

ILT-APR Number 30
Issued: July 2019
ISSN 1340-6167

ILT2019年報

Annual Progress Report

2018-2019



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

レーザー技術総合研究所は 1987 年の創立以来、レーザーおよびその関連産業の振興を図り、わ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、人材の育成などの事業を推進してまいりました。この間、関係省庁、企業、大学等研究機関の皆様から多大なご指導、ご支援を賜りましたこと、厚く御礼申し上げます。

平成 30 年度は、全所横断型の「産業用レーザー開発」と「レーザー探傷技術開発」の 2 つのプロジェクト、ならびにレーザーエネルギー、レーザープロセス、レーザー計測、レーザーバイオ化学、理論・シミュレーションの 5 研究チームとレーザー技術開発室の体制で研究を進めました。

産業用レーザー開発プロジェクトでは、固体レーザー材料のゼロフォノン吸収ライン励起がレーザー媒質の発熱抑制と発振効率の向上に有効であることを実証し、室温動作で kW 出力を達成しました。また、可視域で発振する Pr 添加フッ化物ファイバレーザー出力を波長変換し、高効率・高輝度の紫外光源開発研究を進めました。

レーザー探傷技術開発プロジェクトでは、コンクリート構造物の経年劣化を高速で検査し、健全性を評価する技術の開発を進め、鉄道トンネルや道路トンネルでその有効性を実証するとともに、実用化をめざして、ハード、ソフト両面から、装置の高性能化や検査結果の信頼性向上の研究を進めました。また、落石可能性の検知や配管厚さの監視など、新しい分野への応用研究を開始しました。

チーム研究では、テラヘルツ波光源開発、レーザー加工、レーザー分光による微量成分分析、液中レーザーアブレーションと光化学、生体関連物質の機能研究、レーザープラズマシミュレーション研究、光学素子の損傷評価や高耐力化研究などを継続し、併せて新しい応用分野の開拓をめざした試みも始めています。テラヘルツ光源開発では、これまでの理論研究の成果を実証すべく、金属の周期構造体と誘電体を組み合わせた複合構造体を試作し、電磁波の放射特性を計測して理論との整合性を確認しました。レーザー加工では、木材や金属部材の塗装除去やクリーニング、コンクリート部材の切断・補修など、土木建築分野での応用研究に着手しました。レーザー分光では、船舶に搭載可能なラマンライダー計測システムを開発し、海上からの水中観測に挑戦するなど、実環境での海洋計測をめざす活動を開始しました。また蛋白質の光機能性の解明研究、レーザーアブレーション現象や地震先行現象に関連するプラズマ物理研究などでも成果が積み上げられました。光学素子の高耐力化や損傷評価では、産業界を中心とする皆様方からご相談やご依頼が増加しており、ご要望に対応できる体制などを検討してまいります。

当研究所は公益財団法人として、セミナーやシンポジウムの開催、広報誌の発行などの事業を通じ、成果を広く情報発信することに努めています。ここに平成30年度の成果報告書（ILT2019年報第31巻）を取りまとめました。何卒ご高覧の上、ご助言、ご指導下さいますようお願い申し上げます。

令和元年 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

ILT2019 年報 (Annual Progress Report 2018-2019)

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

Waveform measurement system for novel terahertz radiation	1
---	---

レーザープロセス研究チーム

レーザープロセッシングの新しい展開	4
常温動作キロワット出力 Yb : YAG レーザーの開発	10
Lasing Characteristics of Axicon Retro-Reflector Resonator	16
海上ラマンライダーによる海底面の測距の可能性	22

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欠陥検査：実用化を目指して	26
レーザー打音法によるコンクリート構造物内部欠陥高速検査技術の開発	32
Laser-based remote nondestructive inspection of metal water-pipelines	37

レーザーバイオ化学研究チーム

時間分解レーザー計測による蛋白質の光励起ダイナミクス	44
----------------------------------	----

理論・シミュレーションチーム

レーザー核融合液体壁炉チェンバー内の金属蒸気の澱みの可能性の研究	48
--	----

レーザー技術開発室

小型・高効率 UV レーザー光源開発	50
--------------------------	----

発表論文リスト	57
事業報告書	67
組 織 図	81
構 成 員 一 覧	82
評 議 員	87
理 事 ・ 監 事	88
賛 助 会 員	89

研 究 報 告 書

Waveform measurement system for novel terahertz radiation

Laser energy research group

Dazhi Li, Kosaku Kato¹, Makoto Nakajima¹, Makoto Asakawa², Masaki Hashida³

¹Institute of Laser Engineering, Osaka University

² Faculty of Engineering Science, Kansai University

³ Advanced Research Center for Beam Science, ICR, Kyoto University

1. Introduction

Terahertz radiation source is actively studied since it plays a vital role in terahertz applications¹, and high-efficiency terahertz radiation device is pursued in any terahertz wave systems²⁻⁷. We proposed a configuration of slit-array with the dielectric substrate to effectively generate terahertz radiation². The novel radiation mechanism is different from the well-known Smith-Purcell effect and has been demonstrated to be potential in developing terahertz radiation sources. For further understanding the radiation physics happened in a radiation scheme, we build a THz-TDS measurement system to observe the radiations. With this system, we hope to get the waveform in the time domain, and then we can further understand the characteristics of the radiation physics that we are interested in. In this report, we introduce our experimental setup and the recent progress.

2. Features of novel radiation

The model of the configuration consisted of a metal slit-array on a dielectric substrate² as shown in Fig. 1. We designed the structural parameters as $L=0.2$ mm, $W=0.1$ mm, $H=0.4$ mm, and the permittivity $\epsilon_r=11.7$ (Silicon) is used for the dielectric substrate. We focus on the dispersion relation of this grating configuration, and our attention is confined to transverse magnetic (TM) waves, for which the magnetic field in the z direction vanishes. By making use of the boundary conditions, the dispersion relation between angle frequency ω and wavenumber k_z can be directly derived². With the parameters given earlier, we numerically solved the dispersion equation and obtained predicted a TM mode as shown in Fig. 1. The light line

in vacuum $f = ck_z/2\pi$, and in the dielectric $f = k_z c/2\pi\sqrt{\epsilon_r}$ are also plotted for comparison. It is shown that this mode exists above the light line of dielectric but below that of vacuum, which means that they can radiate in the dielectric

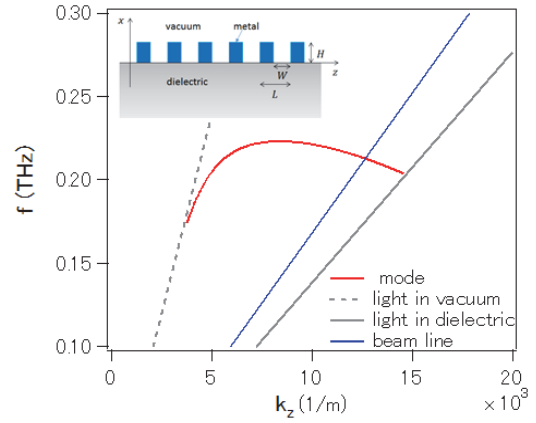


Fig.1 Dispersion relation of the two-dimensional grating configuration with a dielectric substrate. (resonance occurs at the intersection of the beam line with the curve of mode)

side and operate as surface waves in the vacuum region. A 35-keV electron beam is assumed to travel near the surface of the grating, and we also plotted the electron beam line $f = k_z c\beta/2\pi$ for comparison. From Fig.1 we know that the electron beam can excite radiative waves in the dielectric region. At the intersection of the beam line with the curve of the mode, resonant frequency 0.21 THz and the radiation angle 34 degrees can be predicted. According to these predictions, we designed a substrate with the form of wedge to output the radiation. The direction of the radiation can be designed as expected by adjusting the angle of wedge. A simulation example of radiation pattern is given in Fig. 2, where the radiation goes in the forward

direction.

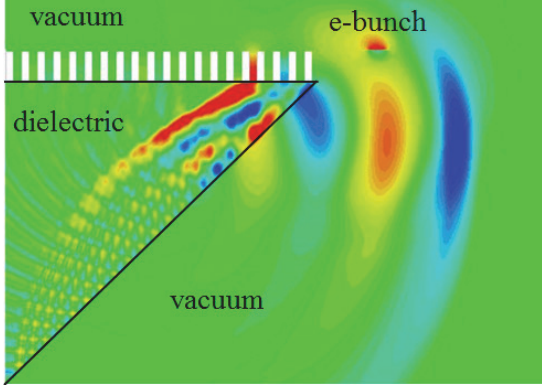


Fig. 2 Magnetic field in y direction of electromagnetic wave to show the radiation pattern. (The wedge angle is designed to make the output wave go in the forward direction)

3. Waveform measurement system

We have developed a compact electron gun based on a 40-kV DC photo-injector to produce ultrashort, high-charge electron bunches. A frequency-tripled Ti:sapphire laser beam ($\lambda=266$ nm, $h\nu=4.7$ eV) irradiates a magnesium photocathode (work function=3.64 eV) installed in the diode-type DC gun to produce photoelectrons. The repetition rate of the laser was 1 kHz, and its pulse width fluctuated slightly in 95-105 fs range. The laser beam is focused on the cathode, which is 20 mm in diameter. The cathode is connected to a high-voltage DC power supply with a maximum voltage of -40 kV. The DC electric field accelerates the photoelectrons toward the anode electrode, and a dumper electrode placed immediately behind the anode electrode, at which a radiation structure for generating terahertz radiation is installed.

Based on the electron gun, we are developing a THz-TDS measurement system as shown in Fig. 3. The laser generated from the Ti:sapphire is divided into three beams, denoted as beam 1, beam 2 and beam 3, respectively. The beam 1 is focused by a lens placed outside the vacuum vessel to irradiate the cathode. The beam 2 is used to irradiate a ZnTe crystal (denoted as ZnTe 1) to produce THz wave through rectification effect. We use this THz wave to examine whether the

measurement system works well or not. The beam 3 goes through a delay device and is focused on another ZnTe crystal (denoted as ZnTe 2). When the THz wave irradiates ZnTe 2 simultaneously, the polarization of beam 3 is changed, and we

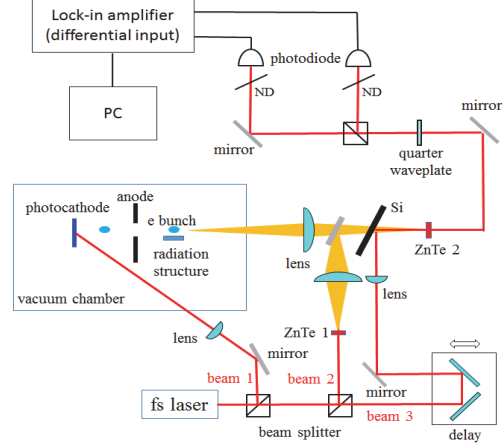


Fig. 3 Schematic of the experimental setup including the generation of terahertz radiation through electron bunches and THz-TDS measurement system.

can know the intensity of THz wave at that moment by measuring the changes of polarization through two photodiodes. By adjusting the temporal delay, we finally can get the waveform of the THz wave in the time domain. After we determine that the measurement system works normally, the beam 2 will be shut down, and let the THz radiation generated from the electron bunches irradiate the ZnTe 2 to perform the actual measurements.

We have finished the measurement and the examination systems, and the examination experiments have been carried out. The terahertz wave generated by the optical rectification effect was observed by the measurement system, and the waveform in the time domain is shown in Fig. 4. It is shown that the measurement system works well, and the experiments for electron bunches are underway.

4. Conclusion

We found that a slit-array with dielectric substrate was possible to provide a radiative electromagnetic mode that could be resonant with an electron beam. From the resonant

mechanism we predicted a special radiation much stronger than the Smith-Purcell radiation, which is a powerful alternative in developing terahertz radiation sources. And it can be expected that an initially continuous beam could be bunched due to the resonance and emit coherent radiation at the resonant frequency. We have developed an experimental setup to further understand the electromagnetic properties of the configuration.

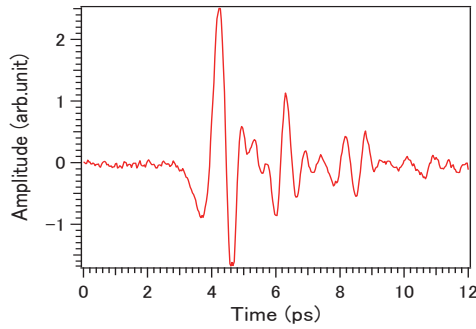


Fig.4 Terahertz wave generated by the optical rectification effect through the irradiation of beam 2 on crystal ZnTe 1.

Acknowledgement

This work is partially supported by the Matsuo Research Foundation, the Cooperative Research Program of Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of

Fukui (H30FIRDM031A), the joint research project of the Institute of Laser Engineering, Osaka University (2018B1-LI), NSFC(61771117), The Futaba Research Grant Program of the Futaba Foundation and KAKENHI (16k04987).

Reference

- [1] Gardelle, P. Modin, and J. T. Donohue, Phys. Rev. Lett. **105**, 224801 (2010).
- [2] D. Li, Y. Wang, M. Nakajima, M. Tani, M. Hashida, M. R. Asakawa, Y. Wei, and S. Miyamoto, Appl. Phys. Lett. **110**, 151108 (2017).
- [3] M. M. Cao, W. X. Liu, Y. Wang, and K. Li, Phys. Plasmas **21**, 023116 (2014).
- [4] D. Li, Y. Wang, M. Hangyo, Y. Wei, Z. Yang, S. Miyamoto, Appl. Phys. Lett. **104**, 194102 (2014).
- [5] W. Liu, M. Cao, Y. Wang and K. Li, Phys. Plasmas **23**, 033104 (2016).
- [6] Y. Wang, Y. Wei, D. Li, K. Takano, M. Nakajima: Phys. Plasmas **22**, 083111 (2015).
- [7] S. Liu, C. Zhang, M. Hu et al., Appl. Phys. Lett. **104**, 201104 (2014).

レーザープロセシングの新しい展開

レーザープロセス研究チーム

藤田雅之

1. はじめに

加工ツールとしてのレーザーは、波長域として遠赤外から深紫外まで、照射時間（パルス幅）ではフェムト秒パルスから連続光まで、また光学系を用いて照射スポットを調整することで幅広くエネルギー密度を選択して使うことができる。これまで行ってきたレーザー加工研究の事例を図1に示す。レーザー加工の三要素と言われる波長、パルス幅、エネルギー密度を変えることにより、非熱的穴開け加工、微細周期構造形成、レジスト剥離、多層ウェハのダイシングなどを手掛けてきた。本稿では、パルス幅の観点からこれらの加工事例を整理し、レーザープロセシングの可能性を紹介する。

2. フェムト秒からピコ秒パルス

物質にレーザー光が照射され、温度が上がっていくと、固体→液体→気体→プラズマへと状態が変化していく。プラズマは電離気体と呼ばれ、イオンと電子で構成される。パルスレーザー加工においてはレーザー照射後数ピコ秒でプラズマが発生し、レーザーエネルギーはプラズ

マに吸収され、プラズマを介した熱伝導によって試料が加熱される。パルスの繰り返し周波数が 1kHz 程度のフェムト秒レーザー加工では試料照射時にレーザーとプラズマとの相互作用が存在しないため、レーザーが固体に照射されて起きる初期過程が加熱プラズマによってかき消されることなく加工痕として観察される。図1中央付近のパルス幅の軸に沿って並べられた3枚の電子顕微鏡像 (SEM 像) は、Si ウェハにパルス幅が (a) 100fs 、(b) 200ps 、(c) 10ns のレーザー光を照射した際の加工痕である。パルス幅が長くなるにつれて溶融領域が顕著になり、加工痕周囲に盛り上がりが見られる。

パルス幅が概ね 10ps （プラズマが発生し膨張を始める時間スケール）以下になると熱影響が無視できる加工が実現し、非熱的な超短パルスレーザー加工と呼ばれている。このような現象はレーザー誘起破壊しきい値のパルス幅依存性の研究によって見いだされ、米国次いで日本国内においても特許化され、ミシガン大学やミシガン州が特許権者であったため“ミシガン特許”と呼ばれていた²⁾。発明者には、昨年ノーベル賞を受賞したモウロ

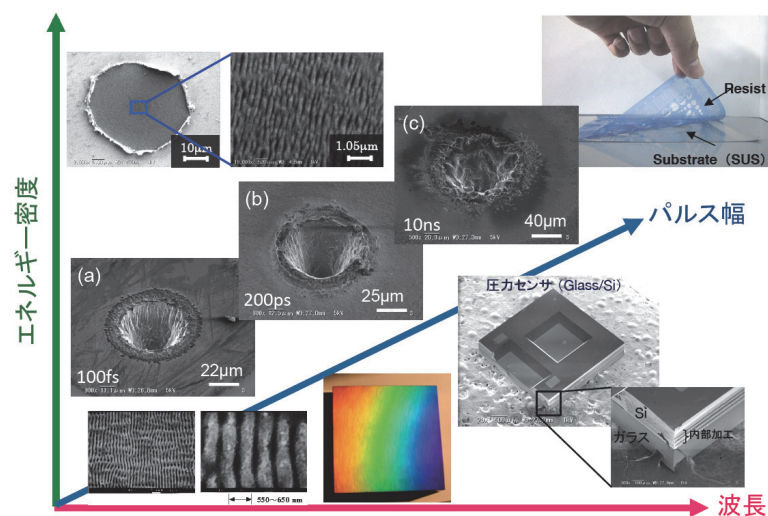


図1 短パルスレーザーを用いた加工事例。レーザー光の波長、パルス幅、エネルギー密度を変えることにより、穴開けや表面処理など様々な加工が可能となる。

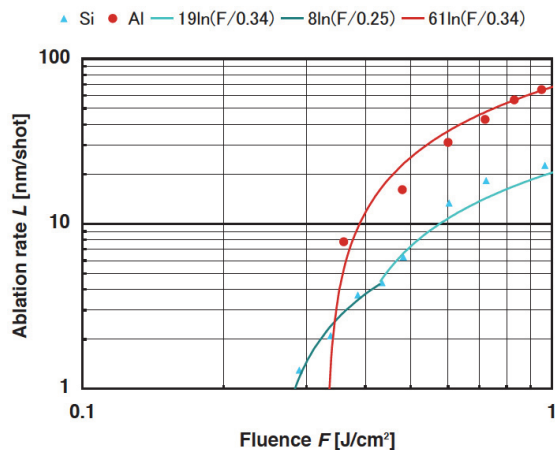


図2 Al (●) と Si (▲) のアブレーションレート
の照射フルーエンス依存性；パルス幅 100fs、波長
800nm.

一博士が名を連ねている。

フェムト秒レーザーパルスはエネルギーが小さくてもピーク強度が高く、照射条件に応じて様々な加工現象が発現することが知られている³⁴⁾。熱影響が無視できるアブレーション加工、サブミクロンの微細周期構造形成、結晶構造の相変化等、産業的にも有益な加工方法として注目されている。一例として、フェムト秒レーザーによって微細構造を形成した Al-Si 合金表面が流体潤滑領域で著しい摩擦係数の低減効果を発揮した事例を以下に紹介する³⁾。

Al-Si 合金は Al と Si が均一に混ぜ合わさっているものではなく、軽量で柔らかい Al 母材中に硬い Si が結晶粒として存在している。耐熱性、耐摩耗性に優れ、熱膨張係数が小さく、鍛造材としてピストンやシリンダーヘッド等に用いられている。

微細周期構造はアブレーション加工しきい値近傍で形成されるために、Al と Si それぞれのアブレーション特性を実験的に調べた。図2に Al と Si のアブレーションレートの照射フルーエンス依存性を示す。Si の方が加工しきい値は低いが、加工レートは Al の方が数倍大きいことが分かる。すなわち、Al の加工しきい値以下では Si が選択的に加工され、Al の加工しきい値以上では Al が加工されやすい。照射フルーエンスを制御するこ

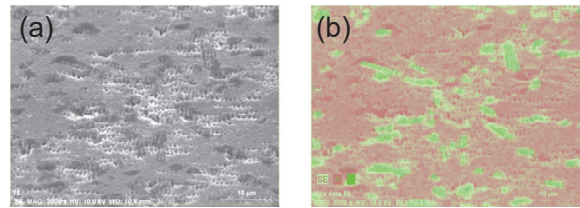


図3 Al の加工しきい値以下で照射された共晶 Al-Si
合金表面の SEM 像 (a) と EDS 分析結果 (b)。Si 結晶
粒に相当する部分が回っている。

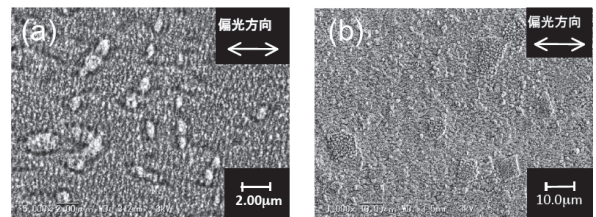


図4 Al の加工しきい値以上で照射された共晶 Al-Si
合金(a)と過共晶 Al-Si 合金(b)表面の SEM 像。Si 結晶
粒が突出している。

とで、Si の結晶粒に相当する部分をへこませたり、Si の結晶粒を突出させたりすることが期待できる。

図3に Al の加工しきい値以下で加工した共晶 Al-Si 合金試料の表面写真を示す。波長 800nm、パルス幅 100fs のチタンサファイアレーザーを用いて加工を行った。Si の結晶粒に相当する部分が凹み、微細周期構造が形成されている。図4に Al の加工しきい値以上でレーザー照射した試料表面の SEM 像を示す。微細周期構造が形成された表面に Si の突出が確認された。このように加工された試料の表面摩擦係数を測定したところ、摺動速度 0.56m/s において共晶 Al-Si 合金で 17%、過共晶 Al-Si 合金で 27%の摩擦低減効果が確認できた。

3. 10ナノ秒パルス

最も産業界で普及している短パルス固体レーザーのパルス幅は 10 ナノ秒であろう。E/O (電気-光) Q スイッチを用いて比較的容易に短パルスを発生させることができ、プリント基板の穴開けや金属等の微細加工で活躍している。ナノ秒パルスは、フェムト秒やピコ秒パルスに比べて大きなパルスエネルギーが利用可能である

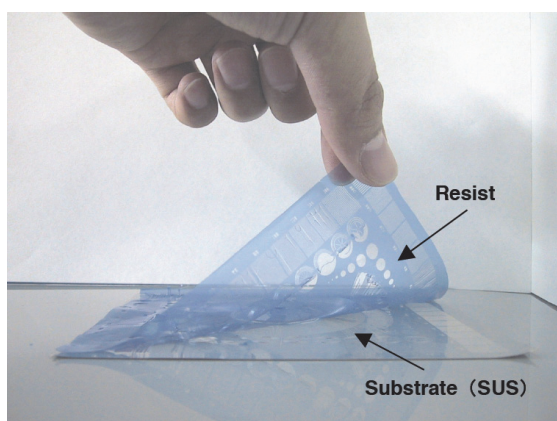


図5 レーザーで剥離されたレジスト。

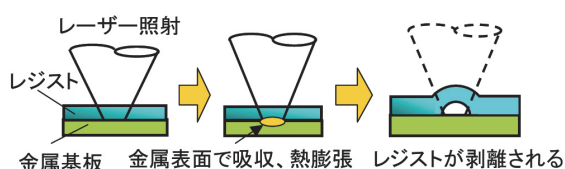


図6 レジスト剥離の概念図。

と同時に、多光子吸収を誘起するのに十分なピークパワーを有している。このような特徴を有するナノ秒パルスレーザーをアブレーション加工では無く、化学薬品を用いたエッチング工程のドライプロセス化に適用した事例を以下に紹介する⁶⁷⁾。

微細金属パーツをフォトリソグラフィを用いた化学エッチングで製造する際には、金属基板上にレジスト膜を密着させており、最終工程でこのレジスト膜を除去する必要がある。従来技術では化学薬品で膨潤、あるいは溶解していた。作業環境の改善、環境汚染の点から、このような行程のドライプロセス化が望まれていた。

レーザーを用いたレジスト除去の研究において、金属基板とレジスト膜からなる多層構造に対してレジスト膜サイドから金属に損傷を与えない程度の適度な強度のパルスレーザー光を照射すると、レジスト膜が剥離する現象が見出された。レジスト膜はレーザー照射により蒸散するのではなく、その形状を保ったまま基板から剥離される。

図5にレーザー照射により金属表面から剥離されたレジストの写真を示す。用いたレーザー光はE/O-Qス

イッチNd:YAGレーザーの2倍高調波(パルス幅10 ns、波長532 nm)である。この波長でのレジスト膜の吸収率は約30%であり、透過したレーザー光は金属基板表面にも吸収される。図6に示すように、金属基板と高分子膜であるレジストの熱膨張率の差により過渡的に応力がかかり剥離が引き起こされたと考えられる。パルス幅が100 nsより長いレーザー光では剥離が困難となりレジストが基板上で溶けてしまった。立ち上がりが緩やかなレーザーパルスを用いると、レーザーはレジストと共に基板を加熱するだけの熱源となる。一方で、パルス幅2 nsという短パルスを用いた場合は、少ないエネルギーで剥離が可能であった。パルスの立ち上がりが剥離に重要な役割を果たしていることが確認されている。

剥離試験は4種類の異なる基板(42アロイ、銅箔、ステンレス箔、ステンレス板)のサンプルに対して行われたが、いずれのサンプルに対しても基板にダメージを与えることなくレジスト剥離が確認された。また、照射条件も±5~10%の範囲で剥離可能であり、実用性が高い。これまでも、レジストに対して吸収率が高い紫外レーザーでアブレーションする方法や反応性気体中でレジストを気化させる方法が提案されていたが、いずれもレジストを体積的に除去する手法であった。本手法は基板とレジストの界面にレーザー光を瞬時に照射し加熱するものであり、極めて効果的なパルスレーザーの利用法であると言える。

4. 100ナノ秒パルス

同じQスイッチレーザーでも、A/O(音響光学)素子をQスイッチに用いた場合には(E/O素子に比べてスイッチングが遅くなるため)100ナノ秒程度の短パルスが発生する。また、近年開発が進んでいるQスイッチパルスファイバーレーザーのパルス幅も100-200 ns程度である。10 nsパルスに比べてピークパワーは低下し熱加工が支配的となってくるが、対物レンズで微細スポットに集光すると多光子吸収による加工が可能となる。以下に、10~200 nsパルスを用いたMEMSウェハのレーザーダイシング事例を紹介する⁸⁾。

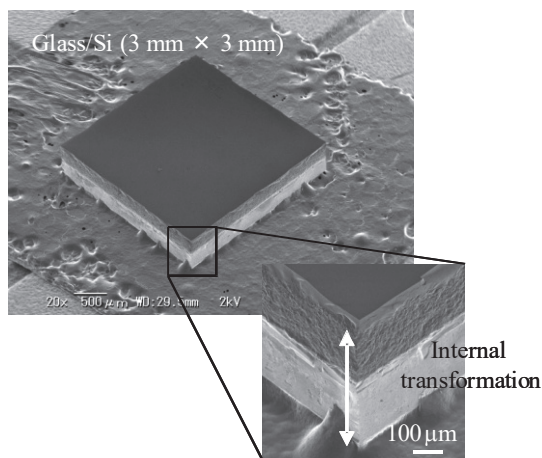


図7 パルス幅 10ns のレーザーで内部加工し、チップ化したガラス/Si (300μm/300μm)の2層構造体のSEM像。

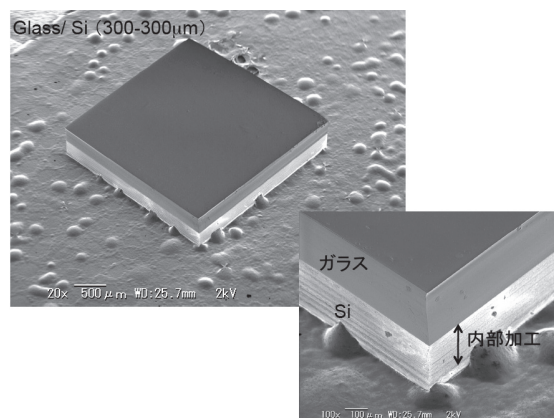


図8 パルス幅 50ns のレーザーで Si 層のみ内部加工し、チップ化したガラス/Si (300μm/300μm)の2層構造体のSEM像。

MEMS (Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械システム)とは、微細な電気要素と機械要素を一つの基板上に組み込んだ素子であり、主に半導体製造技術を用いてウェハ上に数 mm 角のチップとして大量に製造される。MEMS は内部に脆弱構造を有しており低ストレスかつドライでゴミの発生しない新たなダイシング手法の登場が望まれていた。MEMS ウェハの代表的な構造はガラス/Si 接合体である。光学的・機械的特性が異なる 2 種類の材料が貼りあわされた試料をレーザーでダイシングする技術開発を行った。

デブリフリーでレーザー加工するために多光子吸収による内部加工を行った。パルス幅 10 ns のレーザー(波長 1.06 μm)を用いることで、ガラス、Si 共に一台のレーザーで内部加工を施すことができる。図7にシリコン/パイレックスガラス(厚さ 300 μm /300 μm)の2層構造試料の切断結果を示す。Nd:YVO₄ レーザーをガラス側から入射し、底面の Si 側から順に内部クラックを発生させ、加工点を掃引してクラックを繋いでいくことで切断面を形成し、機械的応力を付与して分割した。表面アブレーションを行っていないためデブリフリーで切断できたが、ガラス内に形成したクラックのサイズが加工しきい値付近でも数 10 μm となるため、切断面の粗さもまた数 10 μm となっている。

偶然ではあるが、ガラスの内部加工をせずに Si だけ内部加工すれば割断が可能であることが見いだされた。ガラスは表面に傷を付けるだけで割断できることが知られている。Si に内部加工を施した際に、ガラス/Si の界面に少しでも傷が付いていれば同様の事(内部加工なくても傷に沿ってガラスが割断される)が起こるものと推測される。図8にパルス幅 50ns のNd:YVO₄ レーザーを用いてガラス/Si 多層試料(厚さ 300 μm/300 μm)の Si 層だけに内部加工を施して機械的応力で割断を試みた結果を示す。図7と比較すれば、割断面の品質が飛躍的に向上した。

パルス幅の最適化のために、パルス幅 10 ns、50 ns、100 ns のNd:YVO₄ レーザーとパルス幅 200 ns のYbファイバーレーザーを用いてガラス/Si 多層試料(厚さ 300 μm /300 μm)の Si 層だけに内部加工を施して機械的応力で割断を試みた。ガラス/Si の界面は若干加工されていると思われるが、ガラスの内部加工は行わなかった。割断に必要な曲げ応力を測定すると、パルス幅 10 ns、50 ns、100 ns、200ns に対して、80 MPa、22MPa、13MPa、14MPa となり、パルス幅が長くなるほど小さな力で割断ができることが分かった。割断のための Si の内部加工に関しては、パルス幅が長めのナノ秒パルスを用いて熱加工を施すことが有用であることが確認された。

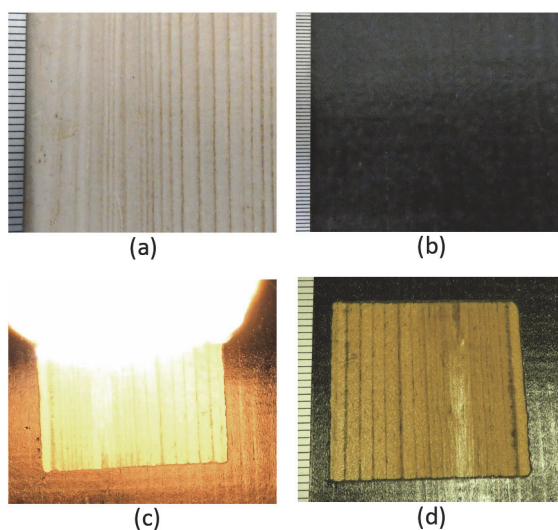


図9 (a) 塗装前の木材(松)の表面、(b) 塗装後の表面、(c) レーザー照射中の様子、(d) レーザー照射後の表面。 レーザースポット径は約2 mm.

