レーザーの電力インフラの保守・更新への利用

藤井 隆, 江藤 修三

(一財)電力中央研究所(〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂2-6-1)

Laser Application for Maintenance and Replacement of Electric Power Infrastructure

Takashi FUJII and Shuzo ETO

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

(Received March 27, 2017)

Due to the aging of electric power infrastructure, its maintenance and repair costs are increasing. Therefore, we need a high-performance diagnostic tool to estimate the infrastructure's degradation condition and its life. Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) is an attractive tool for the diagnosis of infrastructure because it has several advantages over other analytical methods, such as fast, on-site, and remote measurement of trace elements. In this paper, we explain our recent results on LIBS applications for the diagnosis of electric power infrastructures, such as the quantitative measurement of chlorine concentration distribution in concrete infrastructure, the remote measurement of salt deposition on porcelain insulators, and the remote quantitative measurement of chlorine concentration in salt on stainless steel in a narrow space by simulating the gap between a canister and a concrete body in a concrete cask.

Key Words: Laser-induced breakdown spectroscopy, Concrete, Insulator, Canister, Electric power infrastructure

1. はじめに

近年、電力設備の高経年化が進み、その維持、保全、改修コストが増大している。特に、高度経済成長時代に大量に建設された電力設備を、今後どのように保守、更新していくかは、重要な課題である。このため、電力設備の劣化状態や余寿命等を評価することが可能な、高度な設備診断技術が求められている。特に、現場において即座に設備の状態を診断することができれば、現場工期を短縮することが可能になる。また、設備を停止することなく活線状態で状態診断することができれば、大幅なコストダウンが期待される。

レーザーを用いることにより、現場において、遠隔・非接触かつリアルタイムでの計測が可能になる。このため、高所や放射線環境下等、非近接箇所における計測や、活線状態での計測が期待される。また近年、フェムト秒領域の短パルスレーザーを用いて、X線・ γ 線からテラヘルツ波までの、広帯域の電磁波の発生が報告され、これらを用いた非破壊検査への適用も進んでいる。

これらのレーザーの特長を生かし、様々な電力設備の診断への適用に関して研究が行われている。電力中央研究所(以下、当所)では、これまで、①レーザー誘起ブレークダウン分光(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy:

LIBS)を用いた、コンクリート構造物の劣化診断¹⁻⁷⁾、コンクリートキャスク内キャニスタの健全性評価^{6,8-10)}、ガシ汚損の遠隔計測^{11,12)}、炭素濃度計測による高クロム鋼のクリープ損傷評価¹³⁾、②レーザー超音波を用いた鋼材料の非接触探傷¹⁴⁾や亀裂深さ計測¹⁵⁾、③テラヘルツ波や光ルミネッセンスを用いたガスタービン用遮熱コーティングの非破壊検査^{6,16,17)}や塗膜下鋼材の発錆検出^{18,19)}、④レーザー駆動 γ 線を用いた配管減肉の透過検査^{20,21)}等の技術開発を行ってきた。また、他の研究機関では、レーザーラマン分光法を用いた、変圧器の簡易な異常診断法の開発を行っている。絶縁油に溶存しているアセチレンやフルフラールの濃度を測定することにより、放電等の変圧器内部の異常診断を可能にしている^{22,23)}。

本稿では、電力インフラの保守・更新への利用を目的として、LIBSを用いた電力設備診断技術に関する最近の研究成果を紹介する。

2. LIBSの特長

LIBSは、レーザー光を測定対象物に集光することによりプラズマを発生させ、そのプラズマからの発光を分光することにより、測定対象物に付着・含有する元素を

同定・定量する手法である²⁴⁾。Fig. 1に、コンクリートコア断面にレーザー光を集光照射した時の、アブレーションプラズマ生成の様子を示す。Nd:YAGレーザーの二倍波の緑色の散乱光と共に、白いプラズマ発光が観察される。

