ナノ秒パルスの繰り返し印加によりエポキシ樹脂中を進展するトリーからの圧力波測定

正員 門 脇 一 則 (愛媛大学)
 非会員 西 本 栄 (愛媛大学)
 正員 木 谷 勇 (愛媛大学)

Measurement of Pressure Wave Due to Impulse Tree in Epoxy Block Subjected to Successive Nanosecond Pulses

Kazunori Kadowaki, Member, Sakae Nishimoto, Non-member
 and Isamu Kitani, Member (Ehime University)

Pressure signal and discharge light from tree channel were simultaneously observed when 50kV pulses (50ns in width) were repeatedly applied to an epoxy block with point-plane electrodes. The positions of pressure sources were measured from the propagation time of pressure wave from the source to an AE sensor which was located on the back of the plane electrode. The tree length estimated from the pressure signal was in good agreement with the length estimated from the discharge light. The height of the pressure signal due to the induced charge on the plane electrode tended to increase with increasing the number of the voltage application for both polarities. The pressure signal due to the volume expansion of the tree became larger by the successive voltage application in the negative point, while it became smaller in the positive point. The difference between the polarities could be explained by the effect of the residual charge near the point electrode.

キーワード：圧力波，高電圧ナノ秒パルス，エポキシ樹脂，極性効果，残留電荷

1. まえがき

固体絶縁物の劣化を引き起こす大きな要因であるトリーに関する研究は実用上非常に重要である⁽¹⁾。トリーが成長する時、トリー管の急激な弾性変形により圧力波が生ずることはよく知られている。この圧力波を測定する方法、いわゆる音響的方法の利点としては、圧力波の伝搬速度が電氣的信号よりも桁違いに遅いことから、高い精度で音源の位置検出ができる点や、測定系が高電圧回路と電氣的に絶縁されているので破壊の実験に適している点などが挙げられる。HowellとNortonは、変圧器中における部分放電劣化の位置検出を、圧力波の伝搬時間から推定する手法を確立した⁽²⁾。最近では、電力用高圧ケーブルの接続部界面での部分放電の位置検出に対し、同様の試みがなされた⁽³⁾。このように、位置検出としての音響的方法は多くなされているものの、トリーの進展機構を、音響的方法で調べた例は比較的少ない。吉村らは、ポリエチレンにおける交流トリーからの圧力波の大きさと、部分放電電荷量との間に良い相関のあることを報告した⁽⁴⁾。藤田らは、同様の関係をポリエステル樹脂を用いて観測した⁽⁵⁾。香川らは、交流トリー

の圧力波の信号波形がimpulse型和burst型に分類されることを示した⁽⁶⁾。これらの実験においては、検出感度の向上を第一として、 10^5 Hzの帯域に検出感度のピークを有する共振型センサーが用いられた。

最近我々は、 10^8 Hz領域の圧力波を検出できる非共振型センサーを平板電極の背後に設置して、エポキシ樹脂中の針電極にナノ秒パルス電圧を印加した時の圧力波を測定した。圧力波信号には、トリーの圧力波だけでなく、平板上に誘導された電極電荷の圧力波も含まれていた。トリーの成長に伴い、電極電荷の圧力波が検出されてからトリー先端部の圧力波が検出されるまでの遅れ時間は縮小するので、信号波形からトリー長が推定できるとの報告をした⁽⁷⁾。

今回我々は、圧力波の測定と放電光の撮影を同時に行える実験装置を製作し、エポキシ樹脂中の針電極に高電圧ナノ秒パルスを繰り返し印加した場合におけるトリー進展の極性効果を調べた。本報は、繰り返し印加における圧力波信号と放電光とを同時に観測することにより、両者の間に良い相関のあることを示すと共に、信号波形から求められたトリーの体積変化に関係する量と電極電荷量を用いて、トリー進展の極性効果に関する考察を記したものである。