5. マイクロ秒～ミリ秒パルス

Qスイッチを使わずにYAGレーザーをパルス発振させようとする、パルス幅は励起用フラッシュランプの点灯時間に依存することになり、数100マイクロ秒からミリ秒のパルスが得られる。このような長パルスは溶接に使われたり、材料を溶かしてアシストガスで吹き飛ばすことで厚板の切断に使われてきた。

近年、ファイバーレーザーの高出力化と共に高輝度化が進み、連続波(CW)であっても $10^4 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ の照射強度を容易に実現することが可能となってきている。従来は加熱用光源としてのミリ秒パルス或いはCWレーザーであったが、光源の高輝度化によりアブレーションを伴う除去加工用としても使うことができるようになってきている。

また、高速掃引を可能とするガルバノスキャナが市販されており、CWレーザーであっても試料に対してパルスのレーザー照射を行うことができる。例えば、直径1 mmのスポットを10,000 mm/sで掃引すると、試料が感じるレーザー照射時間は100 μs となる。ガルバノスキャナはパソコンで制御され、テンキーとマウスクリックで簡単に掃引速度を4～5桁にもわたって変えることができる。

昨年の年報でも報告したが、CWレーザーと高速掃引を組み合わせ、塗装を除去する技術が注目を集めている。以下に、熱影響を観察しやすい木材を試料としてCWレーザーの掃引照射により塗装を除去した事例を紹介する。

昨年の報告内容を再掲するが、木材の塗装除去を紹介する。図9(a)に塗装前の木材(松)の表面、(b)に塗装後の表面を示す。この塗装面にスポット径2 mm^①で154 Wのレーザー光を集光し、掃引速度2,250 mm/sで20 mm角の領域を照射した。試料が受けた照射パルス幅は約0.9 msに相当する。図9(c)に照射時の様子を示す(30 fpsの動画の一コマ)。炎が吹き上がって塗膜が除去されている状況が確認できる。図9(d)に照射後の表面を示す。図9(a)と比べると若干着色が見られるが、極端な炭化は起きていない。

それでは、掃引速度を変えるとどうなるであろうか？図10に同じ試料に対して掃引速度を225～4,500 mm/sまで変化させて154 WのCWレーザーを照射した結果を示す。掃引速度が遅い場合は木材の炭化が見られ、早すぎると塗装の除去が不完全となる。最適な条件を選ぶことにより、下地の材料を再利用可能な状態で塗膜の除

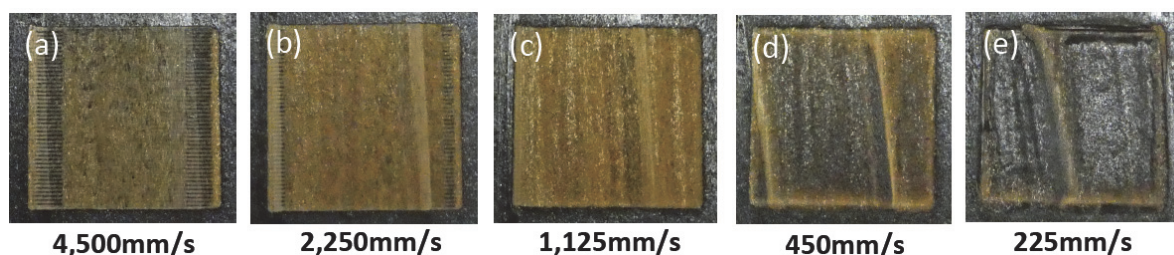


図10 黒色に塗装された木材(松)に対してCWレーザーを掃引速度 (a) 4,500 mm/s、(b) 2,250 mm/s、(c) 1,125 mm/s、(d) 450 mm/s、(e) 225 mm/sで照射した結果。 レーザースポット径は約1 mm.

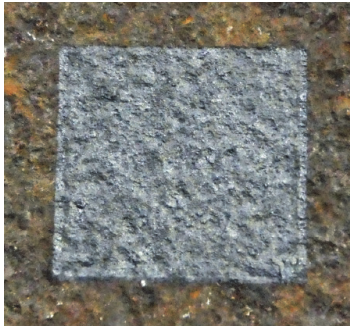


図 11 図 10(c) と同じ条件で鉄板のサビを除去した
試料の表面写真。

去を行うことができる。

興味深いことに、図 10(c) と全く同じ条件で錆び付いた鉄板にレーザーを照射すると、綺麗にサビが除去できることが確認された。試料の状態を図 11 に示す。高輝度の CW レーザーと高速掃引技術を組み合わせることで様々な試料の表面除去（表面のアブレーション加工）が可能となることが分かる。

6. まとめ

今日、様々なレーザー光源が加工応用に使われるようになってきた。照射時間（パルス幅）ではフェムト秒パルスから連続光まで利用可能である。非熱的除去加工はもとより表面処理や、種々の複合・多層材料の効率的加工が実現している。レーザー加工の三要素と言われる波長、パルス幅、エネルギー密度を最適化することにより、

レーザープロセッシングの可能性が益々広がることが期待される。

謝辞

Al-Si 合金の加工は KYB（株）との共同研究、レジスト剥離は東洋精密工業（株）との共同研究でおこないました。MEMS のレーザーダイシングは NEDO の助成を得て東北大学との共同研究で行いました。塗膜除去は天田財団の助成を得て行いました。関係各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 藤田 雅之：「レーザー加工の物理 3 ～光パルス幅と加工～（解説）」，光学，**36**, pp.459-465, (2007).
- 2) 特許公報：特許第 3283265 号（登録日 2002.3.1）。
- 3) 藤田雅之、井澤友策：レーザー研究、**36**, pp.257-262 (2008).
- 4) 藤田雅之：応用物理、**81**, pp.380-385 (2012).
- 5) 尾崎 巧、染川智弘、藤田雅之、吉田 実、中瀬拓也、小林 隆：レーザー研究、**42**, pp.341-344 (2014).
- 6) 藤田雅之、吉門 章、堀邊英夫：レーザー研究、**33**, pp.452-455, (2005).
- 7) 特許第 3853690 号、「フォトレジスト剥離除去方法」
- 8) 鶴見洋輔、井澤友策、菊地秀幸、末田敬一、中田芳樹、江刺 正喜、宮永憲明、田中秀治、藤田雅之：レーザー研究、**37**, pp.384-388 (2009).

常温動作キロワット出力 Yb:YAG レーザーの開発

レーザー計測研究チーム¹、レーザープロセス研究チーム²、
レーザーエネルギー研究チーム³、レーザー技術開発室⁴

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

1. はじめに

固体レーザー材料としての Yb:YAG は、励起量子効率が大きく熱損失が小さい、蛍光寿命が長いことエネルギー蓄積能力が高いなどの特長から、高出力、高パルスエネルギー用のレーザー材料として期待される。当研究所では、Yb:YAG 層を底面に接合した YAG コンポジット (Yb:YAG TRAM (Total-Reflection Active-Mirror、全反射型アクティブミラー方式)) (図1) をレーザー媒質に用いて、常温 (~300 K) で動作する高平均出力固体 CW レーザーの開発を目標に研究を進めてきた。

高出力固体レーザー開発における最重要課題の一つはレーザー媒質の発熱対策であり、二つの手法について検討を行ってきた。第一は、媒質自体の発熱を抑制できるゼロフォノンライン (ZPL、969 nm) 励起の導入である。ZPL 励起を用いた場合、励起波長と発振波長 (1030 nm) のエネルギー差が小さくなるため、通常用いられる 940 nm 帯の励起に比べ発熱損失を約 32 % 抑制できる。第二は、除熱性能の大きい冷却技術の開発であり、新たな手法として TRAM の裏面に冷却水の噴流を直接吹き付けて除熱を行う水衝突噴流 (ジェット) 冷却法の導入を進めてきた。この手法は、噴流により冷却面上の水を強制的に入れ替える (強制対流) ことで高い除熱性能が得られ、また水の沸騰により冷却面上に発生する気泡を物理的に除去できるため、突沸 (膜沸騰) による除熱能力の急激な低下を防止できるという利点がある。これまでの研究で、ZPL 励起による発熱の抑制とそれに伴う発振効率の増加¹⁾や、水ジェット冷却による除熱能力の向上を実験で確認し、これらの手法がレーザーの高効率化、高出力化に有効であることを実証した²⁾。さらに試験結果の分析により、kW 級出力の達成に必要な具体的な条件も明らかになってきた。本研究で

は、これまでの成果に基づき、kW 級の高出力化を実証することを目指し、高出力励起光源 (波長 935 nm、最大出力 > 2 kW) を用いたレーザー発振試験を行い、1 kW を越える出力を実証した。さらに、得られた実験結果に基づき 10 kW 級のレーザー開発のためのスケーリング則について検討した。以下にその詳細について報告する。

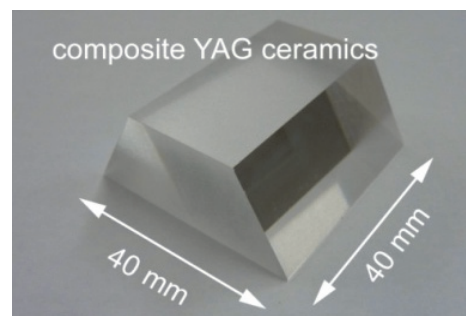


図1 Yb:YAG TRAM の写真

2. 1 kW 級レーザー出力条件の予測

昨年度の研究では、ZPL 励起と水ジェット冷却法を組み合わせ、Yb ドープ濃度および層厚が異なる数種の TRAM について、励起面積 0.04 cm^2 ($\sim \phi 2.3 \text{ mm}$)、励起パワー最大 600W の条件でレーザー発振試験を行った²⁾。その結果、ドープ濃度、層厚が共に薄い Yb 濃度 5 at%、層厚 0.6 mm の TRAM が最も高い出力特性 (発振しきい値、スロープ効率) を示したため、高出力レーザー発振試験に適用する媒質に選定した。

この TRAM の出力特性に基づいてレーザー出力を予測しうるスケーリング則を検討し、kW 出力を実証するための試験条件を求めた。レーザー出力の評価には、以前に我々が作成した、レーザー媒質の温度 (T) 依存性因子を取り入れた出力予測モデルを用いた³⁾。モデル式

を式 (1)に示す。

$$P_{out}(T) = AI_{out}(T) \\ = \eta_{slope} \frac{V}{\left(\frac{f_l(T) + f_u(T)}{h\nu_p} \sigma_{emi}(T) \tau_f(T) \right)} (g_0(T) - g_{th}) \quad (1)$$

ここで、 $P_{out}(T)$ ：レーザー出力 ($=AI_{out}(T)$)、 A ：励起面積、 $I_{out}(T)$ ：出力強度)、 η_{slope} ：スロープ効率、 V ：励起体積、 $f_l(T)$ ：レーザー上準位占有率、 $f_u(T)$ ：レーザー下準位占有率、 $\sigma_{emi}(T)$ ：レーザー発振波長 (1030 nm) での誘導放出断面積、 $\tau_f(T)$ ：蛍光寿命、 $h\nu_p$ ：励起光光子エネルギー、 $g_0(T)$ ：小信号利得、 g_{th} ：発振しきい値での小信号利得である。 η_{slope} 、 $g_0(T)$ 、 g_{th} は、それぞれ式 (2)～(4)で表される。

$$g_0(T) = \frac{(f_l(T) + f_u(T)) \sigma_{emi}(T) \tau_f(T) P_{abs}(T)}{h\nu_p V} - f_l(T) \sigma_{emi}(T) N_0 \quad (2)$$

$$g_{th} = \frac{1}{2l} (2L_s + K) \quad (3)$$

$$\eta_{slope} = \frac{K}{K + L_s} \eta_Q \quad (4)$$

ここで、 N_0 ：原子数×ドープ濃度、 l ：励起光路長、 η_Q ：励起量子効率、 L_s ：レーザー共振器の光学損失、 K ：出力結合鏡の透過率である。 P_{abs} は、励起パワー P_{in} とYb:YAGの吸収断面積 ($\sigma_{abs}(T)$) を用いて式 (5)で表わされる。

$$P_{abs}(T) = P_{in} (1 - \exp(-N_0 \sigma_{abs}(T) l)) \quad (5)$$

この中で、モデル計算を行うために必要な温度依存性因子は f_l 、 f_u 、 σ_{emi} 、 τ_f 、 σ_{abs} である。 f_l 、 f_u については、Ybの励起状態 ($^2F_{3/2}$) の3つのシュタルク準位、基底状態 ($^2F_{7/2}$) の4つのシュタルク準位のエネルギー⁴⁾を用い、各媒質温度について Boltzmann 分布則により算出した。 σ_{emi} はYb:YAGの温度依存性の文献値⁵⁾から近似式を作成し、式(1)に導入した。 τ_f についても同様に蛍光寿命温度依存性の文献値^{6,7)}から近似式を作成して用いた。 σ_{abs} については、温度を調整した TRAM を用いてそれぞれの光吸収率を実測し、温度依存性の実験近似式を作成

して用いた。 L_s については、TRAM 個々の光物性や共振器構成など実験条件に左右される因子であるため、実験値を再現するように値を変化させた。他の因子は、Yb:YAG の物性値⁸⁾ および実験条件から決定した。媒質温度 (T) は、レーザー発振試験時に各励起パワーでの励起中心部の温度を蛍光分光法により同時計測し、媒質温度の励起パワー依存性を実験的に求めてモデル式に導入した。

図2に、水ジェット冷却下 (冷却水温 18 °C (±1 °C))、ZPL 励起 (最大 600 W、励起ビーム径 $\sim \phi 2.3$ mm) での TRAM (Yb ドープ濃度 5 at%、層厚 0.6 mm) のレーザー出力特性と、出力予測モデルによる予測値を示す。モデル計算は、ZPL 励起時 (図中実線) と、高出力レーザー発振試験に使用する励起光源の波長 (935 nm) (図中太線) の両条件で行い、吸収強度に対する出力強度を比較した。ZPL 励起での計算結果は実験値をよく再現している ($L_s = 0.05$)。この計算条件で励起波長のみを 935 nm に変更した場合、ZPL 励起よりも出力特性 (発振しきい値、スロープ効率) は低下すると予測される。これは前年度の報告で述べたように、吸収パワーが同じ場合、ZPL 励起の方が媒質の発熱量が小さく、媒質温度の上昇による出力特性の低下が抑制されるためである¹⁾。kW 級の出力を得る条件として、励起面積を 0.28 cm² (励起ビーム径 $\phi 6$ mm) まで拡張して計算を行い、出力を予測した (図2 右軸)。その結果 935 nm 励起では、約 8.5 kW/cm²の吸収強度で 1 kW 出力が可能と予測できる。

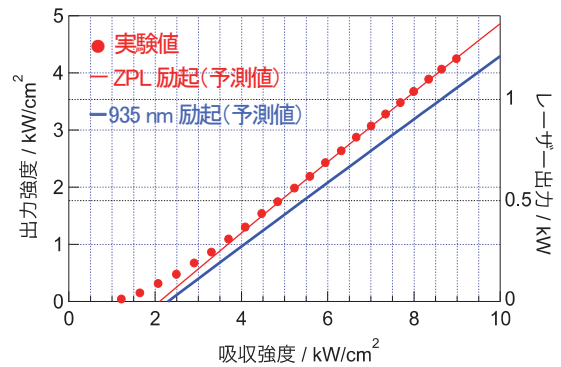


図2 Yb 濃度 5 at%–層厚 0.6 mm TRAM の出力特性 (ZPL 励起、励起面積 0.04 cm²) と式 (1)により計算した励起面積 0.28 cm²での出力予測 (右軸)

3. 高励起レーザー発振試験

3.1 実験手法

前項で示した予測に基づき、Yb 濃度 5 at%-層厚 0.6 mm TRAM を用いた高励起条件でのレーザー発振試験を行った。試験配置を図 3 に示す。媒質の冷却には、噴流速度および冷却水の温度調整が可能な水ジェット冷却装置を用いた。TRAM の背後から水を高速で噴出させ、底面を直接冷却する。TRAM の近傍にダイクロイックミラー(DM0°)、結合出力ミラー(OC、反射率 85 %)を配置し、共振器を構成した。励起光源には、ファイバー出力型高出力 LD (LE0247、浜松ホトニクス、中心波長 935.5 nm、最大出力 2.36 kW)を用い、光吸収効率を向上させるため 3 段励起方式(図中①～③)を導入した。さらに 935 nm LD の隣に最大 600 W のファイバー出力型 LD (D4F4Q22-969、[0,6]-500C-IS45-VBG、DILAS)を配置して 4 段励起光学系を作成し(図中④)、最大入力 2.96 kW の条件で試験を行った。発振後のレーザー光はダイクロイックミラー(DM 45)で反射し、パワーメーター(カロリメーター)により出力を計測した。励起ビーム径は $\phi 6$ mm とした。また、分光器(SP)により Yb の蛍光スペクトルを同時計測して励起中心部の温度を求め、光吸収率の温度依存性から吸収パワーを求めた。図 4 に、1-3 段励起時の TRAM 励起面上での Yb 蛍光のプロファイルを示す(励起ビーム径 $\phi 6$ mm、励起パワー 10 W)。励起段数の増加に伴い蛍光強度も増加する。光吸収パワーと蛍光強度は比例すると考えられるため、励起中心部での蛍光強度の Y

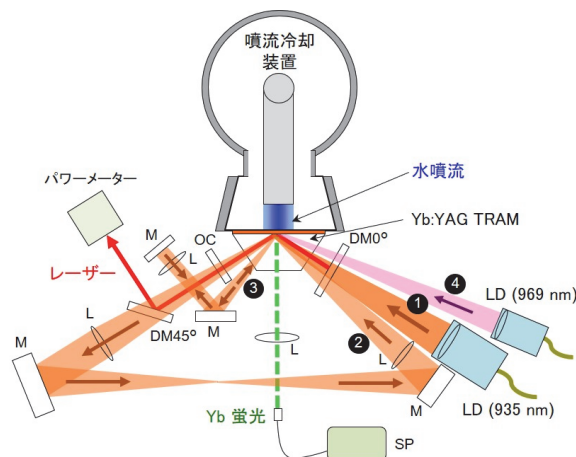


図3 高励起レーザー発振試験配置図

方向分布から蛍光ピーク強度の相対的な増加分を見積もった。その結果、2 段励起では 1 段励起の 1.5 倍、3 段励起では 1 段励起の 1.85 倍であった。3 段目の励起でのビーム径は他に比べやや小さいが、ほぼ予測通りの光吸収効率の増加が起こるものと考えられる。

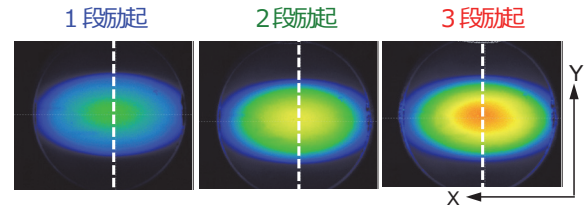


図4 1～3 段励起時の TRAM 励起面での Yb 蛍光プロファイル

3.2 レーザー出力の冷却水温効果

冷却性能がレーザー出力特性に与える効果について検討するため、冷却水温度を 7°C まで低下させた条件でレーザー発振試験を行い、出力特性を比較した。噴流速度は一定 (>5 m/s) とし、励起ビーム径は $\phi 6$ mm、3 段励起方式(図 3)を用いた。図 5 にそれぞれの水温における出力特性を示す。常温冷却時のスロープ効率は 0.58 で高い効率を示したが、 7°C 冷却時にはその効率は 0.62 とさらに向上し、低水温での冷却を行うことで媒質がより低温に保持され、出力特性に有利に働くことが明らかとなった。 7°C 冷却時の最大安定出力は 940 W (2.36 kW 入力時) であった。

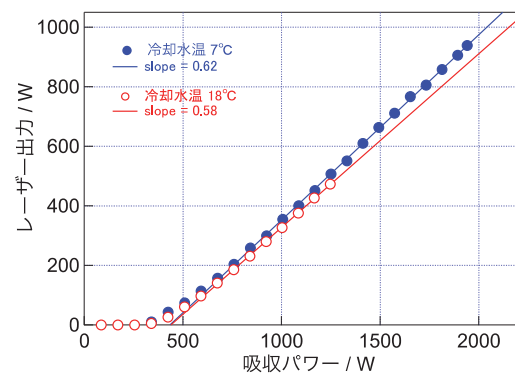


図5 レーザー出力 (3 段励起) の冷却水温効果

3.3 レーザー出力特性評価

多段励起により光吸収率が低い媒質においても吸収

パワーを増大させることが可能になったことから、Ybドーピング層の厚さがより薄いTRAM（Yb濃度9.6at%-層厚0.2mm）を用いたレーザー発振試験を行った。このTRAMの光吸収率はTRAM（Yb濃度5at%-層厚0.6mm）よりも低いが、多段励起を用いると光吸収効率を増大させることが可能となる。図6に3段励起、冷却水温7℃条件での出力特性を示す。最大出力は866W（2.36kW入力時）で、Yb濃度5at%-層厚0.6mm TRAMよりも低いが、スロープ効率は0.67と高い値が得られた。

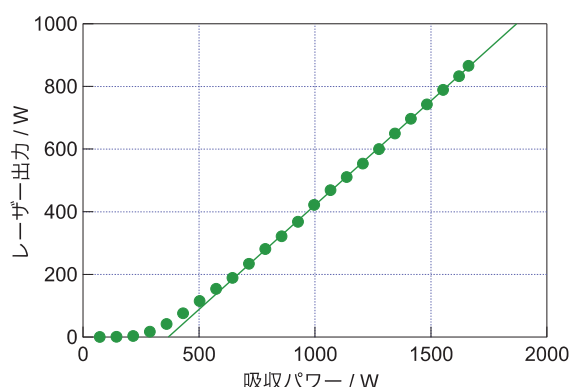


図6 Yb濃度9.6at%-層厚0.2mm TRAMのレーザー出力

図7に、発振試験で得られたレーザー出力特性を予測値（図2参照）と比較したものを示す。実測値（Yb濃度5at%-層厚0.6mm TRAM）は予測出力よりも発振閾値は低下しており、スロープ効率は増加した。この要因として、冷却水温の低下により冷却性能が向上したこと、共振器の光学損失（ L_s ）が低く抑えられたことが考えられる。出力予測モデルを用い、実際の試験条件（7℃冷却、 $L_s = 0.014$ ）で出力を計算すると、実測値をよく再現することがわかった（図中青実線）。図7に、Yb濃度9.6at%-層厚0.2mm TRAMで得られた出力特性を合わせて示す。Yb濃度5at%-層厚0.6mm TRAMに比べ発振しきい値はさらに低下し、スロープ効率は増加した。発振しきい値の低下は主として媒質の厚さが薄くなることで励起体積（ V ）が減少することに起因し、スロープ効率の増加は、層厚（発熱部）が薄いことからジェット冷却による除熱効果が大きくなり、媒質温度の上昇が抑制されたためであると考えられる。予測モデルによ

りドーピング9.6at%、層厚0.2mmの条件で出力を計算すると、実測値がほぼ再現された（図中緑実線）。

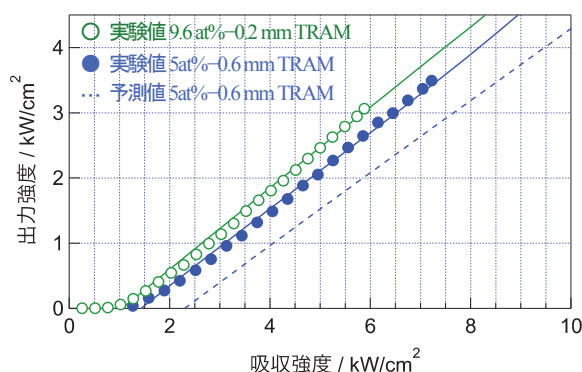


図7 高励起レーザー発振試験におけるレーザー出力特性と出力モデルによる予測値（図2参照）との比較（935nm励起）

3.4 キロワット出力レーザー発振試験

3段励起による試験の結果、1kWを越える出力を達成するためには約2.1kWの吸収パワーを要すると予測される（図7）ことから、4段励起によるレーザー発振試験を行った（図4）。使用したTRAM（Yb濃度5at%-層厚0.6mm、Yb濃度9.6at%-層厚0.2mm）励起ビーム径および冷却条件（水温7℃）など他の実験条件は3段励起時と同一とした。図8に結果を示す。Yb濃度5at%-層厚0.6mmでは最大1070W（入力2.96kW）のレーザー出力が得られ、1kWを越える出力を実証した。

