

論 文

模擬トリーからのトリー伸展に及ぼすアニール効果 —初期・偶発的なトリー伸展要因の検証—

今井 國治^{*1}

(2002年1月21日受付; 2002年5月19日受理)

Annealing Effect on Tree Propagation from a Simulated Tree Channel

-Examination on Tree Propagation of Early/Random Failure Type-

Kuniharu IMAI^{*1}

(Received January 21, 2002; Accepted May 19, 2002)

I have been investigating tree growth from tip of a simulated tree channel in PP block on the basis of shape-parameter m in Weibull distribution of total number of PD pulses to its initiation. I have suspect that structural weak points around tip of a simulated tree channel play important roles in tree propagation of early/random failure type ($m \leq 1$), especially channel diameter is large. In this paper, influence of bulk structure on tree propagation from a simulated tree channel will be discussed with annealed specimen. Inception voltage and total number of PD pulses required for tree propagation in annealed specimen is higher than that in virgin specimen. They increase with annealing temperature but are regardless of annealing time, which is longer than 1 hour. Furthermore, tree propagation of early/random failure type ($m \leq 1$) disappears in annealed specimen and only that of fatigue failure type ($m > 1$) appears. From results of FT-IR and XRD analyses, it is predicted that these phenomena are caused by recrystallization of amorphous part between lamellas and relaxation of internal stress.

1. はじめに

近年の電力需要の増大に伴う送電線路の超高電圧化は、電力用 CV ケーブルの電気絶縁材料に対する電界値を格段に上昇させ、これまで以上にトリーイング劣化による事故の危険性を高めている。それ故にトリーイング劣化機構を解明することは、安定した電力供給を考える上で、極めて重要である。

トリーイング劣化はトリー発生過程とトリー伸展過程とに大別でき、後者はトリー管路内で部分放電（以後、PD と呼ぶ）を繰り返しながら樹枝状に伸展していく劣化過程であることが知られている¹⁾。そのためトリー管路内で点孤する PD は、トリー伸展に対し重要な役割を果たしているものと考えられている。ところが、トリーの形状は上述したように複数の枝分かれしたトリー管路により構成されているため、PD とトリー伸展との関連を詳細に把握する

ことは非常に困難であり、未だ不明な点が数多く存在している。そこで、トリーのような微細な絶縁細管内で点孤する PD とそこから伸展するトリーとの関係を明らかにすれば、実際のトリー伸展機構を解明する上で重要な情報を与えるのではないかと考えられる。

このような観点から、筆者は高分子材料内に模擬トリーと称する微細な絶縁細管を作成し、そこから伸展するトリーの伸展機構を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 m をもとに検討してきた²⁻³⁾。その結果、

(1) 模擬トリーから伸展するトリーの伸展機構は、印加電圧の大きさによって異なっており、低電圧側では初期・偶発的なトリー伸展機構 ($m \leq 1$)、高電圧側では摩耗的なトリー伸展機構 ($m > 1$) が支配的であることが判明した。

(2) 初期・偶発的なトリー伸展を引き起こす要因は、模擬トリー径の大きさによって異なっていた。すなわち、模擬トリー径が小さいの場合 ($d < 30\mu\text{m}$)、模擬トリー管路内における PD 点孤の偶発性や模擬トリー先端付近に存在する構造的弱点部分（初期的要因）の存在確率（偶発性）と言った初期・偶発的な要因が支配的であるのに対し、模擬トリー径が大きい場合 ($d \geq 30\mu\text{m}$)、初期的要因の存在確率

キーワード: 模擬トリー、アニール効果、構造的弱点部分、再結晶化、応力緩和

*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

¹⁾imai@met.nagoya-u.ac.jp

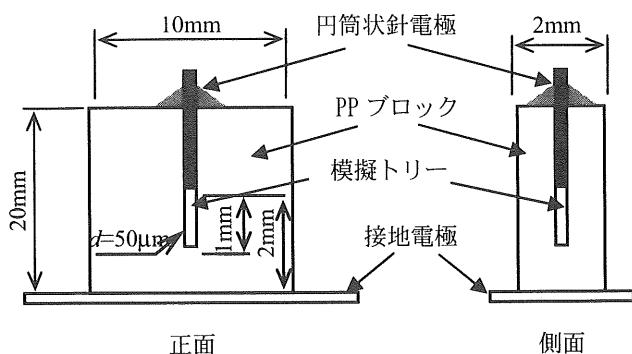


図1 模擬トリー試料の形状
Fig.1 Experimental specimen.

