CT 法および光透過法によるトリーイング劣化 の三次元計測法の開発

正員 柳 原 昌 輝 (秋田高専)
正員 吉 村 昇 (秋田大)

Development of a Measurement Method for Three-Dimensional Treeing Degradation using a Computerized Tomography Method and a Light Penetrating Method

Masateru Yanagiwara, Member (Akita National College of Technology), Noboru Yoshimura,
Member (Mining College, Akita University)

To measure the time to tree-initiation and the tree-growth rate, methods by visual measurements of trees in organic insulating materials through an optical microscope have been used so far. We developed a system to measure tree-growth rate and degraded area of a tree in organic insulating materials using an optical microscope. It was, however, impossible to measure three-dimensional shape of a tree by those methods.

This paper describes the volume of a tree immediately after initiation, as well as changes in the configuration of the tree by a computerized tomography method and a light penetrating method. Specimens were made of PMMA. As a result it was possible to record the cross sections of a tree by the method, and to describe the degraded volume of a tree from the sum total of the cross sections. We determined the specific characteristics of the degraded volume of tree and the cross section area of the tree. It was possible to recognize the difference of the shape of a tree by investigating characteristics.

キーワード：三次元画像処理法，トリーイング劣化，高分子絶縁材料，光学顕微鏡

1. ま え が き

高分子絶縁材料中のトリーイング劣化機構を解明するため、従来、種々の計測法が採用されてきた⁽¹⁾。著者らは、従来用いられていた目視観察による計測方法に代わり、コンピュータを用いた画像処理技術を応用し、トリーを画像としてとらえ、その画像を処理することにより、トリーの伸び、劣化面積などを計測する方法を開発してきた⁽²⁾。その後、計測システムを改良し、それまで計測が困難とされていたトリー発生直後のトリーの伸び、劣化面積、進展状況などを求めるシステムを開発した⁽³⁾。しかし、トリーイング現象その

ものが三次元事象であるにもかかわらず、いずれもトリーを二次元事象としてとらえた処理しかできなかった。そこで、本論文では光透過法およびCT法⁽⁴⁾による処理に基づき、トリーの三次元的要素より、トリー発生後成長過程におけるトリーの断面積の時間的変化を計測し、最終的にトリーの劣化体積を求めることについて検討した。CT法(コンピュータによる断層撮影法)とは、対象となる物体の多方向からの観察像を求め、その画像データをコンピュータで処理することにより、物体の断層像を再生し求める方法である。

本計測システムの特徴を挙げると、

(i) CT法を用いることにより、トリーを立体と

してとらえることができ、トリーの三次元的特徴である劣化体積を求めることができる。

- (ii) 光透過法を用いることにより、一方向から見たトリー画像からトリーの劣化体積を求めることができる。
- (iii) トリーの三次元画像を求めることにより、材料内部の立体的範囲および劣化方向を知ることができる。

2. 試料および実験方法

〈2・1〉 試料 試料としては、アクリル樹脂を用いた。誘料の形状を図1に示す。底面の直径は10 mm、高さは15 mmの円柱状である。これは、ブロック状試片ではトリーを2面からしかとらえることができず、トリーの立体的情報を得るには、データ不足である。そのため、トリーを立体的に処理する方法として円柱試片を考えた。これにより、トリーをその周りから角度を変えて同じ状態で取込むことができる。

円柱棒状の試料を針挿入器にセットし、恒温槽で170°C、15分間加熱した。その後、針挿入器で針(オグラ宝石精機製)を挿入し、室温まで冷却した。針電極には、先端曲率半径5および10 μm 、先端角度30°のものを用いた。

〈2・2〉 実験方法 電極配置は針-平板直接接地方式をとり、針-平板電極間のギャップの長さは2 mm、4 mmとし、試料が平板電極と接する面には導電性銀ペイントを塗布した。また、沿面放電を防ぐため、試料全体をシリコン油に浸漬した。空気中では対象物に光があたって光の収差をおこし、光のむらを生じる。しかし、比較的アクリルの屈折率に近いシリコン油に試料を浸漬したことにより、光の収差が小さく、光源から試料をとおり、光学顕微鏡まで平行光線を得ることができた。

実験は、50 Hzで9、12および15 kVの交流高電圧を連続して印加し、各印加時間に対する発生したトリー画像を取込み、その画像を処理することにより、

図1 電極および試料の形状
Fig.1. Arrangement of electrode and specimen.

