

可搬型 LIBS 装置を用いた磁器がいし汚損度計測

藤井 隆, 大野 桃果, 熊田 亜紀子
東京大学 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

Pollution measurement of porcelain insulators using portable LIBS system

Takashi FUJII, Momoka ONO, and Akiko KUMADA

Tokyo Univ., 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

Abstract: We have developed a portable laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) system for the on-site diagnostics of the pollution of porcelain insulators. The emission lines of Na I (819.48 nm) and Cl I (837.59 nm) were investigated as main elements and O I (777.19 nm), K I (766.49 nm), and Ca II (854.21 nm) were investigated as reference elements, called the internal standards to compensate the change of measurement conditions, for the calibration curve for the SDD measurement. The emission intensity ratios of Na/K and Cl/Ca optimally compensate for the difference in the trend of Na and Cl versus SDD with the difference in laser energies. We also demonstrated the application of the portable LIBS system for the on-site measurement of SDD of porcelain insulators.

Key Words: Laser-induced breakdown spectroscopy, Porcelain insulator, Salt, Plasma, Diagnostics

1. はじめに

がいしやブッシングに代表される電力流通設備の汚損は、電力系統の絶縁信頼性や機器の長期信頼性に影響を及ぼす可能性があるため、汚損物の化学組成の同定や定量計測は汚損状況の正確な評価のために重要である。しかしながら、現在がいしの汚損状況は、筆あらい法やソルトメータを用いたパイロットがいしの汚損採取により、汚損物の可溶成分と等価の電気伝導度を有する NaCl の密度に換算した等価塩分附着密度として評価されている。これらの汚損度評価方法は、パイロットがいしや取り外したがいしの計測に限られており、活線におけるがいしの計測や付着物の化学組成の同定は難しい。これらの代わりに、レーザー誘起ブレイクダウン分光法 (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy; LIBS) を用いた汚損度評価手法を用いることにより、がいし付着物質の多成分、オンサイト、迅速、かつ遠隔計測が可能になり、運用中のがいしに対する汚損状況の正確な評価が期待される。

LIBS を用いた磁器がいしの汚損計測としては、これまで他の研究グループにより、ハンドホールド型のがいし表面塩分密度計測装置の開発が報告されている¹⁻³⁾。また、離隔距離 20 m の遠隔計測において、Na (819.48 nm)、Cl (837.59 nm) の発光強度の塩分附着密度 (Salt Deposit Density; SDD) 依存性の計測結果が報告されている⁴⁾。今回、可搬型の LIBS 装置を開発し、現場計測に適用したので報告する。

2. 可搬型 LIBS 装置

オープンパス方式での LIBS 計測を可能とする、現場で適用可能な可搬型の LIBS 装置 (以下、可搬型 LIBS 装置と呼ぶ) を開発した。装置の配置図を Fig. 1 に、全体の写真を Fig. 2 に示す。可搬型 LIBS 装置はレーザー照射系と受光系が一体となった装置 (以下、レーザー照射・受光系と呼ぶ) と、レーザー用電源、分光器、レーザー発振と分光器のゲートのタイミングを制御するためのデジタル遅延パルス発生器などを搭載した移動棚で構成される。レーザー照射・受光系は三脚に固定されており、上下・左右方向に角度を調整可能である。光源には Q スイッチ Nd:YAG レーザ (Quantel, CFR400) の基本波 (1064 nm) を使用した。パルス幅は 7 ns、ビーム径は 6 mm、パルス繰り返し周波数は 10 Hz である。レーザーヘッドはレーザー照射・受光系の内部に搭載されている。レーザー光を凹レンズ (焦点距離: -35 mm) により直径 50~60 mm までビーム径を拡大し、その後凸レンズ (直径 100 mm, 焦点距離: 250 mm) を用いて測定ターゲットに集光した。ターゲット上に生成したプラズマからの発光は、レーザー光の送信に用いた拡大集光光学系により集光し、ダイクロイックミラーを介して凸レンズにより光ファイバに集光し、分光器 (Avantes 社製 AvaSpec-ULS4096CL) で分光した。

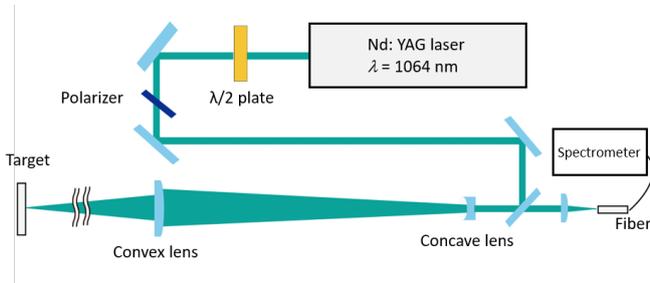


Fig. 1 Schematic diagram of portable LIBS system.