2. 実験方法

図1に試料および実験装置の外観を示す。試料の製法は前報⁽⁷⁾と同じで、ビスフェノールA型エポキシ樹脂(CIBA-GEIGY: ARALDITE-CT200)と、脂環式酸無水物(CIBA-GEIGY: HADNER HT903)との混合により硬化された樹脂ブロック(15×15×30mm³)を用いた。試料の底面は、アルミ平板電極と密着し、針電極側は、高電圧ナノ秒パルス発生器の出力端である同軸ケーブルと連結している。パルス発生器からは、立ち上がり10nsで幅50nsの単一パルスが出力される。印加により生じた圧力波は、アルミ平板電極背面の圧電素子(呉羽化学工業(株): KF-ピエゾフィルム、厚さ30μm)で電気信号に変換され、広帯域アンプ(MITEQ: AU-1332, 0.01-500MHz, 45dB)を通じてデジタルオシロスコープ(Tektronix: TDS520B)で検出された。ASA3200の高感度フィルムを増感現象することにより、放電光の静止写真を得た。実験は以下の項目について行われた。

(1) 圧力波と放電光の同時観測

ギャップ長5.0mmの針対平板電極構成下で、波高値50kVのパルスを印加した時に生じたトリートの放電光と圧力波信号を観測した。試料が絶縁破壊に至るまで、約20秒の間隔で印加を繰り返しながら、放電光の形状と圧力波の信号波形が変化する様子を比較した。針電極には、電解研磨により約1μmの曲率半径に調整された木綿針を用いた。

(2) 平等電界下での圧力波測定

平行平板電極構成の試料に比較的低いパルスを印加すれば、両電極の表面に形成された電極電荷からの圧力波のみを検出できる。この時の信号と、トリートが生じた時の信号との比較をおこなった。針電極の代わりに直径8mmの近似ログウスキー型上部平板電極が樹脂中に埋め込まれた試料に対して、高電圧ナノ秒パルスを印加した。ギャップ長は、1.0mm, 2.5mm, 5.0mmの3種類とした。

図1 実験装置

Fig. 1. Experimental arrangements.

3. 実験結果

<3・1> 圧力波と放電光の同時観測 正針、負針の両方において、各3回の実験をおこなった。破壊に至るまで継続された繰り返しの印加回数の平均値は、負針で50回、正針で27回となり、両者の間で差が認められた。

図2は、負針における1回目から10回目までの印加毎に撮影された放電光の静止写真である。なお、この時の実験では62回目の印加で試料が絶縁破壊した。最初の印加において針先端傍に生じた微小な放電光が、繰り返し数の増加に伴い平板電極方向へ伸びているのがわかる。

図3は、図2の放電光の撮影と同時に検出された圧力波信号である。図の縦軸は信号電圧であり、横軸は高電圧ナノ秒パルスの印加開始時からの経過時間である。初回の印加において、2.5μsと4.5μsの時点で圧力波が検出された。この検出時間から、以下に説明する理由により圧力波の発生源の位置を知ることができる。固体中において、圧力波は10³m/sの桁の速度で伝搬するのに対し、ナノ秒パルス電圧によるトリートは10⁴~10⁵m/sの速度で進展する⁽⁸⁾。このことから、トリート進展開始から圧力波検出までに要する時間は、圧力波が圧電素子の位置まで伝搬するのに要した時間にほぼ等しいと見なすことができる。すなわちトリート進展の開始時点さえ特定できれば、圧力波の伝搬時間がわかるので、その時間と圧力波の伝搬速度から発生源の位置を算出できる。ここで、今回用いた電圧パルスの波形について考える。波高値が低く、かつ幅の長いパルスを印加した場合、印加開始とトリートの進展開始は必ずしも時間的に一致しない。今回の場合、パルスの立ち上がりは十分に小さく、また50kVでの初回印加時におけるトリート発生確率は100%である。つまり今回の電圧印加条件においては、パルスの印加開始とほぼ同時にトリートが進展するので、圧力波の検出時間を、その伝搬時間と見なすことができる。

以上の理由により、2.5μsにおける信号は、平板電極上に誘導された表面電荷による静電応力が、厚さ15mmのアルミニウム中を伝搬してきた後に検出されたものであり、4.5μs付近における信号は、トリート発生時における樹脂の溶融と気化によって生じた応力が樹脂中とアルミニウム中を伝搬してきた後に検出されたものであることがわかる。

