

## 論 文

# 模擬トリー径と模擬トリーから伸展する トリーの伸展要因との関係

今井 國治<sup>\*1</sup>

(2001年9月17日受付; 2001年12月5日受理)

Relationship between Diameter of Simulated Tree Channel  
and Tree Propagation from Its Tip

Kuniharu IMAI<sup>\*1</sup>

(Received September 17, 2001; Accepted December 5, 2001)

I have investigated relationship between partial discharge (PD) in a simulated tree channel and tree growth from its tip. In this paper, influence of channel diameter on tree propagation from its tip is examined. Voltage dependence of total number of PD pulses required for initiation of tree growth and the shape-parameter deduced from Weibull distribution were obtained. Tree growth characteristic for each diameter is divided into two different types according to applied voltage; early/random failure type ( $m \leq 1$ ) in lower voltage range (Region I) and fatigue failure type ( $m > 1$ ) in higher voltage range (Region II). Border voltage between Regions I and II varies with the channel diameter and takes a minimum value around 30  $\mu\text{m}$ . The cause of early/random failure type is considered to be statistical randomness of PD generation and structural weak points around the channel tip for smaller diameters and only structural weak points for larger diameter. Tree propagation process of fatigue failure type was found to be a thermally activated degradation process of Ahrrenius type. An activation energy for each channel diameter estimated from Ahrrenius plots of total number of PD pulses is almost accord with physical bonding energies such as Van der Waals force. I consider that micro cavity around the channel tip created by scission of physical bond acts on fatigue failure type effectively.

## 1. はじめに

近年、電力需要の増大に伴い、電力ケーブルや電力機器等の超高電圧化・大容量化が図られるとともに、電力機器等の輸送限界や立地問題、さらにコスト低減等からこれらの小型化も急速に進んでいる。そのため、以前にも増して電気絶縁部分に対し過酷な条件が課せられるようになり、電気絶縁劣化・破壊による事故の危険性が、より一層高まっている。さらに高度情報化社会の発展に伴い、これまで軽視されてきた瞬時停電さえも重要視されるようになってきた。このような社会情勢から、電気絶縁劣化・破壊に対する関心が高まっており、その機構解明が強く望まれるようになった。

**キーワード**：模擬トリー、気圧上昇、空間電荷効果、構造的弱点部分、高分子鎖の物理結合

\*名古屋大学医学部保健学科放射線技術科学専攻  
(461-8673 名古屋市東区大幸南 1-1-20)  
School of Health Sciences Nagoya University, 1-1-20 Daiko  
Minami, Higashi-ku, Nagoya 461-8673, Japan  
<sup>1</sup>imai@met.nagoya-u.ac.jp

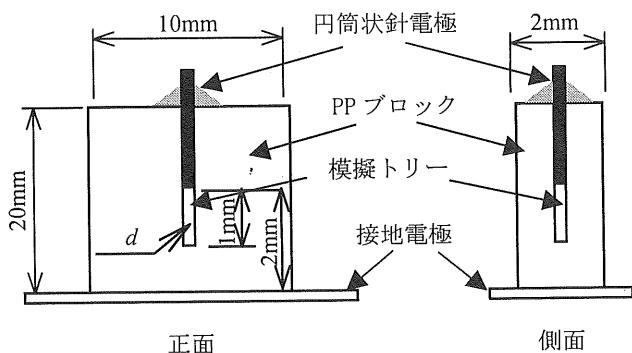
電気絶縁材料の絶縁劣化・破壊現象には、種々の形態があり、その一つにトリーイング現象がある。この現象は、トリーと称する微細な放電劣化痕跡内で、部分放電（以後PDと呼ぶ）を繰り返しながら伸展していく、最終的に全路破壊（絶縁破壊）に至ることが知られている<sup>1-3)</sup>。従ってトリー管路内で点孤するPDとトリー伸展の関係を明らかにすれば、トリー伸展機構を解明する上で、有益な情報を与えるものと思われる。しかし、トリー形状は複数の枝分かれしたトリー管路より構成されているため、両者の関係を明らかにすることは容易でない。

さて、こう言った劣化・破壊現象は電気絶縁材料でのみ認められるのではなく、様々な分野でこれと類似した現象が数多く確認されている。その一つに金属や高分子材料の力学的破壊現象（クラッキング現象やクレージング現象）がある<sup>4)</sup>。この現象は、機械系分野において古くから注目されており、様々な手法を用いて検討が行われている。その手法の一つとして、ワイル分布による解析方法が挙げられる<sup>5)</sup>。この解析法は、劣化・破壊に至るまでの衝撃回

