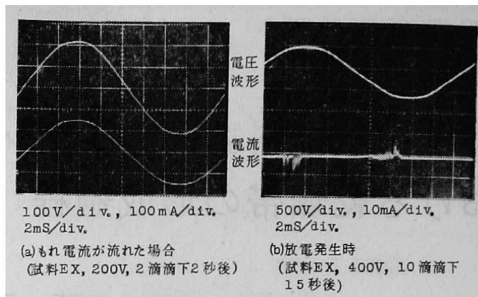


図2 漏れ電流が流れた場合と放電発生時の電流-電圧波形

Fig. 2. Voltage and current wave forms.

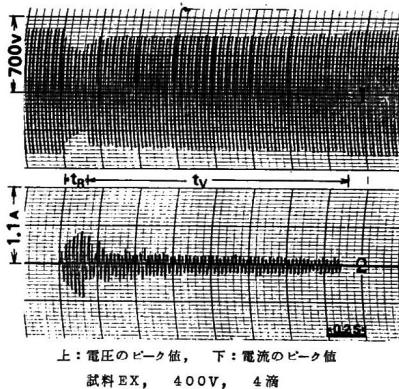


図3 乾燥帯の形成過程における電流-電圧のピーク値

Fig. 3. Peak value of voltage and current under formation process of dry belt.

2 mA 以下まで低下するか、あるいは高周波成分を含む電流波形に変化するまでの時間。

従って、乾燥帯の形成過程に要する時間  $t_s$  は  $t_s = t_R + t_V$  となる。また  $t_s$  内で乾燥帯が形成される可能性を検討するため、光電子増倍管を用いた放電光の測定を試みたが、 $t_s$  内での発光は確認されなかった。このため、 $t_s$  内での乾燥帯の形成はないものとみなした。

〈2.3〉 試料 試料としてはエポキシ樹脂、ポリカーボネート、紙基材フェノール樹脂積層板(以下、それぞれ EX, PC, PL と記す)の3種類を用いた。試料の大きさは  $2 \times 2 \text{ cm}^2$ 、厚さ 1.6~2 mm である。試料はエチルアルコールを含ませたガーゼで表面をぬぐった後、乾布で拭き、48 時間以上シリカゲル入りデンケータ中に保存乾燥したものを実験に使用した。

### 3. 実験結果および検討

#### 〈3.1〉 乾燥帯の形成過程における電流波形

乾燥帯の形成過程を検討する場合、漏れ電流と実際の現象との対応を明らかにする必要がある。漏れ電流

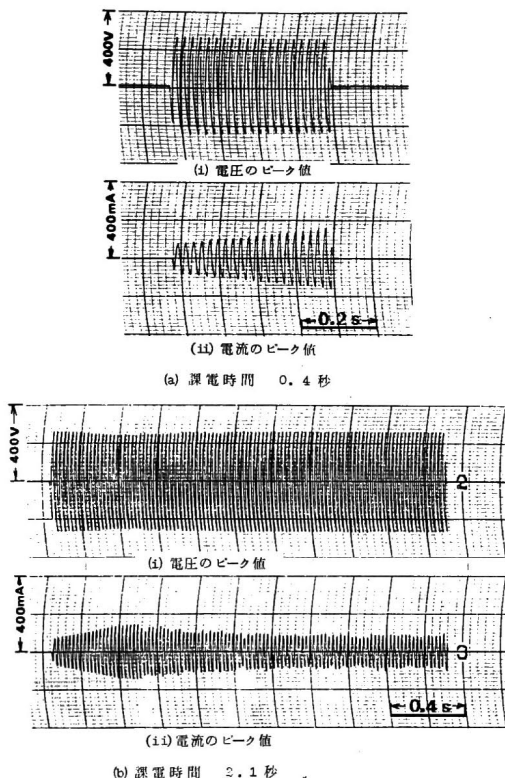


図 4 間欠課電による電流-電圧のピーク値  
Fig. 4. Peak value of voltage and current with intermittent electric source.

