

ILT-APR Number 37
Issued: July 2026
ISSN 1340-6167

ILT2026年報

Annual Progress Report

2025-2026

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年の創設以来、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。この間、長年に亘り、関係省庁、産業界、ならびに大学、研究機関の皆様方から、多大なご指導、ご支援を賜りましたこと、心より深く感謝申し上げます。

近年、世界の情勢は混沌として、これまでの世界秩序が大きく変動する可能性が見え始めています。このような環境の下、令和8年3月に閣議決定された第7期科学技術・イノベーション基本計画では、第1期科学技術基本計画の策定以来30年間にわたる実績と課題を整理し、科学技術・イノベーションの力による持続的な経済発展と社会的課題の解決を実現して国際競争力を高め、「豊かで安全・安心な社会」、「多様な well-being にチャレンジし、実現できる社会」を目指すとしながらも、科学技術・イノベーション政策の転換、推進システムの刷新を図ることが重要との認識を示しています。そして、国際競争力と経済安全保障の観点から、11の新興・基盤技術領域と6の国家戦略技術領域（AI・先端ロボット、量子、半導体・通信、バイオ・ヘルスケア、フュージョンエネルギー、宇宙）を設定し、重点的な支援策を講じるとしています。

光・レーザー技術は、上記の基盤技術領域や戦略技術領域を支える必要不可欠な基礎・基盤技術です。私どもでは、基礎研究の成果を産業界に役立てることを目指して、レーザーの高性能化研究や、電力・原子力、土木・建築、環境・宇宙、物質・材料、生命科学などの幅広い分野におけるレーザー応用研究を進めてきました。

レーザー技術開発では、高出力で高品質のレーザービーム実現をめざして、新方式固体レーザーの開発や、多ビーム結合による高出力化と可変形鏡による波面制御技術の開発を進めています。また、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。

レーザーエネルギー分野では、原子炉廃止措置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。令和7年度より宇宙戦略基金の下でレーザーを利用する宇宙デブリの観測・追尾研究を開始しました。

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、レーザー加工の基礎・応用技術開発を進めています。月面基地建設に向けて、真空・低重力を想定した、月面表土のレーザー積層造形技術の開発研究やレーザー加熱によるナノ構造体合成技術の研究を継続し、あわせて、屋外現場でのレーザー利用安全ガイドライン策定を目指して委員会活動を行なってきました。

レーザー計測分野では、レーザー打音法によるインフラ構造物の健全性評価試験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います。前者では、トンネル切羽での落石予知などレーザー打音法の実用化研究や、レーザー誘起ブレイクダウン分光法による塩害評価、橋梁の劣化診断実証試験を進めました。環境計測では、原子炉格納容器からの気相漏洩や大気中での有害ガス漏洩を可視化できる新しい計測技術、海藻などに取り込まれたブルーカーボン量の評価をめざす海水中でのラマンライダー技術の開発に取り組みました。

レーザーバイオ化学分野では、蛋白質や酵素の光機能解明研究と溶液中イオンの光反応研究を進

めています。後者は、放射性廃棄物の選択的要素分離やレアメタル回収への応用をめざしています。

令和7年（2025年）度も、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7年度成果報告書（ILT 2026 年報 37 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。

2026 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

ILT2026 年報 (Annual Progress Report 2025-2026)

目 次

は じ め に

研 究 報 告 書

レーザープロセス研究チーム

月面表土を用いた建設資材作製の課題	1
Aligning coherent beams with high angular precision: A new method for pointing adjustment and control	7

レーザー計測研究チーム

赤外吸収を利用したアンモニアの可視化手法の開発	14
シアリング干渉計を用いた漏えい気体検知技術の開発	18
海洋炭酸系の観測に向けたラマンライダー技術の開発	23

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反応メカニズム	28
--------------------------	----

発表論文リスト	35
事業報告書	41
組 織 図	53
構 成 員 一 覧	54
評 議 員	59
理 事 ・ 監 事	60
賛 助 会 員	61

研 究 報 告 書

月面表土を用いた建設資材作製の課題

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、湊田安浩¹

¹大林組

1. はじめに

2018 年から大林組と協力して月面表土を用いた建材作製の研究開発を行ってきた¹⁻⁶⁾。月面基地建設のための資材を現地で調達することを目的とし、月の表土(実験では模擬砂を使用)だけを材料として、(結合材や添加物等を加えずに)レーザー加熱3Dプリンターによるブロック等の作製を試みている。レーザー加熱3Dプリンターには図1に示す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、それぞれ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・評価を行ってきた。今後は、地上の実験で実証した建材作製手法が月面環境(1/6重力、真空)においても適用可能であるかを検証することが求められる。

本稿では、2025 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。これまで市販のセラミックス基板上に造形を行ってきたが、模擬砂のみを材料として焼結した基板に対してDED法による積層造形を試みた。PBF法による造形試験においては、マシニングセンター内にパウダーベッドを設置し、自動造形を試みた。また、低重力・真空環境下での粉体搬送方法の検討を行った。

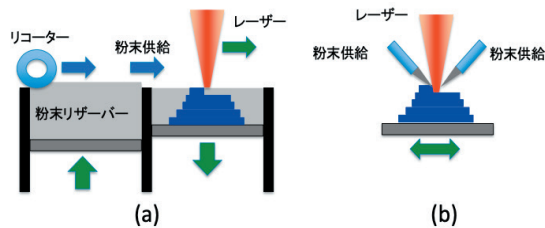


図1 2種類のレーザー加熱積層造形法；

(a) 粉末床溶融結合 (PBF) 法、

(b) 指向性エネルギー堆積 (DED) 法

2. 模擬砂を用いた基板の作製と積層造形

これまで市販のセラミックス基板上にDED法での造形を行ってきたが、特定のセラミック基板を月に持ち込むことは非現実的である。そこで、模擬砂のみを材料として焼結した基板に対して積層造形を試みた。図2に電気炉による模擬砂を用いた焼結基板の作成手順を示す。図2(a)に示す様な黒鉛板(80×80mm)に、深さ5mm、一辺30mmの六角形のザグリを入れたトレイを用意した。次いで、図2(b)に示す様にトレイに模擬砂(FJS-1)を充填した。砂の充填は、加振器で振動を数分間加えた後に同サイズの六角板を手で押しつけ、圧縮して行った。これを、電気炉を用いて焼結すると、図2(c)に示すレゴリス六角板が得られた。昇温時間60分、焼結時間30分、焼結温度1,100~1,130°Cで焼結されたレゴリス六角板は、厚みとして3~4.5mmであった。

このレゴリス基板上へ滋賀県工業技術総合センターに設置されている金属積層造形装置(LAMDA200)を用いて積層造形を試みた。まず、試験的に従来のセラミックス基板上に造形を行った。レーザー照射条件やCAD/CAMデータを確認した後に、セラミックス六角板上に積層造形を試みた結果を図3(a)に示す。次いで、模擬砂(FJS-1⁷⁾)を電気炉で焼結して作成したレゴリス六角板上に積層造形を行った。造形サンプルを図3(b)に示す。セラミックス基板上と同様の造形物が得られるこ

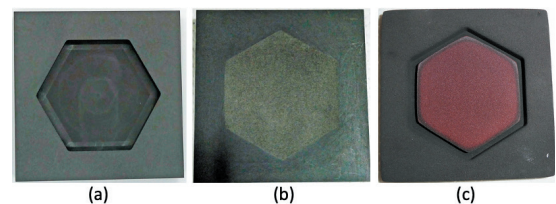


図2 電気炉による模擬砂 (FJS-1) を用いた基板

の作成；(a) 黒鉛のトレイ、(b) 模擬砂を充填した

後、(c) 電気炉での1130°C焼結後。

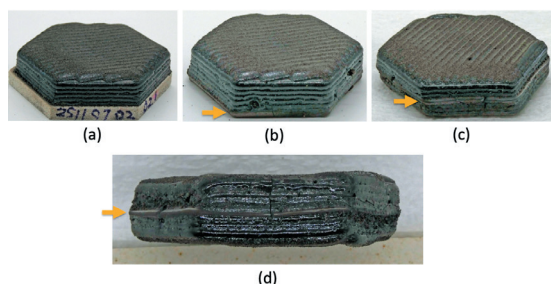


図3 六角板の上下に積層した造形物；従来のセラミックス基板上の造形物 (a)、焼結したレゴリス基板上的造形物 (b)、レゴリス基板の上下に積層した造形物の (c) 全体写真、(d) 側面。矢印はレゴリス基板の位置を示す。

とが確認できた。

さらに、レゴリス六角板の上下に 5 mm ずつ積層造形を試みた。図 3 (c), (d) にレゴリス六角板の上下に積層した造形物の (c) 全体写真、(d) 側面を示す。図 3 (d) の側面写真からは、数ミリ厚の基板さえあれば積層造形が両面で可能であることが分かる。図 4 に月面のイメージ図を背景に六角形の積層造形物を敷き並べた様子を示す。

3 マシニングセンタを用いた PBF 法自動造形

マシニングセンタは自動工具交換装置 (ATC) を備え、切削や穴あけなど様々な加工に対応できる数値制御された汎用性の高い工作機械である。マシニングセンタの主軸に PBF 法で砂を敷き均す治具 (リコーターまたはヘラ) と DED 法の集光ヘッドを工具とみなして自動で

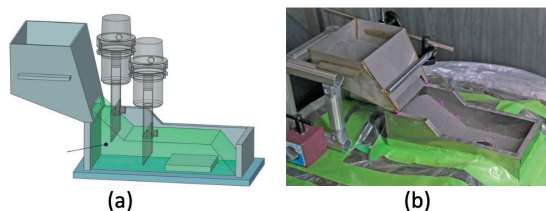


図5 ホッパー (粉体貯留部) 付きパウダーベッド；(a) リコーターが動作する状態での CAD イメージ、(b) マシニングセンタ内に設置し模擬砂を装填した状態。

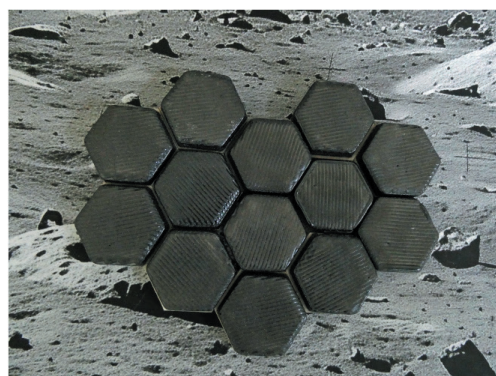


図4 六角形の積層造形物の敷き並べた様子。

交換・取り付けることが可能であり、任意の動きをプログラム制御できる。図 5 に、新たに作製したホッパー (粉体貯留部) 付きパウダーベッドを示す。図 5 (a) はリコーターが動作する状態での CAD イメージ、(b) はマシニングセンタ内に設置し模擬砂を装填した状態である。ホッパー内に模擬砂を貯留することができるために、砂の敷き均しとレーザー照射を連続的に行えるようにした。

図 6 にマシニングセンタ内で (a) リコーターと (b) 集光ヘッドが主軸に取り付けられている様子を示す。リコーターと集光ヘッドは自動で交換され、決められた位置に移動するようにプログラムされている。当該マシニングセンタでは工具交換の最大サイズが 160 mm^φ に制限されており、敷き均し用のヘラを小型化することで自動連続交換が可能となった。図 7 に、(a) リコーターを

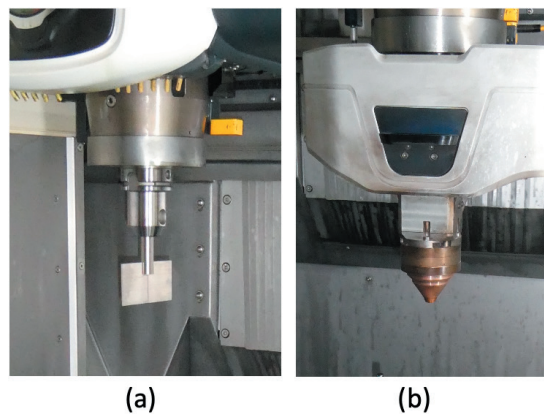


図6 マシニングセンタ内で (a) リコーター、(b) 集光ヘッドが主軸に取り付けられている様子。

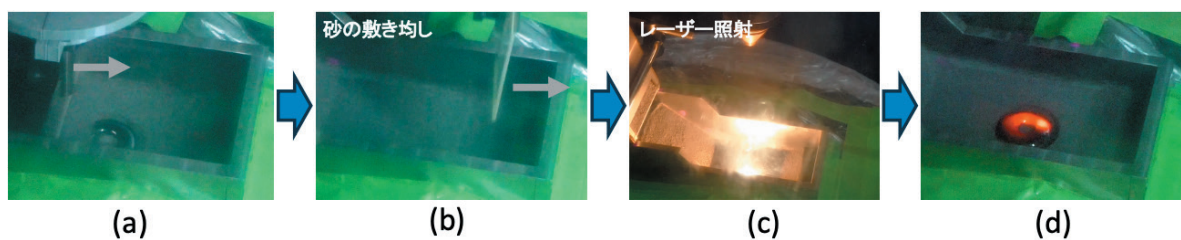


図7 マシニングセンタ内での積層造形；(a) リコーターを動作させ、(b) 砂を敷き均し、(c) レーザーを照射することで、(d) 1層分の積層ができる。

動作させ、(b) 砂を敷き均し、(c) レーザーを照射することで、(d) 1層分の積層ができる様子を示す。レーザーパワー1000W、集光径18mm、掃引速度170mm/min、照射フルーエンス20J/mm²、敷き砂厚2.5mmで、150mm角のセラミックス板を基板として円筒形状の積層実験を行った。

図8にDED法とPBF法による円筒形状の造形物の比較を示す。図8(a)はDED法で20層、図8(b)はPBF法で11層積層した。レーザー照射径がDED法では4mm、PBF法では18mmと大きく異なるために単純な比較はできないが、DED法では単層の積み重ねが繰り返されて大型の安定した造形が実現している。PBF法では、9層目までは円環形状が保たれていたが、10層目で造形時にメルトプールへの砂の吸い込みが発生し、円掃引の終了部で砂が不足して円環が途切れてしまった。さらに11層目へと進めても、円環の途切れた部分では造形物がつながらずに積層が進んでしまった。層数を重ねて行くにつれて造形物が砂に埋もれていき、熱的なバランスが変化し、単層の積み重ねとは異なった条件で積層が進んだものと推測される。

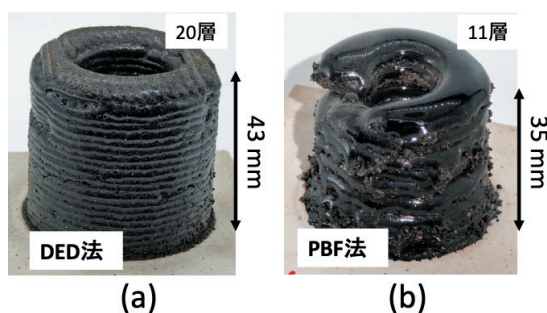


図8 DED法とPBF法による円筒形状の造形物の比較：(a) DED法、(b) PBF法

4. 遠心力を利用した真空中での粉体搬送の検討

月面では真空且つ重力が地上の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求められる。真空且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。

粉体の吐出機構として(株)ヤマシタワークスが開発した加工装置エアラップ®を参考とした。エアラップ®は砥粒を噴射して表面を鏡面研磨する装置であるが、

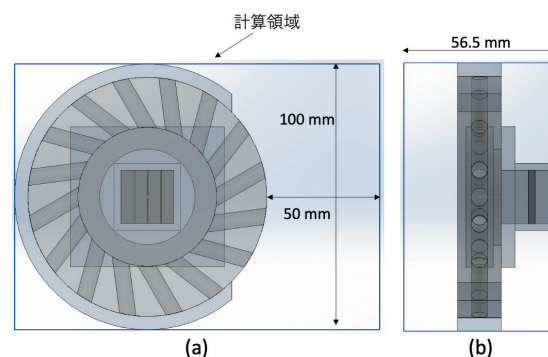


図9 昨年度解析したモデルの1/2サイズモデル；
(a) 正面図、(b) 側面図。

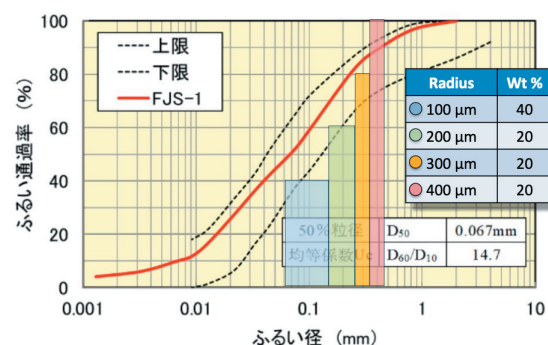


図10 実験で用いた模擬砂FJS-1の粒度分布と数値解析の簡単化のために4群に分けた粒度分布。

表 1 シミュレーションで用いたパラメータ

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

対象物に対してピンポイントで粉体を吹き付けることができる。このメカニズムをDED法の粉体搬送に利用できるかを検討するためにシミュレーションを行い、低重力・真空の環境下でも十分な量の粉体を直線的に供給できることを確認してきた。今回、小型化の可能性を調べるために昨年度解析したモデルの1/2サイズでのシミュレーションを行った。図9に解析モデルを示す。モデルは3D CAD ソフトウェア SOLIDWORKS で作成し、粉体が搬送される様子は離散要素法に基づく粉体シミュレーションと流体シミュレーションの両方が可能な

統合型シミュレーションソフトウェア iGRAF を用いて計算を行った。粉体の粒度分布は簡単化のために粒径毎に4群に分けて供給することとした。図10に実験で用いた模擬砂 FJS-1 の粒度分布⁷⁾と数値解析の簡単化のために4群に分けた粒度分布を示す。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。

