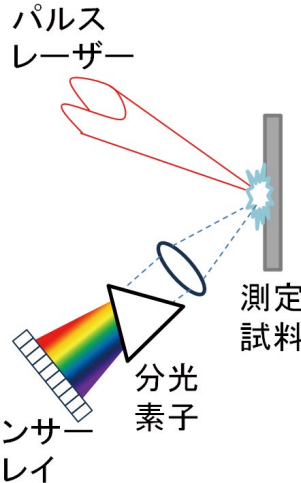


CONTENTS

- ダブルパルスLIBS法を用いたRC構造物の塩分検知技術の開発
- SPIE Sensors+Imaging 2025 国際会議報告
- レーザー総研オープンセミナー「レーザー加工からインフラ診断まで」～ILT2025 令和6年度研究成果報告会～ を開催

LASER CROSS

ISSN 0914-9805



【表紙図】LIBSの概略(左)とプラズマ発光の様子(右)



ダブルパルスLIBS法を用いたRC構造物の塩分検知技術の開発

レーザー計測研究チーム 倉橋慎理、染川智弘

■はじめに

高架橋などの鉄筋コンクリート(RC)構造物の劣化要因の一つである塩害は、コンクリート中の塩分濃度が一定以上になると鉄筋が錆びて膨張し、ひび割れや表面の剥離を生じさせ、構造物の耐力や耐久性を低下させる現象である。

筆者らは、遠隔、かつその場での塩分計測手法を実現するため、レーザー誘起ブレイクダウン分光(LIBS: Laser Induced Breakdown Spectroscopy)法を用いた手法の開発を進めている。これまでに、ナトリウム原子を測定対象として、取り扱いやすい可搬型のリモートLIBSシステムを開発し、実際に高架橋での実証試験を実施してきた(Laser Cross No.404)。LIBSは被測定対象に短パルスレーザーを照射し、発生したプラズマからの発光を分光測定して、対象とする元素からの発光強度より、その場でリアルタイムに元素分析を行う手法(表紙図)である。従来から用いられてきた電位差滴定法などでは必要であったコア採取やそれに伴う足場の敷設、サンプル処理などにかかる時間が原理的に

に不要となる特長がある。

本稿では、LIBSシステムを高感度化するためダブルパルス法¹⁾を導入し、ナトリウム原子に加え、塩素原子の検出をめざして改良を実施した結果を報告する。ダブルパルス法は、時間差を設けた2つのレーザーパルスを測定対象に照射する方法で、第1のレーザーパルスで測定対象をプラズマ化し、発生したプラズマを第2のレーザーパルスで加熱して発光強度の増大を期待する手法である。加えて、第1のレーザー照射の際に発生した衝撃波により窒素などの雰囲気ガスが希薄化され²⁾、第2のレーザー照射では減圧下におけるプラズマ生成が可能となる。減圧することでスペクトル線幅の狭帯域化やバックグラウンドレベルが低減され、分析感度の向上が見込まれる³⁾。

■ダブルパルスLIBSシステムの構築

ダブルパルスレーザーとCMOS型高速分光器からなるLIBSシステムを構築し、3 m先に設置した市販の岩塩のLIBSスペクトルを検出する試験を実施した。ダブルパルスレーザーシステムはレーザーヘッド内に2組

ダブルパルスLIBS法を用いたRC建造物の塩分検知技術の開発

の発振器が内包されており、各発振器のフラッシュランプとQスイッチのタイミングを制御することで、パルス間隔1マイクロ秒の2つのレーザーパルスを連続して同軸で照射可能である。それぞれのレーザーパルスはエネルギー100 mJ、パルス幅5 ナノ秒、波長1064 nm、繰り返し10 Hzである。波長板と偏光ビームスプリッターを用いて2つのレーザーパルスを同軸に結合し、直交する直線偏光状態でレーザーヘッドより射出した。焦点距離3 mのレンズを通してレーザー光をサンプル表面に集光した。発生したプラズマからの発光は集光用レンズを通して受光し、ダイクロイックミラーにより波長200~900 nmの発光成分のみを取り出し、光ファイバへ導光して2台の異なる分光器(波長範囲:200~750 nm, 波長分解能:0.6 nmと波長範囲:700~900 nm, 波長分解能:0.3 nm)を用いてLIBSスペクトルを測定した。

