ILT-APR Number 28 Issued:July 2016 ISSN 1340-6167



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

当研究所は、1987年の創立以来、レーザーおよ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目的として、レーザーとその応用に関す る研究開発、調査、情報の収集・提供、人材の養成などの事業を鋭意推進してまいりまし た。この間、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、心から深く感謝申し上げます。

現在、世界は大変革の時代を迎えており、近年の科学技術は、その発展とも相まって瞬 く間に経済・社会のルールを変化させ、人々のライフスタイルや社会と人間の在り方にま で影響を及ぼしています。このような環境のもと、平成28年1月に閣議決定された第5 期科学技術基本計画では、これらの激しい変化の中で、日本が科学技術イノベーションを リードし、国内問題を克服し、さらには世界の発展に寄与することが求められています。

我々は創立以来、基礎研究の結果を産業界に役立てることを使命とし、レーザーの高性 能化研究や、電力・原子力、環境・宇宙、物質・材料、生命科学、建築・土木などの幅広 い分野におけるレーザー応用研究を行ってまいりました。これらの分野の何れもがレーザ ー技術の極めて重要な要素であることは論を待ちませんが、さらに、これらの分野を越え、 時に国境を越え、研究成果の共有・相互利用を促進できるような仕組みとして専門横断的 に人と人とが繋がるチーム制を取っています。オープンなディスカッション環境で研究を 進めると共に様々な組織とのダイナミックな共同研究を通じて新たな知識や価値を創出し 広く社会に貢献する所存でございます。

そのために、当研究所は、レーザー技術開発において、未来に果敢に挑戦し、牽引的役 割を果たすべく全力で研究活動を行うと同時に、公益財団法人として、セミナーやシンポ ジウムの開催、広報誌の発行などの事業を通じ、その成果を広く情報発信することに努め ております。

この度、ここに平成 27 年度の研究成果と事業活動をまとめて、研究所年報第 28 巻を 発行することができました。何卒ご高覧の上、ご助言、ご指導くださいますようお願い申 し上げます。

平成28年7月

公益財団法人レーザー技術総合研究所 理事長 大石 富 彦

ILT2016 年報(Annual Progress Report 2015-2016)

目 次

はじめに

研究報告書

レーザーエネルギー研究チーム	
テラヘルツ波によるポリマー碍子非破壊診断	1
レーザープロセス研究チーム	
CFRP レーザー加工のパルス幅、波長依存性	5
High-power coherent beam combining (CBC): Beam quality and coupling efficiency in CBC	9
水中レーザーリモートセンシングに向けた水溶存ガスのラマン分光	15
災害現場での有害物質検知に向けたダブルパルス LIBS の開発	19
レーザー計測研究チーム レーザーを用いたインフラ構造物の健全性評価技術	22
Laser technology for remote inspection of highway bridges. Laboratory and field tests	25
レーザーによる水中コンクリート構造物内部欠陥検出技術の開発	30
コンクリート欠陥検査のためのレーザー高速掃引技術の開発	36
レーザーバイオ化学研究チーム	
	30

フェムト秒レーザー計測による D-アミノ酸酸化酵素の機能阻害効果の研究						
Carbonyl motion of the photoactive yellow protein (PYP) chromophore probed						
by ultrafast circular dichroism ········ 43						
液中レーザーアブレーションによるナノ粒子作製						
: 酸化亜鉛の還元・ナノ化と空気電池への応用 48						

理論・シミュレーションチーム

極端紫外光源スズドロップレットのダイナミクス	
高速点火における外部印加磁場の時間発展	
レーザー核融合炉液体壁チェンバー内の金属蒸気の	挙動の解析
レーザーピーニングにおける残留応力生成の解析…	

レーザー技術開発室

	誘電	፪ 体	多層腸	莫偏	お子のレーザー損傷耐性データベース
発	表論	文	リス	۲	
事	業	報	告	書	
組		織		义	
構	成	員	_	覧	
評		議		冒	
理	事		監	事	
評	, 議員	選	 定委	一日	
企	一面		委	日目	
萓	助		会	員	
お	わ		り	に	

研究報告書

テラヘルツ波によるポリマー碍子非破壊診断

レーザーエネルギー研究チーム」、レーザー技術開発室²

李 大治1、本越伸二2

1. はじめに

テラヘルツ波は周波数でいうと 0.1~10 THz、波長に 換算すると3mm~30 µm 程度で、電波と赤外光の間に 当たる領域の電磁波である。テラヘルツ波の最大の特徴 は、光と電波の両方の長所を兼ね備えていることにある。 物質中や大気中の伝播特性は電波に近く、指向性やコヒ ーレンシーを持つことから光にも近いと言える。また、 電波に比べて周波数が非常に高く、光に比べると透過特 性に優れているなど、電波や光にはない特長を持つ。そ のため、プラスチックや紙等に対する透過率が高い、生 体に害を与えない、材料物性を調べるのに有用であるな ど様々な応用が期待されている。しかし光源や検出器と もに適切なものがなかったため、電磁波利用における谷 間とも呼ばれてきた。現在、テラヘルツ波の発生方法と して、様々なものが提案されている ¹²⁾。大型のシンク ロトロン放射設備では、数10Wのテラヘルツ波の発生 に成功している。研究用としては、短パルスレーザーと 米伝導アンテナを用いた装置が、数 THz の電磁波を容 易に得られることから現在広く使用されている。また、 より小型のものとして、量子カスケード半導体素子や、 非線形光学結晶を用いた差周波テラヘルツ波発生技術 などが、積極的に研究されている。一方、テラヘルツ波 を用いた診断応用では、電子部品、医薬品、文化財など の非破壊検査装置として実用化が進んでいる。電力設備 診断においても、ケーブルの絶縁層、遮熱コーティング 層、塗装下の鋼材発錆などを対象として、先行研究が行 われている3-5)。

我々は電力設備用の絶縁材料内部の非破壊検査や半 導体内部に隠された欠陥や劣化の検査など、新しい非破 壊・非接触センシング技術に関する研究に着手した。本 稿では、反射型計測系を用いた研究の進捗状況を報告す る。

2. テラヘルツ波発生・計測装置

我々は、前年度に構築したサンプル表面にテラヘルツ 波を斜めに入射・反射させる光学系を改良して図1に示 す垂直入射・反射測定系を構築した。テラヘルツ波発生 と検出の両方にダイポール型光伝導アンテナを採用し た。フェムト秒チタンサファイアレーザー装置(波長800 nm、100fs、80 MHz)から出力された約40 mWのレーザ 一光は、半透過鏡(Splitter 1)により励起光とプローブ光 に分けられる。励起光は、アンテナの前に設置した集光 レンズ(Lens 1)により、光伝導アンテナ(Emitter)のギャ ップ (5 µm幅) に集光する。20 V (Rep. 99 kHz) のバイ アス電圧を印加することにより、テラヘルツ帯の電磁波 を発生させた。放射されたテラヘルツ波は、放物面鏡 (Parabolic mirror 1)により、平行波にした。その後、テ ラヘルツ帯半透過鏡(Splitter 2)、レンズ(Lens 2, 焦点距 離30 mm)によって、サンプルの表面に集光した。サン プルから反射したテラヘルツ波はレンズ(Lens 2)、テラ ヘルツ帯半透過鏡(Splitter 2)を通過し、放物面鏡 (Parabolic mirror 2)により検出用光伝導アンテナ (Detector)に入射させた。半透鏡によって分けられたプロ ーブ光は、時間遅延光路を通過した後、検出用光伝導ア



図1 THz波発生・計測装置概念図

ンテナ(Detector)のギャップ上に集光される。サンプルで 反射されたテラヘルツ波と検出用光伝導アンテナ上で 時間的に一致した時に微弱電流を発生する。光伝導アン テナ上のプローブ光の時間は時間遅延光路(Delay)を制 御することによって調整するため、プローブ光の遅延時 間に対する微弱電流の変化は、テラヘルツ波の時間波形 を意味する。得られた電流データは、パソコンへ転送さ れ、独自で開発したデータ収集・処理・制御用ソフトに より、テラヘルツ波電場の波形を自動的に検出し、フー リエ変換することにより周波数スペクトルを同時に得 る。更に、サンプル移動ステージ(x:10 mm、y:10 mm) と同期することにより、サンプル内部の欠陥や劣化等を イメージ化することができる。図2に実験装置のテラへ ルツ波の発生部、時間遅延光路、集光光学系、制御・解 析装置を示す。

3. ポリマー碍子内部欠陥検出実験

近年、外被材にシリコーンゴムを用いたポリマー碍 子を適用した電力機器の使用が開始されているが、有 機材からなるポリマー碍子の外部絶縁性能の経年変化 についてはまだ十分な情報が得られていない。特に、 ポリマーブッシングの FRP コアとシリコーンゴム外 皮の剥離や水分の侵入については、外観の調査では確 認できないことから、非破壊で内部の剥離等を検出す る手法の開発が望まれている。我々は、テラへルツ波

図2 実験装置写真 (a)THz 発生アンテナ (b)遅延光 路、(c)集光光学系 (d)制御・解析装置 によるポリマー碍子の内部欠陥検出を想定し、模擬欠 陥検出の測定を行った。

3.1 ポリマー碍子からの反射波計測

図3に示すように、テラヘルツ波をサンプルに照射し、 表面や界面に反射された波形を計測した。図3(a)はアル ミニウム平板で、その表面からの反射波を参照信号とし、 図4の点線で示した。厚さ4mmのシリコーンゴム平板 にアルミニウム平板を接着し図3(b)のような模擬サン プルを製作した。テラヘルツ波を入射すると、シリコー ンゴム表面からの反射波とシリコーンゴム平板とアル ミニウム平板との境界面からの反射波がある。その結果 を図4の破線で示す。サンプルに照射されたテラヘルツ 波は、シリコーンゴム表面で一部が反射された後、吸収 され強度減衰しながらシリコーンゴム内を伝搬する。4 mm厚を伝搬後、アルミニウム表面でほぼ100%反射さ



図3 サンプル照射実験。(a) アルミニウム平板 (b) シリ コーンゴム/アルミ板 (c)ポリマー碍管サンプル



図4 テラヘルツ波反射の測定結果

れ、更に吸収、減衰しながらシリコーンゴム表面へ戻り、 反射信号として検出される。そのため図4の52psに表 れる反射波信号は、4mm厚のシリコーンゴムを往復し た時間遅れと、アルミニウム表面の反射率にシリコーン ゴム内往復で減衰する強度を示す。実際のポリマー碍管 から切り出したサンプルの写真と構造を図3(c)に示す。 シリコーンゴムの厚さは同じ4mmであり、計測された 反射は図4の実線で示した。シリコーンゴムとFRP樹 脂の境界面で反射されたテラヘルツ波信号は図 3 (b)の サンプルのアルミニウム境界面からの反射強度に比べ て弱いことが確認された。シリコーンゴム表面の反射お よびシリコーンゴム内を往復したときの吸収による減 衰は、前述の図3(b)サンプルの場合と同じである。この 弱い信号強度はシリコーンゴムと FRP 樹脂の境界面の 低い反射率に依存する。2つの材料の境界面での反射率 は、それらの材料の屈折率差によって決定される。

3.2 模擬剥離、浸水欠陥

シリコーンゴムと FRP の間に剥離や水の浸透した場 合を想定し、模擬サンプルを作り、テラヘルツ波による 検出を行った。図5に製作した模擬サンプルを示す。厚 さ約1mmのアルミニウム平板に直径10mmの穴を一つ 空けた。アルミニウム板の前面に厚さ約4mmのシリコ ーンゴム板を密着し、後面の開口部をFRP樹脂で封じ、



図 5 ポリマー碍管剥離、浸水(水を封入した場合)欠 陥模擬サンプル。(a)サンプル構造(b)サンプル写 真 剥離欠陥を模擬した。また、穴の中に水を封入すること により、浸水欠陥を模擬した。図5(b)は、前後を貼り合 わせた後の模擬サンプルの外観を示す。

図6(a)はFRP樹脂で封じない場合の反射時間波形の 結果であり、シリコーンゴム板の表面(5ps付近)と裏 面(50ps付近)からの反射ピークが確認され、裏面か らの信号はシリコーンゴムの吸収により減少すること も確認できた。また、2つの反射波の時間差より、シリ コーンゴムの厚さが4.1 mm であることが算出できた (シリコーンゴムの屈折率を1.61とした)。

次に、FRP 樹脂で封じ1mmの隙間(空気)がある場 合の結果を図 6(b)に示す。シリコーンゴムの裏面反射 (48 ps 付近)と FRP 樹脂の表面反射(55 ps 付近)が完 全に分離して確認できる。2つピークの時間差より 1.01 mm の隙間であることが求まり、アルミニウム板に空け た穴の肉厚約1mmと一致することから反射波ピークの 時間差よる隙間の算出が正しいことがわかる。

さらに、隙間に水を封入した模擬欠陥では、図 6 (c) に示すように、シリコーンゴムと水の境界面からの反射 信号の位相が反転することが確認できた。また、水と FRP 樹脂の境界面からの反射信号は、テラヘルツ波が水 に吸収されるため現れない。以上の結果より、シリコー



図 6 ポリマー碍管剥離模擬サンプルの反射波時間波形。(a) シリコーンゴムのみ、(b) 1 mm の隙間(大気)、(c) 隙間 1 mm に水を封じた場合

ンゴムとFRP樹脂が完全に密着している場合に比べて、 隙間がある場合、水が浸入した場合では、反射波信号に 違いがあり、この信号を確認することにより欠陥検出が 可能である。

3.3 金属異物検出

図7(a) に示すように、ポリマー碍管内部に金属針(直 径-0.7 mm) を埋設したサンプルを一次元走査した場合 のテラヘルツ反射波を計測することで金属探知の可能 性を確認する実験を行った。走査は図7(a)中の点線のよ うに、幅4.5 mm、測定間隔0.1 mm で行った。シリコー ンゴムには、高周波数の成分が透過しにくいため、低周



図 7 ポリマー碍管の異物の一次元走査測定。(a)模擬ポ リマー碍管欠陥サンプル、(b)走査反射振幅イメー ジ(ノイズ除去後)



図8 金属針部分(43 ps)の反射強度分布

波数 0.25 THz の成分を抽出して画像を行った。結果を 図7(b)に示す。時間 10 ps 付近にシリコーンゴム表面か らの反射波、時間 42 ps 付近に金属針からの反射波が確 認できる。反射波が現れた走査位置および表面波からの 時間差より、金属針の埋設位置と太さを求めることが可 能である。金属針からの反射強度プロファイルを図 8 に示す。これにより、測定された金属針の反射波の幅は、 約 1.68 mm で、実際の針の大きさ(直径-0.7 mm)より も大きい。この原因は、シリコーンゴムを透過できる低 周波数成分のみを用いたことで空間分解能が低下した ためである。また、材料の内部であることから、屈折率 の影響でテラヘルツ波の収束径が大きくなったことも 原因と考えられる。

4. まとめ

テラヘルツ波反射測定装置を構築し、ポリマー碍子の 反射特性を研究すると共に、掃引走査装置を導入するこ とによりサンプルの模擬欠陥検出が可能であることを 明らかにした。今後、信号/ノイズ比の向上を図るとと もに、実際のポリマー碍管の内部診断を行い装置の安定 性、精度を評価する。

本研究は、関西電力からの受託研究により実施された。 また THz-TDS 装置構築および測定解析について、大阪 大学レーザーエネルギー学研究センターの中嶋誠氏、高 野恵介氏に多大な御指導を頂いた。この場を借りて感謝 したい。

参考文献

- テラヘルツテクノロジーフォーラム編: テラヘルツ技術総 覧,NGT, 東京, 2007.
- 西澤間 編著: テラヘルツ波の基礎と応用,工業調査会,東京, 2005.
- 3) 福地哲生他: 電気学会論文誌 A, 132, 166-172, 2012.
- 4) 布施一則他: 電気学会論文誌 B, 134, 745-748, 2014.
- 5) N. Fuse, et al.: IEEE Trans THz Sci & Tech, 2, 242-249, 2012.

CFRP レーザー加工のパルス幅、波長依存性

レーザープロセス研究チーム

藤田雅之、染川智弘、大河弘志¹、大塚昌孝¹、松谷貴臣¹、前田佳伸¹、宮永憲明² ¹近畿大学理工学部、²阪大レーザー研

1. はじめに

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic:炭素繊維強化樹脂) は軽量、高剛性、高耐力といった特徴を持つ複合材料として注目されており、幅広い産業分野で用いられている¹⁾。特に、自動車/航空機産業においては、車体/機体の軽量化による燃費の向上や排出ガスの抑制が実現している。CFRPの用途をさらに拡大するためには、炭素繊維の低コスト化と共に、素材へのダメージが少なく、高品質な加工が可能な技術の確立が重要となってきている。

我々は、CFRP に対するパルスレーザー加工の適用可 能性について研究を進めてきた²⁹。CFRP のレーザー加 工においては、加工速度の向上と共に熱影響を最小限に 抑えることが求められ、加工品質の最適化のためには、 レーザー波長、パルス幅への依存性を明らかにすること が重要となる。

本稿では、これまで7年間に亘って行ってきた CFRP のパルスレーザー加工実験結果を取りまとめ、レーザー 波長、パルス幅への依存性を考察する。用いたレーザー の主な仕様を図1に示す。各枠内の上段に平均パワー、 下段に繰り返し周波数を記入している。平均出力と繰り 返し周波数は様々であるが、パルス幅は100 fs から 20 ns





まで、波長は266 nm から1064 nm までをカバーする範囲で実験を行ってきた。

加工試料における熱影響は、試料表面/裏面の電子顕 微鏡像(SEM像)において(樹脂だけが蒸発して)炭 素繊維が露出した領域の大きさで評価した。また、様々 なレーザーを用いた実験結果を定量的に比較するため に、単位照射エネルギー当たりのCFRP除去質量で定義 される指標(単位:mg/kJ)を加工効率として導入し評 価を行った。

2. CFRP 切断実験条件

表1に図1で示すレーザーを用いて実験した際の代表 的なパラメーターを示す。複数年に亘って実験を行った ため実験配置やCFRP 試料が異なるが、概ね4通りに分 けられ(表1の実験配置A~D)、以下に概要を述べる。 試料の設置は図2に示す様に、(a)低速掃引の場合は直 進ステージ上に固定し、(b)高速掃引の場合は高速モー ター上に固定した。いずれの場合も大気中でアシストガ ス無しで切断加工を行った。

実験配置 A では、チタンサファイアレーザーを用い て直進ステージ上に置かれた 1.3 mm 厚のクロス CFRP 板の溝掘り加工を行った。CFRP 除去量は溝の幅と断面 積から求めた。

実験配置 B では、波長/パルス幅が 266 nm/35 ps のレ ーザーを用いて高速モーター上に固定された 250 µm 厚 の一方向 CFRP を円形に切断した。直径 20 mm の CFRP



図2 試料の固定法:(a) 低速掃引、(b) 高速掃引

	パルス幅	波長	平均パワー	繰返し周波数	スポット径	掃引速度	照射強度	実験
						mm/s	W/cm ²	配置
(a)	100 fs	800 nm	0.2 W	1 kHz	100 µm	17	2.7×10 ¹³	А
(b)	35 ps	266 nm	2.0 W	100 kHz	60 µm	1500	2.1×10 ¹⁰	В
(c)	200 ps	800 nm	0.4 W	1 kHz	100 µm	17	2.7×10 ¹⁰	А
(d)	2 ns	355 nm	45.0 W	1550 kHz	24 µm	37200	3.4×10 ⁹	С
(e)	10 ns	355 nm	43.0 W	200 kHz	24 µm	4800	5.0×10 ⁹	С
(f)	10 ns	532 nm	3.0 W	10 kHz	18 µm*	1500	1.2×10 ¹⁰	D
(g)	20 ns	1064 nm	3.0 W	20 kHz	27 µm*	1500	1.4×10 ⁹	D

表1 実験条件:(a)~(d)は図1に対応。

ディスクが抜け落ちる時間を測定し、切り幅はレーザー 集光径と同じであると仮定して除去量を算出した。

実験配置 C では、波長 355 nm のナノ秒レーザーを用 いて250 µm 厚の一方向 CFRPのスリット加工を行った。 ガルバノミラーを用いて試料上でレーザーを直線掃引 し、炭素繊維と垂直方向にスリットを形成した。試料表 面と裏面のスリット幅から除去量を算出した。 実験配置 D では、波長 532 nm と 1064 nm のナノ秒レ ーザーを用いて高速モーター上に固定された 140 µm 厚 の一方向 CFRP を円形に切断した。直径 20 mm の CFRP ディスクが抜け落ちる時間を測定すると共に、試料の抜 け落ちを防ぐために円の一部をマスクした加工を行い 試料表面と裏面のスリット幅から除去量を算出した。



図3 パルスレーザーを用いた CFRP 加工のパルス幅・波長依存性

3. CFRP 切断実験結果

図3に加工試料表面のSEM像の比較を示す。全ての SEM像は同じ倍率で示してある。大雑把な比較になる が、用いたレーザーのパルス幅が短く、波長が短い程、 熱影響が小さい(炭素繊維の露出領域が小さい)事が分 かる。

ここで注意したいのは樹脂に対するレーザー光の吸 収率の影響である。図3(f)では、炭素繊維の露出は見ら れないが樹脂部がダメージを受けているように見受け られる。これは、波長 532 nm が樹脂を透過するために CFRP を切り抜く際に、(炭素繊維を切断した後に)底 面の最後の樹脂層を蒸発させるのに時間がかかりレー ザーを過剰に照射したためと思われる。一方で、1064 nm の波長も樹脂を透過するが、この場合は炭素繊維の加熱 による熱影響で裏面の樹脂が蒸発したと考えられる。こ の考察を裏付けるデータとして、図4に波長/パルス幅 が1064 nm/20 ns、532 nm/10 ns、800 nm/200 ps のレーザ ーを用いて貫通加工した試料の表面と裏面の SEM 像を 示す。図4(a), (b)は図3(g), (f)と同じSEM像であり、図 4(d), (e)は図4(a), (b)に対応した試料裏面のSEM像であ る。図4 (d)で確認できる炭素繊維の露出が図4 (e)では 見られない。532 nm 光によって炭素繊維が切断された 後に樹脂層が弱い多光子吸収によりアブレーションさ れたものと推測される。

図4(c),(f)に、波長800 nm、パルス幅200 psのレーザ ーを用いて、低パワーで加工した試料の表面と裏面の SEM像を示す。溝加工した図3(c)に比べて、1/4のパワ ー (0.1W) で貫通加工を試みた結果である。サブナノ 秒レーザーによる加工にもかかわらず表面では熱影響 が見られる一方で、裏面では炭素繊維の露出は見られな かった。532nm/10nsの場合と同様に、底面の最後の樹 脂層を多光子吸収で蒸発させるのに時間がかかりレー ザーを過剰に照射したためと思われる。

4. 加工効率の評価

前節では熱影響層の発現に関してパルス幅・波長依存性を考察したが、本節では加工効率の観点から依存性を



図4 波長/パシレス幅が、1064 nm/20 ns (a), (d)、532 nm/10 ns (b), (e)、800 nm/200 ps (c), (f)のレーザーを用いて 加工した試料の表面 (a)-(c)、裏面 (d)-(f)の SEM 像。

考察する。様々なレーザーを用いた加工結果を定量的に 比較するために、単位照射エネルギー当たりの CFRP 除 去質量で定義される指標(単位:mg/kJ)を加工効率と して評価した。簡単のために、

(i) CFRP の平均密度は 1.5 g/cm³、

(ii) CFRP の炭素繊維体積含有率は50%、

(iii) 炭素繊維に比べて樹脂を蒸発させるエネルギー は無視できる、

と仮定した。

加工試料の厚みおよび表面と裏面の切り幅、すなわち 切断部分の断面積と長さから除去体積を求め、照射パワ ーと加工時間から加工に要したエネルギーを求めた。得 られた結果を図5に示す。それぞれの円の面積は加工効 率(mg/kJ)に比例している。照射エネルギーが全て炭 素繊維の蒸発に費やされた場合の理論限界値は45 mg/kJとなる¹⁰。図5(f)の値は参考値として破線で示し ている。

全体的な傾向としてパルス幅が短く波長が短くなる

程、加工効率が高いことが分かる。図3の結果と合わせ て考えると、加工効率が高いほど熱影響が小さくなると いう結果が得られた。(d)と(f)を比較すると、同じ波長で もパルス幅が10 ns よりも2 nsの方が加工効率が高くな っているが、若干掃引速度とパルスオーバーラップの条 件の違いも影響していると思われる。(d)の場合はパル スオーバーラップが殆どゼロの状態で切断加工を行っ た。また、(b)に関しては、(c)と比べてパルス幅と波長 が短い分、加工効率が良くなると期待されたが、照射強 度に差が無いために同等の結果が得られたものと推測 される。

5. まとめ

様々なレーザーを用いて CFRP 加工における熱影響 の発現と加工効率のパルス幅・波長依存性を調べた。全 体的な傾向として、パルス幅が短く波長が短くなるほど 加工効率が高く熱影響が小さくなることが実験的に明 らかとなった。

謝辞

本研究の一部は公益財団法人天田財団平成26年度一 般研究開発助成により実施されたものであり、ここに感 謝の意を表します。また、266 nm/35 ps レーザーはスペ クトロニクス(株)から、355 nm ナノ秒レーザーはス ペクトラ・フィジックス(株)から装置を借用して実験 を行ったものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 炭素繊維協会ホームページ、
 http://www.carbonfiber.gr.jp/field/craft.html
- 藤田 雅之, 染川 智弘, 尾崎 巧, 吉田 実, 宮永 憲明: レー ザー研究, 39, 701-705, 2011.



図5 加工効率 (mg/kJ)のパルス幅・波長依存性

- 3) 藤田 雅之, 染川智弘: レーザ加工学会誌, 20, 34-38, 2013.
- 4) 藤田 雅之:光学,44,341-349,2015.
- M. Fujita, T. Somekawa, T. Ozaki, M. Yoshida, N. Miyanaga, Y. Mitooka, K. Mikame,; 29th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Anaheim, U.S.A., paper #M105, 2010.
- M. Fujita, T. Somekawa, T. Ozaki, M. Yoshida, N. Miyanaga,
 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Anaheim, U.S.A., paper #M1202, 2012.
- M. Fujita, T. Somekawa, N. Miyanaga; Physics Procedia 41, 629-632, 2013.
- M. Fujita, H. Ohkawa, M. Otsuka, T. Somekawa, Y. Maeda, Y. Orii, K. Inaba, G. Okada, N. Miyanaga; 33rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. San Diego, U.S.A., paper #M601, 2014.
- M. Fujita, H. Ohkawa, T. Somekawa, T. Matsutani, Y. Maeda, J. Bovatsek, R. Patel, N. Miyanaga; Lasers in Manufacturing. Munich, Germany, paper #158, 2015.
- R. Weber, C. Freitag, V. Kononenko, M. Hafner, V. Onuseit, P. Berger, T. Graf: Physics Proceedia 39, 137-146, 2012.

High-power coherent beam combining (CBC): Beam quality and coupling efficiency in CBC

Laser Process Research Team

Haik Chosrowjan

1. Introduction

Interest in coherent beam combining (CBC) has been motivated by the desire to obtain CW as well as pulsed laser beams with higher power, intensity and brightness not achievable from a single laser source. Different phase stabilization techniques for CBC like heterodyne, LOCSET (Locking of Optical Coherence via Single-detector Electronicfrequency Tagging), SPGD (Stochastic Parallel Gradient Descent), interferometric, frequency shift techniques etc. have been developed and successfully implemented. To date, experiments demonstrating multi-channels, multi-kilowatts combined beam power with good beam quality have been performed¹⁾. For material processing applications, we have also developed and coherently combined single mode, \sim ns pulse duration, high repetition rate (~ 1 MHz), high average power (~ 150 W) laser amplifier units based on Yb-doped, LMA (large mode area) PCFs (photonic crystal fibers)²). In our CBC implementation, binary-tree FA (filled-aperture) CBC design was preferred, because FA combination is side lobe free hence, SH and TH (second- and third harmonics) can be also efficiently generated, which are indispensable for some specific material processing applications. Previously, we have presented the principle of the phase-locking method for high-repetition rate, ~ ns pulse beams and several phase control algorithms. We have also carried out proof of principle experiments using low-power beams and demonstrated first application of the presented CBC method on high average-power \sim ns pulse beams^{2, 3)}. Summarized, we have obtained more than 400-W average output power with 75% combining efficiency in terms of combined power. There are, however, other CBC efficiency definitions in the literature, so the need arose to discuss different approaches and their

interrelation qualifying the CBC performance.

Excellent review papers on CBC covering various aspects of solid-state, fiber, semiconductor laser and MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) beam combining approaches are available^{1,4)}. So, the aim of this report is not to review the CBC system implementations, scaling laws, sensitivity analysis or methods and techniques, but specifically to address different approaches qualifying the CBC performance. Here, laser beam quality (BQ) and CBC efficiency metrics are summarized and discussed. Interrelations between laser BQ, CBC efficiency metrics and phase wavefront rms deviation σ (or variance σ^2) are elucidated. CBC efficiency degradation sources are discussed. Examples of CBC efficiency dependence on some misalignments like optical path mismatch and phase difference, pointing instability, aberrations as well as the number of combining beams, are presented. Total efficiency of the CBC is discussed.

2. Laser beam quality definitions

A widely used metric for laser BQ is the M² parameter. It is defined as the ratio of the beam parameter product (BPP = $\theta\omega_0$, where θ is the beam divergence and ω_0 is the spot radius of the beam in the focus) of an actual beam to that of an ideal Gaussian beam (BPP = λ/π) at the same wavelength λ . Note that the M² definition does not involve the beam power or intensity. Higher M² only implies that the second moment of the beam expands faster. M² is always ≥ 1 .

Strehl ratio (S) is another metric for a laser BQ characterization. It is defined as the ratio of a far-field, on axis intensity of a real beam propagating from a near-field hard aperture to that of an ideal, equal power flattop beam filling the same hard aperture. S is always ≤ 1 .

There is no exact mathematical transformation between these two BQ metrics. This basic difficulty can be explained by the fact that only one number in either definition is used to characterize a beam with spatial distribution of amplitudes and phases. Furthermore, an ideal Gaussian beam is infinite in lateral direction whereas S is defined for a finite aperture.

A generalized Strehl ratio for a beam with an arbitrarily waveform propagating from near field plane to a focal plane, can be defined without including a hard aperture⁵⁾. For Gaussian phase noise distribution one obtains:

$$S(\sigma) = \exp\left[-(2\pi\sigma)^2\right] \tag{1}$$

Here σ^2 is the Gaussian phase noise distribution variance. This is the well known expression first introduced empirically by Mahajan⁶⁾. In Eq. (1) σ is expressed in λ units. In radians it will be expressed as $\sigma_{\varphi} = 2\pi\sigma$. For $\sigma \ll 1$, Eq. (1) yields other well known approximations for S such as $S(\sigma) \cong (1 - (2\pi\sigma)^2/2)^2$ (Maréchal approximation) or $S(\sigma) \cong 1 - (2\pi\sigma)^2$. Eq. (1) holds quite well not only for uniform flattop beams but also for beams with Gaussian and super-Gaussian intensity distribution profiles. S is also insensitive to most amplitude variations and is primarily dependent on phase variations.

Although for small σ values (< λ /10) the S calculated by Eq. (1) describes rather well other aberration cases with non-Gaussian phase noise distributions (including also Seidel and Zernike aberrations), for larger σ it often underestimates the Strehl ratio for low-order Seidel and Zernike aberrations. This is because Eq. (1) is strictly valid only for random, uncorrelated Gaussian phase noise.

There are also other BQ metric definitions: (a) Power in the bucket (PIB) BQ metrics is defined as the ratio of the power within a given area (circular, rectangular or other subjectively chosen shape and size) in the far field plain to the total power of the laser; (b) BQ metrics defined as a square root of the P_{DL}/P ratio, where P_{DL} and P are, respectively, the fractions of laser power contained within a far field radius of λ /D for the actual beam and for a diffraction limited beam with a spatially uniform intensity and wavefront profiles. Here D is the near field dimension of the beam, i.e. the exit aperture of the laser. These BQ definitions are mostly used in specific applications or required for engineering and design purposes, so further details of these metrics will be not discussed here.