表1 試料のアニール条件

Table 1 Annealing condition of PP specimen.

試料名	アニール温度	アニール時間
試料1	80°C	1時間
試料2	95°C	1時間
試料3	120°C	1時間
試料4	120°C	12時間
試料5	120°C	24時間

*どの試料も恒温槽内において室温まで自然冷却させた。

のみが支配的となるのではないかと推察した。

(3) 摩耗的なトリー伸展は、模擬トリー径の大きさに関係なく、アレニウス型の劣化過程となることが判明した。またトリー伸展に要する活性化工ネルギの大きさからこの型のトリー伸展機構について検討したところ、PDの衝撃やその熱的効果、さらにPD先端付近の電界効果等が高分子鎖間の物理結合を切断し、それに基づいて生成したミクロボイドが構造的弱点部分として有効に作用しているため

にトリー伸展が起こったのではないかと考えた。

これらの結果の中で、(1)、(3)及び(2)のPD点弧の偶発性と言った事項については、これまでの実験結果からある程度の確証は得たものの、模擬トリー先端付近の構造的な初期的要因についての検証は未だ詳細に行っていない。また、高分子材料のバルク構造と実際のトリー伸展との間には、密接な関連があると古くから指摘されており⁴⁾、上述した初期的要因の検討を含めた上で、バルク構造と模擬トリーから伸展するトリーとの関連を検討することは、非常に有益であると思われる。

さて、一般に高分子材料を熱処理（アニール処理）すると、バルク構造（状態）が変化すると言われている。中でもポリプロピレン（以後、PPと呼ぶ）はアニール処理することにより、バルク構造を容易に制御できる高分子材料として古くから知られている。

そこで、本研究では初期・偶発的なトリー伸展機構の解析及び模擬トリーから伸展するトリーとバルク構造との関連を明確にすることを主眼に置いて、筆者は種々の条件でアニール処理したPPブロック内に模擬トリーを作成し、その先端からトリーが伸展するまでの総PDパルス数（以後、単に総PDパルス数と呼ぶ）と印加電圧との関係を求め、ワイブル分布を用いて解析した。さらにアニール処理によるバルク構造（状態）の変化を検討するため、赤外線分光法及びX線回折による構造解析も行った。本論文はこれらの結果をまとめたものであり、模擬トリー先端付近のバルク構造（状態）の変化に伴うトリー伸展特性の変化、つまり模擬トリーからのトリー伸展に及ぼすアニール効果について論じている。