■ダブルパルス効果の検証

得られた岩塩のLIBSスペクトルのうち波長700~900 nmの範囲を図1に示す。青色のラインは最初のレーザーパルスのみを照射した場合、橙色は第2のレーザーパルスのみを照射した場合に得られたスペクトルを示す。緑のラインは青と橙色のスペクトルを数値的に加算したもので、これは2つのレーザーパルスの照射間隔をお互い影響しないよう十分に空けた場合に相当する。水色のラインは2つのレーザーパルスを1マイクロ秒間隔で照射した場合に得られたスペクトルを示しており、水色と緑で示されたスペクトルを比較することで、ダブルパルス効果の検証を行った。

岩塩を構成するNa, Cl, Kなどの元素と、大気成分と見られるN, Oの元素を示す輝線が観測された。745 nm付近と870 nm付近のNや、780 nm付近と845 nm付近のOの輝線における緑から水色への増加率と、770 nm近傍のKや840 nm近傍のClの輝線における緑から水色への増加率を比べて見ると、岩塩の構成元素の輝線で発光強度の増加率が大きくなっている様子が見られる。これは第1のレーザー照射により上準位粒子が増加している状態で第2のレーザー照

射が行われたことで、効率的なプラズマ再加熱がされたためと考えられる。一方、大気成分の元素においては、緑が水色より大きくなる輝線も見られ、これは前述した雰囲気ガスの減圧効果を示していると考えられる。

■おわりに

ダブルパルスを用いたLIBSは測定対象の構成元素の輝線強度の増大と、大気成分の構成元素の輝線強度の抑制が期待できることを示した。塩水を附着させたモルタルを対象とした測定や、実際の橋梁で実証試験なども実施したので、次の機会に報告したい。

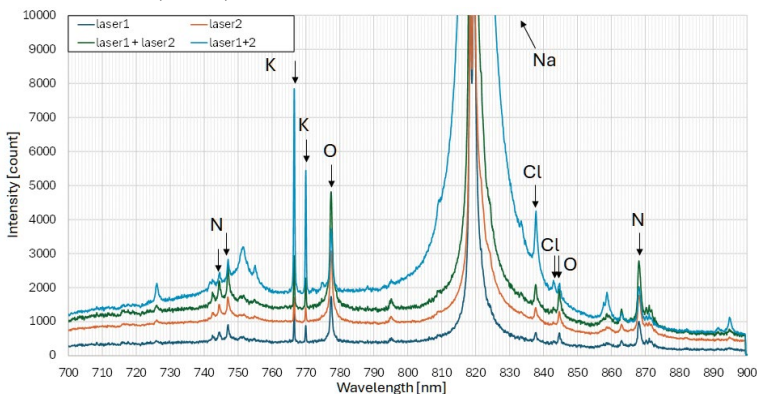
謝辞

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「スマートインフラマネジメントシステムの構築」(研究推進法人:PWRI)の支援を受けて実施された。関係各位に深く感謝の意を表します。

また、研究の遂行にあたり、議論、助言いただいた、名古屋大学・中村光教授、量子科学技術研究開発機構・長谷川登氏、建設技術研究所・戸本悟史氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) 江藤修三 他、電中研報告、H15005(2016)
- 2) F. Colao et al., Spectrochimica Acta Part B 57 (2002) 1167-1179
- 3) 香川喜一郎 他、プラズマ・核融合学会誌、83(5) (2007)401-412