3. CBC efficiency

3.1 CBC efficiency definitions

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_l , defined respectively as

$$\eta_p = \frac{P_{CBC}}{\sum_{n=1}^{N} P_n}$$
(2a)

$$\eta_{I} = \frac{I_{CBC}}{\left(\sum_{n=1}^{N} \sqrt{I_{n}}\right)^{2}}$$
(2b)

Here P_n and I_n are the power and the far field on-axis intensity of the nth beam, 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.

Other metrics like FOM⁷⁾ (figure of merit) or IFC⁸⁾ (interference figure contrast) are also used, but they will be not discussed here, because they are linearly related to Eqs. (2a) and (2b) metrics, respectively. Eq. (2a) efficiency definition is often used for filled aperture (FA) CBC, where combining efficiency decreases due to losses on combiners because of not absolute destructive interference in the secondary (loss) arms. For tiled aperture (TA) CBC there are no combiners in the near field, so η_p is always 1. On the other hand, Eq. (2b) is used for both FA and TA CBC cases.

Brightness (B) is another metrics for CBC efficiency evaluation. It is defined as $B = P/(\lambda M^2)^2$, where P is the beam power, λ is the wavelength and M² is the laser BQ. Brightness accounts for both laser power and beam quality, so for physical understanding of CBC scaling laws it is helpful to think about beam combining as a brightness combining of the individual beams. However, knowing the M^2 values for individual beams does not allow to calculate or even predict the M^2 parameter for the resulting beam, so the brightness (or M^2) of individual beams is poorly suited for quantitative estimation of the CBC efficiency in real systems.

3.2 CBC efficiency degradation sources

Most CBC techniques in active feedback phase control systems deal exclusively with the piston-phase difference correction between individual beams. Although the piston-phase correction is the most critical requirement necessary for successful CBC, it is not sufficient for obtaining high CBC efficiency. Fig. 1 shows a schematic diagram describing the general CBC system with an active phase feedback control loop.

The system can be hypothetically divided into three key subunits, which have to be integrated with great care and accuracy for efficient CBC. First subunit includes seed laser power amplifiers (Fig. 1 (a), rectangle (I) shown by a broken line). This part should provide high gain, high power, high BQ, power-balanced, spatial mode-matched, co-polarized beams with preserved coherence properties of the master oscillator. The second subunit includes optical components and alignment of amplified beams (Fig. 1 (a), rectangle (II) shown by a solid line). This part should consist of optical elements manufactured with diffraction limited accuracy and provide precise geometrical alignment of the beams in the near- and far fields. The third subunit includes piston-phase control system (Fig. 1 (a), rectangle (III) shown by a dotted line). This part should compensate the optical path length mismatches and lock the phases of individual amplified beams with high precision. In real MOPA systems the amplifier arrays are not uniform (existing power variations, phase jitters, array element pointing non-uniformity, etc.). The optical elements, especially coated surfaces contribute to wavefront aberrations, and beam alignments are not perfect. So, the CBC efficiency degradation sources, even with the excellent relative piston-phase control, are errors in relative amplitude control, relative polarization control, relative element beam pointing, wavefronts of individual beams, less than unity fill factor (in TA CBC), less than ideal near field overlap (in FA CBC), etc.



Fig. 1 (a) Schematic diagram of a multichannel MOPA system with active phase feedback control loop CBC, (b) TA CBC and (c) FA CBC geometries, respectively.

The effects of the phase noise and other errors on TA CBC implementation have been discussed and analyzed elsewhere¹), so here the example analysis will be restricted only to the FA CBC scheme. Let's consider a FA CBC case of pulsed beams with temporal overlap mismatch and piston-phase error. In that case, the CBC efficiencies in terms of η_p and η_I are respectively given by the following expressions⁸

$$\eta_{\rm p}(\sigma_t, \sigma_{\varphi}, {\rm N}) = \frac{1}{{\rm N}^2} \left({\rm N} + \frac{{\rm N}({\rm N}-1)}{\sqrt{1+4ln2\frac{\sigma_t^2}{\tau^2}}} \exp\left[-\sigma_{\varphi}^2\right] \right)$$
(3a)

$$\eta_{I}(\sigma_{t},\sigma_{\varphi},N) = \frac{1}{N^{2}} \left(\frac{N}{\sqrt{1 + 8ln2\frac{\sigma_{t}^{2}}{\tau^{2}}}} + \frac{N(N-1)}{1 + 4ln2\frac{\sigma_{t}^{2}}{\tau^{2}}} \exp\left[-\sigma_{\varphi}^{2}\right] \right)$$
(3b)

In Eqs. (3a) and 3(b) τ is the Gaussian pulse FWHM, σ_t^2 and σ_{φ}^2 are the pulse delay time variance and piston-phase variance (in radians), respectively, and N is the number of channels. For $\sigma_t = 0$ (perfect temporal overlap of the pulses) or in CW case ($\tau \rightarrow \infty$), η_p and η_1 coincide. For pulse beams, η_p and η_1 generally differ (Fig. 2). Eqs. (3a), (3b) and Fig. 2 also show that as shorter the pulses as higher requirements on temporal

overlap accuracy (i.e. optical path length $\sigma_l = c\sigma_i$ adjustment, where c is the velocity of light) of the pulses. CBC efficiency degradation examples calculated numerically for four pulse beams (Fig. 2(b)) also indicate that the CBC efficiency measured in terms of energy (η_p) will be always higher and degrade more gently compared to the efficiency in terms of far field on-axis intensity (η_l) measured for the same system.

Let's consider another case example for FA CBC pointing instability. For FA combining, pointing errors result in phase difference changes across combiners and consequent energy losses. In case of the pulsed Gaussian beams with negligible temporal overlap- and piston-phase errors, the CBC efficiencies for $\sigma_{\psi} = 0$ (perfect pointing), η_p and η_l coincide, otherwise η_p and η_l differ (Fig. 3).



Fig. 2 (a) CBC efficiency (η_p) degradation for N = 4; 1 ns FWHM pulse beams; (b) comparison between CBC efficiencies (N = 4, σ_{φ} = 0) for 1 ns ($^{1ns}\eta_1$ and $^{1ns}\eta_p$) and 3 ns ($^{3ns}\eta_1$ and $^{3ns}\eta_p$) pulse beams, respectively.



Fig. 3 Comparison between CBC efficiencies η_l and η_p for N = 8 pulse beams vs. the root-mean squared (rms) error σ_{ψ} of the beam pointing, respectively. θ is the FWHM beam divergence for a Gaussian beam.

As in the previous example, in this case too, the CBC efficiency measured in terms of energy (η_p) is always higher and degrades more gently compared to the efficiency in terms of far field on-axis intensity (η_1) measured for the same system. For Gaussian beams, the FWHM beam divergence is given by $\theta = 4\ln 2/(k_0D_0)$, where k_0 is the wave number and D_0 is the FWHM of the beam diameter in the near field. From Fig. 3 one can conclude that as larger the collimated beam diameter (smaller divergence), as stricter requirements on pointing stability, i.e. smaller instability (σ_{ψ}) is required. Hence, beam pointing stability is one of the most critical parameters for high power, high efficiency CBC implementation.

Aberrations (beam wavefront distortions) are another source of CBC efficiency degradation. Usually, decomposition of wavefront distortions on Zernike polynomials are used to analyze their influence on CBC efficiency. It is important to note that errors in relative piston phase and far field beam pointing already discussed above, are equivalent to first three Zernike polynomials: piston, tip and tilt wavefront deformations in the near field. Hence, these distortions can be expressed also in terms of wavefront rms error σ . Generally, influence of aberrations on CBC efficiency is analyzed numerically in case by case bases, because in each given experimental setup the Zernike polynomial terms and their amplitudes in different channels may considerably differ from each other. CBC efficiency calculation examples for individual Zernike terms (coma, astigmatism, etc.) i.e. identical aberration types but with different amplitudes in each channel, different channel numbers and intensity profiles (Gaussian, super-Gaussian, flattop) were presented by Leshchenko⁸). Rather large discrepancy between CBC efficiency (both η_p and η_i) dependences on phase wavefront rms deviation σ_a for different types of aberrations was recognized. For instance, irrespective of beam intensity distribution profile, the CBC efficiency degradation on σ_a is more severe for spherical aberration compared with astigmatism. On the other hand, for large channel number N>>1 and small $\sigma_a \ll 1$, irrespective of aberration type the CBC efficiencies η_p and η_I both can be expressed by $1 - \sigma_a^2$.

Finally, the phase noise aberrations due to the combining optical components have to be considered. For high average power CBC case, together with the phase-front deformations caused by amplifiers and scattering losses, all optical components such as beam splitters, polarizers and mirrors, could also introduce wave-front distortions, further reducing the combining efficiency. This was analyzed for binary-tree, FA CBC case. For instance, two beams passing through the same beam splitter or reflected by the same mirror will see the same phase front deformation (correlated case). On the other hand, two beams combining at a beam splitter, where one is transmitted and the other one is reflected, see different phase front deformations (uncorrelated case). The analysis below is restricted to the second scenario, and the CBC efficiency in that case is expressed by the following relation:

$$\eta_{I}(\sigma_{a}) = 1 - \left(\frac{n-1}{2} + 2^{-n-1}\right)\sigma_{a}^{2}$$
(4)

Here n = log₂N, N is the number of the beams and σ_a^2 is the wavefront deformation variance. Examples of CBC efficiency η_I dependence on σ_a for N = 4, 8 and 16 beams are presented in Fig. 4. One can see that the CBC efficiency at constant σ_a reduces as the number of beams increases. Hence, for large number of beams it is critical to use high quality optics for FA CBC.



Fig. 4 CBC efficiency η_I dependence on phase wavefront rms deviation σ_a induced by optical components for N = 4, 8 and 16 beams, respectively.

Optical components will induce not only wavefront distortions, but also pointing mismatch due to imperfect alignment of the beams. Hence, for a given setup and alignment, using Strehl ratios of individual beams measured before the CBC unit will always overestimate the CBC efficiency, while individual beam diagnostics (S ratio measurements) at the output of the CBC optical system will allow more accurate calculation of the CBC efficiency.

The natural goal of each CBC system is to achieve highest possible combining efficiency, so in practice efforts are made to obtain quite similar MOPA channels in their characteristics, in addition to low level of errors and misalignments in each channel. So, for quantitative estimation of the CBC efficiency, it is sufficient to deal with the cases where σ for each parameter is small and approximately equal for each channel. In this case, the total CBC efficiency under the presence of all mismatches becomes a product of the individual impacts of those instabilities: $\eta_{total} = \Pi_i [\eta(\sigma_i)]$. For achieving highest possible CBC efficiency, even small misalignments have to be controlled and minimized.

4. Discussion

As it was shown by several examples presented in the previous Section, CBC efficiency defined in terms of energy and far-field on axis intensity, both can be expressed by the misalignment variance of the given parameter. On the other hand, recalling the M² parameter, we note that in contrast to Strehl ratio S, there is no mathematical relation between M² and the phase wavefront deviation rms (or variance). That means that using M² parameters of individual beams for CBC efficiency calculation is impossible. For example, combined BQ of FA CBC of two beams with the same M² will be always better or at least equal to the input beams M², because FA CBC process itself constitutes a "spatial coherence filtering" process. However, FA CBC efficiency of two beams with the same M² cannot be predicted; it may result unity of CBC efficiency in terms of energy if fully correlated common path

aberrations are present, or another value smaller than one, depending on the type of non-correlated aberrations present in each channel. Similarly, CBC efficiency in terms of far-field on axis intensity will be unpredictable if only M² parameters of individual beams are knows. In contrast, knowledge of individual beams S ratios makes possible predicting the CBC efficiencies, because generalized Strehl ratio S, which is identical to CBC efficiency definition η_I , can be expressed by the wavefront deformation variance. Qualitatively, efficiency of CBC decreases as S decreases (σ increases). Quantitatively, the CBC efficiency degradation can be estimated in case by case bases. Most parameter mismatches (except for piston phase error) can be expressed by corresponding beam wavefront deformation components. Hence, Eq. (1) describes η_I for small σ quite well irrespective of the aberration type, while for larger σ different aberrations contribute differently to the n_I degradation.

5. Conclusions

In conclusion, it was shown that for CBC purposes, characterizing the beams with generalized Shrehl ratio is more appropriate because it is related to the phase wavefront deformation variance and accounts for both beam quality and CBC efficiency. In contrast, M² parameter is not related to

phase wavefront variance, characterizes only the beam quality in terms of divergence angle and cannot be used for CBC efficiency estimation. CBC efficiency degradation sources were discussed. Examples of CBC efficiency dependence on some misalignments were presented. In particular, for large diameter beams often used in high average power lasers, except for piston phase correction, pointing stability is one of the most critical parameters for high efficiency CBC implementation.

References

- A. Brignon (Ed.): Coherent Laser Beam Combining, Wiley–VCH, p. 498, 2013.
- H. Chosrowian, T. Kitamura, S. Taniguchi, M. Fujita, and Y. Izawa: ILT Annual Progress Report, ILT, 11–16, 2015.
- H. Chosrowian, S. Taniguchi, M. Fujita, and Y. Izawa: ILT Annual Progress Report, ILT, 11–14, 2014.
- T. Y. Fan: IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 11, 567-577, 2005.
- 5) T. S. Ross: Appl. Opt. 48, 1812-1818, 2009.
- 6) V. N. Mahajan: J. Opt. Soc. Am. 72, 1258-1266, 1982.
- A. Klenke, E. Seise, J. Limpert, and A. Tünnermann: Opt. Express 19, 25379–25387, 2011.
- 8) V. E. Leshchenko: Opt. Express 23, 15944-15970, 2015.

水中レーザーリモートセンシングに向けた水溶存ガスのラマン分光

レーザープロセス研究チーム

染川智弘、藤田雅之

1. はじめに

日本の領海・排他的経済水域は国土面積に比べて 12 倍程度と広く、海底鉱物資源・メタンハイドレート掘削、 CO₂を海底地層に圧入して大規模削減を目指す CCS(Carbon dioxide Capture and Storage)等の有効な海底 利用が計画されている。海底開発では資源探査手法の開 発だけでなく海洋生態系・環境への影響評価が必要とさ れている。現状の採取・採水測定では頻度とエリアに限 度があり、海中での効率的なモニタリング手法の開発が 必要である。そこで、海底を効率よくモニタリングする ために、レーザーを用いたリモートセンシング技術であ るライダーを利用した海中モニタリング技術を開発し ている。これまでに水に溶存している CO2 ガスのラマ ン信号を用いて、20 m 先に設置した水と炭酸水の識別 実験に成功し、水溶存ガスのラマンライダーによって海 中のガスモニタリングが実施できる可能性を示した ¹⁾。 また、水に溶存している CO2 ガス濃度の定量評価にも 成功し²⁾、気泡・海水の影響評価も行っている³⁾。

これまでは扱い易い CO₂ ガスを用いて水溶存ガスラ マンライダーの開発を実施してきたが、CO₂ガスでは実 際に海中でのモニタリング試験を行うための最適な観 測サイトが日本にはない。鹿児島湾北部のたぎりサイト は 77~92.6%と高濃度の CO₂ ガスを含む噴気活動があ るが、水深が 200 m と深く、実験を実施するのが困難で ある。一方、石垣島を中心とした八重山諸島にある竹富 島には水深が 20 m と比較的浅い箇所からメタンガスを 70%程度含む火山性ガスの湧出がある。そこで、水溶存 メタンガスを指標とした水中ガス漏えいモニタリング のナチュラルアナログ研究を開始した。本報告では波長 355 nm のレーザーを用いた水溶存 CO₂・メタンガスの ラマン分光実験の結果と、ラマン分光測定時の海水の及 ぼす影響評価について報告する。

2. 水中ガスのラマン分光実験

図1に実験配置図を示す。これまでの水溶存 CO2ガ スのラマン分光には水の透過率が比較的高い波長 532 nmのレーザーを用いていたが、メタンガスのラマン信 号は約629 nm に観測されることになり、得られるラマ ン散乱光の水による減衰が大きい (水 1m 伝搬で透過率 は約73%)。そこで、メタンガスへの応用には波長355 nmのレーザーを利用した。レーザー光 (パルス幅 10 ns、 繰り返し10Hz、パルスエネルギー60mJ)を高圧チャン バーに入射させ、レーザーの透過方向から 15°の位置 でラマン散乱信号を取得した。散乱光は波長355 nmの エッジフィルターを通してレイリー光を除去した後、バ ンドルファイバーで分光器に導入した。水溶存ガスのラ マンスペクトルの測定には電子冷却 CCD カメラ付き分 光器を用いた。CCDカメラの露光時間は80msであり、 3000 回積算信号の5回平均のスペクトルを取得した。 測定の波長分解能は0.19 nm である。

高圧チャンバーはステンレス製で10 MPa まで耐圧が あり、300 ml までの水を入れることが可能である。チャ ンバーは厚さ11.5 mmのサファイア窓を4面備えており、 窓の開口径は23 mm である。波長 532 nm のレーザーを 使用した際は、サファイア窓からの蛍光が生じ、ラマン スペクトルの測定を妨害していたが、波長 355 nm のレ ーザーでは蛍光が生じないことがわかった。ガスボンベ



図1 実験配置図

圧を利用し、高圧の CO₂・メタンガスを高圧チャンバー に導入した。今回の実験での印加圧力は1 MPa 以下と した。圧力の微調整にはガスの入出射のニードルバルブ を用いた。圧力モニターには、アナログ、デジタルの両 方の圧力計を用いており、温度も熱電対を用いて同時に モニターすることが可能である。ガスは接している水の 表面から溶解するため、チャンバー中の水を羽根で 5 分間程度撹拌させることによって均一にガスを溶解さ せている。

3. 水中ガスのラマンスペクトル

図2に水溶存 CO₂、メタンガスのラマンスペクトルを 示す。図2(a)は1 MPa 程度の圧力での CO₂ガス、水溶 存 CO₂ガス、メタンガス、水溶存メタンガスのラマン スペクトルである。図2(b)、(c)はそれぞれ水溶存 CO₂、 メタンのラマンスペクトルであり、比較のためにガス状 態のラマンスペクトルも示してある。また、図2(c)のメ タンではメタンガスを溶存させる前の大気中で放置し ていた水のラマンスペクトル (Air) も示してある。

3405 cm⁻¹に見られる大きな信号が水の伸縮モードの

信号であり、1635 cm⁻¹に見られる信号が水の変角モー ドのラマン信号である。1289、1390 cm⁻¹に見られる信 号が CO₂ ガスのラマンスペクトルであり、水に溶存さ せると、それぞれ 1280, 1384 cm⁻¹にシフトしている(図 2(b))。また、2897 cm⁻¹に見られる信号がメタンガスの ラマンスペクトルであり、水に溶存させることで 2892 cm⁻¹にシフトしている(図2(c))。メタンガスのラマン 信号は信号強度の大きな水の伸縮モードの裾部分に観 測されるために、信号の分離が難しいことがわかる。ま た、CO₂、メタンガスはガス状態から水溶存状態になる ことで短波数側にシフトすることがわかった。

ガス状態での CO₂ ガス (1390 cm⁻¹)、メタンガス (2897 cm⁻¹) のラマンスペクトルを比較すると、ラマン散乱断 面積が大きいメタンガスは約 13.9 倍大きなラマン信号 が得られている。一方で、20°Cの水に対する CO₂ ガス、 メタンガスの溶解度はそれぞれ 0.88、0.033 であるため に、水溶存メタンガスのラマン信号はメタンガスの 1/66 程度となり、信号の判別が困難である。

水溶存メタンのラマン信号測定は難しい可能性があ るが、気泡として湧出する竹富島の海底温泉のように、



図2 水溶存CO2・メタンガスのラマンスペクトル

ラマン信号強度が大きなメタンガス気泡と共存する観 測系では観測が可能であると考えられる。

4. ラマン分光測定における海水の影響評価

ラマン散乱光は非常に微弱であるために、試料から蛍 光が生じる場合は測定を妨害することがある。そこで、 実際の海中環境を模擬するために、標準海水(IAPSO standard seawater (OSIL))に波長 355, 532 nm のレーザー を照射し、海水に含まれる有機物の蛍光が生じないかを 検討した。

図3に実験配置図を示す。標準海水に波長355,532 nm のレーザーを照射し、後方から散乱光を取得した。それ ぞれの波長に対するエッジフィルターを挿入し、大きな 迷光成分となるレイリー光はカットした。使用した分光 システムは浜松ホトニクス社製のPMA であり、露光時 間19 ms、積算回数100 回、波長分解能2 nm でスペク トルを取得した。

図4に波長355,532 nmのレーザー照射によって得ら れた散乱信号を示す。波長355 nm(左)、532 nm(右) のレーザー照射に対して、それぞれの波長のフィルター でカットしきれていないレイリー光と波長408 nm、650 nmに水の伸縮モードのラマン散乱信号が見られる。ラ マン信号よりも強度が大きいと予想される蛍光の信号 は観測されていない。本実験で使用した標準海水は、天 然の海水を濾過してゴミを取り除き精製した標準海水 なので、通常の海水に含まれる有機物等は含まれている が、355,532 nmのレーザー照射で有機物による蛍光は 見られないことがわかった。しかしながら、濾過等で取 り除いた成分により蛍光が生じる可能性があるために、 実際の海水でも蛍光の影響評価が必要ではないかと考 えられる。

5. まとめ

海底開発における海中の環境影響評価を効率的に実施するために、水中にあるガスのラマンライダーによる 海中モニタリング手法の開発を行っている。竹富島の海底温泉ではメタンガスを主成分とする火山性ガスの湧





による散乱信号

出があり、そのメタンガスのラマン信号から本手法の適 用可能性を検討する海上観測を計画している。

水溶存メタンのラマン信号は2892 cm⁻¹に見られるが、 これは信号強度の大きな水の伸縮モードの裾部分に観 測されるために、水への溶解度が小さいメタンガスでは 信号の分離が難しいことがわかった。しかし、気泡とし て湧出する竹富島の海底温泉のように、ラマン信号強度 が大きなメタンガス気泡と共存する観測系では観測が 可能であると考えている。また、海水にレーザーを照射 すると海水に含まれる有機物等によりラマン測定を阻 害する蛍光が生じる可能性があるが、波長355 532 nm のレーザーを標準海水に照射しても蛍光が生じないこ とがわかった。

今後はこれまでの研究成果を基に、現場で使用できる 船舶設置型の水中溶存ガスラマンライダーを作製する。 その装置を用いて実際に海上観測を実施し、本手法の海 中モニタリングへの適用可能性を検討する予定である。

参考文献

- 1) T. Somekawa, A. Tani, and M. Fujita: Appl. Phys. Express, 4, 112401, 2011.
- 2) T. Somekawa, and M. Fujita: Proc. of ILRC26, S10-06, 2012.
- T. Somekawa, T. Takeuchi, C. Yamanaka, and M. Fujita: Proc. of SPIE, 9240, 92400J, 2014.

災害現場での有害物質検知に向けたダブルパルス LIBS の開発

レーザープロセス研究チーム

染川智弘、大塚昌孝¹、前田佳伸¹、藤田雅之 ¹近畿大学理工学部

1. はじめに

米国炭疽菌事件、地下鉄サリン事件等の生物・化学テ ロや化学工場事故等の、どのような有害物質が発生して いるかわからない CBRNe (Chemical, Bio, Radioactive, Nuclear, explosive) 災害現場において、安全かつ速やか に有害物質を検知・識別することは、除染作業、負傷者 への治療、二次被害の拡大を防ぐ点から非常に重要であ る。従来の分析手法では、サンプルを直接採取して、研 究所に持ち帰り、前処理を施したサンプルを分析してい たために、迅速な事故対応を取ることが困難であった。 また、携帯型の検知・分析機器も登場しているが、現場 でのサンプリングの必要があり、作業員の安全を確保す るためには、数十m~数百m離れた位置から測定を行 う必要がある。そこで、レーザー誘起ブレークダウン分 光 (LIBS: Laser Induced breakdown Spectroscopy) 法を用 いた災害現場で発生する有害物質を遠隔で同定・識別す る手法の開発を行っている」。

LIBS 法は、被測定対象物質に短パルスレーザーを照 射して発生したプラズマを分光測定することで、その場 でリアルタイムに物質の元素の分析が可能な手法であ る。気体・液体・固体といった物質の状態に依らず分析 が可能であり、検出下限も ppm オーダーであるため、 災害現場で発生する種々の有害物質の分析が期待でき る²。また、100m程度離れたCu、Al等のLIBS法によ る成分分析が実施されおり³、LIBS法を用いると遠隔 で有害物質を同定・識別することが可能である。しかし ながら、有害物質は気体、エアロゾル状態で存在するこ とも考えられるため、測定対象の濃度が薄い有害物質を 遠隔で計測する場合は、LIBS信号の検出感度の向上が 必要である。LIBS法で一般的に用いられるナノ秒レー ザーと比較して、フェムト秒レーザーを用いれば、レー ザー自身と生成したプラズマが相互作用しないために 検出感度が向上することが報告されている⁴。本研究で は、さらにLIBS 信号を増加させるために、フェムト秒 ダブルパルス LIBS 法を採用した²⁾。ある時間間隔を持 った二つレーザーパルスを連続で試料に照射するダブ ルパルス法では、1 つ目のレーザーパルスでプラズマを 生成し、2 つ目のレーザーパルスでプラズマを再加熱す ることで、LIBS 信号を増強させることが可能である。 マイケルソン干渉計の光学配置で生成したフェムト秒 ダブルパルス LIBS 計測では、Cu の LIBS 信号強度を 3 ~5 倍程度増加させることに成功している⁵⁰。

本研究では従来の干渉計型のダブルパルス光学配置 よりもレーザーの利用効率が高いポラライザーを用い た光学配置によるダブルパルス LIBS 実験結果を報告す る。

2. ダブルパルス LIBS 実験

図1にダブルパルスLIBS実験の光学配置図を示す。 使用したレーザーは波長800 nm、パルス幅100 fs、繰り 返し周波数10 Hz、レーザー出力150 µJであり、焦点距 離100 mmのレンズで試料であるCu板に照射した。試 料は過去の文献でも使用されるCu板とした⁵⁰。スペク トル測定にはICCDカメラ付きの焦点距離30 cmの分光 器を用いた。波長分解能は0.22 nmである。スペクトル の評価は50回のレーザーショットの積算を5回取って いる。5回の測定は、すべて新しい表面にレーザーを照 射させるために、直進ステージで試料を移動させた。

図 1(a)は過去に文献で使用される従来の干渉計型光 学配置、図 1(b)が新たに提案したポラライザーを用いた ダブルパルス光学配置図である。(a)ではハーフミラーを 用いてレーザービームを2つに分離し、片方の光路で光 学的遅延を加えた後、2枚目のハーフミラーでレーザー ビームを結合するために、どうしても図中の「結合ロ ス」と示した方向にレーザー出力の 50%がダブルパル ス光学系からはずれ、レーザーの出力を効率的に利用で きない。一方、今回提案するポラライザーを用いた(b) の光学配置では、レーザービームの分離をポラライザー で行うために、レーザーの結合効率はポラライザーの偏 光分離効率程度の 90%で可能となる。ダブルパルス対 の光学的遅延は180 ps 程度まで加えることが可能であ る。ダブルパルスの光学的遅延を加えた場合、ダブルパ ルス対の偏光方向はS、P偏光の順に照射される。ダブ ルパルスの従来のハーフミラーを用いたダブルパルス 光学系では、偏光方向が同じであるために、レーザーの アライメントは2 つのビームの干渉縞で行うことが可 能であり比較的容易であったが、本配置では、偏光が直 行することから干渉縞が見られず、2本のビームのアラ イメントは3mほど離れたスクリーン上で2つのビーム が一致するようにアライメントを実施した。また、本配 置ではポラライザーに入射させるレーザーの偏光方向 によって、ダブルパルスの出力比をコントロールするこ





とが可能である。本実験では、レーザーの出力比は 1:1 となるように波長板を調整し、シングルパルスとの LIBS 信号強度の比較実験では S 偏光が 100%となるよ うに波長板の角度を調整している。

3. ダブルパルス | IBS スペクトルと信号増強効果

図 2 にフェムト秒レーザーを用いたダブルパルス LIBS スペクトルを示す。510.55, 515.32, 521.82 nm に見 られるのが Cu の LIBS 信号である。LIBS ではこのよう な試料が持つ特徴的なプラズマ発光を測定することに よって、試料を同定することが可能である。

DP: 0 ps, DP: 100 ps はダブルパルス対のパルス間隔が それぞれ、0 ps, 100 ps であり、ダブルパルスの1 つのレ ーザーパルスの出力は等しく、75 µJ である。一方、SP は S 偏光のシングルパルスの LIBS スペクトルであり、 レーザーの出力はダブルパルスの合計出力である 150 µJ である。SP と比較して、DP の LIBS スペクトルは顕 著に大きくなっており、フェムト秒レーザーのパルスを 分離し、任意のパルス間遅延を加えたダブルパルスを作 成するだけで、比較的容易に LIBS 信号を増強させるこ とが可能である。

図3 にダブルパルス間隔による LIBS 信号の増強比を 示す。信号増強比はダブルパルスの合計出力と等しいシ ングルパルスS 偏光の LIBS 信号強度との比で評価した。 0 ps の信号増強比は1より大きく、521.82 nm の LIBS 信号では信号増強比は1.48 ± 0.28 である。これはダブ



図2 ダブルパルス LIBS スペクトル



図3 ダブルパルス間隔によるLIBS 信号増強比(ダブ ルパルスの合計出力と等しいシングルパルスS 偏 光のダブルパルス LIBS 信号強度との比)

ルパルスの偏光が異なることによるビームの空間分布 の変化や、ダブルパルスの遅延時間0psの位置の誤差が 原因ではないかと考えている¹⁾。信号増強比はその後、 単調に増加し、パルス間遅延50psで増強比は3~5倍で 一定となる。得られたLIBS信号の波長で信号増強比が 異なるのは、それぞれの信号のエネルギー順位に依存す るためである⁹。

新しい偏光子を用いたダブルパルスLIBS 光学配置で も過去の文献と同じような 3~5 倍の信号増強比を得る ことに成功した。本手法では従来手法と異なり、レーザ ーの利用効率が2倍である。また、LIBS 信号強度はレ ーザーの出力に関して、非線形に増加することを考慮す ると⁷、本光学配置では従来手法と比較して、少なくと も2倍以上の信号増強効果が見込めることがわかった。

4. まとめ

災害現場での有害物質を遠隔で検知するために、フェ

ムト秒レーザーを用いたダブルパルスLIBSの偏光子を 用いた新しい光学系を提案し、従来手法と同等の信号増 強効果が得られることを示した。本提案光学系ではレー ザーの利用効率を2倍にすることが可能であり、LIBS 信号強度がレーザー出力に関して非線形に増加するこ とを考慮すると、従来手法と比べて少なくとも2倍以上 の信号増強効果が見込めることを示した。今後は、本光 学配置での、レーザーフルーエンス、レーザースポット 径での信号増強効果の評価や、遠隔でのLIBS 信号取得 に向けたTW レーザーシステムでのダブルパルスLIBS 実験を実施したい。

参考文献

- T. Somekawa, M. Otsuka, Y. Maeda, and M. Fujita: Jpn. J. Appl. Phys., 55, 058002, 2016.
- D. A. Cremers and L. J. Radziemski: Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, Willey, New York, 2006.
- K. Stelmaszczyk, P. Rohwetter, G. Mejean. J. Yu, E. Salmon, J. Kasparian, R. Ackermann, J. Wolf, and L. Woste: Appl. Phys. Lett., 85, 3977-3979, 2004.
- M. Baudelet, L. Guyon, J. Yu, J. Wolf, T. Amodeo, E. Frejafon, and P. Laloi: J. Apply. Phys., 99, 084701, 2006.
- V. Pinon, C. Fotakis, G. Nicolas, and D. Anglos: Spectrochim. Acta Part B, 63, 1006-1010, 2008.
- S. S. Harilal, P. K. Diwakar, and A. Hassanein: Appl. Phys. Lett., 103, 041102, 2013.
- V. Pinon and D. Anglos, Spectrochim. Acta, Part B, 64, 950-960, 2009.

