

ILT-APR Number 29 Issued:July 2017 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 30 年に亘り、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、企業、大学等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厚く御礼申し上げます。

現在、世界は大変革の時代を迎えており、国内外の政治面からも、また地球規模の気候 変動の面からも将来の不確定性が増した状況にあります。また通信インフラの発展・普及 により、情報は瞬く間に世界を駆け巡り、人々の生活や社会に影響を及ぼすようになって 参りました。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、このような 激変する環境の下でも対応できる柔軟な研究・研究体制が大学や諸研究機関に求められて おり、オープンイノベーションあるいは産学連携の重要性が強調されています。

我々は産学連携のために創立され、爾来、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参りました。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 な仕組みとして部門横断的に人と人とが繋がるチーム制を取っており、まさにオープンイ ノベーションを組織のDNAとして取り込んで発展して参りました。昨2月、惜しまれな がら亡くなられた研究所創始者の山中千代衛先生の慧眼に今更ながらに驚く次第でありま す。ここに謹んでご冥福をお祈り申し上げます。

我々はこれからも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、広く社会に貢献していく 所存でございます。そのため、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。

このたび、ここに平成28年度の研究成果と事業活動をまとめて、研究所年報第29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 29 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

ILT2017 年報(Annual Progress Report 2016-2017)

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内部欠陥診断	 1

レーザープロセス研究チーム

シミュレーションで見るレーザーとプラズマの相互作用	5
常温駆動全反射アクティブミラー型 Yb:YAG レーザーの発振特性	9
Polarization and Reflection Characteristics of an Axicon Lens	14
海中メタンガスラマンライダーの開発	20

レーザー計測研究チーム

レーザーによるインフラ構造物の健全性評価	24
Development of laser-based system for remote inspection of unstable structures like highway bridges 2	25
レーザーを用いた構造物内部欠陥検出技術の高速化	29

レーザーバイオ化学研究チーム

理論・シミュレーションチーム

レーザー核融合炉チェンバー内のプルーム同士の衝突の3次元シミュレーション	39
プラズマ物理からみた地震前電離層電子密度変化の研究	42

レーザー技術開発室

355nm 用光学素子のレーザー損傷耐性データベース	
----------------------------	--

発	表論	i文	リス	ト		53
事	業	報	告	書		69
組		織		义		85
構	成	員	—	覧		86
評		議		員	••••••	91
理	事	•	監	事		92
賛	助		会	員		93
お	わ)	IJ	に		94

研究報告書

テラヘルツ波によるポリマー碍子内部欠陥診断

レーザーエネルギー研究チーム

李 大治、本越伸二1

1レーザー技術開発室

1. はじめに

テラヘルツ波は、周波数 0.1~10 THz、波長 3 mm~30 µm 程度の、電波と可視光・赤外光の間に当たる領域の 電磁波である。電波に比べて周波数が高く、プラスチッ クや紙等に対する透過特性に優れており、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¹⁻⁴。電力設備診断においても、ケーブル絶縁層 や遮熱コーティング層の欠陥、塗装下の鋼材発錆検出へ の応用など、先行研究が行われている^{5,60}。

我々は、電力設備として利用が広がるポリマー碍管内 部欠陥の検出することを目的として、模擬欠陥を用いた 基礎実験とシステムの検討を行ってきた。平成27年度 までに、テラヘルツ波発生・検出およびその応用技術に ついて調査を行い、種々の絶縁材料に対してテラヘルツ 波透過特性の評価、隙間などの欠陥、異物の検出につい て模擬試料を用いて計測を行った。

ポリマー碍管は、環状の FRP 樹脂の周囲にシリコー ンゴムが被覆された構造をもつ。外観検査ではシリコー ンゴム表面の汚れや亀裂のみしか確認できない。電気絶 縁特性の保持などの確認には碍管内部、特に FRP 樹脂と シリコーンゴムの接合部の状態を観察することが重要 である。シリコーンゴムは周波数が1THz を越えると吸 収率が増加するため、低周波域の THz 波の利用が有効 である。

平成28年度は、低周波数領域に特化した光伝導アン テナを採用した実験装置を構築し、実際のポリマー碍管 の内部診断を実験的に検証した。

2. テラヘルツ発生・計測装置

図1に示すようなフェムト秒レーザーをベースにし たテラヘルツ波発生・検出実験装置^{7,8)}を構築した。テ ラヘルツ波発生には、低周波域に対応する光伝導アンテ ナを採用した。チタンサファイアレーザー(波長800nm、



図1 THz 発生・計測装置概念図

100 fs、80 MHz)の出力を半透過鏡(Splitter 1)により励 起光 40 mW とプローブ光 40 mW に分けた。励起光は 集光レンズ(Lens 1)によりテラヘルツ波発生用光伝導 アンテナ(Emitter)に集光した。20V (Rep. 99 kHz)のバ イアス電圧を発生用光伝導アンテナに印加することに より、テラヘルツ帯に及ぶパルス状の広帯域な電磁波を 発生させた。放射されたテラヘルツ波は、放物面鏡 (Parabolic mirror 1) により平行波に変換され空間を伝搬 する。その後テラヘルツ帯の半透過鏡(Splitter 2)で反射 され、テラヘルツ波集光レンズ(Lens2、焦点距離30mm) により集光してサンプル表面に垂直に入射させた。サン プル表面及び内部欠陥から反射されたテラヘルツ波は 入射光と逆方向に進み、レンズ(Lens 2)、半透過鏡(Splitter 2)を通って放物面鏡(Parabolic mirror 2)により集光され、 検出用光伝導アンテナ(Detector)に入射される。一方、半 透過鏡(Splitter 1)によって分けられたプローブレーザー

光は、時間遅延光路(Delay)を通過した後、検出用光伝導 アンテナ(Detector)に集光される。サンプルで反射したテ ラヘルツ波とプローブレーザー光が検出用光伝導アン テナ上で時間的に一致した時に、微弱電流が発生する。 プローブレーザー光の遅延時間に対する微弱電流値の 変化を測定することにより、反射されたテラヘルツ波電 場の時間波形が測定できる。得られた微弱電流は、ロッ クインアンプにより増幅された後にパソコンへ転送さ れ、独自に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時間波形を自動的に計算する。 その波形をフーリエ変換することにより周波数スペク トルを同時に得ることができる。更に、サンプル移動ス テージ (x:10mm、y:10mm) とデータ収集を同期するこ とにより、サンプルからのテラヘルツ反射波の空間イメ ージを取得できる。図2に実験装置の光学配置写真を示 す。



図2 実験装置

サンプルの位置に金属平板を置いたときの反射テラ ヘルツ波の時間波形を図3に示す。比較のために、従来 使用していた高周波数帯を含む広い周波数帯域用光伝 導アンテナからのテラヘルツ波時間波形(青線)を重ね て表示した。図の10 ps の時間位置にある信号の半 値全幅は、従来のアンテナでの0.7 ps に対し、低 周波数域アンテナでは3.6 ps に広がっており、低 周波数帯で強いテラヘルツ波が発生できていることを 示している。

図 4(a)に示す光学機器の解像度評価用テストパター ンを使い、本装置の空間分解能を評価した。テストパタ ーンは OHP シートに金属インク(アルミニウム)で印刷 したもので、線の太さと間隔がそれぞれ 2 mm の同心円



図3 発生したテラヘルツ波の電場波形

である。サンプル位置に置かれたテストパターンを XY 二次元(走査間隔 0.2 mm)に移動し、反射テラヘルツ 波振幅の空間分布を得た。各点の振幅データから周波数 成分 0.1 THz、0.15 THz、0.2 THz を抽出した結果をそれ ぞれ図 4(b)、(c)、(d)に示す。図中の黒と白は、それぞれ テストパターンの金属部、透明部に対応している。

図 4(c)に示した 0.15THz の走査図では金属部と透明 部の明暗が明らかに識別できた。0.1 THz と 0.2 THz の 場合はコントラストが低下しており、金属部と透明部の



周波数 0.2 THz

識別がしにくくなっている。この結果より、装置の空間 分解能は2mm程度と言える。理論的に、電磁波の収 束スポット径は最小1波長程度である。周波数0.15 THzの波長は2mmであるから、空間分解能の評価結果は妥当と言える。

3. 模擬欠陥測定

シリコーンゴムと FRP 樹脂で作成した模擬サンプル を用いて反射テラヘルツ波信号の評価を行った。図 5(a) に製作した模擬サンプルの構造を示す。直径 10 mm の



穴を空けたアルミニウム平板(厚さ約1mm)の前面に シリコーンゴム板(厚さ約4mm)を密着し、後面を FRP 樹脂で封じ、剥離欠陥を模擬した。シリコーンゴム側か らテラヘルツ波を照射し、反射テラヘルツ波強度を計測 した。図 5(b)、(c)に、それぞれ広周波数帯域アンテナ、 低周波数帯域アンテナの場合の結果を示す。反射信号は、 シリコーンゴム表面、ゴム裏面、FRP 樹脂表面の順番に 検出される。図より新しく構築した低周波数域実験装置 では、FRP 表面からの反射信号が強くなっていることが 判る。これはシリコーンゴムの吸収が少ない低周波数域 で強いテラヘルツ波を発生できたためである。また、シ リコーンゴム裏面からの反射信号の時間が広周波数帯 域の場合に比べて遅れている。これは低周波数域に対す るシリコーンゴムの屈折率が高くなり、同じ厚さでも往 復の時間を要するようになったためである。

4. ポリマー碍管の内部診断

実際のポリマー碍管から図 6 に示すように一部を切 り出し、テラヘルツ波による内部診断を行った。切り出 したポリマー碍管サンプルは、シリコーンゴムと FRP



図 6 ポリマー碍子サンプル製作 (a)ポリマー碍 管 (b) ナイフで切り込みにより空気層欠 陥作成

樹脂境界面に沿って、ナイフ(厚さ 0.5 mm)で切り込 みを入れ、剥離欠陥を製作した。シリコーンゴムが収縮 するため、切り込みによる欠陥部は、10 mm×10 mm×0.1 mm以下と考えられる。サンプルの正常部と欠陥部、そ して欠陥部に水を浸透させた場合について、反射テラへ ルツ波時間波形を計測した。測定結果を図7に示す。図 の黒線、赤線、青線は、それぞれ正常部、欠陥部、水を 浸透した欠陥部の結果である。正常部の場合(黒線)、 表面反射から約 55ps 遅れてシリコーンゴム/FRP 樹脂



図7 ホリマー時官の小部診断結果。 黒棘: 正常部、 赤線: 模擬剥離欠陥部、青線: 水を含んだ欠 陥部

境界の反射信号が検出された。欠陥部の場合(赤線)、 シリコーンゴム/FRP 樹脂境界面からの反射信号は、僅 かな空気層(隙間)の存在により境界反射率が増大し、 正常部の約2倍大きくなっている。本来、剥離欠陥では、 シリコーンゴム裏面/空気、空気/FRP樹脂の2つの 境界で反射が起こっているが、低周波数域テラヘルツ波 の時間信号幅が広いため2つの信号は分離できず、隙間 の間隔を測定することはできない。しかしながら、反射 信号の大きな変化から、ポリマー碍管内部の剥離欠陥の 識別は可能であると言える。また欠陥に水を浸透させた 場合(青色)では、水が無い場合(赤色)に比べて、僅 かに反射信号が小さくなっている。低周波数域では水の 吸収は小さく、また剥離隙間が狭いため、一様に水で満 たされず、水の有無による違いは小さくなったと考えら れる。

内部に空気層を存在する欠陥のサンプルを円周方向 に一次元走査してテラヘルツ反射波を計測した。走査は 図 8(a)中の赤線のように、幅 14 mm、測定間隔 0.2 mm で行った。計測したデータから、周波数 0.15 THz の成 分を抽出して画像を作り、図 8(b)に示す。碍子が緩やか



な曲率を持っているため、走査位置により表面反射信号 および内部反射信号の時間が変化している。測定箇所 X=0 mm では、時間約 70 ps の位置に欠陥が存在し、X を移動し約5 mm の位置より欠陥部の信号強度が弱くな り、その後一定の信号強度、つまりシリコーンゴムと FRP 樹脂が密着した境界面の反射信号になっている。こ のように、照射箇所を掃引し測定することにより、剥離 した範囲を診断することが可能である。

5. まとめ

低周波数領域に特化したテラヘルツ波反射測定装置 を構築し、実際のポリマー碍管サンプルの内部を診断し、 剥離欠陥検出が可能であることを実証した。今後、装置 の小型化を図るとともに、測定精度、再現性を評価する 必要がある。

謝辞

本研究は、関西電力からの受託研究により実施された。 テラヘルツ波装置の構築および測定結果の解析では大 阪大学レーザー科学研究所の中嶋誠准教授、高野恵介助 教、加藤康作研究員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) R. Kubler, etal.: Appl. Phys. Lett. 85, 3360 (2004).
- 4) Y. Hirota, etal.: Opt. Express 14, 4486 (2006)
- 5) 福地哲生他: 電気学会論文誌 A, 132, 166, 2012
- 6) 布施一則他: 電気学会論文誌 B, 134, 745, 2014
- 7) N. Fuse, etal.: IEEE Trans THz Sci & Tech, 2, 242, 2012
- 8) D. Li, etal.: Int. J. Magnetics Electromagnetism 2, 006 (2016)

シミュレーションで見るレーザーとプラズマの相互作用

レーザープロセス研究チーム¹、理論・シミュレーション研究チーム²

藤田雅之¹、砂原 淳²

1. はじめに

レーザー核融合の研究においては、数値計算(シミュ レーション)が大きな役割を果たしてきた。燃料ターゲ ットにレーザー光が集光照射され、表面からプラズマが 噴き出し、その反作用でターゲットが圧縮され内部の燃 料が高温・高密度になって核融合反応が起きる¹⁾。レー ザーがどのようにプラズマに吸収され、流体としてのプ ラズマがどのように振る舞うのか、即ちレーザーとプラ ズマの相互作用がシミュレーションによって解析され てきた。そこには、電子の熱輸送や輻射によるエネルギ ー伝搬など最新の研究成果が盛り込まれている。

核融合ドライバーとして用いられる主力のレーザー はナノ秒のパルスレーザーであり、産業界では微細加工 用にナノ秒レーザーが用いられている。レーザー核融合 とレーザー加工では集光強度が若干違うものの、支配す る主な物理過程(レーザーとプラズマの相互作用)は共 通である。ここでは、核融合やレーザープラズマの解析 のために開発されたシミュレーションコードを用いて レーザー加工の波長依存性に関して調べた結果を報告 する。ただし、実験との詳細な比較を行っていないため、 あくまで定性的な評価である。



図1 プラズマ中でのレーザー光吸収

2. プラズマによるレーザー光の吸収²⁾

物質にレーザー光が照射され、温度が上がっていくと、 固体→液体→気体→プラズマへと状態が変化していく。 プラズマは電離気体と呼ばれ、イオンと電子で構成され る。プラズマが発生すると、高周波の電磁波であるレー ザーは、重いイオンとは相互作用せずに電子にそのエネ ルギーが吸収される。即ち、プラズマが発生するとレー ザーには電子の雲しか見えなくなる。

図1にプラズマ中でのレーザー光吸収の概要を示す。 レーザー照射により固体表面で発生したプラズマは膨 張し指数関数的な電子密度分布を形成する。レーザー光 は低密度側から入射され逆制動輻射によって吸収され るが、臨界密度に近づくと共鳴吸収が支配的となり、反 射される。(逆制動輻射とは、イオンのクーロン場中で 電子が光を吸収して加速される現象であり、シンクロト ロン放射で電子が光を放出する現象の逆過程である。) プラズマ中の電子は密度に依存した固有の振動周波数 ωpをもつ。ωpはプラズマ周波数と呼ばれ

$$\omega_p^2 = \frac{e^2 n_e}{\varepsilon_m} \tag{1}$$

で与えられる。ここで、m, eは電子の質量、素電荷、 n_e はプラズマの電子密度、 ϵ_0 は真空の誘電率である。

角周波数ωのレーザー光に対するプラズマの屈折率 niは

$$n_{i} = \left[1 - \left(\frac{\omega_{p}}{\omega}\right)^{2}\right]^{1/2}$$
(2)

で与えられる。 $\omega_p > \omega$ では屈折率が虚数になり光が伝搬 できなくなる。 $\omega_p = \omega$ となる電子密度は臨界密度 (critical density) と呼ばれ

$$n_{ec} = \frac{\varepsilon_0 m \omega_0^2}{e^2} \tag{3}$$

n 10²³ 10²⁴ 10²⁶ 10¹⁹ 10¹⁹ 10¹⁹ Cm⁻³ Cm⁻³



で与えられる。臨界密度付近ではプラズマの振動周波数 とレーザーの周波数が一致し、共鳴的に電子プラズマ波 を励起して吸収がおきる。これが共鳴吸収である。

臨界密度はレーザー波長の二乗に逆比例する。例えば、 波長 10.6 μ m の CO₂ レーザーの臨界密度は 10¹⁹ cm³ で あるが、波長 1.06 μ m の YAG レーザーでは 10²¹ cm³、 波長 0.25 μ m では 1.8×10²² cm³ となる。臨界密度が高 ければ高いほど逆制動輻射によって大半のレーザー光 が吸収され共鳴吸収は無視できるようになる。

3. 波長依存性

臨界密度がレーザー波長の二乗に逆比例することは、 プラズマ中へ侵入できる深さが異なることを意味する。 図2に波長によって異なる領域でレーザー光が吸収さ れる様子を示す。波長が長いとレーザー光はプラズマの 外側(低密度側)で吸収され、アブレーションが起きる 固体密度領域と吸収領域の距離が遠くなる。この間は電 子の熱伝導や輻射によってエネルギーが運ばれる。加工 にとってのメリットはレーザー光強度分布がその間で 熱拡散により緩和されることになるが、デメリットとし ては加工スポットがレーザースポットよりも大きくな り加工精度が低下することにつながる。



図2 波長によって異なる領域でレーザー光が吸収さ れる様子。(a) 長波長の場合は低密度側で、(b) 短波長の場合は高密度領域でレーザー光は吸収 される。

← 図3 厚さ10µmのCHターゲットへ、上段:KrF レ ーザー(波長0.25µm)、中段:YAG レーザー(波長1.06 µm)、下段:CO₂レーザー(波長10.6µm)を集光強度 10^{10} W/cm²で照射した際に発生するプラズマの電子密 度分布の時間発展。レーザーの集光径は10µm(ガウシ アン分布)、パルス幅は5ns(フラットトップ)。

図3に厚さ10µmのCHターゲットへ、上段:KrFレ ーザー(波長0.25µm)、中段:YAGレーザー(波長1.06 µm)、下段:CO₂レーザー(波長10.6µm)を集光強度 10¹⁰ W/cm²で照射した際に発生するプラズマの電子密 度分布の時間発展を示す。レーザーの集光径は10µm

(ガウシアン分布)、パルス幅は5ns(フラットトップ) である。

上段:KrF レーザーの場合は、臨界密度が固体密度に 近く、固体表面あるいは穴の底に近いところでレーザー 光が吸収され、4ns後には10µmのターゲットを貫通し ている。プラズマは穴から吹き出すように膨張している。

中段:YAG レーザーの場合は、KrF レーザーの場合 よりも臨界密度が低く、臨界密度プラズマはターゲット の初期表面位置近くに存在している。レーザー光が吸収 され、プラズマは半円状に外へ向かって膨張している。

下段: CO₂レーザーの場合は、臨界密度がさらに低く なり、臨界密度プラズマはターゲット表面より 10~20 µm 外側にある(図中矢印で示している)。波長が長く なるにつれ、臨界密度プラズマはターゲットから遠ざか り、電子による熱エネルギー輸送は横方向(あるいは半 径方向)に広がる。CO₂レーザーの場合は初期の集光ス ポットよりも広い領域からプラズマが平面状に膨張し ている。図から詳細には読み取りにくいが、加工痕の大 きさも波長が長くなるにつれ、大きくなっている。

図4に図3と同じ計算で、電子密度 n_e(cm³)、電子温 度 T_e(eV)、レーザー吸収 S_L(W/cm³)の時間発展の比較 を示す。電子密度分布は図3と同じである。電子温度、 レーザー吸収は空間の半分を表示している。電子温度の スケールは各波長で異なる。図3における電子密度の時 間発展の解釈を電子温度とレーザー吸収分布で補足し た形となっている。レーザー吸収分布の波長依存性を見 ると、長波長ほど固体表面から離れたところでレーザー 吸収が起きていることが明瞭に示されている。

5. まとめ

レーザー核融合やレーザープラズマの解析のために

開発されたシミュレーションコードを用いてレーザー 加工の波長依存性に関して調べた結果を紹介した。波長 の違いは臨界密度の違いになり、レーザー光が吸収され る領域が長波長ほどターゲットから離れていく。それに 合わせて、長波長ほど横方向の電子の熱エネルギー輸送 が増えていくことが可視化されたと言える。

本報告がレーザー加工現象の理解の一助になれば幸いである。

謝辞

シミュレーション結果の解釈に関して阪大レーザー 研の長友先生にご助言をいただきました。ここに感謝の 意を表します。尚、本シミュレーションコードを開発し た砂原研究員は、米国 Purdue 大学へ転籍しました。益々 のご活躍をお祈りいたします。

参考文献

- J. J. Duderstadt, G.A. Moses : "Inertial Confinement Fusion", John Wiley & Sons, Inc., 1982, ISBN 0-471-09050-6.
- 2)藤田 雅之:「レーザー加工の物理3 ~光パルス幅と加工~ 〔解説〕」,光学,36,pp.459-465,(2007).
- 3) M. Fujita, H. Ohkawa, T. Somekawa, M. Otsuka, Y. Maeda, T. Matsutani, N. Miyanaga, "Wavelength and pulsewidth dependences of laser processing of CFRP", Physics Procedia, 83, pp.1031-1036 (16-SEP-2016).
- 4)藤田雅之、染川智弘、宮永憲明、「微細助工 こんなレーザ が今後求められる」、第87回レーザ加工学会講演論文集、 2017年4月5日,pp.117-120(2017).