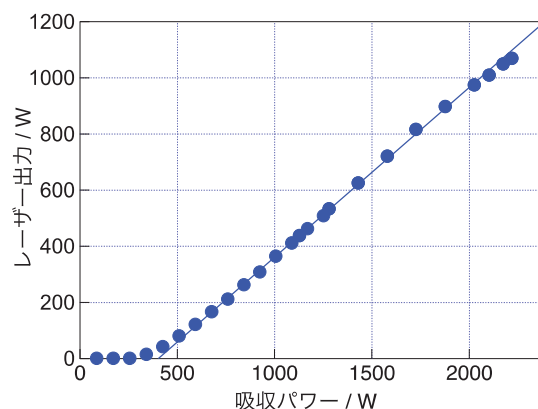


図8 4段励起によるレーザー出力（Yb濃度5at%-層厚0.6mm TRAM、スロープ効率0.61）

図9に、同一の実験条件で行った Yb 濃度 9.6 at%-層厚 0.2 mm TRAM のレーザー出力特性を示す。最大出力は 1030 W (2.96 kW 入力時) であった。Yb 濃度 5 at%-層厚 0.6 mm TRAM 時に比べスロープ効率が増加 (0.67) したため、2 kW 以下の吸収パワーで 1 kW を越える出力が得られた。

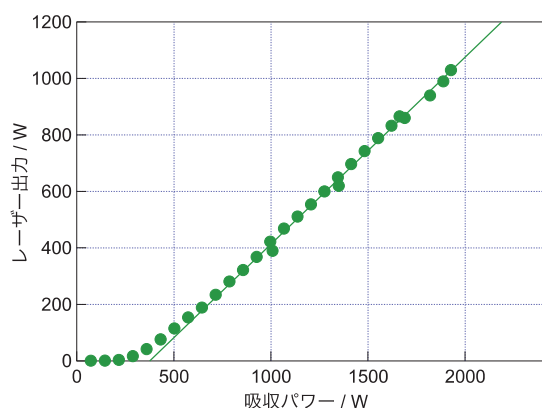


図9 4 段励起によるレーザー出力 (Yb 濃度 9.6 at%-層厚 0.2 mm TRAM、スロープ効率 0.67)

4. 10 kW 級高出力レーザーの開発に向けて

高励起レーザー発振試験により、1 kW を越えるレーザー出力が実証された。この結果は、レーザーのさらなる高出力化に向けたマイルストーンとなる。本項では、発振試験で得られた 1 kW 級レーザー出力特性 (図7) に基づき、出力予測モデルを用いて 10 kW 級出力のレーザー開発に向けたパワースケーリングを行い、高出力化に必要な条件について検討した。同様に ZPL 励起条件についても出力予測を行い、特性を比較した。図 10 に、10 kW 出力を得る条件として励起面積を 3.14 cm² (励起ビーム径 ϕ 2 cm) に拡張した場合の吸収パワーに対する予測出力を計算した結果を示す。ZPL 励起条件では、励起波長に関わるパラメータのみを変更し、他の条件は 935 nm 励起時と同一として出力を計算した。Yb 濃度 5 at%-層厚 0.6 mm TRAM では、935 nm 励起時は吸収パワーが 21 kW で 10 kW の出力が得られる。一方 ZPL 励起時は発振しきい値、スロープ効率とも向上し、10 kW の出力を得るために必要な吸収パワーは 18.5 kW と必要な吸収パワーを抑制できることがわかった。出力モデ

ルから予測された 10 kW 出力時の媒質温度は約 85 °C で、同じ吸収パワーでの 935 nm 励起時の予測温度 (約 110 °C) に比べ約 25 °C 低いことから、ZPL 励起により媒質の発熱を低減することで出力特性が向上するとともに、媒質の高温化による光吸収率の低下を抑制できるものと考えられる。Yb 濃度 9.6 at%-層厚 0.2 mm TRAM においても ZPL 励起の優位性は変わらず、935 nm 励起における 10 kW の出力に必要な吸収パワーは 19.3 kW、ZPL 励起では 17.7 kW で、必要な吸収パワーを抑制できることがわかった。また 10 kW 出力時の予測媒質温度は、935 nm 励起では約 55 °C、ZPL 励起では約 30 °C と媒質温度の上昇が抑制されており、Yb 濃度 9.6 at%-層厚 0.2 mm TRAM においても ZPL 励起がレーザーの高出力化に対して有効であることが示された。

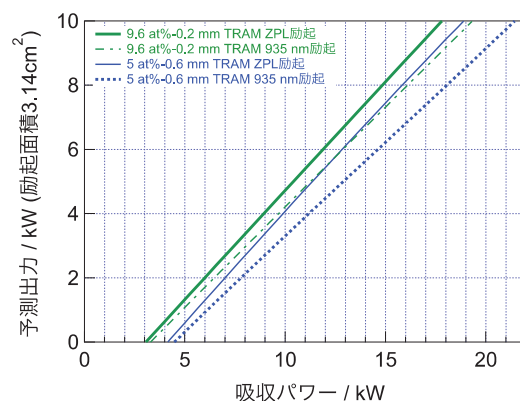


図10 出力モデル式による 10 kW 級出力予測 (励起ビーム径 ϕ 2 cm)

5. まとめ

本研究では、常温で動作する kW 級高平均出力 Yb: YAG TRAM レーザーの開発を目標に、レーザー媒質の発熱対策として水噴流冷却方式を用い、波長 935 nm の高出力励起光源 (>2 kW) を主として用いた高励起レーザー発振試験を行い、その出力特性について検討した。多段励起方式を用いてレーザー媒質の励起光吸収効率を増大させるとともに、冷却水温を 7 °C まで低下させて冷却性能を向上させた結果、Yb ドープ濃度および層厚が異なる 2 種の TRAM において 0.6 以上の高いスロープ効率が得られ、国内研究ではほぼ報告例がない 1

kW を越える CW レーザー出力（最大 1.07kW）を実証した。さらなる高出力化に向け、実験結果に基づいて 10kW 級の出力予測を行った。その結果、媒質の発熱を抑制できるゼロフォノンライン（ZPL、969nm）励起を用いると、935 nm 励起に比べて出力特性が向上し発振効率が增大する可能性が明らかにされ、レーザーの高出力化に対する ZPL 励起の有用性が示された。

謝辞

本研究は、安全保障技術研究推進制度（研究課題名「ゼロフォノンライン励起新型高出力 Yb:YAG セラミックレーザ」）の支援を受けて実施した。噴流冷却システムの開発は、三菱重工業株式会社との共同研究として行われたものである。ご協力頂いた西方伸吾様、森岡朋也様、濱本浩一様、池淵博様、大谷雄一様、金子毅様、醍醐浩之様に感謝いたします。

参考文献

- 1) 谷口誠治他、ILT 2018 年報、pp.9-12 (2018).
- 2) 谷口誠治他、ILT 2018 年報、pp.13-16 (2018).
- 3) 谷口誠治他、ILT 2017 年報、pp.9-13 (2017).
- 4) D. C. Brown, V. A. Vitali, *IEEE J. Quantum Electronics*, **47**, pp.3-12 (2011).
- 5) J. Koerner, C. Vorholt, H. Liebetrau, M. Kahle, D. Kloeppfel, R. Seifert, J. Hein, M. C. Kaluza, *J. Opt. Soc. Am. B*, **29**, pp.2493-2502 (2012).
- 6) J. Dong, M. Bass, Y. Mao, P. Deng, F. Gan, *J. Opt. Soc. Am. B*, **20**, pp.1975-1979 (2003).
- 7) D. S. Sumida, T. Y. Fan, *OSA proceedings on Advanced Solid-State Lasers 1994*, **20**, pp.100-102 (1994).
- 8) T. Y. Fan, *IEEE J. of Quantum Electronics*, **29**, pp.1457-1459, (1993).

Lasing Characteristics of Axicon Retro-Reflector Resonator

Laser Process Research Team

Haik Chosrowjan and Seiji Taniguchi

1. Introduction

The theory of laser resonator has been studied for many years¹⁾. Resonator stability conditions and different cavity geometries tailored for different active media and operation regimes have been analyzed as well²⁾. Noteworthy, most laser cavities are designed and constructed by combination of plane and spherical mirrors. However, for some specific applications³⁾ requiring unique laser modes and polarization conditions such as Laguerre-Gaussian modes and radial/tangential polarization, respectively, or for reduction of thermally induced wave-front distortions in solid-state lasers, non-standard resonators have been used, too. For instance, corner-cubes and metallic W-shaped reflective axicons (also called Waxicons) have been used as reflectors in solid-state⁴⁾ and gas⁵⁾ lasers, respectively.

Corner-cube retro-reflectors (CCR) and axicon lenses (AL) are optical components with interesting reflective and polarization characteristics. One of their properties is that the collimated radiation incident on both elements (arbitrary direction for CCR and normal incident for the AL with 90 degrees apex angle) is reflected in the direction that is counter-parallel to the incident beam. Another common property of both elements is that the reflected beam has coherent properties, which could be used for passive intra-resonator coherent beam combining (CBC). This process is schematically shown in Fig. 1 for AL and briefly described in its caption. Various properties of the CCR have been already addressed theoretically in numerous previous publications⁶⁾. CCRs have been also used as total-reflecting mirrors in laser resonators^{7,8)}. Recently we have suggested that ALs with 90 degrees apex angle can be also used for such purpose. Moreover, using axicons as total reflection mirrors, it seems to be possible generating beams with radial- or tangen-

tial polarizations.

Detailed knowledge of intensity distributions of p- and s-polarization components in retro-reflected beam is essential for designing and building resonators with retro-reflective components. Moreover, polarization properties of retro-reflected beams are also essential for modeling laser mode formation inside the resonator.

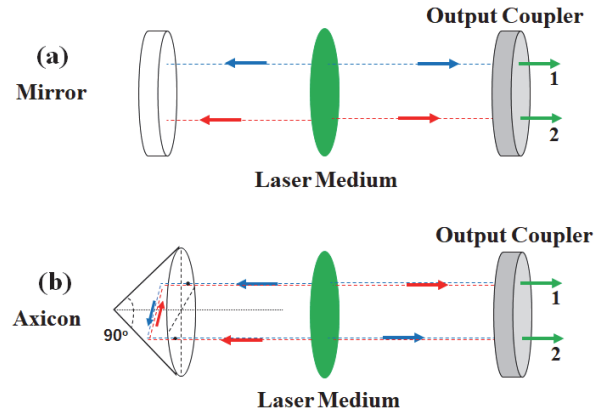


Fig. 1 Comparison between (a) FP and (b) AL based resonators. For large excitation spots and multi-mode operation, in case (a) the areas in the beam profile like 1 and 2 are not phase-locked, while in case (b) the areas 1 and 2 are phase-locked because of mutual injection in the resonator. As a result,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

So, in one of our previous reports⁹⁾, we have presented experimental and calculated results on the basic polarization and reflection properties of the CCR and AL reflectors. Near- and far-field intensity distribution profiles for depolarized, p- and s- polarized outputs were also presented and analyzed. We have performed also case-calculations for several polarization states based on Fresnel equations and compared them with the

experiments. Furthermore, the lasing performance of the CCR based resonator has been addressed in our last report¹⁰⁾ in comparison with conventional Fabry-Perrot (FP) resonator. Laser threshold, slope efficiency, near- and far-field intensity distribution profiles have been monitored. Passive CBC effect inside the CCR resonator was demonstrated based on experimental results and mode calculations.

In this report, the lasing performance of the AL based resonator has been addressed in comparison with conventional Fabry-Perrot (FP) resonator at cryogenic and ambient temperatures. Lasing threshold, slope efficiency, near- and far-field intensity distribution profiles have been monitored. Furthermore, lasing mode selection under high thermal load conditions for FP and AL resonators are also discussed together with the possibility of passive CBC effect inside the AL resonator.

2. Total internal reflection based Axicons

Axicons are often fabricated using fused silica or various glass materials. For achieving retro-reflection of an optical beam, one can coat the reflective surfaces with different metallic or dielectric substrates or simply use them with well-polished but uncoated surfaces. In the later case the total internal reflection (TIR), characterized by critical incidence angle $\theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$, where $n_1 > n_2$, is used for the incidence beam retro-reflection. For high-power laser beam applications retro-reflectors with coated surfaces are not appropriate because of anticipated thermal degradation and damage of the coated surfaces. Hence, we used an uncoated AL with 90 degrees apex angle (fused silica, $n = 1.45$ at 1030 nm, $\theta_c = 43.6$ degrees) where reflection is based on the TIR phenomenon. Briefly, reflection of p- and s- polarized light at the interface between two homogeneous and isotropic media is governed by well-known Fresnel equations.¹¹⁾ When both media are transparent, the phase shifts that accompany partial *external* or *internal* reflections assume the values of π or 0. However, under TIR conditions at incidence angles θ above

the critical angle θ_c , the phase shifts are nontrivial.^{9,11)} When the light rays enter the AL perpendicularly to the anti-reflection coated base surface i.e. at 0 degree to the surface normal, the TIR angle θ for each 2 reflections in AL for axial rays is 45 degrees (Fig. 2). Furthermore, an AL made by fused silica at each reflection will produce phase shifts of $\delta_p = 49.8$ and $\delta_s = 24.9$ degrees for p- and s- polarized lights, respectively.

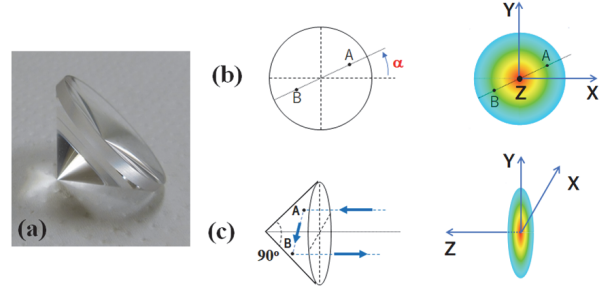


Fig. 2 (a) Photograph of the AL with 90 degrees apex angle (b) Cross-section of the AL retro-reflector in XY plane showing also the azimuth angle α ; and the incident Gaussian-beam cross-section perpendicular to the propagation direction Z with two reflection points A and B in the AL for a given ray; (c) Same as (b) in 3 dimensions.

It can be shown that in AL resonator a linearly polarized light ray after retro-reflection will be elliptically polarized and cannot keep its polarization invariant after a round trip. In other words, there will be always both p- and s- polarized beam components in the resonator and no polarization selection is possible. This conclusion is also valid for ALs with polarization maintaining ($\delta_s = 0$) metal coated reflection surfaces. Indeed, when $\delta_s = 0$, the linear polarization across the beam is not invariant and the beam tends to become a radial polarized one after many roundtrips.

On the other hand, in AL resonator a radial polarized beam after retro-reflection keeps its polarization invariant (phase difference between p- and s- components is zero) after a round trip. In other words, the eigenmode of the resonator with AL has radial polarized component. This conclusion is also valid for ALs with polarization maintaining ($\delta_s = 0$) metal coated

reflection surfaces, i. e., a radial polarized beam is invariant after retro-reflection from the polarization maintaining metal coated AL.

3. Experimental results and discussion

The experimental resonator setup used in this study is schematically illustrated in Fig. 3.

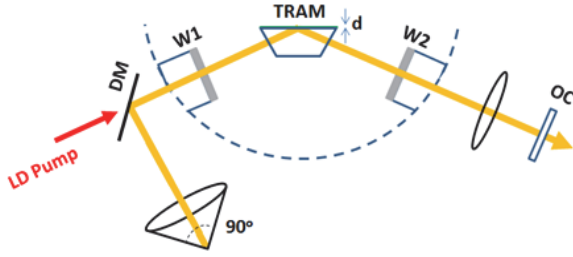


Fig. 3 Experimental setup diagram for comparative investigations of lasing characteristics for resonators with conventional high-reflecting mirror and an AL: DM - dichroic mirror, W1, W2 - cryostat windows, OC - output coupler, TRAM - total reflection active mirror, d - Yb doped layer thickness. The cryostat perimeter is marked with the dotted line.

Composite YAG total reflection active mirror (TRAM) with 9.8 at % Yb doped and $d = 0.2$ mm thickness was used as an active medium at cryogenic (LN_2) temperatures. The total length of the resonator was set to be 460 mm while the LD excitation ($P_{\text{max}} \sim 200$ W) spot was kept at ~ 1.8 mm in diameter. Conventional 100 % reflective mirror (Fabry-Perot resonator) and an AL were used as high reflective elements in the resonator, respectively. On the other hand, 9.8 at% doped Yb:YAG TRAM with $d = 0.6$ mm thickness was used as an active medium in lasing experiments at ambient temperature. The LD excitation ($P_{\text{max}} \sim 600$ W) spot was kept at ~ 5 mm in diameter.

In Fig. 4 (a) a snapshot of the experimental laser setup is presented. Fig. 4 (b) and (c) show the interchangeable high-reflective mirror and AL elements used in FP and AL resonators, respectively.

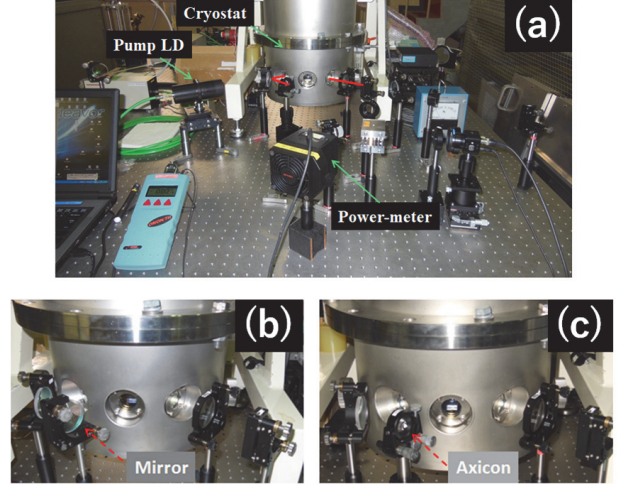


Fig. 4 (a) A snapshot of the cryogenic Yb:YAG laser system. The resonator is shown by a red solid line. (b) FP resonator with conventional 100 % reflective mirror. (c) AL resonator with 100 % reflective axicon lens.

In Fig. 5 the laser output power versus the absorbed pump power for both FP and AL resonators at cryogenic temperatures are presented. The result for CCR resonator is also included for reference purposes.

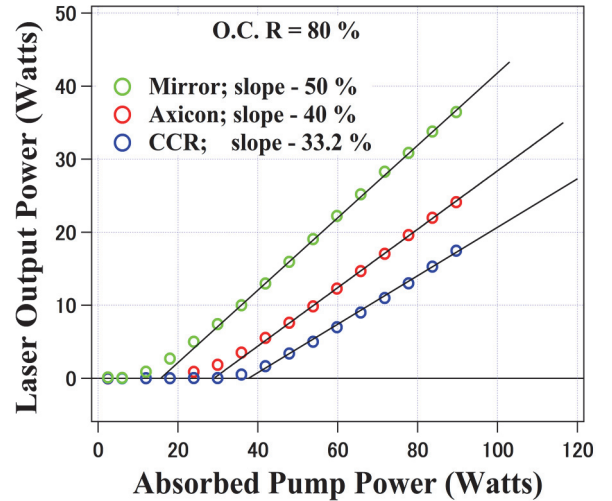


Fig. 5 Output- vs. absorbed pump power dependences for lasers with conventional- (mirror), AL and CCR high-reflective elements, respectively.

In these experiments the same 80 % reflective output coupler (OC) was used. The laser threshold and the slope efficiencies were measured to be about 0.7 kW/cm^2 and 0.5 for

the FP resonator, 1.15 kW/cm² and 0.4 for AL, and 1.5 kW/cm² and 0.33 for the CCR resonators, respectively. The obtained slope efficiency for FP resonator matches well with our previous result of 0.525 using 84.6 % reflective OC¹²⁾. An AL or CCR laser based on TRAM was constructed for the first time, so no effective comparisons can be made at this stage. Marked increase of the laser threshold and decrease of the slope efficiencies for AL and CCR resonators are explained by the small beam diameter on those elements, incurring fractionally large losses due to scattering on the tip of the AL and three corners of the CCR, respectively.

One of potential merits using AL or CCR instead of a mirror in the resonator was based on the earlier observations that at higher excitation powers the FP laser output undergoes a thermal roll-over, so application of AL or CCR could possibly improve that detrimental thermal effect. In Fig. 6, NF and FF output intensity distributions of AL and FP resonators for two absorbed pump power cases are shown. It is seen that thermal effects up to 90 W absorbed pump power hardly affect the main features of the beam profiles. This is probably due to the fact, that in the available TRAM sample ($d = 0.2$ mm) the

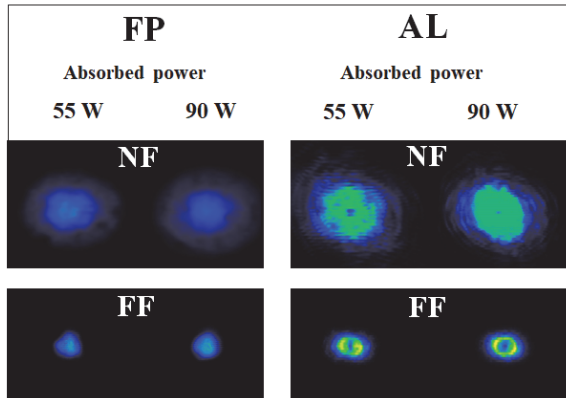


Fig. 6 NF (top) and FF (bottom) intensity distribution patterns of a FP (right) and AL (left) laser beams for 55 W and 90 W absorbed pump power cases, respectively.

pump power ($P_{\text{max}} \sim 200$ W) absorption ratio was only 0.45 and the thermal roll-over effect has not appeared at cryogenic temperatures. To explore potential benefits of the AL and

CCR resonators, we have performed also lasing experiments at ambient temperature. The resonator configuration was similar to the case when cryogenic cooling was applied (Fig. 2), however, in experiments at ambient temperatures the cryostat was removed, and the TRAM was installed on a water jet impingement cooling system. In Fig. 7 (a) and (b) snapshots of the experimental laser setups for FP resonator with conventional 100 % reflective mirror, and AL resonator with 100 % reflective axicon lens, respectively, are presented.

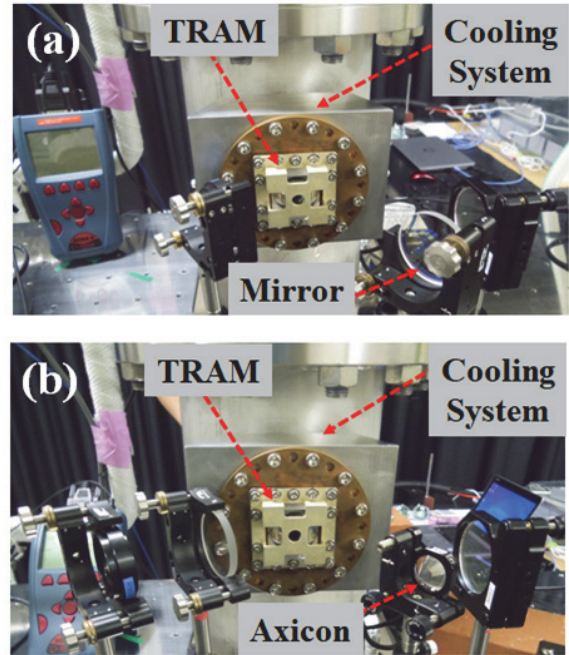


Fig. 7 A snapshot of the Yb:YAG TRAM laser system with water jet impingement cooling. (a) FP resonator with conventional 100 % reflective mirror, and (b) AL resonator with 100 % reflective axicon lens.

In Fig. 8 the laser output power versus the absorbed pump power for both FP and AL resonators at ambient temperatures are presented. We have done also lasing experiments using a CCR resonator, but no lasing was observed up to the maximum (~ 600 W) available pump power (~ 3 kW/cm²). In all experiments at ambient temperature the same 90 % reflective OC was used. As it can be seen from the Fig. 8, the laser threshold and the slope efficiency for the FP resonator, both can be only roughly estimated to be larger than 720 W/cm² and 0.3, respectively. This uncertainty is due to the

nonlinear dependence of the output- vs. absorbed pump powers caused by the reabsorption effect of Yb^{3+} ion at around 1030 nm lasing wavelength.¹³⁾

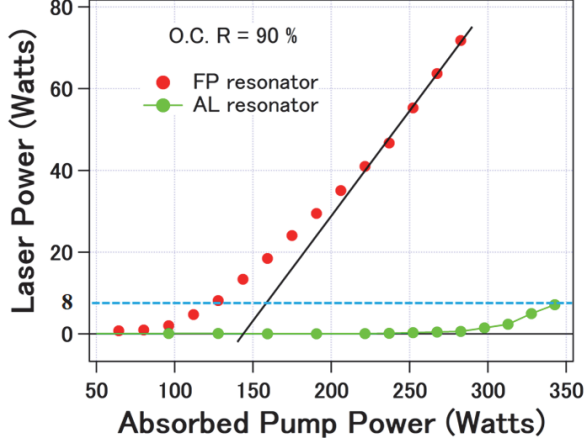


Fig. 8 Output- vs. absorbed pump power dependences for lasers with conventional mirror and AL high-reflective elements, respectively.

On the other hand, for the AL resonator, even rough estimation of the lasing slope and threshold could not be made due to the inefficient and weak laser output. The reason for marked increase of the laser threshold and anticipated decrease of the slope efficiency for AL vs. FP resonators at ambient temperatures can be only partly explained by the fractionally large losses due to scattering on the tip of the AL. Additional experiments are required for understanding the true nature of the lasing efficiency drop in AL resonator case. Lasing performance comparison between cryogenic (Fig. 5) and ambient temperature (Fig. 8) cases reveals that the lasing efficiency, as expected, is lower for the later case due to regressive material properties of Yb:YAG and reabsorption increase from low- to higher temperatures.¹⁴⁾

Concerning the beam quality, we have tried measuring the beam quality factor M^2 for FP and AL resonator outputs (4- σ ISO-standard method, measured by BC106N-VIS/M (Thorlabs) instrument). For FP resonator at ~ 8 W output, the M^2 factor for X- and Y- directions were 11.84 and 8.32 (M^2 mean ~ 9.92), respectively. As the laser pump/output power

increased, the multi-mode operation of the laser dominated and no reasonable measurements of M^2 factor could be performed. In case of the AL resonator, unfortunately, M^2 factor measurements were unsuccessful. This could be caused by the donut-like beam profile of the AL resonator output. To compare qualitatively the beam qualities of FP and AL resonator outputs, an indirect method was adopted. Namely, beam profile changes in near- and far-fields at increasing pump powers (increasing thermal load in TRAM active medium) were monitored and compared (Fig. 9).

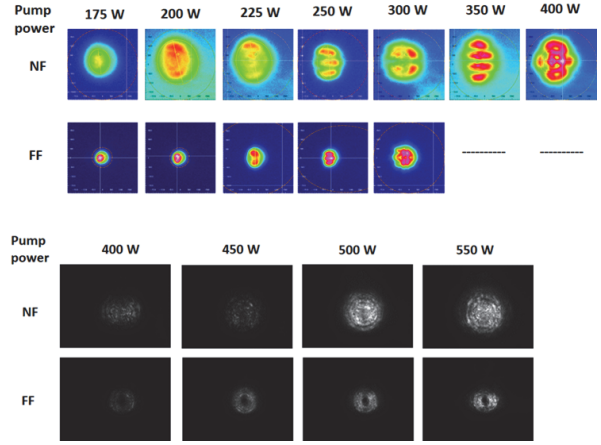


Fig. 9 **(top)** NF and FF profiles of laser beam from FP resonator at different pump powers; **(bottom)** NF and FF profiles of laser beam from AL resonator at different pump powers.

