UDC 621.315.616.96.015.533: 621.3.018.756
537.523.2.096

論文

48-A 53

広い温度範囲においてトリーの性状に 及ぼす印加電圧波形の影響

明治大学 工藤 勝利

明治大学 山口 宗五郎

1. ま え が き

近年、高分子材料の進歩に伴い、ポリエチレンをはじめとして有機材料が電気絶縁体として多方面に使用されている。有機絶縁体はすぐれた電氣的性質を持っているにもかかわらず、不平等電界のもとでは容易に部分破壊が引き起こされる場合があり、最終的には貫通破壊に至る。

部分破壊である“トリー”あるいは“トリーイング”は単に実用上の問題ばかりではなく、広く絶縁体の破壊機構の面からも興味ある問題を含んでいる。1951年 Mason 氏は気中放電の集中により放電孔を形成し、その先端からトリーが伸びる可能性を指摘した。⁽¹⁾ その後、Kitchin 氏らが高電圧用ポリエチレンケーブルにおいてトリーの発生を確認したのが端緒となり、⁽²⁾ 絶縁破壊の前駆現象としてのトリーが注目を集めるようになった。トリー性状は多くの人々により種々の観点から調査、研究がなされ、その機構についてはある程度解明されてはいるが、種々不明な点も多い。特に温度に伴う絶縁体の物理的性質の変化に対応して、いかにトリーの発生、進展機構が変化するかを知ることは重要な問題である。しかしながら、この分野における実験的資料は十分ではない。⁽³⁾ 筆者らは広範囲に温度を変化させ、交流電圧を印加した際のトリー性状についてはいままでに発表してきた。⁽⁴⁾

今回、これに引き続き交流半波、インパルス電圧を

印加した場合のトリー性状の温度依存性を調査したところ、非常に興味ある結果が得られた。すなわち、温度、電圧波形および極性などにより、トリーの発生、進展がかなり異なった挙動を示すことが判明した。

本報告は主にトリー性状の温度依存性についての実験結果であり、それについての定性的な考察を行なった。

2. 試料および実験方法

〈2・1〉 供試料 供試料としてはメルトインデックス (MI) 1.26 の低密度ポリエチレン (以下 PE と略称)、ポリメチルメタアクリレート (以下 PMMA と略称) の2種類を用い、寸法は5~10×12×25mm のブロックである。第1図は試料の形状である。針電極は No. 2 のメリケン針 (約 1mmφ、長さ約 37mm) であり、針先端の角度が 30°、曲率半径約 5μm になるように回転研磨機で研磨してある。試料は針電極そう入固定ジグに取り付けられ、恒温そう内で加熱 (PE

第1図 試料の概形

Fig. 1. Schematic diagram of a specimen.

The Effect of Wave Form of Applied Voltage on the Tree Characteristics Over a Wide Temperature Range. By K. KUDO, Member (Graduate School of Meiji University) & S. YAMAGUCHI, Member (Faculty of Engineering, Meiji University). 工藤勝利: 正員, 明治大学大学院博士課程 (現在, 東京工業大学電気工学科助手)

山口宗五郎: 正員, 明治大学工学部教授

は 100℃, PMMA は 160℃ でそれぞれ 30 分間)して針電極をそう入し, そのままの状態常温まで徐冷してある。また, 針の付け根はエポキシ樹脂系接着剤で固めてある。また, 平板電極に接する試料面はすべて銀ペイントを塗付した。一方, 針電極から平板電極までのギャップの長さは 10 (± 0.5) mm とした。