数や寿命と言った測定値のはらつきが、劣化・破壊本来の性質に起因すると言う考えに基づいた統計・確率論的解析法であり、この分布から求められる形状パラメータの大きさには、劣化・破壊原因が反映されると言われている<sup>6)</sup>。そのため、劣化・破壊機構を解明する上で有力な解析法であると考えられ、電気絶縁材料の劣化・破壊現象の解析にもしばしば用いられている<sup>7)</sup>。

以上の観点から、筆者はトリー伸展に及ぼすPDの役割を明らかにすることを目的として、高分子絶縁材料内に模擬トリーと称する微細な絶縁細管を作成し、その内部で点弧するPDのトリー伸展までの総PDパルス数をワイブル分布により解析し、その結果に基づいて、模擬トリーからのトリー伸展要因について検討を行っている<sup>8)</sup>。その結果、低電圧側では初期・偶発的なトリー伸展要因、高電圧側では摩耗的なトリー伸展要因が支配的であることがわかった。また、これらのトリー伸展要因に及ぼす温度の影響と言った外的要因についての検討は行ったが、模擬トリー自体の幾何学的要因と言った内的要因については検討を行っていない。さらにこの要因は模擬トリー内で点弧するPDにも、何らかの影響を与えるものと考えられる上、実際のトリーを考えてみると、トリー形状自体が様々な太さのトリー管路によって形成されている。従って、模擬トリーの幾何学的要因、特に模擬トリーの太さ（以後、模擬トリー径と呼ぶ）を変化させた場合の模擬トリーからのトリー伸展要因を検討することは、実際のトリー伸展機構を解明する上で非常に有益であると思われる。

そこで本研究では、トリー伸展までの総PDパルス数と印加電圧との関係を模擬トリー径をパラメータとして求め、ワイブル分布を用いて解析した。本論文はこの結果をまと



$d : 10, 20, 30, 50, 100 \mu\text{m}$

図1 模擬トリー試料の形状  
Fig.1 Experimental specimen.

めたものであり、ここで得られた知見をもとに模擬トリーからのトリー伸展要因について論じている。

## 2. 実験試料および実験方法

### 2. 1 実験試料

図1に試料形状（以後、模擬トリー試料と呼ぶ）を示す。模擬トリー試料の作成法については、前報<sup>8)</sup>で詳しく述べたので、ここでは試料の概要を述べるだけにとどめておく。

実験試料としてポリプロピレン（以後PPと呼ぶ）を使用した。このブロック（ $20 \times 10 \times 2 \text{ mm}$ ）内部に円筒状絶縁細管（以後、模擬トリーと呼ぶ。）を作成し、その直下に厚さ1mmの絶縁層を設けた。模擬トリー径は10, 20, 30, 50, 100μmのいずれかとし、模擬トリーの長さは1mm一定とした。電極系は、模擬トリー作成時に使用した先端部分が円筒状のタングステン線をそのまま高電圧電極（以後、

