

令和 3 年 6 月 4 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04105

研究課題名(和文)パールチェーン型トリーのバブル挙動と液中放電開始時の気泡との関連性に関する研究

研究課題名(英文) Study on relationship between behavior of the bubble in pearl-chain type electrical treeing and the bubble generated in dielectric liquid at starting electric discharge

研究代表者

井堀 春生 (IHORI, HARUO)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・教授

研究者番号：70249861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：電気トリーが進展する前段階である初期バブルの極性依存性を検討するため、矩形波に正弦波を重畳した電圧を印加した。負の単極性電圧が印加されているとき、針先からバブルが発生し、突起部分が2か所発生した。その後電圧を反転させ、正の単極性電圧を印加すると、ある突起部が大きく進展した。その後負の電圧を印加すると、その突起部分が小さくなったが、再び正の電圧を印加すると、またその突起部が大きく成長した。以上のことから、極性反転によりバブル内の圧力が急激に変化し、バブルが大きくなるとともに表面に突起が生じること、印加電圧が負から正に変わる方が内部圧力の変化が大きいことがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電気トリーの進展過程は、電力ケーブルやポリマーがいしなど、電力機器全般にわたって、絶縁設計に変革をもたらす絶縁技術のさらなる発展が期待できる。また、ゲル中であることに着目すれば、近年のパワーモジュールの封止材としての高電界特性を明らかにしているとも言え、その分野の産業界にも有用な知見となる。さらには、これらの結果を踏まえて、より絶縁耐力を向上させた新たな材料の開発につなげていくことが期待される。

研究成果の概要(英文)：The voltage superimposing a sine wave on a rectangular wave was applied to the sample electrode system, in order to examine the polarity dependence of the initial bubble which is a stage before the propagation of an electrical tree. When the negative monopolar voltage was applied, a bubble occurred from the tip of the needle electrode, and two protrusions occurred. The one protrusion greatly progressed at the application of the reversed positive voltage. It was considered that the pressure in the bubble suddenly changed by the polarity inversion and the bubble grew bigger with some protrusions on the surface.

研究分野：絶縁材料

キーワード：電気トリー シリコンゴム 部分放電 パールチェーン型トリー

1. 研究開始当初の背景

エネルギー問題は世界的にも大きな課題であるが、生活の多様化や電気自動車、ロボット産業などを考えれば、電力需要は今後も減る傾向にはない。にもかかわらず、人口の減少や原子力発電所の事故の影響などにより、電力設備の大規模な設備更新は期待できず、既設の高経年設備を適切に管理することが非常に重要となってきた。そのため、設備の障害検知技術や、各種絶縁材料の寿命予測、絶縁設計の更なる高度化と信頼性が以前にも増して要求されており、古くから当該分野の悲願である絶縁材料の絶縁劣化機構の解明が急がれる。

液体絶縁体の絶縁破壊のメカニズムの1つとして、気泡が発生し、その気泡を介した放電路が形成され放電に至ることが古くから示唆されており、その現象をとらえようとした多くの研究例を過去の論文に見ることができる。液体の放電分野では最近、材料、バイオ・医療、環境の分野への応用を主とした液中プラズマに関する研究も多く、液中の気泡の挙動や気泡内放電の進展についてのシミュレーションがおこなわれているが、その気泡がどのように発生し、また放電路が進展していくのかを電界などの実測値をもとに定量的に検討した例はない。

そもそも、液体中の高電界現象に関しては、現象がとても速いことに加え電界・電荷分布などを直接測定することが難しいことから、定量的な検討が固体に比較してかなり遅れている。

一方、電気トリーは電力ケーブルに代表される固体絶縁体の劣化要因の1つとしてよく知られているが、その進展過程などについてはいまだ不明な点が多い。最近そのトリーの研究において、シリコーンゲルなどのゲル中に図1のような枝状のトリーとバブル状のトリーが交互に進展するといった非常に興味深い現象が観察された。我々はこれをパールチェーン型トリーと呼んでいる。シリコーンゲルはパワーモジュールの封止剤として多用されており、その絶縁特性自体が学術的だけでなく産業的にも注目されている。シリコーンゲルを対象とした放電現象の観察は、バルク中と界面で進展する沿面放電を対象としているものに分けられる。ゲルの界面を進展する沿面放電の解析などの報告例がみられるが、バルク中の進展に着目し、さらにゲルの架橋度を連続的に変化させて液体中の高電界現象と結びつけるような報告はほとんどなされていない。



