

ILT-APR Number 36
Issued: July 2025
ISSN 1340-6167

ILT2025年報

Annual Progress Report

2024-2025

公益財団法人 レーザー技術総合研究所
Institute for Laser Technology

は じ め に

公益財団法人レーザー技術総合研究所は、1987年の創立以来、レーザーと光関連産業の振興を図り、我が国の学術の進展と科学技術の発展に貢献することを目的として、レーザーとその応用に関する研究開発活動を積極的に展開してまいりました。令和6年（2024年）度におきましても、関係各位のご支援・ご協力を得て、概ね計画通りの活動を遂行することができました。ここに、令和6年度成果報告書（ILT 2025 年報 36 巻）を取りまとめました。何卒ご高覧の上、ご指導、ご助言賜りますようお願い申し上げます。

昨年度もプロジェクト研究「産業用レーザー開発プロジェクト」とチーム研究を並行して進めました。プロジェクト研究では、高出力で高品質のレーザービーム実現をめざして、コヒーレントビーム結合と可変形鏡の開発を継続しています。前者では多ビーム間の位相や伝搬方向のわずかな違いを高感度・高精度で検出・制御できる新手法の研究を、後者ではレーザー加工現場などへの導入をめざして高速制御技術の開発を進めています。

レーザーエネルギー研究チームでは、原子力や宇宙分野で必要なレーザー関連技術の研究開発を進め、新しい応用分野の開拓をめざしています。原子炉廃止措置や宇宙デブリのトラッキングと除去などにおけるレーザー利用技術について調査し、今後の開発課題を整理して開発計画の検討に着手しました。

レーザープロセス研究チームでは、ものづくりイノベーションを支援するため、ナノ秒からフェムト秒領域の短パルスレーザー加工の基礎・応用技術開発を進めてきました。近年は土木・建築業界へのレーザー技術普及をめざして屋外現場でのリスクアセスメントの具体化を進めており、表面クリーニング、道路標識の防水・防雪、月面環境での積層造形など、レーザー加工の新たな展開が期待されます。

レーザー計測チームでは、レーザー打音法によるインフラ構造物の健全性評価と、ラマンライダーを利用した環境計測を2本柱として研究を進めてきました。レーザー打音はトンネル切羽やダムコンクリート面での落石予知など工事現場への適用性研究や、レーザー誘起ブレイクダウン分光法との併用によるインフラ構造物の塩害評価技術への展開を図っています。また、ラマンライダーでは、大気環境から水中環境へと計測対象を拡張、海水中でのプラスチックごみや炭酸ガスの3次元分布計測など新たな課題に挑戦しています。

レーザーバイオ化学チームでは、蛋白質や酵素の機能メカニズム解明をめざすレーザー分光研究と溶液中での金属イオンの光酸化・還元反応の研究を進めています。放射性廃棄物の選択的分離やレアメタル回収、液相レーザーアブレーションを利用した酸化鉄の還元と水素生成への応用をめざします。

レーザー技術開発室では、長年にわたり、光学材料・素子の高耐力化研究と、産業界からのご依頼によるレーザー損傷評価試験を実施してきました。損傷評価では試験の高速化・自動化が望まれています。損傷発生時のプラズマ発光を利用する手法の検討を進め、損傷検出の高感度化に成功し、実用化に近い段階にまで技術レベルが向上しました。また、シリコン油を材料とし、三次元造形により光学素子の形成をめざす開発研究でも進展が見られました。

昨年も活発な研究活動を継続して推進することができたのは、偏に皆様方からのご支援によ

るものであり、心より厚く御礼申し上げます。所員一同、これまで以上に努力を積み上げ、成果の社会還元をめざします。今後ともなお一層のご支援、ご鞭撻を賜りますようお願い申し上げます。

2025 年 6 月

公益財団法人 レーザー技術総合研究所
所長 井 澤 靖 和

ILT2025 年報 (Annual Progress Report 2024-2025)

目 次

は じ め に

研 究 報 告 書

レーザープロセス研究チーム

月面環境での 3D プリンティングに向けて	1
Primary Factors Leading to Efficiency Degradation in Coherent Beam Combining: Effect of the Laser Linewidth	10

レーザー計測研究チーム

ラマンライダーによるプラスチックのリモート計測技術の開発	15
ダブルパルス LIBS 法を用いた RC 構造物の遠隔その場塩分検知技術の開発	20

レーザーバイオ化学研究チーム

光受容蛋白質の電子移動・電荷シフト反応メカニズムの解明	26
-----------------------------------	----

レーザー技術開発室

プラズマ発光計測による微小レーザー損傷の検出	31
------------------------------	----

発表論文リスト	39
事業報告書	45
組 織 図	59
構 成 員 一 覧	60
評 議 員	65
理 事 ・ 監 事	66
賛 助 会 員	67

研 究 報 告 書

月面環境での 3D プリンティングに向けて

レーザープロセス研究チーム

藤田雅之、田島孝敏¹、新村 亮¹、新述隆太¹、湊田安浩¹

¹株式会社大林組

1. はじめに

月面基地建設に使用する建材を現地で調達するために、月の模擬砂を用いた建材作製の研究開発を大林組と協力して 2018 年から行ってきた。月の表土のみを材料として、(結合材や添加物等を加えずに) レーザー加熱によるブロック等の作製を試みている。レーザーを用いた手法では産業界で利用されている 3 次元造形技術(3D プリンター) の転用が可能となる。レーザー加熱 3D プリンターには 2 種類の手法(粉末床溶融結合(PBF: Powder Bed Fusion) 法と指向性エネルギー堆積(DED: Directed Energy Deposition) 法) があり、図 1 に模式図を示す。両手法とも一長一短を有しているため、両手法で積層実験を実施し、造形物の比較・評価を行っている。

本稿では、2024 年度に国交省スターダストプログラムにおいて得られた研究成果を報告する。造形形状の多様化を進めると共に、造形物内部の様子を X 線 CT で観測した。また、月面環境(1/6G、真空)での粉体供給方法について検討を行った。

2. CAD/CAM データを利用した DED 法積層造形

DED 法を用いた実験は、滋賀県工業技術総合センターが保有している金属積層造形装置(LAMDA200)を用いて積層造形を行った。これまでは、積層方向を

90° ずつ変えた 4 層分の座標を手入力して造形を行ってきたが、本装置は産業用に開発された 3D プリンターなので多様な機能を有しており、今回、CAD (Computer Aided Design) /CAM (Computer Aided Manufacturing) データに基づく自動造形機能を利用して形状の多様化を

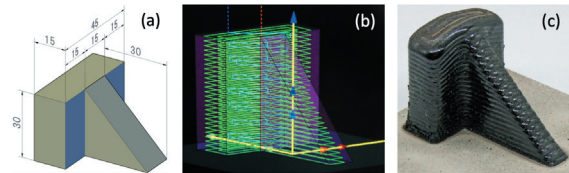


図 2-1 アングル形造形物

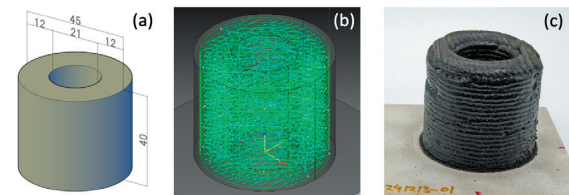


図 2-2 円筒型造形物

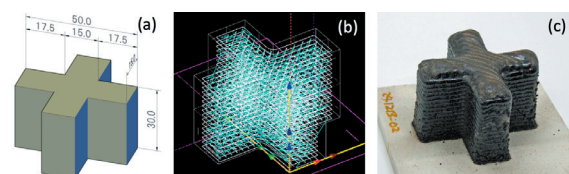


図 2-3 十字型造形物

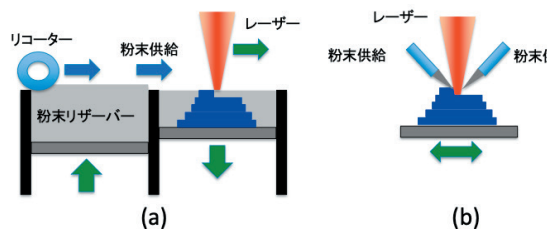


図 1 2 種類のレーザー加熱積層造形法；

- (a) 粉末床溶融結合(PBF) 法、
- (b) 指向性エネルギー堆積(DED) 法

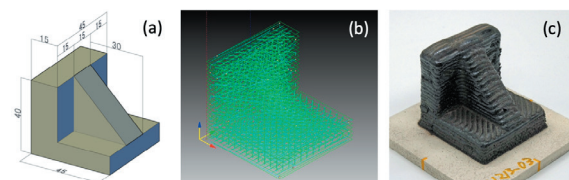


図 2-4 底板付きアングル形造形物

図 2-1～2-4 DED 法による積層造形物；

- (a) CAD データ(単位は mm)、
- (b) CAM データ、(c) 積層造形物。

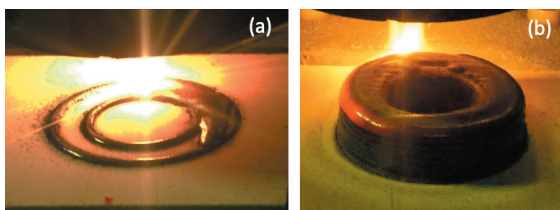


図3 CAD/CAM データを用いた円筒形状の積層造形の様子；(a) 外周と内周を掃引した後に内部を塗りつぶし、(b) 層毎に塗りつぶしの方向を45° ずつ変えて積層していく様子。

試みた。図2-1～図2-4にCAD/CAMデータを用いたアングル形状、円筒形状、十字形状、底板付きアングル形状の積層造形物を示す。それぞれ、(a)CADデータ（単位はmm）、(b)CAMデータ、(c)積層造形物である。形状を定義したCADファイルを作成し、USBメモリでLAMDA200に転送すると、ほぼ自動的にレーザーの掃引方向、掃引の順番等を装置が判断して造形が行われる。各層やパーツ毎に座標を入力する手間が省ける。図2-1～図2-4(b)に示したCAMデータの線はレーザーを掃引する線を示している。例えば、十字形状を積層する場合では、層毎に十字形の領域を塗りつぶしていくわけだが、各層でレーザーの掃引方向を45° ずつ回転させて積層が進んでいく。また、最初の掃引で形状の輪郭をなぞった後に内部を塗りつぶして積層するなど産業用途で得られている知見を活かすことができる。これらの掃引を座標の手入力で行うことは、ほぼ不可能と言える。

図3にCAD/CAMデータを用いたDED法による円筒形状の積層造形の様子を示す。図3(a)は外周と内周を掃引した後に内部を塗りつぶしていく様子、(b)は層毎に塗りつぶしの方向を45° ずつ変えて積層していく様子である。(a)の層と(b)の層では塗りつぶしの方向が90° 異なっている。

3. μ X線CTによる造形物の内部観察

3.1 曲げ試験用供試体の内部

DED法で作製した供試体はほぼガラス化しており、圧縮には強いが表面や内部に微細なクラックやひび割れが生じているため、圧縮強度に比べて低いという課題

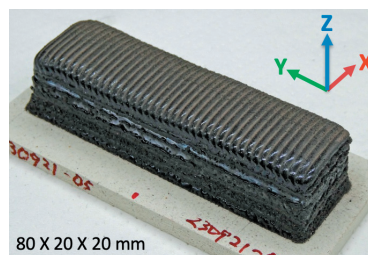


図4 内部観察を行った曲げ強度試験用供試体

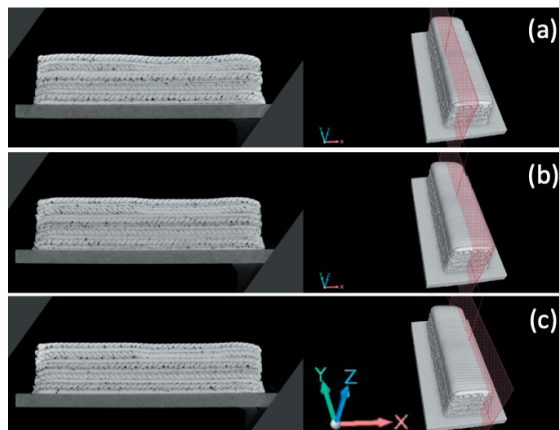


図5 内部観察結果（X方向の異なるYZ断面）。

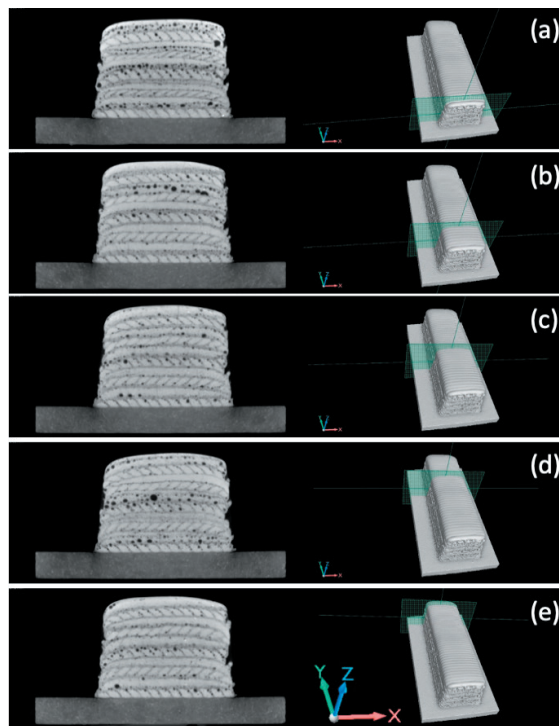


図6 内部観察結果（Y方向の異なるXZ断面）。

がある。そこで、供試体を追加熱・溶融させて表面クラックやひび割れを除去する可能性について検討を行っ

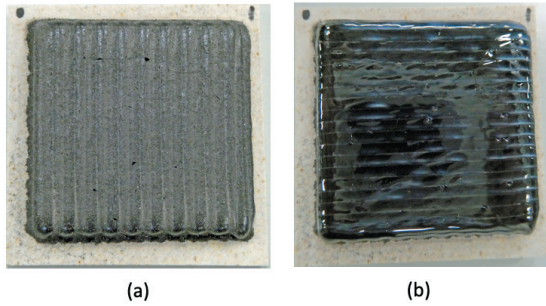


図7 DED法による積層造形物表面の比較；
(a) 造形後の供試体、(b) 造形後にデフォーカスして
表面を再度照射した供試体（ $40 \times 40 \times 4$ mm）。

た。これまで、外観や破断面から内部クラックの存在を推測していたが、今回、 μ X線CT装置を用いた内部観察を行った。図4に μ X線CTで内部観察を行った曲げ強度試験用供試体を示す。観察には神奈川県立産業技術総合研究所のTXS-33000FDを用いた。図5に μ X線CTによる内部観察結果（X方向の異なるYZ断面、Z軸は厚み方向）を、図6に同じく内部観察結果（Y方向の異なるXZ断面）を示す。各層毎の断面形状や空隙が観測されており、サンプルを破壊すること無く、内部のクラックや空隙の存在、積層の構造が確認できる。

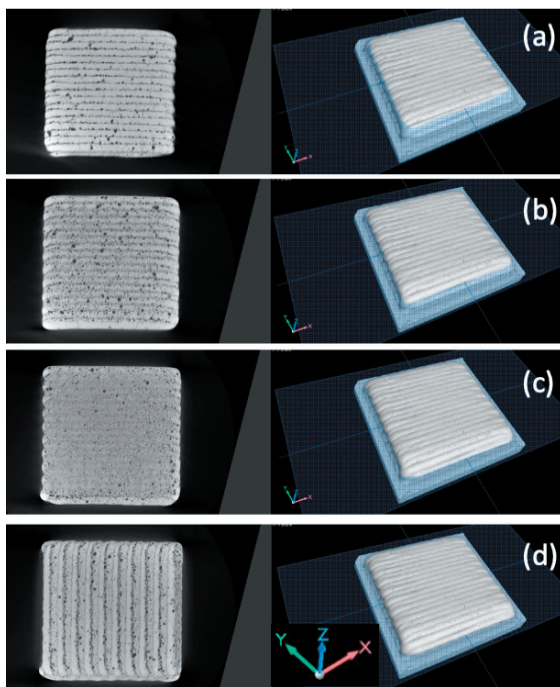


図8 μ X線CTによる内部観察結果；
図7(a)のXY断面。

3.2 レーザー追加加熱を施した供試体の内部

レーザーで供試体表面を追加加熱することで表面や内部がどのように変化するかを確認する実験を行い、その内部を μ X線CTで観察した。図7に2つのDED法による積層造形物表面を示す。図7(a)は造形後、(b)は造形後の供試体表面全体を追加加熱した後の写真である。図7(a)の作製条件は、レーザー出力100 W、走査速度2 mm/s、粉末供給量3.77 g/min (4 rpm)の2層盛、造形寸法 40×40 mm、肉盛高さ4 mmであった。同様に作製した供試体に対して、レーザー出力100 W、走査速度2 mm/sで焦点を5 mmデフォーカスして（照射強度を下げて）加熱した供試体が図7(b)であり、最上層が溶融し滑らかな表面となっている。

図7(a)、(b)の供試体の μ X線CTによる内部観察結果（Z方向の異なるXY断面）をそれぞれ図8、図9に示す。図8と図9で供試体の方向（レーザー掃引の方向）が 90° 異なるが、(a)が表層近傍、(b)が2層目、(c)が1層目と2層目の境界付近、(d)が1層目の断面に対応する。図8と図9の(c)～(d)では、掃引ビードの筋やボイド（空隙）等に関して同様の傾向が見られ

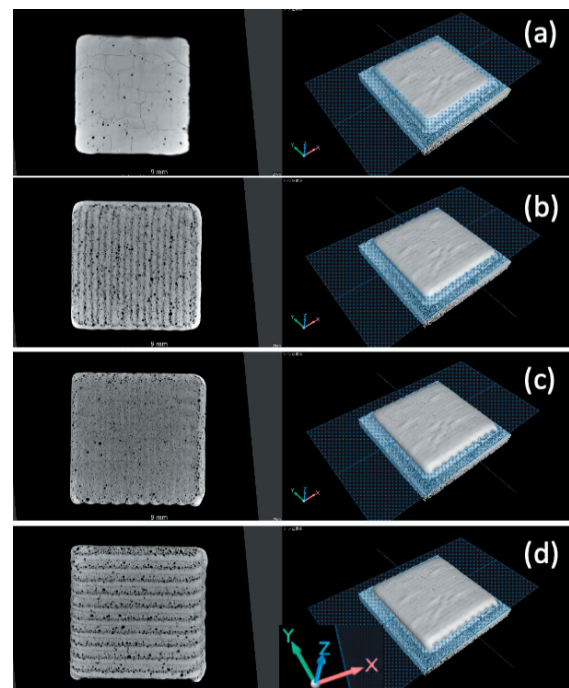


図9 μ X線CTによる内部観察結果；
図7(b)のXY断面。

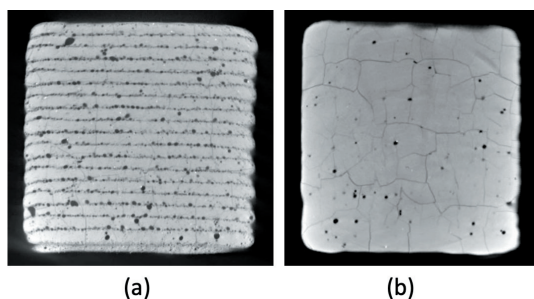


図10 図8(a) と図9(a) のCT像の比較.

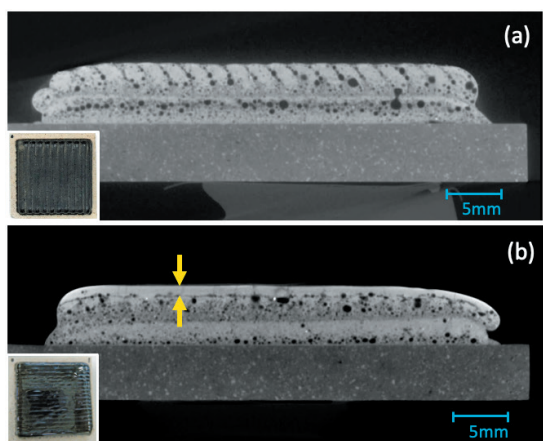


図11 図7に示す供試体の μ X線CT断面像の比較；(a) 造形後の供試体、(b) 造形後にデフォーカスして表面を再度照射した供試体

る。図10に図8(a)と図9(a)のCT像の比較を示す。再加熱の効果でビードの筋が消えてボイドが減少し、クラックが明瞭に観察できる。

再加熱の深さを観察するために、図7(a)、(b)の供試体の断面像を図11(a)、(b)に示す。図11(b)内の矢印は再加熱の効果が見られる層を示す。再加熱の効果（或いは、熔融層の厚さ）は約1mm程度で、空隙が著しく減少しているもののクラックの消滅には至っていない。クラックは熔融層の下から繋がっており、熔融後の冷却時に再度発生したものと推測される。これを変えるには、真空中で再加熱して放置するなど冷却条件を変化させる必要があると考えられる。

3.3 真空中で造形した供試体の内部

昨年の年報で真空中におけるPBF法積層造形試験の結果を紹介した。この時は表面状態を観察して大気中と

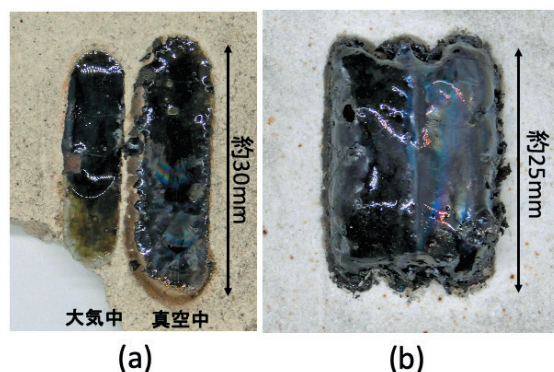


図12 (a) 大気中（左）と真空中（右）で形成したビード、(b) 真空中で形成した3本のビード×3層の造形物。

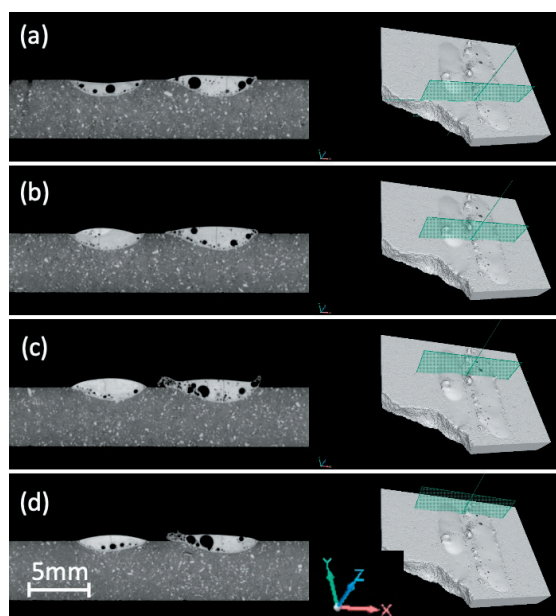


図13 図12(a)に示す供試体の μ X線CT断面像

真空中では表面状態が異なる供試体を得られたことを報告したが、今回は μ X線CTによる内部観察結果について報告する。

図12(a)に大気中（左）と真空中（右）で形成したビードの比較写真を示す。レーザー照射径約7mm、レーザーパワー244W、掃引速度3mm/sの同一条件でレーザー掃引したにも関わらず、幅が異なるビードが形成された。これは、真空中では放熱が妨げられてレーザー照射部が高温で維持されたためであると考えられる。

