

令和 5 年 6 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04345

研究課題名（和文）ポリマーがいしの遠隔劣化計測技術の開発

研究課題名（英文）Development of remote degradation measurement technology for polymeric insulators

研究代表者

藤井 隆 (Fujii, Takashi)

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・特任教授

研究者番号：60371283

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：レーザー誘起ブレイクダウン分光（LIBS）を用い、経年によるポリマーがいし表面の劣化の3次元分布を、離隔距離10 mの遠隔計測により、がいしを切断することなく計測する技術を開発した。LIBSによりSi/Alの発光強度比の深さ方向分布を計測し、ポリマーがいし表面付近（深さ～100 μm以下）では、深さ300～400 μmに比べてSi/Alの発光強度比が減少することを明らかにした。Si/Alが減少する深さは、シリコンゴム成分の喪失によると考えられるポリマーがいしの劣化の深さと一致する。これにより、LIBSによるSi/Alの発光強度比は、ポリマーがいしの経年劣化評価に有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果により、ポリマーがいしの劣化状態を、遠隔、非接触、リアルタイムで計測することが可能になる。このため、運用中のがいしの経年劣化をリアルタイムに監視することが期待される。これにより、電力の安定供給に貢献することができる。さらに、ポリマーがいしは、局所的な劣化が存在すると、そこを起点にして絶縁性能が低下する可能性がある。LIBSは、レーザー光の集光径（< 1 mm）で決定される空間分解能で計測が可能であるため、局所的な劣化の特定が可能になる。これらの計測技術により得られる結果と絶縁性能の関係を明らかにすることにより、ポリマーがいしの劣化メカニズムが明らかになる。

研究成果の概要（英文）：Using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), we have developed a technique to measure the three-dimensional distribution of degradation on the surface of polymeric insulators without cutting an insulator by remote measurement at a distance of 10 m. The depth profile of Si/Al emission intensity ratio was measured by LIBS and it was found that the Si/Al emission intensity ratio decreased near the polymeric insulator surface (depth ~100 μm or less) compared to the depth of 300-400 μm. The depth of Si/Al decrease is consistent with the degradation depth of polymeric insulators, which is thought to be caused by the loss of silicone rubber components. These results indicate that the Si/Al emission intensity ratio measured by LIBS is useful for the evaluation of aging degradation of polymeric insulators.

研究分野：レーザー計測

キーワード：レーザー プラズマ 分光 ポリマー がいし 劣化診断 遠隔計測 電力設備

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ポリマーがいしは、従来使用されてきた磁器がいしに比べて軽量であり、また、撥水性を有するため汚損物の付着が少ない等、磁器がいしにはない特長を有している。しかしながら、その長期性能に関しては未知の部分が多く、ポリマーがいしの適用拡大には、長期性能の解明が重要である。そのためには、ポリマーがいしの経年による状態変化と絶縁性能との関係を明らかにすることにより、劣化メカニズムを明らかにする必要がある。さらに、実運用中のポリマーがいしの劣化状態を観測し、余寿命を即座に判断するため、ポリマーがいしの表面および内部の状態を、遠隔・非接触・非破壊で計測する技術が必要である。

### 2. 研究の目的

レーザー誘起ブレイクダウン分光(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy; LIBS)を用いて、ポリマーがいしの表面および内部の状態を、遠隔・非接触・非破壊で計測する技術を開発する。これを用いて、運用中のポリマーがいしの劣化状態を課電状態において非接触で観測することにより、余寿命を即座に評価する技術を開発する。さらに、これらにより得られる結果と、絶縁性能との関係を明らかにすることにより、ポリマーがいしの劣化メカニズムを解明する。

### 3. 研究の方法

ポリマーがいしは経年劣化すると、表層部においてポリマーがいしの主成分であるシリコーンゴムが酸化し、シリカ( $\text{SiO}_2$ )に変化することが報告されている。また、ポリマーがいしには通常、充填剤として三水和アルミナ( $\text{Al}_2(\text{OH})_3$ )が含有されており、シリコーンゴムの酸化に伴い一部 Si が喪失された場合、アルミナの主成分である Al が残存するため、Si に対して Al の濃度比が増加することが報告されている。従って、ポリマーがいし中の Si と Al の比率の変化を計測することにより、ポリマーがいしの劣化状態を計測することが可能である。

LIBS は測定対象物にレーザー光を集光し、それにより発生するプラズマの発光を分析することにより、測定対象物に付着・含有する元素の種類と濃度を計測する手法である。多元素を、遠隔、非接触、リアルタイムで計測することが可能であり、また、測定においてアブレーションされる量はごく微量であるため、ほぼ非破壊での計測である。従って、ポリマーがいしの劣化状態を、遠隔、非接触、リアルタイムに計測することが可能である。