Based on resonator configuration (no mode selection elements involved) one can deduce that the FP resonator will operate at multi-mode regime as the pump power increases. Indeed, at increasing pump powers (Fig. 9, top row), the NF and FF profiles continuously change, indicating that the resonator enters a multi-mode regime (higher order resonator modes are not suppressed). On the other hand, for AL resonator even at higher pump powers the NF and FF profiles do not change, indicating that intra-resonator mode selection occurs, and high order resonator modes are suppressed (Fig. 9, bottom row).

Unfortunately, the coherence properties of the AL

resonator output cannot be studied for the particular case of TRAM active medium configuration. This is because the output beam polarization for TRAM configuration cannot be controlled due to the phase jumps caused by total internal reflection.

5. Summary and Conclusions

Lasing properties of axicon lens (AL, fused silica, $n = 1.45$ at 1030 nm) retro-reflector based resonator in comparison with conventional Fabry-Perot resonator have been studied for the aim to characterize intra-resonator passive coherent beam combining (CBC) phenomenon. At cryogenic temperatures, The laser threshold and the slope efficiencies were measured to be about 0.7 kW/cm² and 0.5 for the FP resonator, 1.15 kW/cm² and 0.4 for AL, and 1.5 kW/cm² and 0.33 for the CCR resonators, respectively. The maximum output power achieved from the AL resonator was ~ 24 W. At ambient temperatures, although lasing for FP and AL resonators were observed, the laser threshold and slope efficiencies could not be accurately estimated due to the insufficient pump power. No lasing could be observed for the CCR resonator.

Near-field and far-field intensity distribution profiles for FP and AL resonator outputs have been monitored and compared. At cryogenic temperatures, thermal effects for applied pump powers hardly affected the main features of the beam intensity profiles. On the other hand, at ambient temperatures the NF and FF profiles of FP resonator changed at increasing pump powers indicating that the resonator enters a multi-mode regime. On the other hand, for AL resonator even at higher pump powers the NF and FF profiles did not change, indicating that intra-resonator mode selection occurs, and high order resonator modes are suppressed.

Although several characteristics of resonators with retro-reflective elements have been already recognized, more detailed investigations using CW systems are hindered by insufficient pump power densities. Potential benefits of AL and CCR resonators could be further investigated in laser

systems with pulsed regime operation.

Acknowledgment

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

References

- 1) H. Kogelnik, and T. Li: Proceedings of the IEEE, **54** (10), 1312 – 1329, 1966.
- 2) A. G. Fox, and T. Li: Bell. Syst. Tech. J., **40**, 453 – 488, 1961.
- 3) R. Weber, A. Michalowski, M. Ahmed, V. Onuseit, V. Rominger, M. Kraus, and T. Graf: Phys. Procedia **12**, 21 – 30, 2011.
- 4) J. Wu, Y.-L. Ju, T.-Yu. Dai, W. Liu, B.-Q. Yao, and Y.-Z. Wang: Chin. Phys. Lett., **32** (7), 074207: 1 – 3, 2015.
- 5) B. Singh, V. V. Subramanyam, S. L. Daultabad, and A. Chakraborty: Rev. of Sci. Instr., **81**, 073110; 1 – 4, 2010.
- 6) W. He, Y. Fu, Y. Zheng, L. Zhang, J. Wang, Z. Liu, and J. Zheng: Applied Optics, **52** (19), 4527 – 4535, 2013.
- 7) V. K. Orlov, Ya. Z. Virnik, S. P. Vorotilin, V. B. Gerasimov, Yu. A. Kalinin, and A. Ya. Sagalovich: Sov. J. Quantum Electron., **8**, 799 – 800, 1978.
- 8) Y. Cheng, X. Liu, C. Tan, X. Chen, M. Zhu, C. Mi, and B. Sun: Applied Optics, **53** (15), 3267 – 3272 (2014).
- 9) H. Chosrowjan and S. Taniguchi: ILT2017 Annual Progress Report, 14 – 19, 2017.
- 10) H. Chosrowjan and S. Taniguchi: ILT2018 Annual Progress Report, 17 – 20, 2018.
- 11) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 7th Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 952, 1999.
- 12) H. Furuse, J. Kawanaka, K. Takeshita, N. Miyanaga, T. Saiki, K. Imasaki, M. Fujita, and S. Ishii: Opt. Lett. **34** (21), 3439 – 3441, 2009.
- 13) T. Y. Fan, and R. L. Byer: IEEE J. of Quantum Electron. **QE-23** (5), 605 – 612, 1987.
- 14) T. Y. Fan, D. J. Ripin, R. L. Aggarwal, J. R. Ochoa, B. Chann, M. Tilleman, and J. Spitzberg: IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **13** (3), 448 – 459, 2007.

海上ラマンライダーによる海底面の測距の可能性

レーザープロセス研究チーム

染川智弘

1. はじめに

日本の領海・排他的経済水域は国土の面積の 12 倍程度も大きく、レアアースに代表される海底鉱物資源やメタンハイドレート の採掘、CO₂ を海底地層に圧入して大規模削減を目指す CCS(Carbon dioxide Capture and Storage)等の有効な海底利用が期待されている。海底開発では資源探査手法の開発だけでなく、海底開発に伴う海洋生態系・環境への影響評価が重要とされている。単純な採水測定法では評価の頻度や評価可能なエリアに限度があり、広範囲にわたる領域を短時間でモニタリングできる手法の開発が望まれる。筆者らのグループでは、広範囲の海水領域を効率よくモニタリングすることを目指して、海水中に含まれる CO₂ ガスの濃度などを、遠隔から、ラマン散乱で測定するラマンライダー技術を開発中である。ライダーシステムを船舶に搭載し、レーザー光を船上から海へ照射可能な海上ラマンライダーシステムを開発し、沼津や竹富島近海での海上観測を実施してきた¹⁻⁷⁾。

本報告では竹富島近海での海上観測結果で得られた水のラマンライダー信号による水中測距の可能性について紹介する。海上ラマンライダーシステムでは、レーザーパルス毎のレーザー強度のふらつきなどによる誤差を軽減させるために、水のラマン信号を校正信号として取得している。海の中では、海水は均一に分布しているために、水のラマンライダー信号はレーザーの強度減衰などに依存する信号が得られるはずであるが、海底面にもピークが見られることがわかった。この海底面のピークは、それぞれの水深で生じた前方散乱が水中を伝搬し、海底面で反射した信号であると説明できる。波長 355 nm のレーザーで生じるラマン散乱波長が水の透過率が高い領域であることによる特有の現象ではないかと考えられる。

2. 海上ラマンライダーシステム

図 1 に海上ラマンライダーの構成図と写真を示す。波長 355 nm、出力 120 mJ、繰り返し 20 Hz のレーザーパルスを鉛直下向きに海中に照射し、海中からの散乱光を直径 20 cm の望遠鏡で集める。観測した散乱光はレンズでコリメートした後、波長 355 nm のエッジフィルターとノッチフィルターでレイリー光を除去し、光ファイバーで光路 30 cm の分光器に導いた。分光器の測定ポートにはラマンスペクトル計測用の電子冷却 CCD カメラと、ライダー信号を計測する光電子増倍管 (PMT) を搭載している。分光器の光路上に設置したミラーの出し入れによって CCD と PMT の検出機器を切り替えることが可能である。

海上でのライダーシステムの塩害防止のため、望遠鏡、打ち下ろしミラー以外のレーザー本体・電源、分光システム、オシロスコープなどは密閉型の容器内に設置し、除塩フィルター付きのファンで容器内の大気を強制循環して排熱できるようにしている。本ライダーシステムは 2.8 kVA の小型の可搬型インバータ発電機 1 台で全システムの電力が賄え、6 時間程度連続して船上での観測が可能である。

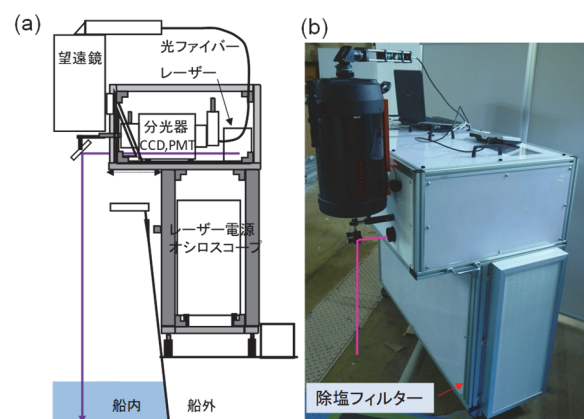


図 1 (a)海上ラマンライダーの(a)構成図と(b)写真

3. 竹富島近海での海上観測

3.1 ラマンスペクトルの測定

石垣島を中心とした八重山諸島にある竹富島の近海には、水深が20 mと比較的浅い海底からメタンガスを70%程度含む火山性ガスの湧出があり、竹富島海底温泉と呼ばれている。平成30年の2月19日～23日の5日間にわたって、竹富島海底温泉での海上観測実験を実施した。海上ラマンライダーシステムは大阪から石垣島までコンテナ輸送したが、トラックや船での輸送による光軸ずれなどの影響はほとんど見られず、本ライダーシステムは特別な調整の必要なく、動作が可能であった。

図2に竹富島海底温泉の真上にて実施したラマンスペクトルの測定結果を示す。ラマンスペクトルは1000回積算で取得した。～3400 cm⁻¹に見られる大きな信号が水の対称伸縮振動によるラマン信号であるが、このラマン信号よりも比較的小さい～1600 cm⁻¹の水の変角振動のラマン信号は識別が困難であった。また、メタンの2897 cm⁻¹でのラマン信号は検出できていない。

本スペクトル計測システムでは、信号の時間分解計測を行っていないために、海面からの反射成分も信号として取り込んでいる。実験中は波による太陽光の反射、散乱が時々刻々大きく変化するため、背景光雑音成分のゆらぎが大きく、測定の積算時間を長くとってもSN比の改善は困難であった。

今後は時間分解機能付きのICCDカメラを検出器に用いて、海中からのラマン散乱成分のみを測定する方式などの改善策を検討する予定である。

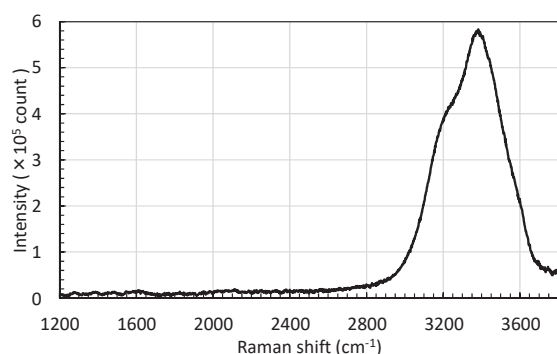


図2 竹富島海底温泉での海上ラマンライダーシステムによるラマンスペクトル

3.2 水のラマンライダー測定結果

図3(a)に3405 cm⁻¹の水のラマン散乱波長で測定した光強度の時間変化、すなわちライダー信号を示す。ライダー信号は1000回積算で取得した。「Deep」は水深が約20 mの竹富島海底温泉の測定結果であり、「Shallow」は水深が約4 mの石垣港での測定結果である。レーザーが海面に到達した時間を原点とし、その信号からの時間遅れを水深に換算している。水深の計算には海水の屈折率1.343を利用した。

水のラマンライダー信号は、海面に到達したのち、レーザーの水中伝搬による強度減衰と、ラマン散乱光を望遠鏡で観測する際の距離の2乗で減衰する信号を示す。海面付近では望遠鏡の視野とレーザーが重なっていないために、信号が得られていない。海水は均一であるために強度減衰のみを反映した波形を示すことが予想されたが、図3(a)の「Deep」での挿入図のピークや、「Shallow」の減衰波形に生じているピークのように、海底面に相当する水深にピークが見られることがわかる。水のラマンライダー信号は対象ガスの濃度を評価する際の校正信号として利用する予定であったが、校正信号としてだけでなく海底面などの測距にも利用できる可能性があることがわかった。

この水のラマンライダー信号の海底面に相当するピークは、レーザー強度が大きい海面付近などで生じた水のラマン散乱の前方散乱が海底面まで到達し、その前方散乱の合計が海底面で反射することによって生じるのではないかと考え、以下の簡単なモデルで検証した。

ラマン信号強度は、レーザーの出力のみに依存し、前方と後方散乱の強度は同じであるとする。水の減衰係数(m⁻¹)はSmith and Baker, 1981⁸⁾のデータを内挿して、波長355 nmでは0.048975、水のラマン散乱波長である403.8 nm(3405 cm⁻¹)では0.020371と求められる。海面での強度を1として、水深Lでの強度は

$$I(L) = \exp(-\sigma_{355}L)$$

となり、前方と後方にそれぞれI(L)の強度のラマン散乱

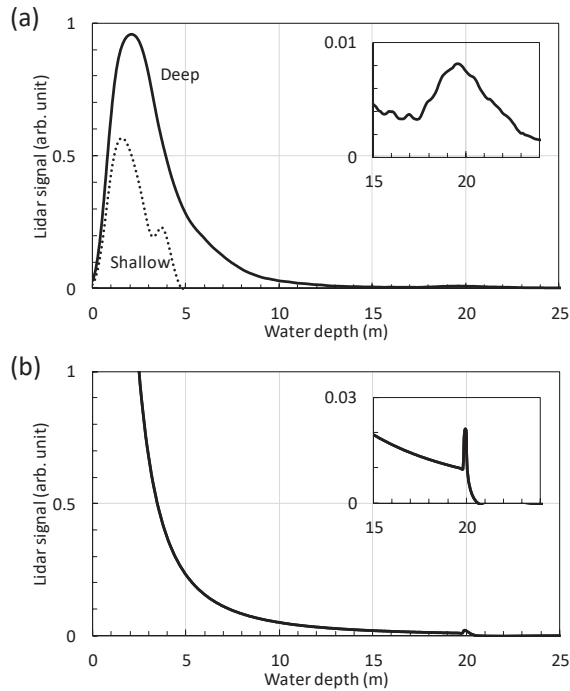


図 3 (a)竹富島海底温泉と石垣港での海上ラマンライダーシステムによる水のラマンライダー信号、
(b)簡単なモデルでの水のラマンライダー計算結果

を生じるとする。後方散乱はそれぞれの水深 L での強度減衰 ($\exp(-\sigma_{403}L)$) を受け、海表面まで戻る。それぞれの水深での前方散乱 $I(L)$ は、海底 20 m までの水の減衰 ($\exp(-\sigma_{403}(20-L))$) を受けながら海底面で反射され、海表面に戻るまでの水による減衰 ($\exp(-\sigma_{403}(20))$) を受けて望遠鏡で観測されるとし、海表面まで戻ってくる光は距離の 2 乗で減衰するとした。計算は観測と同じ 0.15 m 間隔での水深で生じた前方散乱強度の合計が海底面で反射する。海底面での反射率は文献値を外挿し、1%とした⁹⁾。

図 3(b)にこの簡単なモデルでの水のラマンライダーの計算結果を示す。20 m 以降は信号強度を 0 とし、見やすいように線を滑らかにつないだ。観測視野の重なり関数を考慮していないので、近距離の形状が異なるが海底面にピークが現れることがわかる。ここで、仮に波長 532 nm のレーザーを用いたとすると、水の減衰係数は波長 532 nm で 0.053592、水のラマン散乱波長である 649.7 nm (3405 cm^{-1}) では 0.355101 となる。同様の計算を

しても、生じた水ラマン散乱光の水による減衰が大きく、海底面にはピークが立たない。したがって、この水のラマンライダーによる海底面の測距は、水の透過率が比較的高い領域でラマン散乱波長が存在する波長 355 nm のレーザーを利用した場合の特有な現象ではないかと考えられる。

現在の海上ラマンライダーシステムでは、対象ガスである CH_4 と濃度校正用の水のラマンライダー信号の計測時に、分光器の回折格子を回転させて観測波長を選択する必要があるため、同時刻の観測が実施できないという欠点がある。1000 回のレーザー照射を積算することで、レーザーパルス毎のレーザー強度の変動や海面からの反射光強度の変動などの影響を排除できないかと考えたが、3.1 で述べたように波による背景光の変化などが大きく、 CH_4 ガスによる信号かどうかを判断するのが困難であった。今後は、対象ガスと校正用の水の信号を同時に取得可能とするような光学フィルターで波長を分離するライダー信号受信系の開発を進め、室内実験で性能を評価した後、海上観測を実施する予定である。

4. まとめ

海底開発が海中の環境に及ぼす影響を効率よく評価することを目的として、海水中に含まれるガスの種類や濃度をラマン散乱で測定するラマンライダー海中モニタリング手法の開発を行っている。対象ガスの濃度校正用に水のラマンライダー信号の取得を計画していたが、波長 355 nm の水のラマンライダーでは海底面に相当する位置にピークが見られ、測距にも利用できる可能性がわかった。

今後はこの海上観測で得られたラマンスペクトル、ラマンライダー測定それぞれの問題点を改善するとともに、海上観測が容易になるように装置の小型化・省電力化に取り組む予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP25871083, JP15H05336, JP18H01929 の助成を受けて実施した。

参考文献

- 1) T. Somekawa, A. Tani, and M. Fujita: Appl. Phys. Express, **4**, 112401, 2011.
- 2) T. Somekawa, and M. Fujita: Proc. of ILRC26, S10-06, 2012
- 3) T. Somekawa, T. Takeuchi, C. Yamanaka, and M. Fujita: Proc. of SPIE, **9240**, 92400J, 2014.
- 4) T. Somekawa and M. Fujita: EPJ Web of Conference, **119**, 25017, 2016
- 5) T. Somekawa, T. Kitamura, and M. Fujita: Extended Abstracts of the 24th Congress of International Commission for Optics, P3-08, 2017..
- 6) T. Somekawa and M. Fujita, EPJ Web of Conferences, **176**, 01021, 2017.
- 7) T. Somekawa, S. Kurahashi, J. Kawanaka, and M. Fujita, Proc. SPIE, **10791**, 1079104, 2018.
- 8) R. C. Smith and K. S. Baker, Appl. Opt., **20**, 177, 1981.
- 9) 瀬岡和夫, 二瓶康雄, 横山智子, 大見謝辰男, 下地和幸, 海岸工学論文集, **44**, 1291, 1997.

レーザーを用いたコンクリート欠陥検査：実用化を目指して

レーザー計測研究チーム

島田義則、オレグ コチャエフ、倉橋慎理、保田尚俊¹、御崎哲一²

¹ 京都大学

² 西日本旅客鉄道（株）

1. はじめに

高度成長期に建設されたトンネルや橋梁などの構造物が高経年化し、検査維持管理技術の確立が、近年、大きな社会的問題となっている。老朽化による事故を未然に防ぐためには、構造物の健全性を精度よく検査できる技術の開発が望まれている。

トンネルなどの検査には、現在、打音検査法¹⁾が主に用いられている。この手法は、重労働で高所作業の危険を伴うことや、データの定量性が乏しいため、劣化の進行状況を判断しにくいことなどの問題がある。これらを解決するため、高速で客観的なデータを取得できる新しい検査方法の開発が求められている。

打音検査法に代わる検査方法として(1)接触式超音波探傷法²⁾や(2)電磁波検出法³⁾、(3)赤外線検出法⁴⁾および本稿で述べる(4)レーザーを用いた検査方法^{5),6)}(以降、レーザー打音法)等が研究開発されている。(1)と(2)はコンクリート表面への近接が必要であるが、深部の欠陥検査に適している。一方、(3)および(4)はコンクリート表面剥離などの欠陥を遠隔から検査できるという特長がある。最近では、ピストン型ハンマーと收音機をドローンに搭載して打音検査を行うドローン打音法⁷⁾も提案されている。

図1にレーザー打音法の概念を示す。衝撃波励起用のパルスレーザーをコンクリート表面に照射してコンクリート表面を振動させる。振動スペクトルは欠陥の有無により変化するため、その振動を検出用レーザーにより計測し、検査を行う。コンクリートへの照射位置はミラーを回転させることで、また、装置を車両に積載して自走させることにより、覆工コンクリート表面全体を検査することができる。この手法はコンクリートに振動

を与え、その応答を捉えて欠陥診断を行う点では、原理的に打音検査法と同じ検査手法であり、トンネル点検において、今まで蓄積された打音検査データをそのまま継承できる上に、遠隔からの計測が可能であること、コンクリート曲面の計測が容易に行えること、さらに、短時間で検査可能である等の利点がある。

2. レーザー打音法開発の経緯と実用化の課題

図2にレーザー打音法の振動計測方法を示す。コンクリートに衝撃を与える衝撃波励起用レーザーにはQスイッチNd:YAGレーザー、コンクリートの表面振動検出用レーザーにはNd:YVO₄レーザーの2倍高調波（緑色光）を用い、ヘテロダイン検波方式のレーザー干渉計を構成した。

検出可能なひび割れ深さや内部空洞のかぶり厚は衝撃波励起用レーザーのエネルギーで決定され、数ジュール程度なら3～10センチメートル程度である。打音検査法でも検出できる深さは10センチメートル程度であるので、これと同程度が検出できれば

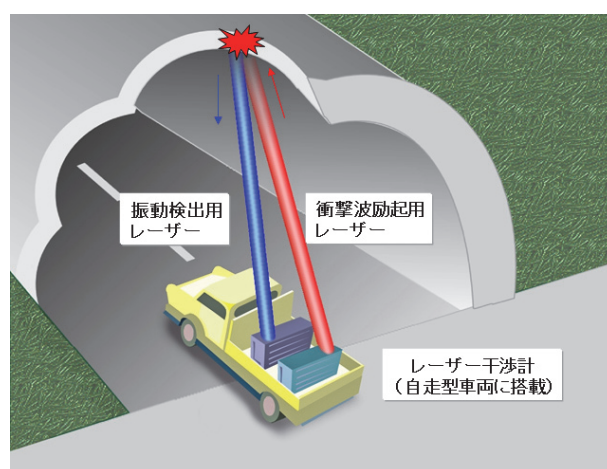


図1 レーザーを用いたトンネル覆工コンクリート検査技術(レーザー打音法)の概念

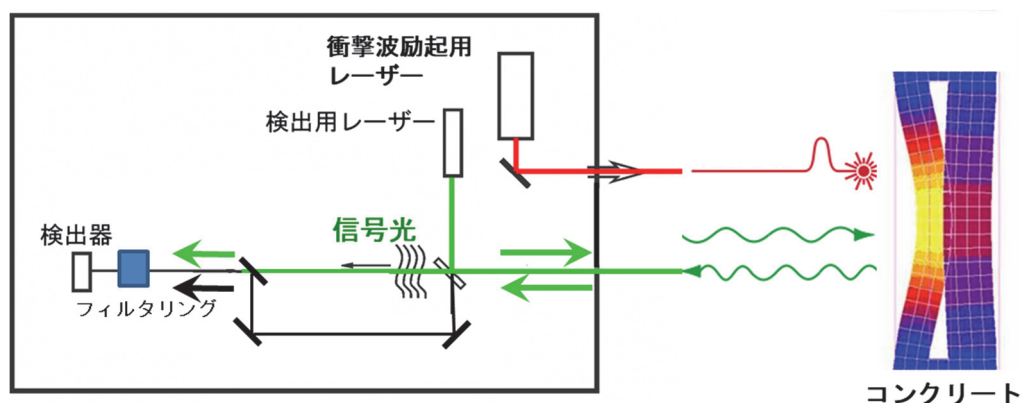


図2 振動検出原理

十分である。

当研究所では、長年にわたり JR 西日本などと協力してレーザー打音技術の開発を行ってきた。まず、開発したレーザー打音装置を軽自動車に搭載し、山陽新幹線橋梁床版部の欠陥検出実験を実施⁵⁾した。ついでディーゼル機関車が牽引する車両に搭載可能なレーザー打音装置を開発し、山陽新幹線トンネルの欠陥検査実験を実施した⁸⁾。両実験を通してレーザー打音法がトンネルコンクリート欠陥検出に適用可能であるという原理実証に成功し、その後実用化を目指した研究開発を実施した。

レーザー打音法を実用化するためには、ハードおよびソフト面で多くの課題がある。ハード面では

- 1) 装置の小型化
- 2) 装置を検査現場まで長距離運搬する際の振動や温湿度などの環境変動によっても光軸の狂いが生じない堅牢な光学系の構築
- 3) 検査現場での振動や騒音に耐える防振、防音機構の付加
- 4) 架線やトンネル付帯物がレーザー照射を受けないようにする安全対策
- 5) あらかじめ設定した検査領域をレーザーで走査して検査できる自動検査機構

などが必要であり、ソフト面では

- 6) 受信した干渉信号波形からコンクリートの劣化の度合いを迅速に判定できる欠陥判定アルゴリズムの開発
- 7) 作業員による打音検査との整合性の実証

8) コスト、経済面での合理性の確立等が挙げられる。

欠陥判定アルゴリズムの良否はレーザー打音法の信頼性を評価する上で極めて重要なファクターであり、これまで熟練の作業員が打音法で判定してきた判定基準による評価結果と一致する評価結果が得られるアルゴリズムが望まれる。

2.1 レーザー打音装置の小型化

装置の小型化を例にとり、ハード面から、実用化へ向けての努力の流れを見てみよう。

先に紹介した原理実証実験では、新幹線トンネルの線路上を走行する車両搭載型のレーザー打音装置を用いたが、装置の小型化を目指して、上下線路の中央に設けられている幅 1 m の点検用中央通路を走行できる車両に搭載可能な装置を開発した。

トンネルの中央通路を走行して検査を行う装置の外観を図 3 に示す⁹⁾。検査システムは 4 両編成で、1 両目と 4 両目が前後に移動するための牽引車、中央の 2 両目がレーザー打音装置を搭載した車両である。装置には振動、騒音、雨、および湿度等への対策を施した。車両上部に設けたレーザー照射窓を開き、そこからコンクリート面に向けてレーザーを照射する。コンクリート表面までの距離をレーザー測距計で測定し、レーザーの焦点位置が常にコンクリート表面になるように制御した。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ーが照射される誤照射を防ぐ役目も果たす。装置の電源に



図3 トンネル内での実験状況

はバッテリーを用いた。バッテリーは各車両に設置されており、トンネル内の中央通路を走行して現地まで移動し、さらに数時間の検査が可能となるような容量がある。レーザーの照射や計測などのシステム制御は牽引車から行うようになっている。

2.2 欠陥判定アルゴリズムの開発

欠陥の判定には、干渉信号の時系列波形とそれをフーリエ変換して得られる周波数スペクトル波形を併用するのが一般的である。欠陥部の振動周波数は健全部に比べて低周波で、振動の持続時間も一般的に長くなる。開発の初期には、スペクトル強度が最大となる振動周波数から良否を判定するスペクトルピーク法や、スペクトル強度が最大となる振動周波数付近の面積割合を用いる方法、およびスペクトル強度と減衰時間を考慮に入れたウェーブレット法¹⁰⁾などを検討してきた。その後は2 kHzを境として低周波側と高周波側のスペクトル面積を求めその比を判定に用いる方法¹¹⁾など様々な方法を検討した。最近では、ノイズに強い欠陥判定法の一つとして、

LSCF 法(Least Square Complex Frequency Domain)が提案されており、現在は LSCF 法を欠陥判定アルゴリズムとして使用している。

LSCF 法では、欠陥による振動減衰波形を、特定の固有振動数と特定の減衰率を有する複数の振動減衰波形の和で近似的に表現する。そして時系列波形をフーリエ変換して得られる周波数スペクトルに現れる固有振動数毎に減衰振動の確実性を推定して欠陥を判定する方式である。詳細については文献 12)-15)に譲るが、この方法は計測データの減衰振動波形の有無を判定に利用しているため、ノイズに強く、また、計算速度が速いなどの特徴がある。

3. トンネル覆工コンクリート検査の現状

中央通路走行型レーザー打音装置と LSCF 法による欠陥判定アルゴリズムを用い、トンネル覆工コンクリート表面を複数点照射してコンクリート異音部を検査する実験を行った。図 4 a)は検査を実施したひび割れ箇所の写真である。写真中央部の四角形にチョーキングした部分は、点検員が事前にハンマーで打音検査し、異音が有ると判断した箇所である。ただし、浮き（異音部）の大きさを正確に表しているものではない。写真中央部の少し下側に○印と□印がある。○印はこれから照射する衝撃波励起用レーザーの照射点、□印はこれから照射する検出用レーザー照射点である。