は乾燥帯形成過程での電解液の状態に依存し、時間と共に変化する。そこで間欠課電装置<sup>(8)</sup>を用い、電解液に所定の時間(0.02~10s)課電した後、回路をしゃ断し、そのときの電解液の減少量  $V_i$  および温度変化  $T_i$  を測定し、電流のピーク値の変化との対応を検討した。このときの各サイクルごとでの電流-電圧のピーク値を測定した結果の一例を図4に示す。(a)図は試料 EX, 印加電圧 200 V, 課電時間 0.4 s の場合で、(b)図は課電時間 2.1 s の場合である。

電解液の減少量  $V_i$  は、課電終了後、試料表面上に残留する電解液をろ紙で捕集し、残留電解液の重量  $V_i$  を測定し、滴下重量  $V_0$  との差  $V_i = V_0 - V_i$  より求めた。また残留電解液の温度  $T_i$  は、課電後約 2s 経過後、熱電対(直径 0.2 mm)により測定した。 $V_i$  および  $T_i$  の測定結果の一例として、試料 EX, 200 V の場合を図5( $V_i$ の結果)、図6( $T_i$ の結果)にそれぞれ示す。プロットした点は7個の試料の相対平均値であり、縦線はばらつきの大きさを示す。

図5より、課電時間  $t_0$  (この場合、約 0.4~0.5s) までの  $V_i$  はほぼ0であり、 $t_0$  以後になると  $V_i$  は

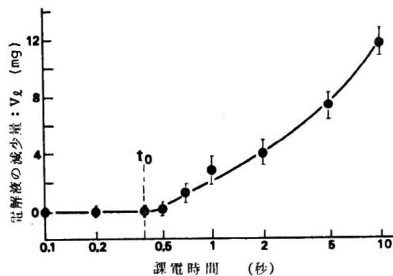


図 5 電解液の減少量  $V_i$  (試料 EX, 200 V)  
Fig. 5. Decreased mass of electrolyte with intermittent electric source.

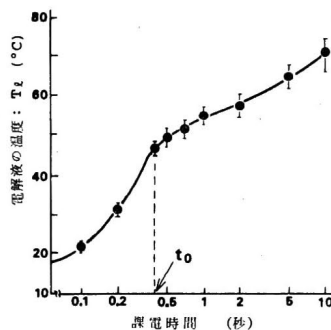


図 6 残留電解液の温度  $T_i$  (試料 EX, 200 V)  
Fig. 6. Temperature of remained electrolyte between the electrodes with intermittent electric source.

増加し、電解液の残留量は減少している。また図6より、 $T_i$  の上昇する傾きは  $t_0$  前後で異なり、 $t_0$  に達するまでの温度上昇のほうが  $t_0$  後のそれに比較して著しく大きいことが認められる。以上の結果より、 $t_0$  に達する以前は電解液の温度は上昇するものの蒸発は生じておらず、 $t_0$  経過後蒸発が開始するものと推察される。

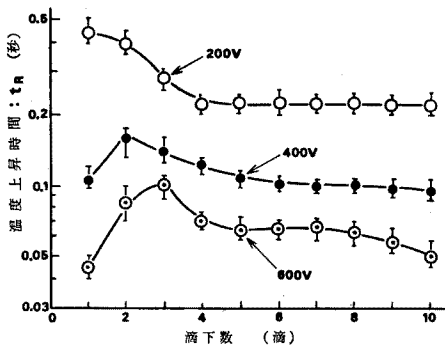
一方、図4(a)に示したように、 $t_0$  (約 0.4~0.5s) に達するまでの漏れ電流のピーク値は課電時間と共に増加しており、図3中の  $t_R$  の時間内での電流値の変化に対応している。また、図4(b)に示した  $t_0$  経過後の漏れ電流は、図3の  $t_v$  内での電流のピーク値の変化に対応している。このため、図4(b)は乾燥帯が形成される前に回路がしゃ断された場合に相当する。従って、漏れ電流が最大となるまでの時間  $t_R$  は、電解液が温度上昇し、蒸発が開始するまでに要する時間と考えられる。また、 $t_v$  は蒸発開始後、電解液の蒸発が促進され、乾燥帯が形成されるのに必要な時間と考えられる。以上のことから、乾燥帯の形成過程は電解液の温度上昇(温度上昇過程)と、その後の電解液の蒸