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。これらの値は昨年度まで行ってきた粉体搬

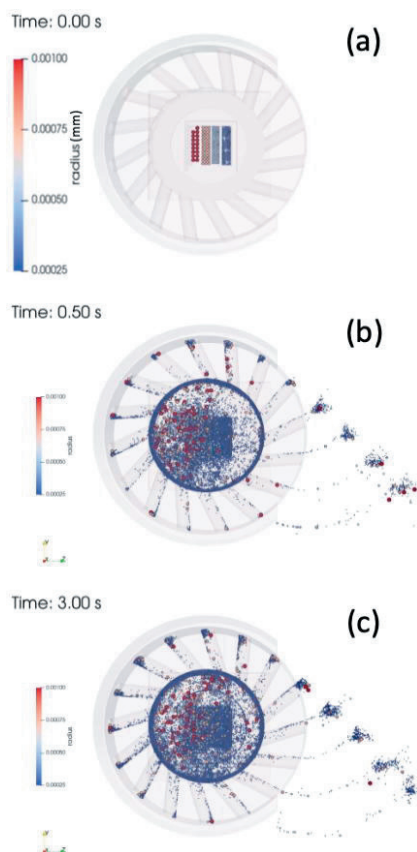


図11 (a)t=0、(b)t=0.25、(c)t=0.5、(d)t=1.0、
(e)t=2.0、(f)t=3.0 秒における粉体の分布。

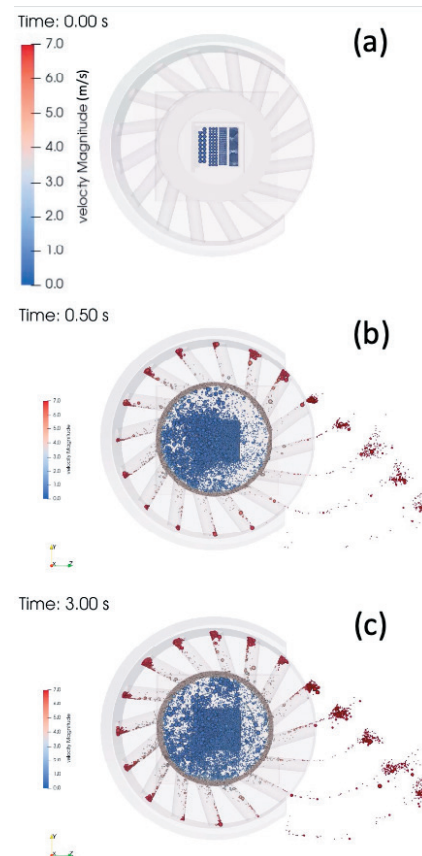


図12 (a)t=0、(b)t=0.25、(c)t=0.5、(d)t=1.0、
(e)t=2.0、(f)t=3.0 秒における粉体の速度。

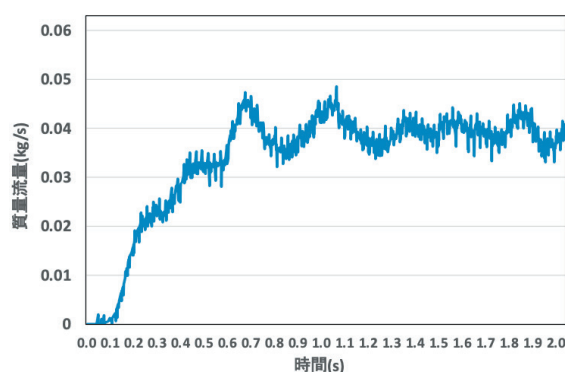


図 13 質量流量の時間変化

送の解析に用いた数値と同じである。

図 11 に、(a) $t=0$ 、(b) $t=0.5$ 、(c) $t=3.0$ 秒における粉体の分布、図 12 に、(a) $t=0$ 、(b) $t=0.5$ 、(c) $t=3.0$ 秒における粉体の速度を示す。円板内部から供給された粉体が回転しているディスクから真っ直ぐに噴出していることが確認できる。

図 13 に、粉体吐出の質量流量の時間変化を示す。回転

開始から 1 秒後には約 40 g/s の吐出が実現している。

図 14 と図 15 は搬送体（回転ディスク）のサイズの違いを示すもので、図 14 に粉体の分布、図 15 に粉体の速度を示す。回転ディスクの直径は両図において (a) 昨年度解析したサイズ 180 mm、(b) 今年度解析した 1/2 サイズ 90 mm で、回転数は両者共に 1500 rpm である。図 14 において粉体の吐出レートは、(a) で約 160 g/s、(b) で約 40 g/s が得られている。図 15 において速度カラーバーの最大値は (a) 14 m/s、(b) 7 m/s である。回転ディスクサイズ 1/2 で吐出速度 1/2、流量 1/4 とサイズに比例した値となっている。

5. まとめ

これまでは市販のセラミックス基板上に DED 積層造形を行ってきたが、模擬砂を（今回は電気炉で）焼結して作製した基板に代えて DED 積層造形を試みた。数ミリ厚の基板さえあれば積層造形が両面で可能であるこ

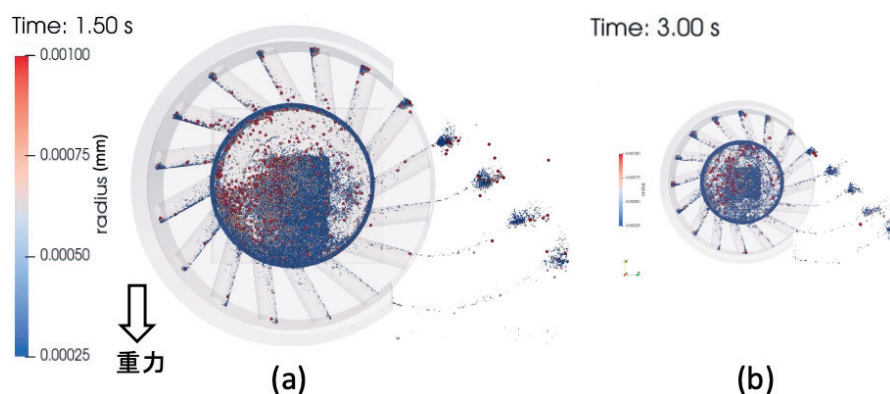


図 14 サイズが異なる解析モデルの比較；粉体の分布。円板の直径は、(a)180 mm、(b) 90 mm.

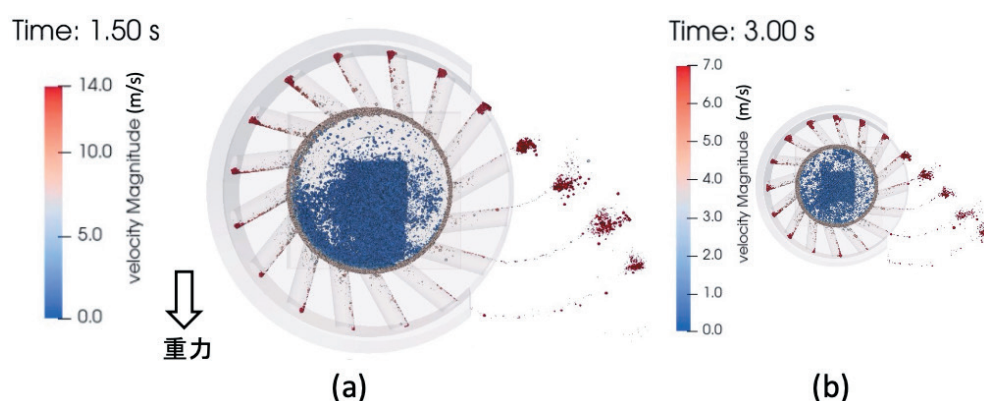


図 15 サイズが異なる解析モデルの比較；粉体の速度。円板の直径は、(a)180 mm、(b) 90 mm.

とが実験的に明らかとなった。

マシニングセンタ内に模擬砂を貯留するホッパーを設置し、リコーターとレーザー集光ヘッドを自動で交換することにより積層の連続化を試みた。PBF 積層造形の機械的な連続自動化を検証することに成功したが、積層を積み重ねるにつれてパウダーベッド内で熱の蓄積が進んだことによる造形条件の変化が見られた。

DED 法では単層の積み重ねが繰り返されて大型の安定した造形が実現しており、PBF 法では造形物が逐々に埋まっていくことによる熱的效果の変化を考慮して積層を進めていく必要があると思われる。

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。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の解析を進めてきたが、今年度は小型化を念頭にサイズによる粉体吐出の変化を調べた。昨年度の解析モデルの 1/2 サイズで同様の数値解析を行い、回転ディスクサイズ 1/2 で、吐出速度 1/2、吐出流量 1/4 とサイズ、面積に比例した値が得られた。

今後は、粉体供給量の限界の見極めなど月面で実用化する際に懸念される課題の検討や、月面でのメンテナンスフリーを目指した円板駆動機構の簡素化、粉体供給部のユニット化の検討が求められる。

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 AcroEdge (株)、(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).
- 6) 藤田雅之 他, 「月面環境でのレーザー加熱 3D プリンティング」、第 69 回宇宙科学技術連合講演会、ア札幌コンベンションセンター、2A04 (2025).
- 7) 田島孝敏 他, 「月資源を用いた拠点基地建設材料の製造に関する研究」、大林組技術研究所報 No. 87 (2023).

Aligning coherent beams with high angular precision: A new method for pointing adjustment and control

Laser Process Research Team

Haik Chosrowjan, Seiji Taniguchi, and Noriaki Miyanaga

1. Introduction

The power scaling of single-laser systems has faced several fundamental limitations, including thermal degradation, mechanical perturbations, and material damage. In general, lasers cannot be scaled to higher power while maintaining their beam quality simply by supplying more pump power. Equally, they cannot be focused to an arbitrarily small size. To overcome these limitations and further increase the power, combining the output power of multiple lasers has become the primary approach¹⁾. Among various combining techniques, the coherent beam combining (CBC) of laser amplification channels is one of the most promising approaches, enabling ultra-high-power lasers with near-diffraction-limited beam quality.

To achieve high combining efficiency in the CBC, strict conditions are required for the individual beamlets and the CBC system's overall stability. Some of the CBC efficiency degradation sources are the piston phase error between the individual beams, optical path length difference (coherence mismatch), wavefront distortions, pointing mismatch, etc. Besides, depending on the system architecture, beams' diameter, etc., some conditions may become looser while others may be much stricter. It is beyond the scope of this report to discuss all those degradation sources and their mitigations in detail.

In this report, we will briefly discuss the dependence of CBC efficiency on beam pointing mismatch and present a new method for laser beam pointing adjustment and control. To indicate the severity of pointing mismatch for large-diameter beams, we will also compare CBC cases with small- and large-diameter beams, respectively. As an example, we will show that the pointing mismatch condition becomes looser for beams with ~ 2 mm diameter,

while for ~ 15 mm diameter beams, the pointing mismatch condition becomes very strict.

2. CBC on a diffraction element

Here, we consider a CBC on a diffraction element (50/50 beam splitter (BS)) as schematically illustrated for the 2-beams' case in Fig. 1. Let's first assume that, except for the pointing mismatch, all other CBC degradation sources, including the piston phase error, do not contribute to the overall efficiency degradation; in other words, the system is ideal except for the pointing error.

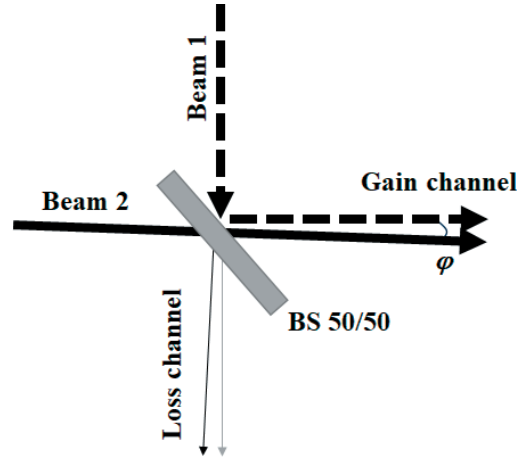


Fig. 1 2-beam CBC scheme on a diffraction element (50/50 BS) with pointing mismatch angle φ .

CBC efficiency (η) calculations for the pointing error mismatch in 2-, 4-, and 8-beam binary-tree geometries have been carried out using Eq. 1 for 50/50 beam splitters and equal-power Gaussian beams of ~ 2 mm and ~ 15 mm diameters ($1/e^2$ definition), respectively²⁾.

$$\eta(N, \sigma) = \frac{1}{N^2} \left(N + N(N-1) \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{(k * D * \sigma)^2}{8}}} \right) \quad (1)$$

Here, N , k , σ , and D are the number of beams, the wavevector ($2\pi/\lambda$), pointing mismatch error rms , and the beam diameter ($1/e^2$), respectively.

CBC efficiency dependence on the pointing mismatch for 2-, 4-, and 8-beams is presented in Fig. 2. For comparison, results of 15 mm (solid lines) and 2 mm (dotted lines) beam diameters are summarized in the same figure.

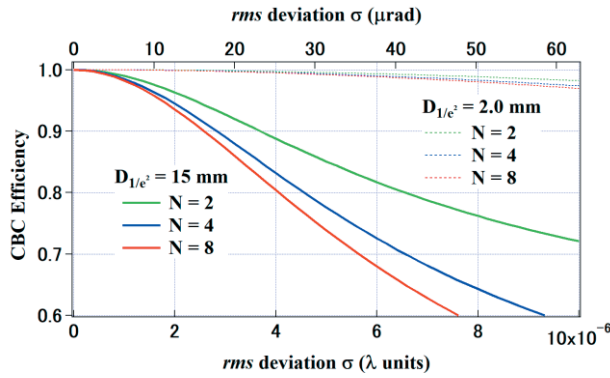


Fig. 2 CBC efficiency degradation versus the pointing mismatch error rms (σ) for $N = 2$ (green), 4 (blue), and 8 (red) beams, respectively. Results of 15 mm (solid lines) and 2 mm (dotted lines) diameter beams are summarized for comparison and discussion purposes.

In Fig. 2, it is seen that the pointing error related degradation of CBC efficiency is severe for the case of a larger 15 mm beam diameter compared with the case of 2 mm diameter beams. For example, at ~ 25 μrad pointing rms error, the CBC efficiency for a system with 8 beamlets will drop by almost 20 %.

In high-power applications, where the laser beams have larger diameters, the uncorrelated pointing errors in each beam path due to vibrations, cooling, etc., should preferably be kept within < 10 μrad ($\sim \lambda/10^6$). However, minimizing the pointing error below < 10 μrad by the system alignment constitutes a challenge by itself. Firstly, the angular resolutions of the mechanical screws on mirrors and beam splitters hardly achieve such a resolution. For

that purpose, piezo-actuator-driven mirrors and beamsplitters could be required. Secondly, the conventional adjustment method, as discussed in the next section, will remain a problem even when piezo-driven mirrors are used.

3. Pointing- and piston phase errors

Let's now consider a 2-beam CBC case with a pointing mismatch (Fig. 1) together with a piston mismatch. For simplicity, only the case when the pointing deviation occurs in the x (tilt) direction (Eq. 2) is considered.

$$I(x, y, \varphi, \Delta\theta) = 2e^{-\frac{8(x^2+y^2)}{D^2}} \left(1 + \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} * \varphi * x + \Delta\theta \right] \right) \quad (2)$$

Here, I is the intensity distribution of the combined beam, x and y are the lateral coordinates, λ is the wavelength, D is the beam diameter ($1/e^2$), φ is the pointing mismatch angle, and $\Delta\theta$ is the piston phase mismatch between the two beams, respectively. All calculations below were performed using the PTC Mathcad Prime 3.0 software.

In Fig. 3 (a), calculated intensity distribution images (“observed” in the gain channel; Fig. 1) of the perfectly phase-combined ($\Delta\theta = 0$) beams corresponding to 200 μrad , 100 μrad , 50 μrad , 25 μrad , 10 μrad , and 0 μrad (perfect pointing case) pointing mismatch angles φ are presented. The inset numbers in each image show the calculated CBC efficiencies (central-lobe power ratios relative to the total power) for each pointing-mismatch case. In Fig. 3 (b), horizontal profiles of the intensity distributions corresponding to the Fig. 3 (a) cases are also plotted. As can be seen, at larger pointing deviation angles (above 50 μrad), the beam shape in the intensity distribution pattern changes. However, below 50 μrad , the intensity pattern remains nearly unchanged; the X-profiles change only slightly in width, and recognition of the pointing mismatch will constitute an experimental challenge. The differences between the intensity profiles become indistinguishable as

the pointing-angle mismatch φ reduces. In real situations, when environmental noise, intensity fluctuations, etc., adversely affect CBC images and profiles, measurements, and control of the pointing angles for large-diameter beams will be even more challenging.

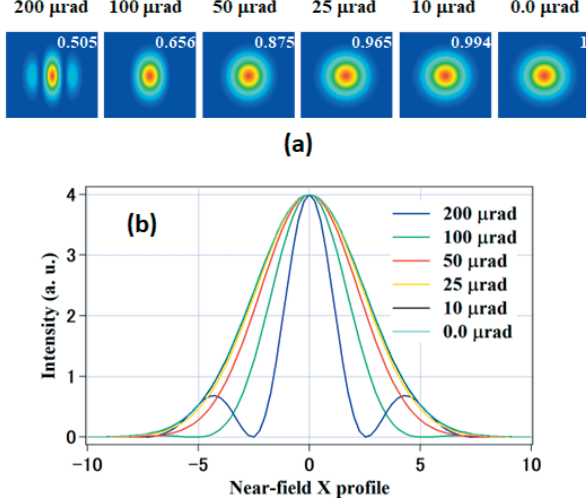


Fig. 3 (a) Calculated near-field intensity distribution images (**gain channel**; Fig. 1) of two perfectly phase-combined ($\Delta\theta = 0$) beams corresponding to 200 μrad , 100 μrad , 50 μrad , 25 μrad , 10 μrad , and 0 μrad pointing angles φ , the inset numbers in each image show calculated CBC efficiencies (central-lobe power ratios relative to the total power) for each pointing-mismatch case. (b) Corresponding X-profiles of the intensity distributions.

However, as discussed above, to achieve high CBC efficiency for large-diameter beams, one needs to keep the pointing mismatch angle below ~ 10 μrad . To overcome this problem, we introduced a *new method based on observation of the combining beams in the loss channel* of the diffraction element (Fig. 1).

Let's now evaluate the calculated near-field intensity distribution images “observed” in the loss channel of Fig. 1 for the same case corresponding to $\Delta\theta = 0$ (perfect phase locked case). The results are summarized in Fig. 4 (a) and

(b). The images in Fig. 4 (a) are normalized for easy recognition of the intensity distribution patterns, while in Fig. 4 (b), the horizontal X-profiles of the intensity distributions are presented in absolute values.

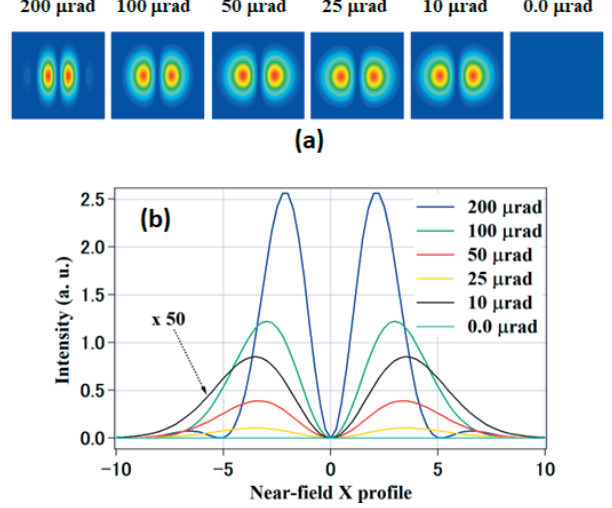


Fig. 4 (a) Calculated (normalized) near-field intensity distribution images (**loss channel**; Fig. 1) of two perfectly phase-combined ($\Delta\theta = 0$) beams corresponding to 200 μrad , 100 μrad , 50 μrad , 25 μrad , 10 μrad , and 0 μrad pointing mismatch angles φ . (b) Corresponding X-profiles of the intensity distributions.

By comparing the intensity distribution profiles in gain and loss channels (Fig. 3 (b) and Fig. 4 (b), respectively), it is clearly seen that the changes in profile shapes and peak intensities at small pointing mismatch angles are drastic in the loss channel in comparison to the gain channel observation.

The case for the pointing mismatch angle $\varphi = 0$ (perfect pointing) deserves special attention. From Fig. 3 (a) and Fig. 3 (b), one can see that in the gain channel, this would correspond to a Gaussian intensity distribution with 100 % CBC efficiency, while in the loss channel, there should be no leaking light at all. In most CBC implementations,

however, perfect piston phase matching ($\Delta\theta = 0$) is not achieved, and some uncompensated residual phase-mismatch fraction remains. To evaluate this more realistic situation, we performed calculations for the case where the piston phase error is set to $\lambda/50$ ($\pi/25$ rad).

