

ILT-APR Number 25
Issued: July 2013
ISSN 1340-6167

ILT2013年報

Annual Progress Report

2012-2013



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、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。おかげさまで、昨年、創立 25 周年を迎えることができました。これもひとえに、長年にわたる関係省庁、産業界、ならびに大学、研究機関の皆様のご指導、ご支援の賜物であり、心から深くお礼申し上げます。

この間、当研究所では、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進めてまいりました。近年は、省エネルギー化に資する CFRP などの先端材料のフェムト秒レーザー微細加工、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など、実用化に近づいた研究成果も出てまいりました。次世代半導体製造に必須の EUV 光源技術開発や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います。また、レーザーの高出力化に寄与し得るビーム結合技術や高耐力光学素子技術、遠隔微量分析技術などでも、新しい成果が生まれてきています。

平成 23 年度からの第 4 期科学技術基本計画においては、震災からの復興・再生とともに、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。光・レーザー技術はイノベーションの源泉ともいわれ、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、研究活動を進めてまいります。

昨年、当研究所は公益財団法人の認可を受け、新たなスタートを切りました。公益法人では、その活動が広く一般社会の利益増進に寄与することを強く求められています。今後とも、わが国の光・レーザー産業の発展に資するべく研究を進めるとともに、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を積極的に進め、成果の情報発信に努めてまいります。

このたび発行いたしました研究所年報は、公益財団法人として最初の研究成果・事業活動報告書でございます。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 25 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

ILT2013 年報 (Annual Progress Report 2012-2013)

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

小型コヒーレント放射源新理論 1

レーザープロセス研究チーム

MEMS 製造工程へのレーザー転写技術の応用 5

100 W 級高品質全反射アクティブミラー増幅器の開発 11

低温冷却 Yb:YAG TRAM レーザーの温度評価 17

A new single detector technique for high power,
multi-channel coherent beam combination (CBC) 21

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 25

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健全性診断装置の開発 29

Development of laser-based system for remote non-destructive inspection
of Shin-kansen tunnels 33

可搬型レーザーを用いた磚子表面塩分計測 45

レーザーバイオ化学研究チーム

光活性蛋白質の蛍光ダイナミクス計測による機能解明 47

液中レーザーアブレーション法によるナノ粒子作製：溶媒効果の検討 55

理論・シミュレーションチーム

高平均出力固体レーザーの熱効果解析 59

極端紫外(EUV)光源開発研究 65

レーザー生成高速イオンによるプラズマ加熱 69

レーザー核融合炉壁のアブレーション 73

レーザーピーニングの2次元シミュレーション 75

レーザー核融合炉液体壁チェンバー内の
アブレーション生成ブルームの2次元シミュレーション 81

レーザー技術開発室

光学素子レーザー損傷閾値データベースの構築
—ダイクロイックミラーの損傷閾値の評価— 85

発表論文リスト 91

事業報告書 109

組織図 123

構成員一覧 124

評議員 129

理事・監事 130

評議員選定委員 131

企画委員 132

賛助会員 133

おわりに 135

研究報告書

小型コヒーレント放射源新理論

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、今崎一夫

¹大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

²兵庫県立大高度産業科学技術研究所

1. はじめに

グレーティングによる電子ビームからのコヒーレント放射とは、低エネルギー(数十 keV)の電子ビームが金属グレーティングの直上を通過する際に、電流が一定値を超えると、指向性を持つ強い電磁波が放射される現象である。このような電磁波放射を有効に利用すると、小型で大出力のコヒーレントなテラヘルツ波光源の開発が可能となるため、学術のみならず応用上も大いに注目を浴びている¹⁾。

電子がグレーティングの表面を通過する際に、スミス・パーセル放射と呼ばれる電磁波の放出が 1953 年に報告されてから、スミス・パーセル放射を用いた放射源開発の研究が進んでいる。1970 年代にはキャビティを用いたスミス・パーセル共振器の構造によるコヒーレントなミリ波の発生が達成され、2000 年前後にはグレーティングの表面に存在する表面電磁波を活用したキャビティを使わないコヒーレントな電磁波の放射が提案されている。

本稿では、電子ビームと表面電磁波の相互作用に関する新しい理論式を導入し、表面電磁波の空間増幅率、発振電流を評価した。また、新理論とシミュレーションの結果も比較した。

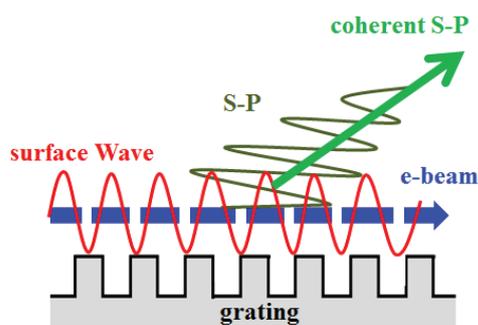


図1 表面電磁波と電子ビームとの相互作用によるコヒーレントなスミス・パーセル放射

2. 新理論による電子ビームと表面電磁波の相互作用

電子ビームがグレーティングの直上を通過する際には、スミス・パーセル電磁波以外に表面電磁波も励起される(図1)。表面電磁波はグレーティングの表面のみに存在するので、外部へ取り出すことはできないが、電子ビームと相互作用することは可能である。相互作用が大きくなる特定の条件を満たせば、電子ビームが集積され、最終的に繰り返し電子ビームパルスとなる。スミス・パーセル電磁波は電子ビームと直接相互作用はできないが、表面電磁波によって繰り返しパルスになった電子ビームにより、指向性を持つコヒーレントなスミス・パーセル電磁波を放出することが可能となる。そのため、理論研究では電子ビームと表面電磁波との相互作用に関する数多くの論文が発表されている¹⁻⁶⁾。理論研究の主な目標は二つある。一つは表面電磁波の空間増幅率 $\mu(E(z)=E(0)\exp(\mu z)$ (E : 電磁波の電場)) を明らかにすることであり、もう一つは発振電流を明確にすることである。

2.1 従来の理論の問題点

2001 年にアメリカ Argonne 国立研究所の Kwang-Je Kim らが初めて μ の理論解析結果を発表し、 μ は電子ビーム電流 I_e の 1/2 乗に比例すると報告した¹⁾。2004 年には Vanderbilt 大学の C. Brau らが異なる理論解析結果を報告し、 μ は電子ビーム電流 I_e の 1/3 乗に比例すると提案した²⁾。その後、Kwang-Je Kim らも、2006 年に 1/3 乗に修正した新しい解析結果を報告した。2007 年には他の研究者らも 1/3 乗の結果を発表している⁸⁾。

一方で、電磁界ソフトを用いた particle-in-cell シミュレーション手法での解析も行われている⁹⁾。さらに、2010 年にはフランス d'Etudes Nucleaires 研究所の J.

Gardelle らが検証実験を行っている¹⁰⁾。検証実験とシミュレーションの結果より、 μ は電流の高い領域では 1/3 乗に比例し、低い領域では 1/2 乗に比例することがわかり、これは μ が I_e の 1/3 乗に比例するとした理論解析と一致しない。C. Brau の論文から典型的な μ の計算式は式(1)のように記述できる。

$$\mu = \frac{\sqrt{3}}{\beta\gamma} \left| \frac{4\pi I_e G(\omega_0, k_0)}{d^2 L I_A v_g} \right|^{1/3} \quad (1)$$

ここで、 β は電子の速度と光速の比、 γ は Lorentz 定数、 I_e は電子ビーム電流、 G は周波数と波数の関数、 d は電子ビームの直径、 L はグレーティングの周期長、 I_A は Alfvén 電流、 v_g は表面電磁波の群速度である。

式(1)では、 μ が I_e の 1/3 乗に比例することが表現されているが、この式を用いて計算するとある電子エネルギーに対する μ が無限大となってしまう (図 2)。

また、従来の発振電流の理論解析¹¹⁻¹³⁾では、グレーティングの末端で電磁場は存在しないという境界条件の下で式を解くが、シミュレーションの結果ではグレーティングの末端で電磁波が放出されるため、そこに電磁場が存在することになり、理論解析での境界条件の置き方が問題になっている。

周期構造体をグレーティングとして、表面電磁波の分散曲線とエネルギー流の伝播方式の従来の考えを図 3 に示す。表面電磁波の分散カーブを中心点で分け、左半分と右半分の領域で考える。左半分の領域では、電磁波

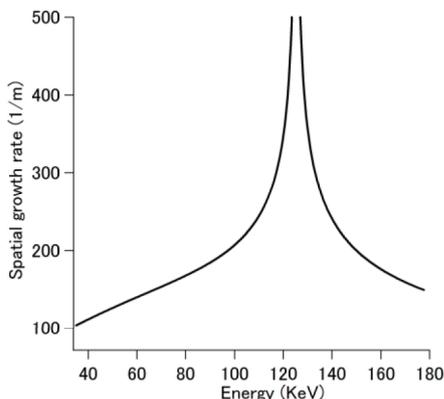


図 2 μ の電子ビームエネルギー依存性

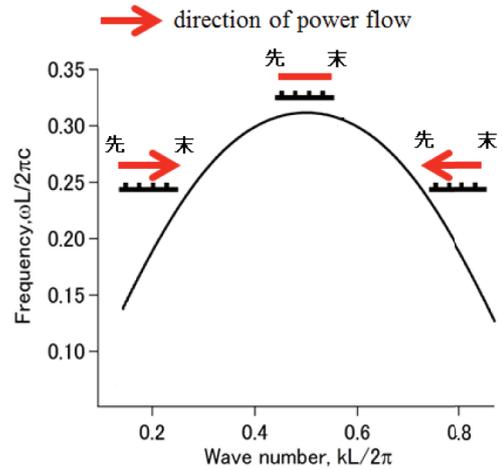


図 3 表面電磁波の分散曲線とエネルギー流の伝搬方式の従来の考え

位相の伝搬方向が電磁波エネルギー流の方向と一致しており進行波と呼ばれ、右半分では方向が逆となるため、後進波と呼ばれる。電子ビームが後進波と相互作用する場合は、電磁波エネルギーがグレーティングの末端から先端へ伝搬するため、自然にフィードバックでき、キャビティを使わなくても発振が可能となる。共振器として末端に入力がないので、電磁場が末端に存在しないという境界条件が設定されている。一方、電子ビームが進行波と相互作用する場合には、エネルギーが先端から末端に伝搬するため、後進波のような自然なフィードバックが起こらないので、キャビティを使わないと発振できない。しかし、シミュレーションの結果では、進行波の場合でも後進波と同様にキャビティを使わなくても発振が可能となるため、理論結果と一致しない。さらに、中心点では、群速度がゼロになることで、エネルギー流がそこで止まるという怪異な考えになる。

2.2 新理論による解析

図 4 に我々の提案するエネルギー流の伝播方式の新発想を示す。従来の理論とは異なり、分散カーブ上のどの位置でも末端向きと先端向きの電磁波が同時に存在するとしている。また、それぞれの電磁波の位相伝搬方向とエネルギー流の伝搬方向は一致している。右の半分の領域では、末端向きのエネルギーよりも先端向きのエネルギーが多く、左の半分の領域では、逆に先端向きエ

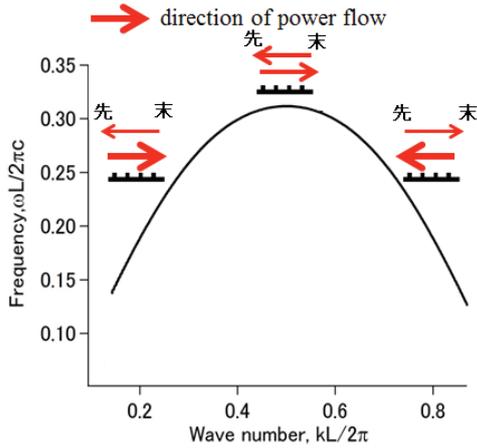


図4 表面電磁波の分散曲線とエネルギー流の伝搬方式の新発想

エネルギーよりも末端向きのエネルギーが多い。中心点では、先端向きのエネルギーと末端向きのエネルギーが等しい。このように考えると、従来の理論の中に、位相伝搬方向とエネルギー流伝搬方向とが逆になることや、中心点でエネルギーが止まることなどの異常な概念がなくなる。さらに、左半分でも先端に向かうエネルギーがあるため、右の半分と同様に自然なフィードバックがあり、キャビティを使わなくても発振できるため、シミュレーションにより観測される結果と一致する。

この新発想を展開して厳密な数学で解析すると、波数変化量 δk を含む6次の方程式が得られる。

$$\sum_{n=1}^2 \frac{\delta k^n \xi^{(n)}(\omega_0, k_0)}{n!} + \Omega \cdot \sum_{n=1}^2 \frac{X^n \mathfrak{R}_{p=0}^{(n)}(0)}{n!} = 0 \quad (2)$$

ここで、 ξ は周波数と波数の関数、 X は電子ビーム電流の関数、 R は波数の関数である。 δk の虚数部が μ になる。式(2)に関する詳細な導入は我々が発表した論文に記述されてある⁷⁾。

ここで、電子ビームの電流1 mA、ビームの厚さ24 μm 、グレーティングの周期長173 μm 、溝幅62 μm 、溝深100 μm として、式(1)と(2)を用いて数値計算した μ を図5に示す。従来の理論解析では、 μ が無限大になるという結果が生じたが、我々の解析では、 μ が無限大となる現象が無くなり、物理的本質を矛盾なく説明することができ

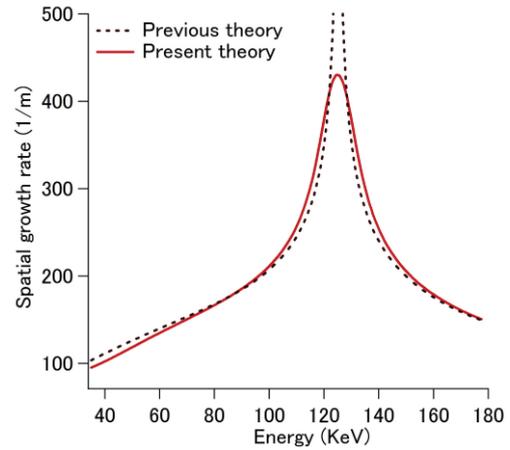


図5 μ の電子ビームエネルギー依存性

ている。さらに、式(2)は6次の方程式のため、 μ と I_e の関係は複雑になるが、シミュレーションで得られた結果とほぼ一致している。

次に、発振電流についての解析を行う。電子ビームは末端向きの電磁波としか同期できないので、末端向きの電磁波とのみ相互作用する。電子ビームのエネルギーは末端向きと先端向きの電磁波に配分され、両方の向きが同時に増幅される。電磁波はグレーティングの末端に着くと、シングルパス増幅が終わり、末端向き電磁波はそのまま放出され、先端向き電磁波は増幅されたエネルギーを持って先端に戻り、それによりフィードバックが達成される。ここで、全電磁波エネルギーに対する先端向きと末端向きの電磁波エネルギーの比をそれぞれ ρ_1 と ρ_0 と考えると、発振条件は式(3)のように導出できる⁷⁾。

$$e^{2\mu l} \cdot \rho_{-1} \cdot \rho_0 = 1 \quad (3)$$

l はグレーティングの全長である。式(2)を用いて式(3)を解くと、発振電流が得られる。

2.3 新理論計算結果とシミュレーションとの比較

実際には、実験やシミュレーションでも、 μ を測定するのは不可能であり、時間信号からデータを抽出することにより時間増幅率 $\sigma(E(t) = E(0) \exp(\sigma t))$ の測定が行われる。したがって、 μ と σ の関係式を構築することで新理論を用いた計算結果とシミュレーション結果との比

較が可能になる。

新理論の図4に示した電磁波の伝搬方式を考えると、従来の理論では構築が困難であった以下の関係式が導出できる⁷⁾。

$$\sigma = \left(\mu + \frac{1}{2\ell} \ln(\rho_{-1}\rho_0) \right) \frac{v_0 |v_{-1}|}{|v_{-1}| + v_0} \quad (4)$$

ここで、 σ は時間増幅率、 v_0 と v_{-1} はそれぞれ末端向きと先端向き電磁波の位相速度である。

理論解析結果と電磁界ソフトによるシミュレーション結果の比較を図6に示す。電子ビームのエネルギーは90 keVを採用し、 σ がビーム電流の関数として計算した。増幅率がゼロである電流値が発振に必要な電流の閾値となる。シミュレーションの誤差、時間信号からデータ抽出の誤差などを含めて考えると、理論はシミュレーション結果と誤差の範囲内で一致している。

3. まとめ

電子ビームと周期構造体との相互作用における、従来の理論と異なった、物理の本質を正しく反映した厳密な理論を提案した。本研究ではグレーティングをベースに

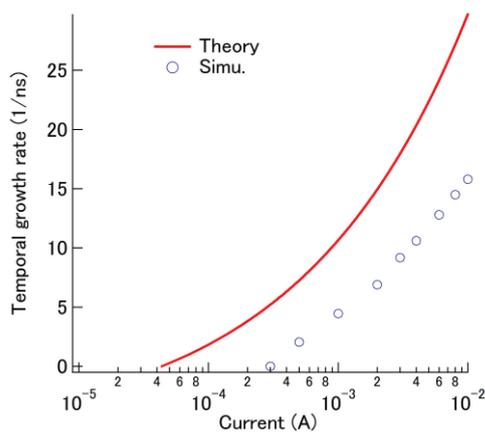


図6 σ の電子ビーム電流依存性

して放射理論を築くことを目的にしているが、その理論は、例えば、進行波管、後進波管、メタマテリアル新電磁材料などのあらゆる周期構造体と電子ビームとの相互作用に応用できる。正しい理論を利用すれば、効率の高い放射機構の提案や高性能の放射源開発などの研究が飛躍的に発展するものと考えられる。

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) Kwang-Je Kim, Su-Bin Song: Nucl. Instr. Meth. Phys. Res., A **475**, 158-163, 2001.
- 2) H. L. Andrews, C. H. Boulware, C. A. Brau, and J. D. Jarvis: Phys. Rev. ST Accel. Beams, **7**, 070701, 2004.
- 3) H. L. Andrews, C. H. Boulware, C. A. Brau, and J. D. Jarvis: Phys. Rev. ST Accel. Beams, **8**, 050703, 2005.
- 4) H. L. Andrews, C. H. Boulware, C. A. Brau, J.T. Donohue, and J. Gardelle: New J. Phys., **8**, 289, 2006.
- 5) Kwang-Je Kim and Vinit Kumar: Phys. Rev. ST Accel. Beams, **10**, 080702, 2007.
- 6) Vinit Kumar and Kwang-Je Kim: Phys. Rev. E, **73**, 026501, 2006.
- 7) D. Li, Z. Yang, Y. Tsunawaki, M. Hangyo, S. Miyamoto, and K. Imasaki: Appl. Phys. Lett., **100**, 191101, 2012.
- 8) G. F. Mkrтчian: Phys. Rev. ST Accel. Beams, **10**, 080701, 2007.
- 9) J. T. Donohue and J. Gardelle: Phys. Rev. ST Accel. Beams, **8**, 060702, 2005.
- 10) J. Gardelle: Phys. Rev. Lett., **105**, 224801, 2010.
- 11) R. Kompfner and N. T. Williams: Proc. IRE, **41**, 1602-1606, 1953.
- 12) J. A. Swegle: Phys. Fluids, **30**, 1201-1211, 1987.
- 13) N. S. Gizburg, S. P. Kuznetsov, and T. N. Fedoseeva: Sov. Radiophys, **21**, 728-731, 1979.

MEMS 製造工程へのレーザー転写技術の応用

レーザープロセス研究チーム

藤田雅之、染川智弘、佐本哲雄¹、平野栄樹¹、田中秀治¹、江刺正喜¹

¹ 東北大学大学院工学研究科

1. はじめに

可変容量コンデンサは携帯電話等の通信機器において周波数をチューニングするために不可欠な素子であり、コンデンサ材料としてのチタン酸バリウムストロンチウム (BST: Barium Strontium Titanate) は GHz 帯においても損失が少ない優れた強誘電体である。BST を MEMS (Micro Electro-Mechanical System: 微小電気機械システム) チップ上で RF フィルタ素子等に利用することで通信機器の小型化・高性能化が期待される。しかし、良質な BST は 600°C の高温下においてサファイア基板上で作られるため、温度に敏感なウェハ上で利用することが困難であった。高温でも安定なサファイア基板上で形成された良質な BST を常温環境下で MEMS ウェハ基板上に転写する技術が確立すれば、MEMS 製造プロセスの自由度が上がり様々なアプリケーションへの展開が期待される。

レーザー技術総合研究所は東北大学と共同で、サファイア基板上に形成された BST をレーザーを用いて剥離し、別のウェハ基板上に転写する技術を開発している。図 1 にレーザー転写の概念図を示す。試料として用いた BST は Pt コートされたサファイア基板上に形成され、表面には Au-Au 接合による転写が可能となるように Au がコーティングされており、Sapphire/Pt/BST/Au の構造を有している。レーザー光はサファイア側から Pt 面に

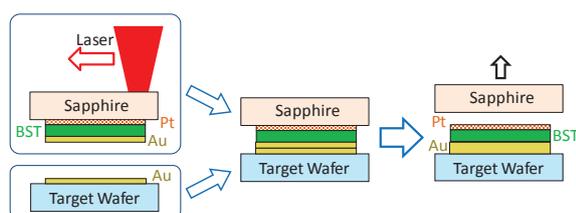


図 1 レーザー転写の概念図

照射され、Sapphire/Pt 間の接合が弱くなることにより BST 層を別基板上に転写することが可能となる。これまで、レーザー転写の研究は主にナノ秒 UV レーザー (波長 355 nm) を用いて行われていたが^{1,4)}、さらなる最適化と物理現象の解明のために様々な波長、パルス幅のレーザーを用いて実験を行った。

2. 実験概要

試料は東北大学から供給された。Sapphire ウェハ上に成膜された Pt/BST/Au には 15 μm 角、30 μm 角、60 μm 角、100 μm 角、200 μm 角の正方形のパターンが施されており、パターンサイズによるレーザー転写条件の比較も行った。実験では、図 2 に示すように ISO2409 に準拠したテープ剥離により転写特性を評価した。レーザー照射後の試料をサファイア側から観察すると共に、テープ上に転写された Au/BST/Pt を光学顕微鏡で観察し転写に要するレーザーパワーを求めた。

用いたレーザーは、波長 532 nm、パルス幅 10 ns、繰り返し 40 kHz の Megaopto 社製 Nd:YVO₄ レーザー、波長 1064 nm、パルス幅 10 ns、繰り返し 20 kHz の Megaopto 社製 Nd:YAG レーザー、波長 1064 nm、パルス幅 200 ns、繰り返し 25 kHz の SPI 社製 Yb ファイバーレーザーである。レーザー光は焦点距離 75 mm の平凸レンズを用いて試料に集光され、レーザーの繰り返し周波数に応じて試料の掃引速度を調整し、パルス当たりの移動距離を一定とした。

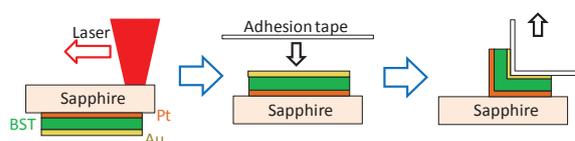


図 2 テープ剥離によるレーザー転写の評価法

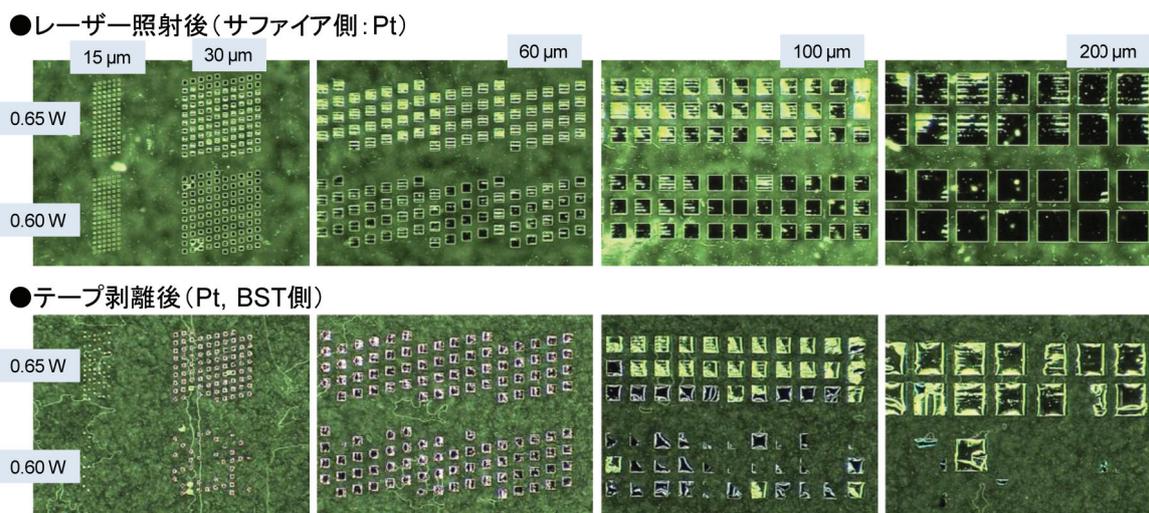


図3 波長 532 nm、パルス幅 10 ns、繰り返し 40 kHz のレーザーを用いて行った実験結果

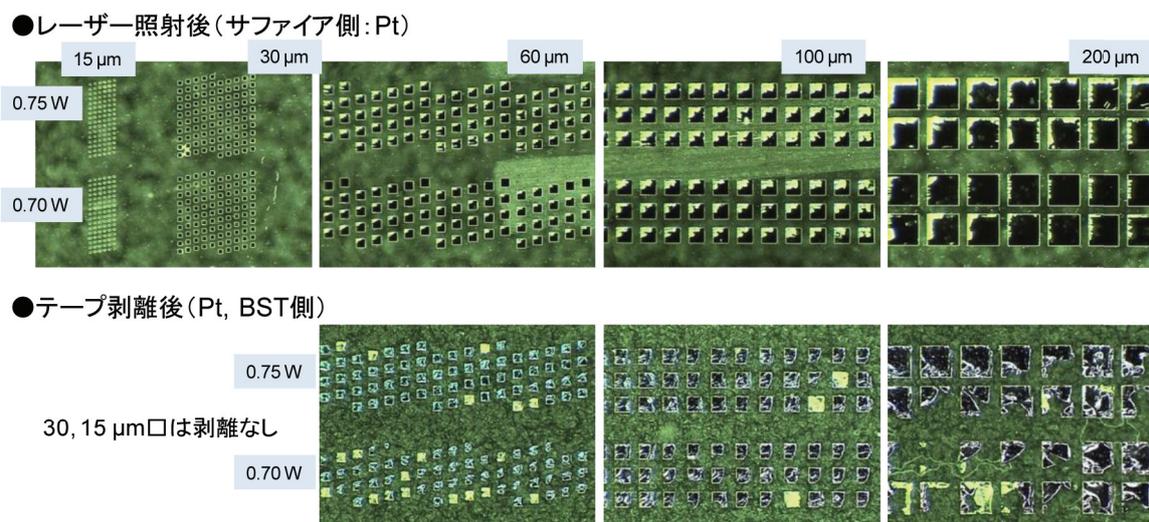


図4 波長 1064 nm、パルス幅 10 ns、繰り返し 20 kHz のレーザーを用いて行った実験結果

3. 実験結果

図3に波長532 nm、パルス幅10 ns、繰り返し40 kHzのレーザーを用いて行った実験結果を示す。掃引速度は4 mm/sでピッチ25 μmで塗りつぶし照射を行った。上段はレーザー照射後にサンプルをサファイア側から、下段はテープ剥離後にテープに転写されたBST/Pt面を光学顕微鏡で観察した写真である。レーザー照射パワーは上半分が0.65 W、下半分が0.6 Wである。サンプル上のパターンサイズは左から15 μm角、30 μm角、60 μm角、100 μm角、200 μm角である。パターン無しの一均一膜に比べて低い照射パワーで剥離が確認された（均一膜の場合は1 W

程度が必要であった）。また、0.7 W以上の照射パワーでは四角のパターンがつぶれてしまった。パターンサイズが小さくなるほど、同じレーザーパワーでも加工線が確認される。これはサイズが小さくなるほど熱が拡散できないためダメージが生じやすいためであると考えられる。ピッチを50 μmにして同様の実験を行ったが、照射パワーが増えるものの剥離/転写は可能であった。

図4に波長1064 nm、パルス幅10 ns、繰り返し20 kHzのレーザーを用いて行った実験結果を示す。掃引速度はレーザーの繰り返し周波数が532 nmレーザーよりも低いことを考慮して2 mm/sでピッチ25 μmで塗りつぶし

●レーザー照射後(サファイア側:Pt)

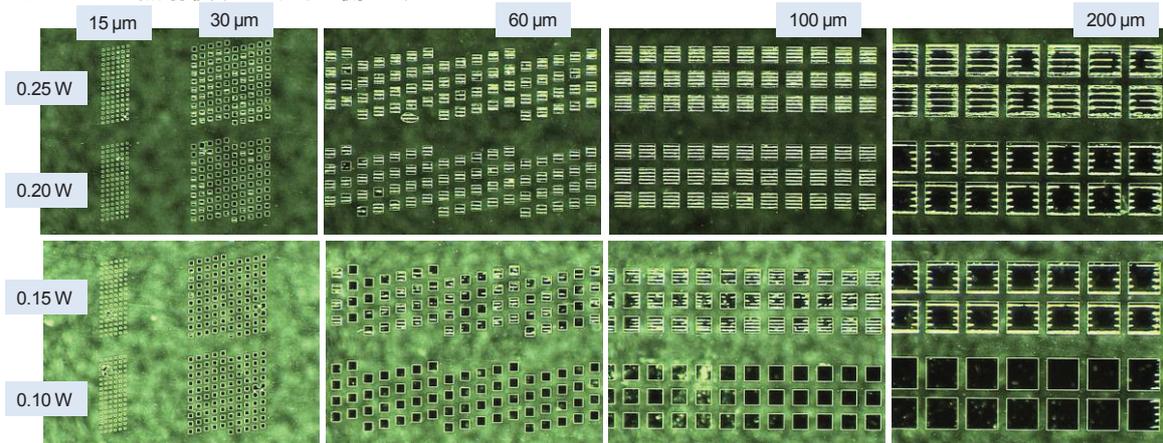


図5 波長 1064 nm、パルス幅 200 ns、繰り返し 25 kHz のレーザー照射後のサンプル

●テープ剥離後(Pt, BST側)

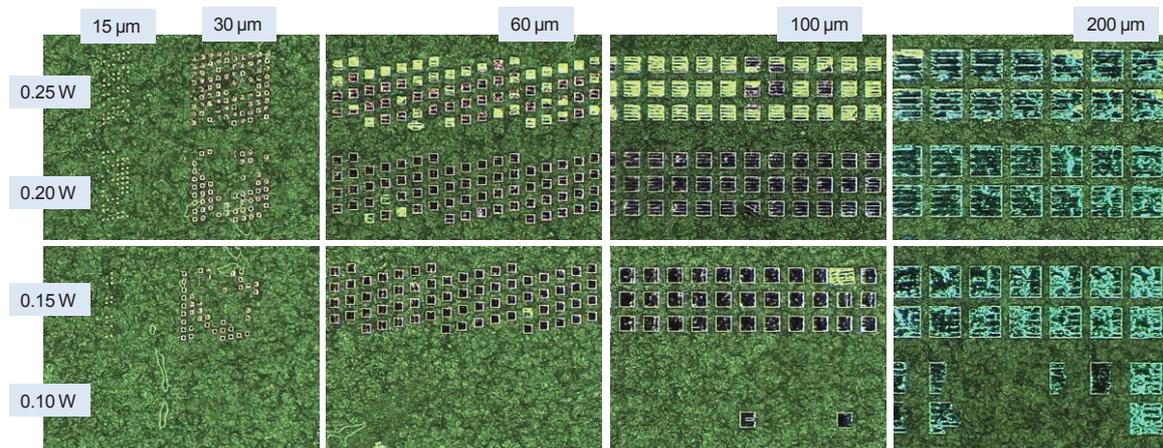


図6 波長 1064 nm、パルス幅 200 ns、繰り返し 25 kHz のレーザー照射・剥離後のサンプル

照射を行った。上段はレーザー照射後にサンプルをサファイア側から、下段はテープ剥離後にテープに転写された BST/Pt 面を光学顕微鏡で観察した写真である。レーザー照射パワーは上段上半分が 0.75 W、下半分が 0.7 W となっている。サンプル上のパターンサイズは左から 15 μm 角、30 μm 角、60 μm 角、100 μm 角、200 μm 角である。0.8 W 以上の照射パワーでは四角のパターンがつぶれてしまい、0.6 W 以下ではほとんど剥離が見られなかった。532 nm 照射時に比べて 1064 nm 照射では転写された□のパターンにいびつなものが多く見られた。また、パターンサイズが 15 μm、30 μm の場合は剥離が観察されなかった。

図5、図6に波長 1064 nm、パルス幅 200 ns、繰り返

し 25 kHz のレーザーを用いて行った実験結果を示す。掃引速度は図3、図4と照射スポットの重なりが等しくなるように 2.5 mm/s でピッチ 25 μm で塗りつぶし照射を行った。図4の実験に対して波長が同じでパルス幅が長いレーザーを用いた場合になるが、剥離が可能となる照射パワーが 0.25 W 以下と格段に小さくなった。0.3 W 以上の照射パワーでも剥離するが BST にダメージが生じた。また、0.1 W 以下では剥離が見られなかった。パターンサイズが小さくなると剥離の確率が低下するが、剥離した BST 面は良好な表面状態であった。パルス幅 10 ns の場合と比べると、プロセスウィンドウが広がっており、入熱レートが低いほどレーザー剥離されたサンプルの状態が良好に保たれるという傾向が得られた。

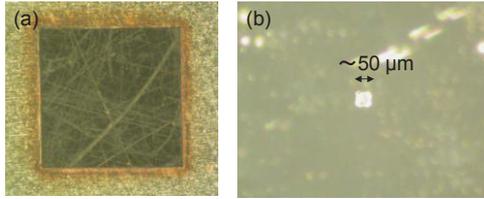


図7 (a)像転送に用いた開口1 mm角のマスク
(b)Pt薄膜状に形成された加工痕

集光強度分布による剥離/転写プロセスの違いをみるために、像転送を用いてフラットトップ状の集光強度でレーザー照射を行った。図7(a)に像転送に用いたマスクを示す。集光レンズの上流1285 mmのところに開口1 mm角のマスクを配置し、75 mmのレンズで集光すると、約1/17に縮小された50 μm角の像が形成される。実際にPt膜上に集光すると、約50 μm角の加工痕が確認された(図7(b))。通常のガウシアンビームを集光するとガウス状の集光スポットになるが、像転送することで四角形状のフラットトップに近い集光スポットを実現でき多重照射の効率が良くなると期待される。ただし、上流のマスクでは均一な照射強度分布を得るためにビーム中心部を切り出しているために、レーザー発振器からの光パワーは大きく減衰した(おおよそ光パワーは1/5に減衰)。

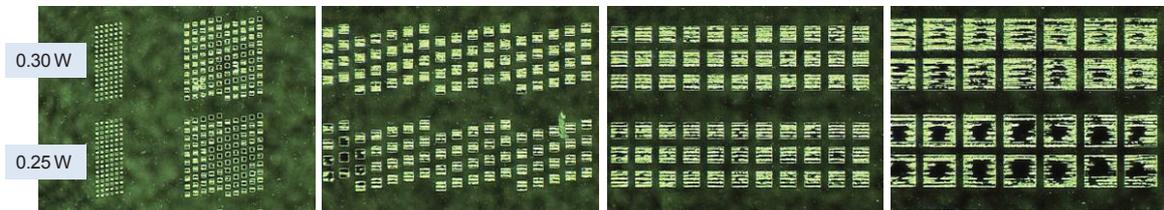
図8、図9に波長532 nm、パルス幅10 ns、繰り返し40 kHzのレーザーを図7に示す像転送を用いて行った

実験結果を示す。掃引速度は4 mm/sでピッチ25 μmで塗りつぶし照射を行った。上段はレーザー照射後にサンプルをサファイア側から、下段はテープ剥離後にテープに転写されたBST/Pt面を光学顕微鏡で観察した写真である。レーザー照射パワーは図8上段上半分が0.3 W、下半分が0.25 W、図9上段上が0.2 W、中が0.15 W、下が0.1 Wとなっている。サンプル上のパターンサイズは左から15 μm角、30 μm角、60 μm角、100 μm角、200 μm角である。図3の実験結果に比べて剥離に要する照射パワーは低下した。0.3 W以上の照射パワーでは四角のパターンがつぶれてしまい、0.1 W以下ではほとんど剥離が見られなかった。

4. まとめ

レーザー波長532 nm、1064 nm、パルス幅10 ns、200 ns、集光強度分布ガウシアン、像転送による角形フラットトップと様々なパラメータ下でレーザー剥離/転写プロセスの条件出しを行った。波長が短く、パルス幅が長いほど剥離に要するレーザーパワーが低下し、ガウシアン分布よりも角形フラットトップの照射強度分布の方がさらに低パワーで剥離/転写が可能であることが確認できた。今後は、転写物の形状だけではなく転写物の電気的特性を評価した上でレーザー転写の可能性や最適化を議論していく必要がある。

●レーザー照射後(サファイア側:Pt)



●テープ剥離後(Pt, BST側)

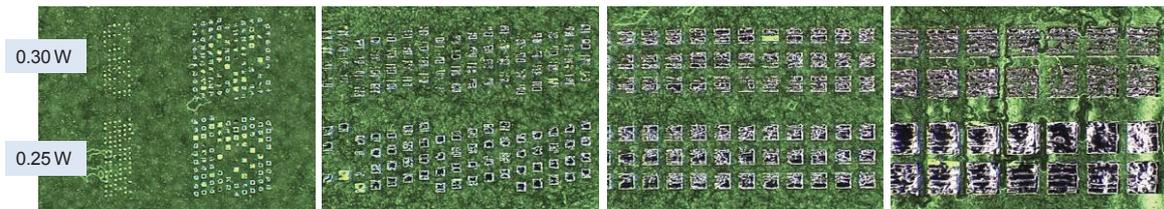
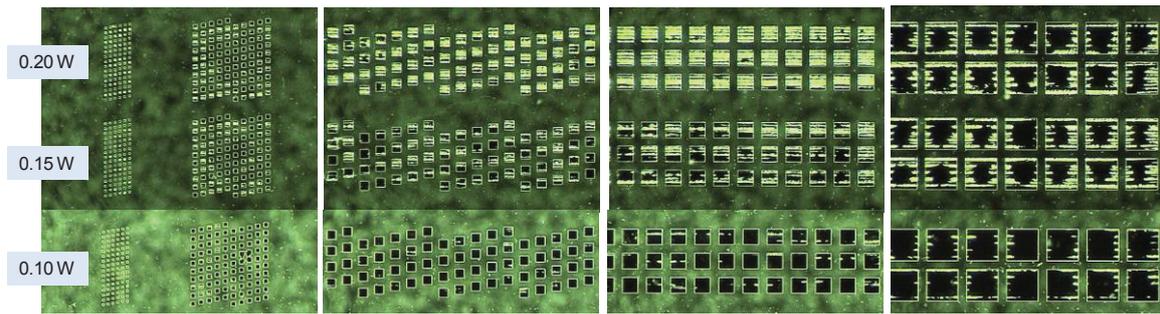


図8 波長532 nm、パルス幅10 ns、繰り返し40 kHzのレーザーを像転送して行った実験結果:
レーザー照射パワーは0.3 W、0.25 W

●レーザー照射後(サファイア側:Pt)



●テープ剥離後(Pt, BST側)

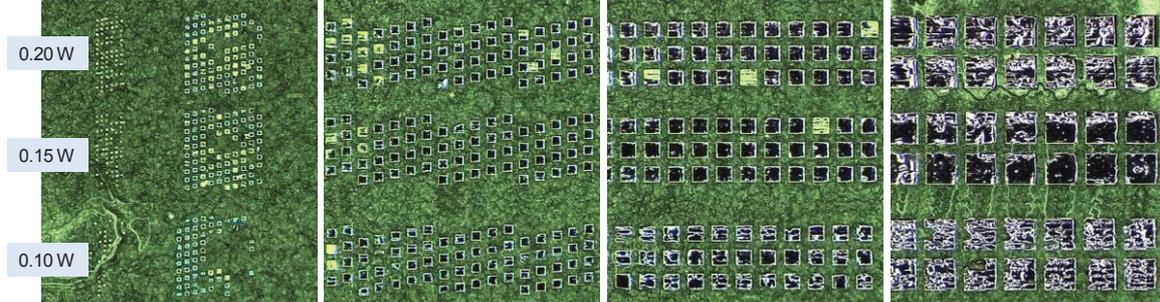


図9 波長 532 nm、パルス幅 10 ns、繰り返し 40 kHz のレーザーを像転送して行った実験結果:
レーザー照射パワーは 0.2 W、0.15 W、0.1 W

本研究は、総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラム（中心研究者：江刺正喜）により、日本学術振興会を通して助成された。

参考文献

1) R. Guerre, U. Drechsler, D. Jubin, and M. Despont: J. Microelectrical Systems, **17**, 157-165, 2008.

2) R. Guerre, U. Drechsler, D. Jubin, and M. Despont: J. Micromech. Microeng., **18**, 115013, 2008.

3) T. Grund, R. Guerre, M. Despont, and M. Kohl: Eur. Phys. J. Special Topics, **158**, 237-242, 2008.

4) T. Chakraborty, B. Xu, Q. Zhang, A. J. Bell, X. Bo, A. Chowdhury, C. James, C. Puchmark, J. Harrington, M. Khan, R. E. Miles, W. Xiong, and S. J. Milne: Integrated Ferroelectrics, **106**, 40-48, 2009.