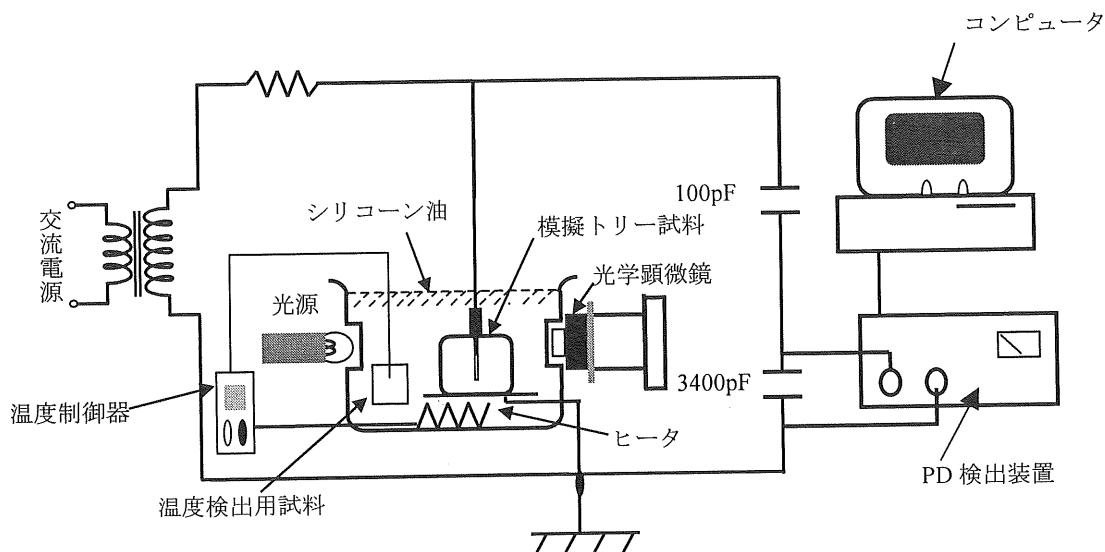


図2 実験装置  
Fig. 2 Experimental apparatus.

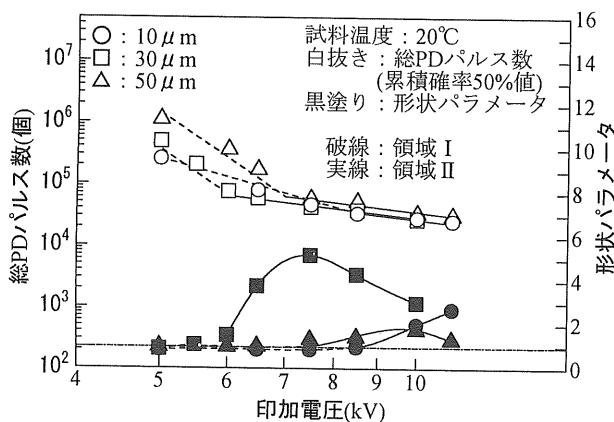


図3 各模擬トリー径における総PDパルス数  
および形状パラメータの電圧依存性

Fig.3 Voltage dependence of total number of PD pulse and its shape-parameter for each channel diameter.

円筒状針電極と呼ぶ)として使用し、これに対向する面には、接地電極としてアルミニウム箔を接着した。また模擬トリー内の気密を保つため、円筒状針電極とPPブロックとの間をエポキシ樹脂でモールドした。

## 2.2 実験方法

図2に実験装置を示す。模擬トリー試料は温度制御と沿面放電防止を兼ねてシリコーン油に浸した。試料温度は、模擬トリー試料と並列に設置した温度検出用試料によりモニタし、常に試料温度が20°C一定となるように調整した。このように設置した模擬トリー試料の円筒状針電極に、一定の交流電圧を印加し、模擬トリー先端からトリーが伸展するまでの総PDパルス数(以後単に総PDと呼ぶ)を部分放電検出装置により測定した。また印加電圧の範囲は本研究においても、前報と同様の方法で定め、トリーの伸展はトリー(長さが10 μm以上)が光学顕微鏡で確認された時点とした。

## 3. 実験結果

模擬トリーから伸展するトリーの基本的な特性を把握するため、印加電圧 $V$ と総PDパルス数 $n$ の関係( $V-n$ 特性)を求めた。図3に模擬トリー径10(−○−)、30(−□−)および50 μm(−△−)の結果を示す。PD点弧の開始電圧はどの模擬トリー径に対しても2.5 kVであり、本研究で得られた結果の限りでは、模擬トリー径の大きさに関係なく、トリー伸展の認められる最低電圧は5 kV一定であった。また総PDパルス数はどの模擬トリー径に対しても、ある印加電圧で屈曲する直線的な特性として与えることができ、各直線に対し $n \propto V^{-\alpha}$ と言う関係が成立した。さらにこの直線の傾きとして求められる指数 $\alpha$ の値は、低電圧側よりも高電圧側の方が小さくなる傾向を示した。そこで本

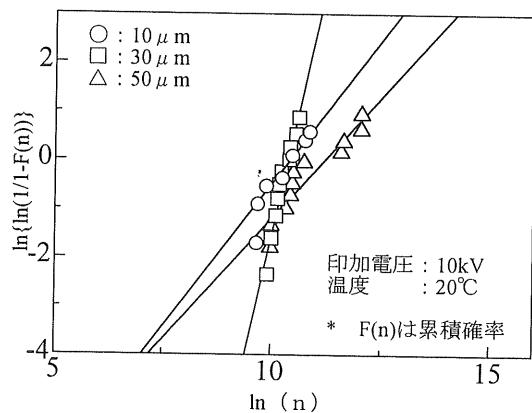


図4 総PDパルス数に対するワイブル分布  
Fig.4 Weibull distribution of total number of PD pulse.