〈2・2〉 実験方法 第2図に実験装置の概要を示す。電極系は針対平板直接接地方式であり, 針電極側に高圧を印加した。使用した交流半波電圧は交流 50 Hz を半波整流したものであり, インパルス電圧は標準波 ($1 \times 40 \mu\text{s}$) を用いた。常温での実験はモリブデンガラス容器にシリコン油を満し, その中に試料を浸せきして行なった。温度制御する場合は, モリブデンガラス容器の周囲を高温潤滑油 (高温用), 氷 (0℃), 氷+ NH_4Cl + NaNO_3 (-20℃ 付近), ドライアイス+エチルアルコール (-60℃ 付近) などそれぞれ充てんしたが, しかしいずれの温度の場合でも, 試料自体はシリコン油中に直接浸せきされている。ただし, 液体窒素の温度にする際は断熱被覆を施したポリエチレン容器に液体窒素を満し, その中に試料を直接浸せきした。いずれの場合も温度を規定値に保った後, 試料を全面浸せきし, 10 分間経過してから電圧を印加した。なお, トリーの観察は最大倍率 120 倍の顕微鏡で行ない, 針の中心軸方向に 20 μm 程度まで伸びたものをトリーの発生とした。

〈2・3〉 特性電圧の測定 50% トリー発生電圧, すなわち特性電圧を求める場合はあらかじめトリーの発生する電圧の見当をつけておき, その付近の電圧を選んで交流半波電圧の際は 10 分間課電, 15 分間休止, 1 kV 段階昇圧で決定する。またインパルス電圧に関しては, 3 発印加し, 15 分間休止, 3 kV の段階昇圧で行なった。交流半波およびインパルス電圧とも各温度で 10 個の試料を用いた。

第2図 実験装置の概図

Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

3. 実験結果とその考察

〈3・1〉 特性電圧の温度依存性 第3図および第4図はそれぞれ PE, PMMA についての特性電圧の変化を示したものである。比較のために, 前回⁽⁴⁾に報告した交流電圧印加の際の特性電圧を波高値で示した。一般的傾向としては低温になるにつれて, トリー発生電圧のばらつきが大きくなる。特に液体窒素温度における PE 試料の負極性のトリー発生電圧は極度に高く, しかもそのトリーは非常に進展しにくい。したがって, その特性電圧を決定する場合, かなりの誤差を生ずる可能性がある。

PE と PMMA では特性電圧の温度依存性はかなり相違が認められ, PE は著しく温度に依存しており, 特に負極性は温度とともに直線的に減少していること

第3図 PE の特性電圧と温度依存性

Fig. 3. Temperature dependence of characteristic voltage in PE.

第4図 PMMA の特性電圧の温度依存性

Fig. 4. Temperature dependence of characteristic voltage in PMMA.

が注目される。これらの結果から特性電圧の一般的な傾向を列挙してみると、

(i) インパルス値では極性差がはっきりしているが、交流半波値では比較的少ない。

(ii) 交流半波値は交流値と同じ傾向であり、PE の場合は $-60^{\circ}\sim 0^{\circ}\text{C}$ で、PMMA の場合は $20^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{C}$ の温度領域でそれぞれ急激に変化している。インパルスではかかる温度領域で異なる特性を示している。

(iii) 高温領域では正負インパルス値がともに交流半波値よりも高い値を示しているが、低温領域においては正のインパルス値と交流半波値の関係が逆転している。この逆転する温度領域は PE の場合は -40°C 付近にあり、PMMA では常温付近にある。

PE のインパルス値は高温になると極性差が小さくなる傾向にある。

交流半波値では低温領域においてわずかに極性差がみられ、高温領域ではほとんど差異を示さない。また Dittmer 氏は常温で一発の交流半波電圧の場合、負極性のほうがかなり高い電圧でトリートが発生することを指摘している。⁽⁵⁾ この結果をあわせ考えると、短時間課電では極性差を生ずるが、課電時間が長くなるにつれて極性差はなくなるものと思われる。この原因について詳細はわからないが、筆者らは次のように考えている。すなわち、交流半波電圧がくり返し印加されるうちに、正および負電極の針端周辺に空間電荷が形成されるが、この場合に課電時間が相当長いために、両者の針端の電界がほぼ等しくなるものと推察される。低温領域では空間電荷形成の遅速によりいくぶん極性差が認められるようである。