【図1】岩塩から得られたLIBSスペクトル

REPORT

SPIE Sensors+Imaging 2025 国際会議報告

◆SPIE Sensors+Imaging 2025

国際会議(SPIE Sensors+Imaging 2025)がスペイン、マドリードのIFEMA Madridで9月15~18日の4日

レーザー計測研究チーム 染川智弘

間にわたり開催された。会場は空港からは近いものの、市街地からは少し遠く、地下鉄を何度も乗り換える必要があり、SPIEの会場は駅からも遠く不便であった。

SPIE Sensors+Imaging は筆者が参加したEnvironmental Remote SensingとSecurity + Defenceの2つの国際会議の共同開催で、両方の会議に参加が可能である。2023年時にはRemote Sensingの前に「Environmental」がついていなかったもので、Security + Defenceとの区別をはっきりさせ、環境計測に特化させているようだ。筆者は「Leak gas detection technique with hyperspectral Raman imaging lidar」というタイトルで、福島第一原子力発電所の原子炉格納容器の気相漏洩箇所を検知する独自のライダー手法の開発状況について口頭講演を行った。講演もあったEnvironmental Remote Sensingのほうに主に参加したが、Security + Defenceのほうが講演会場も広く、安全・防衛分野への関心は世界でも高いことが伺えた。

◆リモートセンシングに関連した幅広い分野の研究者が集まる

Environmental Remote Sensingでは、筆者が参加したRemote Sensing Technologies and Applications in Urban Environmentsのセッションの他に、Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications、Artificial Intelligence and Image and Signal Processing for Remote Sensing、Environmental Effects on Light Propagation and Adaptive Systems、Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere、Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites、Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrologyの6個のセッションがあった。リモートセンシングでは、衛星データの解析事例が多く、画像解析が得意なAIと組み合わせた発表が多い印象である。

ドイツのDeutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. のThilo Erbertseder氏から「Urban air quality and health: overview」というタイトルで、いろいろな大都市の大気中のNO₂濃度に関する招待講演があった。主に化石燃料の燃焼に由来するNO₂は、WHOの2022年から大気質データベースに導入されるなど、健康への基準が厳しくなっている。NO₂は波長430 nmに吸収ラインがあり、その波長を観測している衛星データから、大都市のNO₂濃度を評価していた。その大都市の中に日本の大阪、東京もあり、長年にわたる排ガス規制強化の取り組みのせい、NO₂濃度は改善傾向にあるとのことであった。

Security + Defenceでも同様に、安全+防衛に関連したリモートセンシングの10セッションが開催されていた。安全+防衛分野は展示会などでも、赤外カメラでの監視技術が目についたため、Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applicationsの

2件の発表を紹介したい。環境計測では温室効果ガスとして依然として注目を集めるCO₂ガスだが、防衛分野では、ミサイルの排気ガス中に含まれるCO₂の画像計測から、ミサイルの識別が実施可能とのことであった。

ドイツのFraunhofer IMSのAlexander Litke氏から「Multispectral imaging in the mid- and long-wavelength infrared using uncooled metamaterial-integrated microbolometer focal plane arrays」というタイトルで発表があった。この発表で使用されていたPlasmonic metamaterial absorbers (PMA)は、入射する光の波長よりも小さな周期をもつ金属周期構造を利用して、特定の赤外波長のみを透過させる赤外フィルターとして用いるもので、4.26 μm のCO₂だけでなく、3.32 μm 、7.66 μm のCH₄も計測可能とのことであった。実際に、このPMAを取り付けたサーモグラフィカメラでCO₂ガスの計測を実施していた。

The University of Western AustraliaのHemendra Kala氏からは「Large-area MEMS-based imaging sensors for adaptive multispectral imaging」というタイトルで報告があった。ファブリーペローフィルターの間隔をMEMSで調整して3~5 μm 帯での波長可変フィルターを作成したという報告であった。高価な機種では数千万円する赤外カメラを複数台並べて監視するシステムは無理があるため、フィルターで波長を切り替えるニーズがあるようだ。また、開発されている赤外フィルターは半値全幅が数10 nmなどとかなり広がった。吸収スペクトルは透過波長帯域で平均化されてしまい、得られる吸収変化が小さくなるためガス計測には不向きだと考えられるが、現状はガスの有無程度の評価で十分なようだ。