図1 パールチェーン型トリー

2. 研究の目的

本研究では、トリー開始時に発生する初期トリーに焦点を当てる。固体高分子で発生する初期トリーは枝状であるが、ゲル中ではバブルを形成しやすくなる。このバブルの形状や挙動がトリーの進展に大きくかかわっていると考えられ、これを詳細に検討することでトリーの進展機構に言及するとともに、液体中の絶縁破壊の一因としてとらえられているバブルの絶縁破壊への寄与について言及することを目的とする。

3. 研究の方法

実験試料および電極構成を図2に示す。シリコーンゲル(信越シリコーン KE-1935-A, B)のシリコーン A と架橋剤入りのシリコーン B を5:1の割合で20分間攪拌した後、気泡を除去するために30分間の真空脱気をおこなった。スライドガラス上に針電極(ガス針5号)をギャップ長が2mmになるように設置し、電極間に混合したシリコーンゲルを流し込み、もう1枚のスライドガラスで挟み込むことによって疑似二次元試料とした。この試料を大気中で80℃、8時間加熱し焼き固めた。なお、今回使用した針電極は電解研磨をおこなっている。

実験装置の概略を図3に示す。実験装置は試料に電圧を印加する電源部と、トリーを観察するためのカメラシステム部にわけられる。

印加電源は任意関数発生装置(Tectronix FUNCTION GENERATOR AGF3011)と高速・高電圧アンプ(松定プレシ

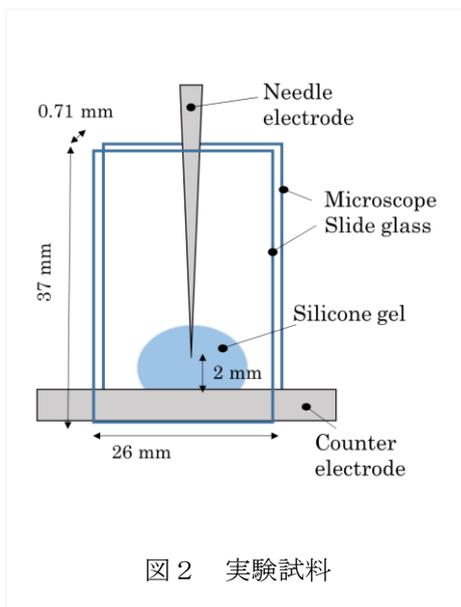


図2 実験試料

ジョン HEOPT-20B10、2000 倍に昇圧)からなり、印加電圧の周波数は $1 \mu\text{Hz}$ から 10MHz まで変化が可能で、電圧は $\pm 20 \text{kVpp}$ まで変化させることが可能である。短絡時の電流を抑えるための保護抵抗として $500 \text{k}\Omega$ を対抗電極側に直列に繋いだ。また、沿面放電を防ぐ目的と光の屈折を防ぐために、試料をシリコンオイルに浸した。

トリー進展の挙動観察は高速度カメラ (Phantom v310) にズーム鏡筒を設置し、パソコンで画像データを記録した。印加電圧と高速度カメラの画像を同期させるために、信号同期 Box (National Instruments USB-6210) を用いている。

試料に印加された電圧は、以下の3つである：

(1) 極性の違いによる初期バブルの挙動を調べるために、正の単極性交流電圧と負の単極性交流電圧を 6Hz で印加した。初めに 1kVpp で印加し、20 秒ごとに 1kVpp ずつステップ状に昇圧させ、上限を 20kVpp とした。図 4 は 20kVpp 時の正の単極性交流電圧をあらわす。

(2) 極性変化による初期バブルの挙動変化を調べるために、両極性交流電圧を 6Hz で印加した。単極性電圧の時と同様に、ステップ昇圧法を用いて電圧を印加した。針電極から初期バブルが発生したところで電圧を一定にし、振動する様子を観察した。

(3) 極性反転による初期バブルの挙動変化を調べた。電圧印加方法を図 5 に示す。 -5kV の直流電圧に 60Hz の交流電圧 (単極性) を乗畳し、4 秒間印加した (これを①区間とする)。その後極性を反転させ、 5kV の直流電圧に交流電圧 (単極性) を乗畳し、4 秒間印加した (②区間)。極性の反転は 2 度おこなわれた (③, ④区間)。