初回印加時に発生した比較的小さなトリートは点状の音源と見なせるのに対して、繰り返し印加により平板側へ伸びたトリートは線状の音源と見なされる。すなわちトリート先端部からの圧力波と、根元部からの圧力波の伝搬時間に差が生じてくる。印加3回目から6回目の間に、4.5μsの手前の時間帯に多くの圧力波が検出された事実は、この間にトリートが大きく伸びたことを意味する。そしてこの結果は、図2の撮影結果に良く対応している。

印加6回目から10回目において、放電光の写真からトリートがさらに伸びる様子は観察されなかった。また同様に、信号波形上で、トリート先端部からの圧力波が平板電極からの圧力波に近づくことも無かった。しかし6回目から10回目

図2 負針における放電光の静止写真

Fig.2. Still photographs of the discharge light under point-cathode / plane-anode.

図3 負針における圧力波信号

Fig. 3. Pressure signals under point-cathode/plane-anode.

図5 正針における圧力波信号

Fig. 5. Pressure signals under point-anode/plane-cathode.

図4 正針における放電光の静止写真

Fig.4. Still photographs of the discharge light under point-anode / plane-cathode.

の間に、圧力波の振幅が徐々に大きくなるという変化が観測された。ここで注目すべきは、トリ－の先端部よりもむしろ根元にて、振幅の増大が顕著であるという事実である。このことは、トリ－が新たに伸びた地点から圧力波が発生するのはもちろんのこと、既に形成されたトリ－管内で生じた気体放電によっても、かなり大きな圧力波が発生することを意味している。気体放電により圧力波が発生する理由は、放電自身によるトリ－管内の気圧上昇が、トリ－管の太さ方向への弾性変形を引き起こすためと、放電に曝されたトリ－管壁の樹脂が溶融気化するための両方が考えられる。繰り返し印加によって、何度も放電に曝されたトリ－管壁の劣化が進行し、トリ－管の直径は徐々に大きくなり、その結果として気体放電の規模が大きくなっていることを印加6回目から10回目の圧力波信号の変化は示している。また、トリ－根元部から大きな負の圧力波が伝搬している理由は、放電の収束に伴い、トリ－管の直径がある程度収縮するためと考えられる。

次に、正針における1回目から10回目までの放電光の静止写真を図4に示すと共に、同時に測定された圧力波信号を図5に示す。なおこの時の実験では、印加42回目に絶縁破壊が起きた。

正針の場合も負針と同様に、圧力波信号から推測されるトリ－の伸びが、放電光の観測結果との間で良い相関関係を示した。例えば印加2回目において、比較的振幅の大きい圧力波が $3.6\mu\text{s}$ で検出されたことは、この時の印加でトリ－が大きく伸びたことを示している。そしてこの時の写真は、複数のチャンネルが強い発光を伴いながら平板電極に近づいている様子を捕えている。また6回目と7回目の信号を比較した時に、6回目に検出された $3.4\mu\text{s}$ の圧力波信号が、7回目には無いことに気付く。これは、6回目の写真では、1本の長いトリ－が強く光っている様子を確認できるのに、7回目にはそのトリ－管内での放電が微弱であり、トリ－先端まで放電が達していない事実と良く対応している。

トリ－の進展能力やその枝分かれのパターンに極性効果のあることはよく知られている⁽⁹⁾。圧力波においても信号波形の変化する様子が極性間で異なることは、図3と図5の比較から明らかである。正針における信号波形の特徴を、以下に記す。

正針におけるひとつの特徴として、最初の数回の印加においてトリ－が大きく伸びたものの、その後10回目までの印加で顕著な成長は認められなかった点が挙げられる。さらに、圧力波の振幅についても、初回印加時が最も大きく、印加の繰り返しにより振幅が増大する傾向はなかった。このような特徴から、正針の場合、印加を繰り返した時のトリ－管内での気体放電の規模は小さく、トリ－管の膨張収縮にともなう体積変化が小さいことが推測される。したがって正針におけるトリ－管の直径は、負針の場合よりも小さいものと思われる。

信号波形の極性間での違いは、破壊直前の段階での圧力波信号において、さらに顕著に現れた。図6(a)(b)は、負針

における印加61回目と正針における印加41回目の圧力波信号である。両極性ともに、 $2.8\mu\text{s}$ 付近で圧力波が検出されており、トリ－先端は平板電極の近くにまで到達している。しかし、トリ－からの圧力波の振幅は大きく異なっており、負針の方が、正針よりもかなり大きいことが、図より明らかである。後に述べる考察のところでは、トリ－先端から根元までの部分から発せられた圧力波が検出された時間帯の信号波形の面積を、トリ－管の体積変化に関係する量と見なし、この値を極性間で比較しながら考察を進める。

