

ILT-APR Number 26
Issued: July 2014
ISSN 1340-6167

ILT2014年報

Annual Progress Report

2013-2014



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年の創設以来、レーザーおよびその関連産業の振興を図り、我が国の学術の進展と科学技術の発展に貢献することを目的として、レーザーとその応用に関する研究開発、調査、情報の収集・提供、人材の養成などの事業を鋭意推進してまいりました。長年にわたり、関係省庁、産業界、ならびに大学、研究機関の皆様方から、ご指導、ご支援を賜りましたこと、心から深く感謝申し上げます。

基礎研究の成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・土木など幅広い分野におけるレーザー応用研究を行ってまいりました。近年は、「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」や「高効率LPP法EUV光源の実証開発」などのNEDOプロジェクトにも参画し、レーザーの高出力化に寄与し得るビーム結合技術や次世代半導体製造に必須のEUV光源プラズマの研究を進めています。JR西日本などとの協力の下で開発してきたレーザー超音波を利用したコンクリート建造物の欠陥検査技術では、昨年のレーザー学会進歩賞に引き続き、今年度は土木学会より技術開発賞を受賞いたしました。省エネルギー化に資する先端材料のフェムト秒レーザー微細加工、レーザーによる遠隔微量分析技術、光学素子の損傷耐力評価などでは産業界との強い連携の下で研究を進めており、新しい成果が生まれてきています。

平成23年度から始まった第4期科学技術基本計画では科学技術イノベーションの戦略的推進が大きな柱として掲げられています。総合科学技術・イノベーション会議は、エネルギー、健康長寿、次世代インフラ、地域資源、震災からの復興・再生の5つを重点分野とする科学技術イノベーション総合戦略を策定しました。光・レーザー技術は、ナノテクノロジー、ICT、環境関連技術とともに、5つの重点課題に共通する分野横断技術とされています。「21世紀は光の時代」ともいわれ、レーザー・光技術は先進科学、先端産業を牽引する基盤技術として今後ますますその重要性が増していくものと期待されています。当研究所は、国および産業界が目指している開発研究について牽引的役割を果たすべく研究活動を活性化するとともに、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も積極的に進め、成果の情報発信に努めてまいり所存でございます。

このたび研究所年報第26巻（平成25年度研究成果報告書）を発行いたしました。何卒ご高覧のうえ、ご助言、ご指導下さいますようお願い申し上げます。

平成26年7月

公益財団法人 レーザー技術総合研究所
理事長 橋本 徳 昭

ILT2014 年報 (Annual Progress Report 2013-2014)

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絶縁材料欠陥診断研究	1
メタマテリアルによる電磁モードの存在条件研究	4

レーザープロセス研究チーム

CFRP のレーザー微細加工	7
Filled-aperture coherent summation technique for multiple high average power laser beams	11
低温冷却 Yb:YAG TRAM レーザーの時間変化計測	15
レーザーラマン分光法による変圧器油中フルフラールの分析	18

レーザー計測研究チーム

レーザーを用いたコンクリート埋め込みボルトの健全性評価技術の開発	22
Two-beam probing interferometry: bridge inspection	25
レーザーを用いた碍子表面塩分計測	29

レーザーバイオ化学研究チーム

レーザー計測による光活性蛋白質のフェムト秒反応ダイナミクス	34
Ultrafast fluorescence up-conversion technique and its applications to flavoproteins	39
液中レーザーアブレーション法によるナノ粒子作製：溶融塩の効果	45

理論・シミュレーションチーム

極端紫外(EUV)光源開発研究	50
レーザー生成高速電子・イオンを用いたプラズマ加熱	53
レーザー核融合炉壁のアブレーション	56
レーザーピーニングの統合シミュレーションによる塑性圧縮応力の評価	59
シミュレーションによるレーザー核融合炉設計研究	66

レーザー技術開発室

H25 年度レーザー損傷耐力データベース化試験	70
新レーザー材料開発	74

発表論文リスト	81
事業報告書	101
組織図	115
構成員一覧	116
評議員	121
理事・監事	122
評議員選定委員	123
企画委員	124
賛助会員	125
おわりに	127

研究報告書

テラヘルツ波による絶縁材料欠陥診断研究

レーザーエネルギー研究チーム

李 大治、本越伸二

1. はじめに

テラヘルツ波は周波数でいうと 0.1~10 THz、波長に換算すると 3 mm~30 μm 程度で、電波と赤外光の間に当たる領域の電磁波である。テラヘルツ波の最大の特徴は、光と電波の両方の長所を兼ね備えていることにある。物質中や大気中の伝播特性は電波に近く、指向性やコヒーレンシーを持つことから光にも近いと言える。また、電波に比べて周波数が非常に高く、光に比べると透過特性に優れているなど、電波や光にはない特長を持つ。そのため、プラスチックや紙等に対する透過率が高いことや生体に害を与えない、材料物性を調べるのに有用であるなど様々な応用が期待されている。しかし光源や検出器ともに適切なものがなかったため、電磁波利用における谷間とも呼ばれてきた。現在、テラヘルツ波の発生方法として、様々なものが提案されている^{1,2)}。大型のシンクロトロン放射設備では、数 10 W のテラヘルツ波の発生に成功している。研究用としては、短パルスレーザーと光伝導アンテナを用いた装置が、数 THz の電磁波を容易に得られることから現在広く使用されている。また、より小型のものとして、量子カスケード半導体素子や、非線形光学結晶を用いた差周波テラヘルツ波発生技術などが、積極的に研究されている。一方、テラヘルツ波を用いた診断応用では、電子部品、医薬品、文化財など非破壊検査装置として実用化が進んでいる。電力設備診断においても、ケーブル絶縁層、遮熱コーティング層、塗装下の鋼材発錆など、先行研究が行われている^{3,5)}。

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

2. テラヘルツ発生・計測装置

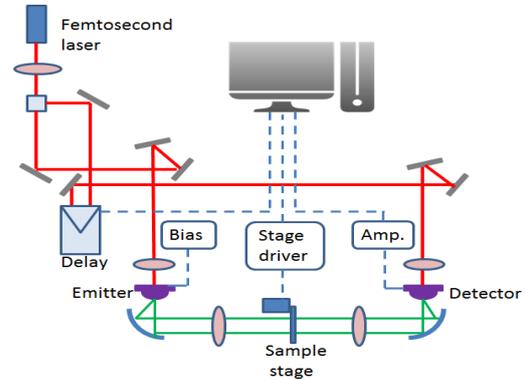


図1 THz 発生・計測装置概念図

実験装置としてテラヘルツ時間領域分光法を基にした図1に示すような計測装置を構築した。光源にはフェムト秒レーザーを用い、テラヘルツ波は光伝導アンテナにより発生検出を行っている。チタンサファイアレーザー装置（波長800 nm、100 fs、80 MHz）から出力された約40 mWのレーザー光は、半透鏡により励起光とプローブ光に分けられる。約20 mWの励起光を、放射用光伝導アンテナの5 μm 幅のギャップに集光する。アンテナへ10.3 kHz、20 V_{pp}のバイアス電圧を印加することにより、テラヘルツ帯の電磁波を発生させる。放射されたテラヘルツ波は、口径25 mmの放物面鏡により、平行光に変換して検出系に伝送する。サンプルを測定するために、集光レンズ2枚を設置してビームスポットを作り、ビームスポットにアパーチャとサンプルホルダーを設置した。テラヘルツ波イメージングによる検査・診断を実現するため、サンプルホルダーは2軸の移動ステージにより走査できるようになっている。一方、プローブ光は時間遅延ラインを通過して検出用光伝導アンテナのギャップ上に集光される。サンプルを透過したテラヘルツ波も検出用光伝導アンテナに集光され、プローブ光と時間的に一致した時にテラヘルツ波電場に応じた微弱電流を発

生ずる。この電流をプローブ光の遅延時間を変えながら検出することにより、テラヘルツ波電場の時間依存データを得る。開発したデータ収集・処理・制御用ソフトを用いて、テラヘルツ波電場の時間波形を自動的に検出し、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が得られる。更に、サンプル移動ステージと同期することによって、サンプル内部の欠陥や劣化等をイメージ化することが可能となる。図2に実験装置のテラヘルツ波の発生部、検出部、集光レンズ、サンプルステージ、時間遅延ライン、イメージングソフトの画面などを示す。

3. 絶縁材料のテラヘルツ帯透過特性

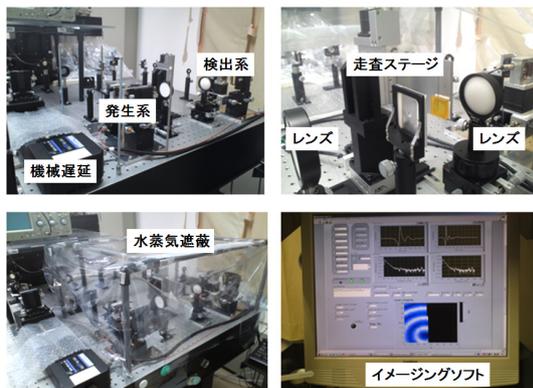


図2 実験装置写真

電力設備の電気絶縁には、固体、気体、液体など多くの材料が使用されている。本研究では、代表的な5種類の材料についてテラヘルツ波透過特性を評価した。サンプルの厚みはそれぞれ異なり、シリコンゴムが5 mm、FRPが3 mm、PVCが4 mm、ポリエチレンが3 mm、エポキシが4 mmである。サンプルが無い場合(参照)と、有る場合(サンプル)で、それぞれ透過伝搬してきたテラヘルツ波を計測し、サンプル信号と参照信号の比を算出することにより、材料の透過率を求めた。測定した透過率スペクトルを図3に示す。0.2 THz以下で計測された信号は、テラヘルツ光学系の物理的サイズの影響により誤差が大きく信頼性がないので削除した。1 THz以上の値もまた、サンプルの吸収により信号対雑音比が低いことから削除した。図3から、ポリエチレンの透過率は

全帯域で1に近いことが分かる。一方、FRPの透過性は周波数に敏感で、0.2 THzにおいて透過率が0.5であるが、周波数が上がると急激に減衰する。その他の材料もFRPによく似た透過特性を示した。材料の透過性を把握

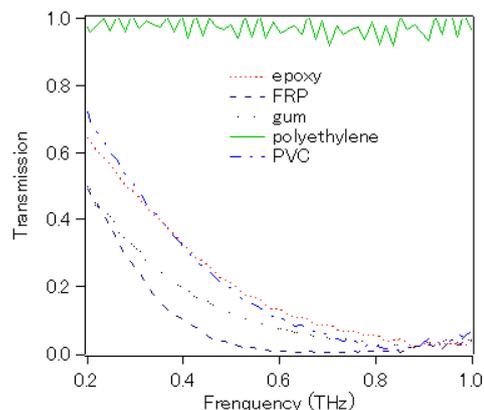
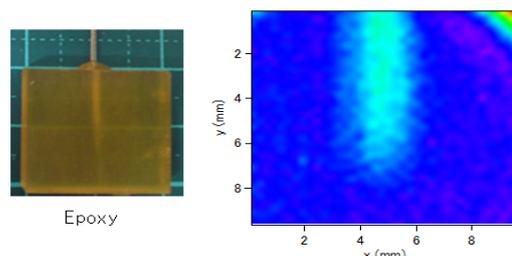
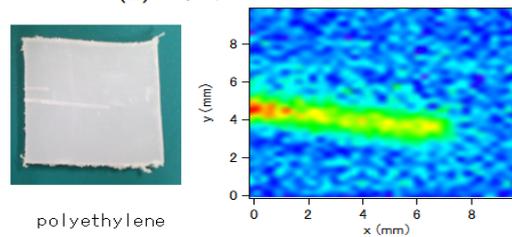


図3 各試料の透過性測定



(a)エポキシサンプル



(b)ポリエチレンサンプル

図4 イメージングにより欠陥検出

することにより、個々の材料に対して適切な測定周波数を選ぶことが診断応用には重要である。

4. イメージングによる欠陥検出

テラヘルツイメージングに基づく欠陥検出を行うために、模擬欠陥のあるサンプルを用いて測定実験を行った。内部に針の挿入痕(直径0.7 mm)を付けたポリエチレンと金属針(直径0.7 mm)を挿入したエポキシをサン

プルに用いた。測定間隔を0.25 mmとし、欠陥部を含む10 mm × 10 mmの領域を二次元走査した。図4(a)はエポキシサンプルのイメージである。金属の針はテラヘルツ波を透過しないため、強度の違いから検出できている。図4(b)に示すのはポリエチレンサンプルのイメージである。針の挿入痕の部分は、屈折散乱等による透過率の違いから確認できている。見かけ上の欠陥幅が実際の欠陥幅よりも大きくなった原因は、測定に用いているテラヘルツ波の波長やサンプル走査時の空間分解能の影響である。

5. まとめ

テラヘルツ波透過特性測定装置を構築し、代表的な絶縁材料の透過スペクトルのデータを取得すると共に、掃引走査装置を導入することによりサンプルの模擬欠陥検出が可能であることを明らかにした。

今後、具体的な電力設備を想定し、その劣化診断へのテラヘルツ波の利用と技術的課題に取り組む予定である。

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

参考文献

- 1) 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.
- 2) 西澤潤一編著：テラヘルツ波の基礎と応用,工業調査会, 東京, 2005.
- 3) K. Liu: Applied Physics Letters, **81**, 4115-4117, 2002.
- 4) D. Grischkowsky: Applied Physics Letters, **57**, 1055-1057, 1990.
- 5) P. Jepsen: Laser Photonics Review, **5**, 124-166, 2011.

メタマテリアルによる電磁モードの存在条件研究

レーザーエネルギー研究チーム

李 大治、萩行正憲¹、宮本修治²

¹大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

²兵庫県立大学高度産業科学技術研究所

1. はじめに

通常の物質では屈折率は正であり、その中を伝播する電磁波は電場、磁場、波数ベクトルの方向が右手系の関係になるため右手系物質と呼ばれる。しかし、誘電率と透磁率が共に負の物質は、負の屈折率を有し、その中では電場、磁場、波数ベクトルの方向が左手系の関係を持つため、左手系物質(NIM)と呼ばれる。このような系は全く新しい光学材料として機能する可能性を秘め、逆チェレンコフ放射や逆ドップラー偏移などの特異な電磁気現象を示し、研究が注目を集めている¹⁾。最近、これらの人工材料(メタマテリアル)の製作技術で進展が見られ、また製作した材料の性能も向上していることから^{2,4)}、新しい物理現象および新しい応用領域の開拓に向けての努力が始まっている⁵⁻⁷⁾。真空と誘電体との境界面に沿って伝搬する表面電磁波は、チェレンコフ型の電磁波放射源の開発に重要な役割を果たすことはよく知られていることである⁸⁻¹⁰⁾。一定の速度で誘電体表面を移動する電子ビームは、電子の速度と同期した位相速度をもつ表面電磁波と相互作用し、また、発振条件を満足させれば、電磁波が増幅されて空間に放出される。そのため、表面電磁波の研究は小型の電磁波放射源の開発に重要であり、特に、大出力テラヘルツ波源への応用研究が活発に行われている。A.V.Katsらは、異なる材料の界面で励起される電磁現象を研究し、負の屈折率媒質の表面に電磁波が存在する条件を導出した¹¹⁾。しかしながら、その条件は誘電率と透磁率への要求が厳しすぎるので、小型電磁波放射源の開発には適用できないことがわかった。この問題を解決するために、我々は媒質平板の下に完全導体の基板を使う発想を提案した。完全導体の基板を利用すると、電磁界の境界条件が変わり、それにより誘電率と透磁率への制限を緩めることが可能と考え

られる。本文では、均質で、等方的、線形の負の屈折率媒質から作られた平板を考え、その表面に伝搬する電磁波の存在条件に関する解析結果を報告する。

2. 理論解析

まず、図1(a)に示すように、真空と無限に厚い媒質平板との二次元スキームを考える。媒質平板は比誘電率 ϵ_r と比透磁率 μ_r を有し、負の屈折率媒質の場合には、比誘電率と比透磁率の実数部が負であり、正の屈折率媒質の場合には、比誘電率と比透磁率の実数部が正である。ビームと電磁波の相互作用では、縦方向の電場成分が主要であるから、理論解析では、縦の電場を持つ磁気的横波(TMタイプモード)に着目する。図1(a)に示すスキームによると、真空領域($x > 0$)における、y方向の磁場成分は下式のように与えられる。

$$H_y^{(1)} = A e^{-\alpha x} e^{jkz} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha = \sqrt{k^2 - \omega^2/c^2}$ 、 ω は角周波数、 c は真空中の光速、 A は係数である。一方、媒質領域($x < 0$)におけるy方向の磁場成分は、

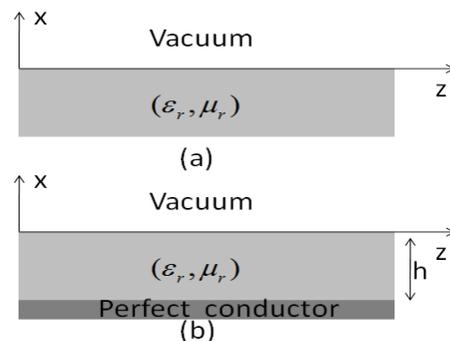


図1 平板モデル概念図 ((a)完全導体基板なし、(b)完全導体基板あり)

$$H_y^{(2)} = B e^{\beta x} e^{jkz} \quad (2)$$

と表される。ここで、 $\beta = \sqrt{k^2 - \epsilon_r \mu_r \omega^2 / c^2}$ 、 B は係数である。電磁波の表面モードは、 $x=0$ の境界面から離れるにつれて指数関数的に減衰する特徴があり、これにより $\alpha > 0$ と $\beta > 0$ の条件が得られる。他の電磁場成分は(1)と式(2)を用いてマクスウエル方程式の関係から求めることができる。

電磁場の各成分を用いて電磁界の境界条件を導入すると、表面電磁波の分散方程式が導出される。

$$\epsilon_r \frac{\alpha}{\beta} = -1 \quad (3)$$

これにより z 方向の伝搬定数 k を推定できる。

$$k^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \frac{\epsilon_r (\epsilon_r - \mu_r)}{\epsilon_r^2 - 1} \quad (4)$$

電磁波の伝搬条件 $k > 0$ 、および表面モードの減衰条件 $\alpha > 0$ と $\beta > 0$ により、表面電磁波が存在するための誘電率と透磁率への要求条件が導出できる。それは図 2 のグレーの領域で与えられる。図 2 より、表面電磁モード

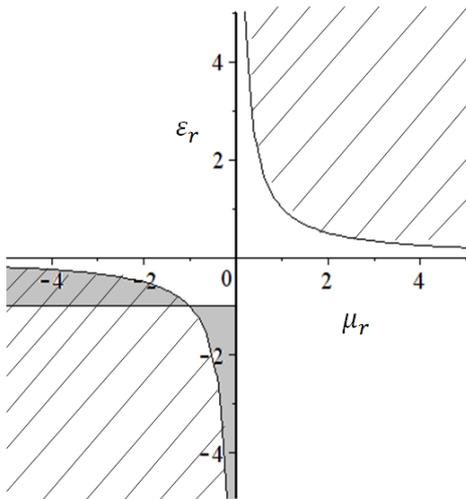


図 2 誘電率と透磁率における表面電磁波存在条件 (グレーは基板なし、ストライプは基板あり)

ドは誘電率と透過率の狭い領域でのみ存在できることがわかった。誘電率と透過率の制限により、負の屈折率媒質で小型チェレンコフ型電磁波放射源を実現するのが非常に難しいことがわかる。この限界を大幅に緩和するために、図 1(b)に示すような完全導体基板を付ける構造を考える。導体基板に入射する電磁波が反射されることで電磁的境界条件が変化する。それにより表面電磁波存在の制限を大幅に改善することが可能である。完全導体基板を付けた構造において、媒質中($x < 0$)での y 方向の磁場成分を

$$H_y^{(2)} = (C \cos(\tau x) + D \sin(\tau x)) e^{jkz} \quad (5)$$

と書き直す。ここで、 $\tau = \sqrt{\epsilon_r \mu_r \omega^2 / c^2 - k^2}$ 、 C と D は係数である。そうすると、表面電磁波の分散方程式は次の式のように導ける。

$$\epsilon_r \frac{\alpha}{\tau} = \tan(\tau h) \quad (6)$$

ここで、 h は媒質平板の厚みである。前述の処理と同様に、 $k > 0$ 、 $\alpha > 0$ 、 $\beta > 0$ の条件から表面電磁モードの存在条件を求めることができる。

$$\epsilon_r \mu_r > 1 \quad (7)$$

これを図 2 のストライプ領域に示す。予測の通り、グレー範囲に比べてストライプ領域の方が広くなり、従来の表面電磁波存在の限界が突破された。正の屈折率媒質による表面電磁波についての研究⁸⁻¹⁰⁾が既に行われているが、負の屈折率のほうはまだ開拓されていない。次に、負の屈折率媒質において、 $\epsilon_r \mu_r > 1$ の範囲で表面電磁モードを実際に求める。

3. 数値計算

一般的に、負の屈折率媒質の比誘電率と比透磁率は Drude モデルで与えられる。

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\nu_c)} \quad (8)$$

ここで、 ω_p はプラズマ周波数、 ν_c は衝突周波数、 $\varepsilon_\infty = 1$ である。計算例として、 $\omega_p = 32\pi \times 10^9$ rad/s、 $\nu_c = 10^{-4}$ Hz を採用し、 $\varepsilon_r = \mu_r$ と仮定する。また、本文の解析では、媒質中での電磁波のロスを考えない。プラズマ周波数以下の電磁波周波数に対応する比誘電率と比透磁率は負数になる。

誘電率と透磁率の Drude 式(8)を分散方程式(6)に代入し、数値計算の手法を用いて方程式を解くと、表面電磁モードの分散関係を求めることができる。この計算では、媒質平板の厚みを 2 mm とした。その時の負の屈折率を有する媒質平板に局在する表面電磁波の分散関係を図 3 に示す。そこには二つの分散カーブがあり、それぞれ基本モードと二番目の高次モードを表す。比較のために、正の屈折率媒質(PIM)($\varepsilon_r = 10, \mu_r = 1$) 平板に対しても計算を行った。基本モードの分散曲線を同図に赤い曲線で示した。また、電子ビームとの相互作用を表現するために、100 keV エネルギーの電子ビームに対する、電子の速度 v_b と $\omega = kv_b$ の関係を図 3 の青い線で示す。この直線と各分散曲線との交点が、電子ビームと電磁モードとの同期点を表す。同期点では、電子の速度が電磁波の位相速度と等しく、電子ビームと電磁波との相互作用が可能であることを意味する。そのため、交点或いは同期点に対する周波数が一定のエネルギーの電子ビームによる励起された電磁波の周波数と考えられる。

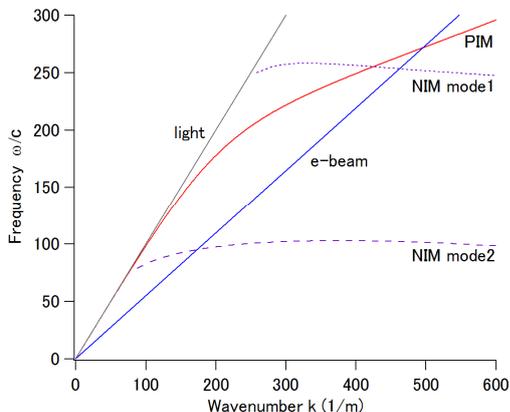


図 3 表面電磁モードの分散関係曲線

4. まとめ

負の屈折率媒質平板による表面電磁モードの存在条件に関する解析を行った。表面電磁波の分散方程式を導出し、数値計算の手法を用いて分散方程式を解き、分散関係を求めた。それにより、完全導体基板を使うことで、従来の誘電率と透磁率への制限を大幅に緩和できることが明らかになり、 $\varepsilon_r \mu_r > 1$ の範囲に表面電磁モードが存在できることが明らかとなった。負の屈折率媒質を用いた小型かつ大出力チェレンコフ型電磁波放射源の開発¹²⁾が可能になると考えられる。

本研究の一部は科研費(24560057)と光科学技術振興財団からの研究助成により実施した。

参考文献

- 1) V.G. Veselago: Sov. Phys. Usp., **10**, 509-514, 1968.
- 2) R.A. Shelby, D.R. Smith, S. Schultz: Science, **292**, 77-79, 2001.
- 3) H.-T. Chen, W.J. Padilla, J.M.O. Zide, A.C. Gossard, and A.J. Taylor: Nature, **444**, 597-600, 2006.
- 4) K. Tkano, T. Kawabata, C. Hsieh, K. Aklyama, F. Miyamaru, Y. Abe, Y. Tokuda, R. Pan, C. Pan, and M. Hangyo: Appl. Phys. Express, **3**, 016701, 2010.
- 5) D. R. Smith, W. Padilla, D. C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, and S. Schultz: Phys. Rev. Lett., **84**, 4184-4187, 2000.
- 6) C.G. Parazzoli, R. B. Gregor, K. Li, B. E. C. Koltenbah, M. Tanielian: Phys. Rev. Lett., **90**, 107401, 2003.
- 7) A. A. Houck, J. B. Brock, and I. L. Chuang: Phys. Rev. Lett., **90**, 137401, 2003.
- 8) H.L. Andrews and C. A. Brau: J. Appl. Phys., **101**, 104904, 2007.
- 9) D. Li, G. Huo, K. Imasaki, M. Asakawa: Nucl. Instr. Meth. Phys., **A606**, 689-692, 2009.
- 10) I.J. Owens and J. H. Brownell: J. Appl. Phys., **97**, 104915, 2005.
- 11) A.V. Kats, Sergey Savel'ev, V.A. Yampol'skii and Franco Nori: Phys. Rev. Lett., **98**, 073901, 2007.
- 12) D. Li, M. Hangyo, Z. Yang, M.R. Asakawa, S. Miyamoto, Y. Tsunawaki, K. Takano, K. Imasaki: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, **A 637**, 135-137, 2011.

CFRP のレーザー微細加工

レーザープロセス研究チーム

藤田雅之、染川智弘、大河弘志¹、大塚昌孝¹、前田佳伸¹

¹近畿大学理工学部

1. はじめに

次世代エンジニアリング材料として注目されている CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic:炭素繊維強化樹脂複合材料) に対するレーザー加工の適用可能性について研究を進めている^{1,2)}。CFRP は炭素繊維を積層し樹脂で固めた構造であるため、樹脂が何らかのダメージを受けると層間剥離が生じて強度が低下してしまう恐れがある。基本的に熱加工であるレーザー加工の場合は、炭素繊維の昇華温度よりも一桁低い融点をもつ樹脂が先に溶融し、炭素繊維と樹脂の間に隙間が生じたり炭素繊維が露出してしまうことが問題となっている。樹脂が熱的ダメージを受けた領域は HAZ (Heat Affected Zone: 熱影響領域) と呼ばれ、10 ~ 100 μm 以下に抑制することが求められている。

我々は、超短パルスレーザーを用いることで CFRP のレーザー加工に伴う HAZ を最小限に抑制できることを示してきた²⁾。しかし、市販の超短パルスレーザーの出力は一般的に数 W レベルであり、輸送機器等の構造材として用いられる厚さ数 mm の CFRP を切断するのに要する加工時間は産業応用とはほど遠いものであった。そこで、超短パルスレーザーの高品質な加工を活用するために、厚さ数 100 μm の極薄 CFRP の微細加工に着目することとした。炭素繊維は「軽くて丈夫」という特徴以外にも、数々の熱的・機械的な優れた特性を有している。

炭素繊維は、ポリアクリルニトリルを炭素化して得られる PAN 系とコールタールなどを原料として得られる PITCH 系に大別される³⁾。PAN 系炭素繊維は高強度でしなり易いという特徴から、自動車車体、航空機、ゴルフシャフト、テニスラケット等に広く使われている。一方で、PITCH 系は繊維軸方向に高度に配向した黒鉛結晶であり、熱伝導率が高く放熱部材として利用可能であ

る。また、熱膨張係数は一般的な金属材料に対して 2 桁低く、ほとんどゼロである。さらに、優れた電磁波シールド特性を有しており、金属部材の代替に適した樹脂材料であると考えられる。

このような炭素繊維の特性を活かすことで、“軽量化”は二次的な効果と考えてもいいぐらいのメリットが得られる用途が期待される。炭素繊維の直径は 7 ~ 10 μm で、髪の毛の約 1/10 の太さであり、5~10 層を積層しても厚さ 100 μm 程度である。10 層も積めば CFRP としての特性が充分発揮されることが期待される。前述のような特徴を活かせば、極薄の CFRP は精密な微細構造体を形成するのに適している材料と考えられる。CFRP は金属とは異なり、フォトリソ、化学エッチングによる微細加工が困難であり、パルスレーザーによる直接描画、精密微細加工が重要となる。

2. 超短パルスレーザーによる切断実験

CFRP のレーザー加工における PAN 系と PITCH 系の比較を行うために、波長 266 nm、パルス幅 35 ps のレーザーを用いて CFRP の切断実験を行った。レーザーパワーを 0.5 ~ 2 W、繰り返し周波数を 25 ~ 100 kHz と変化させ、厚さ 250 μm の CFRP に焦点距離 100 mm のレンズを用いてレーザー光を集光照射した。CFRP 試料は図 1 に示す様に直進ステージまたは高速モーター上に固定した。直進ステージを用いた場合は 10~40 mm/s

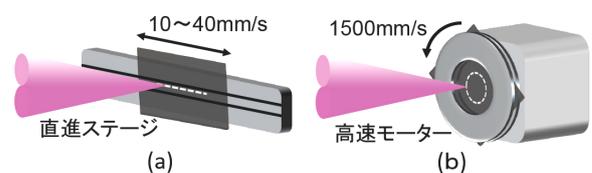


図 1 レーザー光の掃引方法 ; (a) 直進ステージを用いた低速掃引、(b) 高速モーターを用いた高速掃引

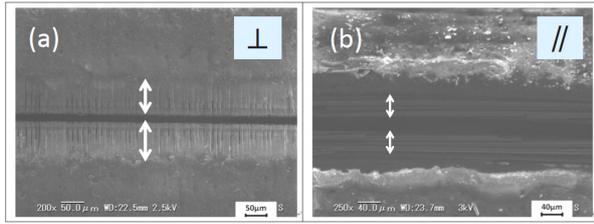


図2 PAN系クロスCFRPを低速で直線加工した際に観察される熱影響層(矢印部分)のSEM像。(a)炭素繊維と垂直に加工、(b)炭素繊維と平行に加工

の掃引速度で試料を直線加工し、高速モーターを用いた場合は1500 mm/sの掃引速度で試料を円形に加工した。円形加工の半径は10 mmであった。用いた高速モーターの回転部分は中空シャフト形状をしており、試料を貫通切断した後のレーザー光はそのままモーターを通過するようになっている。CFRP 試料の形態としては、PAN系クロス、PAN系一方向、PITCH系一方向の3種類を用いて実験を行った。

2.1 低速直線加工におけるPAN系CFRPの熱影響領域

図2にPAN系クロスCFRPを低速で直線加工した際に観察される熱影響領域(HAZ: Heat Affected Zone)のSEM像(矢印部分)を示す。ここでは、CFRPの樹脂が蒸発し炭素繊維が露出した領域をHAZとして測定した。

図3にレーザーパワーを1Wに固定してPAN系炭素繊維と“平行に”直線加工した場合の繊維露出幅の掃引速度依存性を示す。掃引速度に対する依存性は見られないが、繰り返し周波数が高いほど熱影響領域が拡大する傾向がある。これは、繰り返し周波数が高いほど照射スポットの重なりが大きくなり、局所的な加熱が起きているためであると考えられる。また、繰り返し周波数が高いほどパルスエネルギーが小さくなり、炭素繊維の加工しきい値以下のエネルギー成分が増えていることも考えられる。

図4にレーザーパワーを1Wに固定してPAN系炭素繊維と“垂直に”直線加工した場合の繊維露出幅の掃引速度依存性を示す。図3と異なり、掃引速度に対する依

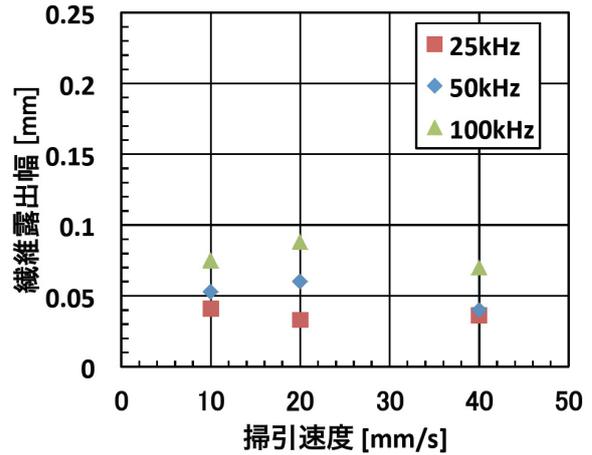


図3 PAN系炭素繊維と平行に直線加工した場合の繊維露出幅の掃引速度依存性。

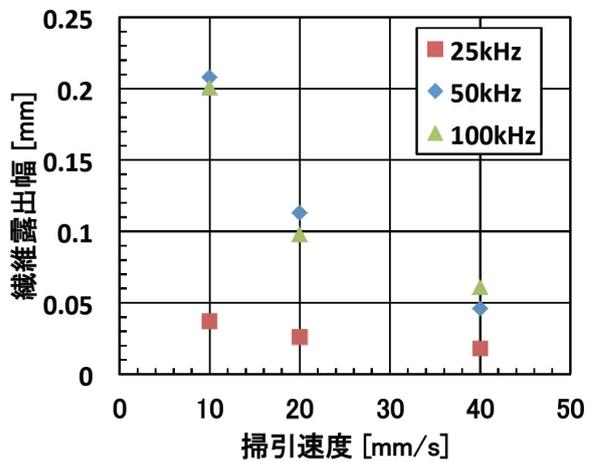


図4 PAN系炭素繊維と垂直に直線加工した場合の繊維露出幅の掃引速度依存性

存性が繰り返し周波数が高い時に顕著に現れている。掃引速度が遅いほど熱影響領域が大きくなっており、炭素繊維に対して垂直に加工する場合は局所的な加熱の影響が著しいことが分かる。PAN系炭素繊維の熱伝導率は鉄と同程度であり繊維内での熱伝導は比較的良好であるが、隣接する繊維間の熱伝導は極めて低い。炭素繊維と平行に直線加工する場合は繊維に沿って熱影響領域が現れても、そこはレーザー加工によって除去されてしまう。一方、炭素繊維と垂直に直線加工する場合は、繊維に沿った熱影響領域がそのまま残ってしまうことになる。この傾向はパルスエネルギーが小さいほど、又はピーク強度が低いほど顕著に現れている。

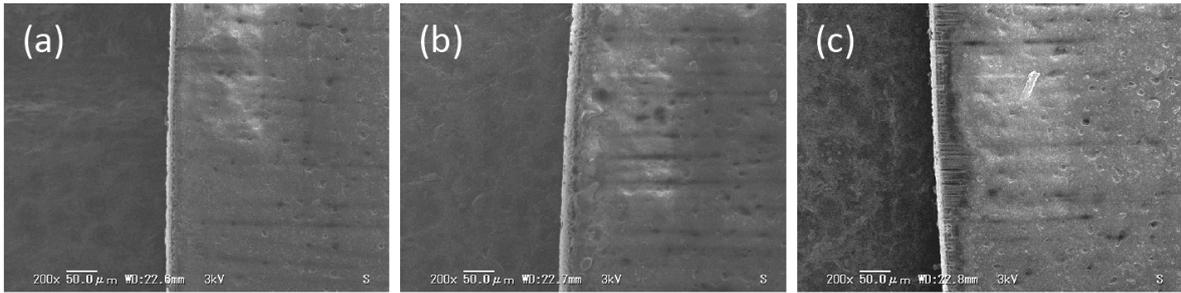


図5 PAN系CFRPを炭素繊維に対して垂直に加工した試料のSEM像。繰り返し周波数は50kHzでレーザーパワーと掃引速度はそれぞれ、(a) 0.5 W、1500 mm/s、(b) 2 W、1500 mm/s、(c) 2 W、40 mm/s

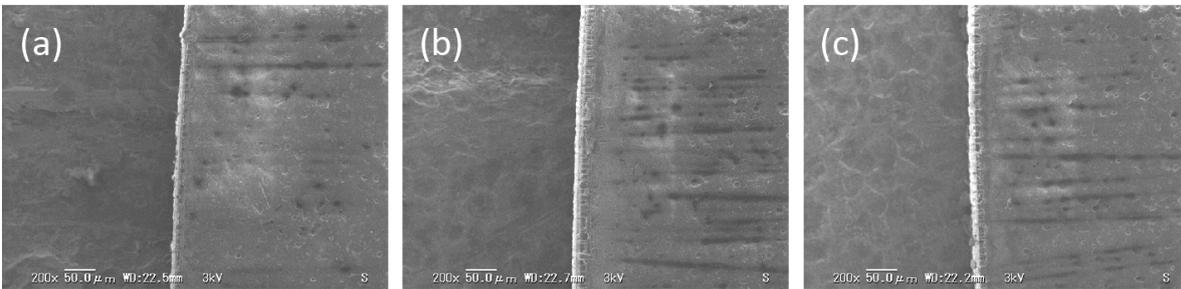


図6 PITCH系CFRPを炭素繊維に対して垂直に加工した試料のSEM像。画面右側がCFRP試料。実験条件は図5と同じ

2.2 掃引速度に対するPAN系とPITCH系の比較

図5にPAN系CFRPを炭素繊維に対して垂直に加工した試料のSEM像を示す。繰り返し周波数は50kHzでレーザーパワーと掃引速度はそれぞれ、(a) 0.5 W、1500 mm/s、(b) 2 W、1500 mm/s、(c) 2 W、40 mm/sであった。図5(a)と(b)を比較すると、レーザーパワーが4倍異なるにもかかわらず1500 mm/sで高速掃引した場合は顕著な熱影響領域が見られない。一方、図5(b)と(c)を比較すると、同じ照射パワーでも40 mm/sの低速掃引では炭素繊維が露出しており、熱影響領域が確認できる。同様の実験をPITCH系炭素繊維に対して行った結果を図6に示す。PITCH系CFRPの場合は、低速加工においても炭素繊維の露出が見られない。PAN系に比べてPITCH系炭素繊維は熱伝導率が数倍高いために、局所的に熱が溜まることなく加工が行われていることが分かる。

2.3 高速円形加工における加工効率

前節においてはPAN系、PITCH系にかかわらず、高

速掃引することで熱影響領域が無視できるレーザー加工を実現できることを示した。高速掃引における加工部周辺の状態はPAN系、PITCH系ともに差が見られない。炭素繊維の熱伝導率の違いは加工にどのような影響を与えているのか？ 図7に厚さ250 μmのCFRPシートから直径20 mmの円板を切り抜くのに要する時間をレーザー出力に対してプロットした。図中〔 〕で示したデータを除くと概ね、加工時間とレーザー出力の間には

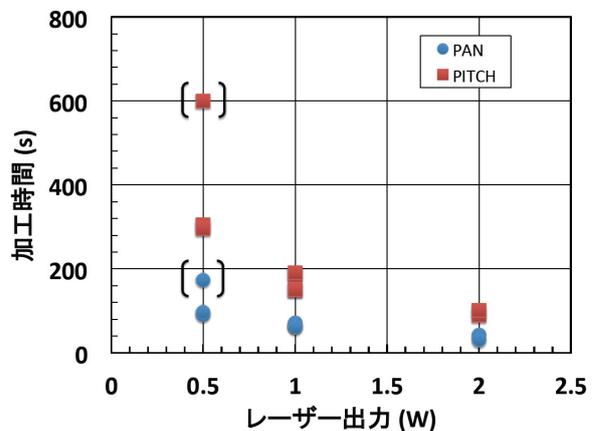


図7 高速円形加工における加工時間の比較

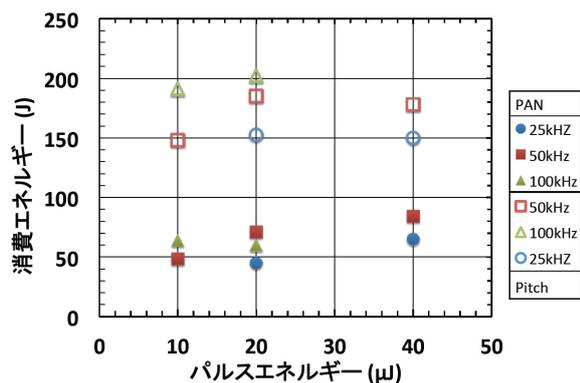


図8 高速円形加工において直径20mmの円板を切り抜くのに要したレーザーエネルギーの比較

反比例の関係がある。〔〕付きのデータは繰り返し周波数100kHz、パルスエネルギー5μJの時に得られた値であり、加工しきい値近傍の照射条件であったため他のデータ(パルスエネルギー10～40μJ)よりも加工時間が多くなっている。

図8に高速円形加工において直径20mmの円板を切り抜くのに要したレーザーエネルギーの比較を示す。図7の(加工時間×レーザー出力)をパルスエネルギー毎にプロットした。図8では図7中の〔〕付きのデータは除外している。図7で概ね反比例の関係が示されたことに対応して、(加工時間×レーザー出力)のパルスエネルギーに対する著しい依存性は見られない。消費エネルギーの平均値はPAN系で60J、PITCH系で180Jであった。PITCH系はPAN系よりも約3倍のエネルギーを要して加工が行われたことになる。これは、PITCH系炭素繊維の高い熱伝導率によるものと考えられる。

加工試料上で測定した切り幅15μmと切り抜かれた円板の直径20mmから、アブレーションされた体積は0.24mm³と見積もられる。レーザーパワー1W当たりのアブレーションレートは消費エネルギーの平均値から計算すると、PAN系で0.24、PITCH系で0.08mm³/min/Wとなる。独シュツットガルト大学で行われた実験ではパ

ルス幅8ps、繰り返し200kHzのレーザーを用いて、波長(1064nm、532nm、355nm)に依存せず1mm³/min/Wという値が報告されている⁴⁾。我々の実験で用いたレーザーのパルス幅は35psであり、レーザー照射後約10psで発生するプラズマの加熱に余分なエネルギーが費やされたために加工効率が低下したと推察される。

3. まとめ

パルス幅35ps、波長266nmのレーザーを用いて厚さ250μmのCFRPをレーザー加工する実験を行った。PAN系とPITCH系の炭素繊維を用いたCFRPの加工特性の比較を行い、(1)PAN系CFRPは低速掃引において熱影響領域が発生しやすい、(2)高速掃引においてはPAN系、PITCH系共に熱影響領域が無視できる加工が可能である、(3)PITCH系CFRPは熱伝導率が高いために熱影響は発生しにくい、PAN系よりも多くのエネルギーを加工に要する、ことが分かった。加工に要するエネルギーと熱影響の受けやすさはトレードオフの関係にあると言える。

謝辞

本研究はスペクトロニクス社のご厚意により開発中のレーザーを借用して実施したものであり、関係者各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 藤田 雅之, 染川 智弘 : レーザ加工学会誌, **20**, 34-38, 2013.
- 2) 藤田 雅之, 染川 智弘, 尾崎 巧, 吉田 実, 宮永 憲明 : レーザー研究, **39**, 701-705, 2011.
- 3) 炭素繊維協会第24回複合材料セミナー資料、
<http://www.carbonfiber.gr.jp/tech/seminar.html>.
- 4) A. Wolynskia, T. Herrmann, P. Muchab, H. Halouic, J. L'huillier, Physics Procedia, **12**, 292-301, 2011..

Filled-aperture coherent summation technique for multiple high average power laser beams

Laser Process Research Team

Haik Chosrowjan, Seiji Taniguchi, Masayuki Fujita, and Yasukazu Izawa

1. Introduction

Powerful lasers with high brightness and good beam quality are increasingly required for many applications in material processing, medicine, environment monitoring, etc. To reach higher intensities, one needs to increase the output power of the laser beam and at the same time keep or improve the beam quality.

Within a “High-power laser development for efficient material processing applications” project of NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization of Japan), we are developing single mode, 400 ps - 10 ns adjustable pulse duration, high repetition rate (500 kHz - 1 MHz), tunable (1040 nm - 1060 nm) high average power (150 W - 200 W) laser amplifier units based on Yb-doped LMA (large mode area) PCFs (photonic crystal fibers). For final design of a desired laser system with 1.5 kW average output power, beam combining concept seems to be one of the viable choices. The motivation behind it is simple; to achieve higher power, intensity and brightness than is obtainable from a single laser source. A number of coherent, incoherent and spectral beam combining techniques have been already proposed¹⁾. Theoretically, for far-field on axis applications, TA (tiled-aperture, side by side alignment of the beams) CBC (coherent beam combining) is better suited, because in contrast to FA (filled-aperture) beam combining techniques, in this case the central lobe intensity I is proportional to $\sim N^2$, where N is the number of amplified beam channels. However, in practice this method is often impaired by an important factor f - aperture fill-factor, which is in most practical cases remarkably smaller than unity. As shown in Fig. 1 (a), the appearance of side lobes in far-field (beam focus) due to $f < 1$ makes TA designs disadvantageous for precision cutting and

drilling applications on CFRP (carbon fiber reinforced plastics) or applications in MEMS (micro-electro-mechanical systems). For such cases, FA CBC designs are preferred, because FA CBC is side lobe free (Fig. 1 (b), bottom), hence better suited for the precision material processing. Additionally, using side lobe free beam profiles, SH (second harmonics) and TH (third harmonics) can be also efficiently generated, which are indispensable for some specific material processing applications.

Basically, there are two modes for FA CBC: polarization addition and DOE (diffractive optical element) based combinations. Several FA CBC implementations have been already proposed and realized^{2,3)}. In polarization combination technique, for addition of each 2 beam pairs, 2 detectors, a polarizer cube and a $\lambda/2$ wave-plate are required, making the scaling of the number of beams quite challenging. In single DOE based FA CBC technique, the requirements on DOE are very strict (diffraction limited), making DOE fabrication

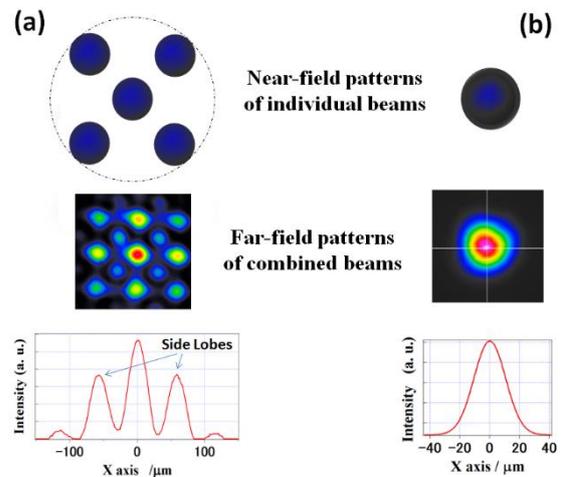


Fig. 1 (From top to bottom) Near-field, far-field and (x, 0) intensity distribution profiles for (a) tiled- and (b) filled-aperture CBC cases.

challenging and very costly. Moreover, in single DOE based CBC the number of beams is fixed, i.e. to increase the number of the beams by just one beam, one needs to manufacture a new DOE suitable for that number. Hence, simple scaling of the beams number in CBC based on a single DOE is impossible. Finally, when multiple DOEs (50/50 beam splitters) have been used, multiple detectors have been often employed, like in the case of polarization addition. Here we propose a single-detector, FA CBC geometry based on half mirrors design and use of simple “climbing hill” or SPGD (stochastic parallel gradient descent) algorithms for phase locking. As a proof of a principle, it is demonstrated for four low power beams in CW regime. In the final laser system design, 3 CBC units combining four beams each (~600 W total power per unit) at slightly different wavelengths has been planned. In the final stage, outputs of those three CBC units will be combined by SBC (spectral beam combination) technique, eventually delivering more than 1.5 kW average output power beam for material processing applications.