レーザーを用いたインフラ構造物の健全性評価技術

レーザー計測研究チーム

島田義則

1. はじめに

2000年頃に起きた新幹線トンネルのコンクリート 崩落事故を始め、高速道路トンネル天井崩落事故な ど高度経済成長期に建造されたトンネルや高架橋な どの社会インフラ構造物の老朽化が深刻な状況とな りつつある。このため、構造物の保守点検作業はイ ンフラ構造物を管理する上に置いて重要な作業の一 つである。保守点検作業を行うに当たり最も多く用 いられている検査手法は打音検査法である。打音検 査法は作業員がハンマー等でコンクリートを打撃し、 その音でコンクリートの欠陥を検知する方法である。 この方法はハンマー等で打撃するだけなので非常に 簡易に検査が可能である利点を有するが、検査員が 大面積を検査するとなると、労力がかかることや人 の耳での判断となるため客観的データに乏しいこと、 更に以前の検査と比較した劣化進行状況(経年劣化) の把握困難であることなどの問題がある。このため、 打音検査法に代わる低コスト、高速、高精度で検査 できる新しい検査手法の開発が求められている。コ ンクリート欠陥検査法は打音検査法以外にレーザー



図1 レーザーを用いたコンクリート欠陥検査 の概念

検査法、接触型超音波探傷法、赤外線検査法、電磁 波検査法、X線検査法がある。また、最近では中性 子を用いた検査方法が提案されているが、当研究所 ではレーザーを用いた方式の研究開発(レーザー法) を推し進めてきた。

レーザー法はパルスレーザーをコンクリート表面 に照射してレーザーによるアブレーションあるいは 熱ひずみによってコンクリート表面に振動を誘起さ せて、その表面振動を別のレーザー干渉計で計測す る。コンクリートに欠陥があると表面振動モードが 変化するため、振動モード変化を捉えることにより 欠陥を検出する。概念を図1に示す。この検出手法 は遠隔かつ非接触で検査が行え、他の方式に比べて 検査箇所への高速移動が可能であることや、コンク リート曲面の計測が容易に行えるなどの利点がある。

当研究所では本手法をトンネル覆エコンクリートの欠陥検出¹⁾、およびスキャン高速化²⁾、コンクリートひび害れ深さの計測³⁾、鋼板補強高架橋床版の浮き検出⁴⁵⁾、水中でのコンクリート壁の欠陥検出⁶⁾など 多岐にわたって技術開発等を行っている。

2. 開発状況と課題

レーザー法を各種インフラ構造物に適用するため には構造物に応じた技術開発が必要である。ここで はこれまで行ってきた技術開発と今後行わなければ ならない課題について述べる。

1) 欠陥検出の高度化

振動検出の感度を向上させるためにダイナミック ホログラムに最適な電圧印加を行うことや、高速検 査を行うための高速スキャン方式構築(ガルバノミ ラー駆動方式)、高繰り返しレーザーの構築(50 Hz 高繰り返し)、および高速データ処理方法の開発を

	トンネル	高架橋	貯水槽・ダム等			
	振動検出の感度向上、高速検査技術(高速スキャン方式構築、高繰り返しレーザ					
欠陥検出の高度化	ーを構築、および高速データ処理方法の開発)、欠陥判定アルゴリズム、欠陥判					
	定の信頼性向上					
システム化技術	小型们	水中ロボットへの搭載検討等				
			濁度、浮遊粒子等による水中エ			
 ^{[「]現灯[」](1)}	防育・防旅対束、温度・湿度調整		ネルギー減衰等の検討			

表1 レーザー法の各種インフラ構造物への開発状況と課題

行った。また、コンクリート表面の振動モードから 欠陥判定を行う複数のアルゴリズムを構築した。さ らにその信頼性を向上させるために 200 箇所を越え る欠陥検査を行い欠陥判定の信頼性向上に努めた。

2) システム化技術

計測装置を野外で使用するためには装置を小型化 する必要がある。特に新幹線トンネル内のコンクリ ート検査では新幹線トンネル内に設置された点検用 の中央通路を走行できる装置にする必要があったた め、装置の大きさを長さ3m×幅0.8m×高さ1mとコ ンパクト化した。

さらに装置を自走させるために床面に車輪を取り 付けて、牽引車で装置全体を移動させることが出来 る車両装置とした。

また、貯水槽・ダムなど、水中コンクリートの検 査には既に水中ロボットなど実績のある装置にレー ザー法を組み込む方法を検討中である。このために は更なるレーザー装置の小型化が必要となる。

3) 環境対応技術

野外での実験では自動車の通行などによる騒音や 振動が装置に悪影響を与える。このため、防音、防 振を備えた筐体を製作して、その中にレーザー装置 本体を設置した。また、人工気象室などを用いて温 度、湿度を変化させた場合の装置挙動を把握し、そ の対策として装置内が一定の温度、湿度となるよう に温度調整制御を加えた。

水中でのコンクリート検査では水中の濁度や浮遊 粒子の影響によりレーザーエネルギーが減衰するた めこれらを考慮した。レーザー波長、装置の大きさ を検討する必要がある。

この様にレーザー法を野外で適用するために直面 する課題を一つ一つ解決してきた。開発状況と課題 を表1にまとめた。さらに技術開発を行って、実用 化を目指す。

3. インフラ構造物の健全性評価のループスキーム

高速道路会社、都道府県、市町村が管理するトン ネルの数は8,970箇所、総延長は3,312 km である。ま た、道路橋の数も150,284箇所で膨大な数となる⁷。こ れらのトンネル、高架橋のほとんどは保守管理図面等が 無い状態である。このため国土交通省は自動車の天井に 画像マッピングシステムを搭載した所謂 MMS(Mobile Mapping System)車両を走行させて3次元点群データを 取得することでトンネルや高架橋の3Dマッピングを行 う計画を進めている。

また、高分解能写真撮影技術を駆使して構造物表面の ひび割れ検出などを行う画像処理技術等も技術開発が 進み、遠方から0.2 mm幅のひび割れが検出できる状態 となっている⁸。これらの技術とレーザー法を組み合わ せることにより構造物の3Dモデリングとレーザー法で 検出した欠陥箇所のマッピングがコンピュータ上に保 存でき、且つ経年に伴う劣化進行状態を把握することが 出来る。これらを総合判断してインフラ構造物の健全性 診断、および補修等に関する維持管理計画を効率的に進 めることが可能となる。このループスキームを図2に示 す。



図2 レーザーによる革新的なインフラ構造物の健全性評価のループスキーム

今後、日本の労働人口減少や膨大なトンネル、高架橋 の保守メインテナンス等を考慮すればレーザー法を含 めたレーザーによる革新的なインフラ構造物の健全性 診断ループスキームは必要なシステムである。

現段階では、当研究所はルースキームの中のレーザー 法の研究開発部分を担当しており、この技術の更なる発 展および適用分野の拡大を進める。

この技術はビルの壁面等の検査にも適用可能である。

参考文献

1) 島田義則他: 非破壊検査, 61, 519-524, 2012.

- 2) 北村俊幸他:ILT 年報, レーザー技術総合研究所年, 2016.
- 3) 倉橋慎理他:コンクリート構造物の補修,補強,アップ グレードシンポジウム論文,11,299-304,2011.
- 4) 倉橋慎理他: レーザー研究, 42, 849-853, 2014.
- 5) Oleg Kotyaev: ILT 年報, レーザー技術総合研究所年, 2016.
- 6) 倉橋慎理他:ILT 年報、レーザー技術総合研究所年,2016.
- 7) 佐伯河川国道事務所ホームページ http://www.qsr.mlit.go.jp/saiki/chisiki/q_answer/
- 例えば、株式会社日立産業制御ソリューションズ 橋梁 点検ロボットカメラ技術 ホームページ http://www.hitachi-ics.co.jp/product/crackscale/index.html

Laser technology for remote inspection of highway bridges. Laboratory and field tests Laser measurement group

O.Kotyaev, Y.Shimada, S.Kurahashi Institute of Laser Engineering, Osaka University

1. Introduction

The inspection system being developed within the A-step project is supposed to be used for location of defects (bad contact, detachment) in metal-concrete interface on the bottom side of highway bridges. Reliable inspection of bouncing structures, like transportation bridges, with the use of conventional or photorefractive laser interferometry is hardly possible. In this case, interferometry is strongly affected by instability of interference pattern, which caused by irregular bouncing of the inspected bridge, especially under heavy traffic conditions. Heterodyne interferometry does not have this problem; however, here is difficulties in working with frequency shifted reference beam and demodulation of resulting signal. Our system uses homodyne interferometry with two-beam probing^{1,2)}. Scattered radiation of the two probes is collected producing two beams which are used like working signals and reference beams for each other.

In the present report, experimental tests of two-beam probing technology are described. The main attention will be focused on using the algorithm of automatic scanning and real-time data processing as the main goal of the current stage of the A-step project.

2. Experimental conditions

In Figures 1 and 2, laboratory installation is presented. Two probe beams are generated by CW laser Verdi-2, 532 nm wavelength. Output power used in the experiments did not exceed 500 mW. Source of impact beam is CO2 laser generating pulsed with 100 ns duration and 5 J energy. Output aperture of the impact laser is imaged to the target surface with scale M = -1. Resulting beam spot size on the target is 35×25 mm. In these conditions, impact in thermal mode is realized providing real nondestructive inspection.



Fig. 1. Laboratory setup. Interferometer and concrete sample.



Fig.2 Impact laser unit. Big mirror is part of image relay.

The target is concrete sample with metal plate simulating bottom part of real highway bridge spans. The sample size is $450 \times 450 \times 150$ mm. Distance from the interferometer is 7 m. The main difference of the present-day system design from previous one²⁾ is implementation of the scanning/processing algorithm. To realize the algorithm, the system is equipped with combining and scanning mirrors shown in Figure 3. Combining mirror combines impact and probe beams: impact beam propagates through the mirror made of ZnSe, and probe beams are reflected by the mirror. As a result, after the combiner all beams propagate in one and the same direction.



Fig.3 Combing and scanning mirrors.



Fig.4 The system control.

The scanning mirror reflects all three beams and controls their direction. The control may be taken both manually and automatically. Automatic control is performed by specially designed hardware and software (by Tecall Inc.). In Figure 4, the control computer with special board and software is shown.

In Figure 5, the main window of the control software is demonstrated. In Figure 5-a, two-dimensional map of inspected area is displayed. The map is real-time result of scanning the sample. Scanning area -400×400 mm, scan points -3×3 , scan step -200 mm. The sample center has inner defect. Its size is 300×300 mm. The central scanning point is located over defect area and the other 8 points are over no-defect area. In the resulting map, green field represent no-defect situation, red field – defect.



a) 2D map of scanned area.









Defect recognition criterion is the presence of detectable standing Lamb wave initiated by laser impact. Spectra of waveform before (Figure 5-b) and after impact (Figure 5-c) are analyzed. Comparison of between resulting spectral amplitudes gives information of the defect presence. In Figure 5-b the signal obtained in no-defect area is displayed. The signal waveform amplitude is near noise level and corresponding spectral amplitude is practically zero. In contrast, Figure 5-c presents waveform and its spectrum of vibration initiated in the defect area. In this case, vibration signal is clearly seen after moment of impact (vertical yellow line), and its spectrum has high spectral amplitude.

The control system allows to select inspected area (scan start and scan finish), scanning resolution (scan step number in two scanning directions), impact shot number (if data averaging is desired), waiting time after scanner movement (if necessary), trigger level. Single-shot mode is also available.

2-D map can be saved along with waveforms obtained in each map nod for further processing.

3. Experimental results

In the experiments, both two-beam probing and conventional one-beam probing techniques were tested. During scanning process, the inspected sample was kept still or it was shaken with simulating bridge spat vibration of 3 Hz with about 1-mm amplitude. The recorded waveforms are results of one-shot impact or averaging of three-shot impact. In each condition set, three records of initiated vibration were made.

Figure 6 demonstrates examples of waveforms recorded in all conditions. Spectra next to the waveforms correspond to laser initiated signal (spectra of waveforms after impact).

Figures 7-10 show two-dimensional maps made in all sets of experimental conditions. In each sets of condition, three 2D maps were created including in total 3 points in defect area and 24 points in no-defect area.





g) Two-beam probing, shaken sample, three-shot impact.



h) One-beam probing, shaken sample, three-shot impact.

Fig. 6. Waveforms and spectra of laser-initiated vibration in the sample center (over defect). Moment of impact -0.



Fig.7. 2D maps. One-shot impact, still sample.



Fig.9. 2D maps. Three-shot impact, still sample.



Fig.8. 2D maps. One-shot impact, shaken sample.



Fig.10. 2D maps. Three-shot impact, shaken sample.
The experiments have proved that idea of two-beam probing is promising. In all conditions, recorded waveform is more stable and the signal of laser-initiated vibration looks much clearly when two-beam probing is used, especially it is noticed if the sample is shaken.

Ideal result of scanning is shown in Figure 5-a: central part is red, surrounding area is green. However, if the signal is unstable, sometimes data of real laser-initiated vibration may be lost and, opposite, fake recognition of no-defect area as defect situation may happen. In this case, central part of 2D map will be green and edge part will be red.

In the scanning results (Table 1), the use of two-beam probing provides much more reliable data. Defect situation is always recognized and fake recognition of no-defect as defect (red area in no-defect situation) happens seldom. In contrast, one-beam probing technique frequently misses the defect situation and frequently recognizes defects in no-defect area.

TT 1 1	-	a	0	•	•
labla		Vinnon I	ot i	anning	ovnormonta
TADJE		SHULLIAL V	(H '		experiments
ruore		ounnu y	UL I	Journmin	ch por interno

	Two	o-beam	One-beam		
Conditions	Defect	No-defect	Defect	No-defect	
1-shot, still	3/3	24/24	1/3	22/24	
1-shot, shaken	3/3	23/24	0/3	23/24	
3-shot, still	3/3	24/24	2/3	20/24	
3-shot, shaken	3/3	24/24	0/3	24/24	
Total %	100	99	25	93	

5. Conclusions

Mobile prototype of the laser-based inspection system has been assembled and tested in laboratory. The system is equipped with new algorithm of automatic scanning and real-time data processing.

In laboratory, the two-beam probing system has demonstrated good performance with significant benefit over conventional one-beam probing technique. All defect cases have been recognized reliably, fake recognition of no-defect case as defect happened only once from 24 attempts.

Waveforms of detected signals are much more stable. Two-dimensional maps generated by the algorithm of automatic scanning and real-time data processing over laboratory sample look correct.

The next step is testing the system in field conditions (for example, under real working bridge). For that purpose, the system should be equipped with protection against sunlight, wind and acoustic noise.

6. Acknowledgements

The present research has been carried out as a part of A-step project held by Japan Science and Technology Agency in cooperation with research teams managed by Dr. Hajime Tachibana (Komaihaltec Inc), and Prof. Sohichi Hirose (Tokyo Institute of Technology).

References

- O. Kotyaev and Y. Shimada: ILT Annual Progress Report, ILT, 2013.
- O. Kotyaev and Y. Shimada: ILT Annual Progress Report, ILT, 2014.

レーザーによる水中コンクリート構造物内部欠陥検出技術の開発

レーザー計測研究チーム

倉橋慎理、本越伸二、島田義則、大坪祐介¹、島原直樹¹ ¹関西電力株式会社

1. はじめに

トンネルや橋梁などのコンクリートからなる 社会インフラの多くが、高経年による老朽化を懸 念されており、適切な保守管理技術が必要とされ ている。この現状を受け、当研究所では鉄道トン ネルや高架橋などコンクリート構造物の欠陥を レーザーで遠隔探傷する技術の開発をすすめて きた^{1,2)}。パルスレーザー照射によりコンクリー トに振動を励起させ、その表面振動をレーザー干 渉計で検出し、振動の周波数分析などを通して欠 陥の有無を評価するものである。室内実験の成果 を基にして野外実験が可能な装置を開発し、山陽 新幹線や高速道路における試験を実施し、その有 効性を確認した。これらの研究開発では、現在実 用化に向けて、欠陥探傷装置の試作や信頼性向上、 検査速度の高速化などの開発を加速している。

一方で、検査の対象をダムや水力発電所のサー ジタンク(流量の平準化を目的として備えられた 貯槽類のこと)、河川護岸などの常時滞水した状 熊で使用されるコンクリート構造物にまで拡げ ることをめざした開発を行っており、昨年度には 屋外設備への導入をめざして装置を試作し、稼働 中の実設備において試験を行った。その際、水中 における装置の姿勢制御には困難が伴い、装置と 検査面の距離が変動すると、ピストンを用いた機 械式の打撃機構では、十分に振動が励起されない 場合があることが分かった。このことから、平成 27年度では、振動励起機構にレーザーを採用し、 レーザー打撃法の水中コンクリート構造物検査 への適用性を検討するため、室内試験を実施した。 本稿では入射エネルギー、波長に対する振動振幅 依存性、水の濁度の影響、検査面への到達エネル

ギーに対する振幅依存性について述べる。

2.水中におけるレーザー打撃法の適用性の検討 2.1 入射エネルギーに対する振動振幅の依存性

図1に実験配置図を示す。振動励起用レーザー は、Spectra-Physics 社の Quanta-Ray PRO-Series Pulsed Nd: YAG Lasers システムで、レーザーの発 振波長は 1064 nm、パルス幅は約 10 ns、繰返し 数は 10 Hz である。レーザー光はビームスプリッ タでエネルギーモニタ用と振動励起用のビーム に分割される。振動励起用のビームは焦点距離 100 mm の集光レンズを通して水槽内に設置され たコンクリート供試体に、ビーム径約10 µm とな るよう照射した。集光レンズは水槽から約30cm の位置に設置した。コンクリート供試体の大きさ は 300 x 300 x 100 mm で、内部に人工的な欠陥が 配置されている。コンクリート供試体は水で満た された水槽壁面から約90 cmの位置に設置した。 レーザー照射によってコンクリート供試体表面 に励起された振動を、水槽外に設置されたレーザ ー振動計 (Polytec 社 PDV-100) を用いて検出を 行った。内部欠陥を有する領域にパルスレーザー を照射すると、内部欠陥の大きさや欠陥の存在す る深さによって決まる周波数で振動するたわみ



振動が励起されるため、この振動の検出により、 検査領域における内部欠陥の有無を判定するこ とが可能となる。入射エネルギーを1540 mJ、1100 mJ、570 mJ、420 mJ、210 mJ、85 mJ と変え、信 号波形の取得を行った。

それぞれのエネルギーにおける信号波形を図 2に、それぞれの波形を高速フーリエ変換したも のを図3に示す。計測はエネルギー毎に5回ずつ 行われ、示した波形はそれぞれの平均値を表す。 内部欠陥を有する領域には約 1250 Hz の固有振 動数を持つたわみ振動が励起され、指数関数的に 減衰することが分かる。この時の時定数は約3.6 ミリ秒であった。また、実験に用いた供試体の水 中での固有振動数である 1250 Hz における振幅 スペクトル値をそれぞれの入射エネルギー毎に プロットしたものを図4に示す。エラーバーは5 回の計測結果の標準偏差を示す。入射エネルギー の増加に応じて、振動スペクトル値が大きくなる ことが確認できた。入射エネルギーが 100 mJ を 下回ると信号レベルが大きく低下したため、背景 雑音成分によっては、計測が困難となることが予 測される。

2.2 波長を変化させた場合の振動振幅の依存性

波長変換素子を用いて振動励起レーザーの波 長を 532 nm に変換し、入射エネルギーに対する 振動振幅の依存性を求めた。波長変換素子を通過 したレーザー光は波長 532 nm に変換され、ビー ムスプリッタでエネルギーモニタ用と振動励起 用のビームに分割される。振動励起用のビームは 焦点距離 100 nm の集光レンズを通して水槽内に 設置されたコンクリート供試体に、ビーム径約 5 µm となるよう照射した。集光レンズは水槽から 約 30 cm の位置に設置した。コンクリート供試体 の大きさは 300 x 300 x 100 nm で、内部に人工的 な欠陥が配置されている。コンクリート供試体は 水で満たされた水槽壁面から約 90 cm の位置に 設置した。レーザー照射によってコンクリート供



0.000 0.002 0.004 0.006 0.008 0.010 0.012 0.014 0.016 0.018 0.020 Time [sec]





図3 各入射エネルギーにおける振幅スペクト ル



図4 1250 Hzの振幅スペクトル値(波長 1064 nm)

たレーザー振動計を用いて検出を行った。入射エ ネルギーを 330 mJ、240 mJ、160 mJ、80 mJ、40 mJ、 12 mJと変え、信号波形の取得を行った。それぞ れのエネルギーにおける信号波形を図5に、それ ぞれの波形を高速フーリエ変換したものを図 6 に示す。計測はエネルギー毎に5回ずつ行い、示 した波形はそれぞれの平均値を表す。内部欠陥を 有する領域には約 1250 Hz の固有振動数を持つ たわみ振動が励起され、指数関数的に減衰するこ とが分かる。この時の時定数は約3.6ミリ秒であ った。これより、励起されたたわみ振動の固有振 動数や減衰の時定数は、照射されるパルスレーザ ーの波長に対する依存性がないことが確認され た。実験に用いた供試体の水中での固有振動数で ある 1250 Hz における振幅スペクトル値をそれ ぞれの入射エネルギー毎にプロットしたものを 図7に示す。エラーバーは5回の計測結果の標準 偏差を示す。入射エネルギーが増加するにつれて、 振動スペクトル値が大きくなる傾向が、入射エネ ルギーが約80mJになるまで確認された。それ以 降は、入射エネルギーに依らずほぼ一定の値をと っており、何らかの原因でエネルギーの一部しか たわみ振動励起に寄与していないと推測される。

2.3 濁度に対するレーザー光透過率

実際に計測を行う環境の水は、常に透明度が高いとは言えない。そのため、水の濁度を変えた場合のレーザー光の透過特性を評価し、波長 1064 nm と 532 nm のレーザー光の濁度による減衰の様子を確認した。

水の濁度の調節には、乳化性液状研磨剤(ピカ ール、平均粒径 3 μm、日本磨料工業株式会社) を用いた。水槽内水量に対して混入する研磨剤の 量を 0 mg/L、30 mg/L、45 mg/L と増加し、その 時の水槽へ入射するレーザー光エネルギーと透 過後のエネルギーを計測した。研磨剤を混入した 時の水槽内を通したカメラ用テストパターンの 様子を図 8 に示す。図の(a)、(b)、(c)はそれぞれ、 研磨剤量 0 mg/L、30 mg/L、45 mg/L の場合であ



0.000 0.002 0.004 0.006 0.008 0.010 0.012 0.014 0.016 0.018 0.020 Time [sec]





図6 各入射エネルギーにおける振幅スペクト ル



図7 1250 Hzの振幅スペクトル値(波長 532 nm)



- (a) 0 mg/L, 900 mm
- (b) 30 mg/L, 300 mm (c) 45 mg/L, 300 mm 図8 研磨剤混入量に対する水槽内テストパターン観察の様子

る。また、(a)の場合は水槽長さ 900 mm であり、 (b)、(c)は長さ 300 mm である。図より、研磨剤の 混入によりパターンに対する視認性が変化する 様子が確認された。混入量が 30 mg/L の場合、混 入なし時と比べて少し良好程度の分解能でパタ ーンを確認できているが、水槽長さは3分の1 になる。同じ水槽長さの場合でも、混入量が 45 mg/L に増えるとパターンの確認が困難になるこ とから、実環境下での計測を想定する際には、用 いるレーザーの波長と水質や濁度に応じて適切 な計測距離を設定する必要があると考えられる。

図9に、波長1064 nm、532 nmの透過エネルギ ー測定結果をそれぞれ示す。この時の水槽内の光 路長は 30 cm であった。どちらの波長の場合も、 混入する研磨剤量が増加するに従い、透過エネル ギー量は減少することが確認された。その変化量 は 1064 nm に比べて 532 nm の方が大きいことが 分かった。これは、波長が短い方が水質による散 乱の影響を受けやすいためである。水による光の 吸収は波長によってその特性が異なり、波長 1064 nm の光は、波長 532 nm の光よりも吸収さ れやすいことが知られている。よって、波長1064 nm の光の減衰は主に水の吸収が支配的であり、 散乱による減衰は小さい。一方、波長 532 nm の 光は水の吸収による減衰は小さく、散乱による影 響を受けやすいことが分かった。

水による吸収や散乱、また、水と水槽の境界面 での反射や各光学素子における損失などを考慮 して、前述した振動励起レーザーの入射エネルギ ーのうち、コンクリート表面まで到達するエネル ギーを求めた。図10に結果を示す。これより、 たわみ振動が十分検出できるコンクリート表面 までの到達エネルギーは約41 mJ(波長1064 nm)、





約30 mJ(波長 532 nm)であることが分かった。

2.4 到達エネルギーに対する振幅依存性

前節で求めた波長 1064 nm、532 nm のレーザー 光のコンクリート供試体表面に到達したエネル ギーと、それぞれの 1250 Hz における振幅スペク トル値をまとめたものを図 11 に示す。図より、 到達エネルギーが同じ場合でも、波長によって振 幅スペクトル値が異なる事が分かる。これは、コ ンクリート供試体表面におけるレーザーの吸収 率が波長によって異なり、波長 1064 nm の方が、 波長 532 nm よりも吸収がよいためと考えられる。

現状の装置を野外で適用するとした場合、水の 層の厚みで計測が可能かを図 12 にまとめた。レ ーザーの入射エネルギーは、波長 1064 nm の場合 が1540 mJ、波長 532 nm の場合が 330 mJ とした。 波長が 1064 nm ではレーザーが通過する水の層 の厚みが 20 cm 以内であれば、信号波形の振幅は 計測に十分な大きさを持つ。波長が 532 nm の場 合、レーザーが通過する水の層の厚みが 100 cm 程度までは、信号振幅は計測可能レベルにあると 考えられるが、これは濁度が小さい場合に限られ る。波長 532 nm のような可視光は、光路上に存 在する不純物による散乱が強くなると考えられ るため、到達エネルギーの低下が想定される。実 験で用いた研磨剤で濃度 45 mg/L 程度の濁度で あった場合、波長 532 nm で計測可能な信号を得 られる距離は 30 cm 程度になると考えられる。

3. まとめ

レーザー打撃法の水中コンクリート構造物検 査への適用性を検討するため、室内試験を実施し た。

コンクリート表面に一定量エネルギーを到達 させることができれば、水中でもたわみ振動を励 起させることが可能であることが分かった。励起 されるたわみ振動の固有振動数、減衰の時定数は 波長に依らないと考えられる。励起された振動の 振幅にはレーザーエネルギーに依存性が見られ、



図 10 水中 90 mm 伝搬後のレーザーエネルギー







図 12 振幅スペクトル値と水中伝播距離の関係

投入するエネルギーが増加するにつれて、振動振 幅が大きくなる傾向が確認された。ただし、波長 532 nm においては、投入したエネルギーの一部 しか振動に寄与していない現象が見られた。

波長 532 nm のレーザー光は波長 1064 nm のレ ーザー光と比べて濁度の影響を大きく受けるこ とが分かった。

コンクリート表面における吸収率に波長依存 性があることが分かった。波長 1064 nm のレーザ 一光の方が、波長 532 nm のレーザー光よりもよ く吸収される。 波長 1064 nm のレーザーを用いる場合、到達エ ネルギーを効率よく振動の励起に用いることが できるが、装置の大型化や水中を伝播可能な距離 が短いことが問題となる。一方、波長 532 nm の レーザーを用いる場合、装置の小型化や長距離の 水中伝播が可能となるが、到達エネルギーが振動 励起に用いられる効率が悪く、濁度による影響が 大きいといった問題がある。利用可能な装置の大 きさや、水中を伝播させる距離などによって、用 いるレーザー波長を適切に選択する必要がある。

参考文献

- 1) 島田義則 他: 非破壊検査, 61, 519-524, 2012.
- 2) 倉橋慎理 他:レーザー研究 42,849-853,2014.

コンクリート欠陥検査のためのレーザー高速掃引技術の開発

レーザープロセス研究チーム

北村俊幸、倉橋真理、島田義則、藤田雅之

1. はじめに

高度経済成長期に建設されたインフラの老朽化が進 む中、重大な事故リスクの顕在化、維持管理・更新の負 担低減のため、高速かつ自動化された検査システムが必 要とされている。現在、トンネル壁面に用いられている コンクリートの劣化診断は、検査員が壁面を金槌で叩き、 音の変化を聞き分けて判断する「打音法」と呼ばれる手 法である。この方法での劣化診断は検査に足場やクレー ン車が必要で、コストも時間も掛かる。それに対し、JR 西日本とレーザー技術総合研究所が開発したレーザー を使った検査手法¹⁾では、従来の手法と測定原理は変わ らず、非接触・遠隔で検査できることから検査全体のコ スト削減が期待されている。

これまでの研究では、測定対象物へのレーザー照射位 置の制御は回転式2軸ステージで行っていたが、ステー ジの回転速度等の問題により、1ヶ所を測定するのに約 2秒の時間を必要としていた。対象物の広い範囲を高い 空間分解能で測定するためには、測定時間の短縮化が要 求されている。

平成 27 年度では、レーザー照射位置移動にガルバノ スキャナと、繰返し25 Hz のレーザー装置を導入するこ とにより、測定の高速化を進めた。本報告では、ガルバ ノスキャナと Field Programmable Gate Array (FPGA)を 用いて新たに開発した制御システムの概要を述べ、高速 動作 (25 Hz) によるコンクリート欠陥検査の結果につ いて報告する。

2. 実験装置

2.1 高速レーザーコンクリート診断装置

図1に平成27年度に構築したコンクリート診断装置 の概念図を示す。装置は、衝撃波励起用レーザー部、衝 撃波検出用レーザー部、照射位置制御部で構成されてい る。衝撃波励起用レーザーには、量子科学技術研究開発 機構関西光科学研究所で開発された繰返し周波数50Hz のNd:YAG レーザー装置(波長1064 nm、パルス幅10 ns、 出力1J)が組み込まれる。衝撃波検出はレーザー干渉 法により行う。衝撃波検出用レーザー(CW-Nd:YVO4 レーザー第二高調波、波長 532 nm、出力 2 W)は偏光 ビームスプリッターにより、プローブ光と参照光に分割 される。参照光はフォトリフラクティブ結晶(以下、 PRC) に照射される。対象物に照射されたプローブ光は、 散乱し信号光となり、PRC に照射される。フォトリフ ラクティブ効果によって重畳された信号光と参照光は、 光検出器で干渉信号として検出される。照射位置制御部 は、レーザー測距器とビーム発散角調整用レンズ対と、 ガルバノスキャナから構成される。装置と対象物までの 実距離を計測することにより、衝撃波励起・検出用レー ザー光の各焦点位置を制御し、測定範囲に対するガルバ ノスキャナの駆動範囲が決定される。

2.2 ガルバノスキャナによる高速スキャン

図2に使用した Nutfield 社製ガルバノスキャナの外観 を示す。ガルバノスキャナは高速に制御できる回転軸に 薄いミラーを取り付け、二枚のミラーで光路を動かすこ



図1 高速掃引レーザー欠陥検出装置概略図。衝撃波励 起用レーザーと衝撃波検出用レーザーはダイク ロイックミラー2で結合され、ガルバノミラーに より検査面上を高速で走査される。



図2 Nutfield 社製ガルバノスキャナ

とにより、ポインティングを正確かつ高速に動かす装置 である。また、ミラーは衝撃波検出の感度向上のため、 通常の2倍の開口径50mmとした。ミラーが大きくな ると高速動作の際にミラー自身の重さ・剛性等が計測に 影響してくる。そのため、ミラーの基材には軽量かつ剛 性の高いシリコンカーバイド(SiC)を使用した。

ガルバノスキャナの駆動性能を確認するために、高速 移動の実測を行った。ガルバノスキャナの駆動速度を最 高速度(4.55 rad/s)に設定し、8m先で25 cm(31 mrad) 移動する指令を出した時の衝撃波検出用レーザーの位 置をハイスピードカメラ(1000FPS:1フレーム1 ms) で撮影を行った。結果を図3に示す。図3(a)は初期位置、 図3(b)は動作終了時7フレーム目(7 ms後)の位置であ る。31 mradを速度4.55 ra/s で駆動する時間は、約6.8 ms であり、加速・減速の時間を考慮すると、ガルバノスキ ャナは仕様性能を満たしていると言える。

2.3 制御システム

制御システムのソフトウェアのプログラミングには 日本ナショナルインスツルメンツ社(NI)の LabVIEW を 使用した。µs オーダーの正確な制御が必要な機器に関 しては NI CompactRIO ボードの Field Programmable Gate Array(FPGA)を用いた。また、ms 以上で制御可能な機器 に対しては PC 本体から直接制御を行った。図4 に制御 レイアウトを示す。システムの実行、パラメーターの変 更等は PC 上で制御を行い、FPGA への指令に関しては



図3 ガルバノスキャナ性能評価試験。8m先のレーザ 一位置(a)初期位置、(b)7ms後

- PCからGUI(グラフィカル・ユーザー・インターフェ
 ース)を操作することにより行った。
 検査システム実行フローは以下の順に行った。
- レーザー距離計からデータを取得し、各レーザーの 焦点を検査対象面に合わせる。
- 検査対象に衝撃波検出用レーザーを当てる点数と 掃引間隔を決める。
- システムの実行ボタンを押し、インパクト用レーザ
 、ガルバノスキャナ、計測機器にそれぞれスター
 ト用トリガを送り、検査対象面をスキャンする。
- 各測定点の振動データを解析し、健全もしくは欠陥 判定を行い、表示を行う。

レーザー距離計からは RS232C 通信でデータ取得を 行い、他のシステムには USB を介して通信を行う。ス タート・トリガ信号に関しては BNC ケーブルを介して 各装置に送る。個々の装置の同期は、マスタークロック

(DG645) からの TTL 信号を間引くことで行った。信 号処理に FPGA を利用することにより、TTL 信号自体 の遅延は 125ns 以下に抑えられている。

光検出器からの信号は、高速データ処理装置により、 信号波形の取得、取得された信号波形の高速フーリエ変 換、得られた信号スペクトルへの診断アルゴリズム適用 し判定される。



図4 制御レイアウト



高速レーザーコンクリート診断を確認するために、内部に空洞を持つコンクリート供試体 (500 mm×500 mm×100 mm)の掃引計測を行った。照射範囲は中心部 200 mm×200 mm、測定間隔 33 mm、49 点(縦7×横7)の 測定を行った。

図5に実験結果を示す。図の赤い部分が欠陥と認識された場所で、緑の部分が健全と認識された場所である。 測定開始から終了までに必要な時間は約2sであった。 この結果は、従来の0.5Hz (2秒)毎の掃引測定で得ら れた欠陥分布と同じであり、判定精度を落とすことなく 高速化を達成したことを意味する。

4. まとめ

コンクリート欠陥高速探査制御システムの開発を



図5 高速レーザーコンクリート診断装置によるコンク リート供試体の診断結果

行った。ガルバノスキャナと FPGA を用いたシステム と高繰り返しレーザーを使用したことにより、検査対象 の各点ごとの検査を従来よりも 50 倍高速化を達成した。 今後はさらなる高速化、また屋外実験に向けて装置全体 の再設計、システムの構築を行う。

謝辞:本研究の実施にあたり、量子科学技術研究開発機 構関西光科学研究所の多大な協力を得た。また本研究は、 内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP イ ンフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法 人:JST)によって実施された。

参考文献

1) 島田義則: 電気学会誌, 135,834-837,2015.