衝撃波印加点と計測点の位置関係は非常に重要で、計測したい位置に対して、最も振動を生じさせる箇所に衝撃波励起用レーザー照射する必要が有る。このため、この装置では、コンピューター画面上の画像を用い、最も振動を生じさせやすいと考えられる衝撃波励起用レーザー照射位置と、振動を最も検出しやすいと考えられる検出用レーザーの照射位置を複数点選択し、オペレーターが事前にその位置を画面上で登録する。測定を開始すると、装置は最初の照射位置にレーザーが照射されるよう光軸を自動調整してその箇所をレーザー照射し、次々と照射位置を変えて照射を続け、選択された照射位置全

てへの照射が終了すると自動的に装置の運転を停止することができる仕組みになっている。○印と□印の相対距離は検出用レーザーが計測できる信号の大きさに依存しており、コンクリート表面上で 30～70 mm に設定した。

図 4 b)は登録した○印、および□印の照射点に両レーザーを照射し、測定結果から欠陥判定アルゴリズムを用いて健全性の度合いを評価し、度合いに応じて異なる色で表示した写真である。□印の各照射箇所において、振動モードの周波数が 500 Hz 以下の低周波数なら赤色、500 Hz から 2500 Hz の中間周波数なら黄色、2500 Hz を越える高い周波数なら緑色とした。ただし、ここに示した基準周波数は現在の検討で利用している数値であり、今後の研究の進展によってはさらなる最適化が図られる可能性がある。

図 4 b)内の“ポイント 1”におけるスペクトル(赤実線)と LSCF 法を用いた場合の減衰振動の確実性を図 5 a)に示す。横軸は周波数、縦軸は LSCF 法を用いて判定した減衰振動の確実性を示すパラメータである。図中で△印や○印が同一周波数(縦方向)に多くプロットされている場合には、固有の減衰振動の存在が確実で、欠陥と判定される。

図 5 a)では 200, 500, 900, および 1600 Hz 付近減衰振動があると判定された。そして、最低周波数が 200 Hz と低いため、図 4 b)の“ポイント 1”は赤色の判定となった。

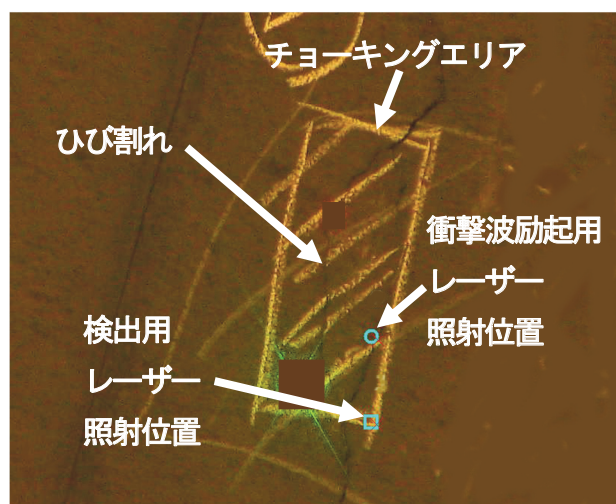
図 5 b)に示す“ポイント 2”におけるスペクトルでも、図 5 a)と同様のスペクトル波形と判定結果が得られ、赤色と判定された。

“ポイント 3”のスペクトルを図 5 c)に示す。“ポイント 3”のスペクトルでは卓越した周波数は無く、△印、○印も無いので、この箇所は緑色と判定された。

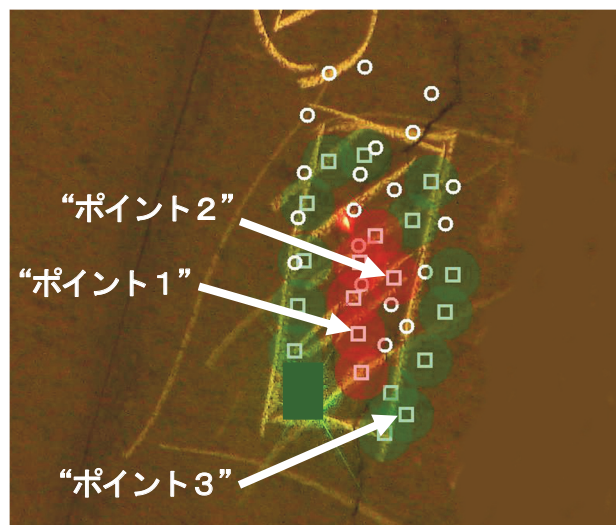
図 4 b)に戻って、図中に示した赤色及び緑色の照射箇所数は 20 程度である。この写真より、覆工コンクリートのどこの部分が浮いているかが判断できる。また、周波数の違いによりどの箇所が剥落しや

すい箇所であるかも分かる。

この実験では検査システム全体の動作試験や LSCF 法による欠陥判定アルゴリズムの試験も兼ねて、打音検査で異常部と判定された箇所を詳細に調べたが、欠陥判定を行うだけならば 20 箇所もの照射は必要なく、数ショットで十分であるため、必要な検査時間は数秒である。現状の打音検査で点検員がバケットを動かして、検査場所にたどり着き、ハンマーで打音して計測する時間に比べると、レーザー打音検査で必要な検査時間は十分短く、高速での検査が可能であると思われる。

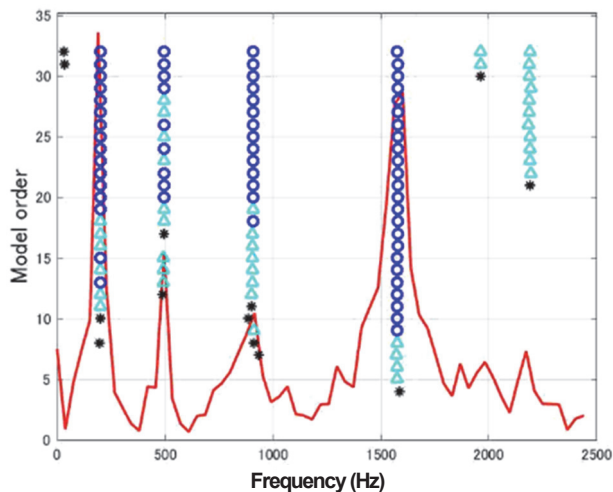


a) 異音箇所の写真

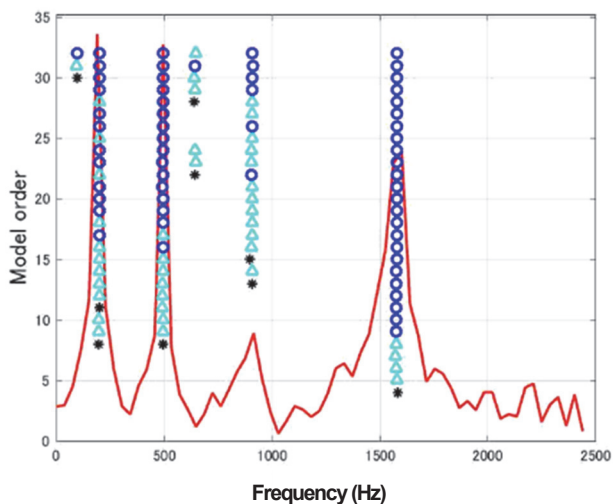


b) レーザー打音検査の結果

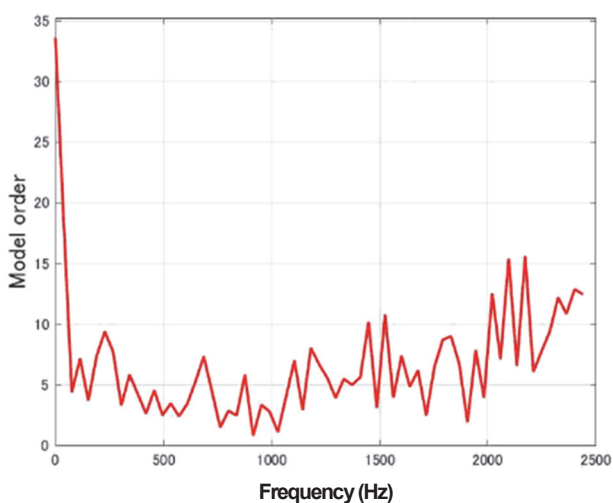
図 4 異音箇所をレーザー打音検査した結果



a) “ポイント 1”



b) “ポイント 2”



c) “ポイント 3”

図 5 異音、健全箇所でのスペクトルと LSCF 法を用いた卓越周波数、減衰率の確実性

4. まとめ

本稿では、レーザー打音法を用いてトンネル覆工コンクリート異音部を高速で検査する装置の開発の現状について述べた。事前に設定した検査箇所リストに従い、レーザー照射位置を自動的に走査できるシステムとすることで、検査時間を大幅に短縮することができた。また、異音部判定に LSCF 法を用いることで減衰振動波形の確実性を評価することができ、ノイズに対して強く、かつ、高速での判定処理が可能となった。

本装置を用いることにより、トンネル覆工展開図や写真から危険そうな箇所を事前に割り出し、そこを遠隔、高速で検査することができる。現在はその実現のために多くの現場試験を行い、装置性能や耐久性を評価中であり、近い将来の実用化を目指している。

参考文献

- 1) 鎌田敏郎、浅野雅則、国枝稔、六郷恵哲：土木学会論文誌 V、**704**, pp.65-79, 2002.
- 2) 村瀬豊、魚本健人：生産研究, 56(2), pp.172-175, 2004.
- 3) 田中正吾、門脇正法：電気学会論文誌 C, **125(1)**, pp.50-56, 2005.
- 4) 柳内睦人、魚本健人：土木学会論文誌, **442**, pp.91-100, 1992.
- 5) 島田義則、オレグコチャエフ：電気学会論文誌 C, **129**, pp.1192-1197, 2009.
- 6) 島田義則、オレグコチャエフ、内田成明、篠田昌弘、大村寛和、御崎哲一、近藤健一、坂本保彦：レーザー研究, **38(10)**, pp.749-753, 2010.
- 7) 古賀文隆、山田圭一、田中雅敏、和田秀樹：日本機械学会 九州支部 第 70 期総会・講演会論文集, **1017**, p.327, 2017.
- 8) 島田 義則、オレグコチャエフ、篠田 昌弘、坂本 保彦、御崎 哲一、高橋 康将、江本 茂夫：土木学第 67 回年次学術講演会予稿集, **VI-267**, pp.533-534, 2012.
- 9) 島田義則：電気学会誌, **135(12)**, pp.834-837, 2015.

- 10) 羽矢洋、羅休、魚本健人：土木構造物の非破壊検査
法国際会議（NDT-CE2：ベルリン）, 2003.
- 11) 御崎哲一、島田義則、篠田昌弘：サイバネティクス,
15(4), pp.26-31, 2010.
- 12) Spitznogle, F. R., and Quazi, A. H.: The Journal of the
Acoustical Society of America, **47(5A)**, pp.1150-1155,
1970.
- 13) Van der auweraer, H., Guillaume, P., Verboven, P. and
Vanlanduit, S.: ASME Journal of Dynamic Systems,
Measurement, and control, **123(4)**, pp.651-658, 2001.
- 14) Verboven, P., Cauberghe, B., Parloo, S., Vanlanduit, S.
and Guillaume, P.: Mechanical Systems and Signal
Processing, **18(4)**, p.759-780, 2004.
- 15) 保田 尚俊、御崎 哲一、島田 義則、江本 茂夫、
金田 道寛、武岡 学、田中 幸司、石田 信孝、
高山 宜久、曾我 寿孝：土木学会論文集 F1（ト
ンネル工学）、**74(1)**, pp. 58-69, 2018.
- 16) 島田義則、オレグコチャエフ、倉橋慎理、保田尚俊、
御崎哲一、高山宜久、曾我寿孝：電気学会 論文誌
C、**139(2)**, pp.131-136, 2018.

レーザー打音法による コンクリート構造物内部欠陥高速検査技術の開発

レーザー計測研究チーム

倉橋慎理、島田義則

1. はじめに

道路橋やトンネル、河川管理施設などの社会インフラと呼ばれるコンクリート構造物の多くは 1950~1960 年代の高度経済成長期から 2000 年代前半までにわたって集中的に整備されており、高経年による老朽化が懸念されている。施設の耐用年数は一般的に 50 年程度とされているが、建設から 50 年以上が経過するインフラは今後加速度的に増えていくと見込まれており、現状では道路橋の約 4 本に 1 本、トンネルの約 5 本に 1 本がそれに相当しているとの報告がある¹⁾。耐用年数を超過した社会インフラは本来ならば全面的な建替えや改修などにより計画的に更新されることが望ましいとされるが、現状ではコスト面などの問題から点検や補修など適切な維持管理を施すことでインフラの延命化を図るものが多い。インフラによって人々にもたらされる恩恵を次世代へ継承していくためにも、社会全体として老朽化問題に取り組んでいくことが求められている。

このような現状を受け、当研究所では鉄道トンネルや高架橋などコンクリート構造物の欠陥をレーザーで遠隔探傷する技術の開発を進めてきた^{2,3)}。パルスレーザー照射によりコンクリートに振動を励起し、その表面振動をレーザー干渉計で検出し、振動の周波数分析などを通して欠陥の有無を評価するものである。室内実験の成果を基にして野外実験が可能な装置の開発を行い、山陽新幹線トンネルや高速道路における試験を実施し、その有効性を確認した^{4,5)}。現在実用化に向けて、欠陥探傷装置の小型化と信頼性向上、検査の高速化など、研究開発を加速している。

当研究所は、平成 26 年度より、内閣府主導の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) のインフラ維持管理・更新・マネジメント技術において、「レーザーを

活用した高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の研究開発」と題する研究を理化学研究所 (理研)、量子科学技術研究開発機構 (量研)、日本原子力研究開発機構 (原研) と共同で実施してきた。平成 27 年度には量研の開発した高出力高繰り返しレーザーと当研究所が開発した遠隔探傷技術を組み合わせて、従来の計測速度の約 50 倍に相当する秒間 25 点の速さでレーザーを走査させながら欠陥を計測することに成功した⁶⁾。平成 28 年度には速度をさらに倍の秒間 50 点に向上させ、加えて検査装置を実験室外に持ち出し、屋外試験を実施した⁷⁾。平成 29 年度は検査装置の車載化を行い、静岡県富士市にある施工技術総合研究所 (施工総研) が所有する模擬トンネルまで移送、実証試験を実施し、模擬トンネルに生じた欠陥の検出に成功した⁸⁾。平成 30 年度は専用車両を設計して装置を搭載し、実際に使用されている道路トンネルにおいて、実証試験を実施した。本稿では、実証試験の概要について述べる。

2. 屋外高速検査装置の開発

2.1 検査装置の概要

実証試験には平成 28 年度に開発した高速検査装置を用いた。装置は、打音検査におけるハンマーに相当する振動励起レーザー、同じく人の耳に相当するレーザー干渉計、ならびに二つのレーザー光を高速で走査する高速走査ユニットからなる。振動励起レーザーには、量研が開発した高エネルギー、高繰り返しパルスレーザー (4J、50Hz) を用いた。振動の検出を行うレーザー干渉計には当研究所が構築したレーザードップラー振動計を用いた。レーザードップラー振動計は、コヒーレント長の長い連続発振 Nd:YVO₄ レーザーの第 2 高調波 (波長 532nm) を光源とし、光音響型変調素子、復調装置を組み合わせ



図1. 自走式レーザー打音検査装置

(a) 移動時の様子 (b)計測時の様子

たヘテロダイン検出型レーザー干渉計の構成となっている。光源の出力は検査対象の表面状態に応じて任意に調整できるようにした。高速走査ユニットは、検査対象までの距離を測るレーザー距離計、距離に連動して照射光学系の焦点位置を調整する電動ステージ、検査面を高速に走査するためのガルバノミラーから構成されている。検査領域を大きく変更する場合には二軸ミラーでレーザー光の出射方向を変える方式を採用しており、二軸ミラーには検査範囲を観察するための光学カメラが、円周方向の回転に対して同軸になるよう搭載されている。

2.2 検査装置の専用車両への搭載

平成29年度には構築した検査装置を4トントラックに搭載し、模擬トンネルにおける実証試験を実施した。検査装置の運搬は大型精密機器の運送業者に依頼し、現地でレンタルした4トントラックに搭載する方式を採用したため、装置の移送にかかるコストが大きかった。また、搭載後に電源周りや光学系の調整を必要としたため、現地に到着後すぐに試験に取り組むことができないといった課題があった。そこで、平成30年度は4トントラックの荷台を改造し、装置類を予め搭載した自走式レーザー打音検査装置の構築を行った。前節で述べた検査装置一式を防音、防振筐体に収納し、レーザー打音装置として、車両後部に設置した。レーザー駆動用の電源や、冷却水、計測や制御に必要な電子機器類は専用に設計したコンテナ内に収納し、車両中央部に設置した。

それぞれの装置や電源類をユニット化したことで、積み下ろしや移設にかかっていた時間の大幅な短縮に成功した。トラックの荷台はエアサスペンション機構を有しており、装置の移送時に路面から受ける振動の影響を低減できる。また、移送時における風雨の影響を考慮し、専用の着脱が容易な巻き上げ式の幌を設計、装着した。これらを採用したことで、レーザー干渉計の光学系には再調整の必要があるレベルのずれは生じなかったことを確認した。図1に自走式レーザー打音検査装置を示す。ディーゼル発動機は別途用意した2トントラック上に設置し、100V、200Vの二系統で分電盤と接続した。検査装置全体の制御と操作はトラックの助手席から行えるようになっている。

2.3 防音カバーの特性試験

レーザー干渉計を用いた振動計測では、干渉計を構成する光学部品が外部から何らかの影響を受けて共振が生じた場合、検査面に生じた振動との区別ができない。共振が生じる原因になりうるものとして、音による影響が挙げられる。この影響を低減するため、図2に示す防音カバーをレーザー干渉計が収納されている筐体に装着した。防音カバーは鉄板と吸音材からなり、欠陥判定に使用する帯域である500kHz~10kHzの外部からの雑音を減衰するよう設計されている。これまでに得られた知見より、環境騒音などの背景雑音成分はその大きさにもよるが、一桁程度低減されることが望ましいと



図2. 防音カバー

考えられ、前述の帯域において 20dB 以上の減衰が望まれる。防音カバーによる減衰性能を確認するための実験を行った。50Hz 程度までの低音域を再生可能なウーファァーを搭載したスピーカーを用いて、広い帯域にわたって成分をもつノイズ音を再生し、防音カバーによってそれらをどの程度低減できるのかを確認した。

レーザー干渉計用の筐体内に集音マイクを設置し、防音カバーを外した場合と、装着した場合において、それぞれデータ収録を行った。また、得られた信号波形を高速フーリエ変換し、振幅スペクトルを得た。図3にそれぞれの状態で収録された音の信号波形と得られた振幅スペクトルを示す。音の大きさに相当する信号波形の振幅が、防音カバーの有無によって大きく異なることが確認でき、また、防音カバーを装着したことで、500Hz 以上の帯域における周波数成分を大きく低減できていることが確認できた。

防音カバーを外した状態と、装着した状態における振幅スペクトルの差分を求め、得られたスペクトルを防音カバーの減衰特性とした。防音カバーの減衰特性を図4に示す。防音カバーにより、500Hz 以上の帯域において、平均して 20dB 以上の減衰が可能であることを確認した。

3. 道路トンネルにおける屋外実証試験

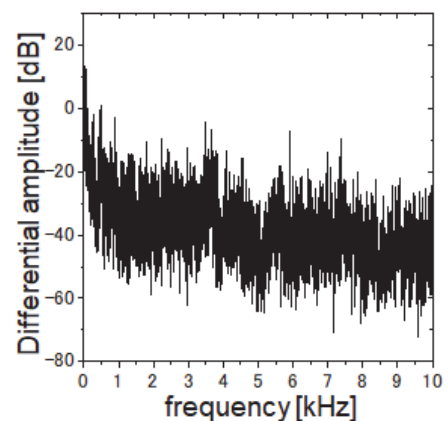
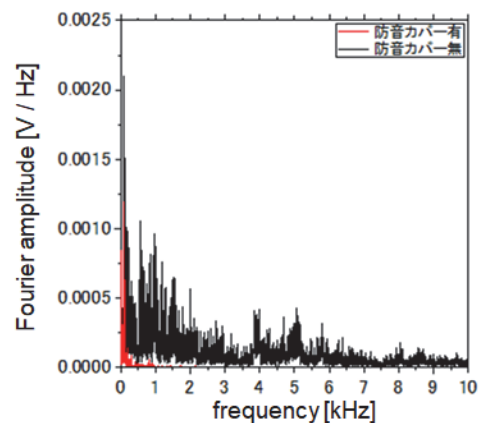
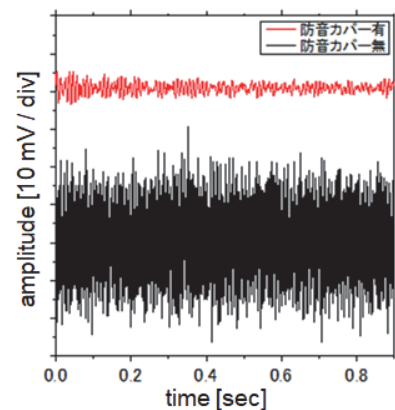


図4. 防音カバーの減衰特性

実際に使用されている道路トンネルにおいて、それぞれの自治体と協力し、以下の三ヶ所において実証試験を実施した。

- ① 奈良阪トンネル、奈良市青山市道 697 号線、
2018/05/31-06/01
- ② 天王第一トンネル、大阪府能勢町国道 173
2018/06/14-06/24⁹⁾

③ 尾崎トンネル、静岡県富士宮市県道 190 号線、
2018/12/17-12/18^{10),11)}

本稿では、天王第一トンネルでの実証試験の結果について報告する。天王第一トンネルを図5に示す。

本実証試験では、トンネルの全面点検を行うのではなく、予め検査会社が点検した結果のうち、国土交通省により策定された道路トンネル定期点検要領¹²⁾における対策区分判定Ⅱb 以上の変状をレーザー打音装置で検出可能であることを実証するのが目的である。対策区分はⅠ～Ⅳで分けられており、Ⅰ<Ⅱ(Ⅱb<Ⅱa)<Ⅲ<Ⅳの順に危険度が高くなる。対策区分判定Ⅱbは、道路トンネルの機能に支障は生じていないが、予防保全の観点から日常巡視等で状態を把握しておくことが望ましい変状に対して下される判定である。また、変状とは、トンネル本体工の覆工、坑門、天井板本体等に発生した不具合の総称をいう。

振動励起用パルスレーザーエネルギー3.4J、繰返し50Hz、振動検出用レーザー光出力 1W の条件で、3-6m 離れた位置から、壁表面 500mm×500mm の領域を約 33mm の間隔で検査した。計測点数は 16×16=256 点であった。時系列のレーザー干渉波形と FFT による周波数変換データを用いて、欠陥の有無を判定し、ディスプレイ上に欠陥の位置を表示するという一連の作業を行っている。

図6に検査結果の一例を示す。背景の写真は壁表面の写真撮影画像で、コンクリートの目地に沿って縦方向に



図5. 天王第一トンネル

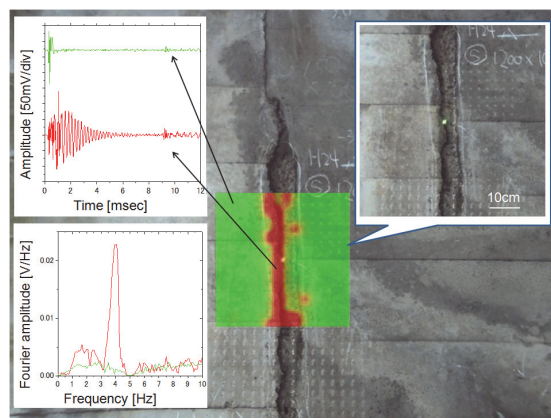


図6. レーザー打音法による検査結果の一例

剥離が生じていることが確認でき、境界面が浮いているかどうかを検査した。中央部正方形のカラー画像は、外枠の大きさ 500 x 500mm の領域を一度のデータ取得で走査・検査した領域をあらわし、背景画像と重ね合わせて出力して、緑色が健全部、赤色が欠陥部であることを表示している。参考としてカラーマップを非表示にした検査領域の様子を図右上に示した。二軸ミラーに取り付けられたカメラで検査範囲の光学画像を取得し、実際に走査した範囲と各照射点における診断結果を一つの画像として出力できるようにした。赤色部と緑色部の代表的な測定点における振動の時系列信号波形と振幅の周波数スペクトルを併せて図中に挿入した。

健全部と欠陥部の判定には周波数スペクトルの最大強度とスペクトル面積の違いを利用した。それぞれのパラメータで閾値を適切に設定し、値に応じて赤から緑の間の色を割り振っている。欠陥を含む領域では、その欠陥の大きさや厚みなどから決定される固有振動数で揺れる板振動が励起されやすいため、スペクトルの最大強度が大きくなる。また、打音検査の結果から、落下の危険性が高い欠陥部は、低音部のスペクトルが強調されるという定性的な結果を用いている。つまり、スペクトルに卓越したピークがあり、なおかつ低周波側に存在するような信号波形が得られる領域ほど赤く示される。健全部では板振動が励起されず、上記の値は小さくなるため、このような領域は緑色で示される。

検査会社の打音検査員による検査結果との比較を図7

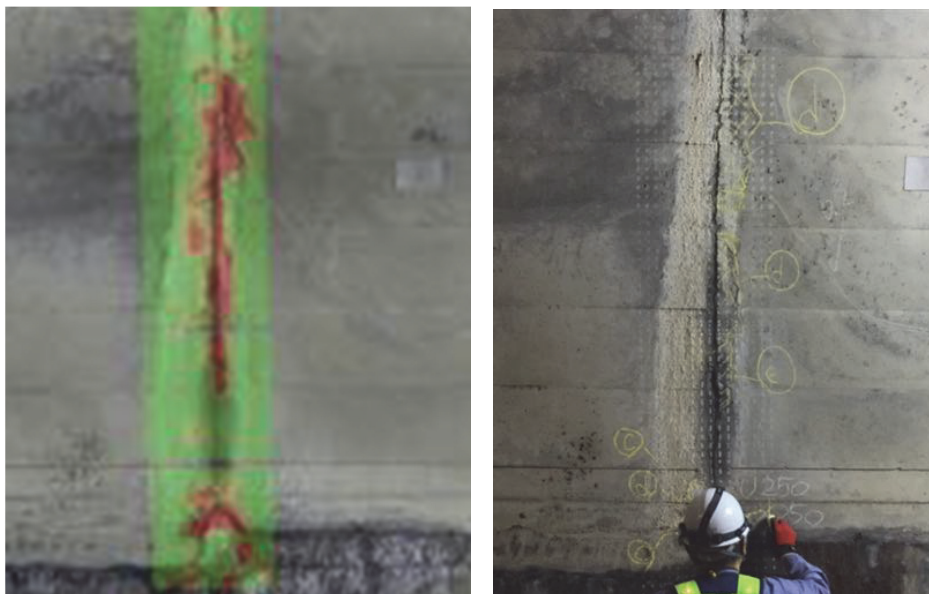


図7. レーザー打音法（左）と打音法（右）による検査結果比較

に示す。図の左側がレーザー打音法による検査結果で、スキャン複数回分の結果を重ね合わせて表示した。右側が検査ハンマーによる打音法の結果を示す。黄色くチョーキングされた箇所が打音法で欠陥と判定された部分を示しており、レーザー打音法による検査結果と良い一致を示した。実際のトンネルに生じた欠陥に対しても、本研究で開発した検査装置は打音検査と同等の検査が可能であることを実証できた。

4. まとめ

検査装置の小型化と専用車両への搭載を進め、検査現場まで移動可能で、広い範囲のトンネル壁面を高速で検査できる装置を開発し、実際に使用されている道路トンネル内において実証試験を行った。道路トンネルに生じた欠陥と予め判定された領域を対象として検査を実施し、欠陥部と健全部の判断を高速で行うことに成功し、打音検査と同等の検査が出来ることを実証した。

謝辞

本研究は、総合科学技術・イノベーション会議のSIP（戦略的イノベーション創造プログラム）インフラ維持

管理・更新・マネジメント技術「レーザーを活用した高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の研究開発」の下で実施した。試験の実施に尽力いただいた量研機構関西研の錦野将元氏、長谷川登氏、近藤修司氏、岡田大氏、北村俊幸氏、三上勝大氏、河内哲哉氏に感謝致します。

参考文献

- 1) 国土交通白書 2018
- 2) 島田義則 他: 非破壊検査, 61, 519-524, 2012.
- 3) 倉橋慎理 他: レーザー研究 42, 849-2014.
- 4) オレグコチャエフ 他: LASER CROSS, No.355
- 5) 島田義則: ILT2017 Annual Progress report
- 6) S.Kurahashi et al.: J. Appl. Remote Sens.12(1),015009 (2018)
- 7) 倉橋慎理 他: ILT2017 Annual Progress report
- 8) 倉橋慎理 他: ILT2018 Annual Progress report
- 9) 朝日新聞 2018年6月24日朝刊 31面 など
- 10) プレスリリース 理化学研究所、レーザー技術総合研究所「インフラの長寿命化を支える先進レーザー診断技術の実証試験に成功」2018年12月19日
- 11) 読売新聞 (2019年1月4日) など
- 12) 国土交通省 道路トンネル定期点検要領 平成31年2月

Laser-based remote nondestructive inspection of metal water-pipelines

Laser measurement team

O. Kotyaev, Y. Shimada, S. Kurahashi

1. Introduction

In this report, experimental results on laser-based technology for remote nondestructive measurement of metal pipe wall thickness are presented. Moving fluids always affect the inner surface of pipeline. For example, boiling water flowing inside the pipeline erodes the metal surface; or mixed liquid containing solid elements scratches the inner surface, as shown in Fig.1. As a result, pipe wall thickness will be reduced. Preventing dangerous situation caused by thinner walls, periodical evaluation of wall thickness is important. Laser-based inspection is considered as a promising technique of remote nondestructive high-speed inspection for metal pipes [1].