研究でも便宜上、同一関係式が成立する電圧範囲を低電圧側から領域I(破線部分)、領域II(実線部分)と呼ぶことにする。

さて、このように指数 $\alpha$ の値が各領域で異なると言うことは、総PDパルス数のワイブル分布から求められる形状パラメータの大きさにも変化があると考えられる<sup>⑨</sup>。一般に寿命と言った時間に対するワイブル分布から求められる形状パラメータの大きさには、故障や破壊と言った原因が反映されると言われているが、これに類する変数、例えば、金属等の力学的破壊に対する応力の繰り返し回数と言ったものを変数とした場合にも、同様の影響が形状パラメータの大きさに含まれると言われている<sup>⑨</sup>。従って、総PDパルス数に対するワイブル分布から求められる形状パラメータの大きさにも、トリー伸展に起因する原因が反映するものと思われる。そこで、総PDパルス数を図4のようにワイブルプロットし、これらの分布の傾きから形状パラメータの大きさ $m$ を求め、各領域との関係を明らかにするため、図3にプロット(−●−: 10 μm, −■−: 30 μm, −▲−: 50 μm)した。形状パラメータの大きさは、領域Iで $m \leq 1$ (初期・偶発的なトリー伸展特性)、領域IIでは $m > 1$ (摩耗的なトリー伸展特性)となった。このことから模擬トリー径を変化させても、領域Iでは初期・偶発的なトリー伸展要因、領域IIでは摩耗的なトリー伸展要因が支配的となることがわかった。

しかし、領域Iを示す電圧範囲は、模擬トリー径の大きさにより異なっている。そこでこのことを明確にするため、領域Iと領域IIの境となる電圧、すなわち $m=1$ となる電圧 $V_{m=1}$ と模擬トリー径 $d$ の関係を求めた。その結果を図5に示す。領域IとIIの境となる電圧 $V_{m=1}$ は、模擬トリー径 $d=30$  μm付近で最低値となるV字特性を示した。つまり、模擬トリー径 $d < 30$  μmの範囲内では模擬トリー径の増大と共に領域Iの範囲は狭まり、逆に $d \geq 30$  μmの範囲内で

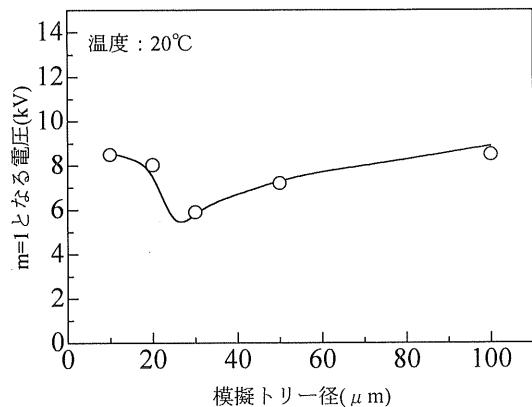


図5 領域IとIIの境界電圧と模擬トリー径との関係  
Fig.5 Border voltage between Regions I and II as a function of the channel diameter.

は広がっている。また表1に示すように領域Iに対する指數 $\alpha$ の値は、模擬トリー径 $d=30\mu\text{m}$ を境にして異なっていることもわかった。以上のことから、模擬トリー径 $30\mu\text{m}$ 付近を境にして、初期・偶発的なトリー伸展を引き起こす要因に何らかの変化が現れたのではないかと考えられる。

一方、領域IIに対する指數 $\alpha$ の値は、模擬トリー径の大きさに関係なく、ほぼ一定であることがわかった。このことから、摩耗的なトリー伸展を引き起こす要因は、模擬トリー径によって変化しないと考えられる。ところが、領域IIを示す電圧範囲については、前報でも述べたように測定上の制限もあり、これについて把握することはできなかった。しかし、この領域のトリー伸展要因を検討する上では、後述の考察からもわかるように、この電圧範囲の変化を把握しなくとも支障がないものと思われる。従って、本論文ではこれに関する論述は避け、詳細な検討は今後の課題としたい。

