

高分子絶縁材料のトリーイングに伴う超音波放射

Acoustic Emission during Treeing in a Plastic Insulation Material

藤田 博之*・山口 楠雄*

Hiroyuki FUJITA and Kusuo YAMAGUCHI

1. はじめに

ポリエチレンやエポキシ樹脂などに代表される高分子絶縁材料は、電力ケーブルや電気機器絶縁に広く利用されている。電極の微小な突起・絶縁材料中の欠陥・繊維などの異物が高圧部分にあると、電界の集中を招きそこで局所的な絶縁破壊を生ずる。この破壊は、微細な放電路があたかも樹枝のように進展してゆくため、トリーイング破壊と呼ばれている。実際の機器の絶縁設計電界強度が理想的な平等電界中の破壊強度よりはるかに低い値に抑えられるのは、トリーイング等の絶縁劣化が生ずるためである。

従来このトリーイング破壊現象について、活発な研究がなされてきた¹⁾。しかし、トリー放電路の進展については、顕微鏡による観察が行われているだけで、不透明な材料や実際の使用条件に近い複雑な絶縁構成については十分な観測が行えなかった。さらに、トリーの進展を実時間で捕えることも不可能であった。

他方、超音波を利用した部分放電の検出は、油中絶縁に応用されている²⁾³⁾。そして油中や気中の放電と同様に、トリーの進展中にも超音波が放射されると考えられる。この超音波を計測すれば、不透明な材料や複雑な電極形状についてもトリーの進展を知ることができる。また実時間で進展を検出できるので、交流やインパルス電圧のように時間的に変動する電圧について、電圧の瞬時値とトリーの伸びとの対応づけも可能となるであろう。つまり、超音波法によって従来の顕微鏡観察の欠点を補えることが期待される。近年、固体中のき裂の力学的な進展に伴って放出される超音波（アコースティック・エミッション：AE）を利用した非破壊検査法が注目され、多くの技術開発が行われた⁴⁾。今回、この超音波技術をトリーイング破壊に応用したところ、破壊に伴う超音波パルスが検出された。この結果、交流電圧の波高値付近にトリー進展が集中していることが明らかとなった。

2. 実験装置

図1に実験回路を示す。まず高電圧部（太線）から説明する。印加電圧は、50 Hz 交流電圧で、最高30 kV（実効値）まで連続的に変化可能である。電圧は静電電圧計によって測定し、以下すべて実効値で表示する。高電圧部分から気中コロナ放電を生ずると、超音波検出系への雑音となるので、シールドリング等を付けコロナを抑制した。次に、超音波検出系（細線）を説明する。検出器としては、300 kHz 共振型のPZT圧電変換素子を用いた。前置増幅器の利得は50 dBである。主増幅器の利得は10～58 dB（2 dB ステップ可変）である⁵⁾が、今回は24 dBに固定した。すなわち、全利得は74 dB（約5000倍）である。増幅した出力波形は、メモリー・スコープで観察した。超音波検出系は2系列を同時に用いた。そのうち1つは検出器を試料の平板電極（図2）に直接接着し、もう1つは検出器を試料のすぐ近くだが音響的結合の無い所に接着した。両者の出力を比較することにより、コロナ放電等による雑音と、トリー進展に伴う超音波を弁別することができる。