次頁 図4 図3と同じ計算で、電子密度n_e(cm³)、電 子温度T_e(eV)、レーザー吸収S_L(W/cm³)の時間発展を 比較。電子密度分布は図3と同じ、電子温度、レーザー 吸収は空間の半分を表示。電子温度のスケールは各波長 で異なる。



常温駆動全反射アクティブミラー型 Yb:YAG レーザーの発振特性

レーザーバイオ化学研究チーム¹、レーザープロセス研究チーム²、 レーザーエネルギー研究チーム³、レーザー技術開発室⁴

谷口誠治¹、ハイク コスロービアン²、李 大治³、本越伸二⁴、藤田雅之²、井澤靖和

1.はじめに

高出力固体レーザー開発における最重要課題の一つ は、レーザー媒質の発熱対策である。Yb:YAG 固体レー ザー材料は、励起量子効率が大きく熱損失が小さい、蛍 光寿命が長いためエネルギー蓄積能力が高い、等の特長 を持つため多く研究されてきたが、高出力化の際にはや はり発熱による出力やレーザー品質の低下、媒質の劣化 などが懸念される。発熱制御の手法として第一に挙げら れるのは媒質自体の発熱の抑制であり、その一つにゼロ フォノンライン (969nm) 励起がある。Yb:YAG は940nm 付近と 969nm 付近に吸収帯のピークを持ち、969nm の 吸収はゼロフォノンラインによる吸収に相当する。通常 はスペクトル幅が広い 940nm 帯を励起に用いるが、近 年のLD 技術の進展により、室温領域においてはバンド 幅が狭い (~2.8nm) ゼロフォノンラインの励起も可能と なってきている。励起波長と発振波長(1030nm)のエネ ルギー差が小さくなるため、969nm 励起を用いた場合、 940nm 励起に比べ発熱損失を約 32%抑制できる。この ため海外では、高出力レーザーの開発にこの波長が用い られる事例が報告されているが、国内ではいまだ報告例 は少ない。第二は、冷却法の開発による除熱性能の向上 である。当研究所では、三菱重工業株式会社の委託によ り、全反射型アクティブミラー方式(Total-Reflection Active-Mirror: TRAM、図1)を用いた低温冷却(クライ オジェニック) Yb:YAG レーザーの開発を進めてきた。 低温で優れた動作特性を示す Yb:YAG と TRAM 方式 を組み合わせることで、より高出力、高品質のレーザー 出力が期待される。しかし一方で、液体窒素自体は気化 熱が小さいため除熱能力が大きくなく、プール冷却条件 において高励起を行った際、液体窒素の突沸(膜沸騰) により励起部の温度が急速に上昇する現象が起こるこ とがわかった」。この課題の解決のため、プール冷却



図1 Yb:YAG TRAM の外観

の約 10 倍の除熱能力を持つ液体窒素衝突噴流方式によ る冷却法が用いられ、TRAM を 3 つ組み合わせた形状 の ZiZa-AM (ZigZag Active-Mirror) を用いた増幅試験 が行われた結果、CW 増幅出力 1.2kW、30 分の安定出力 が達成された²⁾。この結果は、TRAM レーザーにおいて 衝突噴流冷却法が有効に働くことを示している。TRAM は底面に熱伝達率が低い全反射膜コーティングをする 必要がなく、また強固なコンポジット構造を持つため Thin disk 型のような伝導冷却を必要とせず、より除熱効 果の高い直接的な噴流冷却が可能となる。

これらの結果から我々は、ゼロフォノン励起による発 熱抑制と、液体窒素よりも除熱能力が大きい水を冷媒に 用いた衝突噴流冷却法を組み合わせることにより、より コンパクトな冷却装置を持つ常温駆動の高出力 Yb:YAGレーザーの開発が可能ではないかと考え、研究 を開始した。本稿では、レーザー開発の初期段階として 常温領域における水冷Yb:YAG TRAMのレーザー発振 特性と、動作温度の効果について検討した結果を報告す る。

2. 940mm 励起による発振出力の温度特性

水冷による TRAM のレーザー発振特性と動作温度の 効果について検討するため、波長 940nm の低出力励 起光源及び水冷装置を用いてレーザーシステム

を構築し、レーザー発振試験を実施した。図2に プール冷却時の実験配置図を、図3に装置写真を 示す。プール冷却では、冷却装置内に蒸留水を満 たし、TRAMの裏面を水と接触させて冷却を行う。 実験には、Yb:YAG 層の厚さ 0.6mm、Yb ドープ濃 度 9.6at%の TRAM を使用した。TRAM の両側に ダイクロイックミラー(DM 0°)、反射率85%の 結合出力ミラー (OC) をそれぞれ配置して共振器 を作成した。励起には波長約 940nm、500W 出力 のレーザーダイオード(D4F4L22、DILAS 社)を 用いた(ビーム径~2.3mmφ)。発振レーザー光 はダイクロイックミラー(DM45°)で反射してパワ ーメーターで計測、あるいは応答速度の速いフォ トダイオードによりパワーメーター受光面の散 乱光を計測して出力の時間変化を観測した。動作 温度特性の計測では、サーモースタットを用いて 温度調整を行い、23℃から81℃まで水温を約20℃ ずつ変化させた。水温計測用の熱電対は、水温と TRAM の冷却面の温度が一致するよう、TRAM の ごく近傍に配置した。

図4に、発振出力の時間変化をフォトダイオー ドにより計測した結果を示す。水温は23℃(±2℃) である。入力は157Wから417Wまで変化させた。 入力の増加に伴い出力も増大するが、出力は励起



 図 2 940nm 励起レーザー発振特性試験実験配置 (プール冷却)。LD:ダイオードレーザー、
 DM:ダイクロイックミラー、OC:結合出力 ミラー、L:レンズ、PM:パワーメーター、
 AP:アパーチャー、PD:フォトダイオード、
 TC:K 熱電対



図3 実験装置の写真

開始直後がピークで、その後は時間の経過ととも に TRAM の温度上昇が起こり、出力は低下してい く。同様に水温を 43℃(±2℃)、63℃(±2℃)、81℃ (±1℃)に変更して発振試験を行った結果、入力が 同じ場合でも水温が高くなるとピーク値は低下 した。これらの結果から、各温度、各入力での発 振出力は励起開始直後のピーク値であるとし、出 力値を算出した。結果を図5に示す。縦軸は発振 出力、横軸は TRAM に吸収された励起パワー(吸 収パワー)である。動作温度が上昇すると発振に 必要な吸収パワー(発振閾値)は増加するが、吸 収パワーに対する出力効率 (スロープ効率) は大 きくは変化していないようにみえる。実験で得ら れた発振出力の温度特性について評価を行うた め、温度(T)に依存する因子の温度変化を導入した 発振出力式(1)を用い、計算値と実験値の比較を行 った。



図4 プール温度 23℃(±2℃)での各入力に対する
 発振出力(フォトダイオード電圧値)の時間
 変化





ここで、 P_{out} :出力 (= AI_{out} 、A: ビーム面積、 I_{out} :出力密 度)、 η_{slope} : スロープ効率、 g_0 :小信号利得、 g_h :発振閾 値での小信号利得、 f_i :レーザー上準位占有率、 f_u :レー ザー下準位占有率、 σ_{eni} :レーザー発振波長(1030nm) での誘導放出断面積、 r_j : 蛍光寿命、 hv_p : 励起光光子エ ネルギー、 P_{abs} :励起光吸収パワー、V:励起体積、l:励起 光路長、 η_0 :励起量子効率、 L_s :共振器の光学損失、K:出 力結合ミラーの透過率、 σ_{abs} :吸収断面積である。温 度依存因子のうち、 σ_{ent} (T)、 σ_{als} (T)、 r_j (T)については、 Yb:YAG の温度依存性の実測値³⁵⁾から近似式を作成し、 式(1)に導入した。

図6に結果を示す。ただし、縦軸は発振出力を 強度(I_{out})に変換したもの、横軸は吸収パワーを TRAM励起面(面積2A)での吸収強度に変換した ものである。計算に必要な光学パラメータは実験 条件から求め、 $L_s=0.108$ を用いた。図中実線は計算 値であり、出力式(1)の温度のみを変化させたものであ る。実験値と計算値は温度効果を含めてほぼ一致してお り、出力式(1)により実験値が再現されることがわかった。



(■) 81℃での出力強度と、各温度での出力
 強度の計算値(実線)

3. ゼロフォノンライン励起における出力予測

940nm 励起での発振実験の分析に用いた出力 式をゼロフォノンライン(969nm)励起に適用す るため、出力の計算に用いるパラメータの中で、 励起波長に依存するもの(励起光光子エネルギー (hv_p) 、吸収断面積 (σ_{abs}) 、励起量子効率 (η_0))の 数値補正を行った。σ_{abs}は温度にも依存するため、969nm における Yb:YAG の温度依存性の実測値 ³⁾から近似式 を作成し、式(1)に取り入れた。この式を用いて969nm 励起での出力予測を行うともに、動作温度の効果 ついて検討した。図7は、動作温度がそれぞれ23℃、 63℃、100℃、150℃における 969nm 励起(図中赤 線)、940nm 励起(図中点線)での出力を比較し たものである。励起ビーム径は2.3mmφ、Yb:YA G 層の厚み 0.6mm、ドープ濃度 9.6at%、出力ミラ ーの反射率は 85%とした。動作温度を 23℃から 150℃まで上昇させても、同じ温度で比較した場 合には969nm励起の方が発振閾値はより低く、ス ロープ効率はより大きくなるという結果が得ら れた。さらに、ゼロフォノンライン励起では媒質 の発熱が抑制されることから、吸収パワーが同じ 場合 940nm 励起に比べ出力特性はさらに向上す るものと考えられる。



図 7 動作温度 23℃、63℃、100℃、150℃にお ける(赤線)969nm 励起、(点線)940nm 励起での出力強度(計算値)の比較

4. 水衝突噴流冷却試験

水衝突噴流冷却時の発振特性について、噴流管を用い た予備実験を行った。実験配置を図8に示す。冷却装置 の背後から噴流管を挿入し、循環ポンプにより水を噴出 させて TRAM の底面を直接冷却する手法である。噴流 管の先に取り付けたノズルの直径は 3mm、流量は 3.8 (±0.1)L/min.で、TRAM 底面での水の衝突領域の中心部 に LD の励起領域が入るようにノズルの位置を調整し た。水温は23℃(室温)である。他の条件はプール冷却 試験(図2)と同一とし、発振試験を行った。結果を図 9に示す。各入力 (Input) における励起開始直後のフォ トダイオード電圧値はプール冷却時(図4)とほぼ同一 であるが、励起時間の経過による出力低下は抑制されて いる。励起開始から3秒後以降の出力は安定化し、励起 時間の経過による変化はほぼみられなかった。またレー ザー出力が安定した後での出力のパワーメーター計測 値とフォトダイオード電圧の値は線形関係にあり(図 10)、これによりフォトダイオードの電圧値から出力を 算出することが可能である。噴流冷却時に安定出力が得 られるのは、プール冷却時よりも TRAM の温度上昇が 抑制されるためであると考えられる。励起開始から約5 秒後のYb 蛍光スペクトルを観測して励起領域の中心部 の温度を算出のした。その結果、入力が同じ場合、噴流 冷却時の TRAM の励起部の温度はプール冷却時の温度 に比べ 60~40℃程度低下しており、入力の増加により

その温度差は徐々に縮小することがわかった。これらの 結果から、除熱性能がより高い衝突噴流冷却方式を用い ることにより、TRAM 励起面の温度上昇を抑制し、出力 の増加および安定化を行うことが可能であることが明 らかとなった。



図8 940nm 励起レーザー発振特性試験実験配置 (衝突噴流冷却時)。



図9 衝突噴流冷却(水温 23℃(±2℃))での入力 に対する出力(フォトダイオード電圧値) の時間変化



図10 衝突噴流冷却時のパワーメーター計測値 とフォトダイオード電圧の一定値(励起開 始から3秒後以降)の関係

5. まとめと今後

本研究では、ゼロフォノンライン励起による常温動作 高出力 Yb:YAG レーザーの開発を目標に、その初期段 階として940nm励起による室温動作時のTRAM レーザ 一発振出力およびその動作温度特性(室温~80℃)を計 測した。計測データは温度効果を考慮した発振出力 式により分析するとともにゼロフォノンライン 励起時の出力予測を行い、この波長での励起が発 熱の抑制だけでなく出力に対しても有利に働く 可能性があることを示した。また、除熱能力が高 い水衝突噴流冷却を用いた予備的な試験を行い、 プール冷却時と比べて TRAM 励起面の温度が低 下することにより、発振出力の増加および安定化 が起こることを確認した。今後は、969nmLDを用 いたゼロフォノンライン励起レーザー発振試験 や、高出力化に向けたスケーリングおよびレーザ ーシステム設計、衝突噴流冷却方式の改良など、 kW 級の高出力レーザーの開発に向けた具体的な 取り組みを進めて行く予定である。

謝辞

本研究の一部は安全保障研究推進制度(研究課 題名「ゼロフォノンライン励起新型高出力 Yb:YAG セラミックレーザ」)の支援を受けて 実施した。

参考文献

- T. Sakurai, H. Chosrowjan, H. Furuse, S. Taniguchi, T. Kitamura, M. Fujita, S. Ishi, Y. Izawa, *Applied Optics*, 55, 1351-1355, 2016.
- K. Hamamoto, T. Morioka, S. Nishikata, N. Inoue, J. Nakatani, S. Taniguchi, H. Chosrowjan, Y. Izawa, *in "Advanced Solid State Lasers (ASSL '15)" Technical Digest*, paper-ATu2A.41, 2015.
- J. Koerner, C. Vorholt, H. Liebetrau, M. Kahle, D. Kloepfel, R. Seifert, J. Hein, M. C. Kaluza, J. Opt. Soc. Am. B, 29, 2493-2502, 2012.
- J. Dong, M. Bass, Y. Mao, P. Deng, F. Gan, J. Opt. Soc. Am. B, 20, 1975-1979, 2003.
- D. S. Sumida, T. Y. Fan, OSA proceedings on Advanced Solid-State Lasers, 1994, 20, 100-102, 1994.
- H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga, H. Chosrowjan, M. Fujita, K. Takeshita, Y. Izawa, *Optics Express*, 20, 21739-21748, 2012.

Polarization and Reflection Characteristics of an Axicon Lens

Laser Process Research Team

Haik Chosrowjan and Seiji Taniguchi

1. Introduction

The theory of laser resonator has been studied for many years¹⁾. Resonator stability conditions and different cavity geometries tailored for different active media and operation regimes have been analyzed as well²⁾. Noteworthy, most laser cavities are designed and constructed by combination of plane and spherical mirrors. However, for some niche applications requiring specific laser modes and polarization conditions such as Laguerre-Gaussian modes and radial/tangential polarization, respectively, or for reduction of thermally induced wave-front distortions in solid-state lasers, non-standard resonators have been used, too. For instance, corner-cubes and metallic W-shaped axicons (also called Waxicons) have been used as reflectors in solid-state³⁾ and gas⁴⁾ lasers, respectively.

Corner-cube retro-reflectors (CCR) and axicon lenses (AL) are optical components with interesting reflective and polarization characteristics. One of their properties is that the collimated radiation incident on both elements (arbitrary direction for CCR and normal incident for the axicon with 90 degrees apex angle) is reflected back in the direction that is counter-parallel to the incident beam. Another common property of both elements is that the reflected beam has coherent properties, which could be used for passive intra-resonator coherent beam combining (CBC). This process is schematically shown in Fig. 1 and briefly described in its caption. Finally, by rotation of the CCR one could compensate the beam astigmatism induced by thermal load in the laser active medium. For these reasons CCRs are already used as total-reflecting mirrors in laser resonators⁵). Recently we have suggested that axicons with 90 degrees apex angle can be also used for such purpose. Moreover, using axicons as total reflection mirrors, it seems to be possible generating beams with radial- or tangential polarizations.

Detailed knowledge of intensity distributions of p- and spolarization components in retro-reflected beam is essential for designing and building resonators with retro-reflective components. Moreover, polarization properties of retro-reflected beams are also essential for modeling laser mode formation inside the resonator. So, we have studied experimentally the basic polarization and reflection properties of corner-cube and axicon retro-reflectors. Namely, experimental results of near- and far-field intensity distributions for depolarized, p- and s- polarized outputs of these elements are presented and analyzed. We have performed also case-calculations for several polarization states based on Fresnel equations and compared them with the experiments. In this report, however, due to space limitations we present and discuss mainly results for an axicon lens, because various CCR properties have been theoretically addressed in numerous previous publications.⁶⁾



Fig. 1 Comparison between (a) Fabri-Perot and (b) retroreflector based resonators. For large excitation spots and multi-mode operation, in case (a) the areas in the beam profile like 1 and 2 are not phase-locked, while in case (b) the areas 1 and 2 are phase-locked because of mutual injection in the resonator. As a result, intra-resonator passive CBC may occur.

2. Total internal reflection based CCRs and ALs

CCRs and ALs are often fabricated using fused silica or various glass materials. For achieving retro-reflection of an optical beam, one can coat the reflective surfaces with different metallic or dielectric substrates or simply use them with well-polished but uncoated surfaces. In the later case the total internal reflection (TIR) phenomenon, characterized by critical incidence angle $\theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$, where $n_1 > n_2$, is used for the incidence beam retro-reflection. For high-power laser beam applications retro-reflectors with coated surfaces are not appropriate because of anticipated thermal degradation and damage of the coated surfaces. Hence, we studied polarization and reflection properties of a CCR (N-BK7 glass, n = 1.5071 at 1030 nm, $\theta_c = 41.57$ degrees) and an AL with 90 degrees apex angle (fused silica, n = 1.45 at 1030 nm, $\theta_c = 43.6$ degrees) based on the TIR phenomenon (Fig. 2). Briefly, reflection of p- and s- polarized light at the interface between two homogeneous and isotropic media is governed by well-known Fresnel equations.7) When both media are transparent, the phase shifts that accompany partial external or *internal* reflections assume the values of π or 0. However, under TIR conditions at angles of incidence θ above the critical angle θ_c , the phase shifts are nontrivial and given by the following equations:⁷⁾

$$tan(\delta_p/2) = N\sqrt{N^2 sin^2 \theta - 1}/cos\theta$$
(1)

$$tan(\delta_s/2) = \sqrt{N^2 sin^2 \theta - 1} / (N cos \theta)$$
(2)

Here δ_p and δ_s are the phase shifts of p- and s- polarized waves, respectively, θ is the incidence angle and $N = n_1/n_2 > 1$ is the high-to-low ratio of the refractive indices of the incidence and refraction (evanescent) media, respectively.

As it is shown in Fig. 2(c), the light rays enter both the CCR and AL perpendicularly to the anti-reflection coated base surface i.e. at 0 degree to the surface normal. Hence, the TIR angle θ for each 2 reflections in AL for axial rays is 45

degrees while in the case of CCR, θ for each of the 3 reflection faces is exactly $\theta = \arccos(1/\sqrt{3}) \approx 54.7356$ degrees. CCR made by N-BK7 glass, n = 1.5071, according to Eqs. (1) and (2), at each reflection will produce phase shifts of $\delta_p = 123.78$ and $\delta_s = 78.986$ degrees for p- and s- polarized lights, respectively. On the other hand, AL made by fused silica, n = 1.45, according to Eqs. (1) and (2), at each reflection will produce phase shifts of $\delta_p = 49.8$ and $\delta_s = 24.9$ degrees for p- and s- polarized lights, respectively shown that for the 45 degrees incidence angle, the equality $\delta_p = 2\delta_s$ called also the Abelès condition, is always fulfilled independent of N.⁸ This relation, as presented in the next section, makes obtained calculation formulas describing reflected beam's polarized E-field components much simpler.

Finally, it is important to note that in both CCR and AL based on TIR, the optical lengths travelled by rays at normal incidence are equal and do not contribute to the phase shifts between p- and s- polarized electric fields. The phase shifts originate only exclusively from the TIR phenomenon.



Fig. 2 (a) Photographs of the CCR and 90 degrees apex angle AL; (b) Cross-sections of the AL (right) and CC (left) retro-reflectors in XY plane showing also the azimuth angle α and rotation angle γ for AL and CC, respectively; (middle) incidence Gaussian-beam cross-section perpendicular to the propagation direction Z and two reflection points A and B in the AL for a given ray; (c) Same as (b) in 3 dimensions.

3. Intensity- and phase difference distributions

We have performed several case-calculations for an axicon lens with 90 degrees apex angle, but present results of only two of them (p- and radial polarized cases) in this report due to the space limitations. Consider p- (X direction) polarized plane wave with Gaussian intensity distribution propagating in the Z direction toward an AL (Fig. 2 (c)). It reflects from the AL with no losses due to TIR and propagates backward in - Z direction. We want to determine the reflected beam's polarization-selective intensity and phase difference distributions versus the azimuth angle α . Eqs. (3), (4) and (5) express the E-fields of the incidence p- polarized wave (E_p^{in}) and reflected wave's p- (E_p^{out}) and s- (E_s^{out}) polarized components, respectively.

$$E_{p}^{in} = E_{0} \cos(kz - \omega t + \varphi)$$
(3)

$$E_p^{out} = -E_0 \cos^2 \alpha * \cos(-kz - \omega t + \varphi + 4\delta_s) + E_0 \sin^2 \alpha * \cos(-kz - \omega t + \varphi + 2\delta_s)$$
(4)

$$E_s^{out} = -E_0 sin(2\alpha) * cos(\delta_s) * cos(-kz - \omega t + \varphi + 3\delta_s)$$
(5)

Here E_0 is the E-field amplitude, k is the wavenumber, ω is the angular frequency, φ is the initial phase, δ_s is the phase shift of the s- polarized wave, and α is the azimuth angle. Eqs. (4) and (5) were derived by considering (i) two consequent TIRs on the tangential surfaces at the points A and B in the AL (Fig. 2), (ii) by performing Euclidean rotation/reflection transformations of the Cartesian coordinate system and (iii) by using the Abelès condition $\delta_p = 2\delta_s$ briefly mentioned in the previous section. From Eqs. (4) and (5) one can easily determine the spatial intensity distributions of p- and s- polarized components of the reflected beam. Calculated intensity distribution profiles of p- and s- polarized incident beam with Gaussian intensity distribution profile are presented in the Fig. 3 (a).

In an analogous manner one can determine the reflected beam's polarization-selective intensity and phase difference distributions versus the azimuth angle α for radial polarized incidence beam. Eqs. (6), (7) and (8) express the E-field components \tilde{E}_p^{in} and \tilde{E}_s^{in} of the radial polarized incidence wave and from AL reflected wave's p- (\tilde{E}_p^{out}) and s- (\tilde{E}_s^{out}) polarized components, respectively.

$$\widetilde{E}_{p}^{in} = E_{0} * \cos\alpha * \cos(kz - \omega t + \varphi)$$
 6(a)

$$\widetilde{E}_{s}^{in} = E_{0} * sin\alpha * cos(kz - \omega t + \varphi)$$
 6(b)

$$\widetilde{E}_{p}^{out} = -E_{0}\cos\alpha * \cos(-kz - \omega t + \varphi + 4\delta_{s}) \quad (7)$$

$$\widetilde{E}_{s}^{out} = -E_{0}sin\alpha * cos(-kz - \omega t + \varphi + 4\delta_{s}) \quad (8)$$

From Eqs. (7) and (8) one can easily determine the spatial intensity distributions of p- and s- polarized components of the reflected beam. Calculated intensity distribution profiles of p- and s- polarized components reflected from the AL for radial polarized incidence beam with Gaussian intensity distribution profile are presented in the Fig. 3 (b).