(4) シリコンゲルの架橋度を変えて、トリーの進展の様子を観察した。印加電圧は 60Hz の両極性交流電圧であり、同様に、20 秒ごとに 1kVpp ずつステップ状に昇圧させた。

4. 研究成果

(1) 正負の単極性交流電圧を印加した際の初期バブルを図 6 に示す。高速度カメラのフレーム数は 2600fps である。負の単極性交流電圧を印加した場合 1kVpp を印加直後に初期バブルが発生した。更に、電圧をステップ昇圧しても、突起は発生せず、トリーの進展は見られず、初期バブル径が大きくなるのみであった。正の単極性交流電圧の場合、電圧印加直後に初期バブルが発生する場合としない場合があった。初期バブルが発生した場合には、印加電圧が 1kVpp で初期バブルが発生した。このバブルは球でなく枝分かれを

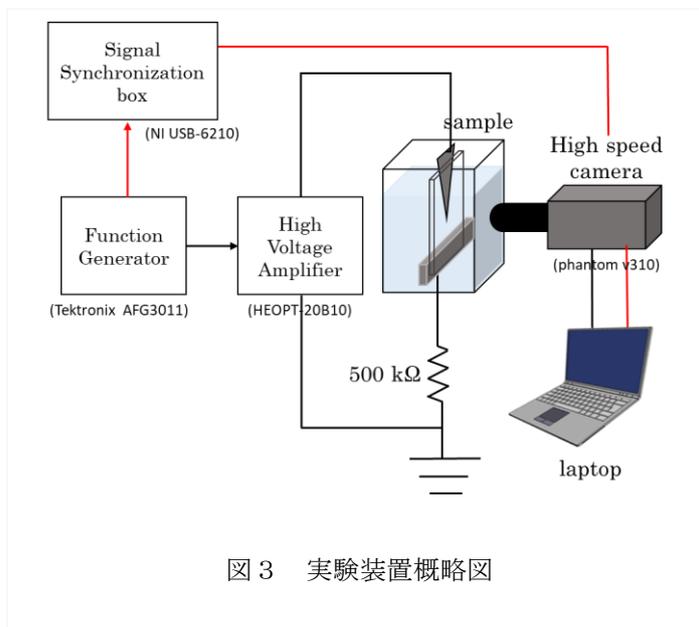


図 3 実験装置概略図

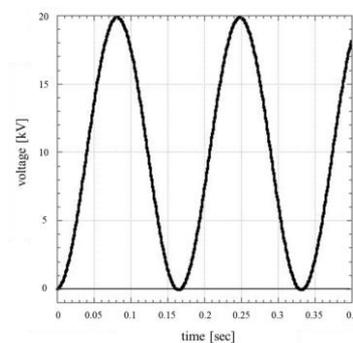


図 4 正の単極性交流電圧

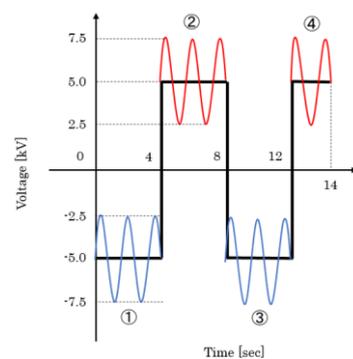
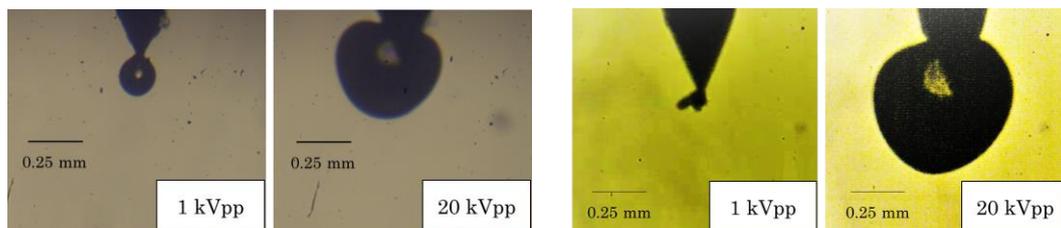