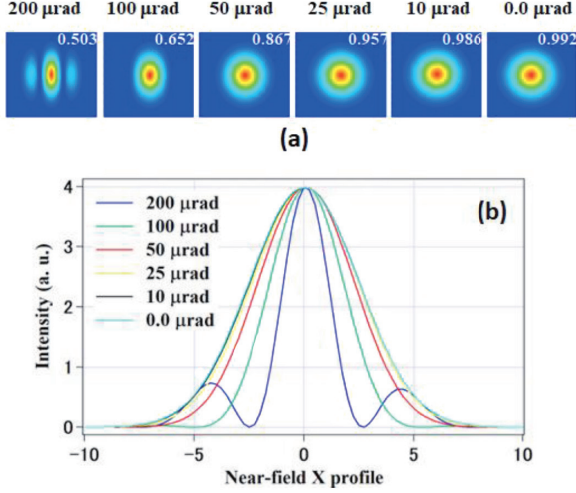


Fig. 5 **(a)** Calculated intensity distribution images (**gain channel**; Fig. 1) of two imperfectly phase-combined ($\Delta\theta = \pi/25$) beams corresponding to 200 μrad , 100 μrad , 50 μrad , 25 μrad , 10 μrad , and 0 μrad pointing angles φ , the inset numbers in each image show calculated CBC efficiencies (central-lobe power ratios relative to the total power) for each pointing-mismatch case. **(b)** Corresponding X-profiles of the intensity distributions.

In Fig. 5 (a), calculated near-field intensity distribution images (“observed” in the gain channel; Fig. 1) of the imperfect phase-combined ($\Delta\theta = \pi/25$) beams corresponding to 200 μrad , 100 μrad , 50 μrad , 25 μrad , 10 μrad , and 0 μrad (perfect pointing case) pointing mismatch angles φ are presented. The inset numbers in each image show calculated CBC efficiencies (central-lobe power ratio relative to the total power) for each pointing-mismatch case. In Fig. 5 (b), horizontal profiles of the intensity distributions corresponding to Fig. 5 (a) are also plotted.

As can be seen, the overall dynamics in the gain channel observation does not change in comparison with Fig. 3. The only difference is the fractional decrease in the CBC efficiencies.

On the other hand, calculated intensity distribution images

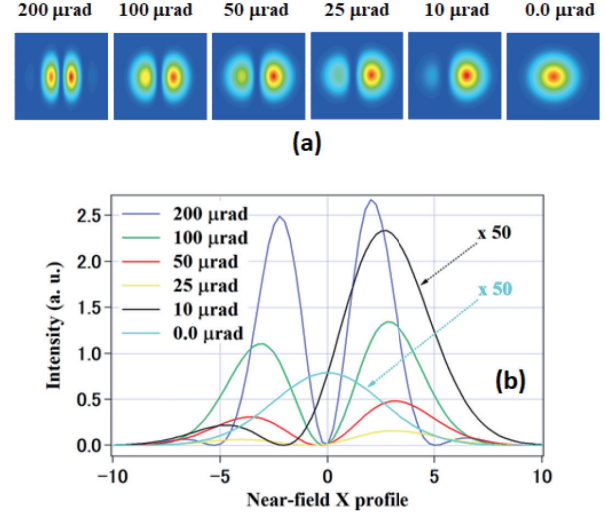


Fig. 6 **(a)** Calculated (normalized) intensity distribution images (**loss channel**; Fig. 1) of two imperfectly phase-combined ($\Delta\theta = \pi/25$) beams corresponding to 200 μrad , 100 μrad , 50 μrad , 25 μrad , 10 μrad , and 0 μrad pointing mismatch angles φ . **(b)** Corresponding X-profiles of the intensity distributions.

“observed” in the loss channel of Fig. 1 for the imperfectly phase-combined ($\Delta\theta = \pi/25$) beams bear two distinct features: (1) the images are asymmetric; (2) even at perfect pointing, the loss channel will leak light with a Gaussian distribution. Using these features, one can minimize and control the pointing-mismatch error in the CBC systems.

Finally, as schematically illustrated in Fig. 7, observing the gain channel image of the CBC on a diffractive optical element (beam splitter) does not allow identification of the spatial orientation of the incident surface created by two beams with a slight pointing-mismatch error. However, observing the loss-channel image of the CBC can identify the orientation of the incident surface and hence predict the

magnitude and adjustment directions of the tip/tilt angles.

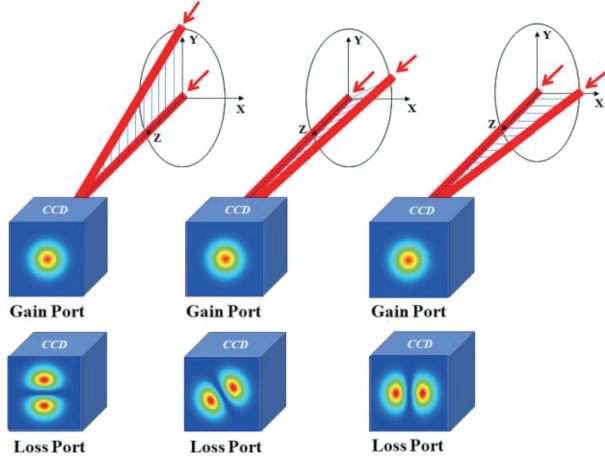


Fig. 7 Schematic illustration of the gain- and loss-channel images of the CBC on a diffractive optical element (beam splitter). Identifying the spatial orientation of the incident surface created by two incident beams with a slight pointing-mismatch error is possible only by observing the loss-channel image of the CBC system.

In summary, by observing the loss-channel intensity images and profiles, one can fine-adjust the pointing tip/tilt angles to reach the highest possible CBC efficiency.

4. Experimental verification of the new method for pointing adjustment and control

In this section, the experimental verification of the new method for the pointing adjustment and control is described.

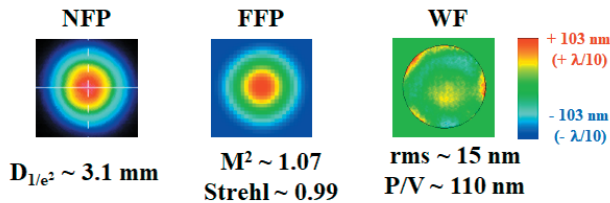


Fig. 8 The near-field (NFP), far-field (FFP) patterns, beam diameter D_{1/e^2} , beam quality parameters M^2 and the Strehl ratio, as well as the wavefront (WF) quality (peak_to_valley (P/V) and *rms*) of the used laser.

As a light source, a fiber-coupled laser diode (LD) delivering 200 mW single-mode CW beam at 1030 nm was used (Fig. 8).

The dynamic pointing of the laser beam was also measured to be about $3.7 \mu\text{rad}$ - sufficient for conducting high accuracy CBC experiments and evaluation of the new method. The experimental apparatus is shown in Fig. 9. Briefly, the laser beam is split into two perpendicularly traveling beamlets by the first beam splitter (BS). One beamlet travels to the second BS while another one reflects from a mirror, then a PA (piezo-actuator) driven mirror, and crosses with the first beamlet at ~ 90 degrees on the second BS. Because the two beamlets are coherent, an interference occurs at the BS surface. Essentially, it is a Mach-Zehnder interferometer with one moving arm. If the phase difference between the beamlets is locked at ~ 0 rad, the beamlets will constructively interfere in the gain channel towards the power meter (PM), while the residual light will leak from the loss port towards the beam profiler.

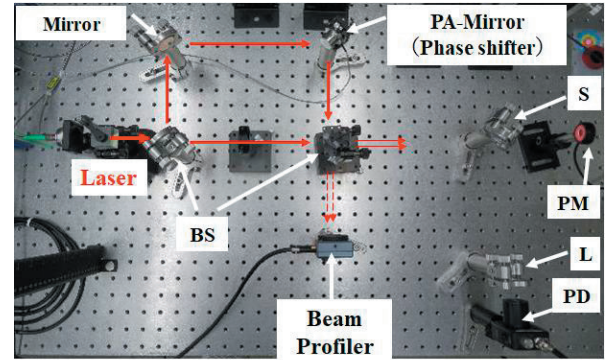


Fig. 9 The proof of the principle experimental setup of the new method for pointing adjustment and control verification. BS – beamsplitter, PA – piezo-actuator, S – sampler, PM – power meter, L – lens, and PD – photodiode.

The phase-locking feedback signal is picked up by a sampler (S) and focused by a lens (L) on a photodiode (PD). The PD signal drives the PA-mirror (phase shifter) via an FPGA-based feedback loop. It is worth noting that the pointing angle between two beamlets can be adjusted to

be close to 0, but the conventional method (observing the gain channel) cannot achieve $\sim \mu\text{rad}$ accuracy. However, the goal of minimizing the angle can be reached by observing the intensity distribution pattern in the loss channel. Some representative data measured by a beam profiler at the loss port are presented in Fig. 10.

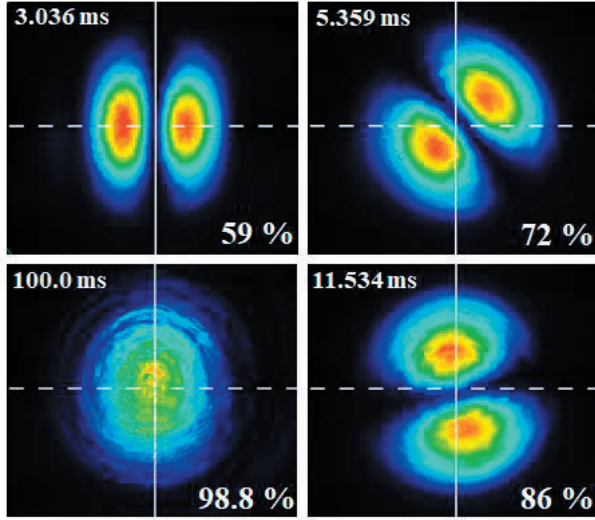


Fig. 10 2-beam CBC intensity distribution images/patterns observed in the loss channel with decreasing pointing-mismatch angle ϕ (clockwise from the top-left image). The bottom-right numbers in each frame (from $\sim 59\%$ to $\sim 98.8\%$) correspond to the CBC power efficiency for each pointing-mismatch case measured by the PM in the gain channel (Fig. 9). The top-left numbers in each frame indicate the accumulation time required for obtaining the corresponding image in the loss channel.

The images presented in Fig. 10 are measured for the following conditions: beam diameter $D_{1/e^2} \sim 3.1$ mm, wavelength $\lambda = 1030$ nm, piston phase rms deviation $\sim \lambda/120$ ($\sim \pi/60$ rad). The pointing angle ϕ was adjusted manually using the tip/tilt screws on a PA-mirror.

We have also calculated the angular resolution achievable with the described technique in the far-field (FF) using the FFT (fast-Fourier transform) of the

near-field (NF) electric field distribution in the loss channel. The angular resolution is estimated to be about $1/50^{\text{th}}$ of the DLD (diffraction-limited divergence; $\text{DLD} = (4/\pi) \cdot \lambda/D$). The DLD angle for the experimental case described above was calculated to be $\sim 423 \mu\text{rad}$. Hence, an angular resolution of $\text{DLD}/50 \sim 8.5 \mu\text{rad}$ was achieved in the experiments described above.

5. Discussion

In many advanced applications in fundamental physics and quantum mechanics, such as aligning beams in linear particle accelerators³⁾, defining absolute axes in optomechanical systems⁴⁾, in applications of gravitational waves research and space exploration⁵⁾, applications in atomic interferometers⁶⁾, etc., aligning laser beams within a restricted area with ultrahigh angular precision ($\sim \mu\text{rad}$) is challenging. Although we discussed the new technique for beam alignment and control related to CBC, the described principle can be easily adopted to the fields listed above. In the future, one of our goals will be to expand the new technique to tiled-aperture CBC systems, as well as to other areas where ultra-high precision of beam alignment is necessary.

6. Conclusions

In conclusion, we have proposed a new method for pointing adjustment and control of mutually coherent laser beams with high angular precision. We have shown that by observing the near-field image of the leaked light at the dump port of the diffraction optical element (beam splitter), the beam pointing angle can be adjusted with high precision up to several μrad .

A two-beam CBC experiment was conducted to verify the principle. We demonstrated that this method can align the pointing between two beams with ultra-high precision, below $1/50^{\text{th}}$ of the diffraction-limited divergence (DLD) angle. The CBC power efficiency of two beams was measured at $\sim 98.8\%$, demonstrating extremely high

efficiency and stability of the output power.

The proposed method has the following distinct advantages: **(a)** The adjustment accuracy of the method improves inversely proportional to the beam diameter, making it useful for pointing angle adjustment of larger diameter laser beams; **(b)** The optical system is simple and does not require expensive measurement instruments, optical elements, or complex control methods.

References

- 1) T. Y. Fan: "Laser Beam Combining for High-Power, High-Radiance Sources", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **11/3**, 567-577, 2005.
- 2) V. E. Leshchenko: "Coherent Combining Efficiency in Tiled and Filled Aperture Approaches", Opt. Express., **23/12**, 15944-15970, 2015.
- 3) H. D. Betz: "An Asymmetry Method for High Precision Alignment with Laser Light", Appl. Opt. **8/5**, 1007-1013, 1969.
- 4) D. Luo, C. Quang, X. Hao, and X. Liu: "High-Precision Laser Alignment Technique Based on Spiral Phase Plate", Opt. and Lasers in Engineering, **50/7**, 944-949, 2012.
- 5) D. Schütze, V. Müller, and G. Heinzel: "Precision Absolute Measurement and Alignment of Laser Beam Direction and Position", Appl. Opt., **53/28**, 6503-6507, 2014.
- 6) H. Müller, S. Chiow, Q. Long, C. Vo, and S. Chu: "Active sub-Rayleigh Alignment of Parallel or Antiparallel Laser Beams", Opt. Lett., **30/24**, 3323-3325, 2005.

赤外吸収を利用したアンモニアの可視化手法の開発

レーザー計測研究チーム

染川智弘、猪口和彦

1. はじめに

アンモニアは独特な刺激臭で認知度が高いガスである。約8割が肥料として利用され、残りの2割は合成樹脂・繊維の原料などといった工業用に使われている。アンモニアは水素からハーバー・ボッシュ法で製造される。水素は主に天然ガスなどの化石燃料から作成されていたが、最近では再生可能エネルギー由来の電気を使い、水を電気分解してつくる作成法も検討されている。

アンモニアは輸送技術が確立しており、次世代エネルギーとして有望な「水素」のキャリア（輸送媒体）としても期待されている。また、アンモニアは燃焼しても CO_2 を排出しないため、アンモニアをエネルギー源とした発電技術の開発も進められている¹⁾。今後、水素の利用が拡大し、新たなアンモニアサプライチェーンの構築の際には、事故などによるアンモニアガスの漏洩を作業者が安全な距離からモニタリング可能な技術の開発は必須となる。

一般的なアンモニア計測では、低濃度域は電気分解方式を用いた定電位電界式センサー、高濃度域では赤外吸収を利用した赤外線式センサーが用いられる²⁾。両方式ともに、ガスセンサー部にガスを導くポイントセンサーであり、定点に設置して濃度を監視する場合や、検査員によるポータブル装置での巡回監視に用いられている。通常の工場などでは、定点設置型のセンサーで漏洩を検知した後、どの部分から漏洩があるのかをポータブル装置を利用して、チェックする必要がある。

赤外分光技術を利用したガス可視化技術としては、赤外レーザーを用いた吸収計測と、通常大気温度の物体による黒体輻射を光源とした赤外カメラ計測がある³⁾。高指向性の赤外レーザーを利用することで、30 m 程度の遠隔からガスのカラム量の計測が可能である。一方、赤外カメラ計測は、測定対象ガスの吸収波長のみを透過す

る干渉フィルターを利用する。ガスがある領域では、赤外光が吸収され暗く映るため、ガスの位置を断定しているが、赤外域の干渉フィルターは透過波長領域が広く、吸収スペクトルが平均化されてしまうため定量評価は難しく、ガスの有無の測定程度である。

本論文では、アンモニアの吸収波長である波長 1521 nm で発振する分布帰還型(Distributed Feedback: DFB)レーザーと近赤外カメラを利用した新しいガス可視化手法を報告する⁴⁾。カメラ撮影動画内で測定対象とするアンモニアガスが存在する領域だけを点滅させて可視化する手法であり、“Gas blinking” differential absorption (Gablidia) 可視化システムと呼んでいる。Gablidiaは環境温度に左右される黒体輻射を光源として利用しないため、定量評価が容易である。

2. アンモニアの吸収スペクトル

図1にDFBレーザーの吸収率0%(N_2 : 100%)、20、30、40%のアンモニアガスセル透過後の出力変化を示す。DFBレーザーの温度は20℃とし、駆動電流を10から104 mAまで変化させた。吸収率0%の窒素100%の結果に見られるように、DFBレーザーは駆動電流を大きくすると、レーザーの波長は長波長側にシフトし、レーザ

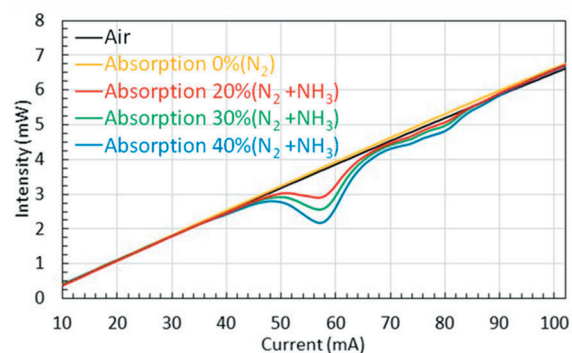


図1 DFBレーザーのアンモニアガスセル（吸収率：0%(N_2 : 100%)、20、30、40%) 透過後の出力変化

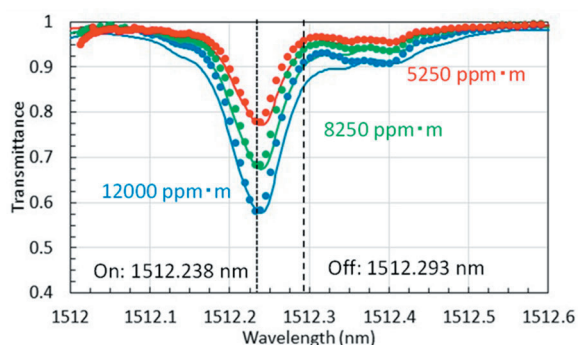


図2 アンモニアの吸収スペクトル

一の出力も大きくなることがわかる。一方で、アンモニアの吸収があるセルの透過後は58 mA と 80 mA にピークを持つ二つの山の吸収ラインが測定されている。

図2に、図1のそれぞれの吸収率のガスセル透過後の信号強度を吸収率 0%の窒素セルの信号強度で割ったアンモニアの吸収スペクトルを示す。実線は HITRAN データベースを用いて計算した計算結果である。この計算結果のスペクトル形状が正しいとして、吸収スペクトルのピーク値を 3 次関数で近似することで駆動電流から波長に変換した。また、この計算結果から吸収率 20、30、40%のガスセルを片道通過した際の濃度は、それぞれ 5350、8250、12000 ppm・m と決定した。

3. Gablidia

図2 で示したように、アンモニアガスは波長 1512.238

nm に吸収ピークを持ち (On 波長)、そのピークから外れた波長 1512.293 nm は弱い吸収 (Off 波長) を示す。この 2 波長の波長掃引が可能な DFB レーザーを、点滅が判断できる 10 Hz 程度の周波数で変調する。これを近赤外カメラで観測すると、レーザーの変調周波数である 10 Hz でガスのある領域でだけ吸収による強度変化が生じ、点滅することになる。

図3にアンモニアの Gablidia 可視化実験配置図を示す。DFB レーザーは On と Off 波長を 10 Hz の矩形波で変調させ、ホログラフィック拡散板を通して 10° の拡散光として 1 m 先の白色のプラスチックスクリーンに照射した。直径 25.4 mm、光路長 15 cm のガスセルはスクリーンの前に設置し、レーザー光を垂直に入射させる配置としている。近赤外カメラの有効画素数は 640×512 ピクセルで、素子ピッチは $15 \mu\text{m}$ 、感度波長域は $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 、最大フレームレートは 90 fps である。カメラはガスセルを斜めから撮影しており、画角は約 21° である。