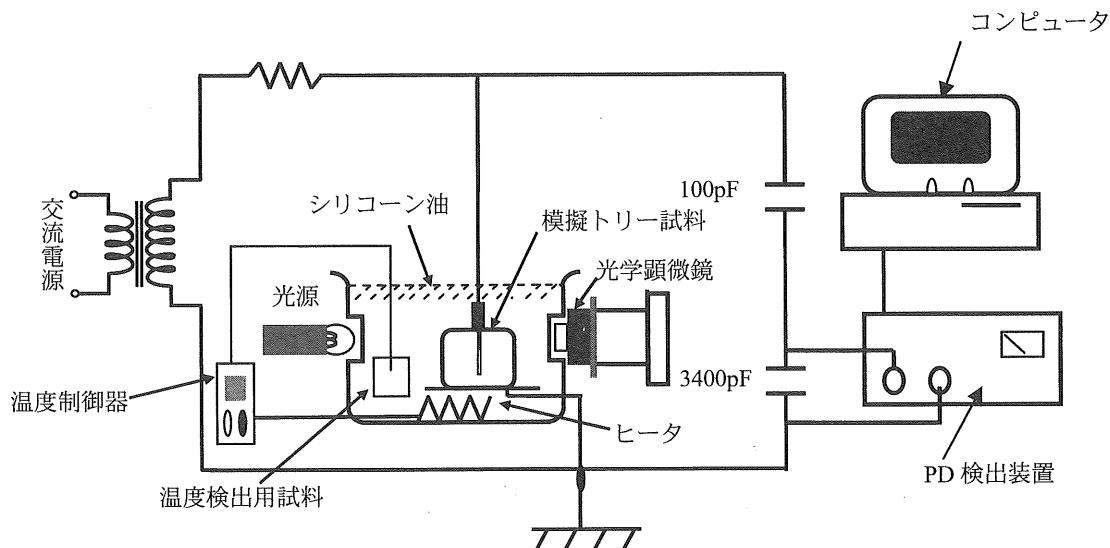


図2 実験装置
Fig. 2 Experimental apparatus.

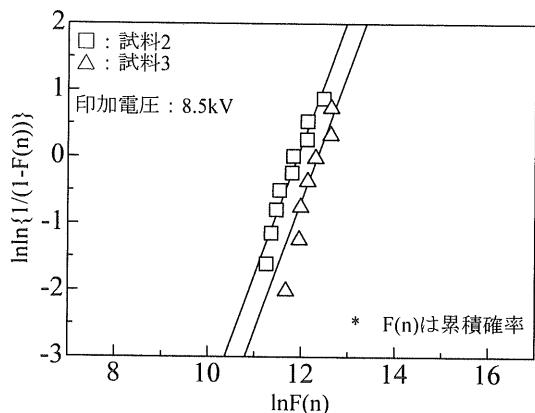


図3 総PDパルス数に対するワイブル分布
Fig.3 Weibull distribution of total number of PD pulse.

2. 実験試料及び実験方法

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。本研究では、既報²⁾で述べた試料作成法に準じて模擬トリー試料を作成した。まず、先端部分が円筒状である直径50μmのタングステン線をPPブロック内に埋め込み、表1に示す条件でアニール処理した(試料1~5)。その後、長さ1mmの円筒状絶縁細管(以後、模擬トリーと呼ぶ)を作成するため、タングステン線を一部引き抜いた。模擬トリー作成の際、タングステン線先端付近のバルク構造を偏光顕微鏡で観察し、トランスクристタル⁵⁾や球晶と言った巨視的な結晶成長が起こっていないことを確認した。模擬トリー作成後、その直下に厚さ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(20×10×2mm)した。電極系としては、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、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ブロックとの間に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、模擬トリー内で点弧するPDのパルス数をPD検出装置により時系列に測定し、トリー伸展に至るまでの総PDパルス数をPD検出装置に接続したコンピュータを用いて算出した。また印加電圧の範囲は本研究においても、既報と同様の方法で定め、トリーの伸展はトリー(長さが10μm以上)が光学顕微鏡で確認された時

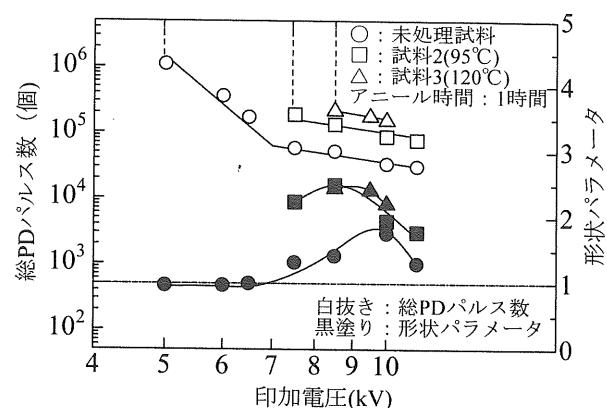


図4 各アニール温度における総PDパルス数及び形状パラメータの電圧依存性
Fig.4 Voltage dependence of total number of PD pulse and its shape-parameter for each annealing temperature.

