

電気トリーの3次元構造解析

Three-Dimensional Structural Analysis of Electrical Tree

岩田 晋弥*

Shinya Iwata

(2015年6月22日 受理)

Polymers have been used widely for electrical insulation. However, polymers' insulating performance degrades when they are used for a long time under a high alternating electric field or electrostatic field. Eventually, electrical breakdown occurs. Electrical treeing, a pre-breakdown phenomenon, is a main reason for the electrical insulation degradation of polymers. This paper presents results of three-dimensional structural analysis of electrical treeing in epoxy resin using X-ray computed tomography (X-CT) and dielectric breakdown numerical calculation.

Key Words: electrical tree, electrical breakdown, X-ray computed tomography, dielectric breakdown model

1. はじめに

高分子材料はその優れた電気絶縁性により、電力ケーブル、電気機器、電子デバイス等に幅広く利用されている。しかし、近年では機器の小型化や高電圧駆動化が進み、使用される環境も多様化しており、従来以上に厳しい条件下でも安全に長期間使用できる電気絶縁材料の開発が求められている。一般的に、絶縁材料は体積抵抗、絶縁破壊強さ、部分放電、雷インパルス、電気トリー等によって評価が行われ、その信頼性や寿命が検討される。本研究では、絶縁破壊の前駆現象である電気トリーに着目し、3次元的な構造解析と描画シミュレーションを行った。

電気トリーは、高分子を中心とした絶縁材料に高電圧を印加したときに、内部に生じる部分的な破壊現象であり、部分放電とともに絶縁破壊の前駆現象として知られている。電気トリーの発生は、潜伏期、発生・進展期の二段階に分けて考えることができる。潜伏期では、材料内での電荷蓄積や化学結合の変化が進み、発生・進展期では破壊が生じる。電気トリーの発生条件や進展後の形状の調査は、材料の絶縁性を評価

する上で重要であり、1950年前後から研究が進められている^{1,2)}。電気トリーは自己相似形を有しているため、形状評価にはフラクタル次元を用いて解析することができる³⁻⁶⁾。また、DBM (Dielectric Breakdown Model) やDLA (Diffusion Limited Aggregation) モデルによって計算機シミュレーションができる⁷⁻¹⁰⁾。DBMはLaplace方程式に基づく電位から高分子の破壊確率を算出することで、電気トリーの進展を確率論的に表現する。

これまでの研究の多くは、観察実験、計算機シミュレーションともに電気トリーを2次元的に扱ってきた。しかし、電気トリーは3次元的な広がりを持ち、その内部構造も未解明な点が多い。また、近年では複合材料を電気絶縁材料として用いる傾向があるが、そのような物質中での電気トリーの進展は、均一な物質と比較してより複雑になると考えられる。

1.1 研究の目的

上記のような背景を踏まえ、本研究の目的を以下のとおりとした。

- ・高分子に発生した電気トリーを1 μm オーダーの空間分解能で観察し、3次元的な構造評価を行う。
- ・DBMモデルに基づく計算機シミュレーションにより3次元的に電気トリーを描画する。

* 製品信頼性科

2. 方法

本研究ではエポキシ樹脂に電気トリートを発生させた。発生させた電気トリートは、X-CT(X-ray Computed Tomography)によって撮影し、3次元再構成を行った。また、再構成データを元に、電気トリートの体積を算出し、3次元フラクタル次元を導出した。DBMシミュレーションと合わせて、以下に研究手法の詳細を述べる。

2.1 試料

試料はビスフェノール A 型のエポキシ樹脂を使用した。Fig. 1 に示すように、電気トリート発生用の針電極を挿入した状態で硬化させた。針電極の先端から対向電極までの距離は 2 mm である。試料の大きさは、沿面放電が生じないように決定した。

2.2 電気トリート発生実験

電気トリート発生実験には東京変圧器製 20 kVA 100 kV 交流高圧発生装置を用いた。装置の外観を Fig. 2 に示す。試験規格 ASTM D3756-97 (2010) を参考にし、大気中において交流電圧 (20 kV, 60 Hz) を 60 分間印加し電気トリートを発生させた。電圧上昇速度は 1 kV/sec とした。