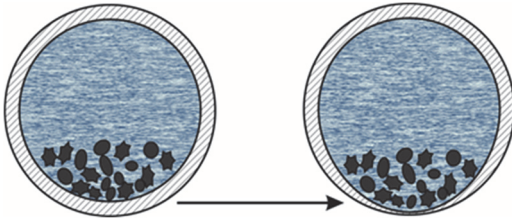


Fig. 1. Metal pipe with rocks-in-water inside.

In the present report, principle possibility of pipe wall thickness measurement by laser vibration meter is demonstrated. Influence of inner water on measurement results and problems of pipe damage caused by laser impact are considered.

2. Idea of thickness measurement

The measurement procedure is based on laser initiation and laser detection of resonant acoustic waves between inner and outer surfaces of pipe wall [2]. Figure 2 shows general principle of laser-based thickness measurement. Impact laser hits outer surface of pipe wall and initiates acoustic wave inside the wall. This wave is reflected by inner surface of the pipe wall and comes back to outer surface.

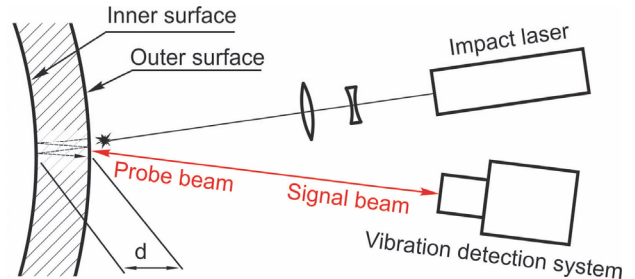


Fig. 2. Laser-based evaluation of metal wall thickness.

The approaching wave will be reflected again and again by outer and inner surfaces. Multiple reflections of initiated acoustic wave will be detected. Resonant frequency of acoustic multiple reflections in pipe wall is given by $F_{nr} = V/2d$, where V is sound velocity in pipe material, d is pipe wall thickness. If pipe is made of material with sound speed of 6 km/s, and wall thickness is 5 mm, then $F_{nr} = 600$ kHz. If pipe wall becomes thinner, then F_{nr} will increase. Detection of increased frequency of multiple reflections in inspected pipe will reveal potentially dangerous situation.

It should be noted that, during actual inspection procedure, pipes are supposed to be filled with water. Presence of water inside pipe should result in decreasing amplitude of initiated resonant vibration but its frequency should remain the same. This effect will be demonstrated experimentally.

3. Experimental setup

A pulsed Nd:YAG laser was used as a source of laser impact. Output laser energy is up to 1J and pulse duration is 8 ns. Detection of initiated vibration was performed by commercially available laser vibrometer OFV-505 manufactured by Polytec Co.



Fig. 3. Metal pipes used in the experiments.

Three pipe samples were provided for the experiments (Fig. 3). These are 1-meter long pieces, 165.2 mm in diameter. The pipes are made of steel. Pipe wall thickness: 7.1, 5.0 and 3.7 mm. Outer surface is covered by protecting paint.

In these experiments, pipe samples were installed on separate table 6 meters away from the inspection system. From this distance, probing radiation scattered by original pipe surface and used as a working signal appeared to be very low. To increase signal power, counter-reflecting tape was used in the probing point in most part of the experiments. However, in reality, only original surface is supposed to be used. So, for the final system design, special experiments have to be carried out with original pipe surface without using counter-reflecting tape to find maximum inspection distance, where signal-to-noise ratio is still acceptable.

Mainly, impact beam size was 5 mm in diameter (square was about 0.2 cm^2). With the use of 1-J laser pulses, energy density and intensity of laser impact beam on pipe surface was 5 J/cm^2 and 625 MW/cm^2 , respectively. In these conditions, ablation took place on pipe surface producing strong acoustic noise in air. To avoid influence of acoustic noise, impact/probe distance was set to be 40 mm (Fig. 4).

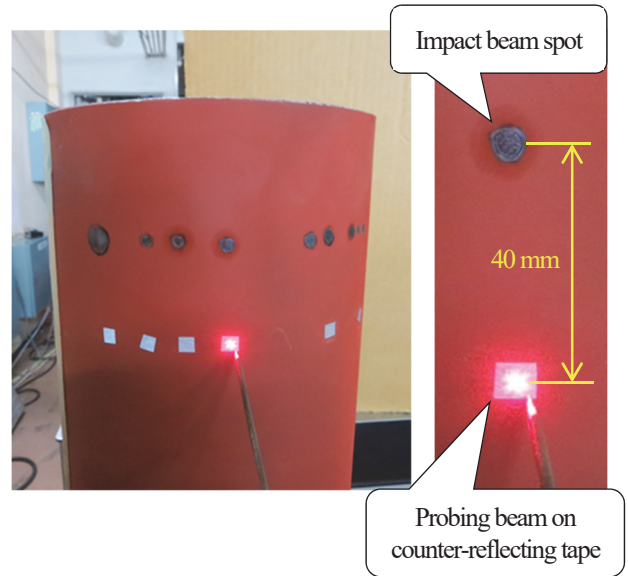


Fig. 4. Impact/detection configuration on pipe surface.

4. Pipe wall thickness measurement

Signal waveforms detected with the use of the impact/detection configuration described above look complicated. For example, Figure 5 shows waveforms and spectra detected in the pipe sample with 3.7-mm wall. Moment of impact takes place at $t = 0 \mu\text{s}$. The wave signal appears at $13 \mu\text{s}$ after laser impact. This delay corresponds to surface wave propagation time over 40-mm distance between impact and probe points. If sound velocity in steel is 5900 m/s, then surface wave velocity is about 3000 m/s, propagation over 40-mm distance will take about $13.3 \mu\text{s}$ which agrees with the observed delay.

The signal between $13 \mu\text{s}$ and $\sim 30 \mu\text{s}$ (hereafter we call “signal beginning”) contains mixture of surface wave and non-stationary multiple reflections. It was found that clear stationary resonant reflections appear about at $30 \mu\text{s}$ after laser impact. It lasts about $50 \mu\text{s}$ until strong oscillation starts at $\sim 80 \mu\text{s}$ after laser impact. Impact by Nd:YAG laser induces surface ablation as mentioned before, and shock wave in air is produced by laser ablation. The strong oscillation after $\sim 80 \mu\text{s}$ (hereafter we call “acoustic noise”) is due to acoustic vibration in air caused by shock wave. Speed of the shock wave seems to be supersonic: about 500 m/s.

Both non-stationary signal beginning and acoustic noise influence on spectra of detected signals, which makes extraction of useful information (here, frequency of multiple reflections) difficult.

One can see the whole waveform spectrum shown in Fig. 5-a has a peak at 800 kHz which corresponds to multiple reflection resonance. However, the peak is surrounded by high-amplitude spectra of the signal beginning (Fig. 5-b) and acoustic noise (Fig. 5-c). The clearest recognition of resonant multiple reflections is possible in the 50- μ s waveform cut between signal beginning and acoustic noise (Fig. 5-d).

Figure 6 presents waveforms and corresponding spectra detected for pipes with wall thicknesses of 7 mm (a) and 5 mm (b). All

waveforms are results of 10-record averaging. To illustrate influence of non-stationary vibration acoustic noise, two waveforms are demonstrated for each pipe: whole detected waveform and 50- μ s waveform cut between 30-th and 80-th μ s. The 50- μ s cuts without initial non-stationary vibration and acoustic noise are most useful for measurement of frequency of multiple reflections in current conditions. Actually, all whole waveform spectra have peaks corresponding to multiple reflections frequency. However, spectra of 50- μ s cuts have the clearest peaks.

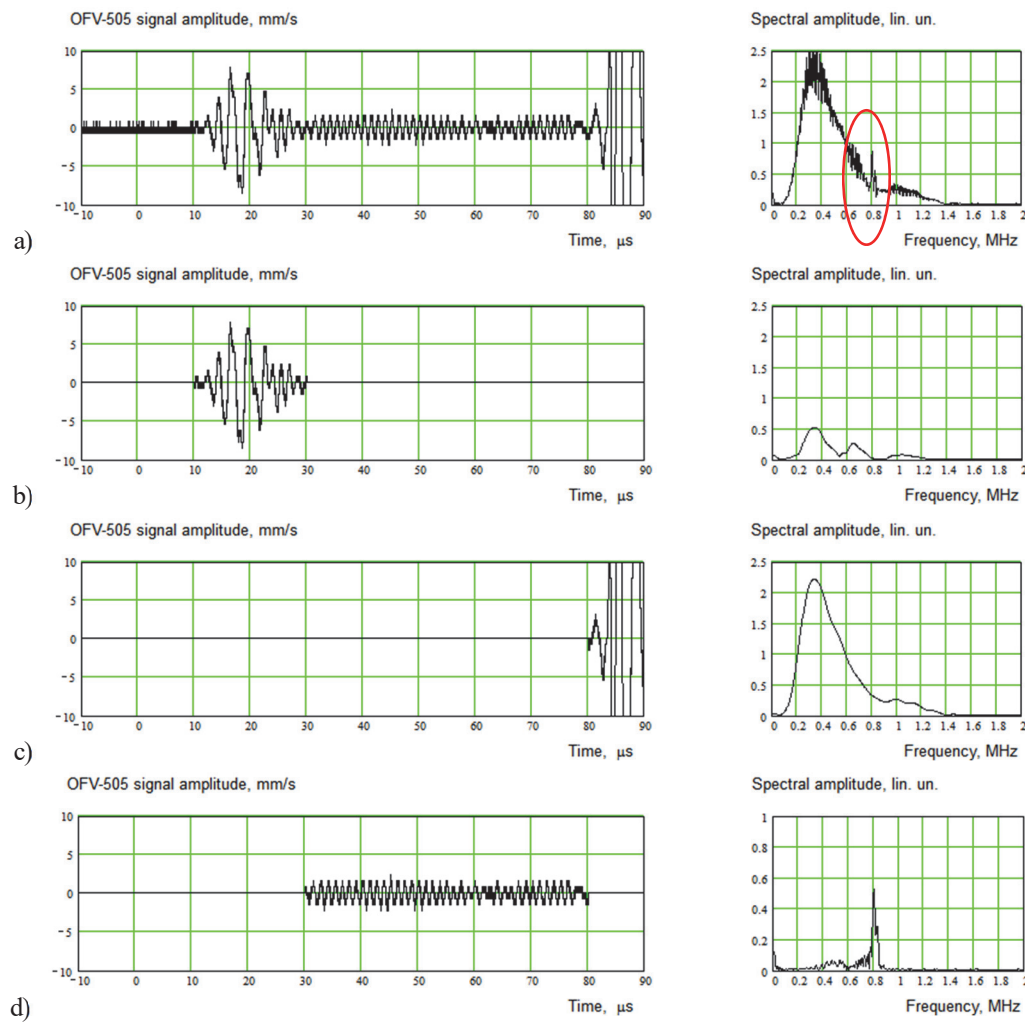


Fig. 5. Waveform and spectra detected in tests of the pipe sample with 3.7-mm wall: a) - whole waveform, b) - signal beginning, c) - acoustic noise, d) - 50- μ s cut between signal beginning an acoustic noise.

Pipe wall thickness – 3.7 mm; detected resonant frequency of multiple reflections – 800 kHz.

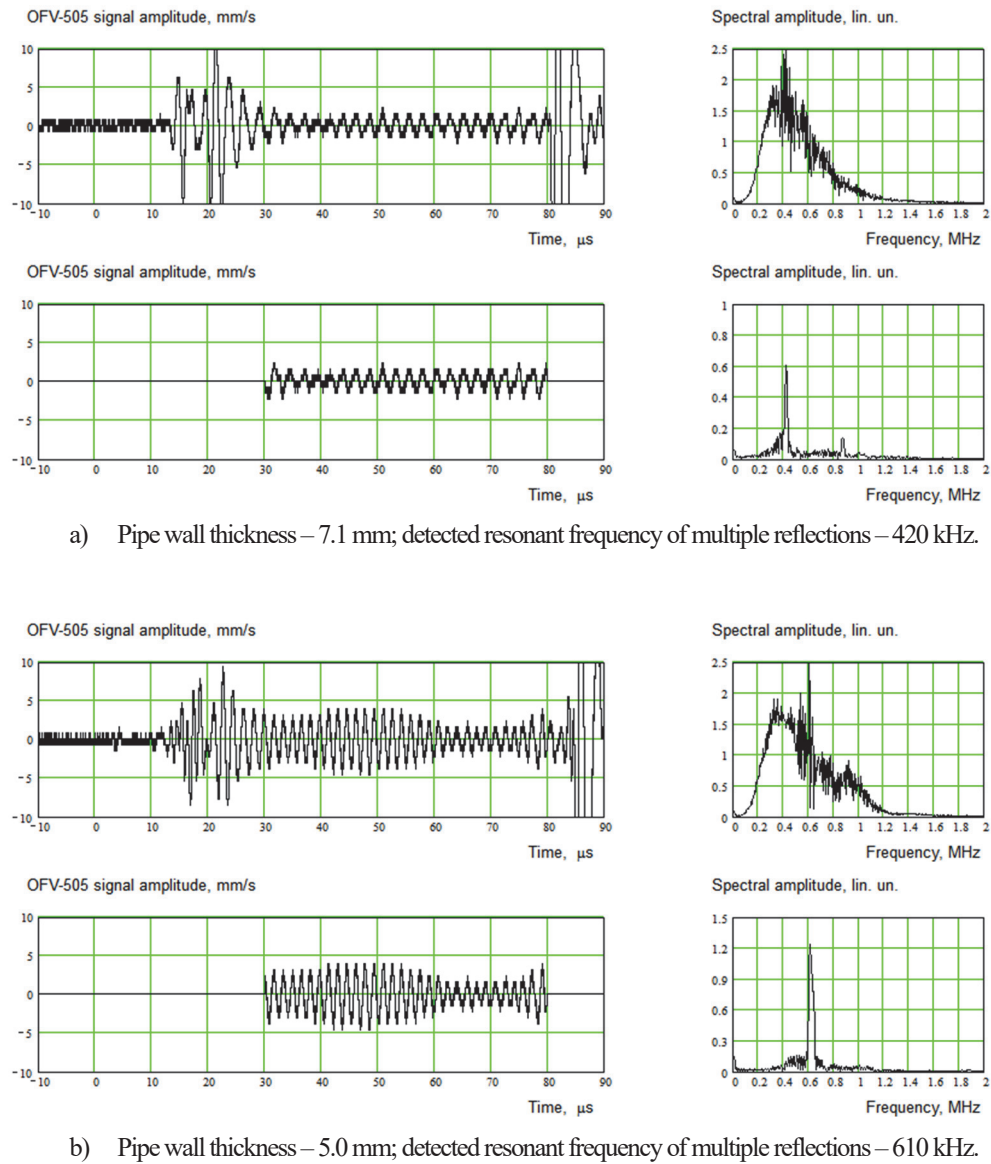


Fig. 6. Waveforms (whole waves and 50- μ s cuts) of detected resonant vibration and corresponding spectra (scales in spectra are varying).

Table 1. Multiple reflections in steel pipe samples.

Thickness, mm	Expected multiple reflections frequency, kHz	Detected multiple reflections frequency, kHz	Detection/expectation ratio
7.1	415	420	1.011
5.0	590	610	1.034
3.7	797	800	1.003

As mentioned above, the provided pipes are made of steel. If sound velocity in steel is 5900 m/s then frequency of multiple reflections should be as shown in Table 1.

One can see there is good accordance between expected and

detected frequencies of multiple reflections. So, laser-based evaluation of metal pipe wall looks reliable and should be used in real applications.

5. Influence of inner water on pipe wall thickness measurement

As mentioned above, a pipe under inspection in real conditions will be filled with water. The presence of water should affect amplitude of initiated resonant reflection. So, it is important information whether it is possible to detect multiple reflections and evaluate pipe wall thickness at the presence of water.

To measure pipe wall thickness in water-filled conditions, a 20-cm piece of the pipe with 3.7-mm thickness was used (Fig. 7). One end of the pipe was sealed with plastic plate; and the resulting pipe “cup” could be filled with water.

Figure 8 presents comparison in whole waveforms and spectra between the two cases: empty pipe and pipe filled with water.

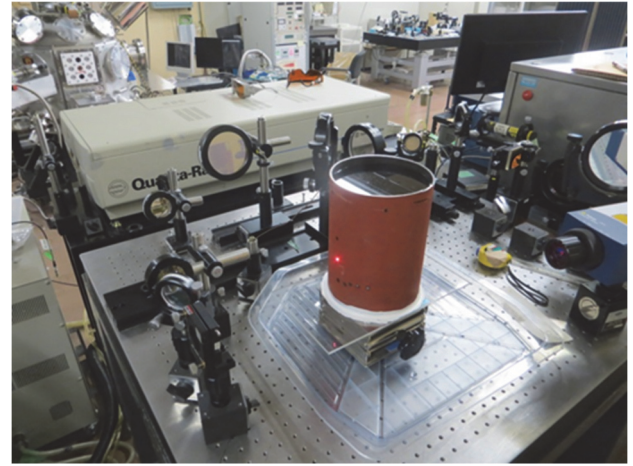


Fig. 7. Water-filled piece of pipe under testing.

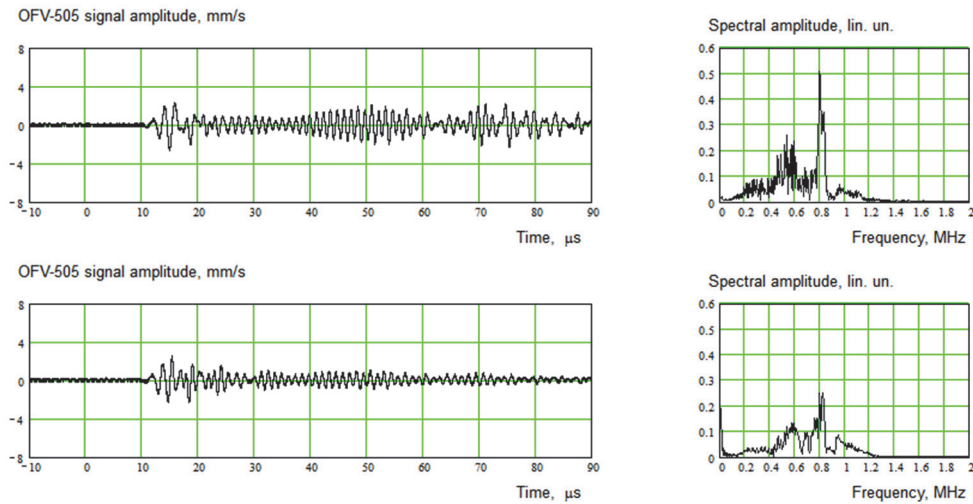


Fig. 8. Waveforms and spectra of multiple reflections in pipe wall: empty pipe (top) and water-filled pipe (bottom).

As it was expected, spectral amplitude of detected signal in water-filled pipe is lower than in case without water. Difference is about 2 times. This difference is caused by difference of acoustic reflectivity from steel/air and steel/water boundaries. Actually, the experimental configuration was not intended for studying acoustic properties, so correct quantitative evaluation of acoustic reflectivity here is not possible. Good news is that detection of multiple reflections in water-filled condition is still possible.

6. Non-destructive impact with the use of CO₂ laser

Laser ablation produced by Nd:YAG laser impact does not

destruct pipe wall, however it produces damage of protection painting covering outer surface of pipes. The damaged spots are clearly seen in Fig. 4. Even with the use of bigger impact beam size and decreased pulse energy (producing practically non-detectable vibration signal) painting damage takes place (Fig. 9). Moreover, applying multiple impact in one and the same position (10 shots, mainly) for data accumulation and averaging to improve signal-to-noise ratio results in just painting removal. This effect probably is not acceptable in real inspection.

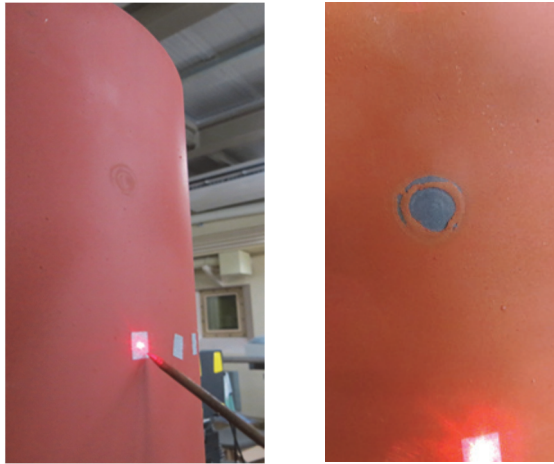


Fig. 9. Pipe painting damage produced by 10-mm impact beam and 0.5 J energy: left – single shot, right – 10-shot accumulation.

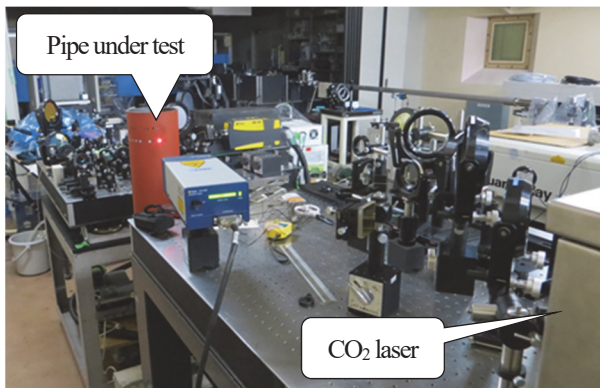


Fig. 10. Test of CO₂ laser impact.

To check possibility of really nondestructive pipe inspection, a CO₂ laser was used instead of the Nd:YAG laser. The CO₂ laser generates pulses with 5 J energy and 90 ns duration. It should be noted the available model of CO₂ laser is not designed for long-distance operation. So, to check CO₂ laser impact, shorter distance (about 1 m) was used (Fig.10).

It was found that CO₂ laser impact beam with 35 x 30 mm size produced noiseless thermal impact and did not make any noticeable damage on pipe painting, even in 10-shot accumulation (Fig. 11). Nevertheless, it initiated detectable resonant multiple reflections which allow to measure pipe wall thickness. Figure 12

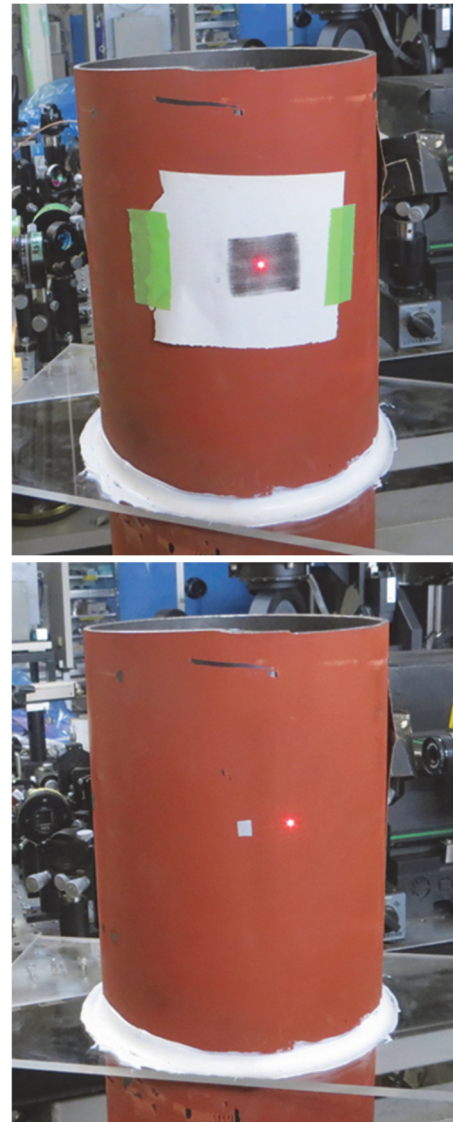


Fig. 11. CO₂ laser beam spot on thermal paper (top) and pipe surface after 10-shot impact accumulation.

presents waveforms and spectra of multiple reflections detected in the three pipe samples. It was found that with the use of thermal impact produced by CO₂ laser, initial non-resonant vibration (“signal beginning”) is shorter than in the experiments with ablation impact produced by Nd:YAG laser. Here, only 6- μ s parts of signal waveforms with initial non-stationary vibration are cut off. Thermal mode of laser impact does not produce acoustic noise, so, the rest waveforms can be used without additional cuts.

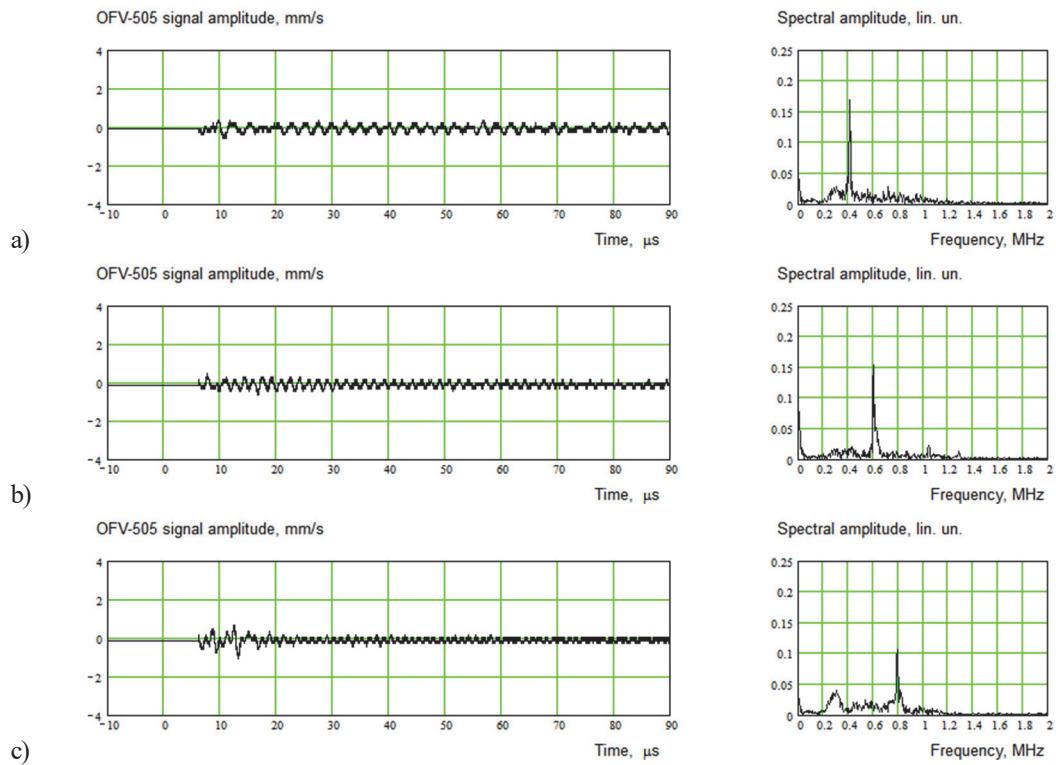


Fig. 12. Waveforms and spectra of resonant multiple reflections in metal pipe walls obtained with the use of CO₂ laser impact. Pipe wall thickness and corresponding resonance frequency: a) 7.1 mm and 420 kHz, b) 5 mm and 610 kHz, c) 3.7 mm and 800 kHz.

