

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05942

研究課題名(和文)パールチェーン型トリーの進展過程と液体絶縁体の高電界現象との関連に関する研究

研究課題名(英文) Study on corresponding development of pearl-chain-type electrical treeing to high electric field phenomena in dielectric liquids

研究代表者

井堀 春生 (Ihori, Haruo)

愛媛大学・理工学研究科(工学系)・准教授

研究者番号：70249861

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：液体とゲルとの高電界現象の関連性に言及することを最終目標とし、シリコーンゲル中に発生するパールチェーン型トリーの進展機構とゲル中の電界測定技術について検討した。

ある条件下でのシリコーンゲル中に発生する電気トリーは、バブル部とストリングス部が交互に進展するパールチェーン型トリーとなる。この進展の様子が高速度カメラによって観察された。バブル部は印加電圧の周期で2種類の振動が存在することなどを見出した。また、ゲル中の電界分布をカー効果を用いて測定することが可能かどうかの検討として、粘性を変化させた液体のカー定数を測定した結果を示した。

研究成果の概要(英文)：In order to understand the growth mechanism of pearl-chain-type electrical trees in a polymer gel, and investigate about the relationship between the liquids and gels for the high electric field phenomena, the electric field distribution must be measured in the gel.

We investigated electric treeing in silicone gel under AC voltage. When the silicone rubber gel made by changing the degree of cross-linking agent was used as a sample, the tree named pearl-chain-type was generated. The pearl-chain-type tree consisted of two parts: string and bubble. Branching occurred at bubble parts. In this study, the pattern of pearl-chain-type tree was observed under different frequency of applied voltage using a high speed camera. Main branches and sub-branch was also considered.

We also studied on the measurement of the electric field strength in a certain gel using Kerr effect. It is interesting that Kerr constant of the gel depend on the weight percent of a solvent.

研究分野：電気電子材料

キーワード：電気トリー カー効果 液体絶縁体 シリコーンゲル

### 1. 研究開始当初の背景

我が国の人口は漸減傾向にあるが、生活の多様化などにより一人辺りが消費する電気エネルギーは増加傾向にあり、今後も自動車をはじめとして、さらに電気エネルギーの使用量は増えていく可能性が高い。

電力の安定供給、電力設備の小型化、使用機器の安全性を考えると、絶縁材料は大きな役割を果たす。例えば電力機器などに古くから使用されている絶縁油など液体絶縁体の高電界現象とそれに関連する電気伝導・絶縁破壊現象は、機器の絶縁信頼性に直接的につながるものであり、ひいては電力供給の信頼性に関わる重要事項である。しかしながら、液体中の現象が極めて複雑であり、また影響因子が多岐にわたっていることなどの理由から、技術の体系化が液体や固体と比較して立ち遅れているのが現状である。

また、近年、パワーモジュールのパッケージ材料として使用されているシリコンゲルのような液体と固体の性質をあわせもつ材料が注目を浴びているが、その絶縁劣化現象に関してはまだ不明な点が多い。

このような状況の中、われわれは液体中の絶縁破壊前後の電界分布を知る目的で研究を開始し、現在、ミリ秒間隔で連続的に電界分布が測定可能なシステムを構築するまでに至り、さらに直近の研究では、液体誘電体中の空間電荷分布の時系列測定や残留電荷の推測、移動度の測定の可能性についても言及している。しかしながら、液体中の絶縁破壊現象をとらえるためには、ナノ秒オーダーの測定が必要となり、我々が開発した測定手法を用いるためには大規模な設備投資が必要となる。

一方、われわれの研究室では高電界下の高分子材料中に発生する電気トリーの進展過程に関する研究をおこなってきた[6-8]。最近そのトリーの研究において、固体絶縁体の架橋度を変えることにより図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。)。この現象のメカニズムの解明自体、ゲル状高分子材料の絶縁性能向上の新たな知見となりうると考えられるが、液体の



図1 パールチェーン型トリー

絶縁破壊に気泡が関与していることは古くから示唆されており、液体の絶縁破壊現象に関しても言及することができるのではないかと考えた。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、シリコンゲル中に発生するパールチェーン型トリーの発生メカニズムおよび進展機構について検討すると同時に、ゲル中の電界測定技術について検討することを目的とした。なお、最終的には液体とゲルとの高電界現象の関連性に言及することを目標としている。

