Development and Disappearance of AC Trees in Two-dimensional Silicone Rubbers

Fumihiko Sugino Student Member (Ehime University)

Yuu Ogawa Student Member (Ehime University)

Haruo Ithori Member (Ehime University)

Masaharu Fujii Member (Ehime University)

Keywords : AC tree, fractal, 2-dimensional tree

The development of AC trees in two-dimensional silicone rubbers has been classified into three modes; (i) straight mode, (ii) isotropic mode and (iii) selected branch mode. The development of the trees in the isotropic mode has been investigated. The envelope curve of the fronts of the tree branches was traced and it has spread isotropically. The length from the front to the needle electrode was measured. Figure 1 shows the time dependence of the length. The tree extended with the power exponent of time. Figure 2 shows the distribution of the exponent. Thus trees spread with square root of time. This suggests the trees spread according to the diffusion law.

The difference equation of the diffusion partial differential equation suggests the mechanism of development of the trees in isotropic mode in which the next front point of the branch is determined by the local conditions/local field, which is made of the injected electrons and the polarity of the applied voltage.

The trees in silicone rubbers have disappeared after some days from applying the voltage. It depends on the dimension of the samples. Figure 3 shows the time dependence of the area of the trees in 3-dimensional and 2-dimensional samples. The tree in 3-dimensional samples disappeared faster than the tree in

2-dimension. The volume effect around the branches should be considered as the main factor.

Fig. 2. Distribution of exponent n

Fig. 1. Length of tree with applied voltage 7.5kV (Needle electrode: sewing needle)

Fig. 3. Time dependence of the area of the tree in 3-dimensional and 2-dimensional sample

2次元シリコーンゴム中に発生する交流トリーの進展と消失

学生員 杉野 文彦* 学生員 小川 優*
正 員 井堀 春生* 正 員 藤井 雅治*

Development and Disappearance of AC Trees in Two-dimensional Silicone Rubbers

Fumihiko Sugino*, Student Member, Yuu Ogawa*, Student Member, Haruo Ihori*, Member, Masaharu Fujii*, Member

The development mode of the AC tree can be classified into three modes; (i) straight mode, (ii) isotropic mode and (iii) selected branch mode. The development of the tree in diffusion mode means that an envelope of the tips of the branches spreads as diffusion. This development has been considered. An AC tree in silicone rubber sample has disappeared after applied voltage. Behavior of the disappearance of trees is different in 2-dimensional (2-D) and 3-dimensional (3-D) sample in which needle electrode system was set up. The branches of 2-D tree are survived longer than the branches of the 3-D tree.

キーワード：交流トリー，フラクタル，2次元トリー

Keywords : AC tree, fractal, 2-dimensional tree

1. はじめに

現代社会において電力は必要不可欠なエネルギーであり、安定供給を考えた場合、絶縁技術は重要かつ必須なものになっている。特に絶縁材料は電力ケーブル等において、非常に重要な役割を果たしている。絶縁物には気体、液体、固体などの様相があり、その中で分岐を持つ絶縁破壊が存在し、固体の場合、トリーイング劣化と呼んでいる。トリーは今までに多くの研究がなされてきたが、その発生や進展機構には多くの不明な点がある、また実用の絶縁材料では微妙なボイドや電極の突起などの絶縁欠陥に関係してトリーが発生することが知られている。そのため、絶縁診断や耐トリーイング性の向上など多くの研究がなされている。筆者らはトリーの形状に注目して、フラクタル次元解析を行ってきた。トリーはマルチフラクタルな性質を示すことが分かり、場所の情報を含む局所フラクタル次元解析がトリーの進展予測に有用であるとしてトリー進展現象を調べてきた⁽¹⁾。

一般にトリーは3次元試料内で発生するものであるが、交流を印加した場合に発生するトリーは非常に細かい枝を多く有するため、トリーの形状観察は非常に難しくなる。そこで強制的に2次元進展をさせて、トリーの進展と形状の変化を調べた。この場合、進展は3つのモードに分類されることが分かった：(i)直線的成長モード、(ii)等方的成長