100 W 級高品質全反射アクティブミラー増幅器の開発

レーザープロセス研究チーム

古瀬裕章、櫻井俊光、ハイク コスロービアン、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センター

²三菱重工業株式会社

1. はじめに

加工、医療、宇宙、高強度物理、慣性核融合等、幅広い分野において高エネルギー、高平均出力レーザーが要求されている。特に産業応用にはレーザー出力だけでなく、高い光変換効率やビーム品質等も要求される。現在加工産業用に 10 kW 以上の横単一モード光源が海外で市販されており¹⁾、今後ますます高出力化が進むと考えられる。

当研究所では、大学や産業界と連携して、産業用の国産高出力レーザー開発を進めてきた。出力目標に 10 kW を掲げており、同時に高効率と高品質を実現し得る光源開発を目指している。上記理想光源を開発するために解決すべき課題には、① 強励起に伴うレーザー材料内部の発熱と、これによる熱収差（熱レンズ効果含む）や熱複屈折の抑制、② 自然放出光の増幅（Amplified Spontaneous Emission: ASE）や寄生発振によるレーザー利得の減少、③ 光学素子のダメージ対策などがある。これらの課題を解決するためには大出力レーザーに適した材料（高い熱物性値を有する、高い蓄積エネルギーを有する、大型化が可能、等）と、増幅形態（高い冷却能力を有する、温度勾配が生じにくい、等）の選定が重要となる。

本研究ではこれまで大きく 2 つのアプローチを試みてきた。一つは発熱量が少ない Yb³⁺:YAG をレーザー材料に用い、低温冷却²⁴⁾により高い熱伝導率を実現して媒質内での温度不均一の低減を図ったことである。もう一つはアクティブミラー型と全反射を組み合わせた TRAM (Total-Reflection Active-Mirror)方式を採用したことである⁵⁾。TRAM は厚み 1 mm 以下のディスク媒質の裏面を直接冷却媒質に接触させ、レーザー媒質と冷媒と

の界面における全反射を利用する。したがって熱伝導率の低い反射膜が不要となり熱除去特性が格段に向上すると期待できる。

これまで低温冷却 Yb³⁺:YAG と TRAM 方式を組み合わせた小型試作器を開発し、横多モード発振特性を評価した。その結果、最大出力 273 W、光-光変換効率 65% を達成し、本方式で高出力と高効率を同時に得ることができることを実証した。また数 kW-数 10 kW 級出力用に、TRAM を多段に連結した ZiZa-AM (ZigZag Active-Mirror)を発明し、出力 214 W、光変換効率 50% を達成した⁶⁾。さらに MOPA (Master Oscillator Power Amplifier) システムによる高品質化を図るために、TRAM 単体の透過波面歪や Yb:YAG 温度を測定し、熱効果を評価した^{7,9)}。近年では ASE や寄生発振を詳細に調査し、増幅利得に対してどのような影響を与えるかを調べた¹⁰⁾。そして得られた基礎データを基に、10 kW 増幅器の概念設計を行った。

本稿では、今後キロワット級 MOPA システムを開発するための前置増幅段として、100 W 級の増幅器を開発した結果を報告する。

2. TRAM の増幅特性 (Yb³⁺:YAG 温度、小信号利得、透過波面歪、熱複屈折)

本章では Yb³⁺:YAG 厚 0.6 mm の TRAM 試料に関して調査した Yb:YAG 温度、小信号利得、透過波面、熱複屈折に関する結果を示し、100 W 級増幅器に最適な励起条件を探る。測定に使用した励起光源は、CW 500 W、ファイバー結合型半導体レーザー (LD)、 $\lambda = 940$ nm であり、種光源は CW 20 W、偏波保持横単一モードファイバーレーザー、 $\lambda = 1029.4$ nm ($\Delta\lambda = 0.2$ nm) である。

蛍光スペクトルの測定には分光器 (920–1080 nm, 分解能 0.2 nm) を使用した。透過波面および熱複屈折の測定にはシャックハルトマン波面センサ、グラントムソン偏光子対をそれぞれ使用した。評価方法の詳細は文献⁷⁻¹⁰⁾にゆずり、本稿では結果のみを示す。

2.1 Yb³⁺:YAG の温度上昇と小信号利得

図 1 に励起時の Yb³⁺:YAG 温度の評価結果を示す。Yb³⁺:YAG 温度の評価には Yb³⁺:YAG からの蛍光スペクトルの 1022 nm と 1027 nm の強度比の温度依存性を利用した。

図 2 に励起スポット径 4 mm と 6 mm における小信号利得の測定結果を示す。○は実験結果を、点線は計算結果を表している。計算では誘導放出断面積と再吸収の温度依存性を考慮した。また計算には図 1 に示した Yb³⁺:YAG 平均温度を利用した。図 2 より、スポット径 6 mm は計算結果と実験結果が良く合うのに対して、スポット径 4 mm ではずれが生じた。レーザー媒質内の温度分布は利得分布を生じるため、スポット径が小さくなると急峻な温度勾配が発生して計算結果との不一致が生じたと考えている。今後、精度良く増幅計算を行うためにも Yb:YAG 内部の温度分布を実験および計算の両面から評価し、増幅計算に取り入れる必要がある。

2.2 TRAM 透過波面歪と熱レンズ効果

透過波面の測定結果について述べる。透過波面測定に

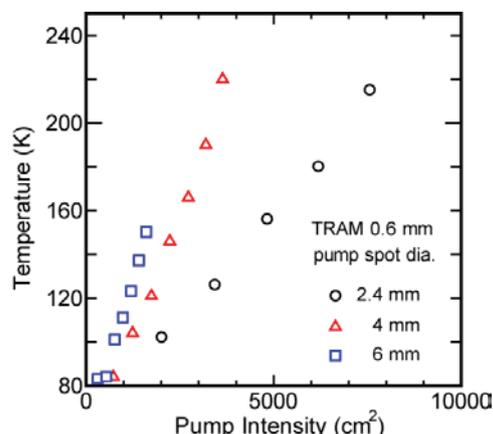


図 1 蛍光スペクトルから見積もった Yb³⁺:YAG 温度

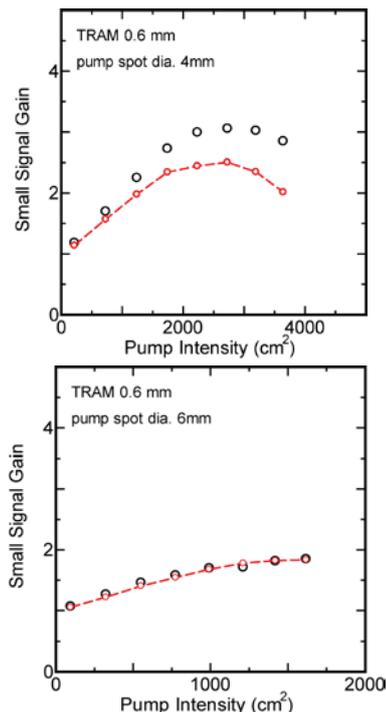


図 2 小信号利得の測定結果と計算結果

はシャックハルトマン波面センサを使用した⁷⁾。図 3 は励起パワー 450 W、励起スポット径 4 mm の励起条件時に測定された透過波面である。測定波面からは Zernike 多項式による解析によって、Tip-Tilt、Defocus、Coma、Astigmatism 等の収差成分を知ることができる。Defocus 成分から熱レンズ焦点距離を知ることができ、これはレンズを用いて補償することが可能である。図 4 に熱レンズ焦点距離と励起強度の関係を示す。励起スポット径 2.4 mm の時、最大で $f100$ mm 程度の非常に強い熱レンズ効果が観測された。

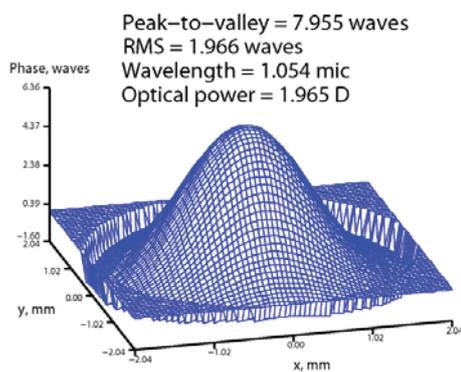


図 3 励起スポット径 2.4 mm、励起強度 10 kW/cm^2 時の透過波面歪み

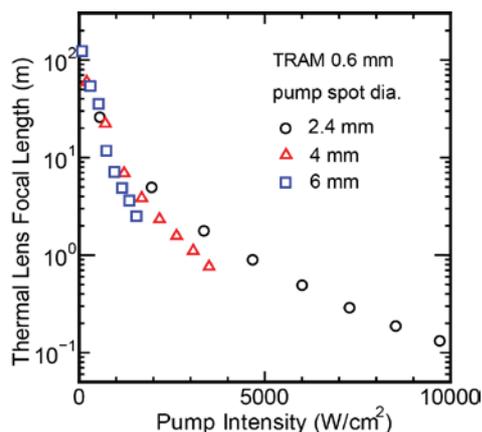


図4 各励起スポット径における熱レンズ焦点距離

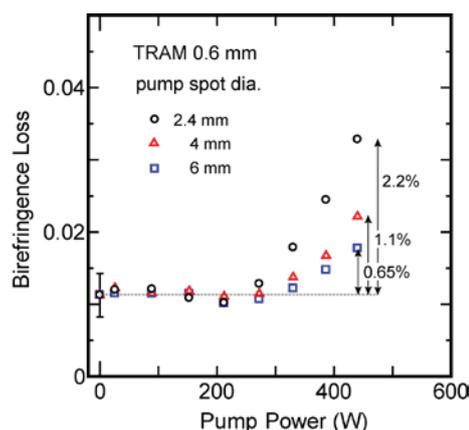


図6 熱複屈折損失と励起パワーの関係

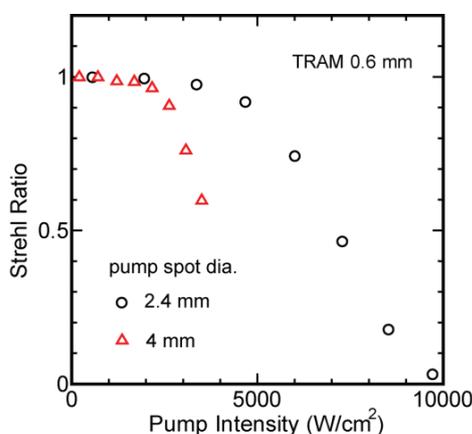


図5 TRAM0.6 mm のストレール比

図5に、熱レンズ効果を取り除いた後のストレール比を示す。ストレール比は、収差が無い場合の集光強度が1と定義され、1に近い程熱収差が小さいことを意味する。図5より、励起強度が2 kW/cm²程度までストレール比は0.9以上を保っており、ほぼ無収差と考えることができる。この領域であれば熱レンズを補償すれば高品質で増幅が可能であると考えられる。

2.4 熱複屈折効果

熱複屈折の測定結果を図6に示す。測定では直交ニコル配置したグランプリズム対の間に TRAM 試料を配置し、検光子からの漏れ量をパワーメータおよび CCD カメラで測定した。励起光投入前に複屈折が約 1% 生じており、図中のエラーバーは標準偏差 ($\sigma=0.003$) を示している。励起スポット径 2.4、4、6 mm の場合、最大で

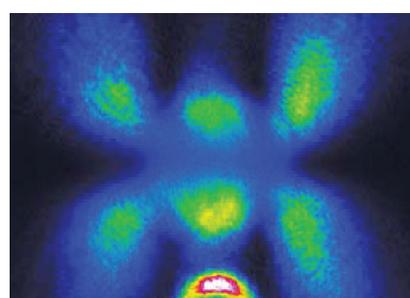


図7 励起スポット径 2.4 mm、励起パワー 420 W 時の熱複屈折プロファイル

熱複屈折損失 2.2、1.1、0.65% を観測した。図7に熱複屈折プロファイルを示す。励起スポット径 2.4 mm、励起強度 9.2 kW/cm² (=420 W) である。前節で述べたように同励起条件時には $f=100$ mm 程度の強い熱レンズ効果が生じているためスペーシャルフィルターの使用が困難であり、LD の漏れ光や迷光が同時に観測されている。

3. 100 W 級 MOPA システムの開発

前章で述べた TRAM の増幅試験結果を総括すると、励起スポット径 4 mm、励起パワー 280 W (励起強度 2.2 kW/cm²) が 100 W の増幅器開発に適した励起条件の一つである。上記励起条件の場合、小信号利得 SSG=3.0、Yb:YAG 平均温度 145 K、熱レンズ焦点距離 $f=2337$ mm、熱複屈折損失 0.01 である。なお、熱レンズ以外の収差から構成されるストレール比は 0.96 であることから、高品質を維持したまま増幅可能であると考えられる。本章ではこの励起条件を使用して 4 パス増幅実験を行ったので、その結果について述べる。

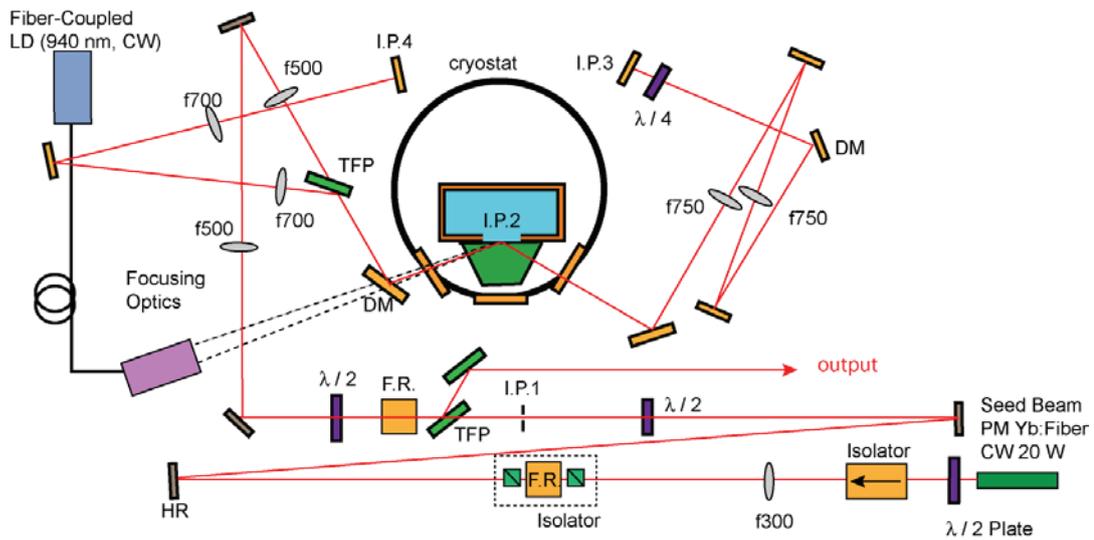


図8 4パス増幅器の構成図

3.1 4パス増幅試験

図8に4パス増幅試験の構成図を示す。戻り光によって種光源が破損しないように、光アイソレーターを2段使用した。また $f = 300 \text{ mm}$ のレンズを用いて種光を直径4mmに設定した。偏光子、ファラデー回転子、波長板を使用して、偏光制御による多重パス増幅を構成した。アパーチャーの像 (IP1) を $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ 面 (IP2)、1パス増幅後のエンドミラー (IP3)、2パス増幅後のエンドミラー (IP4) にそれぞれ像転送した。

図9に4パス後のレーザー出力を示す。励起しない場合、種光の透過パワーは6.5Wであった。励起パワー280W時に出力80W、励起パワー400W時に105W出力を達成した。

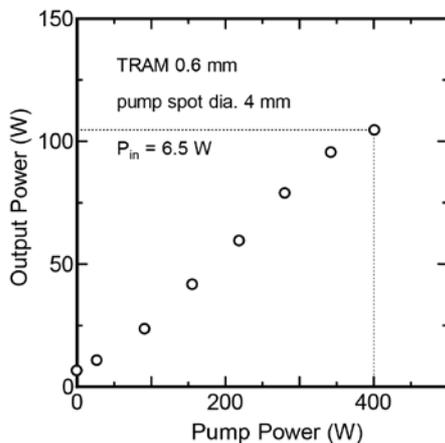


図9 4パス後の出力パワーと励起パワーの関係

図10に105W出力時の出力安定性を示す。図10では種光の出力安定性も示している。増幅出力は、励起後に最大値を示し、その後約10秒間低下することがわかる。これは $\text{Yb}:\text{YAG}$ の温度上昇による効果である。その後、励起時間90秒まではほぼ出力は安定で、100W出力を維持することができた。若干出力に変動が見られるのは、種光の出力が変動しているためであると考えられる。

図11に4パス増幅後の近視野像および遠視野像を示す。4パス後も比較的高品質を維持しているように見えるが、今後調整することでより品質を良くすることができると思われる。

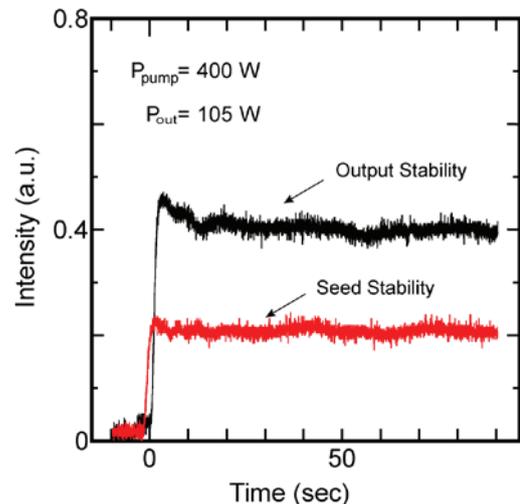


図10 4パス後の出力パワーと励起パワーの関係

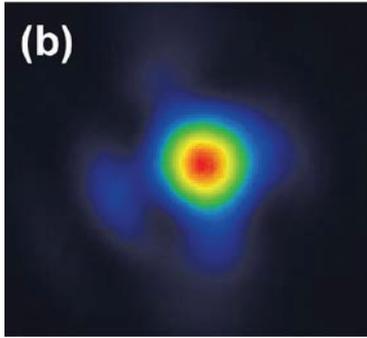
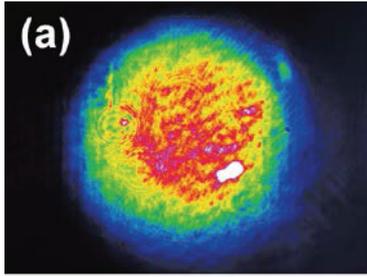


図 11 4パス後の(a) 近視野像と(b) 遠視野像のビームプロファイル

3. まとめ

本稿では、キロワット級増幅器を開発するための前置増幅段として、100 W 級増幅器の開発結果を報告した。Yb:YAG 温度上昇値、小信号利得、透過波面歪、熱複屈折等の基礎データに基づいて、Yb:YAG 厚 0.6 mm の TRAM に対する高品質を維持できる励起条件を見出した。増幅実験では、種光に CW 20 W のファイバーレーザーを使用した。励起パワー280 W のとき、4パス増幅後に出力 80 W を、励起パワーを400 W まで上げたとき、出力 100 W 以上を 90 秒間に渡って維持することができた。

今後は増幅出力の解析を行い、レーザー媒質内の温度分布や利得飽和の影響について考察する予定である。また大信号領域における ASE や寄生発振の影響を調査す

る必要がある。

参考文献

- 1) V. Gapontsev, V. Fomin, and A. Yusim: presented at the 22nd Annual Solid State and Diode Laser Technology Review, Newton, Massachusetts USA, June 29-July 2, 2009.
- 2) R.L. Aggarwal, D.J. Ripin, J.R. Ochoa, and T.Y. Fan: J. Appl. Phys., **98**, 103514, 2005.
- 3) D.C. Brown: IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., **11**, 587-599, 2005.
- 4) T.Y. Fan, D.J. Ripin, R.L. Aggarwal, J.R. Ochoa, B. Chann, M. Tilleman, and S. Spitzberg: IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **13**, 448-459, 2007.
- 5) H. Furuse, J. Kawanaka, K. Takeshita, N. Miyanaga, T. Saiki, K. Imasaki, M. Fujita, and S. Ishii: Opt. Lett., **34**, 3439-3441, 2009.
- 6) H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga, T. Saiki, K. Imasaki, M. Fujita, K. Takeshita, S. Ishii, and Y. Izawa: Opt. Express, **19**, 2448-2455, 2011.
- 7) 古瀬裕章, 河仲準二, 宮永憲明, ハイクコスロービアン, 藤田雅之, 今崎一夫, 竹下賢司, 石井伸也, 井澤靖和: ILT 年報, レーザー技術総合研究所, 2011.
- 8) 櫻井俊光, 古瀬裕章, 河仲準二, 宮永憲明, ハイクコスロービアン, 藤田雅之, 竹下賢司, 石井伸也, 井澤靖和: ILT 年報, レーザー技術総合研究所, 2012.
- 9) H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga, H. Chosrowjan, M. Fujita, K. Takeshita, and Y. Izawa: Opt. Express, **20**, 21739-21748, 2012.
- 10) 古瀬裕章, 河仲準二, 宮永憲明, 櫻井俊光, ハイクコスロービアン, 藤田雅之, 竹下賢司, 濱本浩一, 山田隆弘, 井澤靖和: ILT 年報, レーザー技術総合研究所, 2012.

低温冷却 Yb:YAG TRAM レーザーの温度評価

レーザープロセス研究チーム

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

¹大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

²三菱重工株式会社

1. はじめに

当研究所では、大学や産業界と共同で、TRAM 型レーザー媒質を用いた低温冷却型 Yb:YAG 高出力レーザーの開発を行っている。TRAM は全反射アクティブミラー (Total Reflection Active Mirror) の略称で、厚さ 1 mm 以下のディスク状 Yb:YAG に undoped YAG をキャップした構造になっている。Yb:YAG の裏面に液体窒素を直接接触させ、Yb:YAG と液体窒素との界面での全反射を利用する。熱伝導率の悪い反射膜が不要となり、高い廃熱特性が期待できる。

これまで、小型の TRAM レーザー装置を試作し、レーザー発振・増幅特性や出力レーザー光の波面歪み、熱レンズ効果などを測定するとともに、熱解析を進め、高出力レーザーの設計に必要な基礎データを蓄積してきた¹⁻³⁾。熱解析では、TRAM 内に発生する温度分布を実測するとともに、有限要素法 (以下、FEM (Finite Element Method) とする) を用いて TRAM 内の温度分布を解析し、実験結果と比較しながら、励起スポット径の効果を明らかにすることをめざしている。

本稿では、温度分布の実測結果と FEM による解析結果について報告する。

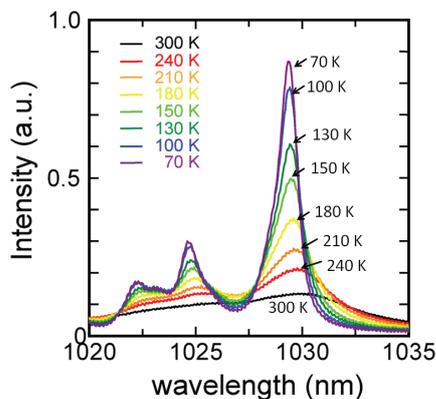


図1 Yb:YAG の蛍光スペクトルの温度依存性

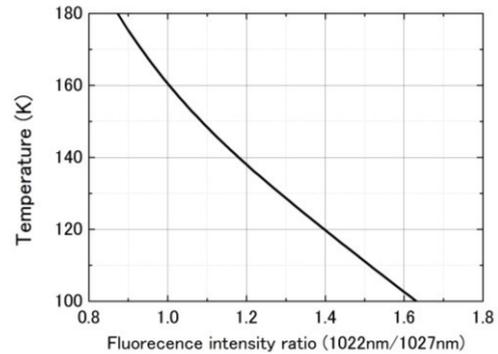


図2 蛍光スペクトルの強度比 (1022 nm/1027 nm) と温度の関係

2. TRAM の温度評価

図1は Yb:YAG の蛍光スペクトル温度依存性である⁴⁾。低温では 1020~1030 nm 領域に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。

Yb:YAG の温度評価実験配置を図3に示す。ファイバー結合型半導体レーザー (LD) で TRAM を励起し、励起面から放射された蛍光を TRAM 上方から取り出し、光ファイバーを介して分光器でスペクトルを計測する。図4は TRAM 上方から CCD で観測した蛍光像である。LD 光は Yb:YAG 面に対し 60° 傾けて入射しているため、励起領域は楕円となる。励起面から上方へ放射された全蛍光を集め、スペクトルを計測することにより励起領域における平均温度が、また励起面をレンズでファイバー入口に結像してファイバーの位置を走査することにより励起スポット内での温度分布が得られる。

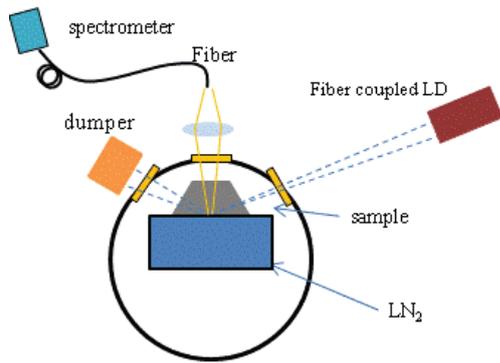


図3 蛍光スペクトを利用した Yb:YAG 温度評価
実験構成図

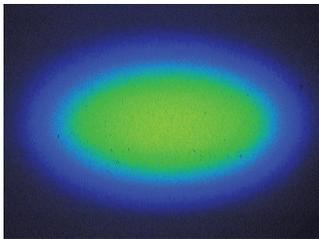


図4 Yb:YAG の励起面をレンズで結像した
CCD 画像

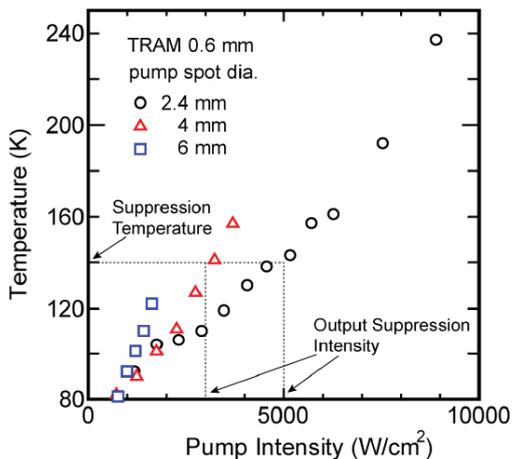


図5 0.6 mm 厚の Yb:YAG を励起した時の平均温度
(励起スポット径 : 2.4, 4, 6 mm) ⁴⁾

図5は、放射された全蛍光を集めてスペクトルを計測することにより得られた、励起スポット径を変えた場合の温度評価結果である。たとえば、Yb:YAG 0.6 mm 厚、 $\phi 4$ mm、励起強度 2.2 kW/cm^2 の時、平均温度は 145 K 程度である。励起強度は同じであっても集光スポット径が小さくなると平均温度は低くなっている。

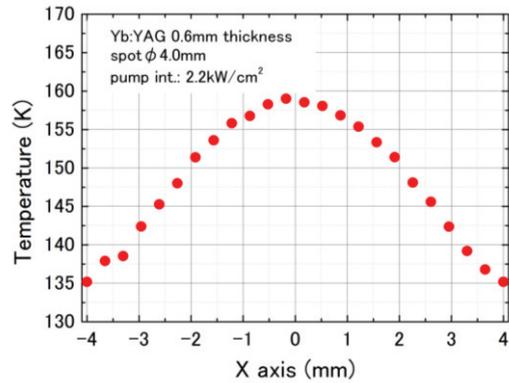


図6 励起領域内長軸方向の Yb:YAG の温度分布 (励起スポット径 : 4 mm、励起強度 : 2.2 kW/cm^2)

図6は、図4に示す励起領域の長軸方向に沿って測定した Yb:YAG の温度分布である。横軸0の位置が楕円の中心に対応している。中央部で最も温度が高く (159 K)、両側にいくほど温度が低下している。

3. FEM 解析

有限要素法 (FEM) により TRAM 内 Yb:YAG の温度分布を計算した。FEM では、CAD で作製した図面に初期条件 (発熱源、初期温度など) を与えて定常状態における温度を計算する。メッシュ数は 100 万メッシュ、発熱源は励起スポット径 (楕円)、投入した LD パワーの 20% を発熱量とした。Yb:YAG の熱伝導率には温度依存性⁵⁾を考慮し、初期温度を 70 K とした。液体窒素の流速を変えて温度分布を計算し、実験値と比較した。その結果流速を 2.6 m/s としたとき、図7に示すように、実験結果をよく再現できることが明らかとなった。

図7で○は図6に示した実験結果、●は FEM による計算結果である。励起領域の両端付近では不一致が見られるものの、中央部約 3/4 の領域では実験と計算結果がよく一致していることがわかる。両側の不一致については今後詳細な検討を行う予定である。

FEM による計算では楕円の励起面全領域での温度分布が評価できるので、計算結果から平均温度を算出して実験結果と比較した。図8は図5に示した励起スポット径 4 mm の場合について、実験と計算で得られた平均温度を比較したものである。励起強度 4 kW/cm^2 までの全領域でほぼよい一致が得られている。

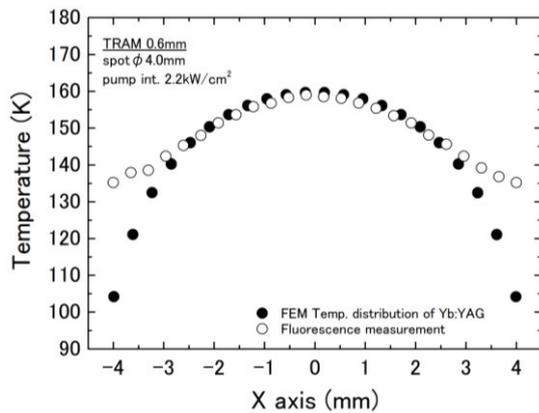


図7 実験により得られた Yb:YAG 面の温度分布と FEM で計算した温度分布の比較 (○ : 実験結果、● : 計算結果)

以上のことから、FEM による温度解析は実験をよく再現できることが明らかとなった。今後は励起面での温度分布がレーザー光の波面歪みに与える影響を評価し、実験で観測された波面歪みと比較しながら、解析の精度を高め、高出力をめざす大型 TRAM 方式の設計に役立てたい。

4. むすび

Yb:YAG の蛍光スペクトルが温度依存性を示すことを利用して、励起に伴う低温冷却 TRAM 内 Yb:YAG の温度上昇を実験で評価した。平均温度だけでなく、楕円型励起面の長軸方向に沿っても温度分布を求めることが可能となった。

FEM により Yb:YAG 内の温度上昇を解析した。解析結果は実験をよく再現できることが明らかとなり、高出力化をめざす大型 TRAM の設計に有力な手法を提供しうることがわかった。今後は、解析結果を下にして

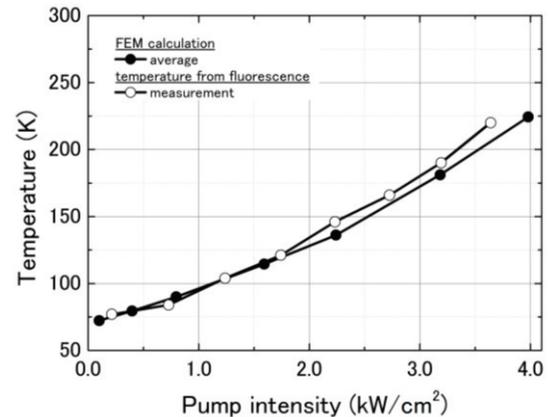


図8 平均温度についての計算と実験の比較 (○ : 実験結果、● : 計算結果 (Yb:YAG : 0.6 mm、励起スポット径 : 4 mm))

TRAM 内に誘起される温度分布がレーザー光の波面歪みに及ぼす影響を定量的に評価する予定である。

参考文献

- 1) 古瀬裕章, 河仲準二, 宮永憲明, ハイコスローピアン, 藤田雅之, 今崎一夫, 竹下賢司, 石井伸也, 井澤靖和: ILT 年報, レーザー技術総合研究所, 2011.
- 2) 櫻井俊光, 古瀬裕章, 河仲準二, 宮永憲明, ハイコスローピアン, 藤田雅之, 竹下賢司, 石井伸也, 井澤靖和: ILT 年報, レーザー技術総合研究所, 2012.
- 3) 古瀬裕章, 櫻井俊光, ハイコスローピアン, 河仲準二, 宮永憲明, 石井伸也, 藤田雅之, 井澤靖和: ILT 年報, レーザー技術総合研究所, 2013.
- 4) H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga, H. Chosrowjan, M. Fujita, K. Takeshita, Y. Izawa: Opt. Express, **20**, 21739-21748, 2012.
- 5) T.Y. Fan and J.L. Daneu: Appl. Opt., **37**, 1635-1637, 1998.

A new single detector technique for high power, multi-channel coherent beam combination (CBC)

Laser Process Research Team

Haik Chosrowjan, Toshihiro Somekawa, Hiroaki Furuse,
Masayuki Fujita and Yasukazu Izawa

1. Introduction

High power lasers with good beam quality are increasingly required for many applications. To obtain ultra-high intensities from multi-kilowatt class laser systems, the concept of beam combining 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⁾. Most of these techniques require sophisticated electronics and phase retrieval/control algorithms. Recently, we have proposed and experimentally demonstrated a simple analogue coherent beam combining (CBC) technique²⁾ employing a pair of photodiodes for each beam channel. It does not require phase retrieval algorithms and is simple in implementation. However, in some specific applications like in coherent LIDAR, employing just a single photo-detector (PD) for all channels together with simple phase control algorithm is desirable. Several CBC techniques for multiple laser beams using a single detector have been already proposed and implemented (multi-dithering technique³⁾, stochastic parallel gradient descent algorithm based technique⁴⁾, etc.). However, with increasing number of beams the mathematics behind these algorithms becomes complicated. Successful implementation of CBC strongly depends on initial phase values and intensities of beams in used algorithms. Mathematically, for given N number of beams, the problem is expressed by one equation with N variables (phases). If N is big, designing a successfully converging algorithm and finding a single solution (set of N independent phase values) within reasonable time becomes a “trial and error” process, which may or may not converge

successfully. We proposed a simple solution to this problem by introducing a spatial modulator between the beam splitter and collimating optics in the path to the single detector. The idea is simple: dividing the N number of beams (the central beam is used as a reference beam and is not numbered) into clusters and doing CBC in sequence, with as small number of beams as possible. If the number of beams within a single cluster is n , the number of clusters will be N/n . An example is illustrated for 9 beams (4 clusters) in Fig. 1.

As a proof of a principle experiment, we demonstrated the new technique for a single cluster (3 beams including the reference beam): $N = 2$, $n = 2$. Afterwards, we evaluated the technique for the case of two clusters: $N = 4$, $n = 2$. We constructed the CBC apparatus and developed simple algorithms for suggested cases. For the single cluster case, we investigated linear and triangular geometries. Theoretical calculations for 5 beam CBC and parameter estimations for desired system resolution has been also performed.

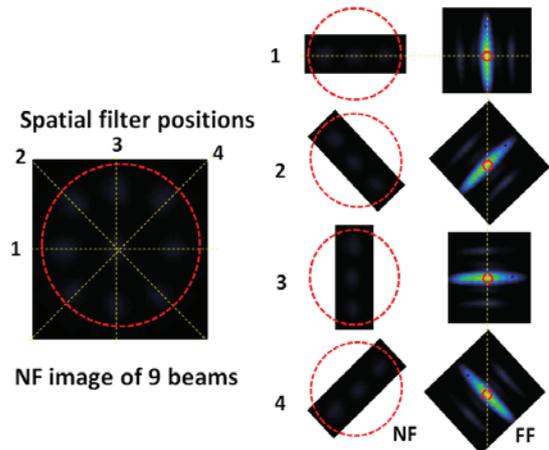


Fig. 1 Near-field (NF) and far-field (FF) patterns of four clusters in single photo-detector CBC technique for 9 beams.

2. Experimental

Figure 2 describes the double cluster case (5 beams). The laser ($d \sim 2$ mm) from the master oscillator is split into five equal beams with ~ 4 mm distance between the neighbor channels. All five 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 of the four beams to the fifth one, a signal from the center of the far-field pattern (FFP) was picked up by a fast photodiode and used it as a feedback control signal to piezo-actuators (PM1 – PM4) located on the paths of four beams.

The fifth beam serves as a reference beam and its phase is not controlled. Experimentally, it is done using a pin-hole (~ 50 μm) placed in front of the photo-detector to pick up the power of the central lobe of the FFP. To reduce the computational burden, the beams are divided into two clusters by a spatial modulator. For each cluster a simple “climbing hill” algorithm is employed in consequent order to maximize the far-field central lobe signal intensity. For the case, when the spatial filter is a chopper, the relation between the required beam combining bandwidth, spatial filter bandwidth and phase shifter bandwidth is given in section 3.

Figure 3 describes experimentally obtained far-field patterns of a single cluster for a triangular geometry taken by a CCD camera (top) and calculated far-field interference patterns (bottom). It is clearly seen that the calculated FFP patterns quite well reproduce the experimental observations.

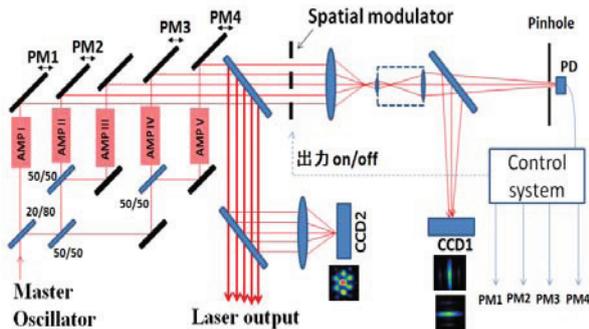


Fig. 2 Schematic diagram for 5 beam CBC apparatus.

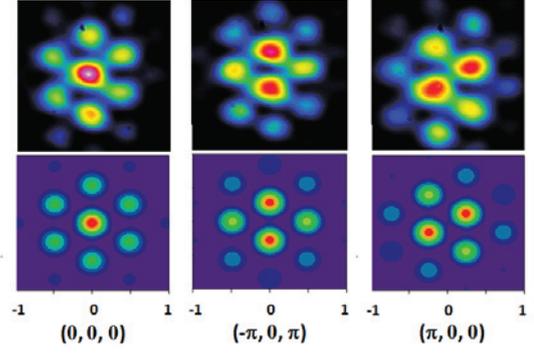


Fig. 3 Measured and calculated far-filed patterns of 3 triangular aligned beams for different relative phase shifts.

In Fig. 4, measured and calculated far field interference patterns of 3 linearly aligned beams for in-phase $(0, 0, 0)$ and out of phase $(-\pi, 0, -\pi)$ cases are presented. It is clearly seen that the calculated FFP patterns quite well reproduce the experimental observations. Hence, using calculations and test-experiments, we can predict the results and optimize the CBC system for effective operation. In our experiments the PD signal noise after amplification is estimated to be ~ 60 mV. Hence, the minimum phase shift $\Delta\phi$ corresponding to $\Delta V_{\min} \sim 60$ mV was estimated to be ~ 0.2 rad or $\Delta\phi \sim \lambda/30$.

3. “Climbing hill” algorithm for single cluster (3 beams) combination

Several modifications of “climbing hill” algorithm, depending on phase shifters, channel numbers, PD bandwidths

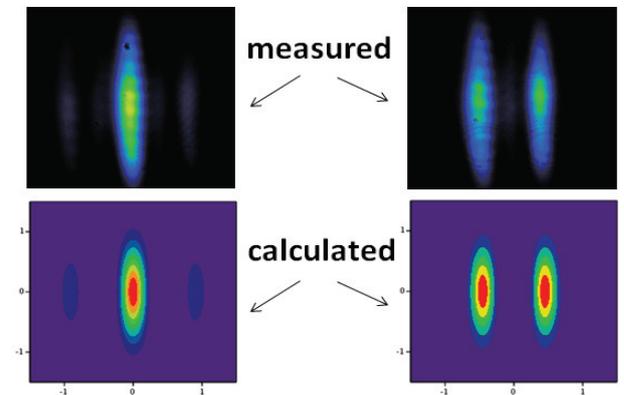


Fig. 4 Measured and calculated far-field patterns of three horizontally aligned and coherently combined beams for in-phase and out-of-phase cases.

and calculation speed can be considered. Here we will describe the simplest case applicable to our method. But before that, we present calculated results of far-field intensity phase map (Fig. 5) at the central point of the detector for 3 beam coherent combination (Eq. (1)), which is essential for the algorithm description.

$$\begin{aligned} E(x, y, \phi_1, \phi_3) &= E_1(x, y, \phi_1) + E_2(x, y, 0) + E_3(x, y, \phi_3) \\ I(0, 0, \phi_1, \phi_3) &= [E(0, 0, \phi_1, \phi_3)]^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Here E is the combined electrical field, E_i are the fields of each beam, x, y are the Cartesian coordinates, ϕ_i are the phases of the beams, I is the intensity at the central point $(0, 0)$ of the far-field pattern.

As shown on the intensity phase map in Fig. 6, from an arbitrary starting point, we supply voltage (ΔV_{piezo}) to only one piezo-actuator (piezo 3). The piezo-actuator makes one step forward. The PD signal is captured and saved. The piezo-actuator makes another step forward. The new PD signal is captured. It is compared with the previous value. If the new value is bigger than the old value – the system remembers the new value and the piezo-actuator goes another step forward. However, if the new value is smaller than the old one, the new value of the PD is discarded and the piezo-actuator makes a step backward. In this way, the piezo-actuator reaches the diagonal position shown with dotted line on Fig. 6. Then both

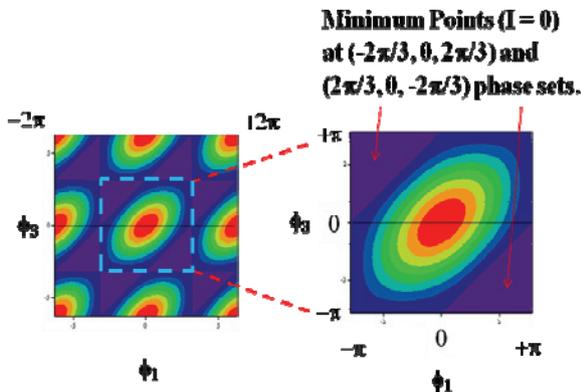


Fig. 5 Calculated far-field intensity phase map at the central point of the detector for 3 beam combination.

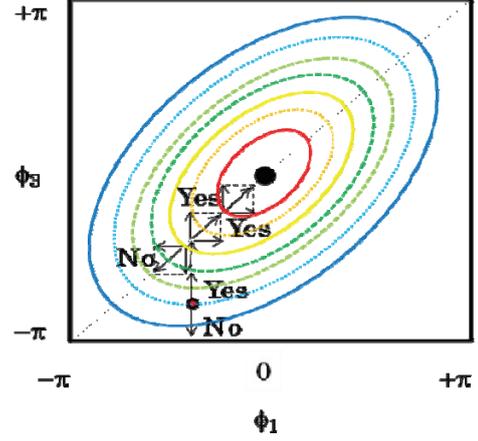


Fig. 6 The process flow of reaching the maximum on the power phase map.

piezo-actuators move at the same time forward. The PD signal is captured and saved. If the new value is bigger than the old value – the system remembers the new value and both piezo-actuators go another equidistant step forward. If, however, the new PD value is smaller than the old one, the new value of the PD is discarded and both piezo-actuators make equidistant steps backward. In this way, the system reaches the maximum position of the power phase map shown by black-filled circle in the center of Fig. 6. The whole described process continues indefinitely. Actually, using this algorithm we have already succeeded coherently combining and locking 3 laser beams.

If a chopper is used as a spatial modulator, the connection between required beam combining bandwidth ($\omega_{\text{BC}} = 2 * \omega_{\text{chopper}}$), number of clusters (N/n), the bandwidth of the phase-shifter (ω_{shifter}) and the number k describing the number of minimum steps required for successful convergence of the used algorithm, will be expressed by the following simple equation.

$$\omega_{\text{BC}} = 2 * \omega_{\text{chopper}} = n * \omega_{\text{shifter}} / (2 * k * N) \quad (2)$$

Using Eq. (2) we can make several case estimations: For coherent combination of $N = 100$ beams with $\omega_{\text{BC}} = 200$ Hz bandwidth in 50 clusters ($n = 2$) and $k = 100$, one needs to use

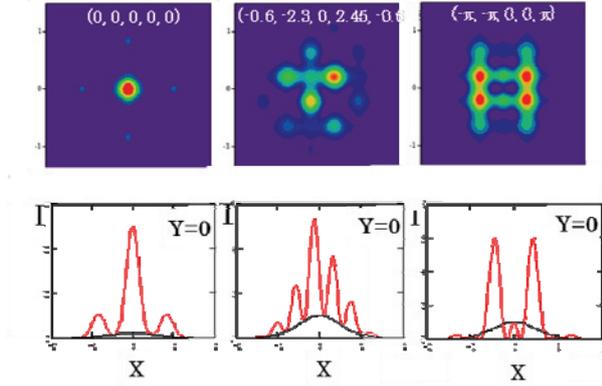


Fig. 7 (top) Calculated FFP images of five beams at different relative phase settings, (bottom) corresponding intensity distribution profiles on a central-horizontal axis ($x, 0$) for above calculated FFPs. The red lines show the profiles for 5 overlapping beams while the black lines show corresponding single beam profile.

a chopper with 100 Hz resolution and a phase shifter with 2 MHz bandwidth. For $N = 10$ beams with $\omega_{\text{CBC}} = 1$ kHz bandwidth in 5 clusters, taking again $k = 100$, one needs to use a chopper with 500 Hz bandwidth resolution and a phase shifter with 1 MHz bandwidth. The final example is, if we want to use 1 kHz bandwidth resolution piezo-actuators as phase shifters ($\omega_{\text{shifter}} = 1$ kHz) and combine 5 beams in 2 clusters, assume $k = 10$, we will get only $\omega_{\text{CBC}} = 25$ Hz (ω_{chopper} must have 12.5 Hz or less bandwidth). In above examples, the $k = 100$ is just a subjective assumption. In the literature, for three beam combination using SPGD algorithm, k is estimated to be ~ 25 . Above examples assume that the convergence (successful CBC) occurs within a single exposure time period (the maximum power on PD is reached and stabilized within $\Delta t = n/(4*\omega_{\text{chopper}}*N)$ time interval). The option when several periods are required to reach the maximum PD power is not addressed here. Experimental estimation of the total convergence time will be one of our future project targets.

As a proof of a principle experiment, we are going to combine 5 beams using a simple mechanical shutter. For a single cluster, all descriptions and analysis given above for 3 beams CBC can be used. The far field pattern of the five beams CBC will be

captured by a CCD2 (Fig. 2). The experiments are still in progress, so in Fig. 7 we present calculated FFP for five beams combination at different phase settings. From Fig. 7 (bottom graphs) it is obvious, that when all phases are locked (far left graph, $(0, 0, 0, 0, 0)$ phase setting), the peak intensity of the combined beam at $(x = 0, y = 0)$ coordinate is $I_{\text{total}} = 5^2 * I_{\text{single}} = 25 * I_{\text{single}}$, as expected for perfect beams and perfect coherent combination. However, when the phases are not locked, the I_{total} is smaller. For some anti-phase alignment (far right graph, $(-\pi, -\pi, 0, 0, \pi)$ phase setting), the I_{total} is equal to I_{single} .

4. Conclusions

In conclusion, we have proposed a single PD, clustered coherent beam combination method using spatial filters. We have performed experimental and theoretical investigations on 3 beams (single cluster) coherent beam combination. The sensitivity for the present laser and experimental set-up was estimated to be $\lambda/30$. We have performed also calculations on 5 beams (two clusters) CBC. Experiments for 5 beams combination using a mechanical shutter are in progress and will be summarized and presented in a forthcoming report. Due to the piezo-actuator bandwidth of ~ 1 kHz, we can reach only ~ 25 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 used.

References

- 1) T. Y. Fan: IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **11**, 567-577, 2005.
- 2) H. Chosrowjan, H. Furuse, M. Fujita, Y. Izawa, J. Kawanaka, N. Miyanaga, K. Hamamoto, and T. Yamada: Opt. Lett., **38**, 1277-1279, 2013.
- 3) T. M. Shay: Opt. Express, **14**, 12188-12195, 2006.
- 4) T. M. Shay, V. Benham, J. T. Baker, A. D. Sanchez, D. Pilkington, and C. A. Lu: IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **13**, 480-486, 2007.

