

論 文

模擬トリーから伸展するトリーのワイブル分布に基づく解析とそれに及ぼす温度の影響

今井 國治^{*1}

(2001年6月12日受付; 2001年8月23日受理)

Statistical Analysis of Tree Propagation from a Simulated Tree Channel with Weibull Distribution and Influence of Temperature on it

Kuniharu IMAI^{*1}

(Received June 12, 2001; Accepted August 23, 2001)

In this paper, I investigate relationship between partial discharge (PD) in a simulated tree channel and tree growth from its tip. Also effect of temperature on tree propagation 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. The shape-parameter m changes from $m \leq 1$ (early/random failure type) to $m > 1$ (fatigue failure type) with increasing voltage. The mechanism of tree growth was discussed based on the shape-parameter. Statistical randomness of PD generation caused by gas pressure rise and space charge effect and structural weak points around the channel tip is found to play important roles in tree propagation of early/random failure type. Voltage region where $m > 1$ tends to shift to lower voltage side with increasing temperature and that where $m \leq 1$ disappears above 40 °C. However, it is found that mechanism of tree propagation of fatigue failure type does not change by temperature. Activation energy for tree growth obtained from Arrhenius plot of total number of PD pulse was estimated to be 4.7 kcal/mol. I consider that micro-cavities are created around the tip of a simulated tree channel by scission of physical bond of polymer chains such as Van der Waals force between CH₃ bonds and act upon initiation of tree propagation of fatigue failure effectively.

1. はじめに

高度情報化社会では高品質、高信頼度の電力供給が必要不可欠となる。そのため電力用 CV ケーブルに課せられる役割は、これまで以上に重要となってくる。しかし電力需要の増大に伴う実運転温度の上昇や地球温暖化に伴う気温の上昇は、これまで以上に絶縁破壊による事故の危険性を高めている。従って、電力用 CV ケーブルの故障原因の一つであるトリーイング破壊の機構解明やそれに及ぼす温度の影響を明らかにすることは工学上極めて重要である。またこれらの機構解明は電力用 CV ケーブルの長期信頼性と言った観点においても非常に重要であり、トリー発生とトリー伸展の両側面から検討が進められている¹⁾。これまでにトリー伸展に関しては、トリー管路内で点弧する部分放

電（以後 PD と呼ぶ。）がトリー伸展に対し重要な役割を果たすこと¹⁾や温度上昇と共にトリーが伸展しやすくなること²⁾が明らかにされた。しかし、トリー形状は枝分かれした複数のトリー管路から構成されているため、PD とトリー伸展の関係、さらにこれらと温度の関係を解析することは容易でなく、その内容が十分に明らかにされているとは言えない。

さて、機器等の故障をもたらす破壊現象の究明は電気系分野だけでなく、機械系分野においても金属や高分子材料の力学的破壊現象^{3, 4)}（クラック及びクレージング現象等）に対して同様の検討が進められている。その際、故障物理に基づく統計・確率論的解析、中でもワイブル分布による解析が最もよく用いられている。これは破壊に至るまでの時間もしくは衝撃回数のばらつきが、破壊本来の性質を反映しているという考えに立脚した解析方法⁴⁾で、その影響はワイブル分布から求められる形状パラメータの大きさとして与えられる⁵⁾。この方法はトリー発生機構の解析にもしばしば用いられているが⁶⁾、トリー伸展に関しては様々

キーワード：模擬トリー、ワイブル分布、形状パラメータ

*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, Higasi-ku, Nagoya, 461-8673, Japan
† imai@met.nagoya-u.ac.jp

な要因が複雑に関わっている上、それを制御することが困難であると言った理由からあまり用いられていない。

以上の観点から、本研究で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、筆者は高分子絶縁材料内にトリーのような微細な絶縁細管（以後、模擬トリーと呼ぶ。）を作成し、その先端からトリーが伸展するまでの総PDパルス数と印加電圧の関係を求め、ワイブル分布を用いて解析した。本論文はこれらの結果をまとめたものであり、この結果に基づいて模擬トリーからのトリー伸展に及ぼす温度の影響について論じている。さらに模擬トリーからのトリー伸展要因を形状パラメータの大きさをもとに考察している。

