

令和元年6月25日現在

機関番号：84431

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K18441

研究課題名(和文)電気構造複合破壊のミッシングリンク - 破壊エネルギー評価による電気トリートリー進展制御

研究課題名(英文) Evaluation of complex relationship between electrical and mechanical breakdown in terms of energy potentially causing or blocking electrical tree and breakdown

研究代表者

木谷 亮太 (KITANI, Ryota)

地方独立行政法人大阪産業技術研究所・和泉センター・研究員

研究者番号：90761619

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：破壊を抑制するのに有効な電気絶縁材料の構造を探索するため、次の研究を実行した。機械強度に異方性をもつ材料を3Dプリンタで作製し、積層方向ごとの電気絶縁性を、外力の有無による違いごとに評価した。次に、バルク樹脂試料に生じた電気トリートのX線CTを撮影した。また、電流積分計による計測と等価回路モデルの作成を行い、バルク樹脂材料に蓄積・貫通するエネルギーの評価方法を検討した。成果は次の通りである。(a)電気絶縁材料の構造と材料に作用する力が絶縁性に及ぼす影響についての知見(b)絶縁材料設計に活用可能なトリートリー3Dモデル(c)電気絶縁材料劣化時の電荷特性経時変化からエネルギーを算出するための基礎モデル

研究成果の学術的意義や社会的意義

機械的特性を考慮して電気絶縁性を向上させる材料構造・作製方法についての知見は、電気絶縁のみならず物質の破壊現象の理解そのものに深く関わっており、学術的な意義が大きい。また、破壊箇所に関する有用な解析モデルは、電気絶縁設計に利用することで、安全かつ高性能な電気機器づくりに資するものであり、同様に電流積分計によるエネルギー評価方法の基礎を構築したことは、新たな電気設備劣化の診断手法に資するものである。いずれも近年のスマートグリッド・電気自動車等によってもたらされる電気利用方法の変革に対応するために必要不可欠な技術基盤となると期待される。

研究成果の概要(英文)：We conducted studies as follows to search the structure of insulation materials to suppress electrical and mechanical breakdown. First, we made polymeric additive manufacturing samples which have anisotropic mechanical strength so that we evaluated the insulating ability of each ones, which have the difference of the additive directions, under conditions of the presence and absence of outer force. Second, we obtain the X-ray Computer Tomography of bulk resins inside which have an electrical tree. Finally, by measuring bulk resins and proposing an equivalent model, we consider the method of evaluating energy penetrate/accumulated-in the resins. The results are as follows. (a)The knowledge of the effect to insulation ability caused by the structure of an insulator and force working inside it. (b)3D-model of a sample with electrical tree which is available for designing insulators. (c)A basic model to estimate energy flow when an insulator is deteriorated and charging properties are given.

研究分野：材料工学

キーワード：電気絶縁材料 破壊 材料力学 トリートリー 電流積分計 電荷

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年では電力利用のあり方が急激に多様化している。そのため直流高圧送電、スマートグリッド、パワーモジュールやモーター等に用いるために、信頼性の高い電気絶縁材料の開発が必要となっている。しかし、急激に進んでいる絶縁材料の高性能化への需要から、材料は複合化や多層化が進み、構造が複雑になってきており、従来では想定できない破壊の進展が見受けられるようになった<sup>[1]</sup>。電気絶縁材料が破壊に至る主な原因として、材料への高電界印加による電氣的破壊と機械的破壊が挙げられる。実材料の設計においては、材料の電氣的破壊のみならず、材料の機械的破壊についても考慮する必要がある。特に破壊前駆現象(電気トリー)を経て、材料が破壊に至る過程については、過去にも多くの研究が行われている。しかし、電氣的破壊と機械的破壊は別々の指標をもって独立に考えられ、依然として未知の部分が多く残されている。そこで、電氣的破壊と機械的構造(欠陥)との関係について調査し、破壊を抑制し得る有効な材料構造を検討する。