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

レーザープロセス研究チーム

染川智弘、笠岡 誠¹、河内二三夫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固体絶縁物が分解され、特有のガス成分が発生する。これらのガスは変圧器内の絶縁油に溶解するため、このガス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)。例えば、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ている。ガス成分の分析には、一般的に絶縁油中のガス成分を抽出し、抽出ガスをガス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、油中ガス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アセチレンガスなどの放電由来物質の分析が可能な手法を開発している。

2. 油溶存アセチレンのラマン分光計測

これまでに、水に溶解している CO₂ ガスのラマン分光によるモニタリングを行ってきた²⁾。この技術を利用すれば、レーザーを油中に照射するだけで油中ガス分析が可能になる。

2.1 アセチレン溶存油

本実験で使用した絶縁油はかんで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%、

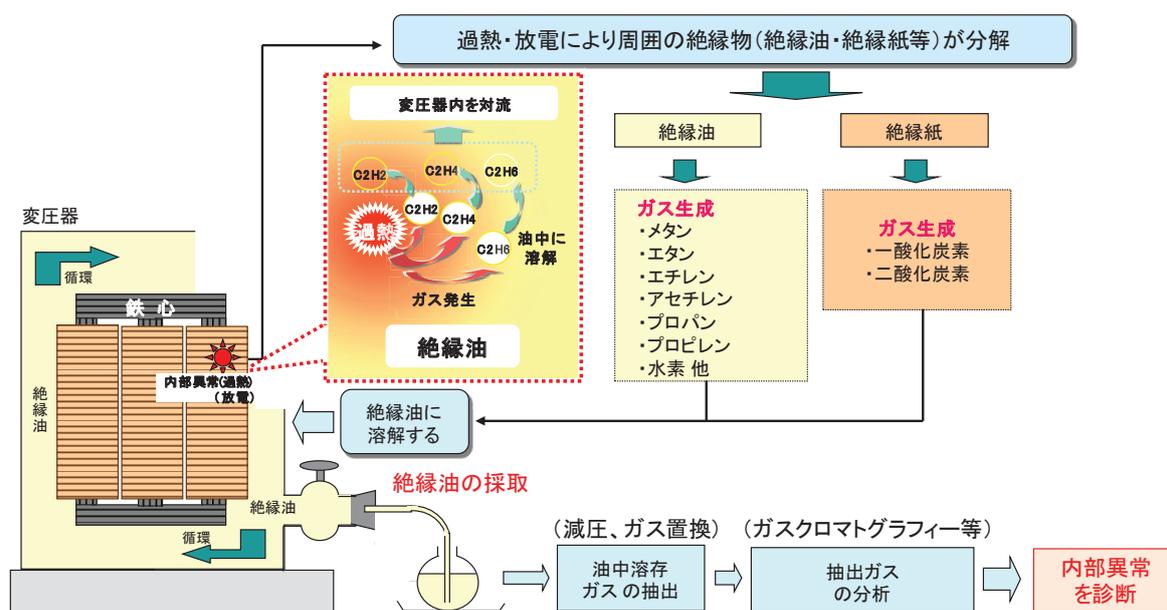


図1 変圧器の絶縁油溶存ガスを用いた異常診断

芳香族炭化水素が 8.4% であり、それぞれの構造式を表 1 に示す。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 に絶縁油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。測定の波長分解能は 1 nm である。紫外域から 370 nm あたりまで吸収があり、380 nm 程度から 430 nm 程度にかけて透過率は急峻に立ち上がり、430 nm 以降は 92% 程度で一定となる。920 nm あたり少し吸収が見られる。この結果から絶縁油のラマン測定には透過率の高い波長 532 nm のレーザーを使用することとした。

溶存アセチレンの濃度をコントロールしたモデル試料の作成は以下の手順で行った。まず真空ポンプで吸引しながらスターラーで油を攪拌し油に溶存している気体を 4 時間程度脱気した。スターラーを入れた注射器に

脱気した絶縁油 200 ml を入れ、アセチレンガス (99% 以上) をガスタイトシリンジで注射器内に導入した。その後、スターラーで攪拌し、アセチレンガスを完全に溶解させた。

試料作成後にガスクロマトグラフで測定した溶存ガスの濃度は 1.9, 5.7, 10% であり、脱気した 0% を加えて 4 種類のモデル試料油中のアセチレンのラマン測定を行った。

2.2 油溶存アセチレンのラマンスペクトル

アセチレンは線形四原子分子であり、図 3 に振動モードを示す。図の点線で囲った ν_1 、 ν_2 、 ν_4 がラマン活性であり、そのうち ν_2 モード (1974 cm^{-1}) が最も大きいラマン散乱断面積を持つために、分析にはこのモードを利用した。

表 1 炭化水素のタイプと構造例

タイプ	構造
パラフィン系炭化水素	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$ n-パラフィン
	$\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_n-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{CH}_3$ イソパラフィン
ナフテン系炭化水素	2,3環ナフテン
	アルキル置換ナフテン
芳香族系炭化水素	2,3環芳香族
	アルキル置換芳香族

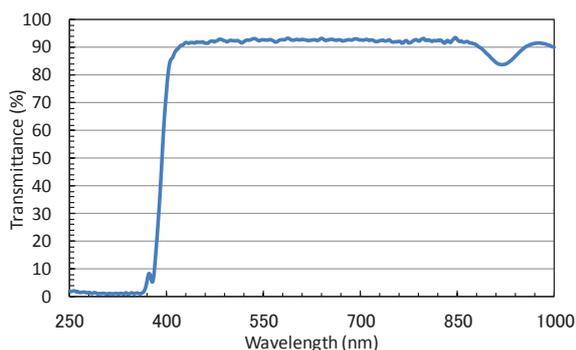


図 2 絶縁油の透過スペクトル

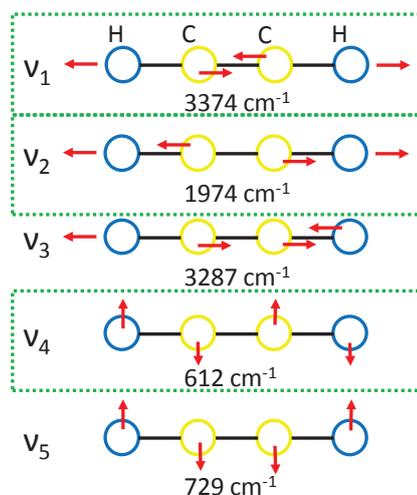


図 3 アセチレンの振動モード

図 4 に実験配置図を示す。試料油は挿入図に示すような $\Phi 3$ 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にバイアル瓶に照射し、後方約 25° の位置からラ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

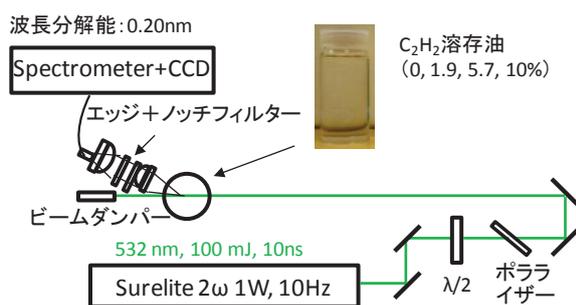


図4 油溶存アセチレンのラマン分光実験配置図

した。CCDカメラの露光時間は90 msであり、3000回積算信号の10回平均のスペクトルを取得した。測定の波長分解能は0.2 nmである。

図5に4種類のモデル試料油中のアセチレンのラマンスペクトルを示す³⁾。(a)が10%のラマンスペクトルである。1800~2300 cm^{-1} 付近では大きなラマン信号が見られず、比較的、スペクトルのベースラインが低いことがわかる。

~1450 cm^{-1} に見られる大きな信号は $\text{CH}_3\text{-CH}_2$ の変角モードであり、~1302, 1350 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、~1610 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、~2725 cm^{-1} はC-Hの伸縮モードと考えられる。~2191 cm^{-1} に見られる信号は、文献等では同定できなかったが、アセチレンの濃度を増加させても信号の増加が見られないことから油由来の信号ではないかと考えられる。Hが重水素Dに置き換わったC-D等の伸縮モードの可能性はあるが同定はできていない。

図5(a)中の点線で囲った領域の拡大図が(b)である。(b)では~2191 cm^{-1} に見られる油由来のラマン信号強度で規格化している。(b)では0, 1.9, 5.7, 10%とアセチレンの濃度が大きくなるにつれて~1972 cm^{-1} のラマン信号強度が大きくなっていることがわかる。これはアセチレンの ν_2 のモードの信号である。比較として、10%のアセチレンガス(90%は窒素ガス)のラマンスペクトルを示したが、気体では~1979 cm^{-1} にラマン信号が測定されているのに対して、油に溶存した際には~1972 cm^{-1} と低波数側にシフトすることがわかった。

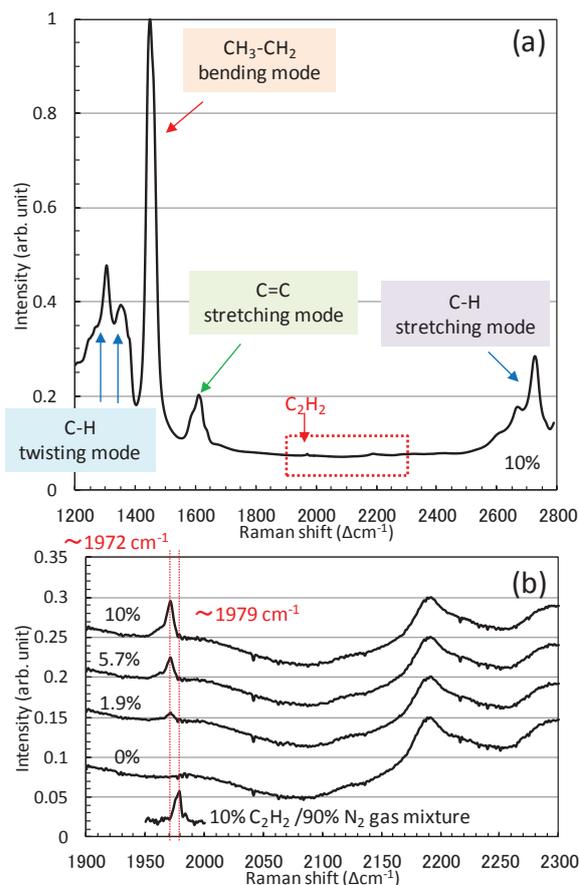


図5 (a)10%油溶存アセチレンのラマンスペクトル、(b)0, 1.9, 5.7, 10%油溶存アセチレンと10%アセチレンガス(90%窒素ガス)のラマンスペクトル

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。アセチレンの検出限界の検討には図5(b)に示した油由来と考えられる~2191 cm^{-1} のラマン信号とアセチレン(~1972 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にアセチレン(~1972 cm^{-1})と油(~2191 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10回測定の平均値からの誤差である。原点を通る傾き0.0825の直線できれいにフィットできている。検出限界の検討にはアセチレンガスが溶存していない0%の場合の1952~1977 cm^{-1} における信号強度の標準偏差 σ を利用した。3 σ の値(図5中の点線)を用いて計算したラ

マン信号強度比（～0.031）が赤点線であり、この直線との交点から検出限界は0.37%であった。

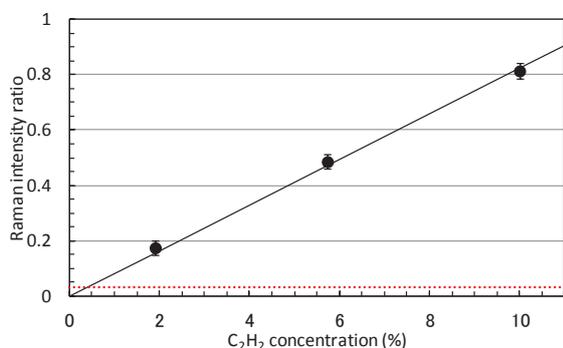


図6 ラマン信号強度比と油溶存アセチレン濃度の関係（点線は信号強度の 3σ ）

3. まとめ

油入り変圧器では油に溶存したガス種を検出することで異常診断が行われている。ガス種の同定には実験室での複雑な前処理行程を必要とする分析によって行わ

れるため、その場での簡易な手法としてレーザーラマン分光法を用いた油溶存ガスの検出手法の開発を行っている。

波長 532 nm のパルスレーザーを用いて油溶存アセチレンからのラマン信号の検出に成功した。本手法を利用すれば、レーザーを油に照射するだけで、その場で変圧器の異常を診断することが可能となる。現状の検出限界は 0.37%と大規模な放電がおこった際のみ検出が可能のため、今後は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, A. Tani, and M. Fujita: Appl. Phys. Express, **4**, 112401, 2011.
- 3) T. Somekawa, M. Kasaoka, F. Kawachi, Y. Nagano, M. Fujita, and Y. Izawa: Opt. Lett., **38**, 1086-1088, 2013.

レーザーを用いたコンクリート健全性診断装置の開発

レーザー計測研究チーム

島田義則、コチャエフ オレグ、篠田昌弘¹、御崎哲一²、高橋康将²、瀧浪秀元²

¹ (公財) 鉄道総合技術研究所

² 西日本旅客鉄道 (株)

1. はじめに

近年、高度成長期に建設された構造物が老朽化し、維持管理技術の確立が焦眉の課題となっている。鉄道では新幹線トンネルの覆工コンクリートが剥落し、列車のパンタグラフや屋根を損傷した例があり、高速道路でも大きな事故が起こっている。

現在の定期検査では打音検査法が主に用いられている。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、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、接触式超音波探傷法や電磁波検出法、赤外線検出法、レーザー法などが開発されてきた。接触式超音波探傷法と電磁波検出法ではコンクリート表面の近くで検査を行う必要がある。赤外線検出法は、初期にコンクリートを熱する作業が必要で、且つ、コンクリートに接近して計測する必要がある。一方、レーザー法は、遠隔かつ非接触で検査が行え、他の方式に比べて探傷箇所的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利点がある。

このような観点から、当研究グループではレーザー法の実用化を目指して、探傷技術に関する基礎実験を行い、装置の開発を進めてきた。図1にレーザーを用いたトンネル覆工コンクリート探傷装置の概念を示す。レーザー装置と検出光学系を車両に積載し、自走しながらレーザー照射位置を走査してコンクリート全断面を検査する。

本稿では、これまでの装置開発の概略を簡単に紹介し、新幹線トンネル内の中央通路を走行できる装置を構築して、新幹線トンネル内において欠陥検出実験を行った結果について述べる。

2. 開発の経緯

レーザー法の原理を図2に示す。振動励起用パルスレーザーをコンクリート表面に照射し、コンクリート表面に微小振動を発生させる。振動検出用レーザー（連続光）をコンクリート表面に照射し、反射された光を検出する。内部欠陥の有無により表面振動モードが異なるため、反射光のスペクトルを解析して振動モードを判別することにより内部欠陥の有無を判断できる。

ここで、問題となるのが、コンクリートの表面粗さである。コンクリート表面で反射された光にはコンクリート表面粗さに起因する波面の乱れが含まれており、表面の微小振動による信号のみを区別して取り出すことが

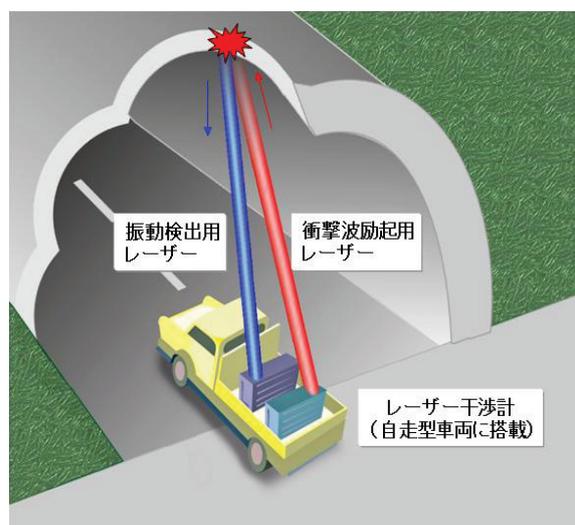


図1 レーザーを用いたトンネル覆工コンクリート検査装置

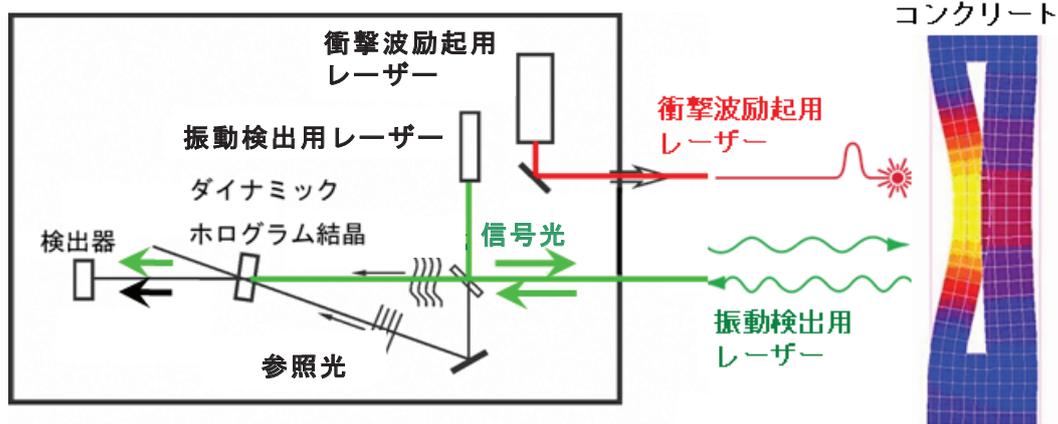


図2 レーザー法の原理

困難で、検出精度が低下する。これを防ぐためダイナミックホログラム結晶（DHC）を使用した光検出方法を用いた。検出用レーザーを検出装置内で光束分配器により信号光と参照光に分け、信号光をコンクリート表面に照射する。表面振動を誘起する前に、コンクリート表面形状の情報を持った反射光と擾乱を受けていない参照光をDHC中でまず干渉させ、コンクリート表面形状に関するホログラムをDHC内に形成しておく。DHC内での位相共役効果を利用して、あらかじめ書き込まれたコンクリート表面形状の情報を差し引いて出力するようにしておけば、表面形状に起因するレーザー波面の乱れは除去され、コンクリートの表面振動による信号のみを高感度で検出できる。この方式により、10 m離れた位置から内部欠陥を判別できることを確認した。

一方、レーザー干渉法は波長程度の振動振幅を検出できるので外乱に弱い。トンネル内では、牽引に伴う機器自身の振動や騒音により信号に大きなノイズが混入する。このため、装置に防振、防音対策を施し、新幹線トンネルでの実地試験を行い、開発したレーザー探傷装置が内部欠陥検査装置として十分な性能を有することを

確認した。開発の経緯の詳細は文献1)を参照されたい。

3. 装置の小型化と新幹線トンネル内のコンクリート検査実験

実用化に向けた開発の最終段階は装置の小型化である。新幹線トンネル内にはメンテナンスのための中央通路がある。中央通路を走行してコンクリート健全度が判断出来れば、将来、昼間でも検査が可能となる。これに向けて装置の小型化を図り、中央通路を走行して検査が可能な検査システムを構築した。装置の外観を図3に示す。小型化のため、レーザーと電源を別々の車両に搭載し、その両側に牽引車を配置する構成とした。除振のため、制動付きバネ吊り下げ光学定盤を用い、レーザーを含めた光学系はすべてこの定盤上に組上げた。また、レーザー車全体に防音対策を施した。

図4に示した照射窓を開き、そこからコンクリートに向けてレーザーを照射した。装置からコンクリート表面までの距離をレーザーで測定し、レーザーの焦点位置が常にコンクリート表面に来るように制御した。このレーザー測距はコンクリート以外の架線等付帯物にレーザ



図3 新幹線トンネル内中央通路走行型レーザー検査装置外観



図4 レーザー車



図5 新幹線トンネル内でのレーザー検査装置

ーが照射されていないことを確認する役目も持つ。電源車にはレーザーや計測装置類を駆動させるためのバッテリーとインバーター等を積載した。4~5 時間の検査が可能である。

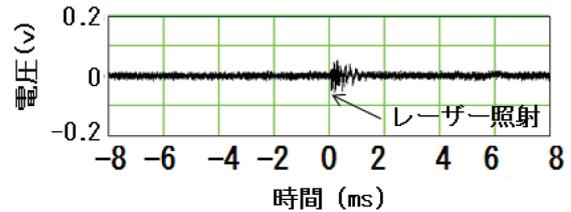
図5は新幹線トンネル内で検査中の写真である。レーザーの制御や計測は牽引車に搭載されたパソコンにより行った。

検査箇所を図6に示す。覆工コンクリートにひび割れが入り、補修を行った部分である。また、比較のため健全箇所のデータも取得した。信号波形を図7に示す。横軸が時間、縦軸は検出器からの電圧出力である。

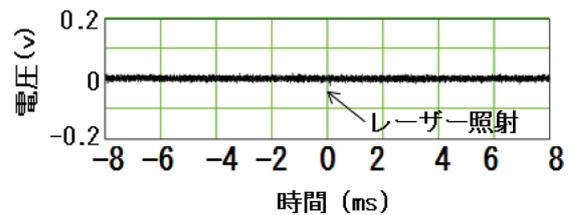
図7 a)ではレーザー照射直後に振動波形が見られる。この信号はコンクリートが完全に密着しておらず浮いていることを示している。一方、図7b)では振動波形が



図6 レーザー照射位置



a) 検査部を照射した場合の信号



b) 健全部を照射した場合の信号

図7 欠陥部分と健全部分を照射した場合の信号波形変化

見られない。健全部のコンクリートは振動していないことを示す。これにより、コンクリートの健全性評価が可能であることが確認できた。

4. まとめ

これまでの成果を基にして装置の小型化を進め、新幹線トンネル内の中央通路を走行可能な検査装置を構築した。新幹線トンネル内の覆工コンクリートに生じたひび割れ箇所に適用して装置の性能確認試験を実施し、健全部と欠陥部の判別や浮き欠陥の検出が可能であることを明らかにし、コンクリートの健全性評価へのレーザー法の適用可能性を実証することができた。

参考文献

1) Oleg Kotyaev: ILT 年報, レーザー技術総合研究所, 2013.

Development of laser-based system for remote non-destructive inspection of Shin-kansen tunnels

Laser measurement team

Oleg Kotyaev, Yoshinori Shimada

1. Introduction

The present report gives a brief historical review of development and examination of laser-based system intended for remote inspection of concrete structures. The research and development in this direction was started in 2001. Since 2004 it has been supported mainly by the West Japan Railway Company (JR West). Therefore, the main application of the system is inspection of railway tunnels, especially, in Shin-kansen bullet train lines¹⁾.

Expected advantages of the novel technology are following: real remote inspection, high sensitivity, insensibility to surface roughness, high operation rate.

In cooperation with the JR West, the laser-based inspection system was designed, assembled and tested both in laboratory and field conditions. In this report, basic steps of this development will be presented.

2. Principle of operation

Figure 1 shows the principle of the system operation. The main units of the system are impact laser, probe-detection laser and photorefractive interferometer. Laser pulse generated by the impact laser initiates vibration in the inspected area. CW

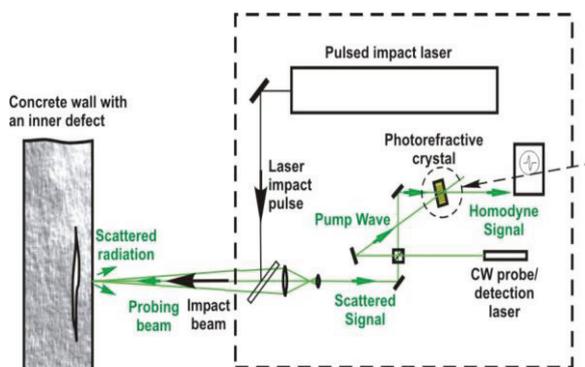


Fig. 1 Principle of operation.

probe/detection laser illuminates the inspected area. Radiation scattered by the inspected area is used as a working signal. Due to initiated vibration, the signal is phase-modulated. Process of two-wave mixing of the phase-modulated signal and monochromatic pump in photorefractive material leads to conversion of phase modulation into amplitude modulation. This process results in forming the homodyne signal which contains information of vibration initiated in the inspected area. Laser impact initiates wide range of vibration frequencies. The present system is supposed to work with low-frequency natural vibration. If concrete layer in the inspected area is thick (no-defect case), then initiated vibration amplitude will be comparatively low (Fig. 2, top). However, if there is an inner defect, then so called standing Lamb wave will be initiated in the concrete layer between outer surface and inner defect. Its amplitude will be much higher and corresponding spectrum will have strong peaks (Fig. 2, bottom). So, the presence of powerful standing Lamb wave can be used as a criterion of the presence of inner defects.

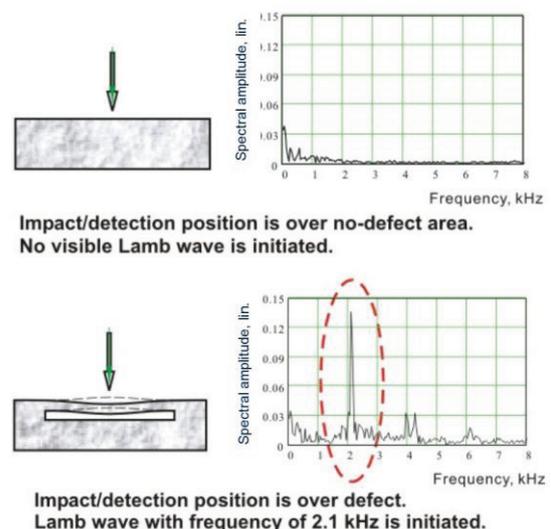


Fig. 2 Criterion of defect location.

Using data of amplitude and spectrum of detected vibration it is possible to conclude how dangerous the inner defects are. The most dangerous defects are characterized by low frequency (below 2 kHz) and high amplitude of initiated vibration.

3. Laboratory tests.

One of numerous variants of laboratory layout is shown in Fig. 3. In this layout, Nd:YAG laser is used as an impact laser. Pulse energy is 0.4 J. Pulse duration is 10 ns. CW Nd:YVO laser with 2-Watt output power is used as a probe/detection laser. BSO crystal is used as a photorefractive material.

The system is equipped with 2-D scanner which allows to control direction of both impact and probe beams simultaneously. Concrete samples with various types of inner defects were provided by the JR West.

At first, we completed basic research in the laboratory²⁾: test of various photorefractive materials, optimization of two-wave mixing parameters, tests of laser impact on concrete, evaluation of detectable vibration amplitude etc.

After the basic research, we tested the performance of our system in laboratory conditions³⁾. Figure 4 shows waveforms and corresponding spectra (in linear scale) of vibration initiated in three different points on the inspected concrete sample.

When impact/probe position is in the sample center (and in the center of inner defect), the first fundamental mode of standing Lamb wave is initiated with 3.1 kHz frequency (Fig.

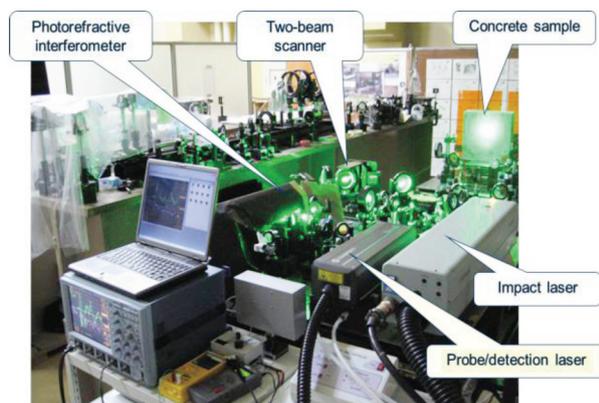


Fig. 3 Laboratory setup.

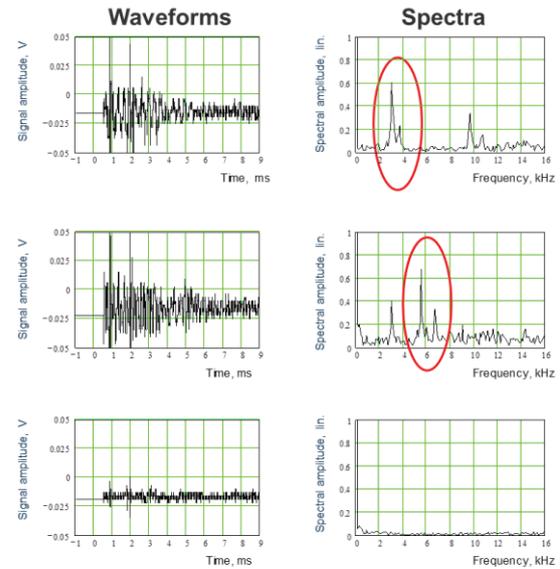


Fig. 4 Vibration signals detected in laboratory tests (see text).

4, top). When impact/probe is between the defect center and its edge – the second “harmonic” is initiated with 5.8 kHz frequency (Fig. 4, middle). When no-defect area is inspected, then no detectable vibration is initiated (Fig. 4, bottom).

We tested numerous samples with different types of inner defects and all detectable defects were recognized using our system. The results were verified with the use of conventional hammering at the presence of hammering expert from JR West. Positive results of the laboratory tests aimed us at testing the system in the field conditions.

4. The first tests in a real tunnel and the JR West testing site.

In 2005, a mobile prototype of the system was assembled (Fig. 5) and delivered to an old tunnel in Takarazuka area³⁾. In Figure 6, the system is during the inspection procedure. Natural defect area in the real tunnel wall (inner void with size of 20 × 20 cm) is inspected by laser system for the first time.

In the very first attempt, the vibration signal was detected. Figure 7 shows the defect area, waveforms and spectra detected in the defect center (top) and no-defect area (bottom). Red ring indicates the impact/probe position.

The defect area was scanned in vertical and horizontal



Fig. 5 One of the first mobile prototypes.



Fig. 6 The first tests in real tunnel. Inspection distance—2.5 m.

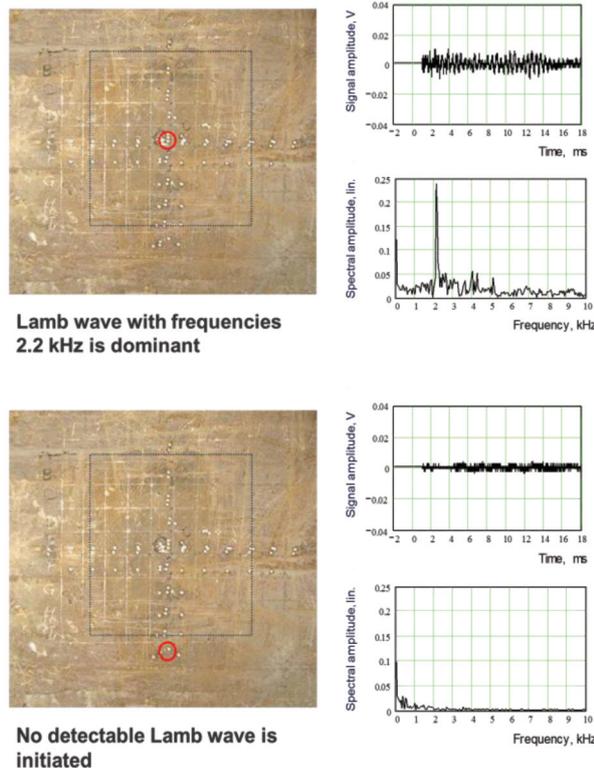


Fig. 7 The defect area and vibration signals.

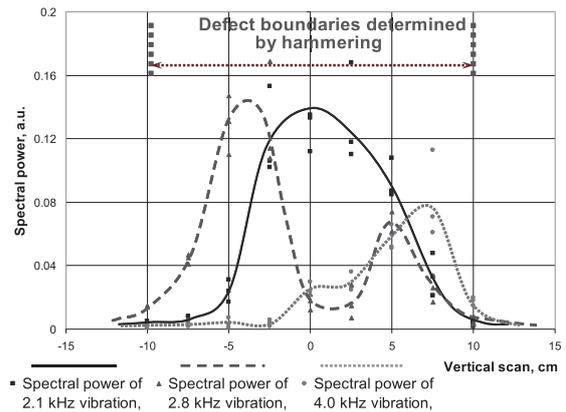


Fig. 8 Defect in the Takarazuka tunnel wall. Distribution of spectral amplitude over defect area.

directions. Vertical distribution of spectral amplitude over the defect area in presented in Fig. 8. Three modes of standing Lamb wave are shown.

The defect area had no surface cracks, so, the defect could not be recognized visually. It was found during preliminary exploration with the use of contact method - conventional hammering. However, the laser-based system demonstrated capability of remote reliable recognition of real inner, invisible defects in the field conditions. Initiated standing Lamb waves are detected within defect area at 1-2 cm from actual defect boundary. This accuracy of defect recognition is quite enough for inspection of concrete structures.

It should be noted that the tunnel where the first tests were carried out is comparatively small. Maximum detection distance did not exceed 2.5 m. However, the system is supposed to be used in Shin-kansen tunnels with inspection distance of 5 - 8 m. To verify capability of defect recognition in this distance range, the system was delivered to the JR West testing site in Suita city (Osaka pref.). Figure 9 shows the system and concrete specimens distanced 5 meters away.

Here, the specimen also has an inner defect without surface cracks (inner 25 × 30 cm void at 2 cm depth). Clear, reliable recognition of this defect by the laser-based system has been demonstrated even from inspection distance of 5 m which corresponds to radius of actual Shin-kansen tunnel.

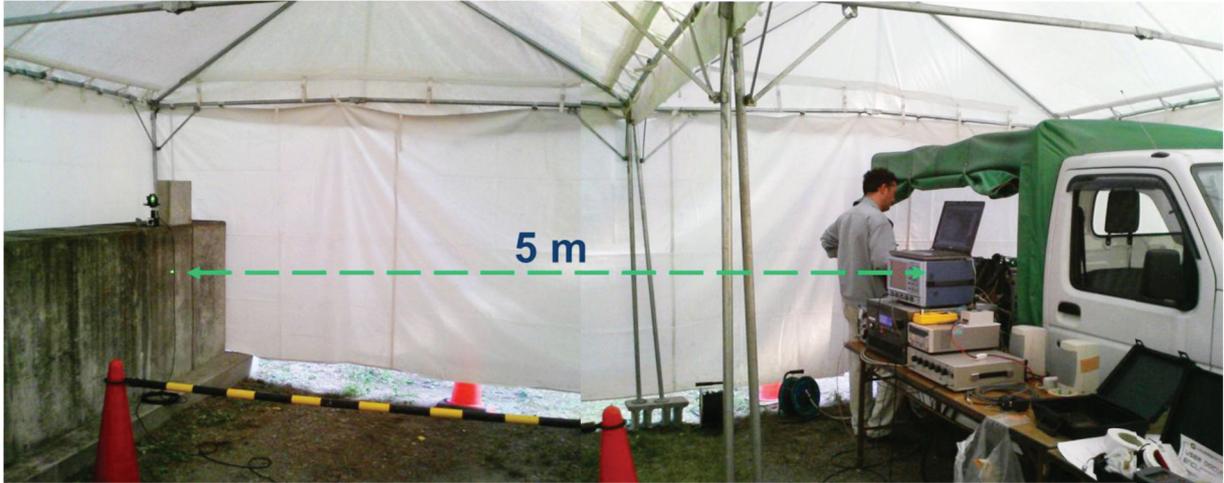


Fig. 9 Experiments at the JR West testing site. Detection distance—5 m.

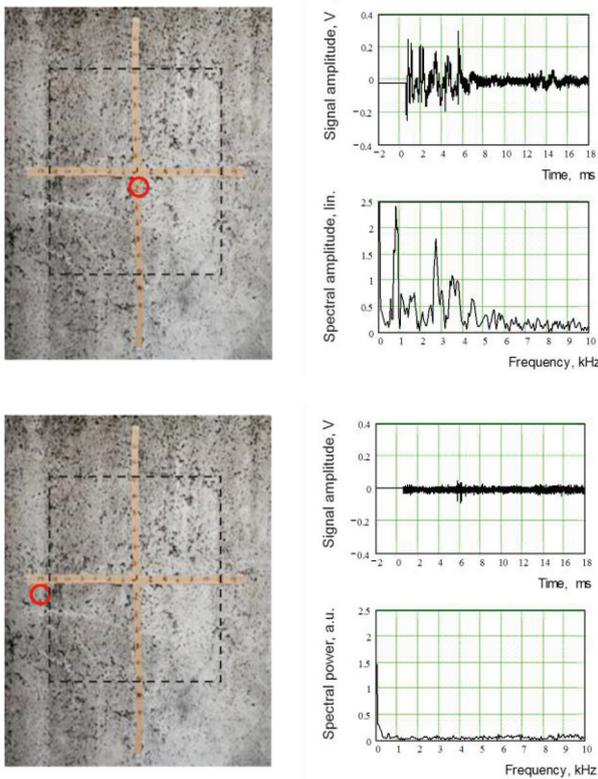


Fig. 10 The defect area and vibration signals. Distance—5 m.

Figure 10 shows waveforms and spectra of vibration initiated in the defect area: in its center (top) and in to-defect area (bottom). Here, like in the Takarazuka tunnel defect, various modes of standing Lamb waves were detected. The main components have frequencies of 0.8, 1.9 and 2.7 kHz. Distribution of spectral amplitudes of these components over the defect area (Fig. 11) allows to say that the defect is detected

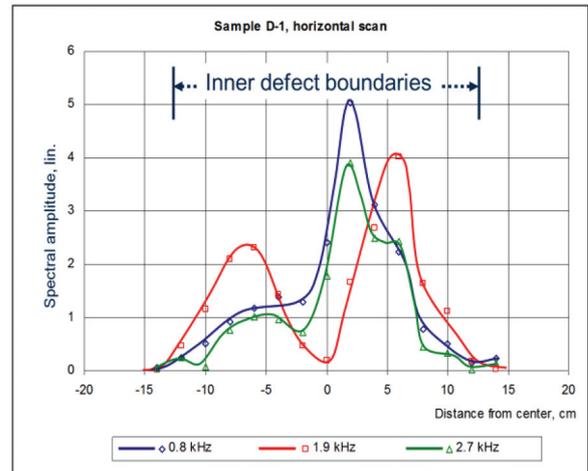


Fig. 11 Defected specimen in the JR Suita testing site.

Distribution of spectral amplitude over defect area.

with accuracy about 2 cm.

So, the system seems to be ready for going to real Shin-kansen tunnel. However, some modifications are necessary (see next Chapter).

5. The system with stabilization of interference pattern and real-time data processing.

Sensitivity of the laser-based system for vibration detection is pretty high. Direct measurement in the laboratory demonstrated possibility of detection of vibration with total displacement less than 1 nm. However, high sensitivity makes the system to be sensitive to various noises. Mechanical

vibration produced by working engine or fans, various acoustic noise results in parasitic modulation of laser signal. As a result, interference pattern inside photorefractive crystal becomes unstable making the vibration detection unreliable or even impossible. To reduce this influence, the special unit for stabilization of interference pattern has been developed and put into operation. Figure 12 shows optical layout with the stabilization system.

Stabilization is realized by analyzing current position of interference pattern and introducing necessary feedback to the laser signal optical path with the use of specially designed mirror mounted on piezo-actuator.

Stabilization of interference pattern is one of the functions of new operation algorithm. As well, the algorithm controls impact/probe positions over inspected area; produces the start-command when interference pattern is considered to be stabilized; and carries out real time data processing with recognition of defect situation. Output of the data processing is 2-D map of the inspected area.

Next figures show the results of testing the flawless concrete sample (Fig. 13) and the sample with inner void (Fig. 14) with the use of the new-design system. Concrete samples were scanned in automatic mode and 2-D maps of the inspected areas were produced in real-time. Green area means no-defect situation; red area – defect case.

Each figure presents vibration signals obtained in three

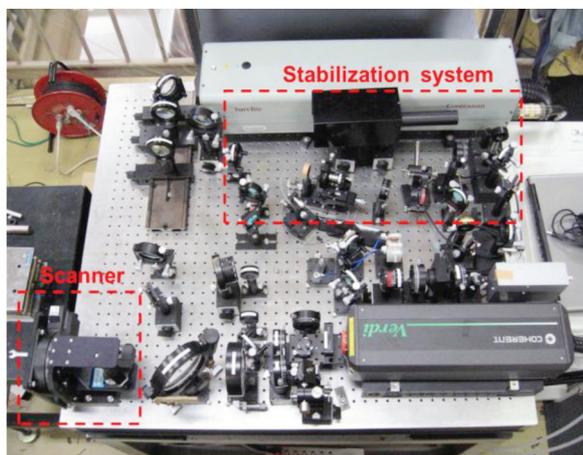


Fig. 12 Laboratory layout with stabilization system.

points A, B and C over the samples.

As it was expected, no vibration was detected in the flawless sample. However, in the defected sample, clear vibration signals of various standing Lamb wave modes were obtained and beautiful 2-D map was created.

We tried to simulate possible modes of standing Lamb wave in this sample. Figure 15 shows the results of simulation.

The system can recognize inner defects which have quite complex shapes. Figure 16 shows the sample with hidden “J” and “R” characters. 2-D map generated by the system makes these characters “visible”.

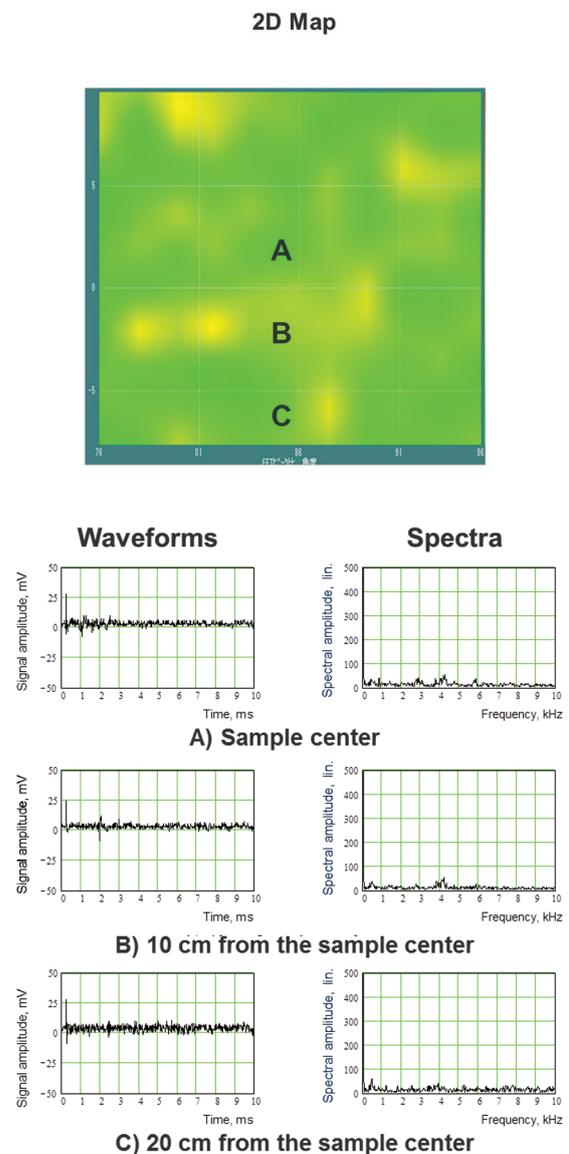


Fig. 13 2-D map and vibration signals in a flawless concrete sample.

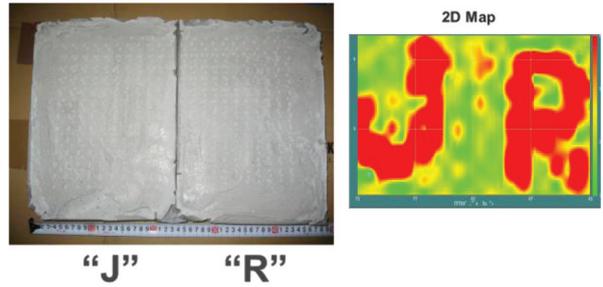
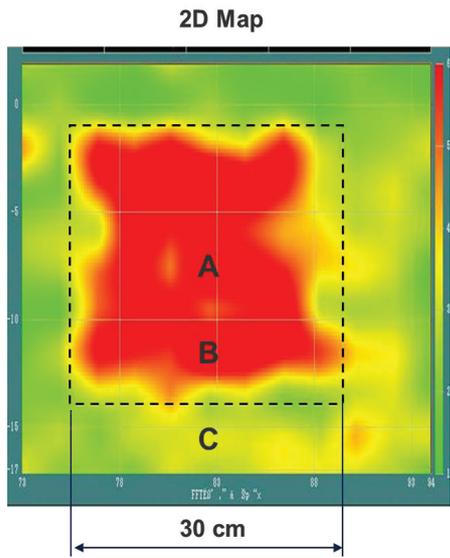


Fig. 16 Location of inner defects with complex shape.

6. Test of the system with stabilization of interference pattern and real-time data processing in the field conditions.

After the laboratory tests, the new system design was tested in the field conditions. It was delivered under a small bridge between two Shin-kansen tunnels near Kobe city (Hyogo pref.). Figure 17 shows the system under the bridge. Detection distance is about 4 m.

The bottom part of the bridge had a small defect at the edge of concrete plate. We had a chance to test our system operation using this defect area before it is repaired. The system has demonstrated outstanding performance. The defect area and its 2-D map are shown in Fig. 18. Figure 19 presents screenshots

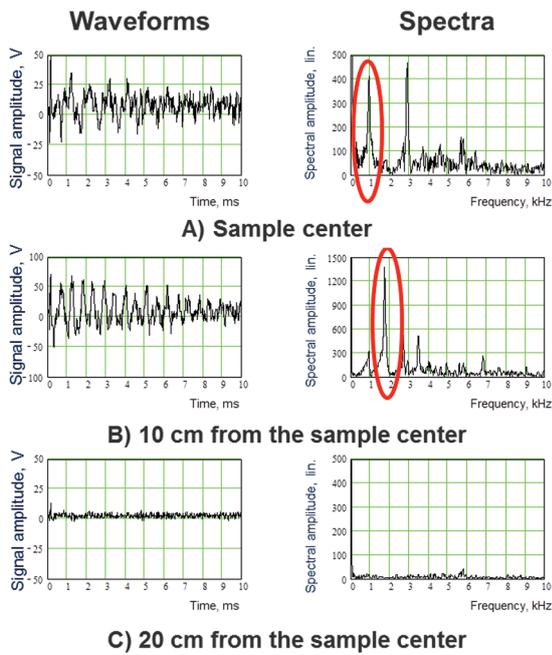


Fig. 14 2-D map and vibration signals in a defected concrete sample.

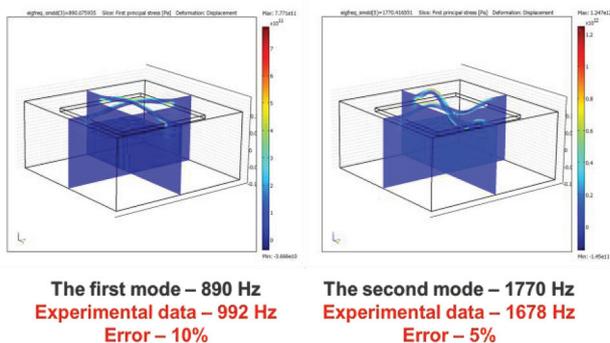


Fig. 15 Simulation of two modes of initiated vibration.



Fig. 17 The system is under Shin-kansen line bridge.

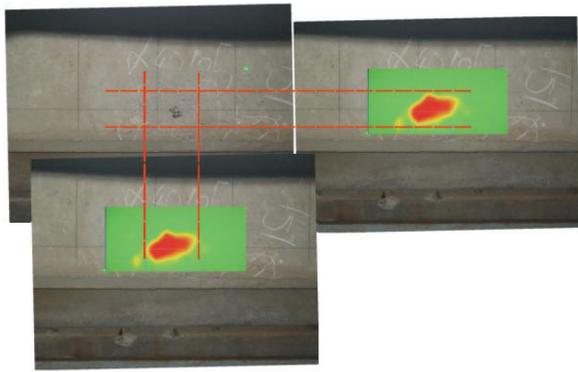


Fig. 18 Defect area on Shin-kansen line bridge and 2-D map.