LIBSを電力設備の診断に適用する場合、以下の特長があると考えられる。①真空容器およびサンプル前処理が不要であるため、現場での計測に適している。②遠隔・非接触計測が可能であるため、高所、狭隘部、放射線環境下等の接近が容易でない箇所における計測、また活線状態での計測が可能になる。さらに、検査箇所のスクリーニングへの応用も期待される。③リアルタイムにデータが取得できるため、保守・点検時間が大幅に短縮される。④様々な物質を同時に計測することが可能なため、情報量が増大し、状態監視の精緻化が可能になる。⑤高い空間分解能での計測が可能であるため、高精度な元素の付着・含有分布の計測により、早期の劣化診断・余寿命評価が可能になる。

3. LIBSを用いた設備診断技術

3.1 コンクリート構造物の劣化診断

臨海部のコンクリート構造物は、塩分を原因とする鉄筋の腐食によりその耐荷性能が低下する。そのため、コンクリート構造物内の塩分浸透濃度を計測することは、構造物の余寿命を知る上で重要である。コンクリート構造物に含有される塩分濃度は、一般的に構造物から直径100 mm程度の円柱状の試験体(コア)を抜き取り、電位差滴定法により計測が行われている。しかしながら、電位差滴定法は計測に数日間を必要とする。

当所では、LIBSを用いて、鉄筋コンクリート構造物中の塩化物イオン等の分布を迅速、簡便かつ精密に計測する手法の開発を進めている¹⁻⁷⁾。前報⁴⁾においては、コンクリートコア断面における、塩素(Cl)や炭素(C)等の二次元分布計測に関して紹介した。Clは塩害の指標に

なり、Cはコンクリート構造物の劣化の一因である炭酸塩の指標となる。このため、本手法を用いることにより、塩害と炭酸化を同時に評価することが可能である。LIBSは空間分解能が高いため、塩分浸透深さが小さい時でも拡散係数の導出が可能である。そのため、早期の余寿命評価が期待される。

一方、コアを切断することなく、Cl等のコンクリート構造物深さ方向の濃度分布を計測することができれば、現場において即座にコンクリート構造物への塩化物の浸透評価ができると共に、計測後に圧縮強度試験などにコアを利用することが可能になる。また、前報で紹介した計測では、バッファガスとしてHeを用いていた。大気中におけるLIBS計測は、プラズマの白色光によるバックグラウンドが大きいという問題があるが、Heは不活性ガスであるため励起エネルギーが高い。そのため、He雰囲気中で計測を行うことにより、バックグラウンド光が低減され、測定感度が向上する²⁾。しかしながら、現場での計測を考えた場合、バッファガスを用いずに高感度の計測ができれば、装置の可搬性を向上することができる。当所では、レーザー光をダブルパルス照射することにより、バッファガスを用いなくても、鉄筋腐食開始目安である 1.2 kg/m^3 以下の検出感度でClの計測が可能であることを示した⁵⁾。

コアを切断せずにコンクリート構造物深さ方向の元素分布を計測する手法をFig. 2に示す。ここでは、コンクリート構造物から切削したコア円周上において、塩分濃度の軸方向(構造物深さ方向)分布を計測する。コアの円周表面にレーザー光を集光し、プラズマからの発光を光ファイバ等で受光し、分光装置でそのスペクトルを計測する。サンプルを回転させながら、レーザー光またはサンプルを移動させることにより、コアの軸方向における元素濃度分布を計測することができる。これにより、コンクリート構造物の塩分浸透分布を、現場において迅速に計測することが可能である。コアの円周表面を計測することにより、コア断面における計測と比べて計測面積が π 倍増加するため、測定感度が向上する。そのため、採取するコアの直径を小さくすることが期待できる。これにより、コンクリート構造物への負荷が低減されるため、コアを採取できる箇所の制限が緩和され、実構造物の健全性評価の精緻化が可能となる。