### 2. 研究の目的

本研究では、機械的構造と電気絶縁性が互いに与える影響を明らかにするため、種々の評価方法を検討・考案すること、および評価結果から破壊を抑制し得る有効な材料構造について提言することを目的とする。特に、材料の破壊時には材料内に蓄えられたエネルギー量が変化するという仮定のもとで、次の3点に着目し、研究を進めた。

- (1) 機械的構造(欠陥)がもたらす絶縁破壊強度の違いとその原因
- (2) 電気トリーが入った材料の破壊形態(X線CT)
- (3) 電気トリーが入った材料の電荷特性(電気材料に蓄えられる電荷の評価モデル開発)

### 3. 研究の方法

(1) 構造異方性をもつ材料を3Dプリンタで作製し、積層方向ごとの電気絶縁性を高電圧試験によって評価した。また材料が持つ自由体積の形状を考慮し、上記絶縁材料に対して材料内空隙形状を変えられるような大きな応力を加えた場合の電気絶縁性変化についても評価した。

波打つ表面を持つ樹脂材料の表面フラッシュオーバーについて評価するため、表面形状と放電開始電圧との関係に着目し、材料表面近傍における放電開始電圧の形状依存性を検討した。

(2) 電気トリーが発生した樹脂試料について、X線CTを撮影し、トリーの形状データを取得した。さらに、電気トリー試験後にシャルピー試験に供した試料の破断面近傍を観察した。

(3) 電流積分計を用いて、高電圧印加時のバルク樹脂材料の電荷量の時間変化を測定した。また、計測をあらわす等価回路モデルを作成後、回路方程式を解くことで、電流積分計に蓄積されるエネルギーの評価方法を考案し、材料近傍の電荷特性を評価した。

電気トリーが発生した樹脂材料と未発生した樹脂材料について、電流積分計による電荷量の時間変化の計測を実施し、樹脂試料の劣化による電流積分計内の積分コンデンサへの電荷蓄積傾向の変化を検討した。

### 4. 研究成果

(1) 積層造形によって構造異方性を持つ材料について、積層方向ごとおよび外力の有無ごとに電気絶縁性を絶縁破壊試験によって評価した結果を図1に示す。積層方向によって絶縁破壊強度に差が出ていることから、積層方向よりも応力による材料変形が絶縁破壊に影響を与えている可能性が示された<sup>[2]</sup>。また、樹脂材料の表面フラッシュオーバーについては、波打つスリット形状に対し、スリットの筋に平行な方向は放電開始電圧が低く、垂直な方向は放電開始電圧が高いという結果が得られた<sup>[3]</sup>。以上の研究成果は、材料表面と内部両方の機械的構造を考慮した絶縁材料設計の指針として活用できる。

(2) 得られた3次元電気トリー像について、図2(a),(b)にそれぞれ結晶性高分子樹脂(ポリエチレン、白色半透明)および熱硬化性高分子樹脂(エポキシ、無色透明)の画像を示す<sup>[4,5]</sup>。これらについて、ノイズ除去後、メッシュ化処理を行い、電界解析・構造解析等に用いることができる3Dモデルを作成した。これにより、電気トリーの進展に関する種々の解析を実施できるようになった。

(3) 今回提案した電流積分計による計測をあらわす等価回路モデルを図3に示す。このモデルは、絶縁材料の電気抵抗・静電容量を考慮し、計測回路全体をモデル化したものである。計測方法について、エポキシ樹脂を硬化させる際に針2本を先端同士向かい合わせにして針-針対向電極としてセットし、これを試料とした。試料に直流電源と電流積分計を直列に接続して直流高電圧を印加した。計測結果と等価回路モデルの計算結果を比較したものを図4(a)に、得られた計算結果とモデルを利用し試料側の電荷量の推定を行った結果を図4(b)に示す。この結果に基づき、材料の性質をそつなく表現できる回路定数や変数を含んだ回路特性を仮定することで、材料に蓄えられる静電エネルギーが求められるようになると考えられる。本結果は、例えばトリーなどの破壊前駆現象が進展するに従い電流積分計への電荷蓄積速度や電荷蓄積量が大きくなる場合には、電気抵抗や静電容量などに相当する回路特性について、変化の可能性を示唆している<sup>[6]</sup>。