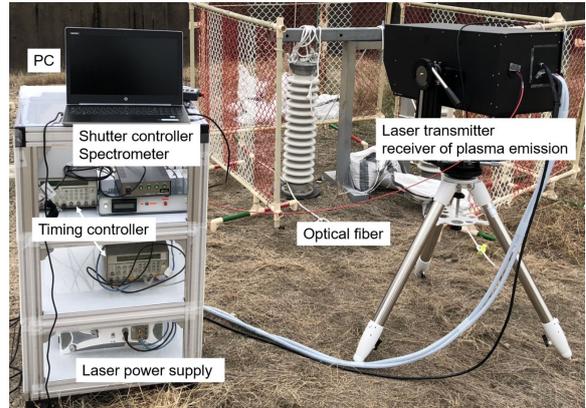


Fig. 2 Photograph of portable LIBS system.

3. 発光強度の SDD 依存性

まず室内において可搬型 LIBS 装置の性能を評価した。測定ターゲットとして、現在一般に広く使用されている磁器がいしを模擬した直径 68 mm の円盤状の磁器製サンプル（以下、磁器がいしサンプルと呼ぶ）を用いた。サンプルの磁器の材質、並びに焼成方法は、一般的な磁器がいしと同様であり、表面は施釉されている。サンプルへの汚損物の付着は、磁器がいしの人工汚損試験において用いられる手法の一つであるどぶ漬け法により行った。LIBS 計測により、塩分に由来する Na I (819.48 nm), Cl I (837.59 nm), 内部基準元素として適用可能な O I (777.19 nm), K I (766.49 nm), Ca II (854.21 nm) の輝線が観察された。各元素の輝線の SDD 依存性を測定し、レーザーエネルギーの変化に対する安定性を評価した。

Fig. 3 に、レーザーエネルギーが 90 mJ と 120 mJ の時の、Na と Cl の発光強度の SDD 依存性を示す。測定ターゲットまでの離隔距離は 1.3 m である。分光器のゲート幅は最小の 9 μs とし、レーザー照射直後からゲートを解放した。Na の発光強度は SDD が ~0.15 mg/cm² 以上において飽和傾向を示したが、SDD が 0.8 mg/cm² まで単調に増加した。今回、レーザーエネルギーは 90~120 mJ であり、さらに受光までの遅延時間はゼロで、ゲート幅も 9 μs と長い。このため、励起温度が高い状態で計測を行ったため、自己吸収が生じたものと考えられる。一方、Cl の発光強度はレーザーエネルギーが 90 mJ, 120 mJ それぞれにおいて、SDD に対して線形に増加した。Fig. 4 に、K, Ca を基準元素として用いた場合の、Na, Cl との発光強度比の SDD 依存性を示す。Na/K, Cl/Ca の発光強度比は、レーザーエネルギーの違いによる Na, Cl の発光強度の違いを良く補正しており、計測条件の変化に対してロバストな計測が可能であることを示している。