コア円周表面における元素濃度分布計測装置を試作した⁵⁾。二本のローラを平行に配置し、その上にコアを設置する。金属棒の両端はベアリング又はモータで保持されており、ローラを円周方向に回転させることにより、ローラと接しているコアが回転する。LIBS計測のためのレーザー光照射系とプラズマ発光受光系は移動ステージに同軸に設置され、コアの軸方向に移動しながら回転するコアにレーザー光を照射することにより、コア軸方向における元素分布を計測する。塩素の濃度分布を計測した結果、電位差滴定法による計測結果と定性的に一致した⁵⁾。また、コンクリート深さ5-85 mmの範囲を5 mm間隔で計測するのに要した時間は46分間であり、電位差滴定法に比べ、格段に迅速な計測が可能である。

Fig. 1 Generation of plasma on the cross section of a concrete core by laser irradiation.¹⁾

Fig. 2 Schematic diagram of LIBS measurement of Cl concentration profile at a surface of a concrete core.

また、Cl濃度が既知のコンクリート粉末試料より得られた検量線を用いることにより、LIBSにより得られるClの発光強度からCl濃度を定量することを可能にしている⁷⁾。この手法を用いて、海岸構造物から採取したコンクリートコアの円周表面に対してLIBS計測を行った。その結果、LIBSの計測結果が電位差滴定法で得られた結果とほぼ一致し、LIBSによる定量は妥当であると評価した。以上のように、本手法は、現場で採取されたコンクリートコアのCl濃度の定量計測にも適用可能であることを示した。

3.2 がいし汚損の遠隔計測

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。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てパイロットがいに付着した汚損物を溶液中に溶解させ、電気伝導度を計測することにより、等価の電気伝導度を有するNaClの密度に換算した等価塩付着密度(Equivalent Salt Deposit Density: ESDD)として評価されている。しかしながら、これらの汚損度評価方法は、主にオフサイトかつオフライン計測であり、また、付着物質の化学組成同定のためには、別途化学分析を行う必要がある。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によるがいし汚損計測に関しては、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に関する報告がある²⁵⁻²⁷⁾。本グループでは、炭酸ガスレーザーとYAGレーザーを用いたダブルパルスにより、がいし表面の損傷を低減した計測を行っている。また、LIBSを用いたがいし付着塩分

の遠隔計測としては、これまで、Nd:YAGレーザーの3倍高調波(355 nm)を用いて、ポリマーがいに付着させた塩分を60 mの離隔距離で検知した例が報告されているが、SDDと発光強度の関係は報告されていない²⁸⁾。塩分付着密度(Salt Deposit Density: SDD)の遠隔計測としては、10 mの離隔距離において人工汚損がいしのSDDを0.1 mg/cm²まで計測した例²⁹⁾が報告されている。しかしながら、日本の電力系統網における汚損区分³⁰⁾を網羅したレンジでSDD計測を行うためには、測定ダイナミックレンジを拡大する必要がある。当所では、広い範囲のSDDの計測が可能な、LIBSを用いた遠隔計測技術の開発を進めている¹¹⁾。

計測ターゲットとして、直径68 mmの円盤状の磁器に釉薬を施し、人工汚損させたサンプル(以下、磁器がいしサンプルと呼ぶ)を用いた。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とぶ漬け法により行った。汚損液には、可溶性物質として並塩を、不溶性物質としての粉を用い、国内の変電所において適用されている汚損区分³⁰⁾に応じた5種類のサンプル(SDDの平均値: 0.008–0.515 mg/cm²)を作成した。

遠隔計測を行う前に、焦点距離250 mmのレンズを用いてレーザー光を磁器がいしサンプルに集光し、LIBSにより波長350–850 nmにおける発光スペクトルを計測した。得られた発光スペクトルをFig. 3に示す。塩分の主たる構成元素であるNa、Cl、主に大気に起因すると考えられるH、Oのみならず、との粉の構成元素であるMg、Al、Si、Caが計測されており、SDDや不溶性物質付着密度(Non-Soluble Deposit Density: NSDD)に関する多成分計測の可能性を示している。上記の元素は、工業汚損物質のCa(OH)₂、じんあい汚損物質のCaSO₄・2H₂O、火山灰に含まれるSiO₂、Al₂O₃、CaO、融雪剤に含まれるCaCl₂、MgCl₂等を構成する元素であり³⁰⁾、これらの元素を計測することにより、がいし汚損の原因を特定することが期待される。

