

# 試験液の表面張力がトラッキング劣化に及ぼす影響

正員 西田 眞 (秋田大)・正員 吉村 昇 (秋田大)  
 正員 鴨沢 勅郎 (福島高専)・非会員 下津 昌紀 (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、湿潤・汚損された場合にその表面における放電の発生により部分的に炭化劣化を生じ、最終的にはトラッキング破壊に至る<sup>(1)</sup>。このように、材料表面の湿潤・汚損はトラッキング破壊を生じる基本的な因子となるものの、使用環境によってその状態が異なっている<sup>(2)</sup>。このため、各種の耐トラッキング性試験法において設定される湿潤・汚損条件は多岐にわたるのが現状である<sup>(3)</sup>。

一般に、湿潤条件を考慮する指針としては材料固有のぬれ性が考えられ、材料のぬれ性すなわち接触角がトラッキング劣化状態に影響を及ぼすことは報告されている<sup>(4)</sup>。しかしながら、材料のぬれ性は固体表面と液体の相互作用の結果として現れるものであり<sup>(5)</sup>、材料の種類とその表面状態からのみでは単純には定まらない。例えば、同一の材料でも界面活性剤を添加し表面張力が低下した水溶液を用いると、接触角は低下しぬれの状態が変化することが知られている<sup>(5)</sup>。更に、試験液への界面活性剤添加の有無により、①トラッキング破壊時間が著しく変動すること<sup>(4)(6)</sup>、②耐トラッキング性の評価に相違を生じる場合があること<sup>(4)(7)</sup>などが報告されている。これらの結果は、試料の表面状態のみならず試験液の表面張力がトラッキング劣化過程および破壊結果に影響を及ぼす因子となりうることを示唆するものであろう。

また、材料表面は突発的にトラッキング破壊へ至る

ことはなく、前駆現象である各種の劣化過程（例えば放電開始、炭化開始および炭化路の進展など）を経た後、破壊に至ることが報告されている<sup>(4)</sup>。このため、トラッキング劣化過程を個々に分類し検討することは(a)材料固有のトラッキング劣化特性、(b)試験条件が試験結果（破壊時間など）に及ぼす影響、(c)湿潤・汚損条件の異なる各種試験法で得られる結果の相関性などを考察するうえで有益な情報を与えるものと期待される。

しかしながら、試験液の表面張力の観点からトラッキング劣化現象を検討した報告は少ない<sup>(7)</sup>。特に、破壊に至るまでの各過程を分類し、試験液の表面張力が各過程に及ぼす影響に関して検討した試みはみあたらないのが現状である。従って、トラッキング破壊に至るまでの各過程を分類し、試験液の表面張力の観点から劣化過程を検討することは、湿潤・汚損条件がトラッキング試験結果および劣化現象に及ぼす影響を明らかにするうえで重要な課題と考える。

本論文では、トラッキング劣化過程および破壊結果に及ぼす試験液の表面張力の影響を明らかにすることを目的に、主に次の6項目に関して検討を加えた。

- (1) 放電の発生状態とトラッキング劣化との対応。
- (2) 試験液の表面張力と試料の接触角の関係。
- (3) トラッキング破壊時間の電圧依存性。
- (4) トラッキング破壊時間の表面張力依存性。
- (5) 試験液の表面張力がトラッキング劣化過程に及ぼす影響。
- (6) 破壊時間における各過程の占有率。

## 2. トラッキング試験装置および試料

〈2・1〉 トラッキング試験装置 用いたトラッキング試験方法、液試験回路、直列抵抗値および試験液の流量は IEC publication 587<sup>(9)</sup> の規定に準拠しており、電極配置を図1に示す。電極には厚さ0.5 mm のステンレス鋼を用い、フィルタペーパー(8枚重ね)と

Influence of Surface Tension of Test Solution on Tracking Deterioration. By Makoto Nishida, Member, Noboru Yoshimura, Member (Mining College, Akita University), Tokirou Kamozawa, Member (Fukushima National College of Technology), Masaki Simotsu, Non-member, & Fumitoshi Noto, Member (Mining College, 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  
 鴨沢勅郎: 正員, 福島工業高等専門学校電気工学科  
 下津昌紀: 非会員, 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

ともに、ステンレス鋼製ねじにより試料に取り付けた。高圧電極（上部）と接地電極（下部）間の距離は 50 mm であり、試料は地面に対して 45 度傾けて設置した。試験電圧には 2.5 kV、3.5 kV および 4.5 kV の 3 種類を使用した。トラッキング破壊は 60 mA の電流が 2 秒以上継続して流れた場合をもって判定した。また、試験時間が 10 時間に達しても破壊に至らない場合には、その時点をもって試験を終了した。試験液には 0.1 重量 % の  $\text{NH}_4\text{Cl}$  水溶液に界面活性剤 (TRITON-X 100: 非イオン性) を各種濃度で添加したものをを用いた。なお、試験液の表面張力 (液-気相の界面張力)<sup>(9)</sup> は Du Noüy 表面張力計<sup>(10)</sup> (田村理研製: 測定精度: 0.1 dyn/cm) を用いて測定した。また、試験液の抵抗率は界面活性剤の濃度にかかわらず、23°C で 396  $\Omega\text{-cm}$  とほぼ一定値であった。