フェムト秒レーザー計測による D-アミノ酸酸化酵素の 機能阻害効果の研究

レーザーバイオ化学研究チーム

谷口誠治、ハイク コスロービアン

1. 序

蛋白質やそれを基に構成される酵素は、化学物質の吸 収、輸送、代謝等、生体内における様々な化学反応を制 御する触媒として働く。蛋白質の機能解析の有力な手法 のひとつに、目的の蛋白質(蛋白質中に存在する補因 子)に作用する異なる複数の分子(基質)をそれぞれ付 加し、その反応性を比較するものがある。この手法は、 ウィルスの蛋白質機能を阻害して増殖を抑制したり、人 体内で異常な機能を示す蛋白質を不活性化し治療する 等の機能阻害効果を持つ薬剤(阻害剤)の開発にも用い られている。

機能阻害効果について最近注目を集めている酵素に D-アミノ酸酸化酵素(D-amino acid oxidase, DAAO)が ある。DAAO はD-アミノ酸を分解(代謝)する機能を 持ち(図1)、ヒトを含む生体の腎臓や肝臓、脳等に多 く存在する。しかし、生体は本来 L-アミノ酸のみによ って構成されるため、その具体的な役割はよくわかって いなかった。近年、福井ら(徳島大)は統合失調症患者 の脳内D-アミノ酸濃度がDAAOの異常活性により通常 よりも低下していることをつきとめ、阻害剤の投与によ り脳内 DAAO の反応活性を抑制(図2)した結果、治 療に有効であると報告した^{1,2)}。この報告は、生体内で の DAAO の役割を明確にするだけでなく、様々な脳疾 患の治療薬開発に繋がる重要な意義を持つ。

一方で、DAAO は光科学の観点からみても興味深い 酵素である。FAD (フラビンアデニンジヌクレオチ ド)を補因子に持つDAAO はフラビン蛋白質の一種で、 FAD 中のイソアロキサジン (Iso、図3(b)中() 内の分 子) は青色領域の光を吸収し緑色 (530 nm 付近)の蛍 光を発する。その強度やスペクトル形状、また減衰寿命 は蛋白質の反応に敏感に応答するため、それらを分光学 的に観測することにより、蛋白質の機能メカニズムの情報を得ることができる。同様に、DAAO と阻害剤との反応過程についても情報を得ることが期待できる。



図1 D-アミノ酸酸化酵素 (DAAO)の反応スキーム



図2 阻害分子による DAAO の機能阻害効果



図3 (a) ブタ腎臓由来 D-アミノ酸酸化酵素 (DAAO)
 の結晶構造 (2 量体、PDB ID: 1VE9)、 (b) 補因
 子フラビンアデニンジヌクレオチド (FAD)
 の分子図

我々の目的は、DAAO の蛍光過程と機能阻害効果の 関連性や、時間分解蛍光計測法の阻害効果観測への有用 性等を明らかにすることである。これまでに、ブタ腎臓 由来のDAAOを用い、阻害剤2-アミノ安息香酸ナトリ ウム (o-AB)を添加した場合の補因子 FAD の蛍光を評 価した。蛍光寿命は約300 fs であり、o-AB と結合した 電荷移動錯体 (CT 錯体) に起因することを明らかにし た。また蛋白構造が異なる場合には阻害剤 o-AB との反 応も異なり、阻害効果にも影響する結果が得られた³。

平成27年度は、阻害剤を3-アミノ安息香酸ナトリウム (m-AB) に変更し、DAAO の補因子 FAD の蛍光を 計測することにより、阻害剤の分子構造が機能阻害に与 える効果について比較検討した。

2. 実験

実験には、ブタ腎臓由来 D-アミノ酸オキシダーゼ (DAAO、Aldlich)を精製したものを使用した。溶媒に は、塩酸により pH を 8.3 に調整したピロリン酸緩衝液 (17 mM)を用いた。阻害剤には3-アミノ安息香酸ナト リウム (m-AB)(東京化成工業、図 4)を用いた。m-AB と2-アミノ安息香酸ナトリウム (o-AB、図 4)では、芳 香環に結合するカルボキシル基とアミノ基の相対配置 が異なる蛍光の計測にはチタンサファイアレーザー

(Coherent, Mira-800)を光源に用いた蛍光アップコンバ ージョンシステムを用いた⁴⁾。励起波長は410 nm、装置 の時間分解能は約 200 fs である。



図4 阻害剤の分子構造((左)3-アミノ安息香酸ナト リウム(m-AB)、(右)2-アミノ安息香酸ナト リウム(o-AB))

3. 結果と考察

3.1 阻害剤添加試料の吸収スペクトル

図5に、DAAO 水溶液 (~0.5 mM) と、それに20 mM

および60 mM の m-AB をそれぞれ添加した試料の吸収 スペクトルを示す。DAAO の吸収帯は FAD の第一電子 励起状態に由来し、吸収ピーク波長は 375、450 nm であ る。ただし、DAAO は溶液中では単量体だけでなく 2 量体としても存在することが知られており⁵、この試料 はDAAO 単量体と2 量体の2種が混合したものである。 DAAO に m-AB を添加すると、吸収スペクトルに変化 がみられる。FAD の上記吸収帯の吸光度は減少し、 500~600 nm の領域に新たな吸収帯が生成された。m-AB 添加濃度の増加に伴いこの変化は更に大きくなること から、新たな吸収帯は DAAO 中の FAD と m-AB が結 合し生成した CT 錯体 %に由来するものであることがわ かる。

3.2 フェムト秒蛍光計測による阻害効果の検討

DAAO および m-AB 添加試料のフェムト秒蛍光計測
結果を図6に示す。測定波長はFAD の蛍光ピークである 523 nm に固定した。DAAO のみの試料の蛍光は非指数関数の減衰を示し、3 成分指数関数(式(1))によるフィッティングから、0.54 ps (0.27)、3.3 ps (0.36)、38 ps (0.37)の寿命成分が得られた(())内は前指数因子の比)。

$$F(t) = \sum_{i=1}^{3} A_i \exp(-t / \tau_i)$$
 (1)

これらの寿命は光励起された FAD と周囲に存在する アミノ酸残基との電子移動過程によるものである。寿命



60 mM (実線) 添加した試料の各吸収スペクトル

(電子移動速度)はFAD とそれに関与するアミノ酸残 基(チロシン、トリプトファンなど)の距離、つまり蛋 白質構造の変化に直接的に依存することから、DAAO は水溶液中で少なくとも2種以上の構造異性を持つ可 能性がある。これまでの研究から、DAAO は水溶液中 では単量体と2量体が混在しており、単量体の励起寿命 は160 ps と長くフェムト秒領域の測定では計測されな いため、3.3 ps および38 ps の寿命成分は2量体を構成 する2種の構造異性体(サブユニット、図7)の各励起 寿命である可能性が高いことがわかっている^{7,8}。0.54 ps の寿命成分については、不純物かあるいは蛋白構造が解 けた(denatured)FAD の蛍光の溶媒和の影響によるも のと考えられるが、明確ではない。

一方、DAAO に阻害剤 m-AB を添加した試料では、阻 害剤濃度の増加とともに、CT錯体が増加しDAAO 濃度が 低下するため蛍光量も低下する。また新たに寿命 0.2~0.3 ps の超高速減衰成分が生成し、阻害剤濃度の増加に対し てその存在比が増加するとともに、2 量体の励起寿命 (3.3 ps および 38 ps)の存在比は低下した。このことか ら、超高速寿命成分は DAAO の2 量体と m-AB 間で形 成された錯体に起因するものであると考えられる。次に各 蛍光データを、2 量体の各励起寿命に錯体の超高速寿命 成分を加えた 3 成分指数関数によりフィッティングし、 m-AB と錯体を形成しない残留 2 量体の 2 つの励起寿命 の前指数因子の比(存在比)を比較した。その結果、存在 比は添加濃度に関わらずほぼ 1:1 を保持し、m-AB の DAAO 各サブユニットへの反応性は同等であることがわ かった。

この結果は、以前に報告した o-AB 添加時のものとは異 なる。添加濃度 18 mM、71 mM の o-AB 添加時の残留 DAAO の2量体の各サブユニットの存在比は、それぞれ 1.21、1.72と変化した。これは37.8 psの寿命を持つサブユ ニットの方が3.7 psのサブユニットよりも阻害剤 o-AB との 結合性が高く、錯体形成が優先して起こるためと考えられ る³。この阻害剤の違いによる結果は、o-AB は DAAO サ ブユニットに対する反応選択性を有するが、m-AB は持た ないことを示している。o-AB は m-AB と比べ分子サイズが やや小さく、DAAO中のFADと結合する際により深く蛋白 質内部に侵入するものの、蛋白質構造の微弱な変化の影 響を受けやすいと考えられる。すなわち、阻害剤の開発 には、阻害分子および蛋白質の構造因子を考慮すること が重要であると言える。今後、水溶液中における蛋白質構 造の計算や、蛍光計測を継続して行うことで、詳細に検 討する。



図6 DAAOのみ(0 mM)、m-AB 20 mM、60 mM
 添加試料の各フェムト秒蛍光データと3 成分
 指数関数による蛍光寿命フィッティング曲線
 (図中各実線、観測波長 523 nm)



図7 MD計算により予測された、水溶液中で2量体
 を形成する DAAO の2種の蛋白質構造異性体
 (サブユニットA、B)⁸

4. まとめ

本研究では、阻害剤の分子構造が D-アミノ酸酸化酵素 (DAAO)の機能阻害に与える効果を明らかにするために、阻害剤 3-アミノ安息香酸ナトリウム (m-AB)を

添加した時のDAAO中FADからの蛍光を時間分解計測 した。蛍光の時間変化を指数関数でフィッティングする ことにより、阻害剤 m-ABはDAAO内の構造異性体(サ ブユニット)への反応選択性を持たないことがわかった。 これは、以前に報告した阻害剤(2-アミノ安息香酸ナト リウム(o-AB))とは異なった挙動である。この要因 には、蛋白質および阻害分子双方の構造因子が深く関与 しているものと考えられる。つまり、阻害剤の開発には 阻害分子および蛋白質の構造因子を考慮することが重要 であることを示している。

謝辞

本研究の実施にあたり、科学研究費補助金(基盤研究 (C)、課題番号26410029)の支援を得た。また本研究は 田中文夫 Chulalongkom大学客員教授(レーザー総研特 別研究員(兼務))との共同研究である。また計測に用 いた酵素の精製には、北村昌也大阪市立大学大学院工学 研究科教授、中西猛同講師の協力を得た。ご協力頂いた 方々に感謝致します。

参考文献

- K. Fukui, H. K. Park, T. Kawazoe, K. Ono, S. Iwana, Y. Tomita, K. Yorita, T. Sakai and Y. H. Kong: Flavins and Flavoproteins, **2005**, 853-860, 2005.
- S. Ishikawa, T. Kawazoe, H. K. Park, K. Tsuchiya, K. Ono, K. Yorita, T. Sakai, T. Kusumi and K. Fukui: J. Enzim. Inhib., 23, 901-911, 2008.
- 3) 谷口誠治 他: ILT0214 年報、レーザー技術総合研究所、 2014.
- N. Mataga, H. Chosrowjan, S. Taniguchi, F. Tanaka, N. Kido and M. Kitamura: J. Phys. Chem. B, 106, 8917-8920, 2002.
- N. Nakashima, K. Yoshihara, F. Tanaka and K. Yagi: J. Biol. Chem., 256, 5361-5263, 1980.
- F. Tanaka, N. Tamai and I. Yamazaki: Biochemistry, 28, 4259-4262, 1989.
- 7) F. Tanaka et al.: Biochemistry, 28, 4259-4262, 1989.
- A. Nueangaudom *et al.*: Phys. Chem. Chem. Phys., 16, 1930-1944, 2014.

Carbonyl motion of the photoactive yellow protein (PYP) chromophore probed by ultrafast circular dichroism

Laser Biochemistry Research Team

Haik Chosrowjan and Seiji Taniguchi

1. Introduction

Mimicking the capabilities of biomolecules to convert light into energy for engineering artificial nano-devices is a current scientific challenge¹⁾. This goal however requires a previous detailed understanding of the natural transduction mechanisms at work on molecular scale. Over the past decade, photoactive yellow protein (PYP) has become a model system for studying light conversion processes in biological photoreceptors²⁾. Moreover, PYP has been also used for development of new protein labeling probes for fluorescence imaging³⁾. PYP is a photoreceptor involved in blue light negative phototactic response of several halophilic bacteria. The photoresponse is mediated by the deprotonated *trans-p*-coumaric acid covalently linked to the protein via a thioester bond (Fig. 1).

Upon blue light irradiation, the protein undergoes a photocycle which triggers a signal transduction. It is known that the first step of the photocycle involves the trans-cis isomerization of the chromophore through the flipping motion of the thioester carbonyl group (C=O) on the femto-picosecond time scale, leaving intact the geometry of phenolate side. This reaction leads to formation of the first



Fig. 1 Schematic representation of the PYP binding pocket

photocycle intermediate with a yield of about 0.3. On the other hand, UV-VIS and IR time-resolved absorption spectroscopic studies show that blue light absorption actually opens two competitive channels: a reactive channel mentioned above and a non-reactive one which restores the initial ground state (pG) through the formation of ground state intermediate (GSI). Although the existence of GSI is well established, its nature remains disputed: has it a distorted vibrationally hot trans-, or cis-like conformation?

Although the UV-VIS transient absorption spectroscopy allows characterization of different electronic states involved in the PYP photocycle, it does not provide direct structural information on the chromophore. In contrast, circular dichroism (CD), the difference in absorption for left- and right circularly polarized light, is very sensitive to the molecular structure (geometry), hence can provide sensitive information on molecular conformation on sub-picosecond time scale. In particular, it is well known that the sign of CD signals associated with the absorption bands of carbonyl groups can reveal precise information about their environments⁴).

In this report, we present first results of transient CD on wild-type (WT) PYP and its R52Q mutant (arginine at 52 position was replaced by neutral glutamine) and identify the origin of GSI in the non-reactive channel of excited PYP's deactivation process.

2. Experimental Section

WT-PYP and R52Q were produced as previously described⁵⁾. Samples were prepared in Tris-HCl buffer (10 mM) at pH 8.1. Steady-state CD spectra were measured with a Jasco J710 spectropolarimeter. Subpicosecond time-resolved experiments were carried out with the setup

described elsewhere⁴⁾. Briefly, the pump beam (~ 420 nm) was directly obtained by frequency-doubling a 1 kHz Ti-sapphire laser. The pulse energy was about 1 µJ. The pulses were focused to a 208×137 µm² elliptical spot in a 1 mm path length silica cell. The probe, tuned between 300 and 355 nm, was generated through optical parametric amplification of a white-light continuum followed by second-harmonic generation stage. It was focused to a $83 \times 34 \,\mu\text{m}^2$ elliptical point on the sample. The two laser beams passed through a common polarizer to ensure exactly parallel polarizations and their superposition was assured with a 50 µm pinhole at the sample position. Pump-probe cross-correlation (instrument response function) has been measured to be about 800 fs. Time resolved CD measurements were performed by evaluating the variation of the laser beam ellipticity with a Babinet-Soleil compensator and a crossed analyzer, as a function of the pump-probe delay. Measurements were conducted with- and without the pump to extract the CD changes (SCD) and absorption changes $(\delta \alpha L = \ln(10) \times \delta OD$, where δOD is the optical density change) induced by the excitation. In the following, we note that $\delta CD = (\delta \alpha_L - \delta \alpha_R)L$, where $\delta \alpha_L$ and $\delta \alpha_{\rm R}$ are the absorption coefficient changes for left or right circular polarization, respectively, and L is the cell optical path length. Note that $\delta \alpha L$ and δCD are unitless quantities.

3. Results and discussion

Interestingly, the steady-state CD spectra of WT-PYP and R52Q are identical⁶, emphasizing the fact that this mutation neither brings any dramatic change to the chromophore electronic state nor to its conformation. Hence, in the following mainly the results of R52Q mutant will be displayed and discussed. Comparison with the apoprotein showed that the negative CD signal below 300 nm arises from the protein backbone whereas the positive signal above 300 nm is due to the chromophore itself (Fig. 2). Specifically, the CD structure in the 300 - 320 nm range has been assigned to the



Fig. 2 Absorption and CD spectra of R52Q mutant

chromophore C=O group based on the following observations:

(a) In this spectral range, strong CD signal associated with a weak absorption is known to be a typical feature of $n\pi^*$ transitions of C=O groups, and (b) the positive sign of the CD, in accordance with the octant rule⁷, is associated with the presence of N atom (N69) borne by the nearby Cys69 residue.

Time-resolved experiments on both WT-PYP and R52Q mutant yielded comparable results. The photo-physical processes at work in both proteins are essentially the same. The main quantitative difference is that the absence of arginine in R52Q slows the excited-state deactivation and decreases the isomerization quantum yield of the chromophore. The non-reactive branch of the photocycle was found to be reinforced in R52Q: about 80 % of the excited chromophores restore the ground state (pG) without initiating the photocycle, versus 70 % in WT-PYP.

We carried out time-resolved measurements in 300 - 355 nm spectral range. It corresponds to the spectral domain relevant for the chromophore C=O transition. Two types of experiments were carried out. First, a "regular" pump-probe transient absorption experiment was performed to obtain the excited state absorption (ESA) relaxation time of the protein $(3.2 \pm 0.6 \text{ ps})$. Next, time resolved CD experiments were performed. A typical result for R52Q at 332 nm, displaying the change of CD signal (δ CD) as a function of pump-probe



Fig. 3 Transient δCD in R52Q at 332 nm. The inset compares wavelength dependence of the absorption maximum and CD changes in arbitrary units.

delay, is shown in Fig. 3. It gives the amplitude and sign of the CD changes induced by the pump at positive delays. Immediately after the excitation, a large *negative* signal with an average relaxation time of 2.1 ± 0.8 ps was observed. Although this time constant slightly differs from that found for $\delta \alpha L$, a direct comparison of both signals on a normalized scale confirms that the relaxation times are indeed comparable. Another interesting feature, shown in the inset of Fig. 3, is that the amplitudes of $\delta \alpha L$ and δCD display similar wavelength dependence immediately after the excitation. These two observations clearly indicate that both signals stem from the same electronic state.

The most striking feature of R52Q transient CD is the large negative value of the signal observed immediately after the excitation in the whole 300 - 355 nm spectral region. We calculated the CD contribution of the pG* state (CD_{pG*}) to δ CD of R52Q at 332 nm for the following two cases: (a) the excited-state is considered to be structurally homogeneous, while in the case (b) the excited state is assumed to be structurally heterogeneous. We found that CD_{pG*} and the average of CD_{pG*} (<CD_{pG*}>) for homogeneous and heterogeneous cases, respectively, both have about – 0.015 values. Namely, the CD of pG* state is not only of opposite sign compared with that of the initial ground state pG

(CD_{pG}=2.7×10⁴), but also much larger in absolute amplitude. It is well established that CD signals are closely connected to the C=O environment. The octant rule allows obtaining the absolute sign of the CD by considering the environment of a C=O bond. The principle of the octant rule is the following: given an atomic group A located in the vicinity of the C=O bond and defining its position relative to the middle of the C=O bond with a vector \vec{R}_{AC} , its contribution to the CD is given by⁷:

$$\Theta = \frac{-xyz}{R_{AC}^4} \tag{1}$$

Here Θ is the contribution of the atomic group A to the CD, R_{AC} is the distance between A and C, and x, y, z are the Cartesian coordinates of the normalized vector \vec{R}_{AC}/R_{AC} . The product xyz expresses the "octant rule", which assigns a different sign for various octants. The inverse dependence with the fourth power of the distance implies that only the closest groups play a role. To investigate the CD in the ground state of WT-PYP, we examined its crystallographic structure (1UWN) obtained from the Protein Data Bank (PDB). Two main contributors to the CD of the ground-state were recognized. The dominant one comes from the N69 atom, yielding a positive contribution to the CD. The second contribution comes from the S atom of Cys69 (S69), giving a negative contribution to the CD. The N69 contribution, however, is found to be stronger. The total steady-state CD of WT-PYP is thus expected to be slightly positive, as experimentally observed. Since the R52Q mutation has no effect on the steady-state CD spectra of the protein, it can be deduced that the local environment of the chromophore C=O remains similar to that of WT-PYP. This is consistent with the X-ray structure of R52Q (PDB, 2D02).

To determine the role of the C=O group's relative position with respect to the protein backbone, we computed the CD by summing the contributions of N69 and S69 atoms as a function of the C=O rotation about the C_2 - C_3 axis. The result is displayed in Fig. 4, where 0° corresponds to the



Fig. 4 Calculated variation of CD associated with the pG state of R52Q and WT-PYP as a function of C=O rotation angle about the C₂-C₃ axis. Positive angle corresponds to a rotation of C=O towards the Phe96 residue (inset).

ground-state configuration. Two observations are worthwhile. First, the strong negative CD signal, when the chromophore C=O is rotated by about 30°, was observed. As shown in the inset of Fig. 4, this rotation corresponds to a motion of the C=O towards the reader; it leads to a decrease of the distance between the chromophore C=O and the Phe96 residue, in agreement with photoisomerization trajectories⁸⁾. Contrary, the rotation in the opposite direction induces significantly smaller variations of the CD signal, the larger ones associated to positive signals. In order to reach quantitative conclusions, the calculated CD amplitudes of Fig. 4 have been scaled so as to yield a value of 2.7×10⁴ for an angle of 0°, which corresponds to the trans structure of pG. CD_{pG*} at 332 nm, estimated considering a structurally homogeneous excited state, is indicated by the solid gray line. It crosses the calculated CD curve at $\theta = +22^{\circ}$ and $+45^{\circ}$. Next, we took into account both the error on the experimental determination of CD_{pG*} and the error on the calculated CD by allowing an effective tolerance of ± 15 % on the level of CD_{pG*} in Fig. 4, the calculated CD curve being kept fixed. The dotted gray lines thereby obtained cross the calculated curve at values which define a confidence interval for the torsion angle: +17° $< \theta < +53^{\circ}$. The remarkably large negative average value of

 CD_{pG^*} (CD_{pG^*}) found considering a structurally heterogeneous excited state can be reached only if the distribution of the chromophore C=O angles is located in the same confidence interval. It can be inferred that upon excitation the main part of excited-state population undergoes the same structural changes. The excited state can be thus considered as structurally homogeneous. Interestingly, this flipping motion of the chromophore C=O has two effects. First, it drives N69 further away from the chromophore C=O and it puts S69 in a more favorable position for the octant rule, increasing its negative contribution to the CD signal. Second, one can see in Fig. 4 that a large rotation of the C=O group (> 90°) is not expected to have a significant effect on the CD signals. The δ CD associated to the chromophore in the full *cis* conformation ($\theta = 180^\circ$) is therefore expected to be very small. On the contrary, a partial flipping of the chromophore C=O ($+17^{\circ} < \theta < +53^{\circ}$) yields a large negative δ CD. Hence, the strong negative δ CD observed immediately after the excitation is due to a fast (<< 0.8 ps) unidirectional partial flip of the chromophore C=O group in the excited state.

To explore the C=O motion following the excited-state deactivation, we compared the kinetics of the $\delta\alpha L$ and δCD for the following two cases: (1) the CD associated with GSI has the same value as that of the excited state (CD_{GSI} = CD_{pG*}, i. e. the chromophore C=O remains twisted in GSI) and (2) the CD associated with GSI has the same value as that of the pG (CD_{GSI}=CD_{pG}, i. e. the chromophore C=O recovered its original position in GSI).

In Fig. 5, simulated transient absorption (a) and CD (b) curves for both hypotheses have been plotted. Each hypothesis predicts different behavior for the relaxation of the transient CD signal. If the geometry of the chromophore C=O in GSI is close to that of pG, there is no clear difference between the transient CD and transient absorption kinetics. In contrast, the transient CD is expected to exhibit a much



Fig. 5 (a) Normalized $\delta \alpha L$ and (b) δCD dynamics for the hypothesis that $CD_{GSI} = CD_{pG^*}$ (dashed line) and for the hypothesis that $CD_{GSI} = CD_{pG}$ (solid line)

slower decay than the transient absorption if the geometry of the chromophore C=O in GSI remains close to that of the excited state; a CD relaxation time of about 9 ps is obtained. Such a slow decay, and significant difference with the transient absorption decay, is not compatible with our experimental findings (Fig. 5). We therefore conclude that the conformation of the chromophore C=O in GSI is very close to that of the pG.

4. Conclusions

Motions of the *trans-p*-coumaric acid carbonyl group following the photo-excitation of the R52Q mutant of photoactive yellow protein have been investigated for the first time by ultra-fast time-resolved CD spectroscopy in near UV region. Quantitative analyses based on the octant rule and a kinetic model developed previously allowed following the photoinduced motion of the chromophore's carbonyl group. We suggested a description of the initial events occurring in the non-reactive part of the PYP photocycle. Immediately after the excitation, the transient CD showed a large negative peak, indicating that the carbonyl group undergoes a fast (<<0.8 ps) and unidirectional flipping motion in the excited state with an angle of about 17°-53°. For the proteins that do not enter the signaling photocycle, transient CD provides strong evidence that the carbonyl group moves back to its initial position, leading to the formation of a nonreactive GSI of trans configuration. The initial ground-state is then restored within 3 ps. Comparative study of R52Q and WT PYP provided direct evidence that the absence of arginine at 52-position has no effect on the conformational changes of the chromophore during those steps.

Acknowledgment

This work was conducted in cooperation with Dr. F. Hache, Dr. P. Changenet-Barret (Ecole Polytechnique, France) and Dr. Y. Imamoto (Kyoto University) for which we express our sincere gratitude.

References

- P. Changenet-Barret, C. Loukou, C. Ley, F. Lacombat, P. Plaza, J.-M. Mallet, and M. M. Martin: Phys. Chem. Chem. Phys., 12, 13715 - 13723, 2010.
- Y. Imamoto, and M. Kataoka: Photochem. Photobiol., 83, 40 49, 2007.
- Y. Hori, K. Nakaki, M. Sato, S. Mizukami, and K. Kikuchi: Angew. Chem. Int. Ed. Engl., 51, 5611 - 5614, 2012.
- F. Hache: In Circular dichroism: Theory, Spectroscopy; D. S. Rodgers, Ed.; Nova Science Publishers: New York, p. 255, 2012.
- Y. Imamoto, T. Ito, M. Kataoka, and F. Tokunaga: FEBS Lett., 374, 157 - 160, 1995.
- L. Mendonça, F. Hache, P. Changenet-Barret, P. Plaza, H. Chosrowjan, S. Taniguchi, and Y. Imamoto: J. Am. Chem. Soc., 135, 14637–14643, 2013.
- A. Rodger, and B. Norden: Circular dichroism and linear dichroism; Oxford University Press: Oxford, p. 293, 1997.
- G. Groenhof, M. Bouxin-Cademartory, B. Hess, S. P. de Visser, H. J. C. Berendsen, M. Olivucci, A. E. Mark, and M. A. Robb: J. Am. Chem. Soc., 126, 4228 - 4233, 2004.