発(蒸発過程)の二つの過程に分類することができ、温度上昇過程で要する時間が $t_R$ 、蒸発過程で要する時間が $t_V$ となる。なお、電解液の蒸発に伴い電流値が低下する理由としては、電解液の蒸発により体積が減少し、断面積が低下するためと考えられる。

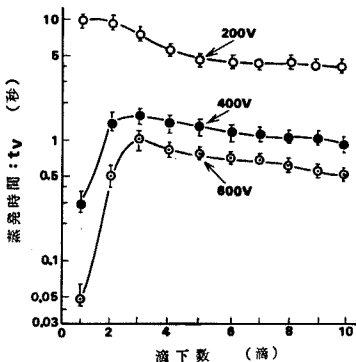
〈3.2〉乾燥帯の形成に要するエネルギー 乾燥帯の形成に要するエネルギー $U_S$ は、電解液の温度上昇に要するエネルギー $U_R$ と、その後の蒸発に要するエネルギー $U_V$ で構成されている。一方、乾燥帯の形成位置は試料の種類および印加電圧の大きさによって異なり<sup>(5)</sup>、乾燥帯の形成過程に要するエネルギー $U_S$ の供給状態と密接に関連することが考えられる。

そこで、 $t_R$ 、 $t_V$ を測定し、乾燥帯の形成に必要なエネルギーを試算する。 $t_R$ 、 $t_V$ を測定した例として、試料 EX の結果を図7に示す。

図2(a)に示したように、乾燥帯の形成過程における電流-電圧波形には位相差は認められず、ほぼ同相と考えられる。更に、用いた装置の力率は0.998~0.996であったことより、 $t_R$ 、 $t_V$ の時間で消費される



(a) 温度上昇時間 ( $t_R$ ) の測定結果



(b) 蒸発時間 ( $t_V$ ) の測定結果

図7 温度上昇時間 $t_R$ と蒸発時間 $t_V$ の測定結果

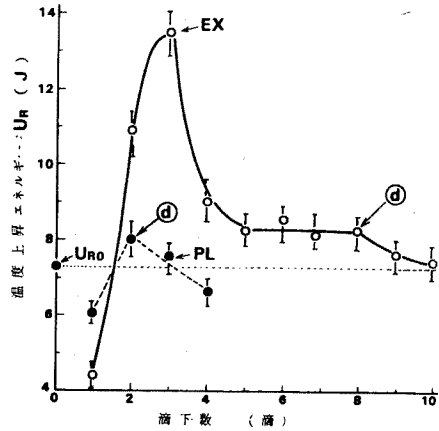
Fig. 7. Rising temperature time  $t_R$  and vaporization time  $t_V$ .

エネルギー $U_R$ および $U_V$ は次式から求めた。

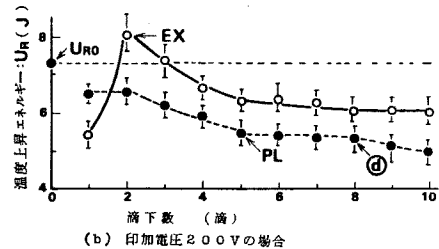
$$U = \int_0^t |I||V| dt \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $|I|$ 、 $|V|$ ：各周期における電流-電圧値の実効値の相加平均値、 $t$ ：図7で得られた $t_R$ または $t_V$

$U_R$ 、 $U_V$ を求めた結果(EXおよびPLの場合)を図8、図9に示す。なお、PCはEXとPLの中間



(a) 印加電圧600Vの場合



(b) 印加電圧200Vの場合

図8 温度上昇過程に要するエネルギー $U_R$   
Fig. 8. Energy for rising temperature of electrolyte  $U_R$ .