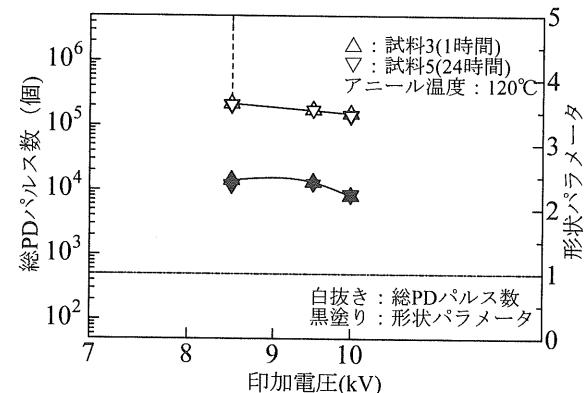


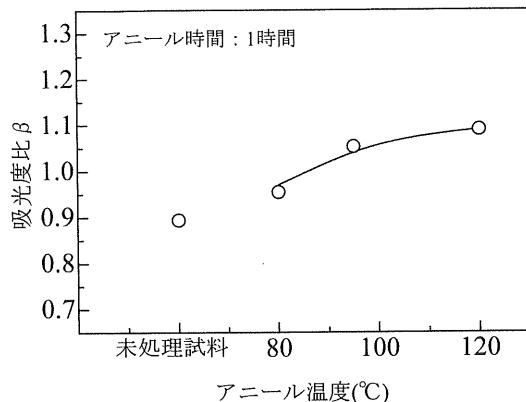
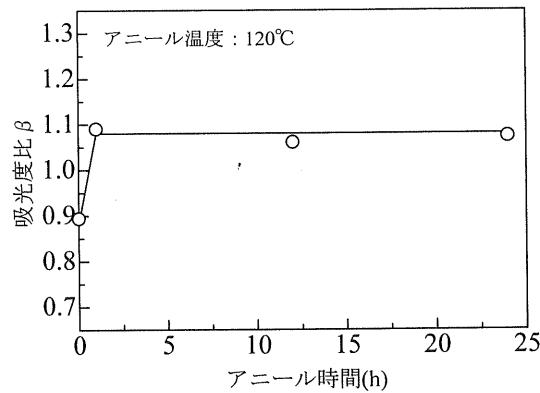
図5 各アニール時間における総PDパルス数及び形状パラメータの電圧依存性
Fig.5 Voltage dependence of total number of PD pulse and its shape-parameter for each annealing time.

点とした。

3. トリー伸展に及ぼすアニール効果

3.1 トリー伸展特性とアニール温度

模擬トリーからのトリー伸展に及ぼすアニール温度の影響を検討するため、既報と同様²⁾、各印加電圧における総PDパルス数を図3に示す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を求めた。その際、各印加電圧に対し、7個の試料を用いて形状パラメータを求めたが、測定値のばらつきが多かった電圧値については、8から15個の試料を用いて評価を行った。図4は試料2及び3における総PDパルス数(累積確率50%値)及び形状パラメータの印加電圧依存性を示したものである。また、トリー伸展に及ぼすアニール効果を明確にするため、アニール処理しなかった試料(以後、未処理試料と呼ぶ)の結果も同図に含めた。模擬トリー管路内におけるPD点弧の開

(a) アニール温度と吸光度比 β との関係(b) アニール時間と吸光度比 β との関係図6 アニール条件と吸光度比 β との関係Fig.6 Relationship between annealing condition and ratio β .

始電圧は、アニール処理の有無に関係なく、2.5kV一定であった。ところがこの図からもわかるように未処理試料で5kV以上、アニール処理した試料では、7kV以上で、模擬トリーからのトリー伸展が確認された。つまり、本研究で得られた結果の限りではトリー伸展が認められる最低印加電圧（以後、トリー伸展開始電圧と呼ぶ）はアニール処理した試料の方が未処理試料のものよりも高く、7kV付近を閾値として、アニール温度の上昇と共に若干増大する傾向を示すことがわかった。また、同一印加電圧下で総PDパルス数を比較してみると、アニール処理した試料の方が、未処理試料のものよりも総PDパルス数が多く、アニール温度の上昇と共に増加する傾向を示した。以上の結果からアニール温度を上昇させると、それに伴ってトリーも伸展し難くなることがわかった。