図 5 矩形波 + 正弦波



(a) 負極性

(b) 正極性

図 6 単極性交流電圧印加時の初期バブル

示していたが、この状態で電圧を上昇すると、バブル径の大きな球状になった。この状態のバブルは曲率半径が大きいいため、突起部が生じない限り同系を保ったままであった。

(2) 両極性交流電圧を印加した場合(フレーム数は 2600 fps)、電圧が 14 kVpp の時初期バブルが発生した。更に電圧を昇圧し、16 kVpp としても、バブルは繰り返し振動するのみだった。この時のバブルの二次元投影面積と印加電圧の関係を図 7 に示す。初期バブルは印加電圧に応じて変化し、大きな膨張と小さな膨張が交互に起きていた。この大小 2 種類の膨張は、針電極が正の場合に大きな膨張に、負の場合に小さな膨張に対応することがわかった。このことは、針電極が正の場合のほうが負の場合より、バブル内部の圧力が高いことを示唆する。

(3) そこで、極性変化による初期バブルの挙動変化を観察するために、図 5 の波形を印加した際に発生した初期バブルの挙動変化を調べた。その結果を図 8 に示す。各写真①～④はそれぞれ図 5 中の波形①～④に対応している。またこの時の初期バブルの投影面積を図下に示す。負電圧を印加した時、形成されている初期バブルが膨張するだけでなく、4 つの突起部が発生した(①)。極性が正に反転したとき(②)、突起の個数が 8 つになるとともに、初期バブルの大きさも大きくなった。2 度目の負電圧が印加された③では、初期バブルが小さくなり、突起数も 5 つに減少した。④で再び正となった時、突起も再び増加して 6 つとなり、初期バブルも負の場合よりも大きくなった。

これらのことから、極性反転により初期バブル内で大きな圧力変化が生じること、またその圧力変化は電圧が負から正への変化のほうが大きいことが推察された。さらにこの圧力変化によって、表面に突起が生じることが確認されたことから、初期バブルからストリングス状のトリーへの進展は、この突起部からであることが考えられ、さらにこれまでの研究から、パールチェーン型トリーの枝分かれはバブル部から生じていることがわかっている。そのため、トリーの進展は正極性の時におこっている可能性が高いと判断された。

なお図 9 は、本研究室で約 35 年前に観察された、液体(シリコン油)中に設置された針電極の先端にバブルをつけて、高電圧を印加した際のバブルの挙動を高速カメラでとらえた中の一コマである。このバブルの形が図 8 のバブルの形とよく似ていることから、ゲル中の破壊現象が液体絶縁体中の破壊現象と関連性を持って