試料の形状を図2に示す。試料は円筒形のポリエステル樹脂で、下端に黄銅製円板からなる接地電極があり、上端からはシールド電極を付けた針電極が接地電極と垂

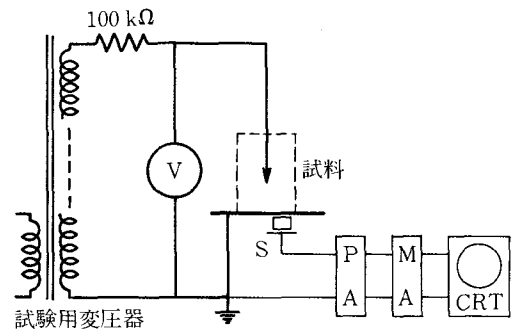


図1 高電圧試験回路と超音波検出系（V：静電圧計，S：超音波検出器，PA：前置増幅器，MA：主増幅器，CRT：オシロスコープ）

*東京大学生産技術研究所 第3部

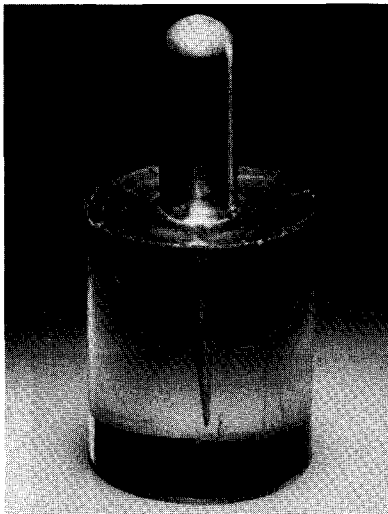
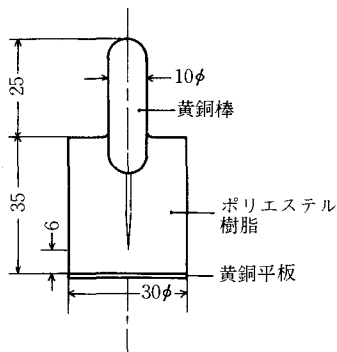


図2 試料形状

直に、6 mmの間隔をあけてモールドされている。針電極には、No. 2メリケン針の先端を1200番サンドペーパーで研磨したものをを用いた。

3. 実験結果

まず、試料に25 kV（交流実効値：以下同様）を5分間印加した。最初の数十秒間は超音波パルスが発生しなかったが、その後一度発生が始まると多数のパルスが観測された。5分後に試料を肉眼で観察すると、針先からトリーが発生していた。この時の軸方向の伸びは約3 mmであった。なお、トリーは必ずしも軸方向に進展せず、多数の屈曲や枝分かれを生ずるので、実際の放電路の長さは3 mmよりかなり長い。

その後電圧を切り、再び徐々に上昇していった。13 kV、16 kV、20 kV、25 kVの各電圧で約15分間ずつ超音波パルス波形の観測を行った。一連の測定後のトリーを写真1に示す。トリーは多数の枝分かれを生じつつ立体的に伸長し、対向電極にまで達していることが分かる。トリー

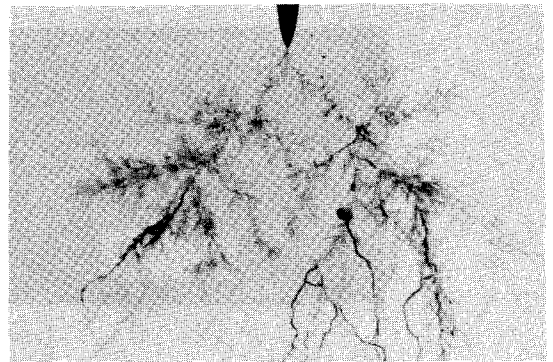


写真1 トリー形状

により両電極間が橋絡されたにも拘わらず、なぜ、全路破壊が生じなかったのか不明であるが、図1の回路図に示す100 kΩの制限抵抗の効果とも考えられる。

写真2に、観測された超音波パルス波形を各印加電圧について示す。左側の波形は速い掃引速度で写したもので、印加電圧の上昇に伴って発生するパルス振幅が大きくなるが、波形そのものにはあまり変化の無いことが分かる。超音波パルスの持続時間は20～30 μsで、金属材料の割れから生ずる超音波パルス（いわゆるアコースティック・エミッション）が数百μsであるのに比べ非常に短いことが特徴である。また、右側の波形は遅い掃引速度で写したもので、高い電圧ほど起音波パルスの発生数が多くなることが分かる。また、超音波パルスの発生するのは交流電圧の波高値付近（10 ms間隔）に集中している。この様子を模式的に示したのが図3である。以下に各電圧での観察について述べる。

(1) 印加電圧 13 kV

前述したように一度トリーを発生させた後、再び印加電圧を低い状態から上昇してゆくと、13 kVで超音波パルスが検出されるようになった。超音波パルスは時折出る程度で、各電圧半波に必ず出るほどではなかった。また、オシロスコープのトリガー・レベルを変えて超音波パルスの振幅が最大に近いものを測ると、検出器出力換算のピーク・ピーク値（以下同様）で60 μV程度であった。