トリーの体積を求めた。

3. 三次元画像処理

〈3・1〉 二次元画像計測システム 三次元画像計測と比較するため、最初に二次元画像処理を行った。図2に画像計測システムを示す。試料に一定の電圧を印加し、発生したトリーを光学顕微鏡、CCDカメラを用いてアナログ画像をVTRに録画する。印加電圧は目的の電圧になるまで連続昇圧法を用いて設定した。更に、その再生画像を画像処理装置(256×256画素/画面、64階調/画素)に取込み、デジタル画像に変換される。画像処理装置はパーソナルコンピュータにより制御される。取込んだ画像はパーソナルコンピュータ(PC 9801 RA 2, 3 MB)によって処理され、トリー部分のみの多値画像を抽出する。この画像を図3に示す。この結果はモニタならびにプリンタなどに出力される。

〈3・2〉 三次元CT法 トリーの投影は図4に示す流れ図により行った。試料を挟み、互いに向かい合うように光源とカメラを設置する。取込んだ画像データは、光透過強度の変化状態を示している。発生したトリーが少ない樹枝状トリーの場合は光透過強度が大きく、トリーが多く発生するブッシュ状トリー、まりも状トリーの場合は光透過強度は小さい。この試料を

図2 画像計測システム
Fig.2. Experimental setup.

図3 トリーの画像
Fig.3. Image of tree.

図 4 トリーの投影画像取込み手順(CT 法)
Fig.4. Flowchart of the sampling projection image of tree (CT method).

図 5 トリーの逆投影処理手順(CT 法)
Fig.5. Flowchart of back projection of tree.

針電極を中心に4度間隔で回転させ、0度から180度まで各角度から見たトリーの二次元投影画像45枚を取込んだ。回転角間隔を4度にした理由は、取込み1枚あたりの画像容量が64Kバイトであり、システムの容量3Mバイト以内に抑えるためである。この結果、フロッピーディスク3枚に計45枚のトリーの投影画像が求められる。

トリーを各角度において投影した二次元の画像データ45枚は、それぞれの画像から1ラインずつ取り出さ

図 6 トリーの劣化体積計測手順
Fig.6. Flowchart of the measurement of degraded volume of tree.

れ、トリーの断面1枚を投影したものとして、その逆投影(バックプロジェクション)を行い、トリーの輪切り画像を求めた。更に、トリーの三次元分布は、針電極の先端からトリー先端までの輪切り画像を積み重ねることで求めた。

これは、メインメモリーに二次元断面画像を求めるための二次元配列だけでよく、最低限のディスクアクセスですむ方法である。また、逆投影処理はトリーの存在するであろう中心の128×128画素のみについて行った。この逆投影処理を行う手順を図5に示す。

このようにして求めた各輪切り画像における画素の総和をトリーの劣化体積とした。

〈3・3〉 光透過法 光透過法によるトリーの劣化体積を求める手順を図6に示す。CT法と同様の方法で実験を行い、図3に示したようなトリーの多値画像を求めた。この画像のヒストグラムをとり、輝度0～63の中で輝度の変化率の高いところをトリーがある部分として処理の対象とし、トリー画像の背景画面のデータを除去する。この画像には多くの雑音が含まれており、画像処理を行ううえで大きな妨げになる。この画像の中で、1画素の連続しない画素を一点雑音

図 7 針電極除去画像
Fig. 7. Image of electrode reduction.

という。初めの処理として、トリー本体と離れて存在するこの一点雑音を除去する。更に画像データを圧縮し、同様の処理を行う。処理を繰返すうち、雑音はなくなり、針電極を除去しトリー部分のみの画像を求めることができる。この画像を図 7 に示す。この画像が、トリーの伸び、劣化面積、劣化体積を求める対象画像となる。

図 7 において、トリー画像の濃度値は 40 以下で背景(濃度値 63)と区別できる。針先端部からトリーの最先端部までの画素数を数えることによりトリーの伸びとし、トリー部分全体の画素数を数えることによりトリーの劣化面積とした。また、この画像において、色の濃い部分はトリーが密集しているため、当たった光の減衰が多く、色の薄い部分はトリー部分が少いで、光の減衰が少ない。光がトリー部分を通らなかった場合、光の減衰はない。光線がトリー本体を通過したときの長さを L とすると、次式から L を求めることができる。