2. 実験試料及び実験方法

2.1 実験試料

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。このブロックを2枚準備し、その間に先端部分が円筒である直径 $20\mu\text{m}$ のタンクステン線をはさみ、 120°C 、1時間恒温槽内にてホットプレスした。その後、大気中にて室温まで自然冷却し、長さ1mmの円筒状絶縁細管（模擬トリー）を作成するため、マイクロメータを備えた持具によりタンクステン線を一部引き抜いた。また模擬トリー直下には厚さ1mmの絶縁層を設け、電極間距離が2mmとなるようにPPブロックを成形（ $20\times10\times2\text{mm}$ ）した。電極系としては模擬トリー作成時に使用したタンクステン線をそのまま高電圧電極（以降、円筒状針電極と呼ぶ。）として使用し、これと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。この試料形状（以後、模擬トリー試料と呼ぶ。）を図1に示す。なお、本研究では模擬トリー内の

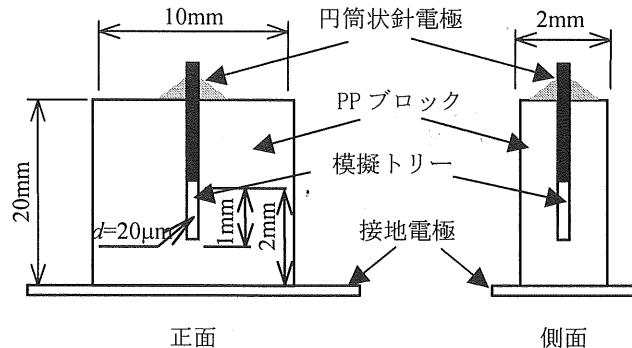


図1 模擬トリー試料の形状
Fig.1 Experimental specimen.

気密を保つため、円筒状針電極とPPブロック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。まず、印加電圧の範囲を決めるため、模擬トリー試料を外した状態で交流電圧を印加し、模擬トリー試料以外でPDが点弧し始める電圧を測定した。その結果、 20°C の場合は 11kV 、それ以外の温度では 10kV だったので、これらの値を実験範囲の上限とした。また測定されたPDのパルス数は自動的にコンピュータへ転送されるため、保管できる最大のデータ量で下限の印加電圧を決めた。

次に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 $20^\circ\text{C}\sim70^\circ\text{C}$ とし、模擬トリー試料と並列に設置した温度モニタ用試料により測定した。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。）

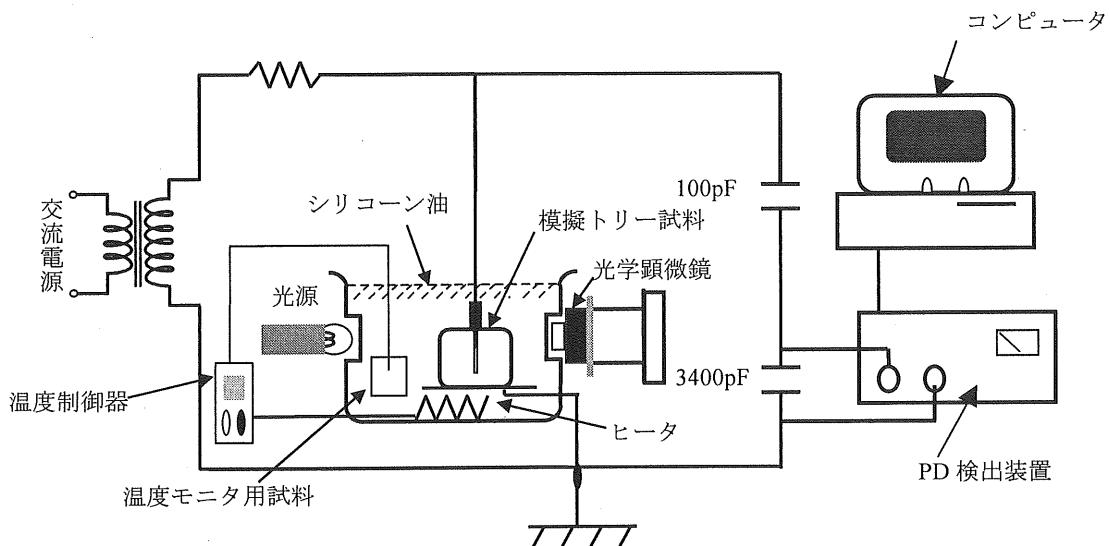


図2 実験装置
Fig. 2 Experimental apparatus.