〈2.2〉 試料 試料としては、シリカを充てんしたビスフェノールタイプエポキシ樹脂および無充てんのポリカーボネートの 2 種類 (以下、EX、PC と略記) を用いた。試料の大きさは両試料とも 50 mm×120 mm で、厚さは 6 mm (EX) と 5 mm (PC) である。EX は 240 番のエメリーペーパーで上下電極方向に軽く均一に研磨した後、イソプロピルアルコールおよびイオン交換水で洗浄し、24 時間以上シリカゲル入りデシケータ中に保存乾燥したものを試験に使用した。PC はイソプロピルアルコールで洗浄した後、乾布でふき、EX と同様の方法で乾燥したものを試験に使用した。

### 3. 光パルス計測方法および測定結果

トラッキング劣化過程で発生する各種放電の光スペクトル測定より、主に炭化開始前に発生するコロナ放電は紫外領域に、炭化劣化を促進するシンチレーションは可視あるいは赤外領域に特徴的なスペクトルを有することは報告した<sup>(11)</sup>。また、放電の発生状態の推移並びに劣化プロセスの境界を判定するには、光パルス数の経時変化を測定する方法 (これを光パルス計測法と称する) が優れていることも既に明らかにした<sup>(9)</sup>。本論文では上記結果に基づき、光パルス計測法によりトラッキング破壊までの各過程の境界を判定し検討を加えた。

〈3.1〉 光パルスの測定位置および測定方法  
 トラッキング破壊の各過程の境界を判定するための光パルス計測に使用した光センサは 700~1,140 nm (ピーク波長: 960 nm) に感度を有するシリコンフォトダイオード (SPD: 以下 Sr と略記) である。放電光は光ファイバ (OF) を用い Sr に入光した。OF は試料表面から 20 mm、接地電極から 5 mm 離れた距離に設置した。使用した OF はセンサ側の断面が一つで、試料側の断面は 2 分割されており、ガラス繊維の配列はランダム形である。OF の透過スペクトルは 0.4~2.1  $\mu\text{m}$  である。更に、OF の入射角度は約 67 度であるため受光可能面積は図 1 に破線で示した部分の内側となり、接地電極周辺全域で発生したシンチレーションの測定が可能である。また、石英ガラスを OF の受光面上に設置し、OF の受光面の汚損および破損を防止した。なお、図 1 に示すようにコロナ放電の発生状態を把握するため紫外線検出管 (U. V. tron: 以下 Su と略記) も試験に使用した。使用した Su は 185~260 nm (ピーク波長: 200 nm) に感度を有しており、また入射角度は 180 度以上である。このため、受光面積は試料表面全体となる。

#### 〈3.1〉 光パルスの測定位置および測定方法

光パルス計測回路の構成を図 2 に示す。OF を通じ Sr に入光した放電光は、Sr によって光電流に変換された後、帰還増幅回路 (増幅率:  $2.0 \times 10^8$ , 応答周波数 ( $f_0$ ): 6 kHz 以下) および増幅回路 (最大利得: 60 dB,  $f_0$ : 1 MHz 以下) で増幅され、波形整形回路で TTL レベルに変換された。また、Su からの信号 ( $f_0$ : 10 kHz 以下) は波形整形回路に直接入力した。Sr およ

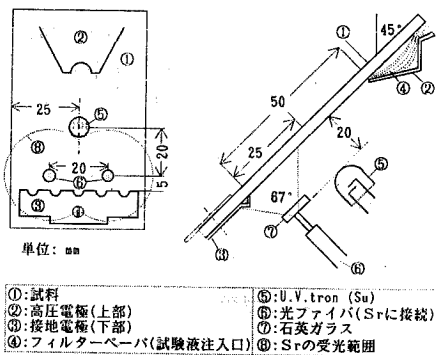


図 1 電極と光センサの受光部の配置

Fig. 1. Arrangement of the electrodes and the optical measurement system.

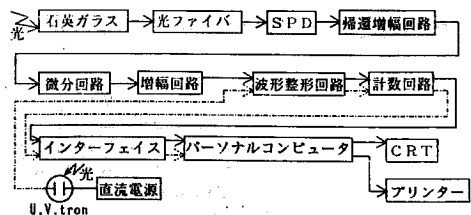


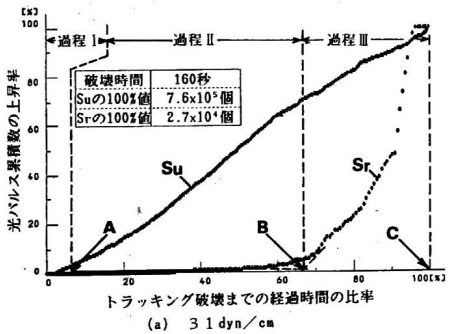
図 2 光パルス計測回路の構成

Fig. 2. Block diagram for the measurement systems of light pulses.