<3・2> 平行平板電極での圧力波測定 <3・1>の針対平板電極での実験において、平板電極表面に誘導された電荷からの静電応力に起因する圧力波が検出された。電極電荷が誘導されたことは、電極電荷とは逆極性の電荷が存在することを意味する。この逆極性の電荷は、トリ－の進展により、試料内部に形成された空間電荷であると考えるのが妥当である。したがって、圧力波信号の中には、試料中に存在する空間電荷からの圧力波も含まれている可能性がある。例えば、固体中の空間電荷分布測定によく用いられるパルス静電応力法においては、ナノ秒パルスの重畳により、空間電荷からの圧力波が検出されていることは周知のとおりである。今回の実験においても、トリ－の先端付近に位置する空間電荷からの圧力波が検出されても不思議

図6 破壊直前の圧力波信号 (a)負針61回目 (b)正針41回目
Fig. 6. Pressure signals for (a) point-cathode at 61th pulse and for (b) point-anode at 41th pulse.

図7 平行平板電極試料における圧力波信号
Fig. 7. Pressure signals under plane-plane electrode.

ではないと考えた。そこで静電応力に起因する圧力波のみを観測し、その振幅や周波数特性を $<3 \cdot 1>$ で得られた圧力波信号と比較することを目的として、平行平板電極試料を用いた実験をおこなった。ギャップ長が異なる3種類の試料に対して、10kV/mmの電界となるようなパルス電圧を印加した時の圧力波信号を図7に示す。この条件下においては、上部電極と下部電極の両方から、同じ大きさの圧力波が発せられる。横軸2.5 μ sにおける信号が下部平板電極からの圧力波であり、図中の丸で囲まれた部分が上部平板電極からの圧力波である。この結果は、上部電極側からの圧力波の伝搬過程における損失が極めて大きいことを示している。特に、ギャップ長が最も小さい1.0mmの場合でさえも信号が非常に小さいという結果から、試料とアルミ平板との界面における音響インピーダンスの不整合が原因で、圧力波の透過率がかなり小さくなっていることが推測できる。つまり検出されたトリーからの圧力波信号には、空間電荷からの静電応力成分はほとんど含まれていないと見るべきである。

4. 考察

実験結果をふまえて、ここではナノ秒パルスの繰り返し印加によるトリー進展の極性効果について考察する。

針電極からのストリーマ進展能力に極性差の生ずる理由について簡単に記せば、正針の場合は正ストリーマがその先端の電界強度を高く維持して進展する機構であるのに対し、負針では針電極から注入された電子がその近傍の電界強度を緩和する傾向があるため、その進展は正針に比べて容易でないことによる。正針、負針各3回の実験における初回印加時の圧力波信号のみを比較したところ、正針の方が負針よりもトリーの伸びは常に大きく、正ストリーマの進展能力が高いことを裏付ける結果となった。ところが負針の場合、印加を繰り返すことにより圧力波の振幅は増大したのに対して、正針の場合、むしろ印加の繰り返しによ

(a)

(b)

図8 トリー信号積分値と印加回数の関係 (a)負針 (b)正針
Fig. 8. The relation between the integrated value of the pressure signal and the number of voltage application for (a)point-cathode and for (b)point-anode.

り圧力波の振幅は小さくなった。この違いを定量的に把握するため、トリーからの信号波形の絶対値の積分値と、平板電極からの信号の高さに着目した。ナノ秒パルス印加による応力の発生は瞬間的であるから、トリーからの圧力波の検出時間帯の広がり、トリーが伸びたことを意味する。一方、繰り返し印加によって既に形成されているトリー管からの圧力波信号の振幅が大きくなることは、放電エネルギーの増大、ひいてはトリー管径の拡大が進んでいることを意味する。つまりトリーからの圧力波信号の絶対値の積分値は、トリー管の体積変化に関係する量として扱える。そこで、トリー先端部から根元部までに相当する圧力波信号をトリー信号と定義し、このトリー信号の絶対値の積分値と、印加繰り返し数との関係を全ての実験結果に対してプロットしたものを図8(a)(b)に示す。負針の場合、積分値が徐々に大きくなるのに対して、正針では最初の印加における値が最も大きく、印加の繰り返しに伴い減少しながらある値に収束する。この理由は、残留電荷によるストリー

図9 電極電荷量と印加回数との関係 (a)負針 (b)正針
Fig. 9. The relation between the induced charges on the plane-electrode and the number of voltage application for (a)point-cathode and for (b)point-anode.