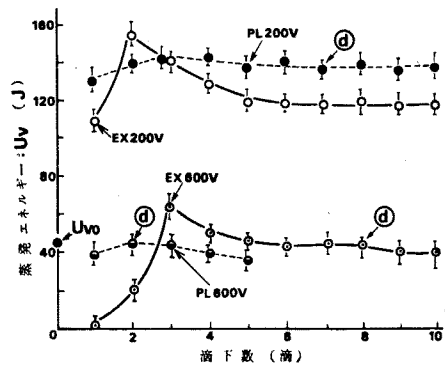


図9 蒸発過程に要するエネルギー $U_V$   
Fig. 9. Energy for vaporization of electrolyte  $U_V$ .

的な値となる。プロットした点は試料個数 10 個の相加平均で、ばらつきを縦線で示す。図中 ④ は乾燥帯形成後、図 2 (b) に示した放電が発生する滴下数 (10 個試料の相加平均値) である。また  $U_{R0}$  ( $=7.3$  J) は、1 滴の電解液量 ( $21 \text{ mm}^3$ ) が  $17^\circ\text{C}$  (試験時の液温) から  $100^\circ\text{C}$  まで温度上昇するのに必要なエネルギー、 $U_{V0}$  ( $=45$  J) は電解液 ( $21 \text{ mm}^3$ ) がすべて蒸発するのに必要なエネルギーである。

$U_R$  と  $U_V$  の結果について印加電圧ごとに整理すると、次のようになる。

(1) 印加電圧 600 V の場合: EX の 1 滴目の  $U_R$  および 1, 2 滴目の  $U_V$  は  $U_{R0}$ ,  $U_{V0}$  に比較して著しく小さい。また図 10 に示すように、EX の 1 滴目で電解液はほとんど蒸発していない。従って、EX の場合、電解液は局部的に温度上昇した後、その部分で急激に蒸発が開始し、乾燥帯が形成されるものと考えられる。1, 2 滴目では電解液の残留量が多いため、3 滴目での温度上昇および蒸発には多くのエネルギーが必要となり、 $U_R$ ,  $U_V$  ともに一時的に上昇する。

一方、PL では 1 滴目における  $U_R$ ,  $U_V$  は EX に比較して多く、このため電解液の蒸発量も多い (図 10)。従って、PL では EX に比較して局部的な温度上昇および局部的な電解液の蒸発は生じにくいことが考えられる。また、1 滴目での電解液の残留量が少ないため、2 滴目以後の  $U_R$ ,  $U_V$  の変化は EX に比較して小さい。なお、印加電圧 600 V の EX, PL では、放電が発生する最小滴下数の数滴前より、乾燥帯の形成過程の中で電解液の一部が試料表面上に飛散することが認められた。しかしながら、飛散した電解液量はいずれの場合も  $1 \text{ mg}$  以下となり、電極周辺に残留した電解液量に比較して著しく少なく、また飛散した電解液の大部分は次に滴下された電解液と附着し蒸発することが認められた。このため、飛散による電解液の消失の影響は少ないものと考えられる。

(2) 印加電圧 200 V の場合: EX の 2 滴目を除き、各滴下数ともに  $U_R$  は  $U_{R0}$  より小さく、逆に  $U_V$  は  $U_{V0}$  に比較して著しく大きい。図 10 に示したように、 $U_V$  は実際に蒸発した電解液量と比較して著しく多く、これは  $U_V$  の多くが電解液周辺に拡散していることを示唆している。従って、次の滴下時での電解液の温度は上昇しやすくなり、 $U_R$  は  $U_{R0}$  に比較して小さくなるものと考えられる。また、EX, PL いずれの場合も 1~2 滴目における  $U_R$ ,  $U_V$  の変化は、印加電圧 600 V の場合に比較して小さい。更に、1~2 滴目での電解液の蒸発量は 600 V に比較して多く、電解液の温度は局部的に上昇しにくくなっていることが考えられ

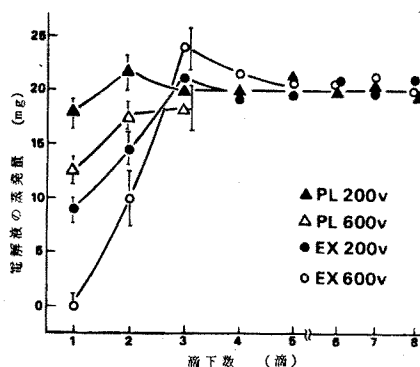


図 10 電解液の蒸発量

Fig. 10. Vaporized mass of electrolyte.