2.3 電気トリートの観察

電圧印加後、目視や光学顕微鏡観察によって電気トリートの発生を確認できる。しかし、電気トリートは 3 次的に進展しているため、形状や長さを定量的に評価することは難しく、内部構造に関する情報もほとんど得られない。そこで本研究では、エポキシ樹脂に発生させた電気トリートを SPring-8 BL20XU における X-CT 装置^{11, 12)}によって断層を撮影し 3 次元再構成した。検出器は、Beam Monitor AA50 および ORCA FLASH 4.0 を用いた。試料ステージの写真を Fig. 3 に示す。試料ホルダーから検出器までの距離は約 10 mm とした。その他の測定条件を Table 1 に示す。視野は 1 mm、空間分解能は 1.5 μm を得た。撮影した断層画像は、可視化・解析ソフト VGStudio を用いて 3 次元再構成した。

2.4 DBM シミュレーション

電気トリートはフラクタル構造を有しており、DBM や DLA モデルによってシミュレーションする方法が知られている。本研究では、DBM を用い電気トリートの 3 次元描画を行なった。描画シミュレーションに用いた格子モデルを Fig. 4 に示す。図中の太線が針電極から発生した最初の電気トリートを示し、その点 (i) からトリートが進展する。点 i における破壊候補点 j は、図中の点 1~5 である。点 i では電位を $\phi_i = 1$ とし、破壊候補点のポテンシャル ϕ_j を Laplace 方程式に基づい

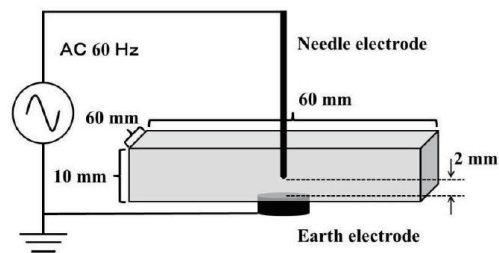


Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup for electrical treeing test.



Fig. 2 High voltage generator.

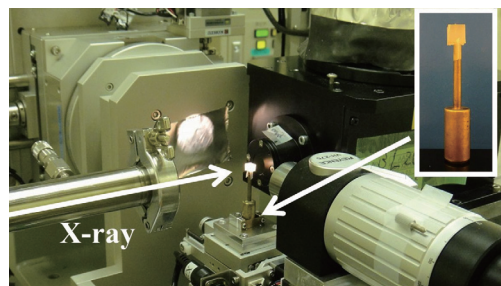


Fig. 3 Sample stage of BL20XU.

Table 1 Measurement parameters

X-ray energy	12.4 keV
Exposure time	150 ms/frame
Rotation speed	1.1 degree/s

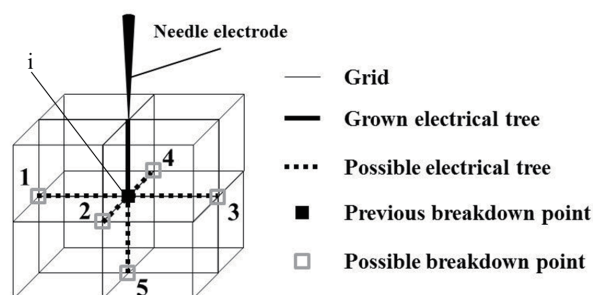


Fig. 4 Schematic illustration of tree propagation by DBM.

て算出する。ただし、針電極とトリーでは $\phi = 1$ 、対向電極とでは $\phi = 0$ としている。さらに、点 i から点 j への破壊確率 $P_{(i,j)}$ を以下の式 (1) を用いて算出する。

$$P_{(i,j)} = \phi_j^\eta / \sum \phi_j^\eta \quad (1)$$

ここで、 η は形状パラメータであるが、 $\eta = 1$ の場合は DBM と DLA は等価である⁹⁾。本研究では $\eta = 1$ とした。式 (1) で求めた確率を重みとして、最終的な破壊点をランダムに決定し、枝の分岐を作る。この計算を繰り返すことによって、電気トリーが形成される。アルゴリズムの構築と描画には、Visual C++ および gnuplot を用いた。