これまでに、機械的構造と電気絶縁性が互いに与える影響を明らかにし、破壊を抑制し得る有効な材料構造について提言するため、材料評価方法に関する研究を鋭意実施した。特に、材

料の破壊時には材料内に蓄えられたエネルギー量が変化するという仮説に基づき、研究を展開した。その結果、(1)電気絶縁性の向上に資する構造についての知見が得られたこと、(2)破壊箇所に関する有用な解析モデルが作成できたこと、(3)電流積分計による新たなトリー進展診断手法の基礎を構築できたことが本研究の成果として挙げられる。

今後、エネルギー評価による複合破壊モデルを実用化するため、引き続き破壊の原理に関する研究を進め、実環境で用いられる各種電気機器の劣化診断・予測について検討する。

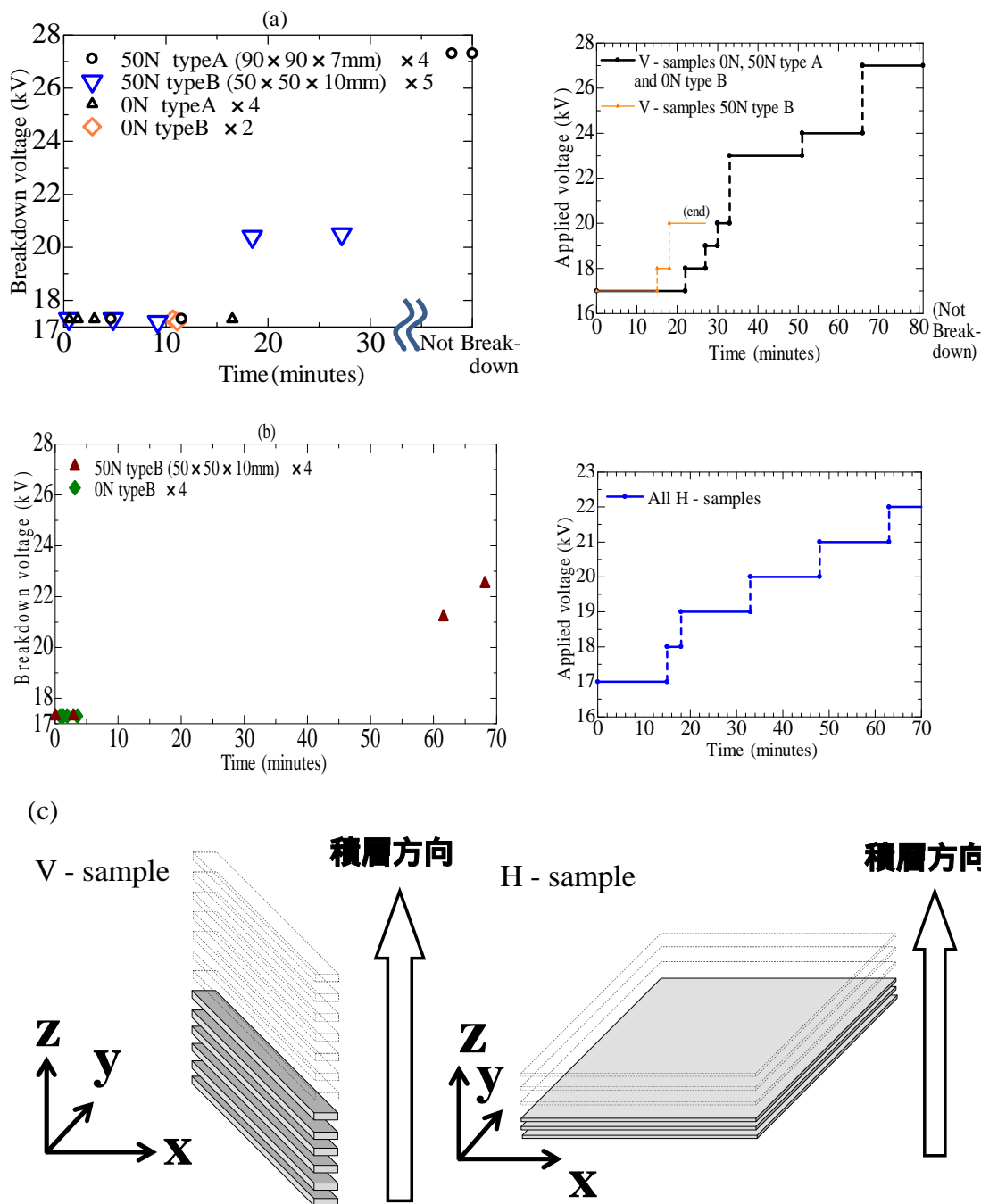


図1 応力印加時の3Dプリンタ製絶縁材料の造形方向ごとの高電圧試験結果。印加電界方向と積層方向が(a)垂直の場合、(b)水平の場合（右側の図は印加電圧履歴をまとめたもの）（雑誌論文 から引用）、(c)材料積層方向の模式図

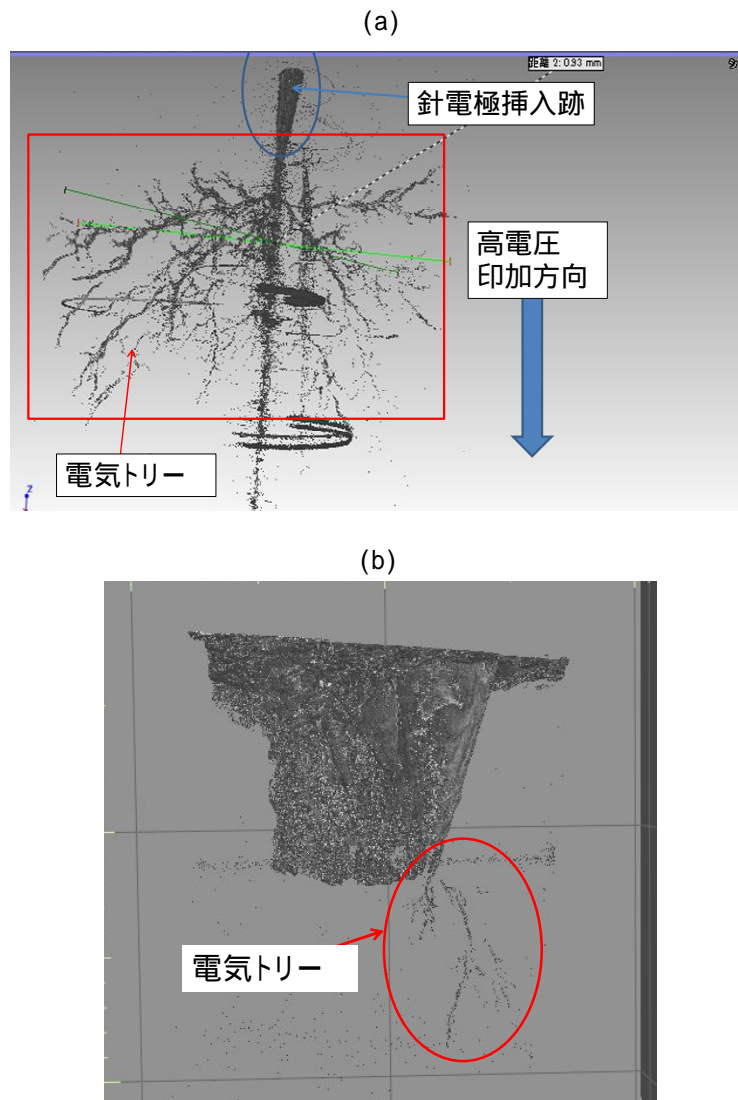


図2 電気トリーの3次元像のスナップショット  
 (a)ポリエチレン樹脂  
 (b)エポキシ樹脂  
 (雑誌論文 および に記載のものを引用。可読性のため一部改変)