2. Experimental

Laser beam from a master oscillator (1064 nm, $d \sim 2$ mm) was split into four channels and aligned again in FA design as shown in Fig. 2. All four beams imitate “amplified” beams to be combined coherently. The “amplification process” in each channel will induce independent time variations of beam phases due to thermal, mechanical and non-linear optical effects. To compensate and lock the phases between the beams, a single photo-detector (PD) was placed in the path of the diagnostics ($\ll 1\%$) beam after the last beam splitter. The signal captured by the fast PD was used as a feedback control signal to piezo-actuators (PM1 - PM3) located on the paths of three beams. The fourth channel was used as a reference beam and its phase was not controlled. The PD signal was maximized by a feedback loop to PMs using simple “climbing hill” algorithms. In contrast to TA CBC⁴, no aperture in front of the PD is required for the presented FA CBC method.

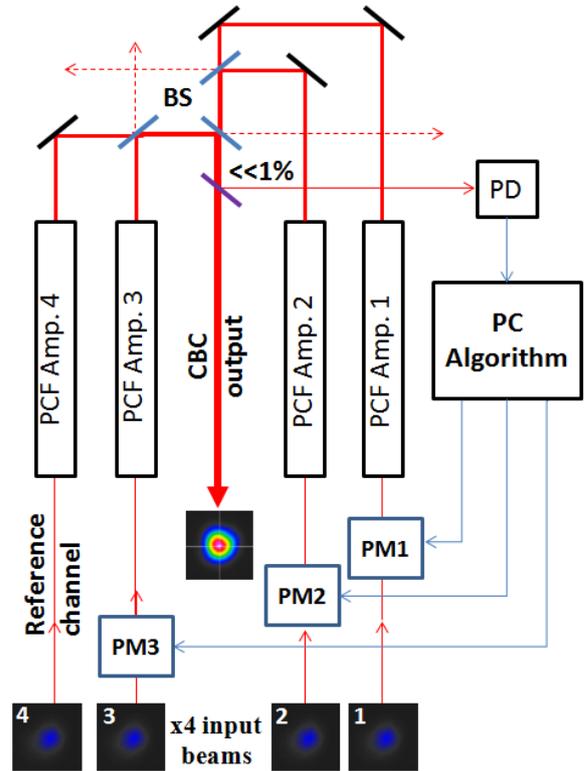


Fig. 2 Schematic diagram for 4 beam FA CBC apparatus.

PM1 - PM3 - phase modulators, BS - beam splitters, PD - photo-detector.

We have tested two algorithms; one is based on discrete Bernoulli distribution with zero mean value dithering SPGD, and another is based on quasi-two dimensional diagonal climbing hill logic on the power-phase map. Here we will describe only the Bernoulli distribution based algorithm. Briefly, Bernoulli distribution is a discrete probability distribution which takes value 1 with success probability and value 0 with failure probability. At an arbitrary starting point, we supply small voltage with the same amplitude ($|\delta V_i|$) to all three piezo-actuators (PM1-PM3, Fig. 2). The voltage sign to each PM, however, is applied in such a way, that the mean value of the applied voltage to each PM over many iteration steps remains zero. For the three PMs ($N = 3$), there are eight possible combinations ($2^N = 8$) and four possible dithering pairs ensuring zero mean values. After the first dithering step, the PD signals for positive (P_+) and negative (P_-) movement directions are captured. For the next step, the control algorithm

uses the following recurrent formulae (1) and makes a guess for the magnitude and direction of the “Bernoulli voltages” to be applied to each PM.

$$V_i = V_{i,n-1} + \gamma * \delta V_i * (P_+ - P_-) \quad (1)$$

Here, $V_{i,n}$ is the “Bernoulli voltage” applied to the i^{th} PM at the n^{th} iteration. γ is the gain constant, δV_i is the dithering voltage for the i^{th} PM and P_+ and P_- are the PD readings for positive and negative movement directions, respectively. In this way the PD signal is maximized and the $(P_+ - P_-)$ difference is minimized. Eventually, the system converges and reaches the maximum PD value. It is kept there as long as the algorithm is running. The whole described process continues indefinitely. As a result, the phases of all beams are locked and the output formed by them behaves as a single coherent beam. Figure 3

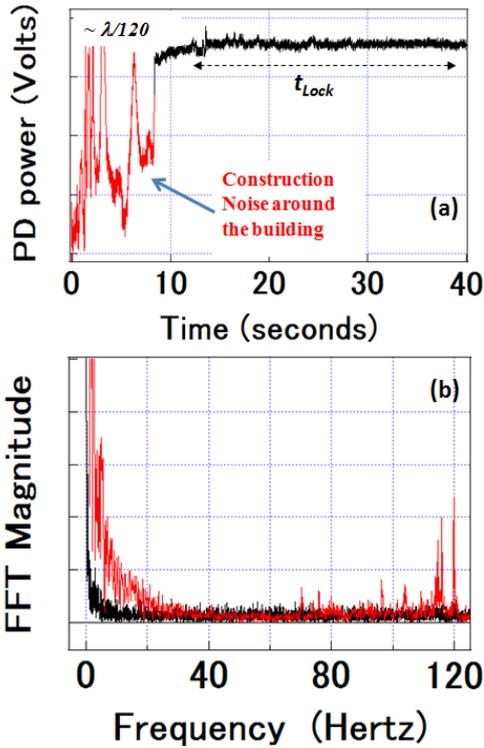


Fig. 3 4 beams CBC unit’s phase locking convergence, *RMS* deviation and stability (a), and corresponding bandwidth (Fourier transform) for the construction noise around the laboratory (b). In each graph the red and black lines show the cases when the CBC system is “off” and “on”.

shows an example of the phase locking convergence, stability and bandwidth for four beams CBC in CW regime. Typical values for piston phase *RMS* deviation and phase locking convergence time were estimated to be $\sim \lambda/100$ and ~ 0.1 s, respectively. The same CBC scheme and algorithms can be used also for high repetition rate (> 500 kHz), sub-ns or longer duration pulse beams. This can be achieved by adjusting temporal overlaps of the pulses in all four beams and by simply keeping the bandwidth ($\Delta\omega$) of the single photo-detector well below the pulse repetition rate, averaging the captured signal over many pulses and maximizing it by SPGD algorithms.

The CBC efficiency S (Strehl ratio) for the present system was estimated to be ~ 0.9 (Fig. 4). The *RMS* deviation of the piston phase was roughly estimated to be $\sim \lambda/100$, which accounts for less than 1% of the CBC efficiency drop. The remaining drop was caused by the power imbalance between individual beams, divergence, pointing, overlap mismatches and wavefront distortions of the individual beams. Several of these factors causing the efficiency drop in binary-tree FA CBC have been analyzed theoretically. As an example, two typical results describing the efficiency drop due to the beam splitter imbalance and wavefront deformation (small, non-correlated wavefront *RMS* deviation (σ) case) are

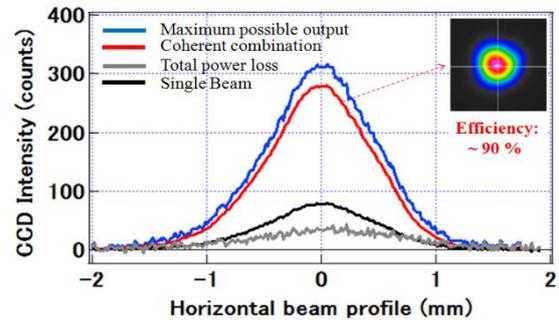


Fig. 4 (bottom to top) Far-field intensity distribution profiles on a $(x, 0)$ horizontal axis shown for total power loss (gray), single beam (black), coherent combination (red) and maximum possible output (blue), respectively.

presented in Fig. 5. The contribution to the efficiency drop from the BS imbalance, as seen from Fig. 5 (a), is quite manageable. For example, even for 70% transmission (30% reflection) values for all BSs, the Strehl ratio can be kept greater than 0.9, if no other efficiency drop sources exist. Similarly, calculations confirm that contributions to the efficiency drop from the power imbalances, spot-size mismatches and lateral shifts of individual beams are not critical (not shown here). However, as shown in Fig. 5 (b), the steepest drop in CBC efficiency is expected from the wave-front phase deformations of the individual beams. Namely, to achieve 0.9 or higher Strehl ratio, one needs to keep the σ values of individual beams at $\lambda/20$ or smaller. It is also important to note, that for high average power CBC case, except phase-front deformations caused by amplifiers, all optical components such as BSs and mirrors could also introduce wave-front distortions, further reducing the combining efficiency⁵. This, however, is not a CBC-method specific efficiency drop, but caused by the FA CBC nature itself, which can be essentially considered as a “spatial coherence filter”.

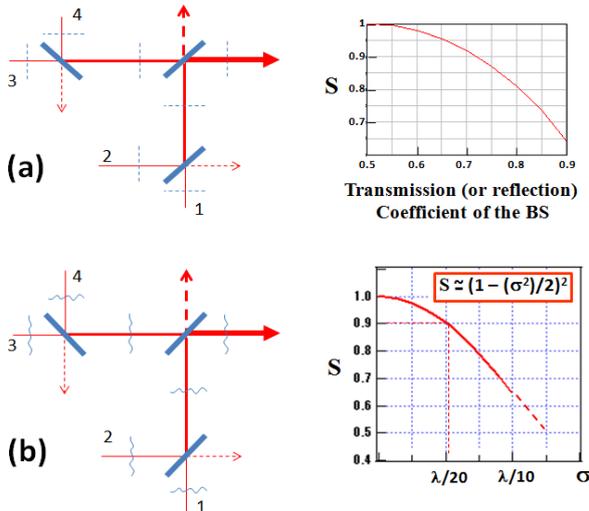


Fig. 5 Analysis of beam combining efficiency S (Strehl ratio); (a) No wavefront distortions; S dependence on the beam splitters transmission (or reflection), (b) No power imbalance; S dependence on non-correlated wavefront RMS deviation σ .

3. Conclusions

For industrial applications of high average power laser beams in precision machining like cutting/drilling on CFRP materials, a simple and cost effective CBC scheme using single-detector, filled-aperture coherent beam combining technique for CW and high repetition rate ns pulse laser beams has been proposed and demonstrated. Proof of principle experiments and efficiency calculations have been performed for four beams coherent combination. The combining efficiency for the present laser system was experimentally estimated to be ~ 0.9 . The proposed CBC technique can accommodate kW level average power beams, be integrated into various MOPA architectures and perform with high speed and accuracy. The phase RMS deviation (combining sensitivity) for the present laser and experimental set-up was estimated to be $\sim \lambda/100$. Due to the piezo-actuator bandwidth of ~ 1 kHz, at present we can reach only ~ 100 Hz phase locking bandwidth at best. In real amplifier systems the phase drift will be faster, so using piezo-actuators is not practical for single diode CBC and faster phase shifters like electro-optical modulator (EOM) units have to be employed.

References

- 1) T. Y. Fan: IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **11**, 567-577, 2005.
- 2) A. Klenke, S. Breitkopf, M. Kienel, T. Gottschall, T. Eidam, S. Hädrich, J. Rothhardt, J. Limpert, and A. Tünnermann: Opt. Lett., **38**, 2283-2285, 2013.
- 3) E. C. Cheung, J. G. Ho, G. D. Goodno, R. R. Rice, J. Rothenberg, P. Thielen, M. Weber, and M. Wickham: Opt. Lett. **33**, 354-356, 2008.
- 4) T. Weyrauch, M. A. Vorontsov, G. W. Garhart, L. A. Beresnev, A. P. Rostov, E. E. Polnau, and J. J. Liu: Opt. Lett. **36**, 4455-4457, 2011.
- 5) W. Liang, N. Satyan, F. Aflatouni, A. Yariv, A. Kewitsch, G. Rakuljic, and H. Hashemi: J. Opt. Soc. Am. **24**, 2930-2939, 2007.

低温冷却 Yb:YAG TRAM レーザーの時間変化計測

レーザープロセス研究チーム

櫻井俊光、ハイク コスロービアン、谷口誠治、河仲準二¹、宮永憲明¹、石井伸也²、
藤田雅之、井澤靖和

¹大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

²三菱重工株式会社

1. はじめに

固体レーザー開発における重要な課題の一つは、レーザー媒質の冷却技術である。Yb:YAG は、Nd:YAG に比べて量子欠損が小さく、本質的に、高効率、低熱損失が期待できる固体レーザー材料といえる。さらに、低温冷却すれば、低い励起入力で大きな増幅利得が得られ、熱伝導特性が向上するため、レーザー媒質の温度上昇を抑えながら、より高い効率と高ビーム品質が可能となる。当研究所では、Yb:YAG を用いた全反射アクティブミラー方式の TRAM (Total Reflection Active Mirror) レーザー¹⁾ を提案し、高出力レーザーの開発を行ってきた²⁾。TRAM では Yb:YAG を直接液体窒素で冷却する方式を採用している。

一方で、Yb:YAG から放出される蛍光スペクトルの形状が温度に依存して変化することを利用して、LD 励起された Yb:YAG の温度を評価する手法を開発し、レーザー媒質内の空間温度分布の測定を行うとともに、温度解析結果との比較を行ってきた⁷⁾。昨年度はこの手法を拡張し、温度の時間変化を測定できるようにスペクトル計測系を改良した。本稿では Yb:YAG 温度の時間変化計測結果について紹介する。

2. 温度評価の原理と実験方法

Yb:YAG 蛍光スペクトルの温度依存性を図1に示す。低温では数本のピークが観測されるが、温度上昇とともにピーク強度が減少し、なだらかなスペクトル形状となる。図2は、1022 nm のピークと 1027 nm の谷の位置での蛍光強度比の温度依存性である。この比を測定することにより Yb:YAG の動作温度を評価できることがわかる。

温度評価のための蛍光スペクトル計測実験配位を図

3に示す。最大出力3 kW のスタック LD 光を TRAM (9.8

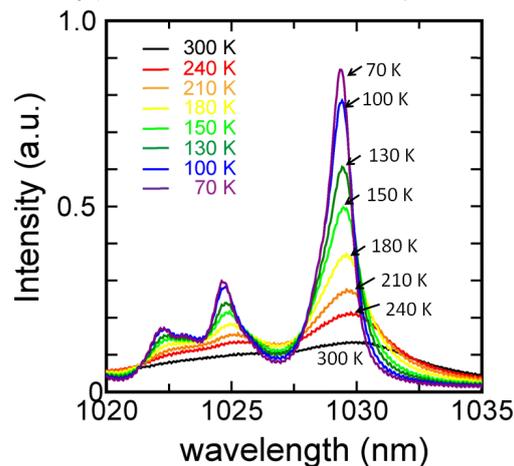


図1 Yb:YAG の蛍光スペクトルの温度依存性

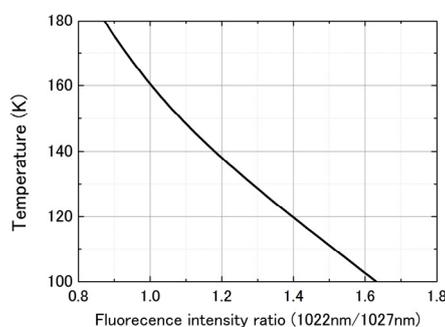


図2 蛍光スペクトルの強度比(1022 nm/1027 nm)と温度の関係

at% Yb:YAG, 0.6 mm 厚) に照射した。Yb:YAG 励起面での LD 光のサイズは 10 mm × 11 mm である。励起領域中心部からの蛍光をファイバで導き分光器 (Oceans Opt. HR4000、波長帯域: 920–1080 nm、分解能: 0.2 nm) に入射した。

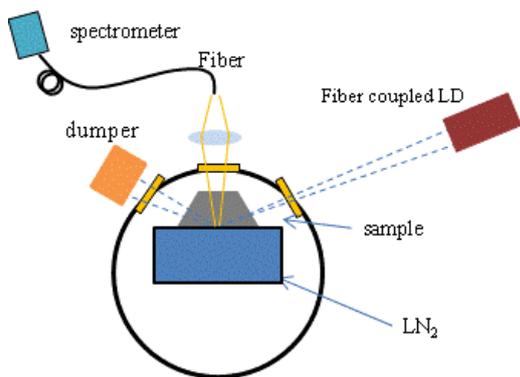


図3 蛍光スペクトル計測実験配位

分光器付属のソフトウェアを利用して蛍光スペクトルの時間変化を抽出して保存した。実際の計測では、10 ms 毎に計測されたスペクトルの3データの平均値を取出し保存できるように設定した。スペクトルデータの中から 1022 nm と 1027 nm を中心とする波長幅 0.05 nm 内のデータを平均して、2 波長における蛍光強度比を求めるソフトを開発した。

3. Yb:YAG の温度上昇と液体窒素の沸騰評価

図4に、蛍光強度比から得られた Yb:YAG 温度の時間変化を示す。励起用 LD パワーが 331 W 以下では、Yb:YAG の温度は LD 照射後数秒から 10 秒以内に平衡温度まで上昇し、その後ほぼ一定値を保っている。平衡温度は LD パワーの増大とともに 95 K 程度まで上昇している。一方、LD パワーが 331 W より大きい場合では、温度 95 K 付近から 110 K 程度まで、急激に温度が上昇する現象が見られる。LD パワーが大きくなるに

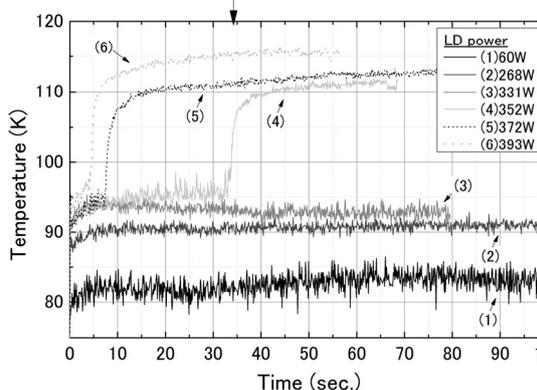


図4 蛍光スペクトルの強度比から評価した Yb:YAG 温度の時間変化

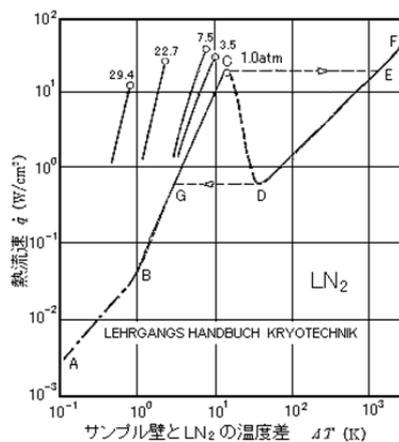


図5 液体窒素の沸騰曲線. A-C:核沸騰領域、C-D:遷移沸騰領域、D-F:膜沸騰領域

つれて、急激に温度が上昇するタイミングが早くなっている。

95 K 付近から見られる急激な温度上昇は Yb:YAG を冷却している液体窒素が核沸騰から膜沸騰へ移行することによるものと考えられる。図5は常圧時における液体窒素の沸騰曲線である⁵⁾。図5によると、サンプル壁(今の場合 Yb:YAG) と液体窒素の温度差が 20 K までの間(図中の A 点から C 点の間)は、サンプル壁から液体窒素への熱流束は増大するが、C 点を超えると熱流束は急激に減少する。これは液体窒素が核沸騰から膜沸騰へ移行することによる。C 点を越えたところで Yb:YAG と液体窒素の界面に窒素ガスの膜が生成されて除熱効率が極端に低下することになる。

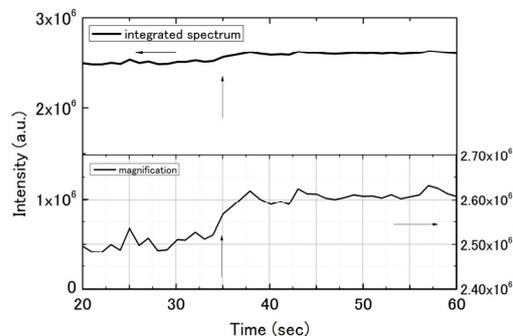


図6 蛍光スペクトルの積分値の時間変化。下部に拡大図を示す。急激な温度上昇時刻を矢印(↑)で示す(図4の時刻↓に対応している)

図 6 は測定した蛍光スペクトルデータを波長 1020 nm から 1035 nm の領域で積分した蛍光強度の時間変化である。図中矢印で示した時点で蛍光強度のわずかな増大が見られる。この時点は、図 4 に示す温度の時間変化で、急激な温度上昇が見られる時点と同じ時刻である。図 3 に示した実験配位でファイバは、Yb:YAG からファイバ方向に放出される蛍光成分と、液体窒素側に放出され液体窒素と Yb:YAG 界面で反射され戻ってくる蛍光成分を受光している。液体窒素が核沸騰から膜沸騰に移行すると液体窒素と Yb:YAG 界面での反射率が変化する。

液体窒素の屈折率 $n_{LN_2} = 1.2$ 、窒素ガス (N_2) の屈折率 $n_{N_2} = 1.0003$ 、YAG の屈折率 $n_{YAG} = 1.82$ を考慮して Yb:YAG- LN_2 界面の反射強度 (I_R) は、入射の蛍光強度を I_{total} として、

$$I_R^{LN_2}/I_{total} = [(n_{YAG} - n_{LN_2})/(n_{YAG} + n_{LN_2})]^2$$

で表現される。界面での屈折率変化により蛍光が反射される N_2 と LN_2 における強度比 ($I_R^{N_2}/I_R^{LN_2}$) は $0.085/0.042 = 2.01$ である。界面での反射を含めた全体の蛍光強度比は $(1+0.085)/(1+0.042) = 1.041$ であり、窒素ガスの場合は液体窒素の場合に比べて 4.1% 増加する。実験で得られた増加率は 4.4% であり、ほぼ計算値と一致している。すなわち、急激な温度上昇後における Yb:YAG 界面では、液体 (LN_2) ではなく気体 (N_2) が定常的に生成されている、液体窒素の膜沸騰状態にあ

ると考えられる。

4. まとめ

レーザー媒質の排熱効率を向上させることが高平均出力レーザー開発では重要な要素技術となる。そこで本研究では、LD 励起時における Yb:YAG 温度の時間変化を計測した。その結果、LD パワーの増大に伴い、温度が 95K から 110K 程度まで急激に上昇する現象が観測された。液体窒素の沸騰曲線と、急激な温度上昇が観測される時点での蛍光強度の変化より、この急激な温度上昇は液体窒素が核沸騰から膜沸騰へ移行することに起因していると推測される。膜沸騰状態では、核沸騰状態よりも液体窒素の除熱特性が劣化するため、より高出力化をめざすためには、大きな除熱効果が期待できる冷却技術の開発が重要である。

参考文献

- 1) 古瀬ほか: ILT2010 年報, レーザー技術総合研究所, 2010.
- 2) 古瀬ほか: ILT2011 年報, レーザー技術総合研究所, 2011.
- 3) 古瀬ほか: ILT2012 年報, レーザー技術総合研究所, 2012.
- 4) 古瀬ほか: ILT2013 年報, レーザー技術総合研究所, 2013.
- 5) H.Furuse et al.: Opt. Lett., **34**, 3439-3441, 2009.
- 6) H.Furuse et al.: Opt. Express, **20**, 21739-21748, 2012.
- 7) 櫻井ほか: ILT2013 年報, レーザー技術総合研究所, 2013.
- 8) <http://frontier.ltm.kyoto-u.ac.jp/kouginote.html>

レーザーラマン分光法による変圧器油中フルフラール分析

レーザープロセス研究チーム

染川智弘、笠岡 誠¹、永野芳智¹、藤田雅之、井澤靖和

¹かんでんエンジニアリング

1. はじめに

変圧器は電気を効率よく消費地に送電するために使用される機器である。発電所で発電された電気は発電所内の変圧器によって適切な電圧に昇圧して送電し、途中の変電所や需要家側が設置している変圧器で所要の電圧に降圧して利用されている。そのため、変圧器の状態を監視し異常を早期に検出することは、電力設備の信頼性を確保するのに不可欠である¹⁾。

変圧器では、電圧と電流の大きさを変換する鉄心と巻線が絶縁油で満たされた油入変圧器が一般的であり、変圧器全体の約 90%を占めている。運転中の変圧器内部で異常が生じた際、異常箇所、異常内容に応じて絶縁油または絶縁紙が分解され、特有のガス成分や、紙の主成分であるセルロースが分解してフルフラールが発生する。これらの物質は変圧器内の絶縁油に溶解するため、この溶存成分を分析することにより、変圧器の内部異常を診断することができる(図1)。油中溶存成分の分析

には、一般的に絶縁油中のガスやフルフラールを抽出した後、ガス・液体クロマトグラフィーにより測定するが、変圧器からの採油や対象物質の抽出など時間のかかる前処理工程を必要とする。そこで、油からガスを抽出することなく、レーザーを用いて直接油中の異常同定物質の分析手法を開発している。これまでに、絶縁油由来の評価物質であるアセチレンガスのラマン分光測定を行ってきた²⁾。アセチレンガスは放電により絶縁物が非常に高温にさらされた時に発生するため、変圧器の内部異常を診断するために重要な測定ガスとされ、本手法では 0.37%の検出限界で油中のアセチレンの評価が可能であった。

本報告では、これまでの絶縁油が分解された際に出るガス成分だけでなく、絶縁紙が分解させた際に生成するフルフラールに対して行ったラマン分光測定の結果を報告する。フルフラールは油のラマンスペクトルと重複することなく検出できることがわかった。

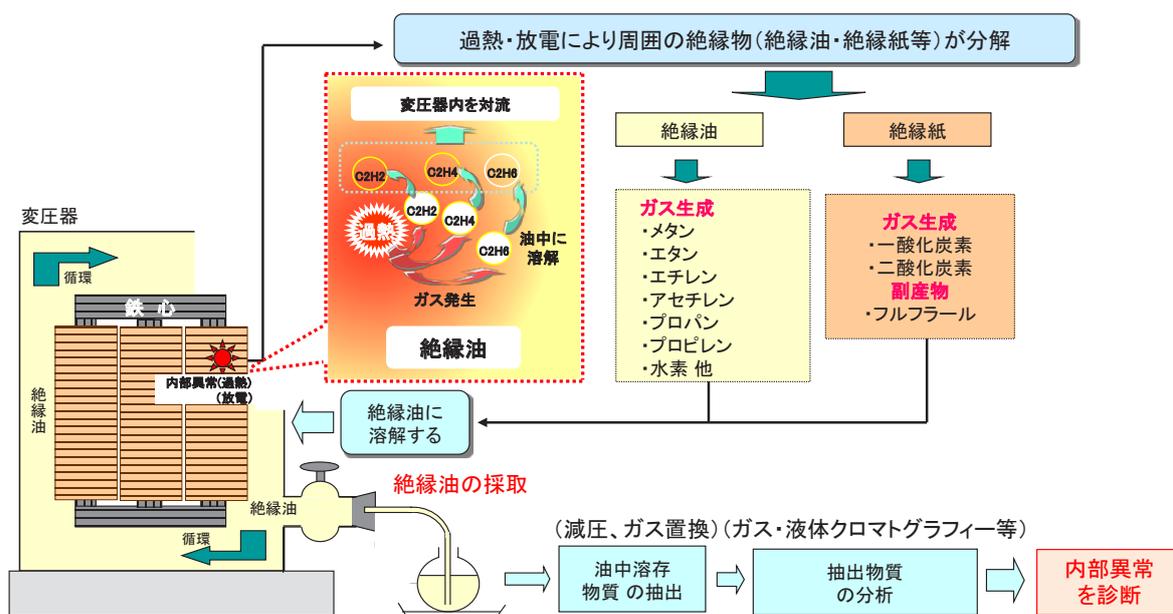


図1 変圧器の絶縁油溶存ガスを用いた従来の異常診断手法

2. 油溶存フルフラールのラマン分光計測

2.1 フルフラール

フルフラールは図 2 の挿入図に示すような構造式をしており、アルコール、エーテルなどの有機溶剤には易溶であるが、水やアルカン類には微溶である。もともとは透明の液体であるが、水や空気によりすぐに酸化し茶色に変色する。また、本実験で使用した絶縁油はかんてんエンジニアリング社製のサンオームオイル MU である。組成はナフテン系炭化水素が 41.6%、パラフィン系炭化水素が 50.0%、芳香族炭化水素が 8.4%である。また、少量のベンゾトリアゾール (BTA) を添加物として含んでいる。

図 2 に新油とフルフラールの透過スペクトルを示す。透過スペクトルの測定には、分光光度計 U-4100 を用いた (石英セル: 光路長 10 mm)。測定の波長分解能は 1 nm である。挿入図には測定を行ったフルフラールを示す。フルフラールは茶色であることからわかるように新油に比べて、青～緑領域で吸収が見られる。850 nm に見られるくぼみは分光光度計の光源を切り替える際に見られたノイズである。

2.2 油溶存フルフラールのラマン分光実験

図 3 にラマン実験配置図を示す。試料油は挿入図に示すようなΦ3 cm のバイアル瓶に入れた。使用したレーザー光は波長 532 nm、パルス幅 10 ns、繰り返し 10 Hz、パルスエネルギー 100 mJ である。このレーザーを集光せず

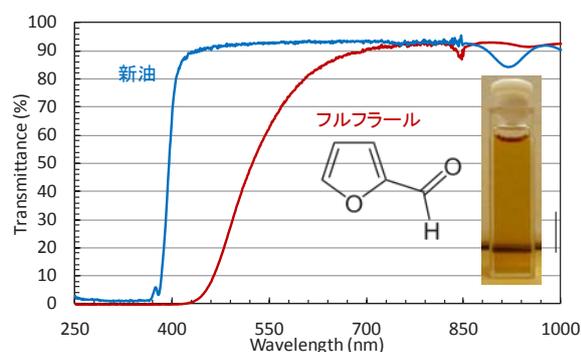


図2 新油、フルフラールの透過スペクトル
(挿入図: フルフラールの構造式とサンプル写真)

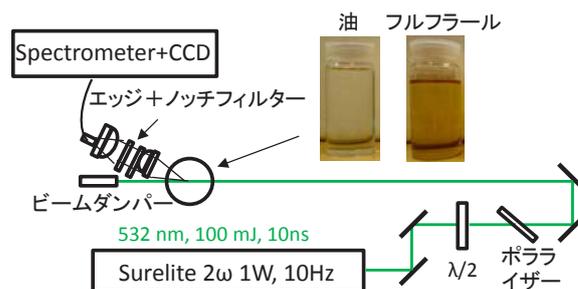


図3 油溶存アセチレンのラマン分光実験配置図

マン散乱を測定している。集光光学系には 532 nm のエッジフィルターとノッチフィルターを挿入し、背景光となる波長 532 nm のレイリー光をカットしている。ファイバーで分光器まで導き、液体窒素冷却 CCD カメラで測定した。CCD カメラの露光時間は 90 ms である。

図 4 に(a)油、(b)フルフラールのラマンスペクトルを示す。500 回積算信号を 5 回平均したスペクトルであり、波長分解能は 0.27 nm である。(a)油では、 $\sim 1450 \text{ cm}^{-1}$ に $\text{CH}_3\text{-CH}_2$ の変角モードの大きな信号が見られ、 $\sim 1302, 1350 \text{ cm}^{-1}$ に見られる二つの信号は C-H のねじれモードと考えられる。また、 $\sim 1610 \text{ cm}^{-1}$ に見られる信号は芳香族系の C=C の伸縮モードであり、 $\sim 2725 \text{ cm}^{-1}$ は C-H の伸縮モードと考えられる。

図 2 からフルフラールは波長 532 nm に吸収があるために蛍光が出ることが予想されたが、フルフラールは波長 532 nm で蛍光を発しないことがわかる。(b)フルフラールでは $\sim 1372 \text{ cm}^{-1}$ に H-C-C/O の変角モードが見られ、 $\sim 1398 \text{ cm}^{-1}$ が C-C の伸縮モードである。また、 $\sim 1478, \sim 1573 \text{ cm}^{-1}$ に見られるラマン信号は C=C の伸縮モード、 $\sim 1675 \text{ cm}^{-1}$ に見られるラマン信号が C=O の伸縮モードである⁴⁾。したがって、(a)油のラマンスペクトルと比較すると、フルフラールは油由来の信号とは識別できる $\sim 1675 \text{ cm}^{-1}$ のラマン信号を持つことがわかる。

次に油にフルフラールを溶存させたモデル試料のラマンスペクトルを図 5 に示す。スペクトルはそれぞれ 3000 回積算信号 (露光時間: 90 ms) の 5 回平均をとり、波長分解能は 0.23 nm である。フルフラール濃度は液体クロマトグラフィーで別途測定し、104, 251, 415, 900, 1106 ppm である。

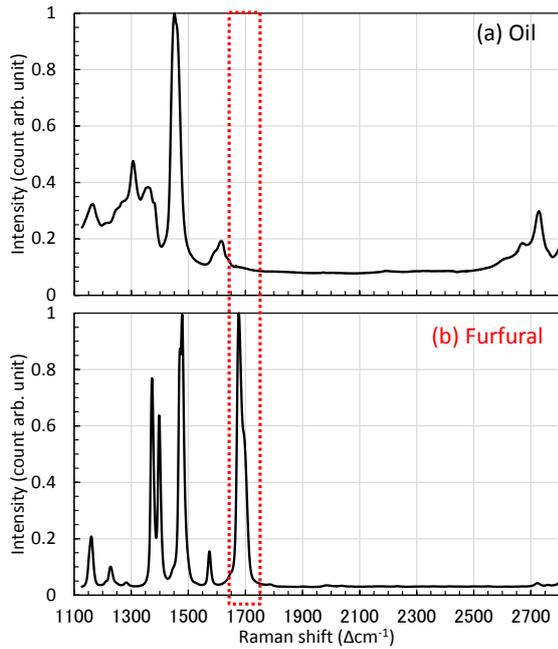


図4 (a)油、(b)フルフラールのラマンスペクトル

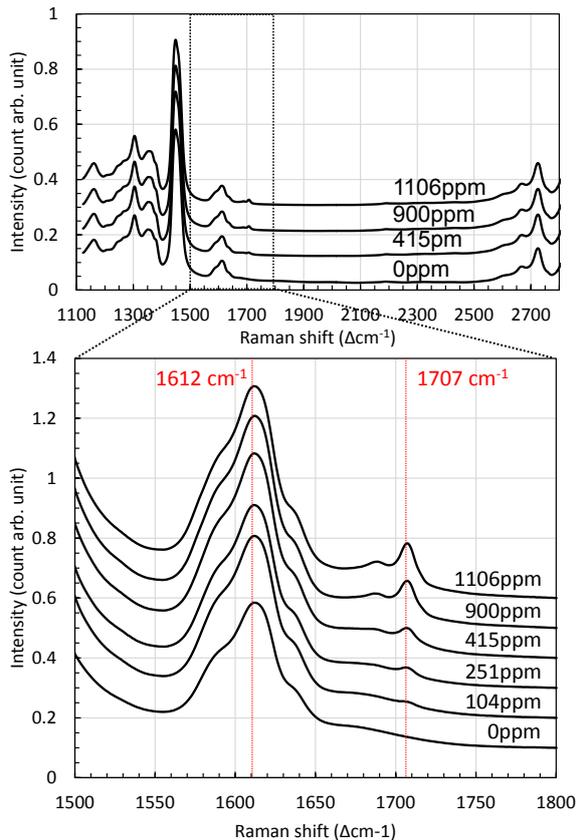


図5 油溶存フルフラールのラマンスペクトル

上図が 1100~2800 cm^{-1} の広帯域なスペクトルであり、下図がフルフラールのラマン信号が見られる 1500~1800 cm^{-1} の拡大図である。~1707 cm^{-1} にフルフラール

の C=O の伸縮モードが確認でき、油由来のラマン信号と区別して測定できることがわかる。ここで、~1707 cm^{-1} に見られるフルフラールの信号は図4に示した信号とスペクトル形状が異なっていることがわかる。このラマン信号は2本のピークが重なるダブルレットであり、フルフラールと溶媒との濃度によってフルフラールの異性体の割合が変化し2本のピーク高さが変化していると考えられる⁵⁾。

2.3 検出限界の検討

ラマン分光では、測定時のレーザー強度のふらつきや、光路の状態によってラマン信号強度が変化するために、定量評価には同時に取得した濃度が一定である他のラマン信号強度との比を用いる。フルフラールの検出限界の検討には図5に示した油由来の~1612 cm^{-1} のラマン信号とフルフラール (~1707 cm^{-1}) のラマン信号強度とのラマン信号強度比を利用した。

図6にフルフラール (~1707 cm^{-1}) と油 (~1612 cm^{-1}) のラマン信号強度比と濃度の関係を示す。測定の誤差は5回測定の平均値からの誤差で評価しているが、シンボルに隠れる程度である。0ppmの1675~1720 cm^{-1} の直線近似からのずれの標準偏差 σ の 3σ で検出限界を定義すると 14.4ppm (0.00144%) であることがわかった。

フルフラールを指標とした絶縁紙の劣化診断は注意レベルで 1.5ppm、危険レベルで 15ppm (0.0015%) である⁶⁾。したがって、本手法では危険レベルでのフルフラールの測定は可能ではあるが、より検出感度の向上が必要である。

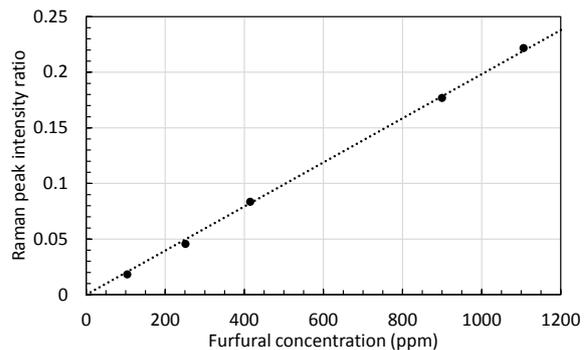


図6 ラマン信号強度比とフルフラール濃度の関係

3. まとめ

変圧器の異常診断をその場で簡易に行う手法としてレーザーラマン分光法を用いた油溶存物質の検出手法の開発を行っている。これまでに波長 532 nm のパルスレーザーを用いて絶縁油の分解生成物であるアセチレンの油溶存状態でのラマン信号の検出に成功しており、本報告では絶縁紙が分解した際に生じるフルフラールの油溶存状態での検出に成功した。

本手法を利用すれば、レーザーを油に照射するだけで、その場で絶縁油・紙由来の変圧器の異常を診断することが可能となる。現状のフルフラールの検出限界は 14.4ppm と危険レベルでの検知は可能であるが、今後はさらに測定システムの検出感度を向上し、その場での実

機絶縁油測定に向けた研究を行う予定である。

参考文献

- 1) 石油学会編: 電気絶縁油ハンドブック, 講談社, 1987.
- 2) T. Somekawa, M. Kasaoka, F. Kawachi, Y. Nagano, M. Fujita, and Y. Izawa: *Opt. Lett.*, **38**, 1086-1088, 2013.
- 3) 染川智弘, 笠岡誠, 河内二三夫, 永野芳智, 藤田雅之, 井澤靖和: *ILT 年報*, レーザー技術総合研究所, 2013.
- 4) T. Kim, R. S. Assary, L. A. Curtiss, C. L. Marshall, P. C. Stair: *J. Raman Spectrosc.*, **42**, 2069-2076, 2011.
- 5) G. Allen and H. J. Bernstein: *Can. J. Chem.*, **33**, 1055-1061, 1955.
- 6) S. Okabe, G. Ueta, T. Tsuboi: *IEEE Trans. Dielectr. Insul.*, **20**, 346-355, 2012.

レーザーを用いたコンクリート埋め込みボルトの健全性評価技術の開発

レーザー計測研究チーム

島田義則、コチャエフ オレグ、御崎哲一¹、高橋康将¹、瀧浪秀元¹

¹西日本旅客鉄道株式会社

1. はじめに

近年、高度成長期に建設された構造物の老朽化が大きな社会問題となっている。鉄道ではトンネルの覆工コンクリートが剥落して新幹線のパンタグラフや屋根を損傷した事故や、高速道路では吊り天井が崩落した事故などが起こっており、構造物の健全性を効率よく診断できる技術の開発が急務である。

現在、健全性の評価には打音検査法（打音法）¹⁾が主に用いられている。ハンマーで構造物表面をたたき、健全部と劣化部の音スペクトルの違いから劣化部を検出するものである。この手法には、人的および時間的な面でコストがかかることや客観的データに乏しいこと、更に前の検査と比較した劣化進行状況（経年劣化）が把握困難であることなどの問題がある。このため、低コスト、高速、高精度で検査できる新しい検査手法の開発が強く求められている。

打音法に代わる検査方法として、レーザーを用いた方法（レーザー法）がある。パルスレーザーをコンクリート表面に照射して振動を誘起し、表面振動をレーザー干渉計で計測して欠陥などを検出する手法で、遠隔かつ非接触で検査が行え、他の方式に比べて検査箇所への高速移動が可能であることや、コンクリート曲面の計測が容易に行えるなどの利点がある。当研究グループではレーザー法の実用化を目指して、検査技術に関する基礎実験を行い、装置の開発を進めてきた¹⁻²⁾。これまでに、この技術を山陽新幹線トンネルに適用して、欠陥検出性能を有することを確認した。また、検出システムの小型化に取り組み、新幹線ト

ンネルの中央通路を走行してトンネル覆工コンクリート検査を行える装置の開発を行った³⁾。

レーザー法はトンネル覆工コンクリート検査のみならず、トンネル内の下束や照明器具、配管などを固定するためのケミカルアンカボルトの欠陥検査にも適用できる可能性がある。当研究グループではレーザー法を用いてボルト等の検査技術を確立するために基礎実験を開始した。

本稿ではボルトとコンクリートを接着させるケミカル樹脂量を変化させたコンクリート供試体を作製して欠陥ボルトの検出実験を行って、その可能性を確認した⁴⁾。この結果について述べる。

2. ボルト埋め込みコンクリート供試体と計測結果

ケミカル樹脂注入量の違いや削孔が複数ある欠陥ボルトなど3種類のコンクリート供試体を用意した。3種類のボルトの違いを図1に示す。ボルト径は24mmφ、削孔深さは360mmでボルトを底まで挿入した。ボルト“1”は360mmの削孔全てにケミカル樹脂を注入した健全ボルトである。ボルト“2”はケミカル樹脂注入量をコンクリート面から深さ30mmまでとした樹脂注入量不足欠陥ボルトである。ボルト“3”は斜め方向を含めて削孔が複数本ある試験体で、垂直方向の削孔にのみボルトを挿入し、削孔全てにケミカル樹脂を注入してある。

はじめに、インパクトハンマーを用いて打撃力を一定とした場合の各ボルトの振動スペクトルを計測した。図2中図にコンクリート供試体を上から見た写真を示す。左側がボルト“3”、右側が

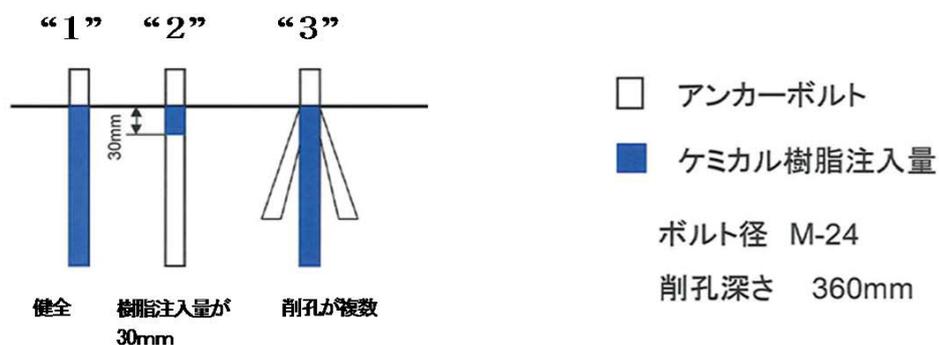


図1 ケミカル樹脂注入量やボルト埋め込み長さ等を変化させたコンクリート供試体

ボルト“2”である。ボルト上部の側面を打撃し、ピエゾセンサーをボルトの頭に取り付けた。図2上図にボルト“3”の時系列波形とその周波数スペクトルを示す。ボルト“3”は健全ボルト“1”と同じ1kHzの卓越振動数をもつ周波数スペクトルを示した。この結果より、ボルト“1”とボルト“3”は周波数スペクトルでは区別がつかず削孔が複数でも健全の応答を示すことが分かった。

また、図2下図にボルト“2”の時系列波形とその周波数スペクトルを示す。ボルト“2”は多くの

卓越振動数を持つ大きな揺れを示した。これよりケミカル樹脂注入量不足のボルトは健全ボルトと区別することが可能であることが分かった。

次にレーザーを用いた計測結果を示す。レーザー装置からコンクリート供試体までの距離は7.5mである。図3中図はコンクリート供試体をレーザーが照射される正面から見た写真で、左側がボルト“2”、右側がボルト“3”である。衝撃波励起用レーザーには4Jの炭酸ガスレーザーを用いた。レーザーをボルトに集光照射すると痕が残るた

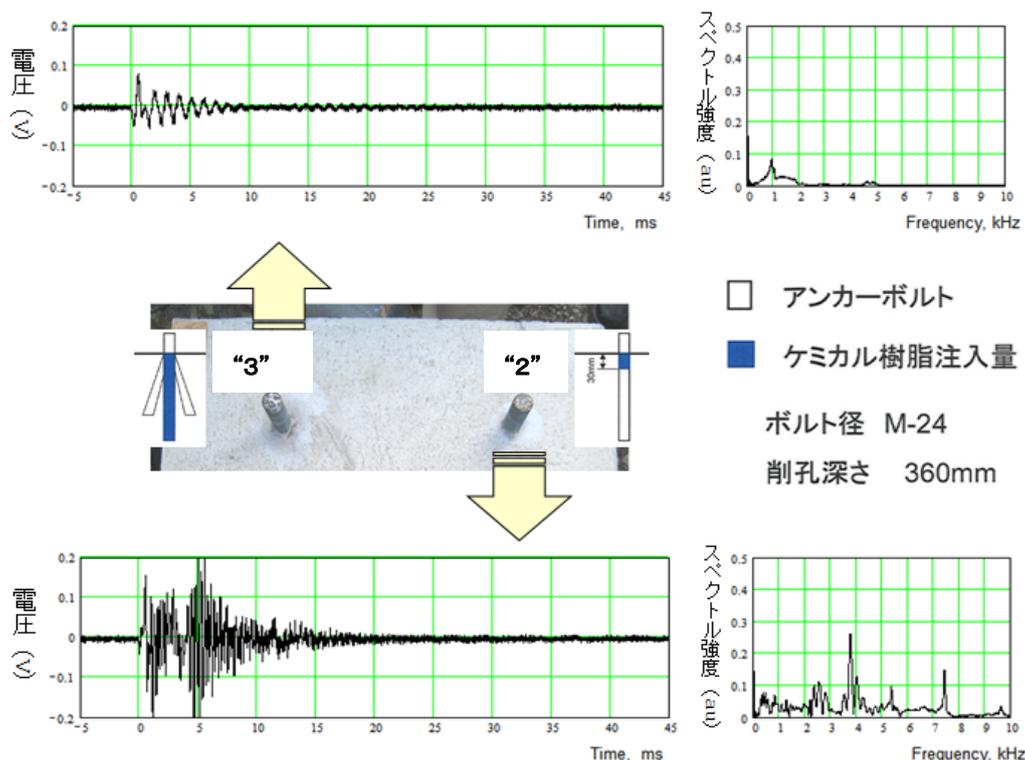


図2 打音検査法を用いた計測結果

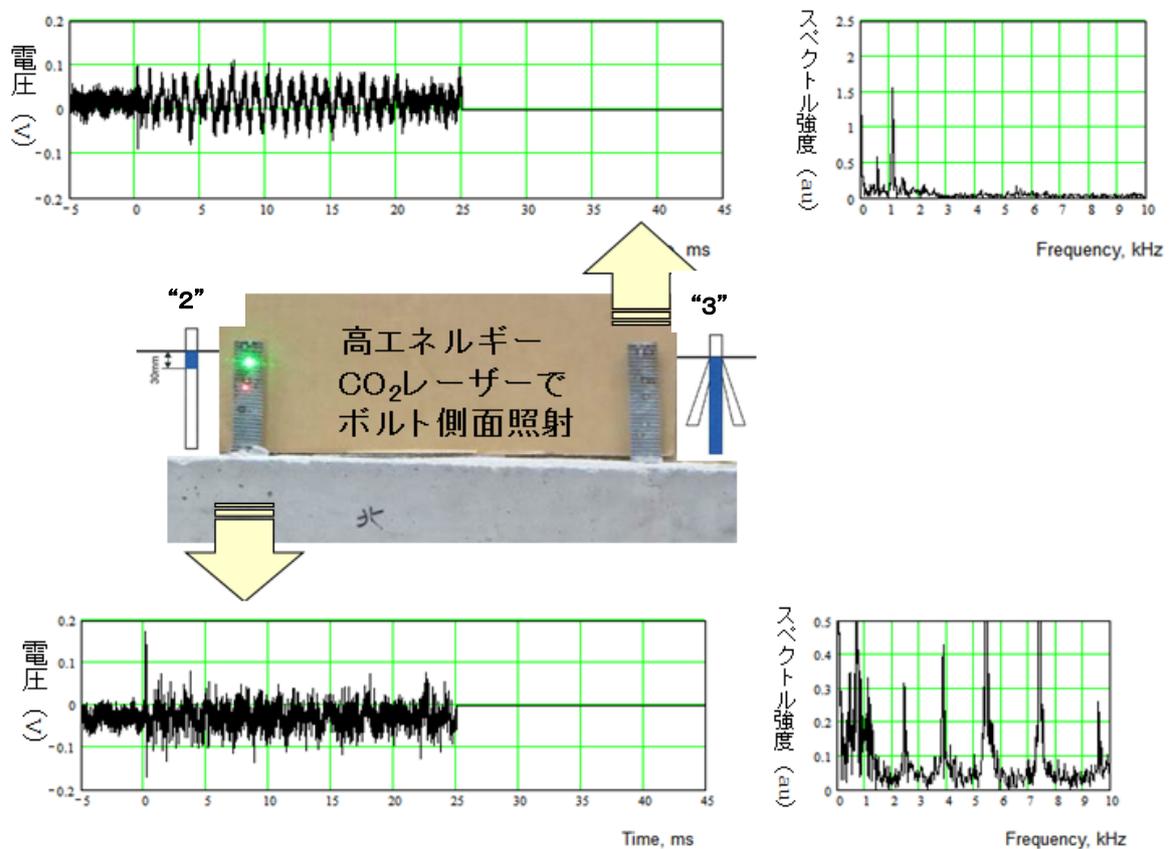


図3 レーザーを用いた計測結果

め、ビーム径を30mm程度に広げて照射した。左側のボルト“2”にレーザー照射位置を示す。ボルト先端から20mm下がったボルト側面に振動検出用レーザーを照射した。また、その20mm下に衝撃波励起用レーザーを照射した。

時系列波形と周波数スペクトル結果を図3 上図および下図に示す。ボルト“3”は1kHzに卓越振動数が現れ、ボルト“2”は4, 5.5, 7.5 kHz付近に複数の卓越振動数が現れた。この結果は、レーザー法でも、打音検査法とよく似たスペクトルが現れ、ケミカル樹脂注入量不足のボルトをS健全ボルトと区別することが可能であることを示していると言える。

3. まとめ

レーザー法を用いてコンクリート埋め込みボルトのケミカル樹脂量注入不足欠陥を評価することが可能であることを示した。

参考文献

- 1) 島田義則, オレグコチャエフ:電気学会論文誌 **129-C**, pp.1192-1197, (2009).
- 2) 島田義則, オレグコチャエフ: レーザー研究, **38(10)**, pp.749-753, (2010).
- 3) Oleg Kotyayev: ILT年報, レーザー技術総合研究所, 2013.
- 4) 島田義則, 他: 第69回土木学会年次学術講演会予稿集, To be published, (2014).