離隔距離10 mにおいて、磁器がいしサンプル付着塩分の遠隔計測を行った。実験系をFig. 4に、実験の様子をFig. 5に示す。エネルギー100 mJのNd:YAGレーザーの第2高調波を、10 m離れた位置に設置した磁器がいしサンプルに集光した。プラズマからの発光は、レーザー光集光光学系の近傍に設置した直径152 mmのニュートン型望遠鏡を用いて集光し、分光器とICCDカメラを用いて受光した。測定結果をFig. 6に示す。SDDが0.008–0.248 mg/cm²において、Na (819.48 nm)の発光強度は単調増加を示した。これにより、国内の変電所において適用されている一般汚損地域(SDD < 0.01 mg/cm²)から超重汚損地域までの広い濃度範囲において、SDDの遠隔計測の可能性が示された。

3.3 コンクリートキャスク内キャニスタ付着塩分の狭隙部・遠隔計測

使用済核燃料の中間貯蔵方式の一つであるコンクリートキャスク方式では、コンクリート容器内にあるステン

Fig. 3 Emission spectra of a contaminated porcelain insulator sample measured by LIBS.¹¹⁾

Fig. 4 Experimental setup for remote LIBS measurement of a porcelain insulator.

Fig. 6 Dependence of Na (819.48 nm) emission intensity on SDD in remote LIBS measurement with a distance of 10 m.^{11,12)}

Fig. 5 A photograph of remote LIBS measurement for a porcelain insulator.

レス鋼製キャニスタ表面の Cl^- 濃度(海塩粒子に起因)が閾値を超えると、応力腐食割れが発生する可能性がある³¹⁾。このため、キャニスタの密封健全性を評価するには、貯蔵中のキャニスタ表面における Cl の計測が重要で

ある。しかしながら、キャニスタ表面は高温かつ高放射線環境であるため、遠隔での計測が必要となる。さらに、コンクリート容器とキャニスタの間隔は50–100 mmであり、この隙間において計測を行うことが望まれる。

当所では、LIBSを用いたキャニスタ付着塩分の遠隔計測技術の開発を進めている。これまで、狭隘部において、移動しながら壁面のLIBS計測が可能な計測機器を開発した。本計測機器を用い、5 mの離隔距離で、コンクリート容器とキャニスタの間の隙間を模擬した幅50 mmの狭隘部において、660 mm移動しながら、狭隘部壁面に設置したステンレス鋼に付着した塩分中の Cl^- 濃度の計測を行った。 Cl^- 濃度 10.63 mg/m^2 のステンレス鋼においても Cl の発光スペクトルは観察され⁹⁾、 100 mg/cm^2 まで、イオンクロマトグラフィとLIBSによる計測結果がほぼ一致した。これより、LIBSを用いることにより、 100 mg/cm^2 以下の範囲において、ステンレス鋼付着塩分中の Cl^- 濃度の定量計測を実証した^{9,10)}。

4. まとめ

本稿では、レーザーを用いた電力設備の診断技術として、これまで当所で取り組んできた、LIBSを用いた診断技術を中心に紹介した。レーザーを用いた計測・診断技術は、遠隔・非接触、非破壊、高分解能等、様々な特長を有しており、電力設備に適用することにより、電力設備の状態監視の効率化・精緻化が期待される。これにより、保守・点検コストの削減、計画的な設備保全、さらに、効率的な設備運用が可能になると考えられる。

謝 辞

本稿で紹介した、電力中央研究所における研究を行うにあたり、以下の方々にご協力を頂きましたことを、深く感謝いたします。電力中央研究所 屋地 康平氏、東京工業大学 元木 浩平氏、堀田 栄喜氏、末包 哲也氏、防衛装備庁 杉山 精博氏。

