

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

本間 大成¹, 藤井 隆¹, 熊田 亜紀子¹, 本間 宏也², 大石 祐嗣²

¹東京大学 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

²電力中央研究所 (〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1)

Evaluation of Measurement Robustness for Remote Degradation Diagnostics of Polymeric Insulator Using Laser Spectroscopy

Taisei HOMMA¹, Takashi FUJII¹, Akiko KUMADA¹, Hiroya HOMMA², Yuji OISHI²,

¹The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

²Central Research Institute of Electric Power Industry, 2-6-1 Nagasaka, Yokosuka-shi, Kanagawa 240-0196

Abstract: Polymeric insulators are widely used for outdoor insulation in power transmission lines. They degrade with long term use in the field. Therefore, to accurately determine the lifetime of polymeric insulators, it is essential to evaluate this degradation. In this paper, we present the results of depth profiling of polymeric insulators using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). The robustness of the remote LIBS measurement was evaluated in terms of laser energy and laser irradiation angle. These results show that depth profiling is sufficiently feasible using laser energy of 100 mJ or less, and that the measured Si and Al emission intensities are almost constant when the irradiation angle was inclined 0 to 40 degrees to the sample surface.

Key Words: Laser induced breakdown spectroscopy, Polymeric insulator, Degradation diagnostics, Remote sensing

1. はじめに

シリコンゴムを外被材に使用したポリマーがいしは、磁器がいしと比較して軽量で耐汚損性に優れているという点から、その適用による電力輸送設備のコンパクト化や低コスト化が期待されている[1]。しかし、長期使用することで外的影響によるポリマーがいしの劣化故障事例がいくつか報告されており、故障を未然に防ぐための劣化評価・診断方法の確立が必要である。

がいしの物理的・化学的特性に基づいて劣化評価をする現場劣化診断手法が研究されており、そのなかでもレーザー誘起ブレイクダウン分光法(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy; LIBS)を応用した研究が報告されている[2]。LIBSではパルスレーザーを照射してプラズマを生成しその発光を分光することで、測定対象に含まれる化学元素の種類や濃度を測定することができる[3]。LIBSには試料の前処理が不要であること、非接触で分析できること、多元素分析が可能であること、高い空間分解能を有することなどの利点がある[4]。KokkinakiらはLIBSを用いたポリマーがいしの遠隔劣化診断法を提案している[5]。経年シリコンゴムがいしの表面に対してLIBS測定を行い、劣化によりC/Siの信号強度が低下することを報告している。一方、LIBS以外の化学分析に基づく研究ではポリマーがいしの深さ方向の化学組成分布により劣化診断をすることの重要性が示されている。ポリマーがいしの経年劣化により表面から100 μm の深さまで、 SiO_2 の成分比の増大やAlに対するSiの成分比の低下が報告されており[6]、化学組成に基づく劣化進展深さが劣化診断の重要な評価指標と考えられている。

本研究では、LIBSを用いたポリマーがいしの遠隔劣化診断技術の開発を目的とし、LIBSを用いて、Alに対するSiの発光強度比を測定し、経年ポリマーがいしにおける表面から深さ方向の組成比変化を評価した。さらに、レーザーエネルギーがレーザーアブレーション深さに与える影響とレーザーの照射角度が各元素の発光強度測定に与える影響を評価した。

2. 実験方法

実験配置図をFig. 1に示す。光源にはQスイッチNd:YAGレーザーの第2高調波(波長532 nm, パルス幅10 ns)を用い、繰り返し周波数10 Hzで動作させた。レーザーのエネルギーは200 mJとし、照射痕面積から算出したレーザーパワー密度はおおよそ $1.9 \times 10^9 - 10^{10} \text{ W/cm}^2$ であった。レーザービームを凹レンズ(焦点距離 $f = -50 \text{ mm}$)で $\phi 80$