さらに、ポリマーがいしは、劣化が進行した箇所が局所的に存在すると、そこを起点にして絶縁性能が低下する可能性がある。そのため、局所的な劣化の特定は重要である。LIBS では、レーザー光の集光径( $< 1 \text{ mm}$ )で決定される空間分解能での計測が可能である。また、レーザー光を一箇所に連続的に照射し、発光スペクトルの変化を観測することにより、がいしを切断することなくターゲット深さ方向の元素分布の変化が計測できる。従って、LIBS を用いることにより、ポリマーがいしの面方向および深さ方向の局所的な劣化を測定することが可能である。

#### 4. 研究成果

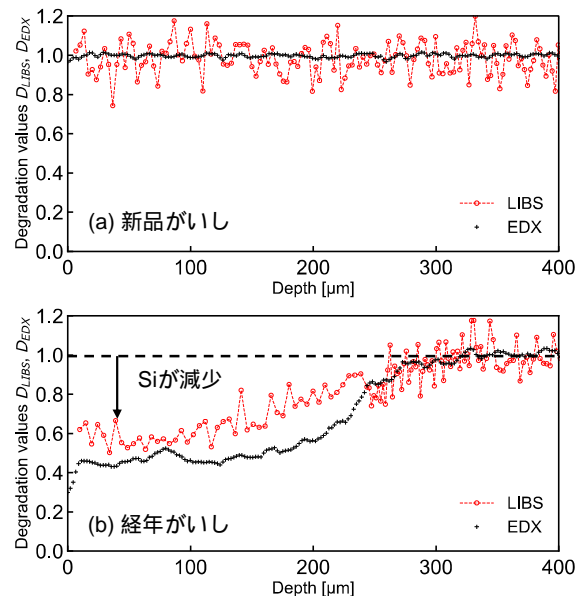
LIBS を用いたポリマーがいしの遠隔劣化計測技術の開発に関して、以下の結果を得た。

##### (1) ポリマーがいしの遠隔劣化診断技術の開発

遠隔計測技術の開発：Q スイッチ Nd:YAG レーザーの第 2 高調波（エネルギー：200 mJ）を光源に用い、プラズマからの発光をカセグレン型望遠鏡（主鏡：230 mm）で集光し、分光器と ICCD カメラで受光した。計測対象として、実機で使用されていた経年 21 年のポリマーがいしを用いた。離隔距離 10 m の遠隔計測により、ポリマーがいしの含有成分の内、劣化診断に有効と考えられる Al (396.15 nm)、Si (390.55 nm) の発光を計測することに成功した。

深さ方向分布計測技術の開発：ポリマーがいしの劣化の 3 次元分布計測を目的とし、深さ方向分布計測技術を開発した。ポリマーがいし表面の同一箇所にてレーザー光を連続照射し、シリコンゴムの成分である Si と、充填剤として含有される三水和アルミナの成分である Al の発光線を計測し、Al に対する Si の発光強度比を求めた。アブレーションの深さが照射パルス回数に対してほぼ線形に変化することを明らかにし、200 パルスのレーザー照射で深さ 400  $\mu\text{m}$  までの計測を照射パルスごとに行うことに成功した。これにより、離隔距離 10 m の遠隔計測において、Si/Al の発光強度比の深さ方向分布の計測が可能であることを示した。

劣化診断手法の開発：ポリマーがいし表面付近（深さ 100  $\mu\text{m}$  以下）では、深さ 300 400  $\mu\text{m}$  に比べて Si/Al の発光強度比が減少することを明らかにした（図 1）。また、SEM-EDX を用いて Si と Al の相対成分比を計測した結果、同様の結果が得られた。走査電子顕微鏡での計測より、ポリマーがいしの劣化は 100 200  $\mu\text{m}$  の表層部に留まっており、これはシリコンゴム成分の喪失によるものと考えられる。以上の結果より、LIBS による Si/Al の発光強度比は、ポリマーがいしの経年劣化評価に有効であることを示した。



可搬型 LIBS 装置の開発：実機環境下における現場劣化診断への適用を目的として、可搬型 LIBS 計測装置を開発した。レーザー照射系と受光系が一体となっており、受光系と同軸にレーザー光が照射される。これにより、計測位置が変わってもレーザーと受光系の光軸は一致しているため、安定な計測が可能である。

図 1. 新品がいしと経年がいしにおける劣化度 (Al に対する Si の発光強度の変化で定義) の深さ方向分布。経年がいしでは、表面からの深さ 300  $\mu\text{m}$  まで Si の減少が観察され、LIBS と EDX の結果は一致した。