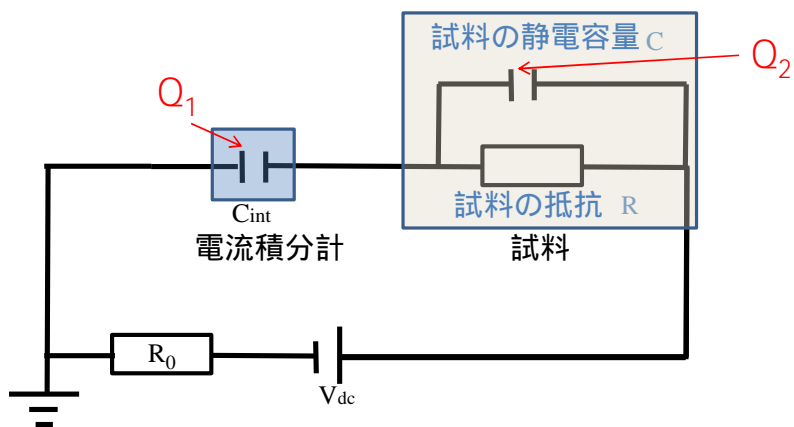


図3 電流積分計による計測をあらわす等価回路モデル

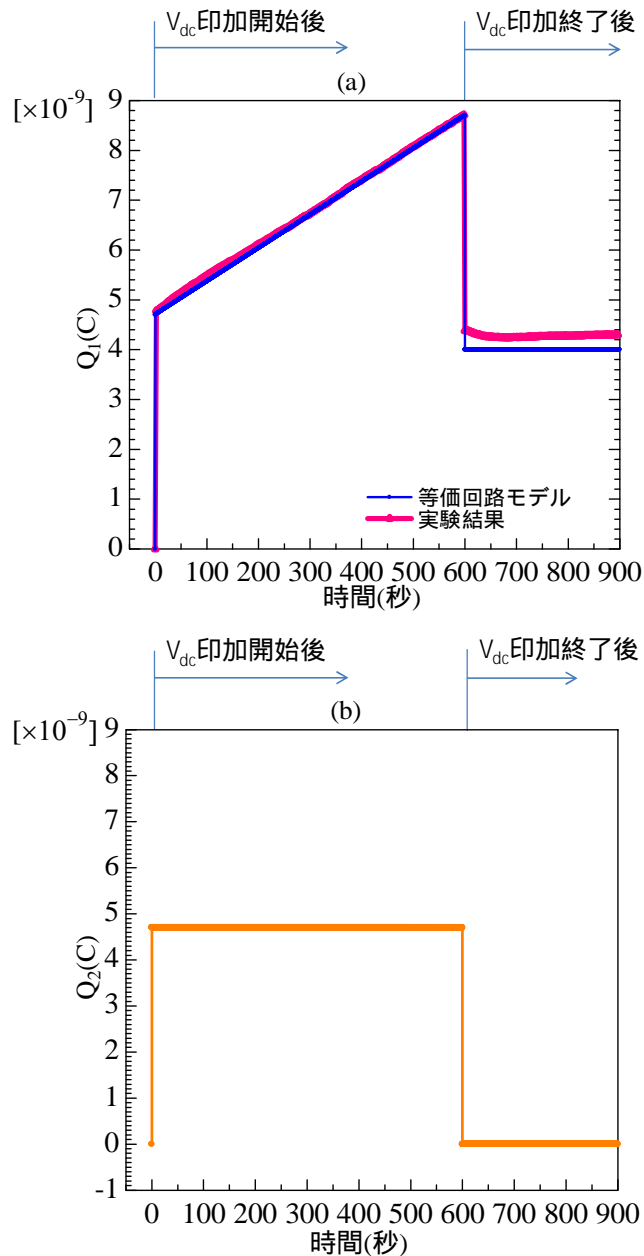


図4 電流積分計による電荷量の計測および計算結果  
 (a) 積分コンデンサ内の蓄積電荷量の実験値と等価回路モデルの数値計算結果との比較  
 (b) 等価回路モデル中の材料物性値を仮定した際の試料側の蓄積電荷の計算結果