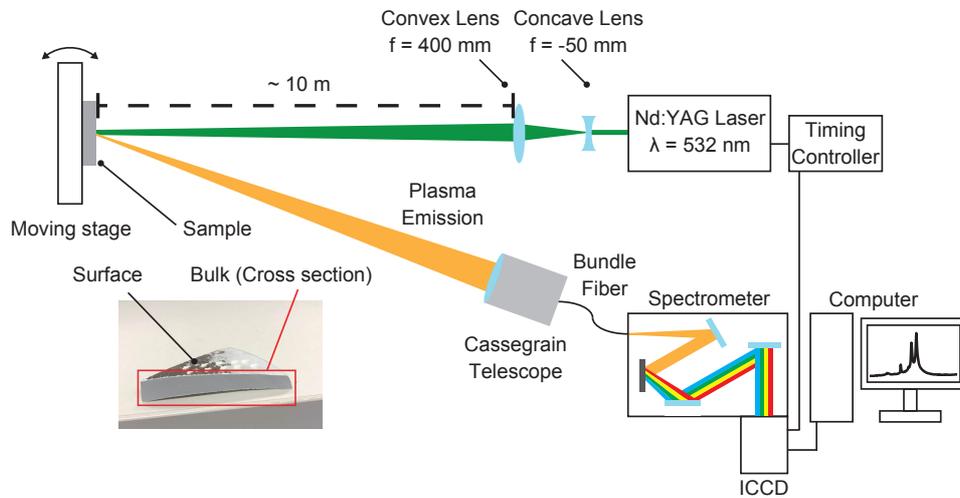


Fig. 1 Remote LIBS experimental setup.

mmに拡大してから、凸レンズ(焦点距離 $f = 400$ mm)で集光することで、およそ10 m先に設置したサンプルに集光した。サンプルの同一箇所にはレーザーパルス200回照射し、1パルスごとに発生したプラズマの発光分光を実施した。プラズマからの発光はレーザー発生装置付近に設置したカセグレン型望遠鏡(主鏡直径 $\phi 230$ mm)で受光し、バンドルファイバ($\phi 1.9$ mm)に集光した。ファイバからの出射光は焦点距離500 mmの分光器により分光し、ICCDカメラにより受光した。分光器の回折格子の刻線数は300 Gr/mmであった。レーザー発振と同期した信号により、ICCDカメラのゲート遅延時間を2 μ s、ゲート幅を5 μ sにそれぞれ設定した。

本実験では、測定対象として経年品のシリコンゴムがはいし片を使用した。経年がいしは実機で21年間使用されていたものであり、アルミナ三水和物を充填剤として50 wt%含有している。全ての経年がいしは日本の送変電設備の塩害汚損区分で汚損区分A(塩分付着密度0.06 mg/cm²以下)に属する地域で使用されていたものである。また、計測ロバスト性の評価をするために、経年品と同様な組成の未劣化の板状シリコンゴムを使用した。

3. 実験結果

3.1 深さ方向分析

380–410 nmの波長範囲で発光スペクトルを測定し、シリコンゴム由来のSi(390.55 nm)の発光線と充填剤由来のAl(396.15 nm)の発光線を測定した。各発光線の裾をベースラインで補正し、発光線のピークからベースラインまでの高さを発光強度とした。劣化を評価するために、Alの発光強度 I_{Al} に対するSiの発光強度 I_{Si} の比をR値として定義する[2]。

$$R = I_{Si}/I_{Al}$$

Fig. 2.1, 2.2は、レーザー照射回数によるR値の変化を示したものである。レーザーパルスの照射回数は、Fig. 1に示したサンプルの表面または切断面からの測定深さに対応している。合計200パルスのレーザーをサンプルの表面または断面に照射し、最初の1パルスを除く各パルスのR値を示している。新品がいし表面の結果は、最初の50パルスでわずかに減少したものの全てのパルスでR値はほぼ一定であり、これは断面での測定結果と同様である。経年がいしの結果では、表面を測定して得られたR値は最初の50パルスでは断面で得られたR値よりも著しく低い、100パルス以降は断面で得られたR値に近い値をとる。このようなR値の変化から、表面に100パルス以上のレーザーを照射することで劣化していない内部までの組成比変化を測定できたことがわかる。

3.2 計測ロバスト性の評価

3.1節ではレーザーエネルギー200 mJで遠隔LIBS測定により10 m先のポリマーがいしの深さ方向分析を実施した。本節では現場での劣化診断を想定して、レーザーエネルギーとレーザー照射角度を変化させたときの計測ロバスト性を評価した。3.1節と同様の実験系で板状シリコンゴムサンプルを用いてレーザーエネルギーを10 mJから200 mJまで変化させたときの照射痕形状を三次元形状測定装置で測定した。レーザーエネルギーに対する照射痕最大深さの変化をFig. 3.1に照射痕体積の変化をFig. 3.2に示す。Fig. 3.1より、レーザーエネルギーが60