## (2) 計測のロバスト性の評価

遠隔計測においては、レーザー照射条件の変化が計測結果に影響を及ぼす可能性がある。離隔距離 10 m の計測において、レーザー照射条件に対する各発光線の発光強度と、劣化評価の指標となる Al に対する Si の発光強度比の変化を計測した。

レーザーエネルギー・焦点距離の影響：レーザーエネルギーを 50 mJ から 200 mJ まで変化させた場合、Al に対する Si の発光強度比はほとんど変化しなかった。また、レーザー光の焦点距離を 0.5 m 変化させた時、Al と Si の発光強度が最大値に対して 30%以上変化したが、発光強度比の変化は  $\pm 5\%$  以内であった。

レーザー照射角度の影響：がいしサンプルに対するレーザーの照射角度が 40 度以下の範囲で Al に対する Si の発光強度比は一定であり、角度が 75 度においても発光強度比の変化は 30% 以内であることを示した。このことから LIBS によるポリマーがいしの劣化診断では、レーザーの照射角度の影響は小さいことを示した。

以上の結果より、今回開発した計測手法においては、レーザー照射条件の変化が計測に与える影響は小さいことを示した。これにより、本手法が、ポリマーがいしのような曲面の計測に有効であることが分かった。

## (3) レーザー誘起プラズマの特性解明

離隔距離 10 m の計測において、レーザーエネルギーが 60 mJ から 200 mJ の範囲で照射痕最大深さはほぼ一定であるが、照射痕体積は増大することを明らかにした。また、プラズマ形状の時間変化を測定し、レーザーエネルギーが増大するとプラズマがサンプル表面に対して水平な方向に広がることを示した。これらの結果より、大気からの圧縮によりプラズマの進展が抑圧されて面方向に広がり、プラズマの熱によりサンプルがアブレーションされることで、レーザーエネルギーに対して照射痕が面方向に拡大したと考えられた。このことから 60 mJ のレーザーエネルギーでも、200 mJ のときと同様な空間分解能で深さ方向分析が可能であることが示された。

## (4) 測定性能の向上

フェムト秒レーザーパルスの適用：パルス幅 200 fs、エネルギー5 mJ のレーザーパルスを、焦点距離 250 mm のレンズでサンプル表面に集光照射した。Al に対する Si の発光強度比を計測した結果、経年サンプルでは新品サンプルに比べ、50%の減少が観測された。これは、エネルギー分散型 X 線分光法による成分比の計測結果と良く一致し、ナノ秒パルスを用いた結果よりも良い一致を示した。これより、フェムト秒パルスを用いることにより、高精度な計測が可能であることを示した。

ダブルパルス LIBS による測定感度の向上：ナノ秒とフェムト秒のレーザーパルスを用いたダブルパルス LIBS により、Al の発光強度が増強することを示した。測定感度の向上に有効であると考えられる。

キャリブレーションフリーLIBS (CF-LIBS) による組成比分析：CF-LIBS では、検量線を用いずに、スペクトル解析のみで各元素の割合を求めることができる。フェムト秒レーザーを用いた CF-LIBS により、シリコンゴムの Al に対する Si の組成比分析を行った。励起温度が高い状態のプラズマからの発光スペクトルを用いることにより、Al に対する Si の組成比が算出可能であることを明らかにした。

本研究成果により、がいし表面の劣化分布を、がいしを切断することなくほぼ非破壊で計測することが可能である。また、遠隔・非接触計測を行うことにより、運用中のがいしの状態診断を送電を停止することなく行うことが可能になる。これにより、革新的なポリマーがいしの診断技術の開発が期待される。先行研究において、LIBS 計測により、経年劣化したポリマーがいしにおいて CN に対して Si の発光強度が相対的に増加することが示されている[1]。しかしながら、CN、Si は共に経年劣化において減少する。一方、Al は経年劣化において安定的にがいし中に存在するため、本研究で示した Al に対する Si の発光強度比を用いる方が正確な劣化評価が期待される。また、10 m の遠隔 LIBS 計測により、Si/Al の発光強度比の深さ方向分布を計測し、ポリマーがいしの劣化評価に適用できることを示したのは世界で初めてである。