4. 現場計測

可搬型 LIBS 装置を用い、屋外における磁器がいしの SDD 計測を行った。測定サンプルとして屋外に 80

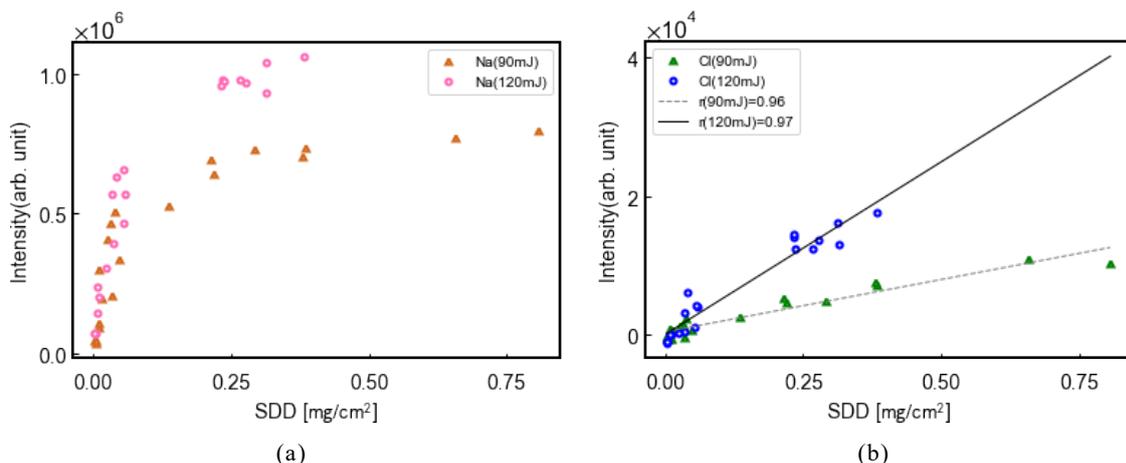


Fig. 3 Dependence of emission intensities of (a) Na and (b) Cl on SDD with laser energies of 90 mJ and 120 mJ.

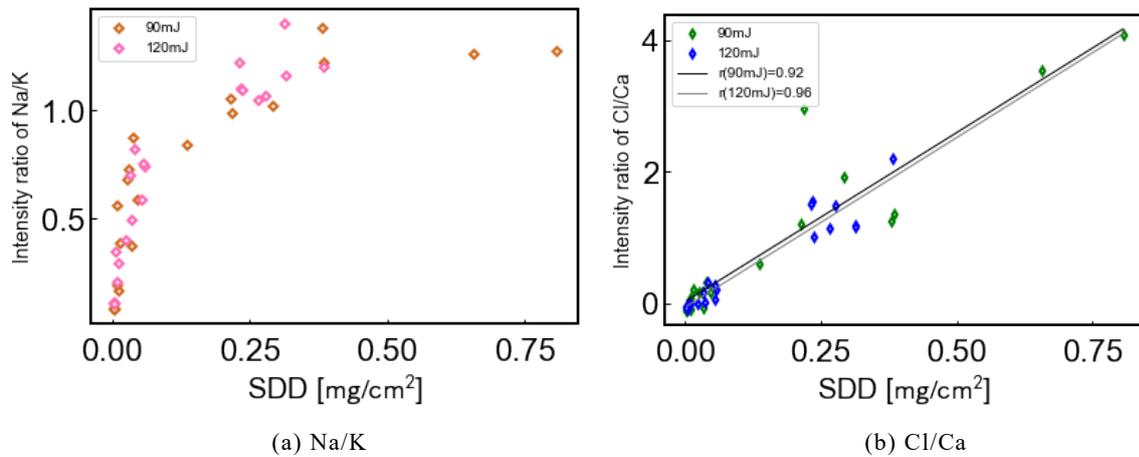


Fig. 4 Dependence of emission intensity ratios of (a) Na/K and (b) Cl/Ca on SDD with laser energies of 90 J and 120 mJ.

日間暴露した中実がいしを用いた。中実がいしの一連の笠数は 14 であり、地面と垂直に固定した。上から 5 段までの笠を対象とし、幹と笠中央部の二ヶ所に対して、90° ごと回転方向に 4 箇所計測を行った。レーザーエネルギーは 240 mJ とした。各測定箇所においてレーザー光を 10 パルス照射し、最初の 1 パルスでの測定結果のみを使用した。分光器のゲート幅は 9 μ s、ゲート遅延時間を 0 μ s とした。

LIBS 測定で得られた、測定箇所ごとの Na と O の発光強度を Fig. 5 に示す。1 回目に 1~5 段目まで計測を行った箇所を a、90°回転させた箇所を b、180°回転させた箇所を c、270°回転させた箇所を d とした。従って、図中横軸の 1a は、回転角 0°の時の 1 段目の計測を示す。各元素の発光強度が、笠中央部分 (center) より幹部分 (stem) の方が大きいのは、レーザー照射角度が異なることが原因だと考えられる。幹部分を計測する時に比べ、笠中央部分を計測する時は照射角度が大きいため、幹部分での発光強度が大きくなったと考えられる。