液中レーザーアブレーションによるナノ粒子作製 :酸化亜鉛の還元・ナノ粒子化と空気電池への応用

レーザーバイオ化学研究チーム¹、関西大学システム理工学部²

谷口誠治1、木村優作2、佐伯拓2

1. はじめに

金属空気電池とは金属と酸素を反応させ電力を取り 出す装置であり、次世代の汎用電源として期待されてい る。この電池は正極側に活物質を必要とせず、その分電 池内に負極の活物質を多く充填できるため、従来の電池 に比べて放電容量を大きくできるという利点がある(図 1)。このことから近年、リチウムイオン電池に代わる 電源として様々な金属を負極側活物質に用いた研究が 行われている。通常空気電池は、充電可能な2次電池の 代わりに負極をカートリッジ化して用いる1次電池と して利用される。この理由は使用後の金属が粉末状の金 属酸化物となるためであるが、この金属酸化物を金属に 戻す(還元)することができれば、空気電池はリサイク ル可能なクリーンエネルギー源としてその応用範囲は 大きく広がるものと考えられる。

我々はこれまで、液中レーザーアブレーション法を用 いて金属酸化物の還元・ナノ粒子化を1段階で行う簡便 な手法の開発を行ってきた。この方式の特徴は、①液体 中の金属酸化物にレーザー光を照射して瞬時にプラズ マ化、原子化させることで酸素と金属を分離(還元)す る。②プラズマ化した金属は照射点近傍を離れると周囲 の液体により急速に冷却され、原子同士が凝集しナノ粒 子化する。またこの方式では液体自体が冷却剤となるた め、チャンバーや冷却ガス等を必要とせず、シンプルな 装置である。これまでの研究の結果、酸化第二鉄

(Fe₂O₃) 粉体の懸濁液にパルスレーザーを照射するこ とで酸化第一鉄 (Fe₃O₄) あるいは鉄 (Fe) への還元・ ナノ粒子化が起こることがわかった^{1,2)}。また、酸化マ グネシウム (MgO) 用いてレーザー照射後の生成物か ら空気電池電極を作成してその電気特性を調べた結果、 通常の Mg 金属板を用いた空気電池と同程度の出力電 圧と電流特性が得られ、液中レーザーアブレーションに より効率良く MgO のナノ粒子化が起こることがわかっ た³⁴⁾。

本報告では、新たな金属酸化物材料として酸化亜鉛 (ZnO)粉体を用いて液中レーザーアブレーションによ る還元・ナノ粒子化実験を行い、生成物の物性や電気特 性について評価した結果について述べる。亜鉛空気電池 は、補聴器やページャー用電池としての実用化例(図 2)があり、本手法の有用性をより実用に近い形で検証 できる。



図1 金属空気電池の動作原理図



図2 亜鉛空気電池の構造(電池工業会 HP (http://www.baj.or.jp)より抜粋)

2. 実験

図3 に液中レーザーアブレーション実験の模式図を 示す¹⁾。反応槽には底部が円錐状となっているナシ型フ ラスコを用いた。酸化亜鉛粉体と溶媒を加えた後、空気 中の酸素の影響を抑制するためアルゴン置換を行い、フ ラスコの底部からレーザー光を打ち上げた。この方式では、粒径の大きな酸化亜鉛粉体は底部に沈殿するためレ ーザー光を原料に直接照射できる。また溶媒の熱対流に より撹拌と同様の効果が得られ、微細化した生成物が溶 媒内に分散しやすい等の利点がある。照射原料には、酸 化亜鉛粉体 (ZnO、純度 99.9%、粒径 ~5µm、和光純薬) を用い、溶媒には蒸留水、アセトン、アセトニトリル

(MeCN)、エタノール(EtOH)を用いた。レーザー光 源には、ナノ秒パルス YAG レーザー(Surelite I (コン ティニュアム社)、パルス幅 8ns (FWHM)、ビーム径 6mm φ、エネルギー < 300mJ/pulse、繰り返し周波数 10Hz)の基本波(1064nm)および第二、第三高調波 (532nm、355nm)を用いた。また、参照実験として亜 鉛粉体(Zn、純度99.5%、粒径75~150µm、和光純薬) にレーザー照射を行い、生成物の比較を行った。レーザ 一照射後の懸濁液は、吸光光度計(V-570、日本分光) による吸収スペクトル測定を行い、生成粒子の粒径観測 および組成分析には走査透過電子顕微鏡(STEM) (TEM-ARM200F、日本分光)を使用した。



図3 液中レーザーアブレーション実験配置

3. 結果と考察

3.1 液中レーザーアブレーションによる酸化亜鉛の還 元・ナノ粒子化

図4に、ZnO 5mg を加えた懸濁液試料~1時間レー ザー照射(1064nm、2.8W、10Hz)した後の様子を示す。 図中(a)~(d)は、それぞれ蒸留水、アセトン、MeCN、 EtOHの溶媒(30ml)の場合である。照射前のZnO 粉体 は白色である。レーザー照射後のZnOは、蒸留水中で

は顕著な色の変化は見られなかったが、アセトンおよび MeCN 中では黄~茶色に、EtOH 中では黒色にそれぞれ 変化した。また、レーザー照射波長を第二高調波 (532nm、 1.3W、10Hz、1時間照射)および第三高調波 (355nm、 0.35W、10Hz、1時間照射)に変更した場合にも同様の 挙動が見られた。試料の色彩変化の要因には、還元 Zn ナノ粒子の生成、または溶媒分子の熱分解等の変成が考 えられる。それを確認するために、同様の溶媒中に亜鉛 (Zn) 粉体を加え、レーザー照射しZnナノ粒子懸濁液 を製作した。図5に、Zn粉体懸濁液に1時間レーザー 照射 (1064nm、2.8W、10Hz) した後の吸収スペクトル を示す。EtOH、MeCN 中では 240nm 付近、 350nm 付近 に吸収帯が確認できる。Zn 板の水中レーザーアブレー ションによる Zn ナノ粒子生成に関しては研究例があり、 報告ではこれらの吸収帯はそれぞれ Zn、ZnO ナノ粒子 に帰属される⁵。ZnOナノ粒子が生成するのは、吸収ス ペクトル測定時にZn ナノ粒子の一部が空気中の酸素と 反応したためと考えられる。一方、水を溶媒とした懸濁 液では、Zn ナノ粒子の吸収帯(240nm 付近)は観測さ



図4 酸化亜鉛 (ZnO) 粉体 (5mg) 懸濁液への1時 間レーザー照射 (1064nm、2.8W、10Hz) 後 の様子。溶媒:(a) 水、(b) アセトン、(c) アセ トニトリル、(d) エタノール れなかった。この理由は、レーザー照射により原子化さ れた Zn が以下の反応(式(1)、(2))により水分子と 直接反応し酸化されたためと考えられる⁵。

$$Zn + 2H_2O = Zn(OH)_2 + H_2$$
 (1)
 $Zn(OH)_2 = ZnO + H_2$ (2)

図 6 に、ZnO 粉体懸濁液への1時間レーザー照射 (355nm、0.35W、10Hz) 後の吸収スペクトルを示す。 ただし、光散乱の影響が大きいため、試料は測定前に希 釈 (~3 倍) するか (溶媒 EtOH、MeCN)、遠心分離に より大粒径の粒子を除去した(溶媒水)。また各溶媒の 吸収はそれぞれのスペクトルから差し引いてある。アセ トン溶媒については、波長300 nm以下にカルボニル基 に起因する大きな吸収帯を持つためスペクトル分析は できなかった。EtOH、MeCN 溶媒の懸濁液では、図 5 と同様のZnナノ粒子に起因する吸収帯(~240nm)が観 測され、ZnOの還元によりZnナノ粒子が生成したと考 えられる。水が溶媒の場合では、Zn ナノ粒子の吸収は 確認できなかった。これは、レーザー照射により Znナ ノ粒子が生成されたとしても、Zn 粉体懸濁液の場合と 同様に式(1)、(2)の反応が起こるためと考えられる。 この結果は懸濁液の色に変化がみられない点と矛盾し ない (図 4 (a))。また、EtOH 中では、粒子の光散乱等 の影響が大きく吸収帯の生成はわずかに見えるが、これ はおそらく、EtOH 中ではZnナノ粒子の生成率がMeCN よりも大きく濃度が高いことから粒子同士が凝集しや すく、見かけの粒径が大きくなる(2次粒子を形成す る) ためであると考えられる。EtOH 中の生成物は黒色 である(図4(d))が、最近市販されている Zn ナノ粒子

(粉体) は黄色 (American Elements 社) または黒色 (US research Nanomaterial 社) と報告されており、今回の実 験結果と一致する。おそらく、Zn ナノ粒子同士の凝集 により生成する 2 次粒子の影響等により色彩が変化す るものと考えられる。





図6 酸化亜鉛 (ZnO) 粉体懸濁液への1時間レーザー 照射 (355nm、0.35W、10Hz) 後の吸収スペクト ル。太実線:エタノール、実線:アセトニトリ ル、点線:水

3.2 電子顕微鏡による生成物の粒径・組成分析

レーザー照射により得られた生成物を走査透過電子 顕微鏡 (STEM) により観測した。 図7に、EtOH 溶媒 中 ZnO 粒子を1時間レーザー照射 (1064nm、2.8W、 10Hz) した後、図4(d)の懸濁粒子の STEM 画像を示す。 粒径 10~20nm の小粒径の粒子が多く存在し、その形状 はほぼ球形であることから、粒径 5µm の ZnO 粒子がレ ーザー照射によりナノ粒子化したことがわかる。図 8 に、同試料のエネルギー分散型 X 線分析 (EDX) 法に よる組成分析結果を示す。ナノ粒子内部の組成は 96% 以上が Zn であった。一方、O の組成比は 3%以内で、 粒子表面は再酸化しているが、内部には存在しないこと が分かった。また、ナノ粒子に含まれる炭素成分は2% 以下と低く、EtOH 溶媒内の炭素は影響しないことがわ かった。このことから、EtOH 溶媒中ではレーザー照射 により ZnO の還元・ナノ粒子化が効率良く、また高い 純度で起こることが明確となった。一方、溶媒が異なる と生成粒子の物性も変化する。図9に、MeCN 溶媒中 ZnO 粒子に1時間レーザー照射 (532nm、1.3W、10Hz) 後の粒子の STEM 画像を示す。生成粒子の粒径は 5nm 以下であり、EtOH 溶媒の場合に比べて小粒径であるこ とがわかった。また EDX 分析では、生成粒子には酸素 と亜鉛が共に含まれることがわかった(図 10)。但し、 装置の空間分解能の限界から定量評価はできなかった。 また、アセトン溶媒の場合でも同様の結果が得られた。 以上の分析から、液中レーザーアブレーション法により ZnOから還元Znナノ粒子が生成することが明らかとな ったが、ZnO の還元・ナノ化過程には使用する溶媒の 種類が大きく影響し、特に EtOH を用いた場合に還元 Znナノ粒子の生成率が高いことがわかった。



図7 EtOH 溶媒中 ZnO 粒子に1時間レーザー照射 (1064nm、2.8W、10Hz)後の懸濁粒子の明視野 STEM 画像



図8 図7粒子のEDXによる組成分析結果。(左)明視野STEM画像、(中)酸素、(右)亜鉛



図9 MeCN 溶媒中 ZnO 粒子への1 時間レーザー照射 (532nm、1.3W、10Hz)後の粒子の明視野 STEM 画像



図 10 図 9 粒子の EDX による組成分析結果。(左)明視野 STEM 画像、(中)酸素、(右) 亜鉛

3.4 レーザー還元 Zn ナノ粒子の空気電池への応用

レーザー照射により作成した還元 Zn ナノ粒子の空気 電池への応用について検討するため、実際に空気電池用 の負極電極を作成し、その電気的特性を調べた。試料に は、EtOH 溶媒 (30mg) 中に ZnO 粒子 (30ml) を加え た懸濁液にレーザー照射(1064nm、2.8W、10Hz)した ナノ粒子を用いた。十分に還元・ナノ粒子化するため、 照射時間は1時間以上行った。負電極は、レーザー照射 後乾燥したナノ粒子 50mg と Ag ペースト(大研化学工 業)を混合、ペースト化した後、Mg 板の上に塗布し、 ホットプレートで焼成 (250℃ 5分) して作成した (図 11(a))。亜鉛の融点は約420℃であるが、通常金属ナノ 粒子はバルク状態に比べ融点が低下する性質を持つた め、250℃で焼成できた。Agペーストは、還元 Zn ナノ 粒子表面の酸素を外し、配位結合に金属を組み込み、安 定した分散特性を得るために用いた。この負電極を用い て製作した空気電池の模式図を図 11(b)に示す。電解液 には飽和食塩水を用い、酸素を供給する正極には多孔質 炭素電極を使用した。正極、負極側の反応を下式に示す。

正極側: $1/2O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$ 負極側: Zn + 4OH⁻ \rightarrow Zn(OH)₄²⁻+ 2e⁻ \rightarrow ZnO+H₂O+2OH⁻+2e⁻



図11 (a)レーザー還元Znナノ粒子を用いて作成した負電極の写真、(b)亜鉛空気電池の模式図

空気中の酸素は正極側で水と反応して水酸化イオン (OH⁻) となり、水酸化イオンは負極側のZn と反応し て Zn(OH) $_4^{2-}$ を形成することにより発電する。また Zn(OH) $_4^{2-}$ は速やかにZnO と H₂O に分解する。

作成した亜鉛空気電池の出力電圧を計測した結果を 図 12 に示す。出力電圧は 1.41V であり、5 時間以上電 圧値を保持した。比較のために行った、負極に亜鉛板を 用いた空気電池の出力電圧は 1.0V であり、試作した Zn ナノ粒子空気電池の方がより高い電圧を得られること がわかった。また、市販の亜鉛空気電池の公称電圧は約 1.4V であり、これと比較しても遜色ない値であった。 さらにこの電池を用いて LED の点灯試験を行ったとこ ろ、10 時間以上の点灯動作が確認できた。これらの結 果から、レーザー照射により ZnO から還元した Zn ナ ノ粒子が空気電池として十分な性能を持つことが示さ れた。また、空気電池として使用後に生成される ZnO をレーザー照射により再度還元 Zn ナノ粒子化すること で、リサイクルも可能であることを示している。

4. まとめ

本研究では、液中レーザーアブレーションにより酸化 亜鉛 (ZnO)の還元・ナノ粒子化実験を行った。溶媒に エタノールを用いた場合に粒子径 20~50nm、純度 96% 以上の亜鉛 (Zn)ナノ粒子が生成されることがわかっ



図12 レーザー還元Znナノ粒子を用いて作成した亜鉛 空気電池の出力電圧計測結果

た。また使用する溶媒により生成物の粒径や組成が変化 することから、レーザー照射による還元・ナノ粒子化過 程には溶媒効果が大きいことが明らかとなった。また、 生成した還元Znナノ粒子を用いて亜鉛空気電池を試作 し、出力電圧1.41Vを得た。この値は、Zn板による空 気電池(1V)および市販の純亜鉛の空気電池(1.4V) と比較しても十分な性能である。以上の結果は、本手法 が金属酸化物の還元・ナノ粒子化およびエネルギー分野 への応用が可能であることを示すものである。今後は、 ZnOのレーザー還元過程の溶媒効果についての詳細な 検討や、装置開発を含めた還元金属ナノ粒子のより効率 的な作製手法に関する検討を行う。

謝辞

本研究の遂行にあたり、平成27年度大阪大学レーザ ーエネルギー学研究センター共同利用・共同研究(自由 研究課題型B2-21)の支援を得た。

参考文献

- T. Saiki, S. Taniguchi *et al.*: ISRN Renewable Energy, 2013, 827681, 2013.
- 2) 谷口誠治:月刊光アライアンス、8月号、pp.20-23、2013.
- T. Saiki, S. Uchida, S. Taniguchi *et al.*: International Journal of Suitainable and Green Energy, 3(6), pp.143-149, 2014.
- 4) 佐伯 拓、谷口誠治 他:電気学会論文誌 A、Vol.135、 No.10、pp.559-564、2015.
- 5) H. Zeng et al.: J. Phys. Chem. B, 109, pp.18260-18266, 2005.

極端紫外光源スズドロップレットのダイナミクス

理論・シミュレーションチーム

砂原 淳

1. はじめに

波長 13.5nm の極端紫外線(Extreme Ultra-Violet : EUV) が半導体リソグラフーにおける次世代光源として期待 されている¹²⁾。現在の半導体量産技術である ArF レー ザー(192 nm)を用いた液浸多重露光技術では今後計画 されている 10 nm 以下の回路線幅の半導体リソグラフ ィーに対応するのは技術的、価格的に容易でない。また、 半導体リソグラフィーに代わる技術としてインプリン トや自己組織化等の研究開発も進んできているが、10 nm 以下の半導体製造にそれらの技術を適用することに 関してはまだ技術的解決課題が多い。そのため半導体製 造コストの増大を抑制しつつ 10 nm 以下の半導体製造 を可能にする技術として、EUV 光源を用いた半導体リ ソグラフィーが目下のところ最も有力な次世代半導体 製造の方法と見なされている。EUV 光源が解決すべき 課題として、長年、光源出力不足が指摘されてきたが、 世界の二大EUV 光源メーカーであるオランダ ASMLの 傘下にある米国 CYMER 社、及び日本の(株) ギガフ ォトンにより精力的な研究開発が進められ、この数年間 でEUV 光源出力は飛躍的に増大し、徐々に量産光源と しての目標である EUV 出力 250 W に近づきつつある。 平成 27 年度末の段階ではギガフォトン社より 132 W~ 158 WのEUV光が3日間安定して出力されたことが発 表されるなど、ここに来て、半導体量産用光源が現実の ものとなりつつある。我々は H15-H19 年度に阪大レー ザー研を中心として実施された文部科学省リーディン グプロジェクト以来、EUV 発光の物理機構解明と高効 率、高出力化に向けたプラズマ条件最適化において実績 を挙げて来た。また、ギガフォトン社と共同で、研究で 得られた知見を実際の開発にフィードバックするよう 努めてきた。トムソン散乱計測の発展で放射流体物理は 直接実験検証されるようになり、研究は質的にますます 高度になっている。

現在、世界の EUV 光源研究は炭酸ガスレーザーを用

い、スズドロップレットにダブルパルス照射を行う方式 を中心に研究が進められている。この方式は直径数 10 µmのスズドロップレットにまずプレパルスレーザーを 照射し、適切なプリプラズマを生成した上でメインパル スである炭酸ガスレーザーを照射し、EUV 光を発生さ せる、二段階のレーザー照射を行うものである。この全 過程を放射流体計算で精度良くシミュレートするため、 我々は昨年度、質量及び運動量保存の新しい二次元放射 流体コードを開発した。

2. 放射流体シミュレーションコード開発

開発した放射流体コードの概要を述べる。流体の基礎 式であるオイラー方程式(連続の式、運動量の式、エネ ルギー式)を解く際、従来は非保存型スキームを用いて いた[3]が、連続の式、運転量の式については保存型ス キームを用いることとした。その結果、図1に示すよう に、従来スキームでは計算領域中のターゲットの質量が 本来保存されるべき一定値から時間的に変動していた が、一定値に保存されるという結果を得た。これは保存



図1 従来スキーム (実線) と開発したコードの計算 領域内の質量の時間変化

型スキームをもちいた当然の帰結である。一方、エネ ルギー式については従来どおり非保存型で解いている。 これは保存型では内部エネルギーの正値性が数値誤差 により破られることがしばしば生じることと、二温度 の扱いが困難となるためである。非保存型解法ではイ オンと電子の温度を独立変数として扱うことが可能に なるが、保存型解法では保存量である全エネルギーを 独立変数にとるしかないため、エネルギーと温度の間 を常に変換する操作が必要になり、このことも数値誤 差を増大させる原因となる理由でエネルギー式につい ては非保存型とした。

3. スズドロップレットのダイナミクス

現実のEUV 光源で用いられる直径20 µmのスズドロ ップレットに対し、プレパルスレーザーを照射した場 合の二次元放射流体シミュレーションの結果を図2に 示す。レーザーのスポットサイズはドロップレットと 同じ直径 20 µm である。レーザー波長は 1.06 µm, レー ザー強度は5×10¹² W/cm²、パルス幅は15fsである。ド ロップレットの右からレーザーを照射し、最初の15 fs のレーザー照射により、ドロップレット表面に最高100 eV 程度のプラズマが生成する. そのため、図 2(b)のレ ーザー照射後3 psの圧力分布に見られるように、レー ザー生成プラズマの高圧力でドロップレット表面に右 から衝撃波が形成される。衝撃波はドロップレット中 心部に向かって進行する。衝撃波が通り抜けた後の物 質の密度は低下するので、図2(b)に示す様に球の右半 分の密度が初期に比べて低下する。また、衝撃波は、 中心部に向かって収束した後に、レーザー照射と反対 側に伝播し、ドロップレットを通り抜ける。衝撃波が通 過後のスズドロップレットは気体と液体の混合状態に なるため、圧力、音速がともに急激に低下し、図2に示 すように密度が低い中空部分と、そのまわりを取り囲む 高密度のシェル状の部分に分かれる。このような中空構 造の形成は既に昨年度までの研究で計算されていたが、 今回、気体と液体の混合状態を含むスズの状態方程式を 高精度化した結果として、中空状態の形成過程で、単純 なシェル構造でない二重の内部構造が見られるように



図2 スズドロップレットの密度分布の時間変化。(a)レーザ
 一照射 1 ns 後、(b) 3 ns 後、(c) 5 ns 後、(d)7 ns 後、(e) 9 ns 後.

なった。さらに計算を続け、レーザー照射後 20 ns の密 度分布を図 3 に示す。図 2(e)のレーザー照射 9 ns 後の図 と比較すると二重構造が消え、単純なシェル構造に変化 した。これは気体と液体の混合領域では音速が小さい、 言い換えると圧縮性が高いため、二重構造が一つに合体 し、元の液体密度まで圧縮されたことを意味する。また、 表面付近に凹凸ができていることがわかる。これは本来 表面に働く表面張力を本シミュレーションでは考慮し ていないため、表面の擾乱が数値的に成長してい



図3 レーザー照射 20 ns 後のスズロップレットの密度 分布

ると解釈している。本来、気体と液体の混合領域でなけ れば音速が比較的大きいため、わずかな密度擾乱が生じ ても圧力波の伝播を経てならされる方向に働くが、気体 と液体の混合領域であるため、音速が小さく、擾乱抑制 が働かないことが推察される。圧力波にかわって擾乱抑 制機構として働く表面張力をシミュレーションに取り 入れることが次のステップである。

7. まとめ

極端紫外光源開発を目的として、レーザー照射された スズドロップレットのダイナミクスを高精度化された 二次元放射流体計算で解析した。改良されたシミュレー ションコードは質量、運動量の保存性を保証し、従来の 非保存型スキームを用いた計算に比べ、計算精度が格段 に向上した。精度の向上に伴い、いままで見えていなか った、ドロップレットのダイナミクスにおける二重構造 の形成や、二重構造から一重構造への合体現象が見られ た。また、表面に凸凹の成長がみられることから、表面 張力の効果を取り入れることが重要であると推察され た。現在の計算は 100 ns 程度までであり、極端紫外光 源開発で求められるマイクロ秒の計算には未だ対応で きていない。表面張力の導入を経て、マイクロ秒の計算 に挑戦する計画である。

今後はさらにこれらの研究をさらに進化させ、EUV 光源実用化を達成すること、さらには EUV 研究で得ら れた知見を広く EUV

外のレーザープラズマ光源の課題解決に生かしたい。

参考文献

- K. Nishihara, A. Sasaki, A. Sunahara, and T. Nishikawa: EUV Sources for Lithography, SPIE press, 2006.
- 東口武史,藤岡慎介、砂原淳、柳田達哉、溝口計:
 レーザー研究, 42, 14-22, 2014,
- A. Sunahara, A Sasaki and K Nishihara,: Journal of Physics: Conference Series 112, 042048, 2008.

高速点火における外部印加磁場の時間発展

理論・シミュレーションチーム

砂原 淳

1. はじめに

大阪大学では高速点火実験(FIREX 実験)を推 進しており、あらかじめ爆縮した高密度プラズマ を核融合点火温度である5keVに加熱することを 目指して研究を展開している。図1に高速点火方 式における加熱、点火の概要を示す。まず、コー ンターゲット付き燃料球を爆縮し、高密度爆縮コ アを生成する。その後、コーンターゲット内壁先 端部に超高強度レーザーを照射し、高速電子を発 生させる。発生した高速電子が高密度爆縮コアを 加熱し、核融合点火条件を満たす高密度、高温状 態に達すると核融合点火が生じ、燃焼に至る。こ の高速点火方式は中心点火方式などの他の加熱 方式に比べてより少ないレーザーエネルギーで 核融合点火を実現できる可能性があるため非常 に魅力的な加熱方式であると見なされており、現 在に至るまで効率良い加熱実現に向けた研究が 続けられている。加熱効率を向上させるには発生 する高速電子の制御が鍵となる。コーンターゲッ ト内壁先端部に照射された加熱用超高強度レー ザーのエネルギーは、発生する高速電子の運動ネ エルギーに変換されるが、コーン先端部と爆縮コ アの間は100 um 程度離れており、発生する高速 電子は半角で数 10 度から 100 度程度の発散角を 有する。このため、コーンターゲット先端部から 爆縮コアへと高速電子が輸送される間に、図 2(a) に示すように高速電子は空間的に広がってしま

い、高密度爆縮コア加熱に寄与する割合は減少し てしまう。そこで、図2(b)に示すように外部磁場 を印加し、高速電子を磁力線に巻きつかせ、磁力 線に沿って高密度爆縮コアへとガイドさせる方 法が考案された。近年、レーザーを用いた高強度 磁場発生方式が開発され、キロテスラ級の高強度 磁場が利用可能である」。キロテスラ級の高強度 磁場をターゲットに印加することにより、高速電 子を磁力線の周り数10 umのラーマー半径内に閉 じ込め、磁力線に垂直な方向への運動を抑制し、 ガイドする磁力線の空間分布を最適化すること で、発生した高速電子を効率良く高密度爆縮コア へ導く。この外部磁場による高速電子ガイディン グを成功させるにはまず、外部磁場をコーンター ゲット内部に印加できることが必要条件である。 実際の実験条件では、外部印加磁場生成コイルは コーンターゲットの外側に置かれることが想定 されており、磁力線は反磁性を持つコーン壁を通 して拡散する必要がある。この磁力線の空間的な 発展を理解するため、数値シミュレーションによ るコイル磁場の生成と磁場分布の時間発展につ いて計算したので報告する。

2. 磁場分布の時間発展計算

磁場の発生及び磁場分布の時間発展を計算す るための基礎方程式として Maxwell 方程式を解く コードを開発した。高速点火における外部磁場印



図1 高速点火における加熱、点火の概要



図2 (a)従来の高速点火,(b)外部印加磁場による 高速電子ガイドを行う高速点火

加はコーンを外部から取り囲むようにコイルが 設置され、発生する磁力線はコーンの軸に対して 対称である。そのため、円柱座標系(r, θ ,z)で方 程式を解く。 θ 方向の一様性を仮定することで、 式(1)及び式(2)に示すように Maxwell 方程式を簡 略化し、計算時間の短縮化を図る。ここで E は電 界、H は磁界、*j* は電流密度である。また、 μ は

$$\frac{\partial(\mu H_r)}{\partial t} - \frac{\partial E_{\phi}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial(\mu H_{\phi})}{\partial t} - \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{\partial E_r}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial(r\mu H_z)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(rE_{\phi}) = 0$$
(1)

$$\frac{\partial(\epsilon E_r)}{\partial t} + \frac{\partial H_{\phi}}{\partial z} = -j_r$$

$$\frac{\partial(\epsilon E_{\phi})}{\partial t} + \frac{\partial H_z}{\partial r} - \frac{\partial H_r}{\partial z} = -j_{\phi}$$

$$\frac{\partial(r\epsilon E_z)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial r}(rH_{\phi}) = -rj_z$$
(2)

透磁率、 ε は誘電率である。また、物質を流れる 電流を考慮するために、オーム則として、 $j = \sigma E$ の関係を用いた。ここで σ は導電率である。Maxell 方程式の数値解法としてはYee格子を用いて方程 式を差分化する FDTD (Finite Difference Time Domain)が有名である²⁾が、境界条件の取り扱いの 容易さから、特性曲線を用いた方向分離解法を用 いた。この特性曲線を用いた解法は r 方向、z 方 向のそれぞれの方向に対し、特性曲線にそって保 存量が輸送されることを用いた解法であり、初め から前進波、後退波の二つの波が存在するため、 境界において自然な形で自由境界を設定できる メリットがある。また、すべての物理量がセル中 心で定義されるため、多次元であっても物理量の グリッド点の設定が容易である。

3. 計算結果

図3に計算条件を示す。空間の一点に電流源を 置き、紙面裏側から手前に向けて時間的に一定な 電流を流す。これにより電流源印加直後に電流源 のまわりに電場、磁場が発生し、電流源を起点と して磁場、電場の変動成分が空間を時間的に伝播 して広がっていく。図4に磁場強度の時間発展を 示す。電場、磁場が空間を光速で伝播し、定常的 な磁場強度分布が形成されるのがわかる。

次に電流源の直下に厚さ40 μmの導電体をおいた場合の計算結果を示す。導電体は導電率 106





図 4 時刻 100 ps における電流源まわりの磁場強 度分布の発展.実線は磁力線を示す

(ジーメンス/m)を持つシリンダーとした。図5に 示すように、磁場は反磁性である導電体を避けて 空間的に広がる。また、図5矢印で示す通り、導 電体中を磁場が拡散しているのがわかる。一般的



図 5 電流源の直下に導電率 10⁶ (ジーメンス/m)の シリンダーをおいた場合の磁場の発展。(a) 時刻 20 ps, (b)時刻 60 ps, (c) 時刻 100 ps.

に反磁性とみなされる物質であっても、本計算で 示したように有限の導電率を持つ物質に対して、 磁場は物質中を拡散していく。この計算は高速点 火におけるコーン壁を通した外部磁場印加を模 擬したものになっており、反磁性であるコーン壁 を磁場が拡散するのに100 ps程度以上の時間を要 することがわかる。

7. まとめ

高速点火実験(FIREX 実験)における外部印加 磁場の時間発展、特にコーンターゲット内部への 拡散に関して計算結果を示した。ここで示した計 算例では導電体の導電率を時間、空間で一定とし て計算を行ったが、実際の導電率は物質の状態に 応じて変化するため、より現実的な導電率モデル を導入することが必要であり、これが次の課題で ある。

参考文献

- S. Fujioka, Z. Zhang, K. Ishihara, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Johzaki, A. Sunahara, N. Yamamoto, H. Nakashima, T. Watanabe, H. Shiraga, H. Nishimura, and H. Azechi, *"Kilotesla Magnetic field due to a Capacitor-Coil Target Driven by High Power Laser"*, Scientific Reports, 3 (2013) 1170-1-7.
- 字野亨: FDTD 法による電磁界及びアンテナ解 析(コロナ社, 1998).