モード、(iii)1つの選ばれた枝の成長モード。すなわちトリーは発生時、ほとんど枝分かれすることなく直線的に成長し(i)、枝分かれが始まるとトリーの枝は等方的に広がるように成長し(ii)、ある程度枝が対向電極に進展した時、1つの枝が選択的に選ばれ他の枝に比べ優先的に成長し、フラッシュオーバーにいたる。

またシリコーンゴム中に発生するトリーは発生後しばらくすると消失することが知られ、絶縁性の自己回復といったものが期待されているが、消失の詳細は未だ不明な点が多い⁽²⁾。

本研究ではシリコーンゴムを2枚のガラスで挟み、強制的にトリーが2次元成長する様にした試料を用いた場合の交流トリーの進展と消失について調べた。その消失過程を3次元試料と2次元試料を用いて比較検討した。また、進展モード(ii)の等方的成長の場合について実験考察している。

2. 実験方法

試料としてシリコーンゴム（信越シリコーン KE-1935A, KE-1953B）を用い、3次元と2次元形状のものを作成した。3次元試料の形状を Fig. 1 に示す。3次元試料は底面に対して針電極が垂直に固定できるように加工した容器に真空脱気したシリコーンゴムを流し込み、もう一度真空脱気し、その後80℃で4時間加熱して硬化させて作製した。針電極としてかず針5号（径0.71mm）を電解研磨したものを用い、ギャップ長は1.0mmとした。この試料をシリコーンオイル中の真鍮平板上に置き電圧を印加した。

2次元試料の形状を Fig. 2 に示す。2次元試料は電極をスベ

* 愛媛大学
〒790-0812 松山市文京町3
Ehime University
3 Bunkyo-cho, Matsuyama 790-0812

Fig. 1. 3-D silicone rubber sample.

Fig. 2. 2-D silicon rubber samples.

ーサとして、スライドガラス間に脱気したシリコンゴムを流し込み、電極が試料内に埋め込まれたものとなっている。Fig. 2(a)に針電極として鉄線（径 0.1mm）を用いたものを示す。この場合、対向電極も同じ鉄線を用いた。Fig. 2(b)は針電極として 3 次元試料と同じ針電極を用いたもので、この場合、対向電極としてアルミ板を用いた。このとき針電極固定用としてテフロンシートを用いた。また、ギャップ長はともに 1.0mm とし、試料厚さは(a)が 0.1mm, (b)が 1.0mm とした。印加電圧は交流で一定電圧とした。電圧値

は 7.5kV から 11.25kV の範囲で、0.75kV きざみとした。この時のトリー進展状況を調べた。

2 次元試料と 3 次元試料を用いてトリーの消失について調べた。また、シリコンゴムの架橋度を変化させた 2 次元試料についても実験を行った。

試料はシリコンオイル中に浸し、電圧を印加した。トリーの進展過程はズーム鏡付 CCD カメラを用いてモニターで観測し、ビデオに記録するとともにコンピュータに取り込んだ。

3. 実験結果および考察

〈3・1〉 交流トリーの進展 2 次元試料で、一定交流電圧を印加した場合、トリーははじめ直線的に進展し、その後枝分かれ進展する。7.5kV の場合、フラッシュオーバーに至る場合とトリー進展が止まる場合があった。印加電圧を 11.25kV まで上げたが、現象は同じで、トリーは始めに直線状に、そして等方向的に、最後にある枝が急速に伸び、フラッシュオーバーに至った。はじめに生じる直線状のトリーはその後枝分かれトリーとは少し形態が異なり、径の太いものである。この後に生じるトリーが等方的に成長するので、トリー先端の包絡線を考え、この拡がり方について調べた。