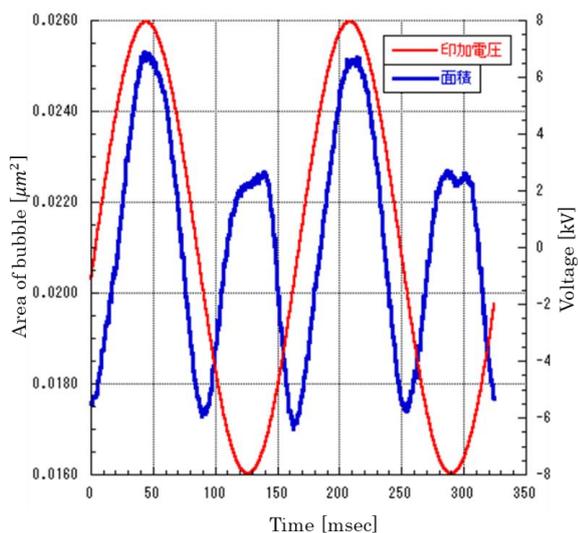


図 7 初期バブルの挙動変化の極性依存性

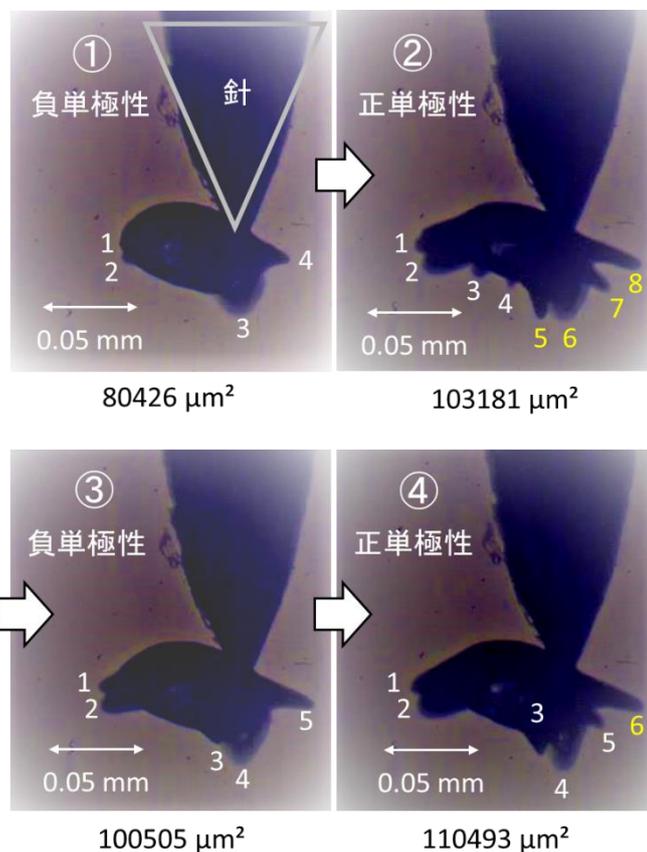


図 8 初期バブルの挙動変化の極性依存性

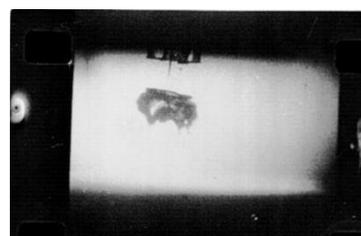


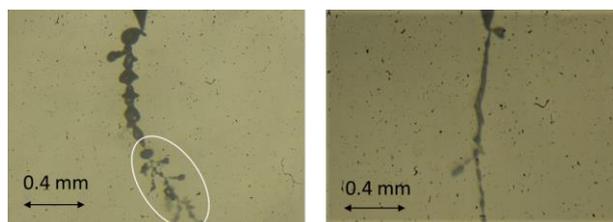
図 9 液体中のバブルの挙動

おり、液体中でも同様なことが起きている可能性を示唆している。

(4) シリコングル A と B の比が 5:1 のものと 7:1 のものを用意した。7:1 はより流動性が高い。観察されたトリーの形状を図 10 に、図 11 にそれぞれのトリーの進展速度の変化を示す。図 10 (a) に示されるように、架橋度 5:1 の試料中では、バブル部とストリングス部が交互に連なるパールチェーン型トリーが発生し、図中の楕円部分から細長いストリングス部を持つ形状に変化した。これは、トリーが沿面を進展した際の典型的な形状であるため、トリーは途中から沿面を進展したと考えられる。この時の進展速度は図 11 中の楕円部分であり、トリーは沿面を進展すると進展速度が速くなること分かる。(b) の場合、途中でトリーの形状の変化は見られず直線的に進展したが、(a) の沿面進展後と同程度の進展速度であった。この理由は (b) のトリーが、沿面を進展している可能性、あるいは試料の粘性が小さくなったことによる可能性が考えられる。

さらに 10:1 の試料を用意して、電圧を印加したところ 12 kVpp で直線上の形状のトリーが発生した。形状は直線状であるが、一部で枝分かれを示した。また通常の架橋度 (1:1) 中のトリーと比較すると、トリー管が明らかに太かった。これはトリー管内の圧力とシリコングルの柔らかさによるものだと考えられる。さらに電圧印加終了時点でトリーが消失している部分が見られた。図 12 (b) は図 12 (a) から 10 分間放置した後のトリーの様子である。右方向に枝分かれして進展していたトリーは電極付近では細くなっているものの、途中からは完全に消失していることがわかる。時間経過と共に、周りのシリコングルの流動性とトリー内部の気圧が減少していくことでトリー管が細くなっていき、最終的には消失すると思われる。24 時間程度でトリーはほとんど消失した。

そこで、この試料に対して電圧を再印加した。電圧印加中止後のトリーを図 12 (c) に示す。トリーは 14 kVpp で発生し、1 回目の発生電圧と比べてもほとんど同じ値を示した。またトリーの形状に関しても、1 回目の履歴に影響されることはなかった。このことから 1 回目の電圧印加前と比較して 2 回目の電圧印加前におけるシリコングルの絶縁性能は劣化していないことが示唆される。この結果は絶縁の自己回復特性を示していると思われる、絶縁液体中の自己回復特性のメカニズムに類似していると考えられる。