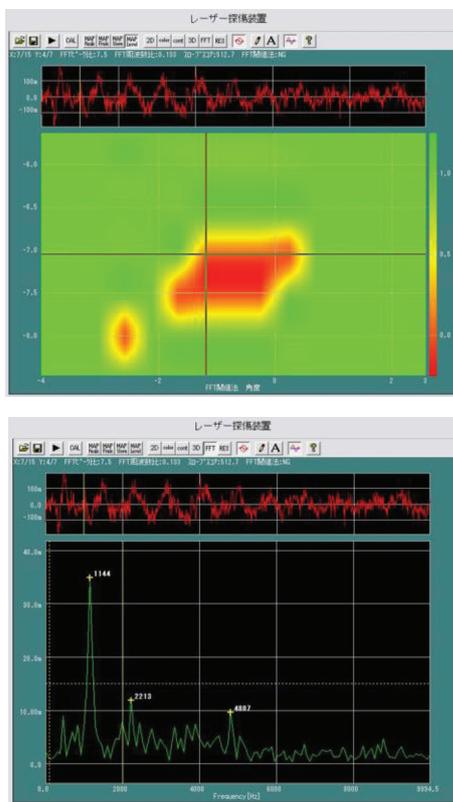


Fig. 19 Screenshots of the processing algorithm (see text).

of the 2-D map itself (top) and vibration data from one of the map points (bottom): vibration waveform and its spectrum. All data were obtained in real-time, immediately after the scanning procedure was finished.

One of the advantages of using the new control/processing algorithm is possibility to choose proper moment for generating impact laser pulse and starting the vibration measurement operation (the start-command). Sometimes, Shin-kansen trains were passing on the bridge; and the bridge

was bouncing making the defect inspection impossible. However, the system automatically interrupted the vibration measurement operation when the bridge bouncing is too strong and automatically resumed the operation after the bridge bouncing was relaxed.

After these test, it was decided to prepare the system for going to real Shin-kansen tunnel.

7. Preparation of the system for going to real Shin-kansen tunnel.

It should be noted the Shin-kansen line and its tunnels are extremely restricted objects. To get the permission for working there, it is necessary to follow a lot of very strict regulations. The first real prototype of our system was supposed to be loaded on a railway flat wagon and a diesel locomotive should be used as a system carrier. One of the regulations is that the system carrier engine must be working all the time. Within preliminary experiments, we investigated vibration environment in tunnel and found it to be very tough. The working diesel produces strong mechanical vibration and very loud acoustic noise. These factors affect the detection performance significantly.

Just loading the small track with our system on a flat wagon (Fig. 20) was not enough for acceptable operation in tunnel conditions. Several attempts of using the system without additional vibration and noise protection were not reliable.



Fig. 20 One of the first system prototypes on a flat wagon.

To protect our system against outer vibration, a special 3-tonn optical table with air suspension was designed (Fig. 21). As a result, influence of outer vibration was reduced by 25 dB. For protection against strong acoustic noise, entire system was covered later by specially designed sound-proof walls and roof (Fig. 22). Resulting noise reduction was better than 15 dB. Actually, we expected more effective sound protection, but it is better than nothing.

Before going to real Shin-kansen tunnel, we tested the system in a box culvert at the Shin-kansen line maintenance site⁴⁾. The box culvert had a small defect at the corner between the culvert wall and ceiling. The defect area was inspected by the system (Fig. 23).

Figure 24 shows the defect area with its 2-D map produced by our system. The defect was clearly recognized. Figures 25 and 26 show 2-D map screenshot and vibration signals in 6 points



Fig. 21 The system with vibration-proof table.



Fig. 22 The system with the sound-proof cover.

of the scanned area.

Scanning was made with 25-cm steps. Approximately this step size is supposed to be used during actual inspection. Basically, the defect was recognized, the signals over defect area have comparatively strong spectral amplitude. However, the current algorithm of defect recognition should be modified and improved. Point 6 is actually over the defect area. But it was not recognized as defect. Vibration waveform in this point has comparatively strong amplitude but its spectrum has no high peak (like in Point 5). However, average level of spectral amplitude is higher than in no-defect area (Point 3). So, the next version of the processing algorithm should use more appropriate criteria of defect recognition.



Fig. 23 The system in a box culvert.

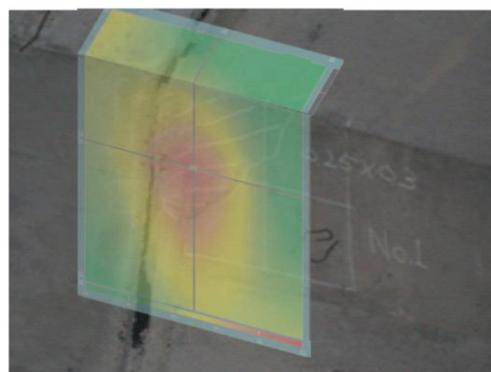


Fig. 24 Defect area in the box culvert.

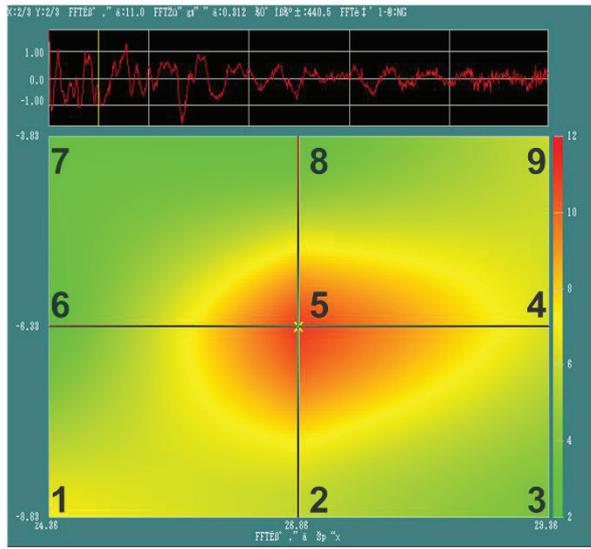


Fig. 25 2-D map of the box culvert defect area.

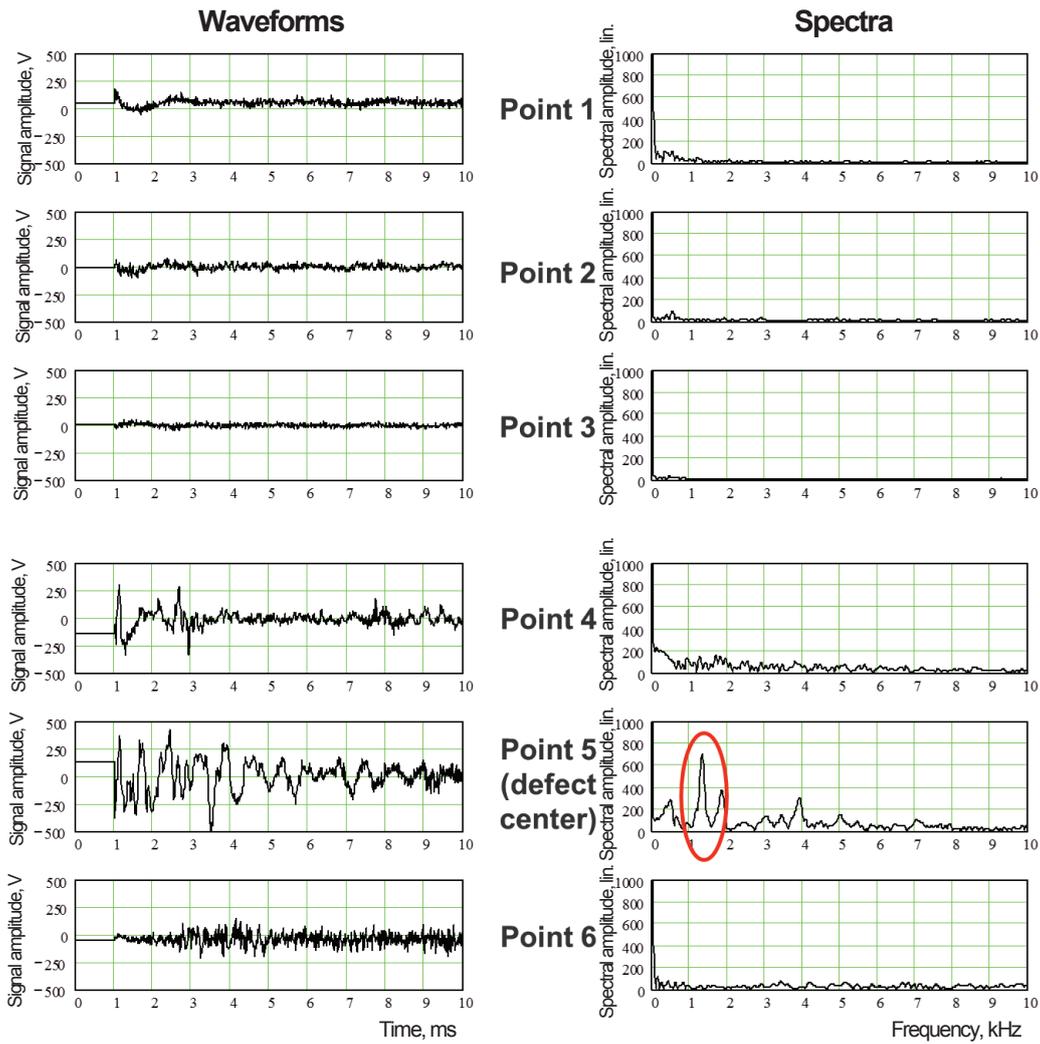


Fig. 26 Waveforms and spectra of vibration signals recorded in the box culvert.

8. Test of the system in real Shin-kansen tunnel.

The main tests have been carried out in three tunnels of Sanyo Shin-kansen line in November-December 2011. The main goal of these tests is evaluation of defect recognition capability provided by our system. One of the main conditions of the tests is inspection of as many as possible defect locations in tunnel walls and ceiling.

Before going to the tunnel with the laser system, we explored the tunnel walls and ceiling with a hammer. The tunnel hosting companies (JR West and RaiITech Co) provided information of known defect locations; and we chose the most interesting defects. We selected both defect and no-defect points. In total, 27 defect locations have been chosen, 68 defect and 35 no-defect points have been selected for the tests. One of typical defect locations used in these tests is shown in Fig. 27.

Here pink marks are the points chosen for the experiments:



Fig. 27 Defect area in Shin-kansen tunnel.

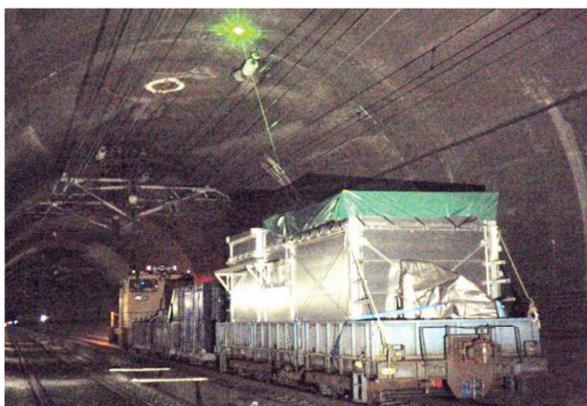


Fig. 28 Mobile prototype of laser-based system in operation.

round marks – defect points, square marks – no-defect points. In these experiments, we did not use 2-D mapping of defect locations. To evaluate the defect recognitions capability, we examined the certain points and compared our results with conventional hammering data.

Here, three laser units were used for producing laser impact: two CO₂ lasers and one Nd:YAG laser. Total energy of two CO₂ laser pulses is 8 J, pulse duration is 100 ns; and the Nd:YAG laser generates 1.5 J in 10 ns pulse. All lasers strike an inspected area of about 3 × 6 cm². A CW Nd:YVO laser with 2-Watt output power is used as a probe/detection laser.

Figure 28 shows the system prototype inspecting the Shin-kansen tunnel ceiling. Detection distance is about 6 m.

Figures 29 and 30 show typical waveforms and corresponding spectra in defect and no-defect areas, respectively.

This result looks very promising. The main summary is that all 27 defect locations tested in the experiments in Shin-kansen tunnels have been recognized using modified algorithm with good and excellent capability.

9. New way of using the laser-based system for inspection of Shin-kansen tunnel.

After the experiments described in the previous Chapter, the

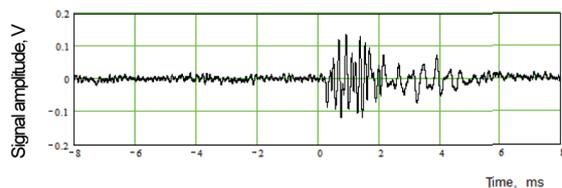


Fig. 29 Waveforms and spectra in a defect area.

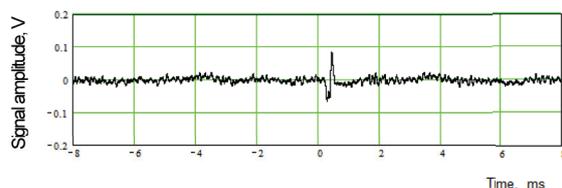


Fig. 30 Waveforms and spectra in a no-defect area.

JR West Company decided to change the way of using the laser-based inspection system. The main idea is that the system should be delivered to Shin-kansen tunnel without using Shin-kansen train lines. In this case, the use of the system may be more flexible and independent on the other working teams. Even there is principle possibility of tunnel inspection during day time. This is a great opportunity to remove usage limitation, when the system loaded on a railway flat wagon can be used only during night time (when Shin-kansen transportation is stopped). Moreover, in this case, there will be



Fig. 31 New design of the system carrier.



Fig. 32 “Yellow system” in Shin-kansen tunnel.

no diesel producing strong vibration and big noise. That meant there is no need to use very expensive vibration and noise protection.

To realize the new idea, the maintenance gap between Shin-kansen lines in tunnel can be used for the system transportation. The size of the gap is about 1.5 m in width and 1 m in depth. So, the system design should be more compact.

For this purpose, the system design has been totally modified. Now, only one laser impact unit is used – Nd:YAG laser with energy up to 1.5 J. Interferometer table and impact laser are loaded on specially designed compact carriage shown in Fig. 31 (“The Yellow System”). Its size is about 3 m in length and 1 m in width. Another carriage of the same size is used for moving electric batteries, laser power supplies and laser cooling system. Two carriages are supposed to be moved by specially designed electro-buggies. Two buggies for two directions (Figure 31 shows only one buggy).

In the beginning of 2013, the new system was delivered to Shin-kansen tunnel for the first tests.

Figure 32 shows the system inside the tunnel. Unfortunately, because of the buggy faulty conditions, we had no permission to go into the tunnel farther than 50 m this time. Initially, we planned to test the system 2 km far from the tunnel entrance where interesting defects are located. Near the tunnel entrance where we were permitted to carry out our experiments, there were no defect locations. We found that the defects used in the previous experiments had been repaired. So, to test our system,



Fig. 33 The new system inspects concrete sample in tunnel.

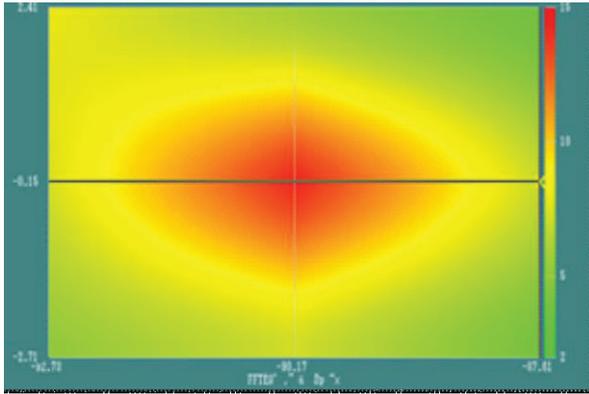


Fig. 34 2-D map of concrete sample.

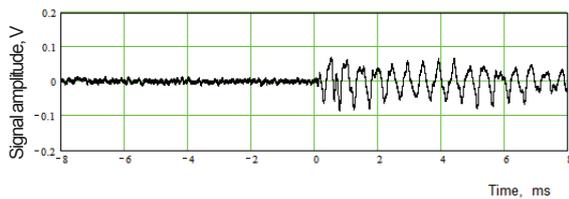


Fig. 35 Waveforms and spectra of vibration initiated in the center of concrete sample.

we used one of laboratory samples. Figure 33 shows the system inspecting the sample. Acceptable 2-D map of the sample inner structure was generated by the data processing algorithm (Fig. 34). Figure 35 shows vibration waveform and spectrum recorded in the sample center.

Actually, we tried to test repaired defect as well. Figure 36 presents waveforms and spectra recorded over former defect area (top) and in no-defect area. Despite the repaired situation, some difference in vibration signals is still visible.

10. Summary.

The presented report gives brief description of about 30 % of experimental work carried out within the development of the laser-based inspection system. A lot of experimental study and many technical tests are not included in the report.

The main result of this big project is actual development,

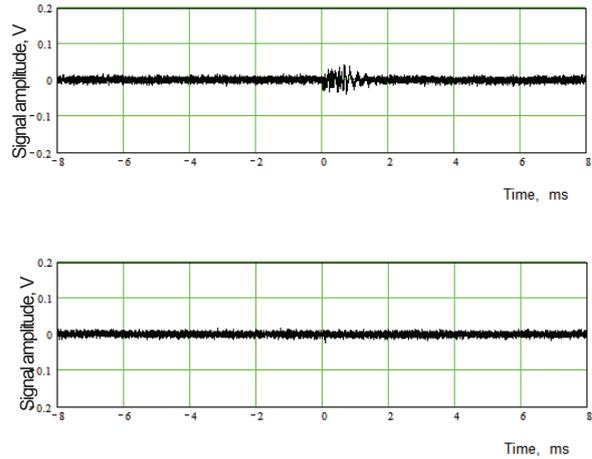


Fig. 36 Waveforms and spectra of vibration initiated in the repaired defect location. Top – former defect area (repaired), bottom – no-defect.

assembling, prototyping and testing the first in the world laser-based system for remote inspection of concrete tunnels. Very promising results with high reliability of defect recognition allow us to consider this system to be an attractive replacement of conventional contact inspection methods.

Now the project is on the stage of industrial design of the system. The “Yellow system” is a real prototype of this design. We hope that after some modification in the system carrier and some improvement of real-time data processing, the system will be put into real operation.

References

- 1) Y. Shimada, O. Kotyaev, ILT Annual Progress Report, ILT, 2007.
- 2) O. Kotyaev and S. Uchida: Proceedings of SPIE, **4702**, 241, 2002.
- 3) O. Kotyaev, Y. Shimada, K. Hashimoto: Proceedings of the 9-th European Conference on Non-Destructive Testing, 23, 2006.
- 4) Y. Shimada, O. Kotyaev, N. Misaki et al.: Journal of the Japan Society for Non-destructive Inspection, **61**, 519-524, 2012 (in Japanese).

可搬型レーザーを用いた碍子表面塩分計測

レーザー計測研究チーム

島田義則、谷口誠治、本越伸二、加藤宏太

1. はじめに

碍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。碍子は野外に設置されることが多く、塩分が付着しやすいため、定期的に着着量を測定して、一定値を越えている場合には洗浄を行い、閃絡事故を防いでいる。塩分付着量の測定には筆洗法¹⁾(ハンド測定)を用いることが一般的であるが、所定量の蒸留水で碍子表面の塩分等を拭き取る作業が必要で手間がかかる。

本研究チームでは、レーザーを用い、碍子に付着した塩分量を、非接触で、かつ迅速に測定できる可搬型装置の開発をめざして研究を行ってきた。プレパルスレーザーを碍子表面に照射して塩分を表面から飛散させ、メインパルスレーザーでプラズマ化して、ナトリウムD線(D1: 589.6 nmとD2: 589.0 nm)の発光量を計測するダブルパルス照射方式を用いている³⁾。プレパルスレーザーには碍子表面への影響の少ないCO₂レーザー(波長: 10.6 μm)を、メインパルスレーザーにはNd:YAGレーザー(波長: 1 μm)を選択した。

ナトリウムからの発光量が碍子表面の塩分濃度に比例することを基礎実験で確認し、発光量から塩分濃度を評価できる検量線を作成した。ここでは昨年実施したプレパルスレーザー(CO₂レーザー)の改良とそれを用いて曝露碍子の塩分計測を行い筆洗法と比較を行った結果について報告する。

2. プレパルスレーザーの改良

CO₂レーザーには、図1 a)に示すように、高い尖頭値ピークの後に、低強度のテール部分が存在するのが一般的である。テール部分は塩分を碍子から飛散させることには使用されておらず、碍子表面にダメージを生じさせる要因となる。これを防ぐためにレーザー装置内の放電管に封入するガス混合比を調整して高尖頭値は一定でテール部分のみ強度を低減させた。

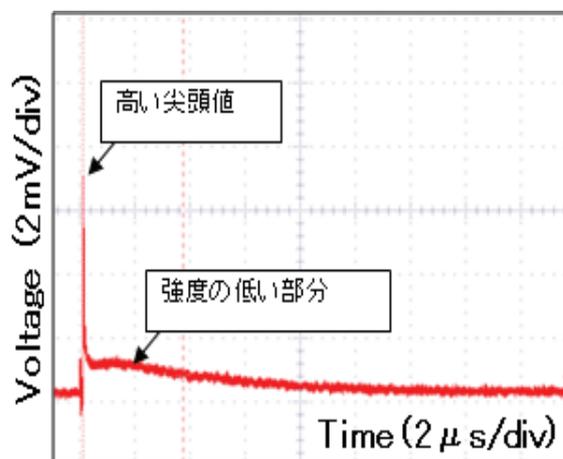
レーザーガス混合比を変化させた場合のパルス波形を図1

に示す。波形の観測にはフォトンドラッグ検出器を用いた。ガス圧は4 kPaである。図1 a)のHe:N₂:CO₂混合比2:1:1では高尖頭値から後方に低強度のテール部分が存在するが、図1 b)のHe:N₂:CO₂混合比1:0:1ではテール部分の強度が低下した。

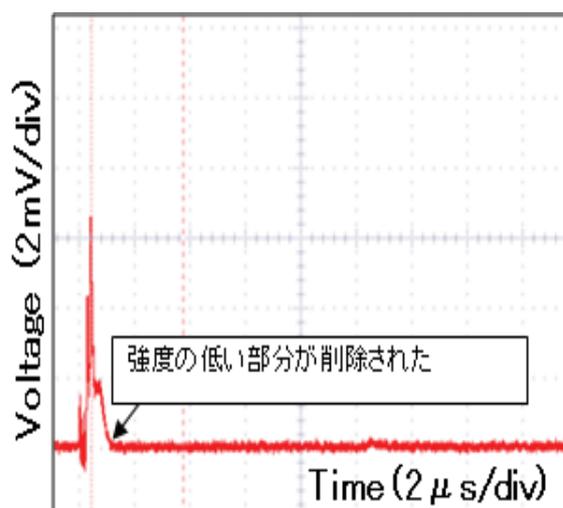
3. 曝露碍子の塩分密度計測

屋外で3ヶ月曝露した碍子の塩分密度計測を行った。

図2に碍子表面塩分計測の写真を示す。筆洗法との比較



a) He:N₂:CO₂=2:1:1



b) He:N₂:CO₂=1:0:1

図1 レーザーガス混合比を変化させた場合のパルス波形

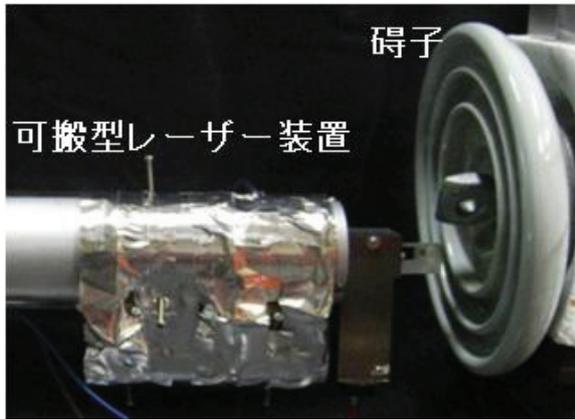


図2 碍子表面塩分計測写真

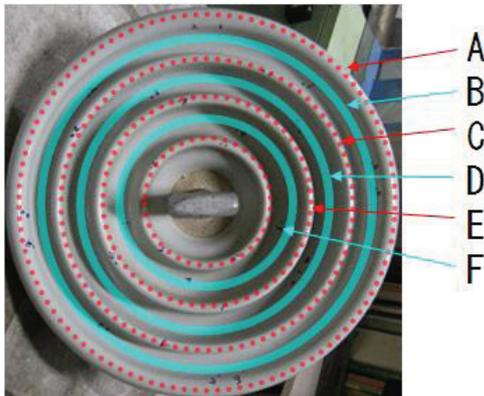


図3 碍子写真と計測領域（点線は山の部分、実線は谷の部分）

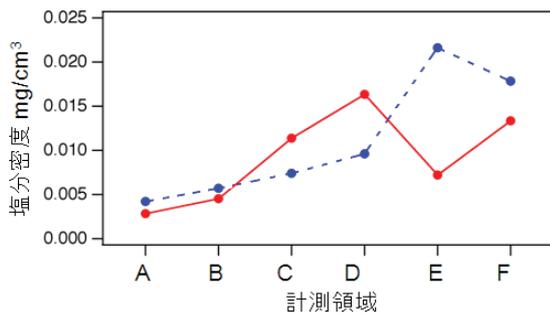


図4 曝露碍子の各領域での付着塩分密度（実線はレーザー計測、点線は筆洗法による）

には平均塩分密度が必要であり、碍子の裏面（ひだ）部分を、図3に示すように、山の部分と谷の部分の6つの領域（A～F、図3）に分け、それぞれの領域で16点以上（計96点以上）の計測を行いその平均値を求めた。レーザー計測後の碍子は6つの領域毎に筆洗法による塩分計測を行い、両測定値を比較した。結果を図4に示す。両測定とも碍子の外周の密度は低く、付着物が溜まりやすい内周に進むに従い密度が増加している。碍子の面積を考慮した碍子全体の平均密度はレーザー計測では0.0125 mg/cm²、筆洗法では0.0134 mg/cm²であり、計測値に差がある領域もあるが定量的にも良く一致した。また曝露期間が異なる別の碍子についても同様に計測を行ったところ、平均の塩分密度はレーザー計測で0.0092 mg/cm²、筆洗法では0.0058 mg/cm²で計測値の誤差は約2倍以内であった。

4. まとめ

碍子表面の塩分密度計測のため、可搬型のレーザー計測装置を作製し、曝露碍子の計測を行い、従来法である筆洗法との比較を行った。約2倍程度の誤差で筆洗法の測定値と一致した。

今後は、計測点や計測回数の最適化および、片手操作が可能な操作性の高い計測装置の開発等による計測時間の迅速化を図り、装置の性能を高める。

参考文献

- 1) 変電設備耐塩設計専門委員会: 電気共同研究, **35**, 125-128, 1979.
- 2) 秤 俊久: R&D News Kansai, **8**, 35-37, 1997.
- 3) 島田義則: ILT2012 年報, レーザー技術総合研究所, 2012.

光活性蛋白質の蛍光ダイナミクス計測による機能解明

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

本研究チームは、高効率の光機能性素子の開発や創薬分野等への応用を目指して、生体内で様々な機能を果たす蛋白質や酵素等、種々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、マラリア原虫内で特定の amino 酸（セリン）を代謝する役割を持つ酵素（セリンヒドロキシメチル転移酵素（SHMT））の光励起過程をフェムトピーコ秒時間分解蛍光計測法を用いて観測し、光による酵素反応制御の可能性について検討した結果を報告する。

2. セリンヒドロキシメチル転移酵素（SHMT）の機能とマラリア治療薬開発への応用

マラリアの病原体はマラリア原虫と呼ばれる単細胞生物である。媒介であるハマダラカにより人体内に送り込まれたマラリア原虫は、肝細胞内での成熟増殖を経て赤血球に侵入し（図 1）、赤血球内での細胞分裂と破壊のサイクルを繰り返すことにより増殖する。マラリアは熱帯、亜熱帯地域を中心に年間 3-5 億人の発症者があり、死者は数十〜数百万人に上るが、有効なワクチンが存在しない、またクロロキンやアーテミスニン等の抗マラリア薬は副作用があり効果が限定的である、さらにはこれらに耐性を示す原虫も出現している等の現状から、新たな治療薬の開発が急がれている。治療薬開発の指針の一つに挙げられるのが、薬剤等によりマラリア原虫の生体機能の一部を阻害して増殖を抑制するというもの（阻害剤の開発）であり、そのターゲットとなる機能性を示すものにセリンヒドロキシメチル転移酵素（*Serine Hydroxymethyltransferase*, SHMT）がある。

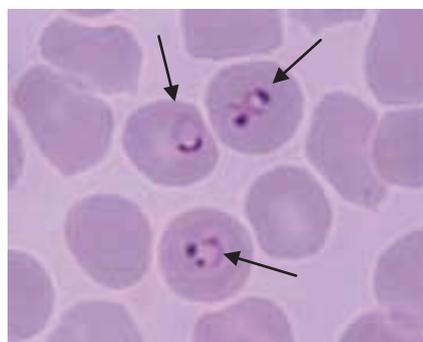


図 1 赤血球内に侵入したマラリア原虫（図中矢印）

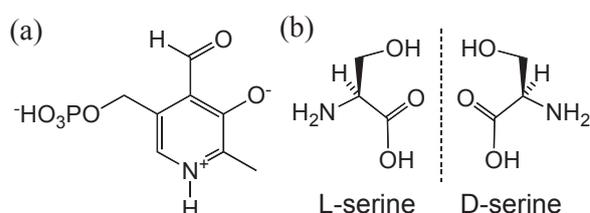


図 2 (a)ピリドキサルリン酸 (PLP, pH 7.0)、(b) L-、D-セリンの分子図

SHMT はマラリア原虫だけでなく細菌類やヒトを含む多くのほ乳類の肝臓内にも存在し、生体の代謝機能や、DNA 合成機能に深く関わる酵素である。SHMT は補欠分子としてピリドキサルリン酸 (Pyridoxal Phosphate (PLP)、図 2(a)) を内包し、テトラヒドロ葉酸 (THF) を補酵素に用いて三重複合体機構 (PLP、アミノ酸、THF の 3 分子が複合体を形成して反応を引き起こす機構) により L 体のセリン (L-セリン (図 2(b)) をグリシンに可逆的に変換する (図 3)。近年 Chaiken らは、マラリア治療薬開発への応用の観点から三日熱マラリア原虫 (*Plasmodium vivax*) および熱帯熱マラリア原虫 (*Plasmodium falciparum*) 由来の 2 種の SHMT の作成に成功した。またそれらの amino 酸および THF との反応速度や生化学的特性をストップフロ

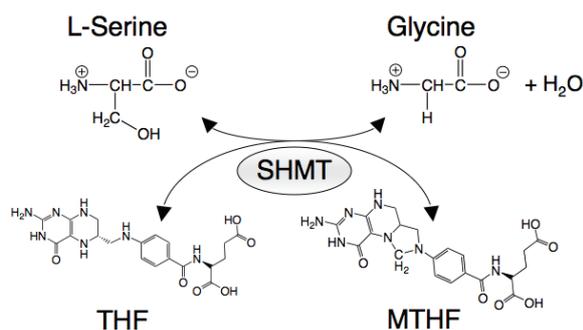


図3 SHMTのアミノ酸変換スキーム

一法により観測し、ウサギ等のほ乳類に由来する SHMT との比較を行った^{1,2)}。その結果、原虫由来の SHMT は、THF 存在下において L-セリンのみならず D-体のセリン (D-セリン、図 2(b)) についても高い反応性を示すことが明らかになった。さらには、THF が存在しない場合にも、溶液の pH が高い状態では SHMT が D-セリンに対して反応性を示すことが明らかとなった。このような反応性の違いは、分子構造に光学活性を持たせた阻害剤の開発等、治療薬開発の重要な糸口となり得る。

一方、SHMT のように PLP を補欠分子に持つ酵素の中には興味深い挙動を示すものもある。SHMT を含め通常の酵素反応は熱過程で起こるが、アスパラギン酸アミノ基転移酵素やトリプトファン脱炭酸酵素等の一部の酵素では、紫外光あるいは青色光の照射により、反応中間体の生成率の増加や酵素の触媒活性の増大が起こることが報告されている^{3,4)}。これらの報告は、PLP の光励起過程が酵素反応に影響を与えることを示しており、PLP を補欠分子に持つ SHMT への光励起効果にも興味注がれる。しかしながら、これらについての研究例はこれまでにない。PLP の光励起過程が SHMT の反応に影響するとするならば、光により SHMT の酵素反応を制御できる可能性が大きくなるため、マラリア治療薬開発への応用も期待できる。本研究では、フェムト〜ピコ秒領域での時間分解蛍光計測法を用いて PLP 分子およびマラリア原虫由来の SHMT の光励起ダイナミ

クスを観測することにより、光励起時の SHMT の反応過程について調べた。また種々のアミノ酸を SHMT 溶液に添加した場合の挙動の変化や、ヒト由来 SHMT での観測結果との比較等から、SHMT の光反応制御の可能性について検討した。

2. 実験

実験に用いた酵素は、三日熱マラリア原虫由来の SHMT (PvSHMT)、熱帯熱マラリア原虫由来の SHMT (PfSHMT) およびヒト由来 SHMT (Human SHMT) の3種である。各 SHMT は大腸菌を用いた遺伝子クローニング法により作成した¹⁾。ただし、酵素の精製効率を上げるため、PfSHMT には His₆ タグを施した²⁾。PvSHMT、PfSHMT の溶媒には pH を 7.0 に調整した HEPES 緩衝液 (50 mM HEPES + 1 mM DTT + 0.5 mM EDTA) を、Human SHMT には pH を 8.0 に調整した HEPES 緩衝液 (10 mM HEPES pH 8.0 + 100 mM NaCl) を用いた。フェムト秒領域での時間分解蛍光計測には、Ti:サファイアレーザー (Mira-800, Coherent) を光源とした蛍光アップコンバージョンシステムを用いた⁵⁾。励起波長は 410 nm、装置の時間分解能は約 170 fs である。またピコ秒領域での蛍光計測には、周波数 2 MHz のキャビティダンプ Ti:サファイアレーザー (Kapteyn-Murnane Laboratories Inc.) を光源としたフォトンカウンティングシステム⁶⁾を用いた。励起波長は 400 nm または 415 nm、時間分解能は約 40 ps である。

3. 結果と考察

3.1 SHMT の蛍光、励起スペクトル

図4に、PvSHMT、PfSHMT、Human SHMT の蛍光 (励起波長 410 nm、図中実線) および励起スペクトル (観測波長 510 nm、図中点線) を示す。全ての試料で PLP の光励起に起因する 500 nm 付近にピークを持つ蛍光帯が観測される。各試料の蛍光ピーク波長は PvSHMT では 515 nm、PfSHMT では 511 nm、Human SHMT では 507 nm で、試料により若干のピーク波長の変化がみられた。また励起スペクトルから得られた吸収ピーク波長

は、PvSHMT では 425 nm、PfSHMT では 426 nm であり変化は小さいが、Human SHMT では 433 nm と、他の SHMT に比べやや長波長側にシフトした。一方、水溶液 (pH 7.0) 中での PLP のピーク波長は 388 nm であり、SHMT の吸収帯はそれに比べ長波長側に大きくシフトする。これは、PLP が SHMT 内のアミノ酸残基 (リシン) と結合し、図 5 に示すようなシッフ塩基と呼ばれる結合体を形成するために起こる挙動である。また 3 種の SHMT を比較すると、Human SHMT の吸収、蛍光帯の波長シフトは他の原虫由来 SHMT とは異なっており、これはおそらく PLP 周囲の蛋白構造が異なっているためであると考えられる。ただし、PvSHMT および PfSHMT の立体構造は現時点では解明されておらず、PLP 周囲の蛋白質環境の違いについては明確ではない。

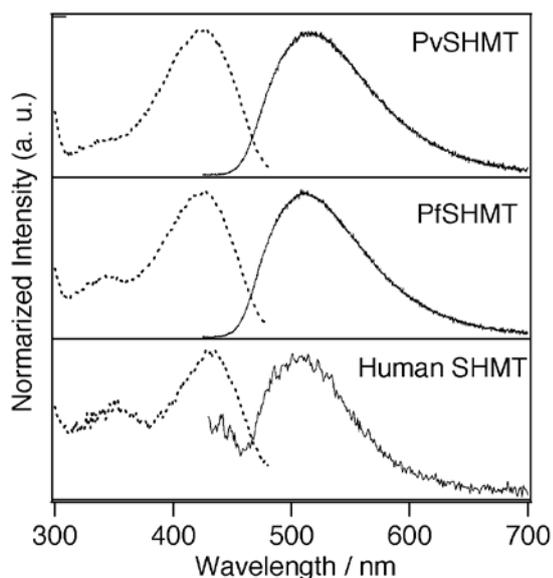


図 4 PvSHMT、PfSHMT、Human SHMT の蛍光 (実線)、励起スペクトル (点線)

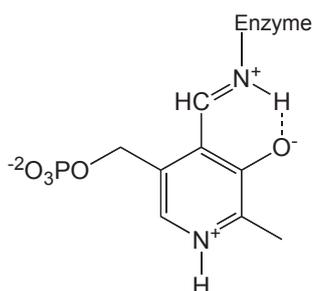


図 5 PLP-酵素結合体 (シッフ塩基) の分子図

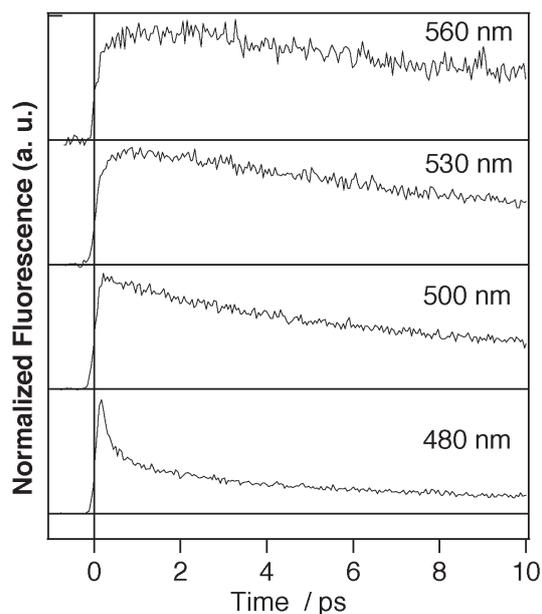


図 6 PLP 水溶液 (pH 7.0) のフェムト秒蛍光観測結果

3.2 SHMT のフェムト秒蛍光ダイナミクス

SHMT の光励起過程について検討する前に、参照化合物に PLP 水溶液 (pH 7.0) を用いて蛍光アップコンバージョン法によるフェムト秒蛍光計測を行った。観測結果を図 6 に示す。励起直後には、溶媒 (水) の溶媒和過程⁷⁾に起因する、蛍光ピーク波長 (500 nm 付近) より短波長側 (480 nm) の 1 ps 以内の急速な減衰と、それに対応する長波長側 (530、560 nm) の蛍光の立ち上がりがみられる。一方、溶媒和の影響が小さい蛍光ピーク波長付近 (500 nm) では、蛍光は寿命約 3 ps と 20 ps の 2 成分指数関数で減衰した。同様の挙動は、Larsen らによる PLP 水溶液の過渡吸収計測によっても観測されている⁸⁾。また彼らは溶媒の pH を 10.0 に上げた条件で同様の観測を行い、長寿命成分のみが 20 ps から 120 ps に変化したことを報告している。これは水溶液の pH の変化により PLP のピリジン環の水素が脱離したために起こる現象であることから、この実験で観測された蛍光は図 2(a) の構造を持つ PLP の励起状態からのものであることがわかった。一方、短寿命の蛍光成分の由来は現在明らかではないが、おそらく励起直後において PLP の何らかの分子構造変化 (分子構造のねじれ等) が起こるためではないかと考えられる。PvSHMT、PfSHMT の観測結

果を図7、図8にそれぞれ示す。両試料とも励起後 10 ps 以内ではほぼ減衰を示さず、観測波長による変化もみられない。蛍光寿命は 30 ps 以上である。PLP が酵素の蛋白質と結合してシッフ塩基を形成した結果、分子の π 共役が広がり (図 5) 励起状態の寿命は増加する。また、PLP は周囲が蛋白質に囲まれているため、水分子の影響を受けず溶媒和ダイナミクスは観測されない。このような挙動は蛋白環境場での分子に特徴的なものである。

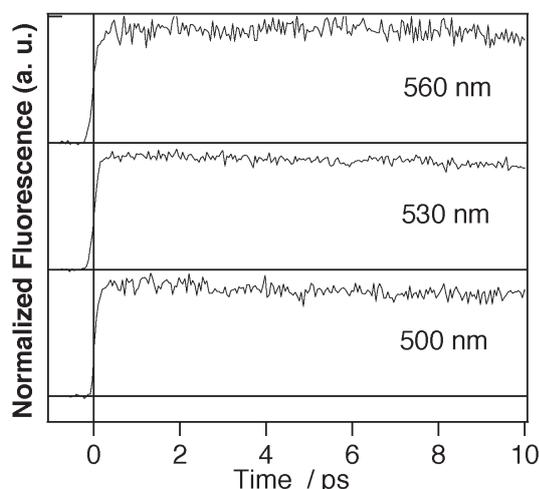


図7 PvSHMT のフェムト秒蛍光観測結果

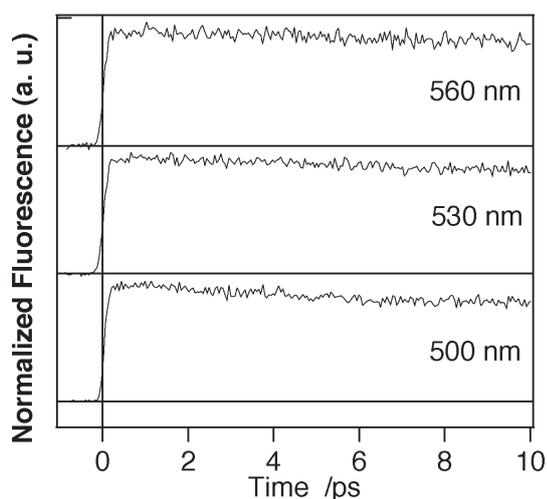


図8 PfSHMT のフェムト秒蛍光観測結果

3.3 SHMT のピコ秒蛍光ダイナミクス

フォトンカウンティングによる PvSHMT、PfSHMT および Human SHMT のピコ秒領域での蛍光ダイナミクス (観測波長 550 nm) を図9に示す。PLP 水溶液と同様、い

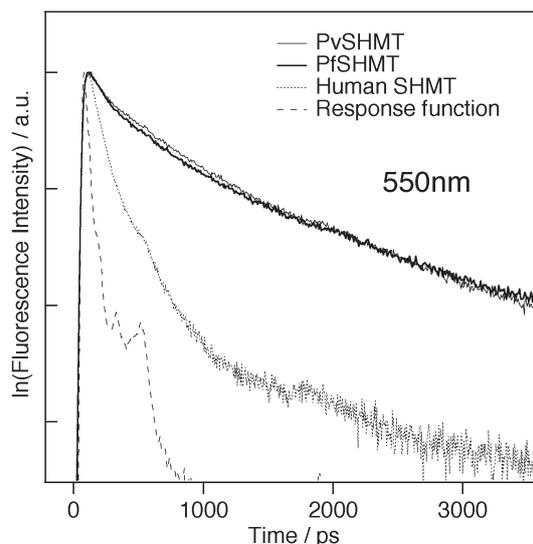


図9 PvSHMT(図中実線)、PfSHMT(太線)、Human SHMT (点線) のピコ秒蛍光観測結果 (図中破線は装置応用関数)

ずれの試料も成分指数関数での蛍光減衰を示すが、減衰寿命は大幅に減少している。これは上記したように SHMT 内では PLP がシッフ塩基を形成しているためである。また PvSHMT と PfSHMT の蛍光減衰はほぼ同様の挙動を示したが、Human SHMT は他に比べて速い減衰を示した。また各試料において観測波長の効果 (480 nm、520 nm、600 nm) について検討を行ったが、大きな変化は見られなかった。各データを用い、装置応答関数を考慮した多成分指数関数による最小二乗フィッティングを行った結果、PvSHMT では 155 ps (0.72) と 1 ns (0.28)、PfSHMT では 145 ps (0.78) と 1.1 ns (0.22)、Human SHMT では 46 ps (0.78)、136 ps (0.21)、1 ns (0.01) の各寿命が得られた (それぞれ4つの観測波長で得られた寿命の平均値、また () 内は全指数因子の比を示す)。SHMT がこのような光励起過程を示す要因には、おそらく PLP の光反応が関連していると考えられる。Larsen ら⁸⁾は、PLP 水溶液にアミノ酸 (バリン) を加え、形成されたシッフ塩基の過渡吸収計測を行い、励起状態の寿命として 63 ps および 1.03 ns を得ており、この結果は PvSHMT および PfSHMT での観測結果と類似する。また彼らは溶媒の重水効果や pH 効果についても検討し、PLP シッフ塩基の互変異生体であるアルジミ

ンの光励起によりバリンの α 位の水素が脱離（水素移動）し、キノノイドに変化することを報告している（図10）。SHMT の場合、PLP は蛋白質のアミノ酸残基と結合しているため PLP-バリンシッフ塩基とは PLP 周囲の環境が異なるものの、SHMT においても同様の反応が起こる可能性はある。一方、Human SHMT の蛍光寿命は他に比べ減少している。これについては励起状態におけるシッフ塩基の安定化エネルギーの差が要因ではないかと考えられる。HumanSHMT の吸収帯のピークは他に比べ長波長側にシフトしているが、蛍光帯のピークは逆に短波長側にシフトすることからストークスシフト幅が狭く、励起状態における安定化エネルギーは Human SHMT が最も小さい。このため励起状態におけるシッフ塩基の π 共役が崩れやすく、熱緩和の割合が大きくなるものと考えられる。