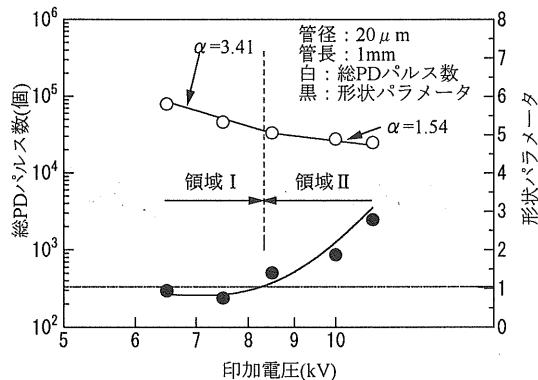


図3 総PDパルス数及び形状パラメータの電圧依存性
Fig.3 Voltage dependence of total number of PD pulse and its shape-parameter.

をコンピュータ支援型の部分放電検出装置により連続測定した。またトリー伸展はトリー（長さが \$10\mu\text{m}\$ 以上）が光学顕微鏡で確認された時点とした。

3. 実験結果

3.1 印加電圧と総PDパルス数の関係

模擬トリーからトリーが伸展するまでの基本的な特性を把握するため、試料温度 \$20^\circ\text{C}\$ (室温付近) における印加電圧 \$V\$ と総PDパルス数 \$n\$ の関係 (\$V-n\$ 特性) を求めた。その結果を図3 (—○—) に示す。総PDパルス数は印加電圧 \$8\text{kV}\$ 付近で屈曲する直線的な特性を示し、各直線に対し \$n \propto V^{-\alpha}\$ という関係が成立した。また低電圧側における指数 \$\alpha\$ の値は高電圧側よりも高い値を示した。そこで本研究では同一関係式が成立する電圧範囲を低電圧側から領域I, 領域IIと呼ぶことにし、以降この分類に基づいて検討を行うこととする。

3.2 印加電圧の大きさによるトリー伸展特性の違い

3.1節において指数 \$\alpha\$ の値が各領域によって異なっていることがわかった。また指数 \$\alpha\$ はワイブル分布から求められる形状パラメータと密接な関係にあることが知られている⁷⁾。一般に寿命と言った時間から求められる形状パラメータの大きさには、破壊や故障と言った現象の原因が反映されていると言われている⁴⁾。しかし、この影響は時間の場合だけではなく、例えば、高分子材料の力学的破壊を考える場合、加えた応力の繰り返し回数をワイブル分布により解析しても、時間の場合と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⁴⁾。このことからトリー伸展に要する総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トリー伸展に起因する原因が反映されるものと考えられる。以上の観点から総PDパルス数を図4のようにワイブルプロットし、こ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

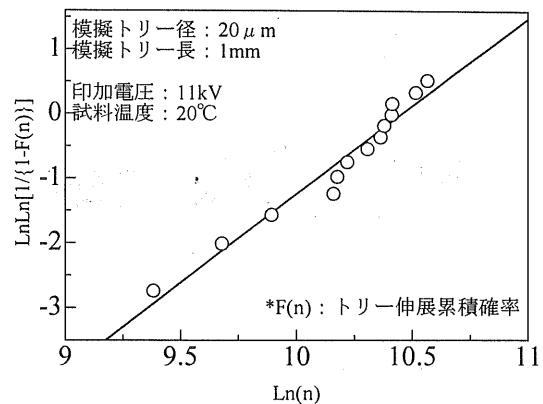


図4 総PDパルス数に対するワイブル分布
Fig.4 Weibull distribution of total number of PD pulse.

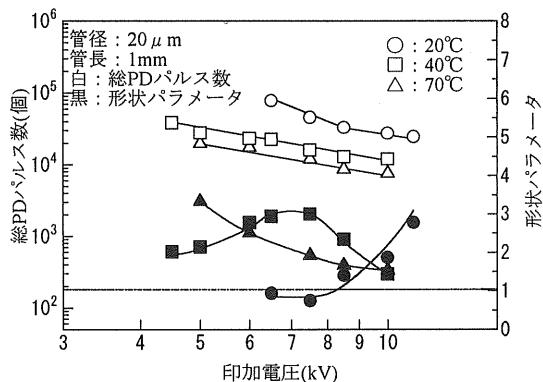


図5 各温度における総PDパルス数及び形状パラメータの電圧依存性

Fig.5 Voltage dependence of total number of PD pulse and its shape-parameter for each temperature.