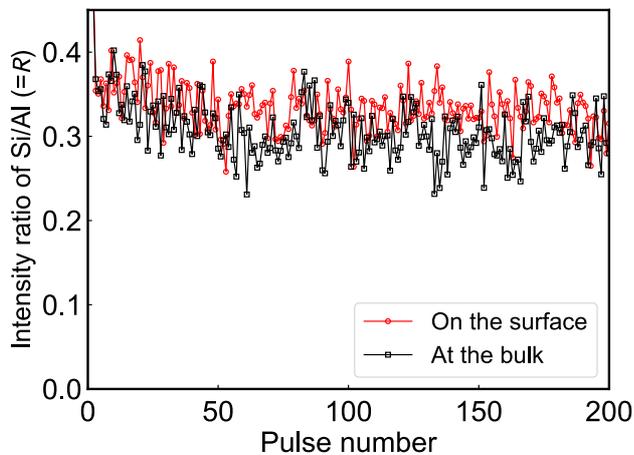


Fig. 2.1 Change in R-value on the number of laser pulses for virgin sample.

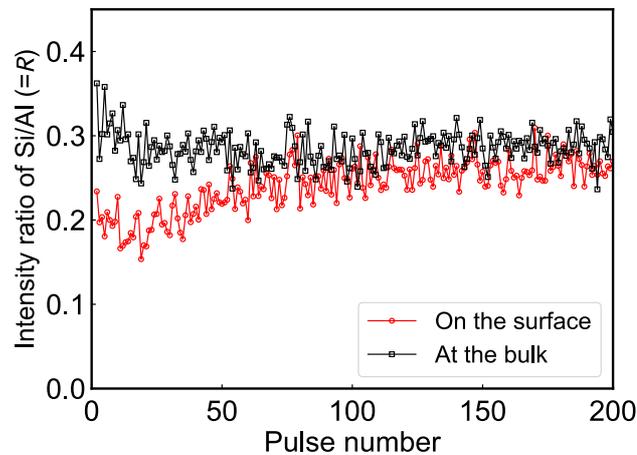


Fig. 2.2 Change in R-value on the number of laser pulses for field-aged sample.

mJから200 mJの範囲で照射痕最大深さは飽和し、ほぼ一定値を示した。このことから60 mJのレーザーエネルギーで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唆された。またFig. 3.2より、レーザーエネルギーが10 mJから60 mJの範囲で照射痕体積は著しく増加したが、60 mJ以上では、レーザーエネルギーに対する照射痕体積の増加率は減少した。Fig. 3.1の結果と合わせ、レーザーエネルギーが60 mJ以上において、表面から深さ方向ではなく面方向のアブレーションにレーザーエネルギーが寄与していると考えられる。

LIBS測定を用いて実機で使用されているポリマーがいしを現場で劣化診断をする場合、レーザーが外被材表面に照射される角度の影響が少ない測定であることが望ましい。レーザーの照射角度に対するSiとAlの発光強度の変化をFig. 4.1に、R値の変化をFig. 4.2に示す。レーザーがサンプル表面に垂直に照射されるときの角度を0度とし、サンプルを取り付けたステージを回転させることでサンプルを75度まで回転させた。Fig. 4.1より照射角度が0度から40度の範囲で各元素の発光強度はほぼ一定であり、それ以上に角度を大きくすると発光強度が減少した。一方、Fig. 4.2より、照射角度が0度から40度の範囲でR値は一定であり、角度が75度においても、R値の変化は30%以内であった。このことからR値を指標とした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少ないことが示された。

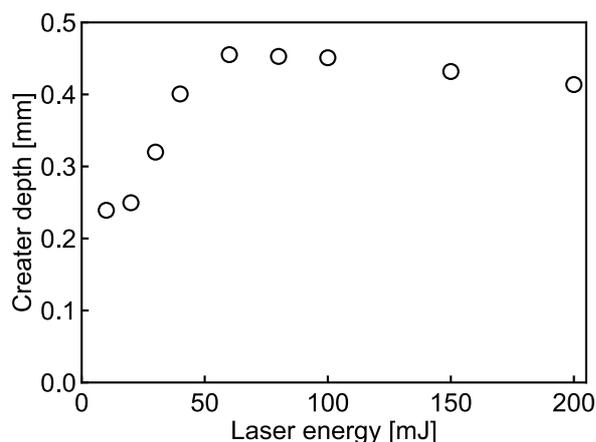


Fig. 3.1 Change in maximum depth of laser crater versus laser energy.