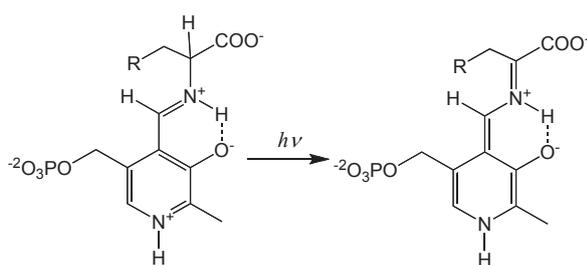


図10 PLP-アミノ酸シッフ塩基の互変異性体アルジミン（左）からキノノイド（右）への光化学反応

3.4 反応基質（アミノ酸）存在下での SHMT の光励起過程

SHMT の酵素反応の第一段階では、PLP は基質となるアミノ酸との間で外部アルジミンと呼ばれる中間体（分子構造は図10のアルジミンと同様）を形成する。その後、アルジミンは水素の脱離によりキノノイドに変換され、生成したキノノイドと THF の間で酵素反応が進行する。このことから、アミノ酸存在下での SHMT の光励起よりキノノイドの生成率が増加し、酵素反応が促進される可能性がある。この点について検討するため、SHMT にアミノ酸を添加した試料のピコ秒蛍光をフォトンカウンティング法により観測した。観測試料には各 SHMT 水溶液（ $\sim 100 \mu\text{M}$ ）に L-セリンまたはグリシン

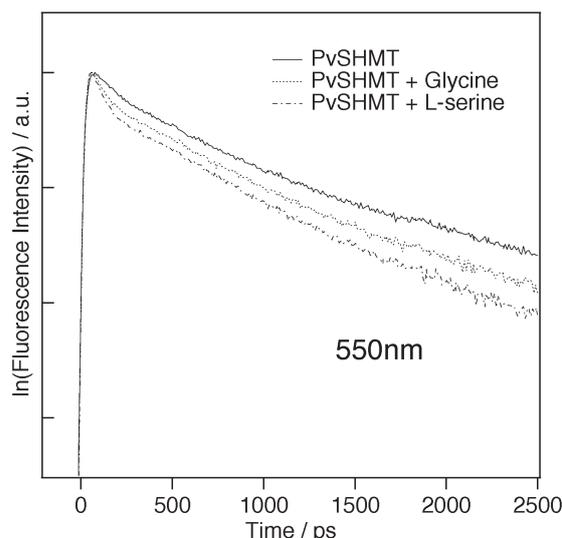


図11 PvSHMT（実線）、グリシン添加試料（点線）、L-セリン添加試料（破線）のピコ秒蛍光観測結果

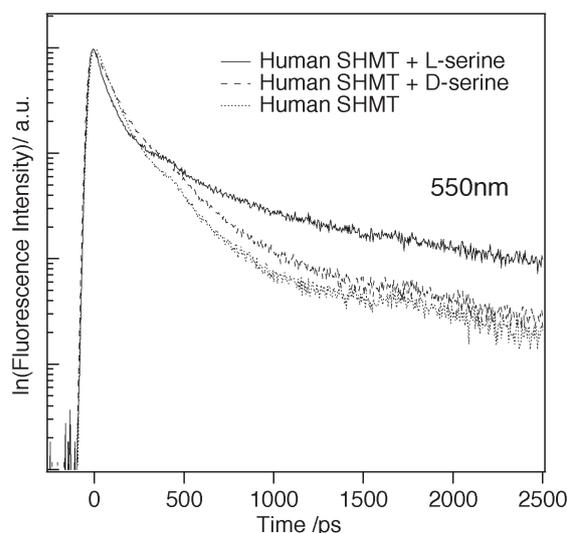


図12 Human SHMT（点線）、L-セリン添加試料（実線）、D-セリン添加試料（破線）のピコ秒蛍光観測結果

を過剰に（ $\sim 100 \text{ mM}$ ）加えて用いた。アミノ酸を加えた試料の蛍光スペクトル（励起波長 415 nm ）は、SHMT のみの試料に比べ蛍光強度は低下するが、スペクトル形状に変化はほぼない¹⁰⁾。PvSHMT におけるピコ秒蛍光観測結果を図11に示す。PvSHMT のみの試料に比べ、グリシンまたは L-セリンを加えた試料の方が明らかに速い減衰を示しており、またグリシンに比べて L-セリンの方がその効果は大きい。PvSHMT についても観測

表1 SHMT およびアミノ酸添加時の蛍光寿命^a

Enzyme	Amino acid	τ_1 /ps	A_1^b	τ_2 /ps	A_2^b	τ_3 /ps	A_3^b	ratio ^c
PvSHMT	none	155	0.78	1086	0.22	-	-	-
	L-serine	37.6	0.75	547	0.25	-	-	0.42
	glycine	46.6	0.71	619	0.29	-	-	0.54
PfSHMT	none	145	0.78	1086	0.22	-	-	-
	L-serine	66.9	0.73	773	0.27	-	-	0.74
	glycine	84.2	0.70	801	0.30	-	-	0.84
Human SHMT	none	46.1	0.78	136	0.21	1006	0.01	-
	L-serine	16	0.77	81	0.2	1012	0.04	0.52
	D-serine	33.7	0.64	140	0.35	1303	0.01	1
	glycine	19.2	0.75	115	0.24	1303	0.01	0.69

^a蛍光寿命は4つの観測波長(480 nm, 510 nm, 550 nm, 600 nm)で得られた値の平均値を示す

^b 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

^cSHMT のみの試料に対する蛍光寿命の減少率から算出したアミノ酸添加時のSHMTの消光率

を行い、PvSHMTと同様の結果を得た。一方、Human SHMTの場合には挙動がやや異なる。観測結果を図12に示す。L-セリンを加えた試料の蛍光は励起直後の時間領域ではSHMTの蛍光に比べ速い減衰を示すが、長寿命成分に寿命変化はみられず、むしろその成分比は僅かに増大した。また図12には、SHMTとは反応しないD-セリンを加えた試料の観測結果を併せて示した。蛍光減衰はSHMTのみの場合とほぼ同じ挙動を示しており、L-セリンまたはグリシンを加えた場合とは対照的である。表1に、実験から得られた各試料の蛍光寿命を示す。観測波長による蛍光減衰の挙動に大きな変化はみられなかったため、蛍光寿命は480、510、550、600 nmの各観測波長で得られた寿命の平均値とした。PvSHMTとPfSHMTを比較すると、アミノ酸の添加により短寿命および長寿命成分共に寿命の減少がみられること、またL-セリンとグリシンではL-セリンの方がSHMTのみの場合と比較して寿命の減少率が高く、消光率が大きいことが共通する特徴に挙げられる。一方、各アミノ酸を添加した試料の消光率はPvSHMTの方がPfSHMTに比べ大きいことなど、異なった特徴もみられた。これらの消光率の変化はSHMTと各アミノ酸間の反応性の高さに関連があるものと考えられる。Chaiyenらは、熱反応(暗条件)でのSHMTとL-セリン間の反応をストップフロー法により調べており、酵素とアミノ酸の親和性(反応のし易さ)を表す指標であるミカエリス定数 K

(mM)を求めた²⁾。PvSHMT、PfSHMTのミカエリス定数はそれぞれ0.18 mM、0.37 mMで、PvSHMTの方がL-セリンとの反応性が高いことを示しており、消光率が大きなPvSHMTの方がL-セリンとの反応性が高いと考えられる今回の実験結果と一致する。これらの結果は、アミノ酸添加時のSHMTの蛍光消光過程が励起状態にあるSHMT中のシッフ塩基とアミノ酸による外部アルジミン形成反応に起因するものであり、さらには光励起によりこの反応が促進されていることを示している。Human SHMTに関しても同様の光反応が起こるものと考えられる。D-セリンを添加した場合には光励起によるアルジミン形成反応は起こらないことを示しており、SHMTの酵素反応におけるアミノ酸選択性との相関がみられる。一方、L-セリンを添加した試料では、短寿命成分については他のSHMTと同様の消光を示すものの、長寿命成分の寿命は変化せず成分比が増大しており、他の試料とは挙動がやや異なる。おそらくシッフ塩基周囲の蛋白構造の変化によりアミノ酸との接触が妨げられているものと考えられるが、その要因については現在明確ではなく、今後明らかにすべき課題である。

4. まとめ

本研究では、フェムト〜ピコ秒領域での時間分解蛍光計測法を用いてマラリア原虫およびヒト由来セリンヒドロキシメチル転移酵素(SHMT)

の光励起過程について検討した。SHMT の蛍光は多成分指数関数で減衰し補欠分子 PLP 水溶液と同様の挙動を示すが、シッフ塩基の形成による蛍光寿命の増大がみられた。また反応基質であるアミノ酸 (L-セリン、グリシン) 存在下での SHMT の光励起過程についても検討を行い、アミノ酸添加時の SHMT の蛍光消光過程がアルジミン形成反応に起因することを明らかにした。アルジミンは SHMT の酵素反応の中間体であることから、本研究で得られた結果は光による SHMT の酵素反応制御の可能性を示すものであり、今後も更に詳細な検討を進めていく予定である。

謝辞

本研究は、田中文夫 Chulalongkorn 大学客員教授と共同で行われたものである。また研究に用いた酵素試料は P. Chaiyen Mahidol 大学教授から提供を受けた。また、フォトンカウンティング計測に関しては玉井尚登関西学院大学教授の協力を得た。ご協力に感謝致します。

参考文献

- 1) K. Sopitthummakhun, S. Maenpuen, Y. Yuthavong, U. Leartsakulpanich and P. Chaiyen: FEBS Journal, **276**, 4023-4036, 2009.
- 2) S. Maenpuen, K. Sopitthummakhun, Y. Yuthavong, P. Chaiyen, and U. Leartsakulpanich: Molecular & Biochemical Parasitology, **168**, 63-73, 2009.
- 3) T. J. Comish and J. W. Ledbetter: IEEE J. Quantum Electron, **20**, 1375-1379, 1984.
- 4) I. I. Stepuro, N. V. Konovalova, A. A. Solodunov and A. S. Tyshchenko: Mol. Biol., **27**, 483-487, 1993.
- 5) N. Mataga, H. Chosrowjan, S. Taniguchi, F. Tanaka, N. Kido and M. Kitamura: J. Phys. Chem. B, **106**, 8917-8920, 2002.
- 6) A. Mandal, J. Nakayama, N. Tamai, V. Biju and M. Isikawa: J. Phys. Chem. B, **111**, 12765-12771, 2007.
- 7) H. Chosrowjan, S. Taniguchi, N. Mataga, T. Pongsak, J. Sucharitakul, P. Chaiyen and F. Tanaka: J. Phys. Chem. B, **113**, 8439-8442, 2009.
- 8) M. P. Hill, E. C. Carroll, M. D. Toney and D. S. Larsen: J. Phys. Chem. B, **112**, 5867-5873, 2008.
- 9) M. P. Hill, E. C. Carroll, M. C. Vang, T. A. Addington, M. D. Toney and D. S. Larsen: J. Am. Chem. Soc., **115**, 16953-16961, 1993.
- 10) K. Sopitthummakhun, C. Thongpanchang, T. Vilavian, Y. Yuthavong, P. Chaiyen and U. Leartsakulpanich: Malaria Journal, **11**, 194-206, 2012.

液中レーザーアブレーション法によるナノ粒子作製：溶媒効果の検討

レーザーバイオ化学研究チーム

谷口誠治、岡田竹弘¹、佐伯 拓¹

¹ 関西大学システム理工学部

1. はじめに

液中レーザーアブレーション法は、気相法等に比べ真空系や冷却系等の装置を必要とせず、より簡便で低コストのナノ粒子生成法である。このことから近年、この手法を用いて金属や金属酸化物、有機化合物等、様々な材料のナノ粒子を作製しようとする研究が数多く行われるようになってきた。我々はこれまで、金属ナノ粒子の水素生産分野への応用を目指し、液中レーザーアブレーション法を利用して金属酸化物の還元、ナノ粒子化を一段階で行う手法を確立するため研究を行ってきた。その結果、溶媒に有機溶媒の一種であるアセトンを用いることにより、酸化第二鉄 (Fe_2O_3) の還元およびナノ粒子化に成功した¹⁾。また我々は、この手法により作製した還元鉄ナノ粒子を用いて水素生成実験を行い、比較的高い効率で水素発生が起こることを確認した²⁾。

液中レーザーアブレーション法を技術的に確立するために考慮すべき要素の一つに、溶媒の選定がある。通常この手法には水が媒体として用いられることが多いが、生成するナノ粒子の物性によっては水と反応してしまう場合や、ナノ粒子の凝集性が強まる可能性がある。このことから、近年では水のかわりに種々の有機溶媒を用いた研究が多くみられるようになってきた。我々はこれまで、溶媒には金属ナノ粒子の凝集抑制効果があるとの報告³⁾があるアセトンを用いてきたが、ナノ粒子作製の最適条件を決定するためには、他の溶媒についても検討を行う必要がある。本稿では、分子構造および物性が異なる数種の溶媒を用いて酸化鉄のレーザー照射実験を行い、酸化鉄の還元・ナノ粒子化過程の違いを比較検討した結果を報告する。また生成物を透過型電子顕微鏡 (TEM) により観測し、その物性について検討した結果についても述べる。

2. 実験

溶媒にはアセトン、水、エタノール、アセトニトリル、シクロヘキサン⁴⁾の5種を用いた。図1に各溶媒の分子構造を示す。アセトン、水、エタノールは分子中に酸素を持つが、アセトンの酸素はカルボニル (=O) 基、エタノールはヒドロキシ (-OH) 基として存在しており、物性が異なる。アセトニトリル、シクロヘキサンは分子中に酸素を持たないが、アセトニトリルは酸素のかわりに窒素が結合している。各溶媒の基本的な物性を表1に示す。水、エタノールはヒドロキシ基を介して溶媒分子同士が水素結合しネットワークを形成するため、粘度、比熱、沸点の各物性値が他の溶媒に比べて大きくなる。酸化鉄試料には粒径 $45\ \mu\text{m}$ 以下 (325 メッシュ処理) の粉

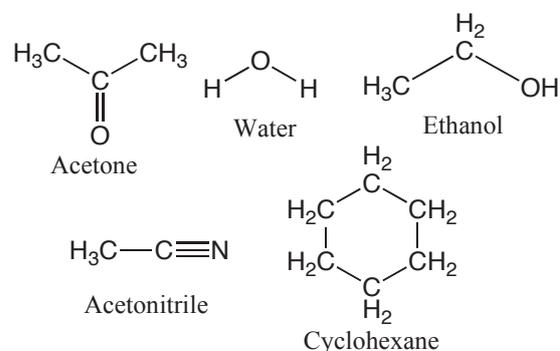


図1 溶媒の分子図

表1 溶媒の物性値

溶媒	密度 g/cm^3	粘度 ^a $\text{mPa}\cdot\text{s}$	比熱 ^a $\text{cal}/\text{g}\cdot\text{K}$	誘電率
Acetone	0.788	0.332	0.52	20.7
Water	1	1	0.997	78.3
Ethanol	0.789	1.2	0.706	24.3
Actonitatile	0.786	0.35	0.304	37.5
Cyclohexane	0.779	0.898	0.442	2.02

^a20°Cでの値

末状酸化第二鉄 (Fe_2O_3 、純度>98% (キシダ化学)) を使用した。図2にレーザー照射実験の配置図を示す。反応槽に底部が円錐状となっている梨型フラスコ (容量 50 ml) を用いその下方からレーザー光を打ち上げる方式である²⁾。この方式では、粒径の大きな酸化鉄粉末はフラスコの底部に沈殿するため、レーザーを効率よく酸化鉄に照射できる。また、この方式ではレーザーにより還元、ナノ粒子化した試料は溶媒内に分散することから、生成ナノ粒子へのレーザーの再照射を抑制する効果もある。照射試料はフラスコに 30 ml の溶媒と 20 mg の酸化第二鉄を加えた後、空気 (酸素) 除去のためアルゴン置換を行い、密閉して実験に使用した。レーザー光源には、ナノ秒パルス YAG レーザー (Surelite I (コンティニウム社)、波長 1064 nm、パルス幅 8 ns、光径 6 mm ϕ 、強度<300 mJ/pulse、繰り返し 10 Hz) の第二高調波 (532 nm) を用いた。また、生成物の電子顕微鏡観測には透過電子顕微鏡 (H-800B、HITACHI) を使用した。また電子顕微鏡観測用の試料は、コロジオン被覆を施した銅メッシュ (STM ミクロングリッド 150Cu、STEM 社) 上にレーザー照射後の懸濁液を滴下し、風乾して作製した。

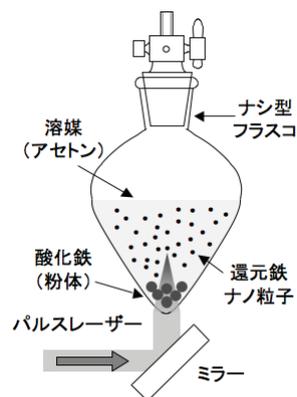


図2 レーザー照射実験配置図

3. 結果と考察

3.1 レーザーによる還元鉄ナノ粒子の作製：溶媒

効果の検討

図3に、各溶媒中での酸化第二鉄へのレーザー照射後の写真を示す。レーザー光の強度は 1 W (100 mJ/pulse、10 Hz)、照射時間は 20 分である。いずれの溶媒中でも試料は赤色から黒色に変化し、また磁性を示すようになった。このことからレーザー照射により第二酸化鉄が還元され、三酸化四鉄 (Fe_3O_4) および酸化第一鉄 (FeO)、あるいは鉄 (Fe) が生成することがわかった。我々は以前、YAG レーザーの基本波 (1064 nm) を用い、同様の実験条件 (光強度 1 W、照射時間 30 分) で酸化第二鉄のレーザー照射実験を行ったが、水中では酸化鉄の一部しか還元が起こらなかった⁴⁾。これに対し今回の実験ではレーザー波長に第二高調波 (532 nm) を用いており、

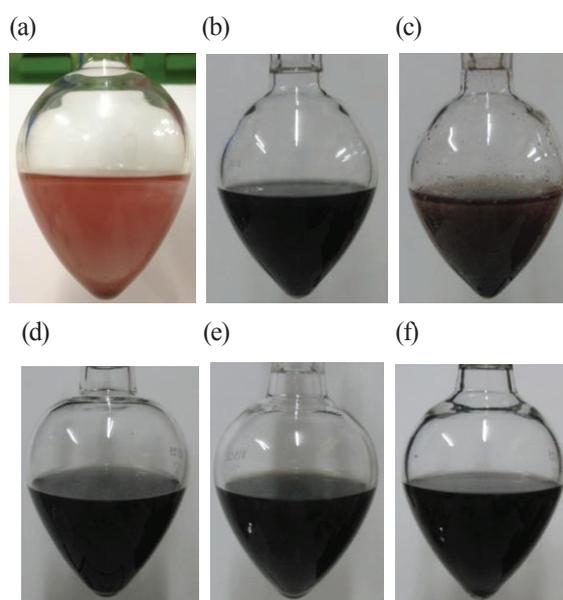


図3 (a)レーザー照射前、(b)アセトン、(c)水、(d)エタノール、(e)アセトニトリル、(f)シクロヘキサン中の酸化第二鉄へのレーザー照射後の写真

これにより水中においても還元反応が進行することがわかった (図3(c))。アセトン中での酸化第二鉄の還元効率、レーザー強度 1 W あたり約 20 mg/h であった⁴⁾が、今回の実験結果 (図3(b)) から、第二高調波を用いた場合には還元効率は少なくとも 3 倍以上 (>60 mg/h) に増大するものと考えられる。おそらく波長の変化により酸化鉄の光吸収率が増大したためではないかと考えられる。その他の溶媒 (エタノール、アセトニトリル、シクロヘキサン) 中では、アルコール中において反応がやや速く進行するものの、アセトン中とほぼ同様の挙動を示しており、溶媒の分子構造や分子中の酸素等の影響

は顕著に見られなかった。次に生成物粒子の分散・凝集性を調べるため、レーザー照射後の試料を一定時間静置し、生成物が沈殿する様子を観察した。図4に、1時間および15時間経過後の各試料の写真を示す。水およびシクロヘキサン中では1時間以内に生成物はほぼ沈殿し、粒子の凝集性は高い。アセトン、エタノール中では15時間経過後には生成物はほぼ沈殿するが、液体は茶色に着色しているためある程度の分散性はある。一方、アセトニトリル中では、15時間経過後も生成物粒子の多くは沈殿せず、分散を保っている。これらの挙動は溶媒の密度や粘度との相関は無いが、水を例外とすれば溶媒の誘電率（極性）との相関があるように思われる。アセトンで報告されているナノ粒子の凝集抑制作用³⁾は、分子中のカルボニル基がナノ粒子周囲に配向することにより起こると考えられるが、アセトニトリルの場合はシアノ基(-CN)が、エタノールの場合にはヒドロキシ基がその役割を果たすと考えられる。アセトニトリルは極性が大きいと粒子への配向性も高くなり、凝集抑制効果も大きくなるものと考えられる。ただし、この効果は溶媒と溶質との静電相互作用が要因となるため、生成した粒子は正負どちらかに帯電している可能性がある。また、水中での凝集性については、水和物の形成等、水分子と鉄との化学的な反応が関連していると考えられるが、その要因については明確ではない。

3.2 透過型電子顕微鏡 (TEM) による生成物分析

酸化第二鉄のレーザー照射後の試料について、透過電子顕微鏡による観測を行いその物性について検討した。参照物として先ず、レーザー照射前の酸化第二鉄粉末試料の観測を行った。ただし、試料はメッシュで処理しているため、45 μm以下の粒子も存在する。図5に明視野TEM画像を示す。100 nm～1 μm程度の様々な粒径の粒子が観測されるが、いずれも形状はいびつで、また粒子同士が凝集して大きな塊状になっているのがわかる。図6に、アセトン中でのレーザー照射後の生成物の明視野TEM画像を示す。粒子の形状はいずれも球状であり、これはレーザーにより酸化第二鉄がアブレートされた

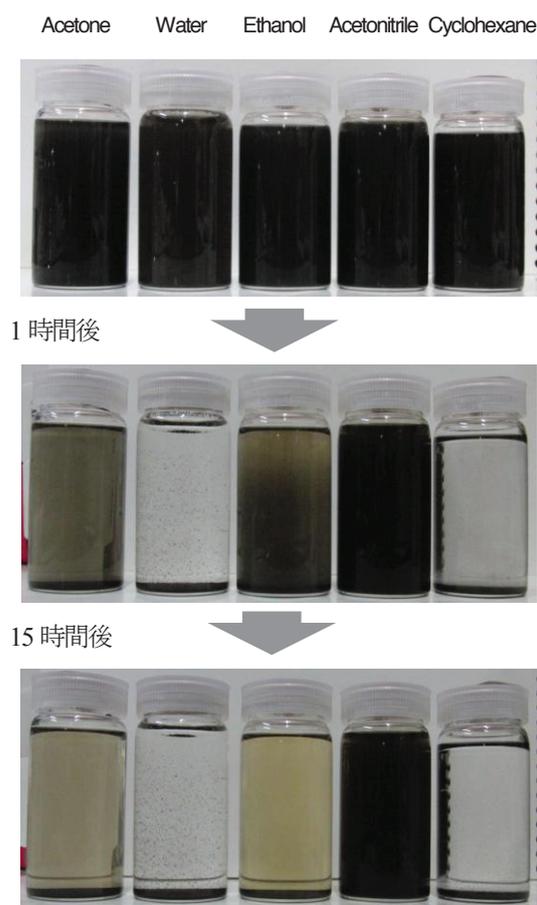


図4 各溶媒中での1時間後、15時間後の生成物の沈殿の様子

後、溶媒により冷却され粒子化されたことを示す。一方粒径分布については、図6(a)でみられるように粒径1 μm以上の大きな粒子の生成がみられるものの、図6(b)のように粒径10～30 nm程度の小粒径のナノ粒子も多くみられた。大粒径の粒子は、レーザーにより一旦生成した小粒径のナノ粒子が再度レーザー照射を受け、粒子同士が融着することにより生成したものと考えられる。図7に、水中でのレーザー照射後の試料の画像を示す。アセトン中と同様、粒径が数100～数10 nmのナノ粒子が観測されている。また、電子顕微鏡の解像度の関係から画像からは判断しにくいですが、粒径が更に小さな(<10 nm)のナノ粒子が集積し、膜化したようにみえる部分もみられる。このような部分がみられるのはアセトン中でも同様である(図6(b))。TEMによる電子線回折測定では、画像から球形が確認できる粒子と、膜化したようにみえる部分では異なる結果が得られており、おそらく、レー

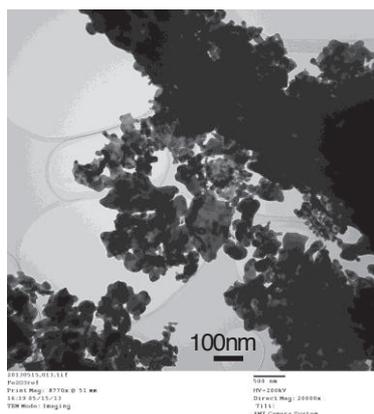


図5 酸化第二鉄粉末のTEM画像

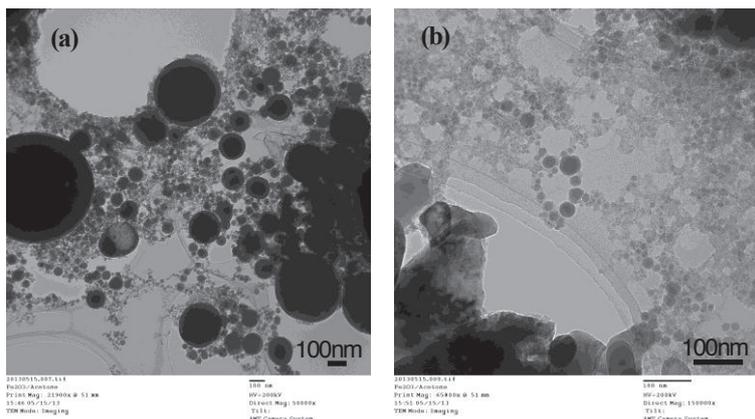


図6 アセトン中でのレーザー照射後の試料のTEM画像

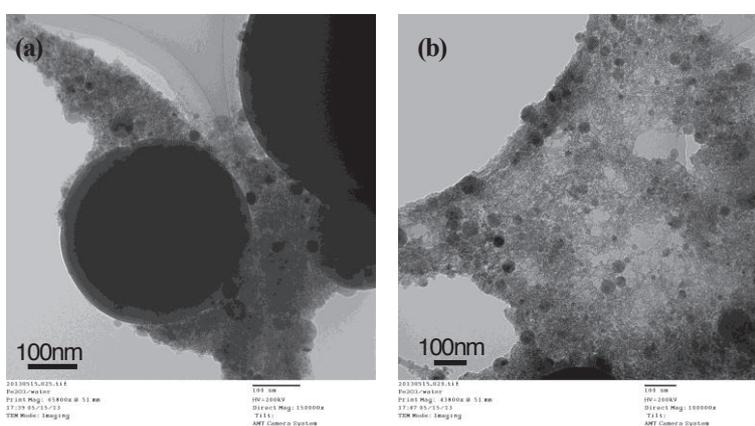


図7 水中でのレーザー照射後の試料のTEM画像

レーザー照射により生成すると考えられる物質(三酸化四鉄(Fe_3O_4)や鉄(Fe)等)の物性の違いにより、生成する粒子の粒径も異なってくるものと考えられる。今後、電子線回折の分析を進め、生成物の同定や存在比等を明らかにしていく。

4. まとめ

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製法の開発に関し、本研究では溶媒の効果について検討した。その結果、生成効率への効果は顕著ではないが、生成ナノ粒子の凝集抑制効果に差がみられた。また生成ナノ粒子の透過電子顕微鏡測定を行い、ナノ粒子の粒径は物質の組成に依存する可能性があることがわかった。今後、電子線回折の分析等を進め、生成物の同定や存在比等を明らかにする予定である。

謝辞

本研究における透過電子顕微鏡による観測は、大阪大学超高压電子顕微鏡センターの協力を得て行われた。ご協力に感謝致します。

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) M. Kawasaki and M. Nishimura: J. Phys. Chem. C, **112**, 15647-15655, 2008.
- 4) 谷口誠治, 岡田竹弘, 佐伯 拓: ILT0212年報, レーザー技術総合研究所, 2012.

高平均出力固体レーザーの熱効果解析

理論・シミュレーションチーム

古河裕之、伊山功一¹、藤田尚徳²、宮永憲明²

¹浜松ホトニクス（株）

²大阪大学レーザーエネルギー学研究中心

1. はじめに

本研究は、NEDO「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト、次世代レーザー加工技術の開発」における、半導体レーザー(LD)励起 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のための熱効果解析である。LD 励起高平均出力固体レーザーの開発においては、吸収された LD 光の内、励起に用いられなかった分は熱となり、レーザー増幅、波面の均質性などに大きな影響を与える。本研究において、プロジェクト前からレーザー総研が所有していた「熱効果を含む光線追跡コード THESLAC」を大幅に改良し、阪大レーザー研から提案された試作機案に対し、増幅器の熱レンズ効果、波面歪、増幅特性等を評価した。図 1 は THESLAC の概要図である。シミュレーションの流れは以下ようになる。

- 1) Solid Works の CAD 機能を用いて、計算機上にモデルを作成し、モデルデータを Scryu/Tetra に入力し、熱流体計算、及び熱応力計算を行う。
- 2) 本研究で作成したインターフェイスプログラムを用いて、Scryu/Tetra の結果を THESLAC に入力し、光線追跡計算を行い、熱レンズ効果、波面歪、利得特性等を評価する。

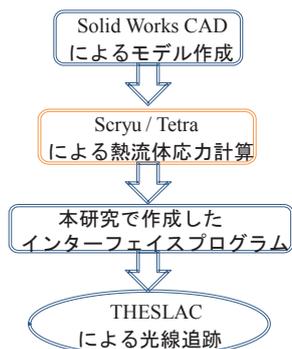


図 1 THESLAC の概要図

熱流体計算、及び熱応力計算を行うためには、吸収した励起光エネルギーから熱エネルギーへの変換率(発熱率)を評価しなければならない。Nd:YAG セラミクスを用いた場合、従来は発熱率は 0.3 程度であると言われていたが、励起エネルギー密度が高い場合、発熱率は 2 倍程度以上になる危険性があることが、本研究により分かった。2 章にて、原子物理的考察による発熱率の導出について述べる。3 章では、熱応力計算により求めた応力分布を用いた、試作機の熱破壊特性の評価について述べる。4 章では、熱レンズ効果、波面歪、及び波面補償計算について述べる。5 章では、熱効果を含んだ増幅計算について述べる。6 章は結言である。

2. 原子物理的考察による発熱率の導出

図 2 は、発熱率の導出に使用した原子モデルである。 E_1, E_2, E_3 が、それぞれ温度に対してボルツマン分布で拡がりを持っていると仮定する。

$$f(E)dE = \frac{1}{2k_B T} \exp\left(-\frac{|E-E_s|}{k_B T}\right) dE \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(E)dE = 1 \quad (2)$$

基底準位から E_3 に励起される確率は、(3)式になる。

$$\begin{aligned} P(E_3) &= \int_{h\nu_3 - \Delta\nu}^{h\nu_3 + \Delta\nu} f(E)dE \\ &= 1 - \exp\left(-\frac{h\Delta\nu}{k_B T}\right) \approx \frac{h\Delta\nu}{k_B T} \end{aligned} \quad (3)$$

種光の周波数拡がり は 40 MHz 程度であり、温度換算で 2 mK 程度なので、エネルギー準位の拡がり幅より十分

小さい。つまり、照射された LD 光のうち光として取り出しうる最大効率 η は、以下ようになる。

$$\eta = \frac{808}{1064} \times \left(\frac{T_0}{T} \right)^3, \quad T_0 = 293.15 \text{ K} \quad (4)$$

光として取り出せなかったエネルギーが全て熱に変わるとすると、発熱率 q は以下ようになる。

$$q = 1 - \eta \quad (5)$$

つまり、温度は発熱率の関数であり、発熱率は温度の関数である。4章で詳述するが、0.5 kW の LD2 台で励起した場合、発熱率を 0.6 とすると、種光の光線に沿って Nd:YAG 内の温度の平均値を求めると、93.32°C であった。この温度は、増幅の中心波長のずれの実験結果から求められる温度と良い一致を示している。さらに、この値を(4)式と(5)式に代入すると、 $q = 0.6113$ となり、モデルの妥当性が示された。考慮すべき蛍光損失は、それぞれの準位の寿命から考えて、本モデルに含まれている E_2 から E_1 への遷移による物のみで良い。

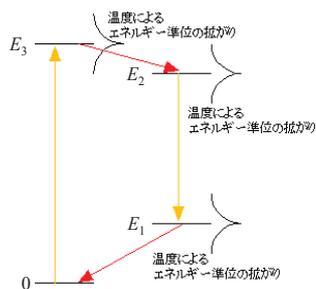


図2 発熱率の導出に使用した原子モデル

3. 試作機の熱破壊特性の評価

図3は、阪大レーザー研から提案された試作機案の概略図である。Non-doped YAG セラミクスを 0.5 mm 厚さの Nd:YAG でコンポジットした構造になっている。対向 2 ビーム励起の場合、下図の矢印に沿って LD 光が伝播し、Nd:YAG 中で吸収され発熱する。それにより温度分布が生成され、熱効果が発生する。

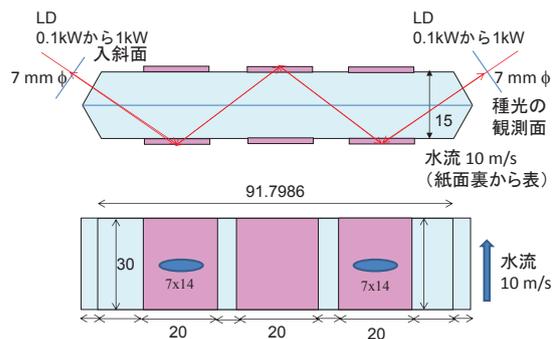


図3 試作機案の概略図

図4は、LD 光の強度分布を考慮して求めた、シミュレーションで用いた発熱分布である。図5は、0.5 kW, 2 ビームで励起した場合の温度分布である。発熱するのは Nd:YAG 部分のみなのだが、Non-doped YAG セラミクス部分にも温度分布が生成されている。

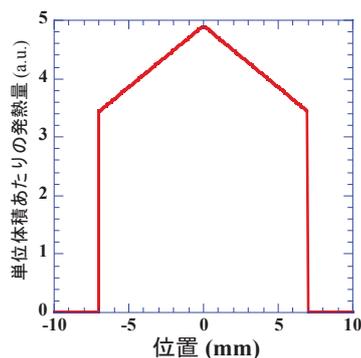


図4 シミュレーションで用いた発熱分布

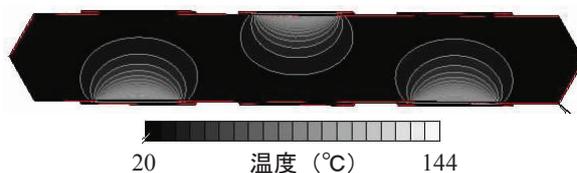


図5 0.5 kW, 2 ビームで励起した場合の温度分布

過大な引っ張り応力が生じると、材料は熱的破壊を起こす危険性がある。最大許容引っ張り応力は、熱衝撃パラメーターなどを用いて、(6)式のように表される。

$$\sigma_{\max} = \frac{\alpha E}{\kappa(1-\nu)} R_s \quad (6)$$

(6)式に、Nd:YAG の物性値を入力して最大許容引っ張り応力を求めると、282 MPa となる。

図6は0.5 kW, 2 ビーム励起の場合の垂直方向の応力分布、図7は0.8 kW, 2 ビーム励起の場合の垂直方向の応力分布、図8は1 kW, 2 ビーム励起の場合の垂直方向の応力分布である。1 kW, 2 ビーム励起の場合、許容量を超えた引っ張り応力が発生している。0.8 kW, 2 ビーム励起の場合でも、あまり余裕はない。0.5 kW, 2 ビーム励起程度以下で運転することが望ましい。

如何に効率良く冷却しても、Nd:YAG の表面の温度が低下するだけであり、内部の温度勾配や応力分布等には大きな変化はない。発熱量の低減が非常に重要である。

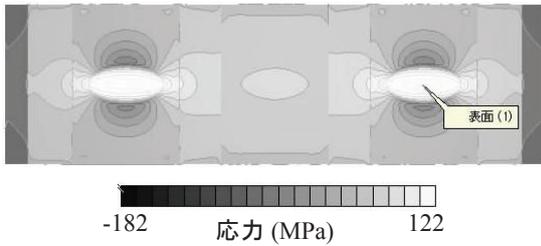


図6 0.5 kW, 2 ビーム励起の場合の垂直方向の応力分布

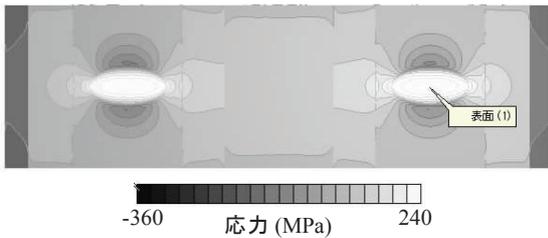


図7 0.8 kW, 2 ビーム励起の場合の垂直方向の応力分布

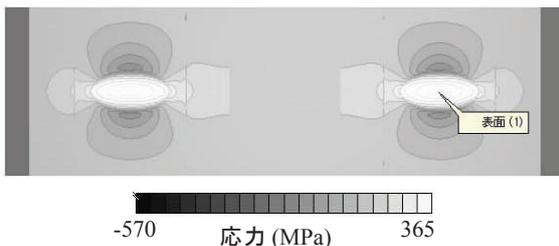


図8 1 kW, 2 ビーム励起の場合の垂直方向の応力分布

4. 熱レンズ効果、波面歪、及び波面補償計算

図9は、光線追跡計算の概略図である。多数の光線を計算機上で飛ばし、場の関数として定義された屈折率の変化に伴い、スネルの法則に従って屈折する。境界面近傍に光線が達した場合、境界面の变形データに基づき、補間曲面と接平面を求め、光線を反射させる。

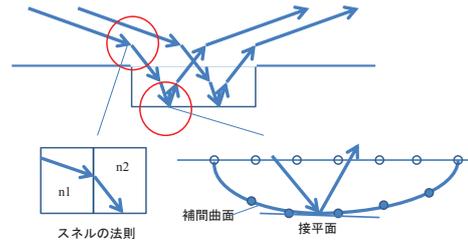


図9 光線追跡計算の概略図

図10は、シミュレーション及び実験で求めた、熱レンズ焦点距離 f の逆数を、2 ビーム分の励起 LD 光パワーの関数として表したものである。波面歪を球面と仮定すると、波面歪の peak to valley 値 ε と熱レンズ焦点距離 f の逆数は、以下のような関係になる。

$$\frac{1}{f} = \frac{2\varepsilon}{R^2}, \quad R = 3.5 \text{ mm} \quad (7)$$

両者は良い一致を示している。また、如何に効率良く冷却しても、Nd:YAG の表面の温度が低下するだけであり、内部の温度勾配、波面歪等に大きな改善は期待出来ない。発熱量の低減が非常に重要である。

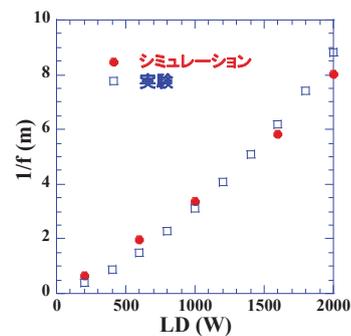


図10 シミュレーション及び実験で求めた、熱レンズ焦点距離 f の逆数

図 11 は、シミュレーションで求めた Nd:YAG の平均温度と、その温度から求めた小信号増幅光の中心波長である。実験とよく一致している。

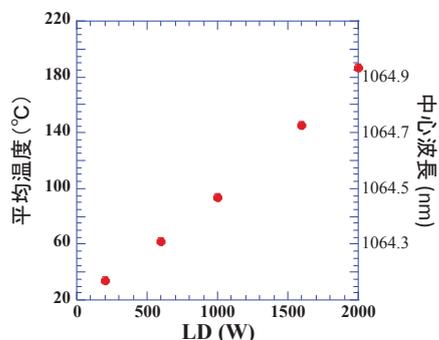


図 11 シミュレーションで求めた Nd:YAG の平均温度と、その温度から求めた小信号増幅光の中心波長

図 12 は、0.8 kW, 2 ビーム励起の場合の、シミュレーションで求めた波面歪である。peak to valley 値で 33.35 波長である。図中の細線は、等高線である。中心付近が、円形でなく楕円形になっていることがわかる。実験では SID4 を用いて計測しており、Zemike 展開で表されるモードしか測定できず、楕円は表現できない。よって、高次モードなどをシミュレーションと実験で詳細に比較するには、実験方法を改める必要がある。

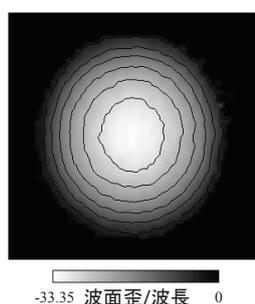


図 12 0.8 kW, 2 ビーム励起の場合の、シミュレーションで求めた波面歪

実験では、種光は水平に入射しているが、LD 光は下方向に 2° 程傾けて照射している。図 13 は、その geometry の説明図、図 14 は、0.8 kW, 2 ビーム励起で、

LD 光を下方向に 2° 程傾けて照射した場合の波面歪である。波面歪みの中心位置が僅かに上にずれて、楕円形からさらに変形している。



図 13 geometry の説明図

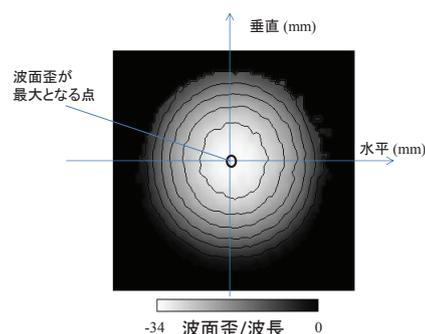


図 14 0.8 kW, 2 ビーム励起で、LD 光を下方向に 2° 程傾けて照射した場合の波面歪

図 15 は、図 14 の水平方向、及び垂直方向の断面図である。図 15 から、図 14 の波面は、単純な球面レンズでは補償できない、ことがわかる。そこで、シリンドリカルレンズを 2 枚用いて、図 14 の波面の補償を行なった。図 16 は、その配置図である。図 17 は、シリンドリカルレンズのパラメーターを最適化して得られた、補償後の波面である。

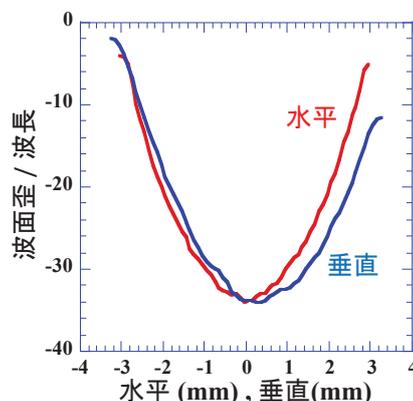


図 15 図 14 の水平方向、及び垂直方向の断面図

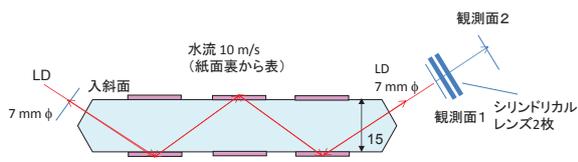


図16 波面補償の配置図

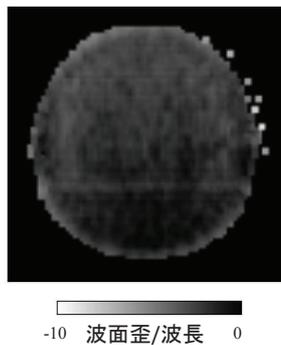


図17 補償後の波面

5. 熱効果を含んだ増幅計算

増幅計算を行うにあたり、(a) simple model と(b) 試作機モデルの2つを考える

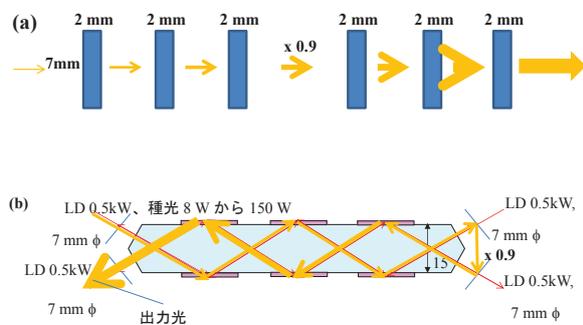


図18 増幅計算のモデル

(a) simple model (b) 試作機モデル

パルス幅内の励起や蛍光を無視すれば、1パルスの増幅計算は以下の連立方程式を解けばよい¹⁾。

$$\frac{\partial n(z,t)}{\partial t} = -cn(z,t)\phi(z,t)\sigma(\lambda, T(z)) \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi(z,t)}{\partial t} + c \frac{\partial \phi(z,t)}{\partial z} = cn(z,t)\phi(z,t)\sigma(\lambda, T(z)) \quad (9)$$

ここで、 n は反転分布数密度、 ϕ は光子数密度、 σ は誘導放出断面積である。種光の入力 150 W、パルス幅 1 ns、誘導放出断面積 $6.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ の場合、光が 2 mm 進行する時間で反転分布密度が減少する割合は、 2×10^4 程度である。ビームの重なるの効果でき、温度効果を考えなければ、試作機モデルと simple model は同じ結果を出す。

0.5 kW, 4 ビーム励起を想定する。誘導放出断面積 $6.5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ 、種光入力 150 W、167 kHz (1パルスあたり、約 0.9 mJ) とし、パルス幅 1 ns で矩形波を仮定し、(8)式及び(9)式を解き、パルス幅内の利得の時間発展を求めた。図 19 に示す。平均値として 93.95 が得られた。飽和フルエンス効果を含んだ小信号利得計算¹⁾を行うと、1パルス目の利得は 95.37 となった。1パルス幅内の利得の時間発展を求める必要は全くない。

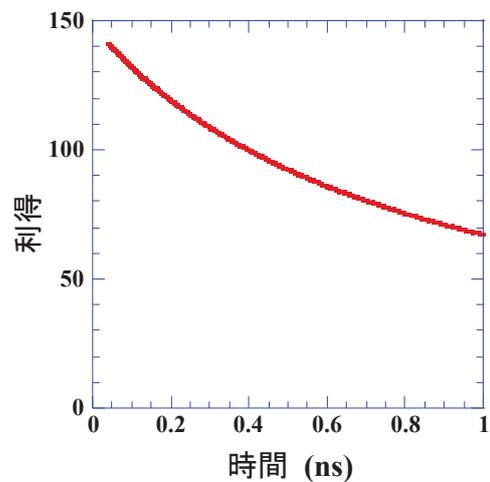


図19 パルス幅内の利得の時間発展

実際には、約 6 μs ごとにパルスが通過するパルス列となっている。1つのパルスが通過する間に、反転分布数密度は減少する。次のパルスが通過するまでの時間に、蛍光及び励起により反転分布数密度は変化する。このような効果を取り入れて、パルス列に対する利得を求めた。図 20 に示す。1パルス目だけが突出して値が大きいことがわかる。十分大きなパルス数に対しては、利得が一定値となる。以降、その一定値をその入力に対する利得値とし、出力を求める。

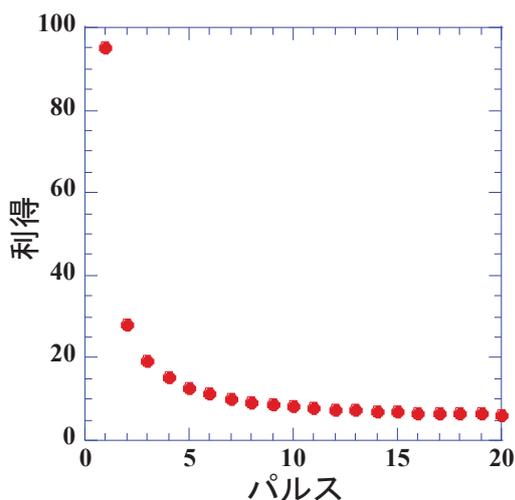


図20 パルス列に対する利得

熱効果を含んだ反転分布数密度、及び誘導放出断面積は、2章の原子モデルから、以下のように定義できる。

$$\sigma(T) = \sigma_0 \times \left(\frac{T_0}{T}\right)^2, \quad n(T) = n_0 \times \left(\frac{T_0}{T}\right) \quad (10)$$

試作機モデルに温度分布を入力し、反転分布数密度分布、及び誘導放出断面積分布を求め、光線追跡により出力を求めた。図21に結果を示す。横軸は入力(W)、縦軸は出力(W)である。種光と励起光の位置が垂直方向に2mmずれると、出力は大きく減少する。LDを下に傾けても、出力に大きな差はない。

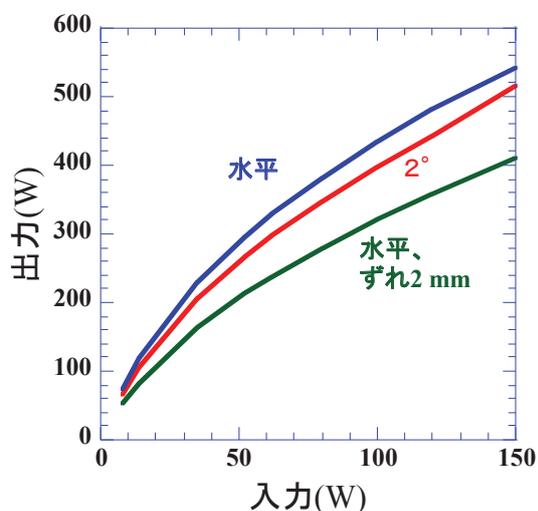


図21 光線追跡により求めた出力

6. 結言

プロジェクト前からレーザー総研が所有していた「熱効果を含む光線追跡コードTHESLAC」を大幅に改良し、阪大レーザー研から提案された試作機案に対し、増幅器の熱レンズ効果、波面歪、増幅特性等を評価した。

Nd:YAG セラミクスを用いた場合、従来は発熱率は0.3程度であると言われていたが、励起エネルギー密度が高い場合、発熱率は2倍程度以上になる危険性があることが、本研究により分かった。

熱破壊を防ぐには、0.5 kW、2 ビーム励起程度以下で運転することが望ましい、ことが分かった。

シミュレーションにより求めた波面歪みの peak to valley 値が、実験値とよく一致した。

シミュレーションで求めた波面歪の中心付近をよく見ると、円形でなく楕円形になっている。実験ではSID4を用いて計測しており、Zemike 展開で表されるモードしか実験的には測定できない。よって、高次モードなどをシミュレーションと実験で詳細に比較するには、実験方法を改める必要がある、ことが分かった。

得られた波面歪は、単純な球面レンズでは補償できない、ことが分かった。そこで、シリンダカルレンズを2枚用いて、波面の補償を行なった。

増幅計算を行う際、ビームの重なりは無視できる、ことが分かった。1パルス幅内の利得の時間発展を求める必要は全くない、ことも分かった。

試作機モデルに温度分布を入力し、反転分布数密度分布、及び誘導放出断面積分布を求め、光線追跡により出力を求めた。種光と励起光の位置が垂直方向に2mmずれると、出力は大きく減少するが、LDを下に傾けても、出力に大きな差はない、ことが分かった。

本研究の一部は NEDO 「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト 次世代レーザー加工技術の開発」の委託により行われた。

参考文献

- 1) 岡田大: 学位論文, 2007.