Fig. 6 に O、K に対する Na の発光強度比を示す。Na の発光強度と比較して、Na/O、Na/K の発光強度比は、幹部分と笠中央部分との差が小さくなった。これは、基準元素との発光強度比を用いることにより、レーザー照射角度の測定に与える影響が小さくなったためと考えられる。Fig. 6 に示した発光強度比を用いて SDD を導出した。検量線には、離隔距離 1.3 m、レーザーエネルギー 180 mJ にて実験室内で計測を行った結果を用いた。求めた SDD の結果を Fig. 7 に示す。LIBS 計測地点の近くに設置されたソルトメータの同日の計測値は 0.002 mg/cm² であり、Fig. 7 に点線で示している。Na/O、Na/K の発光強度比から求めた SDD の計測結果は、全箇所の結果を平均するとそれぞれ 0.02 mg/cm²、0.04 mg/cm² となり、ソルトメータの値よりも大きい値を示した。ソルトメータに使用されるパイロットがいしは汚損度が上昇した時に洗浄されるが、LIBS 計測に用いた暴露がいしは洗浄されないため、暴露がいし表面の SDD はソルトメータの値と比較して大きいことが予想される。また、現場計測でのターゲットである中実がいしの磁器母材や表面釉薬に含有される K の量は、検量線の作成に使用した磁器がいしサンプルと異なる可能性がある。そのため、測定誤差が大きくなった可能性がある。

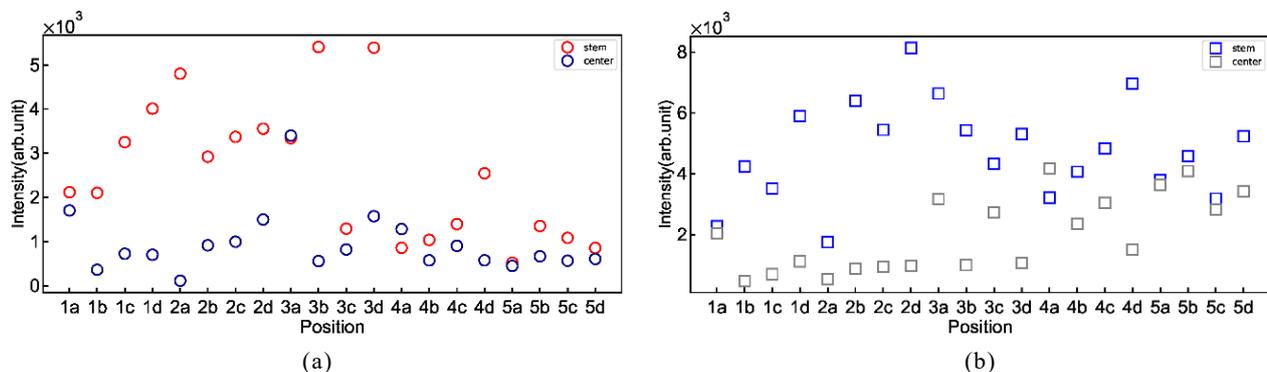


Fig. 5 Emission intensities of (a) Na and (b) O at each measurement position on the sample porcelain insulator.