#### 4. トリー伸展要因の考察

ここでは、3. 節で得られた結果をもとに領域Iおよび領域IIにおける模擬トリーからのトリー伸展要因について検討を行う。

領域Iでは形状パラメータの大きさ $m$ が $m \leq 1$ となり、初期・偶発的なトリー伸展要因が支配的であることがわかった。しかし、模擬トリー径 $d=30\mu\text{m}$ 付近を境にして、この領域に対する諸特性が変化したことから、初期・偶発的なトリー伸展を引き起こす要因に何らかの変化が現れたのではないかと示唆した。以上のことを考慮した上で、領域Iにおけるトリー伸展要因について考察する。

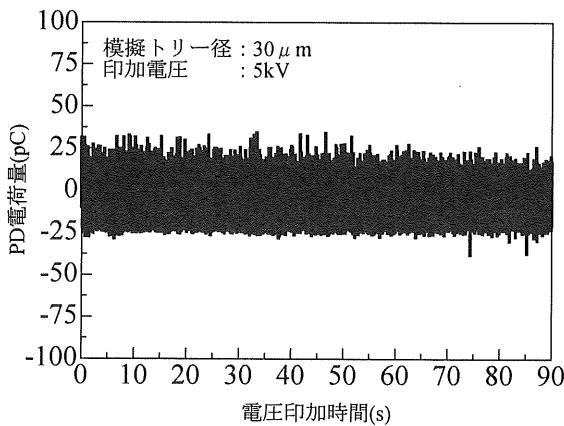
まず $d < 30\mu\text{m}$ の場合について考察する。前報において $d=20\mu\text{m}$ における初期・偶発的なトリー伸展は、模擬トリー管路内におけるPD点孤の偶発性と模擬トリー先端付近

表1  $V-n$  特性における $\alpha$ の値  
Table 1 Exponent  $\alpha$  of  $V-n$  characteristic.

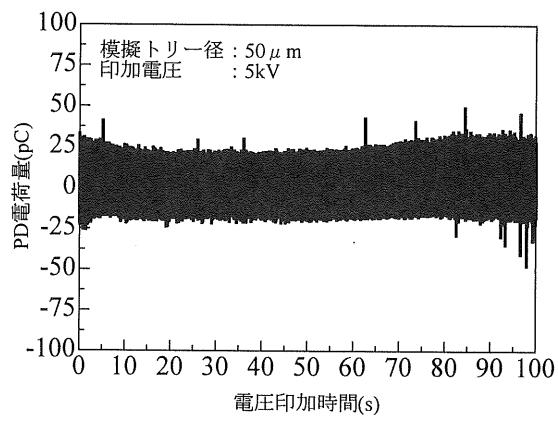
| 模擬トリー径            | 領域I                               | 領域II                           |
|-------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 10 $\mu\text{m}$  | $\alpha = 3.80$<br>( $m \leq 1$ ) | $\alpha = 1.54$<br>( $m > 1$ ) |
| 20 $\mu\text{m}$  | $\alpha = 3.41$<br>( $m \leq 1$ ) | $\alpha = 1.54$<br>( $m > 1$ ) |
| 30 $\mu\text{m}$  | $\alpha = 9.26$<br>( $m \leq 1$ ) | $\alpha = 1.59$<br>( $m > 1$ ) |
| 50 $\mu\text{m}$  | $\alpha = 9.29$<br>( $m \leq 1$ ) | $\alpha = 1.58$<br>( $m > 1$ ) |
| 100 $\mu\text{m}$ | $\alpha = 9.24$<br>( $m \leq 1$ ) | $\alpha = 1.56$<br>( $m > 1$ ) |

にトリー伸展に対し有効に作用する構造的弱点部分（初期的要因）が存在するか否かと言った偶発性に左右されると報告した。さらに、前者の要因として、模擬トリー管路内で生成した放電劣化生成気体による気圧上昇や模擬トリー壁面にトラップされたキャリアによる空間電荷効果と言った二次的要因を、後者の要因として、模擬トリー先端付近に存在する自由体積やミクロボイドと言った構造的要因を挙げた。今回、 $d < 30\mu\text{m}$ の範囲内では、領域Iに対する指數 $\alpha$ の値に変化が認められなかったことから、 $d < 30\mu\text{m}$ の場合におけるトリー伸展要因は、上述した初期・偶発的な要因が支配的であると考えられる。