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、量産されている回路線幅22 nm(ハーフピッチ)の半導体はArFレーザー(192 nm)を光源として用い、液浸技術により屈折率を大きくする露光方式を用いてリソグラフィが行われている。しかしながら、この方法で今後の16 nmの回路線幅の半導体リソグラフィに対応するのは難しく、ダブルパターニング等の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、16 nm回路線幅においてダブルパターニングが不要な波長13.5 nmの極端紫外線(Extreme Ultra-Violet: EUV)が次世代光源として期待されている。このEUV光源は16 nmより狭い回路線幅への適用も可能であり、高いポテンシャルを持つが故にEUV光は世界中で研究開発が行われて来た。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。これらの目標を達成すべく、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%の実証、炭酸ガスレーザーの優位性の発見、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2016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。方式で重要なのは、スズドロップレットに最初のレーザーを照射する際のダイナミクス、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。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。ギガフォトンにより、スズドロップレットをプラズマ化する際の条件次第で、5%を超えるEUV発光効率が見られることが実証され、EUV光源のさらなる高出力化に向けた物理的理解と定量評価手法の確立が一層求められるようになってきている。我々は開発したコードを用いてドロップレットの膨張を計算した。

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¹⁾。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 μm を想定している。

Double pulse irradiation scheme

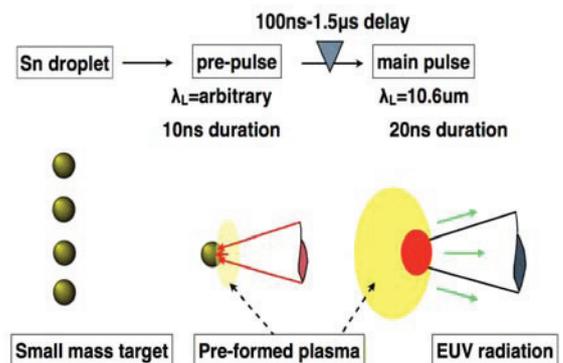


図1 ダブルパルス照射方式によるレーザープラズマEUV光源の概念

プリパルス照射によりプリプラズマが生成され、数100 nsから数 μ sの時間をかけて、ドロップレットの典型的なサイズ20 μ mから数100 μ 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発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。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 μ m以上が必要である。そのため、プリプラズマの生成、即ちスズドロップレットの挙動が重要である。しかしながら、典型的なレーザー条件においては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。我々は米国ローレンスバークレーのDr. R. Moreの協力を得て、高精度な状態方程式を放射流体コード²⁾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。最も外側の低密度スズプラズマの膨張については昨年度に報告しているのですが、ここでは高密度スズのバルクに注目して行った計算結果を示す。図2に典型的なスズドロップレット内部の圧力の時間発展を示す。本計算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よりも大きい直径100 μ mである。レーザー波長は1.06

μ m、レーザー強度は 1×10^{10} W/cm²、パルス幅は10 nsで、図2の時間発展の間、一定強度で照射される。図は底辺において軸対称を仮定している。図より判るように、ドロップレットの右からレーザーを照射しているにもかかわらず、ドロップレットの周辺部からドロップレット中心部に向かって圧力波が進行し(時刻3.0 ns)、中心部で跳ね返った後に中心部は再び圧力が下がる。これは圧力波に伴う流体運動により、密度が希薄になるためである(時刻4.2 ns)。その後はドロップレット周辺部の圧力が高く、中心に向かって圧力波が進行する(時刻5.8 ns)。このように、ドロップレットの内部を圧力波が何度もバウンスする様子が見られた。ドロップレット右側には絶えずレーザーが照射されており、単純には右から左へと衝撃波が通過するダイナミクスになると想像されたが、計算の結果はそのような簡単なイメージではなく、圧力波が高い領域のうしろには圧力の低い領域が形成され、またその背後に圧力の高い領域がくるとということが判った。この交互に山と谷をもつ圧力波の通過によって、ドロップレットは単純な膨張にならず、圧力の高い部分が通過後に膨張しようとしても圧力の低い部分がひきもどす作用を及ぼすことが判った。現在、より多様な条件でスズドロップレットの挙動を解析中である。

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

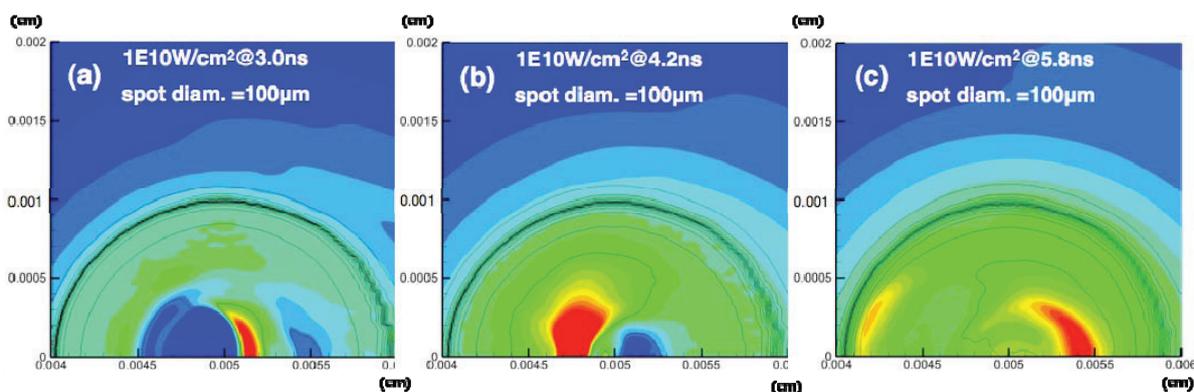


図2 直径100 μ m のスズドロップレット内部のレーザー照射開始から(a)3.0 ns, (b)4.2 ns, (c)5.8 ns の時刻に対応する圧力の時間発展

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) K. Nishihara, A. Sunahara, A. Sasaki, et al.: Phys. Plasmas, **15**, 056708, 2008.
- 2) 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.

レーザー生成高速イオンによるプラズマ加熱

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、昨年過去最大の中性子数を発生させるなど、核融合点火温度である5 keVの爆縮プラズマ温度達成を目指して研究が進んでいる。目下の課題は加熱レーザーの増力もさることながら、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ついた形となっている。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。FIREX実験の加熱効率は次の4つのファクターの積で考えることが出来る。

加熱効率

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

(1)のレーザーから高速電子への変換効率は様々な運動エネルギーを持つ粒子をエネルギー積分した変換効率として定義し、最終的なコアへの粒子エネルギー付与の運動エネルギー依存性は(4)で評価することにする。また、途中の(2)及び(3)における粒子エネルギー依存性は無視できるものとする。図1に2次元PIC計算及びFP計算等により理論的に推定された加熱効率(1)~(4)及び全項目を掛けた値を示す。レーザーから高速電子への変換は80%程度であるが、そのうちLFEXレーザー照射方向(前方)へ進む電子のエネルギー割合は50%と見積もられる。前方に進む高速電子はコーンチップに於いて、電子-電子熱化及び電子-イオン散乱によって進行を妨げられるため、金10 μm 厚のコーンチップの壁を通り抜けられる高速電子のエネルギー割合は60%程度である。また、金10 μm 厚のコーンチップの透過率を含む爆縮コアに到達する高速電子のエネルギー割合は30-40%と見積もられるため、金コーンチップを透過した電子が爆縮コアに到達する割合はエネルギーで60%と見積もられた。この60%の値はコーンチップと爆縮コアとの距離に依存して変化すると考えられるが、現状はコーンチップと爆縮中心との距離は50 μm の仮定で計算されている。高速電子の発散角が全角で110°もあると推定される現

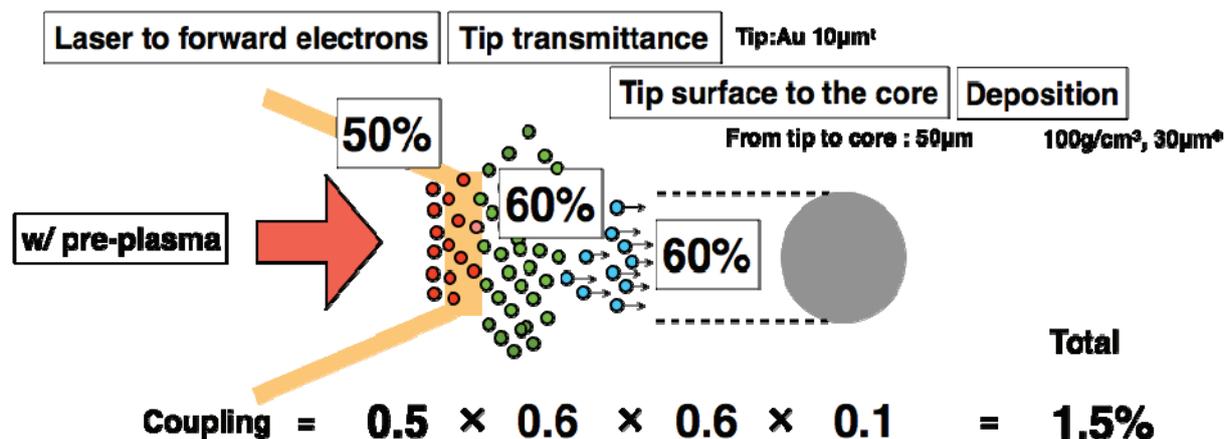


図1 爆縮コア加熱の加熱効率を決める4つの要素の概念図

状ではコーン先端から50 μm 離れた直径30 μm (仮定)の爆縮コアに到達する割合は単純な幾何学的立体角を見積ると、60%よりも遥かに小さい値となるが、コーン回りに生成される電場及び磁場の効果により結合効率は幾何的な見積りよりも増加する。高速電子の発散角については主にワイベル不安定性に起因する自己生成磁場が高速電子を曲げている効果と、横方向へのポンデラモーティブ力によって前方以外に高速電子が加速されていると考えられ、プリプラズマの長さに依存することが判って来ている。現状の110°の大きな発散角では大きな加熱効率が期待できず、これを改善する方法としてLFEXレーザーを直接コアに照射する直接加熱が考えられた。この直接方式では加熱効率の要素(2)と(3)がほぼ100%と見なすことができるため、加熱効率が格段に良くなる他、高速イオンの加熱への寄与も期待できる。本稿では高速イオンの加熱寄与を評価した。

2. 高速イオンの発生

高速イオンは次の機構により発生する。まず、超高強度レーザーがプラズマに照射されるとポンデラモーティブ力により高速電子が加速される。イオンは電子に比べて遥かに重いいため取り残され、デバイ長の範囲内で荷電分離が生じ、電場が生成される。この電場によってイオンは加速される。S.WilksのPIC計算¹⁾に基づき、プラズマをCDプラズマと仮定して、発生する高速イオンへの変換効率を見積ると図2のようになる。図2では様々な密度を仮定して炭素(C^{6+})及び重水素(D^+)イオンへの変換効率を見積もっているが、超高強度レーザーが実際に相互作用するのは主に臨界密度(ncr)から相対論的臨界密度(γncr)付近である。これにより現在のLFEXレーザーの集光強度 $1 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ では1%程度の変換効率があることが解る。同様に、加速された炭素イオン(C^{6+})の運動エネルギーについて見積ると図3のようになる。加速された粒子のエネルギーはレーザー強度増加とともに大きくなる。ここではCDプラズマが完全電離していると仮定して、 C^{6+} , D^+ を考えているが、どちらも $Z/A = (\text{電離度}) / (\text{質量数})$ は同じであり、同様の加速度で

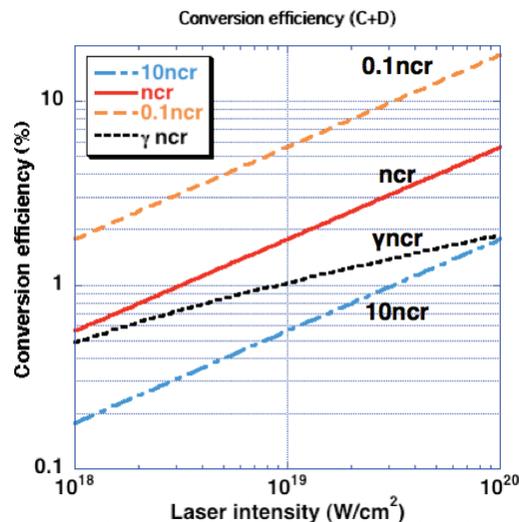


図2 炭素及び重水素イオンへの変換効率 (レーザーが相互作用する密度はそれぞれ 0.1×臨界密度、臨界密度、相対論的臨界密度、10×臨界密度)

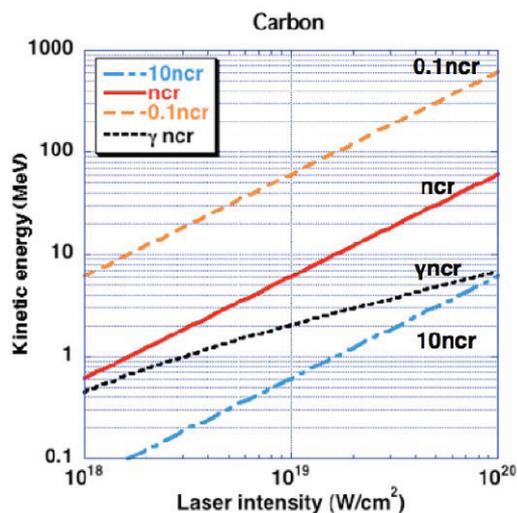


図3 加速された炭素イオン(C^{6+})の運動エネルギー (レーザーが相互作用する密度はそれぞれ 0.1×臨界密度、臨界密度、相対論的臨界密度、10×臨界密度)

もって加速される。そのため質量の大きな C^{6+} が D^+ の6倍のエネルギーをもつことになり、加速された高速イオンが爆縮加熱に寄与するのはほとんど C^{6+} ということになる。

3. 高速イオンの阻止能および爆縮コア加熱

次に高速イオンの阻止能について考える¹²⁾。発生し

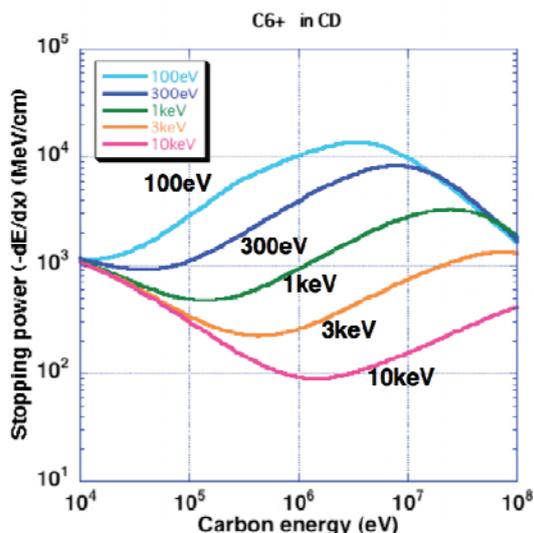


図4 CD プラズマの温度が 100 eV, 300 eV, 1 keV, 3 keV, 10 keV のときの CD プラズマ中の C^{6+} の阻止能 (横軸は入射する C^{6+} の運動エネルギー)

た高速イオン C^{6+} と D^+ が CD プラズマ中でどのようにエネルギーを付与しながら減速するかを評価するために、イオンの阻止能を計算した。阻止能計算は一般的には核的阻止能、束縛電子による阻止能 (LSS、ベーテ理論)、及びプラズマの自由電子とのクーロン散乱を考慮した阻止能により計算され、その合計をトータルの阻止能とする。CD プラズマ中の MeV 程度の運動エネルギーを持つ C^{6+} の高速イオンの阻止能を見積もると図4のようになる。

CD プラズマ中の MeV の C^{6+} の高速イオンはほとんどのエネルギーを自由電子に対して付与し減速したところで、核との衝突によりイオン (原子核) にエネルギーを付与する。図4で右上がりの曲線部分は自由電子の阻止能が効いている部分であり、図の左側、左上りの部分は核的阻止能が支配的である。これらの阻止能計算と電子-イオンエネルギー緩和を合わせて考慮し、プラズマに高速イオンが入射した際の温度上昇を求めたものが図5である。ここでは完全電離を仮定し、流体は静止しているものとした。また、プラズマの密度は 50 g/cc をピークに持つガウシアンを仮定したが、後でみるように、 C^{6+} は主に 1 から 10 g/cc 程度で止まってしまうため、密

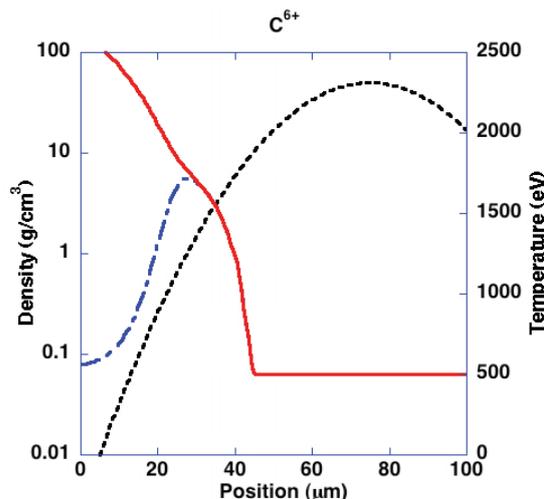


図5 50 g/cc のガウシアン形状を持つ CD プラズマに高速イオンを入射させた時の温度分布 (実線は電子温度、一点鎖線はイオン温度、破線は密度)

度プロファイルをどのように初期に設定しようと、結果は大きく影響を受けない。高速イオン入射後 30 ps の温度緩和を考慮しているため、低密度極限を除き、イオンと電子の温度は一致している。

図5より温度ピークの値は 1.7 keV に到達すると見積もられた。この計算は1次元で流体は動かさない、輻射損失を考慮していないなど、非常に理想化された条件で計算をおこなっているため、実際の温度上昇はこれより低いと考えられるが、変換効率 1% 程度の低い変換効率であっても、高速イオンにより 1 keV を超える爆縮コア加熱が達成出来る事を理論的に示した意味は大きい。

3. 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 のコア点火温度達成の具体的な道筋はまだ明らかになったとは言い難いが、本年度の多くの基礎実験とその解析を通じて高速点火の物理の定量的な理解はかなり進んだと言える。その中で、従来の高速電子による加熱に加え、高速イオンによる加熱という新たな概念が出て来た。本研究では現状の LFEX レーザーで炭素イオン (C^{6+}) への変換効率が 1% 程

度であることを示し、1%の変換効率しかなくても1 keVを超える爆縮加熱が可能であることを計算で示した。来年度以降、LFEXレーザーの増力とコントラストの向上、コーンターゲットの最適化や電子収束が達成されたならば、加熱効率は増大することが予想される。さらに、高速イオンの変換効率はレーザー強度の増加とともに増えるため、高速電子の加熱に加え、さらに高温爆縮コ

ア加熱が達成される可能性がある。

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レンジで容易に変換出来る。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。本稿では平成24年度に行ったプラズマ入射粒子の阻止能計算の成果について記述する。

2. 阻止能計算

核融合炉壁への熱源として実際の核融合生成粒子やX線の代わりにレーザーを用いる方法は実験室レベルで核融合炉壁材料の熱特性を調べる方法として非常に有益であるが、一方で、本当の炉壁における荷電粒子及びX線と炉壁との相互作用についても深く理解し、レーザーを用いる際に実際の炉壁の条件と何が異なるのかを把握しておく必要がある。我々は実際の核融合炉壁について、数値シミュレーションによる熱応答解析を行なうため、様々な炉材料に荷電粒子を入射させた場合の阻止能計算を行う一次元のコードを開発した^{1,2)}。具体的には核的阻止能、ベータ阻止能、プラズマクーロン散

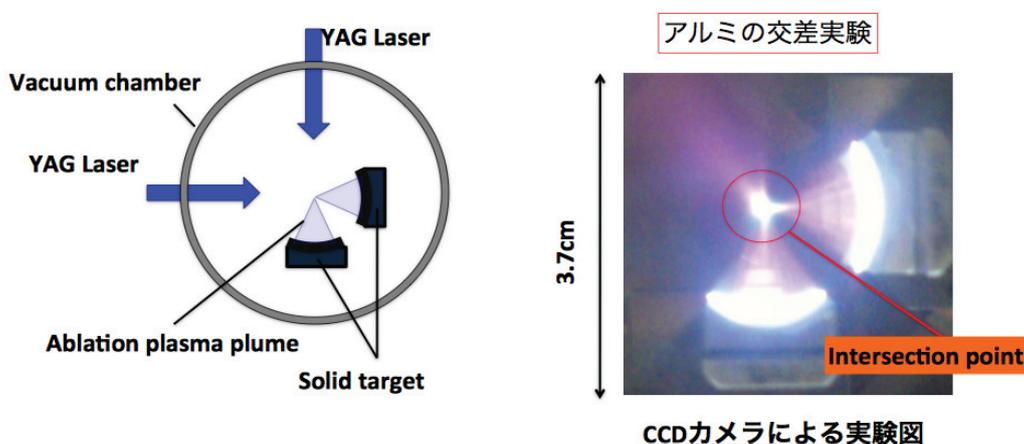


図1 レーザー核融合炉壁アブレーションの模擬実験

乱による阻止能等のモデルを導入し、室温からプラズマまでの温度域に対して阻止能を計算する。図2は核融合燃焼によって発生するプロトンを炉心から4 m離れたカーボン壁材に対して入射させた場合のプロトンからカーボンへのエネルギー付与計算の例で、プロトン入射によって表面(左)から温度が上昇し、表面から深さ10 μm 程度で温度がピークを迎える、いわゆるブラッグピークがとらえられている。温度の最大値は1000度以下になっており、昇華点3652度よりも低い値にとどまっている。

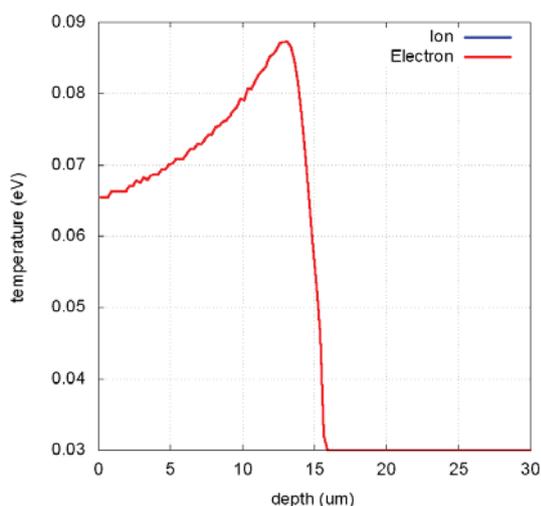


図2 カーボン壁へのプロトン照射によるカーボン壁の温度上昇

また、核融合炉心プラズマからの輻射による核融合炉壁への影響も評価している。図3に、核融合燃焼プラズマにおいて発生するX線を10 keVの輝度温度を持つ黒体輻射と仮定し、炉心から4 mの距離にあるカーボン壁を照射した場合のX線による炉壁の温度上昇の計算結果を示す。カーボン壁の場合、一回の核融合反応で発生するX線による壁の温度上昇は図3より明らかなように非常に小さい。これはカーボンの輻射吸収係数が比較的小さいことが効いており、タングステン壁など、高Z

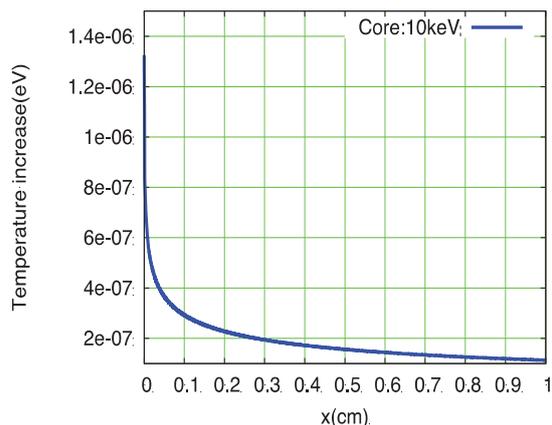


図3 カーボン壁への核融合燃焼プラズマからのX線照射による温度上昇

の炉材料を壁に用いる場合にはカーボンよりも輻射による壁表面の温度上昇は大きくなる。また、実際の核融合炉は高繰り返し運転であり、今後、繰り返しを想定した温度上昇を見積もる必要がある。これらの解析は炉内部の流体運動などを見積もる際の初期条件となるもので、炉設計にとって、非常に重要である。今後さらに詳細な原子過程を組み込むなど、精度を高めた評価を進めて行く予定である。

3. まとめ

核融合炉壁へのX線及び粒子照射による壁の温度上昇を見積もった。今後は壁材料に入射するプラズマ粒子の挙動を解析するためのイオン阻止能計算コードの開発を進め、詳細原子過程及び多次元化を図る予定である。また、壁から噴き出したプルームが核融合炉の中でどのような振る舞いをするかを計算するための多次元放射流体計算コードの開発を進める。

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の2次元シミュレーション

理論・シミュレーションチーム

古河裕之、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

レーザー技術総合研究所では、大阪産業大学及び近畿大学と共同で、レーザーピーニング及びその産業応用に関して精力的に研究を行っている。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によりプラズマを生成し、その圧力により固体内部に衝撃波を発生させ、固体内部に圧縮応力状態を作り、金属表面近傍に圧縮残留応力層や硬化層を形成させ、固体の強度を高める技術である。航空機部品の疲労対策や、原子炉における応力腐食割れの防止策として、さらなる最適化のために研究が続けられている。

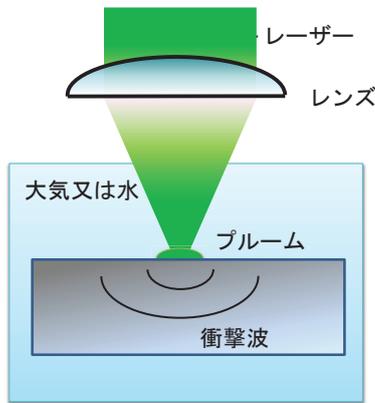


図1 レーザーピーニングの概念図

本研究において、連続体・流体力学的アプローチを基本とし、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¹²⁾。開発した統合コードは、噴出したプラズマの運動方程式の右辺に応力からなる関数を含んでおり、固体内部の応力の分布も評価できる。固体から液体、液体から気体への相変化も取り込んでいる。また、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の計算も可能である。

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、レーザー生成プラズマの解析のモデルとしてよく使われる、Fabbro氏のモデルについて考察する。第4章は、2次元シミュレーションの結果及び考察、第5章は、結言である。

2. 開発したシミュレーションコード¹²⁾

図2は、開発したシミュレーションコードのフローチャートである。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範囲で求める。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。

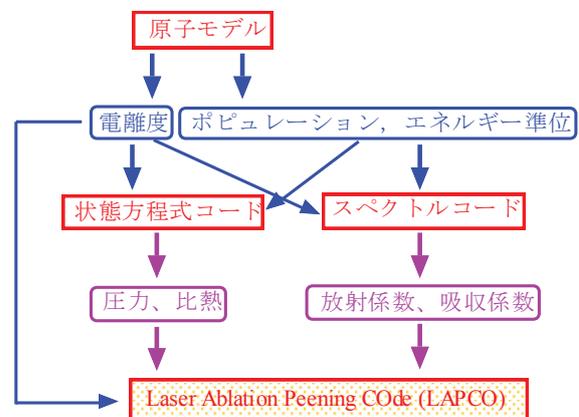


図2 開発したシミュレーションコードのフローチャート

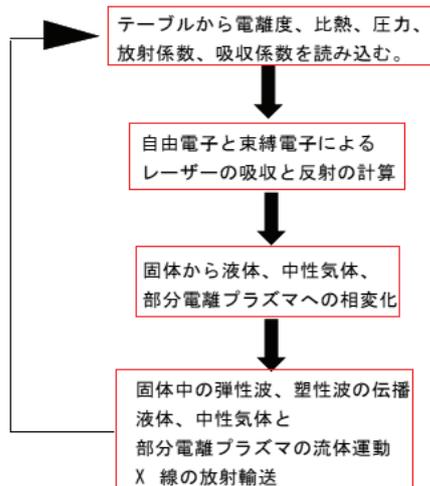


図3 LAPCO のフローチャート

開発したシミュレーションコードの特長を記す。

- (1) 金属に関して、固体、液体、中性気体、部分電離プラズマの相変化を取り入れている³⁾。金属材料から空気または水への熱伝達を取り入れ、空気または水の流体運動をも解くことにより、空気または水の熱の伝搬、衝撃波の伝搬等も評価できる。
- (2) 固体中の弾性応力の分布、及びその時間発展を求めることができる。
- (3) 自由電子の逆運動放射、共鳴吸収、束縛電子によるレーザーの吸収⁴⁾を取り入れた。誘電応答関数を用いて全ての空間格子点上での、レーザー光の反射も計算している。
- (4) 岡山大学西川氏が開発した、方位量子数依存性を取り入れた新しい遮蔽水素様モデル⁵⁻⁷⁾を用いて、状態方程式、放射係数・吸収係数のデータを作成し、それらを取り込み、放射流体運動を評価できるようにした。西川氏は、文献5の執筆分担者である。
- (5) 部分電離プラズマの領域の計算には、1 流体 2 温度モデルを採用した。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も解いている。
- (6) 固体、固体と液体の混合領域、液体中、液体と気体の混合領域、及び中性気体のエネルギー方程式としては、1 温度を仮定した物を用いている。
- (7) 熱束制限多群拡散近似により、X 線放射輸送過程を評価している。

3. Fabbro 氏のモデルについての考察

レーザー生成プルームの解析のモデルとしてよく使われる、Fabbro 氏のモデルについて考察する。図4は、Fabbro 氏のモデルの概念図である⁸⁾。時刻 t において、内部エネルギー $E_i(t)$ 、圧力 $P_i(t)$ 、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 $P_i(t+dt)$ 、長さ $L(t+dt)$ のプルームに変わるとしている。Fabbro 氏の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⁸⁾。よって、Fabbro 氏の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。

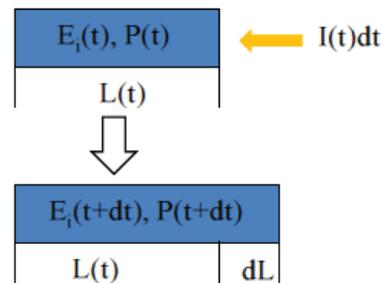


図4 Fabbro 氏のモデルの概念図

Fabbro 氏のモデルにおいて、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⁾。

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

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 氏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(2)で関係付けられる⁸⁾。

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

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 と衝撃波速度 u_i を用いて、以下のように表される。

$$Z_i = \rho_i u_i \quad (3)$$

レーザー強度 I を時間によらず一定とし、(1)式において圧力の時間微分の項を無視し（物理的な妥当性は不明）、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。

$$P = \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{Z} \sqrt{I} \quad (4)$$

$$L(t) = t \frac{2}{\sqrt{Z}} \sqrt{\frac{\alpha}{2\alpha+3}} \sqrt{I} \quad (5)$$

(4)式の結果は、時刻 0 からレーザーが照射されている間は、時間的に一定の圧力（空間的にも同様）が生じることを意味する。レーザー核融合のように超高強度パルスレーザーを照射した場合には成立すると思われるが、レーザーピーニングの様に、数 GW/cm^2 から数十 GW/cm^2 のパルスレーザーを照射する場合には、1次元シミュレーション等と比較検討する必要がある。

水中でアルミニウムに、強度一定、パルス幅 7.5 ns のレーザーを照射した場合を例にとる。水の質量密度 $1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、衝撃波速度（音速） $148290 \text{ cm}/\text{s}$ 、アルミニウムの質量密度 $2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、衝撃波速度（音速） $642000 \text{ cm}/\text{s}$ 、を用いると、 $Z=0.2732 \times 10^6 \text{ g}/\text{cm}^2/\text{s}$ となる。 $\alpha=0.2$ （この値は業界標準）を仮定すると、

$$P(\text{GPa}) = 1.27 \sqrt{I(\text{GW}/\text{cm}^2)} \quad (6)$$

$$L(t)(\mu\text{m}) = t(\text{ns}) \times 0.9279 \sqrt{I(\text{GW}/\text{cm}^2)} \quad (7)$$

となる。 $I=20 \text{ GW}/\text{cm}^2$ の場合、 $P=5.68 \text{ GPa}$ 、 $L(7.5 \text{ ns})=31.12 \mu\text{m}$ となる。

1次元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5に示す。レーザーの強度は $20 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 、波長は 532 nm である。短時間間に圧力は急激に増加し、その後 4.5 GPa 程度を中心に振動している。 5.68 GPa より小さいのは、レーザーの吸収率が 100%でないこと、吸収されたエネルギーは固体にも輸送されること、などが理由として挙げられる。図中の Simple Model は、(4)式のことである。

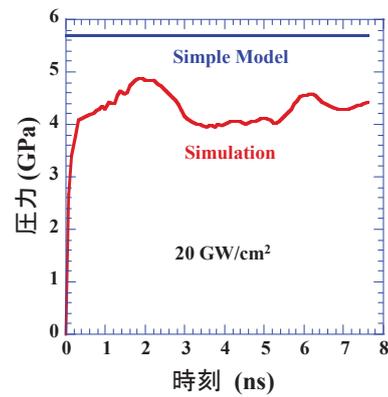


図5 1次元シミュレーションで求めた各々の時刻におけるプルーム中の圧力の空間平均値の時間変化

図6は、1次元シミュレーション及び(5)式で求めたプルームの長さ、図7は、時刻 7.5 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。シミュレーションの方がプルームの長さが長い。温度密度により衝撃波速度が変わること、圧力が空間構造を持っていること、等が理由としてあげられる。図中の Simple Model は、(5)式のことである。

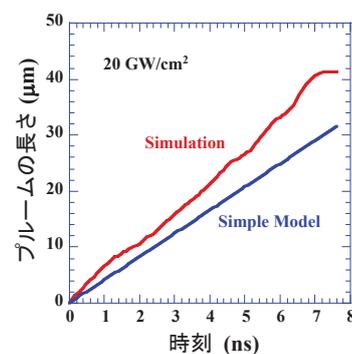


図6 1次元シミュレーション及びSimple Model で求めた、各々の時刻におけるプルームの長さ

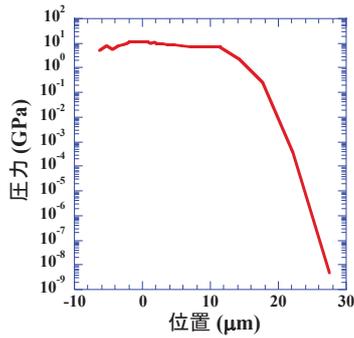


図7 時刻 7.5 ns 時の圧力の空間分布

レーザーの強度を 2.5 GW/cm^2 とした場合の、プルーム中の圧力の空間平均値の時間変化を図8に、プルームの長さを図9に示す。 20 GW/cm^2 の場合と違い、短時間で圧力値は上昇するが、その後圧力値は少しずつ低下している。レーザー強度が低いため、吸収されたレーザーエネルギーの内、相変化や電子の励起電離などに使われるエネルギーが相対的に大きくなること、等が理由としてあげられる。プルームの長さについては、圧力の空間分布などが理由として考えられる。

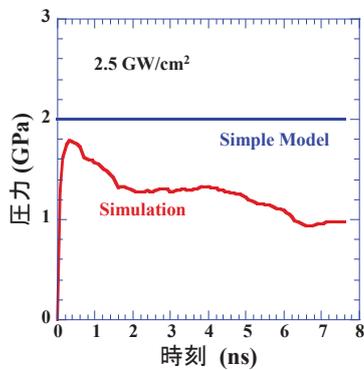


図8 各々の時刻におけるプルーム中の圧力の空間平均値の時間変化

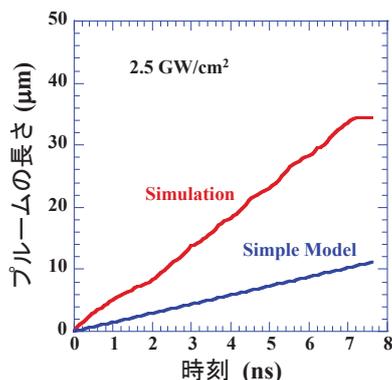


図9 各々の時刻におけるプルームの長さ

鉄についても同様の評価を行なった。水の質量密度 1.0 g/cm^3 、衝撃波速度（音速） 148290 cm/s 、鉄の質量密度 7.86 g/cm^3 、衝撃波速度（音速） 595000 cm/s 、を用いると、 $Z = 0.2875 \times 10^6 \text{ g/cm}^2/\text{s}$ となる。レーザー強度を 20 GW/cm^2 とした時の、プルーム中の圧力の空間平均値の時間変化を図10に示す。圧力の時間変化がアルミニウムの場合と若干異なっているが、それは励起や電離に必要なエネルギーの違いなどが原因と考えられる。

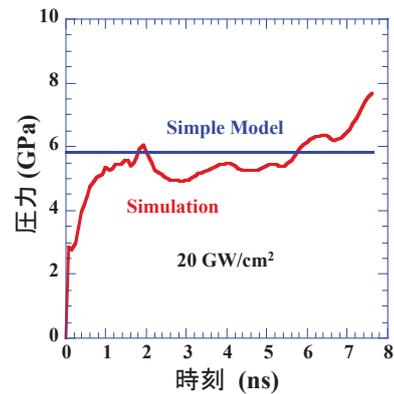


図10 各々の時刻におけるプルーム中の圧力の空間平均値の時間変化

図11は、各々の時刻におけるプルームの長さである。アルミニウムの場合とほぼ同様の傾向を示している。

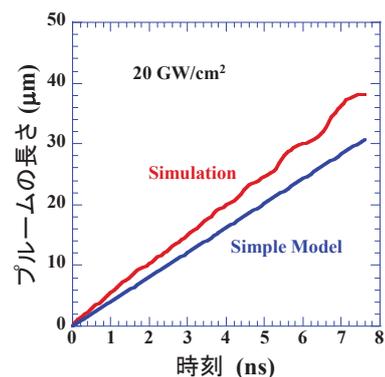


図11 各々の時刻におけるプルームの長さ

レーザーの強度を 2.5 GW/cm^2 とした場合の、プルーム中の圧力の空間平均値の時間変化を図12に、プルームの長さを図13に示す。シミュレーションではアルミニウムの場合より若干短い、理由は質量密度の違いである。

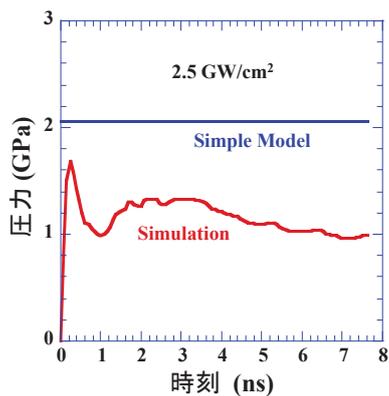


図12 プルーム中の圧力の空間平均値の時間変化

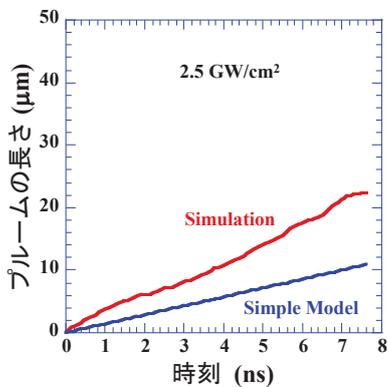
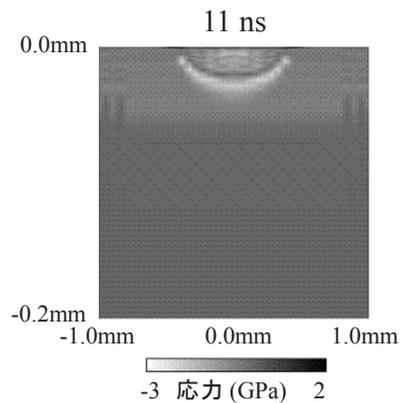


図13 プルームの長さ

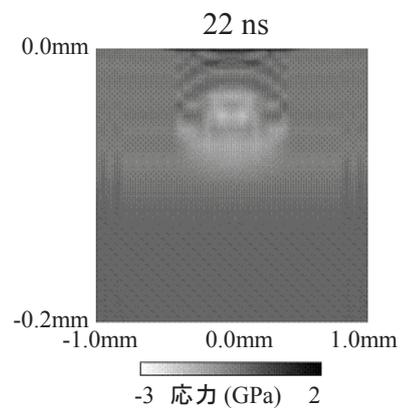
4. 2次元シミュレーションの結果と考察

水中でアルミニウムに、波長 532 nm (YAG レーザーの 2 ω 光)、パルス幅 7.5 ns、パルス波形はガウシアン、ビームプロファイルもガウシアンレーザーを照射した場合について、2次元シミュレーションを行なった。ピーク強度は 10 GW/cm²、2.5 GW/cm²の2種類、ビーム径は 400 μ m と 200 μ m の2種類、計4種類についてシミュレーションを行なった。

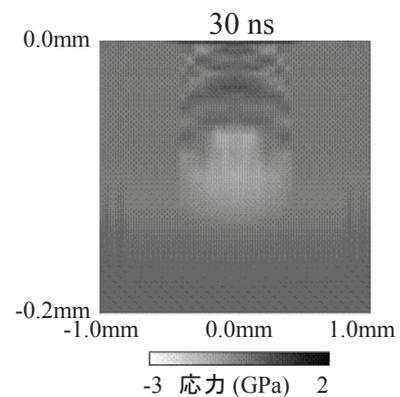
図14は、ピーク強度 10 GW/cm²、ビーム径 400 μ m の場合の応力分布である。(a) は 11 ns 時、(b) は 22 ns 時、(c) は 30 ns 時である。白(-) は圧縮応力、黒(+) は引張応力を表す。横方向に 800 μ m (スポット径の2倍) 程度の範囲で圧縮応力が生成され、時間経過により固体内部に進展している、ことがわかる。レーザーが照射されていない領域でも圧縮応力が生成されているが、これは水圧によるものと考えられる。



(a) 11 ns 時



(b) 22 ns 時



(c) 30 ns 時

図14 ピーク強度 10 GW/cm²、ビーム径 400 μ m の場合の応力分布

図15は、ピーク強度 10 GW/cm²、ビーム径 200 μ m、30 ns 時の応力分布である。横方向に 200 μ m (スポット径) 程度の範囲で圧縮応力が生成されている。図14(c)と比較すると、圧縮応力が生成されている範囲が大幅に減少していることがわかる。スポット径を2倍にすると、それ以上に固体の硬度が増加することが期待できる。

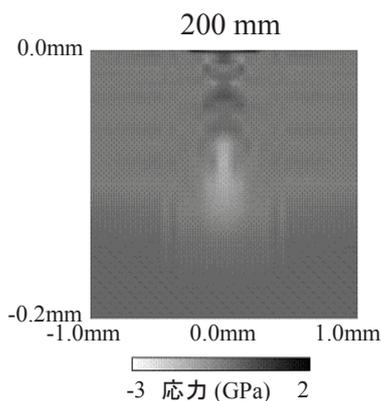


図15 ピーク強度 10 GW/cm^2 、ビーム径 $200 \mu\text{m}$ 、30 ns 時の応力分布

図16は、ピーク強度 2.5 GW/cm^2 、ビーム径 $400 \mu\text{m}$ 、30 ns 時の応力分布である。図14(c)と比較すると、圧縮応力が生成されている範囲が減少し、圧縮応力の絶対値も大きく減少していることがわかる。アルミニウムの硬度を上げるには、ある程度以上の強度とスポット径が必要である、ことがわかった。

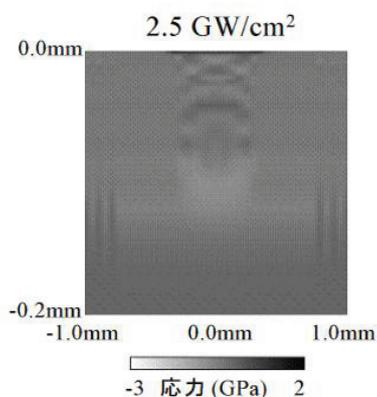


図16 ピーク強度 2.5 GW/cm^2 、ビーム径 $400 \mu\text{m}$ 、30 ns 時の応力分布

図17は、水中で鉄に、波長 532 nm 、パルス幅 4 ns 、パルス波形はガウシアン、ビームプロファイルもガウシアン、ピーク強度 10 GW/cm^2 、ビーム径 $400 \mu\text{m}$ のレーザーを照射した際の、30 ns 時の応力分布である。横方向に 1 mm （スポット径の2.5倍）程度の範囲で圧縮応力が生成されている。図14(c)と比較すると、圧縮応力が生成されている範囲が増加しており、圧縮応力の絶対値も大きくなっている、ことがわかる。材料による応力分布の違いが示された。

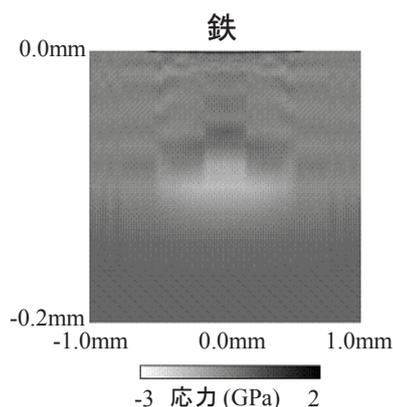


図17 水中で鉄に、ピーク強度 10 GW/cm^2 、ビーム径 $400 \mu\text{m}$ のレーザーを照射した際の、30 ns 時の応力分布

5. 結言

本研究において、相変化及び弾性応力の効果を取り入れた、2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。

水中でレーザーをアルミニウムに照射した場合の、圧縮応力の空間分布を求めた。アルミニウムの硬度を上げるには、ある程度以上の強度とスポット径が必要である、ことがわかった。鉄でも同様のシミュレーションを行なった結果、材料による応力分布の違いが示された。

参考文献

- 1) 古河裕之: レーザー研究, **36**, 742-746, 2008.
- 2) 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.
- 3) S. I. Anisimov and B. S. Luk'yanchuk: Physics-Usppekhi, **45**, 293-324, 2002.
- 4) M. V. Allmen and A. Blatter: Laser-Beam Interactions with Materials, Springer, 1995.
- 5) Vivek Bakshi: EUV Sources for Lithography, SPIE Publications, 2006.
- 6) R. M. More: J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer, **27**, 345-357, 1982.
- 7) F. Perrot: Phys. Scripta, **39**, 332-337, 1989.
- 8) P. Peyre, R. Fabbro, P. Merrien, and H. P. Lieurade: Materials Science and Engineering, **A210**, 102-113, 1996.