る。このため、電解液の蒸発も比較的緩やかになるものと推察される。なお、PL に比較して EX の  $U_R$  が大きく、 $U_V$  が逆に小さいのは (2 滴目を除く)、乾燥帯形成に要するエネルギーの局部的な集中が EX では生じやすいためと考えられる。

以上の結果と乾燥帯の発生位置との対応をまとめると、次のようになる。

(i) 電解液の温度上昇が局部的に生じる場合は、電極間中央部に乾燥帯が生じやすく、一方、温度上昇および蒸発時間が長く、熱拡散が生じやすい場合には電極端に乾燥帯は発生しやすい。

(ii) 試料の種類によって乾燥帯の形成に要するエネルギーの局部的な集中が異なる。

そこで、以下の節で試料および印加電圧の相違による乾燥帯の形成過程について詳細に検討する。

〈3.3〉乾燥帯形成過程の試料による相違 同一電圧課電下において、試料の種類により乾燥帯の形成に要するエネルギーが異なるのは、電極間に存在する電解液の形状に関連するものと考えられる。

一般に試料表面のぬれ性、すなわち接触角は試料により異なり、これが電極間における電解液の形状に関与することが推定される。そこで各試料における乾燥帯の形成過程および乾燥帯の発生位置について、電解液の形状の相違から定性的に検討する。

図 11 に EX および PL における電解液滴下時の電解液の形状を示す。PL に比較して EX の電極間中央部の電解液はくびれており、断面積は小さい。また電解液の形状は双曲放物面に類似している。そこで、電解液の断面を図 12 に示すような放物面と仮定し、次式により断面積  $S$  の計算を試みた。

$$S = 2 \int_0^x (-Kx^2 + h) dx \dots\dots\dots (2)$$

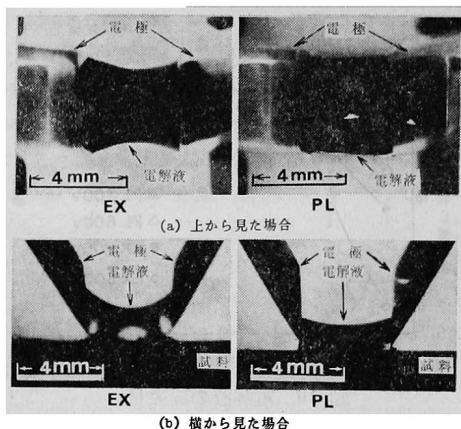


図 11 試料表面上の電解液の形状  
Fig. 11. Formation of electrolyte on sample's surface.

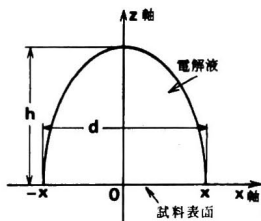


図 12 電解液の断面モデル  
Fig. 12. Model of cross section.

表 1 電解液の断面積比と接触角  
Table 1. Rate of cross sectional area and contact angle.

試料	$S_A$	$S_B$	$S_B/S_A$	接触角
EX	3.4	6.9	2.03	96°
PC	4.0	6.3	1.58	70°
PL	4.4	6.0	1.36	52°

ここで、 $h$  は電解液の高さであり、 $K$  は  $h$  と電解液の幅  $d$  の実測値より求めた。電極間中央部の電解液の断面積  $S_A$ 、電極と接触している所の電解液の断面積  $S_B$  および断面積比  $S_B/S_A$  を求めた結果を表 1 に示す。

なお、電解液を電極軸方向に 20 分割 ( $\Delta l = 0.2\text{mm}$ ) し、(2)式を用いて各微小部分における体積を求め、微小体積の総和を求めると、各試料ともに  $20.8 \sim 21.6 \text{mm}^3$  の範囲となった。この値は 1 滴あたりの滴下量とほぼ同じである。従って、(2)式を用いて求めた断面積はほぼ妥当なものと考えられる。