表1 \$V-n\$ 特性における \$\alpha\$ の値

Table 1 Exponent \$\alpha\$ of \$V-n\$ characteristic.

試料温度	領域I	領域II
\$20^\circ\text{C}\$	$\alpha = 3.41$ ($m \leq 1$)	$\alpha = 1.54$ ($m > 1$)
\$40^\circ\text{C}\$	—	$\alpha = 1.58$ ($m > 1$)
\$70^\circ\text{C}\$	—	$\alpha = 1.55$ ($m > 1$)

係を明らかにするため図3にプロット (—●—) した。形状パラメータの大きさ \$m\$ は領域Iで \$m \leq 1\$、領域IIで \$m > 1\$ となった。このことから領域Iでは初期・偶発的、領域IIでは摩耗的なトリー伸展特性が支配的であることがわかった。

3.3 トリー伸展特性に及ぼす温度の影響

温度がトリー伸展にどのような影響を及ぼすかを検討するため、各試料温度における総PDパルス数及び形状パラメータの大きさ \$m\$ を求め、各領域との関

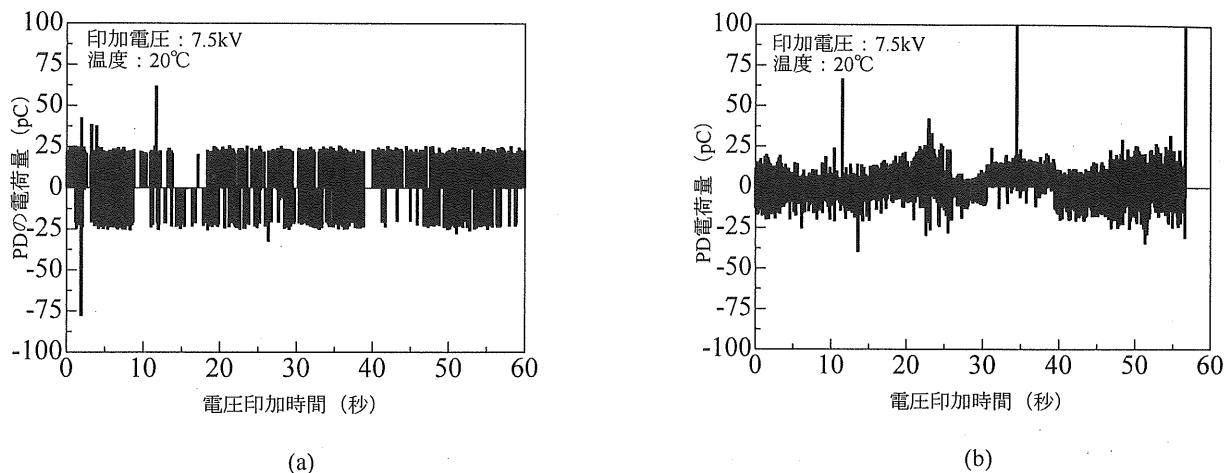


図6 模擬トリー内におけるPDの点弧状況 (20°C)
Fig. 6 Time variation of PD pulse generation in a simulated tree channel at 20 °C.

ラメータの印加電圧依存性を求めた。その結果を図5に示す。試料温度が40°C以上では20°Cの場合と異なり、形状パラメータの大きさ m が $m>1$ となる領域だけが確認された。また、この領域に対する指標 α の値は、表1に示すように20°Cの場合の領域IIの値とほぼ一致している。以上の結果から、試料温度40°C以上では摩耗的なトリー伸展特性を示す領域IIのみとなり、初期・偶発的なトリー伸展特性を示す領域Iは認められなくなることがわかった。さらに、これらの結果は、摩耗的なトリー伸展を引き起こす要因が温度によって変化しないことを示唆しているものと思われる。

