

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04416

研究課題名（和文）部分放電波形の特徴量解析に基づく高電圧絶縁系の絶縁劣化メカニズムの解明

研究課題名（英文）Clarification of degradation mechanism of electrical insulation system based on feature value analysis in partial discharge waveform

研究代表者

川島 朋裕（Kawashima, Tomohiro）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：70713824

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：ナノコンポジット絶縁材料は耐トリーング性の向上など絶縁特性が優れるが、多くは光学的観察と部分放電（PD）特性（発生位相角分布パターンなど）を以って電気トリーの発生と進展抑制が議論される場合が多い。一方で、本来のPD波形の特徴量は、放電空間における電子なだれの特性を反映している可能性が高い。本研究では、模擬トリー管を用いて放電点を限定し、ナノフィラー添加によるPD波形の特徴量変化を調査した。ナノフィラー添加により、PD波形に多数のピークが表れることを示した。ピークの時間差やピークのおおきさ等を統計的に解析し、PD波形の特徴量の観点から電気トリー中の電子なだれの進展特性とフィラーの関係を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

部分放電（PD）波形の特徴量は劣化状態を色濃く反映した貴重な情報である。可能な限り広い周波数帯域を有するPD計測装置を開発し、一発一発のPD電流波形を時系列的に計測した。ナノフィラーの添加によって多峰波形の観測確率が増加することを示した。更に、そのピーク数、ピークの時間差、ピーク比から、放電空間内の電子なだれの挙動を推定し、放電メカニズムに則ってナノフィラーの電子捕獲の効果を考察した。従来の-g-nパターン解析は、劣化様相との相関をみており、定量的な考察が少なかった。本研究により、絶縁劣化を放電特性から議論する上で、波形そのものが有する情報に基づいた定量的な評価が有効であることが示された。

研究成果の概要（英文）：Nanocomposite materials have excellent insulation properties, such as improved treeing resistance. However, the propagation properties of electrical trees are often discussed using optical observations and partial discharge (PD) characteristics, for instance, phase angle distribution patterns. On the other hand, the PD waveform reflects the characteristics of the electron avalanche in the discharge space. In this study, we constructed the PD measurement system with the broadest possible band. The addition of nano-filler increased the ratio of the waveform with multiple peaks. Considering that the nano-filler can easily capture the electron, the multiple peaks suggested that the electron avalanche became hard to progress. We investigated the effect of adding nano-filler from the viewpoint of waveform characteristics. The characteristics also support the time difference between peaks and peak ratio change in the electron avalanche due to electron capture by nano-filler.

研究分野：電気絶縁工学，計測工学

キーワード：部分放電 波形特徴量 電気トリー 絶縁劣化 ナノコンポジット

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高電圧絶縁系の絶縁劣化は、電力機器の運転環境に依存した熱的、機械的、電氣的ストレス等が複合的に作用することによって進行する。絶縁系の絶縁破壊を電力機器の寿命と定義すれば、中でも電氣的ストレスによる絶縁劣化メカニズムの理解が、電力機器の信頼性を維持する上で重要と考えられる。電気トリ－は、部分放電 (PD) を伴った局所的な絶縁破壊の一種であり、絶縁劣化の最終局面である。

電気トリ－の発生・進展メカニズムの解明を目的に、電気トリ－中の PD 計測に関する研究が精力的に取り組まれている。その多くは、検出された PD 信号の強度を適当な較正法に基づいて見かけの放電電荷量に換算し、その位相角分布 (いわゆる、 Φ - q - n パターン) の変化と電気トリ－の様相の相関を見ている。 Φ - q - n パターンと絶縁劣化様相の相関は古くから報告されており、現在も劣化診断の指標として Φ - q - n パターンが広く採用される。

一方で、放電点における PD 波形 (PD 電流波形) は、通信分野では RF (Radio Frequency) 波形と呼ばれる範疇に属し、共振器で検出してから検波して得られる検波波形と区別される。PD 電流波形の立上り時間や立下り時間、あるいは周波数スペクトルといった特徴は、電気トリ－中の放電空間における電子なだれやイオンのスイープアウト過程を反映している。波形そのものが放電空間の状態を知る貴重な情報と考えられる。内部状態を色濃く反映した PD 電流波形を精度良く計測し、放電メカニズムを念頭に波形特徴量を解析することによって、絶縁劣化メカニズムの解明に迫る多くの情報が得られる可能性は高い。