PE は交流半波値、交流値ともガラス転移点に相当すると思われる -60°C 付近から減少しはじめるが、PMMA ではガラス転移温度よりもかなり低い 40°C 付近から低下しはじめる。PMMA の 40°C 付近における変化については、筆者らはこれを吸着水分の影響であるとの推定をくだした。⁽⁴⁾ フィルム状試料の絶縁破壊に関しても 40°C 付近から絶縁強度が急激に低下してゆくことが認められている。⁽⁶⁾ Artbauer 氏はこの現象を分子の緩和現象と自由体積とに関連して説明している。⁽⁷⁾ この場合、インパルス値が交流値、交流半波値の急激に変化する温度領域で、それほど急激には変化していない事実は時間に関係することが大なることを思わせる。

課電時間は空間電荷形成に関連する。しかしながらインパルス値に著しい極性のあることから空間電荷だけでは説明できないものがあり、新しい機構を考える必要があると思われる。また高温領域においては、課

電時間が長い波形ほど特性電圧が低下している事実から、針端付近における熱効果が大になる可能性も考えられる。

〈3・2〉 インパルス電圧によるトリートの進展 第5図、第6図はそれぞれインパルス電圧による PE、PMMA のトリートの伸びを示す。この場合の印加方法は正負両極性とも 75kV を1発印加した。用いた試料は各温度とも5個である。

トリートの伸びについても発生の場合と同じように極性効果がみられ、一般に正極性のほうが進展しやすい傾向を示している。正極性においてはガラス転移温度以上になると顕著なトリート進展がみられるが、負極性の場合はそれほど変化がみられないようである。PE の正極性においては 60°C 付近から高温領域において

第5図 インパルス電圧による PE のトリートの伸びと温度の関係

Fig. 5. Relation between the growth of tree and temperature by a single impulse voltage (PE).

第6図 インパルス電圧による PMMA のトリートの伸びと温度の関係

Fig. 6. Relation between the growth of tree and temperature by a single impulse voltage (PMMA).

(a) 75 kV, 正極性, 19°C
(b) 75 kV, 正極性, 80°C
(c) 75 kV, 負極性, 80°C

第 7 図 インパルス電圧による PE 中のトリーの伸び

Fig. 7. The shape of tree in PE by a single impulse voltage.

(a) 75 kV, 正極性, 30°C
(b) 75 kV, 正極性, 120°C
(c) 75 kV, 負極性, 120°C

第 8 図 インパルス電圧による PMMA 中のトリーの伸び

Fig. 8. The shape of tree in PMMA by a single impulse voltage.

伸びが著しく減少しはじめるのに反し、負極性ではかなりの進展がみられ、100°C 付近になると両極性による差異はほとんど認められなくなる。高温領域において正極性のトリーが進展しにくくなるのに反し、負極性が進展しやすくなっている原因について詳細はわからないが、たとえば結晶性の変化に伴う構造上の問題が考えられよう。PE の結晶化度は 60°C 付近から減少しはじめるとの結果が得られており、⁽⁸⁾ トリーの伸びぐあいと結晶化度がきわめて類似した温度特性を示している事実から相関性がうかがわれる。しかし、この伸びの異常性についてはさらに検討を要するものと思われる。なお、第 7 図、第 8 図にインパルス一発によるトリーの伸びの様子の一部を示す。なお、トリーの伸びは針中心軸方向の伸びとして測定してあるが、PE の場合第 7 図にみられるように 80°C の正極性では中心軸方向の伸びに比べて横方向の伸びが相対的に大きくなる傾向がある。

これらの結果から明らかなように、インパルス電圧を印加した場合のトリー進展はかなり特異な挙動を示しており、この進展機構をさらに詳細に調べるために段階昇圧方式で実験を行なった。段階昇圧はただ一発の場合よりも材料物性との相関性が大きくあらわれることも考えられるので、このような観点から段階昇圧方式を用いた。