一方、 $d \geq 30\mu\text{m}$ の場合における初期・偶発的なトリー伸展要因についてであるが、本研究では同じロッドのPPを使用しているため、 $d < 30\mu\text{m}$ の場合と同じ割合（確率）でバルク内に構造的弱点部分が存在するものと考えられる。従って、 $d \geq 30\mu\text{m}$ の場合についても、 $d < 30\mu\text{m}$ の場合と同様、模擬トリー先端付近にトリー伸展に対し有効に作用する構造的弱点部分が存在するか否かと言った偶発性に左右されるものと思われる。では、模擬トリー管路内におけるPD点孤の偶発性についてはどうであろうか。そこでこれを検討するため、前報と同様、模擬トリーからトリーが伸展するまでのPD点孤状況（PD電荷量の経時変化）を求めた。その典型例を図6に示す。また比較のため、図7に模擬トリー径 $10\mu\text{m}$ および $20\mu\text{m}$ におけるPDの点孤状況も示す。 $d \geq 30\mu\text{m}$ の場合、模擬トリー径の大きさに関係なく、 $25\text{ pC}$ 程度の電荷量を持ったPDパルスがほぼ規則正しく連続的に点孤している状況だけが観察された。これに対し、 $d < 30\mu\text{m}$ の場合、PDの点孤状況は連続的ではあるが、そのパルスの大きさ（電荷量）にはかなりの変動があり、不規則な点孤状況となっている。また前報でも示したようにPDの点孤状況は試料によってもかなり異なって

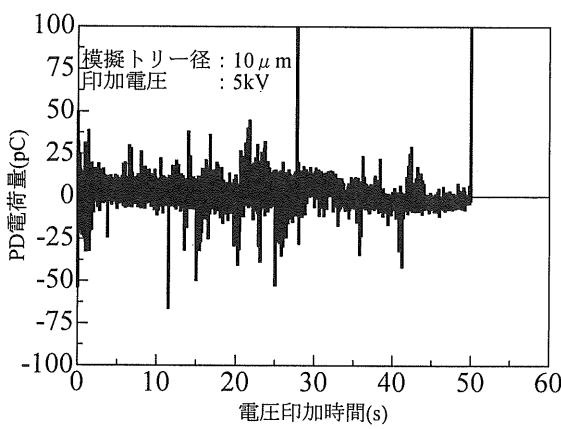


(a) 模擬トリー径 : 30 μm

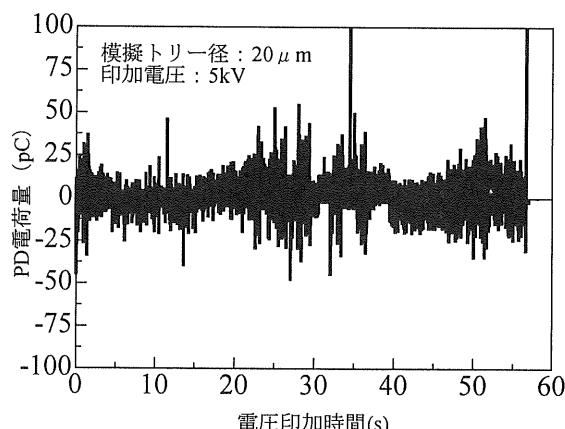


(b) 模擬トリー径 : 50 μm

図6 模擬トリー径  $d \geq 30 \mu\text{m}$  におけるPDの点弧状況  
Fig. 6 Time variation of PD pulse generation in a simulated tree channel for  $d \geq 30 \mu\text{m}$ .



(a) 模擬トリー径 : 10 μm



(b) 模擬トリー径 : 20 μm

図7 模擬トリー径  $d < 30 \mu\text{m}$  におけるPDの点弧状況  
Fig. 7 Time variation of PD pulse generation in a simulated tree channel for  $d < 30 \mu\text{m}$ .

おり、 $d \geq 30 \mu\text{m}$  のようにどの試料においても同じような点弧状況が得られると言ったことはなかった。これらの結果は上述した PD 自身によって引き起こされた二次的要因による影響の違いと考えられ、その違いがそのまま PD 点弧に反映されているものと思われる。以上の結果から、模擬トリー径  $d \geq 30 \mu\text{m}$  の場合、二次的要因による PD 点弧への影響はほとんどなく、PD 点弧の偶発性は  $d < 30 \mu\text{m}$  の場合程ないものと思われる。また、過去に模擬トリーの長さが 2 mm 一定で、印加電圧が直流電圧と言った条件ではあるが、放電電圧と模擬トリー径との関係が検討されており、模擬トリー径が 50 μm 以上では、模擬トリー管路内の気圧上昇や空間電荷効果と言った二次的要因を含む模擬トリーの壁面効果が認められなくなると言う報告もある<sup>10)</sup>。以上のことからこの場合の初期・偶発的なトリー伸展は、あまり模擬トリー管路内の気圧上昇や空間電荷効果と言った二次的要因の影響を受けないものと考えられる。従って、