2. 研究の目的

検出回路として広く採用されてきた共振型回路 (例えば同調式部分放電検出器) は、中心周波数が 400 kHz、帯域幅が 95 kHz 程度のものが一般的である。したがって、ns オーダーの PD 信号を入力信号とした場合には、上記の周波数帯域を有する回路の応答は、インパルス応答 (つまり、共振型回路の伝達関数) となる。つまり、入力信号の大きさは出力信号に反映されるが、立上り時間や立下り時間といった信号の特徴は、入力信号のそれらに関わらず凡そ同じとなる。その波形の形状を以って、電気トリ－中の放電空間における電子なだれの挙動を定量的に考察することは困難である。

また、耐トリ－イング特性の向上を目的に、ナノコンポジット材料の開発も精力的に行われている。多くの場合は、電気トリ－の発生から進展過程の光学的な観察に加えて、 Φ - q - n パターンの変化を解析することで、耐トリ－イング特性が議論される。一方で、フィラーのサイズや添加量にも依るが、散乱の影響によってナノコンポジット材料は白濁している場合が多い。光学的な観察のみで、フィラー添加の効果を確認するには限界がある。また、 Φ - q - n パターンによる解析は、電気トリ－の状態をパターン認識的に評価するものが殆どであり、放電物理に則ったモデルによる定量的な考察は少ない。

本研究では、上記の計測上の課題を解決するために、可能な限り広い周波数帯域を有する PD 計測システムを開発し、一発一発の PD 電流波形を時系列的に計測した。更に、波形特徴量を統計的に解析し、波形そのものが有する情報に基づいてナノフィラーの添加効果を考察した。

3. 研究の方法

Φ - q - n パターン認識が提案された当時は、オシロスコープのデジタル信号処理が未熟であったため、共振型に代表される検出回路の工夫によって、波形を計測系の時間分解能に合わせて加工する必要があったものと考えられる。一方で、近年のオシロスコープのデジタル信号処理技術の向上は、フレームメモリを用いた PD 信号の時系列計測も可能にしている。そこで、回路のインダクタンス成分を極力排除するために、高電圧系を含めた系全体をコンパクトに作製した。可能な限り広帯域の PD 電流波形を計測するために、検出インピーダンスは 50 Ω として信号伝達系との整合をとった。図 1 に構築した広帯域 PD 計測システムを示す。

一般的な PD 計測では、結合コンデンサを介して流れる放電電流を、検出インピーダンスの両端に発生する電位差として検出し、見かけの放電電荷量に変換する。放電電荷量は試料の静電容量により変化するため、試料と並列にパルス発生器を接続し、既知の電荷量を入力することで較正が取られる。このとき、試料の静電容量が較正用パルス発生器の静電容量に比べて無視できる