Two-beam probing interferometry: bridge inspection

Laser measurement team

Oleg Kotyaev and Yoshinori Shimada

1. Introduction

The Laser Measurement Team has gained wide experience in laser-based inspection of civil structures ^{1,2}). Photorefractive laser interferometry has demonstrated very promising performance in the inspection of transportation tunnels ³). However, reliable inspection of bouncing structures, like transportation bridges, with the use of conventional or photorefractive laser interferometry is hardly possible. In this case, interferometry is strongly affected by instability of interference pattern, which caused by irregular bouncing of the inspected bridge, especially under heavy traffic conditions. If total displacement of the probing point on the bouncing bridge is about 3 mm and bouncing frequency is about 3 Hz, then the conventional interference pattern will be moving with phase change rate up to 100 kHz. It is quite difficult to recognize laser-initiated vibration in the range of several kilohertz over this background.

2. Two-beam probing idea

Interferometry based on two-beam probing of inspected area can reduce influence of bridge span bouncing on stability of interference pattern. In Fig. 1, the idea of two-beam probing

is illustrated.

In this idea, interference occurs between two signals formed from scattered radiation of the two probe beams. If the distance between the two probing points is much less than size of bouncing bridge span then these points will be moving almost synchronously. As a result, interference pattern will be much more stable and measurement of laser-initiated vibration will be much easier.

Actual laser-based inspection system is supposed to be used for location of defects in the metal-concrete interface on the bottom side of the bridge span. Impact beam initiates vibration in metal plate and probe beams are used for vibration detection. Useful distance between the probe beams is found to be 5 - 20 cm. It is much smaller than bridge span; and when the span is bouncing the movement of the two probing points is practically synchronous.

Probe-1 is used as a source of reference wave in interferometry. Probe-2 is located close to the point of impact. If there is no defect in the inspected area then laser impact will not initiate detectable vibration. However, if some defect exists in the position of impact beam and Probe-2 then vibration will be initiated just over the defect area. During the laser-initiated

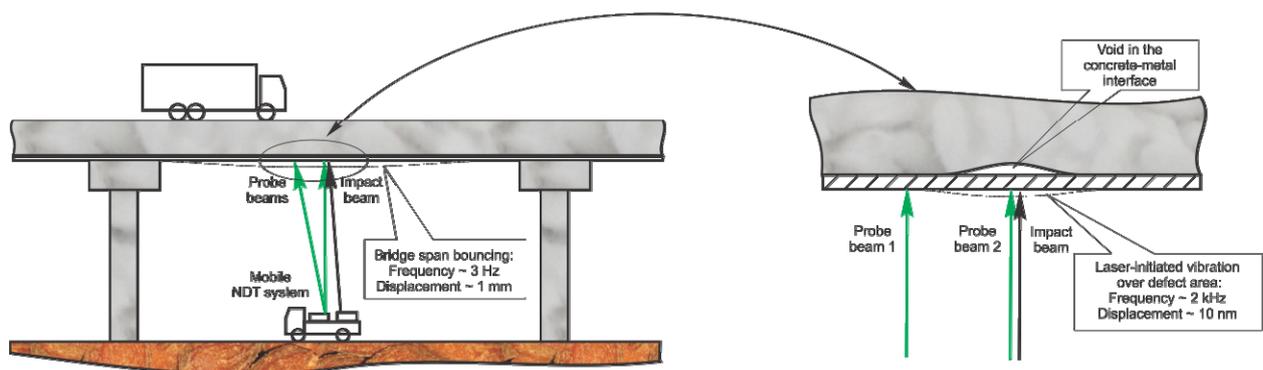


Fig. 1 Two-beam probing inspection of highway bridge.

vibration, probing points will have different character of movement: Probe-1 will not move and Probe-2 will move with vibrating surface. This difference in movement can be easily recognized by detection of resulting interference pattern which will move with frequency of laser-initiated vibration. Actually, power of interference signal in the detection channel will be fluctuating with frequency of laser-initiated vibration. This fluctuation can be used as a criterion of defect recognition.

It should be noted that both signals from two probing points will have speckle character. For effective interferometry it is necessary to use spatial filtering of the two signals.

3. Laboratory and field tests

The two-beam probing system has been designed assembled and tested both in laboratory and field conditions. In Figs. 2 and 3, laboratory setup and one of samples are demonstrated. Green (bright) points on the sample surface are probe positions and red (dim) point indicates impact position.

In this design, CO₂ laser impact in thermal mode is preferable. Pulse duration of 100 ns, impact energy 5 J, and impact beam spot of 35 × 25 mm were used. In this case, no laser damage of metal painting takes place.

When impact position and at least one of the probes position is located over defect area, detectable vibration can be initiated and detected. In no-defect area, no detectable vibration is observed. Figure 4 demonstrates waveforms and spectra of

laser signals obtained in the defect and no-defect cases.

After successful laboratory tests, the system was prepared for the field experiments under real highway bridge. The system table was installed on the small track and delivered to the test site. Figure 5 shows the system under real highway bridge.



Fig. 2 Laboratory setup. Detection distance – 8 meters.

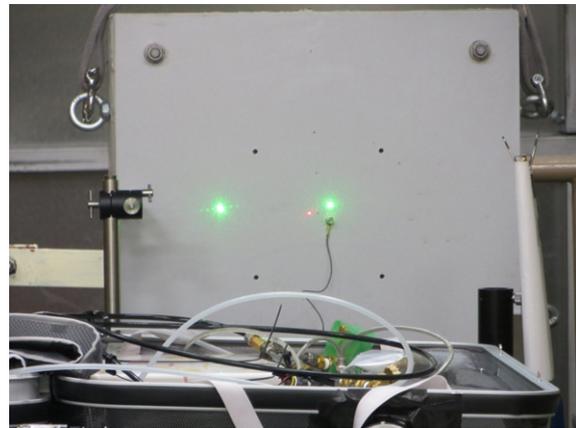


Fig. 3 A sample with metal/concrete interface.

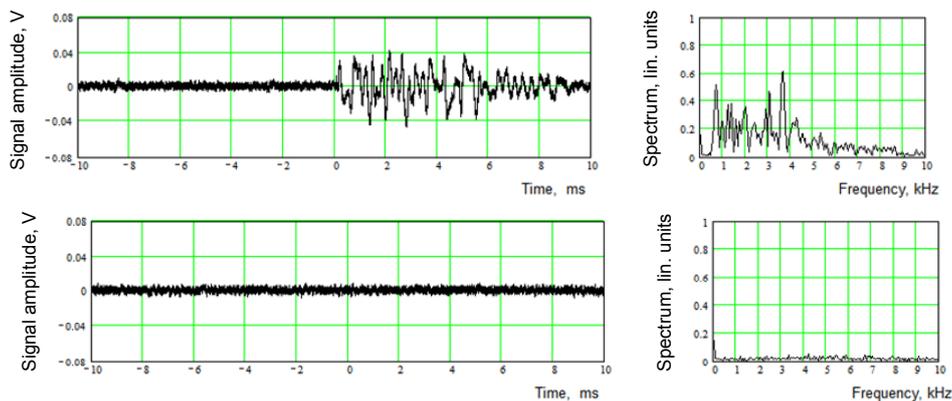


Fig. 4 Waveforms and spectra obtained in the defect (top) and in no-defect area (bottom).



Fig. 5 Two-beam probing system under highway bridge.

Like in tunnel experiments, previously discovered defects were used for the system tests. During the experiments, the bridge was open for traffic and was heavily loaded all the time. As a result, field conditions were much more extreme than in laboratory. However, two-beam probing technique allows to operate even under these tough conditions. Figure 6 demonstrates waveforms and spectra obtained in real defect of metal/concrete interface of the highway bridge bottom side. Like in laboratory, vibration signal can be initiated and detected in real defect situation. In no-defect case, no vibration is detected. Only some signal instability is still observed.

In these experiments, 6 defect locations were inspected and all of them were recognized using the two-beam probing system. The results are considered to be very promising. Moreover, additional impressive benefit was revealed: the

system was capable to run inspection procedure without removing the special protection net which is usually stretched under the bridge spans. It was found that despite of 30% loss of impact energy and power of signals after passing through the net it was still possible to detect laser-initiated vibration and locate defect areas.

4. Discussion and conclusions

The two-beam probing technique of laser-based inspection of civil structures has been presented.

Sensitivity of detection is acceptable for the location of dangerous defects. Reliable location of real defects in the field conditions has been demonstrated.

The technique provides really remote and non-destructive procedure of inspection. The technique does not require assembling and disassembling special scaffoldings which are necessary for hammer-based inspection.

In contrast to piezo-based inspection, laser-based technique requires very short time for changing impact/detection position. In principle, it is possible to develop inspection system with high-speed automatic scanning of inspected area and real-time processing of obtained data.

The main problem of the laser-based inspection is keeping signal stability. Many factors affect the system performance. The environment and the system itself should be as quiet as possible. Otherwise, protection against mechanical vibration

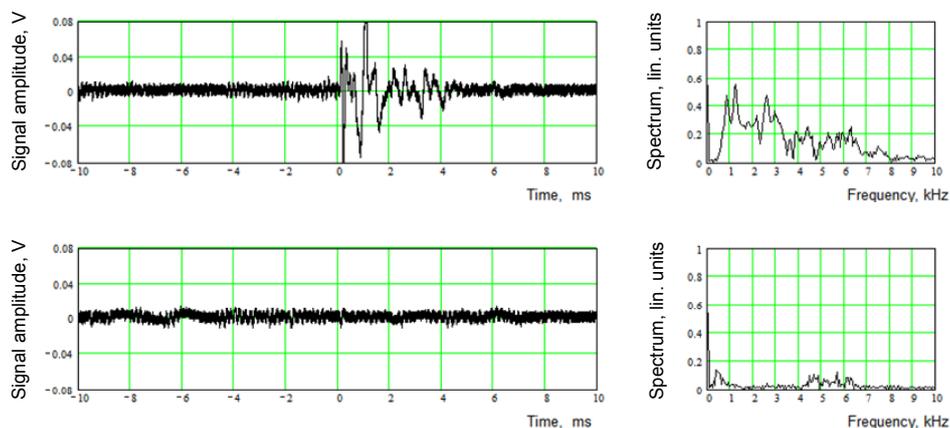


Fig. 6 Waveform and spectrum obtained in real defect (top) and in no-defect area (bottom).

and acoustic noise is necessary.

Comparison between the two-beam probing technique and photorefractive interferometry allows to say that the main advantage of photorefractive over two-beam probing interferometry is possibility of working with speckled laser beams. This fact leads to comparative simplicity of the system alignment. To realize interference and to record the dynamic hologram it is necessary just to intersect two signals in photorefractive crystal. In contrast, the two-beam probing requires spatial filtering of both interfering signals. That means it is necessary to take care of very accurate alignment of beam paths through spatial filters, and to keep this alignment in the field conditions.

The main disadvantage of photorefractive interferometry is non-linear character of laser beam mixing inside photorefractive material. Recording the dynamic grating with high diffraction efficiency takes certain time: for example, 15-20 ms in BSO crystal. This fact limits the field of application of this technique. For example, it is practically impossible to use photorefractive interferometry for the inspection of highway bridges under heavy traffic conditions. The two-beam probing technique is free of these problems. And it can be used effectively for inspection of unstable structures.

As well, it should be remembered that one of the most important conditions of realization of reliable photorefractive interferometry is forming the signal with intensity which is enough for recording the efficient dynamic grating. In field conditions, when the inspection distance is 5-10 meters,

collected power of probing radiation scattered by inspected surface may be too low and not sufficient for the recording the efficient dynamic grating. In two-beam probing technique, signal power is limited only by dynamic range of photodetectors.

Finally, two-beam probing technique is still affected by speckled character of working signals. In spite of the fact that both signals are spatially filtered, signal intensity after spatial filters is randomly fluctuating. This leads to narrowing the time windows where it is possible to collect and process the inspection data.

Generally, both techniques can find their appropriate applications. Our team keeps working in both directions. Now, one of the main tasks is development of inspection algorithm with automatic scanning, real-time data processing and reliable defect recognition. Another task is speeding up the inspection procedure.

References

- 1) O. Kotyaev, Y. Shimada. *ILT Annual Progress Report*, 2013.
- 2) 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,
- 3) Y. Shimada, O. Kotyaev, N. Misaki et al. *Development of Laser-based Remote Sensing System for Detecting Concrete Defects*. *Journal of the Japan Society for Non-destructive Inspection*, **61**, 519-524, 2012 (in Japanese).

レーザーを用いた罫子表面塩分計測

レーザー計測研究チーム

谷口誠治、島田義則、本越伸二、岸田知門

1. はじめに

罫子は絶縁保持のため発電所や送配電システムで数多く用いられている。罫子は野外に設置されることが多く、その表面には塩分が付着しやすいため定期的に付着量を計測し、一定値を超えた時点で洗浄を行うことにより閃絡事故を防いでいる。塩分付着量の計測には筆洗（ふであらい）法¹⁾（ハンド測定）を用いるのが一般的であるが、この手法は蒸留水で付着した塩分を完全に洗い流すのに熟練が必要で、手間もかかるという課題がある。そこで当研究所では、レーザーを用いてより簡便、迅速に付着塩分量の計測を行う手法を開発し、かつ実用的で安価な計測装置を作製することを目標に研究を進めてきた。

レーザーを用いた罫子付着塩分量計測法の開発に関しては、藤吉（九大）らによる先行研究がある³⁾。彼らはナノ秒パルス YAG レーザーの基本波を光源に用い、罫子表面にレーザーを集光して付着した塩分（塩化ナトリウム）を蒸発、解離させ、ナトリウム原子からの自然放出（D 線、 $\sim 589\text{nm}$ ）のピーク強度を PMT（光電子増倍管）により計測して付着塩分量（密度）を求める手法について検討しており、罫子に人工的に定量の塩分を付着させた試料を用いた実験において、塩分密度 $0.005\sim 0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ の範囲内では塩分密度とナトリウム D 線の強度が線形関係にあることを明らかにした。しかしながらこれ以後は、続報や実用化例などは報告されていない。このことから我々は、まずこの手法の検証を行うため、実際に屋外で使用されている罫子を用い、罫子表面へのナノ秒 YAG レーザー（ 1064nm ）照射実験を行った。その結果、レーザー光強度が大きくなると罫子表面がダメージを受け、罫子表面に塗布された釉薬が剥離することが明らかとなった（図 1）。また YAG レーザーの高調波（ 355 、 532nm ）を用いた場合にも、ダメージ

閾値の違いはあるものの同様の現象が起こることが明らかとなった（図 2）。藤吉らも基本波での罫子のダメージ閾値を同様に計測しており、その値は $1.03\text{J}/\text{cm}^2$ と、我々の値とほぼ一致する。罫子釉薬の主成分がガラスであることを考慮すると、近赤外～近紫外の波長領域のレーザー光は罫子内部まで透過し、釉薬層と罫子本体の融着面を破壊するものと考えられる。さらに、我々の実験では罫子表面に塩分付着がない条件にもかかわらず、レーザー照射により罫子表面でナトリウム発光がみられることも明らかとなった。釉薬には酸化ナトリウム（ Na_2O ）がわずかに（ $\sim 0.1\%$ ）含まれていることから、レーザーエネルギーの一部が釉薬内の Na_2O を熱励起す

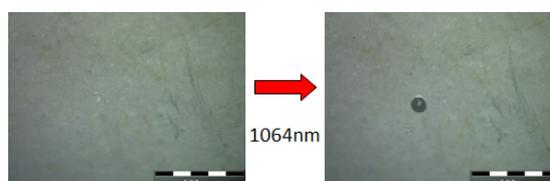


図 1 ナノ秒パルス YAG レーザー（ 1064nm 、 $1.5\text{J}/\text{cm}^2$ ）照射時に罫子表面に発生するダメージ

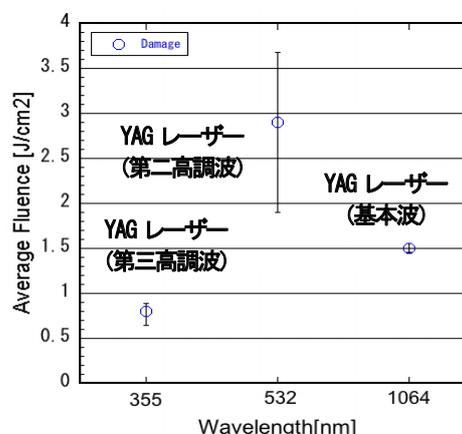


図 2 照射波長に対するダメージ閾値の変化⁵⁾（N-on-1 方式⁶⁾での観測値）

るものと考えられる。一方、藤吉らの報告では、 $0.8\text{J}/\text{cm}^2$ の条件で洗浄後の碇子を用いた計測を行い、ナトリウム発光が計測されたと報告しているが、彼らはこの結果を洗浄し残した塩分に起因するものとしており、釉薬中の Na_2O が発光する可能性については言及していない。また、彼らは塩分塗布剤として食塩水に碇子の粉を混合した水溶液を用いていることから、おそらく表面に塗布された碇子の粉がレーザーエネルギーを吸収する役割を果たし、付着塩分の発光のみを観測できたものと考えられる。しかしながら実際の碇子では、碇子の粉のような大きな粒子がない場合にも、碇子表面に直接塩分が付着する状況が多くみられる。これらのことから我々は、YAG レーザーを用いたシングルパルスによる塩分計測法は碇子のダメージを誘発する危険性が高いと判断し、新たな手法として、2本のパルスレーザーを用いた塩分計測法（ダブルパルス方式）を考案し、その開発に着手した。計測原理を図3に示す。この方式では、まず低強度のパルスレーザー（プレパルスレーザー）を碇子表面に照射して付着した塩分のみを飛散させる。その後遅延時間を制御した高強度のパルスレーザー（メインレーザー）を飛散塩分に集光照射してナトリウムを発光させ、その強度から付着塩分密度を計測する。この方式で重要となるのは、プレパルスレーザーの選択である。碇子表面に付着した塩分を飛散させるには、紫外領域のレーザーを塩分に直接吸収させる方法、あるいは赤外領域のレーザーを吸収性が高い碇子表面のガラス成分や塩分に含まれる水に吸収させ付着塩分を加熱する方法があるが、本研究では、レーザー装置の価格や安全性、可搬性なども考慮して、赤外領域（波長約 $10\mu\text{m}$ ）の CO_2 パルスレーザー（図4）を採用した。しかしながら、 CO_2 レーザーは釉薬内のガラス成分に主に吸収されるため、強度が高い場合には碇子表面が融解することによるダメージが入る。これを防ぐため、我々は装置の回路設計の見直しやガスの混合比、気圧などを調整してレーザー光を短パルス化（ $\sim 100\text{ns}$ ）し、碇子表面の長時間加熱による影響（融解など）を抑制した。このレーザー光を低強度（ $3\text{mJ}/\text{pulse}$ 、 $\sim 0.6\text{J}/\text{cm}^2$ ）で食塩水のみを用いて塩分を

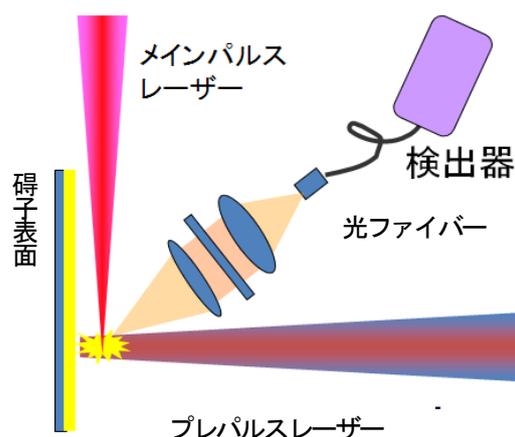


図3 ダブルパルスレーザーを用いた付着塩分計測法の原理図



図4 プレパルスレーザー（ CO_2 レーザー）

付着させた碇子（塩分密度 $\sim 0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ ）へ照射したところ、碇子表面にダメージを与えることなく付着塩分のみを飛散させることに成功した。また、この照射条件では Na_2O によるナトリウムの発光も観測されないことがわかった。短パルス化した条件ではこの出力がほぼ最大であるため（ $\text{max. } 3.3\text{mJ}/\text{pulse}$ ）ダメージ閾値は明確ではないが、少なくとも塩分を飛散させるために必要なエネルギーはナトリウムの発光やダメージを与えるために必要なエネルギー値よりも低いものと考えられる。一方、メインレーザーは空気中で集光するため碇子にダメージを与える懸念がなく YAG レーザーを用いることが可能であるが、飛散した塩分を燃焼させるため、レンズ集光時に $10^9\text{W}/\text{cm}^2$ 以上の強度を出力する光源が必要である。

次の段階として我々は一昨年度、プレパルスレーザーに自作した CO_2 レーザーを、メインレーザーには上記の条件を満たし、かつ小型のレーザーであるマイクロチップレーザー（浜松ホトニクス、レーザー出力 0.3mJ 、パルス幅 2ns ）を用いてそれらを組み合わせた可搬型の付着塩分計測装置を作製した。またこの装置を用いて一

定期間野外で自然汚染させた碇子（曝露碇子）の付着塩分密度計測を行い、筆洗法で求めた塩分密度値と比較したところ、定量的にも比較的良い一致が見られたことから、本手法の有用性が示された⁴⁾。しかしながら、一昨年度に作製した装置は、レーザー照射および発光計測用の光学系を配置した計測ヘッド部をCO₂レーザー（重量約10kg）の出射口に直接取り付けため、計測時には碇子（重量約5kg）の位置を動かす必要があり、計測点を増加させるためには長い時間が必要、という難点もあった。このことから昨年度（平成25年度）は、より簡便で迅速な計測を可能にするため、CO₂レーザーと計測ヘッド部をファイバー伝送により分離して操作性を高めた装置（ハンドホルド型）を新たに製作した。本稿では、装置の概要、および本装置を用いて曝露碇子の塩分密度計測を行いその性能を評価した結果について報告する。

2. 計測装置

計測機器構成を図5に示す。プレパルスレーザーを碇子表面に垂直入射して付着塩分を飛翔させ、特定の遅延時間後にメインパルスレーザーを碇子表面の手前1mmに焦点がくるように斜め方向から集光入射してナトリウム発光を発生させた。図3に示すように、本来メインレーザーの照射方向は試料面に対して平行であるのが理想的であるが、集光用レンズには径4.7mmφ（厚さ3.5mm）のものを使用しているため、試料との接触面からはみ出さないようレンズに角度をつけてある。ただし、レンズの有効焦点距離は6.1mmと短く、焦点通過後のメインレーザーはエアブレイクダウンによる大幅な強度の減少と光径の広がりと同時に起こるため、メインレーザー自体が碇子表面にダメージを与えることはない（図9）。発生したナトリウムのD線は光ファイバーを通してマルチチャンネル小型分光器（USB 2000+、オーシャンオプティクス）に導くことにより分光し、その発光強度を計測した。装置写真を図6に示す。計測ヘッド部（図7）および電源部等をキャリーケース内に納めることができるため装置の運搬が容易であり、

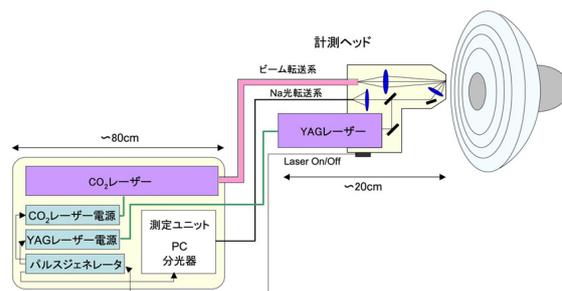


図5 計測機器構成



図6 レーザー計測器電源部

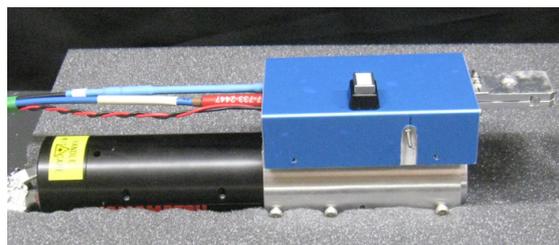


図7 計測ヘッド部

AC100Vの電源が確保できれば屋外での計測も可能である。計測ヘッド部はプレパルス光をファイバー伝送することによりCO₂レーザーを計測ヘッド部から分離し、手で持つことが可能な形状に改良したものである（ハンドホルド型）。これにより装置の操作性は大きく向上し、ヘッド部を動かして碇子表面に接触させることが出来るようになったため（図8）、計測点1点あたりに要する時間を大幅に短縮できるようになった。

模擬試料（スライドガラスに一定濃度の食塩水を塗布して乾燥し塩分を付着させた試料）を用いた計測例を図9に示す。塩分付着がない場合にはメインインパルスレーザーによる大気ブレイクダウン光のみが観測される。スライドガラス内にも通常、Na₂Oが成分として含まれていることから、この結果は、Na₂Oに起因するナトリ

ウム発光が発生しないことを示しており、プレパルスレーザーおよびメインレーザーが試料に直接ダメージを与えることがないことを示している。一方、塩分が付着した試料では、ナトリウム D線の発光ピーク（590 nm 付近）が塩分密度に依存した形で検出されていることがわかる。また、通常2ピーク（589nm, 589.6nm）生成するナトリウムD線が実験では1ピークしか観測されないが、これは分光器の分解能によるものであり、実際の計測に大きな問題はないと考えられる。



図8 作製した装置による罫子表面塩分計測の様子

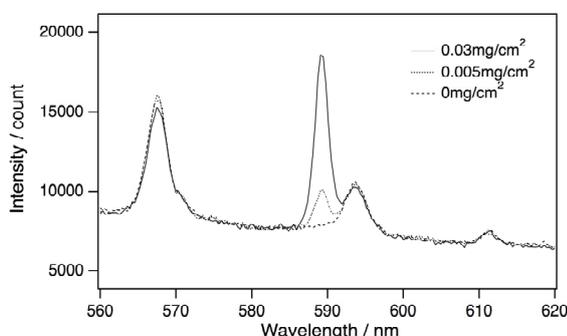


図9 ナトリウムD線の発光スペクトル⁵⁾

3. 曝露罫子の塩分密度計測

製作した装置を用いて屋外で曝露した罫子（曝露罫子）の塩分密度計測を行い、その性能評価を行った。曝露時期、期間、塩分付着量も異なる3種類の曝露罫子を用いた。レーザー計測では、1度の測定で得られる値はプレパルスの照射面積に相当する0.8mm^φであることから、曝露罫子全体の平均塩分密度を計測するためには多点での計測が必要である。このため罫子の裏面（ひた）部分を6つの領域に分け、各領域で24点を選択し、合計

144点の計測データを取得した。計測点によってはナトリウム発光が得られない箇所もあるが、塩分は罫子上に不均一に（まばらに）付着していると考えられるため、それらの結果は計測点に塩分付着がないものとして含めた。得られたデータは罫子の表面積を考慮した上で平均化し、罫子全体の塩分密度を示す値とした。基準となる曝露罫子全体の付着塩分密度は、レーザー計測後に同じ罫子を筆洗法により求めた。曝露罫子には塩分だけでなくさまざまな塩類が付着しているが、濃度計測にはNaイオンメーターを用いており、罫子上に付着したナトリウム塩濃度とD線のピーク強度を直接比較できる。両計測値を比較した結果を図9に示す。両計測値はほぼ比例関係にあるため、検量線を作成することにより付着塩分の計測ができる。また測定可能域については密度約0.002 mg/cm²の付着塩分が検出できている。罫子洗浄が必要な密度は0.03 mg/cm²であるため、本装置を用いれば少なくともその10分の1以下の低密度の計測が可能である。

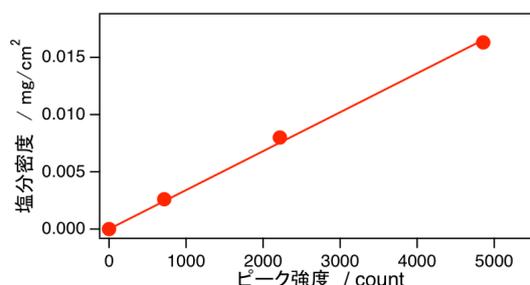


図10 レーザー計測による曝露罫子のナトリウムD線のピーク強度の平均値と筆洗法により求めた付着塩分密度の比較⁵⁾

4. まとめ

罫子付着塩分量計測の簡便化、迅速化を目指し、ヘッド部をハンディホールド型に改良したレーザー計測装置を構築し、曝露罫子の塩分密度計測を行った。その結果、約0.002mg/cm²の低密度計測が可能であることがわかった。また本装置は計測に必要な面積が微小であるため、検査後も塩分付着の履歴がリセットされずトレンド管理が可能であることや罫子の部位別（罫子裏面の外

ひだと内ひだなど)の塩分密度や付着塩分の分布が計測できる等、従来法にない利点も持ち合わせている。

謝辞

本研究は、関西電力(株)の受託研究により行われた。また塩分計測に用いた曝露罫子は日本ネットワークサポート(株)より提供を受けた。また、CO₂レーザーの作製にあたり、大阪大学レーザーエネルギー学研究室センター 實野孝久特任教授から技術提供を受けた。

参考文献

- 1) 変電設備の耐塩設計, 付録IV汚損量の測定方法と汚損検出器; 電気協同研究, **35(5)**, 125-128, 1979.
- 2) 秤 俊久, R&D News Kansai, **8**, 35-37, 1997.
- 3) 藤吉晋一郎, 本田親久, 村岡克紀, 前田三男, レーザー研究, **20(12)**, 955-962, 1992.
- 4) 島田義則, ILT2013 年報, レーザー技術総合研究所, 2013.
- 5) 島田義則他, “レーザーを用いた罫子表面塩分計測”, 平成26年電気学会 C 部門大会予稿集, to be published.
- 6) J. G. Wilde, et al.: NIST Spec. Publ., **755**, 259-264, 1989.

レーザー計測による光活性蛋白質のフェムト秒反応ダイナミクス

レーザーバイオ化学研究チーム

谷口誠治、ハイク コスロービアン

1. はじめに

本研究チームでは、創薬への応用や光機能性素子の開発を目指し、生体内で様々な機能を果たす蛋白質や酵素等の生体関連物質の光初期反応メカニズムとダイナミクスを、超短パルスレーザーを用いた時間分解計測法により明らかにする研究を行ってきた。本稿では、生体内でD-体のアミノ酸を酸化分解する機能を持つD-アミノ酸酸化酵素 (D-amino acid oxidase, DAAO) の機能阻害効果について検討した結果を報告する。

2. D-アミノ酸酸化酵素 (DAAO) の生体内機能と

阻害剤の効果

蛋白質、あるいは蛋白質を基に構成される酵素は、化学物質の吸収、輸送、代謝等、生体内における様々な化学反応を制御する触媒としての機能を担う。それらの機能メカニズムを明らかにすることは生物学や生化学、医学分野において必須の課題である。蛋白質の機能解明のため多く行われている研究手法に、特定の蛋白質 (蛋白質中に存在する補因子) に蛋白質が作用する特定の分子 (基質) 以外の分子を付加し、それらの反応性の変化を観測することで蛋白質機能の要因を明らかにしようとするものがある。またこのような手法は、薬学分野においてはウイルスや細菌内の蛋白質の機能を阻害して増殖を抑制する、体内で異常に活性化した蛋白質を不活性化し疾病を治療する、等を目的とした薬剤 (阻害剤) の開発手法でもある。

蛋白質の機能阻害効果の研究に関して最近、D-アミノ酸酸化酵素 (DAAO、図 1(a)) のアミノ酸濃度調整機能が注目を集めている。DAAO は分子量 39335 (39kDa) の比較的小さな酵素で、補因子にフラビンアデニンジヌクレオチド (FAD、図 1(b)) を持ち、生体内で D-アミノ酸 (D-セリン) を選択

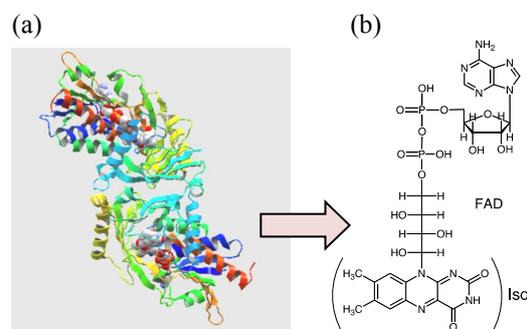


図 1 (a) ブタ腎臓由来 D-アミノ酸酸化酵素 (DAAO) の結晶構造 (2 量体、PDB ID: 1VE9)、(b) 補因子フラビンアデニンジヌクレオチド (FAD) の分子図

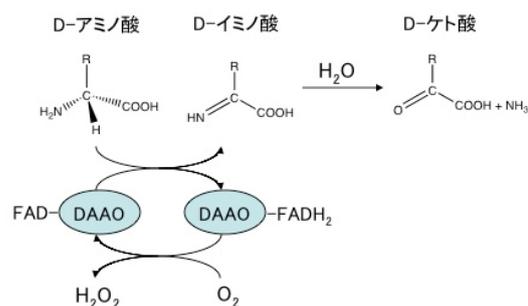


図 2 DAAO の反応スキーム

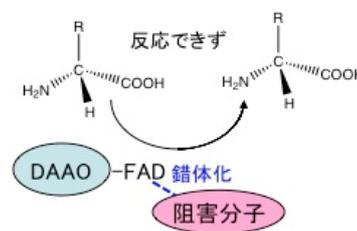


図 3 阻害分子による DAAO の機能阻害効果

的に代謝 (分解) する反応を示す (図 2) が、FAD が安息香酸等種々の分子と結合して錯体を形成するため、薬剤による阻害効果が顕著に見られることでも知られている¹⁾ (図 3)。また DAAO は古くからその存在が知られており、ヒトを含む高等生物の腎臓や肝臓、脳等に多く存在するが、本

来生体は L-アミノ酸のみによって構成されるため、DAAO が体内で具体的にどのような役割を担っているかについてはよくわかっていなかった。これに対し近年、福井ら（徳島大）は統合失調症患者の脳内 D-アミノ酸濃度が DAAO の異常活性により通常よりも低下していることをつきとめ、薬剤（阻害剤）の投与が脳内 DAAO の反応活性を抑制し、脳疾患の治療に有効であると報告した²⁾。この報告は、生体内での DAAO の役割を明らかにするだけでなく、様々な脳疾患に対する治療薬開発の足がかりとなるという意味で非常に重要なものであるが、それと同時に DAAO と阻害分子の錯体形成メカニズムや、形成された錯体の物性にも興味注がれる。

一方、DAAO は光科学の観点からみても興味深い酵素である。FAD を補因子に持つ DAAO はフラビン蛋白質の一種で、FAD 中のイソアロキサジン (Iso、図 1(b)中 () 内の分子) は青色領域の光を吸収し緑色 (530 nm 付近) の蛍光を発する。その強度やスペクトル形状は蛋白質の反応に敏感に応答するため、それらを分光学的手法により観測すれば反応メカニズムに関する有益な情報が取得できる。またフラビン蛋白質は光励起により周囲のアミノ酸残基 (チロシン、トリプトファン) との電子移動や水素移動反応を引き起こすものが多く、蛍光強度の時間変化を計測する手法 (時間分解蛍光計測法) を用いれば蛋白質の光反応過程を直接的に観測できる。さらに興味深いことに、福井らはクロルプロマジン等一部の阻害剤に光照射による阻害活性の増大効果がある³⁾ことも報告している。このことから我々は、DAAO と阻害剤との反応を分光手法により観測するにより、DAAO の機能阻害メカニズムに関するこれまでにない有益な知見が得られると考えた。本研究では、DAAO の蛍光過程と機能阻害効果の関連性や、時間分解蛍光計測法の阻害効果観測への有用性等を明らかにすることを目的に、DAAO、および DAAO に阻

害分子を添加した試料の光励起ダイナミクスをフェムト秒蛍光計測法により観測した。本稿では、阻害剤として高い阻害効果を示すことで知られるアミノ安息香酸を用いた結果について報告する。

3. 実験

実験には、ブタ腎臓由来 D-アミノ酸オキシダーゼ (和光純薬工業、592-00771) を精製したものを使用した。溶媒には、塩酸により pH を 8.3 に調整したピロリン酸緩衝液 (17 mM) を用いた。また阻害剤には 4-アミノ安息香酸ナトリウム (Sodium Anthranilate、東京化成工業、A0501、図 4) を用いた。フェムト秒蛍光の計測には Ti:サファイアレーザー (Coherent, Mira-800) を光源に用いた蛍光アップコンバージョンシステムを用いた⁴⁾。励起波長は 410 nm、装置の時間分解能は約 200 fs である。

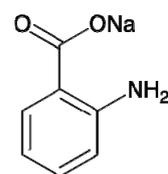


図 4 阻害剤 (4-アミノ安息香酸ナトリウム) の分子図

4. 結果と考察

4.1 吸収、蛍光スペクトル

図 5、図 6 に DAAO (160 μ M)、および DAAO に 4-アミノ安息香酸ナトリウム (o-AB) を過剰 (32mM) に添加した試料の吸収、蛍光スペクトル (励起波長 410 nm) をそれぞれ示す。観測されたスペクトルは FAD の第一電子励起状態に由来し、吸収ピーク波長は 375、449 nm、蛍光ピーク波長は 525 nm である。ただし、DAAO は溶液中では単量体だけでなく 2 量体としても存在することが知られており⁵⁾、この試料は DAAO 単量体と 2 量体の 2 種が混合したものである。DAAO に o-AB を添加すると、吸収スペクトルに変化がみられる。480 nm 付近の吸収の肩が減少し、500~600 nm の領域に新たな吸収帯が生成する。この吸収帯は DAAO 中の FAD と

o-AB が結合し生成した電荷移動錯体 (CT 錯体)⁹⁾に由来し、それぞれの吸収帯の吸光係数の比から存在比を求めると試料全体の約 13%が錯体化したと考えられる。一方蛍光スペクトルは、o-AB の添加により若干短波長側にシフトした。o-AB 添加により pH 等 FAD 周囲の蛋白質環境がやや変化したものと考えられるが、FAD の電子状態が大きくは変化しない CT 錯体とは別種の o-AB 配位体が存在する可能性もある。また CT 錯体の励起 (励起波長 540 nm) では蛍光は観測されなかったが、このことから CT 錯体の励起状態は短寿命であると考えられる。

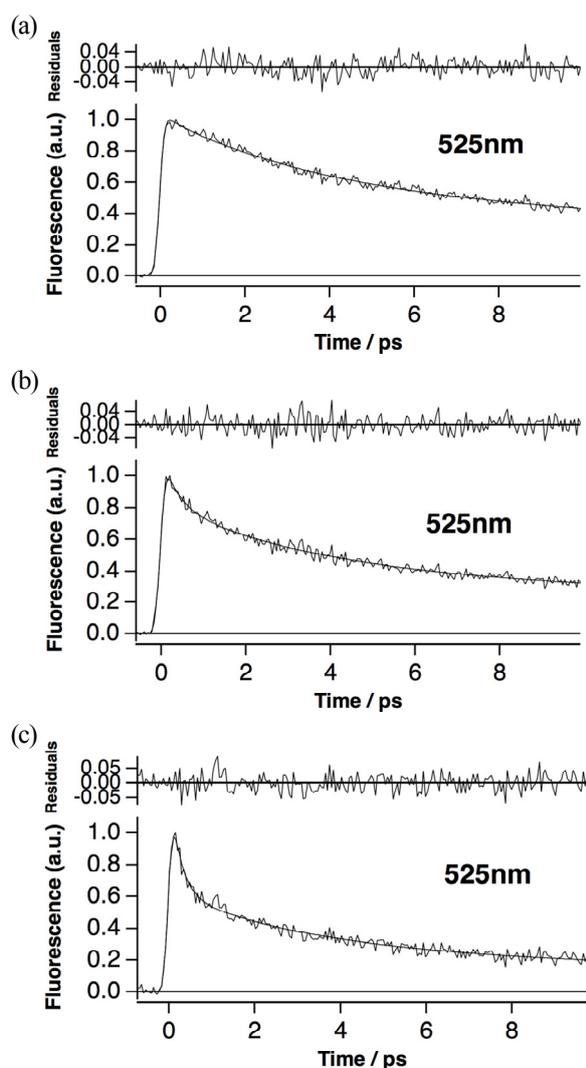


図7 (a)DAAO、(b) o-AB (18 mM) 添加、(c) o-AB (71 mM) 添加試料のフェムト秒蛍光と多成分指数関数によるフィッティング曲線

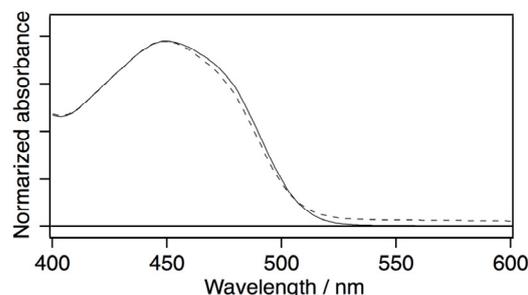


図5 DAAO (実線)、およびDAAOに4-アミノ安息香酸 (32 mM) を添加した試料 (破線) の吸収スペクトル

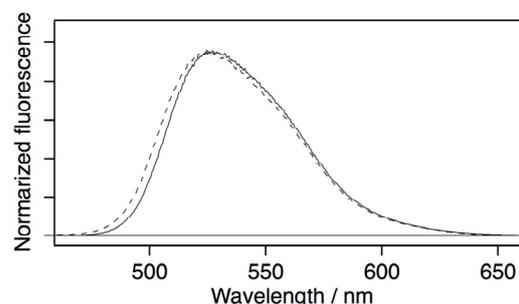


図6 DAAO (実線)、およびDAAOに4-アミノ安息香酸 (32 mM) を添加した試料 (破線) の蛍光スペクトル

4.2 DAAO のフェムト秒蛍光ダイナミクス

DAAO (163 μ M) のフェムト秒蛍光計測結果 (観測波長 525 nm) を図 7(a)に示す。蛍光は非指数関数の減衰を示し、2成分指数関数でのフィッティングにより 3.7 ps (0.49)、37.8 ps (0.51) の寿命成分が得られた (() 内は前指数因子の比を示す)。FAD 単体の蛍光寿命は 2.5 ns と長寿命であるため、この速い減衰は光励起された FAD と周囲に複数存在するアミノ酸残基 (チロシン) との電子移動反応に起因するものである⁹⁾。ブタ腎臓由来 DAAO の蛍光寿命は、先に中島、田中らによる単一光子計数法を用いたピコ秒領域での計測例があり、単量体の蛍光寿命は約 160 ps、2 量体の寿命は約 40 ps と報告されている⁹⁾。このことから、本測定で得られた 37.8 ps の寿命は 2 量体の励起寿命に同定される。試料内には単量体、および蛋白構造が壊れた FAD が不純物として存在し、それらの蛍光減衰成分は 2 量体の減衰に含まれていると考えられるが、フェムト秒領域の計測では