レーザー核融合炉液体壁チェンバー内の金属蒸気の挙動の解析

理論・シミュレーションチーム

古河裕之、乗松孝好1

1大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

1. はじめに

高速点火レーザー核融合炉発電プラント 「KOYO-fast」では、厚さ3mmから5mm程度の 液体リチウム鉛が第一壁に沿って滝状に流下す る液体壁構造により、第一壁を保護している 1-3)。 液体壁は、核融合燃焼により生じた Χ 線、α 粒 子及びデブリ粒子により、液体から中性気体、部 分電離プラズマへと相変化を伴いながらアブレ ーションする。生成されたプルームがチェンバー 中心付近で衝突すると、エアロゾル等が生ずるこ とが予想される。それは金属蒸気の排気、引いて は核燃焼反応にとって大きな妨げとなる。高速点 火レーザー核融合炉発電プラント「KOYO-fast」 では、図1に示すように、第一壁から飛散したプ ルームがチェンバー中心部に集中しないように、 第一壁を角度を付けたタイル構造にしている²⁾。 x, y は、2 章で述べるシミュレーションの座標軸 を表す。



図1 KOYO-fast の液体壁チェンバー第一壁の タイル構造の概念図

これらの複合複雑現象を解析するため、著者ら は 2 次元の統合シミュレーションコード DECORE-2D(<u>DEsign CO</u>de for <u>REactor</u>)を開発 した。炉心プラズマからのX線、 α 粒子及び粒子 等と、液体壁及びアブレーション生成プルームの 相互作用を2次元的に取り入れ、プルームの挙動 を2次元的に評価した。

2 章で DECORE-2D について述べる。3 章では、
 プルームの2次元的挙動について詳述する。4 章は、結言と今後の課題である。

2. 開発したシミュレーションコード^{1,3)}

図 2 に DECORE-2D の 概 要 を 示 す。 DECORE-2D は、原子モデルコード、状態方程式 コード、放射輸送係数コード、阻止能コード、ア ブレーション解析コードから成る統合コードで あり、ACONPL はアブレーション解析コード部 を指す。解析コード部の2次元化には、「保存保 証型 CIP 法」及び「M 型 CIP 法」を用いた⁴。



図2 DECORE の概要

図3は、チェンバー内での核燃焼点と1枚のタ イルの位置関係を表したものである。チェンバー 半径が3mのところでは、タイルの幅は約80cm である。核融合燃焼により生じたX線、α粒子 及びデブリ粒子は、タイルに対して垂直ではなく 斜めに照射される。図中の0点では、E点よりも 照射される強度が低下する。



図3 チェンバー内での核燃焼点と1枚のタイル の位置関係

燃料球から液体壁表面までの距離が3mの部位 に、垂直にX線、α粒子、及びデブリ粒子が照射 される場合の炉心からのX線、α粒子、及びデブ リ粒子の照射強度については、文献1と文献5、 鉛に対するX線の吸収係数については、文献1 を参照されたし。

斜め照射効果を考慮した強度分布は、式(1)及び (2) で表される。

$$I(y,t) = I_{300cm}(t)I(y)$$
(1)

$$I(y) = \frac{300^2}{(70-y)^2 + 3 \times 150^2} \frac{150\sqrt{3}}{\sqrt{(70-y)^2 + 3 \times 150^2}}$$
(2)

ここで式(1) 中の I_{300cm} (t) は、燃料球から液体壁 表面までの距離が3mの部位に、垂直にX線、α 粒子、及びデブリ粒子が照射される場合の炉心か らのα粒子、及びデブリ粒子の強度である。yの 単位は cm である。 図4は、斜め照射効果を考慮した強度分布、式 (2)である。y=0 点が、図3のE点に対応する。E 点からO点に向かうにつれて、強度が減少してい る。このことから、1枚のタイルから吹き出す金 属蒸気の横方向への拡がりを評価するには、図3 のE点(図4のy=0点)近傍を詳細に解析すれば 良い、ということがわかる。



図4 斜め照射効果を考慮した強度分布

本研究では、液体金属として LiPb ではなく鉛 を用いている。Li と Pb は液体中では分子オーダ ーで一様に分布していると考えられる。アブレー ションは十分短い時間に発生するので、その蒸気 圧の温度依存性は異なるが、同時に気化して重た い鉛で運動は支配されると考えて問題ない。Li の 気化熱なども無視できる。

文献6-8 より、初期厚みが 3 mm - 5mm あれば 流れが安定になることがわかっており、本研究で は液体鉛の初期厚みを3 mmとした。液体鉛の初期 温度及び最低温度は、KOYO-fast の運転条件に合 わせ823.15 K (550 ℃)とした¹⁻³⁾。鉛直方向の液 体鉛の運動は無視した。

図 5 は、2次元シミュレーションのモデル図で ある。タイルの端から2 cmの部分を切り出し、照 射強度を式(1)及び(2) で求め、アブレーション生 成プルーム等の数密度分布等を評価した。



図5 2次元シミュレーションのモデル図

3. 生成されるプルームの2次元的挙動解析

レーザーが燃料球に照射されてから 8 µs 後ま で、2 次元シミュレーションを行なった。図6は、 2 次元シミュレーションにより求めた、液体及び プルームの数密度分布の時間発展である。図6か らわかるように、プルームの根元(壁側)は横に 広がっているが、先頭部分はあまり横方向には広 がっていない。

飛散するプルームの y 方向の拡がり角度を評価するために、次式で x 方向と y 方向のフラックスを評価した。

$$F_{x}(t) = \int_{s} \rho(x, y, t) v_{x}(x, y, t) ds$$
(3)

$$F_{x}(t) = \int_{a} \rho(x, y, t) v_{x}(x, y, t) ds$$
(4)

ここで S は、プルームと真空の境界面を表す。

図 7 は、2 次元シミュレーションにより得られ た、x 方向と y 方向のフラックスの時間発展で ある。図 7 から、x 方向のフラックスの時間平均 <F_x>と y 方向のフラックスの時間平均<F_y>の



図 6 2 次元計算により得られた数密度分布 (a) 0 µs 時 (b) 2 µs 時 (c) 5 µs 時 (d) 8 µs 時 比 < F_y >/< F_x > は、0.02 程度と評価できる。

プルームの y 方向への拡がり角度 δ を次式 で評価した。

$$\delta = \tan^{-1} \left[\left\langle F_{y}(t) / F_{x}(t) \right\rangle \right]$$
(5)

拡がり角度 δは1 °程度、と見積もられた。1 枚のタイルから吹き出すプルームは、タイルの表 面に対して垂直な方向にほぼ直進する、と評価で きることが分かった。



図7 x 方向と y 方向のフラックスの時間発展

4. 結言と今後の課題

本研究により、レーザー核融合液体壁チェンバ ー第一壁のタイル構造の有効性が議論できるよ うになった。今後、隣接する2枚のタイルから飛 散するプルーム同士の衝突について、粒子法、分 子動力学等により評価を行い、チェンバー内環境 を3次元的に評価する。

参考文献

- 古河裕之,城崎知至,神前康次,乗松孝好,疇地宏, 西川雅弘,田中和夫,三間圀興,苫米地顕,山中千 代衛:プラズマ核融合学会誌,82,617-627,2006.
- 2)神前康次, 乗松孝好, 古河裕之, 林巧, 惣万芳人, 西 川正史, 苫米地顕: プラズマ核融合学会誌, 83, 19-27, 2007.
- 古河裕之, 乗松孝好: プラズマ核融合学会誌, 87, 51-55, 2011.
- 4) 矢部孝,内海隆行,尾形陽一: CIP法,森北出版, 2003.
- T. Johzaki, K. Mima, Y. Nakao, H. Nagatomo, and A. Sunahara: Proc. 3rd Inertial Fusion Sciences and Applications, 2003.
- T. Kunugi, T. Nakai, Z. Kawara, T. Norimatsu, and Y. Kozaki ; Fusion Engineering and Design 83 (2008) 1888–1892.
- Z. Kawara,, K. Yamamoto, T. Kunugi, T. Norimatsu;
 Fusion Engineering and Design 85 (2010) 2181-2186.
- Kunihiro Yamamoto, Zensaku Kawara, Tomoaki Kunugi, and Takayoshi Norimatsu ; Fusion Science and Technology, 60 (2011) 585-589.

レーザーピーニングにおける残留応力生成の解析

理論・シミュレーションチーム

古河裕之、部谷 学¹、中野人志² ¹大阪産業大学工学部 ²近畿大学理工学部

1. はじめに

レーザーピーニングは、金属表面処理技術の1つであ り、類似技術にショットピーニングがある.レーザーピ ーニングでは、レーザー誘起衝撃波によって金属の塑性 変形を引き起こし、ピーニング効果として表層に圧縮残 留応力や加工硬化を付与する。現在、原子力・宇宙航空 産業を中心に実用化されている¹。

図1に、レーザーピーニングの原理図を示す。閉じ込 め層(大気、水等)を介した短パルスのレーザー照射に より、金属表面がアブレーションし、アブレーション生 成プルームの急激な膨張が閉じ込め層の慣性により抑 えられ、大きな圧力が金属表面に付与される。その圧力 が金属の降伏応力を超えると、塑性変形が起こり、表層 部が伸展し、未変形部の拘束によって圧縮残留応力が付 与される。この圧縮残留応力が,疲労特性の改善、耐応 力腐食割れ特性の向上に寄与するとされている。



図1 レーザーピーニングの概念図

本研究において、レーザーピーニング条件の最適化を 目的とし、レーザー光の吸収から、プルームの発生、プ ルーム膨張の閉じ込めによる圧力波の発生、圧力波の材 料内の伝搬と塑性応力の生成までを計算できる統合シ ミュレーションコードを開発した²⁴。統合シミュレー ションを行った結果、塑性応力の空間分布の時間発展が 固体金属内部の温度分布の時間発展に影響されること を、新たに見出した。

固体金属は、レーザーの照射により直接加熱されるだ けでなく、閉じ込め層により閉じ込められた高温のプル ームにより、再加熱される。塑性応力の生成に関して、 高温のプルームによる再加熱の効果が重要である、こと が示唆された。熱による圧力が高いところは、歪が正と なるので、熱の伝搬に応じて圧縮塑性応力から引張塑性 応力に転じる可能性がある、ことが示唆された。

2. 開発したシミュレーションコード²⁻⁴⁾

2.1 統合シミュレーションコードの概要

図 2 は、開発した統合シミュレーションコード (Integrated Simulation code for Laser Ablation Peening, ISLAP)のフローチャートである²⁴⁾。原子モデルコード を用いて、原子のエネルギー準位、ポピュレーション、 電離度を様々な温度密度で求める。そのデータを状態方 程式コードに入力し、圧力、比熱等を求める。原子のエ ネルギー準位、ポピュレーション、電離度などのデータ をスペクトルコードに入力し、X線の放射係数、吸収係 数等を求める。圧力、比熱、X線の放射係数、吸収係数 等のデータをテーブル化し、Laser Ablation Peening Code (LAPCO)に入力し、固体金属の温度上昇、固体中の応力 生成、相変化、流体運動、放射輸送等の計算を行う。

図3は、LAPCOのフローチャートである。



図2 統合シミュレーションコードのフローチャート



図3 LAPCOのフローチャート。

2.2 応力計算のモデリング5

変位量 u_z と弾性歪 ε_z^e の関係は、次式で表される⁵。 $\varepsilon_z^e(z,t) = \frac{\partial u_z(z,t)}{\partial u_z(z,t)}$

$$\partial z$$
 (1)

弾性応力 σ_z^e と弾性歪 ε_z^e の関係は次式で与えられる⁵。 $\sigma_z^e(z,t) = (\lambda + 2\mu) \varepsilon_z^e(z,t)$ (2)

ここで*λ*, *μ*はラメ定数であり、ヤング率 *E*、ポアソン 比 *ν* を用いて、次のように表される⁹。

$$\lambda = \frac{v E}{(1+v)(1-2v)} , \quad \mu = \frac{E}{2(1+v)}$$
(3)

(1)式の両辺を時間微分することにより、弾性歪 e^{c} と 固体内部の場の速度 v_z が関係づけられる⁵。

$$\frac{\partial \varepsilon_{z}^{e}(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial u_{z}(z,t)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial u_{z}(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial v_{z}(z,t)}{\partial z}$$
(4)

場の速度 v2 は、次の運動方程式を解いて得られる。

$$\begin{split}
o(z,t) \left[\frac{\partial v_z(z,t)}{\partial t} + v_z \frac{\partial v_z(z,t)}{\partial z} \right] \\
&= \frac{\partial}{\partial z} \left[\sigma_z^e(z,t) + \sigma_z^p(z,t) - P(z,t) \right]
\end{split}$$
(5)

ここでPは圧力であり、状態方程式から得られる。 ρ は 質量密度である。

塑性応力について考察する。せん断応力は無視する。 x, y 方向の全歪を 0 とし、塑性歪の非圧縮性より、以 下の関係式が得られる⁵。

$$\varepsilon_x = \varepsilon_x^e - \varepsilon_z^p / 2 = 0 \tag{6}$$

$$\varepsilon_{y} = \varepsilon_{y}^{e} - \varepsilon_{z}^{p} / 2 = 0 \tag{7}$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_z^e + \varepsilon_z^p \tag{8}$$

$$\sigma_{x} = \lambda e + 2 \mu \varepsilon_{x}^{e} = \lambda e + \mu \varepsilon_{z}^{p}$$
(9)

$$\sigma_{y} = \lambda e + 2 \mu \varepsilon_{y}^{e} = \lambda e + \mu \varepsilon_{z}^{p}$$
⁽¹⁰⁾

$$\sigma_{z} = \lambda e + 2 \mu \varepsilon_{z}^{e} = (\lambda + 2 \mu) \varepsilon_{z}^{e} + \lambda \varepsilon_{z}^{p}$$
(11)

$$e = \varepsilon_x^e + \varepsilon_y^e + \varepsilon_z^e = \varepsilon_z^e + \varepsilon_z^p \tag{12}$$

塑性歪の増分と応力の関係より、次式が得られるか。

$$d\varepsilon_{z}^{p} = \frac{2}{3}d\lambda \bigg[\sigma_{z} - \frac{1}{2}(\sigma_{x} + \sigma_{y})\bigg] = \frac{2}{3}\mu d\lambda \big(2\varepsilon_{z}^{e} - \varepsilon_{z}^{p}\big)$$
(13)

$$\sigma_0 \leq \sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\left(\sigma_x - \sigma_y \right)^2 + \left(\sigma_y - \sigma_z \right)^2 + \left(\sigma_z - \sigma_x \right)^2 \right]^{1/2} \\ = \mu \left| 2 \varepsilon_z^e - \varepsilon_z^p \right|$$

(14)

ここで、 の は降伏応力である。

3. 塑性応力の評価

水中でアルミニウムにレーザーを照射した場合のシ ミュレーションを行った。レーザー強度10GW/cm²、波 長1064 nm、パルス幅10 ns、時間波形は矩形波とした。 図5は、固体金属中の塑性応力の空間分布の時間発展で

-64 -
ある。0.366 µs は塑性波が2 mm 伝搬する時間である。 10 µs 時に最も強い圧縮塑性応力が生成されている。そ の後時間が経過するにつれて、固体金属表面付近から、 圧縮塑性応力が弱くなっていくことが分かる。



図 5 塑性応力の空間分布の時間発展

図6は、固体金属内部の温度分布の時間発展である。 0.366 µs 時では、固体金属表面付近の薄い領域が高温 になっている。10 µs 時に温度が低下した後、50 µs まで再び温度が上昇しているが、これは水により閉じ 込められたプルームが熱源となり、固体金属表面を加 熱したためと考えられる。その後時間が経過するにつ れて、固体表面付近の温度が下がり、固体金属の奥に 熱が伝搬している。その熱の伝搬につれて、固体金属 表面付近から、圧縮塑性応力が弱くなっていく。



図6 固体金属内部の温度分布の時間発展

図7は、0.1 ms 時から1 ms 時にかけての、固体金属 中の塑性応力の空間分布の時間発展である。ほぼ同一の 曲線である。



図7 塑性応力の空間分布の時間発展

図8は、0.1 ms 時から1 ms 時にかけての、固体金属 中温度分布の時間発展である。温度低下時には、塑性応 力は温度分布の変化にほとんど影響されないことが示 唆された。



図8 固体金属内部の温度分布の時間発展

4. 結言

固体から液体、液体から中性気体、中性気体から部分 電離プラズマへの相変化の効果を取り入れたレーザー ピーニング統合シミュレーションコード (ISLAP) を開 発した。 水中レーザーピーニングのシミュレーションを行い、 塑性応力の空間分布の時間発展、及び残留応力の評価を 行った。塑性応力の空間分布の時間発展、及び残留応力 が、固体金属内部の温度分布の時間発展に影響されるこ とを、新たに見出した。

固体金属は、レーザーの照射により直接加熱されるだ けでなく、閉じ込め層により閉じ込められた高温のプル ームにより、再加熱される。塑性応力の生成に関して、 高温のプルームによる再加熱の効果が重要である、こと が示唆された。熱による圧力が高いところは、歪が正と なるので、熱の伝搬に応じて圧縮塑性応力から引張塑性 応力に転じる可能性がある、ことが示唆された。また、 温度低下時には、塑性応力は温度分布の変化にほとんど 影響されないことも示唆された。

参考文献

- K. Ding and L. Ye, "Laser shock peening", Woodhead Publishing Limited, 1-44, 2006.
- 古河裕之、部谷学、中野人志:レーザー研究, 24, 784-791, 2014.
- 3) 古河裕之: レーザー研究, 36, 742-746, 2008.
- 古河裕之、藤田和久、森谷信一:
 プラズマ核融合学会誌, 87, 642-649, 2011.
- K. Ding, and L. Ye: 'Laser shock peening Performance and process simulation', CRC Press, 2006..

誘電体多層膜偏光子のレーザー損傷耐性データベース

レーザー技術開発室

本越伸二、岸田知門、實野孝久¹ ¹大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

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、ビー ムスプリッタ、偏光子など、多くの光学素子が使用され ている。高出力で動作するレーザー装置では、しばしば レーザー光による光学素子の損傷 (レーザー損傷) が問 題となる。損傷が発生すると、レーザー装置が当初の性 能 (特性)を発揮できなくなるだけではなく、他の光学 素子の損傷を引き起こす要因にもなる。そのため、光学 素子のレーザー損傷耐性(損傷しきい値)の向上は、高 出力レーザー装置および応用技術にとって重要な課題 であり、国内外の多くの企業・研究機関で、損傷耐力向 上をめざして研究、開発が行われている。

我々は、高耐力光学素子の開発を進めるとともに、平 成 17 年度より、企業からの依頼により光学素子のレー ザー損傷しきい値評価試験を行っている。平成 27 年度 は、29 件の相談を受け、18 件の評価試験を実施した。 その一方で、光学素子のレーザー損傷しきい値の標準化 と情報発信を目的として、「レーザー損傷耐性データベ ース化試験(以下、データベース化試験)」を実施している。これまで、波長1064 nm、532 nm、355 nm、248 nmのシステムに用いる光学素子に対して試験を実施し¹³、 試料を提供頂いた企業に直接結果を報告し、今後の開発 目標にして頂いている。また、レーザー総研のホームペ ージ上に、データベース化試験の結果を公表し、ユーザ ーの皆さんにも利用して頂いている⁴。表1 に、これま で実施したデータベース化試験の内容を示す。7 年間で 合計 509 個の光学素子のデータを蓄積することができた。

平成 27 年度は、1064 nm 用誘電体多層膜偏光子のデ ータベース化試験を行った。

2. 誘電体多層膜偏光子の特徴

「偏光子」は、入射する光を偏光方向によって分離す るために用いる光学素子で、一般には P 偏光を透過し、 S 偏光を反射するようになっている。レーザー装置の中 では、発振器内Qスイッチや、光アイソレータと一緒に

衣1 レーリー損傷的性ケータバー人化試験実施リスト					
実施回数	対象素子	波長[nm]	角度[゜]	偏光	年度
第1回	高反射ミラー	1064	45	Р	L120
第2回	反射防止膜	1064	0	-	ΠZU
第3回	高反射ミラー	532	45	Р	1101
第4回	反射防止膜	532	0	-	пи
第5回	高反射ミラー	355	45	Р	1100
第6回	反射防止膜	355	0	-	пгг
第7回	高反射ミラー	248	45	Р	110.2
第8回	反射防止膜	248	0	-	HZ3
第9回	ダイクロイックミラー	1064	45	Р	1104
第10回	ダイクロイックミラー	532	45	Р	Π24
第11回	高反射ミラー	1064	45	Р	
第12回	反射防止膜	1064	0	-	п29
第13回	高反射ミラー	532	45	Р	Цре
第14回	反射防止膜	532	0	_	Π20

表1 レーザー損傷耐性データベース化試験実施リスト

使用される。図1に一般的な誘電体多層膜偏光子の分光 透過特性の計算例を示す。計算の設計では、入射角度を 56.5°とし、屈折率2.1と1.45の2種類の材料を32層 積層した。図より、P 偏光の透過率が高く、かつS 偏光 では低い領域は、1040 nm~1070 nm の僅か30 nm 程度 しかなく、多層膜ミラーや反射防止コートに比べて狭い。 言い換えると、高性能偏光子の実現には、多層膜に使う 材料の選択や膜厚制御など、設計・製作時の高度な技術 が要求されることになる。レーザー装置の出力を制限す る原因の一つになっている。

3. 評価試料の仕様

データベース化試験を行った多層膜偏光子の特性仕様と参加企業数、試料数を表2に示す。入射角度は56.5°とした。この角度は、ガラス基板のブリュースター角であり、コートを施さない裏面のP偏光の反射がゼロになる。また、1064nmの波長に対して、P偏光反射率を2%以下、S偏光反射率を99.5%以上とした。反射防止膜と同様に、透過するP偏光に対するレーザー損傷しきい値は基板材料や、基板表面の状態に大きく依存するため、石英ガラス基板で、10Å以下の光学研磨仕上げであることを要求した。

参加企業数は9社、15個の試料について、P 偏光(第 15回)とS 偏光(第16回)に分けて、評価試験を行った。





表2 多層膜偏光子の仕様と照射条件

	第15回	第16回
	多層膜	偏光子
波 長 [nm]	10	64
入射角度 [゜]	56	5.5
反射率 [%]	<2%@P偏光、	>99.5@S偏光
基板材料	石英	ガラス
基板研磨状態	RMS	<10 Å
裹面研磨状態	表面と同様	
参加企業数	9)
評価試料数	1	5

照射条件		
波 長 [nm]	1064	
パルス幅 [ns]	10	
入射角度 [゜]	56	6.5
偏光	Р	S

4. 評価装置と方法

レーザー損傷しきい値評価試験には、波長 1064 nm、 パルス幅 10 ns の Q スイッチ Nd:YAG レーザー (Spectra Physics 社 Quanta-ray)を使用した。縦モード、横モード ともに単一モード発振器の出力を増幅器により増幅し た後、焦点距離 3000 mm のレンズを用いて試料上に集 光した。試料に照射するレーザーの時間波形、エネルギ ーは、バイプラナ光電管とエネルギーメータでそれぞれ 計測した。また、レンズから試料表面までと同じ距離に なる位置に CCD カメラを設置し、試料上のビーム形状 およびビームサイズを計測した。照射レーザー光のエネ ルギーは、1/2 波長板とプレート型偏光子を用いて調整 した。

評価方法には、1-on-1 (1 パルス照射毎に損傷の有無 に関わらず照射位置を移動する)試験法を採用した。照 射前後の試料表面をノマルスキー顕微鏡 (50 倍)によ り観察した。レーザー損傷しきい値は、損傷が発生した 最小エネルギー密度として決定し、照射ガウス分布のピ ークエネルギー密度で表した。

5. 多層膜偏光子のレーザー損傷しきい値

図2に多層膜偏光子に対するデータベース化試験の結

果を示す。図2(a)、(b)はそれぞれ P 偏光、S 偏光照射時 の結果である。どちらの場合も損傷閾値のバラツキは大 きかった。多層膜偏光子の設計・製作時の僅かな条件の 違いによってレーザー損傷耐性が大きく変わることを 意味している。P 偏光の場合の最大損傷しきい値は 92 J/cm²、最頻度数しきい値は 20-30 J/cm²であった。S 偏 光照射時の損傷しきい値は、相対的に P 偏光の場合より も高い。これは、S 偏光が多層膜内で反射するのに対し て、P 偏光は多層膜を透過し、基板表面の影響を大きく 受けるためである。S 偏光の最頻度数レーザー損傷しき い値は約 50 J/cm²、最大損傷しきい値は 500 J/cm²を越え





ている。このフルエンスは、現在の評価用レーザー装置 の最大エネルギー密度であり、10 ヶ所照射したが損傷 しなかった。

このフルエンスでは、通常の石英ガラス表面は容易に 損傷を引き起こす。このように、S偏光に対しては誘電 体多層膜ミラーの損傷しきい値と同等以上の試料も存 在することが確認された。また注目すべき点は、購入し た海外市販品の多層膜偏光子に比べ、提供して頂いた国 内の偏光子のレーザー損傷しきい値が高い点である。も ちろん、製品として提供する場合との違いはあるが、国 内光学素子メーカーの高い技術力を示すものである。

ユーザーとしての希望は、どちらの偏光においても高 い耐性を持つことであるが、S 偏光に対して高耐力を持 つ偏光子が、P 偏光に対しても高耐力であるとは限らな い。図3 に各試料における P 偏光照射時のレーザー損傷 しきい値に対する S 偏光損傷しきい値を示す。縦軸と横 軸のスケールが6 倍違うので、目安として2つの損傷し きい値が1:1 の場合を僭線で示した。試料 15 個中 2 個を除いて、P 偏光の損傷しきい値よりも S 偏光の方が 高いことが判る。しかしながら、S 偏光に対して 300 J/cm²を超えた試料 A の P 偏光のしきい値は、18 J/cm² に留まっている。ここまで大きくしきい値が異なると、 反射型の光学システムにおいても使用することが難し くなる。



図3 各試料の偏光による損傷しきい値の比較

6. 損傷形状の比較

先述の照射レーザー偏光方向に対する損傷しきい値 の違い、試料間における損傷しきい値の違いを考察する ために、損傷形状を観察した。図 4(a)(b)は、図 3 で#A と記している試料の損傷形状である。(a)は P 偏光照射、 (b)は S 偏光照射時のレーザー損傷である。 P 偏光による 損傷 (図 4(a)) は局所的な損傷の集まりであるのに対し て、S 偏光による損傷 (図 4(b)) は多層膜の表層の数層 のみの剥かれとして現れていることか判る。これは、損 傷の要因が異なることを意味している。P 偏光ではレー



図4 多層膜偏光子のレーザー損傷形状 (試料A) (a) P 偏光、(b) S 偏光照射時

ザー光は多層膜を透過し基板表面に至る。研磨剤などの 不純物が基板表面近傍に残留しているとき、図4(a)のよ うな局所的な損傷が顕れる。一方、S 偏光の場合には多 層膜各層の境界で反射位相を合わせることにより反射 光強度を増大させている。結局、最表面の光強度が最も 高くなり、最表面近くのレーザー損傷耐性の低い材料層 またはその境界部で損傷しきい値が決定される。これに 比べて、試料#B(図3参照)の損傷形状は、偏光に対 して大きな違いが見られなかった。これは、多層膜中の ある層の吸収(レーザー損傷耐性の低さ)が福光子全体 のしきい値を決めていると考えられる。

7. まとめ

平成27年度に実施した波長1064 nm 用多層膜偏光子 のデータベース化試験結果についてまとめ、考察を行っ た。P 偏光照射時のレーザー損傷しきい値に比べ、S 偏 光のしきい値は高く、バラつきが大きいことを示した。 各試料の偏光方向に対する損傷しきい値を比較し、損傷 形状から損傷の原因について考察した。

平成28年度は、355nm 用光学素子についてデータベ ース化試験を実施する。

参考文献

- 1) 本越伸二他 ILT 年報, レーザー技術総合研究所, 2015.
- S. Motokoshi, et al.: Proc. of Laser-Induced Damage in Optical Materials 2010, SPIE 7842, 78420F-1, 2011.
- S. Motokoshi, et al.: Proc. of Laser-Induced Damage in Optical Materials 2011, SPIE 8190, 81900I-1, 2012.
- 4) http://www.ilt.or.jp/kenkyukai.html

発表論文リスト

発表論文リスト

○レーザーエネルギー研究チーム

_		
著	者	Y. Wang, Y. Wei, <u>D. Li</u> , K. Takano, M. Nakajima
題	目	Dispersion, spatial growth rate, and start current of a Cherenkov free-electron laser with negative-index material
論文詞	志名	PHYSICS OF PLASMAS, Vo1.22, 083111, 2015
著	者	D. Li, Y. Wang, Y. Wei, Z. Yang, S. Miyamoto
題	目	Study on radiation source with negative-index materials

論文誌名 IEEE Xplore, DOI:10.1109/IRMMW-THz.2015.7327572

○レーザープロセス研究チーム

著 者	藤田雅之、田中秀治、宮永憲明
題 目	積層MEMSのためのレーザー支援ダイシング技術
論文誌名	レーザ加工学会誌, 22巻, 2号, pp.8-13, 2015
著 者	藤田雅之
題目	ハイパワーレーザーによるCFRP微細加工技術
論文誌名	『適用拡大するCFRPの成形・加工・リサイクル技術最前線』、第2編 加工技術 第2章 レーザー微細加工技術 第2節, pp.121-131, 2015
著 者	藤田雅之
題目	高出力超短パルスレーザーを用いた炭素繊維複合材加工技術
論文誌名	光学, 44巻, 9号, pp.341-349, 2015
著 者	藤田雅之
題目	CFRPのレーザー加工
論文誌名	光アライアンス 特集:レーザー加工の最先端,26巻,10号,pp.6-10,2015
著 者	<u>染川智弘、藤田雅之、井澤靖和</u> 、笠岡誠、永野芳智
題 目	ラマン分光法を利用した液中物質の非接触計測
論文誌名	オプトロニクス, 402号, pp.71-75, 2015
著 者	T. Somekawa, M. Kasaoka, Y. Nagano, M. Fujita, Y. Izawa
題 目	Insulation Quality Assessment of Transformers Using Laser Raman Spectroscopy
論文誌名	Springer Proceedings in Physics, Vol.177, pp.31-38, 2016
著 者	T. Somekawa, M. Fujita
題目	Raman Spectroscopic Measurements of CO2 Dissolved in Seawater For Laser Remote Sensing in Water
論文誌名	27th International Laser Radar Conference, C3-20, 2015
著 者	<u>染川智弘</u> 、笠岡誠、中井政明、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>井澤靖和</u>
題 目	レーザーラマン分光法を用いた変圧器の異常診断手法の開発
論文誌名	電気学会研究会資料, OQD-16-044, 2016
著者	T. Sakurai, <u>H. Chosrowjan, T. Somekawa, M. Fujita</u> , H. Motoyama, O. Watanabe, <u>Y. Izawa</u>
題 目	Studies of melting ice using CO2 laser for ice drilling
論文誌名	Cold Regions Science and Technology, Vol.121, pp.11-15, 2016
著 者	佐伯拓、 <u>谷口誠治</u> 、中村和広、飯田幸雄
題目	太陽光励起レーザー開発とその応用
論文誌名	電気学会論文誌A, Vol.135, No.10, pp.559-564, 2015

著	者	T. Sakurai, <u>H. Chosrowjan</u> , H. Furuse <u>S. Taniguchi</u> , <u>T. Kitamura</u> , <u>M. Fujita</u> , S. Ishii, <u>Y. Izawa</u>
題	目	Boiling effect in liquid nitrogen directly cooled Yb3+:YAG laser
論文記	誌名	Applied Optics, Vol.55, No.6, pp.1351-1355, 2015

○レーザー計測研究チーム

著 者	御崎哲一、篠田昌弘、 <u>島田義則</u>	
題 目	ハンマーを用いずに新幹線トンネル覆工コンクリート打音検査	
論文誌名	建設機械施工, Vol.67, No.9, September, pp.46-51, 2015	
著 者	<u>島田義則</u>	
題 目	レーザによるコンクリートの健全性評価技術	
論文誌名	電気学会誌, 12月号, pp.834-837, 2015	
 <i> し レ ー ザ</i>	○レーザーバイオ化学研究チーム	

著 者 H. Chosrowjan, S. Taniguchi, F. Tanaka 題 目 Ultrafast fluorescence upconversion technique and its applications to proteins 論文誌名 the FEBS Journal, Vol.282, Issure16, pp.3003-3015, 2015 著 者 N. Nakashima, K. Yamanaka, M. Saeki, H Ohba S. Taniguchi, T. Yatsuhashi 頴 || Metal ion reductions by femtosecond laser pulses with micro-Joule energy and their efficiencies 論文誌名 Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Vol.319, pp.70-77, 2016 F. Tanaka, K. Lugsanangarm, N. Nunthaboot, A. Nueangaudom, S. Pianwanit, S. Kokpol, 者 著 S. Taniguchi, H. Chosrowjan Classification of the mechanisms of photoinduced electron transfer from aromatic amino acids 題 目 to the excited flavins in flavoproteins

論文誌名 Physical Chemistry Chemical Physics, Vol.17, pp.16813-16825, 2015

○理論・シミュレーションチーム

著者	S. Fujioka, T. Johzaki, Y. Arikawa, Z. Zhang, A. Morace, T. Ikenouchi, T. Ozaki, T. Nagai, Y. Abe, S. Kojima, S. Sakata, H. Inoue, M. Utsugi, S. Hattori, T. Hosoda, S. Ho. Lee, K. Shigemori, Y. Hironaka, <u>A. Sunahara</u> , H. Sakagami, K. Mima, Y. Fujimoto, K. Yamanoi, T. Norimatsu, S. Tokita, Y. Nakata, J. Kawanaka T. Jitsuno, N. Miyanaga, M. Nakai, H. Nishimura, H. Shiraga, H. Nagatomo, H. Azechi,
題目	Heating Efficiency Evaluation with Mimicking Plasma Conditions of Integrated Fast-Ignition Experiment
論文誌名	Phys. Rev. E Vol.91, 063102, 2015
著君	Y. Nishimura, Y. Kitagawa, Y. Mori, T. Hioki, H. Azuma, T. Motohiro, T. Komeda, K. Ishii, R. Hanayama, T. Sekine, <u>A. Sunahara</u> , T. Kajino, T. Nishi, T. Kondo, M. Fujine, N. Sato, T. Kurita, T. Kawashima, T. Kan, E. Miura, Y. Sentoku
題目	Multilayered polycrystallization in singe-crystal YSZ by laser-shock compression
論文誌名	J. Phys. D: Appl. Phys. Vol.48, 325305, 2015
著者	H. Nagatomo, T. Johzaki, T. Asahina, <u>A. Sunahara</u> , T. Sano, H. Sakagami, K. Mima, S. Fujioka, H. Shiraga
題目	Computational Study of Magnetic Field Compression by Laser Driven Implosion
論文誌名	Nuclear Fusion. Vol.55, 093028, 2015