レーザー核融合炉液体壁チェンバー内の アブレーション生成プルームの2次元シミュレーション

理論・シミュレーションチーム

古河裕之、乗松孝好¹

¹大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

1. はじめに

レーザー核融合炉発電プラント設計の主な課題の一つに、チェンバー内の金属蒸気の排気がある¹⁻³⁾。高速点火レーザー核融合炉発電プラント「KOYO-fast」においては、厚さ3 mmから5 mm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。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。KOYO-fastでは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（図1）。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。

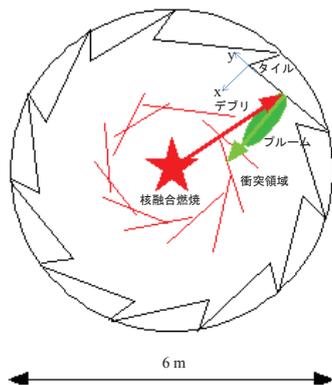


図1 KOYO-fastの液体壁チェンバー第一壁のタイル構造の概念図

これらの複合複雑現象を解析するため、著者らは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、プルームの挙動を2次元的に評価した。最初の2 μ sの計算を1次元で行い、その結果を2次元コードに入力して、さらに計算を進めた。

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

2. 開発したシミュレーションコード^{1,3)}

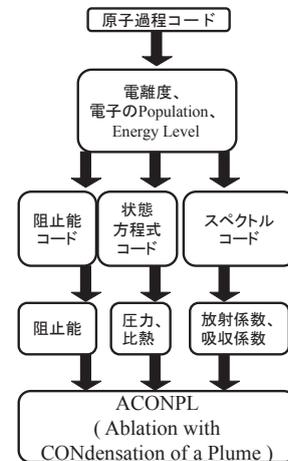


図2 DECOREの概要

図2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⁾。

3. 生成されるプルームの2次元挙動解析

高速点火核融合燃焼から放出される、X線、 α 粒子、デブリ粒子等のパルス出力⁵⁾により、液体壁はアブレーションされる。本研究では、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。用いた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を参照されたし。炉心からのX線のスペクトルと、鉛に対するX線の吸収係数については、文献1を参照のこと。

図3は、1次元シミュレーションにより得られた、レーザーが燃料球に照射されてから2 μ s後の、プルームの数密度（鉛の原子数密度に換算したもの）、及び電子温度のプロファイルである。0 cm（タイルの表面）近傍で、約2桁密度分布が急激に低下していることが分かる。図中の $x < 0$ の部分は、バルクの液体領域である。プルームの数密度は、指数関数的で約7桁程度の分布である。0.5 cm $< x < 2.5$ cm程度の領域では、電子温度は6000 Kから7000 K程度である。

図4は、レーザーが燃料球に照射されてから2 μ s後の、数密度、及び速度のプロファイルである。プルームの先端近傍では、速度は40 km/s程度になっている。分布は、ほぼ線形である。

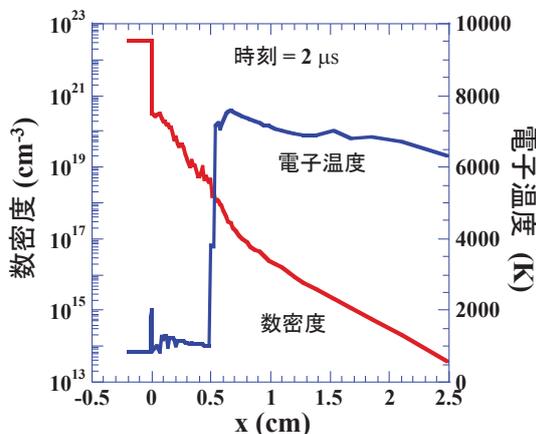


図3 レーザーが燃料球に照射されてから2 μ s後の、数密度、電子温度のプロファイル

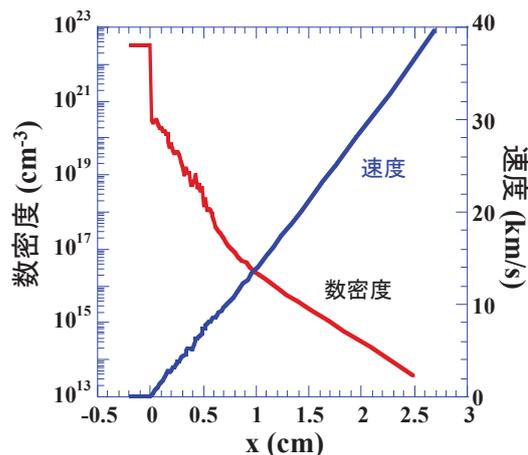


図4 レーザーが燃料球に照射されてから2 μ s後の、数密度、速度のプロファイル

レーザーが燃料球に照射されてから2 μ s後までを1次元シミュレーションにより計算し、1次元の計算結果を入力し、2次元計算を行なった。図5は2次元計算により得られた数密度分布である。(a)は2 μ s時、(b)は2.5 μ s時である。 x, y はそれぞれ、図1の x, y に対応する。プルームの根元（壁側）は横に広がっているが、先端部分は殆ど横方向には広がっていない。図5の結果が正しければ、チェンバーの中心部ではプルーム同士が衝突する確率は極めて低い。

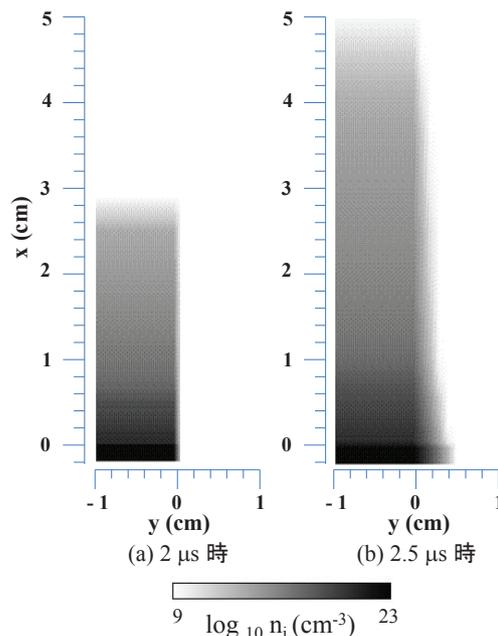


図5 2次元計算により得られた数密度分布 (a) 2 μ s時 (b) 2.5 μ s時

4. 結言と今後の課題

本研究により、レーザー核融合液体壁チェンバー第一壁のタイル構造の有効性が議論できるようになった。今後、液体壁と X 線、 α 粒子、荷電粒子の相互作用も 2 次元で計算を行う。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, 苫米地顕, 山中千代衛: プラズマ核融合学会誌, **82**, 617-627, 2006.
- 2) 神前康次, 乗松孝好, 古河裕之, 林巧, 惣万芳人, 西川正史, 苫米地顕: プラズマ核融合学会誌, **83**, 19-27, 2007.
- 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.

光学素子レーザー損傷閾値データベースの構築 —ダイクロイックミラーの損傷閾値の評価—

レーザー技術開発室

本越伸二、加藤宏太、實野孝久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

レーザーおよびその応用装置には多くの光学素子が使用され、その性能は装置全体の性能を大きく左右する。その中で「レーザー損傷耐力（損傷閾値）」は高出力レーザー装置を設計し、また使用する上で、重要な項目であり、レーザーの発明以来、その損傷物理の理解、高耐力化の研究が多く、研究機関や企業により進められてきた¹⁾。現在、レーザー損傷耐力の評価方法は国際標準として、ISO-21254-Part-1~4で提唱されている。しかし、国内では、未だレーザー損傷耐力は一般的ではなく、多くのユーザーは入手した光学素子の損傷閾値が判らないまま使用し、反対にメーカーは使用したユーザーからの情報が唯一の判断基準となっている。

レーザー技術総合研究所では、平成17年度より、一般に使用されている光学素子のレーザー損傷閾値の評価試験を実施し、毎年十数社からの依頼を受けている。その評価結果に対し、自社の光学素子のレーザー損傷閾値を知ることができるが、他社の素子との比較がしたいなどの意見があった。これに 대응するために、平成20年度に「高耐力光学素子研究会」を設置し、同一仕様の光学素子に対して同一レーザー条件の下でレーザー損傷耐力試験を実施し、比較可能なデータベースの構築を進めてきた。これまで、波長1064 nm、532 nm、355 nm、248 nmにおける光学素子に対して、データベース化試験を実施した^{2,7)}。これらデータベースは、ユーザーにとってはレーザー装置を設計、利用する際の基準となるものであり、またメーカーにとっては、自社の現状技術に対する評価と高耐力化に向けた開発目標値を設定する指針となるものである。

これまでのデータベース化試験は、単一波長に対するものであった。しかし、非線形光学結晶を用いた波長変

換を行う場合や、半導体レーザーを用いて固体レーザーを励起する場合など、複数の波長に対して光学特性を要求し使用することも多い。平成24年度は、波長変換後に基本波と高調波を分離するミラー（ダイクロイックミラー）に着目し、データベース化試験を実施した。

2. 高耐力ダイクロイックミラーの設計概念

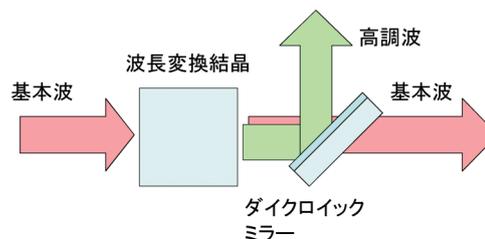


図1 ダイクロイックミラーの用途

1064 nmの基本波と532 nmの高調波を分離するダイクロイックミラーには、1064 nmを反射し532 nmを透過するショートパスフィルタ（SPF）型と、逆に1064 nmを透過し532 nmを反射するロングパスフィルタ（LPF）型の2種類がある。これらは、装置の光学配置や用途に応じて選択される。しかし、SPF型では、(1)高い膜厚制御が必要、(2)使用する材料が限定される、などの理由から、一般に高出力レーザー装置の波長分離には図1に示すようなLPF型が使用される。

誘電体多層膜ミラーの基本設計は、反射波長 λ_1 に対して異なった屈折率材料を光学膜厚（屈折率×物理膜厚） $\lambda_1/4$ で積層することによって行われる。低屈折率材料、高屈折率材料の $\lambda_1/4$ 厚をそれぞれ L, H とし、繰返し積層数を n とすると膜設計は

$$\text{空気} / L [H/L]^n / \text{基板}$$

または

$$\text{空気} / H [L/H]^n / \text{基板}$$

となる。この単純な $\lambda/4$ 厚の積層では、中心波長を線対称として短波長側、長波長側に高い反射率を示す波長域が周期的に表れる。このため、LPF型では、最表面側と最基板側に $\lambda/8$ 厚の高屈折率材料層を設けた

$$\text{空気} / 0.5H/L [H/L]^n 0.5H / \text{基板}$$

の膜設計により、長波長側の周期的な反射率を抑えている。

図2は、透過波長 λ_2 に対する特性を改善させたダイクロイックミラーの分光特性である。また図3にそのミラ

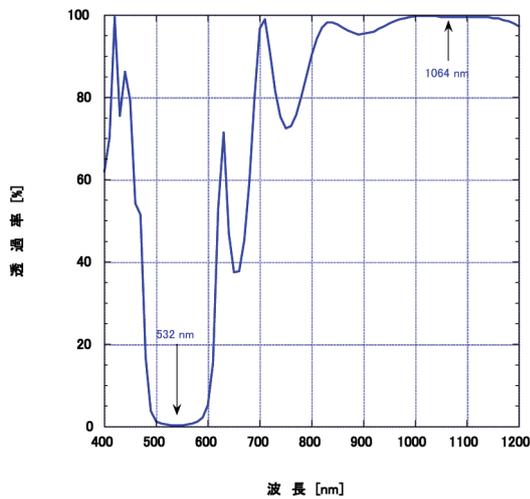


図2 ダイクロイックミラー分光特性 (計算)

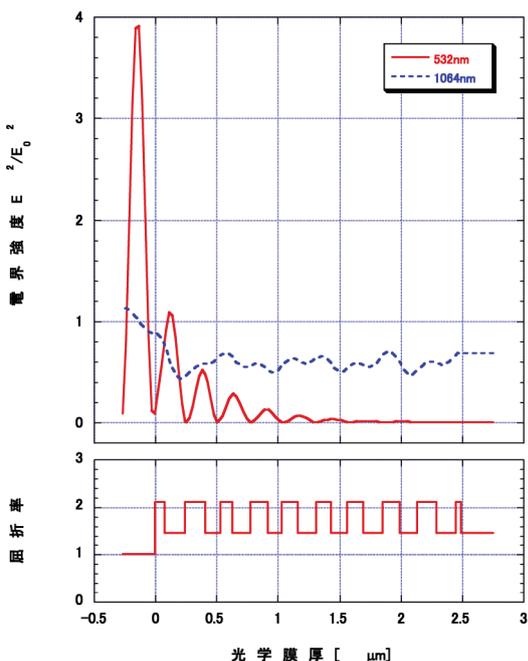


図3 ダイクロイックミラー内電界強度分 (計算)

一の膜内の電界強度分布を示す。図3より、反射する532 nm 光に対しては第1、2層目の境界面で大きな電界強度が存在する。532 nm 光に対する高耐力化のためには、この境界面での電界強度を抑えるように膜厚を調整することが必要である。また、532 nm 光は第10層以降では電界強度はほぼ0となることから、532 nm による損傷はないと考えられる。一方、1064 nm 光は全ての層に対してほぼ同じ電界強度となるため、損傷の発生確率はほぼ同じである。特に、同じ電界強度が基板との境界面に到達することから、基板表面の粗さ、不純物に対しても考慮が必要となる。

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。また、532 nm光は、KTP結晶(5×5×5 mm³)を用いて変換した。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顕微鏡(50倍)により観察した。レーザー損傷閾値は、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. 試料仕様

提供をお願いしたダイクロイックミラーの仕様を表1に示す。入射角は波長分離に多く用いられる45°とし、反射率は532 nmに対して99.0%以上、1064 nmに対し

て0.5%以下とした。1064 nm 光が基板表面まで到達することから、基板材料を石英基板、表面粗さを10Å以下でお願いした。参加企業数は10社で、24個の試料について評価を行った。

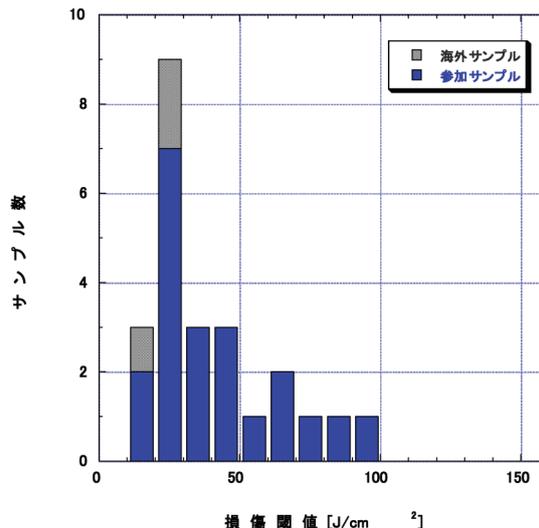
表1 データベース化試験光学素子の仕様

第9回、第10回	
素子	ダイクロイックミラー
波長	1064nm/532nm
パルス幅	10ns
入射角度	45°
偏光	P
反射率	>99.0% @532 nm <0.5% @1064 nm
基板材料	合成石英
基板面精度	λ以下(@633nm)
基板表面粗さ	RMS <10Å
表面仕様	同等研磨コートなし
参加企業数	10社
試料数	24

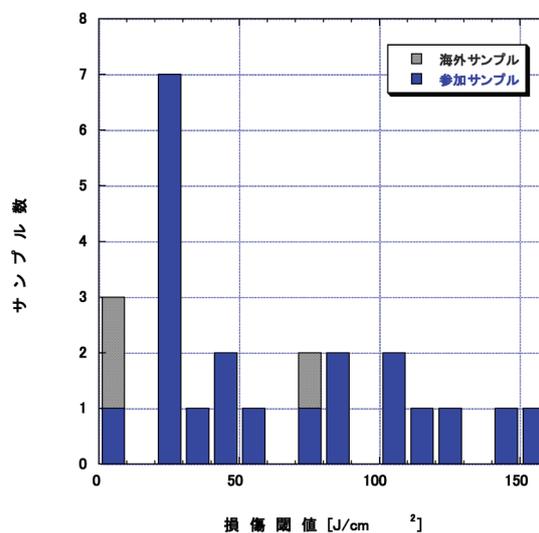
5. ダイクロイックミラーの評価結果

図4にダイクロイックミラー損傷閾値の評価結果を示す。1064 nm 光に対しては、最大96 J/cm²が得られ、最も頻度の多い閾値は、20-30 J/cm²であることが判った。一方で、532 nm 光に対する損傷閾値は、最大153 J/cm²を示し、最多頻度閾値は1064 nm と同じ20-30 J/cm²が得られた。

第2回データベース化試験で行った1064 nm用反射防止膜の結果では、最大317 J/cm²と石英ガラスの内部損傷閾値と同等の値を示すものがあり、100 J/cm²を超えるサンプルが8個(56個中)も存在した²⁶⁾。また最多頻度閾値も40-60 J/cm²であり、今回のダイクロイックミラーの閾値の約2倍であった。この理由は、多層膜の層数に起因するものと考えられる。第2回の単一波長に対する反射防止膜コートは一般的に5-7層であるのに対して、ダイクロイックミラーの層数は30-40層になる。膜の層数が増加するに従い、境界面の増加、欠陥、不純物の増加に繋がるため、より損傷が発生し易いものと考えられる。



(a) 1064 nm 照射



(b) 532 nm 照射

図4 ダイクロイックミラー損傷閾値評価結果

同様に、532 nm 光に対する損傷閾値についても過去のデータベース化試験結果と比較を行った。第3回に実施した532 nm 単一波長に対する高反射膜のデータベース化試験では、最大247 J/cm²と1064 nm 用高反射膜と同等の閾値を持ち、最多頻度閾値は20-40 J/cm²であった³⁶⁾。ダイクロイックミラーの損傷閾値と最多頻度はほぼ同じであることから、高反射膜としての設計は、単一波長と同じであることが予想される。しかしながら、最大損傷閾値の試料が約100 J/cm²も低いことから、1064 nm 光の透過率を考慮するために、単一波長の設計ほど表面層付近の電界強度を抑えることができないと考えられる。

6. 議論

前述の評価結果は、それぞれの波長に対する損傷閾値に対する試料数を比較したものであったが、532 nm 光に対して高い閾値をもつ試料が、1064 nm 光に対しても高閾値をもつとは限らない。図 5 に、各サンプルの 1064 nm 損傷閾値と 532 nm 損傷閾値をプロットした。図中の異なったマークは、試料を提供頂いたメーカーを示している。例えば、メーカー D の 3 つの試料は、532 nm 光に対して約 20 J/cm² の同じ損傷閾値であるが、それぞれの 1064 nm 光に対する損傷閾値は 30–85 J/cm² と大きく異なっている。これは、1064 nm と 532 nm では損傷する原因が異なることを意味している。多層膜の設計は同じでも、基板表面の粗さ等が異なる場合には、このような結果が顕われる。532 nm 光に対して最大損傷閾値 157 J/cm² を持つ試料は、1064 nm 光に対しては約 40 J/cm² であり、非線形結晶において変換効率が低い場合には、基本波である 1064 nm 光で容易に損傷が発生すること

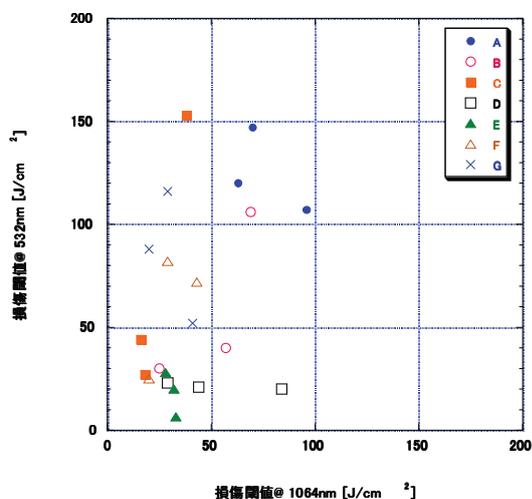


図 5 ダイクロイックミラーの異なった波長による損傷閾値の比較

が危惧される。

このように、設計の考え方によって、それぞれの波長に対する損傷閾値が変化するため、多波長に対する仕様をもつ光学素子の高耐力化は、更に難しいことが伺える。

7. まとめ

平成 24 年度に実施した 1064 nm と 532 nm の波長分離用ダイクロイックミラーのデータベース化試験の結果をまとめた。層数の増加、多波長に対する光学特性を維持するため、高耐力化が難しいことが判った。一方で、設計の中でそれぞれの波長に対するレーザー耐力の重みを変えることにより、仕様にあったミラーの設計、製作も可能であり、ユーザーとの連携が重要であることが判った。

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) C. J. Stolz: Proc. of Laser-Induced Damage in Optical Materials 2009, SPIE 7504, xiii, 2010.本越伸二他: ILT 2009, レーザー技術総合研究所, 2009.
- 3) 本越伸二他: ILT 2010, レーザー技術総合研究所, 2010.
- 4) 本越伸二他: ILT 2011, レーザー技術総合研究所, 2011.
- 5) 本越伸二他: ILT 2012, レーザー技術総合研究所, 2012.
- 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.

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, Y. Tsunawaki, Z. Yang, Y. Wei, S. Miyamoto, M.R. Asakawa, and <u>K. Imasaki</u>
題目	Growth rate and start current in Smith–Purcell free-electron lasers
論文誌名	Applied Physics Letters, Vol.100, 191101, 2012
著者	X. Tang, Z. Shi, Z. Yang, and <u>D. Li</u>
題目	Dispersion analyses of a slow wave structure with a periodic slot-array-grating inside a rectangular waveguide
論文誌名	Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 703, pp. 64–69, 2013
著者	T. Fu, Z. Yang, Z. Shi, F. Lan, <u>D. Li</u> , and X. Gao
題目	Dispersion properties of a 2D magnetized plasma metallic photonic crystal
論文誌名	Physics of Plasmas, Vol.20, 023109, 2013
著者	<u>D. Li</u> , M. Hangyo, Y. Tsunawaki, S. Miyamoto, and <u>K. Imasaki</u>
題目	Theoretical analysis of grating-based radiation
論文誌名	Proceeding of FTT2012, Pos1.4-1, 2012

○レーザープロセス研究チーム

著者	<u>藤田雅之</u>
題目	フェムト秒レーザーが切り開く新しい微細加工技術
論文誌名	応用物理、81巻、5号、pp.380-385、2012
著者	中井貞雄、 <u>井澤靖和</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、近藤公伯、大道博行、三間罔興、佐宗章弘
題目	レーザー核融合の産業波及効果
論文誌名	オプトロニクス、No.9、pp.134-142、2012
著者	Y. Avestisyan, C. Zhang, I. Kawayama, H. Murakami, <u>T. Somekawa</u> , <u>H. Chosrowjan</u> , <u>M. Fujita</u> , and M. Tonouchi
題目	Terahertz generation by optical rectification in lithium niobate crystal using a shadow mask
論文誌名	Opt. Express, Vol.20, No. 23, pp.25752-25757, 2012
著者	<u>藤田雅之</u>
題目	超短パルスレーザーによる複合材料の微細加工
論文誌名	光アライアンス、Vol.24、No.1、pp.7-11、2013
著者	<u>藤田雅之</u>
題目	CFRPの切断・穴あけ・トリミング 3.マイクロ加工
論文誌名	オプトロニクス、Vol.373、No.1、pp.104-106、2013
著者	<u>M. Fujita</u> , <u>T. Somekawa</u> , T. Ozaki, M. Yoshida, and N. Miyanaga
題目	Dual Beam laser Grooving of CFRP by pulsed lasers
論文誌名	Proceedings of International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composites 2012, LPCC-5-1, 2012
著者	R. Bhushan, K. Iyama, <u>H. Furukawa</u> , H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, <u>M. Fujita</u> , and N. Miyanaga
題目	Development of a Compact Diode Pumped High Power Nd:YAG Amplifier
論文誌名	The 1st Advanced Lasers and Photon Sources, ALPSP2-7, pp.57-58, 2012

著者	<u>M. Fujita</u> , <u>T. Somekawa</u> , T. Ozaki, M. Yoshida, and N. Miyanaga
題目	Dual Beam laser Grooving of CFRP by pulsed lasers
論文誌名	Proceedings of ICALEO2012, M1202, pp.1021-1025, 2012
著者	N. Horiguchi, T. Shinonaga, N. Abe, M. Tsukamoto, M. Yoshida, M. Takahashi, and <u>M. Fujita</u>
題目	Variation of Photocatalytic Activity in Titanium Dioxide Film Modified by Femtosecond Laser Irradiation
論文誌名	Proceedings of ICALEO2012, P162, pp.1311-1314, 2012
著者	<u>T. Somekawa</u> and <u>M. Fujita</u>
題目	Development of raman lidar for water dissolved CO2 detection
論文誌名	26th International Laser Radar Conference, S1O-06, pp.1-4, 2012
著者	<u>T. Somekawa</u> , A. Tani, and <u>M. Fujita</u>
題目	Remote sensing of dissolved gases in resource-rich seawater
論文誌名	SPIE Newsroom, 12 November, pp.1-3, 2012
著者	<u>T. Somekawa</u> , C. Yamanaka, <u>M. Fujita</u> , E.A. Valler, and M.C. Galvez
題目	Wavelength Dependence of Cloud Depolarization Ratio Due to Multiple Scattering Using A Two-Field-of-View White Light Lidar System
論文誌名	International Journal of Scientific and Engineering Research, Vol.3, No.12, pp.1-4, 2012
著者	<u>T. Somekawa</u> , M.C.D. Galvez, <u>M. Fujita</u> , D.A. Vallar, and C. Yamanaka
題目	Noise Reduction in White Light Lidar Signal Using A One-Dim and Two-Dim Daubechies Wavelet Shrinkage Method
論文誌名	Advances in Remote Sensing, Vol.2, No.1, pp.10-15, 2013
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 Dissolved C2H2 in Transformer Oils Using Laser Raman Spectroscopy
論文誌名	Opt. Lett., Vol.38, No.7, pp.1086-1088, 2013
著者	<u>H. Chosrowjan</u>
題目	Report on 27th Advanced Solid State Photonics (ASSP) Topical Meeting
論文誌名	The Review of Laser Engineering, Vol.40, No.5, pp.386-388, 2012
著者	<u>H. Chosrowjan</u> , <u>H. Furuse</u> , J. Kawanaka, N. Miyanaga, <u>M. Fujita</u> , K. Hamamoto, T. Yamada, and <u>Y. Izawa</u>
題目	A Novel Concept of Coherent Beam Combining (CBC) Technique for Applications in High Power Multichannel Laser Amplifier Systems
論文誌名	The 1st Advanced Lasers and Photon Sources, ALPS4-4, pp.127-128, 2012
著者	<u>H. Chosrowjan</u> , <u>H. Furuse</u> , <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	Optics Letters, Vol.38, No.8, pp.1277-1279, 2013
著者	J. Kawanaka, D. Albach, <u>H. Furuse</u> , N. Miyanaga, T. Kawashima, and H. Kan
題目	A monolithic composite ceramic with total-reflection active-mirrors for joule-class pulse energy amplification
論文誌名	Optical Materials, Vol.35, No.4, pp.770-773, 2013

著者	<u>H. Furuse</u> , J. Kawanaka, N. Miyanaga, <u>H. Chosrowjan</u> , <u>M. Fujita</u> , S. Ishii, K. Takeshita, and <u>Y. Izawa</u>
題目	Design of 10 kW-class Laser System Based on Multiple-TRAM Configuration with Cryogenic Yb:YAG Ceramics
論文誌名	The 1st Advanced Lasers and Photon Sources, ALPS4-10, pp.139-140, 2012
著者	R. Yasuhara, <u>H. Furuse</u> , A. Iwamoto, J. Kawanaka, and Y. Yanagitani
題目	Evaluation of thermo-optic characteristics of cryogenically cooled YAG ceramics
論文誌名	Optics Express, Vol.20, No.28, pp.29531-29539, 2012
著者	R. Yasuhara and <u>H. Furuse</u>
題目	Thermally induced depolarization in TGG ceramics
論文誌名	Optics Letters, Vol.38, No.10, pp.1751-1753, 2013
著者	古瀬裕章、櫻井俊光、河仲準二、 <u>ハイク コスロビアン</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、濱本浩一、山田隆弘、宮永憲明、井澤靖和
題目	高出力低温冷却Yb:YAGレーザーの開発
論文誌名	レーザー学会第438回研究会、RTM-12-71、pp.1-5、2012
著者	<u>H. Furuse</u> , J. Kawanaka, N. Miyanaga, <u>H. Chosrowjan</u> , <u>M. Fujita</u> , K. Takeshita, and <u>Y. Izawa</u>
題目	Output characteristics of high power cryogenic Yb:YAG TRAM laser oscillator
論文誌名	Optics Express, Vol.20, No.19, pp.21739-21748, 2012

○レーザー計測研究チーム

著者	倉橋慎理、 <u>島田義則</u> 、乗松孝好、石井政博、河野幸彦
題目	マルチチャンネルディテクターを用いたレーザー励起超音波によるコンクリート表面のひび割れ深さ計測
論文誌名	日本材料学会 コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第12巻、pp.329-334、2012
著者	<u>島田義則</u> 、 <u>オレグ コチャエフ</u> 、篠田昌弘、御崎哲一、高橋康将、瀧浪秀元
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	非破壊検査、Vol.61、No.10、pp.519-524、2012
著者	河野幸彦、 <u>島田義則</u> 、倉橋慎理
題目	レーザーによるコンクリートひび割れ深さ計測技術の研究
論文誌名	会誌「電力土木」、平成25年1月号、No.363、pp.56-60、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 surface crack depth in concrete using laser-ultrasonic technique with multichannel detector
論文誌名	The 39th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, AIP Conf. Proc. 1511, pp.317-323, 2012

○レーザーバイオ化学研究チーム

著者	<u>S. Taniguchi</u> , <u>H. Chosrowjan</u> , T. Wongnate, J. Sucharitakul, P. Chaiyen, and F. Tanaka
題目	Ultrafast fluorescence dynamics of flavin adenine dinucleotide in pyranose 2-oxidases variants and their complexes with acetate: Conformational heterogeneity with different dielectric constants
論文誌名	Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, Vol.245, pp.33-42, 2012

著者	<u>S. Taniguchi</u> , <u>H. Chosrowjan</u> , F Tanaka, T. Nakanishi, S. Sato, Y. Haruyama, and M. Kitamura
題目	A key factor for ultrafast rates of photoinduced electron transfer among five flavin mononucleotide binding proteins: Effect of negative, positive and neutral charges at residue 13 on the rate
論文誌名	Bulletin of the Chemical Society of Japan, Vol.86, No.3, pp.339-350, 2013
著者	T. Okada, T. Saiki, <u>S. Taniguchi</u> , T. Ueda, K. Nakamura, Y. Nishikawa, and Y. Iida
題目	Hydrogen Production Using Reduced-Iron Nanoparticles by Laser Ablation in Liquids
論文誌名	ISRN Renewable Energy, Vol.2013, 82768, 2013
著者	S. Sato, Y. Matubara, K. Koike, M. Falkenstrom, T. Katayama, Y. Ishibashi, H. Miyasaka, <u>S. Taniguchi</u> , <u>H. Chosrowjan</u> , N. Mataga, N. Fukazawa, S. Koshihara, K. Onda, and O. Ishitani
題目	Photochemistry of fac-[Re(bpy)(CO) ₃ Cl]
論文誌名	Chemistry A European Journal, Vol.18, pp.15722-15734, 2012
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-8 fs Pulse Laser at 400 nm
論文誌名	The Journal of Physical Chemistry B, Vol.117, pp.4818-4826, 2013

○理論・シミュレーションチーム

著者	S. Fujioka, Z. Zhang, N. Yamamoto, S. Ohira, Y. Fujii, K. Ishihara, T. Johzaki, <u>A. Sunahara</u> , Y. Arikawa, K. Shigemori, Y. Hironaka, Y. Sakawa, Y. Nakata, J. Kawanaka, H. Nagatomo, H. Shiraga, N. Miyanaga, T. Norimatsu, H. Nishimura, and H. Azechi
題目	High energy density plasmas generation on GEKKO-LFEX laser facility for fast-ignition laser fusion studies and laboratory astrophysics
論文誌名	Plasma Phys. Control. Fusion, Vol.54, 124042, 2012
著者	S. Ohira, S. Fujioka, <u>A. Sunahara</u> , T. Johzaki, H. Nagatomo, S. Matsuo, N. Morio, J. Kawanaka, Y. Nakata, N. Miyanaga, H. Shiraga, H. Nishimura, and H. Azechi
題目	X-ray backlight measurement of preformed plasma by kJ-class petawatt LFEX laser
論文誌名	J. App. Phys., Vol.112, 063301, 2012
著者	T. Kono, A. Ishikawa, S. Misaki, <u>A. Sunahara</u> , S. Tanaka, T. Yabuuchi, Y. Hirooka, and K.A. Tanaka
題目	Material dependence on plasma shielding induced by laser ablation
論文誌名	Plasma and fusion research, Vol.7, 2405065, 2012
著者	M. Hata, H. Sakagami, <u>A. Sunahara</u> , T. Johzaki, and H. Nagatomo
題目	Effects of CH foam preplasma on fast ignition
論文誌名	Laser and Particle Beams, Vol.30, pp.189-197, 2012
著者	Y. Kitagawa, Y. Mori, O. Komeda, K. Ishii, R. Hanayama, K. Fujita, S. Okihara, T. Sekine, N. Satoh, M. Takagi, T. Kawashima, H. Kan, N. Nakamura, T. Kondo, M. Fujine, H. Azuma, T. Motohiro, T. Hioki, Y. Nishimura, <u>A. Sunahara</u> , and Y. Sentoku
題目	Fusion Using Fast Heating of a Compactly Imploded CD Core
論文誌名	Phys. Rev. Lett., Vol.108, 155001, 2012

著者 題目 論文誌名	A. Sunahara, T. Johzaki, H. Nagatomo, and K. Mima Generation of Pre-plasma and Its reduction for Fast Ignition Laser and Particle Beams, Vol.30, pp.95–102, 2012
著者 題目 論文誌名	H. Sakagami, A. Sunahara, T. Johzaki and H. Nagatomo Effects of long rarefied plasma on fast electron generation for FIREX-I targets Laser and Particle Beams, Vol.30, pp.103–109, 2012
著者 題目 論文誌名	Ph. Nicolai, M. Olazabal-Loume, S. Fujioka, A. Sunahara, N. Borisenko, S. Gus'kov, A. Orekov, M. Grech, G. Riazuelo, C. Labaune, J. Velechowski, and V. Tikhonchuk Experimental evidence of foam homogenization Phys. Plasmas, Vol.19, 113105, 2012
著者 題目 論文誌名	S. Fujioka, Z. Zhang, K. Ishihara, K. Shigemori, Y. Hironaka, T. Johzaki, A. Sunahara, N. Yamamoto, H. Nakashima, T. Watanabe, H. Shiraga, H. Nishimura, and H. Azechi Kilotesla Magnetic field due to a Capacitor-Coil Target Driven by High Power Laser Scientific Reports, Vol.3, 1170, 2013
著者 題目 論文誌名	H. Shiraga, S. Fujioka, M. Nakai, T. Watari, H. Nakamura, Y. Arikawa, H. Hosoda, T. Nagai, M. Koga, H. Kikuchi, Y. Ishii, T. Sogo, K. Shigemori, H. Nishimura, Z. Zhang, M. Tanabe, S. Ohira, Y. Fujii, T. Namimoto, Y. Sakawa, O. Maegawa, T. Ozaki, K.A. Tanaka, H. Habara, T. Iwawaki, K. Shimada, H. Nagatomo, T. Johzaki, A. Sunahara, M. Murakami, H. Sakagami, T. Taguchi, T. Norimatsu, H. Homma, Y. Fujimoto, A. Iwamoto, N. Miyanaga, J. Kawanaka, T. Jitsuno, Y. Nakata, K. Tsubakimoto, K. Sueda, N. Morio, S. Matsuo, T. Kawasaki, K. Sawai, K. Tsuji, H. Murakami, T. Kanabe, K. Kondo, R. Kodama, N. Sarukura, T. Shimizu, K. Mima, and H. Azechi Integrated experiments of fast ignition targets by Gekko-XII and LFEX lasers High Energy Density Physics, Vol.8, pp.227-230, 2012
著者 題目 論文誌名	O. Komeda, Y. Nishimura, Y. Mori, R. Hanayama, K. Ishii, S. Okihara, K. Fujita, Y. Kitagawa, T. Sekine, N. Sato, T. Kurita, Y. Kawashima, T. Watari, H. Kan, N. Nakamura, T. Kondo, M. Fujine, H. Azuma, T. Motohiro, T. Hioki, M. Kakeno, A. Sunahara, Y. Sentoku, and E. Miura Target Injection and Engagement for Neutron Generation at 1Hz Plasma and Fusion Research: Rapid Communications, Vol.8, 1205020, 2013

○レーザー技術開発室

著者 題目 論文誌名	K. Mikami, S. Motokoshi, M. Fujita, T. Somekawa, T. Jitsuno, and K.A. Tanaka Temperature Dependences of Laser Induced Plasma Thresholds and Periodic Structures by Nanosecond Infrared Laser for Copper, Iron, and Chrome Appl. Phys. Express, Vol.5, No.6, 062701, 2012
著者 題目 論文誌名	本越伸二、三上勝大、實野孝久 高出力レーザー用高耐力光学薄膜 光学、41巻、12号、608、2012
著者 題目 論文誌名	K. Mikami, S. Motokoshi, T. Somekawa, T. Jitsuno, M. Fujita, and K.A. Tanaka Temperature dependence of laser-induced damage thresholds by short pulse laser SPIE, Vol.8530, 8530-4, 2013

著者	H. Murakami, T. Jitsuno, <u>S. Motokoshi</u> , E. Sato, K. Mikami, K. Kato, T. Kawasaki, Y. Nakata, N. Sarukura, T. Shimizu, H. Shiraga, N. Miyanaga, and H. Azechi
題目	Influences of oil-contamination on LIDT and optical properties in dielectric coatings
論文誌名	SPIE, Vol.8530, 8530-45, 2013
著者	K. Mikami, <u>S. Motokoshi</u> , <u>M. Fujita</u> , <u>T. Somekawa</u> , T. Jitsuno, and K.A. Tanaka
題目	Temperature Effects in Laser Damage Mechanisms for Optical Components
論文誌名	The 1st Advanced Lasers and Photon Sources, ALPS2-6, pp.87-88, 2012

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> , M. Hangyo, Y. Tsunawaki, Z. Yang, Y. Wei, S. Miyamoto, M.R. Asakawa, and <u>K. Imasaki</u>
題目	THEORETICAL STUDY OF SMITH-PURCELL FREE-ELECTRON LASERS
会議名	The 34th International Free-Electron Laser Conference, Aug. 26-31, 2012, Nara, Japan
著者	<u>D. Li</u> , M. Hanygo, Y. Tsunawaki, S. Miyamoto, and <u>K. Imasaki</u>
題目	Theoretical analysis of grating-based radiation
会議名	International Symposium on Frontiers in THz Technology, Nov. 26-30, 2012, Nara, Japan