表1 DAAO および4-アミノ安息香酸(o-AB)添加試料の蛍光寿命フィッティング結果

Sample	τ_1 /ps	A_1^a	τ_2 /ps	A_2^a	τ_3 /ps	A_3^a	χ^2
DAAO	-	-	3.7	0.49	37.8	0.51	0.102
DAAO+o-AB (18mM)	0.38	0.27	3.7 ^b	0.40	37.8 ^b	0.33	0.131
DAAO+o-AB (71mM)	0.26	0.71	3.7 ^b	0.31	37.8 ^b	0.18	0.184

^a A_1 、 A_2 、 A_3 はそれぞれ蛍光寿命 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 の前指数因子の比を表す

^b フィッティング時に数値を固定した

長寿命 (>100 ps) の蛍光減衰は成分比が小さくなるため、ここでは無視できる。一方、本測定では3.7psの速い減衰成分が新たに観測されている。蛍光減衰寿命の変化はFADとアミノ酸残基間の電子移動速度が変化することにより起こると考えられるため、DAAOには単量体や2量体とは別の構造を持つもの(蛋白構造異性体)が存在している可能性がある。これについては後述する。

図7(b)、(c)に、DAAOにo-ABをそれぞれ18mM、71mM加えた試料のフェムト秒蛍光を示す。o-ABの添加により寿命数100fsの超高速減衰成分が生成した。o-AB濃度の増大によりその成分比が大きくなることから、この減衰はDAAO中のFADとo-AB間で形成されたCT錯体に起因するものと考えられる。各実験データは超高速成分を加えた3成分指数関数によりフィッティングした。ただし、DAAOの計測で得られた2つの寿命(3.6ps、37.8ps)は、o-ABと錯体を形成しないDAAOに起因するものであるため、パラメータ化せず固定した。結果を表1に示す。超高速減衰成分の寿命(τ_1)はo-AB18mM添加試料で380fs(0.27)、71mM添加試料では280fs(0.51)であり、濃度の増大に対してその存在比も増大することがわかる。一方、o-ABと錯体を形成しないDAAOの2つの寿命(τ_2 、 τ_3)に関して、それらの前指数因子の比(A_2/A_3)がDAAOのみの試料では0.96(0.49/0.51)、o-AB濃度18mMで1.21(0.40/0.33)、71mMの試料では1.72(0.31/0.18)とo-AB濃度に依存して変化することがわかった。これはおそらく37.8psの寿命を持つ構造異性体のo-ABとの反応性が3.7psの寿命を持つものよりも高く、o-ABとの錯体形成が優先して起こるためであると考えられる。このことから、やはりDAAOには単量体、2量体とは別の構造異性体が存在する可能性が高い。

DAAOの構造に関して、最近Kokpol, 田中らが興味深い報告を行っている⁷。彼らは分子動力学(MD)計算法を用い、X線結晶構造解析により得られた2量体の構造を出発点として水溶液中でのDAAOの構造を計算した。その結果、2量体を形成するDAAOのそれぞれが異なる蛋白構造(サブユニット)を持つことが明らかとなった(SubA10およびSubB10、図8を参照)。この結果を今回の計測結果と比較すると、DAAOの光励起過程に関して以下のような説明が可能となる。DAAO2量体はそれぞれが異なる構造を持つ2種のサブユニットで構成されており、光によりそのどちらかのFADが励起される。FADの吸収帯は変化していないことから励起比は1:1と予想される。励起されたFADは周囲のチロシンと電子移動反応を引き起こすが、サブユニットの蛋白構造の違いにより、電子移動過程は寿命が3.7psのもの37.8psのもの2種が存在する。また各サブユニットの阻害剤との反応性は異なっており、o-ABを添加した場合、サブユニットのどちらかが優先的に結合するため、o-ABと結合せずに残ったDAAOのサブユニットの存在比はo-ABの濃度に依存して変化すると考えられる。これらの結果は、水溶液中でのDAAOの構造が結晶中とは異なり多様に変化すること、その変化により阻害剤による効果も異なる可能性があることを示しており非常に興味深い。現状ではどちらのサブユニットがより速い電子移動を示し、また優先的にo-ABと結合するか等については明らかではないが、今後電子移動理論計算や、蛍光ダイナミクス計測による阻害剤効果の検討を継続し、これらについてより詳細に検討する予定である。また今後はヒト由来のDAAOを用いた研究を同様に進め、創薬等への応用に向けたより実用的な知見を得たいと考えている。

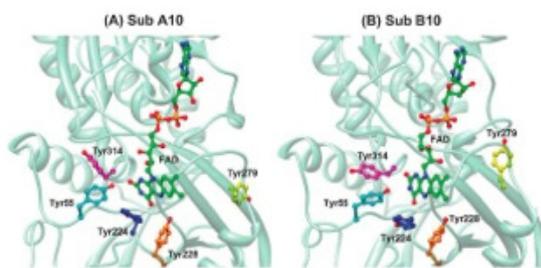


図8 MD計算により予測した、水溶液中で2量体を形成するDAAOの2種の蛋白構造(10°C) (参考文献7より抜粋)

5. まとめ

本研究では、ブタ腎臓由来のD-アミノ酸化酵素(DAAO)の機能阻害効果について検討するため、阻害剤に4-アミノ安息香酸(o-AB)を用いてDAAOおよび阻害剤を添加した試料のフェムト秒蛍光ダイナミクスを観測した。DAAOの蛍光は寿命3.7 ps、37.8 psの2成分指数関数の減衰を示した。分子動力学計算から水溶液中では蛋白構造が異なる2種のDAAO異性体(サブユニット)の存在が予測されることから、得られた寿命成分はそれぞれ各異性体で起こる光誘起電子移動反応の速度を表していると考えられる。o-ABを添加した試料では寿命約300 fsの超高速減衰が観測され、その成分比はo-ABの濃度に依存して増大したことから、この減衰は補因子FADがo-ABと結合したCT錯体に起因するものと考えられる。一方、o-ABと錯体を形成せず残ったDAAOの蛍光減衰寿命の成分比はo-ABの濃度に依存して変化したため、サブユニットの違いによりo-ABとの反応性が異なることがわかった。これらの結果はDAAOの蛋白構造の変化が阻害剤効果にも影響することを示しており、興味深い。またこれらの結果は

フェムト秒蛍光計測により初めて明らかにされたものであり、本手法が酵素の機能阻害効果の観測に有効であることを示すものである。今後、理論計算も含めこれらについてさらに詳細に検討するとともに、ヒト由来のDAAOを用いた研究を同様に進め、創薬等への応用にに向けたより実用的な知見を提供する予定である。

謝辞

本研究は、田中文夫 Chulalongkom 大学客員教授(レーザー総研特別研究員(兼務))との共同研究として行われたものである。また計測に用いた酵素の精製には、北村昌也大阪市立大学大学院工学研究科教授、中西猛同講師の協力を得た。ご協力に感謝致します。

参考文献

- 1) R. Miura et al.: J. Biochem., **122**, 825-833, 1997.
- 2) K. Fukui, H. K. Park, T. Kawazoe, K. Ono, S. Iwana, Y. Tomita, K. Yorita, T. Sakai and Y. H. Kong: Flavins and Flavoproteins, **2005**, 853-860, 2005.
- 3) S. Ishikawa, T. Kawazoe, H. K. Park, K. Tsuchiya, K. Ono, K. Yorita, T. Sakai, T. Kusumi and K. Fukui: J. Enzim. Inhib., **23**, 901-911, 2008.
- 4) N. Mataga, H. Chosrowjan, S. Taniguchi, F. Tanaka, N. Kido and M. Kitamura: J. Phys. Chem. B, **106**, 8917-8920, 2002.
- 5) H. Chosrowjan, S. Taniguchi, N. Mataga, T. Nakanishi, Y. Haruyama, S. Sato, M. Kitamura and F. Tanaka: J. Phys. Chem. B, **114**, 6175-6182, 2010.
- 6) (a) N. Nakashima, K. Yoshihara, F. Tanaka and K. Yagi: J. Biol. Chem., **256**, 5361-5263, 1980. (b) F. Tanaka, N. Tamai and I. Yamazaki: Biochemistry, **28**, 4259-4262, 1989.
- 7) A. Nueangaudom, K. Lugsanangarm, S. Pianwanit, S. Kokpol, N. Nunthaboot and F. Tanaka: Phys. Chem. Chem. Phys., **16**, 1930-1944, 2014.

Ultrafast fluorescence up-conversion technique and its applications to flavoproteins

Laser Biochemistry Research Team

Haik Chosrowjan and Seiji Taniguchi

1. Introduction

Time resolved fluorescence spectroscopy is one of the widely used techniques for studying the structure, function and reaction dynamics of macromolecules in chemistry and biology. Fluorescence is often sensitive to small environmental changes of chromophores – small molecules embedded in proteins and absorbing light, hence responsible for proteins color. So, fluorescence measurements could reveal ligand-induced conformational changes in proteins, origins of charge transfer reactions, solvent relaxation phenomena and local conformational changes in- and around the chromophore in proteins. Most fluorescence decays occur in the time window of ~ 100 fs to nanoseconds, measurements thus require short light pulses and high temporal resolution instrumentation. Many different techniques have been developed to obtain time resolution in fluorescence spectroscopy. For instance, photo-cathode based techniques like TCSPC (time-correlated single photon counting)¹⁾ and streak camera²⁾ allow detecting weak time-resolved fluorescence signals, however, very careful de-convolution procedures are needed to get picoseconds time resolution. At sub-picoseconds resolution level these techniques become both expensive and labile, and system maintenance for day to day reproducibility of sensitive sample measurements is challenging and often impossible. In recent years, a number of advanced and stable ultrafast lasers (primarily Ti:Sapphire based lasers with ~ 100 fs or shorter pulse widths) and associated optoelectronic instruments have emerged and are commercially available. Hence, as a matter of fact, to obtain time resolution comparable to excitation laser pulse width, nonlinear laser sampling techniques could be the best choice. The use of an optical Kerr effect as an optical shutter was first proposed in 1968³⁾. It makes use of the

transient birefringence (3rd order nonlinear effect) induced in a medium with high nonlinear susceptibility χ^3 by an intense laser pulse to create an ultrafast shutter. Liquids (CS₂, benzene, toluene) or solid state materials (glasses, fused silica doped with gold nano-particles) have been used as a gate and instrument response function as fast as ~ 200 fs was demonstrated⁴⁾. However, the Kerr shutter contrast is inherently poor due to the nuclear motion induced slow birefringence recovery component. Furthermore, low sensitivity and spectral restriction to a visible range limit the applications of this technique.

Another nonlinear sampling technique is based on a phenomenon of sum frequency generation of light (2nd order nonlinear effect) in a non-linear crystal (KDP, LiNbO₃, BBO, etc.), thus being an intrinsically high resolution spectroscopic technique. Because the emission signal is generated at the sum frequency (higher photon energy), this technique is called “fluorescence up-conversion”. In regard to time resolution, measurement sensitivity and accuracy, the fluorescence up-conversion technique is ultimately the most competitive one. In Section 2 of this report, the basic principles of the technique, requirements to the non-linear crystals, mixing spectral bandwidth, acceptance angle, etc. have been summarized. We have developed conventional- and microscope based fluorescence up-conversion techniques for studies of protein reaction dynamics and other ultrafast phenomena in solution and solid state phases, respectively.

Flavoproteins contain FAD (flavin adenine dinucleotide) or FMN (flavin mono-nucleotide) as a cofactor (Fig. 1 a, b) and play an important role in oxidation, oxygenation and ET (electron transfer) reactions. Applications of fluorescence up-conversion technique to various “non-fluorescent”

flavoproteins - RBP (Riboflavin binding protein), MCAD (Medium-chain acyl-CoA dehydrogenase), FD (Flavodoxin), DAAO (*d*-amino acid oxidase), etc., have been performed in our laboratory and some results related to solution phase dynamics are presented here. Briefly, the flavin enzymes (Fig. 1 c) are especially interesting model systems for elucidating ultra-fast ET reactions taking place in chromophore binding pockets. When the flavin chromophore is in the oxidized form, it acts as a strong electron acceptor, therefore, if such aromatic amino acid residues as tryptophan and/or tyrosine are in close proximity to flavin, strong fluorescence quenching via ET on ultrafast time scale (10^{-14} - 10^{-10} s) occurs. In Section 3, we will present and discuss effects of ES (electro-static) charge variations in proximity of donors and acceptor on ultrafast ET dynamics of FBP (FMN-binding protein).

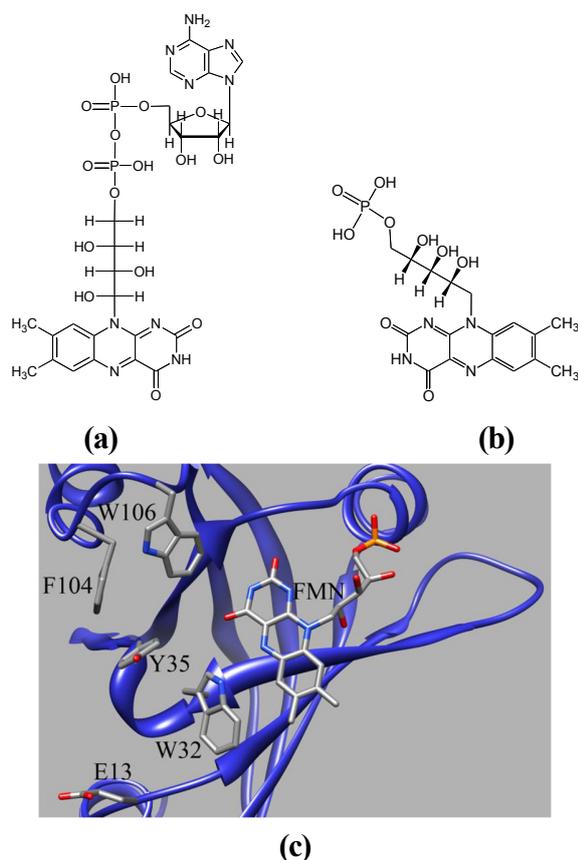


Fig. 1 Molecular structures of flavin chromophores; (a) FAD (flavin adenine dinucleotide) and (b) FMN (flavin mononucleotide), (c) The ribbon diagram of the chromophore binding pocket of FBP enzyme.

2. Fluorescence up-conversion technique

2.1 Basic principles

The time resolution mechanism underlying the fluorescence up-conversion technique is illustrated in Fig. 2. The up-conversion is actually a cross-correlation between the fluorescence and a probe laser pulse. At time $t=0$, the sample is electronically excited by second (in some cases third) harmonics of an ultrafast laser pulse with frequency ω_p . The collected incoherent fluorescence (ω_f) and the probe laser pulse ω_p arriving at time $t = \tau$ are co-focused in a non-linear optical crystal oriented at an appropriate angle with respect to the fluorescence and laser beams. Sum frequency photons are generated only during the time that the probe laser pulse is present in the crystal, acting as a “gate” – thus keeping the time resolution within the laser pulse width. The time evolution of the fluorescence may then be traced by varying the delay τ of the probe laser beam. It is easy to show that the intensity of the signal beam at sum frequency and at a given delay time τ is proportional to the correlation function of the fluorescence with the probe laser pulse. Main features for successful up-conversion measurements are briefly summarized below:

Polarization; The up-conversion process (sum frequency generation) is intrinsically a polarization selection process (for example, $\mathbf{O} + \mathbf{O} \rightarrow \mathbf{E}$ conversion in Type I NLO crystal).

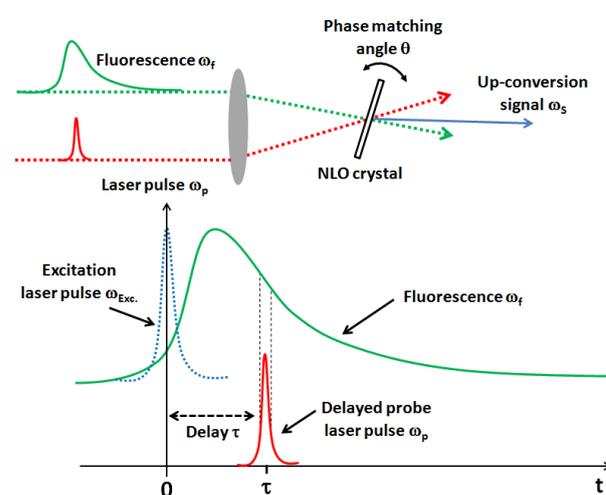


Fig. 2 Schematic diagram describing the basic principles of the fluorescence up-conversion technique.

Hence, for collection of different polarized emission components, rotation of excitation pulse polarization with a thin half-wave plate is required.

Phase matching condition; The up-conversion process is efficient only when condition for *phase matching* is satisfied. This happens for a narrow band of wavelengths centered at a wavelength determined by the phase matching angle θ of the NLO crystal. The conditions for the involved frequencies ω and corresponding wave vectors k ($2\pi n/\lambda$) are $\omega_S = \omega_f + \omega_p$ and $k_S = k_f + k_p$, respectively. Here the indexes S, f and p denote the up-converted signal, fluorescence and probe laser beams, respectively. In practice, the angle between k_f and k_p is kept constant ($\sim 15^\circ$ in our apparatus). For BBO (β -barium borate) crystal, which is well suited for the up-conversion, the phase matching angle (the angle between crystal optical axis and vertical axis) is about 30° for 800 nm and 400 nm mixing (signal at 266.7 nm). For other monitoring wavelengths, the crystal angle can be gently tuned. For the probe wavelength at ~ 800 nm, the BBO crystal can cover 250 – 2000 nm broad mixing spectral range.

Acceptance angle; The acceptance angle is the angle where the phase mismatch is less than 90° . This is another important factor in up-conversion experiments. Since the fluorescence is spontaneous, it is emitted in all directions from the excited spot of the sample, then collected and refocused onto the NLO crystal in a broad cone. Hence, the larger the acceptance angle that can be phase matched by the crystal, the larger the up-conversion efficiency. Roughly, the acceptance angle ϕ increases inversely with the crystal length L. Thus, for thinner crystals the focus can be tightened due to larger acceptance angle. As a result, the total up-conversion signal will stay relatively constant for thinner crystals in addition to better time resolution. For $L = 0.4$ mm BBO crystal the acceptance angle is estimated to be $\sim 8^\circ$.

Spectral bandwidth; The up-conversion spectral bandwidth is estimated by the spectral position difference when the quantum efficiency drops to 50%. Additionally, there is a

complicated interplay between the NLO crystal thickness and fluorescence spectral bandwidth. For $L = 0.4$ mm BBO crystal at 820 nm/500 nm mixing, the spectral bandwidth is less than 1 nm. Up-conversion is an intrinsically high-resolution spectroscopy.

Quantum efficiency of up-conversion; Quantum efficiency of up-conversion can be estimated for “small signal” condition, i.e. no depletion of the fluorescence and probe pulse powers. For example, for 100 fs probe pulse, 0.5 W average power at 820 nm, 0.1 mm spot diameter and 76 MHz repetition rate it is about 0.001 % for $L = 0.4$ mm BBO crystal. This is, however, more than enough for monitoring by average UV photo-multipliers. The obtained S/N ratio is routinely 10^2 .

Group velocity mismatch; In non-linear processes such as sum frequency generation, the mismatch between the group velocity of ultrafast probe pulse and fluorescence may lead to a temporal broadening of the generated up-conversion signal. This restriction is more severe than the one imposed by phase mismatching discussed above. This broadening effect can be pre-compensated by a pulse compressor and/or minimized by a proper choice of optical elements by using refractive optics and thinner NLO crystals.

2.2 Home-made fluorescence up-conversion apparatus

As it was presented above, ultrafast fluorescence up-conversion technique has many peculiarities, that’s probably why it is not available commercially. We have built a reliable system in our laboratory (Fig. 3) with high temporal resolution

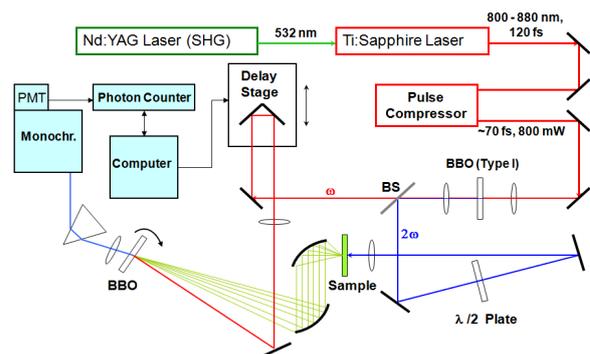


Fig. 3 Schematic diagram of the fluorescence up-conversion.

and sensitivity, briefly described below.

A Ti:Sapphire laser system (Verdi-V8 pumped Mira 900, Coherent, Inc.) was used as a light source (120 fs, 76 MHz, 800 mW at 820 nm). The pulses were further compressed up to ~ 70 fs fwhm using a prism pair compressor. The second harmonic (~ 20 mW) was generated in a 0.1 mm thin BBO crystal and focused onto the sample circulating in a flow cell (50 ml/min) with 1 mm light path length to generate the fluorescence. It is then collected with a pair of parabolic mirrors and focused, together with the residual fundamental laser pulse, on a 0.4 mm BBO type I crystal to generate the up-converted signal at the sum frequency. After passing through a grating monochromator (1200 g/mm, Acton Research Corp.), the fluorescence is detected by a photomultiplier (R1527P) coupled with a photon counter (C5410) system (both from Hamamatsu Photonics K. K.). The fluorescence decay curves can be obtained by varying the optical path length of the computer controlled delay stage for the fundamental laser pulse. Ten scans (~ 6.67 fs or 20 fs steps) in alternate directions are usually accumulated to obtain a single transient with acceptable S/N ratio. As an instrument response function, the cross-correlation signal between the fundamental and its second harmonic pulses is used (fwhm ~ 130 fs). All measurements are usually carried out at $\sim 20^\circ\text{C}$. In the experiments described below, the optical density per 1 cm path-length was ~ 3 at 410 nm.

3. Applications to flavoproteins

As an application example, here we present our recent studies on wild type (WT) FBP (flavin binding protein) and its six point mutants W32Y, W32A, E13R, E13K, E13Q and E13T. Generally, proteins including also FBP, contain many ionic groups which may influence the intra-protein ET rates. The specific purpose of this study was to understand and elucidate the role and influence of ES (electro-static) charges and corresponding energies on the ET rate. Many details of this study can be found elsewhere⁶. Briefly, FBP from

Disulfobrevibrio vulgaris (Miyazaki F) is one of the smallest flavoproteins (122 amino acids, 13 kDa) and contains FMN as a cofactor. It is thought to play an important role in ET processes in the bacterium, however, the whole picture of the electron flow and coupling to the redox proteins is not clear yet. According to the three-dimensional structures determined by X-ray crystallography, there are 3 potential quenchers located close to the Iso (isoalloxazine) rings of the FMN (Fig.4, top):

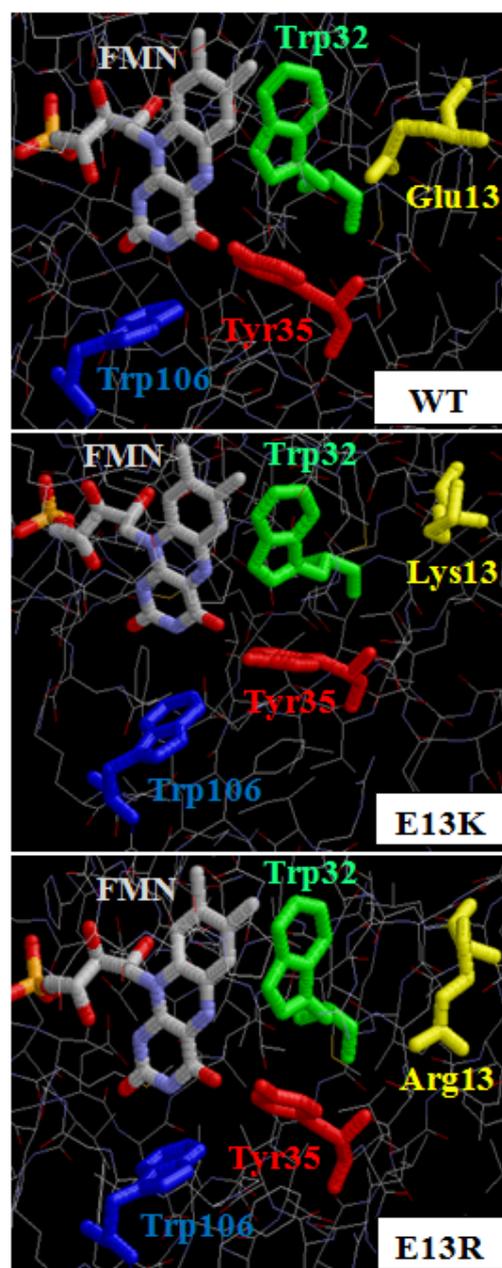


Fig. 4 Chromophore binding pocket structures of WT FBP, E13K and E13R point mutants determined by X-ray crystallography.

tryptophan at 32nd position (Trp32), Tyrosine at 35th position (Tyr35) and another tryptophan at 106th position (Trp106). Corresponding center-to-center distances from Iso to Trp32, Tyr35 and Trp106 were 0.71 nm, 0.77 nm and 0.85 nm, respectively. Firstly, to determine which amino acid is the dominant quencher in this protein, fluorescence dynamics of two point mutations W32Y (Trp at 32nd position was replaced by Tyrosine) and W32A (Trp at 32nd position was replaced by Alanine) were studied and compared with the dynamics of WT FBP (Fig. 5).

It is important to note, that fluorescence up-conversion technique can experimentally determine if there is substantial amount of water involved in the chromophore surroundings or if the protein binding pocket structure is flexible. Such information can be obtained by spectral measurements. In the present study, transient fluorescence decays were measured at several observation wavelengths between 480 – 600 nm and no dynamic Stokes shift or other marked wavelength dependences were observed in all seven proteins examined. Furthermore, the time-resolved anisotropy was ca. 0.4 and constant for all systems, further confirming that neither rotational motions nor changes in electronic state of Iso take place. Hence, we can safely conclude that the protein binding

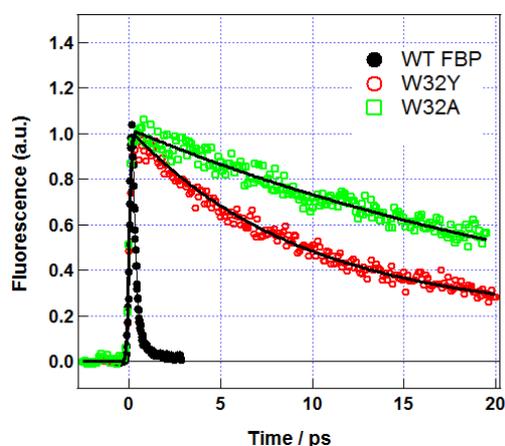


Fig. 5 Fluorescence decay curves of WT FBP, W32Y and W32A point mutants at steady state fluorescence maxima (~ 530 nm) with ~ 170 fs, ~ 11 ps and ~ 40 ps average lifetimes, respectively.

pocket structures are sufficiently rigid in all systems and further discussions are carried out for the single wavelength measurements at emission maxima (~ 530 nm) of these proteins. For comparison, the ET rate in W32A, where tryptophan is replaced with neutral alanine possessing no quenching capability, is more than 200 times lower compared with the ET rate in WT FBP, indicating, that the ET contributions from two other quenchers Tyr35 and Trp106 are negligible. Even when the tryptophan at 32nd position is replaced by potential quencher tyrosine in W32Y, the ET rate is about 65 times lower vs. the WT FBP. Hence, Fig. 5 clearly shows that the main fluorescence quencher in FBP is tryptophan at 32nd position due to its close proximity to Iso and higher (~ 8 eV) ionization potential. Next, to elucidate the effect of electrostatic charge distribution in the protein on the ET rate, we have investigated four single-substitution isomorphs: E13K, E13R, E13T and E13Q. In all these systems the negatively charged glutamic acid at 13th position was replaced by positively charged lysine (E13K) or arginine (E13R), and neutral threonine (E13T) or glutamine (E13G). Interestingly, according to X-ray crystallographic structures of

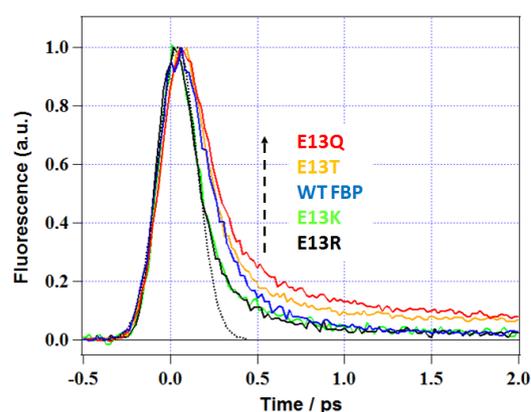


Fig. 6 (bottom to top) Fluorescence decay curves of E13R, E13K, WT FBP, E13T and E13Q isomorphs at steady state fluorescence maxima (~ 530 nm). The dotted line represents the instrumental response function. The fitting curves to experimentally obtained data have been omitted for clarity.

these mutants, the distances between the Iso and all three quenchers Trp32, Tyr35 and Trp106 were almost unchanged (Fig. 4). Moreover, the hydrogen bonding network between Iso and Gly49, Pro47, Thr31 in WT FBP was unaltered in all other systems as well. Hence, one would expect the same ET rate as in the WT FBP for all four mutants. However, as presented in Fig. 6, the experimentally obtained ET rates varied for these systems. The observed fine tuning of fluorescence decay curves describing the ET rate changes could be ascribed to the ES charge redistribution in the protein binding pocket. Indeed, ET rate calculations using Kakitani – Mataga ET model theory^{6,7)} confirmed that the main reason for the observed rate changes is the change in net ES energies of Trp32 in each system. For reference, the net ES energy of Trp32 in WT FBP was ~ 0.026 eV, however, in E13K and E13R it increased to ~ 0.29 eV; in E13T and E13Q it was ~ 0.4 eV. Calculations of the total free energy gap ($-\Delta G^\ddagger$) showed that its value was smallest for E13T and E13Q (ca. 0.065 eV), followed by E13K and E13Q, and then by WT FBP, which has the largest value equal to ~ 0.45 eV. Interestingly, the ET rates from Trp32 to excited Iso* were fastest in E13K and E13R, followed by WT FBP, E13T and E13Q, respectively. This seemingly inconsistent result is clarified in Fig. 7, where ET rate (k_{ET}) dependence on total free

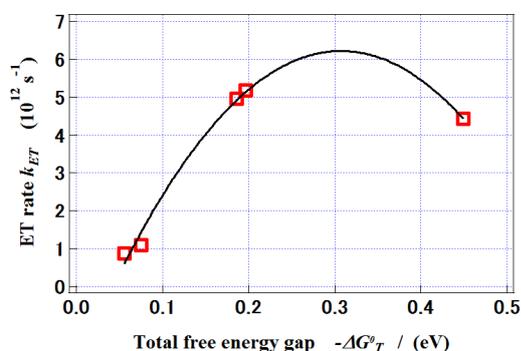


Fig. 7 Trp32 to excited Iso* ET rate dependence on total free energy gap, $-\Delta G^\ddagger$: Donor-acceptor distances were similar in all five FBP isomorphs. The main reason for the observed ET rate changes is the net ES energy differences of Trp32 in each system.

energy gap ($-\Delta G^\ddagger$) is plotted. The observed bell-shaped ET rate dependence explains why for WT FBP the ET rate decreases while the total energy gap increases. This is one of the rarely observed cases when the ET process in a native protein occurs in the inverted region of the energy gap law.

4. Conclusions

We have discussed time-resolution potential of existing transient fluorescence spectroscopic methods and presented basic principles of the ultrafast fluorescence up-conversion technique. Details of our home-made femtosecond up-conversion apparatus have been presented and its application on flavoproteins was demonstrated. Effects of ionic charges on ultrafast fluorescence dynamics were investigated.

We have shown that replacement of ionic amino-acid Glu13 and resulting modification of the electrostatic charge distribution in the protein binding pocket substantially alters the ultrafast fluorescence quenching dynamics and ET rate in the FBP. We have concluded that together with donor-acceptor distances, electrostatic interactions between ionic photoproducts and other ionic groups in the proteins are important factors influencing the ET rates in proteins.

References

- 1) R. R. Duncan, A. Bergmann, M. A. Cousin, D. K. Apps, and M. J. Shipston: *Journal of Microscopy*, **215**, 1 - 12, 2004.
- 2) S. Saha, P. K. Mandal, and A. Samanta: *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **6**, 3106 - 3110, 2004.
- 3) M. A. Duguay, and J. W. Hansen: *Appl. Phys. Lett.*, **13**, 178 - 180, 1968.
- 4) J. L. Gu, J. L. Shi, G. J. You, L. M. Xiong, S. X. Qian, Z. L. Hua, and H. R. Chen: *Adv. Mater.*, **17**, 557 - 560, 2005.
- 5) H. Mahr, and M. D. Hirsch: *Opt. Commun.* **13**, 96 - 99, 1975.
- 6) S. Taniguchi, H. Chosrowjan, F. Tanaka, T. Nakanishi, S. Sato, Y. Hanuyama, and M. Kitamura: *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **86**, 339 - 350, 2013.
- 7) T. Kakitani, and N. Mataga: *J. Phys. Chem.*, **89**, 8 - 10, 1985.

液中レーザーアブレーション法によるナノ粒子作製：溶融塩の効果

レーザーバイオ化学研究チーム

谷口誠治

1. はじめに

ナノ粒子は比表面積が大きく、またバルク材料とは異なった特有の物性を示すことから、その応用に向けた研究開発が様々な分野で進められている。近年では、金や銅等、電気抵抗が小さな金属のナノ粒子はIC基盤等に微細配線を形成するためのインク等に用いられ、また白金ナノ粒子の化粧品や食品への利用、磁性ナノ粒子を用いたガン治療の研究等、多くの応用例が報告されている。このことから、ナノ粒子の需要は今後飛躍的に増大すると予想されるため、生産性の高いナノ粒子作製法の開発は重要な課題となっている。従来のナノ粒子作製法には、金属の塊をボールミル等で粉砕する手法や、真空中で金属を加熱して気化させたりスパッタする手法、常温の液相中で金属塩を還元したり金属錯体を熱分解する手法等があり、これまで数多くの製造プロセスが提案されてきたが、これらの手法では粒子サイズの微細化や均一化に限界がある、原料や設備が複雑で高コストである、生産性に乏しい等、多くの問題も残されている。これらの問題に対し筆者は、ナノ粒子をより簡便に作製する手法として液中レーザーアブレーション法を提案している。液中レーザーアブレーション法とは、液相中でターゲットとなるバルク材料にパルスレーザー光を集光照射することにより、材料を直接的に原子化、プラズマ化する手法であり、原子化された材料は周囲の溶媒により瞬時に冷却され凝集、ナノ粒子化する（図1）。

筆者はこれまで、水あるいはアセトン等の有機溶媒を用いて酸化チタンや鉄ナノ粒子の作製に関する研究を行い、本手法により粒径10~30 nmのナノ粒子を作製することに成功した¹⁻³⁾。しかしながら溶媒に水を用いた場合には、ナノ粒子が水と反応してしまう場合や、凝集性が強まる可能性がある。また有機溶媒を用いた場合には、溶媒分子の熱化学反応により炭化物等が生成してし

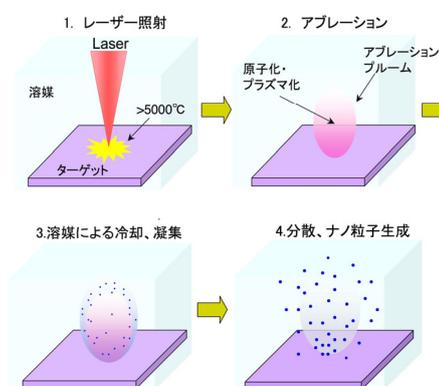


図1 液中レーザーアブレーション法の原理図

まう可能性も指摘されている。このことから、本手法の開発には、化学的に安定で、且つ凝集抑制作用を持つ溶媒の選定が重要となる。

この点に関して最近、溶媒に溶融塩を用いた手法が注目されている。溶融塩は高温 (>300°C) でも化学的に安定で、多くの物質を効率よく溶解させる等の特徴を持つことから、チタンやタングステン等、高融点材料のナノ粒子化に適しており、またナノ粒子間に溶融塩分子が入り込むことで凝集抑制作用を持つ可能性も指摘されている。さらには、作製したナノ粒子懸濁液を常温まで冷却することにより、ナノ粒子を固体中で保存できる（保存中に凝集が起こる懸念がない）といった利点もある。このため溶融塩は噴霧熱分解法やプラズマ誘起電解法等の各種ナノ粒子製造法の溶媒に利用され、一次粒径が約10 nmのナノ粒子の効率的な作製が可能になりつつある⁴⁾が、液中レーザーアブレーション法に応用された例はない。そこで本研究では、溶融塩を溶媒に、ナノ粒子関連研究の標準的な材料である金、および高融点材料のチタンを用いてナノ粒子作製実験を行い、本手法における溶融塩の有用性について検討した。本稿では、溶融塩中および水中で作製したナノ粒子の物性比較を行った結果について報告する。

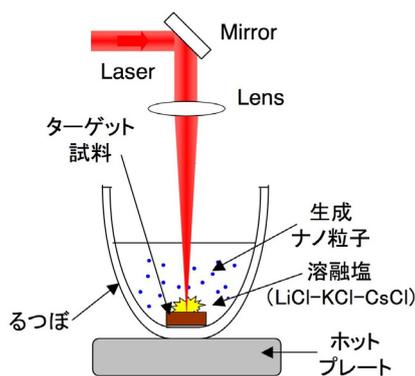


図2 溶融塩中レーザーアブレーション実験図

2. 実験

図2に液中レーザーアブレーション実験の配置図を示す。溶融塩には、塩化リチウム (LiCl)、塩化カリウム (KCl) および塩化セシウム (CsCl) を重量比 1:1:1 で混合したもの (LiCl-KCl-CsCl) を用いた。融点は約 260°C である。溶融塩をセラミック製のるつぼに入れ、ホットプレート上で加熱して溶融させた後、るつぼの底部にターゲット材料 (金、チタン) を配置し、上部から焦点距離 15 cm のレンズにより集光したパルスレーザーを照射した。レーザー光源には、ナノ秒パルス YAG レーザー (Continuum Surelite I、波長 1064 nm、パルス幅 8 ns (FWHM)、光径 6 mm φ、繰り返し 10 Hz) を使用した。実験中はホットプレートの位置を常に移動させ、ターゲット材料の同じ位置にレーザーが照射され続けることがないようにした。試料に一定時間レーザー照射を行った後、生成ナノ粒子を含む懸濁液を常温まで冷却し固化させた。固化した試料は水を加えて水溶液とした後、吸収スペクトル測定および動的散光法による粒径分布測定を行った。吸収スペクトル測定には分光光度計 (HITACHI U-4100) を、粒径分布測定には粒度分布計 (HORIBA LB-550) を使用した。

3. 結果と考察

3.1 液中レーザーアブレーションによる金ナノ粒子の作製: 溶融塩の効果

溶融塩との比較のため、まず水中における金のレーザーアブレーション実験を行い、生成した金ナノ粒子の物

性を調べた。図3(左)に実験時の写真を、図3(右)に光強度 50 mW (2×10^9 J/cm² · sec · pulse) で 40 分、75 mW (3×10^9 J/cm² · sec · pulse) で 15 分、100 mW (4×10^9 J/cm² · sec · pulse) で 15 分の照射実験を行った後の試料の写真を示す。光強度 50 mW では試料は赤色を呈したが、照射光強度が大きくなるに従い紫～青色に変化した。試料の着色は生成金ナノ粒子の表面プラズモン吸収帯に起因するものであり、粒径に依存性して吸収ピークがシフトし色の変化が起こる。図4に各試料の吸収スペクトルを示す。ただし、照射光強度 75 mW、100 mW の試料では生成粒子が凝集しスペクトルに散乱の効果が見られたため、その効果はデータから差し引いてある。いずれの試料にも表面プラズモン吸収帯が観測されており、そのピーク波長は 50 mW 照射時で 523 nm、75 mW 照射時には 550 nm あった。また 100 mW 照射時には幅広い吸収帯が観測され。ピーク波長およびスペクトル形状から生成ナノ粒子の平均粒径を求めると、50 mW 照射試料 (図中 (a)) では 15 nm、75 mW 照射 (図中 (b))

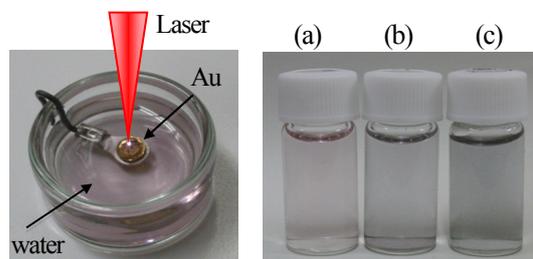


図3 (左) 水中における金のレーザーアブレーション実験時、(右) 光強度 (a)50 mW、(b)75 mW、(c)100 mW での実験後の試料の写真

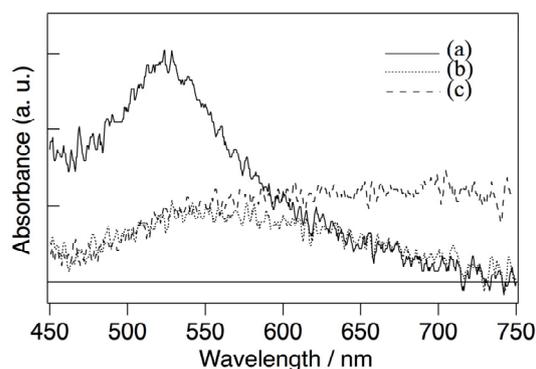


図4 水中レーザーアブレーションにより作製した金ナノ粒子 (図3(a)-(c)) の吸収スペクトル

および 100 mW 照射試料 (図中 (c)) ではそれぞれ約 70 nm、200 nm で、照射光強度の増大により生成粒子の粒径が大きくなることが分かった。光強度による生成粒子の粒径の変化は、1 パルスあたりに原子化される金の濃度 (密度) に依存すると考えられる。つまり、高強度のレーザー照射により一度に多量の金がアブレートされると、プラズム内の金原子の濃度が増大するため原子同士の衝突頻度が大きくなり、その結果粒子の大粒径化が起こるものと考えられる。

熔融塩中におけるレーザーアブレーション実験結果を以下に示す。用いた熔融塩は 3 g、水中で最も小粒径のナノ粒子が得られた照射条件 (光強度 50 mW) で実験を行った。図 5 に実験中 (図 5 (a)) および実験後 (冷却後、図 5 (b)) の試料の写真を示す。融解した熔融塩がナノ粒子の生成により赤く着色し、また冷却後固化した試料もその着色を保持していることから、熔融塩中においてもアブレーションにより金ナノ粒子が生成することが明らかとなった。図 6 (a) に、実験後の試料に水を加え水溶液化した試料の吸収スペクトルを示す。プラズモン吸収帯のピーク波長は 554 nm で、水中での結果 (図 6 (b)) に比べて 20 nm 長波長側にシフトした。ピーク波

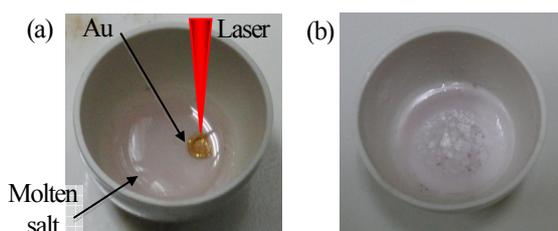


図 5 熔融塩中での金ナノ粒子作製実験での (a)レーザー照射時、(b)照射後 (常温) の試料の写真

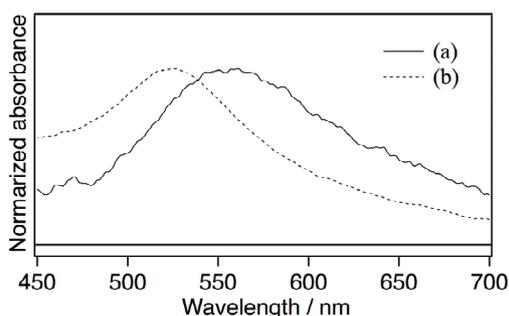


図 6 (a)熔融塩中 (実線)、(b)水中 (点線) で作製した金ナノ粒子の吸収スペクトル (光強度 50 mW)

長から求めた金ナノ粒子の平均粒径は約 80 nm であった。

次に、熔融塩の凝集抑制効果について検討するため水に重量比 10%の熔融塩を加えた水溶液を用い、常温でレーザーアブレーション実験を行った。その結果、光強度 75 mW (15 分) での照射時にナノ粒子の生成が確認された。試料の吸収スペクトルを図 7 に示す。水中での実験結果 (図 3 (b)) に比べ、プラズモン吸収帯は明確に観測された。ピーク波長 (554 nm) から求めた平均粒径は約 50 nm で、水中 (約 80 nm) よりも小粒径の粒子が生成したことから、熔融塩が凝集抑制効果を持つことが示唆される。一方で、光強度 50 mW の照射ではナノ粒子の生成は確認できなかったことから、熔融塩の光吸収により光強度がアブレーション閾値以下にまで低下した可能性もあるため、今後その詳細について検討する必要がある。

熔融塩中と水中での実験結果を比較すると、同じ光強度では熔融塩中の方が大粒径の粒子が生成している。この主な要因には、おそらく溶媒の温度が関連しているものと考えられる。金の融点はバルク状態では 1064°C であるが、粒径が数 10nm あたりから比表面積の増加により融点が低下しはじめ、粒径 2 nm では 400-300°C 付近まで低下する⁹⁾。このため熔融塩の融点 (260°C) 付近では、一旦生成した小粒径のナノ粒子同士が融着し大粒径化すると考えられる。一方で融着により粒径が大きくなるに従い融点も上昇するため、ある程度の粒径で粒子の成長が抑制されるものと考えられる。現時点でその詳細

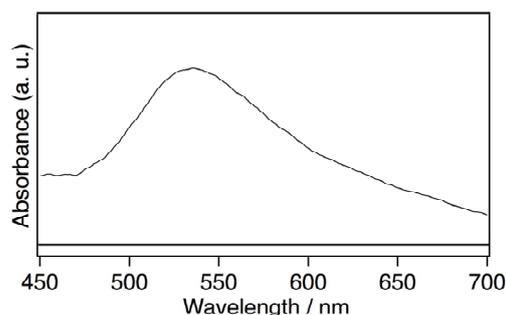


図 7 熔融塩混合水 (10wt%) 中で作製した金ナノ粒子の吸収スペクトル (光強度 75 mW)

は明らかではないが、今後溶媒の温度と生成粒子の粒径との関連性を明確にしていく。

3.2 溶融塩中レーザーアブレーションによる酸化チタンナノ粒子の作製

酸化チタン(TiO₂)ナノ粒子は、n 型半導体の特性や紫外線吸収能を有しており、太陽電池や紫外線遮蔽材、抗菌材等数多くの応用例がある。筆者はこれまで、水中レーザーアブレーションによるチタンナノ粒子の作製を行い、アブレートされたチタンが水あるいは水中の酸素と反応して酸化され、酸化チタンナノ粒子として生成することを明らかにしたりが、溶融塩中での挙動は明らかではない。実験には4.5 g の溶融塩を用い、加熱融解した溶融塩中にチタン板（純度99.5%、ニラコ）を配置して光強度200 mW（9×10⁹J/cm²・sec・pulse）で20分レーザー照射を行った。金の実験時よりも光強度が高いが、これはチタンの融点が金よりも高く（～1800℃）、チタンのアブレーションにより多くのエネルギーを必要とするためである。同様に水中（5 ml）でも同照射条件で実験を行い、結果を比較した。図8(a)、(b)に水および溶融塩中の実験で得られた試料と、実験後のチタン板の写真をそれぞれ示す。ただし溶融塩中の試料は実験後、水を加え水溶液化したものである。試料はいずれも白濁化しており、レーザー照射により白色の酸化チタンナノ粒子が生成したことがわかる。実験後のチタン板は水中では表面の黒化が見られる。これはチタン表面で低次の酸化チタン（Ti_nO_{2n-1}（n=1～10））が生成するためであり⁹、レーザー照射面でチタンの水あるいは酸素による酸化反応が起こることを示す。一方、溶融塩中ではチタン表面の黒化は顕著ではない。溶融塩は分子中に酸素を含まず、また高温状態であるため水中に比べ溶存酸素量も低いと考えられることから、溶融塩中ではレーザー照射によりチタン（Ti）粒子が生成し、その後加えた水や空気中の酸素により酸化されたものと考えられる。生成粒子の粒径計測の結果を図9に示す。酸化チタンナノ粒子は表面プラズモン吸収を持たないため、計測には粒度分布計を用いた。水中での生成ナノ粒子の平均粒径は

98 nm（変動係数45.2）であるのに対し、溶融塩中での粒子は平均粒径2.9 μm（変動係数29.1）と大粒径化していることがわかった。酸化チタンナノ粒子には凝集性があり、水中では粒径数nm～数10nmの1次粒子が凝集して2次粒子を形成するが、溶融塩中では上記したように酸化チタンよりも反応活性が高いチタン粒子が先に生成すると考えられるため、溶融塩中で粒子間の凝集がさらに進んだものと考えられる。このメカニズムの詳細を明らかにするためには、溶融塩が融解した状態（高温状態）で生成粒子の物性を観測する必要がある。今後装置作製を含めさらに検討を進める予定である。

4. まとめ

本研究では、溶融塩（LiCl-KCl-CsCl）溶媒中でレーザーアブレーション法による金およびチタンのナノ粒子作製実験を行い、水中での実験結果と比較した。その結

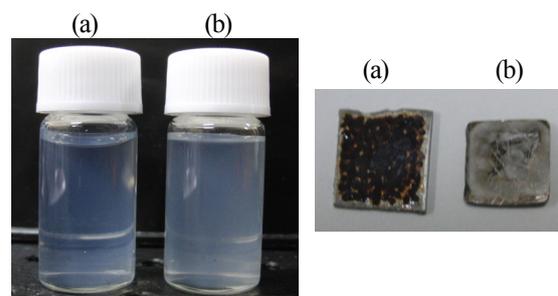


図8 (a)水中、(b)溶融塩中でのレーザーアブレーション実験後の懸濁液試料とチタン板の写真

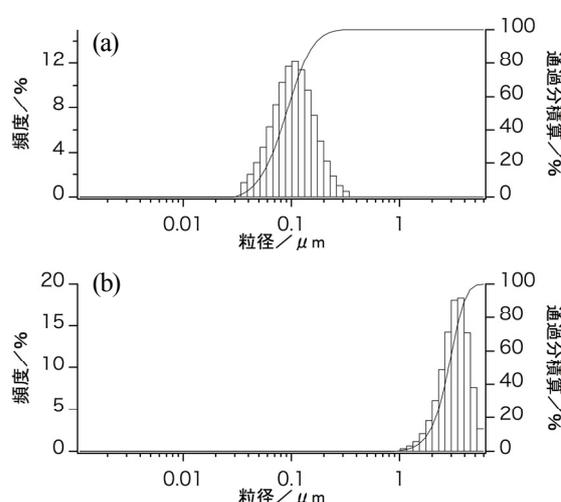


図9 (a)水中、(b)溶融塩中で生成した酸化チタンナノ粒子の粒径分布

果、熔融塩中においても金および酸化チタンナノ粒子が生成することを確認した。一方、金、酸化チタンとも熔融塩中の方が生成粒子の粒径が大きくなることがわかった。金の場合には、熔融塩中では高温下（ $\sim 300^{\circ}\text{C}$ ）でナノ粒子同士が融着し大粒径化すると考えられ、酸化チタンの場合には、熔融塩中で先にチタンナノ粒子が生成した後凝集して大粒径化し、その後水や酸素による酸化が起こる可能性が高い。今後、熔融塩中でのナノ粒子物性について実験装置の作製を含めて検討を進め、その生成メカニズムを明らかにする予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり平成 25 年度大阪大学レーザーエネルギー学研究中心共同利用・共同研究（自由研究課題型 B2-20）の支援を得た。

参考文献

- 1) 谷口誠治, 佐伯 拓, 岡田竹弘, 古 隆志: レーザー学会第 421 回研究会報告「21 世紀のレーザー技術」, **RTM-11-56**, 25-30, 2011.
- 2) T. Okada, T. Saiki, S.Taniguchi, T. Ueda, K. Nakamura, Y. Nishikawa and Y. Iida: *ISRN Renewable Energy (Open access journal)*, **2013**, 827681, 2013.
- 3) 谷口誠治, 岡田竹弘, 佐伯 拓, *ILT2013 年報, レーザー技術総合研究所*, 2013.
- 4) 伊藤靖彦, 後藤琢也, 河村博行, 特許第 4688796 号, 2011.
- 5) N. Wada: *Chem. Eng.*, **9**, 17-21, 1984.
- 6) 谷口誠治, 古河裕之, 佐伯 拓, *ILT2011 年報, レーザー技術総合研究所*, 2011.