マ抑制効果から次の様に説明できる。正針の場合、正ストリーマの進展に伴い、トリート管内には多数の正負電荷が形成されるが、移動度の高い電子群は直ちに針電極へ吸収される。その結果、印加後のトリート管内には正電荷が多く残留するので、印加を繰り返しても新たなトリートの進展が起きる確率は低く、最初にできたトリート管内での微弱な気体放電に止まる確率が高くなる。一方、負ストリーマにより形成された負針のトリート管内では、先端に電子群が、後方に正電荷群が分布した状態を維持しながら進展する。つまり印加終了時における両電荷の再結合が生じ易く、結果として電荷の残留が比較的少なくなる。

次に、平板電極からの信号に着目する。平板電極からの信号が大きくなることは、トリートの成長により平板上に誘導される電極電荷量が増大していることを意味する。平行平板電極試料の場合、試料の静電容量がわかっているため、平行平板試料を用いた実験結果から信号の大きさと電荷量の関係を知ることができる。この関係を針対平板電極試料

における平板電極からの信号にも適用することにより、トリート進展時に誘導される電極電荷量を求めた。電荷量の絶対値と印加繰り返し数との関係を、全ての実験結果に対してプロットしたものを図9(a)(b)に示す。正針負針の両方において、印加の繰り返しにより電荷量が増大しているのがわかる。ここで正針の場合、トリート信号の絶対値の積分値は印加の繰り返しに伴い減少したにもかかわらず、電極電荷量が増加しているのは興味深い事実である。このことは一見不思議に思えるが、電極電荷量は、トリート管内での放電により新たに生じた正電荷と、それまでの印加によりトリート管内壁に残留している正電荷の合計に相当することを考えれば説明がつく。すなわち放電の規模が小さくても、多くの電荷が平板電極表面に誘導されていることを示すこれらの結果は、正針における電荷の残留が顕著であるという考えを支持している。

ここまでの比較に基づいて、両極性における繰り返し印加時の破壊機構をまとめる。負針の場合、残留電荷による抑制効果が少ないため、負ストリーマの進展能力が小さいながらも、印加を繰り返すことにより徐々にトリートが成長し、最終的に破壊に至ると説明できる。正針の場合、最初の印加によりトリートが大きく伸びた後は、トリート管内での微弱な気体放電を繰り返すに止まる。しかし印加を繰り返すうちに、ある確率で正ストリーマが大きく進展することによってトリートはさらに伸びる。過去に報告したPMMA試料を用いたトリートの実験においては、最初の印加でトリートが大きく伸びた後、再度の印加でさらにトリートが伸びる確率は、せいぜい20%であるとの結果を得た⁽⁹⁾。この数値自身は試料の材質や、電圧パルスの立ち上がりや幅によって変わるので、今回の実験に直接あてはめることはできない。しかし、トリート信号の絶対値の積分値がある値で落ち着いた状態から、突然破壊に至るという今回の結果は、正針における繰り返し印加時のトリートの進展が確率的に引き起こされるという考えを支持している。

本手法の現時点における電荷量の検出限界は 10^{-9}C の領域であり、電流測定などの電気的方法と比べ、感度においてその優位性を見出すことはできない。しかし、破壊直前の情報を得たい場合や、不透明試料のような光学的手法を使えない場合に、その有効性が発揮されるであろう。今後、装置の改良や信号処理技術の適用を進め、検出感度を向上させることにより本手法の適用範囲の拡大が期待できる。