次いで、真空中で幅10mm（長さ20mm）のビードを6mm間隔で3本並べて3層の積層を試みた結果を図12

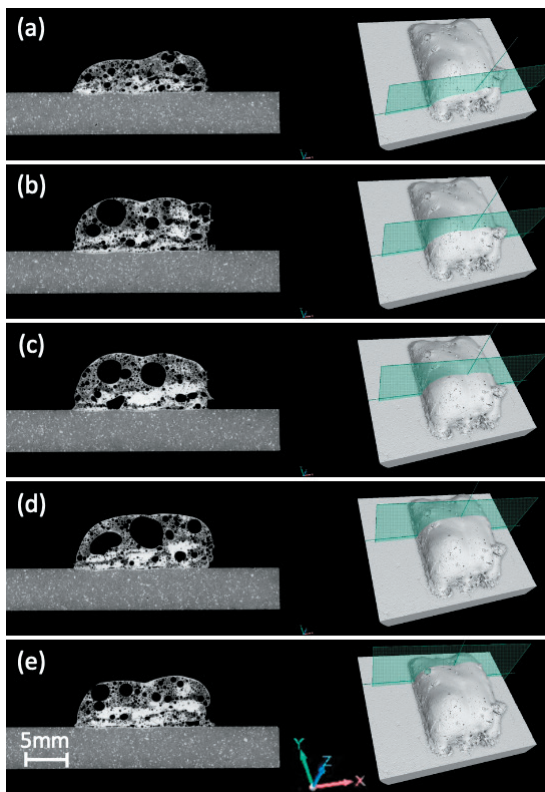


図 14 図 12(b) に示す供試体の μ X 線 CT 断面像

(b) に示す。この時のレーザーパワーは 180 W、掃引速度 3 mm/s であった。手前から奥に向かって順番にビードを並べ、厚さ 2mm の砂を敷きながら 3 回繰り返して積層を行った結果である。最後に引いたビードは表面が虹色に発色している。

図 13 に図 12(a) に示す供試体の μ X 線 CT 断面像 (X 方向の異なる YZ 断面) を示す。断面写真の白い部分がビード部で、左が大気中、右側が真空中で形成したビードである。真空中で形成されたビード内には大きめの空隙が生じていることが分かる。これは、真空且つ高温下で酸化物が解離してガス化したためと推測される。

図 14 に図 12(b) に示す供試体の μ X 線 CT による内部観察結果 (X 方向の異なる YZ 断面) を示す。 μ X 線 CT 像からは (虹色を発色する) 薄いガラス層の存在は明瞭に確認できなかったが、連続してビードを形成した際の空隙発生の様子を推定できる。図 12(b) でビードは 3 層にわたって左側から右側へ 3 本形成したが、最も大きな空隙が確認できたのは最上層で最初に形成された左側のビード内である。一方で、最後に形成された右側

のビード内では空隙はあるものの、その大きさは比較的小さい。このことから、先に形成されたビードが隣接するビード形成時の高温にさらされて、一度はガラス化した模擬砂が軟化し、その成分が再び解離・ガス化して空隙が成長した可能性が示唆される。

今後は、シングルビードの形成実験に加えて、隣接するビード間での熱の移動に着目した実験、最上層のみを再度粉体無しで再加熱する実験や冷却時間によるガラス固化の変化など、真空中での積層造形に特有の現象を解明していくことが重要であると考えられる。

4. 遠心力を利用した粉体搬送の検討

DED 法を用いた積層造形装置では、粉体を Ar ガスで搬送してレーザーの集光点付近に噴射している。一方、月面では真空かつ重力が地上の 1/6 となる。このような環境下で DED 法による積層造形を可能とするためには真空中での粉体搬送技術を検討することが重要となる。真空かつ低重力環境を模擬した実験を地上で行うことは容易ではないので、シミュレーションを用いた検討を行ってきた。

粉体の吐出を利用した産業機械を調査していく中で、砥粒を吹き付けて金属部品を研磨する (株) ヤマシタワークスの加工装置 AEROLAP® (エアロラップ) による鏡面研磨の様子を示す。約 10mm ϕ の範囲で直線的に砥粒が吹き出しており、DED 型 3D プリンターの粉体吐出の样様に酷似している。砥粒を模擬砂に変えれば月面で



図 15 砥粒を吹き付ける加工装置 AEROLAP® による鏡面研磨の様子。

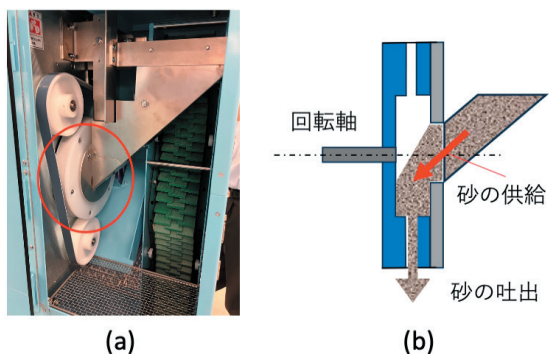


図 16 鏡面加工装置 AEROLAP®の (a) 粉体（砥粒）供給部、(b) (a)の内部構造のイメージ。

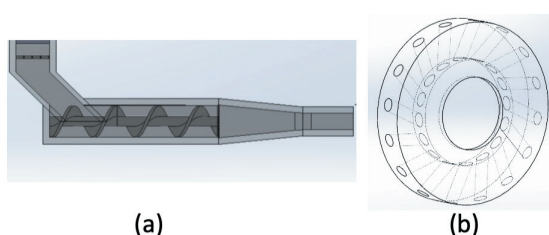


図 17 粉体搬送機構の変更；
(a) スクリュー型、(b) ディスク型

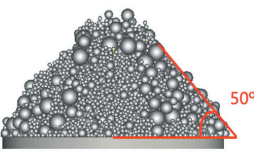
も搬送ガス無しで粉体を供給できることが期待される。また、吐出口径が大きいため、粉体の目詰まりが起きる可能性も低い。

(株) ヤマシタワークス本社を訪問して装置を見学し、内部構造に関する情報を提供してもらった。図 16 に鏡面加工装置エアロラップ®の (a) 粉体（砥粒）供給部、(b) (a)の内部構造のイメージを示す。粉体供給部は円板であり、外周にベルトを密着させて回転させている。円板の内部に粉体を自由落下で供給し、回転する円板に空いた穴から粉体を吐出させている。

これまで、円筒内にスクリーンを配して機械的に粉体を押し出すモデル（図 17(a)）の解析を行ってきたが、吐出された粉体が広がりながら放物線を描いて飛散していく結果しか得られなかった。そこで、今回は円板の円周方向に穴を開けて遠心力で粉体を吐出するモデル（図 17(b)）の解析を行った。

表 1 に粉体搬送シミュレーションで用いたパラメータを示す。これらの値はスクリーン搬送の解析時と同じである。図 18 に遠心力を利用した粉体搬送の解析モ

表 1 粉体搬送シミュレーションで用いたパラメータ

物性値 (粉体)			粒度分布	
粒子径	μm	100, 200, 300, 400	材料	W t %
密度	kg/m ³	2900	100μm	40
安息角	°	50	200μm	20
反発係数	-	0.9	300μm	20
摩擦係数	-	0.7	400μm	20
回転抵抗	-	0.4		
ばね定数	N/m	1.5		
運転条件				
回転数	rpm	1500		
重力	m/s ²	1.635 (9.81/6)		
供給速度	kg/s	0.16		
解析パラメータ				
計算時間	s	3		
初期時間刻み	s	4e-6		
粗視化倍率	-	5		

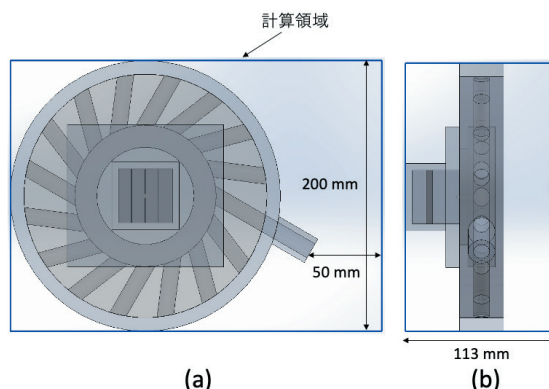


図 18 遠心力を利用した粉体搬送の解析モデル I。

デル I を示す。サイズはエアロラップ®の実機を参考にしている。円板の内部に自由落下で粉体が供給され、円板は時計回りに高速回転（1500rpm）する。円板内に設けられた穴の直径は 12 mm で、粉体吐出の指向性を上げるために円板外周の一部に穴と同じ内径の吐出管を設けた。また、粉体の粒径分布は簡単のために粒径毎に 4 群に分けて供給することとした。供給時には 4 群は分かれているが、供給が始まると混合していくことが確認されている。計算は、真空中（大気との相互作用無し）、重力 1/6G で行った。

図 19、図 20 に解析モデル I の結果として、(a) $t=0$ 、(b) $t=0.3$ 、(c) $t=1.0$ 秒における粉体の分布と粉体の速度を示す。吐出管を設けたことで円板内部に供給された粉体が真っ直ぐに排出されていることが確認できる。この時の排出速度は約 2m/s 程度であった。円板の外壁近傍では接線方向に 14 m/s の速度が得られているにもかかわらず、円板の穴と吐出管の角度及び内径を同じにしたため、粉体は吐出管の内壁に衝突するように排出される

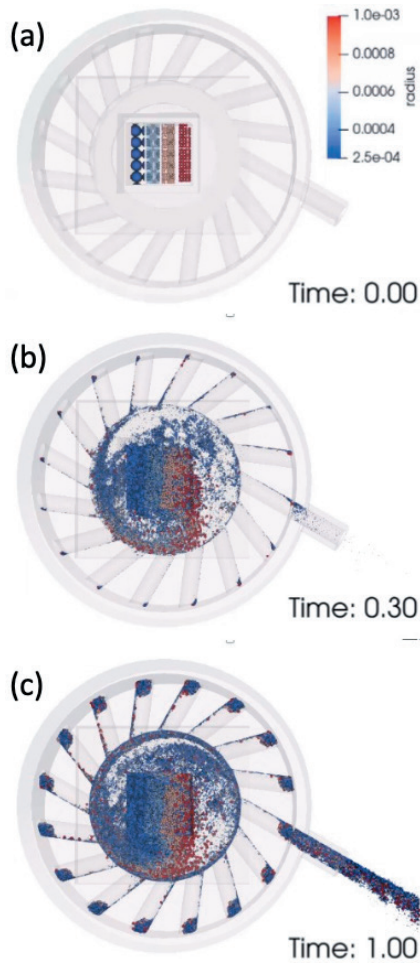


図 19 解析モデル I の結果 ; (a) $t=0$ 、(b) $t=0.3$ 、
(c) $t=1.0$ 秒における粉体の分布。

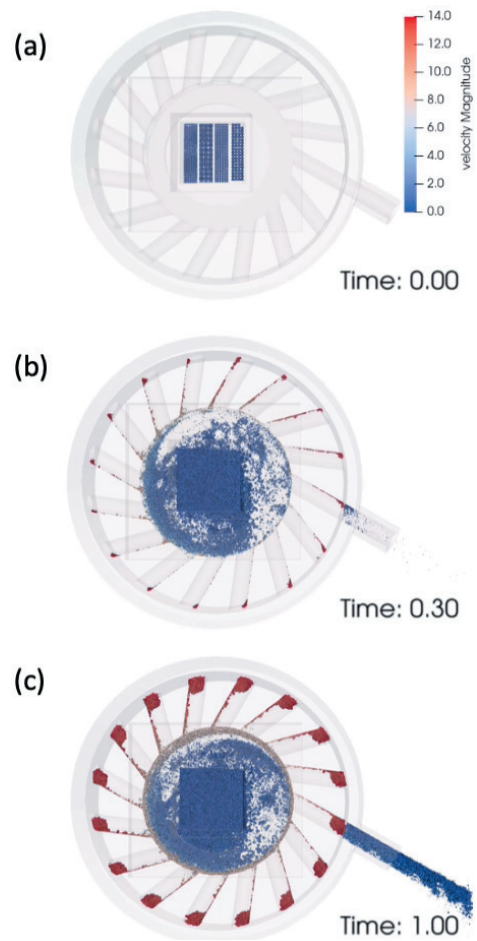


図 20 解析モデル I の結果 ; (a) $t=0$ 、(b) $t=0.3$ 、
(c) $t=1.0$ 秒における粉体の速度。

と共に、吐出管入り口で減速されてしまっている。また、吐出管を通過した後も穴の内部には粉体がとどまっている。この解析モデル I の構造では、吐出管内部に粉体が充満して押し出されるように排出されていることが分かった。排出構造に改善の余地があると言える。

図 21 に解析モデル I における粉体吐出の質量流量の時間変化を示す。回転開始から約 1.5 秒で 140 g/s の吐出が実現しており、3 秒後には供給量と同量の吐出が確認された。この量は、毎秒約 50cm^3 に相当する。

図 22 に遠心力を利用した粉体搬送の解析モデル II を示す。解析モデル I から、より実機に近づけた構造とした。吐出管を廃して、全周の 1/4 を開放した形状にしている。円板の直径や回転数は同じで、円板の回転方向を逆向きでシミュレーションを行った。

図 23、図 24 に解析モデル II の結果として、(a) $t=0.1$ 、

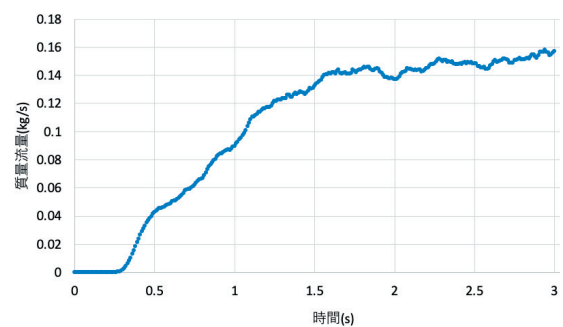


図 21 解析モデル I での吐出管からの質量流量の時間変化。

(b) $t=0.25$ 、(c) $t=1.0$ 秒における粉体の分布と粉体の速度を示す。水平方向の粉体の広がりが見えやすいように斜視図で表示している。穴の出口が開放されると一気に粉体が排出され、若干の広がりがあるものの円板外周上の出口から接線方向に指向性を持って排出されている

ことが確認できる。この時の排出速度は最大で 14m/s であった。

スクリー搬送で円板内部に粉体を搬送して、円板の遠心力を利用して所望のスポットに粉体を供給すると

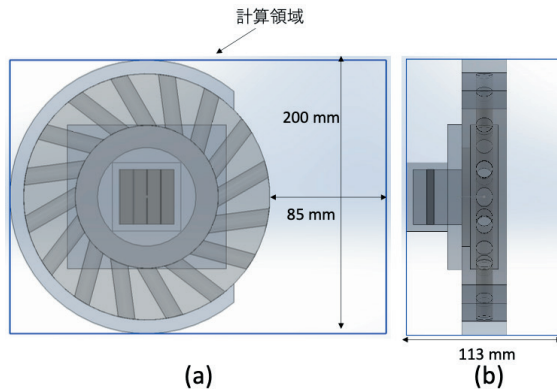


図22 遠心力を利用した粉体搬送の解析モデルⅡ.

いうシステムが成立すると考えられる。

5. まとめ

市販の金属 3D プリンター搭載の CAD/CAM データに基づく自動造型機能を利用して造形物形状の多様化を進めた。レーザー掃引の座標を入力する手間が省けるために形状の自由度が高まることになる。

供試体を追加熱して表面あるいは内部を溶融させて表面クラックやひび割れを除去する可能性について検討を行った。 μ X線CTを用いることでサンプルを破壊すること無く内部のクラックや空隙の存在、積層の構造が観察できることが確認できた。追加熱の効果は表面から約 1mm 程度で、空隙が著しく減少しているもののク

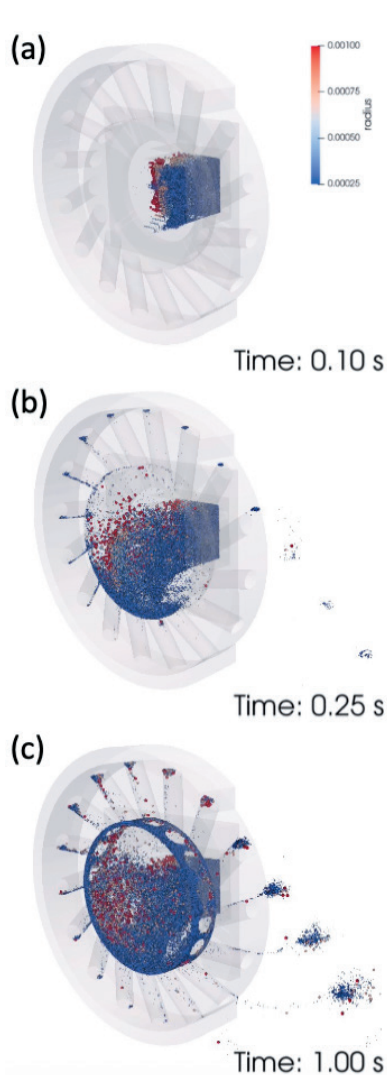


図23 解析モデルⅡの結果；(a)t=0.1、(b)t=0.25、(c)t=1.0 秒における粉体の分布.

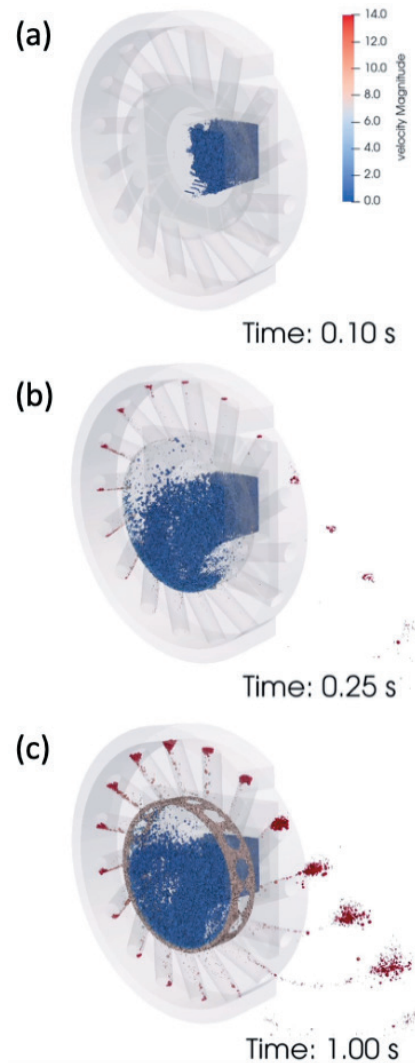


図24 解析モデルⅡの結果；(a)t=0.1、(b)t=0.25、(c)t=1.0 秒における粉体の速度.

ラックの消滅には至っていないことが確認された。クラックは溶融層の下から繋がっており、溶融後の冷却時に再度発生したものと推測される。

また、真空中での PBF 法積層造形実験で作製した供試体の内部を μ X 線 CT を用いて観察した。大気中で作製された供試体と比べて、内部に大きな空隙が形成されていることが確認された。一度はガラス固化した模擬砂がレーザー加熱により軟化し、その成分が再び溶解・ガス化して空隙が成長した可能性が示唆された。今後は、真空中での積層造形に特有の現象を解明していくことが重要であると考えられる。

シミュレーションによる粉体搬送について検討を行い、低重力・真空の環境下でも粉体の搬送が可能である機構について検討を行った。産業用の研磨加工装置を参考にして円板の円周方向に穴を開けて遠心力で粉体を吐出するモデルを用いて解析を行い、十分な量の粉体を直線的に供給できることを確認した。

謝辞

本研究は、令和3年度に開始した「宇宙開発利用加速化戦略プログラム・宇宙無人建設革新技術開発」の一環として、国土交通省の委託を受けて、大林組、名古屋工

業大学と共同で実施した。実験の遂行に際してご協力頂いた滋賀県工業技術総合センターおよび神奈川県産業技術総合研究所、(株)ヤマシタワークスの関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤田雅之 他, 「レーザー加熱による月面模擬砂を用いた建設材料の作製」、第 64 回宇宙科学技術連合講演会、オンライン、2E14 (2020).
- 2) 藤田雅之 他, 「レーザー加熱による月の模擬砂を用いた建設材料の作製」、第 65 回宇宙科学技術連合講演会、オンライン、2A15 (2021).
- 3) 藤田雅之 他, 「レーザー加熱による土質材料の有効利用」、第 66 回宇宙科学技術連合講演会、熊本城ホール、2J11 (2022).
- 4) 藤田雅之 他, 「レーザーを用いた月面基地建設材料の作製」、第 67 回宇宙科学技術連合講演会、富山国際会議場・ANA クラウンホテル富山、3R05 (2023).
- 5) 藤田雅之 他, 「月面環境におけるレーザー加熱 3D プリンティングの可能性」、第 68 回宇宙科学技術連合講演会、アクリエ姫路、2O12 (2024).

Primary Factors Leading to Efficiency Degradation in Coherent Beam Combining: Effect of the Laser Linewidth

Laser Process Research Team

Haik Chosrowjan and Seiji Taniguchi

1. Introduction

Interest in coherent beam combining (CBC) has been driven by the desire to obtain continuous-wave (CW) as well as pulsed laser beams with higher power, intensity, and brightness that are not achievable from a single laser source. Different phase-combining techniques for tiled-aperture (TA) and filled-aperture (FA) CBC have been developed and successfully implemented^{1–3}.

In recent years, we have investigated several CBC geometries based on single-detector and “climbing hill” or stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithms for phase locking. These CBC techniques in active feedback phase control systems deal only with the piston-phase difference correction between individual beams. This is, however, a necessary but not sufficient condition for obtaining high CBC efficiency (see section 2). In real MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) systems, the amplifier arrays are not uniform (power variations, phase jitters, array element pointing and divergence non-uniformities, etc.), and the optical elements, coated surfaces, and beam alignments also contribute to wavefront aberrations. So, a necessity to evaluate the CBC efficiency degradation sources arises. Except the piston phase error between the individual beams, those sources are beams' power imbalance, beams' lateral shift imbalance (fractional spot displacement), beams' size mismatch, optical path length (temporal overlap) mismatch for the finite bandwidth beams, pointing mismatch, divergence mismatch, wavefront distortions (high order aberrations), polarization state mismatch, wavefront deformation error due to the optical components, and beam splitting ratio imbalance. Hence, strict conditions are applied to the individual beamlets in the CBC. For achieving the highest

possible CBC efficiency, even small misalignments must be minimized and controlled.

In our previous report⁴, we discussed the FA CBC efficiency degradation dependence on the beam diameter and compared two cases with beams having ~ 1 mm and ~ 10 mm diameters, respectively. We have shown that the pointing mismatch condition becomes looser for beams with ~ 1 mm beam diameter while the beam centering requirement becomes stricter. Contrary to this, for ~ 10 mm diameter beams, the pointing mismatch condition becomes very strict while the beam centering condition loosens. Sub-Rayleigh alignment of the laser beamlets in parallel is required.

In this report, the dependence of the CBC efficiency degradation on the laser linewidth will be discussed. The laser linewidth is directly related to the coherence length, hence affecting the coherence degree (visibility) and the efficiency of the combining beams. We will show that as the laser linewidth increases, the optical path mismatch condition for efficient CBC becomes severe.

2. CBC efficiency

Several metrics are used to characterize the CBC efficiency. Most widely used ones are the combined power η_p and the far field on-axis intensity η_I defined respectively as:

$$(a) \quad \eta_p = \frac{P_{CBC}}{\sum_1^N P_n} \quad (b) \quad \eta_I = \frac{I_{CBC}}{(\sum_1^N \sqrt{I_n})^2} \quad (1)$$

In Eqs. 1 (a) and 1 (b), P_n and I_n are the power and the far field on-axis intensity of the n^{th} beamlet, P_{CBC} and I_{CBC} are the power and the peak intensity of the combined beam, and N is the number of the beam channels. Eq. 1(a) efficiency definition is often used for the FA CBC, where

combining efficiency decreases due to losses on combiners because of not absolute destructive interference in the secondary (loss or dump) channels. For the TA CBC, there are no combiners in the near field, so η_p is always 1. On the other hand, Eq. 1(b) is used for both FA and TA CBC cases.

Note that one should also distinguish between absolute and relative efficiencies (η^{abs} and η^{rel} , respectively), which are not always equal. In η^{abs} definition, N individual beamlets before combining are considered perfect in terms of phase wavefront flatness (aberration free), whereas in η^{rel} definition, N individual beamlets before combining are considered real, i.e., aberrated. The relation $\eta^{abs} \leq \eta^{rel}$ always holds. In this report, we will use the combined power η_p CBC efficiency definition ($\eta_{CBC} = \eta_p$) because there is no difference between relative and absolute CBC efficiencies in terms of combined power.