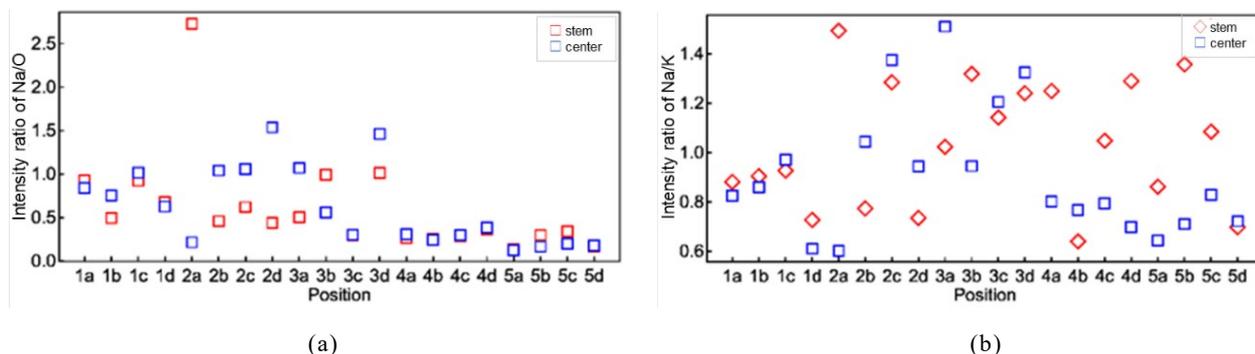


Fig. 6 Emission intensity ratios of (a) Na/O and (b) Na/K at each measurement position on the sample porcelain insulator.

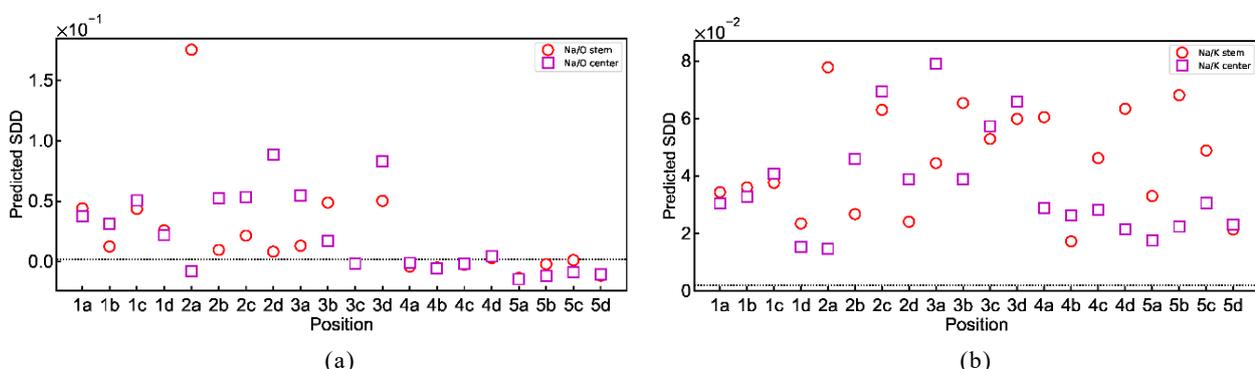


Fig. 7 Predicted SDD using calibration curves of (a) Na/O and (b) Na/K.

5. まとめ

レーザー誘起ブレイクダウン分光法を用いたがいし付着物質計測装置の開発を目的とし、可搬型の LIBS 装置を開発し、実験室内および屋外においてその性能を検証した。レーザーエネルギーを変化させた時の各元素の発光強度、および基準元素に対する発光強度比の SDD に対する変化を測定した。Na I (819.48 nm) の発光は、SDD が 0.15 mg/cm^2 付近から飽和傾向を示したが、Cl I (837.59 nm) の発光は SDD が 0.8 mg/cm^2 まで単調に増加した。また、K I (766.49 nm)、Ca II (854.21 nm) を基準元素に用いた、Na/K、Cl/Ca の発光強度比は、レーザーエネルギーの違いによる Na、Cl の発光強度の変化を良く補正することが示された。屋外において、80 日間暴露された中実がいしの LIBS 計測を実施した。可搬型 LIBS 装置を用いて、離隔距離 1.3 m での計測において、Na I (819.48 nm)、O I (777.19 nm)、K I (766.49 nm) の発光スペクトルの計測に成功した。これらのスペクトルを用いて、中実がいしの SDD を導出した。

参考文献

- 1) Laser Cross, No. 303 (2013, Jun.) ISSN0914-9805.
- 2) Laser Cross, No. 313 (2014, Apr.) ISSN0914-9805.
- 3) 公開特許公報，特開 2013-15404.
- 4) 藤井 隆，元木 浩平，屋地 康平，江藤 修三，堀田 榮喜，末包 哲也，「レーザー誘起ブレイクダウン分光によるがいし付着物質計測技術（その 2）－送変電設備への適用に向けた磁器がいし付着塩分中 Na, Cl の遠隔計測－」，電力中央研究所報告，H16008 (2017).