$d \geq 30 \mu\text{m}$  の範囲内における初期・偶発的なトリー伸展は、模擬トリー先端付近にトリー伸展に起因する初期的要因が存在するか否かと言った確率的要因に支配されるものと考えられる。以上の考察は領域 I と II の境となる電圧  $V_{m=1}$  が、模擬トリー径  $d$  に対し V 字特性を示すことで裏付けられる。すなわち、 $d < 30 \mu\text{m}$  の範囲内で  $V_{m=1}$  が減少するのは、模擬トリー径の増大と共に模擬トリー管路内における気圧上昇や空間電荷効果が緩和し、これらの二次的要因の影響が小さくなつたため、模擬トリー長で規定される放電電圧で PD 点弧が起こるようになり、その偶発性が小さくなつたからと考えられる。逆に模擬トリー径の増大は、模擬トリー先端付近に存在する構造的弱点部分の増加をもたらすこととなり、初期・偶発的なトリー伸展に対し、有効に作用する初期的要因の絶対数が増大したために、 $d \geq 30 \mu\text{m}$  の範囲内で  $V_{m=1}$  の増大が生じたと考れば、上記の検討と併せて、 $V_{m=1} - d$  特性が V 字特性になると言う説

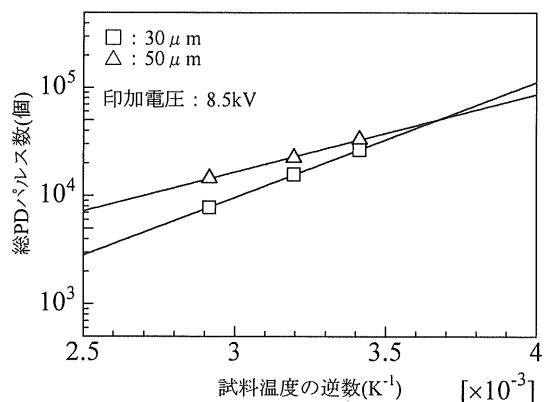


図 8 総 PD に対するアレニウスプロット  
Fig. 8 Arrhenius plot of total number of PD pulses.

明が定性的につく。また図 3 の領域 I に着目すると、模擬トリー径  $50 \mu\text{m}$  における総 PD パルス数は  $30 \mu\text{m}$  の場合よりも多くなると言う結果が得られている。初期・偶発的なトリー伸展に有効に作用する構造的弱点部分の破壊強度がどれも同程度であると考えると、その数が少ない場合、模擬トリー内における電界はこの弱点部分に集中し易くなり、PD による模擬トリー先端部分のダメージが局所化するため、少ない総 PD パルス数でトリー伸展が起こるものと考えられる。これに対し、構造的弱点部分が多い場合だと、電界の集中が起りにくくなるため、PD による模擬トリー先端部分のダメージ箇所が分散化し、総 PD パルス数は多くなるものと考えられる。このように考えれば、この結果も定性的に理解でき、上述のトリー伸展要因に関する考察を支持できるものと思われる。

次に領域 II では形状パラメータ  $m$  の大きさが  $m > 1$  となり、摩耗的なトリー伸展要因が支配的になることがわかった。このことからこの領域では、何らかの劣化蓄積によりトリーが伸展したものと考えられる。前報において領域 II におけるトリー伸展は、アレニウス型の劣化過程であることがわかり、その活性化エネルギーは原子団同士のファンデルワールス力と言った物理的結合エネルギーとほぼ同程度であることを報告した。また、今回この領域で得られた指數  $\alpha$  の値は、模擬トリー径の大きさに関係なく、ほぼ同じであることから、摩耗的な振る舞いをするトリー伸展過程は、アレニウス型であると考えられる。そこで、各模擬トリー径に対するトリー伸展までの総 PD パルス数を図 8 のようにアレニウスプロットし、この直線の傾きからトリー伸展に要する活性化エネルギーを求めた。その結果を表 2 に示す。比較のため、C-C および C-H 結合の化学的結合エネルギー及び  $\text{CH}_3\text{-CH}_3$  の物理的結合エネルギー<sup>10)</sup>を表 3 に示す。各模擬トリー径の間で若干、トリー伸展に要する活性化エネルギーの値に違いは認められるものの、 $\text{CH}_3$  原