3. Laser linewidth and the coherence length, coherence degree and visibility

Coherence length (L_{coh}) is an important parameter to be considered for efficient CBC. It is used to quantify the degree of temporal (not spatial!) coherence as the propagation length (and thus propagation time) over which coherence degrades significantly, i.e., the optical phase undergoes substantial random changes. It is defined as the vacuum velocity of light times the coherence time (Eq. 2).

$$L_{coh} = c * \tau_{coh} = \frac{c}{\pi \Delta \nu} = \frac{\lambda^2}{\pi \Delta \lambda} \quad (2)$$

Here c , τ_{coh} , λ , $\Delta \lambda$, and $\Delta \nu$ are the speed of light, the coherence time, the wavelength, and the FWHMs of the wavelength and the frequency, respectively. Beams with longer L_{coh} are preferred due to their ability to preserve coherence (the interfering potential) at longer optical length differences. Eq. (2) becomes an approximation in cases where the coherence function (and the spectral-line form) has a more complicated shape. Generally, the shape and

width of the optical spectrum alone do not fully determine the coherence properties.

The coherence degree (G) on the other hand, is a normalized correlation function useful for quantifying the coherence between two beams, as measured in a Michelson or other linear optical interferometer. For the single-frequency, Gaussian, and Lorentzian spectral lines, respectively, the coherence degree G can be defined (Eq. 3, from top to bottom) as:

$$G = \begin{cases} 1 \\ e^{-\frac{\pi [\Delta L_{opt}]^2}{2 L_{coh}^2}} \\ e^{-\frac{|\Delta L_{opt}|}{L_{coh}}} \end{cases} \quad (3)$$

Here, ΔL_{opt} is the optical length difference between the interfering beams. By substituting Eq. 2 into Eq. 3, one can recognize that the coherence degree depends on the laser linewidth. Narrow-line laser coherence length can be in kilometers, while the coherence length of, for instance, fs pulses can be in micrometers.

Visibility (V) is another important quantity for efficient CBC. It is a measure of the interference contrast in a system with a superposition of waves. Visibility is defined as the ratio of the intensity difference between the brightest (I_{max}) and darkest (I_{min}) parts of the interference pattern to the sum of those intensities (Eq. 4).

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (4)$$

Generally, when two or more waves are superimposed, and a constant phase difference between them exists, the intensity in the resulting image redistributes, forming an interference pattern. The visibility describes the contrast of such an interference pattern. To get the maximum possible output in the I_{max} channel, the visibility must obtain its maximum value, i.e., $V = 1$. This will mean an ideal black and white contrast for the gain versus the loss channel.

It is easy to understand the underlying physics when we

recognize that the visibility V and the coherence degree G describe the same phenomenon: Visibility is the empirical evaluation of the coherence, while the coherence degree is the mathematical model-based description of the coherence phenomenon by considering the spectral shape of the laser beam. For better illustration, the Coherence Degree ($G = V$) versus the ratio of the optical length difference to the coherence length, for the two-beam CBC scheme (Eq. 3), is plotted in Fig. 1.

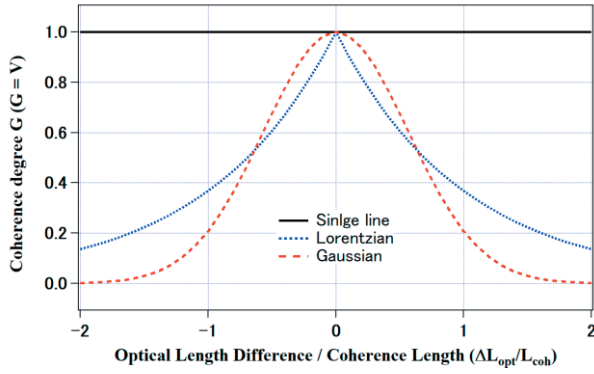


Fig. 1. The coherence degree ($G = V$) as a function of $\Delta L_{opt}/L_{coh}$ ratio for a single line (solid line), Lorentzian (dotted line), and Gaussian (broken line) linewidths, respectively.

For illustration purposes, an example of interference blurring due to the coherence degree (visibility) drop is shown in Fig. 2. The experiments were done using ~ 20 GHz Gaussian linewidth ($L_{coh} \sim 4.77$ mm), 1064 nm wavelength, 5 mm diameter and equal power laser beams overlapping at ~ 0.7 mrad angle, when the optical length difference (ΔL_{opt}) between them was ~ 0 mm (right panels) and ~ 3.5 mm (left panels), respectively. The intensity profile $I(x, y)$ calculations were done using Eq. 5 and the PTC Mathcad Prime 3.0 software, using the above-listed experimental parameters for the Gaussian linewidth beams.

$$I(x, y) = 2 * \exp\left(-2\left(\frac{x^2 + y^2}{R^2}\right)\right) * \left(1 + \exp\left(-\frac{\pi^3}{2}\left(\frac{(\Delta L_{opt})^2 \Delta f^2}{c^2}\right)\right) * \cos\left(2\pi\theta\frac{x}{\lambda} + \varphi\right)\right) \quad (5)$$

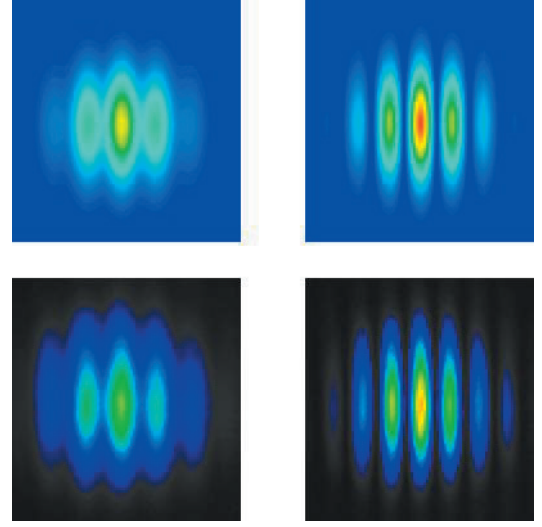


Fig. 2. Demonstration of interference blurring due to the drop in the coherence degree (visibility). Calculated (top) and experimentally obtained (bottom) far-field intensity distribution profiles, respectively. In the *right-side images*, the optical length difference (ΔL_{opt}) between two beams is ~ 0 mm, while in the *left-side images*, the optical length difference between two beams is ~ 3.5 mm.

In Eq. (5), R , Δf , θ , and φ are the beam radius, FWHM of the laser linewidth, the interference angle, and the phase difference between the beams, respectively. In the present analysis φ was set to zero. In Fig. 2, it is clearly seen that the visibility contrast is sharp around 0 but degrades as the optical length difference between the beams increases to ~ 3.5 mm. The observed contrast blurring is directly caused by the finite laser linewidth.

As we will show in the next paragraph, the interference contrast blurring, which directly depends on the laser linewidth, is primarily responsible for the CBC efficiency degradation.

4. CBC efficiency degradation for the finite linewidth beams caused by the optical length mismatch error

Let's now analyze the two-beam CBC efficiency dependence on the optical length mismatch for the case of the filled-aperture coherent combining and different laser

linewidths. In that case, using Eq. 5 for the intensity distribution, the CBC efficiency can be expressed by the following equation:

$$\eta_{CBC}(\Delta L_{opt}) = \frac{I(x=0, y=0, \varphi=0, \Delta L_{opt})}{I(x=0, y=0, \varphi=0, \Delta L_{opt}=0)} = \frac{1}{2} \left(1 + \exp \left(-\frac{\pi^3 (\Delta L_{opt})^2 \Delta f^2}{2 c^2} \right) \right) \quad (6)$$

The calculations were performed for several laser linewidths in the 0 – 50 GHz frequency region and summarized in Fig. 3. As the laser linewidth broadens, at a given finite ΔL_{opt} , the CBC efficiency declines, i.e., the optical difference mismatch condition for high CBC efficiency becomes severe. For example, to reach high CBC efficiency in 2-beam CBC with laser beams having ~ 25 GHz linewidths, the optical length difference between the beams should be adjusted within 0.5 mm. For the ~ 50 GHz linewidth beams, the optical length difference conditions will be even severe, and the path length adjustment between the beams should be within 0.2 mm. In time space, this will mean adjusting the beams' temporal overlap within ~ 500 fs.

Let's now consider the case when $N \gg 1$ beams having finite linewidths are coherently combined. In that case, the

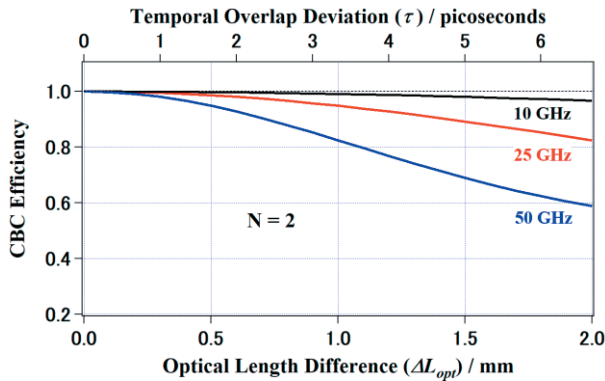


Fig. 3. $N = 2$ beam CBC efficiency degradation versus the optical pathlength mismatch (ΔL_{opt}) (**bottom scale**, in mm units), and versus the temporal overlap deviation $\tau = \Delta L_{opt}/c$ (**upper scale**; in picosecond units) for 10, 25, and 50 GHz Gaussian linewidth beams, respectively.

CBC efficiency will be given by Eq. 7⁵⁾.

$$\eta_{CBC}(\sigma) = 1 - \frac{\pi^2 \Delta f^2}{2 \ln 2 c^2} \sigma^2 \quad (7)$$

Here, σ is the optical length *rms* deviation in [mm] units. In Fig. 4, calculation results for four different laser linewidths, 10 GHz, 25 GHz, 35 GHz, and 50 GHz, are presented.

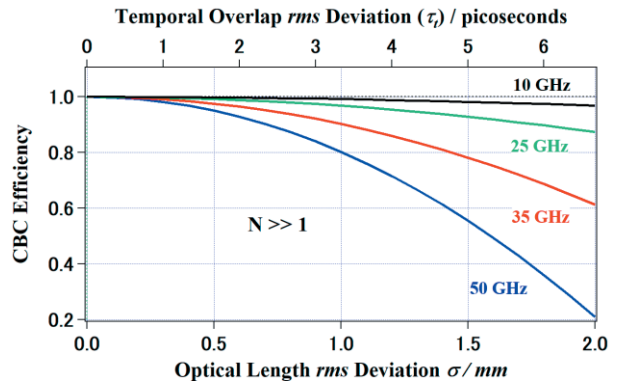


Fig. 4. $N \gg 1$ beam CBC efficiency degradation versus the optical length *rms* deviation σ (**bottom scale**, in mm units), and versus the temporal overlap *rms* deviation $\sigma_t = \sigma c$ (**upper scale**; in picosecond units) for 10, 25, 35, and 50 GHz Gaussian linewidth beams, respectively.

It is clearly seen that as the laser linewidth broadens, the optical length *rms* deviation condition for high CBC efficiency becomes severe. For example, to obtain ~ 99 % CBC efficiency for ~ 35 GHz linewidth beams, the beams' optical lengths' *rms* deviation should be smaller than ~ 50 μm . In time space, this will mean adjusting the beams' temporal overlap mismatch within ~ 150 fs, like an overlap of ~ 150 fs laser pulses.

We need to stress that the above estimations suppose identical bandwidth shapes for all beamlets. In reality, the situation could be even severe, i.e., the linewidths and central wavelengths of the individual beams may also vary. So, in real applications, minimizing or better zeroing the optical length differences between the individual beams will be required. In MOPAs with fiber seed lasers, it could

be achieved, for instance, by using fiber-integrated delay stages.

5. Summary and Conclusions

In summary, the dependence of the CBC efficiency degradation on the laser linewidth has been elucidated and discussed. The laser linewidth directly affects the coherence length, coherence degree (visibility), and the efficiency of the CBC. We have quantitatively shown that as the laser linewidth increases, the optical path mismatch condition for efficient CBC becomes severe.

The interference contrast blurring is primarily responsible for the CBC efficiency degradation and should be avoided at any cost.

For an efficient CBC, the tolerance of the optical length difference is evaluated to be less than 1/10th of the estimated coherence length of the individual beams. The analysis also indicates that in the high-power CBC case, where, due to the temperature increase, linewidth broadening (coherence length shortening) is expected, fine adjustment of the optical length differences seems to be very critical.

The main conclusion of the above analysis is that the visibility of the laser beamlets should be experimentally measured, and the optical length mismatch should be precisely controlled to achieve the highest possible CBC efficiency. The laser linewidth, together with several other properties of real amplified beams, must be considered to achieve high combining efficiency when designing and engineering high-power CBC systems.

References

- 1) T. Y. Fan: IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **11**, 567, 2005.
- 2) A. Klenke, S. Breilkopf, M. Kienel, T. Gottschall, T. Eidam, S. Hädrich, J. Rothhardt, J. Limpert, and A. Tünnermann: Opt. Lett., **38**, 2283, 2013.
- 3) E. C. Cheung, J. G. Ho, G. D. Goodno, R. R. Rice, J. Rothenberg, P. Thielen, M. Weber, and M. Wickham: Opt. Lett., **33**, 354, 2008.
- 4) H. Chosrowjan, and S. Taniguchi: ILT2024 Annual Progress Report, **35**, 6 – 10, 2024.
- 5) G. D. Goodno, C. C. Shih, and J. E. Rothenberg: Opt. Express, **18/24**, 25403, 2010.

ラマンライダーによるプラスチックのリモート計測技術の開発

レーザー計測研究チーム

染川智弘

1. はじめに

私たちの身近にあるビニール袋、ペットボトルなどのプラスチック製品ごみが海洋に流出し、「海洋プラスチックごみ」による海洋汚染は地球規模で深刻化している。プラスチックの使用削減に関する取り組みだけでなく、海洋プラスチックごみの発生経路や被害を正確に評価するために、効率的・効果的なモニタリング手法の確立が求められている。広範囲にわたって分布する海洋プラスチックごみを短時間でモニタリング可能な手法の開発を目指して、ラマンライダー技術の適用検討を開始した^{1,2)}。

2. プラスチックのラマン分光計測

プラスチックの測定には、実体顕微鏡による目視識別を利用するのが一般的だが、様々な用途で使用するプラスチックは色、形状が様々であり、可視画像での識別には限界がある。プラスチックは1200nm付近に吸収スペクトルがあり、その形状や波長がプラスチックの種類で異なるため、広帯域なランプや太陽光の反射スペクトルを利用してプラスチックの識別が実施されている³⁾。しかし、特徴の少ないブロードな赤外反射スペクトルでは、複数のプラスチックが混在している状況などでは識別は困難になる。また、水中では水による赤外光の吸収が大きく、赤外反射スペクトル法の利用は海岸・沿岸などの陸域に制限されると考えられる。一方で、ラマン分光は、散乱現象自体が微弱であるという欠点はあるが、赤外分光よりも特徴的なスペクトルが得られ、波長532nmなどのレーザーを利用すれば、水による吸収の影響を少なくしてモニタリングが可能になる。

図1に発泡ポリエチレン、ポリエチレン製のビニール袋、発泡スチロール（ポリスチレン）のラマンスペクトルを示す。使用したレーザーは、水の透過性が比較的良

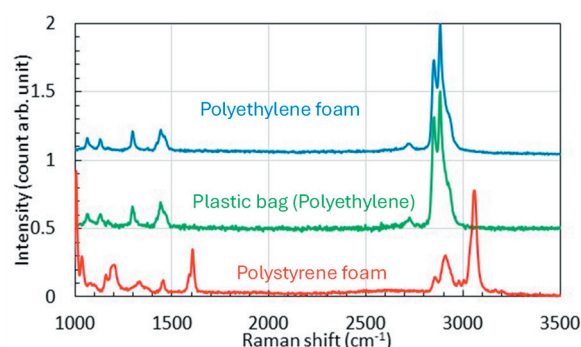


図1 プラスチックのラマンスペクトル

い波長532nmのナノ秒パルスレーザー（パルス幅：6ns、パルスエネルギー：20mJ、繰り返し：10Hz）である。プラスチック試料には、そのままコリメート光を照射した。レーザー照射側から焦点距離100mmのレンズでラマン散乱光を集め、波長532nmのエッジフィルターで、波長532nmのレイリー光などを除去した後、電子冷却CCDカメラ付き分光システム（波長分解能：0.6nm）でスペクトルを記録した（積算回数500回）。

発泡ポリエチレンと、ビニール袋からは同じポリエチレンのラマンスペクトルが得られている。1294cm⁻¹に見られるラマン信号はCH₂のひねり変角モードであり、1445cm⁻¹はCH₂の変角モードである。2848、2881cm⁻¹のラマン信号はそれぞれCH₂の対称、非対称の伸縮振動モードである。一方、ポリスチレン製である発泡スチロールは3058cm⁻¹に強いベンゼン環のCHの伸縮モードのラマン信号を示し、1454、1607cm⁻¹はそれぞれ、CH₂のはさみ変角モードと環振動モードである。また、2861、2914cm⁻¹はそれぞれ脂肪族由来の対称、非対称の伸縮モードである。ポリエチレン、ポリスチレンから特有のラマンスペクトルが得られており、1200～3200cm⁻¹のラマンスペクトルを測定することで、プラスチックの識別が可能であることがわかる。

3. プラスチックのリモートラマンスペクトル測定

ラマン分光測定によって、プラスチックの識別が可能であることはわかったが、ラマン散乱光は微弱であるために、遠方に設置したプラスチックでもラマンスペクトルの測定が可能かを調査した。

図2は、6m先に設置した発泡ポリエチレン試料に対する遠隔識別試験の配置図とラマンスペクトルである。使用したレーザーは波長 532 nm、パルスエネルギーは 180 mJ、繰り返し周波数は 20 Hz である。ラマン散乱光は、直径 200 mm の望遠鏡で集め、波長 532 nm のエッジ・ノッチフィルターでレイリー光を除去したのち、光ファイバーでゲート機能付きの ICCD カメラ付き分光器に導き、ラマンスペクトルを測定した。測定の積算回数は 1600 回であり、ICCD カメラのゲート幅は 5 ns とした。

6 m 先に設置した発泡ポリエチレンでも図1に示したポリエチレンと同様のラマンスペクトルが得られており、遠方のプラスチックからでもリモートラマンスペクトル測定によって同定が可能であることがわかる。

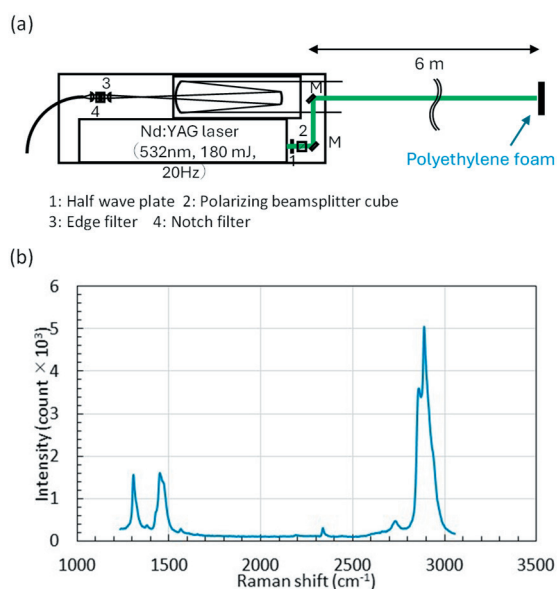


図2 プラスチックのリモートラマンスペクトル測定の実験配置図(a)と得られたラマンスペクトル(b)

4. ハイパースペクトルラマンイメージングライダーによる広範囲のプラスチックモニタリングに向けて

広範囲に分布する海洋プラスチックごみをライダー

で把握するには、2D マッピング計測技術が求められる。先述したリモートラマンスペクトル測定手法では、ある1点の精度の高いプラスチックの識別が可能になるが、プラスチックの分布を得るには、機械的にレーザーと観測視野を走査させる必要があり、これには高繰り返しレーザーが必要になるなど、装置の導入が困難になる。

一方で、カメラの視野内にレーザーを拡散照射することにより、カメラ撮像のような2D イメージを取得するフラッシュ方式のラマンライダーも開発している。この方式では、測定したいラマン波長に相当する干渉フィルターをカメラの前に設置し、特定のラマンモードでの画像を取得することで、一度の測定で、水中にある油を 30 $\times$ 30 cm の広範囲な可視化に成功したが、詳細な定量評価を実施するには、通常のラマン分光測定と同様に内部校正信号として濃度が均一とみなせる測定対象（水中油の場合は水のラマン信号）を続けて測定する必要があり、安定した測定環境でしか定量評価が難しいという欠点があった。そこで、個別の干渉フィルターを切り替えるのではなく、グレーティングで波長分散を与え、縦方向の空間濃度分布とラマンスペクトルの同時記録が可能なハイパースペクトル方式を開発した。

図3に新たに開発した「ハイパースペクトルラマンイメージングライダー」の原理を示す。対象物質からの散乱光の像はカメラレンズでスリットに結像される。スリットを通して縦方向の直線状となった光は回折格子を搭載したイメージング分光器を通過することにより、スリットと垂直な方向（水平方向）に分光され、非点収差、色収差を抑えた2つの対物レンズで ICCD カメラの CCD 上に結像される。後方のカメラの垂直軸に位置情報が、水平軸に波長情報が記録され、カメラ素子数分の分光情報が得られる。このスリット形状の観測視野の長手と垂直方向の1軸方向だけを走査させることで2次元マッピング観測が可能となる。また、ナノ秒の時間オーダーでコマ撮りが可能な ICCD カメラ（Intensified CCD カメラ）を利用することで、距離方向の情報の取得も可能になる。

図4に開発したハイパースペクトルラマンイメージン

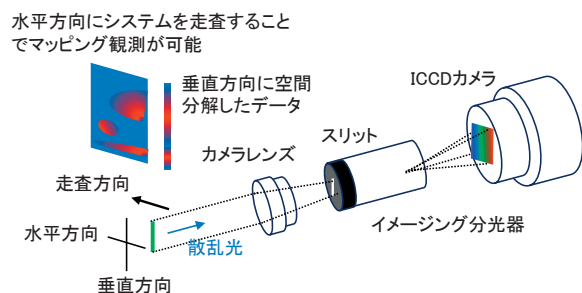


図3 ハイパースペクトルラマンイメージングライダーの原理

ライダーの光学配置図(a)と装置写真(b)を示す。使用したレーザーは Lumibird 社製の Q-smart450 であり、波長 532 nm、パルスエネルギー 140 mJ、パルス幅 5 ns、繰り返し周波数 20 Hz である。このレーザー光は焦点距離 200 mm のシリンダカル凹レンズで垂直方向の直線形状に整形し、ゆるやかに広がりながら伝送させている。写真(c)は、伝送距離 6 m の位置でのビーム形状で、縦方向約 150 mm、横方向約 40 mm になる。

レーザーの送信には、波長 532 nm の光を反射する誘電体ミラーを利用している。ラマン散乱光の受光は、最終の送信ミラーを介して同軸で行っており、45 度で設置した最終送信ミラーの裏側に受光システムを設置している。焦点距離 250 mm のカメラレンズを利用し、SOL 社製のイメージング分光器 (SL100M) を通して Andor 社製の ICCD カメラである iStar 334T に結像し、ラマンイメージング画像を記録している。カメラレンズに入射する散乱信号には、波長 532 nm のレーザー光も含まれるため、波長 532 nm をカットする、ノッチフィルターをカメラレンズの前に入れている。SL100M は幅が可変なスリット、非点収差、色収差を抑えた 2 つの対物レンズ (F 値 : 3.3)、回折格子 (600 l/mm、ブレイズ角 500 nm) から構成される。EM-ICCD カメラの画素サイズは $13 \times 13 \mu\text{m}$ であり、有効画素数は 1024×1024 である。スリット幅を $20 \mu\text{m}$ としたとき、受光システムの波長分解能は、Xe ランプによる測定で、 0.58 nm (波長 633 nm で 14.4 cm^{-1}) と求められた。受光光学系の、観測視野は図 4(c)に示したレーザーの形状とほぼ同じである。