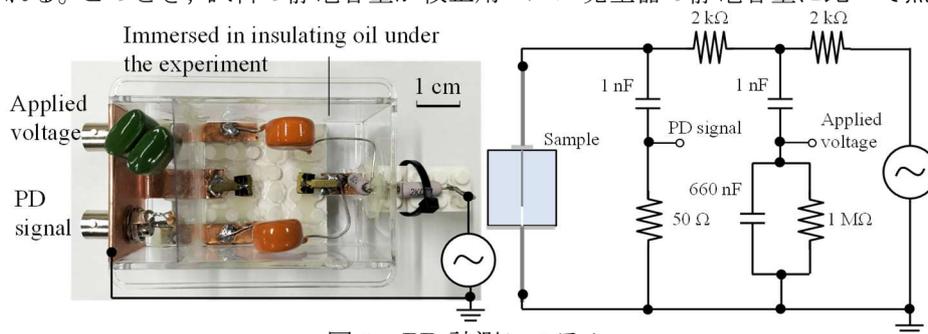


図 1 PD 計測システム

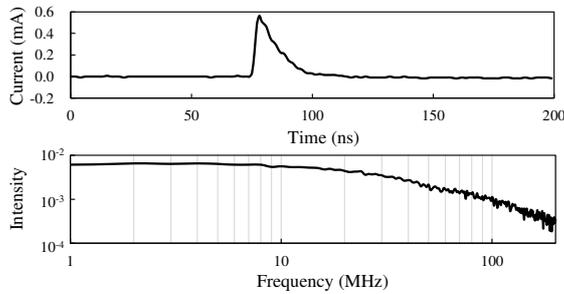


図2 PD電流波形の一例と強度スペクトル

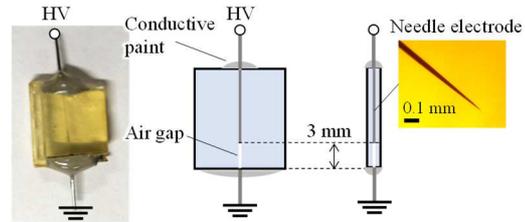


図3 模擬トリー試料の概略図

ほど大きければ、入力される電荷量を校正用パルス発生器の静電容量のみで決定できる。つまり、校正用パルス発生器を電流源と見なすことができるようになり、入力した電荷量を見かけの放電電荷量として取り扱うことができる。

本研究で用いた試料の静電容量は放電点を含めて非常に小さく、浮遊容量の影響も十分に無視できると考えられるため、放電電流のほとんど全てが検出インピーダンス 50Ω を流れる。したがって校正の必要はなく、計測される波形を放電点における PD 電流波形そのものとして取り扱うことができる。

図2は計測された PD 電流波形の一例と、その強度スペクトルである。波形にはリングングや、目立ったアンダーシュート等は確認できない。スペクトルも 70 MHz 程度まで広がっている。結合コンデンサと試料および検出インピーダンス 50Ω で構成される電流ループの共振周波数を回路のサイズから概算すると、数 100 MHz となる。本研究で用いたオシロスコープの周波数帯域は 200 MHz であり計測の範囲外となる。これよりも更に広帯域のオシロスコープを用いる場合には、フィルタを用いて帯域制限かけることが必要と考えられる。以上より、PD 電流の特徴を捉えるにあたって、本計測系が十分に広い周波数帯域を有しているものと判断した。

4. 研究成果

電気トリーは複数のトリーチャンネルを有するため、形状が複雑である。フィラーを添加した場合には、チャンネル内の電子なだれの特性も変化する。計測される波形には、トリー形状の効果とフィラーの効果の両方の情報が反映されるが、これらを分離することは困難である。本研究では、形状の効果を実力排除するために、単一の模擬トリーチャンネルを用いて放電点を限定した。

図3に模擬トリー試料の概略図を示す。高温硬化型エポキシ (EP) 中にタングステン線 (直径 $50 \mu\text{m}$) をモールドし、ギャップ距離が 3 mm になるまで引き抜くことで、模擬トリーチャンネルとした。タングステン線の先端は、電界研磨により針状 (先端曲率半径約 $5 \mu\text{m}$) に加工し、これを高電圧電極とした。他方には導電性ペーストを塗り、接地電極とした。

同様の EP 樹脂に平均粒径 $7 \mu\text{m}$ もしくは平均粒径 60 nm の MgO フィラーを $10 \text{ vol}\%$ 添加した $\text{EP}/\mu\text{MgO}$ および EP/nMgO 試料を作製した。マイクロフィラーは、表面処理等は行わず、遊星攪拌により樹脂中に分散させた。断面 SEM 観察では、数 $10 \mu\text{m}$ の凝集体を確認できるが、概ね均一に分散していた。ナノフィラーについても同様に概ね分散していることを確認した。

約 4 kVrms の交流電圧 (60 Hz) を印加し、 $1,000$ 発の PD 電流波形をオシロスコープ (周波数帯域 200 MHz , サンプリング周波数 1 GSampling/s , レコード長 $1,000$ 点) のフレームメモリ機能を用いて、時系列的に全て記録した。