Fig. 3 (a) p- polarized incidence beam intensity distribution profile (left) and intensity distribution profiles of its ppolarization (middle) and s- polarization (left) components reflected from the AL; (b) Radial polarized incidence beam intensity distribution profile (left) and intensity distribution profiles of its ppolarized (middle) and s- polarized (left) components reflected from the AL. Red arrows indicate the polarization directions in each case. In Fig. 4 (a) and (b) calculated p- and s- components intensity distribution profiles and $\Delta \delta_{s,p}$ phase differences versus the azimuth angle α in the $0 \le \alpha \le \pi/2$ interval for p- and radial polarized incidence beams, respectively, are presented. Note that due to the axial symmetry of the AL, the rays entering, for instance, the upper right quarter exit the AL from the lower left quarter, and so on.



Fig. 4 Amplitudes of the AL reflected beam's p- and sintensity components (black) and phase difference $\Delta \delta_{sp}$ (red) dependences on the azimuth angle α in the $0 \le \alpha \le \pi/2$ interval: (a) The incidence beam is ppolarized plane wave with Gaussian intensity distribution profile; (b) The incidence beam is a radial polarized beam with Gaussian intensity distribution profile (see also Fig. 3). For both cases the incidenceand emerging ray polarizations at (x, y) and (-x, -y) points, respectively, are schematically shown on the right panels of the corresponding figures.

From the phase relation shown in Fig. 4(a) (red) it is clearly seen that in AL resonator a linearly polarized beam after retro-reflection from the AL will be depolarized (become elliptically polarized locally) and cannot be invariant (keep its polarization) after a round trip. In other words, there will be always both p- and s- polarized beam components in the resonator and no polarization selection is possible. This conclusion is also valid for ALs with polarization maintaining ($\delta_s = 0$) metal coated reflection surfaces. Indeed, from Eqs. (3) – (5) it follows that when $\delta_s = 0$, the linear polarization across the beam is not invariant and the beam tends to become a radial polarized one after many roundtrips.

On the other hand, from the phase relation shown in Fig. 4(b) (red) it is clearly seen that in AL resonator a radial polarized beam after retro-reflection from the AL keeps its polarization invariant (phase difference between p- and s-components is zero) after a round trip. In other words, the eigenmode of the resonator with AL has radial polarized component. This conclusion is also valid for ALs with polarization maintaining ($\delta_s = 0$) metal coated reflection surfaces, following from the Eqs. (6) – (8); a radial polarized beam is invariant after retro-reflection from the polarization maintaining metal coated AL.

4. Experimental results and discussion

The experimental setup used in this study is schematically illustrated in Fig. 5. The p- polarized, TEM₀₀ mode, 5 mm in diameter laser beam passes a beam splitter (BS) with 10% transmission, then a polarization beam splitter (PBS) unit and reflects from a retro-reflector element (CCR or axicon). The s-polarized component of the reflected beam is diverted by the PBS and monitored by the CCD2 camera, while the p-polarized component passes the PBS without losses and 90% of it is diverted by the BS to the CCD1 camera.



Fig. 5 Schematic view of the experimental setup for investigating polarization properties of retro-reflective elements (top view) For depolarized monitoring, the PBS unit is removed from the beam path and the retro-reflected beam intensity distribution is monitored by the CCD1 camera. By inserting or removing appropriate lenses in front of the CCD1 and CCD2 cameras, far-field (FF) and near-field (NF) intensity distribution profiles could be monitored.

Some selected experimental results for AL and CCR are presented in Fig. 6(a) and (b) - (e), respectively. In Fig. 6(a), a singularity observed in the center of the images is due to the diffraction on the apex tip of the axicon lens not taken into consideration in the calculations presented in the previous section.



Fig. 6 (a) Intensity distribution profiles of p- polarized incidence beam reflected from the AL: depolarized (left), p- polarized component (middle) and s-polarized component (right) monitoring, respectively;
(b) – (e) Intensity distribution profiles of p-polarized incidence beam reflected from the CC retro-reflector positioned at different orientation angles γ: depolarized (left), p- polarized component (middle), and s-polarized component (right) monitoring, respectively.

Otherwise, comparison of the Fig. 6(a) with Fig. 3(a) reveals that the calculations match quite well with the experiments, hence the general conclusions of the previous section are relevant.

Although in this report it was mainly dealt with the axicon lens, we present also some experimental results on CCR due to the fact that numerous theoretical works on CCR exist, but no experimental visualization of the polarized retro-reflected beam's intensity distribution profiles are present in the literature. Fig. 6(b) - (e) show the depolarized-, p- and spolarized intensity distribution profiles of p-polarized normal-incident beam's reflection from the CCR, positioned at different orientation angles γ . As in the case of the AL, a singularity observed in the center of the images is due to the diffraction on the apex tip of the CCR. One can also see 6 reflective segments separated by 6 corners of the CCR (3 real and 3 imaginary) due to the 6 fold symmetry of the CCR. Furthermore, it is clearly seen that in the depolarized monitoring (first column) the retro-reflected beam is almost round shaped, while in p- (second column) and s- (third column) monitoring the beam shape and intensity distribution changes in correlation with the CCR orientation angle γ . Note that for the retro-reflected beam's s- component monitoring, the gain of the CCD2 (Fig. 5) was increased 5-fold. Finally, in an ideal polarization maintaining CCR for p- polarized incidence beam no s- component would be present in the retro-reflected beam.

5. Conclusions

Polarization properties of corner-cube (CCR, N-BK7 glass, n = 1.5071 at 1030 nm) and axicon (fused silica, n = 1.45 at 1030 nm) retro-reflectors based on total internal reflection (TIR) phenomenon have been studied experimentally and theoretically for the aim to use them as novel total reflection elements in laser resonators. Near field and far field intensity distribution profiles reflected from the CCR at different orientation angles and axicon lens with 90° apex angle for depolarized, s- and p- polarized beams have been measured. Phase and intensity relations for several cases (liner, radial polarizations) have been calculated and compared with the experiment. In retro-reflected beams the intensity distributions generally are inhomogeneous and differ for different polarization components. Taking into consideration depolarization properties of retro-reflectors based on TIR phenomenon is essential in resonator designs with CCR or AL elements. Presently efforts are made to demonstrate and study cryogenic Yb:YAG TRAM laser radiation characteristics based on resonators with retro-reflective elements.

Acknowledgment

This work was partially supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP16K04986.

References

- H. Kogelnik, and T. Li: Proceedings of the IEEE, 54 (10), 1312 - 1329, 1966.
- 2) A. G. Fox, and T. Li: Bell. Syst. Tech. J. 40, 453–488, 1961.
- J. Wu, Y.-L. Ju, T.-Yu. Dai, W. Liu, B.-Q. Yao, and Y.-Z. Wang: Chin. Phys. Lett., **32** (7), 074207: 1–3, 2015.
- B. Singh, V. V. Subramanyam, S. L. Daultabad, and A. Chakraborty: Rev. of Sci. Instr., 81, 073110; 1-4, 2010.
- V. K. Orlov, Ya. Z. Virnik, S. P. Vorotilin, V. B. Gerasimov, Yu. A. Kalinin, and A. Ya. Sagalovich: Sov. J. Quantum Electron., 8, 799-800, 1978.
- W. He, Y. Fu, Y. Zheng, L. Zhang, J. Wang, Z. Liu, and J. Zheng: Applied Optics, 52 (19), 4527-4535, 2013.
- M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 7th Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 952, 1999.
- F. Abelès: C. R. Hebd. Seances Acad. Sci., 230, 1942 1943, 1950.

海中メタンガスラマンライダーの開発

レーザープロセス研究チーム

染川智弘、北村俊幸、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、海底開発による海洋生態系・環境への影 響評価が必要とされている。現状の採水測定では評価頻 度・エリアに限度があり、海中での短時間・広範囲なモ 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、水中ガスラマンライダ ーによる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、 20m 先に設置した水と炭酸水の識別に成功し、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」。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 の影響評価も行った^{3,4)}。本手法はCO2ガス以外への応 用も可能であり、波長355 nmのレーザーを利用した水 中メタンガスのラマン法による評価も行っているう。

水中ガスラマンライダーによる海中モニタリングの 可能性を評価するために、竹富島海底温泉での海上観測 を検討している。石垣島を中心とした八重山諸島にある 竹富島の近海には水深が20m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り、竹 富島海底温泉と呼ばれている。本報告では竹富島海底温 泉の海水がラマン手法へ与える影響評価との、現在開発 を行っている海上ラマンライダーについて報告する。

2. 竹富島海底温泉の海水のラマン分光測定

本手法では、波長355 nmのレーザーを海中に照射するために、海水中に含まれる有機物等からの蛍光が測定

を妨害することが考えられる。そこで、竹富島海底温泉 の海面の海水を採取し、蛍光の有無を評価した。

図 1(a)に実験配置図を示す。波長 355 nm、出力 50 mJ、 繰り返し 10 Hz のレーザーを光路長 2 cm の石英セルに 入れた海水に照射し、後方から散乱光を取得した。積算 回数 1000 回のラマンスペクトルを 5 回計測して評価し ている。散乱光はレンズでコリメートされた後、波長 355 nm のエッジフィルターを通過し、大きな迷光成分 となるレイリー光はカットされ、バンドルファイバーで 分光器に導かれる。分光器の焦点距離は 30 cm であり、 1800 g/mm の回折格子を用いることで、波長分解能は 0.19 nm である。波長 355 nm に対して、1200~3700 cm⁻¹ の範囲のラマンスペクトルの取得が可能であり、1384 cm⁻¹の CO₂ や、2892 cm⁻¹のメタン、1635,3405 cm⁻¹の水 のラマン信号の同時評価が実施できる。スペクトル測定 には電子冷却 CCD カメラを利用した。



図 1(b)に竹富島海底温泉の海水と水にレーザーを照 射した際に得られたラマンスペクトルを示す。両サンプ ルともに、1635,3405 cm⁻¹の水のラマン信号が見られて いるが、海水から蛍光成分等は検出されていないことが わかる。したがって、竹富島海底温泉では波長 355 nm のレーザーを海水に照射しても、ラマンライダー測定を 阻害する蛍光は検出されず、測定実施が可能であること が示唆された。

3. 海上ラマンライダーの開発

3.1 海上ラマンライダー

竹富島海底温泉では水深20mの位置からメタンガス を含むガスの湧出があるため、本手法の実証試験では図 2(a)に示すような観測船に図 2(b)の海上ラマンライダー システムを設置する海上観測方式を取ることとした。図 2(a)の↓の位置にライダーシステムを設置し、鉛直下向 きに波長 355 nmのレーザーを照射する。海中からの散 乱光は直径 20 cmの望遠鏡で集め、光ファイバーで分光 システムに導く。分光システムは図1で示したラマンス ペクトル計測システムと、ライダー信号を計測する光電 子増倍管 (PMT)からなる。分光器の出射ボートに PMT と CCD カメラを取り付けており、光路上に設置したミ ラーの出し入れによって検出機器を切り替えることが 可能である。

海上ラマンライダーシステムは上段にレーザーと分 光システム、望遠鏡等、下段にレーザー電源、オシロス コープ等を設置している(図3)。外枠のパネルは太陽 光によってシステムが暖められるのを緩和するために 白色とした。システムは海上での観測を想定すると、塩 害による機器のトラブル対策のために密閉しなければ ならないが、下段には熱源となるレーザー電源がある。 そのため、熱による装置の不具合を抑制する必要があり、 下段には除塩フィルター付きのファンを取り付け、排熱 を行っている。上段では、船の振動による送信レーザー と受光光学系の光軸ずれを最小限にするために、レーザ 一送信光学系と望遠鏡は同じブレッドボードに固定し ている。レーザーは Quantel 社製の Q-smart450 であり、



図 2 (a)観測船、(b)海上ラマンライダーシステムの ブロック図



図 3 海上ラマンライダーの(a)上段、(b)下段の配置写真

波長 355 nm で出力 120 mJ、繰り返しが 20 Hz である。 このレーザーは電力消費が 1100 W と少ないことから、 本ライダーシステムは小型のインバータ発電機 1 台で 動作が可能である。

システムを密閉した状態で、レーザーと計測システム を全て起動させると、室温の21℃から2時間程度で5℃ 程度上昇し安定する。そのため、レーザーの波長変換結 晶の温度最適化はシステム内の温度が安定してから再 度必要となるが、その後は1時間以上、レーザー出力は 安定した。また、CCD カメラは5℃の温度上昇でも、電 子冷却機構に不具合は生じなかった。

3.2 海上ラマンライダーの動作試験

図4(a)に示すように、海上ラマンライダーシステムの レーザーを鉛直ではなく、水平に照射し、距離18m離 れた位置に設置したガラス製のバイアル瓶(直径:3cm) に入れた水に照射し、リモートでの水のラマン信号の測 定を実施した。望遠鏡は水平観測のために、ライダーシ ステムから取り外し、水平方向を観測できるように設置 した。

図4(b)が「回折格子+PMT」で取得したラマンスペク トルである。回折格子を2800 cm⁻¹に固定し、PMT で100 回積算の散乱信号をカウントする。次に5cm⁻¹だけ回折 格子を動かして 2805 cm⁻¹ での信号を取得する。この測 定を5 cm⁻¹間隔で3400 cm⁻¹まで繰り返し、2800~3400 cm⁻¹のラマンスペクトルを取得した。波長分解能は0.23 nm である。~3400 cm⁻¹を中心とするブロードな水の伸 縮モードのラマンスペクトルが見られる。水の微弱なラ マン信号が観測される 2800 cm⁻¹と、信号のピークであ る 3400 cm⁻¹で回折格子を停止させ、ライダー信号をオ シロスコープで測定したのが図4(c)である。このライダ ー信号は1000回の積算信号である。距離分解能は1m 程度である。横軸がオシロスコープで得られる時間信号 から換算した距離、縦軸が距離の2乗で補正したライダ ー信号である。水のラマンスペクトルの中心である 3400 cm⁻¹では、約18m位置にピークを持つ水のラマン ライダーの信号が検出されている。2800 cm⁻¹ でも、微弱 ではあるが、水のラマンスペクトルの裾野の信号が見ら れる。実際の観測では、3400 cm⁻¹等の水のラマン信号と 2892 cm⁻¹ のメタンのラマン信号の差分を取ることでメ タンガスの分布を測定する。

図4(d)が「回折格子+CCD」で測定したラマンスペク トルである。積算回数は3,000回である。回折格子+PMT では、波長を変えて測定したデータからスペクトルを再



34 (a)表直動下記録、(b)回行格子+PMT C取得した ラマンスペクトル、(c)回折格子+PMT で取得し たライダー信号(2800, 3400 cm⁻¹)、(d)回折格子 +CCD で取得したラマンスペクトル

構築しており、計測に時間がかかるだけでなく、波長毎 に測定時刻が異なっている。したがって、ラマンスペク トル測定には測定時間が短くてすみ、同時刻のスペクト ルデータが取得できる「回折格子+CCD」で測定を実施 する予定である。

実際の海上観測では図4(c)、(d)に示したライダーによるメタンガスの位置情報、ラマンスペクトルによる水中 ガスの成分分析を実施する予定である。

4. 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。本手法の実 証試験として竹富島海底温泉でのメタンガスの分布計 測を計画している。竹富島海底温泉の海水に波長 355 nmのレーザーを照射しても、測定を阻害する蛍光は見 られないことがわかり、海上観測型のラマンライダーシ ステムの開発を行った。

今後は竹富島海底温泉にて本システムによるメタン ガスのモニタリングを実施予定である。実際に海上で 観測を行うことで、測定システムの最適化を行い、本 手法の適用可能性を検討したい。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP25871083, JP15H05336 の助成

を受けたものです。

参考文献

- 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.
- T. Somekawa and M. Fujtia: EPJ Web of Conference, 119, 25017, 2016
- T. Somekawa, M. Fujita: to be published in Proc. ILRC28, 2017.
- T. Somekawa, T. Kitamura, and M. Fujita: to be published in Proc. ICO-24, 2017.

レーザーによるインフラ構造物の健全性評価

レーザー計測研究チーム

島田義則

1. はじめに

インフラ構造物の健全性評価には打音検査が用いられ ている。しかし打音検査は検査員に労力がかかることや 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、打音検査に代わる検査員の労力 が低減され、尚かつ、高速で検査できる新しい検査手法 の開発が求められている。当研究所では10年ほど前か らレーザーによる検査法を提案して技術開発を行って きた。

新幹線トンネル覆エコンクリート検査から始まり、高 架橋床版、水中コンクリート、アンカーボルトなどのコ ンクリート付帯物検査等広く手を広げてきた。また、レ ーザー超音波技術を用いたコンクリートひび割れ深さ 計測や鋼板厚み計測なども行ってきた。

2. 平成28年度の主な成果

JR 西との共同研究では、新幹線トンネル中央通路自走型のレーザー検査装置を改良し、1)インパクト用レーザ ーの高出力化と高繰り返し化により検査速度と検査精 度の向上を図った。また、2)あらかじめ決められた位置 にレーザーを出射できるオート照射機能や安全対策等 の技術開発を進めた。

戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)研究で はトンネル内の条件を模擬するため屋外にテントを設 置して野外での装置実験を行った(図1)。テント内に 理化学研究所のコンクリート表面計測装置や日本原子 力研究開発機構が開発した遠隔レーザー切断装置、およ び量研機構と弊所が共同で開発したレーザーを用いた 内部欠陥検査装置の3種類を設置した(図1)。これら を用いることで目視検査から、打音検査、コンクリート 異音部分のはつり落としまでの一連の作業がレーザー で行えることを実証した。この研究成果については「レ ーザーを用いた構造物内部欠陥検出技術の高速化」 (p.29) で述べる。

鋼板接着された高架橋床版のレーザー検査では、装置 の小型化を進め、屋外に設置された模擬欠陥を使い、接 着不良箇所をレーザーで検査する実験を行った。この研 究成果については「Development of laser-based system for remote inspection of unstable structures like highway bridges」 (p. 25) で 述べる。



a)トンネルに見立てた屋外テント



b)コンクリート表面計測装置(左、理化学研究所)と レーザー内部欠陥検査置装(右)



c)遠隔レーザー切断装置(日本原子力研究開発機構) 図1 トンネル内の条件を模擬した野外テントを設置

-24 -

Development of laser-based system for remote inspection of unstable structures like highway bridges

Laser measurement team

O. Kotyaev, Y. Shimada, S. Kurahashi

1. Introduction

Laser-based remote inspection of civil structures, such as transportation tunnels and highway bridges is one of the main research directions of the Laser Measurement Team [1-3]. In the inspection of highway bridges, the idea of two-beam probing interferometry was proposed to provide more stable homodyne interference pattern. Conventional probe-reference technique for inspection of bouncing bridge spans cannot be used due to very big displacement of probing point bouncing with the bridge span. Usually, optical path of the single probe/detection beam is changing by millimeters or thousands of laser wavelengths. Resulting interference pattern has only corresponding power fluctuations; detection of vibration is not possible in this case. With two-beam probing, two probing points on bouncing bridge span move almost synchronously, mutual displacement and optical path difference is minimized. As a result, interference pattern is more stable and vibration measurement is possible. The prototype system has been developed and successfully put into the operation both in laboratory and field conditions [4, 5].

The system used for the inspection of highway bridge consists of two vehicles as shown in Fig.1. One is for impact laser and the other is for interference optics. The beam divergence of the CO₂ laser used for laser impact is ~ 5 mrad, and the image relay optics with 1:1 image scale was utilized to produce an output beam image of CO₂ laser on the bridge surface, which is ~ 10m away from the vehicle. This image relay optics makes the whole inspection system size so large.

We have evaluated the vibration amplitude induced by the CO_2 laser impact in a concrete sample with and without the image relay optics. Without the image relay optics, it was shown that the diverging CO_2 laser beam can produce enough





Fig. 1. The system under highway bridge and its layout.

large vibration. The compact inspection prototype using only one mobile was constructed, and was used in the field experiments. In this report, development and tests of compact mobile full-spec prototype of the bridge inspection will be presented.

2. Test of CO₂ laser impact with and without image relay

The CO_2 laser impact was tested without image relay, and it was found that it was possible to use it! Despite of the fact that beam size became about 10×10 cm, amplitude of laser-initiated vibration was practically the same as vibration initiated by imaged impact beam. It was found that, in thermal mode, the most important parameter is not impact energy density but absolute laser energy delivered to a target. Influence of energy density on initiated vibration is weaker.



Fig. 2. Spectral amplitude distribution across the target sample: top – imaged, and bottom – non-imaged impact beam.

Capability of defect recognition with the use of non-imaged impact beam was tested. A concrete/metal sample representing structure of modern highway bridges was used in the experiments. The sample was provided by KomaiHaltec. The sample is $450 \times 450 \times 150$ mm concrete block with 5-mm thick steel plate fixed by epoxy. Central part of the sample has a void without epoxy, which simulates defect of concrete/metal interface. The "defect" size is 200 x 200 mm.

The sample was scanned with the use of imaged and nonimaged beams. Both beams initiated various modes of vibration of metal plate over the defect area.

Figure 2 presents comparison between imaged and nonimaged impact beams. It is clearly seen that both impact beams can be used for defect location with practically same defect recognition capability.

So, CO₂ laser impact beam can be used without image relay. That means, to assemble a mobile prototype of the bridge inspection system, there is no need to use two system carriers. Final layout of the system on single carrier is shown in Fig. 3. Resulting mobile system prototype is definitely more compact than previous one (Fig. 1). The prototype was assembled and delivered for field tests to the KomaiHaltec site in Kimitsu-city, Chiba prefecture.





Fig. 3. More compact mobile system prototype and its layout. (SM – scanning mirror, CM – combining mirror)

3. Field test with a bridge sample

On the KomaiHaltec site, a huge piece of an old deconstructed bridge (Fig. 4) is installed vertically for various tests. The sample was used for the filed test of the bridge inspection system prototype. In Fig. 5, the two-beam probing system is inspecting the bridge sample.

It was found that defects in this bridge sample were quite difficult to recognize. In these experiments, amplitude of laser initiated vibration amplitude in the bridge sample defects is 4 times lower and vibration life-time is about 10 times shorter than in experiments with the laboratory sample. However, it was possible to recognize defect situations with the use of our



Fig. 4. Bridge sample on the KomaiHaltec site.



Fig. 5. Two-beam probing system inspecting the bridge sample on the KomaiHaltec site.

system in most cases. Laser vibration meter PDV-100 was used as a reference vibration measurement device.

In Fig. 6, one of the bridge sample defects and impact/probe configuration is demonstrated. Probe-1 (right green point) is used as a source of signal beam, it is covered by big non-imaged impact beam (yellow rectangular); Probe-2 (left green point) is used as a source of "reference" beam. Probe-2 is set aside of the impact beam to avoid its influence. Probing beam of the reference vibration meter PDV-100 (red point) is set next to Probe-1. A piece of counter-reflecting tape was used in PDV-100 probing point to increase signal power and detection sensitivity (signal-to-noise ratio), correspondingly. Otherwise, vibration amplitude was below noise level; and PDV-100 could not detect initiated vibration. In contrast, the two-beam probing system used only original surface.



Fig. 6. One of the bridge sample defect.