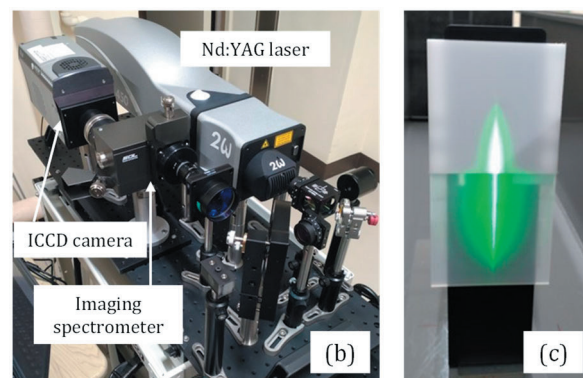
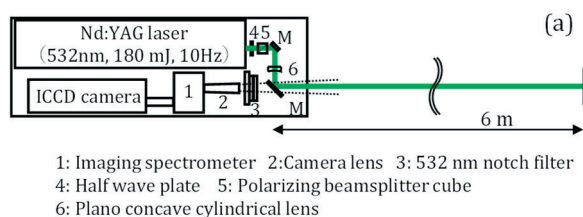


図4 ハイパースペクトルラマンイメージングライダーの光学配置図(a)、装置写真(b)、プラスチック試料へのレーザー照射の様子(c)

ICCD カメラは、レーザーのフラッシュランプの動作に同期したトリガー信号を利用して、そのトリガーからの遅延時間を 1 ns 間隔で調整することで、測定対象を設置した 6 m 位置周辺のラマン信号画像の取得が可能になる。カメラの露光時間 (ゲート幅) は、最小 3 ns から、 1 ns 間隔で決定することができ、このゲート幅によって得られるラマンイメージング画像のレーザー送信方向の距離分解能が決まる。光速 $c(\text{m/s})$ のレーザーがゲート幅 $t(\text{s})$ の間に進む距離は $ct(\text{m})$ で与えられるが、後方への散乱信号を計測することになるので、距離分解能は、伝搬距離の半分の $ct/2(\text{m})$ で表される。以下の実験ではゲート幅を 5 ns としたので、距離分解能は 0.75 m となる。

図 4(c)に示すように、 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ で厚みが 5 mm のポリエチレンとポリプロピレンの板を縦に 2 枚並べた試料を用いている。図 5 にスリット幅を最大値の 2 mm と計測で用いた $20 \mu\text{m}$ にした際のプラスチック試料の 0 次光画像を示す。スリット幅 2 mm では視野 $45 \times 150 \text{ mm}$ でプラスチック試料が観察され、スリット幅 $20 \mu\text{m}$ では、視野の幅は 1 mm 程度になっている。ハイパース

ペクトルラマンイメージング計測では、この1 mm 幅でのラマン信号を取得することになるので、照射するレーザーはシリンドリカル凹レンズを利用して直線状に整形し、レーザーのエネルギーを効率良く利用している。

図 6 がハイパースペクトルラマンイメージングライダーによって得られた ICCD カメラでの画像である。ICCD カメラのゲインは 4000、積算回数は 500 回であり、連続して 5 回測定した平均画像を示している。画像の縦方向は対象物体の縦方向位置に相当し、約 150 mm の位置に 2 枚のプラスチック試料の境界が見られる。横方向は波長軸であり、レーザーの波長 532 nm を用いて計算したラマンシフトに変換している。左に見られる 50~250 mm のほぼ全領域で見られる信号は、ノッチフィルターで除去しきれていない波長 532 nm のレイリー・ミー散乱による迷光である。

図 7 にハイパースペクトルラマンイメージングライダーで得られたポリエチレン、ポリプロピレンのラマンスペクトルを示す。これらのラマンスペクトルは、プラスチックの境界部分から、それぞれ 10 mm 離れた位置から、幅 10 mm の領域の平均スペクトルである（図 6 の黄色の点線で囲んだ位置）。詳細なモードの同定は参考文献に譲るが⁴⁾、特徴的なラマンスペクトルの形状から、試料はポリエチレン、ポリプロピレンであると判定することが可能である。

本実験配置では、観測した ICCD カメラの 1 画素分のスペクトルは、高さ 0.286 mm のプラスチックに相当する。本実験装置でどの程度の大きさのプラスチックまで検知可能かを検討した。

図 8 にポリエチレンの大きさと SN 比の関係を示す。得られたラマンスペクトルに相当するプラスチックの大きさ（面積）は、それぞれの画素の高さに観測の幅 1 mm を掛けた値になるが、プラスチックは長方形となりイメージがつかみにくいので、同じ面積の正方形に換算して、その 1 辺の長さになっている。この検討では上部のポリエチレンの結果であり、図 6 での黄色のハッチの下側から 1、3、17 画素に相当するそれぞれ高さ 0.286、0.857、4.86 mm のスペクトルを利用した。また、ポリエ

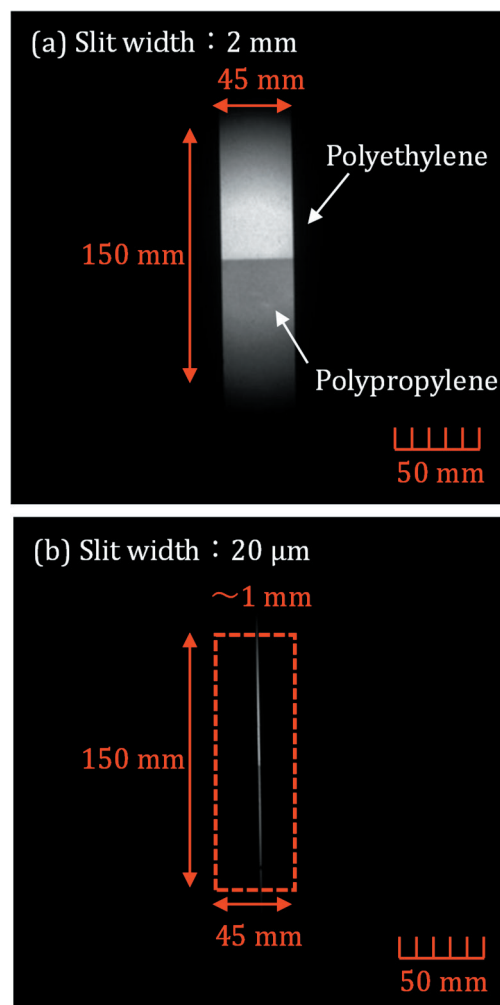


図 5 ハイパースペクトルラマンイメージングライダー光学系のスリット幅による 0 次光画像

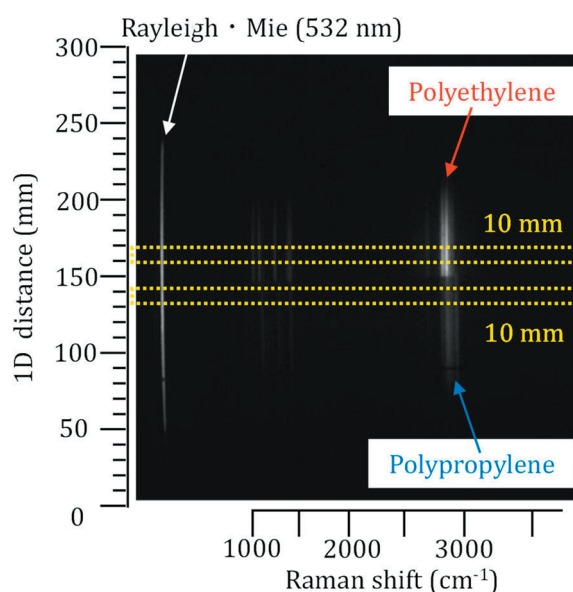


図 6 ハイパースペクトルラマンイメージングライダーによって得られるカメラ画像

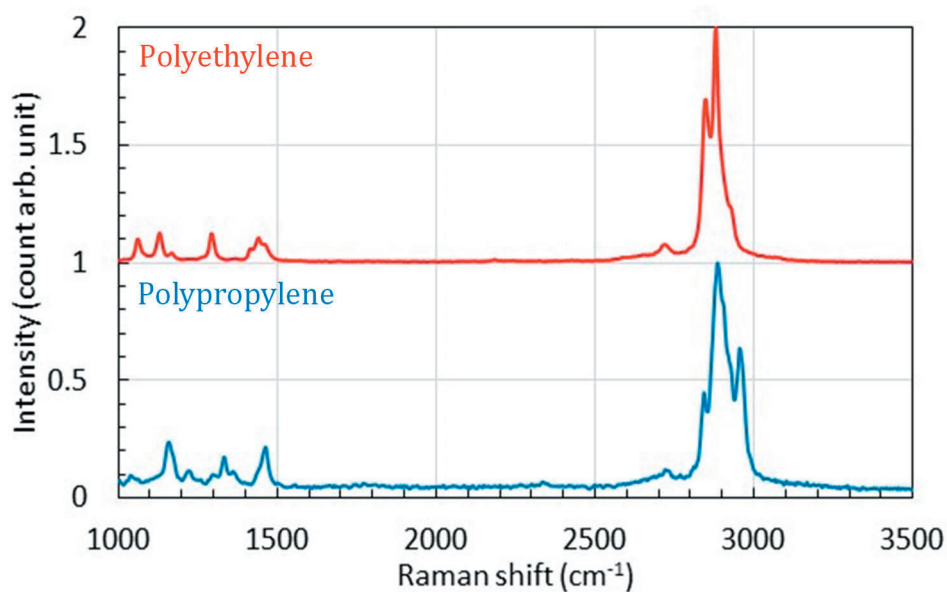


図7 ハイパースペクトルラマンイメージングライダーによるポリエチレン、ポリプロピレンのラマンスペクトル

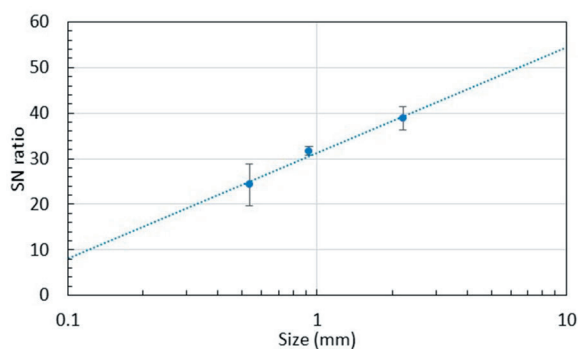


図8 ポリエチレンの大きさと SN 比の関係

チレンでは 2882 cm^{-1} の最も大きなピークが見られるが、プラスチックを識別するという観点では、 $1000\sim 1500\text{ cm}^{-1}$ の波数領域に見られるそれぞれのプラスチックに特有な微細なスペクトルが最適ではないかと考え、 1292 cm^{-1} の信号を採用した。

得られた結果は最小 2 乗法で近似した直線とよく一致している。SN 比の評価では、 $1500\sim 2000\text{ cm}^{-1}$ のラマン信号が見られない波数領域の標準偏差 σ を利用して、その 3σ で検出限界を評価したところ、 0.060 mm となった。今後はプラスチックの厚みの情報についても検討する予定である。

5. まとめ

水中ライダーの新しい応用として、海洋プラスチック

ごみに対する検討を実施した。分光マッピングが容易になると期待されるハイパースペクトルラマンイメージングライダーを開発し、 6 m 離れたプラスチックの空間分布した識別に成功した。今後は水中にあるプラスチックの遠隔識別を実施したい。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP22H03756 の支援を受けたものである。関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) T. Somekawa, S. Matsuda, S. Kurahashi, A. Yogo, and H. Kuze: Proc. ILRC, O5-4, 2024.
- 2) T. Somekawa, S. Kurahashi, S. Matsuda, A. Yogo, and H. Kuze, Opt. Lett., 50, 57, 2025.
- 3) C. Zhu, Y. Kanaya, R. Nakajima, M. Tsuchiya, H. Nomaki, T. Kitahashi, and K. Fujikura: Environmental Pollution, 263, 114296, 2020.
- 4) V. Nava, M. L. Frezzotti, and B. Leoni: Appl. Spectrosc., 75, 1341, 2021.

ダブルパルス LIBS 法を用いた RC 構造物の遠隔その場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

1. 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。RC 内部の鉄筋は、通常不導体被膜に覆われており腐食しにくい¹⁾が、周囲の塩化物イオン濃度が一定以上になると不導体被膜の一部が破壊されその部分から腐食が発生する。塩害を評価するにはコンクリート中の塩化物イオン濃度の把握が重要である。

塩化物イオンは、主に海水や潮風、道路に撒かれた凍結防止剤に含まれる塩分から生じ、付着した塩分はコンクリート構造物の表面から少しずつ内部へ浸透する。コンクリートに対する塩分の拡散浸透に関する研究は古くから行われており²⁾、塩分浸透量をコンクリート構造物の表面塩分量から推定する手法³⁾は塩害評価に有効であると考えられる。

筆者らの研究グループは、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た扱い易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³⁾。LIBS は被測定対象に短パルスレーザーを照射し、発生したプラズマ発光を分光して測定することでその場でリアルタイムに物質の元素分析を行う手法であり、電位差滴定法などの従来手法で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不要である特長がある。

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⁴⁾を導入し、ナトリウム原子だけでなく、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、第 2 のレーザーパルスでプラズマを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⁵⁾、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⁶⁾。

2. 実証試験

2. 1 概要

マイクロ秒間隔で 2 つのパルスを発生することが可能なダブルパルスレーザーシステムと CMOS 型高速分光器を用いて、海塩の付着を想定した模擬試料の分光計測を行った。また、3~5m 離れた位置から対象物体を計測するためのシステムを構築し、実際に使用されている高架橋で屋外試験を実施した。

2. 2 屋内模擬試験

図 1 にダブルパルスレーザーシステムを用いた模擬試料の LIBS 測定の実験配置図を示す。使用したレーザーシステムは LOTIS TII 社製 LS-2132PIV-FF である。レーザーヘッド内に 2 組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

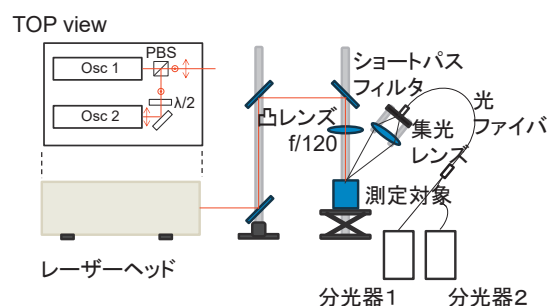


図 1. ダブルパルスレーザーを用いた模擬試料の LIBS 測定の実験配置図

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。それぞれのパルスエネルギーは 100 mJ、パルス幅 5 ナノ秒、繰り返し 10 Hz、波長 1064 nm で、2 つの発振器から出力されたレーザーパルスは波長板と偏光ビームスプリッターで同軸に結合され、直交する直線偏光状態でレーザーヘッドより出射される。この 2 つのレーザーパルスを鉛直下向きに焦点距離 120 mm のレンズで集光照射することで、測定試料上でプラズマ発光が生じる。模擬試料には、蒸留水、蒸留水に食塩を溶かし塩分濃度を 6、12、18%とした食塩水、ならびに濃度を調製した食塩水を市販のモルタルブロックに付着させたものを用いた。

プラズマ発光は集光レンズと波長 1000 nm のショートパスフィルター（主に可視域の光を透過させるフィルター）から成る集光光学系で集められ、光ファイバーで分光器に導かれる。分光システムには Avantes 社製 AvaSpec-ULS4096CL-EVO を使用した。観測可能波長範囲が 200~750 nm で波長分解能が 0.6 nm の紫外～可視用の分光器と、観測可能波長範囲が 700~900 nm で波長分解能が 0.3 nm の近赤外用の分光器の 2 台である。この分光器は高速制御が可能な CMOS イメージセンサを利用しており、露光時間は最小で 9 マイクロ秒である。

食塩水にレーザーを集光照射したときの様子を図 2 に示す。ガラス容器に入った食塩水を試料としており、上部は開放されている。大気と食塩水の界面にプラズマが生成されるよう配置しており、集光光学系のレンズの



図 2. 食塩水にレーザーを集光照射したときの様子

焦点位置も同じ箇所である。

図 3 に濃度 18%の食塩水と蒸留水（濃度 0%）に対する LIBS スペクトルを示す。同図(a)は波長 450~750 nm、(b)は波長 700~900 nm のスペクトルである。露光時間は 9 マイクロ秒、積算回数を 10 回とした。食塩由来と見られるナトリウム(589 nm など)と塩素(837.6 nm)、大気成分である窒素(742 nm など)や酸素(777 nm など)に加え、水が存在することによる水素(656 nm)の輝線を確認した。図 4 は濃度の異なる食塩水に対する LIBS スペクトルのピーク近傍を抜き出したものである。食塩水濃度が濃くなるにつれて、ナトリウムと塩素原子によるピーク強度が増加する傾向が見られた。濃度 0%の蒸留水ではこれらのピークは見られず、ナトリウムと塩素の発光は食塩由来であると考えられる。一方で、大気や水分に由来する窒素、酸素、水素のピーク強度は食塩水濃度ごとに異なる値を示すが、濃度との相関はないことが分かった。

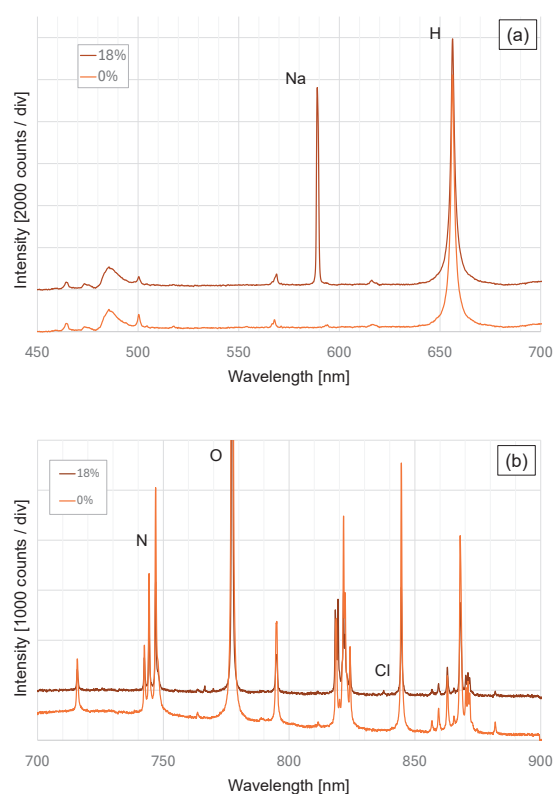


図 3. 濃度 18%食塩水と蒸留水の LIBS スペクトル
(a)波長範囲 450~700 nm (b)波長範囲 700~900 nm

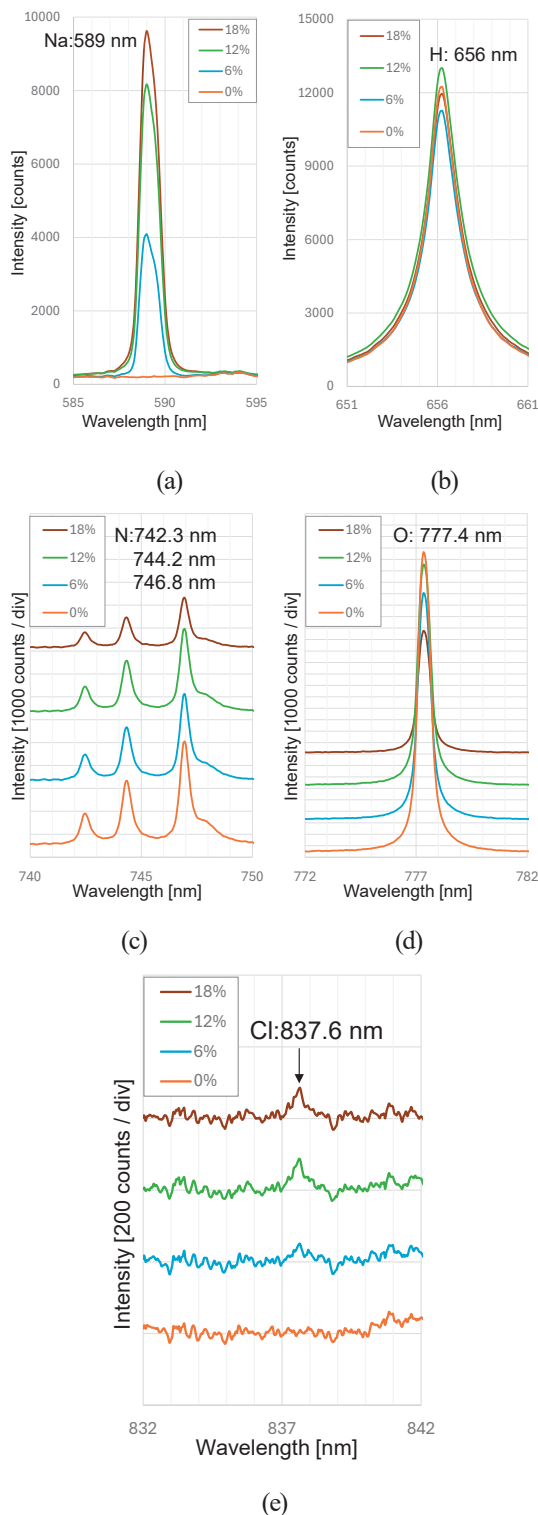


図4. 濃度の異なる食塩水の LIBS スペクトル
(濃度 0% は溶媒である蒸留水を示す)
(a)ナトリウム (b)水素 (c)窒素 (d)酸素 (e)塩素
のピーク近傍を抜き出したもの

図5は濃度18%の食塩水を市販のモルタルブロックに付着させた試料と、試料のみを照射した場合(sample)から得られた LIBS スペクトルである。食塩水を照射した場合の LIBS スペクトルで見られたピークに加え、マグネシウム、カルシウム、カリウムなどのモルタルブロックを構成する元素による輝線が多数現れた。図6は濃度の異なる食塩水をモルタルブロックに付着させた試料に対する LIBS スペクトルのピーク近傍を抜き出したものである。図中 sample は食塩水を付着させていないブロックのみに対するスペクトルである。ナトリウムのピーク(d)に着目すると、試料のみを照射した場合(sample)や蒸留水を付着させた試料を照射した場合(0%)においても検出されていることから、今回試験に使用したモルタルブロックはナトリウムが含まれていると考えられる。食塩水の場合の LIBS スペクトルではナトリウムの輝線は食塩の有無を示す指標となりえたが、コンクリートやモルタルを対象とする場合、ナトリウムのピーク強度のみで塩分の有無を判断するのは不十分であることを示唆している。