(2) 印加電圧 16 kV

この電圧では、超音波パルスが印加電圧の波高値付近で必ず出るようになった。また振幅の最大値は、約80 μV_{p-p}に増加した。

(3) 印加電圧 20 kV

この電圧では、超音波パルスが電圧の半波の間(10 ms)に数個発生するようになった。振幅の最大値は、180 μV_{p-p}程度であった。

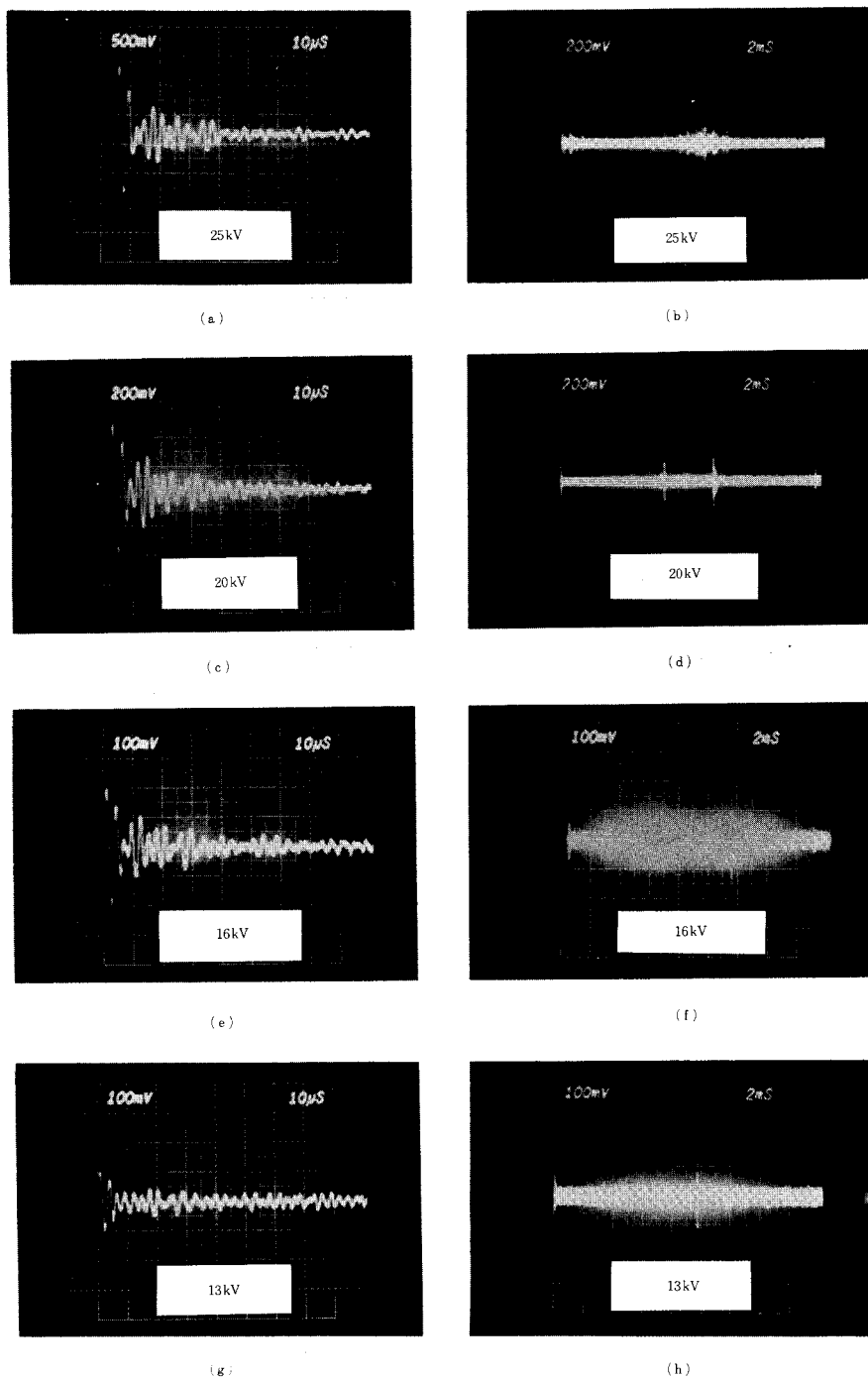


写真2 超音波パルス波形 (印加電圧は写真中に表示)