Fig. 3 は電極にかす針を用いたもので一定電圧 7.5kV 下での進展にとりもった包絡線を示す。(a)~(e)はそれぞれ印加開始 1.3.5.10.15 秒後で(f)にそれを重ねたものを示す。多少のばらつきはあるが対向電極方向に対して等方的あるいは同心円状的進展をしていることが分かる。そこで針先から一番対向電極側に伸びているトリーを最長トリーとした。Fig. 4 は Fig. 3 の最長トリーの進展状況を両対数表示したものである。時間はトリーが等方成長しはじめてからの時間である。トリーはこの場合一様に進展していることが分かる。図中には参考までに $x \propto t^{1/2}$ の線を入れてある。今トリーの長さを X として考えると、 $dX \propto (dt)^n$ 、他の電圧の場合についても、その進展具合を調べた。 n のパラッキを Fig. 5 に示す。 $n=1/2$ の場合が多いことが分かる。 $n=1/2$ の場合(1)式は一般化したウィナー過程⁽³⁾

$$dX = a \cdot dt + b\sqrt{dt} \dots\dots\dots (1)$$

で、第 1 項のドリフト項がない場合に対応する。この場合この式は拡散方程式となる。

拡散方程式の位置の 2 乗平均が時間の 1/2 乗に比例することから、この等方的拡がりとは拡散的な拡がりと考えられる。

2 次元の拡散方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} P(x, y, t) = D \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) P(x, y, t) \dots\dots\dots (2)$$

を差分化して考えると、

$$P_{i,j,t+1} = D \frac{\Delta t}{h} (P_{i+1,j,t} + P_{i-1,j,t} + P_{i,j+1,t} + P_{i,j-1,t} - 4P_{i,j,t}) + P_{i,j,t} \dots\dots\dots (3)$$

となり、ここで、 P は電位勾配、 D は拡散係数、 h は x, y

Fig. 3. Isotropic development of tree and its envelope.

Fig. 4. Length of tree in applied voltage 7.5kV.

軸の刻み幅を示す。そしてこれは Δt 後の値はその前の時間のその周囲からの寄与から決まることを示している。

トリーの進展について考えると、交流トリーの先端では、同心円状的進展をしている時は、電荷の注入とその後の印加電圧の極性反転が中に作る局所電界はほぼ一定であるため、どの先端でもその周辺状況が次の進展を決め、その周

Fig. 5. Distribution of exponent n .

Fig. 6. Development of tree fallen under local electrical field.

辺状況は同じとなり、それが次の進展確率を同じとするため、結果的にトリーは等方的に（あるいは拡散的に）成長すると考えられる。よって拡散係数はここでは一定として考えている。トリーがさらに進展すると、トリー先端の局所電界よりも対向電極との広域的な電界が支配的となり、あるトリー枝がその領域に達した場合選択的に成長し、フラッシュオーバーに至ると考えられる。

Fig. 6 は電極に鉄線を用いたもので、トリーが針電極以外からも進展した場合のものである。図中丸で示したように必ずしも対向電極に向かって進展していない。これは局所的な電界のためと考えられる。また、対向電極とは逆方向に進展するトリーも見られた。

〈3・2〉 トリーの消失 トリーの消失については 3 次元試料と 2 次元試料を用いて調べた。Fig. 7 に 3 次元試料でのトリーを示す。(a)は印加直後、(b)は 24 時間後である。Fig. 8 には針電極、対向電極ともに鉄線を用いた 2 次元試料でのトリーを示す。(a)は印加直後、(b)は 3 週間後、(c)は 15 週間後のものである。トリーは消滅しているが、2 次元のものに比べ 3 次元のものが早く消失した。Fig. 9 に消えていく割合を図示した。2 次元、3 次元ともに消失量を観察した方向に

Fig. 7. Disappearance of 3-D tree.

Fig. 8. Disappearance of 2-D tree.

Fig. 9. the time dependence of the area of the tree in 3-dimensional and 2-dimensional sample.