図4は、 $1,000$ 発の波形の中から時系列に抽出した波形の典型例である。図中の数値はそれぞれ、発生位相とトリガ時間を示している。トリガ時間については、5 発の放電の最初を 0 秒と定義しており、トリガ時間の差が放電発生間隔になる。本実験条件では、 $1 \sim 2$ 周期に一発の割合で PD が生じていることが分かる。

フィラーの添加によって単峰の PD 電流波形でなく、多峰波形も観測された。多峰波形についても、 70 MHz 程度までスペクトルは広がっており、共振等は確認できなかった。したがって、PD 電流波形に表れた多数のピークは、放電現象に由来するものと考えられる。放電点が一つに限定されている模擬トリー試料では、一つのトリーチャンネル内で生じた複数の電子なだれ過程を捉えているものと推測される。

図5にピーク数のヒストグラムを示す。PD 電流波形が有する全てのピーク値とバレー値を算出し、隣接するそれらの値の差がノイズ幅よりも大きい場合を、PD 電流波形のピークとした。フィラー無添加の試料においては、約 94% が単峰の PD 電流波形となったが、フィラーを添加することによって多数ピークを有する PD 電流波形が確かに増加した。特に、正極性においてこの傾向が顕著である。また、 EP/nMgO における PD 電流波形は、 $\text{EP}/\mu\text{MgO}$ のそれに比べて、多峰波形が観測される割合が多い。ナノフィラーの添加によって、トリーチャンネル内では電子なだれが細分化されるものと考えられる。波形特徴量に反映されたフィラーの効果を検討するために、フィラーを添加した試料について、ピークの時間差とピーク比 (図6および図7) を解析したところ、正極性についてはナノフィラーを添加することによって時間差は短くなり、ピーク比も小さくなるが、負極性は逆の傾向を示した。

$10 \text{ vol}\%$ 添加したナノフィラーが樹脂中に均一に分散していると仮定した場合、ナノフィラー

を添加した方がチャンネル中のフィラーの存在確率は高くなる。したがって、電子なだれの進展に対して相互作用を与え易いと考えられる。電子なだれの先端径がトリーチャンネルの径に近づくと、電子はフィラーによって捕獲され、拡大が困難になると共に進展も抑制されることが考えられる。一方で、電子が高電界領域で捕獲された場合は、脱離する可能性も高くなる。脱離した電子は、新たな電子なだれの出発電子となる。このような過程を繰り返すことによって、多数の電子なだれを生じ、PD 電流波形に多数のピークとして表れたものと考えられる。

上述した考察に基づけば、ナノフィラーの方が電子の捕獲確率が高くなるため、ピークの時間差も短くなる。また、脱離を繰り返す度に電子なだれのエネルギーも徐々に減少すると考えれば、PD 波形のピーク比が徐々に小さくなったことも説明できる。