### 3. 研究の方法

#### (1) シリコンゲル中に発生する電気トリーの進展に関する検討

実験試料として、図2に示すようにスライドガラス上に針電極と対向電極を設置し、シリコンゲルを塗布したものをを用いた。シリコンゲルはゴム剤である A 液 (KE-1935-A) 液と架橋剤を含む B 液 (KE-1935-B) を 5:1 の割合で 20 分攪拌し、真空脱気を行い、大気中で 80°C、8 時間加熱し架橋させて作製した。電極間にシリコンゲルを流し込み、その上をスライドガラスで覆い、疑似 2 次元試料とした。

針電極として、鉄(ガス針 5 号)とアルミ箔(厚さ 2μm、先端角度 40°)の 2 種類を用いた。試料は沿面放電を防ぐためシリコンオイルに浸した。

実験装置の概略を図3に示す。印加用電圧源として任意関数発生装置 (Tektronix

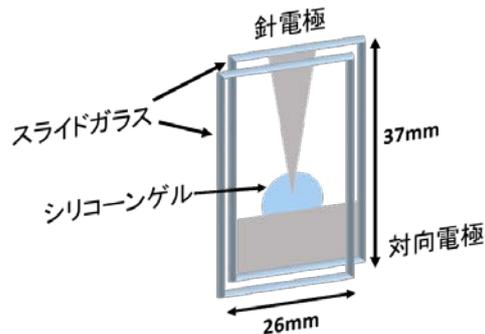


図2 実験試料

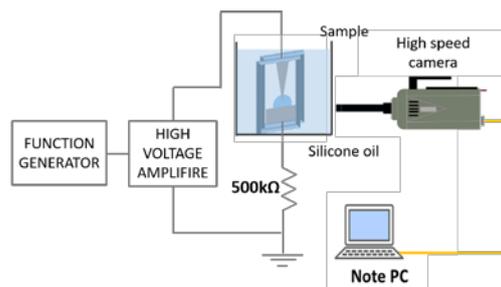


図3 実験装置概略

FUNCTION GENERATOR AGF3011)と高速・高電圧アンプ(松定プレジジョン HEOP-10B2)を用いた。また、高速度カメラ(Phantom v310)にズーム鏡筒を設置したものをを用いてトリーの進展を観測した。

(2) ゲル状物質へのカー効果の適用の検討  
われわれは、カー定数が比較的大きく測定が容易である炭酸プロピレン(関東化学株式会社、C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>3</sub>、カー定数 Kw(実測平均値): $1.0 \times 10^{-12}$ [m/V<sup>2</sup>], 比誘電率:65)を用いて、液体中の電界分布の時系列測定をおこなってきた。この炭酸プロピレンがポリメタクリル酸メチル(和光純薬工業株式会社、PMMA、分子量 Mw 91000)樹脂を溶解することに着目し、ゲル状絶縁体を作製した。これにより、ゲル状絶縁体での測定が可能となれば、炭酸プロピレンでの測定結果と比較することで、液体とゲルの高電界現象の関連性などについて検討することができると考えた。

蒸留によって導電率が  $0.3$  [ $\mu$  S/cm]以下とした炭酸プロピレンに異なる量の PMMA を溶解することで重量比の異なるゲル状絶縁体を作製した。

測定装置を図4に示す。He-Ne レーザから出射された光が偏光子、1/4 波長板、実験セル、検光子の順に透過され、イメージセンサで光強度を測定する仕組みとなっている。セル内には測定試料が満たされており、電極系としてギャップ長 7mm の平行平板電極が設置されている。

上部電極からパルス幅 10ms の直流パルス電圧を-10kV から-5kV の範囲で 1kV ずつ変化させて印加し、パルスが完全に立ち上がってから 1ms 以内の 1ms 間の光強度を測定した。電圧印加前と電圧印加後の光強度から光学的な位相差を求めた。測定試料の状態を考慮して、電圧を印加する際には、直前の電圧印加から 30 分以上経過した後とした。