投影している。3次元のものはかなり早い段階で消失していくことが分かる。トリーの消失として2つの可能性が考えられる。空洞部が周りからの圧力/応力による消失の可能性と、シリコーンゴムの低分子がトリー内に流れ込むことに

Fig. 10. Disappearance of 2-D tree when cross-linker fraction change.

よる見かけのトリー消失が考えられる。これはトリーの枝部の周辺を考えた場合、3次元トリーの場合は全方向からの圧力/応力あるいは流れ込みが働き、2次元トリーの場合は2方向からしか圧力/応力あるいは流れ込みがないので、消失速度に違いが出たと考えられる。

流れ込みに関しては、架橋の量を変えることにより、制御できると考え、架橋剤の量を変えて実験を行った。(a)が架橋剤の多い場合、(b)が少ない場合である。Fig. 10にその結果を示す。消失の違いに大きな変化はなかった。

4. まとめ

シリコーンゴム中に交流電圧を印加してトリーを発生させ、トリーの進展機構、トリーの消失について考察した。

交流トリーの等方的な進展について考察した。トリー先端の包絡線を考え、その拡がりについて調べた。拡がり時間は時間のほぼ1/2乗に比例して成長していることが分かった。これから拡散的な広がりが示唆され(トリー先端のどの位置でも一定となる)、局所的な電界が支配的であるために起きている可能性があることが示された。

3次元トリーの消失と2次元トリーの消失の速度を比較した場合、2次元トリーの消失が遅いことが分かり、次のような消失モデルを考察した。

2次元トリーより3次元トリーの方が早く消失する理由として、トリーにかかる応力 or トリー管を潰そうとする力が2次元は2方向から、3次元は3方向からかかっているためだと考えられる。またトリーへの低分子シリコーンゴムの流れ込みも考えられるが、架橋剤の違いによる変化はあま

り見られなかったため、トリーにかかる応力 or トリー管を潰そうとする力による可能性の方が高いと考えられた。

(平成 19 年 7 月 24 日受付, 平成 19 年 9 月 20 日再受付)

文 献

- (1) M. Fujii, S. Ohmori, H. Ihori, and K. Arie : "Analysis of Development of Electrical Tree in Silicon Rubber using Local Fractal Dimension", Proc. of the 7th ICPADM, pp.879-882 (2003)
- (2) R. Takeuchi and J. Kusakawa : "Electrical Breakdown in Silicone Gel", Proc. of the 32nd Symposium on Electrical and Electronic Insulating Materials and Applications in Systems, pp.45-48 (2000)
- (3) 石村貞夫・石村園子 : 金融・証券のためのブラック・ショールズ微分方程式, 東京図書 (1999)

杉 野 文 彦

(学生員) 1985 年 2 月 21 日生。現在, 愛媛大学大学院理工学研究科博士前期過程機能材料工学コース在学中。トリーの進展機構に関する研究に従事。

小 川 優

(学生員) 1983 年 3 月 11 日生。現在, 愛媛大学大学院理工学研究科博士前期過程機能材料工学コース在学中。トリーの進展機構に関する研究に従事。

井 堀 春 生

(正員) 1968 年 3 月 25 日生。1992 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, 新浜工業高等専門学校電気工学科助手。1995 年 4 月, 愛媛大学工学部電気工学科助手, 現在同大学大学院理工学研究科准教授。博士(工学)主として誘電体中の電界・電荷測定, 光学計測に関する研究に従事。応用物理学会, IEEE 会員。

藤 井 雅 治

(正員) 1954 年 12 月 23 日生。1979 年 3 月広島大学大学院工学研究科博士課程前期材料工学専攻修了。1979 年 6 月愛媛大学工学部電気工学科助手, 現在, 同大学大学院理工学研究科教授。博士(工学)。主として, 導電性高分子, トリー, 誘電体に関する研究に従事。日本物理学会会員。