今回のSPIE Sensors+Imagingは、2026年9月14~17日にスコットランド、エジンバラで開催される予定である。



【写真】発表する筆者

レーザー総研オープンセミナー

「レーザー加工からインフラ診断まで」

～ILT2025 令和6年度研究成果報告会～ を開催

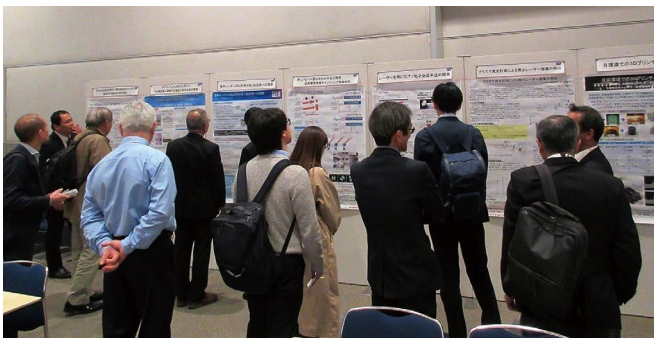
■ILTオープンセミナーを横浜で開催

令和7(2025)年11月11日、パシフィコ横浜(横浜市西区)にてレーザー総研オープンセミナー「レーザー技術の最先端 ～レーザー加工からインフラ診断まで～」ILT2025 令和6年度研究成果報告会を開催いたしました。昨年と同様に、(一財)光産業振興協会と(株)オプトロニクス社共催の「インターオプト2025」との同時開催となりました。

セミナーでは、月面での拠点基地建設に向けた月面資源を利用して建材製造をめざすレーザー3次元造形技術の開発の現状、液中でのレーザーアブレーションと光還元反応を用いたナノ粒子合成法の開発と合金ナノ粒子への応用、複数のレーザービームを高精度・高効率で結合させるための新しい光軸調整手法、レーザー誘起ブレイクダウン分光法を用いた塩分検知技術の開発と鉄筋コンクリート構造物への適用性研究、海中の



【写真1】オープンセミナーの様子

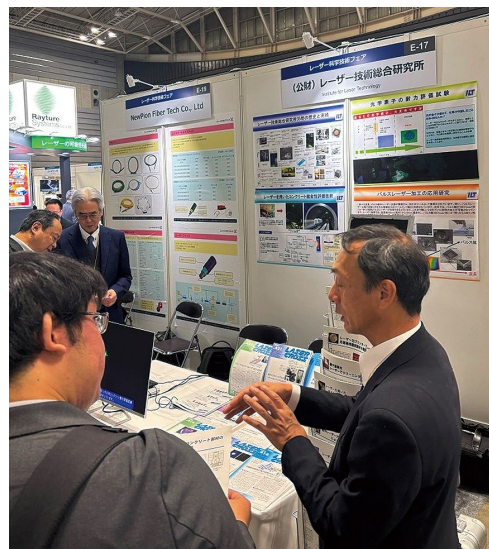


【写真2】ポスター発表の様子

二酸化炭素ガスの高感度検出と漏洩検知に向けたハイパースペクトル型ラマンライダーの開発、光学素子損傷評価試験の高速化・自動化を目指して開発を進めているプラズマ発光を利用した損傷検出技術など、レーザー応用に関するさまざまな技術の基礎と現状について解説し、当研究所の最新の研究成果を報告いたしました。またセミナーの最後には研究員がポスター発表を行い、ご出席者の皆様方と活発な意見交換を行うことができました。

■「インターオプト2025 -光とレーザーの科学技術フェア-」に出展

「インターオプト2025 -光とレーザーの科学技術フェア-」は、光・レーザー、画像計測関連機器が一堂に会する技術展示会として、同会場(パシフィコ横浜)で11～13日まで開催されました。当研究所は、併催イベントとして上記のオープンセミナーを開催し、併せて技術紹介の展示を行いました。展示ブースでは、セミナーで紹介できなかったレーザー打音技術などの紹介ビデオを上映するとともに、当研究所の最新技術に関するパンフレットや本誌のバックナンバーを配布しました。また、光学素子のレーザー耐力や新しいレーザー応用



【写真3】展示会場の様子

分野に関連する技術相談を行いました。当日は多くの方にご来訪いただき、貴重なご意見をいただきました。来年度も、同様の活動を継続して行うことを予定しています。