(a) 架橋度 5:1 (b) 架橋度 7:1

図 10 2 種類の架橋度のトリーの進展の様子

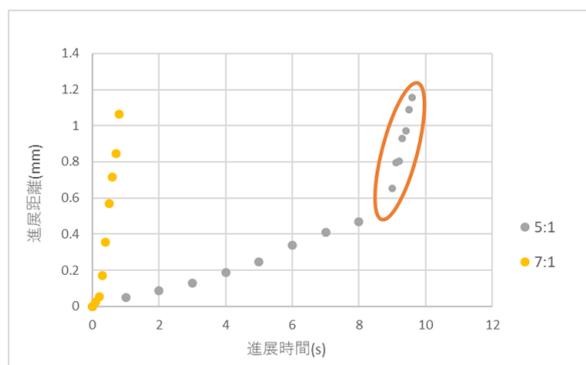
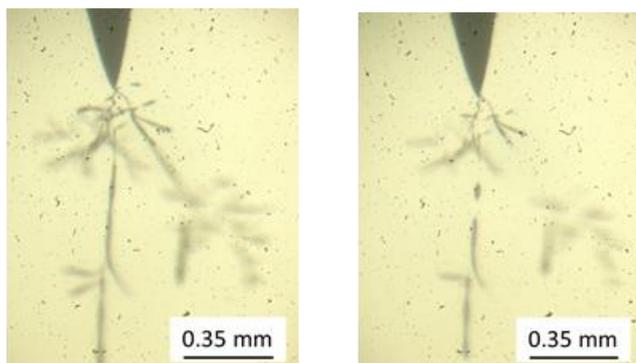


図 11 架橋度を変えたときの進展速度



(a) 電圧印加終了時

(b) 10 分後



(c) 再印加

図 12 架橋度 10:1 のトリーの様子

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 井堀春生, 佐々木慎平, 前田竜二, Jeon Hyeon-Gu, 藤井雅治	4. 巻 138
2. 論文標題 シリコーンゲル中に生じるバブルの挙動	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電気学会論文誌 D	6. 最初と最後の頁 758-759
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejias.138.758	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 Wataru Yabuuchi; Ayaka Wada; Sinpei Sasaki; Yu Kawai; Jeon Hyeon-Gu; Masaharu Fujii; Haruo Ithori	4. 巻 1
2. 論文標題 Electric Field Strength and Tree Propagation Speed for Electrical Treeing in Silicone Gel	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Symposium on Electrical Insulating Materials	6. 最初と最後の頁 474-477
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川相有佑, 佐々木慎平, 全 現九, 藤井雅治, 井堀 春生
2. 発表標題 シリコーンゲルの架橋度の違いによる電気トリーの形状と絶縁自己回復特性
3. 学会等名 令和元年度 電気関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川相有佑, 佐々木慎平, 全 現九, 藤井雅治, 井堀 春生
2. 発表標題 シリコーンゲル中で発生・進展する電気トリーの印 加電圧依存性
3. 学会等名 令和元年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 ○佐々木慎平 藤井雅治 井堀春生
2. 発表標題 シリコーンゲル中に発生するバブルの極性反転に伴う挙動変化
3. 学会等名 平成30年度電気関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 ○佐々木慎平 藤井雅治 井堀春生 全現九
2. 発表標題 シリコーンゲル中における劣化痕の極性依存性
3. 学会等名 第49回 電気電子絶縁材料システムシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 ○佐々木慎平 川相有佑 全現九 藤井雅治 井堀春生
2. 発表標題 シリコーンゲル中における電気トリー発生の極性依存性
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木慎平 川相有佑 全現九 藤井雅治 井堀春生
2. 発表標題 シリコーンゲルの架橋度による電気トリーの形状変化
3. 学会等名 平成31年電気学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川相有佑 全 現九 藤井雅治 井堀春生
2. 発表標題 架橋度の小さいシリコンゲル中に発生する電気トリーの消失と絶縁性の回復
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 数内 渉 石坂太志 全 現九 井堀春生
2. 発表標題 シリコンゲル中を進展したパールチェーン型トリー内での放電 発光の観察
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 執筆者:71名(第6節を分担執筆)	4. 発行年 2021年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 536
3. 書名 高分子材料の絶縁破壊・劣化メカニズムとその対策	

〔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
連携研究者	藤井 雅治 (FUJII MASAHARU) (00127911)	愛媛大学・理工学研究科・教授 (16301)	

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
---------	---------