表 1 中に、液滴法 (液滴量  $21 \pm 0.5 \text{mm}^3$ ) より求めた接触角を併せて示す。電極間中央部の断面積  $S_A$  は

接触角の大きな試料ほど小さい。また、断面積比  $S_B/S_A$  には  $EX > PC > PL$  の大小関係が認められ、接触角の大きさと対応している。このため同一課電条件下では、接触角の大きな試料ほど電極間中央部で乾燥帯の形成に要するエネルギーの集中が起こりやすいことが推察される。この局所的なエネルギーの集中について検討する場合、最終的には電解液の各部分における抵抗値の変化を検討する必要がある。電極間に存在する電解液の微小部分の抵抗値  $R$  は次式で表わされる。

$$R = \rho(\Delta l/S) \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 $\rho$ : 電解液の抵抗率、 $S$ : 微小長さ部分 ( $\Delta l$ ) の断面積、 $\Delta l$ : 電解液の微小部分の長さ

実際の乾燥帯形成過程においては、温度上昇による抵抗率の変化、蒸発に伴う濃度変化ならびに断面積の変化が過渡的に生ずる。そこで、電解液の温度を熱電対 (銅-コンスタンタン、直径 0.2mm、先端をエポキシ樹脂で絶縁したもの) により直接測定し、電極間中央部および電極に接した部分の抵抗値の推定を試みた。熱電対は電極間中央部 (A 点) および電極裏面 (B 点) に設置した。乾燥帯の形成過程における電解液の最大温度を測定した結果を図 13 (400 V の場合) に示す。なお、印加電圧 600 V の場合、 $t_s$  は短く熱電対による温度測定は困難であった。また、印加電圧 200 V の場合、A 点および B 点の温度は  $85 \sim 95^\circ\text{C}$  程度となり、明確な有意差は認められなかった。

印加電圧 400 V における電解液の温度は、B 点に比較し A 点で高くなっている。そこで、電解液の形状が図 11 の状態を保っており、蒸発による濃度変化および断面積の減少が生じないものと仮定し、A 点、B 点での最大温度における  $R_A, R_B$  の比  $R_A/R_B$  を試算する。なお、電解液の抵抗率を測定した結果より、温度により図 14 のような関係にあり、各温度の抵抗率はこの結果を用いた。 $R_A/R_B$  を各温度における抵

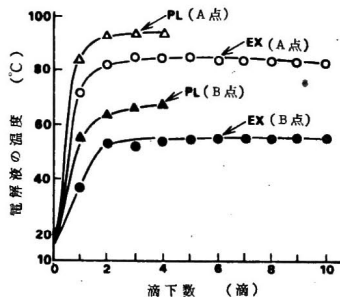


図 13 乾燥帯の形成過程での電解液の温度  
Fig. 13. Temperature of electrolyte under formation process of dry belt.

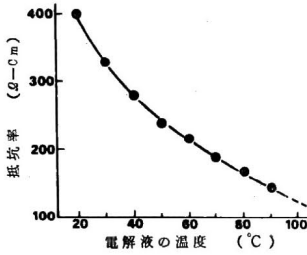


図 14 電解液の抵抗率と温度の関係

Fig. 14. Temperature dependence of resistivity of electrolyte.

抗率および断面積(表1)より求めると, EX で 1.30~1.38, PL で 0.96~0.98 程度, PC では 1.08~1.12 程度となる。

EX, PC の  $R_A/R_B$  は 1 以上となり, この条件下では電極間中央部ほどエネルギーは集中しやすいことを表わしている。特に, EX でエネルギーの集中は生じやすい。一方, PL では EX, PC に比較して, 電極間中央部でのエネルギーの集中は生じにくいものと考えられる。