2.5 フラクタル次元の導出

電気トリーは自己相似形を有するため、フラクタル次元によって解析することができる。これまで報告された研究の多くが 2 次元的な解析であり、3 次元的にフラクタル次元を求めた例は少ない。本研究では、2 次元的な解析例を参考とし、3 次元におけるフラクタル次元を定義する。Fig. 5 に示すように、電気トリーを包含する立方体を規定し、その一片の長さを l とする。また、立方体が内包する電気トリーの体積を V とし

$$d_f = \ln V / \ln l \quad (2)$$

によって表される d_f をフラクタル次元と定義した。X-CT および DBM によるシミュレーション結果に対して、同様の手法で解析した。

3. 結果

3.1 電気トリーの再構成画像

Fig. 6 にエポキシ樹脂に発生した電気トリーの 3 次元再構成画像を示す。一般的に、電気トリーは形状の特徴から、樹枝状トリー (branch type tree) とブッシュ状トリー (bush type tree) に分類することが多いが、Fig. 6 で得られたものは典型的な樹枝状トリーと考えられる。また、Fig. 7 にトリーの断層画像の例を示す。同図から分かるように、太さ $5 \mu\text{m}$ 程度の枝から約 $3 \mu\text{m}$ の枝が分岐している様子が撮影できた。3 次元再構成したデータでは、任意の断層面を抽出できるため、トリーの内部構造やポイドの分布を確認することもできる。また、コントラストを定義することにより、トリーの体積を求めることも可能である。

3.2 電気トリーのシミュレーション

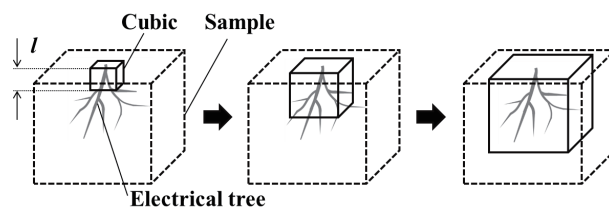


Fig. 5 Schematic illustration of definition of a fractal dimension.

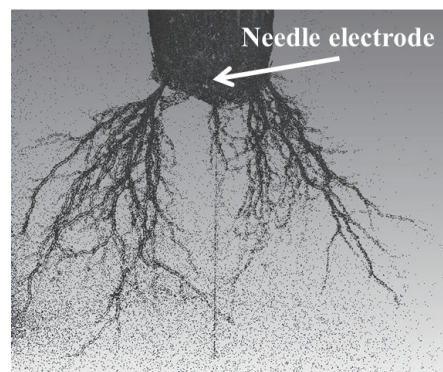


Fig. 6 Reconstructed image of electrical tree.

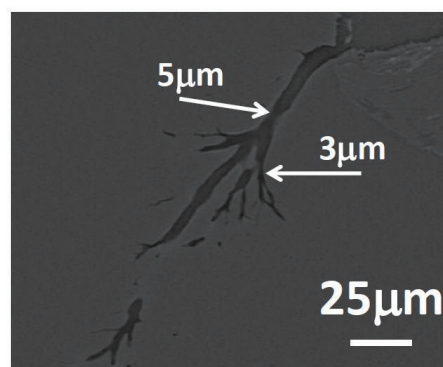


Fig. 7 Tomographic image of electrical tree.

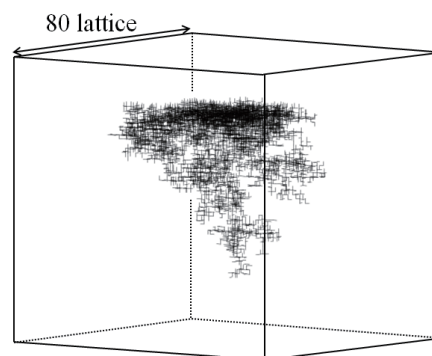


Fig. 8 Simulated structure of electrical tree by DBM.

DBM に基づく電気トリーの描画を Fig. 8 に示す。針電極の先端から、対向電極に向かってトリーが成長している様子を再現した。得られたデータを元に、フラクタル次元を算出することができる。

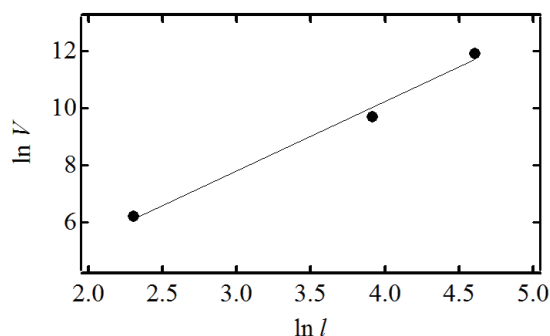


Fig. 9 $\ln V$ versus $\ln l$. The solid line is regression line. The slope corresponds to the fractal dimension.