極端紫外(EUV)光源開発研究

理論・シミュレーションチーム

砂原 淳

1. はじめに

現在量産されている半導体の最も細い回路線幅は22 nm(ハーフピッチ)であるが、それらはArFレーザー(192 nm)を光源として採用し、液浸技術により屈折率を大きくする露光方式を用い、さらに二重露光を行う複雑な行程で製造されている。しかしながら、この方法で今後の回路線幅16 nmの半導体リソグラフィに対応するためにはさらなる多重露光技術が必要とされ、半導体製造コストの増大が懸念されている。そこでダブルパターンニングなどの複雑な行程が不要で、11 nmプロセスよりもさらに微細な回路線幅の半導体まで製造可能である波長13.5 nmの極端紫外線(Extreme Ultra-Violet: EUV)が半導体リソグラフィ用次世代光源として期待されている。EUV光源に求められるのは高い発光効率、高出力、高い安定度である。2014年4月のSPIE advanced lithography会議において、世界の二大EUV光源メーカー、即ち、米国CYMER社と日本のGigaphoton社からそれぞれ開発中のEUV光源の出力について報告があり、CYMER社は70W、Gigaphoton社は43WのEUV出力達成を報告した。これらは従来のEUV出力に比べると飛躍的に出力が向上しているが、まだ量産光源の目標であるEUV出力180 Wには到達していない。

我々はギガフォトン社と協力して、EUV出力180 Wを達成すべく、光源プラズマの最適化研究を行っている。現状のレーザー生成スズプラズマEUV光源のEUV出力を基準として、レーザー出力を3倍、レーザーからEUV光への変換効率を2倍にできれば、EUV出力を現在の6倍にすることができ、180 Wを超えるEUV出力が可能になると考えている。より具体的にはEUV変換効率は6%以上が我々の目標である。6%以上のEUV変換効率が達成できれば、EUV光源としてのスズプラズマの最適化はひとまず一段落する。

これまでに我々はレーザー生成スズプラズマに注目し、EUV発光の物理探究とプラズマ条件の最適化を行って来た。平成15-19年度に阪大レーザー研を中心として実施された文部科学省リーディングプロジェクトにおいて、レーザー生成スズプラズマからのEUV発光効率3%を実証した後、炭酸ガスレーザーの優位性を発見し、スズドロップレットに対してダブルパルス照射を行い、EUV変換効率4%を実証するなど、レーザー生成スズプラズマからのEUV発光の高効率化の指針を世界に先駆けて見出し、EUV発光の物理機構解明と高効率、高出力化に向けたプラズマ条件最適化において実績を挙げて来た。現在、世界のEUV光源研究は2017年頃の量産開始を目標に、炭酸ガスレーザーを用い、スズドロップレットにダブルパルス照射を行う方式を中心に研究が進められている。この方式でさらなる高効率化及び高出力化を目指す上で重要なのは、スズドロップレットに最初のレーザーを照射したときのドロップレットの挙動、プラズマ生成過程の解明・制御と、その後の炭酸ガスレーザー照射によるEUV発光の高効率化である。スズドロップレットにプリパルス照射後、生成したプリプラズマに炭酸ガスレーザーを照射するところまでの全ての過程をトータルに最適化するのが本研究目的である。本稿では、スズドロップレットのダイナミクスを流体シミュレーションにより探求することを目標として行ったH25年度の研究成果についてまとめる。スズドロップレットの挙動とプラズマ生成過程は未だよく判っていない事が多く、その計算も物理的、数値計算的な困難さがあり、定性的な計算のみであったのが現実であるが、我々は開発した輻射流体コード(STAR-2D)¹⁾を用いてドロップレットの膨張を計算した。その結果、高効率化を目指したスズプラズマの最適化に有用な知見が2次元シミュレーションにより得られた。次章で詳し

く述べる。

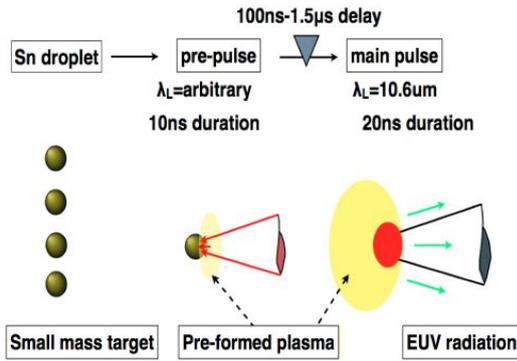


図1 ダブルパルス照射方式によるレーザープラズマ EUV 光源の概念

2. スズドロップレットの挙動

現在、我々が考えているEUV光源は図1に示すように、ダブルパルスを用いる2段階照射方式である²⁾。まず、スズドロップレットに最初のレーザー（プリパルス）を照射する。プリパルスの波長は $1\ \mu\text{m}$ を想定している。

スズドロップレットへのプリパルス照射によりプリプラズマが生成され、数 $100\ \text{ns}$ から数 μs の時間をかけて、ドロップレットの典型的なサイズ（直径） $20\ \mu\text{m}$ から数 $100\ \mu\text{m}$ までプラズマが膨張する。膨張したスズプラズマに対して、2段階目のメインパルスである炭酸ガスレーザーを照射し、EUV光を発生させる。この時、一番大事な事は炭酸ガスレーザーの吸収率を如何に高めるか、ということであり、スズのプリプラズマが十分な密度スケール長を有していることが必須である。具体

的には、炭酸ガスレーザーの十分な吸収を期待するには密度スケール長は典型的な値として $200\ \mu\text{m}$ 以上が必要である。そのため、プリプラズマの生成、即ちプリパルスレーザー照射されたスズドロップレットの挙動を密度分布を中心に解析し、挙動を理解することにより、EUV放射に最適なプリプラズマ生成条件を明らかにすることが出来る。しかしながら、典型的なプリパルスレーザー照射条件において、スズドロップレットは高密度・低温のいわゆる Warm Dense Matter 領域に入り、非理想的なプラズマとしての状態方程式の影響を強く受けることになる。我々は米国の Dr. R. More の協力を得て、高精度な状態方程式を輻射流体コードに導入し、スズドロップレットにプリパルスが照射される際のスズドロップレットの挙動を計算した。H24年度は一次元的計算を行い、プリパルスレーザー照射されたスズドロップレットが気体と液体の混合状態になることを見いだした。H25年度はさらに、2次元計算を行うことで、プリパルスレーザーを照射されたスズドロップレットの実際の挙動を解析した。プリパルスは従来ナノ秒パルスが用いられて来たが、ギガフォトンにより、ピコ秒パルスがより大きなEUV変換効率を与えることを見いだされて来ており、ここではピコ秒プリパルスを中心に記述する。図2に典型的な軸対称2次元計算のスズドロップレット内部の圧力と密度の時間発展を示す。図2ではドロップレットに対し、レーザーは右から照射される。その際、レーザーのスポットサイズはドロップレットと同

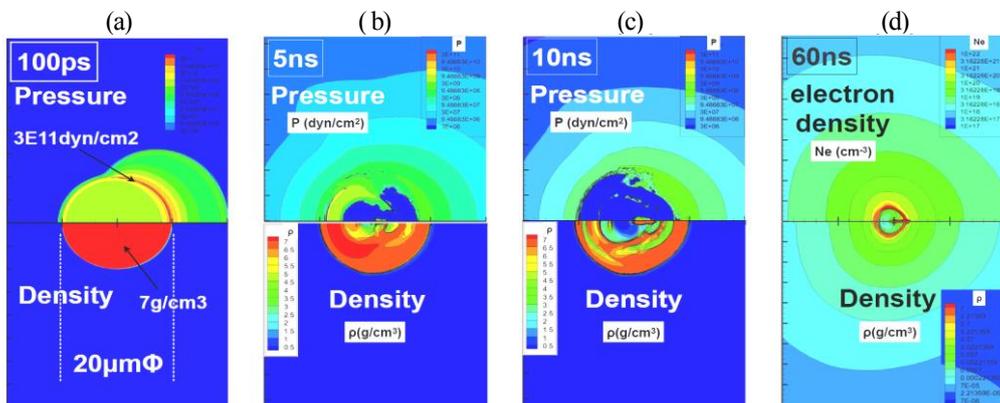


図2 ピコ秒プリパルスを照射されたスズドロップレットの2次元計算結果。それぞれ(a) レーザー照射後 $100\ \text{ps}$ 、(b) レーザー照射後 $5\ \text{ns}$ 、(c) レーザー照射後 $10\ \text{ns}$ 、(d) レーザー照射後 $60\ \text{ns}$ である。

じ直径 $20\ \mu\text{m}$ である。レーザー波長は $1.06\ \mu\text{m}$ 、レーザー強度は $5 \times 10^{12}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 、パルス幅は $15\ \text{fs}$ である。ドロップレットの右からレーザーを照射し、最初の $15\ \text{fs}$ のレーザー照射により、ドロップレット表面に最高 $100\ \text{eV}$ 程度のプラズマが生成する。そのため、図 2(a) のレーザー照射後 $100\ \text{ps}$ の圧力分布に見られるように、レーザー生成プラズマの高圧力でドロップレット表面に右から衝撃波が形成される。衝撃波はドロップレット中心部に向かって進行し、中心部である程度収束した後に、レーザー照射と反対側に伝播し、ドロップレットを通り抜ける。衝撃波がドロップレット中心から広がりながら伝播する際に、ドロップレットの密度は膨張により希薄になり、レーザー照射後 $5\ \text{ns}$ の図 2(b) ではドロップレット中心部に低密度のボイドを形成する。このとき衝撃波によって圧縮されるごく一部の領域を除き、スズドロップレットは固体密度よりも密度が小さく、数千度の比較的温度が低い状態、即ち気体と液体の混合領域に入る。さらに時間が経過し、図 2(c) に示すレーザー照射後 $10\ \text{ns}$ では衝撃波は既にドロップレットのレーザー照射面とは反対の側から抜けているが、ドロップレット中心部のボイドは益々大きく成長し、ドロップレット全体が気体と液体の混合状態となる。この気体と液体の混合領域は密度が圧力及び音速が極端に小さいという特徴を持ち、音速の小ささから、ボイドの領域が広がるのを補償するだけの流体運動が生じない。そのため、スパレーション

(spallation) と同様の現象が生じている。さらに時間が経つと、図 2(d) に示すようにレーザー照射後 $60\ \text{ns}$ 後には高密度のシェルと低密度の中空部分の 2 層構造を保ったまま、スズドロップレットは膨張し、スケールが大きくなっていくことが解った。

3. まとめ

スズドロップレットにレーザーを照射する際のドロップレットの挙動を中心に、次世代半導体リソグラフィに必須である高効率・高出力光源の開発に向けてシミュレーション研究を行った。今後は分子動力学的手法を用いてスズドロップレットの挙動を計算し、流体計算と比較するなど、スズの気液混合状態の物性についてさらに深く研究を進める予定である。また、これらの知見をベースに、スズドロップレットから EUV 光放射に至る全ての過程を統合したシミュレーションを行い、高効率 EUV 発光の条件を見いだす予定である。

参考文献

- 1) Sunahara, A. Sasaki, H. Tanuma, K. Nishihara, T. Nishikawa, F. Koike, S. Fujioka, T. Aota, M. Yamaura, Y. Shimada, H. Nishimura, Y. Izawa, N. Miyanaga, and K. Mima: *J. Plasma Fusion Res.*, **83**, 920-926, 2007.
- 2) K. Nishihara, A. Sunahara, A. Sasaki, et al.: *Phys. Plasmas*, **15**, 056708, 2008.

レーザー生成高速電子・イオンを用いたプラズマ加熱

理論・シミュレーションチーム

砂原 淳

1. はじめに

大阪大学では高速点火実験 (FIREX実験) を推進しており、爆縮プラズマを核融合点火温度である5 keVに加熱することを目指して研究が進んでいる。目下の課題は加熱効率、即ち超高強度レーザーから爆縮プラズマに与えられるエネルギーの割合の更なる向上である。FIREX実験で用いられる典型的なターゲットは図1に示すように、加熱用超高強度レーザーの通り道を真空に保つためのプラズマよけであるコーンターゲットが核融合燃料球に取り付けられた形となっている。最初に爆縮レーザーにより燃料球を圧縮した後、超高強度レーザーをコーンターゲット内部先端部に集光し、高速電子を発生させ、高速電子により爆縮プラズマコアを加熱する。高速点火方式が中心点火方式など他の点火と比べて優位となるためには、加熱効率が流体力学的効率の理論限界である10%以上にならないといけない。しかし、残念ながら加熱レーザー入射から爆縮コア加熱までの加熱効率は図1に示すように現状1%程度と見積もられている。また、この低い加熱効率のために、高速点火時の爆縮コアの温度も現状では数100eV程度しか上昇していないことが実験的に明らかになってきている。加熱効率は式 (1) に示すように次の4つのファクターの積で考えることが

できる。

加熱効率

$$\begin{aligned} &= (1) \text{レーザーから高速電子への変換効率} \\ &\times (2) \text{コーンターゲット先端部 (チップ) の透過率} \\ &\times (3) \text{コーン先端からコアへの到達効率} \\ &\times (4) \text{爆縮プラズマコアへのエネルギー付与効率} \end{aligned}$$

加熱効率を最大化させるためには、式 (1) の右辺の4つの項をそれぞれ最大化させる必要がある。また、従来の高速電子をベースとした高速点火スキームの研究に加え、爆縮コアの加熱温度を飛躍的に向上させる方法として高速イオンの利用についても平成24年度に提案し、研究を進めて来ている。高速イオンの利用を含め、高い加熱効率達成を目指すためには式 (1) に含まれている物理要素のそれぞれを理解し、全要素が統合された評価ツールが有用である。そこで、我々は1次元で統合加熱コードを開発し、平成25年度は高速電子や高速イオンの発散角を考慮するための計算幾何形状の変更等、さまざまな改良を行い、現状の実験の解析に用いることが可能なレベルに至った。次章で詳細を記述する。

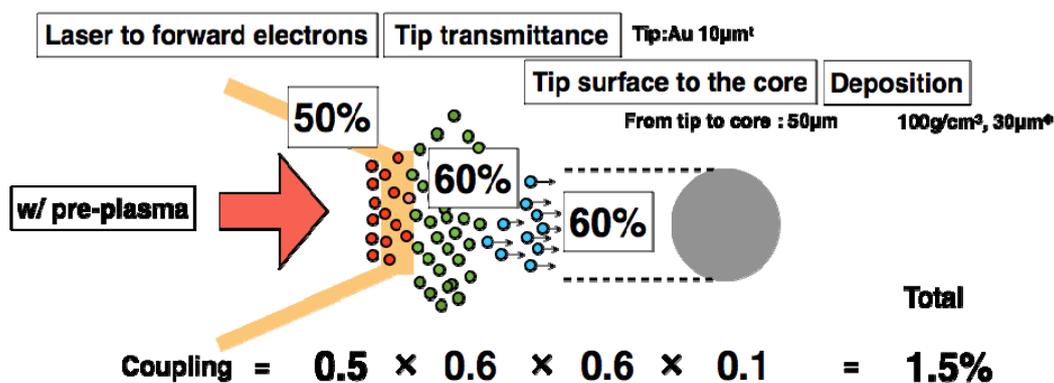


図1 爆縮コア加熱の加熱効率を決める4つの要素の概念図

2. 一次元高速点火加熱評価コード

開発したコードの幾何形状は一次元で、前章の式 (1) の全要素を考慮したものになっている。即ち、高速電子、高速イオンの発生効率、高速電子、高速イオンのプラズマ中における阻止能及びエネルギー付与¹²⁾、爆縮プラズマ中の加熱、帰還電流による加熱、輻射エネルギー損失、プラズマの加熱に伴う電離度の変化である。平成25年度は高速電子及び高速イオンの発散角を考慮すべく、図2に示すようなコーン形状の計算領域を扱うことができるようにコードを書き直した。その結果として、高速電子及び高速イオンの発散角をそれぞれ考慮することが可能になり、現実のFIREX実験の解析に用いることが可能になった。

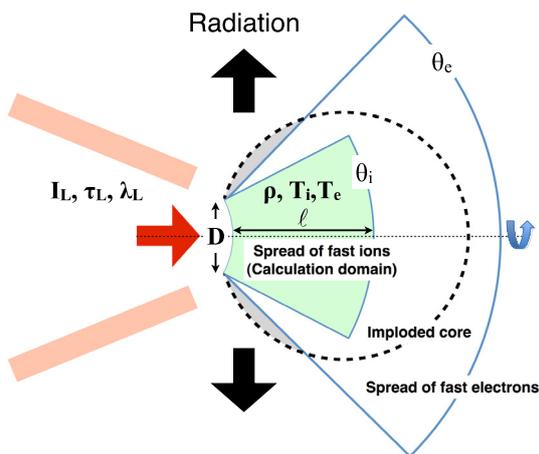


図 2 改良した一次元加熱評価コードの計算領域の模式図。高速電子及び高速イオンの発散角がそれぞれ別の値として考慮できるようになっている。

図 2 には計算条件として与えるべきパラメータをまとめてあり、レーザー条件として強度 I_L 、パルス幅 τ_L 、波長 λ_L 、スポット径 D を与える。このスポット内で高速電子及び高速イオンが発生し、それぞれの発散角 θ_e と θ_i で爆縮コア中を広がりながら通り、爆縮コアを加熱する。爆縮コアの設定パラメータは密度 ρ 、初期電子温度 T_e 、初期イオン温度 T_i である。これらを設定することにより、高速電子及び高速イオンの発生に関するモデルを用いて、図 3(a) に示すようにレーザーからそれぞれの入射

粒子への変換効率や、図 3(b) に示す高速イオンのエネルギーなど、入射粒子のエネルギーが求められ、それらの入射粒子のプラズマ中における阻止能計算によりコア加熱が計算される。

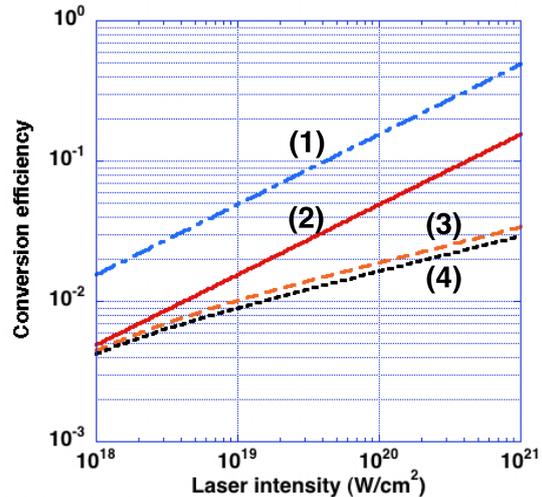


図 3(a) CD プラズマを想定し、高強度レーザーから 6 価の炭素イオンへのエネルギー変換効率を算出した例。それぞれ相互作用領域の密度に応じて(1) $0.1 \times$ 臨界密度、(2) 臨界密度、(3) 相対論的臨界密度 (直線偏光)、(4) 相対論的臨界密度 (円偏光) に相当する。今回の計算では(3)を採用している。

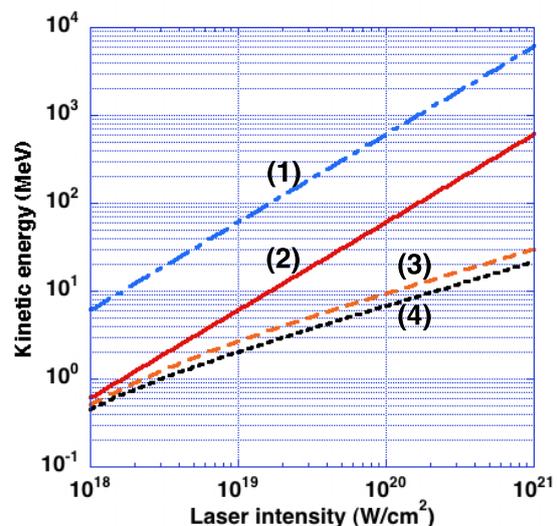


図 3(b) 図 3(a) に相当する 6 価炭素イオンの粒子エネルギー。(1)~(4) は相互作用領域の密度で、図 3(a) と同じ定義である。

3. 計算例

図4に爆縮コア加熱の計算例を示す。ここでは高速電子の発生モデルとして、Wilksによるスケーリング則を用いたものを図4(a)に、Wilksよりも勾配温度が低くなる傾向をもつHainesモデルを用いて高速電子の発生を計算した結果を図4(b)にそれぞれ示す。爆縮密度は全て、現在のFIREX実験における爆縮を想定して10 g/cm³としている。実線は高速イオンの加熱への寄与を考慮したもので、破線は高速電子のみの加熱の場合である。レーザー強度は1×10¹⁹ W/cm²、1×10²⁰ W/cm²、1×10²¹ W/cm²の3つの場合を想定している。パルス幅は1.5 ps、スポットサイズは50 μmΦ、発散角は電子を全角80度、高速イオンを全角30度とした。爆縮コアの初期温度は0.5 keVである。図4(a)より、Wilksモデルで高速電子の発生を考えると、レーザー強度が10¹⁹ W/cm²でスポットサイズが60 μmΦ、高速電子の発散角が全角80度の現状の実験パラメータでは高速電子のみの加熱の場合には1 keVに到達しないことがわかる。また、高速イオン加熱を考慮しても1 keVを僅かに超える温度しか達成できない。5 keV達成には1×10²¹ W/cm²のレーザー強度が必要であることが解る。一方Hainesのモデルで評価した場合にも電子加熱の寄与が若干増加するだけで、5 keVの爆縮コア加熱達成には1×10²¹ W/cm²レベルのレーザー強度が必要である。

4. まとめ

大阪大学が中心になって進めている高速点火原理実証実験(FIREX-I)の目標である5 keVのコア点火温度を達成するには現在の実験のパラメータでは困難であり、式(1)に示した加熱効率を決定づける要素を大幅に改善しなくてはならないことを示した。具体的には発生する高速電子及び高速イオンの発散角の抑制と高速電子の勾配温度の抑制、レーザーエネルギーの増加である。高速電子の発散角抑制に対しては磁場による高速電子ガイドなど、基礎実験が進んで来ている。また、高速電子の勾配温度に関しては、何が勾配温度を高くしてしまうのかを理解するための実験が行われて解析が進ん

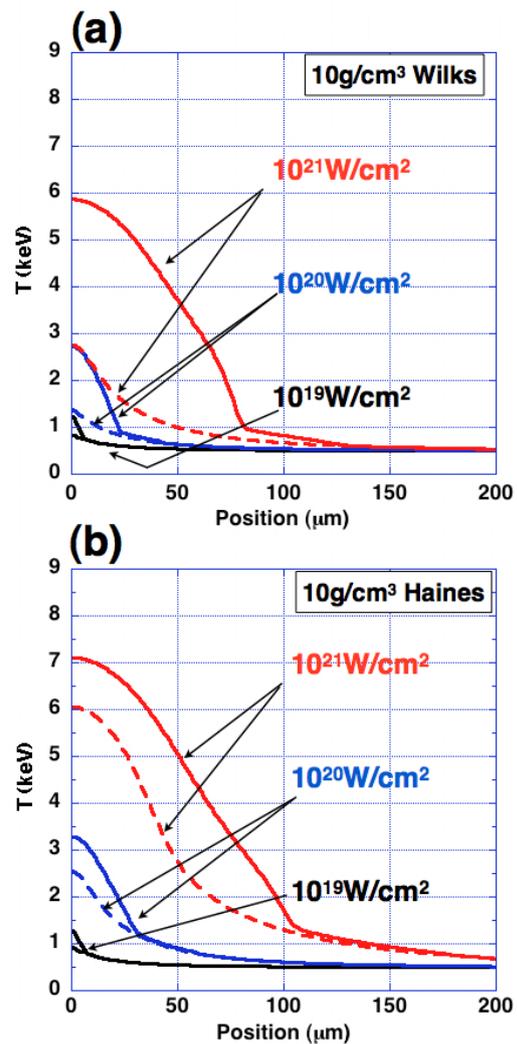


図4 計算結果. (a) Wilksモデルにより高速電子の発生を考慮したもの (b) Hainesモデルにより高速電子の発生を考慮したもの. 実線は高速イオンと高速電子の両者の寄与を考慮したもので、破線は高速電子のみの加熱を考慮している。

でいる。具体的にはコーン形状によって勾配温度が変化するという実験結果について集中的に解析が進んでおり、今後の進展が期待される。

参考文献

- 1) J.F. Ziegler, J.P. Biersack, M.D. Ziegler: SRIM-The Stopping and Range of Ions in Matter, SRIM Co., 2008.
- 2) J.F. Ziegler: Helium : stopping powers and ranges in all elemental matter, Pergamon Press, New York, 1977.

レーザー核融合炉壁のアブレーション

理論・シミュレーションチーム

砂原 淳、影山 慶¹、高木一茂¹、藪内俊毅¹、田中和夫¹

¹大阪大学大学院工学研究科

1. はじめに

核融合炉工学を目指した研究が益々重要になって来ている。特に、第一壁の問題はレーザー核融合、磁場閉じ込め型の方式を問わず重要な研究課題である。大阪大学では図1に示すように、ターゲットにレーザーを照射してプラズマブルームを発生させ、そのブルーム同士をチャンパー中心付近で衝突させることにより、実際の核融合炉壁からのプラズマ発生とダイナミクスを現在の実験室レベルで模擬する実験を行っている。実際の炉壁はX線やアルファ粒子、プラズマデブリなどによる熱インパルスを受けるが、本実験はX線や粒子の代わりにレーザーを模擬熱源として用いて壁材料に熱負荷を与える。レーザーを用いることで、熱入力条件を比較的広い領域で容易に変化させられる。また、様々な物質をターゲットとして用いることが容易であり、多数の実験データにより定量的な物理モデリングが可能である等、多くの利点がある。現在までに多数の実験データが蓄積されて来っており、我々は理論・シミュレーション手法を用いてこれらのレーザー生成ブルームの発生、膨張、衝突のダイナミクス、壁(材料)のアブレーションを定量的に理解し、実際の核融合炉壁の熱応答問題に対する知

見を得ることを目指して、シミュレーションコードの開発と実験解析を行っている。平成25年度にはレーザー核融合炉炉心プラズマから発生するアルファ粒子による核融合炉壁の加熱及びアブレーションを計算し、壁表面が加熱され、噴き出した後、入射してくるアルファ粒子を減速し、プラズマガスカーテンとして機能させることで、壁への熱負荷を抑制できることなどを見いだした。これは図1のプラズマブルーム生成領域のモデリングに相当する。次章で詳細を示す。

2. アルファ粒子による壁表面の加熱

レーザー核融合では炉の中心部で核燃焼が生じ、そこから核反応生成物としてのアルファ粒子を中心として、様々な電離状態のイオンが核融合炉壁へ入射する。そして、それらは壁入射後、表面付近で減速され、壁に対してエネルギーを与える。その結果として、壁表面は加熱され、昇華温度を超えるとアブレーションする。実際の核融合炉設計においては、核融合炉の第一壁はそれら入射粒子の加熱に耐え得る材料の選択が重要であり、さまざまな核融合炉壁材料がどのような熱特性を示すのかを理解することが重要である。我々はレー

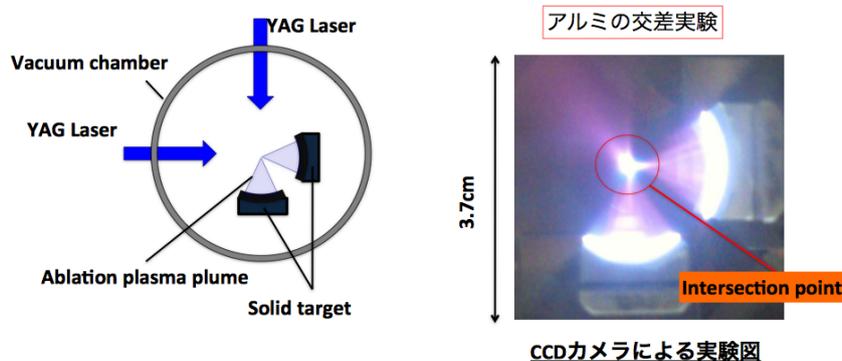


図1 レーザー核融合炉壁アブレーションの模擬実験

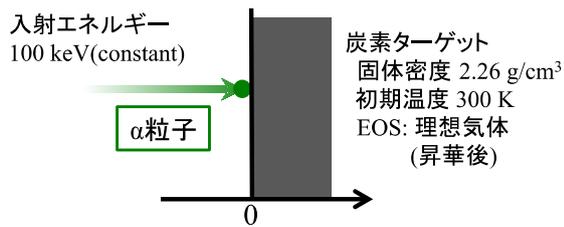


図2 核融合炉を想定した計算条件

ザー核融合の炉心プラズマを想定し、発生するアルファ粒子による核融合炉壁の熱応答を解析した。計算条件として核融合炉壁材料の候補の一つである炭素を採用し、アルファ粒子のエネルギーは100 keVとして、6 nsの間、アルファ粒子が炭素壁に入射するとした。核融合炉は4 mの半径を想定し、典型的なアルファ粒子の入射強度を $1.6 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ とした。図2に炭素壁の条件を示す。

計算は1次元ラグランジアン流体スキームをベースにしており、図2に示すように炭素壁の左側から入射する。入射したアルファ粒子の炭素による阻止能¹²⁾を毎ステップごとに計算し、減速に応じて運動エネルギーの減少分を炭素ターゲットに熱エネルギーとして付与する。図3に6 nsまでの時間発展を2 nsごとに示す。加熱されたカーボン壁表面はアブレーションにより固体密度よりも3桁程度低い気体となってカーボン壁から噴き出す。

ここで特徴的なことは、噴き出したカーボンがアルファ粒子を減速し続けるため、しばらくすると、壁本体への熱流は減少することである。また、これとは反対に、噴き出した炭素はアルファ粒子により加熱されつづけるため、温度は時間的に増加する。図3(c)のアルファ粒子入射開始後6 nsの密度分布を見ると、炭素はごく表面のみがアブレーションされており、噴き出していない部分は固体密度を保持している。また、噴き出した炭素は真空側に向かって温度が増加していることがわかる。これは噴き出した炭素によるアルファ粒子の遮蔽、即ち、ガスカーテン効果を示している。また、6 nsでは初期炭素壁表面から0.5 μm の深さまでが昇華点を越えている。

一方で、固体密度の1/1000の領域は壁から70 μm の

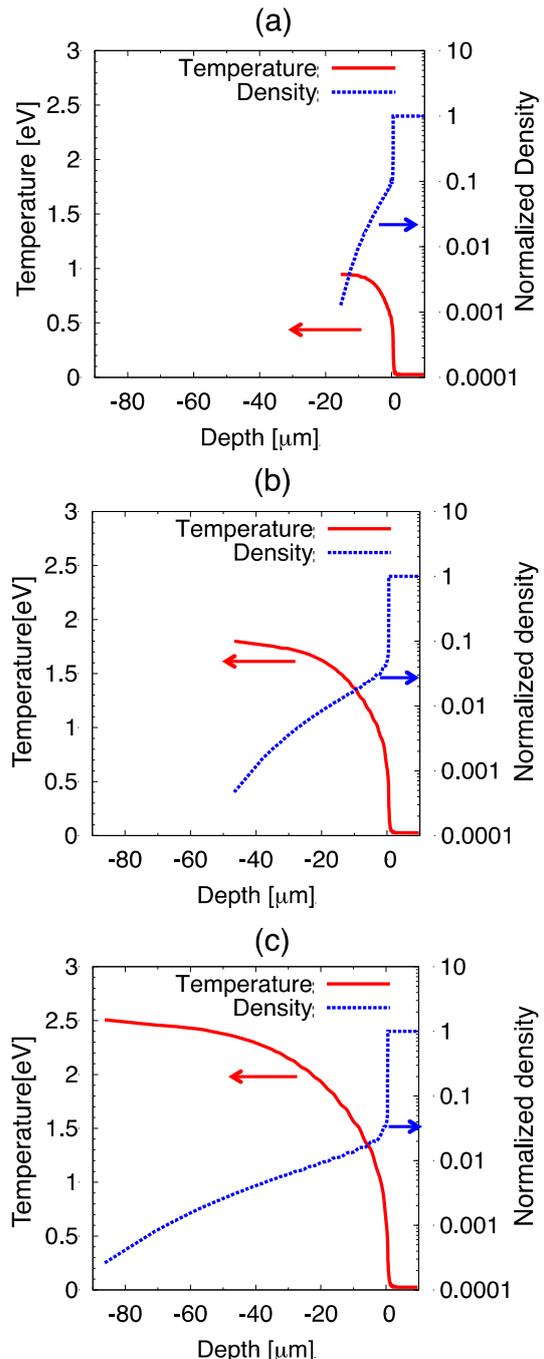


図3 アルファ粒子入射によるカーボン壁のアブレーションの計算結果。(a)アルファ粒子入射開始後2 ns, (b)アルファ粒子入射開始後4 ns, (c)アルファ粒子入射開始後6 nsのそれぞれ密度、温度分布。密度はカーボンの固体密度で規格化されている。

距離まで噴き出しており、核融合炉の典型的なショット間時間である0.1秒の間には1000 m以上の距離を進む事ができることから、噴き出し気体は数mの半径を持つ核融合炉壁内部に十分均一に膨張できることを示し

ている。

3. まとめ

核融合炉壁へのアルファ粒子照射による壁の温度上昇をカーボン壁に対して見積もった。噴き出した気体の温度は最高で数 eV まで上昇しており、今後は気体とプラズマの両方を精度よく扱う阻止能、熱伝導及び状態方

程式モデルの導入が求められる。

参考文献

- 1) J. F. Ziegler, J. P. Biersack, M. D. Ziegler: SRIM-The Stopping and Range of Ions in Matter, SRIM Co., 2008.
- 2) J. F. Ziegler: Helium : stopping powers and ranges in all elemental matter, Pergamon Press, New York, 1977.

レーザーピーニング統合シミュレーションによる塑性圧縮応力の評価

理論・シミュレーションチーム

古河裕之、部谷 学¹、中野人志²

¹大阪産業大学工学部

²近畿大学理工学部

1. はじめに

レーザーピーニングとは、図1に示すように、レーザーアブレーション誘起衝撃波によって金属を塑性変形させ、加工硬化や圧縮残留応力を付与し、金属部品の高強度化、長寿命化を実現できる技術である。既に、宇宙航空産業、原子力産業に実用化されている。また、非接触でかつ局所的に表面処理でき、プロセスの再現性が高く、装置が小型で可搬性に優れているため、精密部品（複雑形状、小型、薄板）への応用が期待されている。

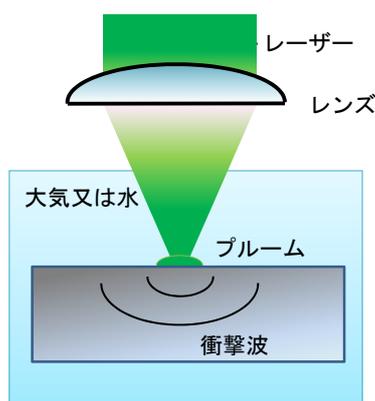


図1 レーザーピーニングの概念図

レーザーピーニングを用いて材料に処理を施す場合、各種材料にあったレーザー条件（レーザー強度、パルス幅、レーザー波長、パルス波形等）で処理する必要がある。適切な衝撃波圧力を発生させ、金属材料の降伏応力を超えた領域で塑性変形を起こさせる。降伏応力は、材料に固有の値を取る。レーザー条件の最適化のためには、シミュレーションにより、レーザーと金属材料、及びブルームの相互作用を正確に理解し、アブレーション生成ブルームの圧力、固体中の残留圧縮応力等を詳細に評価する必要がある。

レーザーピーニングのシミュレーションとしては、有限要素法を用いた応力解析が殆どである¹⁾。ブルームの圧力は、外部からの境界条件として与えられるのみであり、レーザーと物質の相互作用等は計算に含まれない。

レーザー生成ブルームの解析のモデルとして良く使われるものに、Fabbro のモデルがある²⁾。このモデルの詳細は3章で述べるが、レーザーと物質の相互作用を詳細に取り扱ったものではない。レーザー波形が矩形波であることなど、一定の条件を満たす場合にはFabbro のモデルを用いてブルームの圧力を解析的に求めることができる。文献3 では、レーザーの波長を1064 nm とし、レーザーの照射強度とパルス幅を変え、10 μm 厚さのアルミニウム薄膜の裏面の圧力の最大値を測定している。文献3 の Fig. 8 において、実験で得られたレーザー照射強度の関数としてのアルミニウム薄膜の裏面の圧力の最大値と、Fabbro モデル中の α パラメーター（ブルーム中の内部エネルギーが熱エネルギーに変わる割合）を0.2として得られた圧力値の比較が行われている。両者は良く一致している。

レーザーと物質の相互作用、材料中の応力生成・伝搬を統合的に取り扱った数少ない研究の一つとして、Ocana 等によるものがある⁴⁾。これはLSPSIM、HYDRA、HARDSHOCK という3つのコードで構成される統合シミュレーションコードを用いた研究である。レーザーと物質の相互作用はHYDRAで求め、その結果をLSPSIMに入力する。LSPSIMでは、プラズマが材料に与える圧力をFabbro モデルをベースに計算している。HARDSHOCK で、応力計算を行う。Ocana 等の研究により、レーザーと固体の相互作用等により、固体内に発生する熱が応力の発生及び伝搬に影響を与える、ことが示唆された⁴⁾。Ocana 等の研究では、レーザーと物質の

相互作用計算において、「初めにプラズマ有き」を仮定しており、固体から液体、液体から中性気体、中性気体から部分電離プラズマへの相変化は含まれていない。レーザーピーニングで用いられるレーザーパラメーターでは最大でも電子温度は数万度程度であり、これは温度換算した気化熱と同じ程度である。よって、相変化の効果は重要と考えられる。

本研究における新規性を述べる。

- 1) 固体から液体、液体から中性気体、中性気体から部分電離プラズマへの相変化の効果を取り入れた1次元のレーザーピーニング統合シミュレーションコードを開発した^{5,6)}。
- 2) レーザー照射から固体内部の応力の分布も評価まで、統合的に計算できる。
- 3) 真空中、大気中でレーザーを照射する場合のみでなく、水中でレーザーを照射する場合、ガラスでプルームを閉じ込める場合の計算も可能である。

本研究で開発した統合シミュレーションコードにより得られた、レーザー照射強度の関数としてのプルームの圧力の空間平均の最大値は、 $\alpha=0.2$ と仮定してFabbroモデルにより得られたプルームの圧力値と良い一致を示した。

本研究において、塑性圧縮応力の計算のモデリングを行い、レーザー照射から塑性圧縮応力生成まで統合シミュレーションを行った。固体表面からサブ mm の深さのところに、数百 MPa から 1.6 GPa 程度の塑性圧縮応力が生成される、という結果を得た。

第2章では、シミュレーションコードの概要について述べる。第3章では、Fabbro モデルについて考察する。第4章ではレーザー生成プルーム、第5章では塑性圧縮応力の評価について述べる。第6章は結言である。

2. 開発したシミュレーションコード^{5,6)}

図2は、開発した統合シミュレーションコードのフローチャートである^{5,6)}。原子モデルコードを用いて、原子のエネルギー準位、ポピュレーション、電離度などのデータを様々な温度密度で求める。そのデータを状態方

程式コードに入力し、圧力、比熱等を求める。原子のエネルギー準位、ポピュレーション、電離度などのデータをスペクトルコードに入力し、X線の放射係数、吸収係数等を求める。圧力、比熱、X線の放射係数、吸収係数等のデータをテーブル化し、Laser Ablation Peening Code (LAPCO)に入力し、固体金属の温度上昇、固体中の応力の分布、相変化、流体運動、放射輸送等の計算を行う。図3は、LAPCOのフローチャートである。