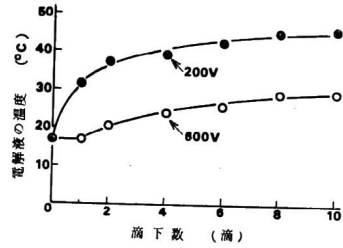
以上のことより, 接触角の大きな試料ほど表 1 に示した  $S_B/S_A$  は大きいため, 電極間中央部にエネルギーは集中しやすく, この部分に乾燥帯が形成されやすいものと考えられる。従って, 同一電圧課電下でも, 用いた試料の接触角の大きさにより乾燥帯の形成位置が異なり, 既報<sup>(5)</sup>の表 1 に示したような乾燥帯の形成位置の試料による相違が生じるものと考えられる。

#### 〈3・4〉 乾燥帯形成過程における印加電圧の影響

乾燥帯の発生位置は印加電圧により異なり, 印加電圧が低いほど電極端に生じやすい<sup>(5)</sup>。また, 印加電圧が低いほど  $U_v$  は大きくなり, 蒸発過程における熱拡散を考慮する必要のあることが示唆された。

図 15 に, 滴下 20 秒後における試料表面に残留した電解液の温度を測定した結果(EX の場合)を示す。600 V に比較して 200 V における残留電解液の温度は高い。印加電圧が低い場合には, 電解液に供給されるエネルギーは小さいため, 乾燥帯の形成過程は緩やかに進行する。このため, 蒸発過程でのエネルギー  $U_v$  は電解液の蒸発を促進するだけでなく, 電極部分の温度上昇をもまた促進することが考えられる。

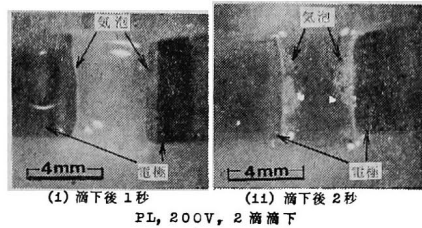
図 16 に, 印加電圧 200 V において電解液の蒸発が開始した直後の例を写真で示す。電極端で気泡が生じており, 電解液の蒸発は電極端から緩やかに開始することが認められる。従って, 電極間中央部に比較して電極端で温度上昇および蒸発が開始しやすく, 乾燥帯は電極端に形成されるものと考えられる。



試料 EX, 滴下 20 秒後

図 15 電極間に残留した電解液の温度

Fig. 15. Temperature of remained electrolyte after formation of dry belt.

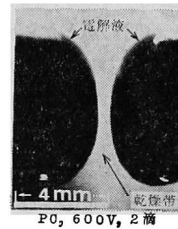


(1) 滴下後 1 秒 (11) 滴下後 2 秒

PL, 200V, 2 滴滴下

図 16 蒸発開始の一例

Fig. 16. Photographs of vaporized electrolyte.



PO, 600V, 2 滴

図 17 乾燥帯の一例

Fig. 17. Photograph of dry belt.

一方, 印加電圧が高い場合には, 電解液に供給されるエネルギーは大きいため, 乾燥帯の形成に要する時間  $t_s$  は短くなる。更に, 蒸発過程での  $U_v$  は電解液の蒸発量とほぼ一致しており, 熱エネルギーは拡散しにくいことが考えられる。このため残留電解液および電極部の温度は低くなる。従って, 電極端での温度は上昇しにくく, 更に断面積の小さな部分へエネルギーは集中しやすいため, 電極間中央部の電解液の温度は急激に上昇し, 蒸発はこの部分で開始し, 乾燥帯が形成されるものと考えられる。

なお, 印加電圧 400 V および 600 V での  $t_s$  は著しく短いため, 蒸発開始時における電解液の状態を写真撮影することは困難であった。しかしながら, 乾燥帯は図 17 に示すように電極間中央部に生じており, 電解液の温度上昇および蒸発が開始する位置に対応するものと考えた。

#### 4. む す び

IEC Pub. 112 耐トラッキング性試験法を用いて、トラッキング破壊時の放電の発生状態に影響する乾燥帯の形成過程を電流波形により検討した。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 乾燥の形成過程は、電解液を介して流れる正弦波漏れ電流の変化から温度上昇過程と蒸発過程の二つに分類される。温度上昇過程は電解液の温度上昇により電流値が増加する場合、蒸発過程は電解液の蒸発に伴い電流値の減少する場合である。また乾燥帯の形成過程では放電は発生しておらず、この過程に要する時間内では乾燥帯は形成されない。