Fig. 7. Vibration initiated in the defect area of the bridge sample. Top: PDV-100, bottom – two-beam probing system.

In Fig. 7, waveforms and spectra of vibration detected in the defect area are presented. On the top, data obtained with the reference vibration meter PDV-100 are shown. Clear vibration peak around 1.1 kHz is detected. The same vibration is detected with the use of the two-beam probing system (on the figure bottom).

Another defect area was inspected with the use of specially designed algorithm of automatic scanning and real-time data processing described in [4]. Immediately after scanning the inspected defect area, a 2-dimensional map was produced by the algorithm (Fig. 8).



Fig. 8. 2-D map of one of the bridge sample defects. Black arrows indicate direction of scanning.



Fig. 9. The defect area and its 2-D map.

Overlapping the defect location by the generated map shows quite good correspondence between the defect (chalked area) and its map (Fig. 9).

The field tests have demonstrated principle capability of the two-beam probing system with modified impact unit to inspect old highway bridges having very rusty metal plates. Inspection of actually operating higher-quality bridges should be less complicated and more reliable.

4. Brief conclusions.

During the last year, the promising laser-based system for remote non-destructive inspection of civil structures was modified and tested. Its mobile prototype has been assembled and tested in the field conditions. The prototype is much closer to actual final design of the system: it is much more compact, uses only one system carrier; the system is equipped with working algorithm of automatic scanning and real-time data processing.

The system uses two-beam probing homodyne interferometry. The technique has demonstrated promising results in inspection of bouncing structures like highway bridges. It may be a good alternative to much more complicated heterodyne interferometry.

As mentioned in Sec.2, the vibration amplitudes induced by the imaged and non-imaged laser pulse are nearly same. And also in Fig. 3, the spectral amplitude of the fundamental mode at 660 Hz for the non-imaged case is ~ 2 times larger than that for the imaged case, but at second and third harmonics, both amplitudes are nearly same. The physical mechanisms for such features are not clear. More detailed experiments will be necessary.

The next step of the research is active stabilization of interference pattern for keeping high sensitivity conditions.

References

- 1) O. Kotyaev, Y. Shimada. ILT Annual Progress Report, 2013.
- O. Kotyaev, Y. Shimada, K. Hashimoto. Laser-Based Non-Destructive Detection of Inner Flaws in Concrete with the Use of Lamb Waves, Proceedings of the 9-th European Conference on Non-Destructive Testing. Berlin, Germany, 2006, p.23,
- Y. Shimada, O. Kotyaev, N. Misaki et al. Development of Lasetbased Remote Sensing System for Detecting Concrete Defects. Journal of the Japan Society for Non-destructive Inspection, vol. 61, 2012, p. 519 (in Japanese).
- 4) O. Kotyaev, Y. Shimada. ILT Annual Progress Report, 2014.
- 5) O. Kotyaev, Y. Shimada. ILT Annual Progress Report, 2016.
レーザーを用いた構造物内部欠陥検出技術の高速化

レーザー計測研究チーム

倉橋慎理、北村俊幸、島田義則

1. はじめに

社会インフラと呼ばれるトンネルや橋梁など のコンクリート構造物の多くは1950~60年代のい わゆる高度経済成長期に建造されており、高経年 による老朽化が懸念されている。耐用年数を超過 した社会インフラは本来ならば全面的な建替え や改修などにより計画的に更新されることが望 ましいとされるが、現状ではコスト面などの問題 から点検や補修など適切な維持管理を施すこと でインフラの延命化を図るものが多い¹⁾。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進めてきた 2,3)。パルスレー ザー照射によりコンクリートに振動を励起し、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、山陽新幹線トンネルや高速 道路における試験を実施し、その有効性を確認し た。現在実用化に向けて、欠陥探傷装置の小型化 と信頼性向上、検査の高速化など、研究開発を加 速している。

当研究所は平成 26 年度より、内閣府主導の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP)のイン フラ維持管理・更新・マネジメント技術において、 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と題して理化学研究所(理研)、量子科学技術研究開発機構(量研機構)、日本原子力研究開発機構(原研)と共同研究を行っ てきた。平成 27 年度には量研機構の開発した高 出力高繰り返しレーザーと当研究所が開発した 遠隔探傷技術を組み合わせて、従来の計測速度の 約50倍に相当する秒間25点の速さでレーザーを 走査させながら欠陥を計測することに成功した⁴⁾。 平成28年度は速度を倍の秒間50点に向上させ、 加えて装置を実験室外に持ち出し、屋外試験を実 施した。本稿では、計測装置の高速化に伴う改良 点と、屋外試験の概要について述べる。

2. 高速検出技術開発

2.1 計測装置のドップラー振動計化

SIP プログラムでは、当研究所が開発してきた レーザー遠隔探傷技術と、量研機構が開発した高 出力、高繰返しパルスレーザーとを組合せ、1m× 1m程度の大きさの領域を、秒間 50 点程度の高速 で検査することを目的としている。検査点へのレ ーザー照射、振動計測 → 次の検査点への移動を 高速で繰り返すことで、高速検査が達成される。 検査領域上にレーザー光を高速で走査させるた め、ガルバノミラーを用いた。

打音検査で濁音(欠陥あり)と判断される周波 数帯域は数百 Hz 程度からと言われており、その 帯域を分解するために十分な計測時間は 10 ミリ 秒(周波数分解能 100Hz)である。照射位置の移 動を 10 ミリ秒以内に完了させることができれば、 検査速度 50Hz の達成が可能である。

コンクリートからの散乱光量を大きくするた め大口径のガルバノミラーを用いており、移動速 度を大きくするとミラーの慣性を吸収しきれず、 ミラーの固有振動数とみられる約 250Hz 程度の 振動が 10 ミリ秒以上にわたって継続する現象が 確認されている。よって計測にはこのガルバノミ ラーの振動が収まりきっていない状態で目当て の振動を検出できる手法が必要である。



図1 レーザー干渉計の変更点(左:ホモダイン検出、右:ヘテロダイン検出)

一方、前年度に構築した検査速度 25Hz に対応 するレーザー干渉計で採用してきた波面補償用 フォトリフラクティブ結晶では、散乱光が入射し てから結晶内に屈折率格子が形成されるまでに 10 ミリ秒程度の時間を要するため、検査速度 50Hz における適用は困難で、他の手法の導入を検 討する必要がある。

ミラーの固有振動の対策としてヘテロダイン 検出法を用いたドップラー振動計の導入を、波面 補償技術として空間フィルタの導入を行った。前 年度までのレーザー干渉計はホモダイン検出法 がベースとなっており、この手法ではミラーの固 有振動が存在する状況で計測を行うと、原理的に 本来見たい振動がミラーの固有振動などで変調 されて検出される恐れがある。また、従来の手法 では、光検出器からの出力をそのまま計測信号と していたため、信号光量の増減が感度に影響した り、所望振動信号が変調される原因の一つにもな っていた。そこで参照光側の光路内に音響光学素 子 (AOM)を導入し、ヘテロダイン検出法を用い たレーザー干渉計を構築した。信号光と AOM に

よって変調された参照光を干渉させ、光検出器を 用いて検出を行うが、この状態の信号では前述の ホモダイン検出にさらに余分な変調を加えただ けに過ぎず、所望信号が変調されて検出される事 態は解決されていない。そのため、光検出器から 出力された電気信号を信号処理し、目当ての振動 を復調する必要がある。復調には位相の変化量か らドップラー速度を算出する手法を用いる。同様 の手法で計測を行う装置は一般的にドップラー 振動計と呼ばれる。ドップラー振動計では、計測 信号の周波数の粗密から所望信号を求めるため、 信号光量の変動に強く、ノイズに強い計測手法で あるといえる。一方で、変調素子や復調システム の導入など、ホモダイン検出と比べシステムが複 雑になるといった側面がある。粗面からの散乱光 に対する波面補償を行うため、信号光の光路内に 空間フィルタの導入を行った。空間フィルタは対 物レンズと小口径(10µm)のピンホールか らなり、入射した光は対物レンズでピンホールに 集光され、ピンホールを通過しうる波面成分を持 つ光のみを取りだすことが可能である。ただし、



図2 各装置で計測された信号波形

それ以外の波面成分はピンホールを通過できな いため、ほぼすべての信号光成分を利用可能であ ったフォトリフラクティブ結晶を用いた干渉計 の構成と比べて、信号光量が減少することに留意 する必要がある。

レーザー干渉計の前年度からの変更点の概略 図を図1に示す。 左がホモダイン検出型で右がへ テロダイン検出型を示している。ヘテロダイン検 出型では、前述した空間フィルタによって減少す ると想定される光量を補償するため、レーザー干 渉計の光源出力を増加させた。レーザー光は偏光 ビームスプリッタ (PBS) によって二本のビーム に分割され、片方はプローブ光として検査面に照 射され、もう片方は参照光として用いられる。検 査面に照射されたプローブ光の一部は、散乱され て干渉計内に戻りその中から PBS を透過した光 を信号とする。信号光は空間フィルタ (SF) によ って単一の波面成分のみを持つ光へと成形され る。参照光は PBS を透過した後 AOM によって変 調され、ハーフミラー上で信号光と重畳され、干 渉信号が作られる。AOM による参照光の変調周 波数は 80MHz である。干渉信号は光検出器に よって検出され、光の強度に応じた電流が出力さ れる。

2.2 従来型との比較

新たに構築したヘテロダイン検出によるドッ プラー振動計型レーザー干渉計と、当研究所で開 発し、これまで使用してきたホモダイン検出によ



図3 各装置から得られた振幅スペクトル

るフォトリフラクティブ型レーザー干渉計、さら に市販のレーザー振動計の感度や安定性の比較 試験を行った。ただし、市販のレーザー振動計は 感度が十分ではなく、検査面に反射用テープを貼 って散乱光強度を増強する必要が生じる場合が 多いことに留意しておくことが重要である。人工 的な内部空洞が配置されたコンクリート供試体 を用いて試験を行った。パルス YAG レーザーを 欠陥領域に照射し、励起された振動を各装置で同 時に計測した。各装置で計測された信号波形を図 2に、それぞれの信号のスペクトル分布を図3に 示す。新しく構築した装置は従来装置や市販製品 と同様に1次モード、2次モードの振動の検出に 成功しており、音波領域の範囲内で計測に十分な 振動の検知性能を有していると言える。続いて、 検出の安定性を確認するための試験を行った。上 記と同一の計測を10回行い、1次モードの振動で ある FFT した際に 1.2kHz に含まれる振動のフー リエ振幅がどのように変化するのかを確認した。 各装置から得られた 1.2kHz におけるフーリエ振 幅をプロットしたものを図4に示す。

横軸は計測番号、縦軸はフーリエ振幅を示す。



図4 各計測におけるフーリエ振幅値

10回の計測から得られたフーリエ振幅値の標準 偏差を装置毎に求め、さらに装置毎の平均値で割 って得られた値を検出の安定性を示す指標とし た。値が小さいほど検出の安定性が高いことを示 す。装置毎の値は、市販製品が0.052、従来装置が 0.758で、今回構築した装置が0.132である。構築 した装置の検出の安定性は市販製品には劣るも のの、従来装置より安定性が大幅に向上している ことがわかる。安定性は市販装置の方が高いが、 検出感度は市販装置より優れており、新幹線トン ネルのように、検査面が汚れていて散乱光強度が 低下するような屋外設備などでも計測できるな ど、適用範囲に優れるといえる。

2.3 屋外試験

新たに構築した高速計測対応可能なレーザー 干渉計測装置と、前年度に引き続き量研機構が開 発した高繰り返し振動励起レーザーと組み合わ せ、1秒間に50回の欠陥検出試験を実施した。試 験では、量研機構関西光科学研究所敷地内に設置 された屋外試験場を利用し、理研、原研の開発成 果との統合試験も行った⁵⁾。図5に屋外試験場に 構築した高速レーザー打音検査システムの外観 を示す。装置は二階建て構造になっている。一階 部分にはレーザー干渉計と高速検査ユニットが、 二階部分には振動励起レーザーが収納されてい



図5 屋外試験場に構築した高速レーザー打音検査システムの外観



図 6 屋外試験用コンクリート供試体と照射 配置

る。一階部分は筐体に除振、防音機構を備え、外 部環境からの影響を極力低減するよう設計した。 一階部分と二階部分は切り離し、別々に運用する ことも可能である。

レーザー干渉計では、振動検出レーザーが偏光 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 AOM によって変調され る。プローブ光は高速スキャン装置によって検査 面に照射され、散乱して戻ってきた光が信号光と なる。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。光検出器からの信号 は、復調器で復調され、データ処理装置に入力さ れる。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ア ルゴリズム適用、結果の二次元表示の一連の処理 が 50Hz で行われる。高速走査ユニットでは、レ ーザー距離計を用いて、検査面までの距離の取得 が行われる。得られた距離データは、直動ステー ジを用いた組み合わせレンズ間距離の決定、ガル バノミラーで走査する点間距離の決定などに用 いられる。プローブ光と振動励起レーザーは、ダ イクロイックミラーで結合され、ガルバノミラー により検査面上を高速で走査される。振動励起レ ーザーのOスイッチタイミング、ガルバノミラー のトリガタイミング、高速データ処理装置の信号 取得タイミングは同期制御されている。

構築した検査装置を用いて、コンクリート供試 体内部に人工的に配置された欠陥を 50Hz で検出 する実験を行った。実験に用いたコンクリート供



図7 診断結果出力の例

試体を図6に示す。コンクリート供試体は施工技 術総合研究所より貸借したもので、予め欠陥の位 置が分かっているものを用いた。模擬欠陥は表面 から10mmの深さに、横200mm、縦100mmの大 きさで、端から50mmの位置に配置されている。 図中の破線で囲まれた領域が模擬欠陥の配置箇 所を示す。このコンクリート供試体の横240mm、 縦150mmの領域を検査した。検査間隔は30mm なので、検査点数は9×6=54点で図中に黒の点で 示してある。コンクリート供試体は欠陥検出装置 から7m離れた位置に設置した。

図7に高速データ処理装置から得られた結果を 示す。二軸ミラー上部に取り付けられたカメラで 検査範囲の光学画像を取得し、実際に走査した範 囲と各照射点における診断結果を一つの画像と して出力する。取得した信号波形を高速フーリエ 変換し、得られた振幅スペクトルから卓越周波数 の検出を行い、(卓越周波数における振幅値)/

(計測周波数領域における振幅の平均値)を求め、 値の大小に応じて赤から緑の色を割り当ててい る。閾値を適切に設定し、値に応じて赤から緑の 間の色を割り振っている。欠陥を含む領域では、 その欠陥の大きさと厚みなどから決定される固 有振動数で揺れる板振動が励起されやすいため、 上記の値は大きくなり、このような領域は赤く示 される。健全部では板振動が励起されず、上記の 値は小さくなるため、このような領域は緑色で示 される。赤と緑それぞれで示された領域における 振幅スペクトルを同図に示す。それぞれ卓越周波 数の有無が確認できる。本実験の条件に於いて、 9x6=54 点を 50Hz で検査可能であるので、検査時 間は2秒未満である。約 30mm 間隔で計測してお り、新幹線トンネル内においても同様の計測を行 えば、従来の約 100 倍の速度で計測が可能である。 従来の打音検査と比べて時間的コストの削減が 期待できる。

3. まとめ

高速検査に対応したレーザー干渉計の開発を 行い、それを基に屋外試験場に計測装置を構築し、 統合試験を行った。

実験室外環境においてコンクリート供試体に 配置された模擬欠陥を含む領域を1秒間に50点 の速度で計測し、健全部と欠陥部の判定を行うこ とに成功した。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議 の SIP(戦略的イノベーション創造プログラム) 「レーザーを活用した高性能・非破壊劣化インフ ラ診断技術の研究開発」:管理法人 JST によって 実施された。

屋外試験の実施に尽力いただいた量研機構関 西研の錦野将元氏、長谷川登氏、近藤修司氏、岡 田大氏、三上勝大氏、河内哲哉氏らに感謝致しま す。

参考文献

- 1) 国土交通白書 2016
- 2) 島田義則 他: 非破壊検査, 61, 519-524, 2012.
- 3) 倉橋慎理 他:レーザー研究 42,849-,2014.
- 4) 北村俊幸 他: 平成 27 年度 ILT 年報
- 5) 理化学研究所プレスリリース, 2016.12.02. など

液中レーザーアブレーションによるナノ粒子作製 : レーザー還元金属ナノ粒子の生成メカニズム

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、石井隆太2、佐伯 拓2

1. はじめに

液中レーザーアブレーション法は、ナノ粒子を比較的 簡便に作製する手法として知られる。この手法では、液 体中に配置したバルク物質にパルスレーザー光を集光 照射することにより、高温・高圧状態を作り出して物質 を原子化・プラズマ化する。原子化した物質は周囲の液 体により瞬時に冷却され凝集・ナノ粒子化する (図 1) ため、気相法等に比べ簡便な装置作成が可能となる。こ のことから、これまでにも金属や有機化合物等、様々な 材料を用いた研究が数多く行われてきたが、その中で 我々は、出発物質に金属酸化物を用い、それらを一段階 で還元・ナノ粒子化して金属ナノ粒子を作製する手法に ついて研究を行ってきた。鉄やアルミ、マグネシウム、 亜鉛等の金属は、ナノ粒子化すると水素発生源や空気電 池の活物質に用いることが可能であるが、反応後の金属 酸化物を直接的に還元・ナノ粒子化して金属ナノ粒子に 再生できれば、クリーンなエネルギー源としての金属ナ ノ粒子の応用範囲はさらに大きく広がるものと考えら れる。

これまでに我々は、酸化第二鉄(Fe₂O₃)、酸化マグ ネシウム(MgO)、酸化亜鉛(ZnO)を出発物質に用 いて研究を行った。酸化第二鉄では、アセトン等の有 機溶媒下で酸化第一鉄(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)}。酸化マ グネシウムでは、レーザー照射後の生成物を用いて空 気電池電極を作成し、その電気特性を調べた。その結 果、バルクの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たことから、本手法によ り比較的効率良くナノ粒子化が起こることがわかった ^{3,4}。酸化亜鉛では、溶媒にエタノールを用いた場合に 粒子径 20~50 nm、純度 96%以上の亜鉛(Zn)ナノ粒 子が生成した⁵。また生成した還元亜鉛ナノ粒子を用



図1 液中レーザーアブレーション法の原理図

い、空気電池を試作してその特性を調べたところ、市 販の亜鉛空気電池と同様の電圧(1.4V)が得られた %。以上の結果は、本手法による金属酸化物の金属への 再生、およびエネルギー分野への応用が可能であるこ とを示している。

一方、本手法を実際に応用するには課題もあり、その 一つにナノ粒子生成効率の向上がある。これまでにも 我々は、ナノ粒子作製条件の最適化のため励起波長や溶 媒の効果について検討してきた 2.5が、本研究では出発 物質の粒子径に着目した。金属酸化物は通常粉体として 存在し、我々はこれまで一般的に市販されている数um ~数 10µm の比較的大きな粒子径の金属酸化物を用い てきたが、この場合、金属酸化物の還元・ナノ粒子化は 多段階で起こる、つまり第一段階ではレーザーにより粒 子が微細化(ナノ粒子化)され、第二段階において微細 化した粒子にレーザーが再度照射され還元反応が起こ る可能性があることがわかってきた2。このことは、出 発物質にすでに微細化されたナノ粒子を用いることで、 第一段階の微細化過程が短縮され、還元金属ナノ粒子の 生成効率が増大する可能性を示している。これについて 検証を行うため、本研究では、出発物質に粒子径約20nm の酸化亜鉛 (ZnO) ナノ粒子を用い、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った。本稿 では、出発物質の粒子径の違いによる還元金属ナノ粒子 生成効率、および生成物の物性や電気特性の変化につい て検討した結果を報告する。

2. 実験

図2に実験配置を示す。反応槽には底部が円錐 状のナシ型フラスコを用いている。金属酸化物粉 体と溶媒を加えた後、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 ー光を打ち上げる¹⁾。底部が円錐状でレンズと同 様の役割を果たすため、入射レーザーは懸濁液中 で集光され、高い光強度での照射が可能となる。 レーザー光源にはナノ秒パルスNd: YAG レーザー の基本波(波長 1064 nm、パルス幅 8 ns (FWHM)、 強度~230mJ/pulse、繰り返し10Hz)およびその第 三高調波(波長 355 nm、強度~50mJ/pulse)を使用 した。溶媒には還元効果の高いエタノール(EtOH) ⁵⁾を用いた。出発物質には、平均粒径 20 nm の酸化 亜鉛粉体(ZnO、純度 99.9%、粒径~20 nm)を用 いた。



図2 液中レーザーアブレーション実験配置

3.酸化亜鉛ナノ粒子の液中レーザーアブレーシ

ョン実験

EtOH 30ml に酸化亜鉛 50mg を加えた懸濁液試料に レーザー照射を行った。基本波を用いた場合の各照射時 間における試料の写真を図 3 に示す。照射前(0min.) の ZnO ナノ粒子は白色であるが、照射時間の増加とと もに黄~茶色に変化し、90 分の照射で試料全体が黒色 化した。この色彩の変化は、レーザー照射により ZnOナ ノ粒子が還元され、亜鉛 (Zn) ナノ粒子が生成したこと を示している 5。比較のため、平均粒子径が 25 倍 (~ 5µm)の ZnO 粒子を用いて同条件で実験を行ったとこ ろ、90 分の照射では試料全体の黒色化は進まず、この 場合 Zn ナノ粒子の生成効率は低下することがわかった。 その後 ZnO の重量を変えた実験を行い、同様の照射条 件では30mgのZnナノ粒子が作製可能であったことか ら、ZnOナノ粒子を出発物質とした場合、Znナノ粒子 の生成効率は約1.7倍に増加することがわかった。一方、 第三高調波を光源に用いた場合には、15 分の照射で試 料全体が黒色化した(図4)。355nmの照射エネルギー は0.5W (50mJ/pulse) であり、各波長の光子エネルギー を考慮しても基本波の照射エネルギー(2.3W (230mJ/pulse)) よりも低いが、Zn ナノ粒子の生成効率は 6倍以上となった。この要因は、ZnOナノ粒子のプラズ モン吸収帯にある。ZnO ナノ粒子化のプラズモン吸収 帯は370nm付近にピークを持つことから(図5)、第三 高調波の吸収性が大きくなり、ZnO の還元過程が促進 されるものと考えられる。

生成した Zn ナノ粒子の粒径を光動的散乱法により観 測した。基本波照射後の試料の観測結果を図6に、第三 高調波照射後の結果を図7に示す。両条件とも、主に粒 子径約20nmのZn ナノ粒子が生成している(1~6µmの 範囲で観測される粒子はZn ナノ粒子の一部が凝集した ものであると考えられる)。この結果は粒子径5µmの ZnO 粒子を出発物質に用いた場合と同様である(電子



図3 ZnOナノ粒子(平均粒径 20nm、50mg) 懸濁液試料(溶媒 EtOH)のレーザー(1064nm、2.3W)照 射実験時の写真((左)照射前(0min.)、(中) 照射 60 分後、(右) 照射 90 分後)