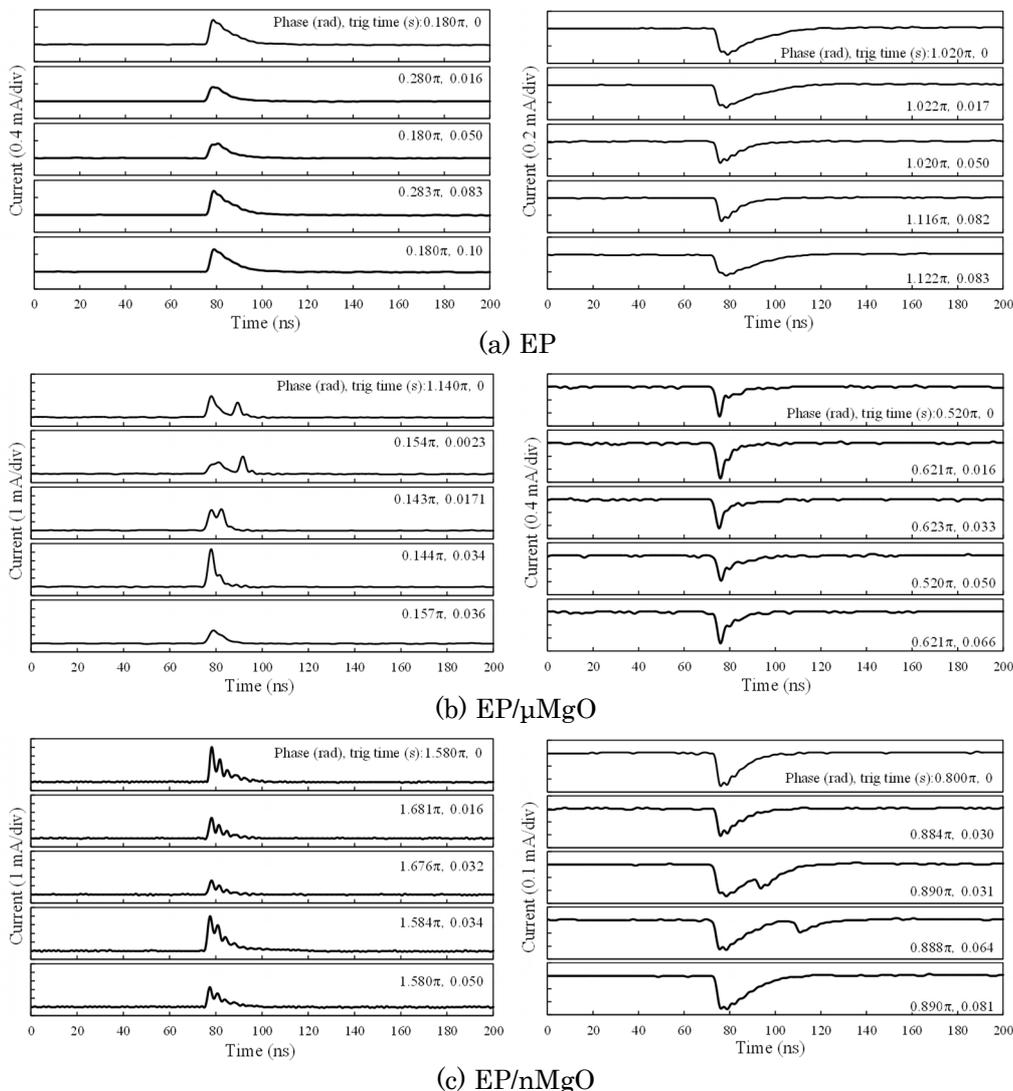


図 4 典型的な PD 電流波形

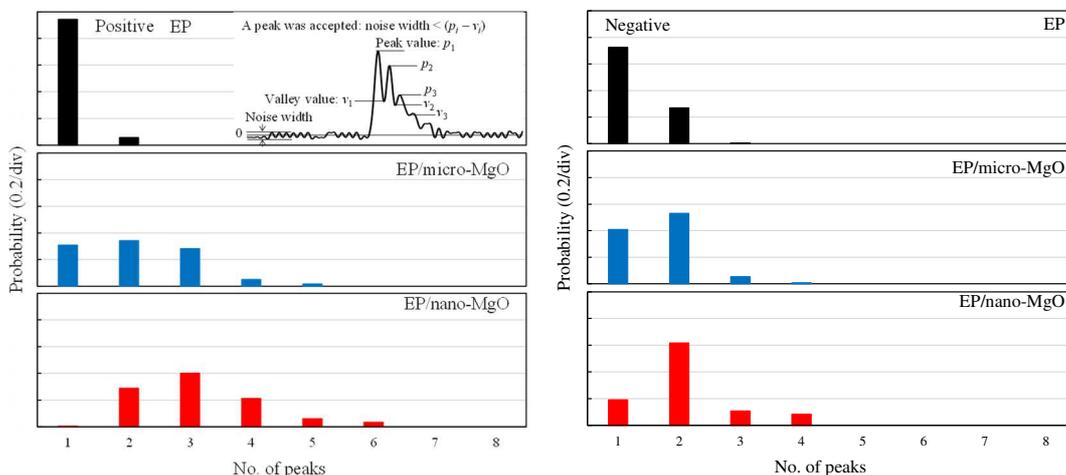


図 5 ピーク数のヒストグラム

ナノフィラーによる電子捕獲は、放電の極性に依らず電子なだれの進展を抑制する。したがって正極性においては、空間電荷効果による電子なだれの進展促進と、ナノフィラーによる進展抑制のバランスによって、最終的な電子なだれの進展が決まると考えられる。一方で、負極性の場合には、空間電荷とナノフィラーの両者が電子なだれの進展を抑制するものとして作用する。したがって、はじめの電子なだれに続いて生じる次の電子なだれは、発生に時間を要すると共に、発生した場合は高いエネルギーを有していると予想される。このような特性が、ナノフィラーを添加した場合における負極性 PD 波形のピークの時間差およびピーク比の増加を招いたものと考えられる。