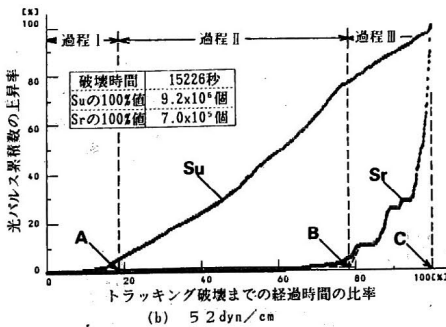
び Su からの信号はインターフェイスを通じてパーソナルコンピュータ ( $f_0$ : 500 kHz 以下) へ同時に取り込み、破壊に至るまでの光パルス累積数の時間変化を自動的に測定した。なお、測定システム全体の応答周波数は、Sr では帰還増幅回路により制限されるため 6 kHz 以下、Su では 10 kHz 以下であった。

〈3・2〉 光パルス計測法による測定結果  
 トラッキング破壊に至るまでの放電の発生状態を光パルス計測法を用い測定した結果の例として EX, 3.5 kV の場合を図 3 に示す。なお、測定値は破壊時間および光パルスの計数総数を 100% に規格化し表示したものである。また、図中の曲線はトラッキング破壊までの経過時間の各割合における光パルス累積数 (以下、累積数と略記する) の増加率を表している。図 3 の結果より、Su および Sr の光パルス累積数の経時変化はおおよそ次のようであった。すなわち、Sr が計数開始に至る以前に常に Su の計数が開始した。また、Su による計数が一たん開始されると、その累積数曲線はトラッキング破壊に至るまではほぼ単調に増加する様子が認められる。このため、Su により計測された累積数の増加率と劣化状態の遷移との対応は明確でない。

これに対して、Sr により得られた累積数の増加率



(a) 3.1 dyn/cm



(b) 5.2 dyn/cm

図 3 光パルス累積数の測定結果例 (EX, 3.5 kV)

Fig. 3. Accumulated number curve of light pulse.

は図 3 中の A 点と B 点の 2 箇所を境にして著しい変化を生じている。このため、トラッキング破壊までの時間は A 点と B 点を境界として三つの過程に分けられるものと考えられる。また、各過程における放電の発生および劣化状態との対応は下記のものであった。なお、放電および炭化路の発生状態の一例を図 4 に示す。

(i) 過程 I (試験開始～A点まで) ではコロナ放電が発生している (図 4 (a) 参照) ため Su では光パルスが計測される。しかしながら、Sr では光パルスは計測されておらず、シンチレーションは発生していないことを示している。なお、過程 I の期間中、Sr の測定位置を変更し試料表面全体の計測を試みたが、本研究で用いた試料および実験条件の下では、光パルスは全く計測されなかった。更に、目視観察においても、シンチレーションの発生および炭化物の析出した様子は確認されなかった。このため、過程 I では試料表面全体でシンチレーションおよび炭化物は発生していないものとみなせる。

(ii) 過程 II (A点～B点) に至ると Sr による光パルスの計数が開始するものの、その増加率は過程 III に比較して小さい。また、Sr による計数開始、すなわち、シンチレーション発生開始と同時に、シンチレーションの発生位置周辺に炭化物の析出している様子

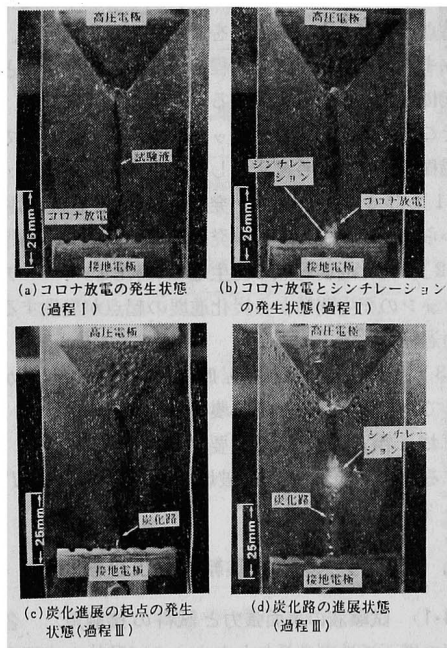


図 4. 放電および炭化路の発生状態の例 (PC, 2.5 kV, 31 dyn/cm)

Fig. 4. Occurrence tendency of discharge and carbon path.