- a) $100 \mu\text{V}/\text{div}$, $10 \mu\text{s}/\text{div}$ d) $40 \mu\text{V}/\text{div}$, $2 \text{ms}/\text{div}$ g) $20 \mu\text{V}/\text{div}$, $10 \mu\text{s}/\text{div}$
 b) $40 \mu\text{V}/\text{div}$, $2 \text{ms}/\text{div}$ e) $20 \mu\text{V}/\text{div}$, $10 \mu\text{s}/\text{div}$ h) $20 \mu\text{V}/\text{div}$, $2 \text{ms}/\text{div}$
 c) $40 \mu\text{V}/\text{div}$, $10 \mu\text{s}/\text{div}$ f) $20 \mu\text{V}/\text{div}$, $2 \text{ms}/\text{div}$

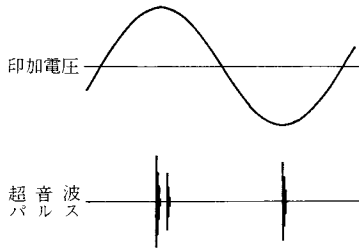


図3 超音波パルス発生時点と印加電圧位相の関係の模式図

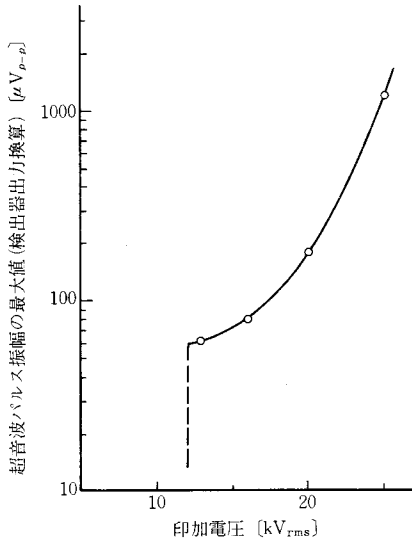


図4 超音波パルス振幅の最大値と印加電圧の関係

(4) 印加電圧 25 kV

印加電圧を 25 kV にまで上昇すると、超音波パルスは多発した。写真 2 を見ると印加電圧の波高値付近に集中して十数個のパルスが発生していることが分かる。また、パルス振幅の最大値も、約 $1200 \mu V_{p-p}$ と非常に大きくなった。しかし、この電圧を印加するとき、トリーはすでに平板電極近くまで伸長しており、超音波の発生源が近づいたことによる振幅の増大も効いていると考えら

れる。なお、図 4 にパルス振幅の最大値と印加電圧の関係を示した。

4 おわりに

高分子絶縁材料中の電界集中部に生ずる、トリーイング劣化を超音波法により観察した。この結果トリーの進展に伴って生ずると思われる、超音波パルスの検出に成功した。印加電圧を上昇するに従い、超音波パルスの振幅は大きくなり、その発生頻度も増加することが分かった。また、超音波パルスは印加交流電圧の波高値付近に集中しており、トリーの進展が波高値付近で活発化することが明らかになった。このことは、トリー進展を実時間で捕えるという、超音波法の利点を示している。

本観察をさらに進めることにより、トリー進展長と超音波パルス波形との対応づけや、印加電圧による発生頻度およびパルス振幅分布の変化を定量的に明らかにしていきたいと考えている。

第 3 部技官の山上典男氏、小柳津宏忠氏には超音波計測についてご協力していただいた。東京大学工学部助手の千葉政邦氏には、実験にあたり多くのご指導とご助力をいただいた。記して、ここに深く感謝する。

(1981年5月29日受理)

参考文献

- 1) 有機絶縁材料のトリーイングについて：電気学会技術報告 100 - (I), (昭 46. 9)
- 2) 木村ほか：油中コロナの発生する商用周波電源回路に関する一考察，電気学会論文誌 59 巻 11 号 612 頁 (昭 14)
- 3) R. T. Harrold: Ultra-sonic Spectrum Signatures of Under-oil Corona sources: IEEE Trans. on Electrical Insulation vol. EI-10, No. 4, p 109 ('75)
- 4) 尾上，山口ほか：アコースティック・エミッションの基礎と応用：コロナ社 (昭 51)
- 5) 山口ほか：東大生研システムによる AE 計測：圧力技術 15 巻 3 号 153 頁 (昭 52)