上部電極からパルス幅 50ms, 波高値-7kV の直流パルス電圧を印加した時の電源から出力されているパルス電圧は図5に示すように電圧が立ち上がっている間はほぼ一定であるが、実際に電極間の電圧を観察してみると 2kV 程度の電圧降下を生じた。すなわち、時間とともに試料に印加されている電圧が変化していることになる。そこで、1ms 間隔で連続して光強度を測定し、この間の光学的な位相差の時間変化を求めた。

#### 4. 研究成果

(1) シリコンゲル中に発生する電気トリーの進展に関する検討

図6に鉄製の針電極を使用した場合とアルミ箔で作製した電極を使用した場合でのトリーの進展の様子を示す。印加電圧を 20kV<sub>pp</sub> とし、針先でトリー発生時を 0[sec] とし、各トリーの進展時間を記している。(a)が針(Fe),(b)が Al でトリーの進展速度はアルミ箔の方が速いことが分かった。試料が疑似

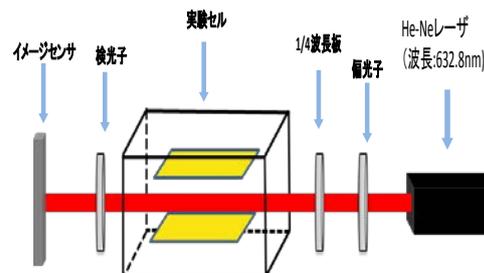


図4 光学実験装置概略

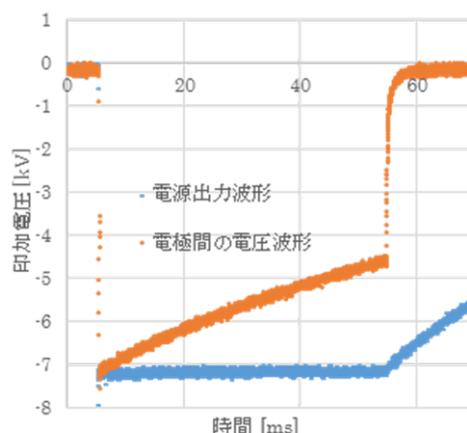
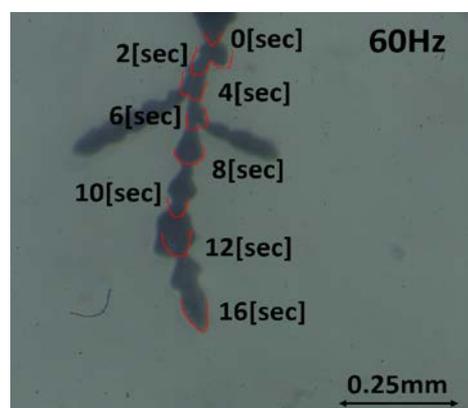
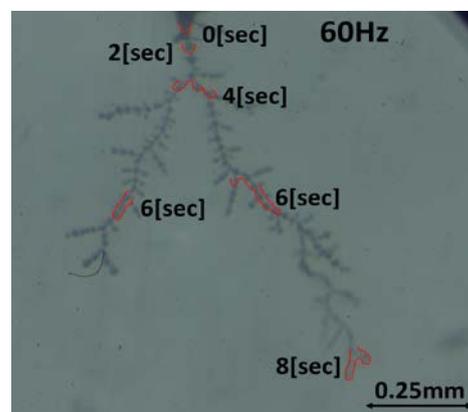


図5 電圧波形



(a) 針電極



(b) アルミ箔電極

図6 トリーの進展速度

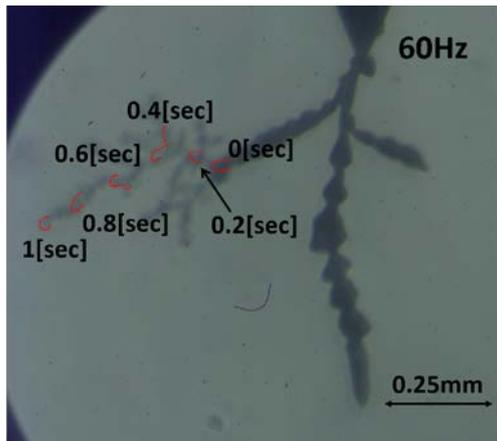


図7 沿面での進展速度

2次元なのでトリーの進展方向により、沿面放電になる場合がある。

図7は針(Fe)電極での沿面の進展速度を示す。この試料では進展速度の速い部分と遅い部分が見られた。初めトリーは図6(a)に示したように時間をかけて進展していたが、トリーが下方方向に進展し始めた時に進展速度が速くなった。進展の遅い部分ではシリコングル(バルク)中を進展しているが、速い部分では沿面に沿って進展していると考えられる。