が認められた。過程Ⅱにおけるシンチレーションの発生および炭化物の析出する位置は、主に接地電極周辺〔図4(b)参照〕であった。また、シンチレーションの発生は間欠的であり、更に析出した炭化物は試験液によって洗い流される様子が認められた。このため、Srの累積数の増加率は小さくなったものと考えられる。

また、過程Ⅱに至ってもコロナ放電は、継続的に発生する傾向が認められた〔図4(b)参照〕。このため、Suの累積数は連続的に上昇するものと考えられる。なお、過程Ⅰと同様過程Ⅱの期間中にSrの測定位置を変更し、試料表面全体の測定を試みた。その結果、Srの測定範囲が接地電極先端から高圧電極方向へ約1cm以上離れたと、光パルスを計数しなくなった。従って、過程Ⅱで発生するシンチレーションを捕捉するうえで、図1に示した受光範囲を設定したことは妥当なものと考えられる。

(Ⅲ) 過程Ⅲ(B点～C点)に至ると、接地電極近傍に析出した炭化路が起点となり〔図4(c)参照〕、これが高圧電極に向けて徐々に進展することが認められた。また、シンチレーションは炭化路先端に集中して発生する様子が認められた〔図4(d)参照〕。このため、過程Ⅱに比較し、過程ⅢにおけるSrの累積数の増加率は大きくなるものと考えられる。

以上の結果より、Srを用い累積数の増加率が変化した時点(A点およびB点)を測定することにより、トラッキング破壊までの各過程の境界を判定することが可能になるものと考えられる。

そこで、本論文ではトラッキング破壊に至るまでの各過程を、次のように定義し検討を加える。

- (1) シンチレーション発生過程(過程Ⅰ)：試験開始からシンチレーションが発生開始するまでの過程。
- (2) 炭化進展起点の発生過程(過程Ⅱ)：シンチレーションの発生開始から炭化進展の起点が発生するまでの過程。
- (3) 炭化進展過程(過程Ⅲ)：炭化進展の起点が発生してからトラッキング破壊に至るまでの過程。

なお、過程Ⅰ、Ⅱ、Ⅲに要する時間を  $T_s$ 、 $T_e$ 、 $T_b$  とすると、トラッキング破壊時間  $T_b$  は  $T_b = T_s + T_e + T_b$  となる。

#### 4. トラッキング試験結果および検討

〈4.1〉 試験液の表面張力と試料の接触角 各種濃度の界面活性剤を添加したときの試験液の表面張力(以下、表面張力と略称する)を測定した結果を図5に示す。図6に接触角の表面張力依存性を求めた結果を示す。なお、接触角は液滴法<sup>(4)(5)</sup>を用い測定した。

表面張力と接触角には良好な対応性が認められ、表面張力の上昇に伴って接触角も上昇している。この結果は表面張力の変化に付随して、試料表面のぬれの状態が変動していることを示している。

〈4.2〉 トラッキング破壊の電圧依存性 トラッキング破壊時間( $T_b$ )の電圧依存性を測定した例として、表面張力が31 dyn/cm および46 dyn/cmの場合を図7に示す。プロットした点は5～10個の試料の相対平均値である。また、図中の縦線は実験結果のパラッキの範囲を示す。いずれの試験液を用いた場合においても、試験電圧が高くなるほど  $T_b$  は短くなる、いわゆる電圧加速が認められる。また、表面張力の大きな試験液を用いると破壊に至りにくくなる様子が認められ、表面張力、すなわち接触角の相違がトラッキング試験結果に影響を及ぼすことを示している。

一方、EXとPCの耐トラッキング性の序列は、使用した表面張力の大きさにより異なっている。すなわち、31 dyn/cmの試験液を使用すると試験電圧2.5kVではEXが、3.5kVおよび4.5kVではPCがトラッキング破壊に至りにくい結果を示している。これに対して、表面張力が46 dyn/cmの場合、いずれの電圧においてもEXに比較してPCの方がトラッキング破壊に至りにくい結果となる。更に、31 dyn/cmの

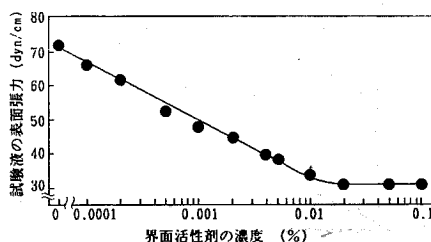


図5 試験液の表面張力の測定結果  
Fig. 5. Surface tension of test solution.

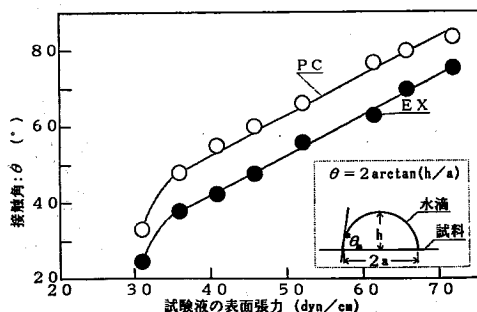


図6 接触角の表面張力依存性  
Fig. 6. Surface tension dependence of the contact angle.