参考文献

- 1) 藤井 隆, 杉山 精博, 松村 卓郎, 根本 孝七: 電力中央研究所 研究報告 H08012 (2009).
- 2) K. Sugiyama, T. Fujii, T. Matsumura, Y. Shiogama, M. Yamaguchi, and K. Nemoto: Appl. Opt. **49** (2010) C181.
- 3) S. Eto, T. Matsuo, T. Matsumura, T. Fujii, and M. Y. Tanaka: Spectrochim. Acta Part B **101** (2014) 245.
- 4) 藤井 隆, 江藤 修三: レーザー研究 **42** (2014) 887.
- 5) 江藤 修三, 藤井 隆: 電力中央研究所 研究報告 H15005 (2016).
- 6) 藤井 隆, 福地 哲生, 江藤 修三: 電気学会誌 **136** (2016) 418.
- 7) 江藤 修三, 藤井 隆, 松野 隆: 第64回応用物理学会春季学術講演会 (2017) 16a-418-6.
- 8) S. Eto, J. Tani, K. Shirai, and T. Fujii: Spectrochim. Acta Part B **87** (2013) 74.
- 9) 江藤 修三, 藤井 隆: 電力中央研究所 研究報告H14004 (2015).
- 10) S. Eto and T. Fujii: Spectrochim. Acta Part B **116** (2016) 51.
- 11) 藤井 隆, 元木 浩平, 屋地 康平, 江藤 修三: 電力中央研究所 研究報告H15016 (2016).
- 12) 元木 浩平, 屋地 康平, 江藤 修三, 堀田 栄喜, 末包 哲也, 藤井 隆: 平成28年 電気学会 電力・エネルギー部門大会 (2016) 337.
- 13) 江藤 修三: 電力中央研究所 研究報告H15011 (2016).
- 14) 福地 哲生, 緒方 隆志: 電気学会論文誌C **130** (2010) 1095.
- 15) 福地 哲生, 緒方 隆志: 電気学会論文誌C **131** (2011) 1275.
- 16) 福地 哲生, 布施 則一, 尾関 高行, 岡田 満利, 藤井 智晴, 水野 麻弥, 福永 香: 電力中央研究所 総合報告H08 (2015).
- 17) T. Fukuchi, T. Ozeki, O. Okada, and T. Fujii: IEEE Trans **11** (2016) 391.
- 18) N. Fuse, A. Naganuma, M. Mizuno, K. Fukunaga, T. Fukuchi, and Y. Hori: Corrosion **71** (2015) 1387.
- 19) 布施 則一: レーザー研究 **45** (2017) 165.
- 20) Y. Oishi, T. Nayuki, C. Nakajima, T. Fujii, A. Zhidkov, and K. Nemoto: Jpn. J. Appl. Phys. **49** (2010) 046602.
- 21) 大石 祐嗣: レーザー研究 **42** (2014) 32.
- 22) T. Somekawa, M. Kasaoka, F. Kawachi, Y. Nagano, M. Fujita, and Y. Izawa: Opt. Lett. **38** (2013) 1086.
- 23) T. Somekawa, M. Fujita, Y. Izawa, M. Kasaoka, and Y. Nagano: IEEE Trans. Dielectr. Insul. **20** (2015) 229.
- 24) D. A. Cremers and L. J. Radziemski: *Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy* (John Wiley & Sons, Ltd. West Sussex, 2006).
- 25) 谷口 誠治, 島田 義則, 本越 伸二, 加藤 宏太: Laser Cross, No. 303 (2013, Jun.) 1.
- 26) 谷口 誠治, 島田 義則, 本越 伸二: Laser Cross, No. 313 (2014, Apr.) 1.
- 27) 公開特許公報, 特開2013-15404.
- 28) M. Bengtsson, R. Gronlund, M. Lundqvist, A. Larsson, S. Kroll, and S. Svanberg: Appl. Spectrosc. **60** (2006) 1188.
- 29) 藤吉 晋一郎, 本田 親久, 村岡 克己, 前田 三男: レーザー研究 **20** (1992) 29.
- 30) 電気協同研究, 第69巻, 第3号 (2013) 62.
- 31) K. Shirai, J. Tani, M. Gotoh, and M. Wataru: PSAM11 ESREL 2012, pp. 3161-3170 (2012).