第 9 図は PE 試料を用い、それぞれ -20°C 付近、常温、60°C および 80°C におけるトリーの伸びについて示してある。この場合、初期電圧 30 kV、10 kV/1 発の段階昇圧で行なった。用いた試料は各温度とも 5 個である。段階昇圧におけるトリーの伸びは前述のインパルス 1 発の場合と同じような伸びの特性を示しており、やはり 80°C におけるトリーは 60°C に比べて進展しにくい傾向がみられる。一般に正極性の場合はある電圧以上になると急激にトリーが進展することがわかる。一方、負極性においては正極性に比べてきわめて進展しにくい傾向ではあるが、高温になるに従いトリーは進展しやすくなり、80°C の場合は正負両極性によるトリーの伸びの差異は少なくなる。このように高温領域において、正極性は進展しにくいのに対して、逆に負極性では進展しやすい傾向を示している事実はトリー進展機構を考察するうえで重要な結果と思われる。

第 10 図は PMMA 試料を用い、常温および 80°C におけるトリーの進展を示す。常温と 80°C の伸びを比較してみると、温度による影響はそれほどみられず、80°C までは伸びの傾向としてはあまり変化しないようである。ただし、前述のインパルス 1 発による

第 9 図 インパルス電圧(段階昇圧)による PE のトリ-の伸び

Fig. 9. The growth of tree in PE by step-rise impulse voltage.

結果からすると、段階昇圧方式の場合も 90°C 付近から急激にトリ-が進展することが推察される。

以上の結果からすると、段階昇圧の場合もインパルス 1 発による場合と同様な傾向を示しており、材料物性との相関性も大差がなくあらわれる。このことから段階昇圧の場合のヒステリシス効果などがトリ-進展にそれほど影響を及ぼしていないことがわかる。

〈3.3〉 交流半波電圧によるトリ-の進展 交流電圧は交互に極性を変えながら連続的に印加されている状態であり、したがってそのトリ-進展機構はかなり複雑になっていることが考えられる。その点、交流半波電圧は単極性であり、かつ間欠的印加の状態であるために、交流電圧印加の際のトリ-進展機構とかなり異なる特性を与えることが考えられる。

第 10 図 インパルス電圧(段階昇圧)による PMMA のトリ-の伸び

Fig. 10. The growth of tree in PMMA by step-rise impulse voltage.

第 11 図 交流半波電圧(段階昇圧)による PE 中のトリ-の伸び

Fig. 11. The growth of tree in PE by step-rise half wave rectified voltage of AC.

本実験は段階昇圧方式であり、初期電圧 8kV、課電時間 10 分、休止 15 分、2kV 段階昇圧で行なった。実験は各温度で 5 個の試料について行ない、その平均値を用いた。なお、比較のために交流電圧値も示した。

第 11 図は PE 試料を用い、それぞれ -20°C 付近、常温、60°C におけるトリ-の伸びを示してある。なお、80°C におけるトリ-の伸びは 60°C に比べてかなり進展しやすく、ほとんどの試料が途中で側面破壊をしたために本文中にはその実験結果を記載していな

第 12 図 交流半波電圧(段階昇圧)による PMMA 中のトリーの伸び

Fig. 12. The growth of tree in PMMA by step-rise half wave rectified voltage of AC.

い。また、第 12 図は PMMA 試料の伸びであり、常温、80°C について示してある。交流半波電圧の場合は交流電圧と比べてトリー発生電圧は高く、低電圧では進展が緩慢であるが、電圧が高くなるにつれて進展しやすい傾向である。また、正の交流半波電圧は負の場合よりも進展しやすいことも特徴である。交流電圧に比較して交流半波電圧によるトリーが進展しやすい原因の一つとしてはトリー内部の気圧の低下が考えられる。交流半波電圧においては電圧印加と休止が交互になるために発生ガスの漏れ、拡散が容易になり、交流電圧の場合に比べて気圧が低下し、放電がうながされ、その結果トリーは進展しやすくなるものと思われる。また、交流と交流半波電圧とのトリーの伸びを比較してみると、相対的に温度が上昇するほど交流と交流半波との伸びの差がなくなる傾向を示している。高い温度では分解ガスの圧力およびトリー先端部の熱効果などの複雑な機構の組合せにより、交流と交流半波との伸びにあまり差があらわれないものと思われる。