#### <引用文献>

[1] O. Kokkinaki, A. Klini, M. Polychronaki, N. C. Mavrikakis, K. G. Siderakis, E. Koudoumas, D. Pylarinos, E. Thalassinakis, K. Kalpouzos, D. Anglos: "Assessing the type and quality of high voltage composite outdoor insulators by remote laser-induced breakdown spectroscopy analysis: A feasibility study", *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, Vol.165 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Homma Taisei, Kumada Akiko, Fujii Takashi, Homma Hiroya, Oishi Yuji	4. 巻 180
2. 論文標題 Depth profiling of surface degradation of silicone rubber composite insulators by remote laser-induced breakdown spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 106206 ~ 106206
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sab.2021.106206	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19件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 本間大成
2. 発表標題 ポリマーがいしの非接触劣化診断に向けたレーザー誘起プラズマ測定
3. 学会等名 電気学会誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本間大成
2. 発表標題 Application of calibration-free laser-induced breakdown spectroscopy to degradation diagnostics of silicone rubber insulator
3. 学会等名 11th Euro-Mediterranean Symposium on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本間大成
2. 発表標題 フェムト秒パルスレーザーを用いたポリマーがいしの組成比分析
3. 学会等名 第7回先端計測技術の応用展開に関するシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井隆
2. 発表標題 Remote diagnostics of silicon rubber composite insulators by laser-induced breakdown spectroscopy
3. 学会等名 4th Asian Symposium on Laser Induced Breakdown Spectroscopy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本間大成
2. 発表標題 レーザー分光法によるポリマーがいしの遠隔劣化診断に向けた計測ロバスト性の評価
3. 学会等名 第39回レーザーセンシングシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本間大成
2. 発表標題 レーザー誘起ブレイクダウン分光法によるポリマーがいしの劣化進展深さ評価
3. 学会等名 令和3年電気学会電力・エネルギー部門大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤井隆
2. 発表標題 Remote diagnostics of composite insulator using laser-induced breakdown spectroscopy
3. 学会等名 OPTICS & PHOTONICS International Congress 2021, Laser-Solutions for Space and the Earth (LSSE) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 本間大成
2. 発表標題 フェムト秒パルスレーザーを用いたポリマーがいしの劣化診断
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 本間大成
2. 発表標題 Remote measurement of polymeric insulator deterioration using LIBS
3. 学会等名 11th International Conference on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本間大成
2. 発表標題 レーザー技術を用いたポリマーがいしの非接触劣化計測
3. 学会等名 令和2年電気学会 放電・プラズマ・パルスパワー研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 本間大成
2. 発表標題 レーザーを用いたポリマーがいしの遠隔劣化診断技術の開発
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 本間大成
2. 発表標題 LIBSによるポリマーがいし中SiとAlの遠隔計測
3. 学会等名 第6回先端計測技術の応用展開に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤井隆
2. 発表標題 LIBSによるポリマーがいしの遠隔劣化診断技術の開発
3. 学会等名 第6回先端計測技術の応用展開に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本間大成
2. 発表標題 ポリマーがいしの遠隔劣化診断に向けたレーザ分光法の開発
3. 学会等名 2019年度放電学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本間大成
2. 発表標題 レーザ誘起ブレイクダウン分光によるポリマーがいしの劣化診断
3. 学会等名 2019年度放電学会若手セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 本間大成
2. 発表標題 レーザー誘起ブレイクダウン分光法によるポリマーがいの現場劣化診断手法の開発
3. 学会等名 第8回先端計測技術の応用展開に関するシンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤井隆
2. 発表標題 Portable laser-induced breakdown spectroscopy system for on-site diagnostics of composite insulators
3. 学会等名 LIBS2022 (12th International Conference on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本間大成
2. 発表標題 Signal enhancement effect in double pulse LIBS with nanosecond and femtosecond laser pulses on silicon rubber
3. 学会等名 LIBS2022 (12th International Conference on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤井隆
2. 発表標題 Development of laser-induced breakdown spectroscopy system for on-site diagnostics of composite insulators
3. 学会等名 OPTICS & PHOTONICS International Congress 2022, Laser-Solution for Space and the Earth (LSSE) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計3件

産業財産権の名称 ポリマーがいしの経年劣化診断方法	発明者 藤井隆、本間大成、 本間宏也、大石祐嗣	権利者 東京大学、電力 中央研究所
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2020/040602	出願年 2020年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 ポリマーがいしの経年劣化診断方法	発明者 藤井隆、本間大成、 本間宏也、大石祐嗣	権利者 東京大学、電力 中央研究所
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-80533	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 ポリマーがいしの劣化計測技術および装置	発明者 藤井隆、本間大成、 本間宏也、大石祐嗣	権利者 東京大学、電力 中央研究所
産業財産権の種類、番号 特許、62/939139	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔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	大石 祐嗣  (OISHI Yuji)  (10371296)	一般財団法人電力中央研究所・電力技術研究所・上席研究員   (82641)	
研究分担者	本間 宏也  (HOMMA Hiroya)  (40371562)	一般財団法人電力中央研究所・電力技術研究所・上席研究員   (82641)	

#### 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
---------	---------