また20°Cにおいて領域Iであった電圧範囲が40°C以上では領域IIとなり、40°Cに関しては形状パラメータの大きさが7kV付近まで上昇する傾向を示した。一般に高分子力学の分野では形状パラメータの大きさが増大すると、高分子材料の破壊に起因する初期・偶発的な要因の割合が減少すると考えられている⁴⁾。従って20°Cにおける8kV以上でも認められたように、形状パラメータの大きさが上昇すると言うことは、印加電圧の増大に伴い摩耗的なトリー伸展特性がより支配的になると言うことを示しているのではないかと考えられる。一方、7kV以上では逆に印加電圧の増大と共に減少し、 $m=1$ に近づく傾向を示した。特に70°Cの場合についてはこの特性だけが認められた。つまりこの電圧範囲では初期・偶発的要因の割合、特に $m=1$ に近づく傾向を示すことから偶発的要因が増大しているものと考えられる。一般に形状パラメータの大きさ m が $m=1$ であると言った解釈は破壊現象そのものがまさに偶発的であると言った解釈と本質的、つまり真性破壊的であると言った解釈^{5,6)}の二通りが挙げられる。この場合、温度の上昇により試料固有の破壊強度が低下することを考慮に入れると、形状パラメータの大きさ m が $m=1$ に近づくと言った特性

は、真性破壊的なトリー伸展特性が支配的になりつつあると解釈でき、70°C程度まで温度を上昇させると摩耗的な特性も、もはや失われかかっているのではないかと考えられる。以上のことから温度の上昇はトリー伸展要因を根本的に変えるのではなく、(初期・偶発的な特性)→(摩耗的な特性)→(真性破壊的な特性)と言った一連の劣化過程を促進させる効果があるのではないかと推測されるが、詳細については今後の検討課題としたい。

4. トリー伸展要因の考察

ここでは領域I及び領域IIにおけるトリー伸展要因を形状パラメータの大きさをもとに検討する。

3.2節において領域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特性が支配的であることがわかった。このことからこの領域では、初期的($m<1$)な要因と偶発的($m=1$)な要因の相乗作用がトリー伸展を引き起こすものと考えられる。では初期的要因としてどのようなものが考えられるだろうか。一般に金属等の力学的初期破壊は、格子欠陥等の構造的弱点部分に起因すると言われている³⁾。このことを考慮すると、この領域においても金属等の力学的破壊と同様、模擬トリー先端付近に存在する自由体積やサブミクロンサイズのボイドと言った微視的弱点部分が、トリー伸展に起因しているのではないかと考えられる。では偶発的(確率的)要因としてどのようなものがあるだろうか。1節でも述べたようにトリー伸展はトリー管路内で点弧するPDと強い相関関係にあることが指摘されている。また実際のトリーや模擬トリーと言った微細な空隙(閉空間)内で点弧するPDは、それ自身によって生成した放電劣化生成気体による気圧の上昇やトリー壁面にトラップされたキャリアによる空間電

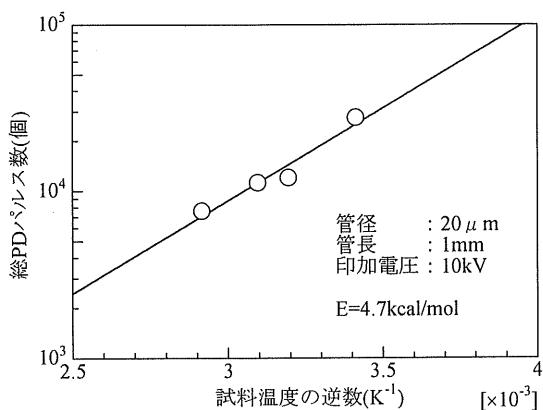


図 7 総 PD に対するアレニウスプロット
Fig. 7 Arrhenius plot of total number of PD pulses.