著者	N. Tanaka, M. Masuda, R. Deguchi, M. Murakami, <u>A. Suahara</u> , S. Fujioka, A. Yogo, H. Nishimura
題目	Characterization of material ablation driven by laser generated intense extreme ultraviolet (EUV) light
論文誌名	Appl. Phys. Lett. Vol.107, 114101, 2015
著者	H. Matsukuma, <u>A. Sunahara</u> , T. Yanagida, H. Tomuro, K. Kouge, T. Kodama, T. Hosoda, S. Fujioka, H. Nishimura
題目	Correlation between Laser Absorption and Radiation Conversion Efficiency in Laser Produced Tin Plasma
論文誌名	Appl. Phys. Lett. Vol.107, 121103, 2015
著者	K. Tomita, Y. Sato, K. Nishikawa, K. Uchino, T. Yanagida, H. Tomuro, Y. Wada, M. Nunishima, T. Kodama, H. Mizoguchi, <u>A. Sunahara</u>
題目	Development of a collective Thomson scattering system for laser-produced tin plasmas for extreme-ultraviolet light source
論文誌名	APE1X. Vol.8, 126101, 2015
著者	H. Hara, G. Arai, T. H. Dinh, W. Jang, T. Miura, A. Endo, T. Ejima, B. Li, P. Dunne, G. O'Sullivan, <u>A. Sunahara,</u> T. Higashiguchi
題 目	Numerical evaluation of a 13.5nm high-brightness microplasma extreme ultraviolet source
論文誌名	Journal of Applied Physics, Vol.118, 193301, 2015
著者	R. Kawashima, T. Morita, N. Yamamoto, N. Saito, S. Fujioka, H. Nishimura, H. Matsukuma, <u>A. Sunahara</u> , Y. Mori, T. Johzaki H. Nakashima
題 目	The measurement of plasma structure in a magnetic thrust chamber
論文誌名	Plasma and Fusion Res. Vol.11, 3406012, 2016
著者	飯田裕之、丹羽勝之、王明炎、 <u>古河裕之</u> 、津山美穂、中野人志、草場光博、 部谷学
題 目	吸収体に黒色液体インクを用いた金属溶融フリーのレーザピーニングの原理実証
論文誌名	電気学会論文誌A 2015年10月号「光エネルギー応用技術の最新動向」特集, 2015
著 者	部谷 学、飯田裕之、中野人志、津山美穂、 <u>古河裕之</u>
題 目	研究開発が進むレーザーピーニング技術
論文誌名	FORM TECH REVIEW, Vol.25, pp.104-107, 2015

○レーザー技術開発室

著	者	S.Kajikawa, T.Terao, M.Yoshida, <u>S.Motokoshi</u> , O.Ishii, M.Yamazaki, Y.Fujimoto
題	目	Single-mode visible laser oscillation in Pr-doped double-clad structured waterproof fluoro- aluminate glass fiber
論文試	站	Electronics Letters, Vol.52, pp.861-863, 2016

国際学会発表リスト

○レーザーエネルギー研究チーム

著	者	D. Li, Y. Wang, Y. Wei, Z. Yang, S. Miyamoto
題	目	Study on Radiation Source with Negative-index Materials
会諱	義名	40th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves 23-28 Aug. 2015, Hong Kong,China

○レーザープロセス研究チーム

著者	M. Fujita, H. Ohkawa, <u>T. Somekawa</u> , T. Matsutani, Y. Maeda, J. Bovatsek, R. Patel, N. Miyanaga
題目	High Power UV Laser Processing of CFRP with Various ns Pulse Waveforms
会議名	The 4th "Advanced Lasers and Photon Sources Conference" (ALPS'15), 22-24 April.2015, Yokohama, Japan
著者	H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga, T. Yamamura, T. Sakagawa, M. Tsukamoto, <u>H. Chosrowjan, T. Kitamura, M. Fujita, Y. Izawa</u>
題目	Nanosecond Pulsed 1.5 kW Average-output-power Fiber Laser System Based on Yb-doped rod PCFs for Filled-aperture Coherent and Spectral combinations
会議名	The 4th "Advanced Lasers and Photon Sources Conference" (ALPS'15), 22-24 April.2015, Yokohama, Japan
著考	T, Kitamura, H, Chosrowjan, S.Taniguchi, M. Fujita, K. Tubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga, <u>Y. Izawa</u>
題	Coherent Combination of Four High-Power Laser Beams Using Bernoulli Discrete Probability Distribution Based Algorithm
論文誌	The 4th "Advanced Lasers and Photon Sources Conference" (ALPS'15), 22-24 April.2015, Yokohama,Japan
著	皆 T. Sakurai, <u>H. Chosrowjan, T. Somekawa, M. Fujita</u> , H. Motoyama, O. Watanabe, <u>Y. Izawa</u>
題	Studies of melting ice using laser for ice drilling
論文誌	Japan Geoscience Union Meeting 2015 24-28 May.2015, Chiba-City,
著者	M. Fujita, H. Ohkawa, <u>T. Somekawa</u> , T. Matsutani, Y. Maeda, J. Bovatsek, R. S. Patel, N.Miyanaga
題目	High Power UV Laser Processing of CFRP with Short ns Pulses and Pulse Splitting
会議名	Lasers in Manufacturing LiM2015, 22-25 June. 2015, Munich, Germany
著者	T. Somekawa, M. Fujita
題目	Raman spectroscopic measurements of CO2 dissolved in seawater for laser remote sensing in water
会議名	27th International Laser Radar Conference, 5-10 July. 2015, New York City, USA
著者	K. Hamamoto, T. Morioka, S. Nishikata, N. Inoue, J. Nakatani, <u>S. Taniguchi</u> , <u>H. Chosrowjan</u> , <u>Y. Izawa</u>
題目	kW-class Zig-Zag Active-Mirror Laser Amplifier with Jet Impingement Cooling
会議名	Advanced Solid State Lasers, ASSL2015, 4-9 October, 2015, Berlin, Germany
著者	M. Fujita, H. Ohkawa, T. Somekawa, Y. Maeda, T. Matsutani, N. Miyanaga
題目	Evaluating Performance of CFRP Laser Cutting with Ultra-Short Pulses
会議名	The 33rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO2015), 18-22 Oct. 2015, Atlanta, USA

著 者	T. Somekawa, N. Manago, <u>M. Fujita</u> , H. Kuze
題目	Development of differential absorption lidar using a coherent white light continuum
会議名	The 23rd CEReS International Symposium, 1-2 December 2015, Japan
著 者	H. Yoshida, K. Tsubakimoto, N. Miyanaga, H. Chosrowjan, T. Kitamura
題目	High-peak and high-average-power Yb-doped PCF fiber Laser System
	International ASHULA Grand Seminar/Symposium 2016
会議名	ASHULA (Asian core program for high energy density science using intense laser photons),
	5-7January. 2016, Osaka, Japan

○レーザーバイオ化学研究チーム

著	者	L. Mendonca, F. Hache, P. C-Barret, P. Plaza, H. Chosrowjan, S. Taniguchi, Y. Imamoto
題	目	Ultrafast carbonyl motion of the Photoactive Yellow Protein chromophore studied by femtosecond circular dichroism
会諱	巉名	16th European Conference on the Spectroscopy of Biological Molecules (ECSBM2015) 6-10 September 2015, Bochum,Germany

○理論・シミュレーションチーム

著 者	I. Kitawaki, M. Heya, <u>H. Furukawa,</u> M. Tsuyama, H. Nakano
題目	Effect of Control of Plasma Confinement Layer on Laser Peening
会議名	The 33rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO2015,) 18-22 October. 2015, Atlanta,USA
著 者	A. Sunahara, H. Matsukuma, K. Nishihara, A. Sasaki
題目	Radiation Hydrodynamic Simulation of Laser-produced Tin Plasmas
会議名	EUVsource woerkshop, 9-11 November. 2015, Dublin, Ireland
著 者	A. Sunahara, H. Matsukuma, K. Nishihara, A. Sasaki
題目	Radiation Hydrodynamic Simulation of Laser-produced Tin Plasmas
会議名	International Strategic Collaboration Award Workshop on Extreme Ultraviolet Source Development for Lithography, Surface Morphology and Water-window imaging (EUV source workshop satellite meeting) 4-5 November. 2015, Dublin,Ireland
著 者	A. Sunahara
題目	Hydrodynamic simulation of Irradiation of ultra-intense laser on the inner surface of shell
会議名	57th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics, 16-20 November. 2015, Savannah, USA
著者	A. Sunahara
題目	Radiation hydrodynamic simulation on the laser-irradiated metal
会議名	JIFT workshop at Fukui, Japan, 24-25 March. 2016, Japan

○レーザー技術開発室

著 者	Y. Honda, <u>S. Motokoshi</u> , T. Jitsuno, N. Miyanaga, K. Fujioka, <u>M. Nakatsuka</u> , M. Yoshida
題目	Energy Transfer Process in Nd/Cr:YAG Ceramics
会議名	The 4th "Advanced Lasers and Photon Sources Conference" (ALPS'15), 22-24 April. 2015, Yokohama,Japan
著 者	K. Mikami, <u>S.Motokoshi</u> , T. Jitsuno
題目	Optical Material Modification by Laser Pulses at Under-Damage Threshold Conditions
会議名	The 4th "Advanced Lasers and Photon Sources Conference" (ALPS'15), 22-24 April. 2015, Yokohama,Japan

著	者	Y. Honda, <u>S. Motokoshi</u> , T. Jitsuno, N. Miyanaga, K. Fujioka, <u>M. Nakatsuka</u> , M. Yoshida
題	目	Small signal gain for Nd/Cr:YAG ceramics at high temperature
会講	義名	CLEO 2015, 10-15 May. 2015, CA,USA

○レーザーエネルギー研究チーム

著 者	<u>李大治</u> 、高野恵介、中嶋誠、宮本修治
題目	負の屈折率媒質を用いたCherenkov自由電子レーザー
会議名	第63回応用物理学会春季学術講演会、2015年3月21日、東京工業大学 大岡山キャンパス
著 者	<u>李大治</u> 、中嶋誠、橋田昌樹
題目	グラフェンによるテラヘルツ波放射
会議名	マイクロ波、ミリ波、テラヘルツ波の技術とそのプラズマ加熱・計測への応用、 2016年1月20日、核融合科学研究所

○レーザープロセス研究チーム

著者	<u>染川智弘、藤田雅之</u>
題目	水中レーザーリモートセンシングに向けた海水溶存CO2のラマン分光測定
会議名	第33回レーザセンシングシンポジウム、2015年9月5日、大田区産業プラザPiO
著 者	大河弘志、 <u>染川智弘</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、松谷貴臣、前田佳伸、宮永憲明、J.Bokvatsek、 R.Patel
題目	CFRPのUVナノ秒レーザー加工における熱影響層評価
会議名	第76回応用物理学会秋季学術講演会、2015年9月14日、名古屋国際会議場
著者	吉田英次、山村健、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、塚本雅裕、酒川友一、 ハイクコスロービアン、北村俊幸
題目	高出力パルス動作Ybファイバーレーザーシステムの開発(7)
会議名	第76回応用物理学会秋季学術講演会、2015年9月14日、名古屋国際会議場
著 者	<u>ハイク コスロービアン、北村俊幸、谷口誠治、藤田雅之、井澤靖和</u>
題目	Analysis of CW regime, multi-pass amplification system characteristics including linear losses
会議名	2015年 第76回応用物理学会秋季学術講演会、2015年9月14日、名古屋国際会議場
著 者	染川智弘、笠岡誠、中井政明、藤田雅之、井澤靖和
題目	レーザーラマン分光法による油種のその場識別手法の開発
会議名	第76回応用物理学会秋季学術講演会、2015年9月16日、名古屋国際会議場
著者	<u>染川智弘</u> 、笠岡誠、中井政明、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>井澤靖和</u>
題目	レーザーラマン分光法による油種のその場識別手法の開発
会議名	第76回応用物理学会秋季学術講演会、2015年9月16日、名古屋国際会議場

著 者	大塚昌孝、 <u>染川智弘</u> 、松谷貴臣、前田佳伸、 <u>藤田雅之</u> 、宮永憲明
題目	フェムト秒レーザーを用いたダブルパルスLIBS法の信号増強効果
会議名	第76回応用物理学会秋季学術講演会、2015年9月16日、名古屋国際会議場
著 者	藤田雅之
題目	短パルスレーザー加工の基礎
会議名	短パルスレーザー加工実習セミナー、2015年10月5日、 ナ阪大学テクリアライアンス棟
1 1 5 日	<u>かの進ん</u> ここまで進んだレーザ加工・計測広田 その最前線け
△ 議 夕	インターオプト2015光技術動向セミナ-2015年10日15日 パシフィュ横近
五 戚 石 玉 戒 石	
11 11 日	<u>旅山准</u> パルフレーザー加工の可能性と是近のトレンド
会議名	レーサー劔細加工の最新ソリューションセミナー、2015年11月18日、 横浜情報文化センター
著 者	染川智弘、藤田雅之
題目	水中レーザーリモートセンシングに向けたCO2気泡と海水溶存CO2のラマン分光
会議名	レーザー学会学術講演会第36回年次大会、2016年1月9日、名城大学天白キャンパス
著 者	藤田雅之
題目	光テクノロジーロードマップ -光加工・計測技術-
会議名	平成27年度光産業技術シンポジウム「光加工・計測が創る新たな社会と産業イノベーション」、2016年2月3日、リーガロイヤルホテル東京
著 者	藤田雅之
題目	超短パルスレーザによるアブレーション加工
会議名	LMPシンポジウム2016 「最新のレーザ加工技術と自動車車体への応用」、 2016年2月8日、名古屋市工業研究所
著 者	染川智弘
題目	レーザーラマン分光法を用いた変圧器の異常診断手法の開発
会議名	第16回レーザー学会東京支部研究会・電気学会 光・量子デバイス技術研究会、 2016年3月4日、東海大学高輪キャンパス
著 者	<u>染川智弘</u> 、大塚昌孝、前田佳伸、 <u>藤田雅之</u>
題目	偏光子を用いたフェムト秒ダブルパルスLIBSの信号増強効果
会議名	第63回応用物理学会春季学術講演会、2016年3月21日、 東京工業大学大岡山キャンパス
著者	H. Chosrowjan, T. Kitamura, S. Taniguchi, M. Fujita, Y. Izawa
題目	A model development for quantitative analysis of CW regime, multi-pass amplifier system characteristics including optical losses
会議名	第63回応用物理学会春季学術講演会、2016年3月21日、 東京工業大学大岡山キャンパス

著	者	大河弘志、 <u>染川智弘、藤田雅之</u> 、松谷貴臣、前田佳伸、宮永憲明
題	目	炭素繊維強化プラスチックのパルスレーザー加工における波長・パルス幅依存性
会講	義名	第63回応用物理学会春季学術講演会、2016年3月19日、 東京工業大学大岡山キャンパス

○レーザー計測研究チーム

著 者	<u>島田義則</u>
題目	レーザーを用いたコンクリート構造物の欠陥検出技術
会議名	非破壊検査協会総合シンポジウム、2015年6月2日、日本非破壊検査協会亀戸センター
著 者	<u>島田義則</u>
題目	レーザーを用いた鋼板接着高架橋の遠隔検査技術開発
会議名	電気学会C部門大会、2015年8月26日、長崎大学
著 者	御崎哲一、中澤明寛、瀧浪秀元、 <u>島田義則</u> 、 <u>オレグコチャエフ</u> 、篠田昌弘、江本茂夫
題目	レーザーリモートセンシングを用いたコンクリート構造物の健全性評価技術 (1)コンクリート欠陥箇所と健全箇所の違い
会議名	土木学会全国大会、2015年9月16日、岡山大学
著 者	<u>島田義則、オレグコチャエフ</u> 、御崎哲一、中澤明寛、瀧浪秀元、江本茂夫
題目	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 (2)ケミカルアンカーボルトの接着不良検出
会議名	土木学会全国大会、2015年9月16日、岡山大学
著 者	加瀨究、村上武晴、斎藤徳人、和田智之、緑川克美、河内哲哉、大道博行、 <u>島田義則</u>
題目	レーザーによるトンネルの健全化の計測
公 諾女	理研シンポジウム・第3回「光量子工学研究」、2015年11月12日、理化学研究所
云诫名	鈴木梅太郎記念ホール
云藏石 著者	鈴木梅太郎記念ホール <u>島田義則</u>
云藏名 著者 題目	鈴木梅太郎記念ホール <u>島田義則</u> レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術
一	鈴木梅太郎記念ホール <u>島田義則</u> レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術 レーザー学会学術講演会、2015年1月10日、名城大学
云 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、	鈴木梅太郎記念ホール <u>島田義則</u> レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術レーザー学会学術講演会、2015年1月10日、名城大学倉橋慎理、北村俊幸、島田義則、オレグコチャエフ
云 著題 義 者 目 名 者 目 名 者 目	鈴木梅太郎記念ホール島田義則レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術レーザー学会学術講演会、2015年1月10日、名城大学倉橋慎理、北村俊幸、島田義則、オレグコチャエフレーザーを用いたコンクリート構造物における内部欠陥高速検出技術の開発
云 著題会著題会議 着目名 名	 鈴木梅太郎記念ホール <u>島田義則</u> レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術 レーザー学会学術講演会、2015年1月10日、名城大学 <u>倉橋慎理、北村俊幸、島田義則、オレグコチャエフ</u> レーザーを用いたコンクリート構造物における内部欠陥高速検出技術の開発 レーザー学会学術講演会第36回年次大会、2016年1月11日、名城大学天白キャンパス
云 著題会著題会著題 会	 鈴木梅太郎記念ホール <u>島田義則</u> レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術 レーザー学会学術講演会、2015年1月10日、名城大学 <u>倉橋慎理、北村俊幸、島田義則、オレグコチャエフ</u> レーザーを用いたコンクリート構造物における内部欠陥高速検出技術の開発 レーザー学会学術講演会第36回年次大会、2016年1月11日、名城大学天白キャンパス <u>島田義則</u>
云 著題会著題会著題 二番題会 著題 一番	鈴木梅太郎記念ホール 島田義則 レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術 レーザー学会学術講演会、2015年1月10日、名城大学 倉橋慎理、北村俊幸、島田義則、オレグコチャエフ レーザーを用いたコンクリート構造物における内部欠陥高速検出技術の開発 レーザー学会学術講演会第36回年次大会、2016年1月11日、名城大学天白キャンパス 島田義則 コンクリート内部の見えない欠陥を検査!
云 著題会著題会著題会不 道子 一番	 鈴木梅太郎記念ホール <u>島田義則</u> レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術 レーザー学会学術講演会、2015年1月10日、名城大学 <u>倉橋慎理、北村俊幸、島田義則、オレグコチャエフ</u> レーザーを用いたコンクリート構造物における内部欠陥高速検出技術の開発 レーザー学会学術講演会第36回年次大会、2016年1月11日、名城大学天白キャンパス <u>島田義則</u> コンクリート内部の見えない欠陥を検査! レーザーを用いた欠陥診断システム JPC関西定例講演会、2016年2月26日、マイドームおおさか
云 著題会著題会著題会著題会著	 鈴木梅太郎記念ホール <u>島田義則</u> レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術 レーザー学会学術講演会、2015年1月10日、名城大学 <u>倉橋慎理、北村俊幸、島田義則、オレグコチャエフ</u> レーザーを用いたコンクリート構造物における内部欠陥高速検出技術の開発 レーザー学会学術講演会第36回年次大会、2016年1月11日、名城大学天白キャンパス <u>島田義則</u> コンクリート内部の見えない欠陥を検査! レーザーを用いた欠陥診断システム JPC関西定例講演会、2016年2月26日、マイドームおおさか 島田義則
云 著題会著題会著題会著題会 著題 一	鈴木梅太郎記念ホール 島田義則 レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術 レーザー学会学術講演会、2015年1月10日、名城大学 倉橋慎理、北村俊幸、島田義則、オレグコチャエフ レーザーを用いたコンクリート構造物における内部欠陥高速検出技術の開発 レーザー学会学術講演会第36回年次大会、2016年1月11日、名城大学天白キャンパス 島田義則 コンクリート内部の見えない欠陥を検査! レーザーを用いた欠陥診断システム JPC関西定例講演会、2016年2月26日、マイドームおおさか 島田義則 レーザーを活用した高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の研究開発
云 著題会著題会著題会著題会著題会不 議 議 議 議 議 議 議 議 員名者自名者自名	鈴木梅太郎記念ホール 島田義則 レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術 レーザー学会学術講演会、2015年1月10日、名城大学 倉橋慎理、北村俊幸、島田義則、オレグコチャエフ レーザーを用いたコンクリート構造物における内部欠陥高速検出技術の開発 レーザー学会学術講演会第36回年次大会、2016年1月11日、名城大学天白キャンパス 島田義則 コンクリート内部の見えない欠陥を検査! レーザーを用いた欠陥診断システム JPC関西定例講演会、2016年2月26日、マイドームおおさか 島田義則 レーザーを活用した高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の研究開発 SIP音響解析会議、2016年2月29日、JST東京本部B1大会議室
云 著題会著題会著題会著題会著題会著題会 著題会 者 題 義 議 議 議 議 議 義 義 義 義 義 義 義 義 義 義 義 義 義	鈴木梅太郎記念ホール 島田義則 レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術 レーザー学会学術講演会、2015年1月10日、名城大学 倉橋慎理、北村俊幸、島田義則、オレグコチャエフ レーザーを用いたコンクリート構造物における内部欠陥高速検出技術の開発 レーザー学会学術講演会第36回年次大会、2016年1月11日、名城大学天白キャンパス 島田義則 コンクリート内部の見えない欠陥を検査! レーザーを用いた欠陥診断システム JPC関西定例講演会、2016年2月26日、マイドームおおさか 島田義則 レーザーを活用した高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の研究開発 SIP音響解析会議、2016年2月29日、JST東京本部B1大会議室 島田義則、オレグコチャエフ、御崎哲一、藤嶋昭久、中澤明寛、高山宜久、 曽我寿孝、江本茂夫
云 著題会著題会著題会著題会 著題会 者題会 者 題 義 義 義 義 義 義 者 目名 者 目名 者 目名 者 目名 者 目名 者	鈴木梅太郎記念ホール 島田義則 レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術 レーザーを用いたトンネル等インフラの診断技術 レーザー学会学術講演会、2015年1月10日、名城大学 倉橋慎理、北村俊幸、島田義則、オレグコチャエフ レーザーを用いたコンクリート構造物における内部欠陥高速検出技術の開発 レーザーを用いたコンクリート構造物における内部欠陥高速検出技術の開発 レーザー学会学術講演会第36回年次大会、2016年1月11日、名城大学天白キャンパス 島田義則 コンクリート内部の見えない欠陥を検査! レーザーを用いた欠陥診断システム JPC関西定例講演会、2016年2月26日、マイドームおおさか 島田義則 レーザーを活用した高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の研究開発 SIP音響解析会議、2016年2月29日、JST東京本部B1大会議室 島田義則、オレグコチャエフ、御崎哲一、藤嶋昭久、中澤明寛、高山宜久、 曽我寿孝、江本茂夫 レーザーを用いたケミカルアンカーボルトの接着不良検出

著 者	御崎哲一、曽我寿孝、高山宜久、中澤明寛、藤嶋昭久、 <u>島田義則</u> 、 <u>オレグコチャエフ</u> 、篠田昌弘、朝倉俊弘、保田尚俊
題目	レーザーによるコンクリート検査手法の開発
会議名	電気学会全国大会、2016年3月18日、東北大学川内北キャンパス
著 者	<u>倉橋慎理、北村俊幸、島田義則、オレグコチャエフ</u>
題目	レーザーによるコンクリート構造物内部欠陥高速遠隔検査技術の開発
会議名	電気学会全国大会、2016年3月18日、東北大学川内北キャンパス
著 者	山田知典、大道博行、河村弘、 <u>島田義則</u>
題目	放射化コンクリートの特性評価に向けたレーザー診断技術の開発
会議名	日本原子力学会2016年春の年会、2016年3月26日、東北大学川内北キャンパス

○レーザーバイオ化学研究チーム

著者	<u>谷口誠治、ハイク コスロービアン</u> 、田中文夫
題目	ヒト由来D-アミノ酸酸化酵素の蛍光ダイナミクス:機能阻害効果の検討
会議名	2015年光化学討論会、2015年9月11日、大阪市立大学
著 者	<u>谷口誠治、ハイク コスロービアン</u> 、田中文夫
題目	レーザー計測によるヒト由来D-アミノ酸酸化酵素の機能阻害効果の検討
会議名	日本化学会第96春季年会、2016年3月25日、同志社大学京田辺キャンパス
著 者	谷口政治、 <u>ハイク コスロービアン</u> 、田中文夫
題目	ヒト由来D-アミノ酸酸化酵素の蛍光ダイナミクス:機能阻害効果の検討
会議名	日本化学会第96春季年会、2016年3月25日、同志社大学京田辺キャンパス
著 者	N. Nakashima, K. Yamanaka, M. Saekia, H. Ohbai, <u>S. Taniguchi</u> , T. Yatsuhashi
題目	Metal ion reductions by femtosecond laser filamentation and their efficiencies
会議名	日本化学会第96春季年会、2016年3月27日、同志社大学京田辺キャンパス

○理論・シミュレーションチーム

著 者	砂原淳
題目	内面照射型高速点火核融合の点火計算
会議名	第32回プラズマ・核融合学会年会、2015年11月24日、名古屋大学東山キャンパス・ 豊田講堂
著 者	砂原淳
題目	内面照射型高速点火核融合
会議名	研究会形式シンポジウム「レーザー核融合炉心プラズマと炉工の総合的理解」、 2015年12月19日、核融合科学研究所
著 者	砂原淳
題目	二次元放射流体シミュレーションによるレーザー照射されたスズドロップレットの 解析
会議名	第29回数値流体力学シンポジウム、2015年12月15日、九州大学
著 者	A. Sunahara
題目	Irradiation of ultra-intense laser on the inner surface of CD shell to generate the hot spark
会議名	ASHULA Grand Seminar / Symposium 2016, 2016年1月12日、大阪大学銀杏会館
著 者	砂原淳
題目	二次元輻射流体コードによるレーザー照射されたスズドロップレットの計算
会議名	「レーザープラズマ科学のための最先端シミュレーションコードの共同開発・共用に 関する研究会」、2016年1月18日、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

著者	砂原淳
題目	二次元放射流体シミュレーションによるアブレーションの解析
会議名	平成27年度超短パルスレーザーとプラズマに関する研究会、2016年1月18日、 光産業創成大学院大学
著 者	<u>砂原淳</u> 、西原 功修、佐々木 明
題目	レーザー照射ドロップレットの長時間シミュレーション
会議名	第63回応用物理学会春季学術講演会、2016年3月19日、 東京工業大学大岡山キャンパス
著 者	<u>古河裕之</u> 、部谷学、中野人志
題目	レーザーピーニング統合シミュレーションによる塑性応力の評価
会議名	第76回応用物理学会秋季学術講演会、2015年9月14日、名古屋国際会議場

○レーザー技術開発室

著 者	本田能之、 <u>本越伸二</u> 、實野孝久、宮永憲明、藤岡加奈、 <u>中塚正大</u> 、吉田実、山田隼弘
題目	Nd/Cr:YAG材料におけるエネルギー移乗過程の解析 -Crの濃度依存性
会議名	レーザー学会第476回研究会、2015年7月17日、阪急エキスポパーク
著者	山田隼弘、本田能之、 <u>本越伸二</u> 、實野孝久、藤岡加奈、吉田実
題目	Cr3+イオン4T1準位定期によるNd/Cr:YAG材料の蛍光特性
会議名	第76回応用物理学会秋季学術講演会、2015年9月14日、名古屋国際会議場
著 者	山田隼弘、本田能之、 <u>本越伸二</u> 、實野孝久、藤岡加奈、吉田実
題目	Cr3+イオン4T1準位励起によるNd/Cr:YAG材料のエネルギー移乗過程の解析
会議名	第36回年次大会、2016年1月10日、名城大学天白キャンパス
著者	佐々木啓、三上勝大、 <u>オレグコチャエフ、本越伸二、島田義則</u> 、 <u>古河裕之</u> 、 山ノ井航平、實野孝久、乗松孝好
題目	レーザー核融合炉の最終光学系用液体金属ミラーの評価
会議名	第36回年次大会、2016年1月10日、名城大学天白キャンパス
著者	寺尾季倫、梶川翔太、藤本靖、 <u>本越伸二</u> 、吉田実、石井修、山嵜正明
題目	シングルモードダブルクラッドPrドープ耐候性フッ化物ファイバレーザーの特性
会議名	第36回年次大会、2016年1月11日、名城大学天白キャンパス
著 者	山田隼弘、本田能之、 <u>本越伸二</u> 、實野孝久、藤岡加奈、吉田実
題目	Cr3+イオン4T1準位励起におけるNd/Cr:YAG材料の蛍光特性 II
会議名	第63回応用物理学会春季学術講演会、2016年3月20日、 東京工業大学大岡山キャンパス

事業報告書

事業報告書

(平成 27 年度)

概況

レーザー技術総合研究所は、レーザーおよ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、調査、情報の収集・提供、人材の養成などの事業を鋭意推進すべ く活動してきた。平成 27 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。

【平成27年度の主な成果】

産業用レーザー開発プロジェクト研究においては、固体レーザーの高出力化に必要な要素技術の開発を継続的に進めてきた。kW 級出力を実現するため、多重パス 増幅システムの構築を行ない、種々の試験を開始、また複数ビームのタイル型コヒ ーレント結合効率向上について検討した。

レーザーエネルギー分野においては、メタマテリアルを用いた新型テラヘルツ光源を提案する一方、電力設備用絶縁材料の内部欠陥検査への適用可能性を調査した。

レーザープロセス分野では、フェムト秒レーザーを用い、CFRP(炭素繊維強化 プラスチック)や金属・半導体等各種材料の加工特性を評価すると共に、ナノ秒レ ーザーを用いたイオン還元による金属ナノ粒子生成法について研究を進めた。

レーザー計測分野においては、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP, 内閣 府) などに参画し、欠陥検出の高速化を実現した。また、レーザー干渉を用いたコ ンクリート欠陥検査装置を開発、実際の新幹線トンネルで欠陥箇所特有の信号抽出 に成功した。これらのレーザー干渉技術をもとに、自動車道の高架橋床版検査のた めの技術も開発中である。

レーザーバイオ化学分野では、レーザーを用い、蛋白質や酵素の反応過程を明らかにし、創薬分野等への応用を図っている。

理論シミュレーション分野においては、レーザープラズマEUV(極端紫外光)光源 の理論的研究を実施しており、半導体リソグラフィ用量産光源実現に重要な高出力 化の指針を与えた。またレーザー核融合に不可欠の爆縮流体シミュレーション等も 行っている。

レーザー技術開発室においては、多くの企業の参加を得て、レーザー用光学素子 の損傷評価試験を実施し、データベース化を進めることができた。 普及啓発活動では、研究成果報告会の開催(7月)、機関誌「レーザークロス」の発行(月刊)、ホームページおよびメール配信による情報発信、レーザーEXPO 2015 への出展(4月)などを実施し、研究成果等の積極的な発信に努めた。

1. 役員等の異動

(理事・監事)

年月日		就 任			退任	
H27.4.7	理事	宮口	仁一	理事	梅田	賢治
H27.4.21	監事	湯浅	英生	監事	岡田	勉
H27.6.17	理事	大石	富彦	理事	橋本	德昭
H27.9.28	理事	落合	誠	理事	向井	成彦

(評議員)