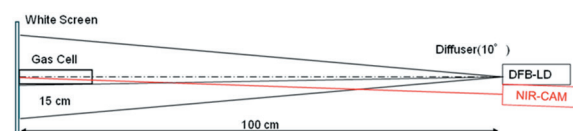


図3 アンモニアの Gablidia 可視化実験配置図

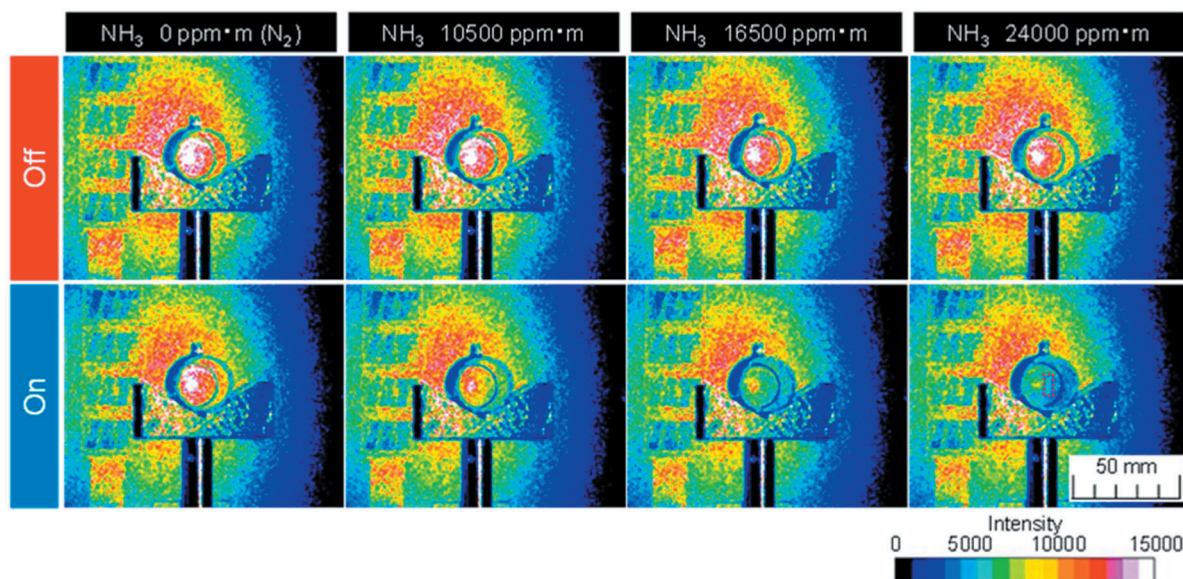


図4 アンモニアの Gablidia 可視化実験での On 波長と Off 波長の撮影画像

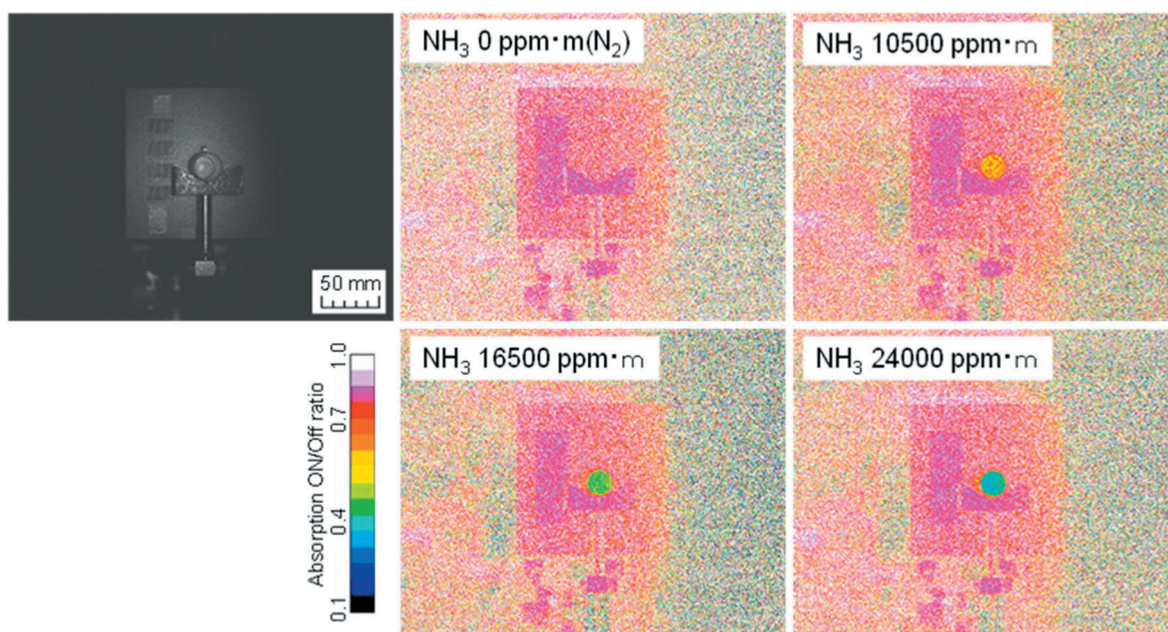


図5 Gablidia の On/Off 波長強度比画像

図4にそれぞれのガスセルを設置した際に得られた On と Off 波長の観察画像を示す。アンモニアガスセルの濃度は図2で求めた値を往復分を考慮して2倍している。図の中央部にV字型のクランプに設置したガスセルが見られ、ガスセルを通過した領域の左側に見られるスポットは、ビームの拡散に利用したホログラフィックディフューザーの0次光である。アンモニア濃度が0である窒素ガスセルでは、ガスセル内の On 波長と Off 波長で強度変化がほぼないのに対して、アンモニアガスセル濃度が大きくなるにつれて、Off 波長でのガスセル内の強度が弱くなる寒色に変化するのが見てとれる。この図で示した On と Off の色の変化が10 Hz で交互に見られるために、アンモニアがあるガスセル内は点滅し、点滅の色の変化は濃度に依存することが確認できる(<https://www.ilt.or.jp/archives/technology/visualization1> で動画を公開している)。

対象ガスを点滅させることによってガスを容易に判断する Gablidia であるが、On 波長、Off 波長の画像は、それぞれ交互に記録されているために、それらを利用した詳細な定量評価も可能である。図5に Gablidia で測定した On、Off 画像をそれぞれ5枚ずつ抽出した平均画像の On/Off 波長強度比画像を示す。On 波長と Off 波長

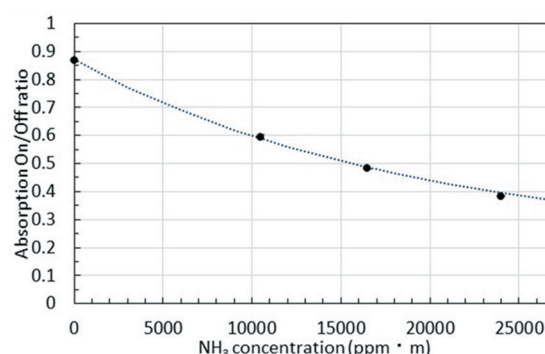


図6 アンモニア濃度と On/Off 強度比の関係

のレーザー強度比がもともと0.87であるために、スクリーンなどはその値を示し、その中のガスセル部分だけ、アンモニアガスセル濃度で色の変化が明瞭に観察できている。

図6には、アンモニア濃度と On/Off 強度比の関係を示している。ガスセルの反射画像の定量評価には、右半分の強度が比較的均一である10.4×5.6 mm (22×12 pixel)の部分を利用し、その平均値から On/Off 強度比を計算した。点線は図2にも示した HITRAN データベースを用いて計算した計算結果から、On 波長と Off 波長の比を計算した線であり、よく実験結果と一致していることがわかる。ここで、簡単のために9000 ppm・m以下のデータを直線で近似し、0 ppm・mの測定誤差σの3σと

の交点を検出下限と定義すると、 $228 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ と求めることができる。

今回の実験では、アンモニアの吸収は弱いですが、DFB レーザーやカメラが比較的手に入りやすい近赤外領域で手法の実証試験を実施したが、中・遠赤外領域にはアンモニアの吸収が大きなラインがある。例えば、遠赤外領域である $8.9 \mu\text{m}$ では、 1512 nm よりも吸収が 20 倍程度大きいので、より低濃度までの可視化が期待できる。

5. まとめ

赤外吸収を利用した新しいガス可視化手法として、測定対象ガスが存在する領域だけを点滅させる Gablidia 可視化システムを開発している。Gablidia は消費電力の少なく小型な半導体レーザーとカメラで構成されるため、可搬性に優れ、カメラ撮影にも特別なアルゴリズムは必要ないことから、対象ガスの広域監視に非常に有効な技術である。また、Gablidia は紫外～赤外領域に吸収を持つ全てのガスへの応用が可能であり、今後、他のガスにも適用可能な可視化技術である。

謝辞

本研究は、防衛装備庁が実施する安全保障技術研究推進制度 JPJ004596 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) M. Aziz, A. T. Wijayanta, and A. B. D. Nandiyanto: *Energies*, 13, 3062 (2020).
- 2) D. Kwak, Y. Lei, and R. Maric: *Talanta*, 204, 713 (2019).
- 3) A. P. Pavikumar, J. Wang, M. McGuire, C. S. Bell, D. Zimmerle, and A. E. Brandt: *Environ. Sci. Technol.* 52, 2368 (2018).
- 4) T. Somekawa, K. Inoguchi, S. Sugimoto, S. Isogai, H. Chosrowjan, S. Taniguchi, and S. Kurahashi: *Opt. Commun.* 614, 133254 (2026).

シアリング干渉計を用いた漏えい気体検知技術の開発

レーザー計測研究チーム

倉橋慎理、染川智弘

1. はじめに

福島第一原子力発電所（1F）廃止措置については長期にわたる継続的な取組が必要とされている。放射性物質により汚染された過酷環境での作業が要求されるため、通常の原子力発電所の廃炉技術とは異なる基礎的・基盤的な研究開発が求められている。

原子炉格納容器（PCV）構成部の一部は事故により閉じ込め機能を喪失していると考えられており、PCV から漏えいした気体が直接環境へ放出されている状況が想定されているが、PCV のどこから、どの程度の漏えいがあるのか現状では把握できていない。PCV 外側近傍の空間線量率が非常に高く人が近寄れないこと、多くの狭隘部が存在し人や機器が入り込みづらいこと、PCV 外壁面が非常に複雑な形状をしており無数の配管が貫通していること、等が原因である。また、1F では水素爆発防止のための窒素封入により PCV 内は微正圧に保たれているため漏洩ガスは窒素で、建屋内の大気（約8割が窒素）中に漏洩した微量の窒素を検出する必要がある、より高感度な検知手法が求められる。

肉眼では見ることでできない流体の流れを可視化する手法¹⁾には、固体壁面に塗布した油などが形成する縞模様から、物体表面に沿う境界層の時間平均流れを調べる壁面トレース法、多数の短い糸（タフト）のなびき具合から流れの状態を調べるタフト法、流れの中に注入した目印となる物質（トレーサ）の動きから流れを調べる注入トレーサ法や、流体の密度変化によって生じた屈折率変化を利用し、流れや温度の可視化を行う光学的可視化法などがある。

本研究では、漏えい状況の把握が困難な原因である高線量、多くの狭隘部、外壁面の複雑な形状に適応するため、遠隔、高分解能、非接触が特長であるレーザー技術を導入する。輝度の高いレーザー光は光学的可視化法との相性がよく、シャドウグラフ法やシュリーレン法など

の光源として用いられることが多い。本稿では、共通光路型であるため外乱に対し頑強であり安定な計測の実現を期待できるシアリング干渉計を用いて、大気中に噴出する窒素ガスの検知、可視化試験を実施した結果を報告する。

2. 実証試験

2.1 シアリング干渉計^{2), 3)}

マイケルソン干渉計などの一般的な干渉計は、物体光と参照光が別々の光路をとるため振動や大気揺らぎなどの外乱の影響を受けやすい。共通光路型の干渉計であるシアリング干渉計では、物体光と自身を横ずれさせた光が干渉するため光路のほとんどが共通となり、外乱に対し頑強であるとされる。

図1にシアリング干渉計を用いた遠隔検査の概要を示す。レーザーのような可干渉性の高い光源からの光を、レンズ等を用いてコリメート光とし検査面へ照射する。照明された検査面を平行平板越しに観測すると、表面と裏面で反射された光が横ずれした状態で伝播してくるので、それを CCD や CMOS などの撮像素子を用い

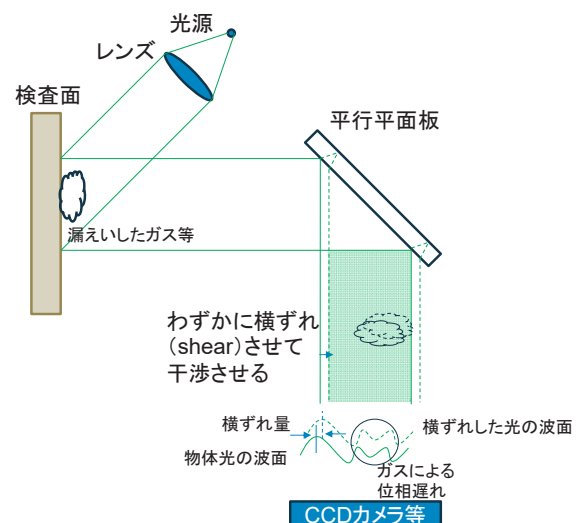


図1. シアリング干渉計を用いた遠隔検査の概要

て記録する。

撮像素子上のある一点に到達する物体光と横ずれした光の位相差は、波面の横ずれ量と平行平板での光路差に起因し、光の波長や入射角、平行平板の屈折率などで決まる。さらに光路の途中にガスなどの屈折率が異なる物質が存在する場合は、屈折率と作用長に応じた位相遅れまたは進みが生じ、物体光と横ずれした光は平行平板によって決まる初期位相差とガスによる位相差をもって干渉する。平行平板表面からの反射光の強度を I_1 、裏面からの反射光の強度を I_2 、ガスによる光路長差を $\Delta(nd)$ (n :それぞれの光路における屈折率、 d :作用長)、平行平板による初期位相差を $\Delta\phi$ とすると、干渉光強度 I は次式で表される。

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \Delta(nd) + \Delta\phi\right) \quad (1)$$

ガスの有無による光路差を干渉光強度の変調として検出することが可能である。

2. 2 窒素ガスの可視化試験

屋外での利用を見据え、装置の簡易化のため市販のシアリング干渉計を組み込んだ可視化光学系を構築し、漏れいガスに見立てたガスボンベから噴霧した窒素ガスを可視化する実験を行った。図2に構築したシステムの光学系を示す。システムはレーザー光を照射し検査面を照明するための照射光学系と、照明された検査面を観測する干渉光学系からなる

照射光学系は、単一周波数連続発振レーザー（coherent 社、Verdi G5、波長 532 nm）、空間フィルタ（ピンホール径 $10\mu\text{m}$ ）、レンズ（ $f=200\text{mm}$ ）、虹彩絞りとミラーで構成される。ミラーM1、M2を用いてレーザー光を空間フィルタへ導光し、高次成分を取り除いてガウシアンビームを生成した。空間フィルタを通過したレーザー光を、レンズと虹彩絞りによってビーム径が直径 25 mm のコリメート光とし、ミラーM3、走査ミラーM4を介して 3 m 先に設置したスクリーン(Thorlabs 社、EDU-VS2) へ照射した。

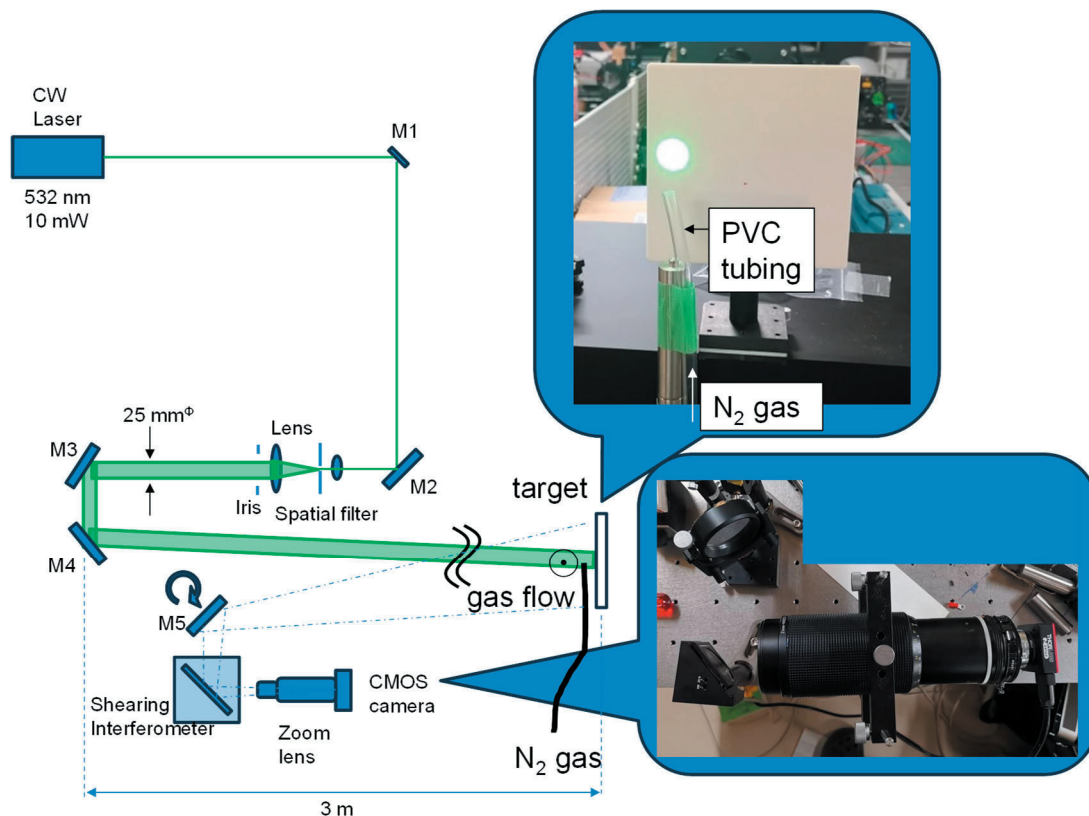


図2. 窒素ガス可視化システムの光学配置

スクリーンの手前約 5 cm の位置に窒素ガスを噴霧した。窒素ガスはガスボンベからレギュレータにより 2 気圧に調整した後、流量計（ヤマト産業株式会社、FS-10-N2）を介し、内径 8 mm のビニールチューブから噴霧した。

干渉光学系は、検査面を観測するためのミラーM5、シアリング干渉計（Thorlabs 社、SI254）、ズームレンズを装着した CMOS カメラ（Thorlabs 社、CS165MU）で構成した。ズームレンズを用いて拡大した検査面を CMOS カメラのセンサー面に結像させる。このとき検査面の画像はシアリング干渉計によって横ずれした干渉画像としてセンサー面で検出される。

窒素ガスを流さない状態で検査面の干渉画像を図 3 に示す。レーザーの出力は 10 mW、CMOS カメラの露光時間は 10 msec である。検査面として用いたスクリーンの表面は粗面であるため、レーザー光を照射すると散乱した光が互いに干渉し、ランダムな斑点模様（スペックル）として現れていることがわかる。図中の破線と一点鎖線の円で囲んだ領域はそれぞれ照明光とシアリング干渉計により横ずれした照明光を示し、これらの重なる領域が干渉領域となる。光の干渉効果により、干渉領域の光強度が高くなっていることが分かる。