荷効果と言った二次的要因に影響されるものと思われる。すなわち、これらの二次的要因が PD 点弧に対しどの程度影響を及ぼすかについては、放電劣化生成気体の発生量やバルク内への拡散量、さらにトリー壁面にトラップされたキャリアの総電荷量や分布等といった要因により左右されるため、非常に偶発的なものになると考えられる。従って、これらの二次的要因は PD 点弧の偶発性を生みだすこととなり、その影響は PD 電荷量の大きさとして反映されるものと考えられる。そこで、この PD 点弧の偶発性を検証するためトリー伸展に至るまでの PD 電荷量の経時変化を測定した。その結果の一例（印加電圧：7.5kV）を図 6 に示す。同図 (a) の場合、PD 電荷量はほぼ一定となっているが、PD 点弧の状況は間欠的となっている。これに対し同図 (b) の場合、PD 点弧の状況は連続的であるもののその電荷量はかなり変動しており、中には一桁以上も違う PD も点弧している。このように同じ印加電圧であるにも関わらず、PD 点弧の状況は明らかに異なっている上、トリー伸展に至るまでの PD 電荷量にかなりの変動があることからトリー伸展を引き起こす偶発的要因の一つとして、模擬トリー管路内における PD 点弧の偶発性が挙げられ、その偶発性は模擬トリー管路内の気圧上昇や空間電荷効果により左右されるものと思われる。また他の偶発的要因としてバルク内の微視的な弱点部分、特にトリー伸展に有効に作用する構造的弱点部分が模擬トリー先端付近に存在するか否かと言った偶発性もトリー伸展に大きな影響を与えるものと思われる。以上のことから領域 I における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と PD 点弧の偶発的要因により支配されるものと考えられる。

次に領域 II では形状パラメータの大きさ m が $m > 1$ となり、摩耗的なトリー伸展特性が支配的であることがわかつ

た。このことから何らかの劣化蓄積によりトリー伸展が開始されたものと思われる。機械系分野では劣化蓄積による疲労破壊の多くはアレニウス型の劣化・破壊過程であると言われている⁴⁾。また 3. 3 節で述べたように摩耗的なトリー伸展を引き起こす要因は温度によって変化しないことが示唆された。以上のことからこの領域におけるトリー伸展をアレニウス型の劣化・破壊過程と仮定して、総 PD パルス数に対するアレニウスプロットを行った。その結果（印加電圧：10kV）を図 7 に示す。総 PD パルス数と温度の逆数との間には直線的な関係が成立し、この領域におけるトリー伸展過程はアレニウス型であることがわかった。そこで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 E を求めたところ、 $E = 4.7 \text{ kcal/mol}$ であることがわかった。この値は C-C 結合 (=96kcal/mol) や C-H 結合 (=92kcal/mol) 等の化学的な結合エネルギー⁴⁾よりもかなり低く、PD の作用により直接高分子鎖を切断することは困難であると思われる。ところが CH₃ 原子団同士のファンデルワールス力 (=1.78kcal/mol)⁴⁾と言った物理的な結合エネルギーとはほぼ同程度の値を示している。このことからこの領域におけるトリー伸展と物理結合との間には密接な関係があるものと思われる。一般に高分子力学の分野ではファンデルワールス力と言った物理結合が切断されると、この部分を基点として高分子鎖が順次切断され、最終的にミクロボイドの形成に至ると言われており、特に結晶性高分子材料についてはこの過程が起こりやすいと考えられている⁴⁾。この報告を考慮して領域 II におけるトリー伸展について考察すると、PD による衝撃や熱的作用あるいは空間電荷効果を含む PD 先端付近の電界効果等が上述と同様の過程を引き起こし、これによって形成されたミクロボイドが構造的弱点部分として有効に作用したためにトリー伸展が開始したのではないかと考えられる。

さてトリー伸展に対する温度効果についてはどのように考えればよいであろうか。3. 3 節において 40°C 以上では初期・偶発的なトリー伸展特性を示す領域 I が認められなくなることがわかった。上述したように領域 I におけるトリー伸展は PD 点弧の偶発性に大きく左右され、その偶発性に影響を与えるものとして模擬トリー内の空間電荷効果や放電劣化生成気体による気圧上昇を挙げた。最近、パルス静電応力法をはじめとした様々な解析法により、高分子絶縁材料内における空間電荷の挙動と温度の関係が検討されるようになった。その結果、温度の上昇に伴って空間電荷の拡散が起こり易くなると言った報告が大半を占めている⁸⁾。一方、トリー管路内の気圧上昇については温度の上昇と共に放電劣化生成気体がバルク内に拡散し易くなり、トリー管路内の気圧上昇を抑制すると言った報告が一般的

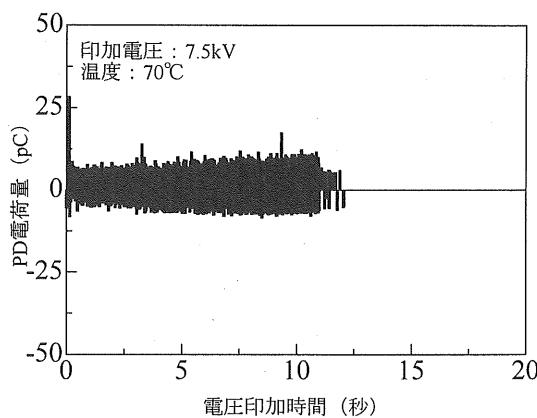


図 8 70°Cにおける PD の点弧状況
Fig.8 Time variation of PD pulse generation in a simulated tree channel at 70°C.