The results of pipe wall thickness measurement obtained with the use of the CO₂ laser are similar to ones summarized in Table 1. So, CO₂ laser is probable alternative of Nd:YAG laser as a source of laser impact in real nondestructive inspection. However, CO₂ laser should be properly designed for long-distance operation.

7. Discussion and conclusions

The experiments have verified principle possibility of remote laser-based inspection of metal pipes. In real inspection, it will be necessary to provide appropriate level of signal power for acceptable signal-to-noise ratio. As well, it will be necessary to optimize impact/probe configuration to minimize influence of initial non-stationary vibration and possible acoustic noise produced by ablation impact.

Another important effect which should be taken into account is about 50% decrease of laser-initiated vibration amplitude when inspected pipe is filled with water. So, when developing real system, it would be a good idea to have some reserve in signal-to-noise ratio.

Ablation impact produces damage of protection painting. If it is not acceptable, the real inspection system should be equipped with

impact source providing really nondestructive impact. Possible candidate is CO₂ laser with pulse energy about 5 J and pulse duration about 0.1 μs. It has been demonstrated, if impact beam size square is about 10 cm² then this kind of laser is capable to initiate detectable resonant vibration without noticeable painting damage. So, safe parameters of energy density and intensity of CO₂ laser impact are 0.5 J/cm² and 5MW/cm², respectively.

According to Fig.1, thinnest part of long time used pipe will be on the pipe bottom. That means, if there is no clear space under inspected pipe, it may be technically difficult to deliver laser beams to pipe bottom. In this case, another physical phenomenon could be used for pipe inspection, for example, initiation and detection of eigenmodes in inspected pipes. This idea will be one of the topics of further study.

This research was supported by the Obayashi Corporation.

8. References

- 1) Nondestructive testing hand book. ASNDT, 1991,
- 2) C.B. Scruby. Laser Ultrasonics. Technique and Application, 1990.

時間分解レーザー計測による蛋白質の光励起ダイナミクス

レーザーバイオ化学研究チーム¹、特別研究員²

谷口誠治¹、ハイク コスロービアン¹、田中文夫²

1. はじめに

本研究チームでは、創薬への応用や光機能性素子の開発を目指し、生体内で様々な機能を果たす蛋白質や酵素等の生体関連物質の光励起ダイナミクスおよび光初期反応メカニズムを、超短パルスレーザーを用いた時間分解計測法により明らかにする研究を行ってきた。本稿では、生体内でD-体のアミノ酸を酸化分解する機能を持つヒト由来D-アミノ酸酸化酵素 (human D-amino acid oxidase, hDAAO) について、そのピコ時間分解蛍光ダイナミクスを電子移動速度理論により解析した結果を報告する。

2. ヒト由来 DAAO の蛍光ダイナミクス

D-アミノ酸酸化酵素 (DAAO) は、フラビンアデニンジヌクレオチド (FAD) を補因子に持つフラビン蛋白質の一種で、FAD の一部であるイソアロキサジン環 (Iso, 図 1 (b) 中 () 内の部分) は青色光を吸収し緑色領域 (530 nm 付近) の蛍光を発する。DAAO はヒトを含む哺乳類の腎臓や肝臓、脳等に多く存在し、D-アミノ酸を分解 (代謝) する機能を持つが (図 2)、その具体的な役割はよくわかっていなかった。これに対し近年、福井ら (徳島大) は統合失調症患者の脳内 D-アミノ酸濃度が DAAO の異常活性により通常よりも低下していることをつきとめ、機能抑制剤の投与が脳内 DAAO の反応活性を抑制し (図 3)、脳疾患の治療に有効であると報告した^{1,2)}。この報告は、様々な脳疾患に対する治療薬開発の足がかりとなるという意味で重要な意義を持つ。我々は、DAAO および抑制剤添加時反応過程をレーザー計測により追跡することで、その機能抑制メカニズムに関する知見を取得できると考え、時間分解蛍光計測法 (単一光子計数法) を用いてヒト由来 DAAO (human DAAO, hDAAO と表記) と 5 種の抑制分子を添加した試料の光励起ダイナミクスの計測を行った (図 4)³⁾。その結果、hDAAO の蛍光は多成分指数関数で減衰し、最小二乗フィッティングから 47 ps、235 ps、1.17 ns、4.5 ns

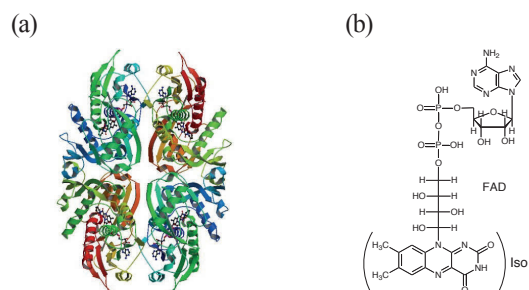


図 1 (a) ヒト由来 D-アミノ酸酸化酵素 (human DAAO) の結晶構造 (4 量体、PDB ID: 2E48)、(b) 補因子フラビンアデニンジヌクレオチド (FAD) の分子図

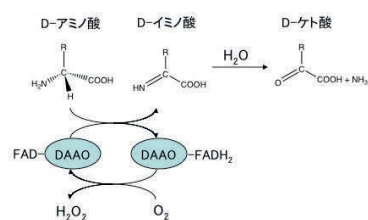


図 2 DAAO の反応スキーム

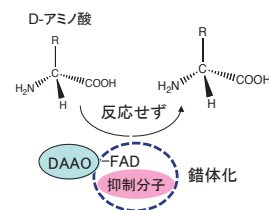


図 3 抑制剤による DAAO の機能抑制効果

の 4 つの寿命成分が得られた。抑制剤を付加した試料では、その種類に応じて 47 ps、235 ps の寿命成分の存在比が低下したため、抑制分子が hDAAO と結合して錯体を形成し機能抑制効果を示したものと考えられた³⁾。一方 2 種の寿命成分については、先に報告例があるブタ腎臓由来 DAAO (pkDAAO) の蛍光寿命⁴⁾との比較から、47ps、235ps の各寿命成分をそれぞれ hDAAO 2 量体、単量体の励起寿命に帰属したが、hDAAO の X 線結晶構造は 4 量体で 1 ユニッ

トを形成しており (図 1 (a))、また溶液中においては 2 量体や単量体が存在しているかどうかは明確ではない。本研究では、DAAO のピコ秒蛍光減衰の主要因である Iso と蛋白質に含まれるチロシン (Tyr) などのアミノ酸残基の間で起こる光誘起電子移動反応を、蛋白質構造や補因子とアミノ酸残基の水素結合相互作用などの蛋白質環境場を考慮した電子移動速度式を構築して解析を行い、理論値と実験値と比較することで水中における hDAAO の溶存状態や、補因子周辺の蛋白質構造について検討を行った。

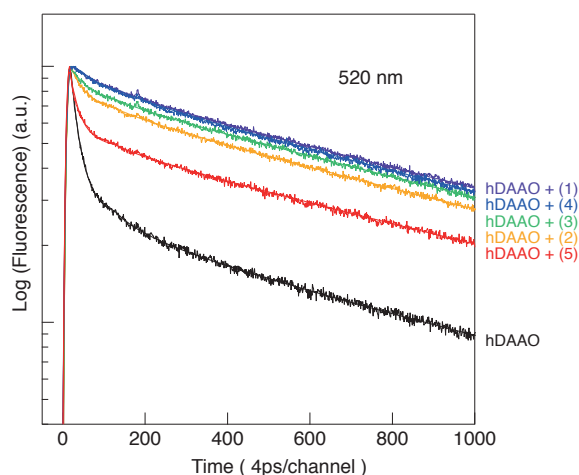
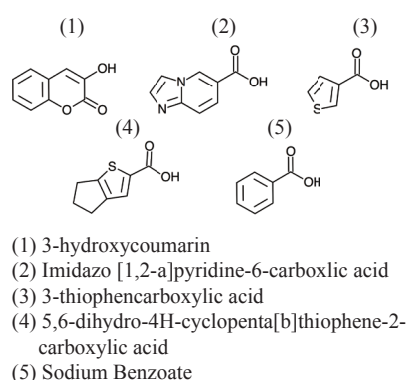


図 4 human DAAO および抑制剤 (1)~(5) 付加試料のピコ秒時間分解蛍光データ (観測波長 520nm)

3. 電子移動反応の理論解析

3.1 電子移動速度理論

DAAO など FAD を補因子に持つ蛋白質は一般にフラビン蛋白質と呼ばれており、フラビン蛋白質は青色光により Iso が励起され (光励起状態を Iso^* と表記)、 Iso^* 周囲に電子供与性を持つ芳香族アミノ酸残基 (チロシン (Tyr) またはトリプトファン (Trp)) が単数または複数存在する場合に、それぞれの Tyr および Trp から電子を受け取る反

応 (光誘起電子移動反応) を示す。電子移動反応の速度は Iso と Tyr (または Iso と Trp) 間の距離や配向、電子的相互作用等に依存して変化し、電子移動速度が大きくなると蛍光寿命は短くなるため、これらの解析により、補因子周辺の局所的な蛋白質構造 (アミノ酸残基の配置) に関する知見が得られる。

基本的な電子移動理論は、Marcus により理論化された⁹⁾が、その後様々な方法により修正が加えられている。本研究では、Kakitani, Mataga らにより構築された電子移動速度理論 (KM 式) を用いた⁹⁾ (式 1)。KM 式は電子移動速度における電子ドナー - アクセプター間の距離依存性を表す式であるが、断熱および非断熱の電子移動過程に適用でき、ドナー - アクセプター間距離が変動する動的電子移動の解析にも適用可能である。

$$k_{KM} = \frac{\nu_0}{1 + \exp\left\{\beta(R_c - R_0)\right\}} \sqrt{\frac{k_B T}{4\pi\lambda}} \exp\left[-\frac{\left\{\Delta G^0 - e^2 / \epsilon_0^{DA} R_c + \lambda + E_{Net}\right\}^2}{4\lambda k_B T}\right] \quad (1)$$

k_{KM} は電子移動速度、 R_c はドナー - アクセプター間距離 (center-to-center)、 ν_0 、 β 、 R_0 はそれぞれ、断熱振動数、ET 過程係数、断熱-非断熱の ET 境界距離である。また、 ΔG^0 は ET 反応生成物と反応物の自由エネルギー差、 $-e^2 / \epsilon_0^{DA} R_c$ はイオン対間の静電エネルギー、 λ は溶媒和エネルギー、 E_{Net} は反応生成物 (Iso - Tyr または Iso - Trp 間のイオン対) とタンパク質内に存在するグルタミン、リシン等のイオン性アミノ酸残基間の静電エネルギーである。

3.2 hDAAO の局所構造

電子ドナー - アクセプター間の距離および配向の決定には、hDAAO の結晶構造 (PDB ID: 2E48) を用いた。本来は溶液中における構造を用いるべきであるが、溶液中の構造はこれまでに実測されていないため、結晶構造で代用した。hDAAO は結晶中では 4 つのサブユニットが集まり 4 量体を形成 (図 1(a)) している。図 5 に、サブユニットの FAD (Iso) 周辺の結晶構造を示す。Iso の周囲には、Tyr224、Tyr228、Tyr314、Tyr55、Trp52 の 5 つの芳香族アミノ酸残基が配置されており、Iso の光励起によりこれらとの間で

電子移動反応が起こると考えられる。溶液中で hDAAO が 2 量体で存在すると仮定し、4 量体のうち隣接する 2 つのサブユニットを選択し、それぞれ subA、subB とした。表 1 に、結晶構造からそれぞれの芳香族アミノ酸残基と Iso 間の距離 (Rc : center to center、Re : edge to edge) を算出した結果を示す。2 つのサブユニットの構造はほぼ同一であり、距離や配向に大きな違いは見られない。

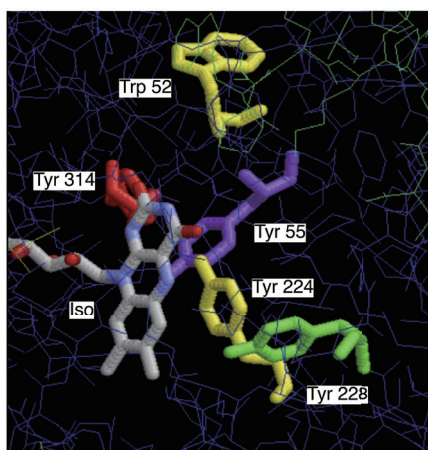


図5 hDAAO における Iso 周辺の芳香族アミノ酸配置 (PDB ID : 2E48)

表1 Iso と周囲のアミノ酸残基間の距離

Amino acid	Rc (nm)		Re (nm)	
	SubA	SubB	SubA	SubB
Tyr224	0.79	0.79	0.71	0.72
Tyr314	0.87	0.87	0.58	0.58
Tyr228	0.92	0.93	0.76	0.76
Trp52	1.15	1.15	0.66	0.66
Tyr55	1.20	1.19	1.03	1.03

3.3 電子移動速度の算出

hDAAO の光誘起電子移動は、Iso の励起状態 (Iso*) と各芳香族アミノ酸間の電子移動が競争して起こるため、蛍光寿命はそれぞれの Iso - アミノ酸間の電子移動速度の総和の逆数として表される。hDAAO2 量体では 2 つのサブユニット(A、B)が近接しているため、サブユニット間でも電子移動反応が起こる (例えば SubA の Iso と SubB の Tyr224) と仮定し、2 量体における電子移動速度 (k_D) は式 (2) で定義した。

$$k_D = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{22} (k_j^{AA} + k_j^{AB} + k_j^{BA} + k_j^{BB}) \quad (2)$$

k_j^{AA} 、 k_j^{AB} はそれぞれ SubA の Iso* と subA 内の芳香族アミノ酸、SubB 内の芳香族アミノ酸との電子移動速度を、 k_j^{BA} 、 k_j^{BB} は SubB の Iso* からの反応の電子移動速度を示す。 j は電子ドナーである芳香族アミノ酸残基数を示し、表 1 で示した 5 個のアミノ酸の他 hDAAO ユニット内に存在する 17 の芳香族アミノ酸 (計 22 個) 全ての電子移動速度を式 (1) によりそれぞれ計算し、その総和を求めたものである。一方、hDAAO が単量体として存在する場合には、ユニット間の電子移動が無いものとし、電子移動速度 (k_M) は式 (3) で定義した。

$$k_M = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{22} (k_j^{AA} + k_j^{BB}) \quad (3)$$

その他の電子移動速度の計算に必要なパラメータ (ν_0 、 β 、 R_0 、 ΔG^0 、 $-e^2/\epsilon_0^D R_c$ 、 λ 、 E_{Net}) の算出手法については、我々の他の発表論文^{7,8)}を参照されたい。

hDAAO 2 量体、単量体における個々の電子ドナーのうち、電子移動速度が大きいもの 5 種の計算結果を表 2 に示す。2 量体において最も速度が大きいドナーは Tyr 314 で、次いで Trp52 であった。Trp52 は Tyr224 や Tyr228 に比べ R_c は大きい、Tyr よりも Trp の方が $-\Delta G^0$ が大きい、電子移動速度は増大したと考えられる。2 量体と単量体を比較すると、電子ドナーの種類と速度の順番は同一であるが、個々の電子ドナーで比較すると 2 量体の方が単量体よりも電子移動速度が大きくなっていることがわかった。

表2 Iso と個々の電子ドナー間の電子移動速度の比較

Electron Donor	Dimer $k_D^j(\text{ps}^{-1})$	Monomer $k_M^j(\text{ps}^{-1})$
Tyr 314	1.82×10^{-2}	3.86×10^{-3}
Trp 52	8.85×10^{-3}	1.62×10^{-4}
Tyr 224	1.86×10^{-3}	1.11×10^{-4}
Tyr 55	8.67×10^{-4}	1.06×10^{-4}
Tyr 228	1.86×10^{-4}	1.18×10^{-5}

3.4 理論値と実験値の比較

hDAAO 2 量体および単量体の電子移動速度解析から算出した蛍光寿命と実測値を比較した (表 3)。 k_s はそれぞ

れ式 (2)および式 (3)から求めた各電子ドナー (Tyr および Trp、計 22 個) の電子移動速度の総和で、 τ_{cal} は $1/k_s$ から求めた蛍光寿命の理論値である。2 量体の蛍光寿命の理論値は 47 ps、単量体では 235 ps と求められ、実験から得られた 2 種の寿命成分 (47 ps、235 ps (τ_{obs})) と良く一致することがわかった。この結果は、hDAAO が水溶液中で 2 量体と単量体が混合した状態で溶存しており 47 ps、235 ps の蛍光寿命がそれぞれ 2 量体および単量体の励起寿命に帰属できること、溶液中での hDAAO の (FAD 周囲の) 構造が結晶構造と一致、あるいは類似性が非常に高いことを示している。

表 3 蛍光寿命の計算値 (τ_{cal}) と実験値 (τ_{obs}) の比較

Protein	k_s (ps^{-1})	τ_{cal} (ps)	τ_{obs} (ps)
Dimer	2.13×10^{-2}	47	47
Monomer	4.26×10^{-3}	235	235

4. まとめと今後

本研究では、ヒト由来 DAAO (hDAAO) の光誘起電子移動反応について、結晶構造および電子移動速度式を用いた理論的な解析を行うことで蛍光寿命を計算し、ピコ秒時間分解蛍光計測で得られた実験値と比較した。その結果、計算値と実験値は非常に良い一致を示し、hDAAO が水溶液中で 2 量体と単量体が混合した状態で溶存し、実験で得られた 47 ps、235 ps の蛍光寿命がそれぞれ 2 量体および単量体の励起寿命に帰属できること、溶液中での hDAAO の (FAD 周囲の) 構造が結晶構造と一致、あるいは類似性が非常に高いことがわかった。しかしながら、これらの解析を行うためには本来、溶液中での蛋白構造を用いることが重要である。溶液中の蛋白質構造を得るための手法には、X 線散乱を用いて溶液中の構造を実際に観測する手法や、分子動力学法を用いて溶液中構造を理論的に予測する手法が考えられる。溶液中の蛋白構造を実測する手法として現在、X 線小角散乱法 (SAXS) が注目されているが、こ

の手法は溶液中での蛋白質全体のサイズの変化など、大まかな構造変化の観測に適しており、現状では X 線結晶解析ほど高精度の観測はできていない。一方、分子動力学法を用いた手法は基本的に理論計算であるため結果を実験的に検証することが必要となる。これに対し、我々が本研究で行った手法は MD 計算による構造予測の検証法として利用できると考えている。MD 計算により得た溶液中の構造を用いて蛋白質の光反応を理論的に予測し、時間分解蛍光計測による実験値と比較することで、予測された溶液中の蛋白構造が実際のものであるかどうかを検証できる。我々はこれまでにブタ腎臓由来 DAAO を用いた検討を進めてきた^{7,8)}が、今後は hDAAO の MD 計算による溶液中構造予測と、その結果を用いた電子移動反応の解析を行うとともに、生体内で様々な機能を果たしている他の多くのフラビン蛋白質への適用を目指して研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) K. Fukui, H. K. Park, T. Kawazoe, K. Ono, S. Iwana, Y. Tomita, K. Yorita, T. Sakai and Y. H. Kong, *Flavins and Flavoproteins*, **2005**, pp.853-860 (2005).
- 2) R. Miura et al., *J. Biochem.*, **122**, pp.825-833 (1997).
- 3) 谷口誠治他、ILT2015 年報、pp.44-49 (2015).
- 4) F. Tanaka, N. Tamai and I. Yamazaki, *Biochemistry*, **28**, pp.4259-4262 (1989).
- 5) R. A. Marcus, *Journal of Chemical Physics*, **24**, pp.966-978 (1956).
- 6) T. Kakitani, N. Mataga, *J. Phys. Chem.*, **89**, pp.8-10 (1985).
- 7) A. Nueangaudom, K. Lugsanangarm, S. Pianwanit, S. Kokpol, N. Nunthaboot, F. Tanaka, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **14**, pp.2567-2578 (2012).
- 8) A. Nueangaudom, K. Lugsanangarm, S. Pianwanit, S. Kokpol, N. Nunthaboot, N. Tanaka, S. Taniguchi, H. Chosrowjan, *RSC Adv.*, **4**, pp.54096-54108 (2014).

レーザー核融合液体壁炉チェンバー内の金属蒸気の澱みの可能性の研究

理論・シミュレーションチーム

古河裕之、中井光男¹

¹大阪大学レーザー科学研究所

1. はじめに

高速点火レーザー核融合炉発電プラント「KOYO-fast」では、厚さ 3 mm から 5 mm 程度の液体リチウム鉛が第一壁に沿って滝状に流下する液体壁構造により、第一壁を保護している¹⁾。液体壁は、核融合燃焼により生じた X 線、 α 粒子及びデブリ粒子により、液体から中性気体、部分電離プラズマへと相変化を伴いながらアブレーションする。生成されたプルームがチェンバー中心付近で衝突すると、エアロゾル等が生じ、金属蒸気の排気、引いては核燃焼反応にとって大きな妨げとなる、ことが予想される。高速点火レーザー核融合炉発電プラント「KOYO-fast」では、図 1 に示すように、第一壁から飛散したプルームがチェンバー中心部に集中しないように、第一壁を角度を付けたタイル構造にしている⁴⁾。

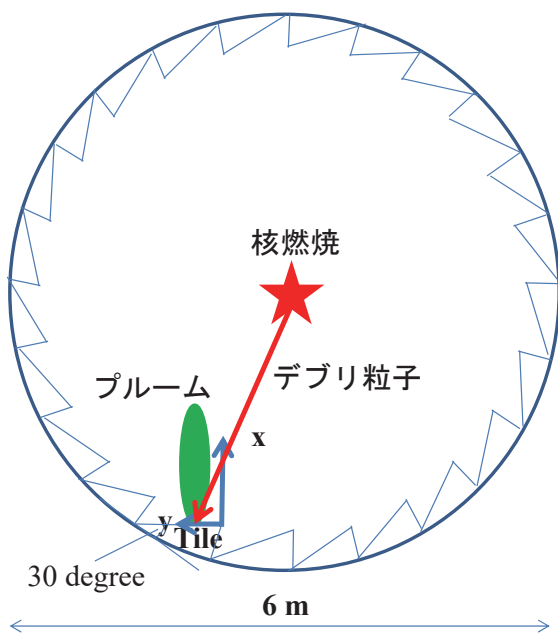


図1 KOYO-fastの液体壁チェンバー第一壁のタイル構造の概念図

アブレーションで生成される金属蒸気は、第一壁の表面からチェンバー内に向かって飛散していく際に、ほぼタイル面に垂直な方向に飛散する。チェンバー内の第一壁近傍では、隣接する 2 つのタイルから飛散するプルーム同士は 15° の角度で衝突する。2017 年度は、実際のチェンバーのサイズを考慮し、DSMC 法を用いた金属蒸気同士の衝突のシミュレーションを行った。2018 年度は、考慮するタイルの枚数を 3 枚とし、飛散する金属蒸気同士の衝突のシミュレーションを、DSMC 法を用いて行った。「KOYO-fast」は、4Hz 動作で設計されており、アブレーションで生成される金属蒸気が 250 ms 以内に排気されることが、極めて重要である。特に、チェンバー中心付近で金属蒸気が澱むことは、レーザー伝搬、ターゲット供給の観点からも、避けなければならない。

2. DSMC 法によるプルーム同士の衝突の評価⁵⁾

チェンバー内の金属蒸気同士の衝突に関し、DSMC 法を用いてシミュレーションを行った。中性粒子からなる希薄分子気体の解析においては、Boltzmann 方程式を解く必要がある。気体を構成する各々の分子について、並進運動と分子間衝突を直接追跡する DSMC (Direct Simulation Monte Carlo, 直接モンテカルロ) 法は、汎用性が高く、希薄分子気体の解析において非常に有用な手法の一つである。チェンバー内の 24 枚のタイルの内、3 枚のタイルに着目しシミュレーションを行った。液体壁がアブレーションし、金属蒸気が 5 cm 飛散した時点初期位置とした。初期に粒子が存在している領域の圧力は、0.05 Torr とした。図 2 は、金属蒸気の初期位置である。

① の粒子の初期速度は、次式で与えた。

$$v_x(t=0) = 0.1v_0 + 0.9v_0(x - x_{\min}) / (5\text{ cm}) \quad (1)$$

$$v_y(t=0)=0 \quad (2)$$

②の粒子の初期速度は、①の粒子の初期速度を 15° 回転して与えた。③の粒子の初期速度は、①の粒子の初期速度を 30° 回転して与えた。 $v_0=10\text{ km/s}$ とした。

(1) 式中の $x_{\min}$ は、図 2 中の①の粒子の初期位置の左端の値を表す。

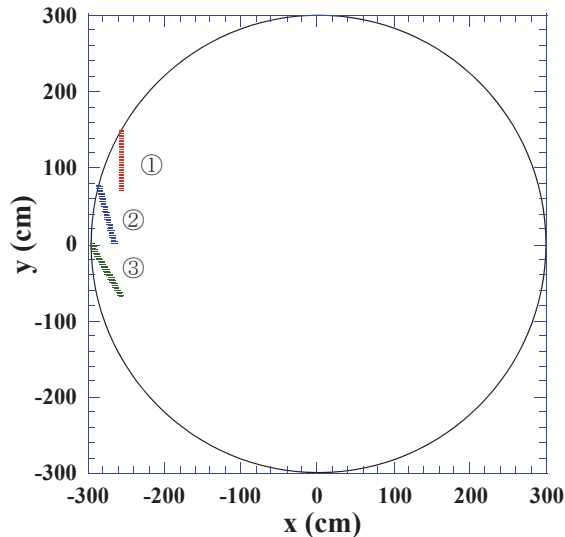


図 2 金属蒸気の初期位置

3. シミュレーション結果

図 3 は、粒子位置の時間発展である。金属蒸気同士が衝突し、軌道を変えながら対向壁に向かって進行し、最終的には対向壁に吸着される様子が表れている。2.287 ミリ秒時には、飛散していた金属蒸気は、ほぼ全て液体壁に再付着している。チェンバーの中心近傍、半径 50 cm 程度の範囲では、金属蒸気が激む危険性は低い、ことを示唆する結果が得られた。

4. 結言と今後の課題

チェンバー内の金属蒸気同士の衝突に関し、DSMC 法を用いてシミュレーションを行った。チェンバー内の 24 枚のタイルの内、3 枚のタイルに着目しシミュレーションを行った。液体壁がアブレーションし、金属蒸気が 5 cm 飛散した時点初期位置とした。チェンバーの中心近傍、半径 50 cm 程度の範囲では、金属蒸気が激む危険性は低い、ことを示唆する結果が得られた。

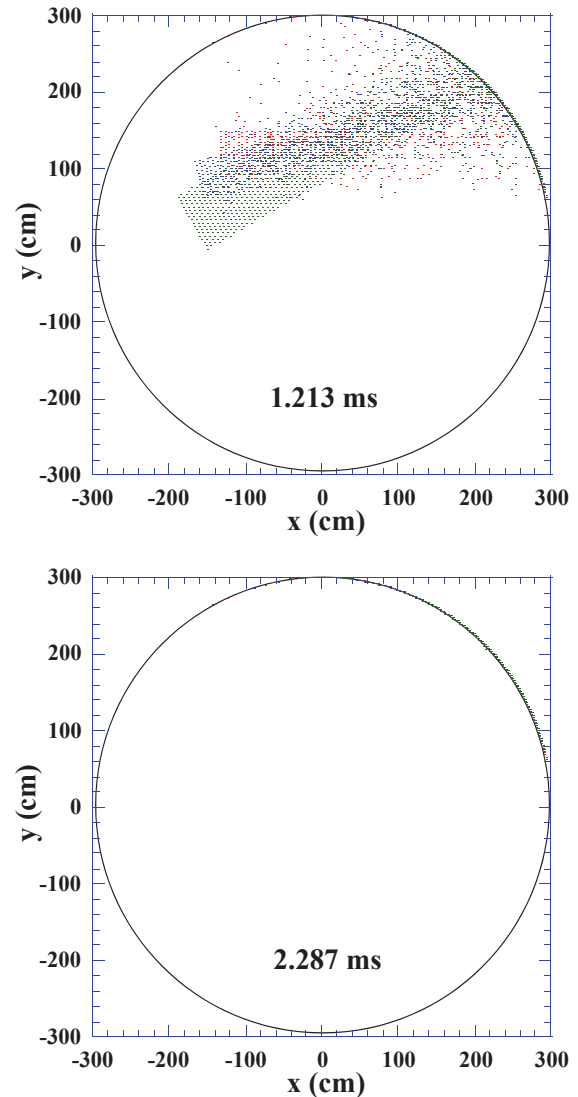


図 3 粒子位置の時間発展

参考文献

- 1) H. Furukawa, T. Norimatsu : Plasma and Fusion Research, **11** 1405084-1 - 1405084-5, 2016.
- 2) 古河裕之, 乗松孝好: プラズマ核融合学会誌, **87**, 51-55, 2011.
- 3) 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, 三間罔興, 苔米地頭, 山中千代衛: プラズマ核融合学会誌, **82**, 617-627, 2006.
- 4) 神前康次, 乗松孝好, 古河裕之, 林巧, 惣万芳人, 西川正史, 苔米地頭: プラズマ核融合学会誌, **83**, 19-27, 2007.
- 5) Shinji Kawamoto, and Kenichi Nanbu ; IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, **27** (1999) 1389-1397.