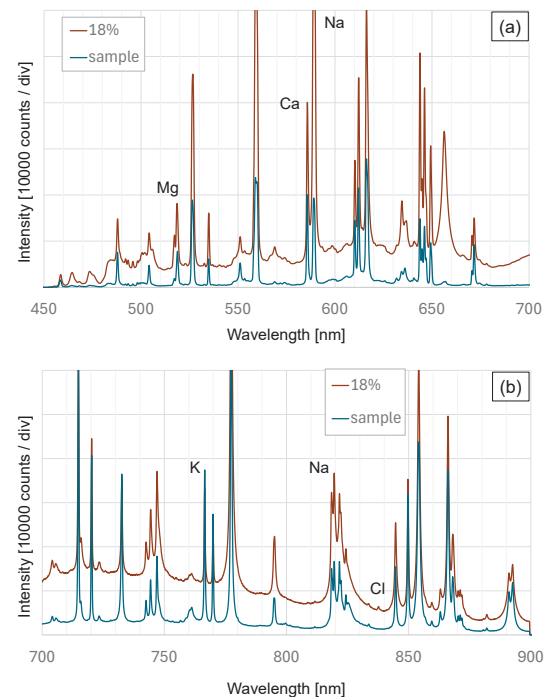


図5. 濃度18%食塩水とモルタルブロックの
LIBS スペクトル
(a)波長範囲 450~700 nm (b)波長範囲 700~900 nm

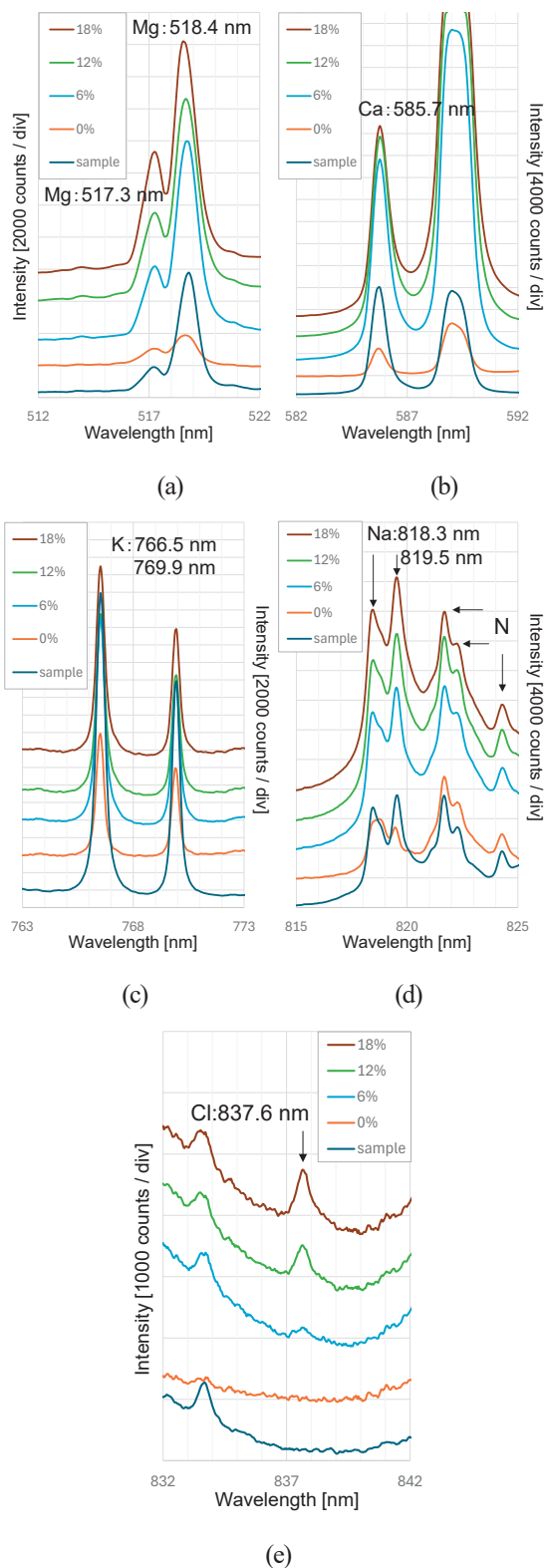


図6. 濃度の異なる食塩水を付着させたモルタルブロックのLIBSスペクトル(濃度0%は溶媒である蒸留水を示す)
(a)マグネシウム (b)カルシウム (c)カリウム
(d)ナトリウム (e)塩素
のピーク近傍を抜き出したもの

一方、塩素による波長 837.6 nm のピークは(e)に示すようにピーク強度は低いものの、食塩水濃度と相関があることから、塩分の有無を判断する指標となりえると考えられる。波長 818.3 nm と 819.5 nm にも比較的高い強度で発光するナトリウムの輝線が存在し、スペクトルの広がりの中に重畳する形で塩素のピークが検出される。塩分濃度が増加するとナトリウムのピーク強度は高くなりスペクトルの広がりも増大すると考えられるため、測定対象のコンクリートに元から含まれるナトリウム量や付着した塩分量によっては塩素のピークが広がったスペクトルに隠されてしまい、測定に十分な感度が得られない可能性がある。また、波長 450 nm 以下にも LIBS スペクトルは存在するが、使用したショートパスフィルタの特性(可視域用フィルタ)によって著しく減光されていることを確認した。

2.3 屋外実証試験

前節で性能を検証したダブルパルスレーザーシステムと分光器を用いて、図7に示す可搬型ダブルパルスリモート LIBS システムを構築した。本システムの特徴は、レーザー光を測定箇所へ集光照射し、プラズマを生成するレーザー照射系と、生成されたプラズマからの発光を集め分光器へと導光するための受光系の光路を共通とし、同軸配置としたことである。ダブルパルスレーザーヘッドから射出した2つのパルスは、設計波長 980 nm のダイクロイックビームスプリッター(DBS)を透過して、凹凸レンズ対を介して測定対象に照射される。凹凸レンズ対は移動距離 25 mm の直線ステージ上に配置されており、凹凸レンズ対の距離を調整することで、3~10 m

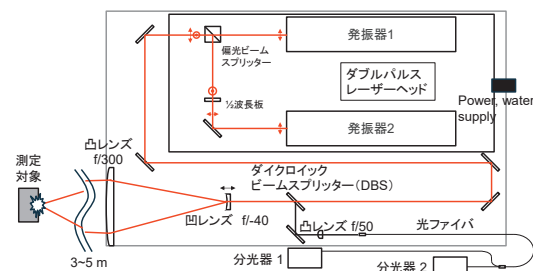


図7. 構築した可搬型ダブルパルスリモート LIBS システムを用いた実験配置

程度離れた測定対象表面にプラズマを生成することが可能である。

遠方で生成されたプラズマからの発光は、レーザー照射と同じ光路で戻り凹凸レンズ対によって集められる。集められた光は DBS により波長 980 nm を境に分離され、測定に用いる 200~900 nm の光は 90°方向（紙面下方向）に反射される。前節で実施した塩水付着コンクリート試料の測定では、ショートパスフィルターの特性の影響で波長 450 nm 以下のスペクトルを計測できなかったが、本システムでは DBS を用いているので、波長 200~900 nm の広帯域なスペクトル測定を実現できている。DBS で反射された光をミラー、レンズによって 2 分岐光ファイバーに入射し、2 台の分光器を用いて LIBS スペクトルの測定を行う。

構築した可搬型ダブルパルスリモート LIBS システムを用いて、実際に使用されている橋梁の橋脚やコンクリート床版部の LIBS スペクトル測定を実施した。図 8 に試験の様子を示す。海沿い（写真右側に堤防があり、越えたとすぐ海）に設置された高架橋であり、定期点検の結果によると高い塩分濃度の箇所があるとされている。システムを高所作業車のデッキに搭載し、測定箇所から 3~5 m 程度離れた位置から測定した。

図 9 に得られた LIBS スペクトルの測定例を示す。挿入図に示した高架橋上部の赤点線で囲った部分の測定結果である。高所作業車のデッキ上のような不安定な足場においても、LIBS スペクトルの取得は可能であることを示した。今回の試験では、波長 589.6 nm のナトリウムの輝線の計測には成功したが、波長 837.6 nm の塩

素の輝線は微弱で計測が困難であった。今後は、微弱な塩素を検出するための感度向上と、それに付随して期待できるシリコンなど他元素との同時検出の結果から、総合的に劣化を診断する手法を検討する予定である。

3. まとめ

鉄筋コンクリート構造物の遠隔かつその場における塩分検知・測定が可能な技術の開発を目指して、ダブルパルス法を用いた LIBS システムの構築し、実証試験を実施した。

マイクロ秒間隔で 2 つのパルスを発振することが可能な波長 1064 nm のダブルパルスレーザーと CMOS 型高速分光器を用いて、海塩の付着を想定した模擬試料の分光計測を行い、塩素の輝線を検出することに成功した。食塩水濃度と相関があることから、塩分の有無を判断する指標となりうると考えられる。

実際の高架橋で屋外試験を実施し 3~5 m 程度離れた位置から LIBS スペクトルが取得可能であることを示した。塩素の輝線を検出できなかったため、さらなる感度



図 8. 屋外実証試験の様子

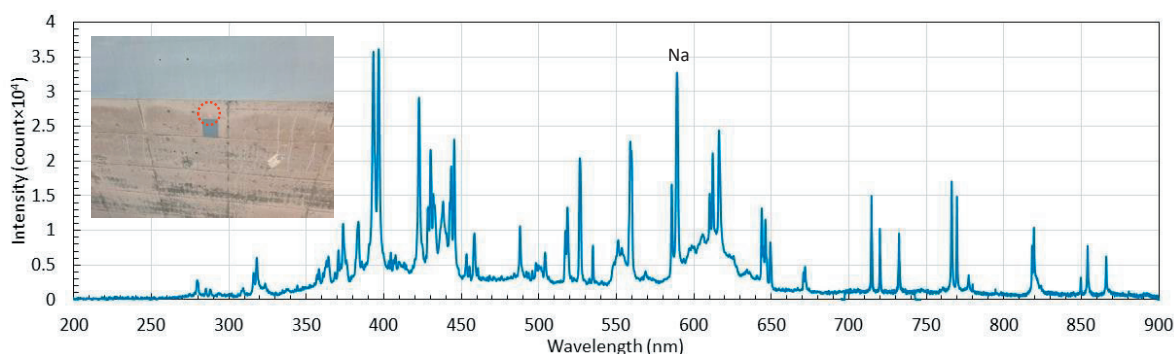


図 9. コンクリート床版から得られた LIBS スペクトルの測定例

向上を行うのと並行して、検出下限の測定など定量的な評価を今後行う必要がある。

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) 丸屋 剛 他、コンクリート工学年次論文報告集 **11-1** (1989) 597.
- 2) T.Maruya et al., コンクリート工学, **52**(6), 2014.
- 3) 染川 智弘 他, レーザー研究, **50**(2022)318.
- 4) 江藤 修三 他、電中研報告、H15005(2016)
- 5) F. Colao et al., *Spectrochimica Acta Part B* **57** (2002) 1167–1179
- 6) 香川 喜一郎 他、プラズマ・核融合学会誌, **83**(5) (2007)401-412

光受容蛋白質の電子移動・電荷シフト反応メカニズムの解明

レーザーバイオ化学研究チーム

谷口誠治、コスロービアン ハイク

1. はじめに

動植物の多くは光を受容して機能性を示す蛋白質や酵素を体内に有している。光合成反応で光エネルギーを化学エネルギーに変換する反応中心複合体や、網膜に存在し光を検知する酵素ロドプシンなどはよく知られた例である。この中で最近、クリプトクロム (CRY) ・光回復酵素 (PL) ファミリー (Cryptochrome Photolyase Family、CPF) と呼ばれる酵素ファミリーの光機能に注目が集っている。

CPF は、フラビンアデニンジヌクレオチド (FAD) を補因子に持つフラビン酵素の一種である¹⁾。CRY と PL は蛋白質のアミノ酸配列や立体構造がほぼ同様である (このため「ファミリー」と呼ばれる) にもかかわらず、生体内で異なる機能を示す。CRY は、概日リズム形成のほか、植物の成長と発育、光依存開花制御のシグナル伝達、鳥類の地球磁場の検知など、さまざまな生体の幅広い機能に関わっている²⁾ (図1)。一方 PL は、紫外線で損傷した DNA を光反応により修復する酵素であり、バクテリアやヒトを除く高等生物が多く有している。

CRY、PL に共通するのは、青色光により FAD が励起され (以下 FAD* と記す)、蛋白質を形成する近傍の芳香族アミノ酸残基 (トリプトファン (Trp)) から、電子を引き抜くことによる光誘起電子移動反応 (光還元反応とも呼ぶ) が起こる点にある。CRY では1電子が還元された FAD (FAD^{•-})、PL では2電子が還元された FAD (FADH²⁻) が生成すると考えられている。このため通常 CRY は DNA 修復機能を示さないが、近年、光合成藻類の一種であるクラミドモナス (*Chlamydomonas reinhardtii*) (図2) が持つ動物型 CRY (以下 CraCRY と記す) の中に、シグナル伝達機能と DNA 修復機能の両方を示すものが見出された³⁾。この報告は、CraCRY の光反応を研究することにより、CPF が PL と CRY に分岐した要因を明らかにできる可能性を示しており、その機能メカニズムに興味注がれている。

結晶構造解析の結果⁴⁾ (図3)、CraCRY には15個のトリプトファンが含まれており、光励起された FAD (FAD*) が近傍に存在する Trp (Trp399、数字は蛋白質を構成するアミノ酸残基を識別するための番号を示す) から電子を引き抜き、その後界面にあるチロシン (Tyr373) から Trp322 → Trp376 → Trp399 の経路を通して電子がシフトする (Trp399 に電子が補充され元に戻る) と考えられている (図4)。これに関して最近、超高速過渡吸収分光法により CraCRY の光初期反応が観測され、光誘起電子移動の最初の段階 (Trp399 → FAD*) の反応速度は 0.4ps、次段階 (Trp376 → Trp399) は 4ps、Trp322 → Trp376 は 50ps、最後のステップ (Tyr373 → Trp322) は 0.8~5 ns で反応が進行すると報告されている⁵⁾。

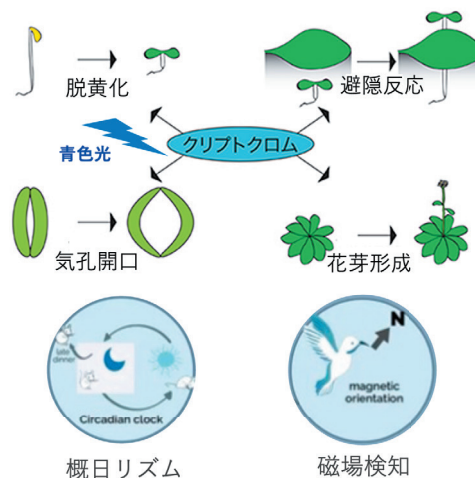


図1 光機能性酵素クリプトクロム (CRY) が関与した様々な生体機能



図2 光合成細菌 (クラミドモナス) の電子顕微鏡写真

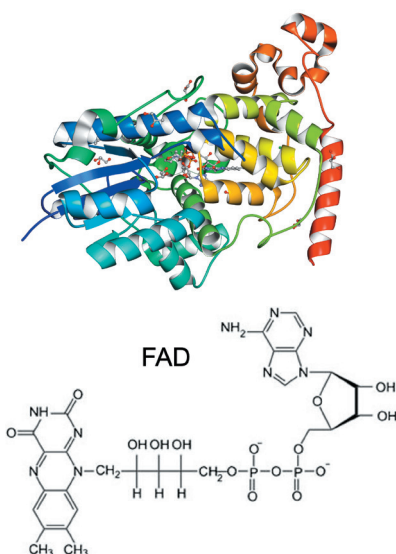


図3 (上) 動物型クリプトクロム (CraCRY) の結晶構造⁴⁾、(下) 青色光を受容する補因子フラビンアデニンジヌクレオチド (FAD) の分子図

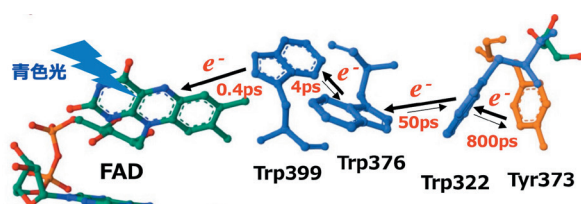


図4 動物型クリプトクロム (CraCRY) の光誘起電子移動および電荷シフト反応の経路と反応速度⁵⁾。FADの近傍に存在するトリプトファン (Trp399) から光励起されたFADへと電子 (e^-) が0.4 psで移動する。その後 Trp376→Trp399、Trp322→Trp376、Tyr373→Trp322 と段階的に電子がシフトして電子が補充され、元の状態に戻る。

酵素または蛋白質内で起こる光励起反応、とりわけ初期の段階で起こる光誘起電子移動反応はフェムト〜サブピコ秒という超高速で起こるため、生体内で高い機能性を示すようになるが、その要因として周囲に存在するアミノ酸残基の立体構造が深く関与している、つまり蛋白質が特定の反応が有利に進行するような環境場を形成していると考えられてきた。このため近年 X 線結晶構造解析法を用いて酵素の蛋白構造を明らかにしようとする研究が数多く行われてきた。しかしながら、この

手法では酵素試料が結晶である必要があるため、実際に酵素が機能する環境である生体膜中や液中とは構造自体が異なる可能性が指摘されている。つまり、酵素の機能メカニズムと構造の関連性を解明するためには、酵素の結晶構造ではなく液中での構造を明らかにする必要がある。液中の蛋白構造を結晶構造解析レベルで明らかにするため多く見られるのが、分子動力学 (Molecular Dynamics、以下 MD と記す) を用いたシミュレーションにより蛋白構造を分析する手法⁶⁾である。この手法は、シミュレーションを行う 3 次元空間内に酵素と溶媒分子 (H_2O) を配置し、原子間力およびポテンシャル関数を定義した後、酵素、溶媒を構成する原子 (H、C、O、N など) を古典力学に基づき一斉に振動させる。このステップを繰り返し行い、酵素と溶媒を含む系全体が持つエネルギーが最も低くなる原子配置を決定することで、液中における蛋白質の安定構造が予測できる。

昨年度は、MD 計算を用いた液中構造の分析、および得られた構造を用いた電子移動速度の理論的な解析により、光誘起電子移動の最初の段階の反応について検討した⁷⁾。CraCRY は電子アクセプターとして機能する補因子フラビンアデニンジヌクレオチド (FAD) とその周囲に電子ドナーとして機能する複数のトリプトファン (Trp295、Trp354、Trp399、Trp401) を持つ。FAD と Trp の光誘起電子移動反応を化学式で表すと下式のようになる。



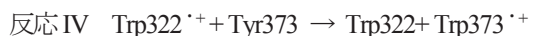
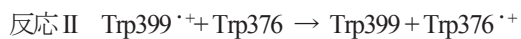
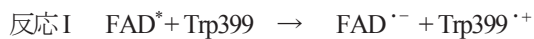
Trp が電子ドナー、FAD が電子アクセプターとして働き、Trp から電子が光励起された FAD に移動することによりイオン対 (FAD アニオンと Trp カチオン) 状態となる 2 分子間反応である。MD 計算により得られた液中構造を用いて FAD と Trp 間の電子移動速度を理論解析した結果、Trp295、Trp354、Trp399、Trp401 の中で Trp399 との反応速度が最も大きく、実測された電子移動速度 (0.4ps)⁵⁾とも良い一致を示した。この結果により、CraCRY の光誘起電子移動反応が FAD と Trp399 間で起こることを理論的に解明できた。

本研究では、上記の FAD と Trp399 間の光誘起電子

移動反応の次に起こる段階的な電荷シフト反応について、同様に反応速度の理論的解析を行い、そのメカニズムについて検討した結果を報告する。

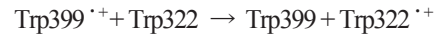
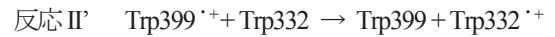
2. CraCRY の液中構造

図 5（上）に、MD 計算により得られた液中での CraCRY 全体の構造を示す。計算方法等の詳細については昨年度の ILT2024 年報⁷⁾を参照されたい。中央付近に補因子 FAD が位置し、周囲を蛋白質が取り囲んでいる。図 5（下）に、補因子 FAD と周辺の拡大図を示す。FAD の近傍には、FAD と光誘起電子移動を引き起こす Trp399 が位置しており、その近傍には Trp376、Trp322 が配置している。Trp376 の隣には Trp322、さらにその隣にはチロシン（Tyr373）が配置しており、光誘起電子移動により失った Trp399 の電子を補充するように連続的な電荷シフト反応が 3 段階で起こると考えられている⁹⁾。ここでは、それぞれの反応を区別するため、初期段階で起こる光誘起電子移動⁷⁾、第 2 段階、第 3 段階、第 4 段階目で起こる電荷シフトをそれぞれ反応 I～反応 IV と記す。各段階の反応を化学式で表すと下式のようにになる。



反応 II では Trp399^{・+}が電子アクセプター (A)、Trp376 が電子ドナー (D) として働く。他の反応も同様である。

溶液中構造から算出した電荷シフト反応に関わるアミノ酸残基、およびそれらの周辺に配置しているアミノ酸残基間の分子中心間距離 (Rc) を表 1 に示す。Trp399 との Rc が最も短いのは Trp332 で、Trp376、Trp322 の順で大きくなった。このことは、反応 II が Trp399 と Trp376 間だけでなく、Trp399 と Trp332 間、Trp399 と Trp322 間でそれぞれ起こりうることを示している。この 2 種の反応は反応 II と競争して起こるため、これらの反応を反応 II' と定める。化学式を以下に示す。



ただし、Trp332 の周囲には Trp が存在しておらず、3 段階目の電荷シフト反応（反応 III に相当）が起こる可能性は低い。Trp376 との Rc が最も短いのは Trp322 であり、次段階の反応（反応 III）が最も高速で起こると考えられる。また、Trp322 と Tyr373 の Rc は 0.6 nm と Rc が最も短く、Trp よりも電子放出能力が低い（酸化反応に必要なエネルギーが大きい）Tyr でも反応が起こりやすい配置となっている。

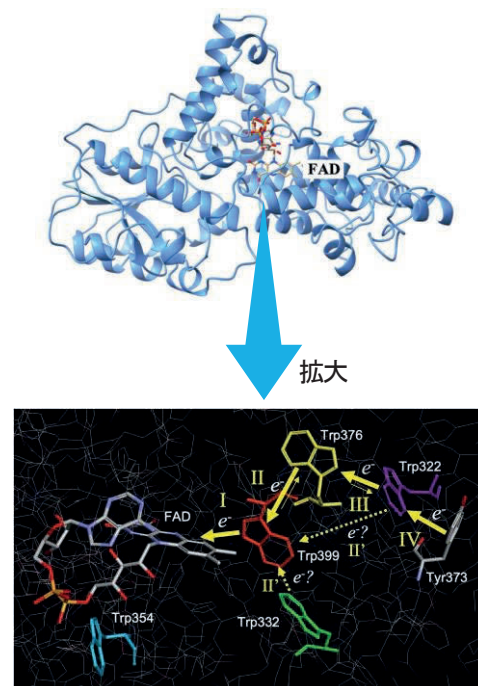


図 5 MD 計算により得られた動物型クリプトクロム (CraCRY) の液中構造。(上) 全体構造、(下) FAD 近傍の構造を拡大した図 (水分子の表示は省略した)。図中 e^- は電子、矢印は電子がシフトする方向を示す。

表 1 アミノ酸残基の分子中心間距離

アミノ酸残基(A)	アミノ酸残基(D)	分子中心間距離 Rc (A-D) /nm
Trp399	Trp322	1.08
Trp399	Trp332	0.73
Trp399	Trp376	0.82
Trp376	Trp322	0.79
Trp376	Trp332	1.36
Trp322	Tyr373	0.60

3. 電荷シフト反応速度の解析

電荷シフト反応 (反応 II~IV) 速度の計算には、Marcus により理論化され⁸⁾、Kakitani, Mataga らにより構築された電子移動速度理論 (KM 式)⁹⁾ を電荷シフト反応に適用した式を用いた (式 (1))。KM 式は電子移動速度における A-D 間の距離依存性を表す式であるが、A-D 間距離が変動する動的電子移動の解析にも適用できる。

$$k^l = \frac{\nu_0^w}{1 + \exp\{\beta^w(R_l - R_0^w)\}} \sqrt{\frac{k_B T}{4\pi\lambda_S^w}} \exp\left[-\frac{\{\Delta G_{wl}^0 + \lambda_S^w\}^2}{4\lambda_S^w k_B T}\right] \quad (1)$$

k^l : 電荷シフト速度、 ν_0^w : 断熱振動数、 β^w : 電子移動過程係数、 R_0^w : 断熱-非断熱の電子移動境界距離、 R_l : 電子ドナー (l は反応に関わるそれぞれの Trp または Tyr を示す) - 電子アクセプター (Trp) 間距離 (分子中心間距離 R_c と同義)、 k_B : ボルツマン定数、 T : 温度、 ΔG_{wl}^0 : 反応生成物 (反応 II~IV の化学式の右項) と反応物 (反応 II~IV の化学式の左項) の標準自由エネルギー差、 λ_S^w : 電子ドナーの溶媒再配向エネルギー

ΔG_{wl}^0 、 λ_S^w はそれぞれ以下の式(2)~(4)で表される。

$$\Delta G_{wl}^0 = \Delta G_{ew}^0 + \Delta ESDA(l) + ES(l) \quad (2)$$

$$\Delta G_{ew}^0 = E_{IP}^w - \Delta G_A^0 \quad (3)$$

$$\lambda_S^w = e^2 \left(\frac{1}{2a_w} + \frac{1}{2a_w} - \frac{1}{R_l} \right) \left(\frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_0} \right) \quad (4)$$