また、どのアニール温度に対しても、総PDパルス数 n と印加電圧 V との間には直線的な関係 ($n=V^{-\alpha}$ α :ベキ数) が成立したが、未処理試料のように、ある印加電圧で屈曲する直線的な特性は示さなかった。このようなアニール処理の有無に伴う特性の違いは、形状パラメータの印加電圧依存性においても認められ、アニール処理した試料では、どの印加電圧に対しても、形状パラメータの大きさ m が $m > 1$ となった。つまり、アニール温度を変化させた試料では摩耗的なトリー伸展機構だけが支配的となり、未処理試料の低電圧側で認められる初期・偶発的なトリー伸展機構 ($m \leq 1$) に基づくトリー伸展が起こらなくなることがわかった。

3. 2 トリー伸展特性とアニール時間

模擬トリーからのトリー伸展に及ぼすアニール時間の影響を検討するため、前節と同様、アニール時間をパラメ

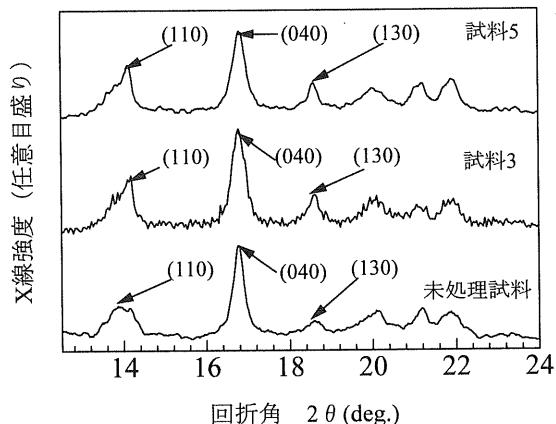
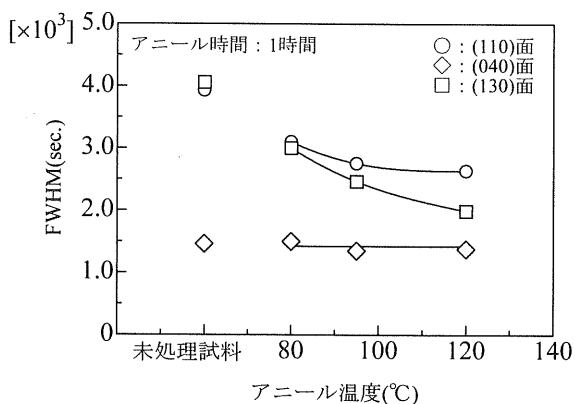


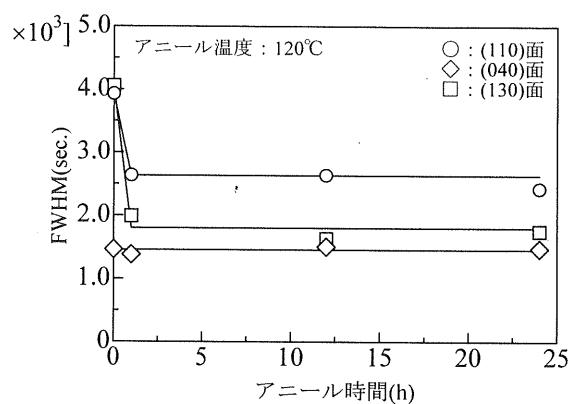
図7 XRDスペクトルパターン
Fig.7 XRD spectra patterns for various annealing condition.

ータとして総PDパルス数及び形状パラメータの印加電圧依存性を求めた。図5に試料3及び5の結果を示す。トリー伸展開始電圧は、未処理試料のものよりも高くなるものの、アニール時間1時間以上では、ほとんど変化が認められなかった。また、同一印加電圧下における総PDパルス数の変化を見ても、未処理試料の総PDパルス数より多くなるものの、アニール時間1時間以上では、総PDパルス数にほとんど変化が認められなかった。以上の結果から、アニール時間を変化させても、模擬トリーからのトリー伸展は起こり難くなるが、本研究で得られた結果の限りでは1時間以上アニール処理を施しても、トリー伸展を抑制する効果にほとんど変化がないことがわかった。

また前節と同様、総PDパルス数の印加電圧依存性に着目してみると、この場合も未処理試料のようにある印加電圧で屈曲する直線的な関係は認められず、さらに形状パラメータの印加電圧依存性に関しても、形状パラメータの大



(a) アニール温度と FWHM との関係



(b) アニール時間と FWHM との関係

図 8 アニール条件と FWHM との関係

Fig.8 Relationship between annealing condition and FWHM.