次に、窒素ガスを流した場合と流さない場合の干渉画像を比較した。流量は 10 NL/min（ノルマルリットル：温度 0℃、圧力 1 気圧、湿度 0%における体積）、レーザーの出力は 10 mW、CMOS カメラの露光時間は 10 msec である。窒素ガスを流した場合の干渉画像を図 4 に示す。それぞれの干渉画像から直観的にガスの噴出の有無を見出すのは困難であることがわかる。そこで、窒素ガスを流した場合と流さない場合それぞれの干渉画像の差分値（それぞれの画像における各画素の輝度の差の絶対値）を計算した。背景雑音成分に相当する窒素ガスを流さない場合のスペックルパターンを除去することで、窒素ガスによる光強度変化のみを強調する狙いである。

図 5 に得られた差分画像を示す。背景雑音成分が低減された結果、図中に示す干渉領域内において窒素ガスに

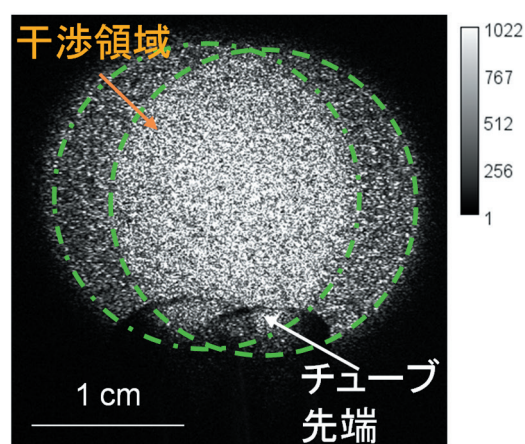


図 3. 窒素ガスを流さない場合の干渉画像

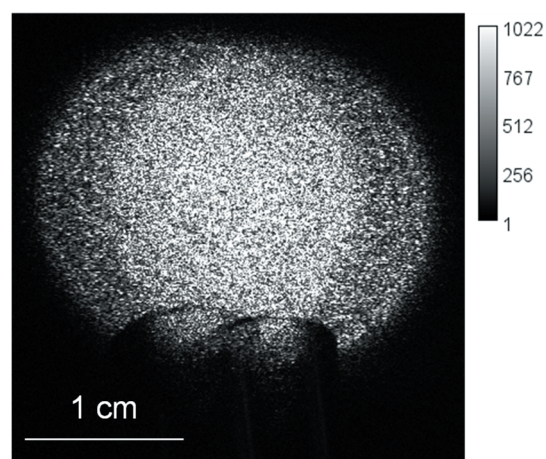


図 4. 窒素ガスを流した場合の干渉画像

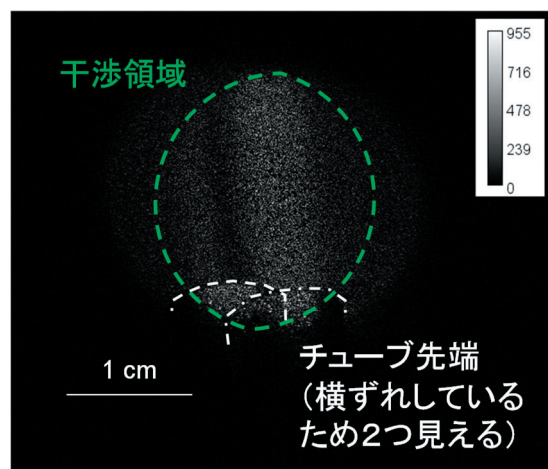


図 5. 図 3 と図 4 の差分画像

よる干渉光強度の変化が見られるようになった。横ずれして 2 つ見えるチューブ先端それぞれから紙面上方に

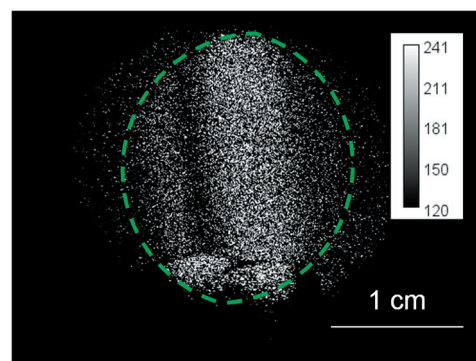
向かって伸びる輝度の高い領域が見られた。差分画像の輝度は二枚の画像の差の絶対値で表されるため、輝度の高い領域は正負問わず干渉光強度の変化量の大きい領域であり、この領域に窒素ガスが存在する可能性は高い。窒素ガスを流した場合と流さない場合の干渉画像を撮影し、それらの差分値を計算し画像を生成することで、噴出する窒素ガスを可視化出来る事を示した。

図 6(a)-(d)に異なる流量で窒素ガスを流した場合に得られた差分画像を示す。流量はそれぞれ(a)10 NL/min、(b)7 NL/min、(c)4 NL/min、(d)1 NL/min で、窒素ガスを流さない場合の干渉画像との差分画像である。視認性を向上させるため輝度の最大値と最小値が同じになるように調整している。緑の波線で示す干渉領域において、流量が 10、7、4 NL/min の差分画像ではチューブ先端面と垂直にガスが噴き出している様子が観測された。流量計の最小目盛りである 1 NL/min の差分画像では、噴き出す勢いが弱いため他の流量の差分画像と比べて紙面左側に傾いてガスが噴き出す様子が観測された。本手法を用いて、使用した流量計の最小指示値である 1 NL/min で流れる窒素ガスの検出と、噴出する二次元形状の可視化が可能であることが分かった。

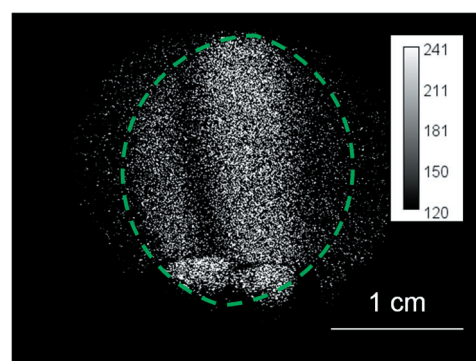
3. まとめ

PCV の気相における漏洩および漏洩箇所の検知・測定が可能な技術の開発を目指して、シアリング干渉計を用いた窒素ガスの可視化試験を実施した。レーザーを光源とするシアリング干渉法は、PCV 近傍の高空間線量に対応する遠隔性や、狹隘部や複雑な形状に適応する空間分解能を有し、共通光路型であるため外乱に対し頑強であり安定な計測の実現を期待できる技術である。

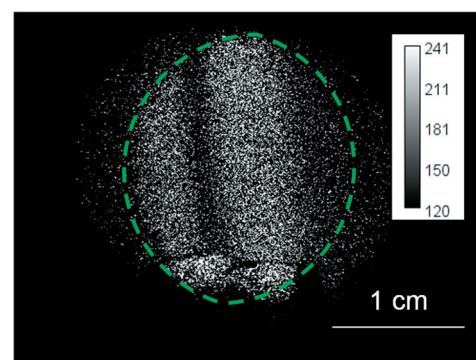
シアリング干渉計を組み込んだ可視化光学系を構築し、漏えいガスに見立てたガスボンベから噴霧した窒素ガスを可視化する実験を行った。PCV 外壁や配管近傍の検査を行う場合、粗面からの散乱光を用いる必要があるためスペックルパターンの中からガスの位相差による干渉光強度変化を検出する手法が求められる。窒素ガスを流した場合と流さない場合の干渉画像を撮影し、そ



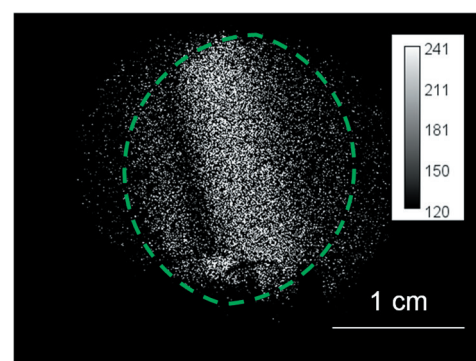
(a) 10 NL/min



(b) 7 NL/min



(c) 4 NL/min



(d) 1 NL/min

図 6. 各流量で得られた差分画像

これらの差分値を計算し画像を生成することでスペックルパターンの影響を低減し、噴出する窒素ガスを光強度の変化として可視化出来る事を示した。また、異なる流量で窒素ガスを流した場合の差分画像から、使用した流量計の最小指示値である 1 NL/min で流れる窒素ガスの検出と、噴出する二次元形状の可視化を出来ることを示した。

本稿ではガスのない場合の干渉画像を撮影し、ガスのある場合の干渉画像との差分を計算する処理を行ったが、実現場ではガスの有無そのものが不明であるため本手法をそのまま適用することが出来る状況は限定的であると想定される。現状に即した手法として、検査箇所を動画撮影し任意のフレームとその後のフレームから差分画像を計算する手法を検討している。漏えいするガスが時間的に変化するようであれば、その変化分が強調されて検出出来るのではないかと考えている。

謝辞

本研究の一部は、日本原子力研究開発機構「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業」によって実施された、課題解決型廃炉研究プログラム「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」(JPJA23P23813496)の助成を受けた。研究の遂行にあたり、議論、助言いただいた、日本原子力研究開発機構松田晶平氏、千葉大学椎名達雄准教授、石井萌氏、千葉大学環境リモートセンシング研究センター久世宏明名誉教授に感謝いたします。

参考文献

- 1) 中川慎二：精密工学会誌, vol.70, No.11, 2004, 1343-1346
- 2) Hung, Y.Y: Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing, Opt. Eng. 21 (1982), 391-395.
- 3) D.Malacara : Optical shop testing(3rd), John Wiley and Sons, New York, NY (2007)

海洋炭酸系の観測に向けたラマンライダー技術の開発

レーザー計測研究チーム

磯谷舟佑、倉橋慎理、染川智弘

1. はじめに

2021 年の気候変動に関する政府間パネル (IPCC) による報告書では、人間活動が主に温室効果ガスの排出を通じて地球を温暖化させてきたことに「疑う余地がない」と断定している¹⁾。温室効果ガスの中でも特に二酸化炭素 (CO₂) 対策が重要で、その削減に向けて海洋の利用が注目されている。

一つの手法として、発電所や工場から排出される CO₂ を大気中に放出する前に回収し、海底地中深くに貯留する CCS (Carbon dioxide Capture and Storage) があり²⁾、国内においては 2012 年から苫小牧沖の海底地層での実証試験が行われている³⁾。CCS の実施にあたっては、CO₂ の海中への漏洩検知技術の開発や漏洩後の環境影響評価などが必要不可欠である。

近年は、海水中の藻などに CO₂ を吸収させ、炭素の形で蓄積させる手法が注目されている。このような炭素は「ブルーカーボン」と呼ばれている。藻場の育成・保全を図り、炭素固定技術として展開していくためには、海藻による炭素固定のメカニズムや固定量の把握が必要となり、海藻近傍での CO₂ 濃度の水深・空間分布の詳細な把握が求められている。

このように海域を利用した CO₂ 排出削減技術を進めるためには、海洋中や海藻近傍での CO₂ 漏洩や挙動のモニタリングが必要となる。従来は、採水を伴う測定や、定点観測機器を搭載した自立型無人潜水機 (AUV) によるその場計測によるモニタリングが行われているが、我々はレーザーを利用してリモートモニタリングが可能な新しい手法の開発を進めてきた。

ライダー (Lidar: Light detection and ranging) は、レーザーを用いたリモートセンシング技術である。パルスレーザーを大気中や海水中に送出し、その光路中に存在している媒質からの後方散乱光を光信号として検出し、信号

検出までの時間を測定することで対象領域を 3 次元的にモニタリングすることが可能となる⁴⁾。この方式は一般的に TOF (Time of Flight) 方式という。一般的に大気中での CO₂ モニタリングは、赤外吸収分光法を用いて行われるが、水分子は赤外線を強く吸収するため、水に対する吸収の小さい紫外から緑色 (可視) の波長領域の光を利用する⁵⁾。

ラマン散乱は分子による光散乱現象で、分子の固有振動数だけ入射光とは異なる波長をもつ光が散乱される。散乱光は微弱であるが、物質識別性が高い。これまで弊所では、水への透過性が高い紫外および緑色の波長領域 (355 nm および 532 nm) のレーザーを利用して、ラマン分光法を用いた水中溶存 CO₂ のリモートラマン測定を行ってきた^{6,8)}。これまでの結果から、20 m 先の水中溶存 CO₂ の識別が可能であることや、水中溶存 CO₂ の濃度を評価できる可能性が示されている。しかし、海中の溶存 CO₂ は、化学平衡により HCO₃⁻、CO₃²⁻に変化する。これらを合わせて「海洋炭酸」という。海水の pH は 8 付近であり、炭酸系の平衡ダイアグラムから、HCO₃⁻ の割合が約 90 % と最も多くなることが知られている⁹⁾。そのため、海水中の CO₂ の挙動や漏洩をモニタリングするためには、CO₂ だけでなく HCO₃⁻ も測定できる技術が必要となる。

本稿では、海洋での利用を目的とし、主に HCO₃⁻ を測定するための二種類のラマンライダー技術の開発状況を報告する。第 2 章では、CCS に関連して海水中へ漏洩した CO₂ の検出を目標として開発している、位置とスペクトルを同時に測定できる、ハイパースペクトルラマンイメージングライダー (フラッシュライダー方式) について、第 3 章では海藻近傍での CO₂ 濃度の水深・空間分布を把握することを目標として開発している TOF 方式のラマンライダーについて紹介する。

2. ハイパースペクトルラマンイメージングライダーを用いた CO_2 および HCO_3^- の測定—CCS における漏洩モニタリングに向けた開発—

2.1. ハイパースペクトルラマンイメージングライダーについて

図 1 に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)、およびサンプルにレーザーを照射している様子 (c) を示す。レーザー光を緑の光路に沿って出射し、6m 離れた位置においたサンプルからの反射・散乱光を ICCD カメラで検出する。レーザー波長は水を透過し易い 532 nm とした。パルスエネルギー 400 mJ、パルス幅 5 ns、繰り返し周波数は 10 Hz である。レーザー光は、焦点距離 200 mm のシリンダリカル凹レンズを通すことによって垂直方向の直線形状に整形し、緩やかに広げながら伝送させた。サンプル位置でのビームの形状は、図 1(c) に示すように、垂直方向に約 150 mm の長さであった。サンプルからの散乱光は、図 1(a) の 3 に示した 550 nm のエッジフィルター、532 nm のノッチフィルター、575 nm のバンドパスフィルター（半値全幅：80 nm）を通り、焦点距離 250 mm のカメラレンズに入る。エッジフィルターおよびノッチフィルターは 532 nm のレイリー・ミー散乱を、バンドパスフィルターは 649 nm 付近に観察される H_2O の伸縮振動由来の強いラマン散乱を除去するために入れている。

ハイパースペクトルカメラの原理を図 2 に示す。散乱光信号をカメラレンズでイメージング分光器の入口に結像させる。分光器入口には上下方向のスリットが設けられており、スリットで直線状になった信号光が分光器を通過することにより、スリットと垂直な方向に分光され、ICCD カメラに結像される。カメラの垂直軸に位置情報、水平軸に波長情報が記録され、カメラの素子数分（本測定の機器においては、 1024×1024 個の素子）の空間・分光情報が得られる。スリットに対して垂直方向にシステムを走査することによって、マッピングが可能となる。このような技術を、ラマンライダーの測定に応用したものがハイパースペクトルラマンイメージングライダーである。

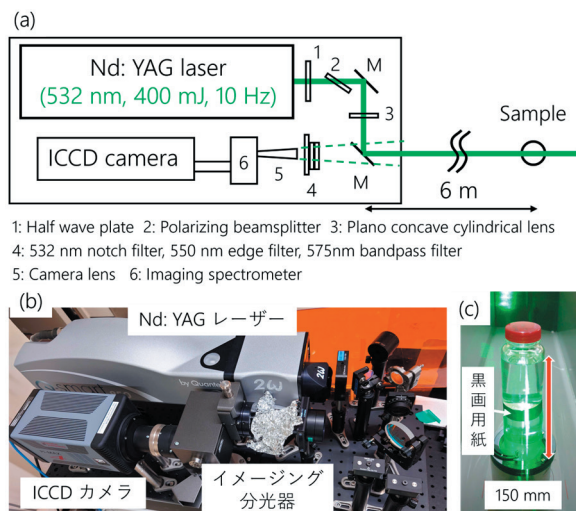


図 2 ハイパースペクトルラマンイメージングライダーの (a) 光学配置図、(b) 装置写真、および (c) 6 m 先に設置したサンプルへのレーザー照射の様子。

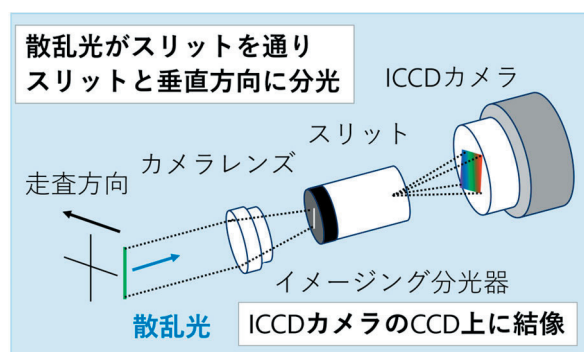


図 1 ハイパースペクトルカメラの原理。

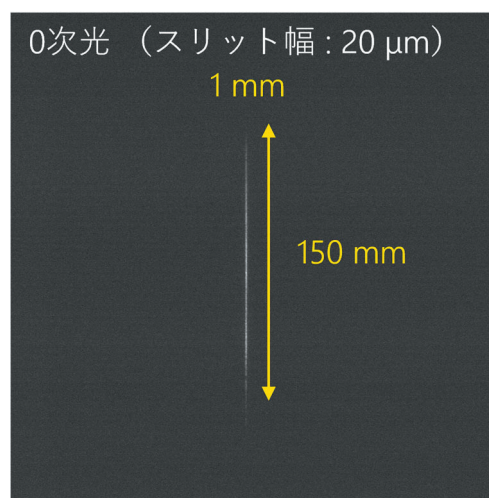


図 3 ハイパースペクトルラマンイメージングライダーにおける 0 次光のイメージング画像。スリット幅は 20 μm 。このスリット幅における観測視野は、約 1 mm $\times$ 150 mm である。

図 3 にハイパースペクトルラマンイメージングライダーの 0 次光のイメージング画像を示す。スリット幅は $20\ \mu\text{m}$ で、この時のサンプル上での観測視野は、約 $1\ \text{mm} \times 150\ \text{mm}$ である。なお、図 1 (a) で示したようにシリンドリカル凹レンズを利用することでレーザーを直線形状に整形しているのは、サンプル上でのレーザー照射領域をスリットの観測視野と一致させることで効率的にレーザーのエネルギーを利用するためである¹⁰⁾。ICCD カメラ (Intensified CCD カメラ) を用いることにより、ナノ秒の時間オーダーでコマ撮りが可能となり、距離方向の情報も取得可能である。

2.2 ハイパースペクトルラマンイメージングライダーを用いた 6 m 先の CO_2 および HCO_3^- の測定

サンプルは、図 1 (c) に示したようにガラス瓶を 2 段重ねにして設置したもので、上段の瓶には $150\ \text{mmol/kg}$ の NaHCO_3 水溶液、下段の瓶には約 $150\ \text{mmol/kg}$ の水溶存 CO_2 (炭酸水) を入れた。瓶と瓶の境界に黒紙を巻き、瓶と瓶の境界からの強い散乱光を防いだ。