ΔG_A^0 : アミノ酸カチオン (Trp⁺) の電子親和力に関する標準自由エネルギー、 $\Delta ESDA(l)$: D-A 間の静電エネルギー、 $ES(l)$: Trp と周囲のアミノ酸残基との静電エネルギー、 E_{IP}^q : 電子ドナーのイオン化ポテンシャル、 a_w : 分子半径、 ϵ_0 : 比誘電率

電荷シフト速度の計算に必要なパラメータ (ν_0^w 、 β^w 、 R_0^w 、 ΔG_{wl}^0 、 λ_S^w) の詳細については、我々の他の発表論

文¹⁰⁾を参照されたい。

表 2 に、上記の理論式から得られた各反応の電荷シフト速度、および理論解析に用いた各パラメータの値を示す。2 段階目の電荷シフト反応の速度は、反応 II' と比べ反応 II (Trp399⁺ と Trp376 の間の電荷シフト) での 1.6×10^{-1} (ps⁻¹) が最も高速であり、電荷シフトの主反応であることがわかった。反応 II' のうち Trp332 の速度が遅い (3.9×10^2 ps⁻¹) のは、Trp399⁺ と Trp332 間の R_c が 1.08 nm と、他のアミノ酸残基よりも大きいためである (表 1)。一方、Trp399⁺ と Trp322 間の R_c は Trp399⁺ と Trp376 間の R_c と同等であるが、 ES の値に違いが見られており、その結果 ΔG_{wl}^0 に 0.1 eV の差が生じたことが (Trp322 で 2.1 eV、Trp376 で 2.2 eV (表 2)) 電荷シフト速度の変化の主要因と考えられる。この結果は、Trp 周囲の環境場 (Trp とそれ以外のアミノ酸残基との静電相互作用) が電荷シフト速度に大きく影響することを示している。また、過渡吸収計測により得られた電荷シフト速度の実測値は 4 ps (2.5×10^{-1} ps⁻¹)⁵⁾ (図 4) と報告されており、今回得られた反応 II、反応 II' の速度を足し合わせた値 (2.37×10^{-1} ps⁻¹) と良く一致した。この結果は反応 II、反応 II' の 3 つの反応が並行して起こっている (競争反応) 可能性を示している。

3 段階目の電荷シフト反応 (反応 III) の速度は 2.3×10^2 ps⁻¹ と算出され、実測値 50 ps (2×10^2 ps⁻¹) (図 4 参照) と同様であった。一方、反応 III の逆反応 (Trp376⁺ から Trp332 への電荷シフト反応) の速度は 2.4×10^3 ps⁻¹ で、反応 III の 10 倍遅かった。逆反応の速度が大きいと、他の反応に比べて速度が遅い次段階目の電荷シフト

表 2 理論解析により得られた反応 II~IV の電荷シフト速度 (k) と解析に用いたパラメータ

電荷シフト 反応	電子アク セプター	電子 ドナー	k (ps ⁻¹)	$\Delta ESDA$ (eV)	ES (eV)	ΔG_{wl}^0 (eV)	λ_S^w (eV)
反応 II'	Trp399 ⁺	Trp322	3.8×10^2	-2.1×10^{-3}	0.23	-2.1	2.1
反応 II'	Trp399 ⁺	Trp332	3.9×10^2	4.3×10^{-3}	-0.20	-2.6	1.9
反応 II	Trp399 ⁺	Trp376	1.6×10^{-1}	-2.0×10^{-3}	0.19	-2.2	2.0
反応 III	Trp376 ⁺	Trp322	2.3×10^2	1.2×10^{-2}	0.11	-2.2	1.6
(逆反応)	Trp322	Trp376 ⁺	2.4×10^3	-1.2×10^{-2}	-0.11	-2.5	1.6
反応 IV	Trp322 ⁺	Tyr373	1.7×10^{-3}	3.7×10^{-2}	-0.03	-3.5	2.5

(800 ps、図 4) の効率は著しく低下する。この結果から、Trp332 が CraCRY 内に巧みに配置されており、電荷シフト反応の速度を制御していることを示している。

4 段階目の電荷シフト反応 (反応 IV) の速度は $1.7 \times 10^3 \text{ ps}^{-1}$ であった。こちらについても実測値 800 ps ($1.25 \times 10^3 \text{ ps}^{-1}$) (図 4 を参照) とほぼ同様の値が得られた。

本研究では、MD 計算による水溶液中の蛋白構造と電子移動理論式を用いて、CraCRY 内で起こる光反応全体 (光誘起電子移動とその後に続く電荷シフト反応) のメカニズムを解析し、実測値と同様の結果が得られた。この手法は、光機能を示す他の様々な酵素 (PL など) にも適用可能である。また、光機能性分子の分子周囲の環境場を含めた分子設計等にも応用可能であると考えている。

4. まとめ

本研究では、光合成藻類の一種クラミドモナスが持ち、光シグナル伝達機能と光による DNA 修復機能の両方を示す酵素 (動物型クリプトクロム (CraCRY)) に関して、分子動力学 (MD) 計算を用いた液中構造の分析、および得られた構造を用いた電子移動速度の理論的な解析により、光誘起電子移動反応の後に起こる 3 段階の電荷シフト反応 (図 4) のメカニズムについて検討した。電子移動速度の計算には、反応に関わるアミノ酸残基 (Trp または Tyr) の周囲に存在するアミノ酸残基が持つ電荷を静電エネルギーとして考慮した。その結果、3 段階の電荷シフト反応それぞれについて、報告された実測値⁹⁾とほぼ同値の速度が得られ、光誘起電子移動⁷⁾とあわせ CraCRY の光反応全体のメカニズムを解析することがわかった。この結果は、蛋白質を構成するア

ミノ酸残基の持つ電荷が電荷シフト速度に影響すること、酵素が高い反応効率を示すよう、蛋白質により巧みに形成される環境場が光反応を制御していることを示している。本研究で用いた解析手法は、結晶構造が明らかでない他の光機能性酵素 (光合成における電子伝達機能や PL 等) にも適用でき、また電子伝達等の機能を示す光機能性分子における (分子周囲の環境場を含めた) 分子設計等に応用可能であると考えており、今後も研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) A. Sancar, *Chem. Rev.*, **103**, pp. 2203–2237 (2003).
- 2) I. Chaves, R. Pokorny, M. Byrdin *et al.*, *Annu. Rev. Plant Biol.*, **62**, pp. 335–364 (2011).
- 3) Y. Zou, S. Wenzel, N. Mueller *et al.*, *J. Plant Physiol.*, **174**, pp. 4–14 (2017) .
- 4) S. Flanz, E. Ignatz, S. Wenzel *et al.*, *Nucleic Acids Research*, **46**, pp.8010–8022 (2018).
- 5) F. Lacombe, A. Espagne, N. Dozova *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **141**, pp. 13394–13409 (2019).
- 6) A. Nueangaudom *et al.*, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **16**, pp.1930–1944 (2014).
- 7) 谷口誠治他、ILT2024 年報、pp.23–27 (2024)
- 8) R. A. Marcus, *Journal of Chemical Physics*, **24**, pp.966–978 (1956).
- 9) T. Kakitani, N. Mataga, *J. Phys. Chem.*, **89**, pp.8–10 (1985).
- 10) N. Nunthaboot, A. Nueangaudom, F. Tanaka, S. Taniguchi, H. Chosrowjan, *J. of Photochem. Photobiol. A, Chemistry*, **444**, pp.114946–114959 (2023).

プラズマ発光計測による微小レーザー損傷の顕出

レーザー技術開発室

本越伸二、吉田実¹、藤岡加奈²

¹ 近畿大学大学院理工学研究科

² 大阪大学レーザー科学研究所

1. はじめに

レーザー装置およびその応用機器には、ミラーやレンズなど、多くの光学素子を使用されている。これら光学素子は高出力レーザー光に曝されると、しばしば損傷（レーザー損傷）を引き起こす。損傷が発生した部分は、当初の光学性能が得られないだけでなく、回折等により後段光学素子の損傷の要因にもなる。そのため、使用する光学素子のレーザー損傷しきい値を把握し、しきい値以下のエネルギー密度でレーザー装置を運転する必要がある。

レーザー技術総合研究所（ILT）では、平成17年度より光学素子のレーザー損傷しきい値（LIDT）評価試験を開始し、毎年約50個の光学素子の試験を行っている。また、平成20年度よりレーザー損傷しきい値データベース化試験（以下、データベース化試験）を行ってきた。LIDT評価試験は試料への照射レーザーフルエンスに対する損傷の有無を観察し、損傷確率0%の最大フルエンスを求めるものであり、その方法は国際規格ISO-21254-1~4にて規格化されている。ここで重要となるのは損傷の検出方法である。国際規格では、ノマルスキー型微分干渉顕微鏡（倍率10倍）にて照射前後の表面を観察することが記載されている。一方で、オンライン損傷検出のために、任意の適切な技術を使用してもよいとされ、オンライン顕微鏡技術、光音響や光熱検出、プローブレーザーによる散乱光検出などの例が述べられている²⁵⁾。このオンライン損傷検出は、評価試験の自動化、省力化、そして高精度化のために重要な技術である。

これまでに、顕微鏡以外の損傷検出方法として、プローブ光による散乱光計測と、プラズマ発光計測を検討し、微分干渉顕微鏡による損傷検出法との比較を行ってき

た。結果として、プラズマ発光計測の方が顕微鏡観測に近いことが分かった⁶⁾。しかしながら、低い照射フルエンスで発生した損傷は、局所的かつ微小であることが多く、発生するプラズマ発光も微弱であるため損傷として認識できず、顕微鏡観察よりも高い損傷しきい値を見積もる場合があった⁷⁾。

プラズマ発光計測によるレーザー損傷検出による LIDT 評価試験の自動化を目的に、本報告では、損傷時のプラズマ発光計測感度の向上、および迷光抑制による S/N 比改善を図った結果を報告する。最終的に、顕微鏡観測とプラズマ発光計測による損傷検出の比較を行い、プラズマ発光計測による損傷検出で LIDT 評価試験が可能であることを確認した。

2. プラズマ発光計測光学系

図1にプラズマ発光計測の光学系を示す。図1(a)は従来の測定光学系であり、焦点距離 50mm の捕集光学レンズを用い、損傷部（プラズマ発光点）の像を PIN フォトダイオード検出器（ソーラボジャパン社、PAD100A2）上に転送する方式である。検出器には、損傷発生に伴うプラズマ発光だけでなく、照射パルスレーザーの散乱光も入射する。散乱光を抑制するために、フォトダイオードの前に、干渉フィルター（波長 633nm）と熱線吸収（HA）フィルターを設置した。しかしながら、レーザー散乱光の強度はプラズマ発光に比べて十分に大きく、干渉フィルターや複数の HA フィルターだけでは取り除くことができなかった。また、実験室内の迷光に微弱なプラズマ発光が埋もれてしまうことも分かった。

これら課題を改善するために、新しくプラズマ発光計測の光学系を構築した（図1(b)）。微弱プラズマ発光を

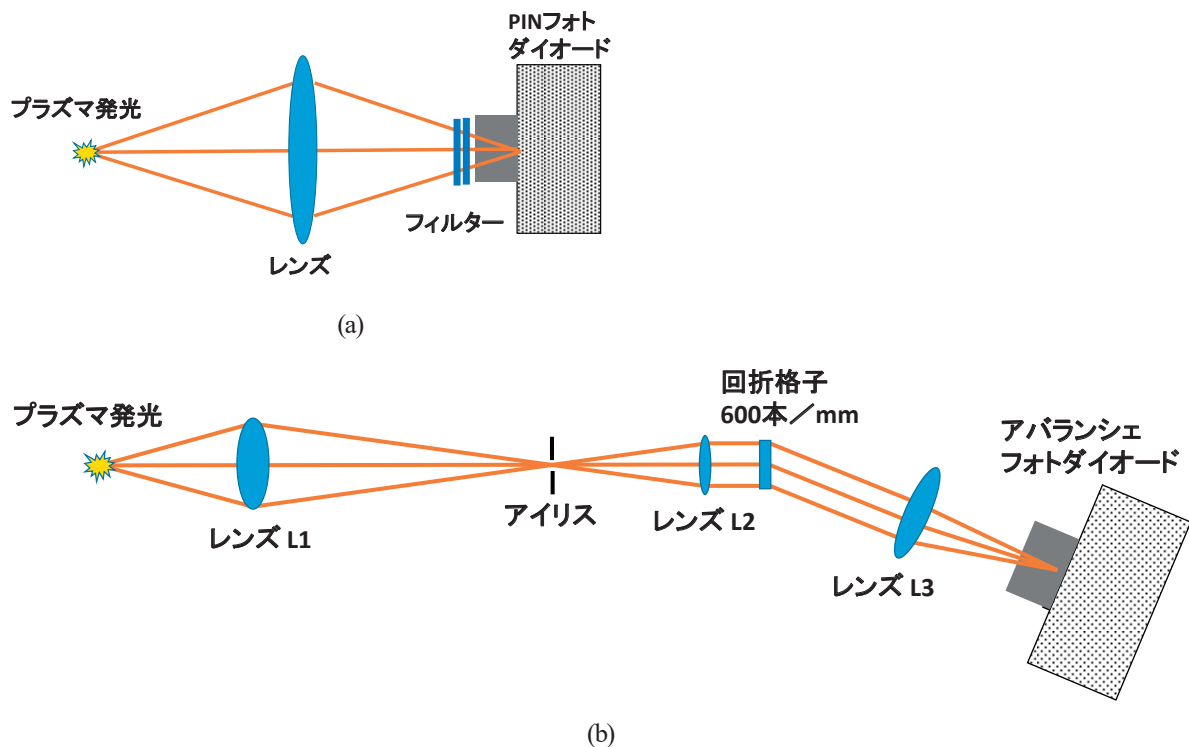


図1 プラズマ発光計測光学系。(a) 従来、(b) 改善後

計測するために、検出器をアバランシェフォトダイオード（ソーラボジャパン社、APD440A）に変更した。この変更により、プラズマ発光の観測に利用している波長 633nm の光に対して約 100 倍光感度が向上することになる。プラズマ発光は白色光であり、その計測は任意の波長で可能であるが、光学系のアライメントに He-Ne レーザー光（633nm）を用いたため、本研究ではプラズマ発光の波長 633nm の成分を計測した。プラズマ発光は焦点距離 26.5mm のレンズ L1 により集光し、アイリスを通して実験室内の迷光を抑制した。その後、焦点距離 40mm のレンズ L2 により平行光にし、透過型回折格子（溝本数 600 本/mm）によりプラズマ発光と照射レーザー散乱光とを分離し、焦点距離 40mm のレンズ L3 によりフォトダイオード上に集光した。

図 2 に回折格子への入射角と-1 次回折角の関係を示す。ここでは溝本数 600 本/mm の透過型回折格子を想定し、プラズマ発光の観測に利用する波長 633nm と、損傷試験に使用するレーザー光 1064nm、532nm、355nm の 4 波長に対する計算結果を示している。入射角度を大きくするに従い、回折角も大きくなり、その変化の割合

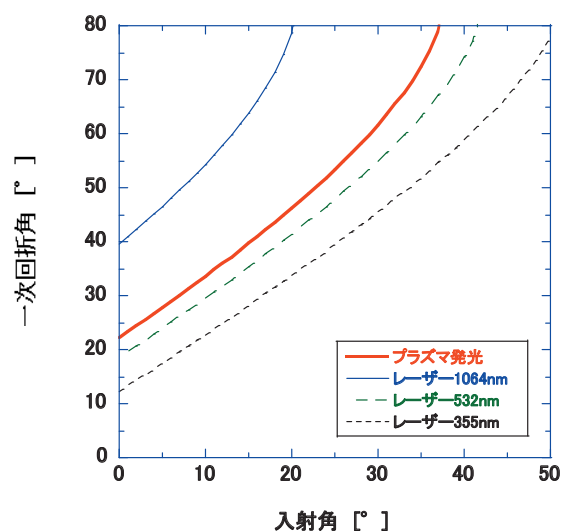


図2 回折格子入射角と-1 次回折角

は波長に依存しないことが分かる。回折格子への入射角が 0° の時、プラズマ発光と波長 532nm のレーザー散乱光との回折角の差は 3.7° であり、焦点距離 40mm のレンズ L3 による集光点の位置ずれは、約 2.6mm となる。フォトダイオードの受光径は直径 1mm であるので、アイリスの径を 1mm 以下にすれば、溝本数 600 本/mm の

回折格子と焦点距離 40mm のレンズを用いることにより、レーザー散乱光がフォトダイオードに入射することを抑制できる。

3. レーザー損傷しきい値評価試験と評価試料

LIDT 評価試験光学配置図を図3に示す。試験用レーザーには、波長 1064nm、パルス幅 10ns の単一モード Q スイッチ Nd:YAG レーザー発振器 (Spectra Physics 社 Quanta-ray) を使用した。レーザーパルスはアイソレータと増幅器を経て、焦点距離 3000mm のレンズを用いて、試料表面に集光される。レンズと試料の間にビームスプリッタを配置し、その表面反射光を計測して照射エネルギーを求めた。照射エネルギーの大きさは、1/2 波長板と偏光子により調整した。レンズと試料間との距離に等しくなる位置に CCD カメラを設置し、試料表面上のビーム径を計測した。また、レーザーパルス波形およびパルス幅はバイプラナ光電管とオシロスコープによって計測を行った。

試料損傷時に発生するプラズマ発光は、前節で説明した計測光学系を、試料の裏側で、レーザー光軸より 45° 傾けた方向に設置し計測した。またレーザー照射前後の試料表面を微分干渉顕微鏡により観察し損傷の有無を判定した。

LIDT 評価試験は、1-on-1 方式で行った。1 パルス照射毎に損傷の有無を確認し、照射位置、照射フルエンスを変更してレーザー照射を繰返し、最終的に損傷確率が 0% となる最大フルエンスを LIDT と定義する。プラズマ発光計測では、試料がない場合の 1 パルス照射毎のフォトダイオードからのバックグラウンド信号を予め計測し、その平均値およびバラツキから非損傷信号範囲を求め、その範囲から外れた信号を損傷とした。

評価試料には、波長 1064nm 用反射防止コートを用意した。コートの材料には、SiO₂ と TiO₂ を使用し、微弱プラズマを計測するために比較的耐力となるように設計、製作した。

4. 損傷サイズとプラズマ発光信号

プラズマ発光計測光学系を改善した結果を確認するために、従来の PIN フォトダイオードの場合の計測信号とアバランシェフォトダイオードを用いた場合の信号の比較を行った。図4は、レーザー照射後顕微鏡で観察された損傷の大きさと、それぞれのプラズマ発光計測光学系で計測された信号の大きさとの関係を示したものである。図4(a)に示したように、従来の PIN フォトダイオードの場合、損傷サイズが 8μm 程度までは信号出力は約 4.9mV で変わらず、10μm 以上の大きさになり信

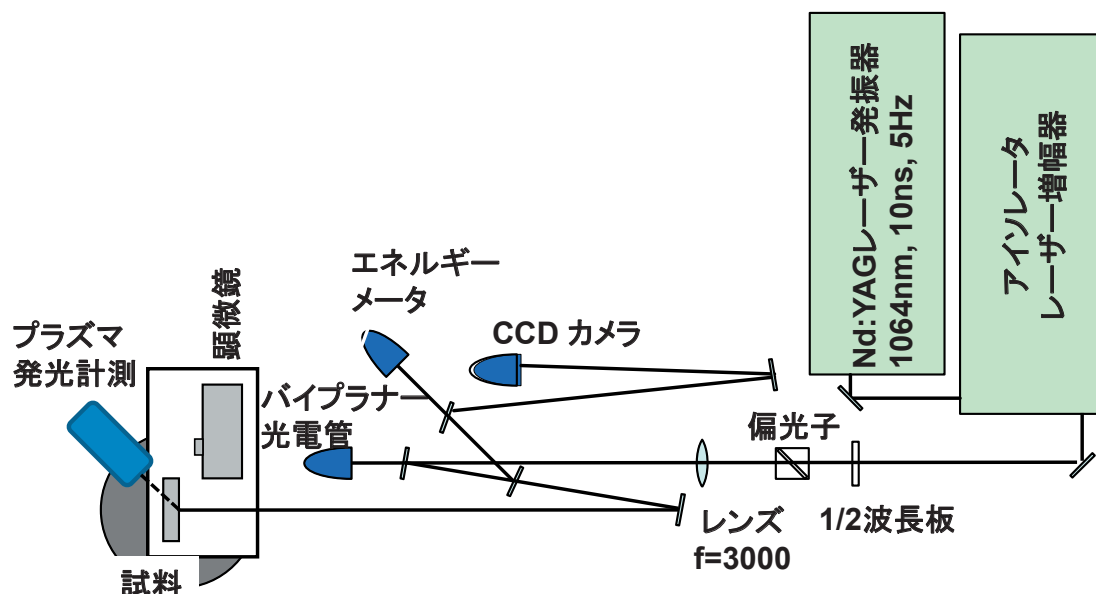
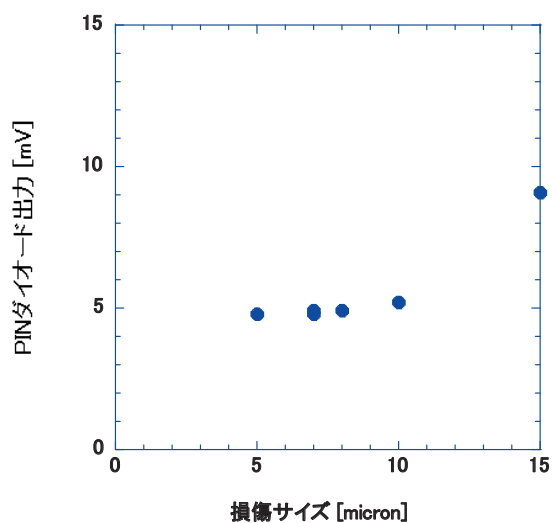
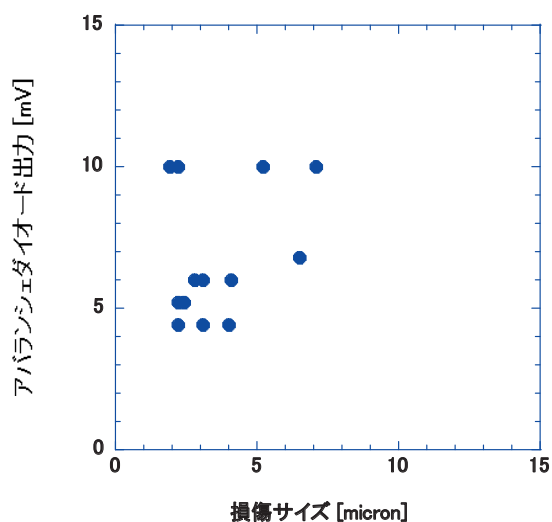


図3 レーザー損傷しきい値評価試験光学配置



(a)



(b)

図4 損傷サイズとプラズマ発光計測信号の関係

(a) PIN フォトダイオード計測光学系、(b) アバランシェフォトダイオード計測光学系

号は大きくなった。このことから、10 μ m 未満の損傷時のプラズマ発光は計測できていないと考えられる。一方、図 4(b)の新しい測定光学系では、損傷サイズ 4 μ m 以下では 4.2mV 程度の低い信号出力もあるが、損傷サイズ 2 μ m でも 10mV の出力信号を得ている。測定光学系を改善することにより約 2 μ m の微小損傷も検出可能になったと言える。