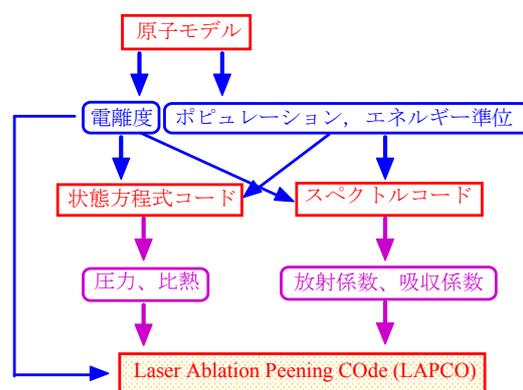


図2 統合シミュレーションコードのフローチャート

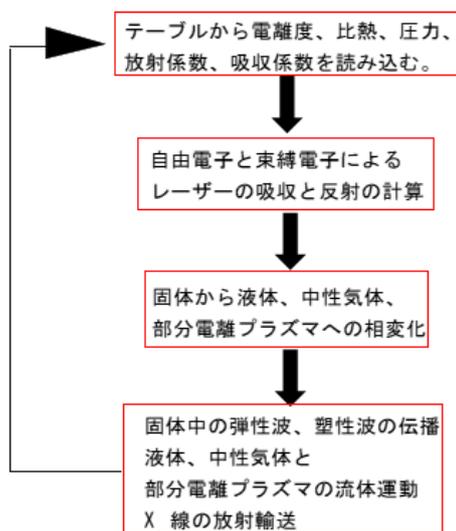


図3 LAPCOのフローチャート

開発した統合シミュレーションコードに関して、レーザーピーニングのシミュレーションのプロセスに沿って説明する。

- (1) 計算の対象となる金属に関して、原子モデルコードを用いて、電離度、ポピュレーション、エネルギー準位などを求める。このデータは、入力したレーザーエネルギーの内、励起、電離に使われるエネルギーの割合の評価や、中性気体から部分電離プラズマへの相変化を記述する際に、極めて重要となる。
- (2) 電離度、ポピュレーション、エネルギー準位などのデータを状態方程式コードに入力し、圧力、比熱などを求める。これは、プルームの圧力の評価、熱エネルギーの評価にそのまま反映される。
- (3) 電離度、ポピュレーション、エネルギー準位などのデータをスペクトルコードに入力し、X線の放射係数、吸収係数を求める。
- (4) (1)-(3) で求めた「電離度、圧力、比熱、X線の放射係数、吸収係数」のデータを「LAPCO」に取り込む。さらに、レーザーのパラメーター、金属の厚み、初期温度、閉じ込め物質の種類、厚み、初期温度などを入力し、流体シミュレーションを開始する。入力可能なレーザーパラメーターを、以下に記す。
 - (4-1) ピーク強度 (4-2) パルス幅 (4-3) 波長
 - (4-4) パルス波形
 パルス波形は、ソースコードを書き換えることにより、任意の波形に対応可能である。
- (5) LAPCO に含まれている主な物理を、以下に記す。
 - (5-1) 自由電子の逆制動放射、共鳴吸収、束縛電子によるレーザーの吸収⁷⁾。
 - (5-2) 固体、液体、中性気体、部分電離プラズマの相変化⁸⁾。
 - (5-3) 電子、イオンの熱伝導、および、電子-イオン間のエネルギー緩和。
 - (5-4) 固体中の衝撃波の伝搬。応力生成。
 - (5-5) 金属材料から閉じ込め材料への熱伝達。
 - (5-6) X線放射輸送過程。

図4は、本シミュレーションコードにおける geometry である。左から右 (z 軸の負から正) に向かってレーザーが照射され、物質は右から左 (z 軸の正から負) に閉じ込め媒質に向かって噴き出す。本シミュレーションコ

ードでは、物質の相構造は、基本的 (定常的) には、右から固体、固体と液体の混合領域、液体、液体と気体の混合領域、気体 (部分電離プラズマ) と連続的に分布しているとしている。閉じ込め媒質中では、レーザーは吸収されない、と仮定している。

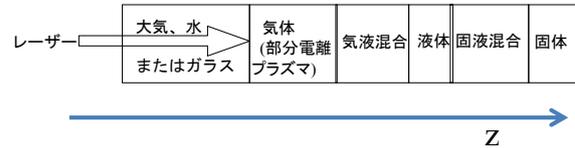


図4 本シミュレーションコードにおける geometry

変位量 u と弾性歪 ε_e の関係は、次式で表される。

$$\varepsilon_e(z,t) = \frac{\partial u(z,t)}{\partial z} \quad (1)$$

弾性応力 σ_e と弾性歪 ε_e の関係は、次式で与えられる⁹⁾。

$$\sigma_e(z,t) = (\lambda + 2\mu) \varepsilon_e(z,t) \quad (2)$$

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

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

(1)式の両辺を時間微分することにより、弾性歪 ε_e と固体内部の場の速度 v が関係づけられる。

$$\frac{\partial \varepsilon_e(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial u(z,t)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial u(z,t)}{\partial t} = \frac{\partial v(z,t)}{\partial z} \quad (4)$$

場の速度 v は、次の運動方程式を解いて得られる。

$$\rho(z,t) \left[\frac{\partial v(z,t)}{\partial t} + v \frac{\partial v(z,t)}{\partial z} \right] = \frac{\partial}{\partial z} [\sigma_e(z,t) + \sigma_p(z,t) - P(z,t)] \quad (5)$$

ここで P は圧力であり、状態方程式から得られる⁶⁾。

塑性圧縮応力 σ_p は、塑性歪 ε_p を用いて次式で表される⁹⁾。

$$\sigma_p(z,t) = 2\mu \varepsilon_p(z,t) \quad (6)$$

塑性歪 ε_p については、次のようにモデリングした⁹⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_p(z,t)}{\partial t} &= -\frac{2}{3\lambda+2\mu} \frac{\partial P(z,t)}{\partial t} && \text{for } -\sigma_e > \sigma_y \\ &= 0 && \text{for } -\sigma_e < \sigma_y \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 σ_y は降伏応力である。

3. Fabbro モデル

レーザー生成プルームの解析のモデルとしてよく用いられる、Fabbro モデルについて考察する。図 5 は、Fabbro モデルの概念図である²⁾。時刻 t において、内部エネルギー $E_i(t)$ 、圧力 $P(t)$ 、長さ $L(t)$ のプルームに、強度 $I(t)$ のレーザーが時間 dt の間照射された後、内部エネルギー $E_i(t+dt)$ 、圧力 $P(t+dt)$ 、長さ $L(t+dt)$ のプルームに変わるとしている。Fabbro モデルでは各々の時刻において、プルーム中の圧力と内部エネルギーは、空間分布を持たない、と仮定されている²⁾。よって、Fabbro モデルで求めた圧力は、シミュレーションで得られる圧力の空間平均値に相当する、と考えられる。

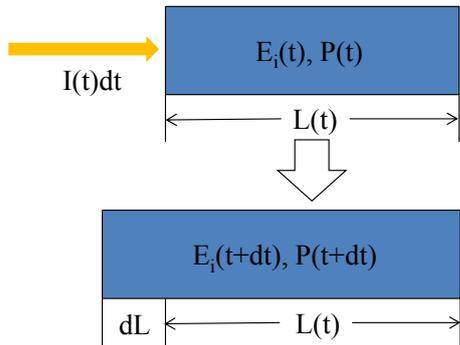


図5 Fabbro モデルの概念図

Fabbro モデルにおいて、状態方程式を理想気体のものと同じとすると、レーザーの照射強度 $I(t)$ と圧力 $P(t)$ とプルームの長さ $L(t)$ は、式(1)で関係付けられる⁸⁾。

$$I(t) = \left(1 + \frac{3}{2\alpha}\right) P(t) \frac{dL(t)}{dt} + \frac{3}{2\alpha} L(t) \frac{dP(t)}{dt} \quad (8)$$

ここで α は、プルーム中の内部エネルギーが熱エネルギーに変わる割合であり、Fabbro のモデル内では決められないパラメーターである。

媒質中での衝撃インピーダンスが一定であるとする、圧力 $P(t)$ とプルームの長さ $L(t)$ は、式(9)で関係付けられる²⁾。

$$\frac{dL(t)}{dt} = \frac{2}{Z} P(t) \quad , \quad \frac{2}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \quad (9)$$

ここで、 Z_1, Z_2 はそれぞれの媒質中での衝撃インピーダンスであり、媒質の質量密度 ρ_i と衝撃波速度 u_i を用いて、以下のように表される。

$$Z_i = \rho_i u_i \quad (10)$$

レーザー強度 I を時間によらず一定とし、初期のプルームの長さを 0 とすると、(1)式と(2)式から、圧力 P とプルームの長さ $L(t)$ は以下のように求められる。

$$P = \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z} \sqrt{I} \quad (11)$$

$$L(t) = t \frac{2}{\sqrt{Z}} \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{I} \quad (12)$$

本研究では、パラメーターとして、水の質量密度 1.0 g/cm^3 、衝撃波速度（音速） 148290 cm/s 、アルミニウムの質量密度 2.7 g/cm^3 、衝撃波速度（音速） 642000 cm/s を用いた。4章で、シミュレーション結果と Fabbro モデルの詳細な比較を行っている。 $Z = 0.2732 \times 10^6 \text{ g/cm}^2/\text{s}$ となる。 $\alpha = 0.2$ を仮定し、上記値を(11)式と(12)式に代入すると、 $I = 10 \text{ GW/cm}^2$ の場合、 $P = 4.02 \text{ GPa}$ 、 $L(10 \text{ ns}) = 29.35 \text{ } \mu\text{m}$ となる。 $I = 2.5 \text{ GW/cm}^2$ の場合、 $P = 2.01 \text{ GPa}$ 、 $L(10 \text{ ns}) = 14.67 \text{ } \mu\text{m}$ となる。

4. レーザー生成プルームの評価

図6は、シミュレーションで求めた、時刻10 ns時の圧力の空間分布である。横軸は初期の固体表面からの位置である。レーザーの強度 10 GW/cm^2 、波長 1064 nm 、パルス幅 10 ns 、時間形状は矩形波である。初期の固体アルミニウムの厚さは 2 mm 、水の厚さは 1 cm である。計算領域は、 -1.0 cm から 2 mm までである。初期の固体アルミニウムと水の温度は 300 K である。図からわかるように、プルームの先端近傍では急激に圧力が低下している。初期の固体表面は $z=0$ であり、溶融したため固体表面が最初の位置から正に移動している。

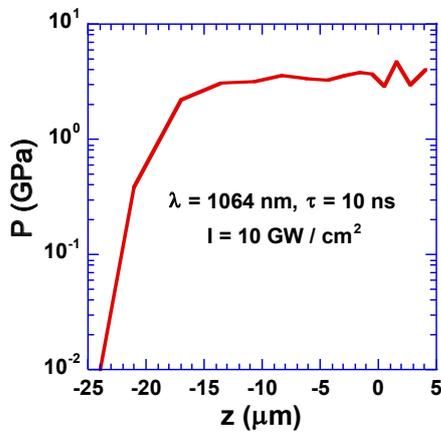


図6 10 ns 時の圧力の空間分布

シミュレーションで、プルーム中の圧力の空間平均値の時間変化を求めた。結果を図7に示す。シミュレーションにより得られた圧力の最大値は、(11)式で求められる 4.02 GPa と良い一致を示している。

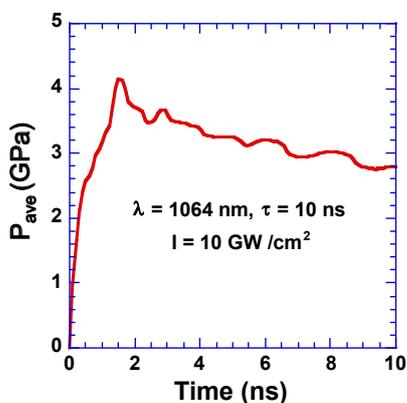


図7 シミュレーションにより得られた、プルーム中の圧力の平均値の時間発展

図8は、シミュレーション及び(12)式で求めたプルームの長さである。両者は良い一致を示している。図中の Simple model は、(12)式で求めたプルーム長を指す。

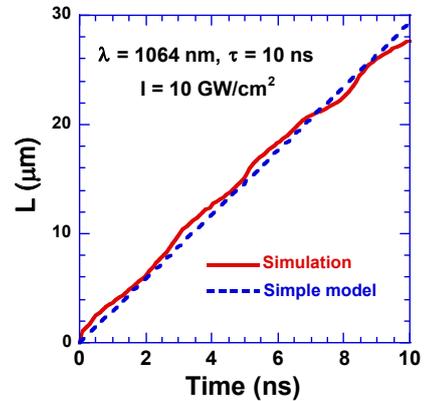


図8 シミュレーション及び simple model で得られたプルームの長さの時間発展

シミュレーションで求めた、プルーム中の内部エネルギーが熱エネルギーに変わる割合 α の時間発展を図9に示す。レーザーが照射されてからプルームが生成されるまでの時間は $\alpha=0$ である。固体から液体に相変化した領域では、沸点に達するまで熱エネルギーが増加するので α は時間に対して増加する。1 ns 時から 2 ns 時においては、相変化に使われるエネルギーが増加し、 α は時間に対して減少する。その後、 α は時間に対してわずかに減少している。

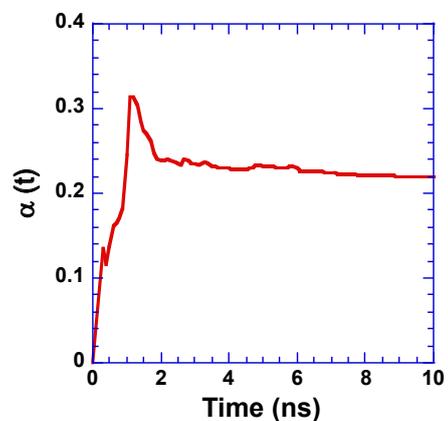


図9 シミュレーションにより得られた α の時間発展

レーザーの時間形状は矩形波とし、レーザーの強度を 2.5 GW/cm^2 、 5 GW/cm^2 、 10 GW/cm^2 とした場合の、プラーム中の圧力の空間平均値の最大値をレーザー強度の関数として図 10 に示した。強度を変化させても、シミュレーションと Fabbro モデルは良い一致を示した。

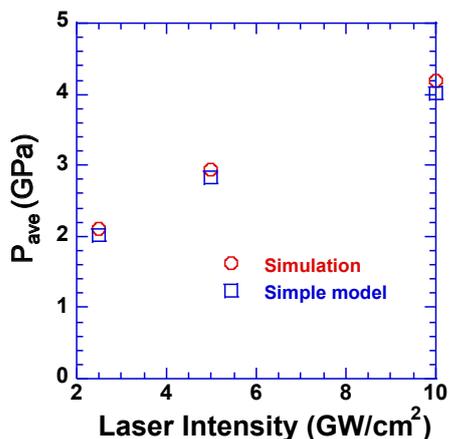


図 10 レーザー強度の関数として表したプラーム中の圧力の空間平均値の最大値

レーザーの時間形状をガウシアンとし、パルス幅 10 ns、強度を 10 GW/cm^2 とした場合の、プラーム中の圧力の空間平均値の最大値を図 11 に示す。矩形波の場合と比べ、最大値が減少している。圧力波形の実効的な半値全幅は 18 ns 程度である。圧力が最大になる時間が、レーザーピーク時より 4 ns 程度遅れている。

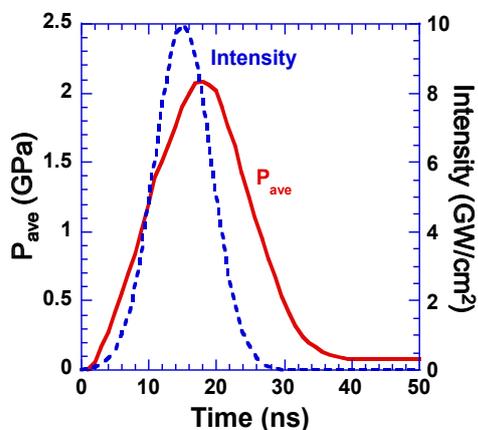


図 11 レーザーの時間形状をガウシアンとした場合のプラーム中の圧力の空間平均値の最大値

5. 塑性圧縮応力の評価

レーザーピーニング統合シミュレーションにより、塑性圧縮応力の評価を行った。レーザーの時間形状が矩形、レーザー強度 10 GW/cm^2 、波長 1064 nm、パルス幅 10 ns の場合の塑性圧縮応力の時間発展を図 12 に示す。500 ns 時には、0.8 mm 程度深さの所に 1.45 GPa 程度の塑性圧縮応力が生成されている。2 mm 厚さの固体アルミニウム中の音波の伝搬時間等を考慮し、シミュレーションの最大時間を 500 ns とした。

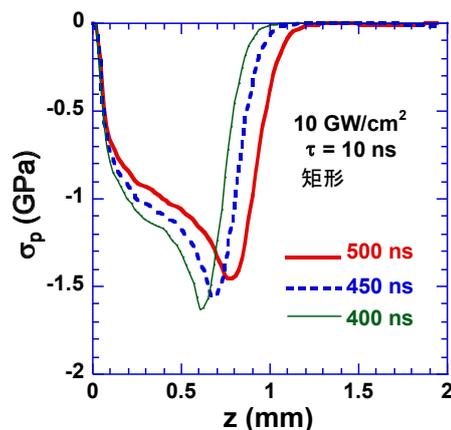


図 12 塑性圧縮応力の時間発展

レーザーの時間形状は矩形波とし、パルス幅 10 ns、レーザーの強度を 2.5 GW/cm^2 、 5 GW/cm^2 、 10 GW/cm^2 として、塑性圧縮応力の評価を行った。500 ns 時の最大塑性圧縮応力の値をレーザー強度の関数として、図 13 に示す。500 ns 時の最大塑性圧縮応力の値は、レーザー強度の平方根に比例する、ことが分かった。

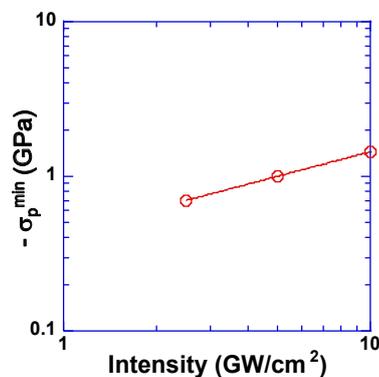


図 13 最大塑性圧縮応力値のレーザー強度依存性

レーザーの時間形状は矩形波、レーザーの強度を 10 GW/cm² とし、パルス幅を 3.2 ns、5 ns、10 ns、15 ns、20 ns とした場合の塑性圧縮応力の評価を行った。500 ns 時の最大塑性圧縮応力の値をパルス幅の関数として、図 14 に示す。500 ns 時の最大塑性圧縮応力の値は、パルス幅の対数に比例する、ことが分かった。

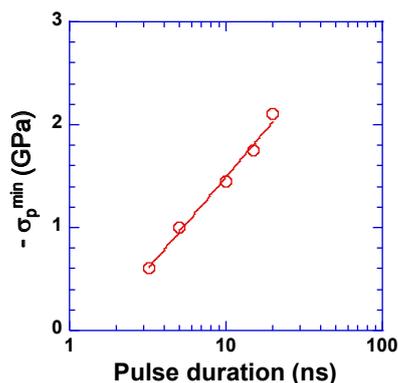


図 14 最大塑性圧縮応力値のパルス幅依存性

レーザー強度 10 GW/cm²、波長 1064 nm、パルス幅 10 ns とし、パルス波形を変えた場合の塑性圧縮応力の結果を図 15 に示す。大きな差異はなかった。

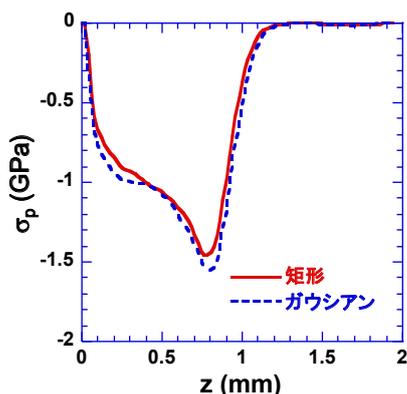


図 15 パルス波形を変えた場合の塑性圧縮応力

6. 結言

本研究において、固体から液体、液体から中性気体、中性気体から部分電離プラズマへの相変化の効果を取り入れたレーザーピーニング統合シミュレーションコードを開発した。

レーザー生成プルームの解析のモデルとしてよく用いられる、Fabbro モデルについて、水中レーザーピーニングの場合の圧力とプルームの長さの解を導出した。

水中レーザーピーニングのシミュレーションを行い、圧力及びプルームの長さが Fabbro モデルのそれと良い一致を示した。プルームの圧力の平均値の時間発展について、パルス波形依存性を評価した。

本研究において、塑性圧縮応力の計算のモデリングを行い、レーザー照射から塑性圧縮応力生成までの統合シミュレーションを行った。固体表面からサブ mm の深さのところ、数百 MPa から 1.6 GPa 程度の塑性圧縮応力が生成される、という結果を得た。

500 ns 時の最大塑性圧縮応力の値について、レーザー強度依存性、パルス幅依存性、及びパルス波形依存性を評価した。

謝辞

伊藤良祐氏においては、近畿大学理工学部在学時に、有益な議論を行った。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) William Braisted, and Robert Brockman: International Journal of Fatigue **21**, 719-724, 1999.
- 2) R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, P. Peyre, D. Devaux, and J. Virmont: J. Appl. Phys. **68**, 775-784, 1990.
- 3) P. Peyre, L. Berthe, R. Fabbro, and A. Sollier: J. Phys. D: Appl. Phys. **33**, 498-503, 2000.
- 4) J.L. Ocana, M. Morales, C. Molpeceres, J. Torresa: Applied Surface Science **238**, 242-248, 2004.
- 5) 古河裕之: レーザー研究 **36**, 742-746, 2008.
- 6) 古河裕之、藤田和久、森谷信一: プラズマ核融合学会誌 **87**, 642-649, 2011.
- 7) M. V. Allmen and A. Blatter: Laser-Beam Interactions with Materials, Springer, 1995.
- 8) S. I. Anisimov and B. S. Luk'yanchuk: Physics-Uspekhi, **45**, 293-324, 2002.
- 9) ABAQUS, 1996, Users' Manual, Version 5.5. Hibbitt, Karlsson & Sorensen.

シミュレーションによるレーザー核融合炉設計研究

理論・シミュレーションチーム

古河裕之、乗松孝好¹

¹大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

1. はじめに

レーザー核融合炉の研究においては、新たに多くの技術開発、材料開発等を行わなければならない。現在、IFE フォーラム・レーザー核融合技術振興会では、レーザー核融合実験炉概念設計委員会（委員長神前康次、副委員長乗松孝好）を設けて、点火燃焼後に発電実証を行う実験炉の概念を明らかにし、商用炉へ向けた研究、開発方針を明らかにすることを目的とし、レーザー核融合実験炉の設計を行っている。点火燃焼の物理、ターゲット製作供給技術、レーザー照射精度に対する利得のスケールリング則、高平均出力レーザーの建設見通しが立っていることが実験炉建設の要件となる。

委員会報告によると、実験炉は3つのフェイズに分けて進めることを考えている。必要なレーザーは初めに製作し、チェンバー（炉）のみを各フェイズの目的に合った最も合理的なものを製作する。圧縮レーザー500kJ、点火レーザー100kJで繰り返しは1~4Hzを想定している。

フェイズ I は繰り返し照射による利得発生を証明を目的とし、1 Hz で 100 ショットを行う。チェンバーはブランケットを持たず、現在のレーザー核融合実験設備とほぼ同様のイメージである。

フェイズ II は発電実証を目的とし、1 Hz で 1-2 週間連続運転し、蒸気タービンで発電する。チェンバーは固体壁で、ブランケットは現在磁場核融合で研究されているリチウムタイトネートのペレットを用い、ヘリウムを介して水冷するシステムを採用する。

フェイズ III は長期運転を実証することを目的とし、4 Hz で半年程度連続運転を行う。商用炉で採用される液体壁チェンバーが採用され、液体壁

に伴う技術課題の検証と、トリチウム製造、液体金属循環による腐食の試験、商用炉に向けた材料試験が行われる。液体壁固有の課題とは、照射後のチェンバー内の排気、液体金属による腐食、最終光学系への金属蒸気の影響などである。冷却系は液体 LiPb のループと水ループで構成され、熱交換器を通したトリチウムの拡散の防止対策などもテストされる。

点火燃焼を実現した後、最終的に核融合エネルギーを実用化する商用発電プランとの建設のためには、フェイズ III クラスのシステムでの材料試験データの蓄積が必要になる。図1は、委員会の設計によるレーザー核融合実験炉フェイズ III のチェンバー周辺のイメージである。

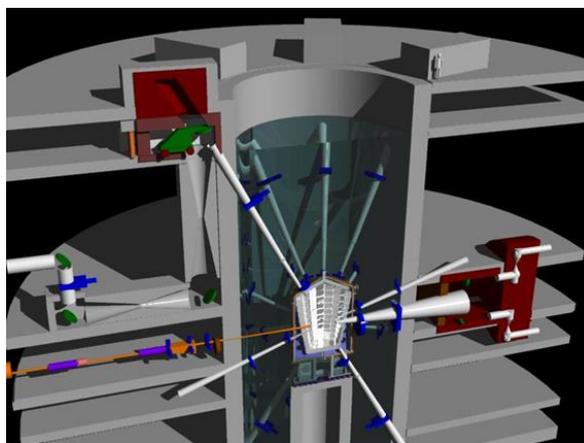


図1 レーザー核融合実験炉フェイズ III のチェンバー周辺のイメージ

2. 液体壁チェンバーの課題

筆者らは、レーザー核融合実験炉概念設計委員会の前身である「レーザー核融合炉設計委員会」以降、現在も引き続き、高速点火レーザー核融合炉発電プラント「KOYO-fast」の設計研究を行っ

ている。「KOYO-fast」では、液体壁チェンバーを採用しており、厚さ3 mm から5 mm 程度の液体リチウム鉛が第一壁に沿って滝状に流下する液体壁構造により、第一壁を保護している¹⁻³⁾。実験炉も、フェイズ III では液体壁チェンバーを採用する予定になっている。チェンバー内で起こる物理現象は、定性的には実験炉フェイズ III と KOYO-fast では、ほぼ同じである。

液体壁は、核融合燃焼により生じた 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（気体、液体、固体などの塊）がチェンバー中心付近で衝突すると、エアロゾルが生ずることが予想される。それは金属蒸気の排気、引いては核燃焼反応にとって大きな妨げとなる。高速点火レーザー核融合炉発電プラント「KOYO-fast」では、図2に示すように、第一壁から飛散したプルームがチェンバー中心部に集中しないように、第一壁を角度を付けたタイル構造にしている²⁾。チェンバー中心の核融合燃焼により生じたデブリが、タイル構造の第一壁に衝突し、プルームを生成し、中心から離れた所でプルーム同士が衝突する様子を表している。x、y は、3章で述べるシミュレーションの座標軸を表す。



図2 KOYO-fast の液体壁チェンバー第一壁のタイル構造の概念図

これらの複合複雑現象を解析するため、著者らは統合シミュレーションコード DECORE (DEsign COde for REactor) を開発した。今年度は、2次元のDECOREを開発し、炉心プラズマからのX線、 α 粒子及び粒子等と、液体壁及びアブレーション生成プルームの相互作用を2次元的計算し、プルームの挙動を2次元的に評価した。3章でDECOREについて述べる。4章では、プルームの2次元の挙動について詳述する。5章は、結言と今後の課題である。

3. 開発したシミュレーションコード^{1,3)}

図3にDECOREの概要を示す。DECOREは、原子モデルコード、状態方程式コード、放射輸送係数コード、阻止能コード、アブレーション解析コードから成る統合コードであり、ACONPLはアブレーション解析コード部を指す。前年度までACONPLは1次元コードであったが、今年度2次元コードを開発した。2次元コードでは「保存保証型CIP法」及び「M型CIP法」を用いた⁴⁾。前年度までは、X線、 α 粒子及び荷電粒子と、液体鉛及び部分電離プラズマの相互作用は1次元モデルで計算していたが、今年度は相互作用も2次元モデルで計算した。

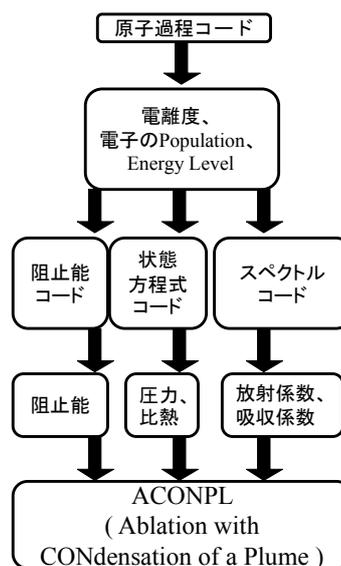


図3 DECORE の概要

4. 生成されるプルームの2次元挙動解析

本研究において、燃料球から液体壁表面までの距離が 3 m の部位に、垂直に X 線、 α 粒子、及びデブリ粒子が入射される場合について、シミュレーションを行った。液体鉛の厚みを 2 mm とし、液体鉛の初期温度及び最低温度は 823.15 K (550 °C) とした。炉心からの X 線、 α 粒子、及びデブリ粒子のパルス波形とスペクトルについては、文献 1 と文献 5、鉛に対する X 線の吸収係数については、文献 1 を参照されたし。図 3 は、2 次元シミュレーションのモデル図である。タイトルの端から 1 cm の部分を切り出し、空間的に一様に X 線、 α 粒子、及びデブリ粒子が照射される。

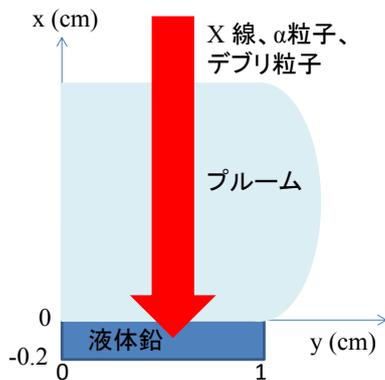


図4 2次元シミュレーションのモデル図

レーザーが燃料球に照射されてから 9.8 μs 後まで、2次元シミュレーションを行なった。図 5 は、2次元シミュレーションにより求めた、液体及びプルームの数密度分布の時間発展である。X 線、 α 粒子及び荷電粒子と、液体鉛及び部分電離プラズマの相互作用も 2次元モデルで計算している。プルームの根元（壁側）は横に広がっているが、先端部分はあまり横方向には広がっていない。KOYO-fast の設計では、チェンバーの中心部でのプルーム同士の衝突避けるために、プルームの横方向の広がりを 30° 程度以内と想定している、図 5 の結果が正しければ、プルームの先端部分はあまり広がっておらず、チェンバーの中心部でプルーム同士が衝突する確率は極めて低い。

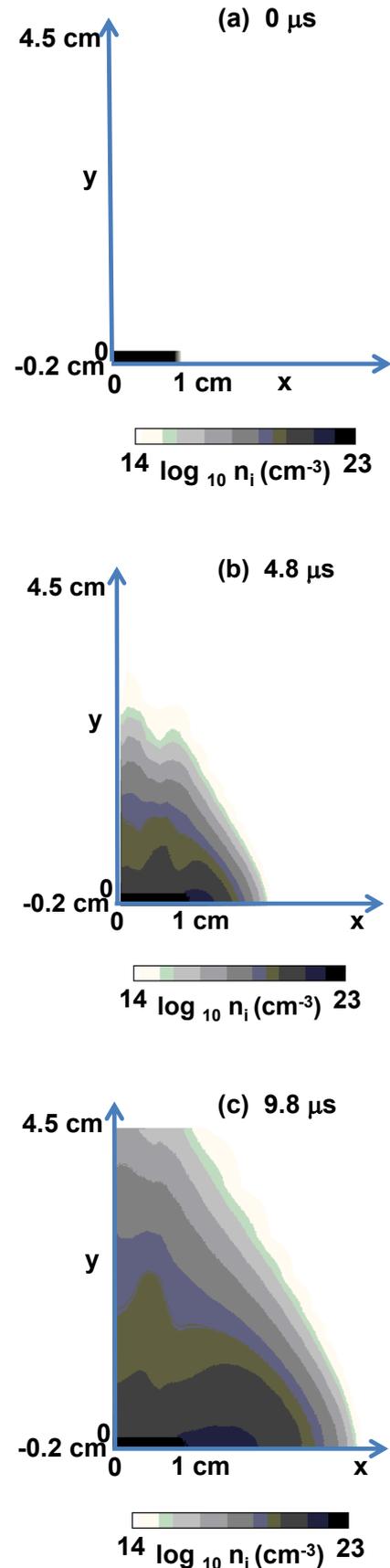


図5 2次元計算により得られた数密度分布
(a) 0 μs 時 (b) 4.8 μs 時 (c) 9.8 μs 時

5. 結言と今後の課題

本研究により、レーザー核融合液体壁チェンバー第一壁のタイル構造の有効性が議論できるようになった。今年度は、液体壁と X 線、 α 粒子、荷電粒子の相互作用も 2 次元モデルで計算を行った。流体近似の適用が危ぶまれる低密度状態に対して、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法、Moving Particle Semi-implicit (MPS) 法などの粒子法による取り扱いを行うことも必要である。中性気体、及び部分電離プラズマと荷電粒子の相互作用の理論モデルに関しても、実験等による検証が必要である。状態方程式の改良も必要である。エアロゾル生成の評価についても、モデルの検証、改良等が必要である。

参考文献

- 1) 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, 三間園興, 苔米地頭, 山中千代衛: プラズマ核融合学会誌, **82**, 617-627, 2006.
- 2) 神前康次, 乗松孝好, 古河裕之, 林巧, 惣万芳人, 西川正史, 苔米地頭: プラズマ核融合学会誌, **83**, 19-27, 2007.
- 3) 古河裕之, 乗松孝好: プラズマ核融合学会誌, **87**, 51-55, 2011.
- 4) 矢部孝, 内海隆行, 尾形陽一: CIP法, 森北出版, 2003.
- 5) T. Johzaki, K. Mima, Y. Nakao, H. Nagatomo, and A. Sunahara: Proc. 3rd Inertial Fusion Sciences and Applications, 2003.

H25 年度レーザー損傷耐力データベース化試験

レーザー技術開発室

本越伸二、岸田知門、實野孝久¹

¹大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

1. はじめに

レーザー装置には多くの光学素子が使用されている。高出力レーザー装置では、その光学素子がレーザー光によって損傷することがしばしば発生し、装置の性能、稼働率を低下させる要因になっている。そのため、光学素子のレーザー損傷耐力（損傷しきい値）の向上、レーザー損傷物理の理解は、高出力レーザー装置を開発、利用する上で重要な課題となっている。

レーザー技術総合研究所では、高耐力光学素子の開発を進めるとともに、平成 17 年度より、企業からの依頼によるレーザー損傷しきい値評価試験を行っている。また、光学素子のレーザー損傷しきい値の標準化を図り、共有できる情報を発信することを目的として、光学素子メーカーの協力を得て「レーザー損傷耐力データベース化試験」を実施している。これまで、波長 1064 nm、532 nm、355 nm、248 nm で用いる光学素子を対象として、データベース化試験を実施し¹⁾⁷⁾、その結果をホームページ上で公開してきた⁸⁾。図 1 に過去 10 回のデータベース化試験の参加企業数と試料数を示す。第 4 回までは

無料で実施したこともあり、参加企業数、試料数ともに多かった。一昨年（第 9 回、10 回）は、評価対象素子がダイクロミックミラー（1064 nm 透過、532 nm 反射）であったこともあり、参加は 7 社 21 試料に止まった。

平成 25 年度は、1064 nm 用光学素子に対するデータベース化試験への要望が多かったことから、第 1 回（1064 nm 用高反射膜）、2 回（1064 nm 用反射防止膜）と同じ特性仕様の光学素子に対して再度データベース化試験を実施した。本報告書では、その結果をまとめるとともに、第 1 回、2 回との比較結果について述べる。

2. 光学特性仕様

第 11 回、12 回の光学特性仕様と参加企業数、試料数を表 1 に示す。高反射膜では、レーザー装置内で最も多く使用されている 45° ミラー、反射率を 99.5%以上（P 偏光）とした。P 偏光では、S 偏光に比べて高い反射率を得ることが難しく、その分、層数や屈折率差を増やす必要があり、一般に S 偏光に比べて損傷耐力は低くなる。反射防止膜の基板材料は、窓材やレンズ等に使用される

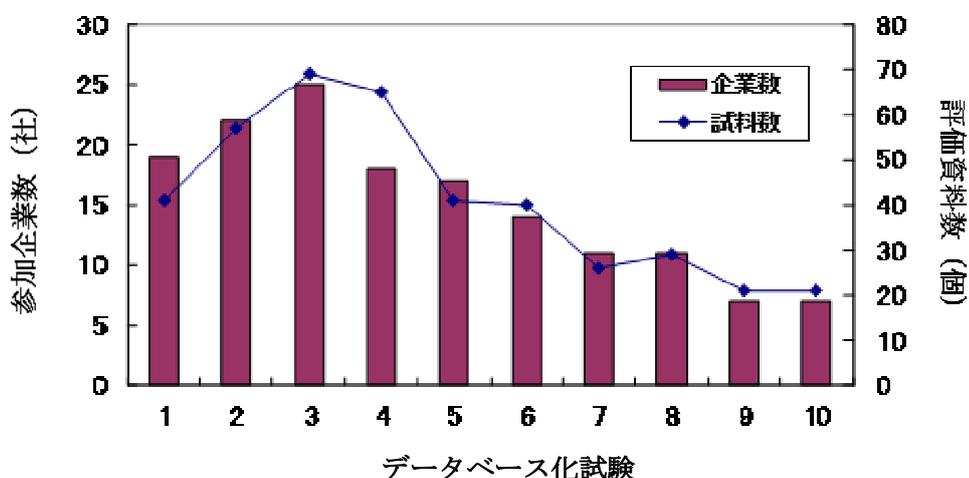


図 1 レーザー損傷耐力データベース化試験の参加企業数と試料数の推移

表1 平成25年度データベース化試験の
光学素子仕様

	第11回	第12回
膜タイプ	高反射膜	反射防止膜
波長 [nm]	1064	
入射角 [deg]	45	0
偏光	P	-
反射率 [%]	>99.5	<0.5
基板材料	任意	石英ガラス
表面粗さ	光学研磨	RMS<10Å
裏面粗さ	任意	表面と同じ
参加企業数	8	9
評価試料数	18	30

石英ガラス基板とした。

反射防止膜では基板ガラス面までレーザー光が届くため、コート前の表面粗さやクリーニングの状態がレーザー損傷耐力に大きな影響を及ぼす。そのため前回同様、表面粗さのみを指定した。参加企業数、試料数は、それぞれ8社18個、9社30個であり、第1回、2回に比べて約半数であった。また、高反射膜の試料には、入手したドイツメーカーのものが含まれている。ドイツは、レーザーの産業応用を強力に推進していることから、その光学素子も高いレーザー損傷耐性をもつことが予想される。

3. 評価装置と方法

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

評価方法には、1-on-1 (1 パルス照射毎に損傷の有無に関わらず照射位置を移動する) 試験法を採用した。この方法は、過去に多くの論文報告等もあり、比較情報が豊富である。照射前後の試料表面をノマルスキー顕微鏡 (50 倍) により観察した。レーザー損傷しきい値は、損傷が発生した最小エネルギー密度として決定し、照射ガウス分布の尖頭値で示した。

4. 1064 nm 用高反射膜の評価結果

高反射膜のデータベース化試験結果を図2に示す。最大損傷しきい値は約 220 J/cm² となった。石英ガラス内部損傷しきい値が経験的に 250-300 J/cm² であるため、この高反射膜の損傷しきい値は、石英ガラス内部と同程度であると見積もられる。また、最頻度しきい値は 30-40 J/cm² となった。

比較のために、第1回データベース化試験結果を図3に示す¹⁶⁾。この時の最大損傷しきい値は約 290 J/cm² であり、今回よりも少し高い値の試料が存在したが、この差は成膜技術の差よりも、保管方法や運搬方法などの僅かな環境の差によるものと考えられる。また、第1回の最頻度しきい値は 10-20 J/cm² にあり、今回の方が高い。メーカーの膜設計および成膜技術の改善の結果と、試料数全体が減少したため度数分布に変化が生じたと考えられる。

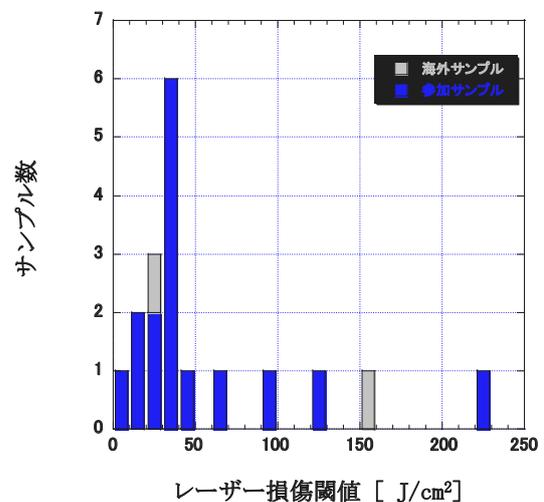


図2 1064nm 高反射膜データベース化試験結果

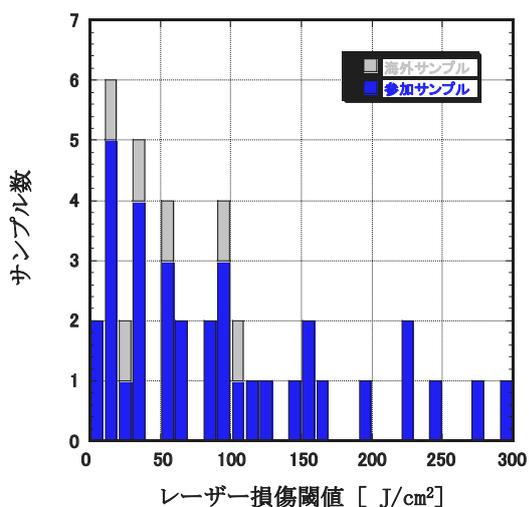


図3 第1回データベース化試験結果

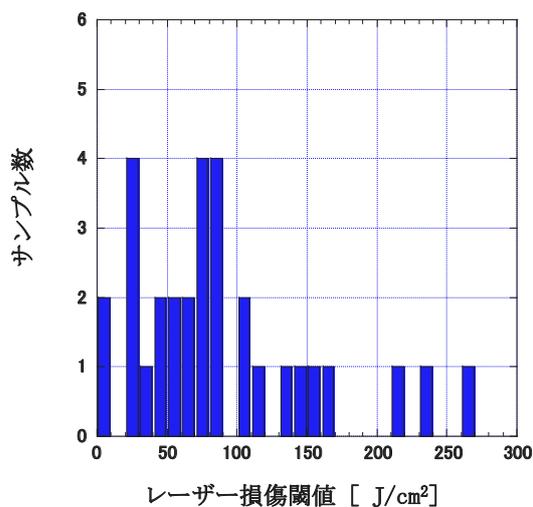


図4 1064nm 反射防止膜データベース化試験結果

5. 1064 nm 用反射防止膜の評価結果

図4、図5に、今回の1064 nm用反射防止膜のデータベース化試験結果と、第2回データベース化試験の結果¹⁶⁾を示す。それぞれの最大損傷しきい値は、約270 J/cm²と約320 J/cm²であり、これも高反射膜の場合と同様に技術的な差はないと考えられる。一方、最頻度しきい値は、第2回の場合には30-50 J/cm²にあったのに対して、今回は20-30 J/cm²と70-90 J/cm²と2つに分かれた。その結果、全体の度数分布は高耐力へシフトしたものと判断される。しかし、試料数の減少も度数分布に影響していると考えられるので、個別に詳細な比較が必要である。

6. メーカー毎の損傷耐力の比較

第1回と第11回、また第2回と第12回の両方のデータベース化試験に参加したメーカーサンプルの損傷しきい値を比較した。各メーカーは、それぞれのデータベース化試験に、複数個の試料を提供しているので、その中の最高損傷しきい値のみを比較した。

図6に比較可能なメーカー9社の高反射膜、反射防止膜の最高レーザー損傷しきい値を示す。6社のメーカーにおいて、今回（第11回、12回）の方が高いレーザー損傷しきい値であることが判る。特に、A社、E社については、5倍以上の損傷耐力の改善が進んでいる。

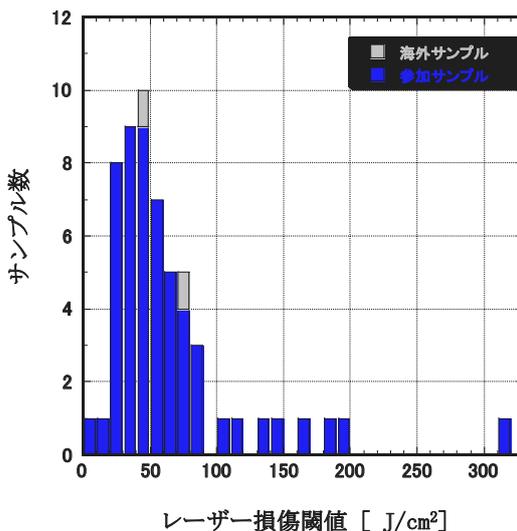


図5 第2回データベース化試験結果

以上のことから、図2、図4のデータベース化試験の度数分布は、メーカー各社の膜設計、成膜技術の改善により高耐力化が進んだ結果と言える。

7. まとめ

平成25年度に実施した第11回(1064 nm 高反射膜)、12回(1064nm 反射防止膜) データベース化試験の結果についてまとめた。この光学素子は、平成19年度に実施した第1回、2回と同じ光学特性仕様であり、前回か

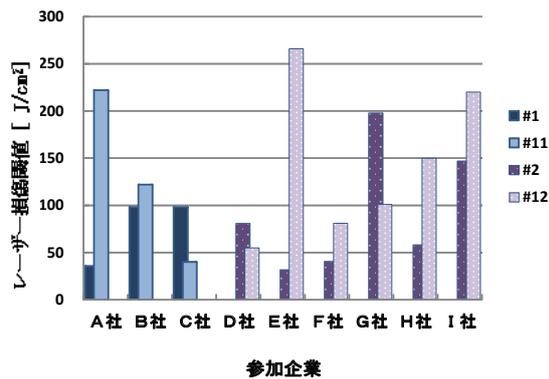


図6 第1回と第11回、第2回と第12回の参加メーカー最高レーザー損傷しきい値の比較

らの比較により高耐力化が進んだことを確認した。このことは、国内技術の底上げが可能であることを示唆するものである。

今後、他の光学素子、またレーザー照射条件においてデータベース化試験を実施するとともに、高耐力化へ支援を進めていく。

謝辞

試料を提供し御協力頂いた高耐力光学素子研究会参加企業各社に感謝致します。

参考文献

- 1) 本越伸二他: ILT 2009, レーザー技術総合研究所, 2009.
- 2) 本越伸二他: ILT 2010, レーザー技術総合研究所, 2010.
- 3) 本越伸二他: ILT 2011, レーザー技術総合研究所, 2011.
- 4) 本越伸二他: ILT 2012, レーザー技術総合研究所, 2012.
- 5) 本越伸二他: ILT 2013, レーザー技術総合研究所, 2013.
- 6) S.Motokoshi, et al.: Proc. of Laser-Induced Damage in Optical Materials 2010, SPIE **7842**, 78420F-1, 2011.
- 7) S.Motokoshi, et al.: Proc. of Laser-Induced Damage in Optical Materials 2011, SPIE **8190**, 81900I-1, 2012.
- 8) <http://www.ilt.or.jp/kenkyukai.html>

新レーザー材料開発

レーザー技術開発室

本越伸二、宮永憲明¹、村上匡且¹

¹大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

1. はじめに

現在、固体レーザー媒質として誘導放出断面積が大きく、発振が容易なNd:YAG結晶が広く利用されている。しかし結晶材料は大型化が困難で、大きな誘導放出断面積は高出力動作において寄生発振を引き起こす要因となるため、Nd:YAG材料は高出力レーザーには不向きである。

近年、この課題を解決するために、Yb:YAG材料が注目されている。900nm帯を半導体レーザー(LD)で直接励起できるために、Nd:YAG材料に比べて高効率動作が可能である。しかし、準3準位系のエネルギー準位のために、反転分布ができにくく、強励起が必要である。また、極低温に冷却することにより4準位レーザー動作が可能となり、低温冷却固体レーザー装置として、研究開発が進められている¹⁾。

一方、励起用LDの高出力化が進み、固体レーザーの高効率動作が可能となったが、パルス動作やコスト性能を考えると、未だにフラッシュランプ(FL)励起も多く利用されている。そのため、白色光であるFL励起固体レーザーの高効率化も重要な課題である。