アルミ電極を使用した場合は、シリコングルがさらに薄く塗布されることになるのでトリーはより2次的に進展する。そのため、沿面の影響を受けていると考えられ、パールチェーン型トリーにおけるトリーの進展速度は沿面の影響によって変化してくることが見いだされた。今後、電気機器の小型化に伴い、トリー進展においては3次元中での進展と沿面上での進展を分けて考えることも重要となってくる。

次に、パールチェーン型のトリーのバブル部に着目した考察を述べる。実験条件は交流電圧 60Hz、印加 14kVpp である。これを針電極の試料に印加した際の高速度カメラの写真を図8に示す。膨張時を比較すると膨張に2種類あり、この2種類の膨張が交互に行われていることがわかった。また、膨張が大きい時バブル表面に進展の起点となる突起部が生成し、トリーの進展に影響を与えていることもわかった。

このバブルの振動について詳しく知るため、針先にバブルを発生させてその振動を観察した。その時のバブル径の大きさの時間変化を図9に示す。実験条件は交流電圧 60Hz、印加 12kVpp である。

やはり膨張には2種類あり、さらに縦方向の方が膨張と収縮の差が大きいことが分かった。また、膨張と膨張の間隔が約 8.3ms であったこと、60Hz の交流電圧のピークが印加される間隔が約 8.3ms であることから、印加電圧の交流波形に対応していることが分

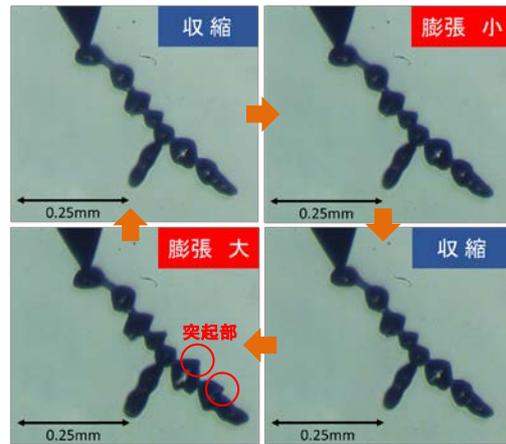
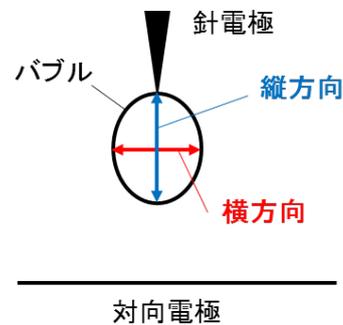
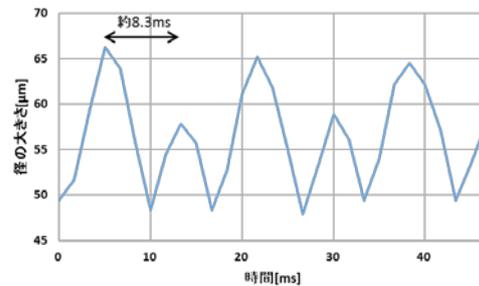


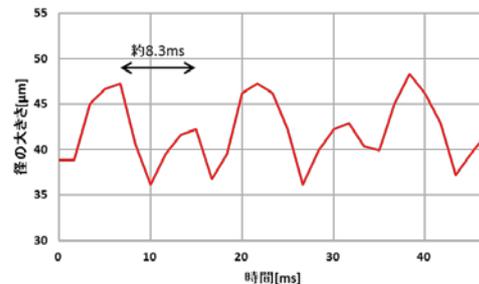
図8 パールチェーン型トリーの振動におけるバブル部の膨張



(a) バブル径の測定方法



(b) 縦方向



(c) 横方向

図9 バブル径の時間変化

かる。トリーの進展がジュール熱による試料の気化とトリー管中のプラズマ状態に起因していることから膨張は交流電圧波形のピークに対応していると考えられる。また膨張の差は印加される電圧の極性によるバブル表面電界に関係していると考えられる。