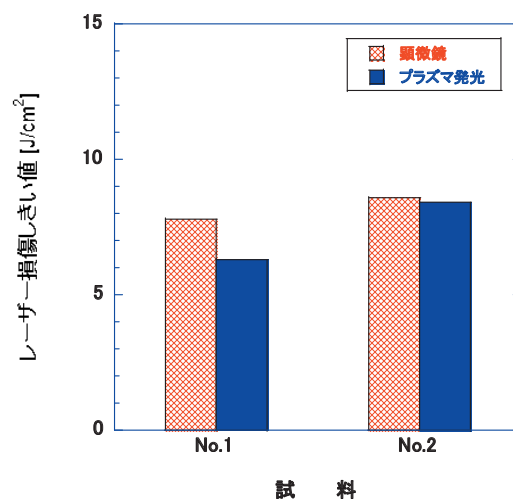


図5 反射防止コートのレーザー損傷しきい値

5. レーザー損傷しきい値評価結果

新しいプラズマ発光計測光学系を用い、反射防止コートの LIDT を評価した。図 5 には、比較のために、微分干渉顕微鏡による観察による評価結果も示した。試料 No.1 と No.2 は、同一バッチでコートしたものである。顕微鏡観察では、2 つの試料に対し、どちらも約 8J/cm² の LIDT が得られた。試料 No.2 に対しては、プラズマ発光計測による LIDT は、顕微鏡観察と同じ約 8J/cm² であると求められた。このことから、改善したプラズマ発光計測光学系により従来の顕微鏡観察と同様の損傷検出および LIDT 評価試験が可能であると言える。更に、試料 No.1 のプラズマ発光計測による LIDT は約 6J/cm² と顕微鏡観察の場合よりも低い値が得られた。これは、顕微鏡で確認できなかった微小損傷をプラズマ発光計測により検出できたことを意味する。

図 6 に、試料 No.1 を試験した時の照射フルエンスデータを示す。横軸に照射レーザーフルエンス、縦軸に照射時に得られたフォトダイオード出力を示す。○、●のプロットはそれぞれ顕微鏡観察による非損傷、損傷を意味する。フォトダイオード出力 5mV の実線は、バックグラウンド信号の上限であり、5mV を越えた出力信号をプラズマ発光計測による損傷とした。顕微鏡観察では、照射フルエンス 2J/cm²~14J/cm² まで、非損傷のデータ

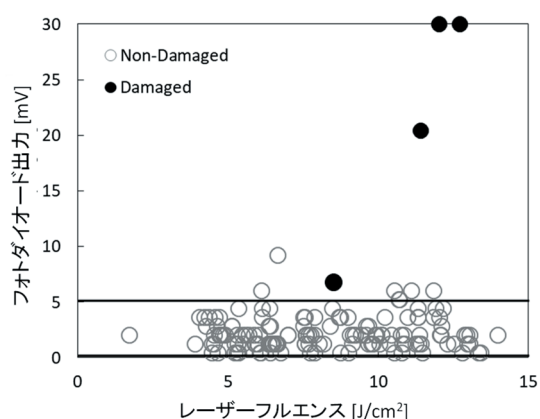


図6 反射防止コート試料No.1の照射フルエンスと損傷との関係

は沢山あるが、損傷のデータ4点の最低フルエンスは8.2J/cm²であり、損傷確率0%はその下8J/cm²と求まる。一方、フォトダイオード出力も多くは5mV以下であるが、顕微鏡観察では損傷と確認できなかった6J/cm²、7J/cm²で、フォトダイオード出力が5mVを越え損傷と判断されている。これら2点より、損傷確率0%のフルエンスは下がり、LIDTは6J/cm²と求められた。

6. まとめ

LIDT評価試験の自動化を目的に、損傷時に発生するプラズマ発光計測による損傷検出について、発光計測感度の向上およびレーザー散乱光等の迷光の抑制を行い、損傷検出精度の改善を図った。結果、損傷サイズ約2μm

の損傷までプラズマ発光計測が可能になった。また反射防止コートのLIDTを顕微鏡観察と比較した結果、同等のLIDTが得られ、顕微鏡観察との置き換えが可能であることが分かった。但し、顕微鏡観察で確認できない損傷についても発光信号が得られるなど、適切な発光信号強度を決める必要があることが分かった。今後、改善したプラズマ発光計測光学系を用い、多くの試料の評価を行い、計測データを蓄積することにより適切な発光信号強度を決め、自動化を進める予定である。

謝辞

本研究の一部は、大阪大学レーザー科学研究所、ならびに近畿大学大学院総合理工学専攻との共同研究として行われた。

参考文献

- 1) <http://www.ilt.or.jp/testing/kenkyukai.html>
- 2) J.B.Frank, et al., Nat. Bur. Stand. Spec. Publ. (1986) 727.
- 3) A.Stratan, et al., Proc. of SPIE Vol. 8530 (2012) (5301Y-1.
- 4) K.Mann, et al., Proc. of SPIE Vol. 1438 (1989) 39.
- 5) L.Sheehan, et al., Proc. of SPIE Vol.3578 (1998) 302.
- 6) 本越伸二, ILT2022 年報 (レーザー技術総合研究所, 2022) 53.
- 7) 本越伸二, ILT2023 年報 (レーザー技術総合研究所, 2023) .

発 表 論 文 リ ス ト

発表論文リスト

〇レーザーエネルギー研究チーム

著 者	K. Fujioka, Y. Matsumoto, Y. Tamaru, H. Yoshida, J. Ogino, S. Tokita, K. Tsubakimoto, K. Yamamoto, A. Yogo, J. Kawanaka, and <u>N. Miyanaga</u>
題 目	Fabrication, spectroscopic characteristics, and lasing performance of Nd,La:CaF ₂ transparent ceramics
論文誌名	Opt. Mater. Exp. 15, 890-902 (2025), doi.org/10.1364/OME.558733

〇レーザープロセス研究チーム

著 者	新村 亮、田島孝敏、白井 孝、加藤邦彦、 <u>藤田雅之</u>
題 目	月資源を用いた拠点基地建設材料の製造と施工方法の技術開発
論文誌名	建設機械、vol.60, No.5、pp.35-39、(2024)

〇レーザー計測研究チーム

著 者	<u>T. Somekawa</u> , S. Matsuda, <u>S. Kurahashi</u> , A. Yogo, and H. Kuze
題 目	Remote Detection and Identification of Plastics with Raman Lidar
論文誌名	Proc. ILRC、O5-3 (2024)
著 者	<u>T. Somekawa</u> , <u>S. Kurahashi</u> , S. Matsuda, A. Yogo, and H. Kuze
題 目	Remote detection and identification of plastics with hyperspectral Raman imaging lidar
論文誌名	Optics Letters、Vol. 50, Issue 1、pp. 57-60 (2025) https://doi.org/10.1364/OL.544096 、(2025)
著 者	M. Ishii, <u>T. Somekawa</u> , <u>S. Kurahashi</u> , S. Matsuda, K. Hiroaki, and T. Shiina
題 目	Measurement of nitrogen leakage by Raman lidar for observation inside the Fukushima No.1 reactor building
論文誌名	Lidar and Optical Remote Sensing for Environmental Monitoring XVII、1326507、(2024)
著 者	T. Sakurai, <u>T. Somekawa</u> , and H. Matsushita
題 目	A snow melting behavior on hydrophilic surface from femtosecond laser-induced periodic surface structures fabricated on galvanized steels
論文誌名	Bulletin of Glaciological Research、Vol. 42、pp.103-111、(2024)

国内学会発表リスト

○レーザープロセス研究チーム

著 者	田島孝敏、新村 亮、白井 孝、加藤邦彦、 <u>藤田雅之</u>
題 目	マイクロ波およびレーザーを用いた月面基地建設材料の製造に関する研究(その2)
会議名	令和6年度土木学会全国大会第79回年次学術講演会、2024年9月5日、東北大学川内北キャンパス
著 者	<u>藤田雅之</u> 、新村 亮、田島孝敏、新述隆太、湊田安浩
題 目	月面環境におけるレーザー加熱3Dプリンティングの可能性
会議名	第68回宇宙科学技術連合講演会、2024年11月6日、姫路市文化コンベンションセンター
著 者	新村 亮、湊田安浩、田島孝敏、白井 孝、加藤邦彦、 <u>藤田雅之</u>
題 目	月資源を用いた拠点基地建設材料の製造と施工方法の技術開発
会議名	第68回宇宙科学技術連合講演会、2024年11月7日、姫路市文化コンベンションセンター
著 者	<u>藤田雅之</u>
題 目	レーザー加工の基礎と応用
会議名	パワーレーザーオンラインセミナー、2024年11月18日、オンライン
著 者	<u>藤田雅之</u> 、新村 亮、田島孝敏、新述隆太、湊田安浩
題 目	月面環境におけるレーザー加熱3Dプリンティング
会議名	レーザー学会学術講演会第45回年次大会、2025年1月22日、広島国際会議場

○レーザー計測研究チーム

著 者	<u>染川智弘</u> 、 <u>倉橋慎理</u> 、松田晶平、余語覚文、久世宏明
題 目	ラマンライダーによるプラスチックのリモート計測技術の開発
会議名	第42回レーザセンシング学会、2024年9月12日、大阪大学中之島センター
著 者	松田晶平、 <u>染川智弘</u> 、 <u>倉橋慎理</u> 、石井萌、久世宏明、椎名達雄
題 目	福島原子炉建屋内の漏洩気体計測に向けたレーザーリモートセンシング技術の開発
会議名	第42回レーザセンシングシンポジウム、2024年9月12日、大阪大学中之島センター
著 者	<u>倉橋慎理</u> 、 <u>染川智弘</u>
題 目	コンクリート構造物の塩害評価に向けたリモートダブルパルスLIBSの開発
会議名	第42回レーザセンシングシンポジウム、2024年9月12日、大阪大学中之島センター
著 者	石井萌、 <u>染川智弘</u> 、 <u>倉橋慎理</u> 、松田晶平、久世宏明、椎名達雄
題 目	福島原子炉建屋内観測のためのラマンライダーによる漏洩窒素計測
会議名	第42回レーザセンシングシンポジウム、2024年9月12日、大阪大学中之島センター
著 者	<u>染川智弘</u> 、松田晶平、 <u>倉橋慎理</u> 、余語覚文、久世宏明
題 目	ラマンライダーによるプラスチックの遠隔計測技術の開発
会議名	第85回応用物理学会秋季学術講演会、2024年9月17日、朱鷺メッセ
著 者	<u>倉橋慎理</u>
題 目	実現場への適用へ向けたレーザーによるインフラ構造物検査技術の開発
会議名	多元技術融合光プロセス研究会 第4回研究交流会プログラム、2024年12月9日、御茶ノ水トリエッジカンファレンス
著 者	新村 亮、谷口 信博、渡辺 淳、奥澤 康一、川北 章悟、 <u>倉橋 慎理</u> 、 <u>染川 智弘</u>
題 目	振動特性を用いたトンネル切羽浮石検知システムの開発
会議名	第16回岩の力学国内シンポジウム、2025年1月14日、熊本城ホール
著 者	<u>染川智弘</u> 、 <u>倉橋慎理</u> 、松田晶平、余語覚文、久世宏明
題 目	海洋プラスチックごみの遠隔計測に向けたラマンライダー技術の開発
会議名	レーザー学会学術講演会第45回年次大会、2025年1月21日、広島国際会議場

著 者	田中 大裕、澤田 寛、中辻 千陽、松浦 壮汰、佐藤 匠、西井 一郎、本多 拓也、堀本 駿、 <u>染川 智弘</u> 、 <u>簀内 俊毅</u> 、宮西 宏併、犬伏 雄一、千徳 靖彦、清水 智弘、新宮原 正三、山ノ井 航平、重森 啓介
題 目	超高速X線シャドウグラフによるナノワイヤーアレイのプラズマダイナミクス計測
会議名	レーザー学会学術講演会第45回年次大会、2025年1月21日、広島国際会議場
著 者	大村 リョウ、Ji Hantao、Gao Lan、Guo Fan、Zhang Yang、Russell Brandon、Pomraning Geoffrey、明松 凜也、唐木 優河、松原 広貴、Dun Jinyuan、Xiao Han、瀧澤 龍之介、Law King Fai、山ノ井 航平、佐野 孝好、 <u>染川 智弘</u> 、坂和 洋一、余語 寛文、藤岡 慎介
題 目	ピコ秒ペタワットレーザーとキャパシターコイルを用いた強磁場の生成とその測定
会議名	レーザー学会学術講演会第45回年次大会、2025年1月22日、広島国際会議場
著 者	大山 哲矢、杉本 幸代、市川 祐嗣、萩田 将一、星野 礼香、山下 望、山本 知代、朝日 一平、江藤 修三、 <u>染川 智弘</u> 、 <u>コスロービアン ハイク</u> 、 <u>谷口 誠治</u>
題 目	共鳴ラマン効果による広域漏洩監視用アンモニアLIDAR装置の開発
会議名	レーザー学会学術講演会第45回年次大会、2025年1月23日、広島国際会議場
著 者	<u>倉橋慎理</u> 、 <u>染川 智弘</u>
題 目	ダブルパルスLIBSによるコンクリート構造物の遠隔塩分計測技術の開発
会議名	レーザー学会学術講演会第45回年次大会、2025年1月23日、広島国際会議場
著 者	<u>染川智弘</u>
題 目	ラマンライダーを使った微量物質のセンシング
会議名	2024年度多元技術融合光プロセス研究会 第5回研究交流会、2025年3月4日、東海大学品川キャンパス
著 者	<u>染川智弘</u> 、 <u>倉橋慎理</u> 、松田 晶平、余語 寛文、久世 宏明
題 目	ハイパースペクトルラマンイメージングライダーによるプラスチックの遠隔識別
会議名	第72回応用物理学会春季学術講演会、2025年3月14日、東京理科大学野田キャンパス
著 者	<u>倉橋慎理</u> 、 <u>染川 智弘</u>
題 目	コンクリート構造物の遠隔塩分計測に向けたダブルパルスLIBSシステムの開発
会議名	令和7年電気学会全国大会、2025年3月18日、明治大学中野キャンパス

〇レーザーバイオ化学研究チーム

著 者	谷口 誠治、 <u>ハイクコスロービアン</u> 、 <u>本越伸二</u> 、 <u>藤田雅之</u>
題 目	ゼロフォノンライン励起高出力Yb: YAGレーザーの開発
会議名	レーザー学会第585回研究会「高機能固体レーザーとその応用」、2024年7月19日、新大阪セミナーオフィス 会議ルームO-6
著 者	H. Chosrowjan、S. Taniguchi、N. Miyanaga、K. Hamamoto
題 目	Continuous phase-shifting interferometry using an optical vortex as a reference beam: Application to coherent beam combining
会議名	第85回応用物理学会秋季学術講演会、2024年9月19日、朱鷺メッセほか2会場
著 者	谷口 誠治、 <u>コスロービアン ハイク</u> 、 <u>稲田順史</u> 、 <u>本越伸二</u> 、 <u>藤田雅之</u>
題 目	長距離レーザー伝送への適用に向けた高速動作・高光耐性デフォーマブルミラーの開発
会議名	レーザー学会学術講演会第45回年次大会、2025年1月23日、広島国際会議場

〇レーザー技術開発チーム

著 者	本田 能之、 <u>本越伸二</u> 、 <u>實野孝久</u> 、 <u>藤岡加奈</u> 、 <u>吉田実</u>
題 目	レーザー発振効率改善のためのNd/CrYAG材料におけるエネルギー移乗過程の解明
会議名	第585回研究会「高機能固体レーザーとその応用」、2024年7月19日、新大阪セミナーオフィス

国際学会発表リスト

○レーザー計測研究チーム

著 者	<u>T. Somekawa</u> , S. Matsuda, <u>S. Kurahashi</u> , A. Yogo, and H. Kuze
題 目	Remote Detection and Identification of Plastics with Raman Lidar
会議名	31st International Laser Radar Conference、2024年6月23日、Landshut
著 者	M. Ishii, <u>T. Somekawa</u> , <u>S. Kurahashi</u> , S. Matsuda, H. Kuze, and T. Shiina
題 目	Measurement of nitrogen leakage by Raman lidar for observation inside the Fukushima No.1 reactor building
会議名	Asia-Pacific Remote Sensing 2024、2024年12月2日、Kaohsiung, Taiwan

○レーザー技術開発チーム

著 者	<u>S.Motokoshi</u>
題 目	Development of Solar Power Pumped Solid State Laser
会議名	Laser Korea Congress2025、2025年1月16日、Gwangju South Korea

事業報告書

事業報告書

(令和 6 年度)

概 況

公益財団法人レーザー技術総合研究所は、レーザー及びその関連産業の振興を図り、我が国の学術の進展と科学技術の発展に貢献することを責務とし、レーザーとその応用に関する研究開発活動を積極的に展開し、併せてレーザー関連技術の調査、情報の収集・提供、人材育成などの普及啓発事業を推進してきた。令和 6 年度においても関係各位の協力を得て、概ね計画どおり活動することができた。

【令和 6 年度の主な活動】

産業用レーザー開発プロジェクトでは、多ビーム結合による大出力化と波面制御による高ビーム品質化をめざして、位相制御の高速化と可変形鏡の高精度化研究を進めた。また、レーザー加工分野への適用性など実用化に向けた検討も開始した。

レーザーエネルギー分野では、原子力や宇宙分野で要求されているレーザー関連技術の調査研究を進め、新しい応用分野の開拓をめざした。

レーザープロセス分野では、ものづくりイノベーションを支援するため、レーザー加工等のレーザープロセス技術の基礎・応用開発研究を進め、あわせて、屋外現場でのレーザー利用安全ガイドライン評価手法の検討を行った。

レーザー計測分野では、コンクリート構造物の健全性評価をめざすレーザー打音・レーザー超音波法の高度化研究と、ラマンライダーなどの多様な分光・分析技術を駆使した大気中・水中、環境計測技術の研究開発を実施した。

レーザーバイオ化学分野では、蛋白質や酵素の機能解明をめざすレーザー分光研究を継続するとともに、光反応を利用した金属イオンの光酸化・還元過程の研究を行い、選択的要素分離技術への適用性について検討を進めた。

レーザー技術開発室では、光学素子・材料のレーザー損傷機構解明研究を行い、高耐力化をめざして技術開発を進めた。また、産学連携の中核的な存在として、技術、情報、人材等の連携・交流を進めた。

普及啓発活動では、研究成果報告会の開催、展示会への出展、機関誌「レーザークロス」や成果報告書の刊行、ホームページおよびメール配信などを通して積極的に成果を公開し、情報発信に努めた。

1. 役員等の異動

(理事)

年月日	就 任	退 任
R6.4.30	串原 智博	林 知則
R6.4.30	北川 敬明	神崎 寛
R6.4.30	齋藤 憲一	佐藤 俊志
R6.6.19 (改選)	高西 一光(再任)	
R6.6.19 (改選)	井澤 靖和(再任)	
R6.6.19 (改選)	梅林 徹 (再任)	
R6.6.19 (改選)	上原 拓也(再任)	
R6.6.19 (改選)	北川 敬明(再任)	
R6.6.19 (改選)	串原 智博(再任)	
R6.6.19 (改選)	兒玉 了祐(再任)	
R6.6.19 (改選)	齋藤 憲一(再任)	
R6.6.19 (改選)	齊藤 知孝(再任)	
R6.6.19 (改選)	齋藤 公秀(再任)	
R6.6.19 (改選)	山下 圭 (再任)	
R7.3.27	高村 幸宏	齊藤 知孝

(監事)

年月日	就 任	退 任
R6.6.19 (改選)	中島 信昭(新任)	
R6.6.19 (改選)	日根野 健(再任)	
R6.6.19 (改選)	吉村 隆 (再任)	

(評議員)

年月日	就 任	退 任
R6.6.19 (改選)	尾崎 雅則(新任)	
R6.6.19 (改選)	川嶋 利幸(新任)	
R6.6.19 (改選)	重松 昌行(再任)	
R6.6.19 (改選)	高木 宏彰(再任)	
R6.6.19 (改選)	高林 幹夫(再任)	
R6.6.19 (改選)	田中 淳 (再任)	
R6.6.19 (改選)	富岡 洋光(再任)	
R6.6.19 (改選)	東 邦夫(再任)	
R6.6.19 (改選)	藤岡 直人(再任)	
R6.6.19 (改選)	山田 裕之(再任)	
R7.3.27		重松 昌行

2. 役員会等の開催

(1) 理事会

第 59 回理事会（令和 6 年 4 月 17 日 みなし決議）

決議事項

- ・臨時の第 42 回評議員会の招集及び目的である事項

第 60 回理事会（令和 6 年 5 月 30 日 Web 会議）

決議事項

- ・令和 5 年度事業報告
- ・令和 5 年度財務諸表
- ・定時評議員会の日時及び場所並びに目的である事項

報告事項

- ・職務執行状況の報告

第 61 回理事会（令和 6 年 7 月 16 日 みなし決議）

決議事項

- ・理事長、副理事長及び常務理事の選定

第 62 回理事会（令和 7 年 3 月 10 日 Web 会議）

決議事項

- ・令和 7 年度事業計画
- ・令和 7 年度収支予算書及び資金調達及び設備投資の見込み
- ・研究活動上の不正行為の防止等に関する規程（内規）の改正
- ・特定費用準備資金等取扱規程の制定及び

特定費用準備資金の設定について

- ・臨時の第 44 回評議員会の招集及び目的である事項等

報告事項

- ・職務執行状況の報告

(2) 評議員会

第 42 回評議員会（令和 6 年 4 月 30 日 みなし決議）

決議事項

- ・理事の選任

第 43 回評議員会（令和 6 年 6 月 19 日 Web 会議）

決議事項

- ・令和 5 年度財務諸表

- ・改選期に伴う理事の選任
 - ・改選期に伴う監事の選任
 - ・改選期に伴う評議員の選任
- 報告事項 ・ 令和5年度事業報告

- 第 44 回評議員会 （令和 7 年 3 月 27 日 みなし決議）
- 決議事項
- ・評議員の退任
 - ・理事の選任

3. 賛助会員状況

令和 6 年度末会員数 28 社 67.5 口

4. 学会および論文発表

学会発表 27 件 （国内：24 件、国外： 3 件）

論文発表 6 件 （国内： 1 件、国外： 5 件）

5. 特許等出願件数

令和 6 年度出願件数 1 件

令和 6 年度末特許保有件数 33 件 （登録：26 件、公開：6 件、他：1 件）

I 研究開発および調査事業

1. 研究調査事業

【産業用レーザー開発プロジェクト】

レーザー加工技術など産業応用分野の発展に資するため、10kW 級産業用レーザーに必要とされる基盤技術の研究開発を進めた。

(1) ビーム結合に関する研究

レーザーの大出力化に有効な多ビーム結合技術について、結合効率を高めるための手法を解析し、位相制御の高速化と結合ビーム数の増大に成功した。

(2) 波面制御技術に関する研究

レーザービームの波面歪を補償し、大出力で高品質ビームを実現できる可変形鏡の設計を進め、実機の製作を行った。

【レーザーエネルギー研究チーム】

レーザーエネルギーの新しい応用分野の開拓をめざし、原子力や宇宙分野で要求されているレーザー関連技術を調査した。

(1) 新しいレーザー応用分野の探索

原子炉廃止措置に必要なレーザー関連技術や、宇宙デブリのトラッキングと除去におけるレーザー利用技術について調査し、今後の開発課題を検討した。

【レーザープロセス研究チーム】

ものづくりイノベーションを支援するレーザープロセス技術の基礎・応用開発研究を行った。

(1) 短パルスレーザー加工に関する研究

フェムト秒からナノ秒領域の短パルスレーザーを用いた、金属、半導体、誘電体等、各種材料の加工特性に関する研究を行った。

(2) レーザー加工のインフラ構造物への適用性に関する研究

建設業界へのレーザー技術の普及をめざし、屋外現場でのリスクアセスメントの具体化を進めるとともに、表面クリーニング、月面環境での積層造形、ならびに道路標識の防雪、防氷などに関するレーザー加工技術の適用性を検討した。

(3) レーザーによるナノ構造体生成技術の研究

液中レーザーアブレーションを利用した金属イオンの光還元試験を行い、生成した金属ナノ粒子の物性について具体的な知見を得た。また、合金ナノ粒子合成試験を進めた。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・月資源を用いた拠点基地建設材料の製造と施工方法の技術開発
- ・レーザー加工による難着氷雪技術の研究
- ・ナノ秒パルスレーザを用いた液相レーザアブレーションでの金属還元の検証実験

【レーザー計測研究チーム】

レーザー応用計測・分析技術の高性能化に資する基盤技術を開発した。

(1) レーザーを用いた非破壊診断技術の開発

レーザーを用いた、コンクリート構造物の健全性評価技術の実用化をめざし、トンネル切羽や、ダム嵩上げ時の落石の危険度評価に向けたレーザー打音・超音波技術の応用研究を実施した。