図4 ZnOナノ粒子(平均粒径 20nm、50mg) 懸濁液試 料(溶媒 EtOH)のレーザー(355nm、0.5W、10Hz) 照射実験時の写真((左)照射前(0min.)、(中) 照射 15 分後、(右) 照射 30 分後)



図 5 ZnO ナノ粒子(平均粒径 20nm)の吸収スペクト ル (溶媒: EtOH)



図6 基本波の照射 (90分) 後のZnOナノ粒子試料 の粒径分布



図7 第三高調波照射 (30分)後のZnOナノ粒子試料 の粒径分布

顕微鏡による観測)。。このことから、照射条件やZnOの粒子径に関わらず、生成したZnナノ粒子の物性は同様であると考えられる。

4. 還元 Zn ナノ粒子を用いた空気電池の電圧特性

還元 Zn ナノ粒子の物性についてさらに評価を行うた め、生成ナノ粒子を用いて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、ZnOナノ粒子 をそれぞれ基本波 (90分) および第三高調波 (30分) でレーザー照射したもの(図3右、図4右を参照)を用 いた。負電極は、レーザー照射後乾燥した試料 50mg と Ag ペーストを混合、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。Agペーストを混合する理由は、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である。この負電極を用いて空気電 池を作成した(図 8)。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。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)42-を形成することにより発電する。また Zn(OH)₄²- は速やかに ZnO と H₂O に分解する。正極側 および負極側の化学反応を下式に示す。

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⁻

空気電池の出力電圧を計測した結果を図 9、図 10 に 示す。図 9 は基本波の照射により生成した還元 Zn ナノ 粒子を用いたもの、図 10 は第三高調波の照射により生 成した還元 Zn ナノ粒子を用いたものである。出力電圧 はともに約 1.4V で、約 20 時間電圧値を保持した。また 得られた電圧特性は、粒子径 5 μ m の ZnO を用いて作製 した還元 Zn ナノ粒子により作成した空気電池の特性の と同等であった。このことから、還元 Zn ナノ粒子が、 照射条件や ZnO の粒子径によらず空気電池への利用に 十分な性能を示すことが明らかとなった。



図8 亜鉛空気電池の模式図



図9 基本波照射後に生成した還元 Zn ナノ粒子を用い て作成した空気電池の電圧特性



図10 第三高調波照射後に生成した還元 Zn ナノ粒子を 用いて作成した空気電池の電圧特性

5. まとめ

本研究では、酸化亜鉛ナノ粒子を出発物質に、液中レ ーザーアブレーション法による還元 Zn ナノ粒子の作製

を行い、金属酸化物の粒子径が金属ナノ粒子生成効率に 与える影響について検討した。照射光源にYAG レーザ ーの基本波(1064nm)を用いた場合、粒子径 20nm の酸 化亜鉛における還元 Zn ナノ粒子の生成効率は、より大 粒径 (~5µm) の酸化亜鉛粒子を用いた場合に比べて約 1.7 倍に増加した。これは金属酸化物の還元・ナノ粒子 化が、レーザーによる粒子の微細化(ナノ粒子化)と、 微細化された粒子へのレーザーの再照射による還元反 応の多段階過程で起こるため、より小粒径の粒子を用い ることにより微細化に必要なエネルギーが低減される ことによるものと考えられる。一方、第三高調波(355nm) を用いた場合には、ZnO ナノ粒子のプラズモン吸収帯 により光吸収性が増大するため、還元 Zn ナノ粒子の生 成効率は1064nm 照射時の6倍以上に増加した。また生 成した還元 Zn ナノ粒子の物性は、レーザー照射条件や 金属酸化物の粒径に関わらず同様であり、空気電池など への利用も可能であることがわかった。今後、粒子径の 効果についてさらに定量的な検討を行うとともに、ナノ 粒子作製の効率化に向けてさらに研究を進めていく予 定である。

参考文献

- T. Okada, T. Saiki, S. Taniguchi, T. Ueda, K. Nakmura, Y. Nishikawa, Y. Iida, *ISRN Renewable Energy*, **2013**, 827681-1-7, 2013.
- 2) 谷口誠治、月刊光アライアンス、8月号、20-23,2013.
- T. Saiki, S. Uchida, T. Karita, K. Nakamura, Y. Nishikawa, S. Taniguchi, Y. Iida, *Int. J. of Sustainable* and Green Energy, 3, 143-149, 2014.
- 4) 佐伯 拓、谷口誠治、中村和広、飯田幸雄、電気学 会論文誌 A, 135, 559-564, 2015.
- 5) 谷口誠治、月刊 OPTRONICS、419、101-106,2016.
- 6) 谷口誠治、木村優作、佐伯 拓、ILT2016 年報、pp.48-52, 2016.

レーザー核融合炉チェンバー内のプルーム同士の衝突の 3次元シミュレーション

理論・シミュレーションチーム

古河裕之、乗松孝好¹ ¹大阪大学レーザー科学研究所

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¹⁴。液体壁は、核融合燃焼により生 じた X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、エアロゾル等が生じ、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、ことが予想される。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⁴。



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

昨年度までの研究により、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 ぼ直進するため、チェンバー中心近傍でのプルーム同 士の衝突は殆どない、ことが示された。しかし、チェン バー内の液体壁近傍では、隣接する 2 つのタイルから 飛散するプルーム同士は 15°の角度で衝突する。本年 度は、上記の条件を取り入れ、粒子法を用いてプルーム 同士の3次元シミュレーションを行った。簡単のため、 LiPb ではなく鉛で、3 次元シミュレーションを行った。

2. 粒子法によるプルーム同士の衝突の評価5

プルーム同士の衝突に関し、粒子法を用いてシミュ レーションを行った。図2 は、プルーム同士の衝突の 概略図である。衝突の結果、プルームの y 方向の速度 が負になると、プルーム同士がチェンバー中心付近で 衝突する可能性が生じる。



図2 プルーム同士の衝突の概略図

粒子法は、流体を任意の大きさの塊に離散化して、 それを仮に粒子という存在として計算する方法であ る。基礎方程式は、以下のように書ける。

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = \frac{u_i^{k+1} - u_i^k}{\Delta t} = -\frac{\nabla P}{\rho} - \nu \,\mathbf{u} \tag{1}$$

質量密度 ρ は、重み関数 w を用いて以下のように 書ける。

$$\rho = m \,\tilde{n}_i \,/\, V = m \sum_{j \neq i} w \left(\left| \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i \right| \right) / \, V \tag{2}$$

$$w(r) = \begin{cases} r_e / r + r / r_e - 2 & (r < r_e) \\ 0 & (r > r_e) \end{cases}$$
(3)

$$V = \frac{4\pi}{3} r_e^3 \tag{4}$$

ここで、r。は相互作用長である。

圧力勾配は、以下のように離散化する。

$$\left\langle \nabla P \right\rangle_{i} = \frac{3}{\tilde{n}_{i}} \sum_{j \neq i} \frac{P_{j} - P_{i}}{\left| \mathbf{r}_{j} - \mathbf{r}_{i} \right|} \frac{\mathbf{r}_{j} - \mathbf{r}_{i}}{\left| \mathbf{r}_{j} - \mathbf{r}_{i} \right|} w \left(\left| \mathbf{r}_{j} - \mathbf{r}_{i} \right| \right)$$
(5)

粘性率は、以下のように定義する。

$$\mathbf{v} = \sigma \, n \, \mathbf{u} = \pi \left(2 r_{Pb} \right)^2 n \, \mathbf{u} \tag{6}$$

(1)-(6)を連立して解く。

3. シミュレーション結果

0.05 Torr の場合と0.01 Torr の場合で、衝突する 2 つ のプルーム各々の速度の時間発展を求めた。境界条件 は、xyz 全ての方向において周期境界条件とした。図 3 は、0.05 Torr の場合の初期位置である。



図 3 初期位置

図 3 の「赤〇粒子」に x 方向の初期速度 v_0 を与え、 「青×粒子」に x 方向の初期速度 $v_0 \cos 15^\circ$ 、y 方向 の初期速度 $v_0 \sin 15^\circ$ を与え、シミュレーションを行っ た。図 4 は、 $v_0=10^6$ cm/s の場合の「赤〇粒子」と「青 ×粒子」の速度の統計平均の時間発展である。図 4 か ら、衝突により 2 つのプルームが一体となって運動す る、ことが分かる。



図 4 「赤〇粒子」と「青×粒子」の速度の統計平均の 時間発展

図 5 は、y 方向の速度が負である「赤〇粒子」の存 在確率である。衝突により、0.3 µs 程度で y 方向の速 度が負である「赤〇粒子」が存在しなくなる、ことが分 かる。



図 5 y 方向の速度が負である「赤〇粒子」の存在確率

図 6 は、0.01 Torr の場合の初期位置である。



図 6 初期位置

図 7 は、0.01 Torr の場合の「赤〇粒子」と「青×粒子」の速度の統計平均の時間発展である。初期速度の与え方は、0.05 Torr の場合と同じである。図 7 から、衝突により 2 つのプルームが一体となって運動する、ことが分かる。0.05 Torr の場合と比べ、2 つのプルームが一体となるまでの時間が、わずかに長い。粘性の大きさの違いが表れている。



図 7 「赤〇粒子」と「青×粒子」の速度の統計平均の 時間発展

図 8 は、y 方向の速度が負である「赤〇粒子」の存 在確率である。衝突により、0.4 µs 程度で y 方向の速 度が負である「赤〇粒子」が存在しなくなる、ことが分 かる。



図 8 y 方向の速度が負である「赤〇粒子」の存在確率

4. 結言と今後の課題

粒子法により、衝突する 2 つのプルーム各々の速度 の時間発展を求めた。y 方向の速度が負である粒子の 存在確率も求めた。双方の結果から、液体壁近傍での 2 つのプルーム同士の衝突は、チェンバー中心近傍での プルーム同士の衝突に大きな影響を与えない、ことが 示唆された。今後、これらの結果を基に、チェンバー内 の金属蒸気の 3 次元的挙動を明らかにする。

参考文献

- H. Furukawa, T. Norimatsu : Plasma and Fusion Research, 11 1405084-1 - 1405084-5, 2016.
- 古河裕之, 乗松孝好: プラズマ核融合学会誌, 87, 51-55, 2011.
- 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.
- 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.
- 5) 越塚誠一、柴田和也、室谷浩平:粒子法入門、丸善出版。

プラズマ物理からみた地震前電離層電子密度変化の研究

理論・シミュレーションチーム

古河裕之、山中千博¹、奥村暢朗²、杉浦繁貴² ¹大阪大学理学部、²(株) コンポン研究所

1. はじめに

大地震の発生前における電磁気的な現象は、送 信電波の伝搬異常・雑音発生、環境電磁場の変動 や発光現象、あるいは地電流の観測といった形で 過去からその存在が指摘されてきたが、必ずしも 明確に観測されるわけではなく、その後の地震現 象との関連も明らかにはなっていない。

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震 (Mw=9.0) では、北海道大学の日置により、 GPSTEC の手法で、地震発生 40 分前から震源上 空の電離層電子密度の増大が観測・報告された1)。 GPSTEC とは、GPS 衛星の出す電波が電離層電子 によって遅延を受けることを利用し、地上局から 衛星へ向けた視線方向の電子密度を算出する手 法である。TEC 異常は、主に太陽活動と関連があ り、そういった宇宙起源の現象は全地球的に変化 を及ぼしうるので、局所的な現象とは区別をつけ ることができる。日置は、1994年から2015年ま での太陽起源の磁気嵐の時期を除外した M8 以上 の地震前の震源上空の TEC 異常を解析し、過去 11 回の例ですべて地震発生直前数十分以内にお ける TEC 異常があったことを示した²⁾。この一致 率を単なる偶然の一致とすることは困難で、初め て科学的に意味のある地震前兆現象ではないか、 と考えられ始めている。しかし、これらの現象を 説明できる物理モデルはまだなく、現象の詳細な 観測とともにモデルの提出が求められている。

そこでレーザー技術総合研究所では、大阪大学 理学研究科、(株) コンポン研究所と共同で、こ の大地震発生前の電離層の電子密度変化に関し てプラズマ物理の立場から考察する研究を開始 した。



3/11 0227/15



 図 1 東北地震時の電離層総電子数 (TEC)変化。
 15番衛星を地上局 950038 (相馬 1) 950227
 (千葉)で観測した例。実線は fitting 関数で、実測では、地震発生から 40 分程度前から正の異常があることがわかる。日置¹⁾に 基づき再計算した。

図 1 は、GPS を用いた電離層総電子数 (TEC) の解析結果である¹⁾。電離層総電子数が増加して いることが分かる。

一つの考え方として、考えるべき TEC 異常が、 宇宙起源ではないならば、それは地球起源であり、 もしそれが地震活動と関連するならば、それは地 殻の状態変化に影響されると考えるものである。 地震の直前においては、震源地殻に対する応力変 化が進み(震源核形成)、その変動に伴い圧力の 変化が臨界的になっていることが考えられる。そ

-42 -

こで、圧力変化(ゆらぎ)に伴う地殻の電気分極 変動があれば、地震動の発生前に、分極電荷によ る電磁場発生が起こり、電離層の電子密度分布等 に影響を与えることが想定できる。我々は、定量 的にその可能性を探るために、地下 100 km 程度 の所での電気分極を仮定して、それが震源域上空 電離層の電子密度へ与える影響を評価すること を考えた。

2. 開発したシミュレーションコード^{3.4)}

2.1 簡単化した地球モデル

本研究では簡単のため、平面地球で、プラズマ の成分は電子と水素のみ、擾乱のない静かな電離 層を仮定した。座標系は X-Y-Z の直交座標系 を用い、震源域と震源核の大きさを地震のマグニ チュードの関数とするモデルを導入した。地下 100km 程度の場所での電気分極を仮定し、それが ガス流体で拡散するモデルを考えた。さらに流体 が震源核を通り越した時刻以降、電荷は再結合に より指数関数的に減衰するとした。図2 は、地震 の震源域と震源核の概念図である。



図 2 震源域と震源核の概念図

http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/houkoku/suid ou/dl/130801_s01.pdf より改変。

今回は、破壊核形成の拡がりに従って平面的に 分極するモデルを仮定し、分極メカニズムとして は、震源核形成時の破壊による電子放出と、深層 ガスによる移動を仮定した。以下は、他の電気分 極機構を考えても基本的に有効な議論であると 考えられる。次に地球磁場は Y 方向に一様、 B_{earth} = 25000 nT とした。震源核については、時間 t=0 から、X 軸のマイナス方向、地中から地上に向か って θ の角度で大地の亀裂が始まり、速度 v₀で進 展するものとした。亀裂の表面に現れる電荷及び 電流を求め、上空に現れる電場及び磁場の時間発 展を求める。今回は電荷発生について、榎本の岩 石破壊実験の値を用いた(私信)。図 3 は、亀裂 の表面に現れる電荷の物理モデルの概念図であ る。



図 3 亀裂の表面に現れる電荷の物理モデルの概念図

マグニチュード Mw と震源域の大きさ W₀ と L₀の関係は、次式で表される⁵⁾。

$$W_0 = 10^{0.55M_W - 2.19} [km]$$

= 575.440 km (Mw = 9) (1)

$$L_0 = 10^{0.31M_W - 0.63} [km]$$

= 144.544 km (Mw = 9) (2)

震源核の大きさは、次式で表される。 $w_0 = 0.05W_0 = 28.772 \ km \ (Mw = 9)$

$$f_0 = 0.05 L_0 = 7.227 \ km \ (Mw = 9) \tag{4}$$

(3)

流体の速度は、次式で与えられる。

$$v_0 = \frac{h^2 \Delta P_c}{12 \eta f_0} \tag{5}$$

ここで、h はクラックギャップで h=0.1 mm 、 η は粘性率で η = 1.5×10⁻⁵ Pa·s である。 ΔP_c は圧力差で、次式で与えられる。 $\Delta P_c[Pa] = 1.51×10^4 D_c = 4.183×10^8 Pa$ (6)

(5) 式に数値を代入すると、v₀=3.215 m/s とな る。

$$Q_{\max} = 1.17 \times 10^{-6} w_0 \times f_0 (C) = 243.284 C$$
(7)

時刻 t における電荷量は、以下のようになる。 $O(t) = O \quad \tilde{t}$

$$P(t) = Q_{\max} t \qquad t \ge t_c$$
$$= Q_{\max} \exp\left[-\frac{t-t_c}{\tau}\right] \qquad t > t_c \qquad (8)$$

ここで $t_c \equiv f_0 / v_0$ $\tilde{t} \equiv t / t_c$ であり、規格化され た時間を表す。τ は電荷の寿命に相当する時間で あり、 $\tau = 100 s$ とした。計算時間の短縮のため、 $t_c = 600 s$ となるように、加速計算を行った。

2.2 岩盤上の電荷及び電荷による電場の物理モ デル

岩盤上の電荷による電場をビオサバールの法 則により求めた。図 3 中の着目点 P に発生する 電場は、以下のように表される。

$$d\mathbf{E}(t) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{dQ(t)}{r^2} \frac{\mathbf{r}}{r} = \frac{Q(t)}{4\pi\varepsilon_0} \frac{dy}{w_0} \frac{\mathbf{r}}{r^3}$$
(9)

$$E_{x}(t) = \frac{Q(t)}{4\pi\varepsilon_{0}} \frac{\left\lfloor X - x(t) \right\rfloor}{w_{0}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \frac{1}{r^{3}} dy$$
(10)

$$E_{y}(t) = \frac{Q(t)}{4\pi\varepsilon_{0}w_{0}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \frac{Y-y}{r^{3}} dy = \frac{Q(t)}{4\pi\varepsilon_{0}w_{0}} A \quad (11)$$

$$E_{z}(t) = \frac{Q(t)}{4\pi\varepsilon_{0}} \frac{\lfloor Z - z(t) \rfloor}{w_{0}} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \frac{1}{r^{3}} dy$$
(12)

$$A = \frac{1}{\left\{ \left[X - x(t) \right]^{2} + \left[Z - z(t) \right]^{2} + \left[Y - y_{\max} \right]^{2} \right\}^{1/2}}$$
(13)

$$\frac{1}{\left\{\left[X - x(t)\right]^{2} + \left[Z - z(t)\right]^{2} + \left[Y - y_{\min}\right]^{2}\right\}^{1/2}}$$

$$y_{\min} = W_0 / 2 - w_0 / 2 \tag{14}$$

$$y_{\rm max} = W_0 / 2 + W_0 / 2 \tag{15}$$

$$x(t) = \frac{L_0}{2}\cos\theta - v_0 t\,\cos\theta \tag{16}$$

$$z(t) = -L_0 \sin\theta + v_0 t \sin\theta \tag{17}$$

2.3 岩盤上の電流及び電流による磁場の物理モ デル

岩盤上の電流による磁場をビオサバールの法 電子の慣性を無視すると、電子の運動方程式は 則により求めた。図 3 中の着目点 P に発生する 磁場は、以下のように表される。

$$d\mathbf{B}(t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{dQ(t)}{r^3} v_0 \mathbf{n} \times \mathbf{r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Q(t)dy}{w_0} v_0 \frac{\mathbf{n} \times \mathbf{r}}{r^3}$$

 $\mathbf{n} = (\cos\theta, 0, -\sin\theta)$

$$B_{x}(t) = \frac{\mu_{0}}{4\pi} \frac{Q(t)}{w_{0}} v_{0} \sin \theta \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \frac{Y - y}{r^{3}} dy$$

$$= \frac{\mu_{0}}{4\pi} \frac{Q(t)}{w_{0}} v_{0} \sin \theta \times A$$

$$(20)$$

$$B_{y}(t) = -\frac{\mu_{0}}{4\pi} \frac{\mathcal{Q}(t)}{w_{0}} v_{0}$$
$$\times \left\{ \left[X - x(t) \right] \sin \theta + \left[Z - z(t) \right] \cos \theta \right\} \int_{y_{\min}}^{y_{\max}} \frac{1}{r^{3}} dy$$

$$B_{z}(t) = \frac{\mu_{0}}{4\pi} \frac{Q(t)}{w_{0}} v_{0} \cos\theta \times A$$
(22)

$$A = \frac{1}{\left\{ \left[X - x(t) \right]^{2} + \left[Z - z(t) \right]^{2} + \left[Y - y_{\max} \right]^{2} \right\}^{1/2}} - \frac{1}{\left\{ \left[X - x(t) \right]^{2} + \left[Z - z(t) \right]^{2} + \left[Y - y_{\min} \right]^{2} \right\}^{1/2}}$$
(23)

2.4 基礎方程式

1 流体モデル(プラズマ近似)を基本に、磁場 の効果のみでなく電場の効果も含められるよう に基礎方程式を導出し、空間2次元、速度3次 元、電場3次元、磁場3次元のシミュレーション コードを作成した。E+Bbio+Bearth の下でのプラ ズマの運動を求めた。

光電離などによる電子、及びイオンの生成を無 視すると、電子及びイオンの連続の方程式は次の ように書ける。

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \left(n_e \, \mathbf{v}_e \right) = 0 \tag{24}$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot \left(n_i \, \mathbf{v}_i \right) = 0 \tag{25}$$

(24) 式と(25) 式から、次式が導ける。

$$\frac{\partial e \Delta n}{\partial t} = \nabla \cdot \mathbf{j}$$
 (26)

(27) $\Delta n \equiv n_e - n_i$

$$\mathbf{j} = e \left(n_i \, \mathbf{v}_i - n_e \, \mathbf{v}_e \right) \approx - e \, n_e \, \mathbf{v}_e \tag{28}$$

以下のように書ける。

$$0 = -\nabla P_e - en_e \mathbf{E} - en_e \mathbf{v}_e \times \mathbf{B}$$
(29)

イオンの運動方程式は以下のように書ける。

$$m_i n_i \left(\frac{\partial \mathbf{v}_i}{\partial t} + \mathbf{v}_i \cdot \nabla \mathbf{v}_i \right) = -\nabla P_i + e n_i \mathbf{E} + e n_i \mathbf{v}_i \times \mathbf{B} + m_i n_i \mathbf{g}$$
(30)

(29) 式と(30) 式を足すと、次式が得られる。 $\rho\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}\right) = -\nabla \left(P_i + P_e\right) - e\Delta n \mathbf{E} + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \rho \mathbf{g}$ (31)

ここで、ρ は質量密度、j は電流密度である。(29) 式では、電子の速度を一意的に決定することはで きないので、本研究では以下のように仮定した。

 $\rho \approx m_i n_i \quad \mathbf{j} \approx -e n_e \mathbf{v}_e \quad \mathbf{v}_e \approx \mathbf{v}$ (32) 電荷分布により生じる電場は、ポアソン方程式 より求める。

$$\nabla^2 \phi = -\frac{e}{\varepsilon_0} \left(-\Delta n \right) \tag{33}$$

$$\mathbf{E}_{ind} = -\nabla\phi \tag{34}$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{ind} + \mathbf{E}_{ext} \tag{35}$$