○レーザープロセス研究チーム

著者	<u>M. Fujita</u> , <u>T. Somekawa</u> , T. Ozaki, M. Yoshida, and N. Miyanaga
題目	Dual Beam laser Grooving of CFRP by pulsed lasers
会議名	International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composites 2012, Apr. 26-27, 2012, Yokohama, Japan
著者	R. Bhushan, K. Iyama, <u>H. Furukawa</u> , H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, <u>M. Fujita</u> , and N. Miyanaga
題目	Development of a Compact Diode Pumped High Power Nd:YAG Amplifier
会議名	The 1st Advanced Lasers and Photon Sources Conference 2012, Apr. 26-27, 2012, Yokohama, Japan
著者	<u>M. Fujita</u> , <u>T. Somekawa</u> , T. Ozaki, M. Yoshida, and N. Miyanaga
題目	Dual Beam laser Grooving of CFRP by pulsed lasers
会議名	The 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Sep. 23-27, 2012, Anaheim, USA
著者	N. Horiguchi, T. Shinonaga, N. Abe, M. Tsukamoto, M. Yoshida, M. Takahashi, and <u>M. Fujita</u>
題目	Variation of Photocatalytic Activity in Titanium Dioxide Film Modified by Femtosecond Laser Irradiation
会議名	The 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, Sept. 23-27, 2012, Anaheim, USA
著者	K. Iyama, R. Bhushan, <u>H. Furukawa</u> , K. Tsubakimoto, H. Yoshida, H. Fujita, <u>M. Fujita</u> , N. Miyanaga, Y. Tamaoki, Y. Kato, and T. Kawashima
題目	Development of kW class Nd:YAG composite ceramic thin disc laser
会議名	Photonics West 2013 / LASE, Feb. 2-7, 2013, San Francisco, USA
著者	<u>T. Somekawa</u> and <u>M. Fujita</u>
題目	Development of raman lidar for water dissolved CO2 detection
会議名	26th International Laser Radar Conference, Jun. 25-29, 2012, Porto Heli, Greece
著者	<u>H. Chosrowjan</u> , <u>H. Furuse</u> , J. Kawanaka, N. Miyanaga, <u>M. Fujita</u> , K. Hamamoto, T. Yamada, and <u>Y. Izawa</u>
題目	A Novel Concept of Coherent Beam Combining (CBC) Technique for Applications in High Power Multichannel Laser Amplifier Systems
会議名	The 1st Advanced lasers and Photon Sources, Apr. 26-27, 2012, Yokohama, Japan

著者	T. Uchida, <u>T. Sakurai</u> , and T. Hondoh
題目	Ice-Shielding models for self-preservation effect of gas hydrate
会議名	2012 Fiery Ice, May 28-Jun. 1, 2012, Sapporo, Japan
著者	I. Oyabu, Y. Iizuka, <u>T. Sakurai</u> , T. Suzuki, T. Miyake, M. Hirabayashi, H. Motoyama, and T. Hondoh
題目	Chemical compositions of soluble particles around the Termination I in the Dome Fuji ice core
会議名	European Geosciences Union, General Assembly 2012, Apr. 22-27, Vienna, Austria
著者	I. Oyabu, Y. Iizuka, <u>T. Sakurai</u> , T. Suzuki, T. Miyake, M. Hirabayashi, H. Motoyama, and T. Hondoh
題目	Chemical compositions of soluble aerosols around the Termination 1 in the Dome Fuji ice core
会議名	International Partnerships in Ice Core Sciences First Open Science Conference, Oct. 1-5, 2012, Presqu'île de Giens, Côte d'Azur, France
著者	<u>H. Furuse</u> , J. Kawanaka, N. Miyanaga, <u>H. Chosrowjan</u> , <u>M. Fujita</u> , S. Ishii, K. Takeshita, and <u>Y. Izawa</u>
題目	Design of 10 kW-class Laser System Based on Multiple-TRAM Configuration with Cryogenic Yb:YAG Ceramics
会議名	The 1st Advanced Lasers and Photon Sources, Apr. 26-27, 2012, Yokohama, Japan
著者	<u>H. Furuse</u> and J. Kawanaka
題目	1 J, 100 Hz GENBU-Front End Laser System with Multi-TRAMs
会議名	7 th Workshop on High Energy Class Diode Pump Solid State Lasers, Sep. 11-14, 2012, Tahoe City, CA, USA
著者	<u>H. Furuse</u> , <u>T. Sakurai</u> , J. Kawanaka, N. Miyanaga, <u>H. Chosrowjan</u> , <u>M. Fujita</u> , and <u>Y. Izawa</u>
題目	Thermal Analysis of Cryogenic Yb:YAG TRAM Laser for High-Average Power Systems
会議名	7 th Workshop on High Energy Class Diode Pump Solid State Lasers, Sep. 11-14, 2012, Tahoe City, CA, USA
著者	<u>H. Furuse</u> , J. Kawanaka, R. Yasuhara, N. Miyanaga, K. Matsumoto, T. Kawashima, and H. Kan
題目	1 J, 100 Hz, Sub-ns DPSSL Development Using Cryogenic Yb:YAG/YAG Composite Ceramics for OPCPA
会議名	The international Committee on Ultra-High Intensity Lasers, Sep. 16-21, 2012, Mamaia, Romania

○レーザー計測研究チーム

著者	<u>M. Fujita</u> , O. Kotyaev, and <u>Y. Shimada</u>
題目	Non-destructive Remote Inspection for Heavy Constructions
会議名	CLEO, May 5-11, 2012, San Jose, USA

○レーザーバイオ化学研究チーム

著者	T. Okada, <u>S. Taniguchi</u> , T. Saiki, T. Furu, Y. Iida, and <u>M. Nakatsuka</u>
題目	Synthesis of Fe and FeO Nanoparticles by Laser Ablation in Liquids and its Applications
会議名	The 1st Advanced Lasers and Photon Sources, Apr. 26-27, 2012, Yokohama, Japan

○理論・シミュレーションチーム

著者	<u>A. Sunahara</u> , T. Johzaki, H. Sakagami, H. Nagatomo, S. Fujioka, Y. Arikawa, Y. Sakawa, H. Shiraga, K. Mima, and H. Azechi
題目	Heating of the imploded plasma by fast ions in the fast ignition scheme
会議名	54th American Physics Society DPP meeting, Oct. 29-Nov. 2, 2012, Providence, Rhode Island, USA
著者	<u>A. Sunahara</u> and T. Johzaki
題目	Heating of the imploded plasma by fast ions in the fast ignition scheme
会議名	12th International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets, Nov. 4-8, 2012, Napa, CA, USA
著者	Y. Kitagawa, Y. Mori, O. Komeda, K. Ishii, R. Hanayama, K. Fujita, S. Okihara, T. Sekine, N. Satoh, T. Kurita, T. Kawashima, H. Kan, N. Nakamura, T. Kondo, M. Fujine, H. Azuma, T. Motohiro, T. Hioki, M. Kakeno, Y. Nishimura, <u>A. Sunahara</u> , and Y. Sentoku
題目	Fast ignition scheme Fusion Using High-Repetition-Rate Laser
会議名	IAEA FEC 2012, Oct. 8-13, 2012, San Diego, USA
著者	<u>H. Furukawa</u> , T. Norimatsu, and M. Nakai
題目	Theoretical Studies on Environments in laser fusion liquid wall chamber
会議名	Conference on Inertial Fusion Energy, Apr. 25-27, 2012, Yokohama, Japan

○レーザー技術開発室

著者	Y. Honda, M. Yoshida, <u>S. Motokoshi</u> , K. Fujioka, T. Jitsuno, and <u>M. Nakatsuka</u>
題目	Temperature dependence of optical properties in Nd/Cr:YAG materials
会議名	The 1st Advanced Laser and Photonics Symposium, Apr. 25-27, 2012, Yokohama, Japan
著者	K. Mikami, <u>S. Motokoshi</u> , <u>T. Somekawa</u> , <u>M. Fujita</u> , T. Jitsuno, and K.A. Tanaka
題目	Temperature Dependence of Laser-Induced Damage Thresholds by Short Pulse Laser
会議名	Laser Damage Symposium 2012, Sep. 23-26, 2012, Boulder, USA
著者	<u>S. Motokoshi</u> , K. Tsubakimoto, N. Miyanaga, and <u>M. Fujita</u>
題目	Laser-Induced Damage Thresholds for 355-nm AR Coatings on LBO Crystals
会議名	Laser Damage Symposium 2012, Sep. 23-26, 2012, Boulder, USA
著者	<u>S. Motokoshi</u> , K. Kato, K. Mikami, and T. Jitsuno
題目	Database on Damage Thresholds for AR and HR Coatings in UV Region
会議名	Laser Damage Symposium 2012, Sep. 23-26, 2012, Boulder, USA
著者	T. Jitsuno, H. Murakami, <u>S. Motokoshi</u> , E. Sato, K. Mikami, K. Kato, T. Kawasaki, Y. Nakata, N. Sarukura, T. Shimizu, H. Shiraga, N. Miyanaga, and H. Azechi
題目	Influence of Oil-Contamination on LIDT and Optical Properties in Dielectric Coatings
会議名	Laser Damage Symposium 2012, Sep. 23-26, 2012, Boulder, USA
著者	<u>S. Motokoshi</u>
題目	Damage threshold optics for high power lasers
会議名	2013 Laser-IT Workshop for Advanced High Power Industrial Lasers, Jan. 17-18, 2013, Gwangju, Korea

著者	K. Mikami, <u>S. Motokoshi</u> , <u>M. Fujita</u> , <u>T. Somekawa</u> , T. Jitsuno, and K.A. Tanaka
題目	Temperature Effects in Laser Damage Mechanisms for Optical Components
会議名	The 1st Advanced Laser and Photonics Symposium, Apr. 25-27, 2012, Yokohama, Japan

国内学会発表リスト

○レーザープロセス研究チーム

著者	伊山功一、Bhushan Ravi、古河裕之、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の開発 (1)
会議名	第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月11日-14日、愛媛大学/松山大学
著者	中井一樹、成山達也、塚本雅裕、升野振一郎、高橋謙次郎、藤田雅之、阿部信行
題目	ナノ秒レーザーによる炭素繊維強化プラスチックの切断加工特性
会議名	第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月11日-14日、愛媛大学/松山大学
著者	成山達也、中井一樹、塚本雅裕、升野振一郎、高橋謙次郎、中野人志、水田浩平、藤田雅之、阿部信行
題目	ナノ秒レーザーを用いた炭素繊維強化プラスチックの加工ーレーザー波長依存性ー
会議名	第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月11日-14日、愛媛大学/松山大学
著者	堀口直人、塚本雅裕、吉田 実、篠永東吾、高橋雅也、藤田雅之、阿部信行
題目	フェムト秒レーザー照射による酸化チタン膜の光触媒機能変化ーレーザー波長依存性ー
会議名	第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月11日-14日、愛媛大学/松山大学
著者	藤田雅之、染川智弘
題目	超短パルスレーザーを用いたCFRPの微細加工
会議名	第78回レーザー加工学会講演会、2012年12月13日-14日、アクトシティ浜松コングレスセンター
著者	伊山功一、Bhushan Ravi、古河裕之、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の増幅特性
会議名	レーザー学会学術講演会第33回年次大会、2013年1月28日-30日、姫路商工会議所
著者	堀口直人、塚本雅裕、吉田 実、篠永東吾、原 一之、高橋雅也、藤田雅之、阿部信行
題目	ナノ秒レーザー照射による酸化チタン膜の電気抵抗変化
会議名	レーザー学会学術講演会第33回年次大会、2013年1月28日-30日、姫路商工会議所
著者	伊山功一、Bhushan Ravi、古河裕之、Chosrowjan Haik、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の開発 (2)
会議名	第60回応用物理学会春季学術講演会、2013年3月27日-30日、神奈川工科大学
著者	藤田雅之
題目	レーザーのリモートセンシング
会議名	光エレクトロニクスフォーラム、2012年9月5日、大阪大学・テクノアライアンス棟
著者	藤田雅之
題目	身近なレーザー加工、これからのレーザー加工
会議名	レーザー安全公開セミナー、2012年9月7日、東北大学・電気通信研究所

著者 題目 会議名	藤田雅之 次世代エンジニアリング素材CFRPのレーザー加工 レーザー学会第431回研究会、2012年9月18日、全労済ソレイユ
著者 題目 会議名	藤田雅之 複合・多層材料のレーザ加工技術とその応用2013 Electronic Journal 第1552回 Technical Seminar、2013年1月11日、連合会館
著者 題目 会議名	染川智弘、谷 篤史、藤田雅之 水溶存ガスの遠隔計測に向けたラマンライダーの開発 第30回レーザーセンシングシンポジウム、2012年9月6日-7日、オリビアン小豆島
著者 題目 会議名	竹内智紀、染川智弘、山中千博 高圧CO ₂ のレーザー誘起ブレイクダウン分光法 (LIBS) : ナノ秒、フェムト秒レーザーの比較 第30回レーザーセンシングシンポジウム、2012年9月6日-7日、オリビアン小豆島
著者 題目 会議名	佐藤 悠、染川智弘、高橋真弘 ラマンライダーによる水蒸気観測および数値予報モデルへの水蒸気同化 第30回レーザーセンシングシンポジウム、2012年9月6日-7日、オリビアン小豆島
著者 題目 会議名	染川智弘、谷 篤史、藤田雅之 水溶存ガスの遠隔計測に向けたラマンライダーの開発 第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月11日-14日、愛媛大学/松山大学
著者 題目 会議名	竹内智紀、染川智弘、山中千博 高圧CO ₂ のレーザー誘起ブレイクダウン分光法 (LIBS) : ナノ秒、フェムト秒レーザーの比較 第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月11日-14日、愛媛大学/松山大学
著者 題目 会議名	佐藤 悠、高橋真弘、染川智弘 ラマンライダーによる水蒸気観測および数値予報モデルへの水蒸気同化 平成24年度土木学会全国大会 第67回年次学術講演会、2012年9月5日-7日、名古屋大学
著者 題目 会議名	高橋真弘、染川智弘、佐藤 悠 ラマンライダーによる水蒸気観測および数値予報モデルへの水蒸気同化 水文・水資源学会 2012年度研究発表会、2012年9月26日-28日、広島市西区民文化センター
著者 題目 会議名	染川智弘、谷 篤史、藤田雅之 水溶存ガスの遠隔計測に向けたラマンライダーの開発 レーザー学会学術講演会第33回年次大会、2013年1月28日-30日、姫路商工会議所
著者 題目 会議名	染川智弘、笠岡 誠、河内二士夫、永野芳智、藤田雅之、井澤靖和 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 第60回応用物理学会春季学術講演会、2013年3月27日-30日、神奈川工科大学
著者 題目 会議名	染川智弘、眞子直弘、久世宏明 白色光レーザーを用いた温室効果ガスの計測法の開発 第15回環境リモートセンシングシンポジウム、2013年2月22日、千葉大けやき会館

著者 題目 会議名	<u>Haik Chosrowjan</u> 、 <u>染川智弘</u> 、 <u>古瀬裕章</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>井澤靖和</u> 単一光検出器による多チャンネルコヒーレントビーム結合 第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月11日-14日、愛媛大学/松山大学
著者 題目 会議名	<u>Haik Chosrowjan</u> 、 <u>櫻井俊光</u> 、 <u>古瀬裕章</u> 、 <u>伊山功一</u> 、 <u>Ravi Bhushan</u> 、 <u>古河裕之</u> 、 <u>椿本幸治</u> 、 <u>吉田英次</u> 、 <u>藤田尚徳</u> 、 <u>宮永憲明</u> 、 <u>川嶋利幸</u> 、 <u>本越伸二</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>井澤靖和</u> kW級コンポジットセラミクス薄ディスクレーザー開発におけるビーム特性に関する研究 第60回応用物理学会春季学術講演会、2013年3月27日-30日、神奈川工科大学
著者 題目 会議名	<u>櫻井俊光</u> 、 <u>染川智弘</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>飯塚芳徳</u> 、 <u>大藪幾美</u> 、 <u>藤田秀二</u> 、 <u>井澤靖和</u> パルスレーザーを利用した、氷床コアに含まれる不純物の化学組成解析－非線形光学を利用した分光計測を目指して－ 雪氷研究大会（2012・福山）、2012年9月24日-27日、福山市立大学
著者 題目 会議名	<u>櫻井俊光</u> 、 <u>古瀬裕章</u> 、 <u>河仲準二</u> 、 <u>宮永憲明</u> 、 <u>Haik Chosrowjan</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>濱本浩一</u> 、 <u>山田隆弘</u> 、 <u>井澤靖和</u> 低温冷却Yb:YAG TRAMレーザーの励起スポットにおける温度分布評価 レーザー学会学術講演会第33回年次大会、2013年1月28日-30日、姫路商工会議所
著者 題目 会議名	<u>櫻井俊光</u> 氷床内における微粒子に関する研究 ドームふじアイスコアに関する研究集会、2013年3月28日-29日、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H ₂ O分子の挙動に関する研究 氷の物理と化学研究の新展開2012、2012年12月6日-7日、北海道大学低温科学研究所
著者 題目 会議名	<u>古瀬裕章</u> 、 <u>櫻井俊光</u> 、 <u>河仲準二</u> 、 <u>宮永憲明</u> 、 <u>Haik Chosrowjan</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>濱本浩一</u> 、 <u>山田隆弘</u> 、 <u>井澤靖和</u> 低温冷却Yb:YAG TRAM増幅器の寄生発振機構 第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月11日-14日、愛媛大学/松山大学
著者 題目 会議名	<u>古瀬裕章</u> 、 <u>河仲準二</u> 、 <u>Haik Chosrowjan</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>濱本浩一</u> 、 <u>山田隆弘</u> 、 <u>宮永憲明</u> 、 <u>井澤靖和</u> 低温冷却Yb:YAG TRAMレーザーのASEおよび寄生発振 レーザー学会学術講演会第33回年次大会、2013年1月28日-30日、姫路商工会議所
著者 題目 会議名	<u>古瀬裕章</u> 、 <u>安原 亮</u> 、 <u>岩本晃史</u> 、 <u>河仲準二</u> Yb:YAGセラミックス熱伝導率のドーブ濃度および温度依存性 第60回応用物理学会春季学術講演会、2013年3月27日-30日、神奈川工科大学
著者 題目 会議名	<u>古瀬裕章</u> 、 <u>櫻井俊光</u> 、 <u>河仲準二</u> 、 <u>Haik Chosrowjan</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>濱本浩一</u> 、 <u>山田隆弘</u> 、 <u>宮永憲明</u> 、 <u>井澤靖和</u> 高出力低温冷却Yb:YAGレーザーの開発 レーザー学会第438回研究会「新レーザー技術」、2012年12月19日、愛媛大学

○レーザー計測研究チーム

著者	御崎哲一、坂本保彦、高橋康将、 <u>島田義則</u> 、 <u>Oleg Kotyaev</u> 、篠田昌弘、江原季映、江本茂夫
題目	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1
会議名	平成24年度土木学会全国大会 第67回年次学術講演会、2012年9月5日-7日、名古屋大学
著者	江原季映、篠田昌弘、中島 進、阿部慶太、真井哲生、 <u>島田義則</u> 、 <u>Oleg Kotyaev</u> 、渡邊英世、御崎哲一、坂本保彦、高橋康将
題目	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2
会議名	平成24年度土木学会全国大会 第67回年次学術講演会、2012年9月5日-7日、名古屋大学
著者	<u>島田義則</u> 、 <u>Oleg Kotyaev</u> 、篠田昌弘、坂本保彦、御崎哲一、高橋康将、江本茂夫
題目	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3
会議名	平成24年度土木学会全国大会 第67回年次学術講演会、2012年9月5日-7日、名古屋大学
著者	<u>島田義則</u> 、 <u>Oleg Kotyaev</u> 、篠田昌弘、御崎哲一、高橋康将、坂本保彦
題目	レーザーを用いたコンクリート欠陥検出
会議名	平成24年電気学会電子・情報・システム部門大会、2012年9月5日-7日、弘前大学
著者	<u>島田義則</u> 、 <u>Oleg Kotyaev</u> 、篠田昌弘、御崎哲一、高橋康将、瀧浪秀元
題目	レーザーを用いたコンクリート欠陥検出
会議名	レーザー学会学術講演会第33回年次大会、2013年1月28日-30日、姫路商工会議所
著者	倉橋慎理、 <u>島田義則</u> 、 <u>Oleg Kotyaev</u> 、乗松孝好、河野幸彦、中田正剛、石井政博
題目	レーザー励起超音波を用いたコンクリート表面ひび割れの評価
会議名	レーザー学会学術講演会第33回年次大会、2013年1月28日-30日、姫路商工会議所
著者	<u>島田義則</u>
題目	レーザーを用いたトンネル覆工コンクリート探傷技術
会議名	24年度 第1回 関西支部イブニングサロン、2012年7月20日、(財)電子科学研究所心齋橋研修センター

○レーザーバイオ化学研究チーム

著者	岡田竹弘、上田 剛、 <u>谷口誠治</u> 、佐伯 拓、古 隆志、富永健太、飯田幸雄
題目	液相レーザーアブレーションによる還元鉄ナノ粒子合成と水素製造への応用
会議名	第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月11日-14日、愛媛大学
著者	<u>谷口誠治</u> 、 <u>Haik Chosrowjan</u> 、田中文夫、Thanyaporn Wongnate、Pimchai Chaiyen
題目	ヒト由来セリンヒドロキシメチル転移酵素の蛍光ダイナミクス
会議名	日本化学会第93春季年会、2013年3月23日-25日、立命館大学

○理論・シミュレーションチーム

著者	砂原 淳、城崎知至、長友英夫、藤岡慎介、重森啓介、弘中陽一郎、三間囿興、白神宏之、疇地 宏、FIREXプロジェクト
題目	高速点火レーザー核融合におけるコーンターゲットの流体力学的特性
会議名	第9回核融合エネルギー連合講演会、2012年6月28日-29日、神戸国際会議場
著者	砂原 淳、城崎知至、長友英夫、藤岡慎介、重森啓介、弘中陽一郎、三間囿興、白神宏之、疇地 宏、FIREXプロジェクト
題目	高速点火コーンターゲット先端部の流体力学的特性II
会議名	日本物理学会2012秋季大会、2012年9月18日-21日、横浜国立大学常磐キャンパス
著者	砂原 淳、森 芳孝、米田 修、石井勝弘、花山良平、沖原伸一郎、藤田和久、北川米喜、関根尊史、栗田隆史、佐藤伸弘、川嶋利幸、菅 博文、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
題目	超高強度レーザーによる爆縮プラズマの直接加熱
会議名	プラズマ核融合学会第29回年会、2012年11月27日-30日、クローバープラザ福岡
著者	砂原 淳
題目	レーザー照射された金属ドロップレットの挙動
会議名	第26回数値流体力学シンポジウム、2012年12月18日-20日、代々木青少年センター
著者	砂原 淳
題目	高速点火レーザー核融合における直接加熱
会議名	レーザー学会学術講演会第33回年次大会、2013年1月28日-30日、姫路商工会議所
著者	砂原 淳、城崎知至、長友英夫、白神宏之、疇地 宏、FIREXプロジェクト、森 芳孝、北川米喜、GPI核融合研究チーム
題目	高速点火における直接加熱
会議名	日本物理学会2012年次大会、2012年3月26日-29日、広島大学
著者	砂原 淳、西原功修、佐々木明
題目	レーザー照射されたスズドロップレットの挙動
会議名	第60回応用物理学会春季学術講演会、2013年3月27日-30日、神奈川工科大学
著者	古河裕之、部谷 学、中野人志
題目	多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の開発
会議名	第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月11日-14日、愛媛大学/松山大学
著者	古河裕之、部谷 学、中野人志
題目	多次元のレーザーピーニングのシミュレーション
会議名	レーザー学会学術講演会第33回年次大会、2013年1月28日-30日、姫路商工会議所
著者	水田浩平、宮本幸大、津山美穂、高橋 誠、古河裕之、部谷 学、柴柳敏哉、中野人志
題目	レーザーピーニングにおけるダブルパルスレーザー照射効果
会議名	第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月11日-14日、愛媛大学/松山大学
著者	古河裕之、部谷 学、中野人志
題目	レーザーピーニングにおける多次元効果等の評価
会議名	第60回応用物理学会春季学術講演会、2013年3月27日-30日、神奈川工科大学

○レーザー技術開発室

著者 題目 会議名	本田能之、 <u>本越伸二</u> 、藤岡加奈、實野孝久、宮永憲明、 <u>中塚正大</u> 、吉田 実 Nd/Cr:YAG材料におけるエネルギー移乗過程の解析 「高機能個体レーザーとその応用」研究会、2012年7月13日、阪急エキスポパーク
著者 題目 会議名	<u>本越伸二</u> 、三上勝大、實野孝久、 <u>染川智弘</u> 、 <u>藤田雅之</u> 超短パルスレーザーによる光学薄膜のレーザー損傷 (3) 第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月11日-14日、愛媛大学/松山大学
著者 題目 会議名	三上勝大、 <u>本越伸二</u> 、實野孝久、 <u>染川智弘</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、田中和夫、神村共住 超短パルスレーザーによるレーザー損傷閾値の温度依存性 (2) 第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月11日-14日、愛媛大学/松山大学
著者 題目 会議名	佐藤雄二、 <u>本越伸二</u> 、 <u>中塚正大</u> マグネシウム還元率のレーザー波長依存性 第73回応用物理学会学術講演会、2012年9月11日-14日、愛媛大学/松山大学
著者 題目 会議名	村上英利、加藤宏太、 <u>本越伸二</u> 、佐藤英児、三上勝大、川崎鉄次、中田芳樹、猿倉信彦、清水俊彦、白神宏之、實野孝久、宮永憲明、疇地 宏 汚染量制御下における光学素子のレーザー損傷耐力劣化 レーザー学会学術講演会第33回年次大会、2013年1月28日-30日、姫路商工会議所
著者 題目 会議名	三上勝大、 <u>本越伸二</u> 、 <u>染川智弘</u> 、實野孝久、 <u>藤田雅之</u> 、田中和夫 異なる照射パルスにおけるレーザー損傷閾値の温度依存性 レーザー学会学術講演会第33回年次大会、2013年1月28日-30日、姫路商工会議所
著者 題目 会議名	本田能之、 <u>本越伸二</u> 、實野孝久、宮永憲明、藤岡加奈、 <u>中塚正大</u> 、吉田 実 Nd/Cr:YAG材料におけるエネルギー移乗過程の解析 レーザー学会学術講演会第33回年次大会、2013年1月28日-30日、姫路商工会議所
著者 題目 会議名	一色択真、 <u>本越伸二</u> 、藤岡加奈、實野孝久、村上匡且、吉田 実 Nd:CNGG粉体材料の蛍光特性 レーザー学会学術講演会第33回年次大会、2013年1月28日-30日、姫路商工会議所
著者 題目 会議名	三上勝大、 <u>本越伸二</u> 、 <u>染川智弘</u> 、實野孝久、 <u>藤田雅之</u> 、田中和夫 超短パルスレーザーによるレーザー損傷閾値の温度依存性 (3) 第60回応用物理学会春季学術講演会、2013年3月27日-30日、神奈川工科大学
著者 題目 会議名	本田能之、 <u>本越伸二</u> 、實野孝久、宮永憲明、藤岡加奈、 <u>中塚正大</u> 、吉田 実 Nd/Cr:YAG材料のエネルギー移乗過程 第60回応用物理学会春季学術講演会、2013年3月27日-30日、神奈川工科大学
著者 題目 会議名	一色択真、 <u>本越伸二</u> 、藤岡加奈、實野孝久、村上匡且、吉田 実 Nd:CNGGセラミック粉体材料の蛍光特性 第60回応用物理学会春季学術講演会、2013年3月27日-30日、神奈川工科大学

事業報告書

事業報告書

(平成 24 年度)

概況

レーザー技術総合研究所は、4月1日公益財団法人に移行し新しいスタートを切り、10月31日には創立25周年を迎えた。

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24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24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、熱レンズによるビーム波面歪みや熱複屈折損失等のビーム特性を評価する予備試験を行い、高出力レーザー光の波長変換効率の温度依存性を考慮した解析を進めた。また、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、昨年度までに実施した新幹線トンネルのコンクリート実欠陥検査実験で得た結果に基づき、測定感度向上、装置の小型化など実用化に向けたシステム設計・構築を行った。また、新たな応用として水中におけるコンクリート欠陥計測の可能性を検証した。

主な研究テーマとしては、CFRP(炭素繊維強化プラスチック)やMEMS(微小電気機械システム)デバイスへのレーザー加工の実証など低炭素社会に資する研究や、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(波長分離ミラー)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「LASER CROSS」の発行(月刊)、ホームページ等を活用した情報発信、「LASER EXPO 2012」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. 役員会等の開催

(1)理事会

第1回	理 事 会	(平成24年4月24日 みなし決議)
第2回	理 事 会	(平成24年5月30日 大阪科学技術センター)
第3回	理 事 会	(平成25年3月12日 関電会館)

(2)評議員会

第1回	評 議 員 会	(平成24年6月15日 大阪科学技術センター)
-----	---------	-------------------------

(3)評議員選定委員会

第1回	評議員選定委員会	(平成24年5月23日 大阪大学)
-----	----------	-------------------

2. 賛助会員状況

平成24年度末会員数	49社	112口
------------	-----	------

3. 学会および論文発表

(1)学会発表	93件	(国内：63件、国外：30件)
(2)論文発表	52件	(国内：9件、国外：43件)

4. 特許等出願件数

平成24年度出願件数	1件	
平成24年度末特許保有件数	40件	(登録済：23件、公開済：14件、未公開：3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、発振・増幅特性を詳細に調べ寄生発振抑制のための条件を明らかにした。

(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けるレーザー光の波面歪みを解析するために増幅媒質の熱解析の高精度化および光線追跡による波面解析を進めると共に、温度依存性を考慮した波長変換の計算を行った。また、これらの解析結果を検証するための波面計測実験を行った。

(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行った。新たなビーム結合技術を考案し、複数ビームのコヒーレント結合を実証した。

[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) テラヘルツ放射源に関する研究

コヒーレントテラヘルツ光源の開発を目的とし、電子ビームと周期構造体との相互作用を厳密に取り扱える線形理論を構築し、グレーティングによる電子ビームからのコヒーレント放射を解析した。

[関連する主な受託・共同研究]

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

【レーザープロセス研究チーム】

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、半導体表面改質の現象解明、応用について引き続き検討を行った。

(2) 低炭素社会に資するレーザー加工に関する研究

省エネ電子デバイスへの応用を目指して、薄膜 CFRP(炭素繊維強化プラスチック)へのレーザー加工の適用性の評価を行うと共に、MEMS(微小電気機械システム)製造プロセスにおけるレーザー転写技術の開発を進めた。

(3) 白色光ライダーを用いた大気計測に関する研究

白色光ライダーの新たな応用を目指し、超短パルスレーザー光の大気伝搬の研究、温室効果ガスの検出、降雨予測の可能性などの研究を行った。

(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フィールド試験を行った。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・ 微細周期構造の応用研究
- ・ ヘテロ集積化プロセス技術の研究開発
- ・ 超短パルスレーザー光大気伝搬による白色光生成とそのライダーへの応用
- ・ 都市域大気における温室効果ガス検知に向けた白色光同時吸収分光法の開発
- ・ 高精度気象予測のためのレーザー観測情報の利用に関する基礎的研究
- ・ 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
- ・ 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
- ・ SRS-LIBS を利用した極地氷床コア中の微量不純物分析技術の開発

【レーザー計測研究チーム】

レーザー応用計測・分析技術の高性能化に資する技術開発を行った。

(1) レーザー超音波探傷技術に関する研究

レーザー探傷装置の小型化を進め、新幹線トンネル内での実験を通して安定に欠陥を検出できることを実証した。また、この技術は大気中だけでなく、水中での欠陥検出にも展開できることを明らかにした。

(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コンクリートや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。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・レーザー計測機器の改良、設計評価、性能確認試験・評価、課題抽出・解決
- ・碍子表面の塩分計測研究
- ・レーザーを活用したサージタンク劣化調査手法の開発研究
- ・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
- ・海底資源用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

【レーザーバイオ化学研究チーム】

化学、生物分野へのレーザー技術の応用を目標とし、超高速レーザー分光技術を用いた蛋白質等生体物質の光機能解明に関する研究を進めた。またレーザーの環境、省エネルギー関連技術への適用を目標とし、液中レーザーアブレーション法によるナノ粒子生成と水素生成に関する研究を進めた。

(1) フェムト秒分光計測による光応答性蛋白質、光機能性材料の光過程の研究

光活性黄色蛋白質(PYP)の超高速光反応過程を明らかとするため、サブピコ秒領域での時間分解円二色性計測法による観測を行い、蛋白質内で実際に機能する分子の構造が光励起後 1ps 以内に大きくねじれ、PYP の光反応効率に影響を及ぼすことを明らかとした。

(2) フラビン関連物質の光反応メカニズムの研究

ピロリ菌由来フラボドキシンのシミュレーション解析を進め、電子移動速度の分子間距離依存性を明らかにした。また、生体内でアミノ酸(セリン)の代謝を行うセリンヒドロキシ転移酵素(SHMT)とアミノ酸との反応性を蛍光寿命計測により観測し、光励起により SHMT の機能が促進される可能性を見出した。

(3) レーザーの環境、省エネルギー関連分野への応用

エネルギー分野へのレーザー技術の応用を目指し、パルスレーザーをエネルギー源とした鉄等の金属酸化物の還元とナノ粒子形成に関する研究を進めた。レーザー

照射法の改良、還元鉄ナノ粒子を用いた水素発生実験等から比較的高い効率で水素生成が可能であることを明らかとした。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・セリンヒドロキシ転移酵素(SHMT)の光反応過程の研究
- ・液相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

【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を理論・シミュレーションにより支援した。レーザーアブレーション解析コード、放射流体コードなどを開発し、EUV(極端紫外)光源開発やレーザーアブレーションピーニング等の産業応用に有用なデータを提供した。また、レーザー核融合プラズマ、核融合炉設計に関する理論的研究なども行った。

(1) EUV(極端紫外光)光源に関する理論的研究

放射流体コードの改良、状態方程式の高精度化、低強度領域のレーザー吸収モデルの改良を図り、スズドロップレットの挙動解析を中心にレーザープラズマ方式EUV光源における発光効率の最適化を行った。

(2) レーザー生成圧縮プラズマの理論的研究

レーザー生成高密度プラズマの挙動を高精度に模擬可能な流体シミュレーションモデル、高エネルギー粒子輸送モデルを開発し、効率的な核融合点火及び中性子源の可能性を評価した。さらに、高速点火レーザー核融合の加熱率向上を図るため、高速点火核融合ターゲット特性の解析を行った。

(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てレーザーアブレーション過程を記述するシミュレーションコードの開発・改良を行い、大気中のみでなく、水中、及びガラスによる閉じ込め効果を考慮したピーニングのシミュレーションコード開発を行なった。

(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型チェンバー内のエアロゾルの形成過程および運動を理論的に解析し、チェンバー内環境を評価した。壁から蒸発した金属蒸気の挙動について、評価を行った。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・EUV光源プラズマの基礎研究
- ・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で使用される Nd/Cr:YAG セラミックス材料の Cr から Nd へのエネルギー移乗過程について解析を進め、移乗効率、移乗時間等の温度による影響を明らかにした。また、広帯域発光が可能となる 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

フェムト秒パルスレーザー用高耐力・広帯域ミラーの設計を行った。また、レーザー損傷閾値の温度依存性を評価し、その依存性がレーザー照射によって生成された電子の衝突電離過程に関連することを明らかにした。

(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、7社からの依頼を受けた。また、損傷閾値のデータベース化を目的に、1064nm/532nm 波長分離用ミラーを対象に第9回、第10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
- ・多層膜素子、光学材料の高耐力化に関するデータベースの構築

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から、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・要望に積極的に取り組んだ。34件の技術相談に対応し、そのうち19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。

学界との連携に関しては、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。

産学官との連携に関しては、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。

また、(財)大阪科学技術センターが主催している「カーボンナノ材料研究会」に参加し、ナノテクノロジー分野の情報収集、人脈形成に努めた。

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) アダプティブパワーフォニクスの基本技術(多層膜素子、光学材料の高耐力化データベース)
(独)科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST タイプ)
- (3) レーザー探傷による補強橋梁床板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)

6. 受託研究

36 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により、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) 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）
- (6) 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）

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下記のとおり実施した。

1. 人材の育成

共同研究の相手先や技術相談依頼企業等の若手研究員に技術指導を行いながら研究を進めることにより、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おいて平成 23 年度の研究成果を報告する研究成果報告会 (ILT2012) を開催した。

7月 5日 KKR ホテル東京（東京）

7月 18日 千里ライフサイエンスセンター（大阪）

3. 機関誌等の発行

機関誌「LASER CROSS」を月 1 回発行した。また、H25 年 1 月から電子メールでの情報配信サービスを開始し、広く情報の発信・提供を行った。

4. 展示会への出展

関係団体が主催する光技術やレーザーに関する展示会へ積極的に出展し、当研究

所の広報活動に務めた。

LASER EXPO 2012 4月25日～27日 パシフィコ横浜（神奈川県）

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15の国際会議へ参加した。また、フランスボルドー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) OPTICS & PHOTONICS International Congress (OPIC, 4月, 日本)
- (2) The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO, 5月, アメリカ)
- (3) International Laser Rader Conference (ILRC, 6月, ギリシャ)
- (4) High Energy Class Diode Pumped Solid State Laser (HEC-DPSSL, 9月, アメリカ)
- (5) Laser Damage Symposium (9月, アメリカ)
- (6) The International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO2012, 9月, アメリカ)
- (7) 韓国原子力研究所(KAERI)共同研究 (12月, 韓国)
- (8) 韓国光技術院(KOPTI)招待講演 (1月, 韓国)
- (9) ボルドー大学共同研究 日仏交流促進事業 SAKURA プログラム (2月, フランス)

Ⅲ 創 立 25 周 年 記 念 事 業

平成 24 年度に当財団が創立 25 周年を迎えたのを機に、レーザー技術のさらなる普及啓発活動を推進すべく、「ハイパワーフォトニクス」をテーマに創立 25 周年記念事業を実施した。

1. 記念講演会

- ・日時 : 平成 24 年 7 月 18 日(水) 15:00 ~ 17:00
- ・場所 : 千里ライフサイエンスセンター
- ・参加者 : 約 100 名

【プログラム】

① 開会挨拶

所長 井澤 靖和

② 泰山賞贈呈式

◇レーザー功績賞 豊田 浩一 氏

「レーザーマイクロプロセスの研究とレーザー科学技術の発展に対する貢献」

◇レーザー進歩賞 渡部 俊太郎 氏

「超短パルス高強度レーザーとコヒーレント短波長光発生に関する先駆的研究」

③ 記念講演

◇「レーザー総研 25 年とレーザー産業」

所長 井澤 靖和

◇「レーザー科学研究の将来」

光産業創成大学院大学 学長 加藤 義章 氏

④ 閉会挨拶

副所長 中塚 正大

2. 記念祝賀会

- ・日時 : 平成 24 年 7 月 18 日(水) 17:30 ~ 19:00
- ・場所 : 千里阪急ホテル クリスタルホール
- ・参加者 : 約 100 名

3. 創立 25 周年記念誌の発行

「レーザー総研 25 年の進歩」(平成 24 年 7 月 18 日発行)

IV 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 23 年度の研究成果を年報にまとめ、刊行した。

・「ILT2012 年報」(2011～2012) (平成 24 年 7 月発行)

3. 泰山賞の贈呈

創立 25 周年記念講演会にて第 4 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

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	島田義則 谷口誠治 (兼務) オレグ コチャエフ
【レーザーバイオ化学研究チーム】	チームリーダー 副主任研究員 副主任研究員	中島信昭 ハイク コスロービアン 谷口誠治
【理論・シミュレーションチーム】	チームリーダー 主任研究員 研究員	井澤靖和 (兼務) 砂原 淳 古河裕之
【レーザー技術開発室】	主任研究員 (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 渡邊佳子
【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 (財)豊田理化学研究所 フェロワー 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25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
 大阪大学大学院工学研究科
 大阪大学大学院工学研究科
 大阪大学大学院工学研究科
 大阪大学大学院基礎工学研究科
 大阪大学大学院理学研究科
 大阪大学接合科学研究所
 大阪大学接合科学研究所
 大阪大学
 大阪工業大学工学部
 大阪産業大学工学部
 大阪市立大学大学院理学研究科
 岡山大学大学院自然科学研究科
 核融合科学研究所
 核融合科学研究所
 関西学院大学理工学部
 関西大学システム理工学部
 関西大学システム理工学部
 北見工業大学
 京都大学化学研究所
 京都大学化学研究所
 京都大学大学院理学研究科
 京都大学大学院理学研究科
 近畿大学理工学部
 近畿大学理工学部
 近畿大学理工学部
 近畿大学理工学部電気電子工学科
 高知工業高等専門学校
 高知工業高等専門学校
 摂南大学工学部
 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
 千葉大学
 電気通信大学 企画調査室
 電気通信大学レーザー新世代研究センター
 東京工業大学大学院工学研究科
 東京工業大学大学院総合理工学研究科
 東北大学大学院工学研究科
 東北大学大学院理学研究科
 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

センター長 疇地 宏
 教授 斗内 政吉
 教授 萩行 正憲
 教授 西村 博明
 教授 乗松 孝好
 教授 宮永 憲明
 准教授 河仲 準二
 准教授 坂和 洋一
 准教授 藤田 尚徳
 准教授 藤岡 慎介
 助教 椿本 孝治
 講師 藤本 靖
 名誉教授 西原 功修
 特任教授 實野 孝久
 教授 兒玉 了祐
 教授 栗津 邦男
 教授 田中 和夫
 教授 宮坂 博
 准教授 山中 千博
 教授 節原 裕一
 准教授 塚本 雅裕
 名誉教授 柳田 祥三
 教授 西口 彰夫
 教授 草場 光博
 教授 八ツ橋知幸
 助教 西川 亘
 准教授 岩本 晃史
 助教 安原 亮
 教授 玉井 尚登
 教授 浅川 誠
 准教授 佐伯 拓
 助教 古瀬 裕章
 教授 阪部 周二
 准教授 橋田 昌樹
 教授 七田 芳則
 教授 大須賀篤弘
 教授 吉田 実
 教授 橋新 裕一
 教授 中野 人志
 准教授 前田 佳伸
 准教授 赤松 重則
 准教授 芝 治也
 教授 田口 俊弘
 准教授 藤田 秀二
 教授 久世 宏明
 特任教授 植田 憲一
 准教授 西岡 一
 教授 矢部 孝
 講師 河村 徹
 准教授 田中 秀治
 准教授 柴田 穰
 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

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

特任教授	三間 圀興
准教授	部谷 学
教授	藤原 関夫
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

(平成25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 材料技術研究開発本部技師長
	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
	高杉政博	関西電力株式会社 執行役員
	田中健一	三菱電機株式会社先端技術総合研究所 所長
	西 亨	一般財団法人大阪科学技術センター 専務理事
	西 正孝	独立行政法人日本原子力研究開発機構関西光科学研究所 所長
	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 コーポレートR&D戦略室 理事

(平成25年6月現在)

理 事 ・ 監 事

(敬称略)

理事長	橋本徳昭	関西電力株式会社 常務取締役
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 原子力事業本部 原子力技術部 部長
	佐藤正一	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
	鈴木幸司	日本電気株式会社 執行役員
	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師長	
吉澤厚文	東京電力株式会社 原子燃料サイクル部長	
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

(平成25年6月現在)

評議員選定委員

(敬称略)

高杉政博	関西電力株式会社 執行役員
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
佐々木孝友	大阪大学 名誉教授
阪部周二	京都大学 教授

(平成25年6月現在)

企 画 委 員

(敬称略)

委員長	大濱稔浩	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
	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
	鈴木良和	オムロンレーザーフロント株式会社 技術統括マネージャー
	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 マネージャー
	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
	富永研司	株式会社日立製作所 電力システム社 原子力事業統括本部 原子力事業統括センタ 王禅寺センタ長
	中島信昭	公益財団法人 豊田理化学研究所 フェロー
	名倉準市	中部電力株式会社 技術開発本部 研究企画グループ長
	西村博明	大阪大学 教授
	濱崎 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
	藤原関夫	兵庫県立大学 教授
	宮崎健創	京都大学 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
	横井賢二郎	関西電力株式会社 研究開発室 研究推進グループ マネージャー

(平成25年6月現在)

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

【金属製品製造業】

原子燃料工業株式会社

【電気機器具製造業】

ウシオ電機株式会社
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】

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42社(他1社含む)

(平成25年6月現在)

お わ り に

レーザー技術総合研究所年報第 25 巻 ILT2013（平成 24 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。

当研究所は、昨年創立 25 周年を迎え、同時に、公益財団法人レーザー技術総合研究所として新たなスタートを切りました。現在、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、一昨年、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。

チーム研究では、フェムト秒レーザーによる CFRP 極薄板の溝切り加工で良好な性能が得られ、マスクパターン形成技術への適用に見通しが得られました。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。白色光ライダー技術を発展させ、大気中だけでなく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、碍子表面の塩分量計測、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、成果の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。

今後は、公益財団法人としての責務を果たすべく研究開発活動を積極的に推進し、わが国の産業活力向上に貢献できるよう、鋭意努力する所存でございます。

長年にわたる皆様方のご指導、ご協力に深く感謝申し上げますとともに、これからも相変わりがせず、ご支援、ご鞭撻下さいますようお願い申し上げます。

平成 25 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

ILT2013 年報

平成 25 年度 7 月 発行

公益財団法人 レーザー技術総合研究所

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

TEL (06) 6443-6311 (代)

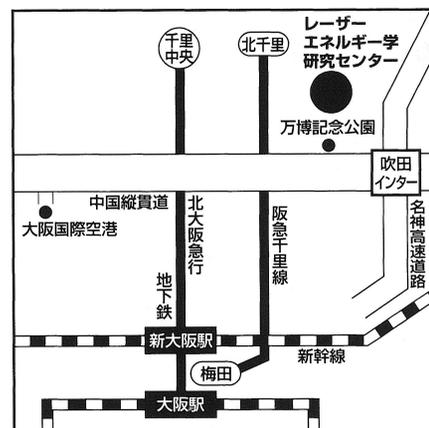
公益財団法人 レーザー技術総合研究所



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



研究部 / 尼崎市若王寺3丁目11番20号 〒661-0974
 関西電力(株)技術研究所内
 TEL.06-6492-7613
 FAX.06-6492-5641



共同研究先 / 吹田市山田丘2番6号 〒565-0871
 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター
 TEL.06-6878-1264
 FAX.06-6878-1568

■お問い合わせは、総務部までお気軽にご連絡ください。



Institute for Laser Technology