5. むすび

高電圧ナノ秒パルスが繰り返し印加されたエポキシ樹脂中を、トリートが進展する時の圧力波を測定すると同時に、放電光の撮影を行った。得られた結果を以下に要約する。

(1) 平板上の電極電荷の圧力波が検出されてから、トリート先端部の圧力波が検出されるまでの遅れ時間から推定されるトリートの伸びと、放電光の写真撮影結果は良い相関関係を示しており、本手法の有効性を確認することができた。

(2) 繰り返し印加において、トリートのさらなる伸びが無

いような場合でも、既に形成されたトリ－管内での気体放電によって、圧力波が発生することがわかった。

(3) 負針の場合、トリ－からの圧力波の振幅が、印加の繰り返し数の増加に伴い大きくなる傾向が認められた。繰り返し生じる気体放電によりトリ－管が太くなるにつれて、放電のエネルギーが増大していることが示唆された。一方、正針の場合、トリ－からの圧力波の振幅が、印加の繰り返しにより大きくなることは無かった。

(4) トリ－管の体積変化量に関係するトリ－信号の絶対値の積分値と、平板電極表面に誘導される電荷量を求め、正針と負針との比較をおこなった。トリ－管内の残留電荷によるストリーマの抑制効果を用いて、繰り返し印加によりトリ－の成長する様子が、極性間で異なる理由を説明した。

最後に実験を行うにあたり協力してくれた本学卒業生の
大西俊之氏に謝意を表します。

(平成12年6月23日受付, 平成13年5月24日再受付)

文 献

- (1) 電気学会技術報告第100号:「有機絶縁材料のトリ－イングについて」, (1971)
- (2) E. Howells and E. T. Norton: "Detection of Partial Discharges in Transformers Using Acoustic Emission Techniques", IEEE Trans. on Power Appar. Sys., **PAS-97**, 5, pp. 1538-1549 (1978)
- (3) 中西 豊・中谷洋一・飯住昌弘・粕谷正春:「AEセンサによるCVケーブル用プレハブ接続箱の部分放電検出」, 電学論B, **112**, 10, pp. 897-904 (1992)
- (4) N. Yoshimura, H. Kudo and F. Noto: "Acoustic Emission Associated with Tree Growth in Polyethylene", Jpn. J. Appl. Phys., **20**, 11, pp. L775-L778 (1981)
- (5) 藤田博之・中西孝充・山口楠雄:「ポリエステル樹脂中の電気トリ－伸展に伴う超音波と部分放電の対応」, 電学論A, **58-5**, p.287 (1983)
- (6) Y. Kagawa and S. Yamazaki: "Acoustic Emission Associated with Tree Growth in Polymeric Materials", IEEE Trans. on Elect. Insul., **EI-17**, 4, pp. 314-318 (1982)
- (7) K. Kadowaki, S. Nishimoto and I. Kitani: "Measurement of the Acoustic Emission Due to Tree Growth in Polymeric Insulator", Proc. of the ACEID'99, **1**, pp. 22-26 (1999)
- (8) 山田弘・藤原民也・玉田耕治・木村眞吾・佐藤淳:「ナノ秒パルス電圧によるポリメチルメタクリレートの破壊進展の光学的測定」, 電学論A, **112**, 3, pp. 237-243 (1992)
- (9) I. Kitani and K. Arii: "Impulse Tree and Discharge Light in PMMA", IEEE Trans. on Elect. Insul., **EI-19**, 4, pp. 281-287 (1984)

門脇 一則 (正員) 1965年11月22日生。90年3月, 愛媛大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年4月, 日東電工(株)入社。96年10月, 愛媛大学工学部電気電子工学科助手, 現在に至る。主として, 液体, 固体および複合体の高電界電導と, 破壊現象の研究に従事。IEEE会員。

西本 栄 (非会員) 1946年12月15日生。71年4月, 愛媛大学工学部文部技官, 現在に至る。直流破壊前駆像の観測系の開発, 圧力波信号のウェーブレット解析等の研究に従事。

木谷 勇 (正員) 1944年7月14日生。68年3月, 大阪大学工学部電気工学科卒業。同年4月, 三洋電機(株)入社。71年愛媛大学工学部電気工学科助手, 現同学部電気電子工学科教授。工学博士。主として, 液体, 固体および複合体の高電界電導と, 破壊現象の研究に従事。電気設備学会, 応用物理学会, IEEE会員。