場合に比較して両試料のトラッキング破壊時間の相違が大きくなる。この結果は、使用する試験液の表面張力が、(1)試料のトラッキング破壊時間の長短に影響を及ぼすこと、(2)試験電圧が異なる場合における試料間の耐トラッキング性の評価に変動を与える因子の一つとなりうることを示唆している。

〈4・3〉 トラッキング破壊時間の表面張力依存性

$T_b$  の表面張力依存性を求めた結果を図8に示す。両試料の  $T_b$  には表面張力の増加に伴って上昇する傾向が認められるが、その上昇率は EX と PC では異なっている。この結果は、表面張力すなわち接触角のわずかな変化がトラッキング破壊時間に影響を及ぼすこと、その効果の程度は試料の種類によって異なることを示すものであろう。

〈4・4〉 試験液の表面張力がトラッキング劣化過程に及ぼす影響

トラッキング破壊に至るまでの各過程に要する時間を求めた結果を図9(過程I)、図10(過程II)および図11(過程III)に示す。各過程に要する時間はいずれも表面張力の増加に伴って上昇する傾向が認められる。この結果は、試験液の表面張力がトラッキング破壊までのすべての過程に変動を及ぼしていることを示している。そこで、表面張力が各過程に及ぼす影響について劣化状態を考慮に加えて検討する。

(1) 過程Iに要する時間 ( $T_s$ ):  $T_s$  は表面張力の増加に伴い上昇する傾向が認められる。この原因として試験液の流下状態とコロナ放電の発生状態が表面張力によって変化するためと考えられる。試験液の流下状態を図12に、試験開始後トラッキング破壊までの放電の発生状態の推移を図13に示す。表面張力が小さい場合には、試験液は薄膜状に流下し、コロナ放電は特定位置に集中して発生する様子が認められる。更

に、図3(a)に見られるように、 $S_u$  の累積数は試験開始直後からほぼ連続的に上昇しており、コロナ放電が連続的に発生しやすいことを示している。このため、試料表面の劣化は促進され、 $T_s$  が短くなるものと考えられる。これに対して、表面張力が大きい場合には試験液は水滴状となり不連続に流下する(図12(b))。更に、表面張力が小さい場合と同一の経過時間の条件の下で比較すると、コロナ放電の発生が抑制される傾向が認められた(図3参照)。従って、表面張力が大きくなると試料表面の劣化は促進されにくくなり、 $T_s$  が長くなるものと考えられる。

(2) 過程IIに要する時間 ( $T_c$ ): 過程IIではコロナ放電とシンチレーションは混在して発生するが(図13参照)、表面張力により放電の発生状態が異なっている。すなわち、表面張力が小さい場合には、コロナ放電とシンチレーションは接地電極近傍の比較的狭い

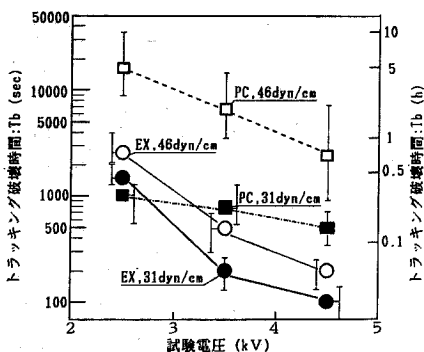
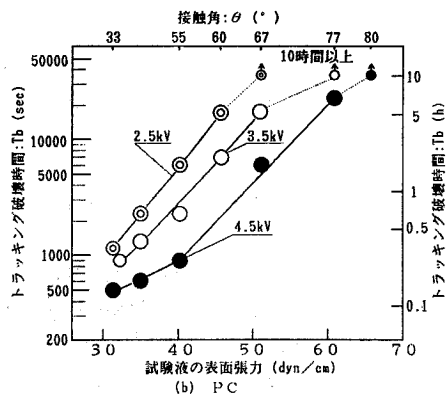
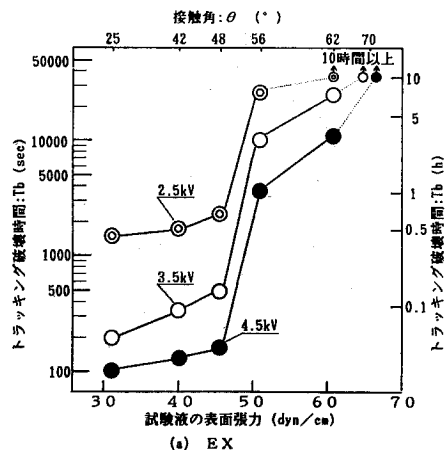


図7 トラッキング破壊時間の電圧依存性の測定結果

Fig. 7. Voltage dependence of time to tracking breakdown.