外部電場下のポアソン方程式を数値的に安定 に解くことは、非常に難しい。そこで任意に決定 されるパラメーター α (y,z) を導入し、次式によ り、 Δn_{max} を定義した。 α (y,z) は、プラズマの実 質分極の程度を決める係数である。

$$\Delta n_{\max}(y,z) = \frac{\varepsilon_0}{e} \left| \nabla \cdot \mathbf{E}_{ind}(y,z) \right| \alpha(y,z)$$
(36)

上記連立方程式を解き、大気層、及び電離層の 電子密度分布の時間発展を評価した。電子温度イ オン温度共に、時間空間的に300Kで一定とした。 電離層での α は 1、大気層での α は 0とした。

3. シミュレーション結果

図 4 は、シミュレーションに用いた初期電子 密度分布である。薄い水色部分は、震源地の上空 を表す。

$$N_{e}^{c}(t) = \frac{1}{\Delta y} \int_{0km}^{450km} dz \int_{W_{0}/2 - \Delta y/2}^{W_{0}/2 + \Delta y/2} \left[n_{e}(y, z, t) - n_{e0}(y, z) \right] dy$$

$$N_{e}^{LA}(t) = \frac{1}{W_{0}} \int_{0}^{450 \, km} dz \int_{0}^{W_{0}} \left[n_{e}(y, z, t) - n_{e0}(y, z) \right] dy$$

(38) $TEC unit = 10^{16} / m^2$ (39)



図4 初期電子密度分布

図 5 は、各々の時刻の電子数密度から初期電 子数密度を引いたものを、該当領域で積分したも のの時間発展、と電荷量の時間発展である。図中 の c は、震源核中心部でのデータ、LA は震源核 全体で平均をとったものである。電荷量が減少す るタイミングと、電子数が減少するタイミングに 若干の差異が生じている。



図 5 電子数と電荷量の時間発展

図 6 は、600 秒後の電子密度分布の初期電子 密度からの差である。震源域上空で電子数密度が 増加していることが分かる。



(37)

図 7 は、1000 秒後の電子密度分布の初期電子 密度からの差、である。震源域上空で電子数密度 分布が崩れていることが分かる。



図 7 1000 秒後の電子密度分布

図 8 は、600 秒後の外部電場分布である。地表 付近で 200 V/m 程度の外部電場が生じている。



図 8 600 秒後の外部電場分布

図 9 は、1000 秒後の外部電場分布である。600 秒後のそれと比べ、大きく値が減少している。



図 9 1000 秒後の外部電場分布

図 10 は、600 秒後の外部磁場分布である。地 球磁場に比べ、十分に小さい。



図 10 600 秒後の外部磁場分布

図 11 は、600 秒後の誘導電場分布である。図 から、y 方向(水平方向)の誘導電場分布が電子 数密度の増加に大きく影響を及ぼしている、こと が示唆された。



図 12 1000 秒後の誘導電場分布

図 12 は、1000 秒後の誘導電場分布である。 600 秒後のそれとは、分布形状が大きく異なって いる

4. 結言

1 流体モデルを基本に、磁場のみでなく電場の 効果も含んだ基礎方程式を導出し、空間 2 次元、 速度 3 次元、電場 3 次元、磁場 3 次元のシミュ レーションコードを作成した。岩盤上の電荷によ る電場と磁場をビオサバールの法則により求め、 $E + B_{bio} + B_{earth}$ の下でのプラズマの運動を求めた。 当該領域上空において、電子密度の増加が確認さ れた。

震源域と震源核の大きさを地震のマグニチュ ードの関数とするモデルを導入し、シミュレーシ ョンを行った。流体が震源核を通り越した場合、 電荷は指数関数的に減衰するとした。電荷量が減 少するタイミングと、電子数が減少するタイミン グに若干の差異が生じた。岩盤上に一定量以上の 電荷が存在することが、当該領域での電子数の増 加を保持するために必要であることを示唆する 結果が得られた。

本シミュレーションは、擾乱のない静かなプラ ズマ近似モデルから出発し、過渡的で持続時間の 長い地表電荷分極による電磁場により、電離層電 子が、優先的に駆動されてその密度を上げるプロ セスを模擬した。電子密度増大という初期に課し たプラズマ近似条件に反しているのは、あくまで 過渡的な現象として観測データを模擬する為で ある。簡略化したモデルではあるが、一定時間保 持・増加する地上電荷が、電離層電子に影響を与 えうることが示されたといえる。より現実的な物 理的描像を得るために、さらなるモデルの改善は 必要である。

参考文献

- 1) Heki, K. Geophys. Res.Lett. 38. L17312. (2011)
- Heki, K and Y. Enomoto, J. Geophys. Res. Space Phys., 120, 7006-7020, (2015)
- J. D. Huba, G. Joyce, and J. A. Fedder:
 'Sami2 is Another Model of the Ionosphere (SAMI2)
 A new low-latitude ionosphere model'
 J. Geophys. Res. 105, No. A10, 23,035-23,053, OCTOBER 1, 2000.
- 西川恭冶、大林康二、若谷誠宏;「連続流体物理学」 朝倉現代物理学講座 -9。
- 5) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による強 震動:防災科学技術研究所

355nm 用光学素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大阪大学レーザー科学研究所

1. はじめに

レーザー装置およびその応用機器には、ミラー、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。これら光学素子は高出力レーザー光に曝される と、しばしば損傷(レーザー損傷)を引き起こす。損傷 が発生した部分は、当初の光学性能が得られないだけで はなく、回折等により後段光学素子の損傷の要因にもな る。そのため、より高いレーザー損傷耐性(損傷しきい 値)を持つ光学素子の開発が望まれ、国内外の多くの企 業・研究機関により研究が進められている。

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 れは、評価する光学素子の仕様を毎回決め、その仕様に 合った光学素子を参加企業から提供して頂き、同じ条件 で試験を行うものである。これまで、波長1064nm、 532nm、355 nm、248nmのレーザー装置に用いる光学素 子に対して試験を行ってきた¹³⁾。各企業から提供され た光学素子のレーザー損傷しきい値はそれぞれの企業 に対してのみ報告するが、同時に、全ての試験結果をレ ーザー損傷しきい値の頻数分布としてレーザー総研の ホームページ上で公開し、ユーザーにも確認して頂ける ようにしている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。8年間で合計547個の光学素 子のデータを蓄積することができた。

平成28年度は、355 nm 用高反射ミラーと反射防止膜 についてデータベース化試験を行った。本報告書では、 その結果について考察するとともに、同一仕様で実施し た平成22年度の結果との比較をまとめた。

2. 評価光学素子の仕様

データベース化試験を行った 355nm 光学素子の特性 仕様と、参加企業数、試料数を表2に示す。第17回の 評価対象は、レーザー装置内で多く使用されている入射 角45°で、P 偏光に対して 99.5%以上の反射率を持つ高 反射膜とした。P 偏光でS 偏光と同じ反射率を得るため には、より多くの層数が必要となる。また、一般に、P 偏光の方がレーザー損傷しきい値は低くなる。第18回 は、レンズやウィンドウの表面にコートされる入射角 0°の反射防止膜を対象とした。反射防止膜の場合には、 コートする基板の材質、粗さによりレーザー損傷しきい 値が変化するため、基板を表面粗さ 10 A以下に研磨さ れた合成石英ガラスと指定した。また、ガラス裏面も同 程度のエネルギー密度のレーザー光に曝されることか ら、裏面の表面粗さも表面と同程度であることを要求し た。

型	角度・偏光	1064 nm	532 nm	355 nm	248 nm
ミラーコート	$45^{\circ} \cdot P$	0	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
反射防止コート	0° .	0	\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc
石英ガラス表面	0° .				\bigcirc
ダイクロイックミラー	$45^{\circ} \cdot P$	0	\bigcirc		
多層膜偏光子	56.5° • P,S				

表1 光学素子のレーザー損傷耐性データベース化試験の過去実施内容

	第17回	第18回
	高反射膜	反射防止膜
波 長 [nm]	3!	55
パルス幅 [ns]	8	3
入射角度 [°]	45	0
偏光	Р	-
反射率 [%]	>99.5	<0.5
基板材料	指定なし	石英ガラス
基板研磨状態	光学研磨	RMS<10Å
裏面研磨状態	指定なし	表面と同様
参加企業数	7	7
評価試料数	13	25

表2 データベース化試験光学素子仕様

参加した企業数と個数は、第17回では7社13個、第 18回では7社25個であった。

3. 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)の第三高調波 (355 nm)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、KTP 結晶と LBO 結晶を用 いて、波長 355 nm に変換した。その後、焦点距離 2000 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、試料 表面と等価なイメージ点に 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、基本波エネルギーを 1/2 波長 板とプレート型偏光子を用いて調整することにより行 った。

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 観察して損傷発生の有無を確認した。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。

4. 355nm 用高反射膜のレーザー損傷しきい値

図1に測定した355nm 用高反射膜試料の損傷しきい 値の頻度分布を示す。第17回の試験で用いた13個の試 料の中では、最高損傷しきい値は49J/cm²、最低損傷し きい値は11J/cm²であった。また、最頻度数のしきい値 は20-25J/cm²であった。平成22年度に実施した同一 仕様の第5回データベース化試験の結果(図2)と比較 すると、最高損傷しきい値が下がっている。これは、第 5回の時に高いしきい値を示したメーカーが今回は参 加していないためである。第5回の最頻度数損傷しきい 値が25-30J/cm²であることから、355nm 用高反射膜に



図1 355nm 用高反射膜のデータベース化試験結果



図2 H22 年度第5回データベース化試験の結果 (355nm 用高反射膜)

ついては、この6年間で大きな変化はないと判断するこ とができる。

5.355mm 用反射防止膜のレーザー損傷しきい値

図3に測定した355nm 用反射防止膜の損傷しきい値 頻度分布を示す。比較のために、平成22年度に実施し た同条件の第6回データベース結果を図4に示す。第 18回の25個の試料の中で、最高損傷しきい値は77J/cm²、 最低損傷しきい値は10J/cm²となった。第6回試験の最 高損傷しきい値が41J/cm²であったことから、約2倍高 耐力の反射防止膜が製作されている。また、この最高損 傷しきい値は、図2に示した第5回高反射膜の最高損傷 しきい値75J/cm²とほぼ同じ値であることから、多層膜 に使用されるコーティング材料自身の損傷しきい値で 決まる上限と思われる。

第18回の最頻数しきい値は20-25J/cm²であり、この 値は6年前の5-10J/cm²に比べて2倍以上大きな値と なっている。つまり、コーティングメーカー全体の技術 が向上したものと考えられる。

6. まとめ

平成28年度に実施した波長355 nm 用光学素子のデ ータベース化試験結果についてまとめ、過去の同一仕様 の試験結果との比較を行った。高反射膜については、耐 力向上は認められなかったが、反射防止膜については、 最高損傷しきい値、最頻数しきい値ともに、2倍以上の 向上が確認され、今後、紫外レーザー光の高出力化、産 業応用に大いに貢献できるものと期待される。

平成29年度からは、繰返し10Hzパルスによる100on-1条件でのデータベース化試験を開始する。まずは波 長1064nm用光学素子に対して実施し、これまでの1パ ルスによるデータベースと比較することにより、産業用 光学素子の課題についても検討していく。





図3 355nm 反射防止膜のデータベース化試験結果

図4 H22 年度第6回データベース化試験の結果 (355nm 用反射防止膜)

参考文献

- 1) 本越伸二他: ILT 2016, レーザー技術総合研究所, 2016.
- 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

<u> </u>	ーエネルギー研究チーム
著 者	C. Ding, Y. Wei, Y.Wang, Q. Li, X. Lei, W. Wang, <u>D. Li</u> , Y. Gong
題 目	2-Dimensional Microstrip Meander-line for Broad Band Planar TWTs
論文誌名	IEEE International Vacuum Electronics Conference proceedings, DOI: 10.1109/IVEC.2016.7561870, 2016
著者	Y. Wang, Y. Wei, <u>D. Li</u> , W. Wei, G. Guo, L. Zhang, C. Ding, Y. Gong, J. Feng, Gun-Sik Park
題目	A Novel Method to Obtain the Slow-Wave Dispersion Characteristics of Slow-Wave Structures
論文誌名	Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 37, p.1055, 2016
著 者	M. Takemura、F. Yabu, Y. Kuboda, <u>D. Li</u> , S. Yamaguchi, M. R. Asakawa
題 目	Coherent Smith-Purcell radiation emitted by electron bunches produced by photoinjector
論文誌名	J. Jpn. Soc. Infrared Science & Technology, 26, p.50, 2016
著 者	D. Li, Y.Wang, M.Nakajima, M.Hashida, Y.Wei, S.Miyamoto
題 目	Harmonics radiation of graphene surface plasmon polaritons in terahertz regime
論文誌名	Physics Letters A, 380, p.2181, 2016
著 者	W. Wei, Y. Wei, L. Yue, Z. Lu, L. Zhang, M.i Huang, Y. Gong, W. Wang, D. Li
題 目	Small-Signal Analysis of a Square Helix TWT
論文誌名	IEEE International Vacuum Electronics Conference proceedings DOI: 10.1109/IVEC.2016.7561888, 2016
著 者	D.Li, Y. Wang, M. Nakajima, M. Hashida, Y. Wei, S. Miyamoto, M. Tani
題 目	Terahertz Radiation from Graphene Surface Plasmon Polaritons
論文誌名	Proceedings of International Conference Infrared, Millimeter and Terahertz waves, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2016.7758931, 2016
著者	Y. Wang, Y.Wei, W. wei, X. Shi, X. Lei, Q. Li, H. Yin, J. Xu, L. Zhang, C. Ding, Y. Gong, W. Wang, <u>D. Li</u>
題 目	Theoretical Study of the Growth Rate in a Cherenkov Free-Electron Laser with Two Beams
論文誌名	IEEE International Vacuum Electronics Conference proceedings, DOI: 10.1109/IVEC.2016.7561872, 2016
<u> </u>	ープロセス研究チーム
著 者	<u>M. Fujita</u> , H. Ohkawa, <u>T. Somekawa</u> , Y. Maeda, T. Matsutani, J. Bovatsek, R. Patel, N. Miyanaga
題 目	High Power UV Laser Processing of CFRP with Various ns Pulses
論文誌名	Proceedings of ICALEO 2016, paper #M204, 2016
著 者	T. Somekawa, M. Otsuka, Y. Maeda, <u>M. Fujita</u>
題目	Signal enhancement in femtosecond laser induced breakdown spectroscopy with a double-pulse configuration composed of two polarizers
論文誌名	Jpn. J. Appl. Phys, 55, 058002, 2016
著 者	H. Chosrowjan
題 目	Beam quality and coupling efficiency in coherent beam combining
論文誌名	レーサー学会誌 (The Review of Laser Engineering), Vol. 44, No. 6, 357-362, 2016

著	者	M. Fujita, H. Ohkawa, T. Somekawa, M. Otsuka, Y. Maeda, T. Matsutani, and N. Miyanaga	
題	目	Wavelength and Pulsewidth Dependences of Laser Processing of CFRP	
論	文誌名	Physics Procedia, vol.83, pp.1031-1036, 2016	
著	者	染川智弘	
題	目	「レーザー3D計測」特集号に寄せて	
論	文誌名	レーザー研究, 44巻, 5号, p.300, 2016	
著	者	<u>H. Chosrowjan, T. Kitamura, M. Fujita, Y. Izawa,</u> K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga	
題	目	Coherent Combining of High Average Power Nanosecond Pulse Laser Beams	
論	文誌名	IEEE Xplore Digital Library, DOI: 10.1109/LO.2016.7549703, 1, 2016	
著	者	吉田英次、椿本孝治、藤田尚徳、宮永憲明、 <u>ハイク コスロービアン</u> 、 <u>北村俊幸</u> 、 山村健、酒川友一	
題	目	ロッド型フォトニック結晶ファイバのビーム結合によるパルス動作1.5kW級高平均出力レー ザーの開発	
論	文誌名	レーサー研究,44巻,6号,p.363-368,2016	
著	者	T. Somekawa, N. Manago, H. Kuze, <u>M. Fujita</u>	
題	目	Differential absorption lidar measurements of H2O and O2 using a coherent white light continuum	
論	文誌名	Proc. SPIE 10006, Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing XII, 1000605, 2016	
著	者	<u>H. Chosrowjan, T. Kitamura, S. Taniguchi, M. Fujita</u> , K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga, and <u>Y. Izawa</u>	
題	目	High-power coherent beam combining: Beam quality and coupling efficiency in CBC	
論	文誌名	ALPS'16, The 5th Advanced Lasers and Photon Sources, ALPS18-4, 268 - 269, 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	EPJ Web of Conference, Vol. 119, No. 7,25017, 2016	
著	者	K. Mikami, S. Motokoshi, T. Somekawa, T. Jitsuno, M. Fujita, K. A. Tanaka, and H. Azechi	
題	目	Theoretical analysis for temperature dependences of laser-induced damage threshold of optical thin films	
論	文誌名	Journal of Physics: Conference Series, Vol.688,012065, 2016	
著	者	<u>北村俊幸、ハイク コスロービアン、染川智弘</u> 、武者満、 <u>井澤靖和</u>	
題	目	空間フィルターとStochastic Parallel Gradient Descent (SPGD)アルゴリズムを用いたタイルア パーチャーコヒーレントビーム結合	
論	文誌名	レーサー研究, 44巻, 6号, p.390 - 394, 2016	
著	者	<u>染川智弘</u> 、笠岡誠、中井政明、 <u>藤田雅之、井澤靖和</u>	
題	目	レーザーラマン分光法による油様物質のその場識別手法の開発	
論	文誌名	レーザー研究,44巻,4号,pp.272-275,2016	
著	者	<u>藤田雅之</u>	
題	目	レーザーを用いたドライプロセス	
論	文誌名	ケミカルエンジニヤリング, 61巻, 10号, pp.744-749, 2016	

著 者	染川智弘
題 目	レーザーを用いた環境計測の可能性
論文誌名	オプトロニクス, 419巻11号, pp.89-94, 2016
著 者	藤田雅之
題 目	レーザーを用いた多層・複合材料の加工
論文誌名	オプトロニクス, 419巻11号, pp.95-100, 2016
著 者	藤田雅之
題 目	総論:レーザ技術の現状と新展開
論文誌名	電気学会誌,136巻,7号,pp.414-417,2016

○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を壇検査
論文誌名	月間建設機械, 52-57, 2016
著 者	島田義則
題 目	レーザーを用いたコンクリートの健全性評価
論文誌名	オプトロニクス, 419巻11号, pp.85-88, 2016
著 者	<u>島田義則</u>
題 目	レーザーを用いたコンクリート健全性評価技術
論文誌名	生産と技術, 68(3), 54-57, 2016
著 者	<u>島田義則、オレグ コチャエフ、倉橋慎理、北村俊幸</u>
題 目	レーザーを用いたコンクリート構造物の欠陥検査技術
論文誌名	非破壊検査, 65(12), 600-604, 2016
著者	長谷川登、錦野将元、三上勝大、岡田大、近藤修司、河内哲哉、 <u>島田義則</u> 、 <u>倉橋慎理、北村俊幸</u>
題 目	レーザーを利用したコンクリートの健全性検査の高速化技術の開発
論文誌名	検査技術, 22(3), 57-61, 2017
著 者	御崎哲一、篠田昌弘、 <u>島田義則</u>
題 目	レーザーを用いたトンネル覆工コンクリート欠陥検査法の研究
論文誌名	会誌フォトニクスニュース, 2(1), 2016

○レーザーバイオ化学研究チーム

著	者	N. Nunthaboot、K. Lugsanangarm, A. Nueangaudom, S. Pianwanit, S. Kokpol, F. Tanaka, <u>S. Taniguchi, H. Chosrowjan</u> , T. Nakanishi, M. Kitamura
題	目	Photoinduced electron transfer from aromatic amino acids to the excited isoalloxazine in flavin mononucleotide binding protein. Is the rate in the inverted region of donor – acceptor distance not real?
論文	T誌名	Journal of Photochemistry and Photobiology A. Chemistry, 326, 60-68, 2016
著	者	N. Nunthaboot, K. Lugsanangarm, A. Nueangaudom, S. Pianwanit, S. Kokpol, F. Tanaka, <u>S. Taniguchi</u> , <u>H. Chosrowjan</u> , T. Nakanishi, M. Kitamura
題	目	Photoinduced electron transfer from aromatic amino acids to the excited isoalloxazine in single mutated flavin mononucleotide binding proteins: Effect of the dimer formation on the rate and the electrostatic energy inside the proteins
論→	て誌名	Computational and Theoretical Chemistry (CTC), 1108, 1-9, 2017

著 者 谷口誠治 目 液中レーザーアブレーションによるナノ粒子作製技術 頿 論文誌名 オプトロニクス, 419巻11号, pp.101-106, 2016 ○理論・シミュレーションチーム Y. Nishimura, Y. Kitagawa, Y. Mori, K. Ishii, R. Hanayama, H. Azuma, T. Hioki, T. Nishi, 著 者 T. Motohiro, O, Komeda, T. Sekine, N. Sato, T. Kurita, T. Kawashima, H. Kan, A. Sunahara, Y. Sentoku, and E. Miura 頴 目 Amorphous nanostructuralization in HOPG by 1014W cm-2 laser 論文誌名 Journal of Physics: Conference Series 717, 012073, 2016 H. Hara, G. Araki, Y. Kondo, H. Nagatomo, T-H. Dinh, P. Dunne, G. O'Sullivan, T. Ejima, 者 著 T. Hatano, W. Jiang, M. Nishikino, A. Sasaki, A. Sunahara and T. Higashiguchi 頴 E Characteristics of the soft x-ray emission from laser-produced highly charged platinum plasmas 論文誌名 APEX 9,066201,2016 K. Tomita, Y. Sato, T. Eguchi, S. Tsukiyama, K. Uchino, T. Yanagida, H. Tomuro, 者 著

題目Development of a collective Thomson scattering system for EUV light source plasmas
Biannual Journal of Japanese Society of Radiation Chemistry "論文誌名放射線化学, No.102, 27-34, 2016著者M. Edamoto, N. Saito, T. Morita, N. Yamamoto, R. Kawashima, S. Miura, Y. Itadani,
H. Nakashima, <u>A Sunahara</u>, S. Fujioka, A. Yogo, H. Nishimura, Y. Mori, and T. Johzaki,題日Development of a magnetic thrust chamber for a laser fusion rocket論文誌名Source of the Document 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2016.
(conference paper)

K. Kouichiro, Y. Wada, M. Kunishima, T. Kodama, H. Mizoguchi and A. Sunahara

著者K. Matsuo, K. F.F. Law, S. Tosaki, A. Yogo, T. Johzaki, <u>A. Sunahara</u>, H. Sakagami, M. Nakai, H. Nishimura, H. Shiraga, S. Fujioka, and H. Azechi

題 目 Energy distribution of fast electrons accelerated by High intensity laser pulse depending on laser pulse duration