年月日	就 任	退 任
H27.7.16	美濃 由明	西亨

2. 役員会等の開催

(1)理事会

第12回理事会 (平成27年4月14日 みなし決議) 決議事項

・臨時の第9回評議員会の招集及び目的である事項

第13回理事会 (平成27年6月2日 関電会館)

決議事項

- ·平成26年度事業報告書
- ·平成26年度財務諸表
- ・内閣府への定期報告
- ・基本財産の運用
- ・定時評議員会の日時及び場所ならびに目的である事項 報告事項
- ・職務執行状況の報告
- ・第9回評議員会(臨時)の決議内容
- 第14回理事会 (平成27年7月1日 みなし決議) 決議事項

・理事長の選出

第15回理事会 (平成27年9月11日 みなし決議)

決議事項

- ・臨時の第11回評議員会の招集及び目的である事項
 第16回理事会 (平成28年3月9日 関電会館)
 決議事項
 - ·平成28年度事業計画書
 - ·平成28年度収支予算書
 - ・基本財産の運用
 - ・規程の制定および変更ならびに廃止
 - ・臨時の第12回評議員会の招集及び目的である事項

報告事項

- ・職務執行状況の報告
- ・第11回評議員会(臨時)の決議内容

(2)評議員会

第8回評議員会 (平成27年4月7日 みなし決議)

決議事項

- ・理事の選任
- 第9回評議員会 (平成27年4月21日 みなし決議)
 - 決議事項
 - ・監事の選任
- 第10回評議員会 (平成27年6月17日 大阪科学技術センター) 決議事項
 - ・平成26年度財務諸表の承認
 - ・理事の選任
 - ・基本財産の運用
 - 報告事項
 - 第13回理事会の決議内容
 - ·平成26年度事業報告
- 第11回評議員会 (平成27年9月28日 みなし決議)
 - 決議事項
 - ・理事の選任

(3)評議員選定委員会

- 第7回評議員選定委員会 (平成27年7月16日大阪大学)
- 3. 賛助会員状況
 - 平成 27 年度末会員数 35 社 80 口
- 4. 学会および論文発表

学会発表 74件 (国内:54件、国外:20件)

論文発表

5. 特許等出願件数

平成27年度出願件数	0 件		
平成 27 年度末特許保有件数	30 件	(登録済:20件、	公開済:10件)

I 研究開発および調査事業

研究開発の推進と成果の拡充を図るため、研究部門では下記の事業活動を実施した。

1. 研究調査事業

【産業用レーザー開発プロジェクト研究】

省エネルギー効果が期待されるレーザー加工技術の発展に活用するため、kW 級 産業用レーザーに必要とされる基盤技術の開発研究を実施した。

(1) 大出力レーザーの開発

産業利用を目的とした大出力固体レーザーの開発を進め、多重パス増幅システム の構築と増幅特性の解析を行うと共に、室温噴流冷却方式の予備試験を開始した。

(2) ビーム結合に関する研究

レーザーの大出力化において重要となるビーム結合技術に関する研究を引き続き 実施し、複数ビームのタイル型コヒーレント結合効率向上に必要な要素技術につい て検討した。

[関連する主な受託・共同研究]

・大出力レーザー開発に関する研究

【コンクリート構造体の健全性評価技術開発プロジェクト研究】

鉄道トンネルを対象として、コンクリート構造体の経年劣化を高速で検査し、健 全性を評価するレーザー干渉法の開発を進めた。

(1) レーザービーム高速スキャン技術の開発

広いコンクリート表面を高速で精度よくスキャンできる技術を開発した。また、 検査結果をリアルタイムで表示できる高速画像表示技術を開発した。

(2) 信号処理の高速化研究

信号処理や欠陥判定アルゴリズムの高速化技術開発を行った。

(3) レーザー高速コンクリート検査技術の開発

当研究所が開発したコンクリート高速診断技術と日本原子力研究開発機構(現 量子科学技術研究開発機構)が開発した高繰り返しレーザー技術とを組み合わせる ことにより 25Hz でのコンクリート検査を実証した。

[関連する主な受託・共同研究]

・レーザーを活用した高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の研究開発

【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を開拓するため、テラヘルツ光源開発、材 料物性の診断・検査への応用に関する研究を行った。

(1) メタマテリアルによる電磁波放射基礎研究

負の屈折率を有するメタマテリアルと電子ビームとの相互作用で発生する電磁波の 放射シミュレーションを行い、メタマテリアル特有の電磁波モードが存在することを初めて 明らかにした。

(2) テラヘルツによる診断・検査研究

電力設備であるポリマー碍管の内部をテラヘルツ波を用いて診断する可能性を評価した。模擬試料からの反射テラヘルツ波を解析することにより、内部剥離、浸水等の存在を検出できることを検証した。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・テラヘルツ光源の開発研究
- ・テラヘルツ波による電力設備診断技術に関する調査研究
- ・メタマテリアルによるコヒーレント放射光の基礎研究

【レーザープロセス研究チーム】

レーザー加工特性の評価試験を行い、基礎技術開発を行うとともに、レーザープ ロセスの高性能化に資する基盤技術を開発した。

(1) フェムト秒レーザー加工に関する研究

フェムト秒パルスを用いて金属・半導体等各種材料の加工特性に関する研究を進め、微細周期構造の応用について検討を行った。

(2) CFRP のレーザー加工に関する研究

産業用部材の軽量化に期待される CFRP に対してレーザー加工の波長およびパル ス幅依存性を評価した。

(3) レーザーによるナノ粒子生成技術の研究

ナノ秒レーザーによる金属酸化物(酸化亜鉛)の還元と微細化、空気電池への応用 に関する研究を進めた。また、フェムト秒レーザーを用いたイオン還元による金属 ナノ粒子生成技術に関する研究を進めた。

[関連する主な受託・共同研究]

・CFRPの微細加工に関する研究

・レーザーによる金属還元ナノ粒子作成と空気電池への応用

・フェムト秒フィラメンテーションの化学 - 金属イオンの還元、金属ナノ粒子の生成-

【レーザー計測研究チーム】

レーザーを用いたリモートセンシング技術をトンネルや高架橋等のインフラ構造 物健全性評価に適用するための技術開発およびレーザー分光法を用いた微量分析技 術開発の研究を行った。

(1) レーザー超音波探傷技術に関する研究

レーザー干渉を用いた新幹線トンネル覆エコンクリート欠陥検査装置の性能評価 を行い、新たな欠陥判定基準等を検討した。また、レーザー干渉技術を基に高架橋 床版検査のためのレーザー差動干渉技術開発や水没コンクリートの健全性評価のた めのレーザー干渉技術開発を行った。

(2) レーザーを用いた成分分析の研究

レーザーラマン分光法による油種のその場識別手法の検討を行った。

(3) 高強度レーザーを用いた環境評価技術の研究

高強度レーザーを用いて、大気中の温室効果ガスの高度分布計測や、水中レーザ ーモニタリングに関する基礎研究を行った。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・現場環境を模擬した条件下での光学系回路の制御、適用性評価
- ・高感度ダイナミックホログラム・レーザー超音波法を用いた欠陥検出に関する 研究
- ・レーザーによる補強橋梁床版欠陥部のリモートセンシング技術開発と実用化
- ・原子力施設用コンクリート材料のレーザー診断法による評価
- ・レーザーを活用したサージタンク劣化調査手法の開発研究
- ・レーザーラマン散乱を用いた海水溶存成分測定法の開発
- ・現場における油種識別技術・測定方法の開発
- ・白色光レーザーを用いた温室効果ガスの計測法の開発

【レーザーバイオ化学研究チーム】

レーザーの生物・創薬分野への応用や生体分子の光機能デバイスへの応用を目的 とし、蛋白質・酵素等の機能解明、および薬剤等による機能阻害効果に関する研究 を進めた。

(1)時間分解レーザー計測による生体関連物質の機能研究

種々のフラビン蛋白質の水相における構造変化およびその反応過程を、レーザー分

光計測結果を元に分子動力学、分子軌道シミュレーションにより明らかとした。

(2) レーザー分光による生体内酵素の機能制御メカニズムの研究

生体内の d-アミノ酸濃度の調整機能を持つ d-アミノ酸酸化酵素について、実際に ヒト由来の酵素を用い、その薬剤分子による機能阻害効果をレーザー分光法により 明らかにした。

[関連する主な受託・共同研究]

・時間分解蛍光計測による蛋白質の機能阻害効果の研究

【理論・シミュレーションチーム】

レーザーと物質の相互作用に関する理論的研究を幅広く行い、各研究チームが行 う実験研究に対して、理論・シミュレーション面より支援を行った。レーザープラ ズマに関連するコードを開発し、産業応用に有用なデータの提供を行った。

(1) EUV(極端紫外光)光源に関する理論的研究

半導体リソグラフィ用量産光源の実現のため、EUVプラズマの解析を行い、高出 力化の指針を与えた。

(2) レーザー生成高密度プラズマの理論的研究

核融合爆縮流体シミュレーションを行い、高密度爆縮及びプラズマ加熱実験に対 する指針を与えた。

(3) レーザーアブレーションとその応用に関する理論的研究

レーザーアブレーション過程を記述するシミュレーションコードの精緻化を行い、 レーザー加工や表面処理プロセスへの適用を行った。

(4) レーザー核融合炉設計に関する理論的研究

レーザー核融合炉内での金属蒸気の3次元挙動を評価して、炉設計に有用なデータ を提供した。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・EUV光源プラズマの解析
- ・核融合流体シミュレーション

【レーザー技術開発室】

高出力レーザーとその応用システムに共通する光学部品や光学材料の高性能化を めざして基礎技術開発を行った。レーザー損傷評価試験を実施し、「高耐力光学素子 研究会」を通して、レーザー損傷しきい値のデータベース化を進めた。 (1) Nd/Cr:YAG レーザー材料内のエネルギー移乗過程の解明

太陽光励起レーザー用媒質として期待される Nd/Cr:YAG 材料において、Nd から Cr へのエネルギー移乗過程を解明し、赤色励起時のエネルギーレート方程式を構築 した。この結果、赤色励起時のレーザー利得を計算することが可能になった。さら に、白色励起時に拡張するために、青色励起時の蛍光特性の評価を行った。

(2) 繰返しレーザー照射時のレーザー損傷機構の解明

光学素子のレーザー損傷しきい値は、照射レーザーの繰返し周波数、繰返しパルス数に応じて低下することが知られている。その要因を明らかにし、高耐力化を進めるために、10ms~1sに時間差を調整した2パルスの損傷しきい値の評価を行い、1パルスのしきい値に比べて、パルス間隔が短くなるに従い70%まで低下することが判った。合わせて、レーザー照射時の欠陥準位の生成とその緩和時間について解析を行った。

(3) レーザー損傷評価試験

技術相談窓口と連携し、展示会、ホームページなどを通して受託試験の広報を行い、15件の依頼を受け、評価試験を行った。また、損傷しきい値のデータベース化を目的に、1064nm用多層膜偏光子を対象に第15回、第16回の評価試験を実施した。ほとんどの試料において、P偏光の損傷しきい値に比べてS偏光の方が高耐力であることが確認された。

[関連する主な受託・共同研究]

・高耐力ミラーの開発

2. 各種研究会活動

当研究所の研究開発活動を効率的・発展的に推進させるため、関連各界の意見・ 情報収集の場として、さらにはわが国の研究活動の方向性について提言を発信する 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から受け付けた、企業の技術開発・改良に対す る技術支援、光学部品の損傷評価、微細加工、超音波診断などの相談・要望に対し、 積極的に取り組んだ。41件の技術相談に対応し、そのうち20件が受託研究へ結び 付いた。

また、広範に拡がるレーザー技術に関するニーズに対応するため、情報、人材、

技術等の交流を推進した。

学界との連携では、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター等との共同研究 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。

産学官との連携では、企業、大学等と連携を図りながら、国や(国)新エネルギー・ 産業技術総合開発機構(NEDO)など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)宇宙航空研究開発機構(JAXA)、(国)日本原子力研究開発機構(JAEA)、(財)光産 業技術振興協会(OITDA)、(財)大阪科学技術センター(OSTEC)、(財)近畿高エネルギ ー加工技術研究所(AMPI)、(社)レーザー学会(LSJ)、(社)レーザープラットホーム協 議会(LPF)韓国原子力研究所(KAERI)、韓国光技術院(KOPTI)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) レーザーによる補強橋梁床版欠陥部のリモートセンシング技術開発と実用化
- ((国)科学技術振興機構 研究成果最適展開支援プログラム A-STEP 産学共同促進ステ ージ ハイリスク挑戦タイプ)
- (2) レーザーを活用した高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の研究開発 ((国)科学技術振興機構 戦略的イノベーション創造プログラム SIP)
- (3) 高効率 LPP 法 EUV 光源の実証開発 ((国)新エネルギー・産業技術総合開発機構 戦略 的省エネルギー技術革新プログラム 実証開発)
- (4) レーザー駆動指向性中性子の発生・制御及び検出に関する基盤技術開発 ((国)科学 技術振興機構研究成果最適展開支援プログラム A-STEP ステージ I 産業ニーズ対応 タイプ)

6. 受託研究

35 件の受託研究を実施した。(公募によるものを除く。技術相談によるものを含む。)

7. 補助事業

文部科学省の科学研究費補助金や民間団体の研究助成を活用し、以下のような研 究を実施した。

- (1)時間分解蛍光計測による蛋白質の機能阻害効果の研究(基盤研究 C)
- (2) マルチビームレーザーによる高速コンクリート欠陥探傷に関する研究(基盤研究C)
- (3) 高速点火レーザー核融合における高エネルギー粒子輸送の物理解明(基盤研究 C)
- (4) Two-beam probing laser-based system for remote inspection of unstable structures (基盤研究 C)
- (5) 海底開発による環境影響評価に向けたラマンライダーによる海中モニタリング 技術の開発(若手研究 A)
- (6) 短パルスレーザーを用いた炭素繊維強化複合材の微細加工技術の開発(天田財 団 一般研究開発助成)
- (7) 多光子吸収過程によるガラス三次元造形(日本板硝子材料工学助成会研究助成)
- (8) 反射機構を必要としないチェレンコフ型テラヘルツ波放射発振器に関する基礎 研究(松尾学術研究助成)
- (9) レーザー三次元造形による石英ガラス回折光学素子の直接創成(天田財団 一般研究開発助成)

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、共同研究先や技術相談の依頼元から若手研究員 を受け入れ、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を行った。

2. 研究成果報告会

東京ならびに大阪にて、平成 26 年度の研究成果を報告する研究成果報告会 (ILT2015)を開催した。

- 7月10日 千里ライフサイエンスセンター (大阪)
- 7月17日 KKR ホテル東京(東京)

3. 機関誌等の発行

機関誌「Laser Cross」の月1回の発行、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。

・レーザーEXPO 2015 4月 22 日~24 日 パシフィコ横浜(神奈川)

5. プレス発表

当財団がこれまで研究を進めてきた「コンクリート構造体の健全性評価技術開発 プロジェクト研究」については、1月8日に大阪および東京にて、戦略的イノベー ション創造プログラム(SIP,内閣府)での研究成果として、コンクリート内部の欠 陥の検出速度を従来の50倍(0.5Hz→25Hz)に向上させたことを発表した。

6. 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9の国際会 議へ参加した。また、韓国原子力研究所(KAERI)、韓国光技術院(KOPTI)等との共 同研究を実施した。主なものは以下のとおり。

(1) LiM2015 (6月, ドイツ)

(2) 27th International Laser Radar Conference (7月, 米国)

(3) The 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (8 月, 香港)

(4) International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA 2015) (9 月, 米国)

(5) ICALEO2015 (10 月, 米国)

(6) 2015 International Workshop on EUV and Soft X-ray Sources

(11月,アイルランド)

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

慣性核融合エネルギー開発事業の推進をめざし、レーザーによるエネルギー開発 に向けた有識者会議を開催した。また、レーザー核融合とそれに関連する科学技術 の展開をめざし、日本学術会議が主催する国際シンポジウム「大型レーザーによる 高エネルギー密度科学研究の新展開」等の活動を支援した。

2. 出版物の刊行

平成 26 年度の研究成果を年報にまとめ、刊行した。 ・「ILT2015 年報」(2014~2015) (平成 27 年 7 月発行)

3. 泰山賞の贈呈

7月の成果報告会にて第7回泰山賞の表彰式を行い、レーザー科学技術の分野で 永年にわたり抜群の功績を上げた個人に功績賞を、近年著しい業績を上げたグルー プに進歩賞を贈呈した。
組 織 図構成員一覧

組織図



構成員一覧

理事長 事長・名誉所長 副理事長・所長 常務理事 常務理事・副所長 大石富彦 山中千代衛 井澤靖和 松村宏治 中塚正大

【レーザーエネルギー研	「究チーム】	チームリーダー 研究員	井澤靖和(兼務) 李 大治
【レーザープロセス研究	ミチーム】	主席研究員	藤田雅之
		()一公)一次一) 副主任研究員 副主任研究員 研究員	ハイク コスロービアン(兼務) 染川智弘 北村俊幸
【レーザー計測研究チーム】		主任研究員	島田義則
		() 公) /) 副主任研究員 研究員 研究員	谷口誠治(兼務) オレグ コチャエフ 倉橋慎理
【レーザーバイオ化学研	「究チーム】	チームリーダー 副主任研究員 副主任研究員	中島信昭 ハイク コスロービアン 谷口誠治
【理論・シミュレーションチーム】		チームリーダー 主任研究員 研究員	井澤靖和(兼務) 砂原 淳 古河裕之
【レーザー技術開発室】		主任研究員	本越伸二
		研究員	岸田知門
【総務部】		事務局長 総務部長 マネージャー マネージャー マネージャー 事務員	松村宏治(兼務) 松村宏治(兼務) 幸脇朱美 小野田理恵 藤本 勲 藤田淑子
【特別研究員】	京都大学 名誉 元日新電機株式 元三重県立看護大学 元東京市立大学 元レーザー技術	*教授 会社 会社 文学 名誉教授 * 准教授 特任教授 F総合研究所	毛利明博 鈴木泰雄 田畑則一 田中文夫 糟谷紘一 中島信昭 今崎一夫

【共同研究員】

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	ヤンター長	疇地 宏
大阪大学レーサーエネルキー字研究センター	教授	斗内政古
大阪大学レーザーエネルギー学研究ヤンター	教授	西村博明
	北京	五八五石
人阪人子レーリーエイルイー子研究とンター	积力	米仏子灯
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	教授	宮永憲明
十阪十学レーザーエネルギー学研究センター	對極	蓝圆植众
人阪人子レーリーエイルイー子切光とシター	彩1文	膝凹层刀
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	准教授	河仲準二
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	准教授	版和洋—
		以旧子
大阪大学レーサーエネルキー字研究センター	作教授	車 称啓介
大阪大学レーザーエネルギー学研究ヤンター	准教授	中嶋 誠
大阪大学レーサーエネルキー学研究センター	講 印	膝平 項
大阪大学レーザーエネルギー学研究ヤンター	講師	時田茂樹
		抹 卡本公
人阪人子レーリーエイルキー子研究センター	助教	傄平子石
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	特任研究員	西原功修
十阪十学レーザーエネルギー学研究センター	切曲拗吕	宙野老り
人限人子レーリーエイルイー子切光とシター	拍榜教員	貝玎子八
大阪大学大学院工学研究科	教授	兒玉了祐
十阪十学十学院工学研究到	教授	更净却 甲
入版 十八十八十八十八十八	彩1又	米住がカ
大阪大字大字院工字研究科	教授	田中和夫
大阪大学大学院基础工学研究科	教授	宣坂 博
	秋汉	百次时
大阪大字大字院埋字研究科	作教授	山甲十博
大阪大学接合科学研究所	<u>教</u> 授	節 原 裕 一
大阪大学按合科学研究 所	惟教授	琢伞推俗
大阪大学接合科学研究所	招聘教授	内田成明
人阪人子元科子センター	特性教授	佐々木存仅
大阪大学	名誉教授	柳田祥三
- 版工業+学工学型	ある	一一 一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一
入限上来八子上子 ^前	彩1文	四日彰大
大阪産業大学工学部	教授	草場光博
十阪帝亲十会工会动	准教授	如公 学
八阪匡朱八十二十印	田积反	
大阪市立大学大学院理学研究科	教授	八ツ橋知幸
岡山七学七学院自然利学研究利	时步	一日 日
	功权	
核融合科字研究所	准教授	岩本晃史
核融合科学研究所	助教	安百 高
	シリイス	
第四字阮天字理上字 部	教授	玉廾回兌
関西大学システム理工学部	教授	淺川 誠
	7444-15	
第四人子ンスプム理工子部	惟教授	佐旧 拍
北見工業大学	助教	古瀬裕童
古州上学化学研究所	地位	
从他人子他子师先的	彩1文	败 即 同 一
京都大学化学研究所	准教授	橋田昌樹
古都十学十学院 理学研究科	教授	十日本町
	积反	山田万則
京都大字大字院埋字研究科	教授	大須貨篤弘
近樂大学理工学部	<u> </u>	吉田 宝
	秋以	
近畿天学埋上学部 ————————————————————————————————————	教授	樯新俗一
近畿大学理工学部	教授	中野人志
	1010	十月 八心
近 嚴 人 子 埋 上 子 部	惟教授	削田住伸
高知工業高等専門学校	准教授	赤松重則
点加工業宣榮車 開 受校	准势运	士 公山
向却上来向寺守门子仪	作王教友	之 伯也
摂南大学工学部	教授	田口俊弘
信却,シンフテム研究機構 国立振動研究所	唐仁	想开你来
情報·シンクノム明九波博 国立極地的九月	何江圳九貝	按开反几
十枼大字埬境リモートセンシング研究センター	教授	人世宏明
雷気诵信大学 企画調杏室	特任新授	植田憲—
电风迪信人子天子阮淯報埋丄子研先科	教授	四両 一
電気通信大学レーザー新世代研究ヤンター	准教授	武者 満
市台工业中学中学校》公司工学社会社	山の人人	
米 尔 上 未 八 子 八 子 阮 祁 口 理 上 子 研 九 什	再印	们们们们
東京工業大学大学院情報理工学研究科	教授	廣瀬壮一
甫北十学十学院工学研究到	共	田山禾江
米北八子八子阮上子圳九 件	教 [文	田中方伯
東北大学大学院理学研究科	准教授	柴田 穣
台湾国立态通大学	諸広新河	· 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一
口传出业义进入于	冊/ 空羽反	相尔 仏
日本原子力研究開発機構福島研究開発部門福島研究基盤創生センター	副所長	大頂博行

光産業創成大学院大学	教授	藤田和久
光産業創成大学院大学	特任教授	三間圀興
光産業創成大学院大学	客員教授	内田成明
兵庫県立大学大学院工学研究科	教授	藤原閲夫
兵庫県立大学高度産業科学技術研究所	所長	宮本修治
兵庫県立大学高度産業科学技術研究所	名誉教授	望月孝晏
広島大学大学院工学研究科	教授	遠藤琢磨
広島大学大学院工学研究科	准教授	城﨑知至
福井大学大学院工学研究科	教授	仁木秀明
福井大学大学院工学研究科	教授	金邊忠
福岡工業大学工学部	教授	河村良行
福岡工業大学情報工学部	准教授	中村龍史
防衛大学校システム工学郡	准教授	篠田昌弘
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
山梨大学大学院医学工学総合研究部	教授	張本鉄雄
山梨大学大学院医学工学総合研究部	助教	宇野和行
立命館大学情報理工学部	教授	陳 延偉
量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門	主幹研究員	佐々木明
量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門	レーザー医療応用研究グルー プリーダー	山川考一
量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門	X線レーザー研究グループサ ブリーダー	錦野 将元
量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門	主幹研究員	長谷川 登
量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門	研究員	三上 勝大
量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門		近藤 修司
量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門		岡田 大

評議員議員選手・監事許議員選定委員企画委員

評議員

(敬称略)

- 評議員 礒嶋茂樹 住友電気工業株式会社 研究開発本部 電力・エネルギー・超電導 担当技師長
 - 内海 涉 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
 - 量子ビーム科学研究部門 関西光科学研究所長 尾崎 博 富士電機株式会社 発電・社会インフラ事業本部 発電プラント事業部

原子力技術部長

- 加藤有一 一般財団法人電力中央研究所 常務理事
- 佐々木孝友 大阪大学 名誉教授
- 仙藤敏和 関西電力株式会社 執行役員 原子燃料サイクル室長
- 田中健一 三菱電機株式会社開発本部 役員技監
- 中田公明 パナソニック株式会社 エコソリューションズ社 ものづくり革新本部 生産技術開発センター長
- 原 勉 浜松ホトニクス株式会社 常務取締役 中央研究所長
- 東 邦夫 京都大学 名誉教授
- 美濃由明 一般財団法人大阪科学技術センター 専務理事
- 望月孝晏 兵庫県立大学 名誉教授

理 事・監 事

(敬称略)

- 理事長 大石富彦 関西電力株式会社 取締役常務執行役員
- 理 事 井澤靖和 大阪大学 名誉教授
 - 中塚正大 大阪大学 名誉教授
 - 松村宏治 公益財団法人レーザー技術総合研究所 総務部長
 - 疇地 宏 大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター長・教授
 - 落合 誠 株式会社東芝 エネルギーシステムソリューション社 電力・社会システム技術開発センター 原子炉・量子応用技術開発部 部長 小野寺正洋 東京電力ホールディング株式会社 原子燃料サイクル部長
 - 小森憲昭 中部電力株式会社 技術開発本部 部長
 - 豊留昭宏 富士電機株式会社 関西支社 営業第二部長
 - 中田洋介 日本電気株式会社 関西支社 第三営業部長
 - 宮口仁一 三菱重工業株式会社 エネルギー・環境ドメイン 原子力事業部 原子力技術部 部長
 - 山中千代衛 大阪大学 名誉教授
 - 山本俊二 三菱電機株式会社 電力・産業システム事業本部 技術顧問
- 監 事 小林英生 株式会社三井住友銀行 大阪本店営業第二部長
 - 西原功修 大阪大学 名誉教授
 - 日根野文三 日根野公認会計士事務所 所長

評議員選定委員

(敬称略)

- 阪部周二 京都大学化学研究所 教授
- 佐々木孝友 大阪大学 名誉教授
- 仙藤敏和 関西電力株式会社 原子燃料サイクル室長
- 西原功修 大阪大学 名誉教授
- 松村宏治 公益財団法人レーザー技術総合研究所 総務部長

企画委員

(敬称略)

- 委員長 木島和夫 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
- 委 員 栗津邦男 大阪大学大学院 工学研究科 教授
 - 石津京二 一般財団法人大阪科学技術センター 総務部 企画室長
 - 植田憲一 電気通信大学 特任教授
 - 大谷浩司 三菱電機株式会社 電力システム製作所 磁気応用先端システム部 次長
 - 沖野圭司 オムロンレーザーフロント株式会社 取締役
 - 奥田泰弘 住友電気工業株式会社 エレクトロニクス・材料研究所 エレクトロニクス接続技術研究部 部長
 - 兒玉了祐 大阪大学大学院 工学研究科 教授
 - 近藤公伯 国立研究法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 量子 ビーム応用研究センター 先進ビーム技術研究ユニット長
 - 白神宏之 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 教授
 - 武田和仁 東京電力株式会社 原子燃料サイクル部 サイクル技術グループ マネージャー
 - 竹辺晴夫 富士電機株式会社 電力・社会インフラ事業本部 事業企画部 主席
 - 斗内政吉 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 教授
 - 中島信昭 大阪市立大学 特任教授
 - 西村博明 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 教授
 - 浜崎 学 三菱重工業株式会社 原子力事業本部 原子力技術部 次長
 - 藤原閱夫 兵庫県立大学大学院 工学研究科 教授
 - 宮永憲明 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 教授
 - 向井成彦 株式会社東芝電力システム社 電力・社会システム開発センター 電気計装不技術開発部長
 - 森 勇介 大阪大学大学院 工学研究科 教授
 - 山口浩司 関西電力株式会社 原子燃料サイクル室 サイクル事業グループ マネジャー

賛助 会員

【建設業】

株式会社環境総合テクノス 関電プラント株式会社 株式会社きんでん

【鉄鋼·非鉄金属製造】 株式会社神戸製鋼所 住友電気工業株式会社

【電気機器具製造業】 株式会社ダイヘン 株式会社東芝 日新電機株式会社 日本電気株式会社 パナソニック株式会社 株式会社日立製作所 富士電機株式会社 三菱電機株式会社

【機械·輸送用機器具】 三菱重工業株式会社 【精密機器具製造業】 有限会社岡本光学加工所 オムロンレーザーフロント株式会社 株式会社片岡製作所 光伸光学工業株式会社 ジオマテック株式会社 株式会社島津製作所 浜松ホトニクス株式会社

【商社・その他】 株式会社オプトサイエンス

【銀行・その他金融】 株式会社三井住友銀行

- 【電気・ガス業】 関西電力株式会社 中国電力株式会社 北陸電力株式会社
- 【鉄道業】 西日本旅客鉄道株式会社

【サービス業・その他】 関電不動産開発株式会社 株式会社ケイ・オプティコム 株式会社レイソルテクノロジーズ

-113 -

【団体関係】

- 一般財団法人大阪科学技術センター
- 一般財団法人関西情報センター
- 一般財団法人電力中央研究所
- 一般財団法人光産業技術振興協会
- 一般社団法人レーザー学会

合計35社

おわりに

レーザー技術総合研究所 平成 27 年度成果報告書 (ILT2016 年報第 28 巻)を取りまとめ ました。7 月に東京と大阪で開催する成果報告会においてその内容をご報告し、皆様から ご批判、ご教示を頂きたいものと願っています。

当研究所では、全所横断型の2つのプロジェクト研究、「産業用レーザー開発」と 「レーザー探傷技術開発」を推進するとともに、レーザーエネルギー、レーザープロセス、 レーザー計測、レーザーバイオ化学、理論・シミュレーションの5研究チームとレーザー 技術開発室の体制で研究を進めています。

産業用レーザー開発では、小型、高出力、高効率、高ビーム品質の固体レーザー実現 をめざして、低温冷却 TRAM レーザーの開発を進め、新しい冷却方式を導入して kW 級 出力を実現しました。また、新たに、室温水冷方式の開発にも着手しました。更なる高出 力をめざしてコヒーレントビーム結合方式を研究し、ファイバレーザー増幅器で高い結合 効率を実証しました。

レーザー探傷技術開発では、SIP(戦略的イノベーションプログラム)「レーザーを活 用した高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の開発研究」の下で、探傷技術の高速化をめ ざす研究が進展し、実用化に向けて明るい見通しが得られました。また、産業界との共同 研究などにより、トンネル欠陥検出システムの小型化と信頼性の向上、高速道路橋梁の健 全性評価技術開発、水中でのコンクリート構造物探傷実験などを継続して進めました。

チーム研究では、昨年度より開始された、A-STEP「コンパクト中性子源とその産業応 用に向けた基盤技術の構築」の下で、レーザー駆動型中性子源の開発をめざして、レーザ ープラズマシミュレーション研究に着手しました。CFRPのレーザー微細加工、テラヘル ツ波を利用した電力設備の欠陥検出、溶液中に溶存している不純物のラマンライダー計測、 液中レーザーアブレーションを利用した酸化還元反応とナノ粒子生成、フェムト秒レーザ ーによる生体関連物質の機能研究、次世代半導体リソグラフィ用 EUV 光源のシミュレー ション研究、光学素子の損傷評価や高耐力化研究などを継続して進め、成果の積み上げを 図ってきました。

今後とも、研究開発活動を積極的に推進し、わが国の産業活力向上に貢献できるよう、 鋭意努力する所存でございます。長年にわたる皆様方のご指導、ご協力に深く感謝申し上 げますとともに、これからも相変わりませず、ご支援、ご鞭撻下さいますようお願い申し 上げます。

平成 28 年 7 月

公益財団法人 レーザー技術総合研究所 所長 井 澤 靖 和

ILT2016 年報

平成28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4F

TEL (06) 6443-6311 (代)

公益財団法人 レーザー技術総合研究所



[■]お問い合わせは、総務部までお気軽にご連絡ください。