図8 トラッキング破壊時間の表面張力依存性の測定結果

Fig. 8. Surface tension dependence of time to tracking breakdown.

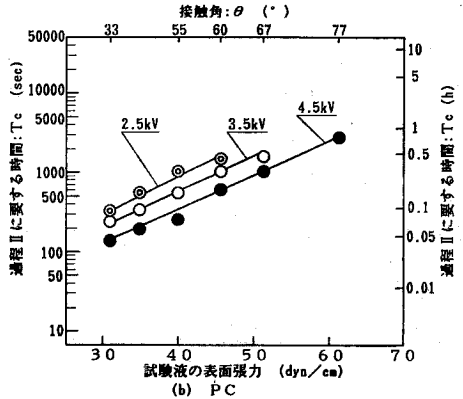
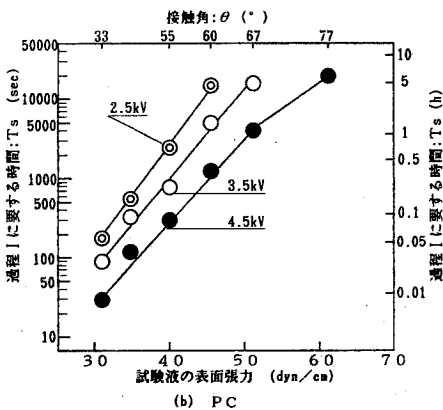
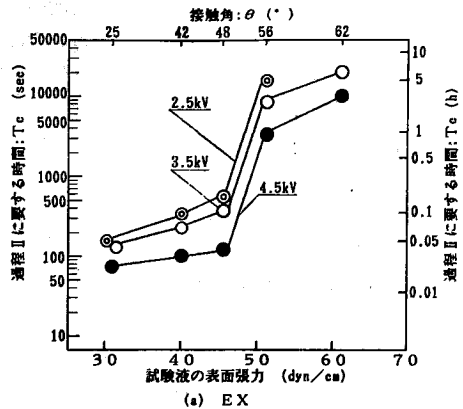
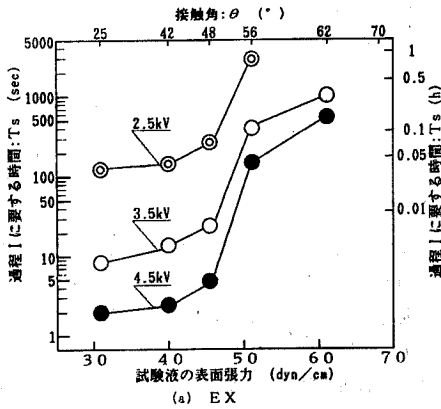


図 9 過程 I に要する時間の測定結果  
Fig. 9. Required time for process I.

図 10 過程 II に要する時間の測定結果  
Fig. 10. Required time for process II.

範囲に集中して発生する傾向が認められた。このため、接地電極近傍の特定位置に炭化物は集中的に析出し、この結果として炭化進展の起点が発生しやすくなったものと考えられる。

一方、表面張力が大きくなると、コロナ放電およびシンチレーションは広い範囲にランダムに発生しやすく(図 13 参照)、特定位置へ集中しにくい様子が認められた。このため、炭化物は特定位置に集中して析出することは少なく、この結果として炭化進展の起点が発生するまでに長い時間を要したものと考えられる。

(3) 過程 III に要する時間 ( $T_g$ ): 過程 III におけるシンチレーションの発生および炭化路の進展状態は次のようであった。すなわち、表面張力が小さい場合にはシンチレーションは図 13(a)に見られるように、炭化路先端に集中して発生しやす傾向が認められた。更に Sr により測定された累積数は(図 3(a)参照)ほぼ連続的に増加しており、シンチレーションは連続的に発生している。このため炭化路は比較的速やかに

進展し  $T_g$  は短くなるものと考えられる。一方、表面張力が大きい場合には、炭化路先端に乾燥帯が形成されやすいことが確認された。更に図 3(b)に見られるように Sr により測定した累積数は階段状となり、シンチレーションの発生が断続的であることを示している。従って、表面張力が大きくなると炭化路は進展、停止を繰り返しながら断続的に伸び、 $T_g$  が長くなるものと考えられる。

なお、過程 I と II に比較し過程 III に要する時間の上昇率は相対的に小さい。この事実は表面張力の過程 III に及ぼす影響の程度が、過程 I と II に比較して小さいことを示唆するものである。更に、各過程の上昇率に相違が認められることは、表面張力の変動がトラッキング破壊時間を支配するプロセスに影響を及ぼすことを示唆するものである。そこでトラッキング破壊時間に占める各過程の割合を求め検討を加える。