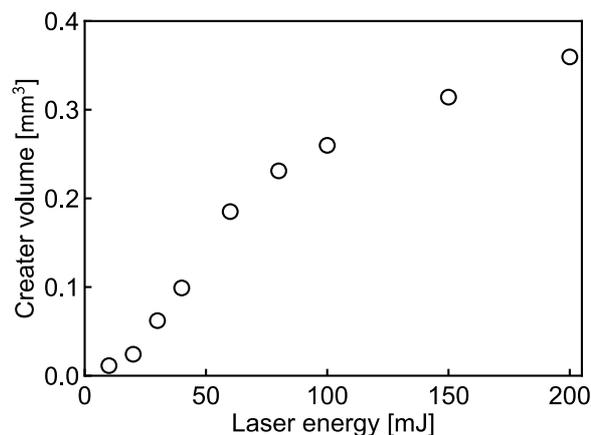


Fig. 3.2 Change in volume of laser crater versus laser energy.

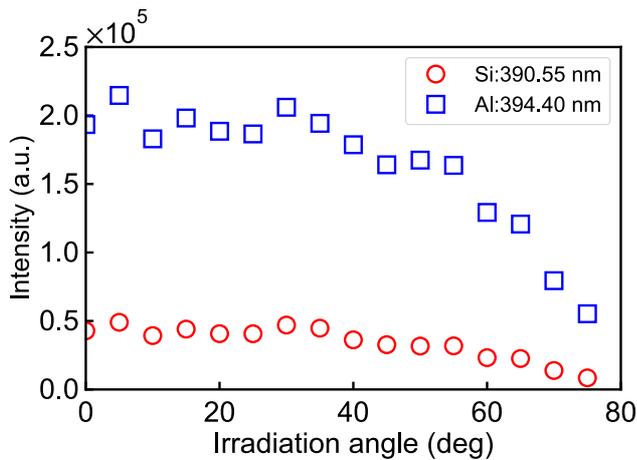


Fig. 4.1 Dependence of emission intensity on laser irradiation angle.

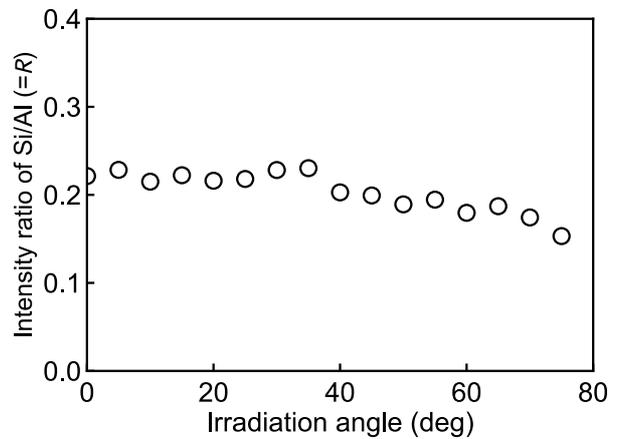


Fig. 4.2 Dependence of R -value on laser irradiation angle.

4. おわりに

LIBS測定により10 m先に設置した経年21年のポリマーがいしについて劣化進展深さ評価をおこなった。エネルギー200 mJのレーザー光をがいし表面に200パルス照射することで、劣化表面から内部にかけてAlに対するSiの発光強度比の変化を測定することができた。また同様の実験系で、現場での劣化診断を想定して、レーザーエネルギーとレーザー照射角度について計測ロバスト性を評価した。その結果、レーザーエネルギーが60 mJから200 mJの範囲でアブレーション深さが同様であり、またレーザーの照射角度をサンプル表面に対して40度傾けたときと垂直に照射したときではAlに対するSiの発光強度比はほとんど変化しないことがわかった。

謝 辞

本研究の一部は JSPS 科研費 JP19K04345 の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) E. Cherney and R. Gorur, IEEE Trans Dielectr Electr Insul, **6**, 5, pp. 605–611, 1999.
- 2) T. Homma, *et al.*, Spectrochim Acta Part B: At Spectrosc, **180**, p. 106206, 2021.
- 3) C. Davies, *et al.*, Spectrochim Acta Part B: At Spectrosc, **50**, 9, pp. 1059–1075, 1995.
- 4) L. J. Radziemski, Spectrochim Acta Part B: At Spectrosc, **57**, 7, pp. 1109–1113, 2002.
- 5) O. Kokkinaki, *et al.*, Spectrochim Acta Part B: At Spectrosc, **165**, p. 105768, 2020.
- 6) H. Homma, *et al.*, in ISEIM, pp.198-201, 2020.