このように、現在利用されているレーザー材料についても、一長一短があり、用途に応じた固体レーザー材料の開発が期待されている。

レーザー技術総合研究所では、これまで宇宙へのレーザー応用を目的に、太陽光励起レーザー装置の開発研究を行ってきた。Cr³⁺を共添加したNd/Cr:YAG²⁾セラミックスを採用して、発振および増幅実験を行った。Cr³⁺イオンは、可視域に広い吸収帯を持ち、白色光である太陽光を効率よく吸収し、そのエネルギーを発振イオンであるNd³⁺に効率よく移乗すると考えられてきた。しかしながら、そのエネルギー移乗の過程は、未だ十分に理解

されていない。

本報告書では、Nd/Cr:YAG材料内のエネルギー移乗過程の解明を目的に、平成25年度に実施した蛍光特性の温度依存性の結果についてまとめる。また、新しく始めたNd:CNGG(CaNbGaガーネット)^{3,4)}セラミック材料の開発の現状について報告する。

2. Nd/Cr:YAG材料のエネルギー準位

Nd/Cr:YAGセラミック中のCr³⁺イオンとNd³⁺イオンのエネルギー準位を図1に示す。Cr³⁺イオンは、紫外から可視域に広い吸収帯(⁴T₁、⁴T₂)を持っている。この吸収帯準位から蛍光上準位である²Eに熱的に緩和し、その後Nd³⁺イオンへ遷移(エネルギー移乗)することによってNd³⁺の蛍光量が増加すると考えられている⁵⁾。また、Cr³⁺イオンに蓄積されるエネルギーがNd³⁺イオンへ移乗するため、Nd/Cr:YAGセラミックのCr³⁺イオンの蛍光寿命は、Cr³⁺のみを添加したYAGと比較して短くなると考えられる。

レーザー材料の蛍光特性は、Nd³⁺イオンやCr³⁺イオン

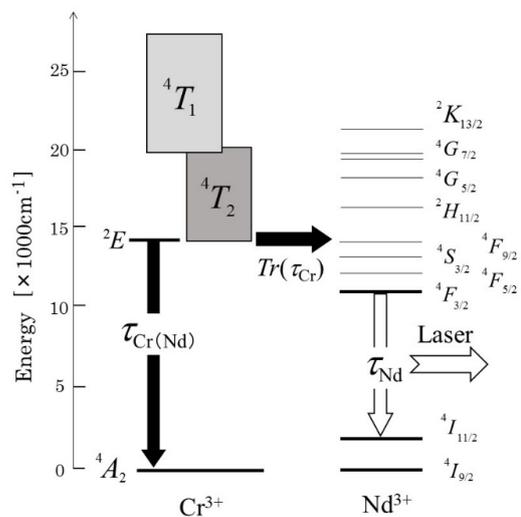


図1 Nd/Cr:YAG材料のエネルギー準位

などの添加イオンのエネルギー準位によって決まる。そのエネルギー準位は主材料であるYAGの結晶場により影響を受ける⁶⁾。これら2つのイオンにおいて、Nd³⁺イオン（希土類）の発光に関与する4f電子は5s、5p電子で遮蔽されているのに対して、Cr³⁺イオン（遷移金属）では発光に関与する3d電子が不完全最外殻を作るため、外場の影響を敏感に受ける。外場によりCr³⁺イオンのエネルギー準位は変化するので、それに伴った蛍光特性を解析すれば、Nd/Cr:YAGセラミックのエネルギー移乗を明らかにできると考えられる。昨年度は、母材温度を変化させた場合のNd/Cr:YAGセラミックおよびCr³⁺:YAG粉体の蛍光減衰波形を評価し、エネルギー移乗の解析を行った。

3. Cr³⁺イオンの蛍光温度依存性

蛍光の測定には、Nd/Cr:YAGセラミックおよびCr:YAG粉体を用いた。実験配置図を図2に示す。励起源としてローダミン色素レーザー（610 nm、パルス幅10 ns）光をサンプルに照射し、干渉フィルターを通して蛍光波長を限定し、PINダイオード（応答速度0.1 μs）で蛍光寿命を評価した。干渉フィルターはCr³⁺イオンの蛍光波長である690±5 nmを選択した。サンプル温度は、ヒーターと熱電対を用いて293~473 Kの範囲で変化させた。

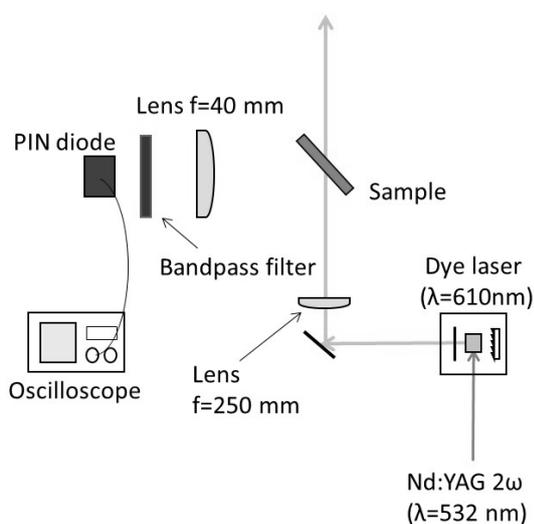


図2 Nd/Cr:YAG材料蛍光測定配置図

図3に測定したNd/Cr:YAGセラミックの蛍光減衰波形の温度依存性を示す。蛍光寿命は、温度上昇に伴い短くなることが判る。Cr:YAG材料においても温度上昇とともに寿命の短縮が確認された。また、それぞれの温度における蛍光寿命を2つの材料で比較した結果、Nd/Cr共添加材料の方がCr:YAGより短いことが判った。

この減衰波形の違いから、式(1)のように、Cr³⁺からNd³⁺へのエネルギー移乗効率（割合） η_{Tr} を求めた。

$$\eta_{Tr} = \left(1 - \frac{\tau_{Cr(Nd)}}{\tau_{Cr}} \right) \quad (1)$$

ここで、 $\tau_{Cr(Nd)}$ 、 τ_{Cr} は、それぞれNd/Cr:YAG材料、Cr:YAG材料からのCr³⁺の蛍光寿命を示す。結果、エネルギー移乗効率は、温度によらず約65%で一定であることが判った⁷⁾。

4. Nd:Cr:YAG材料の諸特性

固体レーザーの媒質には主に単結晶とガラスが存在し、単結晶はガラスと比較して大型化が困難である。しかし、熱耐力が強く高繰り返しパルス動作に有利である。一方、ガラスは単結晶と比較してスペクトル幅が広く高ピークパワーのパルス動作が得意であるが、熱破壊に弱いという欠点がある。

結晶材料ではYAG (Y₃Al₅O₁₂) に代表される、等方的で固く化学的に安定なガーネット構造を持つ結晶が広

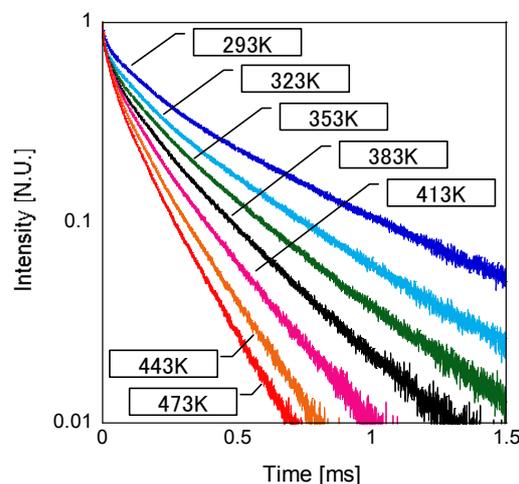


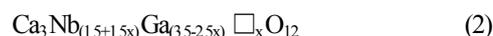
図3 Nd/Cr:YAG材料のCr³⁺イオン蛍光減衰波形

く研究され、様々な金属元素の組み合わせによってガーネット構造の結晶を得ることができる。ガーネット構造は $\{C\}_3\{A\}_2\{D\}_3O_{12}$ の化学式で表され、 $\{C\}$ サイトには Y^{3+} 、 Gd^{3+} 、などや活性イオンとなる Nd^{3+} などの元素が入り、8個の酸素が12面体状に配位している。 $\{A\}$ サイトには Sc^{3+} 、 Al^{3+} 、 Ga^{3+} などの元素が入り6個の酸素が8面体状に配位している。 $\{D\}$ サイトには Al^{3+} 、 Ga^{3+} などの元素が入り4個の酸素が4面体状に配位している。例えば、YAGの場合は $\{C\}$ サイトにはY、 $\{A\}$ 、 $\{D\}$ サイトにはAlが入っている。

Nd添加ガーネット結晶とガラス材料の特性を表1に示す^{3,4,8-14)}。表からも、ガラス材料は広い蛍光スペクトル幅を持つが、誘導放出断面積、熱伝導率が小さいことが分かる。一方、Nd:YAG材料は高い熱伝導率を持つが、誘導放出断面積が大きすぎて、容易に寄生発振を起こす。これらの中間であるNd:CNGGは適切な誘導放出断面積 ($3\sim 9 \times 10^{20} \text{ cm}^2$) の範囲内であり、ガラスよりも高い熱伝導率、ガーネット構造の結晶材料の中で広い蛍光スペクトル幅を持つため、高出力レーザー媒質の候補と考えられる。

CNGGは Ca^{2+} 、 Nb^{5+} 、 Ga^{3+} の元素から構成され、 $\{A\}$ サイトに価数の違う元素がランダムに入ることによって電荷補償を保つためにランダム空孔を生じる。そのた

め、CNGGの組成式は



となり、 \square は空孔を表す。 $x=0.125$ の



が調和溶融組成と呼ばれる作り易い組成比であり、単結晶を育成できるのは、 $0.11 \leq x \leq 0.14$ の範囲であるとされている¹⁵⁾が、多結晶では $x=0$ の $Ca_3Nb_{1.5}Ga_{3.5}O_{12}$ の作製も報告されている¹⁶⁾。

平成26年度は、Nd:CNGG結晶のセラミックス化を目標に、微結晶粉体の製作を行い、材料特性を評価した。

5. Nd:CNGG微結晶粉体の製作と蛍光特性

ゾルゲル法を用いて、微結晶粉体の製作を行った。合成原材料には、酢酸ネオジム $Nd(CH_3COO)_3$ 、酢酸カルシウム $Ca(CH_3COO)_2$ 、ニオブイソプロポキシド $Nb[OCH(CH_3)_2]_5$ 、ガリウムイソプロポキシド $Ga[OCH(CH_3)_2]_3$ を化学組成比に合わせて合成し、その焼結温度による蛍光特性の違いを蛍光分光装置により測定した。

表1 Nd添加ガーネット結晶の諸特性^{3,4,8-14)}

	誘導放出断面積 [$\times 10^{20} \text{ cm}^2$]	蛍光寿命 [μs]	熱伝導率 [W/mK]	蛍光スペクトル幅 (FWHM) [nm]
Nd:YAG	28	242	13	1.4
Nd:YSAG	9.4	265	-	5.5
Nd:YSGG	15	270	7.9	1
Nd:GGG	15	200	13	0.9
Nd:GSAG	32	256	5.6	1.3
Nd:GSGG	16	265	6	-
Nd:CNGG	5.4	170	4.7	17
Nd:CLNGG	2.4	-	3.0	17
Nd:リン酸塩 ガラス	4.0	310	1.3	21

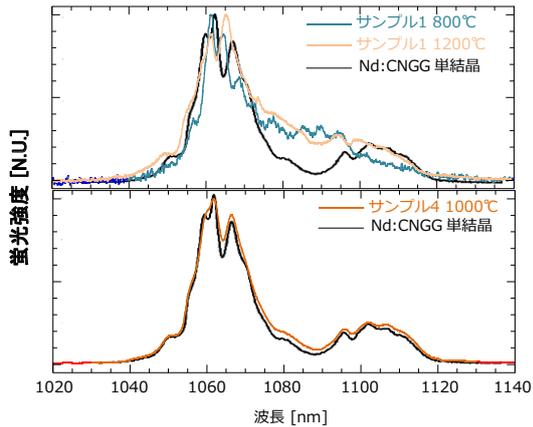


図4 Nd:CNGG 微結晶粉体の蛍光特性

図4に製作した微結晶粉体の蛍光特性を示す。図4(a)、(b)はそれぞれ異なった製作ロットを示し、焼結温度が異なる。また比較のために報告されているNd:CNGG単結晶の蛍光特性を重ねて示す。図より、焼結温度により異なった蛍光特性を示すことが判った。またX線回折装置を用いて、これらのサンプルの結晶構造を確認した結果、サンプル1には、CNGG結晶以外の異なった酸化物結晶が含まれていることが判った。以上のことから、適切な原材料、焼結温度によって、Nd:CNGG微結晶の製作は可能であり、今後、透明セラミックス化に向けて研究を進めていく。

6. まとめ

更なる固体レーザーの高性能化、高効率化に向けて、新しいレーザー材料の開発、材料評価を進めた。Nd:Cr:YAGセラミックス、Nd:CNGGセラミックスとも

に、これまでになかったレーザー諸特性をもち、固体レーザーの新しい応用の可能性を示唆している。

今後、材料物性評価、製造方法の最適条件などを明らかにし、レーザー動作特性の評価を進めていく。

参考文献

- 1) 宮永憲明他: プラズマ・核融合学会誌, **83**, 3-18, 2007.
- 2) Z. J. Kiss and R. C. Duncan: Appl. Phys. Lett., **5**, 200-202, 1964.
- 3) A. Agnesi et al.: J. of Quan. Electron. **37**, 304-313, 2001.
- 4) Y. Ono, et al.: Physica B, **213-214**, p.420-422, 1995.
- 5) 椿本孝治他: レーザー研究, **37**, 698-703, 2009.
- 6) B. Henderson, et al.: J. Phys. C Solid State Phys., **21**, 6187-6198, 1988.
- 7) Y. Honda, et al.: J. of Luminescence, **148**, 342-346, 2014.
- 8) 小林番郎: 固体レーザー, 学会出版センター, pp. 84-86, 1997.
- 9) H. Okada, et al.: Optics Lett., **35**, 3048-3050, 2010.
- 10) J. Saikawa et al.: Advanced Solid-State Photonics, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2004), paper TuB17, 2004.
- 11) Y. Sato et al.: Advanced Solid-State Photonics, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2004), paper WB6, 2004.
- 12) L. J. Qin, et al.: Laser Physics, **18**, 719-721, 2008.
- 13) A. Rapaport, et al.: Applied Optics, **41**, 7052-7057, 2002.
- 14) 小林番郎: 固体レーザー, 学会出版センター, pp. 74, 1997.
- 15) K. Shimamura, et al.: J. of Crystal Growth, **147**, 99-103, 1995.
- 16) Y. K. Voronko, et al.: Optical Materials, **20**, 197-209, 2002.

発表論文リスト

発表論文リスト

○レーザーエネルギー研究チーム

著者	<u>D. Li</u> , M. Hangyo, Z. Yang, Y. Tsunawaki, Y. Wei, Y. Wang, S. Miyamoto, M. R. Asakawa, and <u>K. Imasaki</u>
題目	Theoretical analysis and simulation of growth rate and start current in Smith–Purcell free-electron lasers
論文誌名	Terahertz Science and Technology, Vol.6, No.3, pp.189-205, 2013
著者	M.Zhang, Y.Weii, G.Guo, L.Yue, Y. Wang, and <u>D. Li</u>
題目	Study on two kinds of novel 220 GHz folded-waveguide traveling-wave tube
論文誌名	Japanese Journal of Applied Physics Vol.53, pp.036201, 2014
著者	李大治、萩行正憲、宮本修治、 <u>今崎一夫</u>
題目	グレーティングによるテラヘルツ電磁波放射の新理論
論文誌名	レーザー学会第454回研究会報告、pp.17、2013
著者	橋本智、陳彩華、小林花綸、川田健二、 <u>李大治</u> 、天野壯、宮本修治
題目	小型電子線形加速器LEENAを用いたテラヘルツ光源開発
論文誌名	電気学会論文誌C、Vol.134、p.495、2014

○レーザープロセス研究チーム

著者	<u>T. Somekawa</u> , M. Kasaoka, F. Kawachi, Y. Nagano, <u>M. Fujita</u> , and <u>Y. Izawa</u>
題目	Analysis of DissolvedC ₂ H ₂ in Transformer Oils Using Laser Raman Spectroscopy
論文誌名	Opt. Lett., Vol.38, No.7, pp.1086-1088, 2013
著者	H. Furuse, <u>H. Chosrowjan</u> , J. Kawanaka, N. Miyanaga, <u>M. Fujita</u> , and <u>Y. Izawa</u>
題目	ASE and parasitic lasing in thin disk laser with anti-ASE cap
論文誌名	Opt. Express, Vol.21, No.11, pp.13118-13124, 2013
著者	H. Furuse, <u>T. Sakurai</u> , <u>H. Chosrowjan</u> , J. Kawanaka, N. Miyanaga, <u>M. Fujita</u> , S. Ishii and <u>Y. Izawa</u>
題目	Conceptual design of 10 kW high-average power laser system based on cryogenic Yb:YAG/YAG composite ceramics
論文誌名	"The Eighth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA)" Technical Digest, paper - P.Mo-50, 2013
著者	H. Fujita, K. Iyama, R. Bhushan, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, <u>M. Fujita</u> , N. Miyanaga, and T. Kawashima
題目	Development of a kW class Nd:YAG ceramic thin disc laser for advanced laser machining
論文誌名	Proceedings of Advanced Lasers and Photon Sources Conference 2013, pp.139-140, 2013
著者	<u>H. Chosrowjan</u> , H. Furuse, <u>M. Fujita</u> , <u>Y. Izawa</u> , J. Kawanaka, N. Miyanaga, K. Hamamoto, and T. Yamada
題目	Interferometric phase shift compensation technique for high-power, tiled-aperture coherent beam combination
論文誌名	Opt. Lett., Vol.38, No.8, pp.1277-1279, 2013

著者 題目 論文誌名	<u>M. Fujita</u> , <u>T. Somekawa</u> , and N. Miyanaga Micromachining of CFRP with ultra-short laser pulses Proceedings of Laser Processing for CFRP and Composite Materiala, Vol. 41, pp.629-632, 2013
著者 題目 論文誌名	<u>T. Sakurai</u> , H. Furuse, <u>H. Chosrowjan</u> , J. kawanaka, N. Miyanaga, S. Ishii, and <u>M. Fujita</u> , <u>Y. Izawa</u> Temperature distribution characteristics in a cryogenic Yb:YAG TRAM laser medium ALPS'13, The 2st Advanced Lasers and Photon Sources, Paper No. ALPSp6-18, pp.107-108, 2013
著者 題目 論文誌名	藤田雅之、 <u>染川智弘</u> ハイパワーレーザを用いたCFRPの微細加工 レーザ加工学会誌、20巻、1号、pp.34-38、2013
著者 題目 論文誌名	H. Furuse, <u>T. Sakurai</u> , <u>H. Chosrowjan</u> , J. Kawanaka, N. Miyanaga, <u>M. Fujita</u> , S. Ishii, and <u>Y. Izawa</u> Amplification characteristics of cryogenic Yb ³⁺ :YAG total-reflection active-mirror laser Applied Optics, Vol. 53, Issue 9, pp.1964-1969, 2014
著者 題目 論文誌名	S. Hwang, H. Furuse, <u>H. Chosrowjan</u> , C. Lim, J. Kawanaka, and N. Miyanaga Gain Spectral Filtering for Spectral Enhancement of Mode-Locked Fiber Oscillators Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 52, pp. 122701-122705, 2013
著者 題目 論文誌名	<u>M. Fujita</u> , <u>T. Somekawa</u> , T. Samoto, H. Hirano, K. Hikichi, S. Tanaka, and M. Esashi Laser Selective Transfer Process of Barium Strontium Titanate (BST) on a Sapphire Substrate Proceedings of ICALEO2013, pp.783-786, 2013
著者 題目 論文誌名	H. Ohno, Y. Iizuka, S. Horikawa, <u>T. Sakurai</u> , T. Hondoh, and H. Motoyama Potassium alum and aluminum sulfate micro-inclusions found in polar ice from Dome Fuji, East Antarctica Polar Science, Vol.8, pp.1-9, 2014
著者 題目 論文誌名	<u>T. Somekawa</u> , M. Kasaoka, Y. Nagano, <u>M. Fujita</u> , and <u>Y. Izawa</u> Transformer Working Assessment Using Laser Raman Spectroscopy Proceedings of 2nd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology, pp.21-25, 2014
著者 題目 論文誌名	T. Samoto, H. Hirano, <u>T. Somekawa</u> , K. Hikichi, <u>M. Fujita</u> , M. Esashi, and S. Tanaka Wafer-to-wafer transfer process of barium strontium titanate metal-insulator-metal structures by laser pre-irradiation and gold-gold bonding for frequency tuning applications Proc. of 2013 Transducers and Eurosensors, XXVII, pp.171-174, 2013
著者 題目 論文誌名	<u>染川智弘</u> 、佐藤悠、高橋真弘、高田望、藤田雅之 ラマンライダーによる数値予報モデルへの水蒸気同化 日本リモートセンシング学会誌、33巻、5号、pp.360-366、2013

○レーザー計測研究チーム

著者 題目 論文誌名	<u>島田義則</u> レーザーによるコンクリート健全性の評価 O Pule E, Vol.35 No.5、467-471、2013
------------------	--

著者	島田義則
題目	レーザーを用いたコンクリート欠陥検出の進展
論文誌名	超音波テクノ、2013.7-8、83-87、2013
著者	N. Misaki, T. Asakura, H. Takinami, <u>Y. Shimada</u> , <u>O. Kotyaev</u> , and M. Shinoda, H. Sakamoto Y. Takahashi, and Y. Sakamoto
題目	Development of non-destructive inspection method for concrete elements in tunnel lining using remote laser sensing
論文誌名	Proceedings of the first international conference on civil and building engineering informatics, pp.79-83, 2013
著者	S. Kurahashi, <u>Y. Shimada</u> , <u>O. Kotyaev</u> , T.Norimatsu, Y. Kono, S. Nakata and M. Ishii
題目	Measurement of depth of surface cracks in concrete by laser-ultrasonic technique
論文誌名	Proceedings of the first international conference on civil and building engineering informatics, pp.515-520, 2013
著者	島田義則
題目	レーザーを用いたコンクリート欠陥検出の進展
論文誌名	検査技術、2013.11、31-35、2013

○レーザーバイオ化学研究チーム

著者	K. Lugsanangarm, S. Pianwanit, A. Nueangaudom, S. Kokpol, F. Tanaka, N. Nunthaboot, K. Ogino, R. Takagi, T. Nakanishi, M. Kitamura, <u>S. Taniguchi</u> , and <u>H. Chosrowjan</u>
題目	Mechanism of Photoinduced Electron Transfer from Tyrosine to the Excited Flavin in Flavodoxin from Helicobacter pylori. A comparative study with the flavodoxins and flavin mononucleotide binding protein from Desulfovibrio vulgaris (Miyazaki F)
論文誌名	Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry Vol.268, pp.58-66, 2013
著者	L. Mendonça, F. Hache, P. Changenet-Barret, P. Plaza, <u>H. Chosrowjan</u> , <u>S. Taniguchi</u> , and Y. Imamoto
題目	Ultrafast Carbonyl Motion of the Photoactive Yellow Protein Chromophore Probed by Femtosecond Circular Dichroism
論文誌名	Journal of the American Chemical Society, Vol.135, No.39, pp.14637-14643 2013
著者	J. Liu, A. Yabushita, <u>S. Taniguchi</u> , <u>H. Chosrowjan</u> , Y. Imamoto, K. Sueda, N. Miyanaga, and T. Kobayashi
題目	Ultrafast Time-Resolved Pump-Probe Spectroscopy of PYP by a Sub-8fs Pulse Laser at 400 nm
論文誌名	The Journal of Physical Chemistry B, Vol.117, No.17, pp.4818-4826 2013
著者	谷口誠治
題目	太陽励起レーザーの水素生産への応用 -レーザー還元金属ナノ粒子による水素生成-
論文誌名	月刊光アライアンス、8月号、pp.20-23、2013
著者	N. Nunthaboot, K. Lugsanangarm, S. Pianwanit, S. Kokpol, F. Tanaka, <u>S. Taniguchi</u> , <u>H. Chosrowjan</u> , T. Nakanishi, and M. Kitamura
題目	Bell-shaped dependence of the rate of ultrafast photoinduced electron transfer from aromatic amino acids to the excited flavin on the donor-acceptor distance in FMN binding proteins
論文誌名	Computational and Theoretical Chemistry, Vol.1030, pp.9-16, 2013

○理論・シミュレーションチーム

著者	K. Tomita, K. Nakayama, K. Inoue, <u>A. Sunahara</u> and K. Uchino
題目	A Collective Laser Thomson Scattering System for Diagnostics of Laser-Produced Plasmas for Extreme Ultraviolet Light Sources
論文誌名	Applied Physics Express Vol.6, 076101, 2013
著者	Y. Mori, T. Sekine, O. Komeda, S. Nakayama, K. Ishii, R. Hanayama, K. Fujita, S. Okihara, N. Satoh, T. Kurita, T. Kawashima, H. Kan, N. Nakamura, T. Kondo, M. Fujine, H. Azuma, T. Hioki, M. Kakeno, T. Motohiro, Y. Nishimura, <u>A. Sunahara</u> , Y. Sentoku and Y. Kitagawa
題目	1-Hz fast-heating fusion driver HAMA pumped by a 10-J green diode-pumped solid-state laser
論文誌名	Nuclear Fusion, Vol.53, 073011-1-8, 2013
著者	A. Maeno, N. Yamamoto, S. Fujioka, Y. Mori, <u>A. Sunahara</u> , T. Johzaki, and H. Nakashima
題目	Analysis of Laser Wavelength and Energy Dependences of the Impulse in a Magnetic Thrust Chamber System for a Laser Fusion Rocket
論文誌名	Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol.56, No.3, pp.170-172, 2013
著者	A. Sasaki, <u>A. Sunahara</u> , K. Nishimura
題目	Atomic processes and Radiation Hydrodynamics
論文誌名	J. Plasma Fusion Res., Vol.10, pp.654-658, 2013
著者	H. Nagatomo, T. Johzaki, <u>A. Sunahara</u> , H. Sakagami, K. Mima, H. Shiraga and H. Azechi
題目	Computational study of the strong magnetic field generation in non-spherical cone-guided implosion
論文誌名	Nuclear Fusion, Vol.53, pp.063018-1-4, 2013
著者	K. Shigemori, Y. Hironaka, H. Nagatomo, S. Fujioka, <u>A. Sunahara</u> , T. Kadono, H. Azechi, and K. Shimizu,
題目	Extremely high-pressure generation and compression with laser implosion
論文誌名	Applied Physics Letters, Vol.102, 183501, 2013
著者	Y. Kitagawa, Y. Mori, O. Komeda, K. Ishii, R. Hanayama, K. Fujita, S. Okihara, T. Sekine, N. Sato, T. Kurita, T. Kawashima, H. Kan, N. Nakamura, T. Kondo, M. Fujine, H. Azuma, T. Motohiro, T. Hioki, M. Kaneno, Y. Nishimura, <u>A. Sunahara</u> , and Y. Sentoku
題目	Hi-rep. Counter-Illumination Fast Ignition Scheme Fusion
論文誌名	Plasma Fusion Res., Vol.8, 3404047, 2013
著者	<u>A. Sunahara</u>
題目	Initial Process of Laser-Plasma Interaction in the Extreme Ultra-Violet Light Source and the Inertial Confinement Fusion Plasmas
論文誌名	J. Plasma Fusion Res., Vol.89, No.6, pp.416-422, 2013
著者	T. Higashiguchi, S. Fujioka, <u>A. Sunahara</u> , T. Yanagida, and H. Mizoguchi
題目	Progress of Extreme Ultraviolet (EUV) Source Development for Micro-Lithography
論文誌名	The Review of Laser Engineering, Vol.42, No.1, pp.14-22, 2014

著者	Z. Zhang, H. Nishimura, T. Namimoto, S. Fujioka, Y. Arikawa, H. Nagatomo, M. Nakai, T. Ozaki, M. Koga, T. Johzaki, <u>A. Sunahara</u> , H. Chen, J. Park, G. J. Williams, H. Shiraga, S. Kojima, M. Nishikino, T. Kawachi, H. Hosoda, Y. Okano, N. Miyanaga, J. Kawanaka, Y. Nakata, T. Jitsuno, and H. Azechi
題目	Quantitative measurement of hard X-ray spectra from laser-driven fast ignition plasma
論文誌名	High Energy Density Physics, Vol.9, pp.435-438,2013
著者	T. Johzaki, <u>A. Sunahara</u> , H. Nagatomo, H. Sakagami, S. Fujioka, H. Shiraga and K. Mima
題目	Enhancement of Energy Coupling Efficiency in Fast-Ignition Laser Fusion by Electron Beam Guiding with Self-Generated Magnetic Field
論文誌名	J. Plasma Fusion Res., Vol.89, No.7, pp.456-461, 2013
著者	T. Zh. Esirkepov, J. Koga, <u>A. Sunahara</u> , T. Morita, M. Nishikino, K. Kageyama, H. Nagatomo, K. Nishihara, A. Sagisaka; H. Kotaki, T. Nakamura; Y. Fukuda, H. Okada, A. Pirozhkov, A. Yogo, M. Nishiuchi, H. Kiriya, K. Kondo, M. Kando, and S. V. Bulanov
題目	Prepulse and amplified spontaneous emission effects on the interaction of a petawatt class laser with thin solid targets
論文誌名	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol.754, pp.150-163, 2014
著者	O. Komeda, Y. Nishimura, Y. Mori, R. Hanayama, K. Ishii, S. Nakayama, Y. Kitagawa, T. Sekine, N. Sato, T. Kurita, T. Kawashima, H. Kan, N. Nakamura, T. Kondo, M. Fujine, H. Azuma, T. Motohiro, T. Hioki, M. Kakeno, <u>A. Sunahara</u> , Y. Sentoku and E. Miura
題目	First demonstration of laser engagement of 1-Hz-injected flying pellets and neutron generation
論文誌名	Scientific reports, Vol.3, 2561, 2013
著者	Y. Mori, T. Nakayama, K. Ishii, R. Hanayama, N. Satoh, T. Kurita, T. Kawashima, H. Kan, N. Nakamura, T. Kondo, M. Fujine, M. Kakeno, S. Ohshima, H. Azuma, T. Hioki, T. Kajino, T. Motohiro, <u>A. Sunahara</u> , Y. Sentoku, and Y. Kitagawa,
題目	Repetitive 1Hz Fast-Heating Fusion Driver HAMA Pumped by Diode Pumped Solid State Laser
論文誌名	The review of laser engineering, Vol.42, pp.154-159,2014
著者	M. Olazabal-Loumé, Ph. Nicolai, G. Riazuelo, M. Grech, J. Breil, S. Fujioka, <u>A. Sunahara</u> , N. Borisenko and V. T. Tikhonchuk
題目	Simulations of laser imprint reduction using underdense foams and its consequence on the hydrodynamic instability growth
論文誌名	New J. Physics, Vol.15, 085033, 2013

○レーザー技術開発室

著者	K.Fujioka, T.Saiki, <u>S.Motokoshi</u> , Y.Fujimoto, H.Fujita, and <u>M.Nakatsuka</u>
題目	Parameter mapping survey on optimized sensitizing effect of Ce/Cr/Nd:YAG material for solar-pumped solid-state lasers
論文誌名	Journal of Luminescence, Vol.143, pp.10-13, 2013

著者	Y.Honda, <u>S.Motokoshi</u> , T.Jitsuno, N.Miyanaga, K.Fujioka, <u>M.Nakatsuka</u> , and M.Yoshida
題目	Temperature dependence of optical properties in Nd/Cr:YAG materials
論文誌名	Journal of Luminescence, Vol.148, pp.342-346, 2014
著者	K. Mikami, <u>S. Motokoshi</u> , <u>T. Somekawa</u> , T. Jitsuno, <u>M. Fujita</u> , and K. A. Tanaka
題目	Laser-induced damage thresholds at different temperature for optical devices
論文誌名	Proceedings of SPIE, Vol.8786, pp.87861J1-J9, 2013
著者	K. Mikami, <u>S. Motokoshi</u> , <u>T. Somekawa</u> , T. Jitsuno, <u>M. Fujita</u> , and K. A. Tanaka
題目	A theoretical analysis for temperature dependences of laser-induced damage threshold
論文誌名	Proceeding of SPIE, Vol.8885, pp.88851T1-T9, 2013
著者	K. Mikami, <u>S. Motokoshi</u> , <u>T. Somekawa</u> , T. Jitsuno, <u>M. Fujita</u> , and K. A. Tanaka
題目	Temperature dependence of laser-induced damage threshold of optical coatings at different pulse widths
論文誌名	Optical Express, Vol.21, pp.28719-28728, 2013

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	<u>D. Li</u> , K.Imasaki, <u>Y.Izawa</u> , S.Miyamoto, K.Horikawa, and T.Mochizyki
題目	Dispose of nuclear waste with Laser-Compton scattering gamma ray
会議名	International Conference on Laser Applications in Nuclear Engineering, Apr. 23-25, 2013, Pacifico Yokohama, Japan
著者	<u>D. Li</u> , M. Hangyo, Z. Yang, Y. Wei, Y. Wang, D. Wang, and S. Miyamoto
題目	Dispersion characteristics of grating structure with composite materials
会議名	35th International Free Electron Laser Conference, Aug. 26-30, 2013, New York Marriott Marquis Hotel, USA
著者	<u>D. Li</u> , M. Hangyo, Z. Yang, Y. Wei, Y. Wang, D. Wang, and S. Miyamoto
題目	Study on radiation from negative-index material
会議名	35th International Free Electron Laser Conference, Aug. 26-30, 2013, New York Marriott Marquis Hotel, USA

○レーザープロセス研究チーム

著者	K. Iyama, H. Furukawa, <u>H. Chosrowjan</u> , <u>T. Sakurai</u> , K. Tsubakimoto, H. Yoshida, H. Fujita, <u>M. Fujita</u> , N. Miyanaga, Y. Tamaoki, Y. Kato, and T. Kawashima
題目	400W Nd:YAG composite ceramic thin-disc laser in 10ns pulse at 167kHz
会議名	Photonics West, Solid State Lasers XXIII: Technology and Devices, Feb. 3, 2014, Moscone Center, San Francisco, USA
著者	H. Fujita, K. Iyama, R. Bhushan, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, <u>M. Fujita</u> , N. Miyanaga, and T. Kawashima
題目	Development of a kW class Nd:YAG ceramic thin disc laser for advanced laser machining
会議名	The 2nd Advance Lasers and Photon Sources, Apr. 25, 2013, Pacifico Yokohama, Japan
著者	<u>M. Fujita</u> , <u>T. Somekawa</u> , and N. Miyanaga
題目	Micromachining of CFRP with ultra-short laser pulses
会議名	Laser Processing for CFRP and Composite Materials 2013, Apr. 24, 2013, Pacifico Yokohama, Japan
著者	<u>T. Sakurai</u> , H. Furuse, <u>H. Chosrowjan</u> , J. Kawanaka, N. Miyanaga, K. Hamamoto, T. Yamada, <u>M. Fujita</u> and <u>Y. Izawa</u>
題目	Temperature distribution characteristics in a cryogenic Yb:YAG TRAM laser medium
会議名	The 2nd Advance Lasers and Photon Sources, Apr. 23-25, 2013, Pacifico Yokohama, Japan
著者	<u>M. Fujita</u> , <u>T. Somekawa</u> , and N. Miyanaga
題目	Micromachining of CFRP with ultra-short laser pulses
会議名	Lasers in Manufacturing (LiM2013), May. 13-16, 2013, International Congress Center, Germany

著者	H. Furuse, <u>T. Sakurai</u> , <u>H. Chosrowjan</u> , J. Kawanaka, N. Miyanaga, <u>M. Fujita</u> , S. Ishii, and <u>Y. Izawa</u>
題目	Conceptual of 10 kW high-average power laser system based on cryogenic Yb:YAG/YAG composite ceramics
会議名	The Eighth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2013), Sep. 8-13, 2013, Nara Prefectural New Public Hall, Japan
著者	<u>M. Fujita</u> , <u>T. Somekawa</u> , T. Samoto, H. Hirano, K. Hikichi, S. Tanaka, and M. Esashi
題目	Laser Selective Transfer Process of Barium Strontium Titanate (BST) on a Sapphire Substrate
会議名	32nd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, ICALEO2013, Oct. 6-10, 2013, Hyatt Regency Miami, USA
著者	<u>T. Somekawa</u> , <u>M. Kasaoka</u> , F. Kawachi, Y. Nagano, <u>M. Fujita</u> and <u>Y. Izawa</u>
題目	Transformer Working Condition Assessment using Laser Raman Spectroscopy
会議名	2nd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology, Jan. 7-9 2014, The Sana Lisbon Hotel, Portugal

○レーザー計測研究チーム

著者	<u>O. Kotyaev</u> , <u>Y. Shimada</u> , M. Shinoda, N. Misaki, Y. Takahashi, and H. Takinami
題目	Laboratory and Field Tests of a Laser-Based System for Remote Non-Destructive Inspection of Transportation Tunnels
会議名	3rd International Symposium on Laser Ultrasonics and Advanced Sensing (LU2013), Jun. 25-28, 2013, Pacifico Yokohama, Japan
著者	H. Tachibana, K. Nakamoto, <u>Y. Shimada</u> , <u>O. Kotyaev</u> , Y. Yamaguchi and S. Hirose
題目	Non-Destructive Inspections for a Steel Plate Bonding Method
会議名	The 12th Japan-Korea Joint Symposium on Steel Bridges, Aug. 22-24 2013, Okinawa University, Japan
著者	N. Misaki, T. Asakura, H. Takinami, <u>Y. Shimada</u> , <u>O. Kotyaev</u> , M. Shinoda, H. Sakamoto, Y. Takahashi, and Y. Sakamoto
題目	Development of non-destructive inspection method for concrete elements in tunnel lining using remote laser sensing
会議名	1st International Conference on Civil and Building Engineering Informatics 2013, 2013, Nov. 7-18, 2013, Tokyo International Exchange Center, Japan
著者	N. Misaki, T. Asakura, H. Takinami, <u>Y. Shimada</u> , <u>O. Kotyaev</u> , M. Shinoda, H. Sakamoto, Y. Takahashi, and Y. Sakamoto
題目	Development of Non-destructive Inspection Method for Concrete Elements in Tunnel Linings Using Remote Laser Sensing
会議名	World Congress on Railway Research 2013, Nov. 25-28, 2013, Sydney Convention Center, Australia
著者	S. Kurahashi, <u>Y. Shimada</u> , <u>O. Kotyaev</u> , T. Norimatsu, Y. Kono, S. Nakata and M. Ishii
題目	Measurement of Depth of Surface Cracks in Concrete by Laser-Ultrasonic Technique
会議名	1st International Conference on Civil and Building Engineering Informatics 2013, No. 7-18, 2013, Tokyo International Exchange Center, Japan

○理論・シミュレーションチーム

著者	A. Sunahara
題目	Modeling of reactor related physics by the numerical simulation
会議名	Partnerships for International Research and Education (PIRE), Jun. 3-5, 2013, RIHGA Royal Hotel Kyoto, Japan
著者	A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo, K. Mima, H. Shiraga, H. Azechi, Y. Mori, and Y. Kitagawa
題目	Direct heating of imploded plasma in the fast ignition
会議名	8th International conference on Inertial Fusion Science and Applications, Sep.8-13, 2013, Nara Prefectural New Public Hall, Japan
著者	A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo, K. Mima, H. Shiraga, and H. Azechi
題目	Direct heating of imploded plasma in the fast ignition
会議名	Fast Ignition Workshop, Sep.16-18, 2013, Kishu-Minaber RoyalHotel, Japan
著者	A. Sunahara, T. Johzaki, H. Sakagami, H. Nagatomo, K. Mima, Y. Arikawa, S. Fujioka, H. Shiraga, H. Azechi, FIREX project
題目	Direct heating of imploded plasma by ultra-intense laser in the fast ignition scheme
会議名	55th Annual Meeting of the APS DPP Meeting, Nov.10-16, 2013, Denver, CO, USA
著者	A Sunahara, K. Takaki, K. Kageyama, T. Yabuuchi, and K. Tanaka
題目	Hydro simulation of materials irradiated by lasers or charged particles
会議名	The 12th Asia Pacific Physics Conference of AAPPS, Jun. 14-19 2013, Makuhari Messe International Convention Complex, Japan

○レーザー技術開発室

著者	Y. Honda, S. Motokoshi, T. Jitsuno, N. Miyanaga, K. Fujioka, M. Nakatsuka, and M. Yoshida
題目	Analysis of energy transfer process in Nd/Cr:YAG materials
会議名	The 2nd Advance Lasers and Photon Source, Apr. 23-25, 2013, Pacifico Yokohama, Japan
著者	T. Isshiki, S. Motokoshi, K. Fujioka, T. Jitsuno, M. Murakami, and M. Yoshida
題目	Analysis of fluorescence for Nd:CNGG powder
会議名	The 2nd Advance Lasers and Photon Source, Apr. 23-25, 2013, Pacifico Yokohama, Japan
著者	K. Mikami, S. Motokoshi, T. Somekawa, T. Jitsuno, M. Fujita, and K. A. Tanaka
題目	A theoretical analysis for temperature dependences of laser-induced damage threshold
会議名	XLV Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers, Sep. 22-25, 2013, Colorado, USA
著者	S. Motokoshi, K. Mikami, and T. Jitsuno
題目	Database on damage thresholds for dichroic mirrors of 1064nm and 532nm
会議名	XLV Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers, Sep. 22-25, 2013, Colorado, USA
著者	K. Mikami, S. Motokoshi, T. Somekawa, T. Jitsuno, M. Fujita, and K. A. Tanaka
題目	Measurement and calculation of laser-induced damage threshold at different temperature for optical coating
会議名	The 2nd Advance Lasers and Photon Source, Apr. 23-25, 2013, Pacifico Yokohama, Japan

著者	Y. Matsuura, Y. Kuroki, K. Kuroda, T. Kiriyama, T. Kamimura, K. Mikami, <u>S. Motokoshi</u> , and T. Jitsuno
題目	Effects of subsurface removal on surface damage resistance of optical coatings in deep-UV wavelength
会議名	XLV Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers, Sep. 22-25, 2013 Colorado, USA
著者	H. Murakami, T. Jitsuno, K. Kato, K. Mikami, <u>S. Motokoshi</u> , T. Kawasaki, N. Miyanaga, and H. Azechi
題目	Quantitative study of effect of contaminations on the damage threshold in optical coating
会議名	XLV Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers, Sep. 22-25, 2013 Colorado, USA
著者	Y. Honda, <u>S. Motokoshi</u> , T. Jitsuno, N. Miyanaga, K. Fujioka, M. Nakatsuka, M. Yoshida
題目	Energy transfer process for Nd/Cr:YAG ceramics
会議名	The 9th Laser Ceramics Symposium, Dec. 2-6, 2013, Daejeon, Korea

国内学会発表リスト

○レーザーエネルギー研究チーム

著者	李大治、萩行正憲、宮本修治
題目	負の屈折率平板表面電磁モード研究
会議名	第61回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月17日-20日、青山学院大学
著者	李大治、萩行正憲、網脇恵章、宮本修治、浅川誠
題目	グレーティングによる電子ビームから電磁放射の理論研究
会議名	レーザー研シンポジウム2013ー平成24年度共同研究成果報告会、2013年5月8日-9日、大阪大学銀杏会館
著者	早川岳人、堀川賢、宮本修治、望月孝晏、天野壮、李大治、今崎一夫、井澤靖和、緒方一、千葉敏
題目	50年前に予言された直線偏光ガンマ線の(γ , n)角度分布の実証
会議名	日本物理学会2013年秋季大会、2013年9月20日-23日、高知大学朝倉キャンパス
著者	李大治、萩行正憲、宮本修治、今崎一夫
題目	グレーティングによる放射の理論研究
会議名	第74回応用物理学会秋季学術講演会、2013年9月16日-20日、同志社大学京田辺キャンパス
著者	橋本智、陳彩華、川田健二、李大治、天野壮、宮本修治
題目	小型電子線形加速器LEENAを用いたテラヘルツ光源開発
会議名	第74回応用物理学会秋季学術講演会、2013年9月16日-20日、同志社大学京田辺キャンパス
著者	李大治、萩行正憲、宮本修治、今崎一夫
題目	グレーティングによるテラヘルツ電磁波放射の新理論
会議名	レーザー学会第454回研究会、2013年12月9日、岡山国際交流センター

○レーザープロセス研究チーム

著者	藤田雅之
題目	レーザーの加工応用
会議名	レーザー技術推進センター平成25年度研修、2014年3月15日、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
著者	笠岡誠、染川智弘、藤田雅之、井澤靖和、永野芳智
題目	レーザーラマン分光法によるフルフラーレン分析
会議名	平成26年電気学会全国大会、2013年3月18日-20日、愛媛大学 城北キャンパス
著者	染川智弘、笠岡誠、永野芳智、藤田雅之、井澤靖和
題目	レーザーラマン分光法による変圧器油中フルフラーレンの分析
会議名	第61回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月17日-20日、青山学院大学相模原キャンパス
著者	松隈啓、鵜籠照之、吉田健祐、浦辺祥吾、李超剛、藤岡慎介、西村博明、佐藤英児、染川智弘、柳田達哉
題目	レーザー駆動EUV光源プラズマのレーザー吸収率測定
会議名	第61回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月17日-20日、青山学院大学相模原キャンパス

著者 題目 会議名	<u>藤田雅之</u> 加工用レーザとその発振原理およびビーム特性：超短パルスレーザとその応用 中部レーザ応用技術研究会第26回レーザ加工技術講座、2014年3月25日、株式会社最新レーザ技術研究センター
著者 題目 会議名	<u>ハイク コスロービアン</u> 、 <u>谷口誠治</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>椿本幸治</u> 、 <u>吉田英次</u> 、 <u>宮永憲明</u> 、 <u>井澤靖和</u> 単一検出器とSPGDアルゴリズムを用いた重ねアパーチャコヒーレントビーム結合技術 第61回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月17日-20日、青山学院大学相模原キャンパス
著者 題目 会議名	<u>藤田雅之</u> レーザー加工の基礎(1) 世界の産業用レーザーとレーザー加工技術の動向 レーザーエキスポ2013特別技術セミナー、2013年4月25日、パシフィコ横浜
著者 題目 会議名	<u>藤田雅之</u> レーザー加工の基礎 短パルスレーザー加工・講義と実習、2013年7月22日、大阪大学テクノアライアンス棟
著者 題目 会議名	<u>藤田雅之</u> 高輝度レーザーによる物質改質・加工 第51回放射線科学研究会、2013年7月19日、住友クラブ
著者 題目 会議名	<u>笠岡誠</u> 、 <u>染川智弘</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>井澤靖和</u> 、 <u>河内二三夫</u> 、 <u>永野芳智</u> レーザーラマン分光法による絶縁油中ガス成分の直接測定 平成25年電気学会電力・エネルギー部門大会、2013年8月27日-29日、朱鷺メッセ新潟コンベンションセンター
著者 題目 会議名	<u>染川智弘</u> 、 <u>眞子直弘</u> 、 <u>久世宏明</u> 、 <u>藤田雅之</u> コヒーレント白色光を用いた水蒸気差分吸収ライダーの開発 第74回応用物理学会秋季学術講演会、2013年9月16日-20日、同志社大学京田辺キャンパス
著者 題目 会議名	<u>佐藤悠</u> 、 <u>高橋真弘</u> 、 <u>染川智弘</u> ラマンライダーによる水蒸気の昼夜連続観測および数値予報モデルへの水蒸気同化 土木学会平成25年度全国大会 第68回年次学術講演会、2013年9月4日-5日、日本大学生産工学部津田沼キャンパス
著者 題目 会議名	<u>佐藤悠</u> 、 <u>染川智弘</u> 、 <u>高橋真弘</u> ラマンライダーを用いた数値予報モデルへの水蒸気データ同化 第31回レーザーセンシングシンポジウム、2013年9月12日-13日、ホテルおかだ
著者 題目 会議名	<u>櫻井俊光</u> 、 <u>ハイク コスロービアン</u> 、 <u>染川智弘</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>本山秀明</u> 、 <u>渡辺興亜</u> 、 <u>井澤靖和</u> レーザーによる氷の融解に関する研究 -氷床の底に生きる生命体の検出を目指して- 雪氷研究大会（2013・北見）、2013年9月17日-21日、北見工業大学