表 2 トリー伸展に要する活性化エネルギー  
Table 2 Activation energies for initiation of tree propagation.

| 模擬トリー径            | 活性化エネルギー(kcal/mol) |
|-------------------|--------------------|
| $10 \mu\text{m}$  | 4.76               |
| $20 \mu\text{m}$  | 4.70               |
| $30 \mu\text{m}$  | 4.96               |
| $50 \mu\text{m}$  | 3.41               |
| $100 \mu\text{m}$ | 2.77               |

表 3 高分子鎖の結合エネルギー<sup>10)</sup>  
Table 3 Bonding energy of polymer.

| 結合名                          | 結合エネルギー(kcal/mol) |
|------------------------------|-------------------|
| C-C 結合                       | 96                |
| C-H 結合                       | 92                |
| $\text{CH}_3\text{-CH}_3$ 結合 | 1.78              |

子団同士の物理的結合エネルギー(ファンデルワールス力)とほぼ同程度の値を示すことがわかった。以上の結果から、前報で述べたように、PD の衝撃や熱的効果もしくは空間電荷効果を含む PD 先端付近の電界効果が、高分子鎖間の物理結合を切断し、その結果として生成したミクロボイドが、トリー伸展に有効に作用したため、トリーが伸展し始めたのではないかと考えられる。

以上の結果は一応の定性的説明を与えているものと思われるが、前報と同様、バルク構造とトリー伸展との関係については依然として不明な点が多く残されており、今後の検討課題したい。

## 5. まとめ

本研究では模擬トリーからトリーが伸展するまでの総 PD パルス数に着目し、ワイブル分布を用いて、模擬トリー径の違いに基づく模擬トリーからのトリー伸展要因について検討を行った。その結果を以下に要約する。

1.  $V-n$  特性 ( $n \propto V^{-\alpha}$ ) および総 PD パルス数のワイブル形状パラメータの大きさ  $m$  をもとにトリー伸展要因を検討したところ、模擬トリー径の大きさに関係なく、印加電圧に対し二つの要因に大別できた。つまり、低電圧側(領域 I)で支配的となる初期・偶発的なトリー伸展要因 ( $m \leq 1$ ) と高電圧側(領域 II)で支配的となる摩耗的なトリー伸展要因 ( $m > 1$ ) である。
2. 模擬トリー径を増大させると、 $d=30 \mu\text{m}$  を境にして、初期・偶発的なトリー伸展を引き起こす要因に変化が現

れることがわかった。すなわち  $d < 30 \mu\text{m}$  の範囲では、PD 点弧の偶発性と言った要因や構造的弱点部分に起因する初期・偶発的要因が支配的であるのに対し、 $d \geq 30 \mu\text{m}$  の範囲内では、構造的弱点部分に起因する初期・偶発的要因だけが支配的となった。一方、摩耗的なトリー伸展はアレニウス型の劣化過程であり、それを引き起こす要因については、模擬トリー径に關係なく同じ要因が支配的であることがわかった。つまり、高分子鎖間の物理結合の切断に基づくミクロボイドの形成と言った摩耗的要因である。

最後に本研究は名城大学理工学部電気電子工学科電気物理材料研究室内で行われたものであり、研究を行うに当たり実験施設および機材を提供していただいた同大学教授工学博士繩田正人先生、同じく教授工学博士清水教之先生に感謝します。また試料を提供していただいたタツタ電線株式会社の方々にも謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 絶縁材料トリーイング専門委員会：電気学会技術報告（I）部、第100号
- 2) 繩田正人、河村英昭、家田正之：電気学会雑誌、91(1971)1358
- 3) L.A.Dissado and J.C.Fothergill : Electrical degradation and breakdown in polymer, p.250, Peregrines, London (1992)
- 4) 横堀武夫：材料強度学, p.74, 技報堂出版 (1955)
- 5) 市川昌弘：構造信頼性工学, p.11, 海文堂(1988)
- 6) 広瀬英雄：電気学会論文誌A, 116-A, No.10 (1996) 840
- 7) 今井國治、鈴木貴雄、清水教之、繩田正人：電気学会論文誌A, 120-A, No.5 (2000) 645
- 8) 今井國治：静電気学会誌, 25, (2001)271
- 9) 深堀美英：高分子の力学, p.205, 技報堂出版 (2000)
- 10) 水野幸男、長尾雅行、小崎正光：電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, 246(1993)123