(2) ゲル状物質へのカー効果の適用の検討

光学的な位相差  $\gamma$  の算出結果を図 1 0 に示す。図中の比は炭酸プロピレンと PMMA の重量比を表しており、1:0 は炭酸プロピレン単体を意味する。横軸は印加電圧の二乗とした。すべての試料において、測定範囲内で良い線形性を示した。また、近似線の傾きに着目すると、PMMA の重量比が大きくなるにつれて、その傾きは小さくなった。カー効果は試料中に生じた光学的な位相差が印加電界の二乗に比例する現象である。いずれのゲル状絶縁体においても良好な比例関係が得られていることから、カー効果が維持されていると判断できる。PMMA の量が多くなるにつれて、近似線の傾きが小さくなったのは炭酸プロピレンの濃度が小さくなったことでカー効果が小さくなったためだと考えられる。さらに、図 1 1 に示すように PMMA の重量比と傾き  $\alpha$  には良い比例関係が見られることから、測定範囲内 ( $w \approx 0 \sim 16.6\%$ ) においては、PMMA の量によってゲル状絶縁体のカー定数  $K_w$  を求めることができることを示唆している。

光学的な位相差の算出結果を図 1 2 に示す。横軸は印加電圧の二乗とした。図 5 の電圧波形から明らかなように、横軸の負の方向に時間が経過していることを意味する。すべての試料において良い線形性を示していることが確認できた。光学的位相差と印加電圧の二乗が比例関係にあることから、時系列測定であってもゲル状絶縁体でカー効果が維持されていると考えることができる。

本研究の測定結果から、カー効果を用いて、ゲル状絶縁体中の電界分布・電荷分布を時系列測定できる可能性を見出すことができた。この結果は、液体とゲル中で測定された結果を比較することで、高電界現象における液体とゲルの相関性や相違点を議論できる可能性を与えるものである。