論文誌名 Journal of Physics: Conference Series 717, 012102, 2016

著

	Y. Mori, Y. Nishimura, S. Nakayama, K. Ishii, Y. Kitagawa, T. Sekine, N. Sato, T. Kurita,
者	T. Kawashima, H. Kan, O. Komeda, T. Nishi, H. Azuma, T. Hioki, T. Motohiro,
	A. Sunahara, Y. Sentoku, and E. Miura

題 目 Fast heating of imploded core with counter-beam configuration

 而又 応	Physical Review Letters 117, 055001, 2016
著者	 S. Fujioka, Y. Arikawa, S. Kojima, T. Johzaki, H. Nagatomo, H. Sawada, S. H. Lee, T Shiroto, N. Ohnishi, A. Morace, X. Vaisseau, S. Sakata, Y. Abe, K. Matsuo, K F. F. Law, S. Tosaki, A. Yogo, K, Shigemori, Y. Hironaka, Z. Zhang, <u>A. Sunahara</u>, T. Ozaki, 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, K. Kondo, M. Bailly-Grandvaux, C. Bellei, J. J. Santos, and H. Azechi
題目	Fast Ignition Realization Experiment with High-Contrast Kilo-Joule Peta-Watt Laser LFEX and Strong External Magnetic Field
論文誌名	Phys. Plasmas 23, 056308, 2016

著	者	H. Sawada, S. Lee, T. Shiroto, H. Nagatomo, Y. Arikawa, H. Nishimura, T. Ueda, K. Shigemori, <u>A. Sunahara</u> , N. Ohnishi, F. N. Beg, W. Theobald, F. Perez, P. K. Patel,
		and S. Fujioka
題	目	Flash K α radiography of laser-driven solid sphere compression for fast ignition
論	文誌名	Applied Physics Letters 108, 254101, 2016
著	者	砂原淳
題	目	レーザープラズマシミュレーションの最前線
論	文誌名	オプトロニクス, 419巻11号, pp.107-111, 2016
著	者	 Y. Arikawa, S. Kojima, A. Morace, M. Hata, S. Sakata, S. Fujioka, T. Kawashima, Y. Hironaka, K. Shigemori, Y. Abe, Z. Zhang, X. Vaisseau, SH. Lee, T. Gawa, K. Matsuo, L.K. Fai, Y. Kato, S. Matsubara, S. Tosaki, A. Yogo, H. Nagatomo, S. Tokita, Y. Nakata, T. Jitsuno, N. Miyanaga, J. Kawanaka, Y. Fujimoto, K. Yamanoi, T. Norimatsu, M. Nakai, H. Nishimura, H. Shiraga, FIREX GROUP, LFEX GROUP, H. Azechi, <u>A. Sunahara</u>, T. Johzaki, T. Ozaki and H. Sakagami,
題	目	Improvement in the heating efficiency of fast ignition inertial confinement fusion through suppression of the preformed plasma
論	文誌名	Nuclear Fusion Vol.57, 066022, 2017
著	者	T. Johzaki, H. Nagatomo, <u>A. Sunahara</u> , Y. Sentoku, H. Sakagami, M. Hata, T. Taguchi, K. Mima, Y. Kai, D. Ajimi, T. Isoda, T. Endo, A. Yogo, Y. Arikawa, S. Fujioka, H. Shiraga, and H. Azechi,
題	目	Integrated simulation of magnetic-field-assist fast ignition laser fusion
論	文誌名	Plasma Phys. Control. Fusion, Vol.59, 014045, p8, 2017
著	者	A. Sasaki, <u>A. Sunahar</u> a, K. Nishihara and T. Nishikawa
題	目	Investigation of the ionization balance of bismuth-to-tin plasmas for the extreme ultraviolet light source based on a computer-generated collisional radiative model
論	文誌名	AIP advances, 105002-1-6, 2016
著	者	T. Shiroto, N. Ohnishi, <u>A. Sunahara</u> , S. Fujioka and A. Sasaki
題	目	Numerical demonstration of high-Z doping scheme on ignition-relevant scale implosion
論	文誌名	Physics of Plasmas, Vol.23, 122705-1-8, 2016
著	者	A. Sunahara and K. Nishihara
題	目	Radiation hydrodynamics simulation of laser Irradiated tin droplet and its extreme ultra-violet emission Biannual Journal of Japanese Society of Radiation Chemistry "Radiation Chemistry
論	文誌名	放射線化学、No.102, pp.41-47, 2016
著	者	R. Kawashima, T. Morita, N. Yamamoto, N. Saito, S. Fujioka, H. Nishimura, H. Matsukuma, <u>A. Sunahara</u> , Y. Mori, T. Johzaki and H. Nakashima
題	目	The Measurement of Plasma Structure in a Magnetic Thrust Chamber
論	文誌名	Plasma and Fusion Research, Vol.11, 3406012, 2016
著	者	 Y. Arikawa, S. Kojima, A. Morace, S. Sakata, T. Gawa, Y. Taguchi, Y. Abe, Z. Zhang, X. Vaisseau, S. H. Lee, K. Matsuo, S. Tosaki, M. Hata, K. Kawabata, Y. Kawakami, M. Ishida, K. Tsujii, S. Matsuo, N. Morio, Kawasaki, S. Tokita, Y. Nakata, T. Jitsuno, J. Kawanaka, H. Nagatomo, A. Yogo, M. Nakai, H. Nishimura, H. Shiraga, S. Fujioka, H. Azechi, <u>A. Sunahara</u>, T. Johzaki, T. Ozaki, H. Sakagami, A. Sagisaka, K. Ogura, A. S. Pirozhkkov, M. Nishikino, K. Kondo, S. Inoue, K. Teramoto, M. Hashida,
題	目	Ultrahigh-contrast kilojoule-class petawatt LFEX laser using a plasma mirror
論	文誌名	Applied Optics Vol.55, pp.6850-6857, 2016

著	者	T. Asahina, H. Nagatomo, A. Sunahara, T. Johzaki, M. Hata, K. Mima and Y. Sentoku,
題	目	Validation of thermal conductivity in magnetized plasmas using particle-in-cell simulations
論さ	文誌名	Physic of Plasmas Vol.24, 042117, 2017
著	者	K. Ishii, Y. Nishimura, Y. Mori, R. Hanayama, Y. Kitagawa, T. Sekine, N. Sato, T. Kurita, T. Kawashima, <u>A. Sunahar</u> a, Y. Sentoku, E. Miura, A. Iwamoto, and H. Sakagami,
題	目	Velocity measurement using frequency interferometer and chirped pulse laser
論さ	文誌名	Proc. SPIE 10089, Real-time Measurements, Rogue Phenomena, and Single-Shot Applications II, 100890H, 2017
著	者	<u>H. Furukawa</u> , T. Norimatsu
題	目	Two-Dimensional Simulation of a Plume Produced by Ablation in the Liquid Wall Chamber of KOYO-Fast
論さ	 大誌名	Plasma and Fusion Research, Vol. 11, 1405084-1 - 1405084-5, 2016
Ol	ノーザ	一技術開発室
埊	去	木栽併二

著	者	本越伸二
題	目	光学素子のレーザー損傷しきい値データベース
	1 - 1 - 1	

論文誌名 オプトロニクス, 419巻11号, pp.112-116, 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	Y. Wei, W. wei, X. Shi, X. Lei, Q. Li, H. Yin, J. Xu, L. Zhang, C. Ding, Y. Gong, W.Wang, D. Li
題	目	Theoretical Study of the Growth Rate in a Cherenkov Free-Electron Laser with Two Beams
会讀	義名	17th IEEE International Vacuum Electronics Conference, 19-21 April. 2016, Monterey, USA
著	者	W. Wei、Y. Wei, L. Yue, Z. Lu, L. Zhang, M. Huang, Y. Gong, W. Wang, D. Li
題	目	Small-Signal Analysis of a Square Helix TWT
会讀	義名	17th IEEE International Vacuum Electronics Conference, 19-21 April. 2016, Monterey, USA
著	者	C. Ding, Y. Wei, Y. Wang, Q. Li, X. Lei, W. Wang, <u>D. Li</u> , Y. Gong
題	目	2-Dimensional Microstrip Meander-line for Broad Band Planar TWTs
会調	義名	17th IEEE International Vacuum Electronics Conference, 19-21 April. 2016, Monterey, USA
著	者	D. Li、Y. Wang, M. Nakajima, M. Hashida, Y. Wei, S. Miyamoto, M. Tani
題	目	Terahertz Radiation from Graphene Surface Plasmon Polaritons
会讀	義名	41st International Conference Infrared, Millimeter and Terahertz wave, 25-30 September. 2016, Denmark
著	者	<u>D. Li</u> , M.Tani, M. Nakajima, M. R. Asakawa, M. Hashida
題	目	Terahertz radiation from a grating structure with graphene
会讀	義名	The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies, 7-9 March. 2017, Fukui, Japan
<u>0</u> 2	ーザ	ープロセス研究チーム
著	者	M. Fujita, H. Ohkawa, T. Somekawa, M. Otsuka, Y. Maeda, T. Matsutani, N. Miyanaga
題	目	Wavelength and Pulsewidth Dependences of Laser Processing of CFRP
会翻	義名	The Second Smart Laser Processing Conference 2016 (SLPC2016), 17-19 May. 2016, Yokohama,Japan
著	者	<u>H. Chosrowjan, T. Kitamura, S.Taniguch</u> i, <u>M. Fujita</u> , K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga, <u>Y. Izawa</u>
題	目	High-power coherent beam combining (CBC): Beam quality and coupling efficiency in CBC
会讀	義名	ALPS'16, The 5th Advanced Lasers and Photon Sources, 17-20 May.2016, Yokohama, Japan
著	者	<u>H Chosrowjan, T. Kitamura, M. Fujita, S. Taniguchiha, Y. Izawa</u> , K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga
題	目	Coherent Combining of High Average Power Nanosecond Pulse Laser Beams
会讀	義名	17th International Conference, Laser Optics 2016, 30 June-1 July.2016, Petersburg, Russian Federation
著	者	M. Fujita, H. Ohkawa, T. Somekawa, M. Otsuka, Y. Maeda, T. Matsutani, N. Miyanaga
題	目	Wavelength and Pulsewidth Dependences of Laser Processing of CFRP
会調	義名	9th International Conference on Photonic Technologies - LANE 201619-22 Sept. 2016,Furth,Germany
著	者	T. Somekawa, N. Manago, H. Kuze, <u>M. Fujita</u>
臣旦	F	Differential Absorption Lidar Measurements of H2O and O2 using a coherent white light

会議名 SPIE Remote Sensing 2016, 26-29 September. 2016, Edinburgh, United Kingdom

著	者	<u>M. Fujit</u> , H. Ohkawa, <u>T. Somekawa</u> , Y. Maeda, T. Matsutani, J. Bovatsek, R. Patel, N. Miyanaga
題	目	High Power UV Laser Processing of CFRP with Various ns Pulses
会議名		The 35th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO2016, 16-20 Oct. 2016, San Diego, USA

○レーザー計測研究チーム

著 者	M. Norikazu, M. Shinoda, N. Yasuda, T. Asakura, Y. Shimada, S. Emoto
題目	Development of Non-destructive Inspection Method for Concrete Elements in Tunnel Linings Using Laser Remote Sensing
会議名	The World Tunnel Congress, 22-28 April.2016, San Francisco, CA, USA
著者	S. Wada、N. Saito, K. Kase, Y. Otake, Y. Ikeda, T. Kawachi, H. Daido, <u>Y. Shimada</u> , K. Midorikawa
題目	Nondestructive Inspection of Infrastructures by Laser and Neutron Beam Technology
会議名	Lser Solution for Space and the Earth 2016, 17-20 May.2016, Yokohama, Japan
著者	K. Mikami, <u>S. Kurahashi</u> , <u>T. Kitamura</u> , N. Hasegawa, H. Okada, S. Kondo, <u>K. Oleg</u> , <u>Y. Shimada</u> , and T. Kawach
題目	Development of the High Speed Inspection System of Defects Inside Concrete
会議名	Lser Solution for Space and the Earth 2016, 17-20 May.2016, Yokohama, Japan
著 者	O. Kotyaev, Y. Shimada, N. Misaki
題目	A Mobile Laser Based System for Remote Inspection of Shinkansen Tunnels
会議名	Lser Solution for Space and the Earth 2016, 17-20 May.2016, Yokohama, Japan

○理論・シミュレーションチーム

著者	<u>A. Sunahara</u>
題目	Diffusion of external magnetic fields into the cone-in-shell target in the fast ignition
会議名	Japan-US workshop on Theory and Simulation on the high energy density physics related to the inertial confinement fusion, 4-5 November.2016, San Jose, CA, USA
著 者	A. Sunahara
題目	Diffusion of external magnetic fields into the cone-in-shell target in the fast ignition
会議名	58th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics, 31 October -4 November.2016, San Jose, CA, USA
著 者	A. Sunahara
題目	Generation of Magnetized Plasma by Ultra-intense laser Irradiation on Shell Inner Surface for Fast Ignition scheme
会議名	34-th European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM2016), 18-23 September.2016, Moscow, Russia
著 者	A. Sunahara
題目	Temporal evolution of external magnetic fields applied to the cone shell target
会議名	14th International workshop on Fast-ignition and High field physics with High power lasers oint with CLES2016, 17-20 May.2016, Yokohama, Japan
著 者	A. Sunahara
題目	Kinetic modeling on laser-produced plasmas
会議名	Kinetic physics workshop, 5-7 April. 2016, Livermore, CA, USA

$0 \nu - \tau$	一投你開充至
著 者	S. Kajikawa, T. Terao, <u>S. Motokoshi</u> , M. Yoshida, O. Ishii, M. Yamazaki, Y. Fujimoto
題目	Generation of red Q-switched pulse laser in Pr-doped double-clad structured waterproof fluoride
	glass fiber with graphene till film
会議名	ALPS'16, The 5th Advanced Lasers and Photon Sources, 17-18 May.2016, Yokohama, Japan
著者	T. Yamada, Y. Honda, <u>S. Motokoshi</u> , T. Jitsuno, J. Kawanaka, K. Fujioka, M. Yoshida
題目	Analysis of fluorescence properties for exciting in Cr3+ 4T1 level of Nd/Cr:YAG ceramics
会議名	ALPS'16, The 5th Advanced Lasers and Photon Sources, 17-20 May.2016, Yokohama, Japan
著者	T. Mikami, T. Okamoto, T. Jitsuno, <u>S. Motokoshi</u> , V. Samarkin, A. Kudryashov, J. Kawanaka, N.Miyanaga
題目	Ion-assisted coating for large-scale Bimorph deformable mirror
会議名	Pacific-rim Laser Damage '16, 18-20 May.2016, Yokohama, Japan
著 者	M. Sugiura, K. Tamura, M. Kobiyama, <u>S. Motokoshi</u> , T. Jitsuno
題目	The investigation of laser induced damage of low dispersion mirrors
会議名	Pacific-rim Laser Damage '16, 18-20, May. 2016, Yokohama, Japan
著 者	S. Motokoshi, Y. Takemura, T. Jitsuno, M. Yoshida, J. Kawanaka
題目	Laser-induced damage thresholds by double pulses with interval time
会議名	Pacific-rim Laser Damage '16, 18-20, May. 2016, Yokohama, Japan
著 者	T. Jitsuno, H. Murakami, <u>S. Motokoshi</u> , T. Mikami, T. Kawasaki, J. Kawanaka, N. Miyanaga
題目	Source of contamination in damage-test sample and vacuum chamber
会議名	Pacific-rim Laser Damage '16, 18-20, May. 2016, Yokohama, Japan
著者	T. Yamada, Y. Honda, <u>S. Motokoshi</u> , T. Jitsuno, K. Fujioka, M. Yoshida, J. Kawanaka
題目	Analysis of energy transfer processes for exciting in Cr3+ 4T1 level of Nd/Cr:YAG materials
会議名	CLEO'16, Laser Science to Photonic Applications, 5-10 June 2016, San Jose, CA, USA

○レーザーエネルギー研究チーム

著 者	李大治、本越伸二
題目	テラヘルツ波によるポリマー碍子内部欠陥診断
会議名	第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016年9月15日、朱鷺メッセ
著 者	李大治
題目	基本波で放射するスミス・パーセル自由電子レーザー
会議名	GHz~THz帯における高電力発振源の開発と応用研究会、2017年1月27日、 核融合科学研究所
著 者	李大治、中嶋誠、橋田昌樹
題目	グラフェン表面プラズモンポラリトンによる電磁波放射
会議名	第64回応用物理学会春季学術講演会、2017年3月15日、パシフィコ横浜

○レーザープロセス研究チーム

-	<u>_t</u> .	
者	有	
題	目	短パルスレーザー加工の特性と微細加工応用
会講	義名	OPIEレーザー微細加工セミナー、2016年5月18日、パシフィコ横浜
著	者	藤田雅之
題	目	パルスレーザーを用いた CFRP の加工
論文	誌名	技術情報交換会、2016年6月16日、東京大学工学部2号館
著	者	ハイク コスロービアン
題	目	レーザー加工の最近の国際的な動向
会請	義名	短パルスレーザー加工の基礎と応用、2016年8月31日、大阪大学吹田キャンパス
著	者	<u>藤田雅之</u>
題	目	短パルスレーザー加工の基礎と応用
会請	義名	短パルスレーザー加工セミナー、2016年8月31日、大阪大学テクノアライアンス棟
著	者	染川智弘、藤田雅之
題	目	水中ガスリモートセンシングに向けた水溶存メタンガスのラマン分光測定
診士	士夕	第34回レーザセンシングシンポジウム、2016年9月9日、野沢温泉スパリーナ・
珊入	司の一日	コンベンションホール
著	者	<u>北村俊幸、ハイク コスロービアン</u> 、椿本孝治、吉田英次、武者満
題	目	ロッド型フォトニック結晶ファイバーのモード不安定性の観測
論文	誌名	第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016年9月13日、朱鷺メッセ
著	者	藤田雅之
題	目	これからの光加工・計測、光医療のあり方 -その将来像とは-
論文	誌名	インターオプト2016光技術動向セミナ-、2016年9月15日、パシフィコ横浜
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水溶存メタンのラマン分光
論文	誌名	第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016年9月16日、朱鷺メッセ
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
論文	誌名	第305回 電気材料技術懇談会、2016年10月14日、堂島リバーフォーラム

著者	<u>染川智弘</u> 、岡和彦、 <u>藤田雅之</u>
題目	白色光偏光ライダーの開発
論文誌名	日本光学会年次学術講演会Optics & Photonics Japan 2016、2016年11月1日、 筑波大学東京キャンパス文京校舎
著 者	藤田雅之
題目	レーザー発振の基礎
論文誌名	光とレーザーの科学技術フェア レーザーセミナー LA-3レーザー応用技術の基礎、 2016年11月16日、科学技術館
著 者	染川智弘
題 目	暮らしに役立つレーザー計測
論文誌名	レーザー・光技術応用研究の最前線』、2016年11月17日、科学技術館
著 者	藤田雅之
題 目	パルスレーザー加工の勘どころ ~SPレーザーで見つけたツボ~
論文誌名	レーザー微細加工の最新ソリューションセミナー、2016年11月30日、 横浜情報文化センター
著者	<u>藤田雅之</u> 、大河弘志、 <u>染川智弘</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
会議名	レーザー学会学術講演会第37回年次大会、2017年1月7日、徳島大学
著者	染川智弘
題目	配電設備へのレーザー利用
会議名	レーザー学会学術講演会第37回年次大会、2017年1月7日、徳島大学
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竹富島海底温泉の海水影響評価
会議名	レーザー学会学術講演会第37回年次大会、2017年1月9日、徳島大学
著者	染川智弘、眞子直弘、久世宏明、藤田雅之
題目	コヒーレント白色光を用いた長光路差分吸収分光法による大気中CO2の計測
会議名	第42回リモートセンシングシンポジウム、2017年3月8日、千葉大松韻会館
著者	<u>ハイク コスロービアン、谷口誠治、北村俊幸</u>
題目	Polarization properties of corner-cube and axicon retro-reflectors
会議名	2017年 第64回応用物理学会春季学術講演会、2017年3月14日、パシフィコ横浜
著者	笠岡誠、中井政明、 <u>染川智弘、藤田雅之、井澤靖和</u>
題目	レーザーラマン分光法を用いた携帯型油種識別装置の開発
会議名	電気学会全国大会、2017年3月15日、富山大学 五福キャンパス
著者	染川智弘、北村俊幸、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ラマンライダーの開発
会議名	第64回応用物理学会春季学術講演会、2017年3月17日、パシフィコ横浜

○レーザー計測研究チーム

著 者	<u>島田義則、倉橋慎理、北村俊幸、オレグ コチャエフ</u>
題目	レーザーを用いたコンクリート欠陥の高速遠隔検査技術の開発
会議名	土木学会全国大会、2016年9月7日、東北大学

著者	御崎哲一、曽我寿孝、 高山宜久、 中澤明寛、朝倉俊弘、 <u>オレグ コチャエフ</u> 、 篠田 昌弘、江本 茂夫
題目	レーザーを用いたコンクリート構造物の非接触計測技術の開発(1) 装置概要と試験状況
会議名	土木学会全国大会、2016年9月9日、東北大学
著者	<u>島田義則</u>
題目	レーザーを用いたコンクリート欠陥検出技術
会議名	非破壊検査協会 超音波による非接触材料評価研究会、2016年9月23日、 キャンパスプラザ京都
著 者	島田義則
題目	レーザーを用いたコンクリートの非破壊評価技術
会議名	平成28 年度 第2回 鉄筋コンクリート構造物の非破壊試験部門講演会、2016年10月7 日、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
著者	<u>島田義則</u>
題目	レーザーでコンクリート診断! レーザー超音波とその産業応用
会議名	大阪大学 技術懇親会 光エレクトロニクスフォーラム、2016年10月21日、 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
著者	<u>倉橋慎理、北村俊幸</u> 、三上勝大、長谷川登、岡田大、近藤修司、錦野将元、 <u>島田義則</u>
題目	レーザ打音法によるコンクリト構造物内部欠陥検出の高速化技術開発
会議名	レーザー学会第37回年次大会、2017年1月日、徳島大学
著者	<u>倉橋慎理、北村俊幸</u> 、三上勝大、長谷川登、岡田大、近藤修司、錦野将元、 <u>島田義則</u>
題目	レーザー打音法によるコンクリート構造物 内部欠陥検出の高速化技術の開発
会議名	電気学会全国大会、2017年3月15日、富山大学

○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	フェムト秒蛍光計測によるD-アミノ酸酸化酵素の機能阻害効果の研究
会議名	2016年日本光化学討論会、2016年9月8日、東京大学駒場キャンパス
著 者	谷口誠治、佐伯拓
題目	液中レーザーアブレーションによる還元金属ナノ粒子の作製
会議名	日本化学会第97春季年会 特別企画「液相高エネルギー化学の新展開」、 2017年3月19日、慶応大学日吉キャンパス