きさ m が、 $m > 1$ となる結果のみが得られた。このことからアニール時間を変化させた試料を用いても、アニール温度を変化させた試料の場合と同様、摩耗的なトリー伸展機構だけが支配的となり、未処理試料の低電圧側で認められる初期・偶発的なトリー伸展機構に基づくトリー伸展が起こらなくなることがわかった。

4. PP ブロックの構造解析

前節において、PP ブロックにアニール処理を施すと、
 (1) 模擬トリーからのトリー伸展が起こり難くなる。
 (2) 未処理試料の低電圧側で認められる初期・偶発的なトリー伸展機構に基づくトリー伸展が起こらなくなる。と言ったトリー伸展に対するアニール効果が現れることを述べた。これはアニール処理を施すことによって、バルク内部の構造（状態）が変化したことと深く関わっているものと思われる。従って、バルク内部の構造（状態）の変化を把握することは、非常に重要であると考えられる。ところが、現在確立されている物理・化学的手法では、バルク表面近傍の構造解析は行えても、バルク内部の構造（状態）を詳細に解析することはかなり困難である。しかし、バルク表面近傍で起こる構造（状態）の変化は、バルク内部でも起こると考えられるので、バルク表面近傍の解析を行えば、かなりの程度バルク内部の構造（状態）変化を把握できるものと思われる。そこで本研究では、アニール処理によるバルク表面近傍の構造（状態）変化を赤外線分光法（以後、略して FT-IR と呼ぶ）及び X 線回折法（以後、略して XRD と呼ぶ）により解析した。

4. 1 FT-IR による構造解析

通常、FT-IR を用いて PP のバルク表面近傍やフィルムの構造を検討する場合、 974 cm^{-1} 及び 998 cm^{-1} の吸光度が重

要となり、前者は非晶部分を、後者は結晶部分を反映していると言われている⁶⁾。そのため、両者の吸光度比 β (998 cm^{-1} の吸光度 / 974 cm^{-1} の吸光度) は、結晶化度を反映する指標となる⁵⁾。そこで、この吸光度比 β とアニール条件との関係を求めた。その結果を図 6 に示す。アニール処理した PP ブロックの吸光度比 β は、未処理試料のものよりも高くなった。また、同図 (a) に示すように吸光度比 β は、アニール温度の上昇と共にさらに高くなる傾向を示したが、同図 (b) に示すように、アニール時間 1 時間以上では、吸光度比 β にほとんど変化が認められなかった。この結果から、アニール温度を上昇させると、PP のバルク表面近傍の結晶化度は高くなるが、1 時間以上アニール処理を行っても、結晶化度はあまり変化しないものと考えられる。

4. 2 XRD による構造解析

アニール処理により PP のバルク表面近傍の結晶構造（状態）がどのように変化したかを確認するため、XRD による構造解析を行った。図 7 に試料 3, 5 及び未処理試料の XRD スペクトルパターンの一例を示す。アニール処理の有無に関係なく、これらの XRD スペクトルパターンに大きな差異は認められなかった。そこで、これらを標準的なスペクトルパターン⁶⁾と照合したところ、 $2\theta \approx 14^\circ$, 17° , 19° 付近の XRD スペクトルピークは、順に (110), (040), (130) 面と言う結晶面を示しており、XRD スペクトルパターンから三斜晶系、いわゆる γ 変態の構造であることがわかった。

ところで、一般に高分子材料の結晶構造は、金属材料等のように格子点に原子は存在しないと言われている⁷⁾。そのため、高分子材料の結晶構造は、金属材料等の場合と比べて乱れやすく、たとえ、今回のようにアニール処理の有無によらず、結晶構造が同じだったとしても、その結晶状態は異なっている可能性が高いと考えられる。また、結晶