(2) レーザーによる環境計測技術の研究

ラマンライダー技術を利用して、海中環境や海中プラスチックごみを遠隔評価する技術、大気中に漏洩した微量物質の検出・分析技術の開発を実施した。原子炉格納容器からの気体漏洩検出では、光学干渉を利用した新しいガス可視化手法も検討した。また、レーザー誘起ブレイクダウン分光法によるコンクリート構造物の劣化診断技術を開発し、高架橋への適用試験を実施した。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・レーザーによるコンクリート欠陥検査に関する研究
- ・海底開発における環境影響評価に向けた水中ライダーシステムの開発
- ・コンクリート構造物の表層近傍の物理的・化学的劣化のデジタルデータ化及び劣化予測技術の開発
- ・短パルスレーザを用いた CBRNE 検知ライダーシステムの開発
- ・PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究

【レーザーバイオ化学研究チーム】

蛋白質や酵素の光機能解明に関する研究、ならびに光反応を利用した選択的要素分離と回収手法の開発を進めた。

(1) 光応答性酵素の機能研究

光による DNA 修復機能に関わる酵素の反応に関して、酵素内における電荷シフト反応メカニズムの理論解析を進めた。

(2) パルスレーザーによる溶液中金属イオンの光酸化・還元の研究

水溶液中のランタノイドイオンについて光酸化反応過程を研究し、テルビウムの光酸化現象を実験で検証した。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・溶液中金属イオンの光酸化還元に関する研究

【レーザー技術開発室】

光学素子や光学材料の高耐力化研究を実施した。また産業界や大学と協力して技術、情報、人材等の交流を進めた。

(1)光学素子の高耐力化研究

光学素子・材料のレーザー損傷機構解明の研究を継続し、紫外域で高耐力化が期待できる材料のコーティング技術開発を進めた。

(2)レーザー損傷評価試験の自動化

レーザー損傷試験の自動化をめざしてプラズマ発光法の検討を進め、損傷評価の精度向上を図った。

(3)新材料技術の開発研究

レーザー三次元造形法を用いた光学素子形成技術開発を進めた。石英ガラス基板上に堆積したガラス状物質の物性値を精度よく評価する手法を検討した。

2. 各種研究会活動

当研究所の研究開発活動を効率的・発展的に推進するため、関連各界の意見・情報収集の場として、次のような研究会を開催し、当研究所の事業の活性化を図った。

[実施した主な研究会]

- ・次世代レーザー技術応用研究会
- ・高耐力光学素子研究会

3. 産学官連携の推進

ホームページ上の技術相談窓口等で受け付けた、企業の技術開発・改良に対する支援、光学部品の損傷評価、微細加工など 35 件の相談・要望に対し、積極的に対応した。

学界との連携では、大阪大学レーザー科学研究所等との共同研究をはじめ、国内外の大学と積極的に連携を図りながら研究を行った。

産学官の連携では、企業、大学等と連携を図りながら、国が主導する産学官連携プロジェクト研究に参画した。

4. 関連団体との連携

(国)日本原子力研究開発機構(JAEA)、(国)量子科学技術研究開発機構(QST)、(国)理化学研究所(RIKEN)、(国)宇宙航空研究開発機構(JAXA)、(一財)光産業技術振興協会(OITDA)、(一財)大阪科学技術センター(OSTEC)、(一財)近畿高エネルギー加工技術研究所(AMPI)、(一社)レーザー学会(LSJ)、(一社)レーザプラットフォーム協議会(LPF)、(特非)日本フォトニクス協議会関西支部(JPC 関西)、(特非)光科学アライアンスなど関連団体とも積極的に情報交流や人的交流を図り、これらの団体と連携してわが国のレーザー技術の発展と普及に寄与する活動を推進した。

5. 公募研究

国等が公募を行っている各種競争的研究資金の獲得に努め、本年度は以下の採択課題に参加した。

- (1) 月資源を用いた拠点基地建設材料の製造と施工方法の技術開発
(内閣府 宇宙開発利用加速化戦略プログラム「スターダストプログラム」
国土交通省 宇宙無人建設革新技術開発推進事業)
- (2)PCV 気相漏洩位置及び漏洩量推定のための遠隔光計測技術の研究開発
(英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業
CLADS 英知「課題解決型廃炉研究プログラム」)
- (3)短パルスレーザーを用いた CBRNE 検知ライダーシステムの開発
(防衛装備庁 安全保障技術研究推進制度委託事業)
- (4)コンクリート構造物の表層近傍の化学的劣化のデジタルデータ化技術の開発
(内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム (S I P)
「スマートインフラマネジメントシステムの構築」)
- (5)光技術(レーザー等)を活用した鉄道施設の維持管理に係る技術実証
(国土交通省 中小企業イノベーション創出推進事業 SBIR)
- (6)海中レーザーCO₂計測が拓く脱炭素への貢献
(文部科学省 戦略的創造研究推進事業 CREST)

6. 受託研究

展示会、ホームページなどを通じて受託研究の広報を行い、8 件の受託研究を実施した。(公募によるものを除く)

7. 補助事業

文部科学省の科学研究費補助金を活用し、以下のような研究を実施した。

- ・海底開発での環境影響評価のための海中フラッシュライダー
3D マッピング技術の開発（基礎研究B）

II 普及啓発活動事業

レーザー技術の普及啓発活動として、情報の発信・提供、人材交流などの事業を以下のとおり実施した。

1. 人材の育成

大学、関連研究機関、企業などとの共同研究や技術相談を通じ、若手研究員の技術指導を行うことによりレーザー技術に関する人材育成に貢献した。

2. 研究成果報告会

大阪ならびに横浜にて、令和 5 年度の研究成果を報告する研究成果報告会 (ILT2024)を開催した。

- ・ 7 月 17 日 マイドームおおさか
- ・ 10 月 29 日 パシフィコ横浜 アネックスホール

3. 機関誌等の発行

機関誌「Laser Cross」の発行および電子メールでの情報配信により、当研究所の研究成果やレーザーに関する国内外の研究開発動向など、幅広い情報の提供を行った。

4. 展示会への出展

関係団体が主催する光技術やレーザーに関する展示会へ積極的に出展し、当研究所の広報活動に努めた。

- ・ OPIE'2024（レーザーEXPO）4月24日～26日 パシフィコ横浜
- ・ 光・レーザー関西 2024 7月17日～18日 マイドームおおさか
- ・ InterOpto 2024・光とレーザーの科学技術フェア 10月29日～31日 パシフィコ横浜

5. 国際交流

海外のレーザー技術の開発動向や産業応用に関連した情報を収集するとともにレーザー関連団体や関係研究機関との情報交換・人材交流を図るため、計4の国際会議へ参加した。

- (1) OPIC 2024（4月24日-26日、パシフィコ横浜）
- (2) 31st International Laser Radar Conference
（6月23日-28日、ドイツ・ランツフート）
- (3) Asia-Pacific Remote Sensing 2024（12月2日-5日、台湾・高雄）
- (4) Laser Korea Congress2025（1月15日-17日、韓国・光州市）

Ⅲ そ の 他 事 業

1. IFE（慣性核融合エネルギー：Inertial Fusion Energy）フォーラム活動

レーザー核融合によるエネルギー開発に向けた活動や産学共創を目指す委員会活動などを支援した。

2. 出版物の刊行

- 令和5年度の研究成果を年報にまとめ、刊行した。
- ・「ILT2024年報」（2023～2024）（令和6年7月発行）

3. 泰山賞の贈呈

泰山賞は、レーザー科学技術分野の優れた研究開発業績を表彰する制度である。過去の受賞者を中心とする推薦委員より候補者を推薦していただき、第三者を含む選考委員会において受賞者を選考し、7月の成果報告会(大阪)にて贈呈式を行った。令和6年度の第15回泰山賞受賞者とその業績は下記の通りである。

レーザー進歩賞

関西光量子科学研究所 光量子ビーム科学研究部 上席研究員

西内 満美子 氏

「超高強度レーザーによる高エネルギーイオン加速の研究」

Ⅳ 法 人 ・ 組 織 活 動

1. 研究不正防止活動

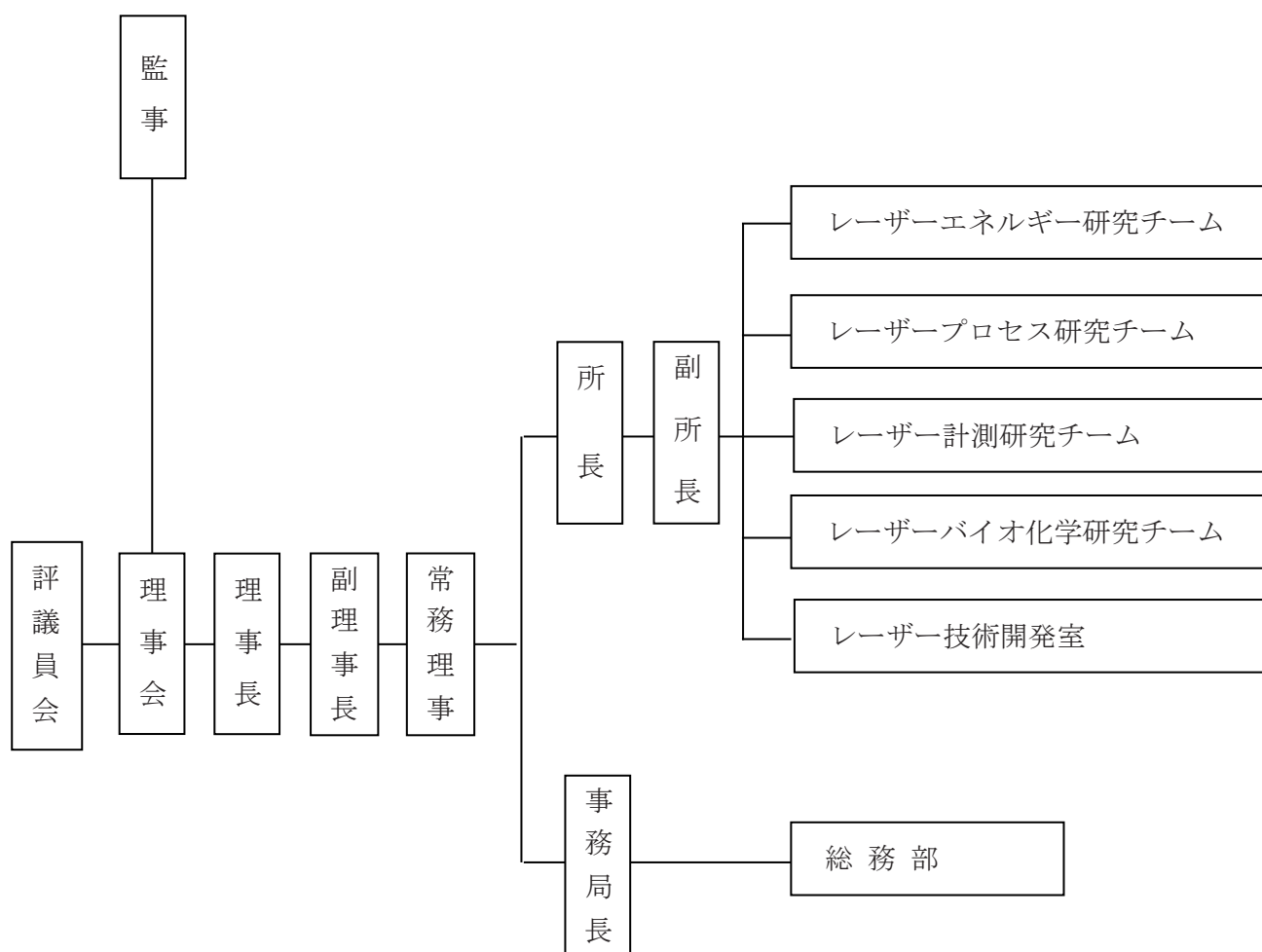
文部科学省の「研究機関における公的研究費の管理・監査のガイドライン（実施基準）」（令和 3 年 2 月 1 日改正）、「研究活動における不正行為への対応等に関するガイドライン」（平成 26 年 8 月 26 日策定）をもとに定めた研究活動上の不正行為の防止等に関する規程等にもとづき、不正防止活動を行った。

（附属説明書について）

「一般社団法人及び一般財団法人に関する法律施行規則」第 34 条第 3 項に規定する附属明細書については、「事業報告の内容を補足する重要な事項」がないため、作成しない。

組 織 図 構 成 員 一 覧

組 織 図



(令和 7年 7月現在)

構 成 員 一 覧

理事長
副理事長
常務理事

桑野 理
井澤靖和
梅林 徹

◇研究部

所長

井澤靖和

【レーザーエネルギー研究チーム】

チームリーダー
特別研究員
特別研究員

井澤靖和（兼務）
宮永憲明
大道博行

【レーザープロセス研究チーム】

副所長
主任研究員
主任研究員
副主任研究員
研究員

藤田雅之（チームリーダー）
谷口誠治（兼務）
染川智弘（兼務）
コスロービアン ハイク（兼務）
稲田順史

【レーザー計測研究チーム】

主任研究員
主任研究員
副主任研究員
研究員
研究員
研究員

染川智弘（チームリーダー）
谷口誠治（兼務）
コスロービアン ハイク（兼務）
倉橋慎理
猪口和彦
磯谷舟佑

【レーザーバイオ化学研究チーム】

主任研究員
副主任研究員

谷口誠治（チームリーダー）
コスロービアン ハイク

【レーザー技術開発室】

主席研究員
研究員
研究員

本越伸二（室長）
坂本高保
畑山 淳

◇総務部

事務局長
総務部長
マネージャー
チーフ
事務員
事務員

梅林 徹
梅林 徹（兼務）
小玉善文
藤田淑子
林 絢子
片岡紀子

【特別研究員】

元東京工業大学 准教授
大阪公立大学大学院 客員教授
大阪大学 名誉教授
大阪大学 名誉教授
元日本原子力研究開発機構
㈱コヒーレントシステムズ

糟谷紘一
中島信昭
中塚正大
宮永憲明
大道博行
内田成明

（令和7年7月現在）

【共同研究員】

大阪大学レーザー科学研究所	所長	兒玉了祐
大阪大学レーザー科学研究所	教授	岩本晃史
大阪大学レーザー科学研究所	教授	重森啓介
大阪大学レーザー科学研究所	教授	千徳靖彦
大阪大学レーザー科学研究所	教授	中嶋 誠
大阪大学レーザー科学研究所	教授	藤岡慎介
大阪大学レーザー科学研究所	教授	余語覚文
大阪大学レーザー科学研究所	教授	吉村政志
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	有川安信
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	坂和洋一
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	佐野孝好
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	椿本孝治
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	中田芳樹
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	長友英夫
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	藤岡加奈
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	山ノ井航平
大阪大学レーザー科学研究所	助教	荻野純平
大阪大学レーザー科学研究所	助教	田丸祐基
大阪大学レーザー科学研究所	特任教授	乗松孝好
大阪大学レーザー科学研究所	特任教授	山本和久
大阪大学レーザー科学研究所	特任研究員	吉田英次
大阪大学レーザー科学研究所	特任講師	田中のぞみ
大阪大学エマージングサイエンスデザインR ³ センター	特任教授	宮坂 博
大阪大学大学院理学研究科	准教授	山中千博
大阪大学大学院工学研究科	准教授	尾崎典雅
大阪大学接合科学研究所	教授	節原裕一
大阪大学接合科学研究所	教授	塚本雅裕
大阪産業大学工学部	教授	草場光博
大阪公立大学大学院理学研究科	教授	八ツ橋知幸
岡山大学大学院自然科学研究科	助教	西川 亘
核融合科学研究所	教授	安原 亮
関西学院大学理学部化学科	教授	玉井尚登
関西大学システム理工学部	教授	浅川 誠
関西大学システム理工学部	教授	佐伯 拓
京都大学化学研究所	教授	時田茂樹
京都大学大学院工学研究科	特定助教	保田尚俊
近畿大学理工学部	教授	吉田 実
近畿大学工学部電子情報工学科	教授	部谷 学
元近畿大学理 教授		橋新裕一
近畿大学理工学部	教授	中野人志
近畿大学生物理工学部	講師	三上勝大
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所	研究員	櫻井俊光
千葉大学環境リモートセンシング研究センター	協力研究員	久世宏明
千葉大学大学院工学研究院	准教授	椎名達雄
千葉工業大学	教授	藤本 靖
電気通信大学大学院情報理工学研究科	理事	西岡 一
東海大学総合科学技術研究所	教授	橋田昌樹
東北大学大学院工学研究科	教授	田中秀治
東北大学大学院理学研究科	准教授	柴田 穰
日本原子力研究開発機構	客員研究員	田口俊弘
日本大学生産工学部建築工学科	教授	永井香織
光産業創成大学院大学	教授	藤田和久
広島大学先進理工系科学研究科	教授	遠藤琢磨
広島大学先進理工系科学研究科	教授	城崎知至
福岡工業大学情報工学部	教授	中村龍史

福井工業大学工学部電気電子情報工学科	教授	中井光男
国立研究開発法人物質・材料研究機構	主幹研究員	古瀬裕章
北海道大学大学院工学研究院	教授	足立 智
北海道大学大学院工学研究院	教授	長谷川靖哉
宮崎大学産学・地域連携センター	准教授	甲藤正人
山梨大学大学院総合研究部	教授	張本鉄雄
山梨大学大学院総合研究部	准教授	宇野和行
立命館大学情報理工学部	教授	陳 延偉
立命館大学総合科学技術研究機構	客員教授	七田芳則
量子科学技術研究開発機構量子技術基盤研究部門関西光量子科学研究所	プロジェクトリーダー	山川考一
量子科学技術研究開発機構量子技術基盤研究部門関西光量子科学研究所	研究副主幹	佐々木明
量子科学技術研究開発機構量子技術基盤研究部門関西光量子科学研究所	主幹研究員	長谷川登
量子科学技術研究開発機構量子技術基盤研究部門関西光量子科学研究所	グループリーダー	錦野将元
量子科学技術研究開発機構量子技術基盤研究部門関西光量子科学研究所	室長	近藤修司
量子科学技術研究開発機構量子技術基盤研究部門関西光量子科学研究所	主幹技術員	岡田 大

評 議 員
理 事・監 事
賛 助 会 員

評 議 員

(敬称略)

浅原 潤	関西電力株式会社 原子燃料サイクル室 原子燃料サイクル部長
尾崎雅則	大阪大学 理事・副学長
川嶋利幸	浜松ホトニクス株式会社 中央研究所企画部 部長
神門正城	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所 所長・推進室長
西沢昭則	三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 所長
藤岡直人	一般財団法人電力中央研究所 業務執行理事
松下義尚	一般財団法人大阪科学技術センター 専務理事
宮本修治	兵庫県立大学 名誉教授
山田裕之	富士電機株式会社 インダストリー事業本部 原子力・放射線事業部長 兼 事業戦略室長

理 事・監 事

(敬称略)

理事長	栗野 理	関西電力株式会社 執行役常務
理 事	井澤靖和	公益財団法人レーザー技術総合研究所 所長・大阪大学 名誉教授
	梅林 徹	公益財団法人レーザー技術総合研究所 常務理事
	上原拓也	東芝エネルギーシステムズ株式会社 エネルギーシステム技術開発センター 機械技術開発部エキスパート
	大原弘樹	富士電機株式会社 パワエレ営業本部関西支社 営業第三部担当部長
	北川敬明	三菱重工業株式会社 原子力セグメント 原子力技術部長
	串原智博	三菱電機株式会社 関西支社 発電・原子力部長
	兒玉了祐	大阪大学レーザー科学研究所 所長
	高村幸宏	中部電力株式会社 技術開発本部 企画部長
	田畑太嗣	日本電気株式会社 文教・科学インテグレーション統括部 第二営業グループ長
	藤田雅之	公益財団レーザー技術総合研究所 副所長
	山下 圭	東京電力ホールディングス株式会社 技術戦略ユニット技術統括室長
監 事	中島信昭	大阪公立大学大学院 客員教授
	日根野健	日根野公認会計士事務所 公認会計士
	吉村 隆	株式会社三井住友銀行 執行役員 大阪本店営業第二部長

(令和7年7月現在)

賛 助 会 員

(50音順)

会社・団体名	
一般財団法人大阪科学技術センター	一般財団法人電力中央研究所
株式会社オカモトオプティクス	東芝エネルギーシステムズ株式会社
株式会社片岡製作所	TOWAレーザーフロント株式会社
一般財団法人関西情報センター	日本電気株式会社
関西電力株式会社	浜松ホトニクス株式会社
株式会社KANSOテクノス	一般財団法人光産業技術振興協会
関電不動産開発株式会社	株式会社日立製作所
関電プラント株式会社	富士電機株式会社
株式会社きんでん	株式会社三井住友銀行
光伸光学工業株式会社	三菱重工業株式会社
株式会社島津製作所	三菱電機株式会社
清水建設株式会社	一般社団法人レーザー学会
株式会社ダイヘン	
	合計25社

ILT2025 年報

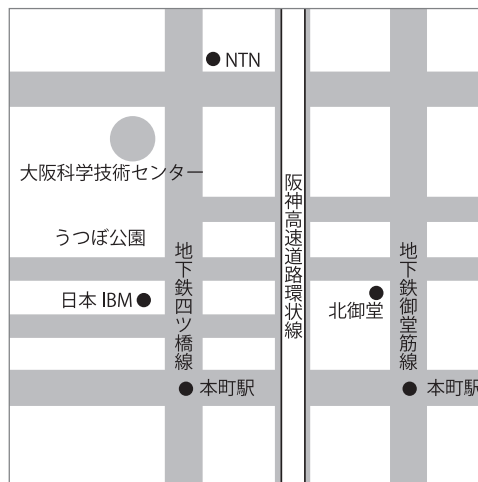
2025 年 7 月 発行

公益財団法人 レーザー技術総合研究所

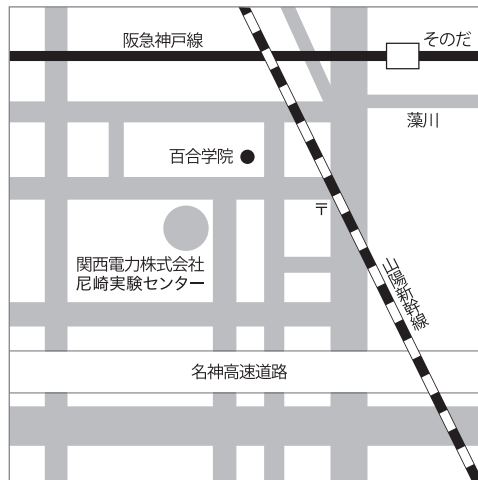
〒 550-0004 大阪市西区靱本町 1 丁目 8 番 4 号
大阪科学技術センタービル 4 F

TEL (06) 6443-6311 (代)

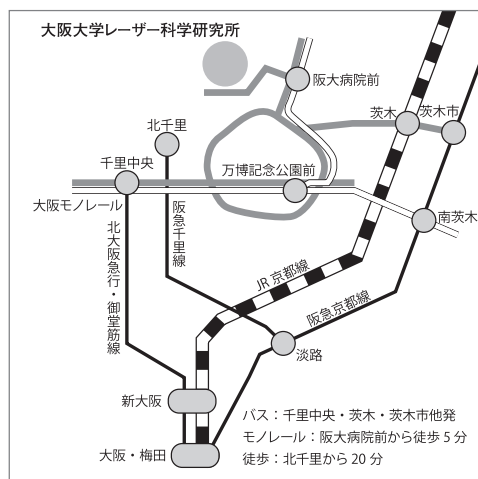
公益財団法人 レーザー技術総合研究所



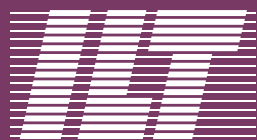
総務部／ 大阪市西区靱本町1丁目8番4号 〒550-0004
大阪科学技術センタービル4F
TEL.06-6443-6311 (代)
FAX.06-6443-6313



研究部／ 尼崎市若王寺3丁目11番20号 〒661-0974
関西電力(株) 尼崎実験センター
TEL.06-6492-7613
FAX.06-6492-5641



共同研究先／ 吹田市山田丘2番6号 〒565-0871
大阪大学レーザー科学研究所
TEL.06-6878-1264
FAX.06-6878-1568



Institute for Laser Technology