○理論・シミュレーションチーム

著 者	砂原淳
題目	Diffusion of external magnetic fields into the cone-in-shell target in the fast ignition
会議名	シミュレーション研究会、2016年9月28日、やまと会議室5階中会議室
著 者	砂原淳
題目	高速点火ターゲットへの磁場印加シミュレーション
会議名	第33回プラズマ・核融合学会年会、2016年11月30日、東北大学青葉山キャンパス
著 者	砂原淳
-----	---
題目	高 Z 物質 (Sn, Bi) の放射流体計算
会議名	高強度レーザー・ビーム技術と短波長光源に関する研究会、2016年12月9日、 まちなかキャンパス長岡
著 者	<u>古河裕之</u> 、山中千博、奥村暢朗、杉浦繁貴
題目	震源核形成とガス流による電気分極を仮定した大地震前のTEC異常のシミュレーション
会議名	日本地震予知学会、第3回(2016年)学術講演会、2016年12月21日、電気通信大学
著 者	砂原淳
題目	材料創成につながるシミュレーション
会議名	平成28年度レーザープラズマ加速研究会、2017年1月17日、光産業創成大学院大学

○レーザー技術開発室

著 者	竹村有輝、 <u>本越伸二</u> 、實野孝久、吉村政志、吉田実
題目	2パルスによる光学材料のレーザー損傷
会議名	第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016年9月13日、朱鷺メッセ
著 者	李大治、本越伸二
題目	テラヘルツ波によるポリマー碍子内部欠陥診断
会議名	第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016年9月16日、朱鷺メッセ
著 者	山田隼弘、本越伸二、實野孝久、藤岡加奈、時田茂樹、河仲準二、吉田実
題目	CW励起によるNd/Cr:YAG材料の蛍光特性の評価
会議名	学術講演会第37会年次大会、2017年1月8日、徳島大学
著 者	竹村有輝、 <u>本越伸二</u> 、吉村政志、實野孝久、吉田実
題目	繰返しパルス照射時の石英ガラス損傷しきい値
会議名	学術講演会第37会年次大会、2017年1月9日、徳島大学

事業報告書

事業報告書

(平成28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 28 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28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、大出力固体レーザーに必要と される基盤技術の開発を目標に、室温での動作特性を解析するとともにゼロフォノ ンライン励起方式の予備試験を開始した。

コンクリート構造物健全性評価技術開発プロジェクト研究では、トンネル覆エコ ンクリートを対象として、構造物の経年劣化を高速で検査し、その健全性を評価す る技術の研究を進めた。

レーザーエネルギー分野においては、テラヘルツ波帯で負の屈折率を有する金属 周期構造体をデザインし、三次元シミュレーションによりメタマテリアル中の電磁 波伝播特性を明らかにした。また低周波数テラヘルツ波発生・検出装置を構築した。

レーザー計測分野においては、リモートセンシング技術を高架橋などのインフラ 構造物健全性評価に適用するための技術開発および高強度レーザーを用いた環境評 価技術の研究を行った。レーザーバイオ化学分野では、創薬、蛋白質の光デバイス などへの応用を目的とし、蛋白質・酵素などの機能解明および薬剤による機能阻害 効果に関する研究を進めた。

理論シミュレーション分野においては、各研究チームが行う実験研究を理論・シ ミュレーション面より支援し、併せてレーザーピーニング、レーザー加工など産業 応用に有用なデータの提供を行った。

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 2016 へ

1. 役員等の異動

(理事	•]	監事)	

年月日		就 任		退任
H28.4.28	理事	中田 洋介	理事	友永 匡哉
H28.4.28	監事	小林 英生	監事	湯浅 英生
H28.6.23	理事	大石 富彦	再任	
H28.6.23	理事	井澤 靖和	再任	
H28.6.23	理事	中塚 正大	再任	
H28.6.23	理事	松村 宏治	再任	
H28.6.23	理事	疇地 宏	再任	
H28.6.23	理事	落合 誠	再任	
H28.6.23	理事	小野寺正洋	再任	
H28.6.23	理事	小森憲昭	再任	
H28.6.23	理事	豊留 昭宏	再任	
H28.6.23	理事	中田 洋介	再任	
H28.6.23	理事	宮口 仁一	再任	
H28.6.23	理事	山中千代衛	再任	
H28.6.23	理事	山本 俊二	再任	
H28.6.23	監事	西原 功修	再任	
H28.6.23	監事	日根野文三	再任	
H28.6.23	監事	小林 英生	再任	
H29.2.15	理事	山中千代衛	退任	

(評議員)

年月日	就 任	退 任
H28.4.28	原勉	内山 博文
H28.6.23	礒嶋 茂樹	再任
H28.6.23	内海 渉	再任
H28.6.23	尾崎博	再任
H28.6.23	加藤有一	再任
H28.6.23	仙藤 敏和	再任
H28.6.23	田中健一	再任
H28.6.23	中田 公明	再任
H28.6.23	原勉	再任
H28.6.23	東 邦夫	再任
H28.6.23	美濃 由明	再任
H28.6.23	望月 孝晏	再任
H28.6.23	佐々木孝友	新任

2. 役員会等の開催

(1)理事会

- 第17回理事会 (平成28年4月14日 みなし決議) 決議事項
 - ・臨時の第13回評議員会の招集及び目的である事項
- 第18回理事会 (平成28年6月1日 関電会館)

決議事項

- ·平成27年度事業報告書
- ·平成27年度財務諸表
- ・内閣府への定期報告
- ・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13回評議員会(臨時)の決議内容
- 第19回理事会 (平成28年7月5日 みなし決議) 決議事項
 - ・理事長及び副理事長並びに常務理事の選定
- 第 20 回理事会 (平成 29 年 1 月 23 日 みなし決議) 決議事項
 - ・基本財産の運用
- 第 21 回理事会 (平成 29 年 3 月 22 日 関電会館) 決議事項
 - ·平成29年度事業計画書
 - ·平成 29 年度収支予算書
 - ・臨時の第15回評議員会の招集及び目的である事項
- (2)評議員会
 - 第12回評議員会 (平成28年4月1日 みなし決議) 決議事項
 - ・定款の変更
 - ・評議員会運営規程の変更
 - 報告事項
 - ・第14回理事会および第16回理事会の決議内容
 - 第13回評議員会 (平成28年4月28日 みなし決議) 決議事項
 - ・理事の選任
 - ・監事の選任
 - ・評議員の選任
 - 第14回評議員会 (平成28年6月23日 関電会館)

決議事項

- ・平成27年度財務諸表の承認
- ・改選期に伴う理事の選任
- ・改選期に伴う監事の選任
- ・改選期に伴う評議員の選任 報告事項
- 第18回理事会の決議内容
- ·平成27年度事業報告

3. 賛助会員状況

平成 28 年度末会員数 37 社 80.5 口

4. 学会および論文発表

学会発表	57 件	(国内:41件、	国外:16件)
論文発表	52 件	(国内:17件、	国外:35件)

5. 特許等出願件数

平成28年度出願件数	1 件		
平成 28 年度末特許保有件数	23 件	(登録済:22件、	公開済:0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、室温動作時のレーザー 発振特性の解析を行い、出力予測モデルを構築すると共に、ゼロフォノンライン励 起方式の予備試験を開始した。

[関連する主な受託・共同研究]

・ゼロフォノンライン励起新型高出力 Yb:YAG セラミックレーザ

【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】

トンネル覆エコンクリートを対象として、コンクリート構造体の経年劣化を高速 で検査し、健全性を評価する技術開発を進めた。

(1)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、50Hz での高速検査 を実証し、野外実験で検査システムのロバスト性を確認した。

[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、テラヘルツ波の光源開発 と、材料の診断や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

金属周期構造体で構成され、テラヘルツ波帯域で負の屈折率を有するメタマテリ アルをデザインし、三次元シミュレーションで電磁波の伝搬特性を明らかにした。 また、グラフェンを用いた新しい放射構造体の研究を開始した。 (2) テラヘルツによる電力設備の診断・検査研究

ポリマー材料への適用をめざして、低周波域で強いテラヘルツ波を発生できるように実験装置を改良し、ポリマー碍管の内部欠陥診断の可能性を実験的に評価した。 また、現場で使えるように、装置の小型化や安定性などについて検討を行った。

[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) 半導体の表面処理に関する研究

太陽電池製造工程への応用を目指して、半導体表面における極薄アモルファス層形成に関する研究を行った。

(3) レーザーによるナノ粒子生成技術の研究

酸化亜鉛の還元と微細化、空気電池への応用を目標に、ナノ粒子作成の高効率化 について研究を進めた。また、フェムト秒レーザーによる金属ナノ粒子生成技術に 関し、溶媒効果についての検討を進めた。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・超短パルスレーザを用いたヘテロ接合型太陽電池表面処理技術の開発
- ・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) レーザーを用いたリモートセンシング技術に関する研究 高架橋床版検査のためのレーザー差動干渉技術開発を行った。 (2) 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、大気中温室効果ガスの濃度や高度分布の計測、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]

- ・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
- ・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
- ・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】

創薬分野、蛋白質の光デバイスなど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

フラビン蛋白質の光反応過程について、実験値と分子動力学ならびに電子軌道計算 による理論値を取り入れて反応モデルを構築した。

(2) 薬剤による生体内酵素の機能制御メカニズムの研究

統合失調症の要因となる d-アミノ酸酸化酵素の異常活性を抑制できる薬剤分子 の効果を、分光計測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 う実験研究を支援するとともに、レーザーピーニングやレーザー加工など産業応用 に有用なデータを提供した。

(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実現のため、レーザー生成EUVプラズマの諸特性 を解析し、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

レーザー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

相変化、応力発生、固体中の圧力伝搬、残留応力生成などを含め、大気中や水中 の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を精緻化し、レ ーザーピーニング、レーザー加工、表面処理プロセスへ適用した。

(4) レーザー核融合炉設計に関する理論的研究

レーザー核融合炉液体壁炉チェンバー内の金属蒸気同士の衝突を3次元シミュレ ーションにより評価し、金属蒸気の排気系設計の指針となりうるデータを提供した。

[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、青色励 起時の蛍光特性および温度特性を評価することにより、Nd から Cr へのエネルギー 移乗過程について研究を進めた。

(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が繰返し照射時に低下する要因を明らかにする ため、連続2パルスによる石英ガラス材料のレーザー損傷しきい値の評価を行った。 第一パルス照射により生成された構造欠陥および自由電子が、次のパルスによるレ ーザー損傷を引き起こすことを示唆する結果を得た。

(3) レーザー損傷評価試験

損傷しきい値のデータベース化を目的に、355nm 用光学素子を対象に第17回、 第18回の評価試験を実施した。

(4) 可視・紫外レーザー用高耐力光学素子の開発

可視光ファイバレーザー用多層膜ミラーの設計、製作を行い、必要性能が得られ ていることを確認した。

[関連する主な受託・共同研究]

・革新的小型・高効率UV レーザー光源の開発

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。53件の技術相談に対応し、そのうち16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(現レーザー科 学研究所)等との共同研究をはじめ、国内外の大学と積極的に連携を図りながら研 究を行った。

産学官との連携では、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)、(国)量子 科学技術研究開発機構(QST)、(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) 革新的小型・高効率 UV レーザー光源の開発 ((国)新エネルギー・産業技術総合開発 機構高輝度・高効率次世代レーザー技術開発)
- (4) ゼロフォノンライン励起新型高出力 Yb:YAG セラミックレーザ (安全保障技術研究推進制度)
- (5) 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) 超短パルスレーザを用いたヘテロ接合型太陽電池表面処理技術の開発((国)科学技術振 興機構 マッチングプランナープログラム「企業ニーズ解決試験」)

6. 受託研究

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、技術相談窓口で依頼 を受けて16件のレーザー損傷評価試験を行うなど、計32件の受託研究を実施した。 (公募によるものを除く。)

7. 補助事業

文部科学省の科学研究費補助金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) グラフェン表面プラズモンを用いたテラヘルツ広域帯電磁波発振器と増幅器の 研究開発(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) アキシコンを用いた共振器内コヒーレントビーム結合技術開発と応用(基盤研究C)
- (7) 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)
- (8) 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)
- (9) 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)

(10) 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 27 年度の研究成果を報告する研究成果報告会 (ILT2016)を開催した。

7月8日 千里ライフサイエンスセンター (大阪)7月15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 2016 5月 18日~20日 パシフィコ横浜(神奈川)
- ・第1回レーザー科学技術フェア 11月15日~17日 科学技術館(東京)

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、12月1日に、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50Hz まで向上させたこと、および「レーザー高空間分解能計測」、「レーザー打音」、「レ ーザーコンクリート切断」を合わせた屋外実験に成功したことを発表した。

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7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) 17th International Conference Laser Optics 2016, LO'2016 (6月, ロシア)
- (2) LANE2016 (9月, ドイツ)
- (3) 34-th European Conference on Laser Interaction with Matter (ECLIM2016)
 (9月、ロシア)
- (4) SPIE Remote Sensing 2016 (9月, 英国)
- (5) ICALEO2016 (10月,米国)

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、プラズマ・核融合学会と日本原子力学会が共催する「核融合エネ ルギー連合講演会」等の活動を支援した。

2. 出版物の刊行

平成 27 年度の研究成果を年報にまとめ、刊行した。 ・「ILT2016 年報」(2015~2016) (平成 28 年 7 月発行)

3. 泰山賞の贈呈

7月の成果報告会にて第8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 副理事長 常務理事 常務理事・	・所長 副所長	大石富彦 井澤靖和 松村宏浩 中塚正大			
【レーザーエネルギー研究ラ	チーム】	チームリータ 研究員	Ť	井澤靖和 李 大治	(兼務)	
【レーザープロセス研究チ-	-4]	主席研究員 (チームリー 副主任研究員 副主任研究員	-ダー)	藤田雅之 ハイク コ 染川智弘	スロービアン(兼務)
【レーザー計測研究チーム】		主任研究員 (チームリー 副主任研究員 副主任研究員 研究員	-ダー) 11	島田義則 谷口誠治 オレグ コ 倉橋慎理	(兼務) チャエフ	
【レーザーバイオ化学研究を	チーム】	チームリータ 副主任研究員 副主任研究員		中島信昭 ハイク コ 谷口誠治	スロービアン	
【理論・シミュレーションチ	ーム】	チームリータ 研究員	<i>i</i> —	井澤靖和 古河裕之	(兼務)	
【レーザー技術開発室】		主任研究員 (室長) 研究員		本越伸二 岸田知門		
【総務部】		事務局長 総務部ージャー マネネージャー 事務員	-	松村 松村 宏 治 本 宏 先 美 町 本 田 歌 本 淑 沢 一 歌 本 初 家 朱 田 歌 本 一 歌 本 一 歌 本 一 歌 本 一 歌 本 一 歌 本 一 歌 本 一 歌 の 一 歌 の 一 歌 の 一 歌 の 一 歌 の 一 歌 の ろ の の の の の の の の の の の の の の の の の	(兼務) (兼務) 恵	
【特別研究員】 京都 元日 元日 三国 元月 大阪 元月	部大学 名着 日 新電電機株 三 東京 工 立 大 学 様 様 株 三 三 委 志 二 大 学 代 で 機 株 末 三 菱 電 機株 末 三 菱 電 機 株 末 三 菱 で で 機 株 末 三 で 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一		<u>v</u> z	毛鈴田田糟中今明泰則文紘信一		

大阪大学レーザー科学研究所	教授	千徳靖彦
大阪大学レーザー科学研究所	教授	斗内政吉
大阪大学レーザー科学研究所	教授	西村博明
大阪大学レーザー科学研究所	教授	乗松孝好
大阪大学レーザー科学研究所	教授	藤岡慎介
大阪大学レーザー科学研究所	教授	宮永憲明
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	河仲準二
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	坂和洋一
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	重森啓介
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	中嶋 誠
大阪大学レーザー科学研究所	講師	時田茂樹
大阪大学レーザー科学研究所	助教	椿本孝治
大阪大学レーザー科学研究所	特任教授	疇地宏
大阪大学レーザー科学研究所	招へい教授	實野孝久
大阪大学大学院工学研究科	教授	粟津邦男
大阪大学大学院工学研究科	教授	兒玉了祐
大阪大学大学院基礎工学研究科	教授	宮坂 博
大阪大学大学院理学研究科	准教授	山中千博
大阪大学接合科学研究所	教授	筋原裕一
大阪大学接合科学研究所	教授	塚本雅裕
大阪大学光科学センター	特任教授	佐々木孝友
大阪丁業大学丁学部	教授	西口彰夫
大阪産業大学工学部	<u>教授</u>	首場光博
大阪市立大学大学院理学研究科	教授	小ツ橋知幸
岡山大学大学院自然科学研究科	助教	元川 百 西川 百
核融合科学研究所	准教授	出 <u>一</u> 岩木晃中
核融合科学研究所	田教	安臣 高
期而学院大学理工学部	为权参	天 <u></u> 王 士 尚 登
関西大学システム理工学部	教授	玉川 尚玉
関西大学システム理工学師	准教授	佐伯 拓
	田数	上口 1/1 士
11.1.1.未八子 古都大学化学研究前	助权参授	[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[[
方都大学ル学研究所	() (本 新 授	次印/ 一 佐田旦樹
古邦大学大学院理学研究科	一般授	1100000000000000000000000000000000000
近继大学理工学站	教授	八項員馬加 山野人士
U.戴八于垤上于叩 近幾十受理工受动	初这	下均八心
U.戴八于垤上于叩 近幾十受理工受动	秋1文 数/ 英	(前利)伯 士田 宝
U.戴八于垤上于叩 近幾十受理工受动	秋1文 数/ 英	口山 天 前田住仙
<u></u> 近藏八于理工于即 宣知丁丵宣笙甫明受妨	彩1文 准数运	<u> </u> 去 が 舌 即
同加二未同守守门于仪 ;言知丁类言华甫明受妨	1日初1又	小仏里則
同加二未同守守门于仪 揮	1日代1又 数 运	之 (日也 田日 <i>休</i> 引
1%用八十二十印 国立研究期或注入十十七研究前 审批十十百次前	彩1又	田日 夜 54
国立切九開光伝八上不切九川 本地上不切九川 工華十学理培!!エートカンバノガ研究カンター) 安井) 仮 九 世 安田
「来八子氓児リモートビンシンク切九ビンクー	彩1文 数/运	久世仏 <u>切</u> 燕木 法
朱丄未八子 電气活信十尚十尚陀桂却理工尚研究到	彩1文 数/运	膝平 項 一
电风迪恒人子人子阮泪報理上子妍九件 重气通信十学 众声调本宏	彩1文 株け 如 極	四回 一 枯口実 .
电风旭信入子 企画詞宜至 审查工业十学十学院博想理工学研究科	村住教校	他口思一
宋尔上亲人子人子阮涓報理上子妍九件 市古工业十兴中的公众理工兴研究科	?狄1文 ≢4年	
果从上来人子人子阮総合理上子研先件 重业十学十学院工学研究科	· 申 印	仍们 110 田山禾込
泉北人子人子阮上子研先科 東北十学十学院理学研究科	<i>教授</i>	田中労宿 此田 菘
泉北人子人子阮理子研先科 	作教授	采田 様 逆回 空
百得国立父迎入子。	神座教授	省尿 <u>広</u>
ローンドナノ研究開発機構協局研究部門 増果返帰技術開発でンター ローナーー レーナー レーナー レーナーー レーナー レーナーー レーナーー レーナー レーナーー レーナーー レーナー レー レーナー レーナー レーナー レーナー レーナー レーナー レーナー レーナー レー レーナー レーナー レーナー レー レー レー レー レー レー レー レー レー レ	モンター長	入坦時行
日平电风休八云江	+14-1-17	伊滕良峻
兀 生 未 即 风 人 子 阮 人 子	教授	膝田 <u></u> 一眼四回
兀 生 未 削 风 人 子 阮 人 子	行 <u></u> 壮教授	二间固興
人阪医美人子 丘库坦士士学士学院工学研究社	作教授	前台 子
兵庫県立大学大学阮上学研究科 5. 唐周五上党言席玄雅科学技術 英席子	教授	滕原阅天
兵庫県立大字局度産業科字技術研究所	所長	呂本修冶

評 議 員理 事・監 事

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 渉 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
 - 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
 - 兒玉了裕 大阪大学 レーザー科学研究所 所長・教授
 - 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

賛 助 会 員

(50音順)

会社·団体名				
一般財団法人大阪科学技術センター	大成建設株式会社			
有限会社岡本光学加工所	株式会社ダイヘン			
株式会社オプトサイエンス	株式会社竹中工務店			
オムロンレーザーフロント株式会社	中国電力株式会社			
鹿島建設株式会社	一般財団法人電力中央研究所			
株式会社片岡製作所	株式会社東芝			
株式会社環境総合テクノス	西日本旅客鉄道株式会社			
一般財団法人関西情報センター	日新電機株式会社			
関西電力株式会社	日本電気株式会社			
関電不動産開発株式会社	パナソニック株式会社			
関電プラント株式会社	浜松ホトニクス株式会社			
株式会社きんでん	一般財団法人光産業技術振興協会			
株式会社熊谷組	株式会社日立製作所			
株式会社ケイ・オプティコム	富士電機株式会社			
光伸光学工業株式会社	前田建設工業株式会社			
株式会社神戸製鋼所	株式会社三井住友銀行			
ジオマテック株式会社	三菱重工業株式会社			
株式会社島津製作所	三菱電機株式会社			
清水建設株式会社	株式会社レイソルテクノロジーズ			
住友電気工業株式会社	一般社団法人レーザー学会			

合計40社

おわりに

レーザー技術総合研究所 平成 28 年度成果報告書 (ILT2017 年報第 29 巻)を取りまとめ ました。7 月に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、これまでから、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きました。

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 出力を達成しました。昨年は、安全保障技術研究推進制度による「ゼロフォノンライン励 起新型高出力 Yb:YAG セラミックレーザー」と NEDO プログラムによる「革新的小型・ 高効率 UV レーザー光源の開発」の2テーマで新たな研究を立ち上げ、産業界とも協力し ながら、室温水冷方式固体レーザーの開発とファイバレーザーをベースにした UV 光への 波長変換技術開発に着手しました。

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、理化学研究所や量子科 学技術研究開発機構と連携しながら探傷技術の高速化をめざす研究を進め、50Hz での高 速探傷試験の実証に成功し、実用化に向けて明るい見通しを得ることができました。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、レーザー微細加工、テラヘルツ波による非破壊検査、レーザー分光 による微量成分分析、液中レーザーアブレーションと光化学、生体関連物質の機能研究、 レーザープラズマ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。光学素子の損傷評価試験は、本年4月にレ ーザー学会より産業賞(貢献賞)を受賞しました。これまでの地道な努力の積み重ねがわ が国のレーザー産業振興に貢献していると評価されたことは大きな喜びであります。

当研究所は本年創立 30 周年を迎えます。初心に還り、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 29 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

ILT2017 年報

平成29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