4. 考 察

Fig. 6 で示した電気トリーの再構成データを用い、Fig. 5 に示した手法によってフラクタル次元を解析した。電気トリーを囲む立方体の一辺の長さ l と電気トリーの体積 V の関係は Fig. 9 のようになる。同図より傾きを求めるとフラクタル次元となり、この場合 2.4 となった。一方、同様の手法で Fig. 9 の電気トリーのフラクタル次元を求めると 2.4 となり実験結果と良い一致を示した。本研究の DBM では、均一な材質であることを前提としており、絶縁破壊が針電極から対向電極へ向かって、等方的に進展している。実験で用いたエポキシ樹脂においても、フィラー等の添加物によるトリー進展のブロックが無い¹³ため、対向電極へ向かって樹枝状に進展している。

5. まとめと今後の展望

電気トリーを X 線 CT によって断層撮影し再構成することで、これまでにない高空間分解能で 3 次的に観察・評価することができた。また、DBM に基づく確率論的な描画シミュレーションプログラムを構築し、3 次的に電気トリーを描画した。

電気絶縁材料の分野では、高分子材料のコンポジット化が検討されているが^{13, 14)}、電気トリーの進展に関しては未解明な点が多いため、本手法を活用したい。また、絶縁破壊現象と分子レベルでの材料特性に関する

研究も進められ、量子化学計算による分析や分子設計が注目されている^{15, 16)}。今後は、分子サイズでの絶縁破壊現象、電気トリー発生に関する考察を進めたい。

6. 謝 辞

本研究は JSPS 科研費 26630337 の助成を受けたものである。X-CT 実験は SPring-8 課題採択 (No.2014A1511) を受けたものである。

参考文献

- 1) J. H. Mason: Proceedings of the IEE - Part I General, **98** (1951) 44.
- 2) D. W. Kitchin and O.S. Pratt: Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, **81** (1962) 112.
- 3) L. Niemyer, L. Pietronero and H. J. Wiesmann: Phys. Rev. Lett., **52** (1984) 1033.
- 4) J. C. Fothergill, L. A. Dissado and P.J.J. Sweeney: IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., **1** (1994) 474.
- 5) L. A. Dissado, S. J. Dodd, J. V. Champion, P.I. Williams and J. M. Alison: IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., **4** (1997) 259.
- 6) K. Kudo: IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., **5** (1998) 713.
- 7) J. L. Vicente, A. C. Razzitte, M. C. Cordero and E.E. Mola: Phys. Rev. E, **57** (1998) R1.
- 8) L. A. Dissado, J. C. Fothergill, N. Wise and J. Cooper: J. Phys. D: Appl. Phys., **33** (2000) L109.
- 9) I. M. Irurzun, P. Bergero, V. Mola, M. C. Cordero, J.L. Vicente and E. E. Mola: Chaos, Solitons & Fractals, **13** (2002) 1333.
- 10) P. L. Dammig Quina, L. Herrera, I. M. Irurzun and E. E. Mola: Comput. Mater. Sci., **44** (2008) 330.
- 11) Y. Suzuki, K. Uesugi, N. Takimoto, T. Fukui, K. Aoyama, A. Takeuchi, H. Takano, N. Yagi, T. Mochizuki, S. Goto, K. Takeshita, S. Takahashi, H. Ohashi, Y. Furukawa, T. Ohata, T. Matsushita, Y. Ishizawa, H. Yamazaki, M. Yabashi, T. Tanaka, H. Kitamura and T. Ishikawa: AIP Conf. Proc., **705** (2004) 344.
- 12) K. Uesugi, M. Hoshino, A. Takeuchi, Y. Suzuki, and N. Yagi, Proc. SPIE, **8506** (2012) 850601I.
- 13) 電気学会技術報告, 第 1051 号 (2006)
- 14) 電気学会技術報告, 第 1148 号 (2009)
- 15) T. Takada, T. Ishii, Y. Komiyama, H. Miyake and Y. Tanaka, IEEJ Trans. FM, **132** (2010) 1151.
- 16) T. Takada, T. Ishii, Y. Komiyama, H. Miyake and Y. Tanaka, IEEJ Trans. FM, **133** (2013) 313.