< 引用, 参考文献 >

今井 隆浩, 澤 史雄, 尾崎 多文, 中野 俊之, 清水 敏夫, 吉満 哲夫, エポキシ樹脂のナノコンポジット化とその絶縁特性の検討, 電学論A, 2004, 124 巻, 11 号, pp.1065-1072.

Ryota Kitani and Shinya Iwata, Stress effects on the electrical degradation of additive manufactured materials, 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), 2017, vol.1, pp. 118-121, doi: 10.23919/ISEIM.2017.8088703.

Shinya Iwata and Ryota Kitani, Influence of surface roughness of additive manufacturing polymer on surface flashover voltage, Electrical Engineering, vol.100, 2017, doi: 10.1007/s00202-017-0675-3.

木谷亮太, 岩田晋弥, 絶縁材料に生じる複合的電気破壊痕の3次元観察, SPring-8 User Experiment Report, 2018, <https://user.spring8.or.jp/apps/experimentreport/detail/22791/ja>.

木谷亮太, 岩田晋弥, 固体絶縁材料破壊痕の3次元形状観察, SPring-8 User Experiment Report, 2019, <https://user.spring8.or.jp/apps/experimentreport/detail/25012/ja>.

Shinya Iwata, Ryota Kitani and Tatsuo Takada, Diagnostic Technique for Electrical Tree by Current Integration Method, 2019 IEEE 37th Electrical Insulation Conference (EIC) (in printing).

## 5 . 主な発表論文等

[ 雑誌論文 ] ( 計 5 件 )

Shinya Iwata, Ryota Kitani and Tatsuo Takada, Diagnostic Technique for Electrical Tree by Current Integration Method, 2019 IEEE 37th Electrical Insulation Conference (EIC) (in printing), 査読有.

木谷亮太, 岩田晋弥, 固体絶縁材料破壊痕の3次元形状観察, SPring-8 User Experiment Report, 2019, <https://user.spring8.or.jp/apps/experimentreport/detail/25012/ja>, 査読無.

木谷亮太, 岩田晋弥, 絶縁材料に生じる複合的電気破壊痕の3次元観察, SPring-8 User Experiment Report, 2018, <https://user.spring8.or.jp/apps/experimentreport/detail/22791/ja>, 査読無.

Shinya Iwata and Ryota Kitani, Influence of surface roughness of additive manufacturing polymer on surface flashover voltage, Electrical Engineering, vol.100, 2017, doi: 10.1007/s00202-017-0675-3, 査読有.

Ryota Kitani and Shinya Iwata, Stress effects on the electrical degradation of additive manufactured materials, 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), 2017, vol.1, pp. 118-121, doi: 10.23919/ISEIM.2017.8088703, 査読有.

[ 学会発表 ] ( 計 2 件 )

Shinya Iwata, Ryota Kitani and Tatsuo Takada, Diagnostic Technique for Electrical Tree by Current Integration Method, 2019 IEEE 37th Electrical Insulation Conference (EIC), Calgary, 2019.

Ryota Kitani and Shinya Iwata, Stress effects on the electrical degradation of additive manufactured materials, 8th International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM), Toyohashi, 2017.

## 6 . 研究組織

(1) 研究分担者

なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：岩田 晋弥

ローマ字氏名：IWATA, Shinya

研究協力者氏名：高田 達雄

ローマ字氏名：TAKADA, Tatsuo

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。