ところで、トリー進展はその形状と密接に関係しており、一般にはトリー状トリーで進展してゆく場合はかなり急速であるが、ブッシュ状あるいはクラック状トリーに近い形状の場合は緩慢に進展してゆくことがわかる。PMMA の交流半波電圧によるトリーの様子の一部を第 13 図、第 14 図にそれぞれ示す。PMMA では 80°C よりも常温のほうが高電圧側で進展しやすくなっており、そのトリー形状にもかなりの相違が認められ、常温の場合はトリー状トリーであるが、80°C になるとブッシュ状に近いトリー形状となっている。

第 13 図 交流と交流半波電圧による PMMA 中のトリーの形状 (21°C)

Fig. 13. The shape of trees in PMMA by the difference of AC and its rectified voltages. (21°C)

第 14 図 交流と交流半波電圧による PMMA 中のトリーの形状 (80°C)

Fig. 14. The shape of trees in PMMA by the difference of AC and its rectified voltages (80°C).

4. む す び

筆者らは、PE と PMMA 試料を用いてトリーの発生、進展機構を考察したが、液体窒素温度から 120°C 付近までの温度範囲では材料の種類、温度、電圧波形などにより著しく相違していることがわかった。その結果を要約すると次のようである。

(1) トリーの発生 単極性 (インパルス、交流半波電圧) では極性効果がみられ、インパルスの場合には著しい極性差が認められ、特に低温領域では極性効果が重要と思われる。交流と交流半波電圧のような課電時間の相当長い場合には、材料自身の挙動、たとえば分子運動に対応してトリー発生電圧は変化するようであるが、インパルス電圧のように短時間課電ではこの関係は緊密でないようである。さらに高温領域にお

いては、課電時間が長い波形ほどトリーは発生しやすくなっており、熱効果が支配的となる可能性も考えられる。

(2) トリーの進展 単極性のトリー進展についても極性効果がみられ、正極性のほうが一般に進展しやすい。PE において正極性のインパルス電圧を印加した場合はガラス転移温度および 60°C 付近において著しい伸びの差異が認められる。PMMA の正極性インパルス電圧においてもやはりガラス転移温度付近で著しい伸びがみられる。また、交流半波電圧は交流に比べて印加電圧が高くなるにつれて進展しやすい傾向であるが、これらの相違は分解ガスなどの影響が重要な役割を果たしているものと考えられる。

以上のように、温度および電圧波形がトリー性状に及ぼす影響を調べ、上記の定性的な結果を得るにいった。しかしながら、なお多くの問題を残しており、今後さらに検討していく予定である。

終わりに、本研究に対して終始、ご指導、ごべんたつを賜わった青山学院大学教授 斎藤幸男博士、本学教授 田中庄蔵博士に感謝の意を表します。また、実験に協力していただいた本学大学院生 日向野栄氏、試料を提供していただいた昭和電線電纜株式会社にお礼申し上げます。

(昭和 47 年 7 月 29 日受付, 同 48 年 5 月 19 日再受付)

文 献

- (1) J. H. Mason: Proc. Instn. Elect. Engrs **98**, 1, 44 (1951)
- (2) D. W. Kitchin & O. S. Pratt: Trans. Amer. Inst. Elect. Engrs **77**, III, 180 (1958)
- (3) たとえば、光井・鳥山: 電学誌 **87**, 2436 (昭 43-10)
- (4) たとえば、工藤・山口・斎藤: 電気学会論文誌 **92-A**, 159 (昭 47-4)
- (5) B. Dittmer: Arch. Electrotech. **III**, Heft 6, 387 (1964)
- (6) W. G. Oakes: J. Inst. Elect. Engrs **96**, 1, 37 (1949)
- (7) J. Artbauer: たとえば、J. Polymer Sci. **16**, 477 (1967)
- (8) W. G. Oakes: J. Inst. Elect. Engrs **95**, I, 36 (1948)