である^{1) 2)}。これらの報告から温度上昇に伴う空間電荷効果の緩和や気圧上昇の抑制が、PD 点弧の偶発性を低下させるのではないかと考えられる。そこで 40°C 以上の場合についてもトリー伸展に至るまでの PD 電荷量の経時変化を測定した。その結果の一例を図 8 に示す。20°C の場合、図 6 に示したように PD 点弧の状況は偶発的であったのに対し、40°C 以上では多少 PD 電荷量の大きさに変動はあるもののほぼ同程度の電荷量を持った PD が、連続的に点弧している状況だけが確認された。つまり 40°C 以上では PD 点弧の偶発性は 20°C の場合と比べてあまり認められないと言うこととなり、これが領域 I を消滅させる原因の一つであると考えることができる。一方、バルク構造に関しては温度上昇による高分子鎖のミクロプラウン運動の活発化が自由体積やミクロボイドと言った構造的弱点部分を分散させ、バルクを均質化するという報告がある⁹⁾。従ってこのようなバルク構造の変化はトリー伸展に起因する微視的弱点部分を模擬トリー先端付近から実効的に減少させるものと思われる。以上の検討から、温度が上昇すると領域 I が認められなくなるのは、空間電荷効果の緩和や気圧上昇の抑制、さらにバルクの均質化に伴う微視的弱点部分の実効的な減少と言った要因が有効に作用したためではないかと考えられる。また温度上昇は劣化過程の促進を引き起こす効果があるのではないかと推測した。これは温度上昇に伴うバルクの機械的強度の低下や電子などそれものが高温で形成されやすいと言ったこと等が原因として考えられる。このように考えると印加電圧の増大と共に形状パラメータ m が $m=1$ に近づく、すなわち真性破壊的なトリー伸展特性に移行すると言った現象や摩耗的振る舞いをする領域 II が低電圧側へシフトしていくと言ったこと、さらに以前報告があったように温度と共にトリーが伸展しやすくなると

言った現象も定性的理解できる。

以上の考察は、実験結果の一応の定性的説明を与えていくものと思われるが、詳細については不明な点も多く一層の検討が必要と思われる。

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トリー伸展要因及びそれに及ぼす温度の影響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 ($n \propto V^{-\alpha}$) 及び総 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印加電圧に対し 2 つの領域に分けることができた。すなわち低電圧側から領域 I (α の値 = 3.41, $m \leq 1$)、領域 II (α の値 = 1.58, $m > 1$) である。領域 I は模擬トリー管路内における PD 点弧や模擬トリー先端部分に存在するミクロボイド等の初期・偶発的要因、領域 II は蓄積的劣化(アレニウス型の劣化)による摩耗的要因が支配的であると考察した。
- 2) 温度を上昇させると領域 II が低電圧側へシフトする傾向を示した。また 40°C 以上では低電圧側で認められた初期・偶発的なトリー伸展特性(領域 I)が認められなくなつたが、高電圧側では真性破壊的なトリー伸展特性へ移行する傾向を示した。

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及び機材を提供して頂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、(1971) 5
- 2) 繩田正人、河村英昭、家田正之：電気学会雑誌、91 (1971) 1358
- 3) 横堀武夫：材料強度学、p74. 技報堂出版 (1955)
- 4) 深堀美英：高分子の力学、p205. 技報堂出版 (2000)
- 5) 家田正之：現代高電圧工学、p148. コロナ社 (1981)
- 6) 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 (2000) 645
- 7) 広瀬英雄：電気学会論文誌 A、116-A (1996) 840
- 8) 会田二三夫、藤田道朝、谷本元：電気学会論文誌 A、117-A (1997) 922
- 9) 山北隆征：電気学会論文誌 A、117-A (1997) 621