以上より、広帯域計測した PD 波形の特徴量を統計的に解析することで、耐トリーイング性の向上の一つの要因とされるナノフィラーの電子捕獲の効果と、電子なだれの挙動の関係を波形そのものから考察した。本研究の成果を、他の劣化種について適用したところ、例えば、絶縁劣化に伴う抵抗率の変化を波形特徴量から定量的に読み取ることもできた。絶縁劣化を放電特性から議論する上で、波形そのものが有する情報に基づいた定量的な評価は有効である。 Φ - q - n パターン解析による知見とも組み合わせることで、劣化メカニズムに迫る有用な知見が示せるものと考えられる。

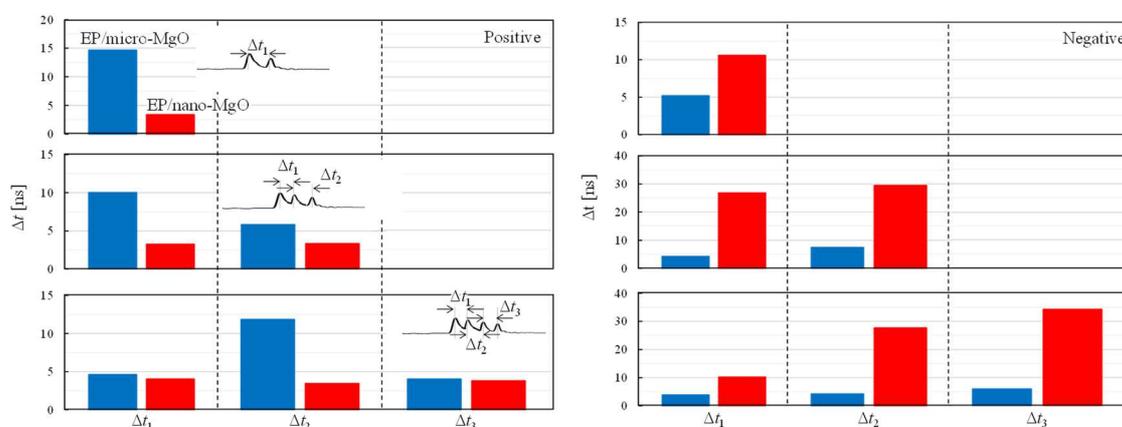


図6 ピークの時間差 (中央値)