図 4 に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測定で得られた ICCD カメラ画像を示す。6 m の位置にある試料の信号の強度が最大になるように ICCD カメラのゲート遅延時間を調整し、ゲート幅は $5\ \text{ns}$ で行った。ICCD カメラのゲインは 1000、積算回数は 3000 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、横方向は波長軸である。左端の信号はノッチフィルターで除去しきれていないレイリー・ミー散乱による迷光で、この位置が照射レーザー光の波長 $532\ \text{nm}$ 、ラマンシフト $0\ \text{cm}^{-1}$ に対応している。ラマンシフトは文献 10 のデータをもとにポリエチレンのラマンピークで校正した。波長分解能は、Hg ランプによる測定から、 $0.49 \pm 0.07\ \text{nm}$ (ラマンシフトでは、 $14 \pm 2\ \text{cm}^{-1}$) であると見積もられる。

図 5 にハイパースペクトルラマンイメージングライダーから得られた NaHCO_3 水溶液と炭酸水のラマンスペクトルを示す。赤線が NaHCO_3 水溶液、青線が炭酸水

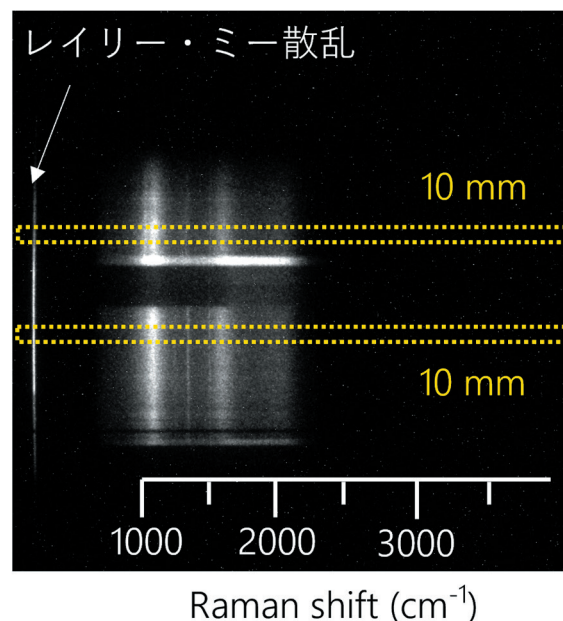


図 4 ハイパースペクトルラマンイメージングライダーによって得られる ICCD カメラ画像。

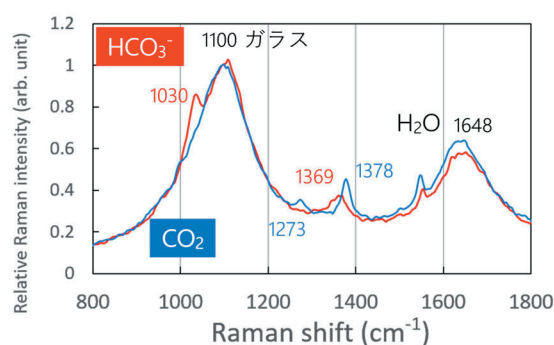


図 5 ハイパースペクトルラマンイメージングライダーによる 6 m 先に設置された水溶存 CO_2 、および NaHCO_3 水溶液のラマンスペクトル。

のラマンスペクトルである。これらのラマンスペクトルは、図 4 の黄点線で囲まれた幅 $10\ \text{mm}$ の領域を積算したスペクトルである。図 5 において、 $1100\ \text{cm}^{-1}$ と $1648\ \text{cm}^{-1}$ のピークは両方のスペクトルで観測されている。 $1100\ \text{cm}^{-1}$ 付近のピークはガラス瓶の主成分である Si-O 伸縮振動由来¹¹⁾、 $1648\ \text{cm}^{-1}$ は H_2O の変角振動モードのピークである。赤線の NaHCO_3 水溶液のラマンスペクトルからは $1030\ \text{cm}^{-1}$ 、 $1369\ \text{cm}^{-1}$ にピークが確認された。 $1030\ \text{cm}^{-1}$ のピークは HCO_3^- 由来の C-OH 伸縮振動モード、 $1369\ \text{cm}^{-1}$ のピークは HCO_3^- 由来の C-O の対称伸縮振動モードであると同定した¹²⁾。一方、青線の炭酸水

のラマンスペクトルからは 1273 cm^{-1} 、 1378 cm^{-1} のピークが確認され、これらは水溶存 CO_2 の伸縮振動と変角振動の倍音のモードの間のフェルミ共鳴による成分由来のピークであると同定した¹³⁾。これらの結果から本技術を用いて、6 m 先にある水溶液中の CO_2 、および HCO_3^- の識別ができることが分かる。

今後は、これらの溶存 CO_2 、および NaHCO_3 水溶液の濃度を変えて測定し、検出限界を求めるとともに、開発した装置を曳航体に載せて、海中からの観測を行っていく予定である。

3. ラマンライダー光学系を用いた HCO_3^- 水溶液のリモート測定—藻場近傍における CO_2 濃度分布観測に向けて—

海藻近傍での CO_2 濃度の水深・空間分布観測に向けた TOF ラマンライダーの開発に先立って、ラマンライダーの光学系を用いて 6.5 m 先の NaHCO_3 水溶液に対するリモートラマン分光測定を行った。図 6 にリモートラマン分光システムの 光学配置図 (a)、装置写真 (b)、6.5 m 先に設置された口径 22 mm、光路長 10 cm の石英セルの写真 (c) を示す。試料には、水、または NaHCO_3 水溶液 (481 mmol/kg) を石英セルに入れて用いた。レーザー波長は 532 nm、パルスエネルギーは 240 mJ、パルス幅は 480 ps で、繰り返し周波数は 10 Hz とした。TOF ラライダーの開発にあたって、距離分解能を高めるため、パルス幅 480 ps のレーザーを用いた。距離分解能は、パルス幅を τ 、光速を c として、 $\Delta R = c\tau/2$ で与えられ、約 7.5 cm となる。

レーザー光は緑の光路を通り、6.5 m 先のサンプルまで伝送される。サンプルからのラマン散乱光は、直径 200 mm の望遠鏡で集め、レイリー・ミー散乱を 532 nm のエッジフィルターでカットした後、分光器を通して CCD カメラでラマンスペクトルを測定した。積算回数は 3000 回で、それぞれ 5 回ずつスペクトルを取得した。波長分解能は、0.40 nm (ラマンシフトでは 12.0 cm^{-1}) であった。

図 7 に 6.5 m 先に設置した NaHCO_3 水溶液と水のラマ

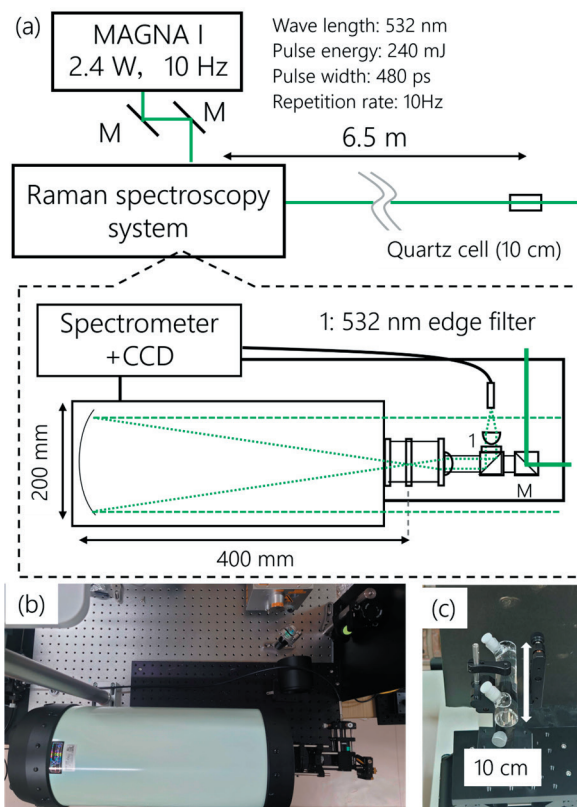


図 6 リモートラマン分光システムの (a)光学配置図、(b)装置写真、(c)6.5 m 先に設置された 10 cm の石英セルの写真。

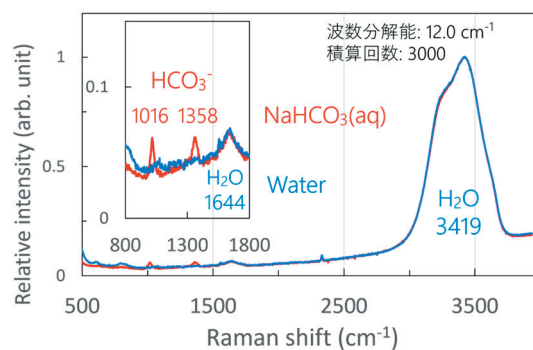


図 7 6.5 m 先に設置した NaHCO_3 水溶液と水のラマンスペクトル。

ンスペクトルを示す。赤線が NaHCO_3 水溶液のスペクトル、青線が水のスペクトルである。両方の試料から、 H_2O 由来の 1644 cm^{-1} と 3400 cm^{-1} 付近のラマン信号が観測され、 NaHCO_3 水溶液からのみ HCO_3^- 由来の伸縮振動モードのピークである 1016 、 1358 cm^{-1} のラマン信号が観測された¹²⁾。この結果から、今回のラマンライダーの光学系で水中の HCO_3^- の測定が可能であることが分かった。

今後は、 1016 cm^{-1} 、 1358 cm^{-1} 、 3419 cm^{-1} のラマン信号を用いた TOF ラマンライダー光学系を開発し、ライダー測定を実施する予定である。

4. まとめ

海水中の海洋炭酸のモニタリングのため 2 種類のラマンライダーを開発し、それぞれのライダーを用いた炭酸水、および NaHCO_3 水溶液の測定をし、水溶存 CO_2 と HCO_3^- の識別に成功した。今後は、それぞれのラマンライダーの開発を進めて、海洋炭酸の検出限界の評価を行い、船や曳航体に載せて海上および海中からの観測を実施する予定である。

謝辞

本研究は、JST CREST の JPMJCR24J3 の支援を受けたものである。ご協力いただいた方々に心より感謝申し上げます。

参考文献

1) V. Masson-Delmotte et al., Eds., Climate Change

2021: The Physical Science Basis, IPCC (2021).

- 2) D. Tanase et al, Energy Procedia ,37, 6571 - 6578 (2013).
- 3) S. I. Plasynski et al., Critical Reviews in Plant Sciences 28, 123–138 (2009).
- 4) C. Weitkamp, Springer, (2005).
- 5) R. C. Smith and K. S. Baker, Appl. Opt. 20, 177 (1981).
- 6) T. Somekawa et al., Appl. Phys. Express 4, 112401 (2011).
- 7) T. Somekawa et al., in Proc. of SPIE, (Amsterdam, Netherlands, 2014).
- 8) T. Somekawa, and M. Fujita, EPJ Web of Conferences 119, 25017 (2016).
- 9) 気象研究所技術報告, 41, 6 (2000).
- 10) T. Somekawa et al., Opt. Lett. 50, 57 (2025).
- 11) L. Robinet et al., Journal of Raman Spectroscopy 37, 789–797 (2006).
- 12) A. R. Davis and B. G. Oliver, J Solution Chem 1, 329–339 (1972).
- 13) G. R. Anderson, J. Phys. Chem. 81, 273–276 (1977).

光受容蛋白質の電子移動反応メカニズム

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

生物にとって光は必要不可欠であるが、有害となる側面も持つ。その大きな例が紫外線によるDNAの損傷である。DNAは核酸塩基同士が水素結合により結びつくことで二重らせん構造をとるが、紫外線(波長200~300 nm)が照射されると、隣り合う2つの核酸塩基(ピリミジン)が化学反応して2量化し、シクロブタン型ピリミジン2量体(以下CPDと記す)や6-4光産物のような光生産物が生成することがある。光生産物が生成した部分では塩基同士の水素結合ができないため、DNAに損傷が起こる(図1)。DNAが損傷するとDNA複製や転写の妨げとなり、突然変異や細胞死、がん化など生体にさまざまな障害を引き起こす要因となる。このようなDNA損傷に対し、青色光(波長350~450 nm)を利用してそれらを修復する酵素が生体内には存在する。この酵素は光回復酵素(Photolyase、以下PLと記す)と呼ばれる¹⁾。

図2に大腸菌由来のPLの蛋白構造および補因子フラビンアデニンジヌクレオチド(以下FADと記す)の分子図を示す²⁾。FADは、FADを構成するイソアロキサジン環(以下Isoと記す)の酸化還元反応により、酸化型(FADox)、ラジカル型(または中性型)(FAD[•]、

FADH₂)、還元型(FADH)などの状態を取ることができ、蛋白質内での電子移動やプロトンの移動反応により相互変換が可能である(図3)。このPLはCPDを分解して元の状態に戻す(DNAを修復する)機能を持つことが知られており³⁾、その光機能メカニズムを解明する研究が古くから行われてきた。PLの修復反応では、初期状態(暗状態)ではFADはFADoxとして存在するが、青色光を受容するとFADH[•]へと変化し反応活性状態となる。この反応は「光還元反応」と呼ばれる³⁾。反応活性状態のPLはDNA損傷部へ移動し、FADH[•]が近接するようにCPDを酵素内部に収納する。その後FADH[•]がさらに青色光を受容すると、FADH[•]からCPDへと光誘起電子移動反応が起こり、CPDが電子により分解されDNAが修復される。反応後のPLは元の状態(FADox)へと戻り再利用される。このことからPLのDNA修復には少なくとも2段階の電子移動反応が関与しており、そのメカニズムを解明するための研究がそれぞれの反応に対して行われてきた。

FADH[•]からCPDへの電子移動に関しては、過渡吸収分光などの超高速レーザー計測による研究が行われ^{4,5)}、PL内ではFADのIsoとCPDの中間にFADのアデニン(Ade、図2参照)が配置されており、3分子の分子軌

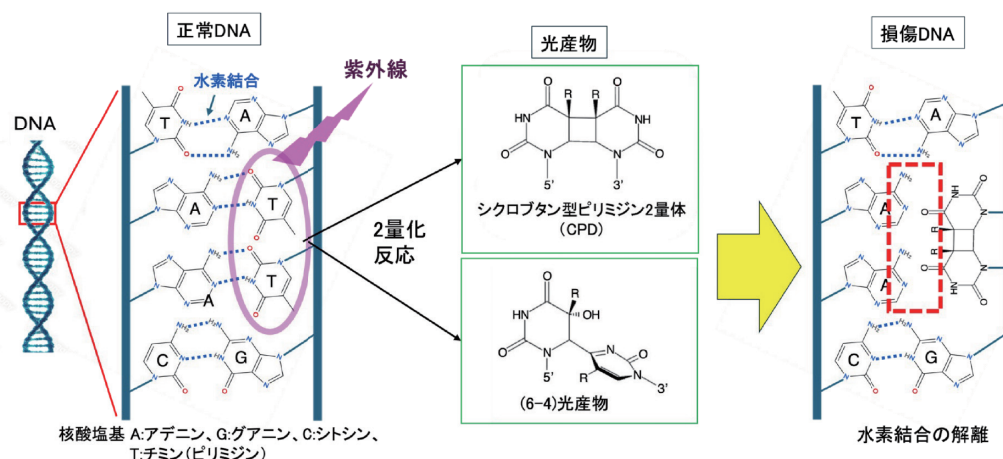


図1 紫外線によるDNA損傷

道が混成して電子トンネル効果を引き起こすことにより電子移動を加速し（超交換機構）、修復反応の効率を1近くまで増加させていることが明らかになった⁶⁾。この結果は、蛋白質内部の電子移動反応では、電子ドナー（この場合 FADH[•]の光励起状態）および電子アクセプター（この場合 CPD）だけでなくその近傍に存在する分子（この場合 Ade）との分子間相互作用が電子移動速度に大きく影響することを示している。

FADH[•] を生成する光還元反応においても超高速レーザー計測による研究が行われた^{4,5)}。その結果、光励起された FADox が近傍に配置する芳香族アミノ酸トリプトファン（Trp382、数字は蛋白質を構成するアミノ酸を識別するための番号である）から電子を引き抜くことで FAD が還元され、その後酵素と水の界面に配置された芳香族アミノ酸チロシン（Tyr464）から、蛋白質内に存在する2つの Trp（Trp306、Trp352）を経由して電子が連続的に移動し、Trp382 に電子が補充されることが明らかとなった⁴⁾（図4）。電子移動速度の解析には、分子軌道法による量子力学計算と分子力場計算を組み合わせた QM/MM シミュレーションが用いられ、シミュレーション結果と実測値がよく一致することが報告されている⁷⁾。一方で、この解析に取り入れられているアミノ酸残基は光還元反応に直接関与する Trp382、Trp306、Trp352 のみであった。PL では Iso の近傍に5つの芳香族アミノ酸（Trp382、Trp277、Trp384、Trp338、Tyr281）が配置されており（図5）、Iso、特に光励起状態の Iso との相互作用が FAD の光還元メカニズムに影響している可能性がある。また光還元反応では、FAD が電子を受け取るだけでなく、同時にプロトン化する（H⁺を取り込む）ことも必要である（図3を参照）。しかしながら現状では、プロトンの移動がどのような形で起こるかについては明確ではない。

本稿では、Iso と近傍の5つの芳香族アミノ酸を取り入れた分子軌道（MO）計算を行い、光励起時に起こるそれぞれの分子の電荷密度および電荷分布、およびそれぞれの状態が持つエネルギーの変化を計算することで、プロトン移動を含む光還元反応のメカニズムについて

考察した結果について報告する。

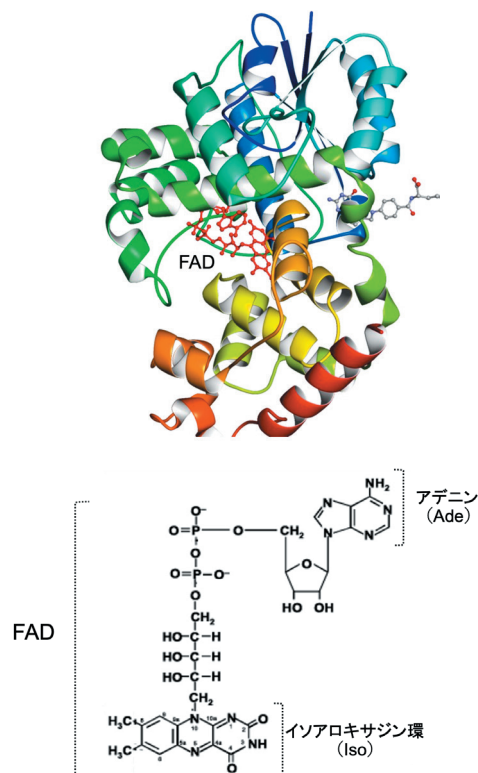


図2 (上) 大腸菌由来の光回復酵素（PL）の立体構造、（下）補因子フラビンアデニンジヌクレオチド（FAD）の分子図。FADを構成するイソアロキサジン環（Iso）、アデニン（Ade）をそれぞれ図中に記した。