(2) 温度上昇過程および蒸発過程で要するエネルギー ( $U_R$  および  $U_V$ ) を測定した結果より、 $U_R$  は印加電圧が高いほど高くなり、逆に  $U_V$  は低くなる。印加電圧の低い場合の  $U_V$  は、電解液の蒸発量に比較して著しく多く、熱拡散が生じやすい。一方、印加電圧が高い場合の  $U_V$  は、電解液の蒸発量とほぼ対応し、熱拡散は生じにくい。このため、乾燥帯の形成過程は供給エネルギー (電圧) により異なり、乾燥帯の発生位置に影響することが明らかとなった。

(3) 電極間に存在する電解液の形状は双曲放物面に類似しており、電極間中央部の断面積  $S_A$  と電極との接触面での断面積  $S_B$  との比  $S_B/S_A$  は試料によって異なる。接触角の大きな試料ほど  $S_B/S_A$  は大きくなり、電極間中央部にエネルギーは集中されやすい。このため、電極間中央部で局部的に温度は上昇し、電解液が蒸発分離するため、この部分に乾燥帯が形成されやすくなることが明らかとなった。

(4) 印加電圧による乾燥帯の形成過程は、局部的なエネルギーの集中と熱拡散によって影響される。印加電圧が低い場合には、蒸発過程での熱拡散により電極端の残留電解液の温度は高くなる。このため、電極端での温度は上昇しやすく、蒸発は開始し、この部分に乾燥帯は形成されやすい。一方、印加電圧が高い場

合には、電極端での温度は上昇しにくく、更に断面積の小さな部分でエネルギーは集中しやすいため、電極間中央部で急激な温度上昇、蒸発が生じる。このため乾燥帯は電極間中央部に形成されやすい。

なお、本論文では IEC Pub. 112 方法の場合について検討したが、本試験方法以外の各種のトラッキング試験法においても、乾燥帯の形成過程および発生位置がトラッキング破壊に寄与する要因となることが推測される。このため、異なった試験方法を用いた場合の乾燥帯の形成過程とトラッキング破壊との関連についても明らかにする必要があると考えられ、今後検討を進める予定である。

最後に、本研究に対し御協力下された本学電気工学科 高橋重雄技官、大学院生 工藤英行君に感謝する。また測定装置に御便宜、供与下された渡辺測器(株)、試料を提供下された東芝ケミカル(株)、帝人化成(株)の関係各位に厚くお礼申し上げる。なお、本研究の一部は昭和 56 年度文部省科学研究費 (奨励研究) の援助で行なったことを付記し感謝の意を表わす。

(昭和 57 年 11 月 24 日受付)

#### 文 献

- (1) 例えば、「IEC Publication 112 による絶縁材料の耐トラッキング性」, 電気学会技報(II部), 第115号 (昭 56-6)
- (2) IEC Publication 112, Third edition (1979)
- (3) 「トラッキング現象と耐トラッキング性試験法の動向」, 電気学会技報(I部), 第86号 (昭 43-7)
- (4) N. Yoshimura, M. Nishida & F. Noto: "Influence of the electrolyte on tracking breakdown of organic insulating materials", *IEEE Trans. Elect. Insulation*, EI-16, 510 (1981)
- (5) 吉村・西田・能登:「有機絶縁材料のトラッキング破壊における炭化開始過程」, 電学論A, **101**, 429 (昭 56-8)
- (6) 上草:「湿潤されたホウケイ酸ガラス表面における微小放電の発生に関する研究」, 同上A, **100**, 449 (昭 55-8)
- (7) 西田・吉村・能登:「光センサを用いたトッキング劣化過程における微小放電の光計測」, 電気学会絶縁材料研究 EIM-83-46 (昭 58-6)
- (8) 能登・吉村・柴田:「間欠課電によるポリエチレン中のトリ一の進展と性状」, 電学論A, **93**, 14 (昭 48-1)