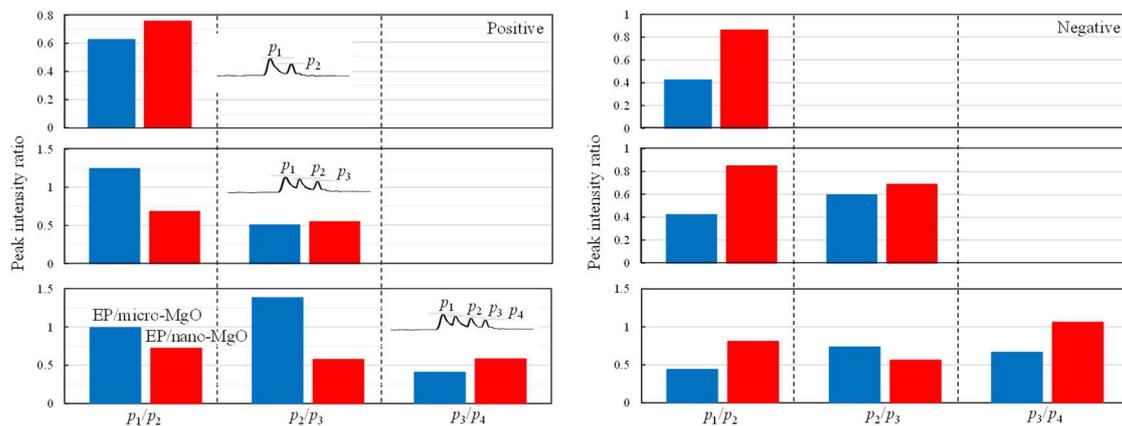


図7 ピーク比 (中央値)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takeda Nobuyuki, Kawashima Tomohiro, Murakami Yoshinobu, Hozumi Naohiro	4. 巻 142
2. 論文標題 Assessment of Electron Avalanche Suppression in Electrical Tree based on Waveform Characteristics of Partial Discharge	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 145 ~ 151
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.142.145	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawashima Tomohiro, Murakami Yoshinobu, Hozumi Naohiro, Kurimoto Muneaki, Yoshida Shigeyoshi, Umemoto Takahiro, Mabuchi Takahiro, Muto Hirotaka	4. 巻 0
2. 論文標題 Nano-size Filler Effect on Propagation of Electron Avalanche in terms of Waveform Characteristics of Partial Discharge	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TDEI.2023.3281762	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 山田拓海, 川島朋裕, 村上義信, 穂積直裕
2. 発表標題 部分放電波形の時系列特徴量解析による放電空間の状態推定
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川島朋裕, Ho Quang, 村上義信, 穂積直裕
2. 発表標題 深層学習による時間領域部分放電波形を基にした絶縁体の状態識別
3. 学会等名 誘電・絶縁材料研究会 / 電線・ケーブル研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉川敢大, 竹田彼方, 川島朋裕, 村上義信, 穂積直裕
2. 発表標題 電力ケーブル接続部模擬モデルにおける部分放電計測と 逆畳込み処理による部分放電波形の復元
3. 学会等名 電気学会A部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川島朋裕, 山田拓海, 村上義信, 穂積直裕, 栗本宗明, 吉田成是, 梅本貴弘, 馬淵貴裕, 武藤浩隆
2. 発表標題 部分放電波形の特徴量からみた電子なだれ進展に対する ナノフィルターの効果
3. 学会等名 電気学会A部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Takeda, T. Kawashima, M. Kurimoto, Y. Murakami, N. Hozumi
2. 発表標題 Fundamental Study for Condition Monitoring of Discharge Space based on Waveform Characteristics of Partial Discharge
3. 学会等名 International Conference on Materials and Systems for Sustainable (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田修幸, 川島朋裕, 村上義信, 穂積直裕
2. 発表標題 部分放電の波形特徴量に基づく電気トリー中の電子なだれ抑制の評価
3. 学会等名 電気学会A部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田修幸, 川島朋裕, 村上義信, 穂積直裕, 栗本宗明, 吉田成是, 梅本貴弘, 馬淵貴裕, 武藤浩隆
2. 発表標題 模擬トリー管壁面の状態による部分放電波形の特徴量変化
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Takeda, T. Kawashima, M. Kurimoto, Y. Murakami, N. Hozumi, S. Yoshida, T. Umemoto, T. Mabuchi, H. Muto
2. 発表標題 Assessment of charge behavior in electrical tree of composite material based on characteristics of PD waveform
3. 学会等名 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 N. Takeda, T. Kawashima, Y. Murakami, N. Hozumi
2. 発表標題 Assessment of charge behavior in electrical tree tube based on characteristics of partial discharge waveform
3. 学会等名 International Symposium on Electrical Insulating Materials (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武田修幸, 川島朋裕, 村上義信, 穂積直裕
2. 発表標題 部分放電波形の特徴量を用いた電気トリー中の電荷挙動の推定
3. 学会等名 電気・電子・情報関係学会 東海支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 武田修幸, 川島朋裕, 村上義信, 穂積直裕, 栗本宗明
2. 発表標題 模擬トリー管の形状と材質が部分放電の波形特徴量に与える影響
3. 学会等名 電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	村上 義信 (Murakami Yoshinobu) (10342495)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授 (13904)	
研究分担者	穂積 直裕 (Hozumi Naohiro) (30314090)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (13904)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------