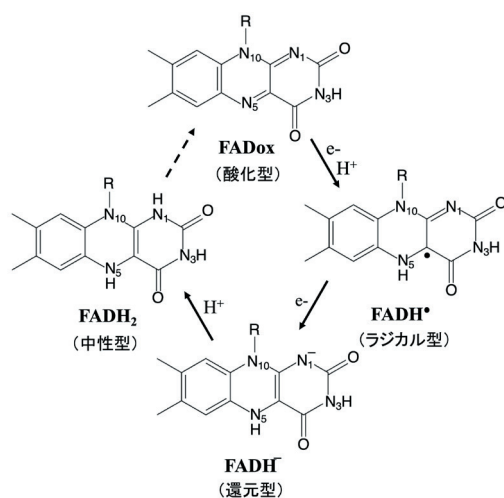


図3 FAD の酸化還元時のイソアロキサジン環（Iso）の変化。図中 e⁻ は電子、・は不対電子（ラジカル電子）、- は陰イオンを示す。N の添字は分子内の N の位置を識別するための番号である。

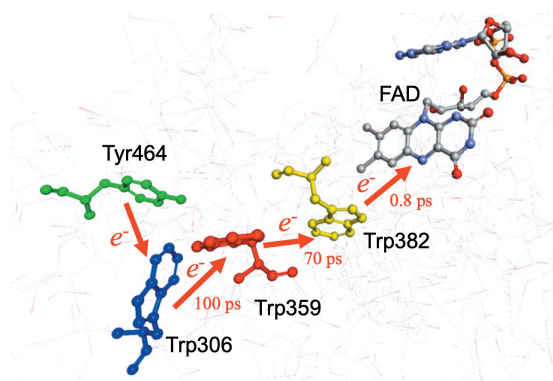


図4 光還元反応に関与するアミノ酸の配置。電子の移動経路(矢印)と速度を併せて示す。Trpはトリプトファン、Tyrはチロシンを示す記号、数字は蛋白質を構成するアミノ酸の識別番号である。

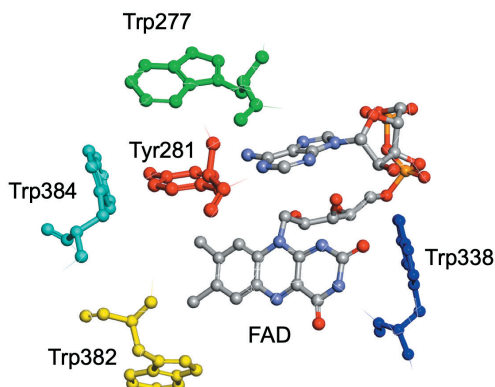


図5 FADのイソアロキサジン環(Iso)近傍に存在するトリプトファン(Trp)チロシン(Tyr)の配置。

2. 分子軌道計算による光還元反応の解析

本研究では、PLの中からFADのイソアロキサジン環(Iso)と、その近傍にある5つの芳香族アミノ酸(Trp382、Trp338、Trp384、Trp277、Tyr281)を選択し、空間的に配置することによりMO計算を行った。表記を簡便にするため、以下Isoと5つのアミノ酸からなる系を「集合系」と呼ぶこととする。集合系の初期配置は、報告されているPLの結晶構造から決定した。Isoと各アミノ酸間の分子中心間距離(Rc)を表1に示す。いずれもRcは1.2 nm以内であり、近接した配置となっている。分子のモデリング(分子構造作成)および初期配置にはWinmoster(Ver.7.028)を、MO計算にはMOPAC2016を使用した。半経験的ハミルトニアン分子軌道法による

量子化学計算を行い、集合系の熱的安定構造、生成熱(HF)、電荷分布および電荷密度を求めた。光励起時の計算は、Isoの初期状態を最低励起一重項状態(LUMO、 S_1 と記す)に設定し、同様に安定構造および生成熱を計算することにより行った。遷移エネルギー(または励起エネルギー、TE)は、光励起をしていない基底状態(HOMO、 S_0 と記す)と励起一重項状態でそれぞれ計算した集合系の生成熱の差によって求められる。

表1 Isoと近傍のアミノ酸間の分子中心間距離

アミノ酸 (D)	分子中心間距離 Rc (Iso-D) / nm
Trp382	0.86
Trp338	1.03
Trp384	1.09
Trp277	1.18
Tyr281	0.91

2.1 集合系の遷移エネルギー

表2に、MO計算から得られた集合系の各状態の生成熱、遷移エネルギー、遷移エネルギーの差を計算した結果を示す。 S_0 、 S_1 はそれぞれIsoが基底状態、励起一重項状態であることを示す。また光還元反応で起こると考えられるプロトン移動を考慮してIsoの N_5 の位置にHが付加した分子構造を用いて計算を行った(Hが付加していない場合のIsoの構造は図3の酸化型FADに相当、 N_5 にHが付加した分子構造についてはラジカル型、還元型、中性型のFADを参照のこと)。また比較のため、 N_1 の位置にのみプロトンが付加した構造についても同様に計算した。計算に用いた媒体の比誘電率は蛋白質内部で一般的に用いられる値(10)に設定した。蛋白質内部は水が侵入にくいいため、水の比誘電率(~ 80)よりも誘電率は小さくなる。Isoの S_0 と S_1 での生成熱の差から遷移エネルギーは3.88eV($=2.95-(-0.93)$)であった。一方、 N_1 、 N_5 にそれぞれプロトンが付加した場合の遷移エネルギーはそれよりも低く、その差はそれぞれ-0.8eV、-1.32eVであった。この結果は、プロトン移動が起こった場合に N_1 、 N_5 のそれぞれの位置に付加されうること示している。また、 N_5 の位置の方が熱的に安定な

構造となるため、プロトン付加がより起こりやすいものと考えられる。

表2 MO 計算により得られた集合系の各状態における生成熱と遷移エネルギー

Iso	プロトン 付加位置	生成熱 (eV)	遷移エネルギー (eV)	エネルギー差 (eV)
S ₀	-	-0.93	-	-
S ₁	-	2.95	3.88	-
S ₁	N ₁	2.16	3.09	-0.8
S ₁	N ₅	1.64	2.57	-1.32

2.2 集合系の電荷密度

表3に、MO 計算後の Iso と各アミノ酸の電荷密度 (e) を示す。ここでいう電荷密度とは、例えば電荷密度が -1 であればその分子全体が 1 電子分の電荷を持ち、 $+1$ であれば分子から 1 電子が失われていることを示す指標として定義したものである。Iso が基底状態にあるとき (S₀) は、いずれの分子の電荷密度はほぼ 0 であり、集合系全体が中性状態にある。一方 Iso を励起一重項状態 (S₁) とすると、Iso の電荷密度は -0.96 (~ -1) まで減少し、Trp382 の電荷密度は 0.96 ($\sim +1$) に増加した。他のアミノ酸の電荷密度に変化は見られないことから、Iso の励起状態から Trp382 から Iso へ電子が移動した状態が最も集合系の持つエネルギーを安定化させる、つまり Iso の光励起により、Trp382 から Iso への電子移動反応が主反応として起こることを示している。この結果は、報告値と一致する挙動である (図4を参照)。N₁ にプロトンが付加した状態では、Iso、Trp382 を含め全ての分子の電荷密度はほぼ 0 となった。この集合系では、Iso、Trp はプロトン移動反応を引き起こす置換基を有しておらず、プロトン移動反応が起こる可能性があるのは Tyr281 が持つ水酸基 ($-OH$) のみである (図6) ため、

プロトンは Tyr281 から Iso へ移動すると仮定すると、Tyr281 の電荷密度は -1 となるはずである。一方、N₅ にプロトンが付加した状態では、Iso の電荷密度は 0.550 、Tyr281 は -0.579 であった。この要因として、Iso と Tyr281 の間の分子間相互作用による電荷の非局在化が起こっていることが挙げられる。このような相互作用は媒体の極性に依存することから、媒体の比誘電率を 10 から 20 に増加して再計算を行ったところ、それぞれの電荷密度はほぼ 0 となり、N₁ にプロトンが付加した場合と同様の挙動を示すことがわかった。これらの結果は、Trp382 から Iso へと電子が移動した後 Tyr281 から Iso へプロトンが付加して Iso が中性となり、その際に Tyr281 で生成した負電荷が Trp382 に移動するためであると推定される。この仮説についてさらに検討するため、Iso へのプロトン付加が Tyr281 のプロトンが移動する場合と、集合系の外部からプロトンが付加する場合の生成熱をそれぞれ MO 計算により求め、比較を行った。結果を表4に示す。光還元反応は、図3に示すように FADox から光誘起電子移動とプロトン付加が起こることで FADH $\cdot$ が生成し、その後さらに電子移動が起こり FADH が生成すると考えられる。この時 Iso は 2 電子を取り込むため、集合系の総電荷数は -2 である (表4 (2 段目) を参照)。外部からプロトンが付加した場合は、プロトンが 1 電子をうち消し集合系の総電荷数は -1 となる (表4 (3、4 段目) を参照)。一方 Tyr281 からプロトンが移動する場合は、Tyr の水酸基に負電荷が残るため、集合系の総電荷数は -2 となる (表4 (5、6 段目) を参照)。外部からプロトンが付加した場合、プロトン付加がない場合との生成熱差は正となり、プロトン付加により集合系は不安定化するが、Tyr281 からプロトン移動が起こる場合、特に N₅ にプロトン付加が起こる場合

表3 MO 計算により得られた集合体の各分子の電荷密度

ES	プロトン 付加位置	電荷密度 (e)					
		Iso	Tyr281	Trp277	Trp338	Trp382	Trp384
S ₀	-	-0.007	-0.006	0.01	-0.001	0	0.003
S ₁	-	-0.965	0	0.008	0	0.955	0.002
S ₁	N ₁	-0.004	0.003	0.003	-0.004	-0.001	0.003
S ₁	N ₅	0.550	-0.579	0.008	-0.003	0.021	0.002

には生成熱の差は負の値となった。この結果は、Iso に付加するプロトンは Tyr281 に由来するものであることを示している。実際の反応においても、Iso のプロトン付加が N₁ ではなく N₅ の位置で起こる (図3、FADH⁺ の分子図を参照) ことと一致する結果である。

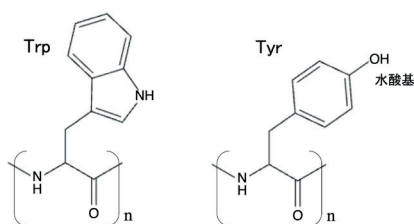


図6 アミノ酸 (トリプトファン (Trp) 、チロシン (Tyr) の分子図) 。

表4 還元された Iso のプロトン付加による生成熱の変化

総電荷数 (e)	プロトン 付加位置	生成熱 (eV)	生成熱の差 (eV)
0	-	-0.53	-
-2	-	-7.22	-
-1	N ₁ (外部から)	-3.86	3.36
-1	N ₅ (外部から)	-6.25	0.96
-2	N ₁ (Tyr281 から)	-6.56	0.66
-2	N ₅ (Tyr281 から)	-8.75	-1.53

3. まとめ

本研究では、光回復酵素 (PL) の光誘起電子移動反応およびプロトン付加反応について、補因子 (Iso) の周囲の芳香族アミノ酸 (Trp382、Trp338、Trp384、Trp277、Tyr281) を取り入れた集合系の分子軌道計算を行い、そのメカニズムについて検討した。その結果、光誘起電子移動は他のアミノ酸に比べ Iso と Trp382 間で最も起こ

りやすいことを示した。この結果は実験により得られた結果と一致する。また、プロトン付加反応は Tyr281 の水酸基からプロトンが移動し、Iso の N₅ の位置に付加されるというメカニズムにより起こる可能性を示した。光還元反応におけるプロトンの供給源は現状では明確にはなっていないため、光還元反応のメカニズムを明らかにするための重要な知見を得たと言える。しかしながら本研究では、計算で用いた配置が結晶構造解析のものであること、計算に取り入れたアミノ酸数が少なく、また水素結合相互作用など蛋白質内で起こる効果についても十分に考慮できていない、など課題もある。今後は、分子動力学 (MD) 計算による PL の水溶液中での構造解明、芳香族アミノ酸以外のアミノ酸を取り入れたより大規模な MO 計算などを行い、光還元反応全体のメカニズムの解明に向け研究を進める予定である。

参考文献

- 1) A. Sancar, *Chem. Rev.*, **103**, pp. 2203–2237 (2003).
- 2) H.-W. Park, S.-T. Kim *et al.*, *Science*, **268** (5219), pp. 1866–1872 (1995).
- 3) C. Aubert, M. H. Vos *et al.*, *Nature*, **405**, pp. 586–590 (2000).
- 4) Y.-T. Kao, C. Tan *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.*, **130** (24), pp. 7695–7701 (2008).
- 5) D. Zhong, *Annu. Rev. Phys. Chem.*, **66** (1), pp. 691–715 (2015).
- 6) T.R. Prytkova, D.N. Beratan *et al.*, *Proc. Nat. Acad. Sci. UAS*, **104** (3), pp. 802–807 (2007).
- 7) P.B. Woiczikowski, T. Steinbrecher *et al.*, *J. Phys. Chem. B*, **115** (32), pp. 9846–9863 (2011).

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 (2025) 890-902, https://doi.org/10.1364/OME.558733

〇レーザープロセス研究チーム

著 者	<u>藤田雅之</u> 、 <u>新村 亮</u> 、 <u>田島孝敏</u>
題 目	月資源を用いた建設材料の作製
論文誌名	粉体技術, vol.17, No.7, pp.12-15, (2025)
著 者	<u>藤田雅之</u> 、 <u>田島孝敏</u> 、 <u>新村 亮</u> 、 <u>兒玉了祐</u> 、 <u>金森洋史</u>
題 目	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
論文誌名	Optronics Edge レーザー核融合,第二章「パワーレーザーとその応用」,pp.61-64,(2025)
著 者	<u>田島孝敏</u> 、 <u>新村 亮</u> 、 <u>湊田安浩</u> 、 <u>白井 孝</u> 、 <u>藤田雅之</u>
題 目	月レゴリスの焼成固化による基地建設材料の製造技術
論文誌名	基礎工,vol.54, No.1,pp.12-15,(2026)

〇レーザー計測研究チーム

著 者	D. Tanaka, H. Sawada, T. Idesaka, C. Nakatsuji, S. Matsuura, T. Sato, <u>T. Somekawa</u> , T. Yabuuchi, K. Miyaniahi, K. Sueda, Y. Inubushi, Y. Sentoku, T. Shimizu, S. Shingubara, K. Kawasaki, N. Ozaki, K. Yamanoi, K. Shigemori
題 目	Experimental investigation on nanowire array irradiated with ultrahigh intensity laser at x-ray free electron laser facility SACLA: Fabrication of nanowire array target and its application to ultrafast time-resolved measurements
論文誌名	J. Appl. Phys.,Vol. 137,1259-1,(2025)
著 者	<u>T. Somekawa</u> , S. Matsuda, <u>S. Kurahashi</u> , M. Ishii, H. Kuze, and T. Shiina
題 目	Leak gas detection technique with hyperspectral Raman imaging Lidar
論文誌名	Proc. SPIE,136720C,(2025)
著 者	T. Sakurai, <u>T. Somekawa</u> , Y. Hirai, and H. Matsushita
題 目	Superhydrophobic PDMS using Femtosecond Laser-Processed Surface Molds for Anti-Icing
論文誌名	Journal of Photopolymer Science and Technology, 38, pp.91-98,(2025)

国内学会発表リスト

○レーザープロセス研究チーム

著 者	藤田雅之、田島孝敏、新村 亮、新述隆太、湊田安浩
題 目	レーザー加熱3Dプリンターを用いた月面基地建設材料の作製
会議名	先進加工技術懇話会第113回例会、2025年4月18日、岡山国際交流センター
著 者	藤田雅之
題 目	短パルスレーザー加工の基礎(ナノ秒からフェムト秒まで)
会議名	OPIEレーザー基礎&応用技術セミナー、2025年4月24日、パシフィコ横浜
著 者	藤田雅之
題 目	パルスレーザー加工の波長依存性
会議名	スパッタリングおよびプラズマプロセス技術部会 第 182 回定例研究会、2025年5月29日、岡山ヒカリホールディングス
著 者	藤田雅之、新村 亮、田島孝敏、新述隆太、湊田安浩
題 目	月面環境でのレーザー加熱3Dプリンティング
会議名	第69回宇宙科学技術連合講演会、2025年11月25日-28日、札幌コンベンションセンター
著 者	藤田雅之、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46回年次大会、2026年1月13日-15日、大阪南港ATC
著 者	藤田雅之
題 目	建設現場における可搬レーザーの安全性評価
会議名	第5回光無線給電技術専門委員会、2026年1月22日、横浜

○レーザー計測研究チーム

著 者	倉橋慎理、 <u>染川智弘</u> 、松田晶平、椎名達雄、石井萌、久世宏明
題 目	シアリング干渉法による漏えい気体可視化技術の開発
会議名	令和7年電気学会 基礎・材料・共通部門大会、2025年9月2日-4日、芝浦工業大学
著 者	川崎剛洋、市川 祐嗣、荻田 将一、大山哲矢、大井信彦、山本和代、 <u>染川智弘</u> 、朝日一平
題 目	共鳴ラマン効果を用いたフラッシュLIDARによるアンモニア可視化技術の検討
会議名	第43回レーザセンシングシンポジウム、2025年9月4日-5日、国立極地研究所
著 者	<u>磯谷舟佑</u> 、 <u>染川智弘</u> 、 <u>倉橋慎理</u>
題 目	ハイパースペクトルラマンイメージングライダーを用いた水溶存CO2のリモート測定
会議名	第43回レーザセンシングシンポジウム、2025年9月4日-5日、国立極地研究所
著 者	<u>染川智弘</u> 、松田晶平、 <u>倉橋慎理</u> 、石井萌、久世宏明、椎名達雄
題 目	ガス漏洩検知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43回レーザセンシングシンポジウム、2025年9月4日-5日、国立極地研究所
著 者	<u>染川智弘</u> 、 <u>倉橋慎理</u>
題 目	ダブルパルスリモートLIBSによる高架橋の塩害評価技術の開発
会議名	第43回レーザセンシングシンポジウム、2025年9月4日-5日、国立極地研究所
著 者	<u>染川智弘</u> 、猪口和彦、 <u>コスロービアンハイク</u> 、谷口誠治、 <u>倉橋慎理</u>
題 目	フェムト秒レーザーを利用したリモートダブルパルスLIBS計測
会議名	第86回応用物理学会秋季学術講演会、2025年9月7日-10日、名城大学天白キャンパス
著 者	<u>磯谷舟佑</u> 、 <u>倉橋慎理</u> 、 <u>染川智弘</u>
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炭酸水の測定
会議名	第86回応用物理学会秋季学術講演会、2025年9月7日-10日、名城大学天白キャンパス
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	構造物からの気体漏洩の検知を目指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開発
会議名	日本原子力学会2025年秋の大会、2025年9月10日-12日、北九州国際会議場