著者 題目 会議名	<u>ハイクコスロービアン</u> 、 <u>染川智弘</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>井澤靖和</u> 、石井伸也 空間変調器による5ビームコヒーレント結合 第74回応用物理学会秋季学術講演会、2013年9月16日-20日、同志社大学京田辺 キャンパス
著者 題目 会議名	<u>櫻井俊光</u> 、 <u>谷口誠治</u> 、 <u>本越伸二</u> 、 <u>染川智弘</u> 、吉村義隆、瀬川高弘、 <u>本山秀明</u> 、 <u>藤田雅之</u> 紫外レーザーを用いた氷コア内微生物のラベルフリー計測 雪氷研究大会（2013・北見）、2013年9月17日-21日、北見工業大学
著者 題目 会議名	<u>染川智弘</u> 、竹内智紀、 <u>藤田雅之</u> 水中レーザーリモートセンシングに向けたCO2気泡のラマン分光測定 第31回レーザーセンシングシンポジウム、2013年9月12日-13日、ホテルおかだ
著者 題目 会議名	<u>藤田雅之</u> 加工・計測・メディカル応用の最新動向 インターオプト2013光技術動向セミナー、2013年10月17日、パシフィコ横浜
著者 題目 会議名	<u>染川智弘</u> 、 <u>笠岡 誠</u> 、 <u>河内二三夫</u> 、 <u>永野芳智</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>井澤靖和</u> レーザーラマン分光法による変圧器油中アセチレン分析 日本分光学会年次講演会、2014年11月19日-21日、大阪大学豊中キャンパス 基 礎工学部国際棟Σホール
著者 題目 会議名	<u>藤田雅之</u> レーザー加工の最新動向 サイエンスエキスポ2013・加工計測コンソーシアム公開シンポジウム、2013年 11月13日、インテックス大阪
著者 題目 会議名	大藪幾美、飯塚芳徳、植村立、平林幹啓、三宅隆之、 <u>本山秀明</u> 、 <u>櫻井俊光</u> 、 <u>鈴木利孝</u> 、 <u>本堂武夫</u> 最終退氷期の南極内陸部における硫酸塩フラックスと気温との関係 気水圏シンポジウム、2013年11月12日、国立極地研究所
著者 題目 会議名	<u>藤田雅之</u> 短パルスレーザー加工の基礎と応用事例 レーザー加工とビジネススキルセミナー、2013年11月21日、大阪大学テクノア ライアンス棟
著者 題目 会議名	東久美子、平林幹啓、 <u>本山秀明</u> 、三宅隆之、倉本隆之、植村立、川村賢二、 <u>Fredric Parrenin</u> 、 <u>鈴木香寿恵</u> 、 <u>飯塚芳徳</u> 、 <u>鈴木啓助</u> 、五十嵐誠、 <u>藤井理行</u> 、 <u>鈴木利孝</u> 、 <u>堀川信一郎</u> 、 <u>河野美香</u> 、 <u>藤田耕二</u> 、 <u>櫻井俊光</u> 、 <u>小端拓郎</u> 南極ドームふじコアの化学成分が示す過去70万年の環境変動 気水圏シンポジウム、2013年11月12日、国立極地研究所
著者 題目 会議名	<u>櫻井俊光</u> SRSを利用した水溶液中の水分子挙動に関する研究 H2Oを科学する2013、2013年12月2日-3日、北海道大学低温科学研究所
著者 題目 会議名	伊山功一、 <u>古河裕之</u> 、 <u>櫻井俊光</u> 、 <u>ハイクコスロービアン</u> 、 <u>椿本孝治</u> 、 <u>吉田英次</u> 、 <u>藤田尚徳</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>宮永憲明</u> 、 <u>川嶋利幸</u> kW級Nd:YAGコンポジットセラミクスシンディスクレーザー増幅器の開発 レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会、2014年1月21日、北 九州国際会議場

著者 題目 会議名	<u>染川智弘</u> 、 <u>笠岡誠</u> 、 <u>河内二士夫</u> 、 <u>永野芳智</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>井澤靖和</u> レーザーラマン分光法による変圧器油中アセチレン分析 レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会、2014年1月20日-22日、北九州国際会議場
著者 題目 会議名	<u>ハイク コスロービアン</u> 、 <u>石井 伸也</u> 高出力、タイル状開口コヒーレントビーム結合のため新技術 レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会、2014年1月20日-22日、北九州国際会議場
著者 題目 会議名	<u>染川智弘</u> 、 <u>眞子直弘</u> 、 <u>久世宏明</u> コヒーレント白色光を用いた水蒸気差分吸収ライダーの開発 第16回環境リモートセンシングシンポジウム、2013年2月21日、千葉大学けやき会館
著者 題目 会議名	<u>藤田雅之</u> 短パルスレーザー加工の基礎と応用事例 短パルスレーザー加工セミナー、2014年2月13日、大阪大学テクノアライアンス棟

○レーザー計測研究チーム

著者 題目 会議名	<u>島田義則</u> 、 <u>オレグ コチャエフ</u> 、 <u>御崎哲一</u> 、 <u>高橋康将</u> 、 <u>瀧浪秀元</u> 、 <u>篠田昌弘</u> レーザーを用いたトンネル覆工コンクリート欠陥検査技術の開発 平成25年度電気学会全国大会、2014年3月20日-22日、愛媛大学
著者 題目 会議名	<u>島田義則</u> 、 <u>オレグ コチャエフ</u> 、 <u>篠田昌弘</u> 、 <u>江原季映</u> 、 <u>御崎哲一</u> 、 <u>高橋康将</u> 、 <u>瀧浪秀元</u> 、 <u>江本茂夫</u> レーザーリモートセンシング装置を用いたコンクリート欠陥探傷実験結果(2) 土木学会平成25年度全国大会第68会年次学術講演会、2013年9月4日-5日、日本大学生産工学部津田沼キャンパス
著者 題目 会議名	<u>御崎哲一</u> 、 <u>瀧浪秀元</u> 、 <u>高橋康将</u> 、 <u>朝倉俊弘</u> 、 <u>島田義則</u> 、 <u>オレグ コチャエフ</u> 、 <u>篠田昌弘</u> 、 <u>江原季映</u> 、 <u>江本茂夫</u> レーザーリモートセンシング装置を用いたコンクリート欠陥探傷実験結果について 土木学会平成25年度全国大会第68会年次学術講演会、2013年9月4日-5日、日本大学生産工学部津田沼キャンパス
著者 題目 会議名	<u>島田義則</u> 、 <u>オレグ コチャエフ</u> 、 <u>御崎哲一</u> 、 <u>瀧浪秀元</u> 、 <u>高橋康将</u> 、 <u>篠田昌弘</u> 、 <u>江本茂夫</u> レーザーを用いたコンクリート健全度診断装置の開発 平成25年度電気学会C部門大会、2013年9月4日-7日、北見工業大学
著者 題目 会議名	<u>島田義則</u> 、 <u>谷口誠治</u> 、 <u>本越伸二</u> レーザーを用いた碍子表面塩分計測 レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会、2014年1月20日-22日、北九州国際会議場
著者 題目 会議名	<u>御崎哲一</u> 、 <u>高橋康将</u> 、 <u>瀧浪秀元</u> 、 <u>島田義則</u> 、 <u>オレグ コチャエフ</u> 、 <u>江原季映</u> 、 <u>篠田昌弘</u> 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 レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会、2014年1月20日-22日、北九州国際会議場

○レーザーバイオ化学研究チーム

著者	谷口誠治、岡田竹広、出島満、佐伯拓
題目	液中レーザーアブレーション法による還元金属ナノ粒子の作成と水素生産への応用
会議名	日本化学会第94春季年会、2014年3月27日-30日、名古屋大学東山キャンパス
著者	谷口誠治、佐伯拓、岡田竹広
題目	液中レーザーアブレーション法による還元鉄ナノ粒子の作成と水素生産への応用
会議名	第61回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月17日-20日、青山学院大学相模原キャンパス
著者	佐伯拓、谷口誠治、出島満、内田成明、中村和広、西川侑介
題目	液中レーザーアブレーション法による酸化マグネシウムの還元
会議名	レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会、2014年1月20日-22日、北九州国際会議場
著者	佐伯拓、内田成明、狩田達也、中村和広、西川侑介、谷口誠治、飯田幸雄
題目	還元マグネシウムペースト焼成板を用いたリサイクル可能な空気電池の特性評価
会議名	レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会、2014年1月20日-22日、北九州国際会議場

○理論・シミュレーションチーム

著者	砂原淳、中村龍史、西原功修、佐々木明
題目	プリパルスレーザー照射時のドロップレットの挙動
会議名	第61回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月17日-20日、青山学院大学相模原キャンパス
著者	古河裕之、乗松孝好
題目	レーザー核融合炉チェンバー第一壁の液体金属のアブレーションに関する2次元シミュレーション
会議名	日本物理学会第69回年次大会、2014年3月27日-30日、東海大学湘南キャンパス
著者	佐々木明、西原功修、砂原淳、古河裕之、西川亘、小池文博
題目	EUV光源の最適化のためのレーザープラズマ相互作用の初期過程のモデリングについての考察
会議名	第74回応用物理学会秋季学術講演会、2013年9月16日-20日、同志社大学京田辺キャンパス
著者	砂原淳、西原功修、佐々木明
題目	EUV光源の発光効率の向上
会議名	第74回応用物理学会秋季学術講演会、2013年9月16日-20日、同志社大学京田辺キャンパス
著者	伊山功一、Bhushan Ravi、古河裕之、ハイク コスロービアン、櫻井俊光、椿本孝治、吉田英次、藤田尚徳、藤田雅之、宮永憲明、川嶋利幸
題目	kW級Nd:YAGコンポジットセラミクスシンディスクレーザーの開発 (3)
会議名	第74回応用物理学会秋季学術講演会、2013年9月16日-20日、同志社大学京田辺キャンパス

著者 題目 会議名	古河裕之、部谷学、中野人志 レーザーピーニングにおける多次元効果等の評価II 第74回応用物理学会秋季学術講演会、2013年9月16日-20日、同志社大学京田辺キャンパス
著者 題目 会議名	古河裕之、伊山功一、藤田尚徳、宮永憲明 高平均出力固体レーザーの熱効果解析 第74回応用物理学会秋季学術講演会、2013年9月16日-20日、同志社大学京田辺キャンパス
著者 題目 会議名	砂原淳、城崎知至、坂上仁志、長友英夫、三間罔興、Zhang Zhe, 石原和大、有川安信、藤岡慎介、白神宏之、疇地宏、FIREX project レーザー駆動高カレントによる高強度磁場生成時のコイルの輻射流体力学的特性と磁場強度 日本物理学会第69回年次大会、2014年3月27日-30日、東海大学湘南キャンパス
著者 題目 会議名	砂原淳、影山慶、高木一茂、藪内俊毅、田中和夫 気液体混合領域を考慮した金属のレーザーアブレーション 第27回数値流体力学シンポジウム、2013年12月17日-19日、名古屋大学豊田講堂
著者 題目 会議名	砂原淳、藤岡慎介、P. Nicolai, M. Olazabal, 城崎知至、長友英夫、藤本靖、長井圭治、大西直文、白戸高志、白神宏之、乗松孝好 高Z物質添加による高密度爆縮 レーザー学会第456回研究会及び核融合科学研究所双方向型共同研究合同研究会、2014年1月9日、阪大レーザー研
著者 題目 会議名	砂原淳 高Z物質添加による高密度爆縮 核融合科学研究所双方向型共同研究成果報告会、2014年1月23日、核融合科学研究所
著者 題目 会議名	砂原淳、森芳孝、中山師生、花山良平、石井勝弘、沖原伸一朗、藤田和久、北川米喜、関根尊史、栗田隆史、佐藤仲弘、川嶋利幸、菅博文、米田修、中村直樹、近藤拓也、藤根学、掛布光孝、東博純、日置辰視、元廣友美、西村靖彦、千徳靖彦、三浦永祐 高繰返し対向照射高速点火方式小型レーザー核融合の研究ー炉心プラズマシミュレーションの現状ー 日本物理学会2013年秋季大会、2014年1月25日-28日、徳島大学
著者 題目 会議名	砂原淳、城崎知至、坂上仁志、長友英夫、有川安信、藤岡慎介、白神宏之、疇地宏、森芳孝、北川米喜 高速点火における直接加熱 プラズマ・核融合学会第30回年会、2013年12月3日-6日、東京工業大学大岡山キャンパス
著者 題目 会議名	砂原淳 高速点火レーザー核融合における高速イオンの利用 平成25年度レーザー産業創成とプラズマ加速に関する研究会、2014年1月15日、光産業創成大学院大学

著者	砂原淳
題目	放射流体シミュレーションによるレーザー生成スズプラズマモデリングの現状
会議名	レーザー学会第450回研究会、2013年10月22日、早稲田大学
著者	古河裕之、乗松孝好
題目	レーザー核融合炉チェンバー第一壁の液体金属のアブレーションに関する2次元シミュレーション
会議名	レーザー学会第456回研究会及び核融合科学研究所双方向型共同研究合同研究会、2014年1月9日、大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

○レーザー技術開発室

著者	本田能之、本越伸二、實野孝久、宮永憲明、藤岡加奈、中塚正大、吉田実
題目	Nd/Cr:YAG材料のエネルギー移乗過程III
会議名	第61回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月17日-20日、青山学院大学相模原キャンパス
著者	本田能之、本越伸二、實野孝久、宮永憲明、藤岡加奈、中塚正大、吉田実
題目	Nd/Cr:YAG材料におけるエネルギー移乗の解析
会議名	レーザー学会第445回研究会、2013年7月16日、ホテル阪急エキスポパーク
著者	本田能之、本越伸二、實野孝久、宮永憲明、藤岡加奈、中塚正大、吉田実
題目	Nd/Cr:YAG材料のエネルギー移乗過程II
会議名	第74回応用物理学会秋季学術講演会、2013年9月16日-20日、同志社大学京田辺キャンパス
著者	秋田将幸、吉田実、本田能之、本越伸二、實野孝久
題目	Cr ³⁺ :YAGとCr ³⁺ :Al ₂ O ₃ の蛍光特性の比較
会議名	レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会、2014年1月20日-22日、北九州国際会議場
著者	本田能之、本越伸二、實野孝久、宮永憲明、藤岡加奈、中塚正大、吉田実
題目	Nd/Cr:YAGセラミックにおける小信号利得の温度依存性
会議名	レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会、2014年1月20日-22日、北九州国際会議場
著者	一色択真、本越伸二、藤岡加奈、實野孝久、村上匡且、吉田実
題目	Nd:CNGGセラミック材料の蛍光特性
会議名	レーザー学会創立40周年記念学術講演会第34回年次大会、2014年1月20日-22日、北九州国際会議場

事業報告書

事業報告書

(平成 25 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 25 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 25 年度の主な成果】

平成 22 年度から開始した産業用レーザー開発研究においては、次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクトに参画した。大阪大学レーザーエネルギー学研究中心で試作されるコンポジットセラミック増幅器の冷却特性の計算機解析・評価を進めるとともに、ファイバー増幅器の特性解析を行う計算コードの開発に着手し、高出力、高繰り返し、短パルスレーザーシステムにおける波長変換特性の解析を進めた。また、引き続き kW 級高平均出力を実現するための増幅器設計およびビーム結合技術の開発も進めた。

レーザーエネルギー研究チーム、レーザープロセス研究チーム、レーザー計測研究チーム、レーザーバイオ化学研究チームおよび理論・シミュレーションチームでは、多分野にわたるこれまでの研究をさらに発展させ、研究成果を学会や研究会等で積極的に発信した。

レーザー超音波探傷技術に関する研究では、実用化に向けた小型化を図り、新幹線トンネル内の中央通路を走行出来る装置によるトンネル内コンクリート欠陥検出実験を行った。また、高速道路高架橋欠陥検出への適用についても検討を進めた。

平成 25 年度より開始した極端紫外光源開発研究では、半導体リソグラフィ用量産光源開発のための EUV(極端紫外光)光源プラズマの解析及び条件最適化を行った。

その他主な研究テーマとしては、薄膜 CFRP(炭素繊維強化プラスチック)へのレーザー加工の実証など低炭素社会に資する研究、レーザーブレイクダウン分光法やラマン分光法を取り入れた表面付着物や溶液中の成分の高感度検出技術の開発、テラヘルツ波を用いた内部診断の研究を進めた。

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、LASER EXPO 2013への出展(4月)などを実施し、研究成果等の積極的な発信に努めた。

1. 役員等の異動

(理事・監事)

年月日	就任	退任
H25. 4.16	監事 岡田 勉	監事 岩西 徹
H25. 6.19	理事 梅田 賢治 理事 豊留 昭宏	理事 遠山 眞 理事 鈴木 正
H25. 8. 8	理事 小野寺 正洋 理事 北山 泰久	理事 吉澤 厚文 理事 佐藤 正一

(評議員)

年月日	就任	退任
H25. 7.11	大塚 茂樹	高杉 政博

2. 役員会等の開催

(1)理事会

第4回理事会 (平成25年5月29日 大阪科学技術センター)

決議事項

- ・平成24年度事業報告書
- ・平成24年度財務諸表及び収支計算書
- ・基本財産の運用
- ・定時評議員会の日時及び場所並びに目的である事項

報告事項

- ・監事の選任報告
- ・職務執行状況の報告

第5回理事会 (平成25年7月29日 みなし決議)

決議事項

- ・評議員選定委員会委員の選任
- ・臨時の第4回評議員会の招集及び目的である事項等

報告事項

- ・評議員の選任

第6回理事会 (平成26年3月3日 関電会館)

決議事項

- ・平成 26 年度事業計画書
- ・平成 26 年度予算書
- ・諸規程の制定

報告事項

- ・職務執行状況の報告

(2)評議員会

第 2 回 評 議 員 会 (平成 25 年 4 月 16 日 みなし決議)

決議事項

- ・監事の選任

第 3 回 評 議 員 会 (平成 25 年 6 月 19 日 関電会館)

決議事項

- ・平成 24 年度財務諸表及び収支計算書
- ・理事の選任

報告事項

- ・平成 24 年度事業報告
- ・第 3 回、第 4 回理事会の決議内容

第 4 回 評 議 員 会 (平成 25 年 8 月 8 日 みなし決議)

決議事項

- ・理事の選任

報告事項

- ・第 2 回評議員選定委員会の決議内容
- ・第 2 回理事会の決議内容

(3)評議員選定委員会

第 2 回 評議員選定委員会 (平成 25 年 7 月 11 日 大阪大学)

3. 賛助会員状況

平成 25 年度末会員数 40 社 93 口

4. 学会および論文発表

学会発表 98 件 (国内 : 68 件、国外 : 30 件)

論文発表 50 件 (国内 : 8 件、国外 : 42 件)

5. 特許等出願件数

平成 25 年度出願件数 1 件

平成 25 年度末特許保有件 28 件 (登録済 : 16 件、公開済 : 10 件、未公開 : 2 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について研究を進めた。

(1) 大出力レーザーの開発

産業利用を目的とした大出力レーザーの開発を進め、その応用を検討した。高平均出力を実現するために、増幅媒質の温度計測に基づく冷却手法の評価、システム構築技術の検討を行った。

(2) 大出力レーザーの熱解析

kW 級大出力レーザー増幅においてファイバー増幅器の特性解析を行う計算コードの開発に着手すると共に、kW 級、高繰返し、短パルスレーザーシステムにおける波長変換特性の解析を行った。

(3) ビーム結合に関する研究

レーザーの大出力化において重要となるビーム結合技術に関する研究を引き続き行った。同軸およびタイル状の複数ビームのコヒーレント結合を実証し、大出力化、高平均出力化の可能性について検討した。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・ 大出力レーザー開発に関する研究
- ・ 次世代素材等レーザー加工技術開発

【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、テラヘルツ放射源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

従来の電子ビームを用いた電磁波放射の手法に負の屈折率を有するメタマテリアルを導入し、従来の限界を打ち破る新型光源の可能性の検討を行った。メタマテリアル平板における電磁モード存在条件、伝搬特性を解析した。

(2) テラヘルツによる診断・検査研究

テラヘルツ波はプラスチックや紙等に対する透過率が高く、生体に害を与えないため、材料物性を調べるのに有用である。テラヘルツ波の発生、透過型計測用の実験装置を立ち上げ、それを用いて電力設備用絶縁材料の透過特性を調べ、内部欠陥検査への適用可能性を調べた。

[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】

低炭素社会に資するため、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) フェムト秒加工に関する研究

フェムト秒レーザー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) 低炭素社会に資するレーザー加工に関する研究

産業用部材の軽量化に期待される CFRP(炭素繊維強化プラスチック)への超短パルスレーザー加工の適用性の評価を行うと共に、省エネ電子機器に用いられる MEMS(微小電気機械システム)デバイス等へのレーザーを用いたマイクロ 3D プリンティングの検討を行った。

(3) レーザーによるナノ粒子生成技術の研究

パルスレーザーをエネルギー源とした金属酸化物(酸化鉄、酸化マグネシウム)の酸化還元および微細化、水素発生技術の開発を進めた。また熔融塩中におけるナノ粒子生成技術の開発に向け、金およびチタンを材料に用いた研究を進めた。

(4) レーザーを用いた氷雪分析に関する研究

氷雪を対象としたレーザー応用研究を進めた。極地氷コアのレーザー分析研究を行い、また、構造物への着氷雪防止について検討を行った。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・CFRP の微細加工に関する研究
- ・微細周期構造の応用研究
- ・極地氷床コアに含まれる微生物の分光解析
- ・液中レーザーアブレーションによる活性金属ナノ粒子生成と水素生産への応用
- ・液中レーザーアブレーション法によるナノ粒子生成：熔融塩中の効果

【レーザー計測研究チーム】

レーザー応用計測・分析技術の高性能化に資する技術開発を行った。

(1) レーザー超音波探傷技術に関する研究

レーザー干渉を用いたコンクリート欠陥探傷等に必要な計測技術等の課題を明らかにした。また、それを用いたコンクリート付帯物の欠陥検査等への技術展開を図った。さらに計測手法の改善や装置の小型化を進めるとともに、高架橋検査への適用可能性を検証した。

(2) レーザーを用いた成分分析の研究

レーザーブレイクダウン分光法による表面付着物の定量計測や溶液中の成分分析技術開発を行った。レーザーブレイクダウン分光法による碍子表面付着物の元素分析ならびにレーザーラマン分光法による CO₂ およびアセチレン検出実験を実施し、成分分析の高感度化を進めた。

(3) 高強度レーザーを用いた環境評価技術の研究

高強度レーザーを用いて、大気や水環境を遠隔で計測する基礎研究を行った。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・ レーザー計測システムの性能確認試験
- ・ 碍子塩分等レーザー測定装置開発研究
- ・ 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
- ・ レーザー探傷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
- ・ 海底資源様物質に対する高強度レーザー分光開発
- ・ 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
- ・ レーザーラマン法を用いた油中成分分析に関する研究
- ・ ピコ秒・フェムト秒レーザーの大気ライダーへの応用可能性に関する研究

【レーザーバイオ化学研究チーム】

生体分子の光機能デバイスへの応用、および医療分野へのレーザー技術応用を目的とし、超高速レーザー分光計測による蛋白質等生体物質の光機能解明に関する研究を進めた。

(1) 時間分解レーザー計測による光応答性蛋白質の研究

光活性黄色蛋白質(PYP)の超高速光反応過程を明らかにし光機能デバイスへの応用を進めるため、サブピコ秒領域の時間分解円二色性計測法による PYP 変異体(ミュータント)の観測を行い、分子構造の時間変化を明らかにした。

(2) レーザー分光による生体内酵素の機能メカニズムの研究

生体の代謝機能に関わるマラリア原虫およびヒト由来の酵素(セリンヒドロキシ

転移酵素)の光物性を観測した。酵素の種類によりアミノ酸に対する光による機能阻害効果が異なることから、機能阻害剤の光選択の可能性を明らかにした。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・ヒト由来セリンヒドロキシ転移酵素(SHMT)の光反応過程の研究
- ・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】

各研究チームが行う実験研究に対して、理論・シミュレーションにより支援を行った。レーザープラズマに関連するコードを開発し、産業応用に有用なデータを提供した。

(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の実現ため、EUVプラズマの解析を行い、高出力化の指針を与えた。

(2) レーザー生成高密度プラズマの理論的研究

核融合爆縮流体シミュレーションを行い、高密度爆縮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

相変化や凝集などを含め、様々の環境下でレーザーアブレーション過程をシミュレーションできるコードの精緻化を図り、実験との比較を含む検討を行った。

(4) レーザー核融合炉設計に関する理論的研究

レーザー核融合炉液体壁チェンバー内での金属蒸気の挙動を詳細に解析した。

[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、レーザー損傷閾値のデータベース化を進めた。

(1) レーザー材料開発

太陽光励起レーザーへの適用に向けて、Nd/Cr:YAG セラミックス材料中のエネルギー移乗過程を解析し、高温で高効率動作が期待できることを明らかにした。また、広帯域発光が可能な Nd:CNGG 材料の透明セラミックス化試験を開始した。

(2) 高耐力光学部品開発

フェムト秒パルスに対するレーザー損傷しきい値を決定する要因について評価を進めた。

(3) レーザー損傷評価試験

技術相談窓口と連携し、展示会、ホームページなどを通して積極的に広報を行い、11社18件の依頼を受けた。また、損傷閾値のデータベース化を目的に、1064nm用光学薄膜素子を対象に第11回、第12回の評価試験を実施した。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・高耐力ミラーの開発

2. 各種研究会活動

当研究所の研究開発活動を効率的・発展的に推進させるため、関連各界の意見・情報収集の場として、さらにはわが国の研究活動の方向性について提言を発信する場として、次のような研究会を開催し、当研究所の事業の活性化を図った。

[実施した主な研究会]

- ・次世代レーザー技術応用研究会
- ・高耐力光学素子研究会

3. 産学官連携の推進

ホームページ上の技術相談窓口等から受け付けた、企業の技術開発・改良に対する技術支援、光学部品の損傷評価、微細加工、超音波診断などの相談・要望に対し、積極的に取り組んだ。43件の技術相談に対応し、そのうち22件が受託研究へ結び付いた。

また、広範に広がるレーザー技術に関するニーズに対応するため、情報、人材、技術等の交流を推進した。

学界との連携では、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター等との共同研究をはじめ、国内外の大学と積極的に連携を図りながら研究を行った。

産学官との連携では、企業、大学等と連携を図りながら、国等の公募事業に参画した。

4. 関連団体との連携

(独)宇宙航空研究開発機構(JAXA)、(独)日本原子力研究開発機構(JAEA)、(財)光産業技術振興協会(OITDA)、(財)大阪科学技術センター(OSTEC)、(財)近畿高エネルギー加工技術研究所(AMPI)、(財)製造科学技術センター(MSTC)、(社)レーザー学会(LSJ)、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、本年度は下記の採択課題に参加、実施した。

- (1) 次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト
((独)新エネルギー・産業技術総合開発機構)
- (2) レーザー探傷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
((独)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 FS タイプ)
- (3) 高効率 LPP 法 EUV 光源の実証開発 ((独)新エネルギー・産業技術総合開発機構 戦略的省エネルギー技術革新プログラム 実証開発)

6. 受託研究

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

7. 補助事業

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

- (1) 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 (基盤研究 C)
- (2) 負の屈折率メタマテリアルによるコヒーレント放射光源研究開発 (基盤研究 C)
- (3) パルスレーザーを利用したラマン分光法による、氷床コアに含まれる微粒子解析の研究 (若手 B)
- (4) 高速点火レーザー核融合における高速電子の発生と輸送の物理的制御 (基盤研究 C)
- (5) Two-beam probing laser-based system for remote inspection of unstable structures (基盤研究 C)
- (6) 海底資源探査・環境影響評価に向けたラマンライダーによる水中モニタリング技術の開発 (若手 B)
- (7) パルスレーザーを利用した極地氷床コアに含まれる微生物の分光解析 (住友財団 環境研究助成)
- (8) メタマテリアルによる電子ビーム放射光の基礎研究 (光科学技術振興財団 研

究助成)

- (9) 液中レーザーアブレーションによる活性金属ナノ粒子生成と水素生産への応用(ひょうご科学技術協会 学術研究助成)
- (10) 氷コアに含まれる人為起源物質と生命環境起源物質の計測技術に関する研究(国際科学技術財団 研究助成)

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 24 年度の研究成果を報告する研究成果報告会(ILT2013)を開催した。

7月10日 千里ライフサイエンスセンター (大阪)

7月17日 日本科学未来館 (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発信を行った。

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務めた。

・LASER EXPO 2013 4月24日～26日 パシフィコ横浜 (神奈川)

5. 国際交流

海外のレーザー技術の開発動向や産業応用に関連した情報を収集し、また、レーザー関連団体や関係研究機関との情報交換・人材交流を図るため、計 9 の国際会議へ参加した。また、米国 Purdue 大学や韓国原子力研究所(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) LiM2012 (5 月, ドイツ)
- (2) ICALEO2013 (10 月, 米国)
- (3) 2013 International Workshop on EUV and Soft X-ray Sources
(11 月, アイルランド)
- (4) 55th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (11 月, 米国)
- (5) PHOTOPTICS2014 (1 月, ポルトガル)
- (6) 日米協力(RAIJIN)核融合炉工学共同研究 (2 月, 米国 Purdue 大学)

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、レーザー核融合実験炉設計委員会活動およびレーザー核融合関連技術の普及のための講演会等を支援した。

2. 出版物の刊行

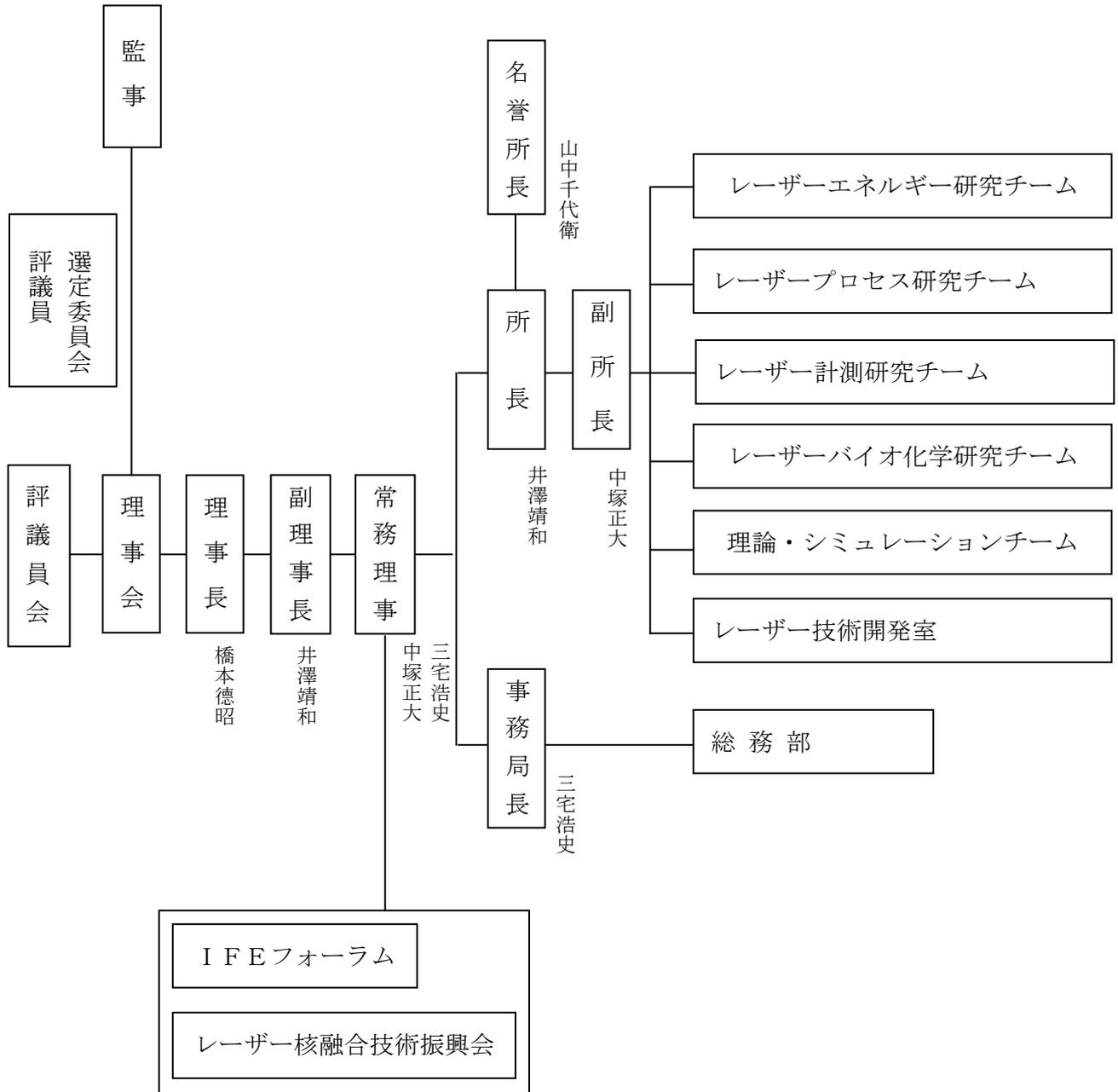
平成 24 年度の研究成果を年報にまとめ、刊行した。
・「ILT2013 年報」(2012~2013) (平成 25 年 7 月発行)

3. 泰山賞の贈呈

7 月の成果報告会にて第 5 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個人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	橋本徳昭
	副理事長・名誉所長	山中千代衛
	所 長	井澤靖和
	常務理事	三宅浩史
	常務理事・副所長	中塚正大
【レーザーエネルギー研究チーム】	チームリーダー 研究員	井澤靖和 (兼務) 李 大治
【レーザープロセス研究チーム】	主席研究員 (チームリーダー) 副主任研究員 副主任研究員 研究員	藤田雅之 ハイク コスロービアン(兼務) 染川智弘 櫻井俊光
【レーザー計測研究チーム】	主任研究員 (チームリーダー) 副主任研究員 研究員 研究員	島田義則 谷口誠治 (兼務) オレグ コチャエフ 倉橋慎理
【レーザーバイオ化学研究チーム】	チームリーダー 副主任研究員 副主任研究員	中島信昭 ハイク コスロービアン 谷口誠治
【理論・シミュレーションチーム】	チームリーダー 主任研究員 研究員 研究員	井澤靖和 (兼務) 砂原 淳 古河裕之 竹内 靖
【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 総務部長 マネージャー マネージャー マネージャー 事務員 事務員 事務員	三宅浩史 (兼務) 三宅浩史 (兼務) 幸脇朱美 小野田理恵 高山大輔 諸白景子 中川道子 大森和賀子
【特別研究員】	京都大学 名誉教授 元日新電機株式会社 元三菱電機株式会社 三重県立看護大学 名誉教授 元東京工業大学 准教授 大阪市立大学 特任教授 元(財)レーザー技術総合研究所	毛利明博 鈴木泰雄 田畑則一 田中文夫 糟谷紘一 中島信昭 今崎一夫

(平成 26 年 6 月現在)

【共同研究員】

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	センター長	疇地 宏
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	教授	斗内政吉
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	教授	萩行正憲
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	教授	西村博明
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	教授	乗松孝好
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	教授	宮永憲明
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	准教授	河仲準二
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	准教授	坂和洋一
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	准教授	藤田尚徳
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	准教授	藤岡慎介
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	助教	椿本孝治
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	講師	藤本 靖
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	名誉教授	西原功修
大阪大学レーザーエネルギー学研究センター	特任教授	實野孝久
大阪大学大学院工学研究科	教授	兒玉了祐
大阪大学大学院工学研究科	教授	栗津邦男
大阪大学大学院工学研究科	教授	田中和夫
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	節原裕一
大阪大学接合科学研究所	准教授	塚本雅裕
大阪大学	名誉教授	柳田祥三
大阪工業大学工学部	教授	西口彰夫
大阪産業大学工学部	教授	草場光博
大阪市立大学大学院理学研究科	教授	八ツ橋知幸
岡山大学大学院自然科学研究科	助教	西川 亘
核融合科学研究所	准教授	岩本晃史
核融合科学研究所	助教	安原 亮
関西学院大学理工学部	教授	玉井尚登
関西大学システム理工学部	教授	浅川 誠
関西大学システム理工学部	准教授	佐伯 拓
北見工業大学	助教	古瀬裕章
京都大学化学研究所	教授	阪部周二
京都大学化学研究所	准教授	橋田昌樹
京都大学大学院理学研究科	教授	七田芳則
京都大学大学院理学研究科	教授	大須賀篤弘
近畿大学理工学部	教授	吉田 実
近畿大学理工学部	教授	橋新裕一
近畿大学理工学部	教授	中野人志
近畿大学理工学部電気電子工学科	准教授	前田佳伸
高知工業高等専門学校	准教授	赤松重則
高知工業高等専門学校	准教授	芝 治也
摂南大学工学部	教授	田口俊弘
大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立極地研究所	准教授	藤田秀二
千葉大学	教授	久世宏明
電気通信大学 企画調査室	特任教授	植田憲一
電気通信大学レーザー新世代研究センター	准教授	西岡 一
東京工業大学大学院工学研究科	教授	矢部 孝
東京工業大学大学院総合理工学研究科	講師	河村 徹
東北大学大学院工学研究科	准教授	田中秀治
東北大学大学院理学研究科	准教授	柴田 穰

奈良先端科学技術大学院大学
 日本原子力研究開発機構敦賀本部レーザー共同研究所
 日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門
 日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門
 光産業創成大学院大学
 光産業創成大学院大学
 大阪産業大学
 兵庫県立大学大学院工学研究科
 兵庫県立大学高度産業科学技術研究所
 兵庫県立大学高度産業科学技術研究所
 広島大学大学院工学研究科
 広島大学大学院工学研究科
 福井大学大学院工学研究科
 福井大学大学院工学研究科
 福岡工業大学工学部
 北海道大学大学院工学研究院
 北海道大学大学院工学研究院
 宮崎大学産学・地域連携センター
 山梨大学大学院医学工学総合研究部
 山梨大学大学院医学工学総合研究部
 立命館大学情報理工学部
 光産業創成大学院大学
 福岡工業大学工学部 情報工学部

特任教授 増原 宏
 所長 大道博行
 研究主幹 山川考一
 研究副主幹 佐々木明
 准教授 藤田和久
 特任教授 三間園興
 准教授 部谷 学
 教授 藤原闊夫
 特任教授 望月孝晏
 教授 宮本修治
 教授 遠藤琢磨
 准教授 城崎知至
 教授 仁木秀明
 准教授 金邊 忠
 教授 河村良行
 教授 足立 智
 教授 長谷川靖哉
 准教授 甲藤正人
 教授 張本鉄雄
 助教 宇野和行
 教授 陳 延偉
 客員教授 内田成明
 准教授 中村龍史

(平成26年6月現在)

評 議 員
理 事・監 事
評議員選定委員
企 画 委 員

評 議 員

(敬称略)

評議員	磯嶋茂樹	住友電気工業株式会社 研究統括部 担当技師長 兼 パワーシステム研究開発センター
	大塚茂樹	関西電力株式会社 原子燃料サイクル室長 原子力事業本部副事業本部長
	尾崎 博	富士電機株式会社 電力・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
	菅 博文	浜松ホトニクス株式会社 取締役
	小森芳廣	日本原子力研究開発機構関西光科学研究所 所長
	田中健一	三菱電機株式会社開発本部 役員技監
	西 亨	一般財団法人大阪科学技術センター 専務理事
	東 邦夫	京都大学 名誉教授
	望月孝晏	兵庫県立大学 特任教授
	山中龍彦	大阪大学 名誉教授
	山本修一	パナソニック株式会社 R&D本部 全社CTO室 理事

理事・監事

(敬称略)

理事長	橋本徳昭	関西電力株式会社 取締役常務執行役員
理事	山中千代衛	大阪大学 名誉教授
	中塚正大	大阪大学 名誉教授
	三宅浩史	公益財団法人レーザー技術総合研究所 事務局長
	疇地 宏	大阪大学 レーザーエネルギー学研究センター センター長
	井澤靖和	大阪大学 名誉教授
	梅田賢治	三菱重工業株式会社 エネルギー・環境ドメイン 原子力事業本部 原子力技術部 部長
	小野寺正洋	東京電力株式会社 原子燃料サイクル部長
	北山泰久	中部電力株式会社 技術開発本部 部長
	佐野雄二	株式会社東芝電力システム社 電力・社会システム開発センター技監
	友永匡哉	日本電気株式会社 関西支社 第三営業部長
	豊留昭宏	富士電機株式会社 関西支社 営業第二部長
	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	岡田 勉	株式会社三井住友銀行 大阪本店営業第二部長
	西原功修	大阪大学 名誉教授
	日根野文三	日根野公認会計士事務所 所長

評議員選定委員

(敬称略)

大塚茂樹	関西電力株式会社 原子燃料サイクル室長 原子力事業本部副事業本部長
阪部周二	京都大学 教授
佐々木孝友	大阪大学 名誉教授
西原功修	大阪大学 名誉教授
三宅浩史	公益財団法人レーザー技術総合研究所 事務局長

企 画 委 員

(敬称略)

委員長	仙藤敏和	関西電力株式会社 原子燃料サイクル室 原子燃料サイクル部長
委員	栗津邦男	大阪大学 教授
	井上哲也	一般財団法人大阪科学技術センター 総務部 企画室長
	植田憲一	電気通信大学 特任教授
	大谷浩司	三菱電機株式会社 電力システム製作所 磁気応用先端システム部 次長
	沖野圭司	オムロンレーザーフロント株式会社 取締役
	奥田泰弘	住友電気工業株式会社 エレクトロニクス・材料研究所 エレクトロニクス接続技術研究部 部長
	兒玉了祐	大阪大学 教授
	近藤公伯	独立行政法人日本原子力研究開発機構 先進ビーム技術研究ユニット長
	白神宏之	大阪大学 教授
	竹辺晴夫	富士電機株式会社 エネルギー事業本部 事業企画部 担当部長
	田中正人	関西電力株式会社 原子燃料サイクル室 サイクル事業グループ マネジャー
	斗内政吉	大阪大学 教授
	中熊哲弘	東京電力株式会社 原子燃料サイクル部 サイクル技術グループ マネージャー
	中島信昭	大阪市立大学 理学研究科理学部 特任教授
	西村博明	大阪大学 教授
	浜崎 学	三菱重工業株式会社 原子力事業本部 原子力技術部次長
	藤原闊夫	兵庫県立大学 教授
	宮永憲明	大阪大学 教授
	向井成彦	株式会社 東芝 電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電気計装システム開発部 部長
	森 勇介	大阪大学 教授
	山畑和樹	関西電力株式会社 研究開発室 研究推進グループ マネジャー

賛 助 会 員

【建設業】

株式会社環境総合テクノス
関電プラント株式会社
株式会社きんでん

【鉄鋼・非鉄金属製造】

株式会社神戸製鋼所
住友電気工業株式会社
三菱電線工業株式会社

【電気機器具製造業】

株式会社ダイヘン
株式会社東芝
日新電機株式会社
日本電気株式会社
株式会社日本ネットワークサポート
パナソニック株式会社
株式会社日立製作所
富士電機株式会社
三菱電機株式会社

【機械・輸送用機器具】

三菱重工業株式会社

【精密機器具製造業】

有限会社岡本光学加工所
オムロンレーザーフロント株式会社
株式会社片岡製作所
光伸光学工業株式会社
ジオマテック株式会社
株式会社島津製作所
浜松ホトニクス株式会社

【商社・その他】

株式会社オプトサイエンス

【銀行・その他金融】

株式会社三井住友銀行

【電気・ガス業】

大阪ガス株式会社
関西電力株式会社
中国電力株式会社
北陸電力株式会社
日本原子力発電株式会社

【鉄道業】

西日本旅客鉄道株式会社

【サービス業・その他】

関電不動産株式会社
株式会社ケイ・オペティコム

【団体関係】

公益財団法人応用光学研究所

一般財団法人大阪科学技術センター

一般財団法人関西情報センター

一般財団法人電力中央研究所

一般財団法人光産業技術振興協会

一般社団法人レーザー学会

合計40社(他1社含む)

(平成26年6月現在)

お わ り に

レーザー技術総合研究所年報第 26 巻 ILT2014（平成 25 年度成果報告書）を取りまとめました。7 月に東京と大阪で開催する成果報告会においてその内容をご報告し、皆様からご批判、ご教示を頂きたいものと願っています。

当研究所では、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おります。また、全所横断型の産業用レーザー開発プロジェクトチームを立ち上げました。

プロジェクトチームでは、小型、高出力、高効率、高ビーム品質の固体レーザー開発を目標に、小型の装置による基礎実験を進め、レーザー出力特性や熱解析の成果を下にして、高出力レーザー設計手法の確立をめざしています。また、多ビーム構成により更なる高出力を実現するため、新しいコヒーレントビーム結合方式を提案し、実証実験を進めています。

チーム研究でも成果の積み上げを図っています。レーザー超音波探傷技術開発では、山陽新幹線トンネルにおける内部欠陥検出実地試験でその有効性を実証することができ、実用化に大きく一歩近づきました。新幹線トンネルの中央通路内を走行しながら欠陥検査を行えるように検出システムの小型化を進めるとともに、コンクリートクラック深さの測定、天井に取り付けられたアンカーボルトの健全性評価、高速道路橋梁の健全性評価など、レーザー超音波技術の応用分野拡大をめざした研究も進めています。碇子表面の塩分量計測技術開発でも検査システムの小型化を進め、可搬型システムとハンドホールド型計測ヘッドを開発しました。フェムト秒レーザー加工、溶液中に溶存している不純物の遠隔計測をめざすラマンライダー、次世代半導体リソグラフィ用 EUV 光源のシミュレーション研究でも順調な進展が見られました。溶液中でのレーザーアブレーションを利用した酸化還元反応とナノ粒子生成、メタマテリアルを利用するテラヘルツ光源など、新しい研究の芽も生まれました。レーザー技術開発室では、産業界からの様々な技術相談に対応するとともに、光学素子の損傷評価や高耐力化の分野で貢献することができました。

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

平成 26 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

ILT2014 年報

平成 26 年 7 月 発行

公益財団法人 レーザー技術総合研究所

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

TEL (06) 6443-6311 (代)



Institute for Laser Technology