$$L = (\log H_0 - \log H) / A$$

ここに、 H_0 : 基準信号の強さ、 H : トリー部分通過後の信号の強さ、 A : トリー本体の吸収係数

この式を全画素に適用し、トリー全体の奥行きを出し、その総和を求めトリーの劣化体積とした。

4. 実験結果と検討

〈4・1〉 CT 法によるトリーの体積 図 3 に示したのが、角度 0 度の場合の投影画像である。試料を 4 度ずつ回転し、それぞれの角度におけるトリーの投影画像を求め、その二次元投影画像を逆投影しトリーの輪切り画像を求めた。図 8 にトリーの輪切り画像を求めている途中経過を示す。左側の 9 枚の画像は、右側の線付近の輪切り画像を表している。輪切り画像は針電極先端(下方)からトリーの先端(上方)方向の順に表しており、線を引いている部分の輪切り画像が 9 枚目に対応している。針電極からトリーの先端方向への各輪切り画像を図 9 に示す。各図において左上から右

図 8 トリーの輪切り画像計測途中経過
Fig. 8. Image of section in the tree of measurement in progress.

(a) トリー中央付近

(b) トリー先端付近

図 9 トリーの輪切り画像
Fig. 9. Image of section in the tree using CT method.

のほうへ、針電極先端部からトリー部分そしてトリー先端部の方向の順に示している。同図から、トリーは、針先端部から放射状に大きくなっており輪切り断面が円に近く、トリーの先端付近においては輪切り断面が数箇所に分かれ、一つの連続した画像に固まっている。これはトリーがブッシュ状トリーの先端の特徴を示していることがわかる。図 3 のトリー原画像にもトリーの形状の特徴が現れているが、CT 法を用いることにより、二次元画像には現れなかった細部の特徴がより顕著に現れた。CT 法により計測した各断面の 1 画素あたりの劣化面積は $30 \mu\text{m}^2$ 、1 画素の劣化体積は $192 \mu\text{m}^3$ となる。この CT 法により求められたトリーの劣化体積を、トリーの標準体積とした。

〈4・2〉 光透過法によるトリーの体積 発生したトリーは、雑音をもった多値画像として取込まれる。その画像に対し、ヒストグラムおよび圧縮画像処理などを基にした雑音処理を行った後トリーのみ画像を求めた。この画像が、トリーの伸び、劣化面積そして劣化体積を求める画像である。図 3 のトリー画像にお

針先端曲率半径: 5 μm , ギャップの長さ: 4 mm

図 10 各印加電圧におけるトリーの劣化体積特性

Fig. 10. Characteristics of degraded volume of tree.

針先端曲率半径: 10 μm , ギャップの長さ: 2 mm

図 11 各印加電圧におけるトリーの劣化体積特性

Fig. 11. Characteristics of degraded volume of tree.

いて、光透過法により求めたトリーの劣化体積は 205,865 画素 (約 $3.983 \times 10^7 \mu\text{m}^3$), CT 法により求めたトリーの劣化体積は 207,033 画素 (約 $3.975 \times 10^7 \mu\text{m}^3$) となり、ほぼ同様の値を示していることがわかる。計測法としては、CT 法よりも光透過法による方法が容易なため、多くのデータを求めるには光透過法のほうが向いている。光透過法により計測した画像における 1 画素の大きさは、トリー針軸方向 6.4 μm , トリー針軸に対し垂直方向 5.2 μm である。よって、1 画素あたりの劣化面積は 33.3 μm^2 , 1 画素あたりの劣化体積は 193.5 μm^3 となる。以上の計測法により求めた体積特性と断面積の変化特性を次に示す。

(1) 各印加電圧における印加時間に対する体積特性

図 10, 図 11 に印加電圧を 9, 12, 15 kV にした場合における印加時間に対する体積変化特性を示す。図 10 は、曲率半径 5 μm , ギャップの長さ 4 mm, 図 11 は、曲率半径 10 μm , ギャップの長さ 2 mm の場合で

(a) 電極針先端からトリー先端まで

(b) 電極針先端付近

(c) トリー先端付近

図 12 トリーの各断面の面積特性

Fig. 12. Characteristics each cross area of tree.