著 者	谷口信博、新村亮、渡辺淳、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実証実験
会議名	第51回岩盤力学に関するシンポジウム、2025年12月18日-19日、土木学会土木会館
著 者	<u>染川智弘</u> 、松田晶平、 <u>倉橋慎理</u> 、石井萌、久世宏明、椎名達雄
題 目	漏えい気体可視化に向けたハイパースペクトルラマンイメージングライダーの開発
会議名	レーザー学会学術講演会第46回年次大会、2026年1月13日-15日、大阪南港ATC
著 者	<u>倉橋慎理</u> 、 <u>染川智弘</u> 、松田晶平、椎名達雄、石井萌、久世宏明
題 目	漏えい気体可視化に向けたシアリング干渉技術の開発
会議名	レーザー学会学術講演会第46回年次大会、2026年1月13日-15日、大阪南港ATC
著 者	<u>磯谷舟佑</u> 、 <u>倉橋慎理</u> 、 <u>染川智弘</u>
題 目	藻場におけるCO2濃度分布観測のための水中ラマンライダーの開発
会議名	レーザー学会学術講演会第46回年次大会、2026年1月13日-15日、大阪南港ATC
著 者	大村リョウ、Ji Hantao、Gao Lan、Guo Fan、Zhang Yang、Russell Brandon、Pomraning Geoffrey、木村魁、明松凜也、唐木優河、松原広貴、Dun Jinyuan、Muhammad Fauzan SYAHBANA、瀧澤龍之介、Law King Fai Farley、山ノ井航平、佐野孝好、 <u>染川智弘</u> 、坂和洋一、余語覚文、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46回年次大会、2026年1月13日-15日、大阪南港ATC
著 者	川崎剛洋、市川祐嗣、荻田将一、大山哲矢、大井信彦、山本知代、 <u>染川智弘</u> 、朝日一平
題 目	フラッシュ共鳴ラマンLIDARによるアンモニア可視化技術の開発
会議名	レーザー学会学術講演会第46回年次大会、2026年1月13日-15日、大阪南港ATC
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、武島佳輝、 <u>染川智弘</u> 、藪内俊毅、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線シャドウグラフを活用したレーザー照射ナノワイヤーアレイにおけるエネルギー吸収・緩和過程の観測
会議名	レーザー学会学術講演会第46回年次大会、2026年1月13日-15日、大阪南港ATC
著 者	<u>染川 智弘</u>
題 目	海中レーザーCO2計測が拓く脱炭素への貢献
会議名	光エレクトロニクス産学連携専門委員会『光の日』シンポジウム、2026年3月4日、東京理科大学森戸記念館
著 者	<u>倉橋慎理</u> 、 <u>染川智弘</u>
題 目	屋外実構造物の塩分測定に向けたリモートダブルパルスLIBSシステムの開発
会議名	令和8年電気学会全国大会、2026年3月12日-14日、東北学院大学五橋キャンパス
著 者	<u>染川 智弘</u> 、猪口和彦、杉本幸代、 <u>ハイク コスロービアン</u> 、 <u>谷口誠治</u> 、 <u>倉橋 慎理</u>
題 目	赤外吸収を利用したNH3ガスの可視化技術の開発
会議名	第73回応用物理学会春季学術講演会、2026年3月15日-18日、東京科学大学大岡山キャンパス
著 者	<u>磯谷舟佑</u> 、 <u>倉橋慎理</u> 、 <u>染川智弘</u>
題 目	ラマン分光法を用いたHCO3-水溶液のリモート測定 ―藻場におけるCO2濃度分布観測に向けて―
会議名	第73回応用物理学会春季学術講演会、2026年3月15日-18日、東京科学大学大岡山キャンパス
著 者	<u>染川 智弘</u>
題 目	レーザーを利用した海洋プラスチックごみ対策
会議名	OI Academy、OnDemand、Webinar

国際学会発表リスト

〇レーザー計測研究チーム

著 者	<u>S. Kurahashi</u> , <u>T. Somekawa</u>
題 目	Development of Double-pulse LIBS Technique for Concrete Infrastructure Assessment
会議名	LSSE2025、2025年4月21日-25日、Pacifico Yokohama
著 者	N.Hasegawa, H.Okada, S.Kondo, M.Nishikino, K.Sakamoto, M.Kabashima, <u>S.Kurahashi</u> , <u>T.Somekawa</u> , S.Tomoto, H.Nakamura
題 目	Development of small laser hammering system for inspections of concrete infrastructures
会議名	LSSE2025、2025年4月21日-25日、Pacifico Yokohama
著 者	<u>T. Somekawa</u> , S. Matsuda, <u>S. Kurahashi</u> , M. Ishii, H. Kuze, and T. Shiina
題 目	Leak Gas Detection Technique with Hyperspectral Raman Imaging Lidar
会議名	SPIE Environmental Remote Sensing、Proc. SPIE、2025年9月15日-18日、IFEMA Madrid

事業報告書

事業報告書

(令和7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7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7年度の主な活動】

産業用レーザー開発プロジェクトでは、レーザーの大出力化に有効なコヒーレント結合技術について、ビーム結合数増加のためのシステム開発、および大出力レーザーを用いた実装試験を行った。また、波面制御技術について、大口径の可変形鏡を開発し、性能評価を行った。

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について、タイルアレイビーム結合やフェーズドアレイの調査研究を進めた。

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具体化を進めた。また、レーザー加熱による合金ナノ粒子合成試験を進めた。

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に加え、気相漏洩検知に向けたシアログラフィ技術を開発した。また、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、蛋白質や酵素の光機能の解明研究と光を利用した選択的元素分離、レアメタル回収手法の開発を進めた。

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
R7.5.12	田畑 太嗣	齋藤 公秀
R7.5.12	大原 弘樹	齋藤 憲一
R7.6.16	栗野 理	高西 一光
R7.6.16	藤田 雅之	

(評議員)

年月日	就 任	退 任
R7.5.12	西沢 昭則	高林 幹夫
R7.5.12	神門 正城	田中 淳
R7.6.16	浅原 潤	高木 宏彰
R7.6.16	松下 義尚	富岡 洋光
R7.6.16	宮本 修治	

2. 役員会等の開催

(1) 理事会

第 63 回理事会 (令和 7 年 4 月 17 日 みなし決議)

決議事項

- ・臨時の第 45 回評議員会の招集及び目的である事項

第 64 回理事会 (令和 7 年 6 月 2 日 Web 会議)

決議事項

- ・令和 6 年度事業報告
- ・令和 6 年度財務諸表および特定費用準備資金の積立てについて
- ・給与規程の改定について
- ・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 65 回理事会 (令和 7 年 7 月 25 日 みなし決議)

決議事項

- ・理事長の選定

第 66 回理事会 (令和 8 年 3 月 6 日 Web 会議)

決議事項

- ・令和 8 年度事業計画

- ・ 令和 8 年度収支予算書及び資金調達及び設備投資の見込み
- ・ 情報セキュリティ対策規程の制定
- ・ 嘱託職員就業規則の制定
- ・ 給与規程の改正

報告事項

- ・ 職務執行状況の報告
- ・ 特定費用準備資金の設定変更について

(2) 評議員会

第 45 回評議員会 （令和 7 年 5 月 12 日 みなし決議）

決議事項

- ・ 理事の選任
- ・ 評議員の選任

第 46 回評議員会 （令和 7 年 6 月 16 日 Web 会議）

決議事項

- ・ 令和6年度財務諸表および特定費用準備資金の積立てについて
- ・ 理事の選任
- ・ 評議員の選任

報告事項

- ・ 令和6年度事業報告

3. 賛助会員状況

令和 7 年度末会員数 25 社 55.5 口

4. 学会および論文発表

学会発表 29 件 （国内：26 件、国外： 3 件）
論文発表 7 件 （国内： 3 件、国外： 4 件）

5. 特許等出願件数

令和 7 年度出願件数 3 件
令和 7 年度末特許保有件数 35 件 （登録：28 件、公開：1 件、他：6 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ビーム結合、波面制御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コヒーレント結合技術について、ビーム結合数増加のためのシステム開発、および大出力レーザーを用いた実装試験を行った。

(2) 波面制御技術に関する研究

大出力レーザービームの波面歪を補正するため、大口径の可変形鏡を開発し、その性能を評価した。

【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

原子炉廃止措置等、レーザーの原子力利用の動向調査を原子力学会プログラムを通じて行った。宇宙デブリ対策などで必要とされているレーザー技術に関して、タイルアレイビーム結合ならびにそれを発展させたフェーズドアレイについて調査した。

【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、安全ガイドライン評価手法の具体化を進めるとともに、屋外現場での表面クリーニング、月面環境での積層造形を検討した。

(3) レーザーによるナノ構造体合成技術の研究

レーザー加熱による合金ナノ粒子合成試験を進めた。照射部の温度計測などによりナノ粒子生成条件に関する具体的な知見を得た。

[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の開発と、実用化に向けた試験を実施した。

(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、トンネル切羽での落石の危険度評価に向けたレーザー打音・超音波技術の研究を進めた。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遠隔劣化診断技術を開発し、実際の橋梁で実証試験を実施した。

(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、海中環境の遠隔評価技術や、大気中に漏洩した微量有害物質分析技術を開発した。また、原子力発電所の原子炉格納容器（PCV）からの気相漏洩検知に向けたシアログラフイー技術を開発した。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・海中レーザー計測による脱炭素への貢献
- ・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
- ・短パルスレーザーを用いた 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の解明に関する研究、光を利用した選択的元素分離、レアメタル回収手法の開発を進めた。

(1) 光応答性酵素の機能研究

光を利用して DNA 修復機能を示す酵素の酵素内電子移動メカニズムを、理論解析により明らかにした。

(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

水溶液中ランタノイドイオンの光酸化に関し、レーザー波長や光強度など反応を効率化する照射条件について検討した。

[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耐力データを取得するとともに、ハフニウムをはじめとする酸化物材料について損傷試験を実施し、高耐力化の方策を検討した。

(2) レーザー損傷評価試験の自動化

光学素子・材料のレーザー損傷試験の自動化をめざしてプラズマ発光を利用する手法を検討し、損傷検出感度向上の指針を得た。

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 41 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)
- (7)追尾型地上レーザによる宇宙デブリの超解像監視技術の開発
(内閣府 文部科学省ほか 宇宙戦略基金事業)

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、6 件の受託研究を実施した。(公募によるものを除く)

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 6 年度の研究成果を報告する研究成果報告会 (ILT2025)を開催した。

- ・ 7 月 16 日 マイドームおおさか
- ・ 11 月 11 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'2025 (レーザーEXPO) 4 月 23 日～25 日 パシフィコ横浜
- ・ 光・レーザー関西 2025 7 月 16 日～17 日 マイドームおおさか
- ・ InterOpto 2025-光とレーザーの科学技術フェア 11 月 11 日～13 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2件の国際会議へ参加した。

(1) OPIC 2025 (4月23日-25日、パシフィコ横浜)

(2) SPIE Remote Sensing 2025 (9月13日-20日、スペイン・マドリード)

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6年度の研究成果を年報にまとめ、刊行した。

・「ILT2025 年報」(2024～2025) (令和7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7年度の第16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

光産業創成大学院大学 特任教授 北川米喜 氏、准教授 森 芳孝 氏
「繰り返し方式レーザー核融合実験の先導的研究」

Ⅳ 法 人 ・ 組 織 活 動

1. 研究不正防止活動

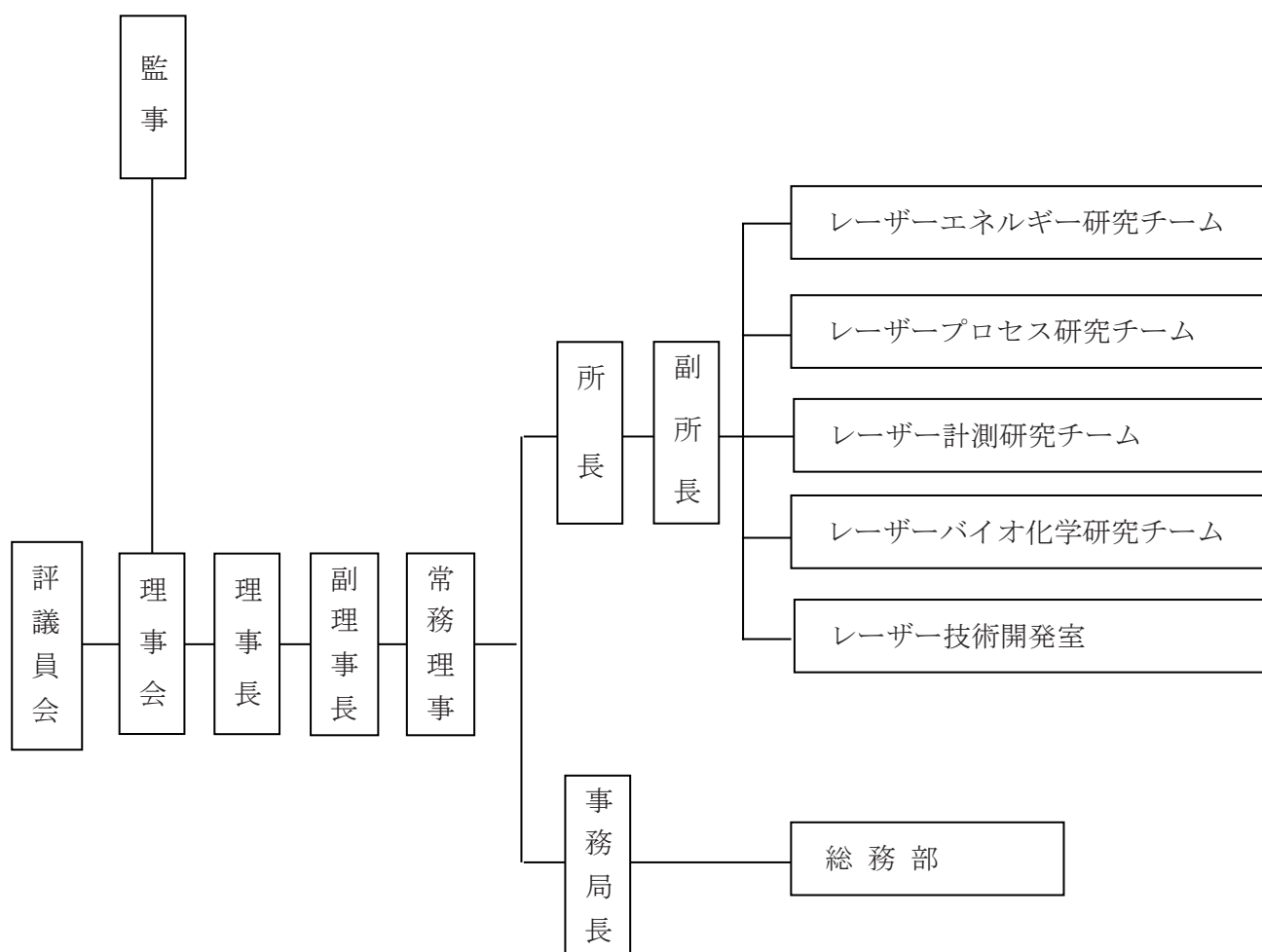
文部科学省の「研究機関における公的研究費の管理・監査のガイドライン（実施基準）」（令和 3 年 2 月 1 日改正）、「研究活動における不正行為への対応等に関するガイドライン」（平成 26 年 8 月 26 日策定）をもとに定めた研究活動上の不正行為の防止等に関する規程等にもとづき、不正防止活動を行った。

（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8年7月現在)

構 成 員 一 覧

理事長
副理事長
常務理事

栗野 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
主席研究員
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
主席研究員
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
磯谷舟佑
猪口和彦

【レーザーバイオ化学研究チーム】

主席研究員
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】

チームリーダー
研究員
研究員

井澤靖和（兼務）
坂本高保
畑山 淳

◇総務部

事務局長
総務部長
マネージャー
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
山澤 博
藤田淑子
林 絢子
片岡紀子

【特別研究員】

元東京工業大学
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
元大阪大学先導の学際研究機構
元公益財団法人レーザー技術総合研究所

糟谷紘一
中島信昭
中塚正大
宮永憲明
大道博行
内田成明
Pikuz Tatiana
本越伸二

（令和8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	助教	柴田一範
大阪大学レーザー科学研究所	助教	南部誠明
大阪大学レーザー科学研究所	招聘教授	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	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	中野人志
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
近畿大学生物理工学部	講師	三上勝大
元近畿大学理 教授		橋新裕一
千葉工業大学	教授	藤本 靖
千葉大学環境リモートセンシング研究センター	名誉教授	久世宏明
千葉大学大学院工学研究院	准教授	椎名達雄
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
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所	主任研究員	櫻井俊光
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
福井工業大学工学部電気電子情報工学科	教授	中井光男

福岡工業大学情報工学部	教授	中村龍史
国立研究開発法人物質・材料研究機構	独立研究者	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	主幹技術員	岡田 大
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	専門業務員	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	上席研究員	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	上席研究員	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	シニアスタッフ	山川考一

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 エネルギー事業本部 発電プラント事業部 原子力事業推進室長

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	株式会社東芝 総合研究所 エネルギーシステムR&Dセンター 機械技術開発部 研究主幹
	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
	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
	中野 聡	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
	藤田雅之	公益財団レーザー技術総合研究所 副所長
	古川 学	富士電機株式会社 パワエレ営業本部 関西支社 営業第四部部長
	吉田景太	三菱電機株式会社 関西支社 発電・原子力部長 兼 原子力システム営業課長
監 事	高阪亜弓	株式会社三井住友銀行 執行役員 大阪本店営業第二部長
	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

(令和8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	株式会社東芝
一般財団法人関西情報センター	TOWAレーザーフロント株式会社
関西電力株式会社	日本電気株式会社
株式会社KANSOテクノス	浜松ホトニクス株式会社
関電不動産開発株式会社	一般財団法人光産業技術振興協会
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23社

ILT2026 年報

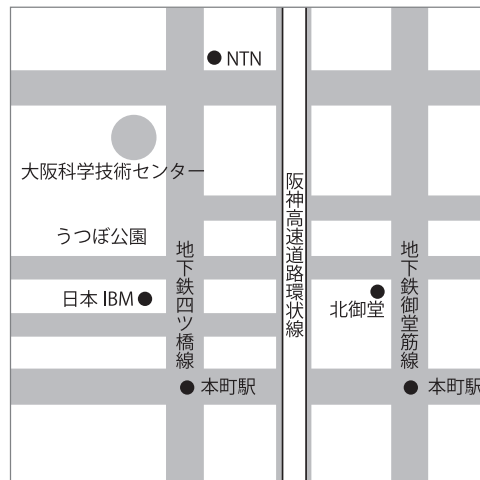
2026 年 7 月 発行

公益財団法人 レーザー技術総合研究所

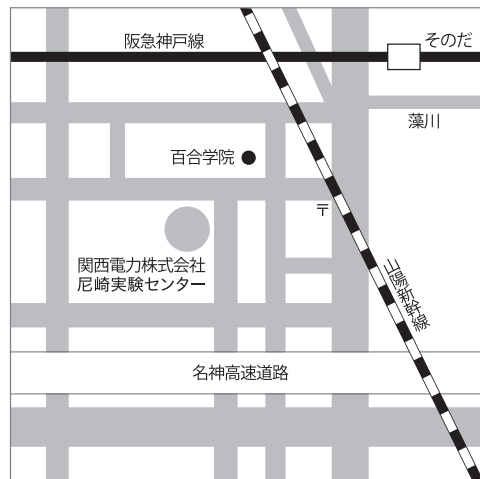
〒 550-0004 大阪市西区靱本町 1 丁目 8 番 4 号
大阪科学技術センタービル 4 F

TEL (06) 6443-6311 (代)

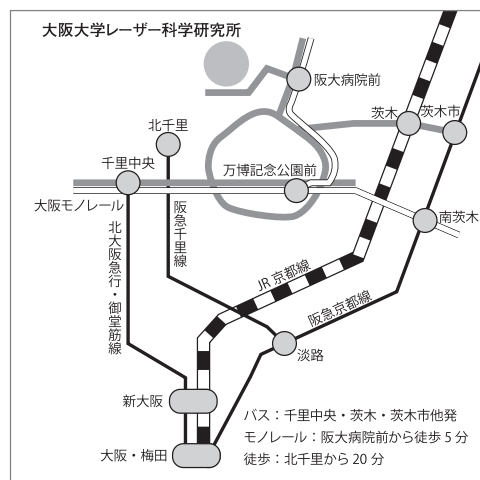
公益財団法人 レーザー技術総合研究所



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