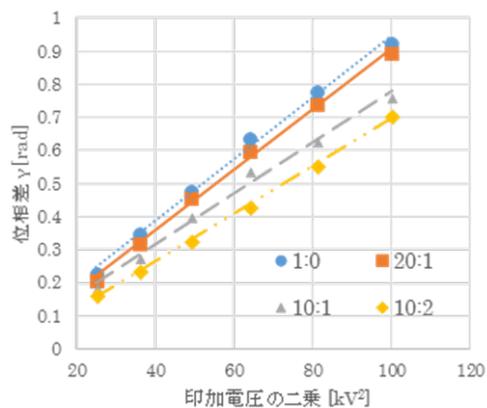


図 1 0 位相差と印加電圧の二乗の関係

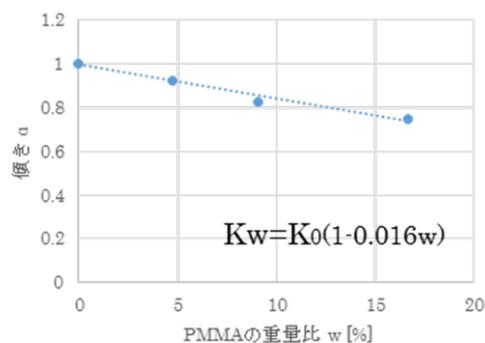


図 1 1 質量パーセントにおける傾き

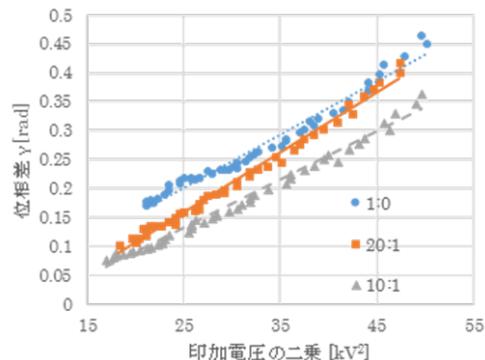


図 1 2 位相差と印加電圧の二乗の関係

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- 1) 井堀 春生, 児玉 有生, 藤井 雅治, 全現九, 原 滉貴, 大崎 晃輝 : "シリコンゲル封止材中に生じる電気トリーの周波数依存性", 電気学会論文誌 D, Vol. 137, No. 5 (2017. 5) pp. 458--459. 査読有  
doi.org/10.1541/ieejias.137.458
- 2) 井堀 春生, 児玉 有生, 全現九, 藤井 雅治 : "交流下のシリコンゴム中に発生するパールチェーン型トリーの進展について", 電気学会論文誌 A, Vol. 137, No. 4 (2017. 4) pp. 215--220. 査読有  
doi.org/10.1541/ieejfms.137.215
- 3) 田中 祐輔, 永岡 祐二, 全現九, 藤井 雅治, 井堀 春生 : "ゲル状絶縁体中の電界強度の光学的測定", 電気学会論文誌 C, Vol. 136, No. 10 (2016. 10) pp. 1420--1421. 査読有  
doi.org/10.1541/ieejciss.136.1420

[学会発表] (計 17 件)

- 1) 佐々木 慎平, 藤井 雅治, 井堀 春生 他 : "パールチェーン型トリーバブル部の初期振動" : 平成 30 年 電気学会全国大会 (2018.3)
- 2) Haruo Ihori et.al. : "Measurement of AC Electric Field in Transformer Oil Using Kerr Effect", 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials, (2017.9)
- 3) Masaharu Fujii et.al. : "Dependence of Pearl-chain Type Tree in Silicone Gel on The Waveform and the Frequency of Applied Voltage", 2017 ISEIM, (2017.9)
- 4) 藤井 雅治 他 : "パールチェーン型トリーのストリング部の進展について", 2017 電気関係学会四国支部連合大会 (2017.9)
- 5) 佐々木 慎平, 藤井 雅治, 井堀 春生 他 : "パールチェーン型トリーに関する振動と極性", 2017 電気関係学会四国支部連合大会 (2017.9)
- 6) 則内 怜欧, 井堀 春生 他 : "カー効果によるゲル状試料中の電界測定", 平成 29 年電気学会全国大会 (2017.3)
- 7) 井堀 春生 他 : "パールチェーン型トリー形状の印加電圧周波数依存性", 平成 29 年電気学会全国大会 (2017.3)

8) 則内 怜欧, 井堀 春生 他 : "ゲル状絶縁体に対するカー効果の検討", 2016 電気関係学会四国支部連合大会 (2016.9)

9) 井堀 春生 他 : "カー効果を用いた電圧印加後の液体絶縁体中の電荷挙動の考察", 2016 電気関係学会四国支部連合大会 (2016.9).

10) 児玉 有生, 藤井 雅治, 井堀 春生 他 : "パールチェーン型トリー発生時の印加電圧周波数依存性", 2016 電気関係学会四国支部連合大会 (2016.9).

11) 井堀 春生 他 : "交流下のシリコンゴム中に発生するパールチェーン型トリーの進展について", 平成 28 年 電気学会基礎・材料・共通部門大会, (2016.9)

12) 田中 祐輔, 井堀 春生 他 : "カー効果を用いたゲル状絶縁体中の電界測定", 平成 28 年 電気学会全国大会 (2016.3)

13) 田中 祐輔, 井堀 春生 他 : "カー効果を用いた電界測定による空間電荷の評価", 電気学会放電研究会, (2015.12)

14) 児玉 有生, 藤井 雅治, 井堀 春生 他 : "パールチェーン型トリー進展と周波数依存性", 電気学会放電研究会, (2015.12)

15) 田中 祐輔, 井堀 春生 他 : "ゲル状絶縁体中の電界強度の光学的測定", 2015 電気関係学会四国支部連合大会 (2015.9)

16) 藤井 雅治 他 : "パールチェーン型トリーのバブル形成について", 2015 電気関係学会四国支部連合大会 (2015.9)

17) 児玉 有生, 藤井 雅治, 井堀 春生 他 : "パールチェーン型トリー進展の印加電圧周波数依存性", 2015 電気関係学会四国支部連合大会 (2015.9)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井堀 春生 (IHORI HARUO)  
愛媛大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号 : 70249861

### (2) 連携研究者

藤井 雅治 (FUJII MASAHARU)  
愛媛大学・理工学研究科・教授  
研究者番号 : 00127911