<4.5> 各過程の占有率 トラッキング破壊時間を 100% に規格化し、各過程の占める割合(占有率)を求めた結果を図 14 に示す。占有率は使用した試験

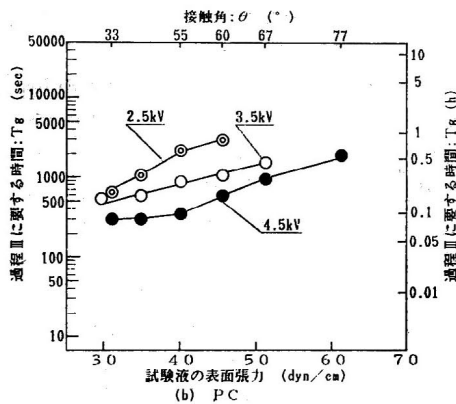
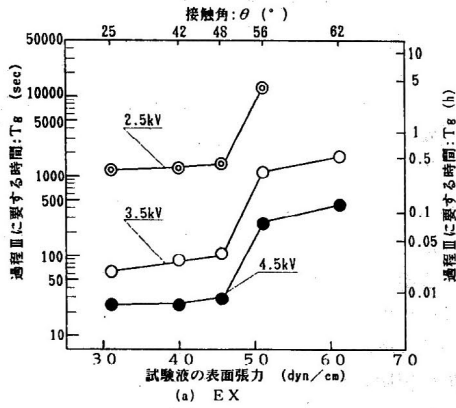


図 11 過程Ⅲに要する時間の測定結果  
Fig. 11. Required time for process III.

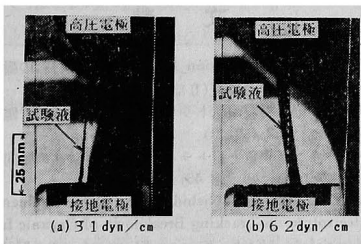


図 12 試験液の流下状態 (PC)

Fig. 12. Flow condition of test solution.

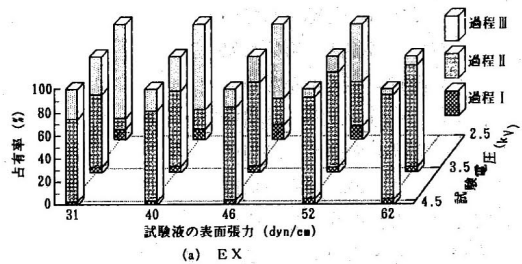
液の表面張力に依存し変化の様子が認められる。更に、EX と PC では同一の表面張力および試験電圧においても各過程の占有率には相違が認められる。

(1) EX の場合: EX における各過程の占有率は表面張力に依存して変化し、その変動状態は試験電圧によって異なっている。すなわち、試験電圧が低い場合 (2.5 kV) には過程Ⅲの占有率が多く、例えば 31 dyn/cm では 80% 以上を占有するに至っている。これに対して、試験電圧が高い場合 (3.5 kV および 4.5

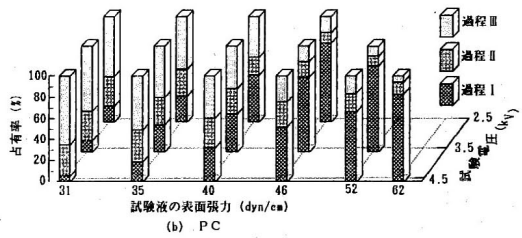


図 13 表面張力が異なる場合における  
トラッキング破壊までの放電および  
炭化路の発生状態 (EX, 4.5 kV)

Fig. 13. Occurrence tendency of discharge and carbon path under the different surface tension.



(a) EX



(b) PC

図 14 各過程の占有率

Fig. 14. Occupied rate of three processes in time to tracking breakdown.

kV) には過程Ⅱの占有率が最も大きい。この事実は、試験電圧が高い場合には過程Ⅱが、試験電圧が低い場合には過程Ⅲが EX のトラッキング破壊時間を支配する主プロセスとなることを示している。

一方、各試験電圧とも表面張力の増加に伴って過程Ⅱの占有率が次第に上昇し、例えば 2.5 kV, 52 dyn/cm の場合でさえ 40% 以上を占めるに至っている。

この結果は、表面張力が上昇すると過程Ⅱの比重が増大し、これに反比例して過程Ⅲの比重が低下することを示している。従って、試験電圧が高い領域では過程Ⅱが、低い領域では過程Ⅲが破壊時間を支配する主プロセスとなるものの、表面張力が上昇すると過程Ⅱの重要性が増大するものと考えられる。