状態の違いは、クリスタリットの厚さ、すなわちラメラ厚として現れ、これは各結晶面を示す XRD スペクトルピークの半値幅の大きさ（以後、単に FWHM と呼ぶ）として反映される⁷⁾。そこで各結晶面の FWHM とアニール条件との関係を求めた。その結果を図 8 に示す。同図 (a) に示すように (040) 面を除く各結晶面の FWHM は、アニール温度の上昇と共に小さくなる傾向を示した。このことからアニール温度の上昇に伴い、バルクの結晶性が改善され、ラメラ厚も全般的に厚くなるものと考えられる。しかし同図 (b) に示すように、アニール時間 1 時間以内では、アニール温度を変化させた場合と類似した変化が FWHM に現れたが、それ以上のアニール時間では、どの結晶面においても変化がほとんど認められなかった。上述したようにバルクの結晶性やラメラ厚は、FWHM の大きさに反映されると言ふことを考慮に入れると、1 時間以上アニール処理を施しても結晶性はあまり改善されず、ラメラ厚もほとんど変化しないものと考えられる。

5. 考察

本節では、アニール処理による模擬トリー先端付近のバルク構造（状態）の変化について検討し、その結果をもとに模擬トリーからのトリー伸展に及ぼすアニール効果について考察する。

図 6 の解析結果から、バルク表面近傍の結晶化度はアニール温度と共に上昇する傾向を示すが、アニール時間 1 時間以上では、ほとんど変化しないと推測した。また図 8 の解析結果から、アニール温度の上昇と共にバルク表面近傍の結晶性は改善され、ラメラ厚も厚くなるが、アニール時間 1 時間以上では、結晶性もラメラ厚もほとんど変化しないと推測した。このようにアニール処理を施すことにより、バルク構造（状態）に変化が生じるのは、ラメラ間非晶質の再結晶化や高分子鎖の再配列が起こるからである⁸⁾。また前節で述べたようにバルク表面近傍で起こる構造（状態）の変化はバルク内部、強いては模擬トリー先端付近でも起こっているものと考えられる。以上のことから、アニール温度を上昇させると、それに応じた非晶部分の再結晶化や高分子鎖の再配列が模擬トリー先端付近で起こり、それに伴って結晶化度も上昇し、ラメラ厚も増大するものと思われる。しかし、今回の実験結果からは 1 時間以上アニール処理を施しても、PP のバルク構造（状態）にはあまり変化をもたらさないものと考えられる。

では、以上の考察を考慮した上で、模擬トリーから伸展するトリーのアニール効果について検討する。図 4 及び 5において、トリー伸展開始電圧および総 PD パルス数は、アニール温度の上昇と共に増大し、アニール時間 1 時間以

上ではほとんど変化しなくなることがわかった。一般に非晶部分には、自由体積やミクロボイドと言った構造的弱点部分が多く存在するため、トリーは非晶部分を選択的に伸展すると言われている⁸⁾。従って、模擬トリーからのトリー伸展の起こり難さは、模擬トリー先端付近に占める非晶部分の割合と相関関係にあるものと考えられる。また上述したように、模擬トリー先端付近に存在する非晶部分の再結晶化の度合いはアニール条件により異なってくる。そのため、そこに存在する非晶部分の割合も、アニール条件に応じて変化すると考えれば、これに呼応するようにトリー伸展特性が変化したことも定性的に理解できよう。ところで、このような現象は針電極先端から発生するトリーにおいても認められ、トリー発生はアニール処理を施すことにより起こり難くなると言う報告が大半を占めている。これらの報告によれば、トリー発生が起こり難くなるのは、バルク内部の応力緩和が起こるためであると考察されている⁹⁻¹⁰⁾。従って現象自体は、若干異なっているものの、この要因を全く無視することはできず、逆にバルク内部の応力緩和によってトリー伸展が起こり難くなる可能性は充分にあるものと考えられる。以上の検討から、トリー伸展開始電圧や総 PD パルス数がアニール条件に呼応するように変化したのは、模擬トリー先端付近に占める非晶部分の割合、さらに、その部分における応力緩和の仕方に起因しているためではないかと考えられる。