ある。図 10 から、印加電圧を 9 kV にした場合、印加時間に対する劣化体積の変化が小さい。これはトリーが発生直後、樹枝状トリーで進展し、トリーそのものがあまり分岐しないことによるものと考えられる。12 kV, 15 kV を印加した場合、発生直後は樹枝状トリーで進展するが、間もなくトリーが増殖するように各方向に伸び始める。このため、トリーの伸びそのものよりも、体積が急増しているものと思われる。図 11 から、ギャップの長さが小さい場合トリーは発生しやすく、発生後の伸びも速いことが分かる。また、形状もブッシュ状、まりも状である。

(2) トリーの断面積の変化特性 一例として、ブッシュ状トリーにおける各断面ごとの断面積の変化特性を図 12 に示す。図において、横軸に付けた数字はトリーの断面の番号を表しており、0 は電極針先

端, 30~50 がトリー中央部分, そして 20 以降がトリー先端部分を表している。(a)図は電極針先端 0 からトリー先端 79 までの各断面ごとの断面積の変化特性, (b)図は電極針先端付近 0~10, (c)図は, トリー先端 69~72 の各断面ごとの断面積の変化特性を示している。図 12 から, トリーの断面積は電極針先端から急激に増加しており, トリーの中央付近で最大となり, トリー先端に行くにつれて減少し, トリー先端においては微小面積のトリーが続いているのがわかった。これは, 図 3 に示したブッシュ状トリーの形状の特徴がよく出ている。

5. あとがき

本論文では, 発生したトリーを三次元的にとらえるために, 試料としてアクリル円柱棒を用いた。長時間破壊試験を行い, 取込んだトリーの画像に CT 法, 光透過法を施すことにより, トリーの体積変化を計測した。その結果を要約すると,

- (1) CT 法により, トリーを三次元的にとらえ, その輪切り画像を求めた。この画像は, トリーの進展過程における断面の特徴がよくでている。
- (2) CT 法により求めたトリー全体における断面画像の総和を求めることにより, トリーの劣化体積を求めることができた。
- (3) 光透過法を用いることにより, トリーを一方から取込むだけで, トリーの劣化体積を求めることができた。この方法は, トリーの劣化体積の時間的变化を求める簡便な方法である。
- (4) CT 法, 光透過法により, 求めたトリーの劣化体積は, ほぼ同様の値を示した。
- (5) 求めた劣化体積特性は, トリーの形状の違いがはっきり表れており, トリーの進展状況もよく出ている。

今後, 試料の種類を変え, 更に検討を加えていきたい。なお, 本研究は平成元年度文部省科学研究費(一般研究 C)の援助の下に行ったことを付記し, 感謝の意を表す。最後に, 日ごろ研究を行うにあたり, 多大な御教示をいただいている八戸工大能登文敏教授, また, 本研究に対し, 討論および援助下された秋田大学電気工学科高橋重雄技官, 同電気工学科 4 年生吉澤尚幸(現, 宇都宮県庁), 秋田高専電気工学科 5 年佐藤 亨(現, 日本電気ソフトウェア(株)), 柴田秀一

[現, 沖電気工業(株)]の諸君, 更に試料を提供下された藤倉電線(株), (株)アドバンテストの関係各位に厚くお礼申し上げる。(平成 2 年 2 月 23 日受付)

文 献

- (1) 電気学会技報(I部), No. 100 (昭 46)
- (2) 柳原・吉村・能登: 「画像処理によるトリー進展及び形状の自動計測システムの開発」, 電学論 A, 108, 139 (昭 63-4)
- (3) M. Yanagiwara, N. Yoshimura & F. Noto: "Development of Automatic Measurement System for Growth and Shape of Tree by Image Processing", 2th ICPADM, L-08, p. 499 (1988)
- (4) 中村・南: 科学計測のための画像データ処理インタフェース, No. 137 (昭 63)

柳 原 昌 輝 (正員)

昭和 19 年 1 月 5 日生。41 年 3 月秋田大学鉱山学部電気工学科卒業。同年 4 月秋田工業高等専門学校電気工学科助手, 49 年同講師, 53 年同助教授, 現在に至る。主として, 画像処理工学の基礎と応用に関する研究, アコースティックエミッション法を用いた非破壊検査の研究に従事。計測自動制御学会, システム制御情報学会, 静電気学会会員。

吉 村 昇 (正員)

昭和 18 年 11 月 5 日生。44 年 3 月秋田大学大学院修士課程電気工学専攻修了。同年 4 月秋田大学鉱山学部電気工学科助手, 以後講師, 助教授を経て, 58 年 4 月同教授となり, 現在に至る。工学博士。電気・電子材料, 特に絶縁材料の劣化現象と絶縁破壊, 誘電体および半導体セラミックスの電気物性および電磁気工学の生物工学への応用に関する研究に従事。53 年 1 月~54 年 8 月アメリカ・クラークソン工科大学客員研究員。59 年電気学会論文賞。電子情報通信学会, 応用物理学会, 静電気学会, 日本音響学会, IEEE 会員。