(2) PC の場合：PC における各過程の占有率は表面張力の変化に、より大きく依存する傾向が認められる。すなわち、表面張力の低い領域 (35 dyn/cm 以下) では各試験電圧とも過程Ⅲの占有率が最も多く、例えば 4.5 kV, 31 dyn/cm で過程Ⅲが約 65% 以上の占有率となっている。この結果は、表面張力が低い領域では過程Ⅲすなわち、炭化進展過程がトラッキング破壊時間を支配する主要なプロセスとなっていることを示すものである。これに対して、表面張力が増加すると過程Ⅰの占有率は次第に上昇し、4.5 kV, 62 dyn/cm では 80% 以上を占有するに至っている。この事実、表面張力の増加に伴って過程Ⅰの比重が次第に増して行き、それにつれて破壊時間を支配する主プロセスが過程Ⅰすなわちシンチレーション発生過程に遷移していることを示している。一方、同一の表面張力を有する試験液を用いた場合、試験電圧が低い程過程Ⅰの占有率がわずかながら大きくなる様子が認められる。しかしながら、試験電圧の相違に基づく各過程の占有率の変動は、表面張力の場合に比較して小さい。従って、PC の場合には主に表面張力が各過程の占有率に影響を及ぼし、表面張力の低い領域では過程Ⅲが、表面張力の高い領域では過程Ⅰが主プロセスとなるものと考えられる。

以上述べたように、表面張力、すなわち接触角および試験電圧が破壊に至るまでの各過程に要する時間および占有率に影響を及ぼす重要な因子となる。従って、各試料の主プロセスの表面張力、すなわち接触角および試験電圧に基づく変動が、トラッキング破壊時間の長短および耐トラッキング性の評価に相違をもたらす要因となりうるものと考えられる。

## 5. あとがき

本論文は主に試験液の表面張力がトラッキング破壊までの各過程および破壊時間に及ぼす影響について検討を加えた。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 光パルス計測法を用いて破壊までの光パルス累積数を測定し、劣化との対応性について検討した。その結果として、試験開始後トラッキング破壊に至るまでをシンチレーション発生過程 (過程Ⅰ)、炭化進

展起点の発生過程 (過程Ⅱ) および炭化進展過程 (過程Ⅲ) の3種過程に分類した。

(2) トラッキング破壊時間に占める各過程の占有率は表面張力および試験電圧に依存して変動すること、更に試料により各過程の占有率に相違を生じることが認められた。

(3) EX の場合には、試験電圧が高い領域では過程Ⅱが、低い領域では過程Ⅲが主プロセスとなるものの、表面張力が上昇するといずれの電圧においても過程Ⅱの比重が次第に増大することが明らかとなった。

(4) PC の場合、試験電圧にかかわらず表面張力が低い領域では過程Ⅲが主プロセスとなる。また、表面張力の上昇に伴い過程Ⅰの比重が次第に増し、それにつれて破壊時間を支配する主プロセスが過程Ⅰに遷移することが明らかとなった。

(5) このように、各試料の主プロセスの表面張力および試験電圧に基づく変動が、トラッキング破壊時間の長短および耐トラッキング性の評価に変動をもたらす因子となりうる事が明らかとなった。

最後に、本研究に対し協力下された本学電気工学科高橋重雄技官、学部学生若狭幸喜君に感謝する。また試料を提供下された日本チバガイギー (株) にお礼申し上げる。本研究は昭和 61 年度文部省科学研究費 (奨励研究) の援助の下に行ったことを付記し感謝の意を表す。

(昭和 61 年 12 月 18 日受付, 同 62 年 5 月 8 日再受付)

## 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), 115 (昭 56)
- (2) 例えば、絶縁材料の耐トラッキング性について、電気学会技報 (Ⅰ部), 82 (昭 42)
- (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), 86 (昭 43)
- (4) N. Yoshimura, M. Nishida & F. Noto: "Influence of the Electrolyte on Tracking Breakdown of Organic Insulating Materials", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, Vol. EI-16, No. 6, 510 (1981)
- (5) 丸茂: 高分子の表面化学, 産業図書 (株) (昭 48)
- (6) A. J. Day & D. J. Stonard: "Creepage and Clearance Distance in Electrical Equipment for Shipboard Use", *IEEE Trans. Electr. Insul.*, EI-12, No. 3 (1977)
- (7) H. Suhr: "Probleme der Kriechstromfestigkeit: Untersuchungen über den Einfluss der Prüflösung", *Zeitschrift für Werkstofftechnik*, Bd 5, Nr. 8, 437 (1974)
- (8) 西田・吉村・能登: 「有機絶縁材料表面のトラッキング劣化過程で発生する放電の光パルス計測」, 電学論 A, 104, 41 (昭 59)
- (9) IEC SC 15 A (Central Office) 44, Draft for an amendment to IEC publication 587 (1981)
- (10) 小寺: 物理化学実験法 254 (昭 49) 朝倉書店
- (11) 吉村・西田・高橋・能登: 「有機絶縁材料のトラッキング劣化過程で発生する放電の発光スペクトル特性」, 電学論 A, 105, 7, 373 (昭 60)