次に、アニール処理を施すことにより、トリー伸展開始電圧に閾値(7kV 附近)が存在することや初期・偶発的なトリー伸展機構に基づくトリー伸展が低電圧側で認められなくなるのはどのように考えればよいだろうか。これは未処理試料の低電圧側における模擬トリーからのトリー伸展機構を検討する上で非常に興味深い現象であると思われる。筆者は既報において、模擬トリー先端付近に存在する構造的弱点部分（初期的要因）の存在確率（偶発的要因）が、低電圧側で生じるトリー伸展を大きく左右するのではないかと考察した²⁾。特に模擬トリー径が大きい場合 ($d \geq 30\mu\text{m}$)、この要因のみが支配的になるのではないかとも考察した。上述したように非晶部分には、多くの構造的弱点部分が存在するため、アニール処理による非晶部分の再結晶化や高分子鎖の再配列は、そこに存在する構造的弱点部分の減少をもたらすものと考えられる。換言すれば、これは模擬トリー先端付近に存在する構造的弱点部分の存在確率を低下させることになる。従って、アニール処理を施すことにより、初期・偶発的なトリー伸展が低電圧側で認められなくなるのは、非晶部分の再結晶化及び高分子鎖の再配列に伴い、模擬トリー先端付近における初期的要因の存在確率が顕著に低下したため、もはや初期・偶発的なトリー伸展を

引き起こすのに必要な初期的要因がなくなったからではないかと考えられる。さらに、この考察を考慮することで、アニール処理した試料にはトリー伸展開始電圧に対し閾値が存在し、その値が7kV付近であるという事実もうまく説明できる。つまり、図4からもわかるように印加電圧7kVまでが未処理試料における初期・偶発的なトリー伸展が支配的となる電圧範囲であり、アニール処理により、上述した理由で初期・偶発的なトリー伸展が起こらなくなつたためと考えれば、摩耗的なトリー伸展が支配的となり始める7kV付近にトリー伸展開始電圧の閾値が存在しても無理なく理解できる。最後に以上の現象は低電圧側における初期・偶発的なトリー伸展が、模擬トリー先端付近における初期的要因の偶発性に起因すると言う筆者の考察を支持する一例となつたのではないかとも考えられる。

以上の考察は、実験結果を一応の定性的説明を与えてるものと思われるが、本研究の結果だけでこれ以上の考察には問題があり、今後の分析技術の高度化による詳細な検討に期待したい。

6.まとめ

本研究ではPPブロック内における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、これをワイル分布を用いて解析し、トリー伸展に及ぼすアニール効果について検討を行つた。その結果を以下に要約する。

1. アニール温度の上昇と共にトリー伸展開始電圧および総PDパルス数は増大したが、アニール時間1時間以上ではその効果がほとんどないことがわかつた。これはアニール処理による非晶部分の再結晶化や高分子鎖の再配列、さらにバルク内部の応力緩和が深く関与しているのではないかと考察した。
2. アニール処理を施すことにより未処理試料の低電圧側で認められる初期・偶発的なトリー伸展機構に基づくトリー伸展が起こらなくなることがわかつた。これはアニール処理に伴う非晶部分の再結晶化や高分子鎖の再配列が構造的弱点部分（初期的要因）を減少させたことに

起因すると考察した。そして、低電圧側で認められる初期・偶発的なトリー伸展を起こす要因は模擬トリー先端部分に存在する初期的要因の存在確率（偶発性）に起因すると言ふこれまでの筆者の考察を裏付ける結果となつたのではないかと示唆した。

最後に本研究は名城大学理工学部電気電子工学科電気材料物性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。また実験試料を提供して頂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, **100** (1971) 5
- 2) 今井國治：静電気学会誌, **25** (2001) 271
- 3) 今井國治：静電気学会誌, **26** (2002) 84
- 4) 絶縁材料トリーイング専門委員会：電気学会技術報告第854号(2002)1
- 5) 日本化学会編：複合材料, p.156, 学会出版センター(1975)
- 6) 高木謙行, 佐々木平三：ポリプロピレン樹脂, p.45. 日刊工業新聞社 (1967)
- 7) 村橋俊介, 藤田 博, 小高忠男, 蒲池寛治：高分子化学, p.232, 共立出版 (1966)
- 8) 石田政義, 岡本達希：電気学会論文誌A, **112-A**(1992) 922
- 9) 徐 建飛, 柳原昌輝, 吉村 昇：電気学会論文誌A, **116-A**(1997)351
- 10) 山北隆征：電気学会論文誌A, **117-A**(1997) 621