小型・高効率UVレーザー光源開発

レーザー技術開発室

本越伸二、藤本靖¹、中原正盛²、佐藤毅²、Paul Binun²

¹ 千葉工業大学

² (株) 金門光波

1. はじめに

1960 年レーザーの発明以来、様々なレーザー光が提案され、実用化されている。その形態は、固体、液体、気体と様々で、光の波長も X 線から赤外まで幅広く、用途に応じて選択することが可能である。

紫外 (UV) 領域に注目すると、半導体露光に使用される ArF、KrF エキシマレーザー (波長 193 nm、248 nm)、表面加工や色素レーザーの励起源に使用する XeCl エキシマレーザー (308 nm)、非線形光学結晶による波長変換を使用した固体レーザー (266 nm、355 nm) など、平均出力数 W~kW クラスのパルスレーザーが様々な応用分野で利用されている。一方、連続波 (CW) レーザーでは、半導体レーザー (LD、波長 375nm) の進展が著しく、単一モードで数 10 mW、マルチモードで 100 mW が可能となっている。

表 1 に、紫外光を発生する CW 固体レーザー、半導体レーザー装置の市販品の一例を示す。ここでは、微小領域に集光できる紫外光の特徴を活かすために、ビーム品質 M² 値の良い製品だけをまとめた。半導体レーザーは出力が向上したとは言え、波長は 375 nm が限度であ

る。固体レーザーの発振波長は近赤外域 (〜1 μm) に存在するため、紫外光を得るには、2 回の波長変換過程を経る必要がある。非線形光学結晶を用いた高調波発生では、基本波レーザーの特性、結晶の品質、温度、角度などが、変換効率や出力の安定性などに大きく影響を及ぼす。言い換えると、これらの僅かな変化がそのまま紫外光出力に影響を及ぼすことになり、装置の安定性を下げる要因となる。

Fujimoto らは、これまでに青色半導体レーザー励起による希土類ドープ耐候性フッ化物ファイバレーザーの開発を行ってきた²⁾。2012 年には波長 638 nm、出力 1.2 W のレーザー発振に成功している³⁾。このフッ化物ファイバからのレーザー光 (638 nm) であれば、1 回の波長変換過程で紫外光 (319 nm) が得られる。結果、装置の小型化、安定化、そして高効率の UV レーザー光源が期待できる。

我々は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) プロジェクト「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」(2016 年〜2021 年 3 月) に参画し、「革新的小型・高効率 UV レーザー光源の開発」を進めている。本報告で

表 1 市販されている CW 紫外光固体レーザー装置

メーカー	品名	波長 [nm]	出力 [mW]	サイズ [mm ³]	重量 [kg]	品質 M ²	特記
コヒーレント	Azure	266	230	367x592x177	48	1.3	4 倍高調波
	Genesis CX-STM	355	250	281x156x85	—	1.2	3 倍高調波
スペクトラフィジックス	Excelsior 375	375	70	98x28x36.5	—	1.5	LD
金門光波	KAL-50C-A	375	50	175x46x62	0.55	1.2	LD
サイバーレーザー	ALTAIR 266	266	500	—	—	1.3	4 倍高調波
オキサイド	Frequad-HP	266	1000	240x840x160	—	1.2	4 倍高調波

は、昨年度までの成果をまとめ、今後の展開を紹介する。

2. 耐候性 Pr 添加フッ化物ガラス

フッ化物ガラスは、酸化物ガラスでは蛍光を発しない希土類元素でも発光が得られることから蛍光母材としての優位性がしばしば指摘されてきた。しかし、 BeF_2 ⁴⁾や ZBLAN ($\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$) といったフッ化物ガラスは、著しい潮解性と、 BeF_2 においてはその毒性によって使用範囲が制限されてきた。1991 年、 AlF_3 をベースにしたフッ化物ガラスが開発された⁵⁾。このガラスでは大気中の OH 基と反応しやすい ZrF_4 を使用しないため、表面の散乱やクラックを抑制できることが報告されている⁹⁾。

図 1 に Pr イオン添加の耐候性フッ化物ガラス (Pr 濃度 3000 ppm) の吸収・蛍光スペクトルを示す。波長 442 nm に大きな吸収ピークがあり、蛍光スペクトルはガラス特有の不均一広がりのため、可視光のほぼ全領域に亘っている。その量子効率⁷⁾は 80-90% と高い。

NEDO プロジェクトでは、蛍光スペクトルの中で比較的強い蛍光強度を持つ波長 638 nm でレーザー発振させ、その高調波変換により 319 nm の UV レーザー光を得ることを試みている。この波長は、He-Cd レーザー (波長 322 nm) と近い¹⁾ため、既存の光学部品をそのまま使用することができ、He-Cd レーザー装置の置き換えが期待できる。

プロジェクトでは UV 出力 2 W を目標に開発を進めており、主要な課題は

- 1) 高出力用フッ化物ファイバの開発
- 2) 励起用 LD 光の高密度集光光学系の開発
- 3) 第 2 高調波発生用高効率外部共振器開発
- 4) 高耐力・低損失コーティング膜の開発

などである。当研究所は課題 4) を担当し、フッ化物ファイバ端面のコーティングならびに外部共振器用ミラーのコーティング技術開発を進めている。

3. 高耐力共振器ミラーの開発

図 1 の Pr 添加フッ化物ガラスの吸収および蛍光スペクトルから、波長 442 nm で励起し、波長 638 nm のレーザー発振を得るためには、以下のような共振器ミラーが要求される。

- ①波長 442 nm に対して吸収、反射損失が少ない。
- ②波長 638 nm に対して高反射率を有する。
- ③波長 638 nm 以外の強い蛍光波長に対して反射率が小さい。

波長 442 nm では、高屈折率材料は僅かに吸収をもつ。そのため、比較的吸収の少ない材料を選択する必要がある。また、励起光を高密度に集光し、フッ化物ガラスを励起する必要があるため、局所的な温度上昇による応力、損傷にも注意が必要である。

図 1 に見られるように、フッ化物ガラスは波長 638 nm 以外に、490 nm、523 nm、610 nm、720 nm にも強い蛍光を持つ。そのため、波長 523 nm などでも容易にレーザー発振に至る⁷⁾。高効率で波長 638 nm のレーザー発振を得るためには、他の波長での発振を抑制する必要がある。特に、波長 610 nm の蛍光は、目標である 638 nm に近く、その蛍光強度は強い。波長 610 nm の光が共振器内で往復することが無いように、共振器ミラーの反射率を十分に下げることが要求される。

図 2 に設計した共振器ミラーの分光透過特性を示す。低屈折率材料には SiO_2 、高屈折率材料には TiO_2 、 Ta_2O_5 、 ZrO_2 、 Al_2O_3 を採用し、31 層の積層で設計した。励起波長 442 nm では透過率 99.8% 以上、発振波長 638 nm では透過率 0.4% (反射率 99.6%) が得られる。になった。発振を抑制したい波長 610 nm に対しては 90% 以上の透

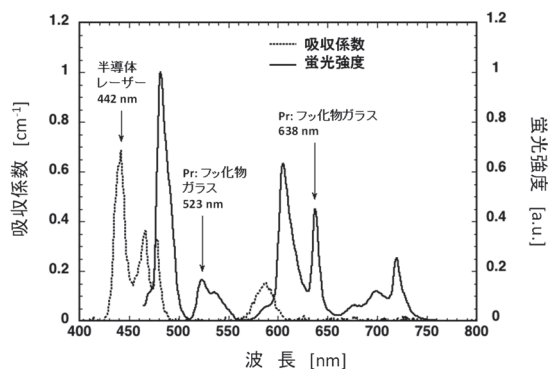


図 1 Pr 添加フッ化物ガラスの吸収・蛍光スペクトル

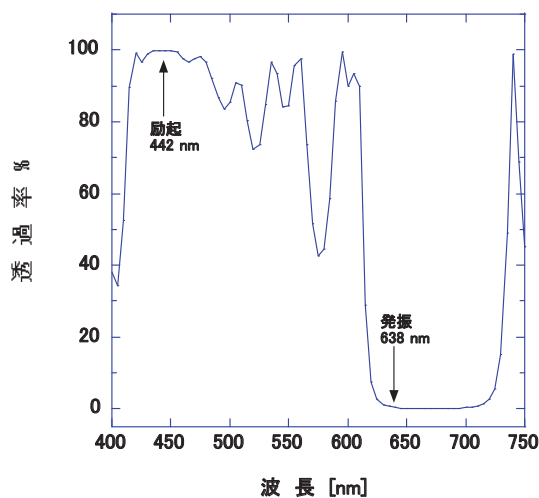


図 2 励起側ファイバ端面コーティングの分光特性 (設計値)

過率が得られ、638 nm とは 10 倍以上のコントラスト比になった。

4. 発振実験

4.1 基本波 (638 nm) のレーザー出力

レーザー媒質には、ファイバ化した Pr 添加フッ化物ガラスを用いた。ファイバはダブルクラッド構造であり、コア径 8.2 μm 、内クラッド径 25.5 μm である。また、Pr 濃度は 3000 ppm、ファイバ長 100 mm であった。コアと内クラッドの NA は 0.04 であり、その値から算出される V-number (1.61) よりシングルモードで発振可能であると判断された。ファイバの片端には図 2 で示したミラーをコートし、もう一方には反射防止コートを施し、外部出力ミラーと結合するように構成した。ファイバの励起には、波長 442 nm の半導体レーザー (出力 3.5W) 2 台を使用した。偏波合成した励起光は、集光レンズを通してファイバの内クラッド 25.5 μm 内に入射した。

図 3 に励起半導体レーザーパワーに対する基本波レーザー (638 nm) の出力特性を示す。レーザー発振しきい値 300 mW から励起半導体レーザーパワーの増加に従い、基本波出力も増加し、最大励起入力 6.6 W に対して基本波レーザー出力 2.01 W を得た。この時のスロープ効率は 36.2% であった。励起パワーが 6.0 W を超えた領域で、レーザー出力が飽和する傾向が現れた。

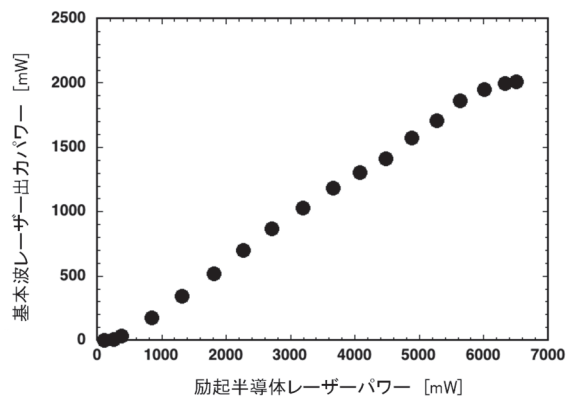


図 3 Pr 添加ファイバレーザーの入出力特性

これはファイバ全体の温度が上昇したためと考えられる。今後、高出力化に向けて、冷却効率の改善等が必要である。

4.2 第二高調波 (319 nm) 出力

可視光から紫外光を発生するための非線形光学結晶には、市販の KDP、BBO、LBO、CLBO などが候補となる。CW レーザー光は、光強度が低いため、高効率変換をするためには、大きな非線形光学定数、長い結晶長が必要になる。本研究では、比較的的非線形光学定数が高い BBO 結晶 (Type-I: 位相整合角 37.65°) を選択した。BBO 結晶に入射する基本波レーザー強度を上げるために、外部共振器を構成し、BBO 結晶は共振器内部に設置、調整した。

図 4 に励起半導体レーザーパワーに対する高調波 (319 nm) の出力特性を示す。この実験では、励起パワーを

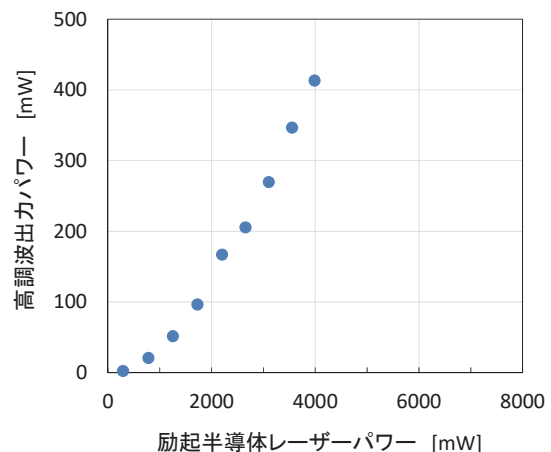


図 4 BBO 結晶を用いた高調波出力特性

4.0 W までに制限したが、UV 出力 413 mW を得た。図 3 の基本波レーザー出力と比較すると、BBO 結晶の変換効率は 30%を超え、励起半導体レーザーからの入出力効率も 10%を超えている。UV 出力 413 W でも出力飽和は見られないので、更に励起パワーを増加することにより、0.5 W の UV 光出力達成が期待できる。

5. プロトタイプ機の製作

実験室では、上述したように、基本波 (638 nm) 出力 2.0 W、高調波 (319 nm) 出力 0.4 W を達成し、UV 出力 0.5 W の達成も可能であることが分かった。これら実験室での開発研究と並行して、製品化の開発も進めている。図 5 に製品化プロトタイプ機の外観を示す。プロトタイプ機では、波長 319 nm で 100 mW を、長時間連続して、出力できることを目指している。現在、出力特性、安定性、耐環境性などのデータを取得中で、2019 年度出荷を目指している。今後、ユーザーからの評価を下にして、更なる高出力化、高性能化を行い、実用化開発を展開していく予定である。

6. まとめ

UV レーザー光源は、良好な集光特性、高い光子エネルギー特性を利用して、半導体露光、微細加工、アニーリング、分光計測など、様々な分野で広い応用が期待されている。同時に、高出力化、高効率化、小型化、高品質化など、レーザーの性能向上に対する要求も大きい。本研究で開発中の UV レーザー光源は、小型で高効率動作が可能であることが実証され、さらに高出力化へ可能性も高い。製品化をめざした開発を進める一方で、今後、高出力化に向けた開発や応用分野の開拓展開も合わせて行う予定である。

謝辞

本研究は、NEDO「高輝度・効率次世代レーザー技術開発」プロジェクトの委託を受けて行われた。

フッ化物ガラスファイバの開発、供給をして頂いた株式会社住田光学ガラス様に感謝の意を表します。

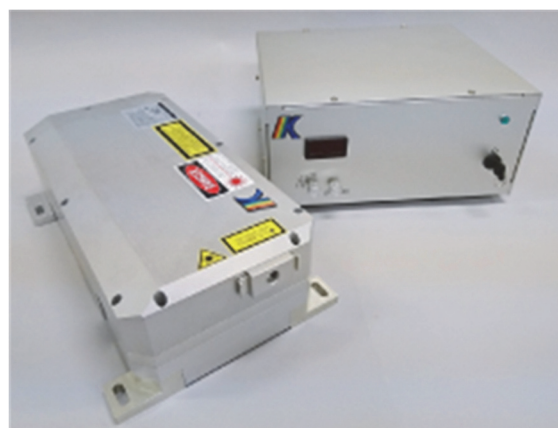


図 5 UV ファ이버レーザー装置プロトタイプ (波長 319 nm、出力 100 mW)

参考文献

- 1) T.H.Maiman, Nature 187, 493 (1960).
- 2) Y. Fujimoto, J. Nakanishi, T. Yamada, O. Ishii and M. Yamazaki: Prog. Quantum Electron. **37** (2013) 185.
- 3) J. Nakanishi, T. Yamada, Y. Fujimoto, O. Ishii and M. Yamazaki: Proc. , Conference on Lasers and Electro-Optics: 2012, CM2N.4.
- 4) V. M. Goldschmidt: Skrifter Norske Vid. Akad. (Oslo) **8** (1926) 127.
- 5) T. Iqbal, M. R. Shahriari, G. Merberg and G. H. Sigel: J. Mater. Res. **6** (1991) 401.
- 6) Y. Wang, N. Sawanobori and S. Nagahama: J. Non-Cryst. Solids **128** (1991) 322.
- 7) J. Nakanishi, Y. Horiuchi, T. Yamada, O. Ishii, M. Yamazaki, M. Yoshida and Y. Fujimoto: Opt. Lett. **36** (2011) 1836.

発 表 論 文 リ ス ト

発表論文リスト

〇レーザーエネルギー研究チーム

著者	<u>D. Li</u> , T. N. K. Phan, K. Kato, M. Nakajima, M. R. Asakawa, M. Hashida, M. Tani, W. Liu, Y. Wei,
題目	Development of Terahertz Radiation Source with Slit-Array Structure
論文誌名	IEEE Xplore, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510392
著者	K. Mori, M. Hashida, T. Nagashima, <u>D. Li</u> , K. Teramoto, Y. Nakamiya, S. Inoue, and S. Sakabe
題目	Increased energy of THz waves from a cluster plasma by optimizing laser pulse duration
論文誌名	AIP Advances 9, 015134 (2019)
著者	S. Fang, J. Xu, X. Jiang, X. Lei, P. Yin, Q. Yang, T. Guo, G. Wu, Q. Li, C. Ding, R. Yang, G. Zhao, H. Yin, L. Yue, <u>D. Li</u> , W. Wang, Y. Wei
題目	0.65 THz Sheet Beam Traveling-wave Tube Based upon Truncated Sine Waveguide
論文誌名	IEEE Xplore, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2018.8510521
著者	C. Ding, Y. Wei, Q. Li, X. Lei, S. Fang, G. Wu, R. Yang, J. Xu, W. Wang, Y. Gong, <u>D. Li</u>
題目	3-D printed Ka-band sine waveguide slow-wave structures
論文誌名	2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference proceedings、DOI: 10.1109/IVEC.2018.8391564
著者	G. Wu, G. Wu, Y. Wei, Q. Li, X. Lei, C. Ding, G. Guo, X. Niu, L. Yue, Y. Gong, <u>D. Li</u>
題目	Design of a cascade high-power source with high efficiency
論文誌名	2018 IEEE International Vacuum Electronics Conference proceeding, DOI: 10.1109/IVEC.2018.8391538
著者	P. Yin, J. Xu, S. Fang, N. Shi, G. Zhao, W. Wang, H. Yin, L. Yue, Y. Wei, <u>D. Li</u> , L. Zhang
題目	0.22THz Ridged Sine Waveguide BWO and Sheet Beam Electron Optical System
論文誌名	IEEE Xplore, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2018.8509851
著者	<u>D. Li</u> , M. Nakajima, M. Tani, J. Yang, H. Kitahara, M. Hashida, M. Asakawa, W. Liu, Y. Wei & Z. Yang
題目	Terahertz Radiation from Combined Metallic Slit Arrays
論文誌名	Scientific Reports, 9, 6804, (2019)
著者	李大治、本越伸二
題目	テラヘルツ波による絶縁材料欠陥検出研究
論文誌名	電気評論、103巻、7号、pp.19、(2018)
著者	李大治、本越伸二
題目	テラヘルツ波によるポリマー導管内部欠陥検出研究
論文誌名	電気材料技術雑誌、27巻、1号、pp.5、(2018)

〇レーザープロセス研究チーム

著者	<u>M. Fujita</u> , <u>S. Taniguchi</u> , <u>H. Chosrowjan</u> , <u>D. Li</u> , <u>S. Motokoshi</u> , <u>Y. Izawa</u> , S. Nishikata, T. Morioka, K. Hamamoto, H. Ikebuchi, Y. Ohtani, T. Kaneko, H. Daigo
題目	Zero-phonon line pumped Yb:YAG TRAM laser oscillator with direct jet impingement cooling
論文誌名	Proc. SPIE 10896, Solid State Lasers XXVIII: Technology and Devices, 108961Z (7 March 2019), Vol. 10896, 1 - 6, (2019)
著者	<u>H. Chosrowjan</u> , <u>S. Taniguchi</u> , H. Yoshida, <u>N. Miyanaga</u>
題目	Lasing Characteristics of Resonators with Retro-Reflective Elements
論文誌名	IEEE Xplore Digital Library, DOI: 10.1109/LO.2018.8435216, 73-74, (2018)

著者	谷口誠治、 <u>ハイクコスロービアン</u> 、 <u>李大治</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>井澤靖和</u> 、西方伸吾、森岡朋也、濱本浩一、池淵博、大谷雄一、金子毅、醍醐浩之
題目	ゼロフォノンライン励起Yb: YAG TRAM レーザーの出力特性
論文誌名	レーザー学会第527回研究会報告、No. RTM-18-59、29-34、(2018)
著者	<u>H. Chosrowjan</u> , <u>S. Taniguchi</u> , H. Yoshida, <u>N.Miyanaga</u>
題目	Polarization and Laser Properties of Resonators with Corner-Cube and Axicon Retro-Reflectors
論文誌名	OPIC2018, ALPS'18, The 7th Advanced Lasers and Photon Sources, ALPSp-16, 1, (2018)
著者	<u>T. Somekawa</u> , <u>S. Kurahashi</u> , J. Kawanaka, and <u>M. Fujita</u>
題目	Development of the Marine Raman Lidar System
論文誌名	SPIE Remote sensing, 10791, 10791-4, (2018)
著者	<u>T. Somekawa</u> , <u>M. Fujita</u>
題目	Raman spectroscopy measurement of CH ₄ gas and CH ₄ dissolved in water for laser remote sensing in water
論文誌名	EPJ Web of Conference, Vol. 176, 01021, (2018)
著者	K. Fujioka, X. Guo, M. Maruyama, J. Kawanaka, <u>N. Miyanaga</u>
題目	Room-temperature bonding with post-heat treatment for composite Yb:YAG ceramic lasers
論文誌名	Optical Materials, 91, 344-348 (2019); doi.org/10.1016/j.optmat.2019.03.032
著者	<u>藤田雅之</u> 、 <u>染川智弘</u> 、 <u>宮永憲明</u> 、 <u>兒玉了祐</u>
題目	建築部材等のレーザー加工
論文誌名	レーザー学会第527回研究会報告、RTM-18-56、pp.13-17、(2018)
著者	<u>藤田雅之</u>
題目	短パルスレーザーを用いた炭素繊維強化複合材の微細加工技術の開発
論文誌名	天田財団機関誌「FORM TECH REVIEW 2017」、27巻、pp.89-94、(2018)

○レーザー計測研究チーム

著者	保田尚俊、御崎哲一、 <u>島田義則</u> 、江本茂夫、金田道寛、武岡学、田中幸司、石田信孝、高山宜久、曾我寿孝
題目	レーザーを用いたコンクリート構造物の非接触健全性評価
論文誌名	土木学会論文集F1(トンネル工学)、74(1)、pp.58-69、(2018)
著者	長谷川登、岡田大、近藤修司、三上勝大、北村俊幸、錦野将元、河内哲哉、 <u>倉橋慎理</u> 、 <u>島田義則</u>
題目	レーザー打音法の道路トンネルにおける実証試験について
論文誌名	レーザー学会第523回研究会報告、18巻、21号、pp.19-22、(2018)
著者	<u>倉橋慎理</u> 、 <u>オレグコチャエフ</u> 、 <u>島田義則</u>
題目	レーザー超音波リモートセンシングによる構造物検査
論文誌名	超音波TECHNO、vol.30, No.6、pp.55、(2018)
著者	<u>島田義則</u> 、 <u>オレグコチャエフ</u> 、 <u>倉橋慎理</u> 、保田尚俊、御崎哲一、高山宜久、曾我寿孝
題目	レーザによるコンクリート剥離検査技術開発
論文誌名	電気学会 論文誌C、Vol.139, No.2、pp.131-136、(2019)
著者	<u>島田義則</u>
題目	レーザーを用いたコンクリート欠陥検出の技術開発
論文誌名	検査技術、2019年1月、pp.49-52、(2019)

○レーザーバイオ化学研究チーム

著 者	A. Nueangaudom, K. Lugsanangarm, S. Pianwanit, S. Kokpol, N. Nunthaboot, F. Tanaka, <u>S. Taniguchi</u> , <u>H. Chosrowjan</u>
題 目	Comparative Study on the Mechanism of Photoinduced Electron Transfer from Tryptophan 168 to Excited Flavin in T169S and Wild-type Pyranose 2-Oxidase
論文誌名	ACS Omega, 4, pp.593-605, (2019)

○レーザー技術開発室

著 者	Y. Honda, <u>S. Motokoshi</u> , T. Jitsuno, K. Fujioka, <u>M. Nakatsuka</u> , M. Yoshida, T. Yamada, J. Kawanaka, <u>N. Miyanaga</u>
題 目	Temperature dependent fluorescence decay and energy transfer in Nd/Cr:YAG ceramics
論文誌名	Optics materials, Vol.90, pp.215-219, (2019)
著 者	本越伸二
題 目	石英ガラスのレーザー損傷
論文誌名	プラズマ・核融合学会誌、94巻、10号、pp.501-504、(2018)

国際学会発表リスト

○レーザーエネルギー研究チーム

著 者	<u>D. Li</u> , K. Sugimoto, S. Miyake, M. R. Asakawa, K. Kato, T. N. K. Phan, M. Nakajima, M. Hashida,
題 目	Research on Terahertz Radiation from Femtosecond Electron Bunches
会議名	The 11th Asia-Pacific Laser Symposium, 28-31 May, 2018, Xi'an, China
著 者	<u>D. Li</u> , T. N. K. Phan, K. Kato, M. Nakajima, M. R. Asakawa, M. Hashida, M. Tani, W. Liu, and
題 目	Development of Terahertz Radiation Source with Slit-Array Structure
会議名	43rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz waves, 9-14 September, 2018,

○レーザープロセス研究チーム

著 者	<u>H. Chosrowjan</u> , <u>S. Taniguchi</u> , H. Yoshida, <u>N. Miyanaga</u>
題 目	Polarization and Laser Properties of Resonators with Corner-Cube and Axicon Retro-Reflectors
会議名	OPIC2018, ALPS'18, The 7th Advanced Lasers and Photon Sources International Conference, 23-27, April, 2018, Yokohama, Japan
著 者	<u>H. Chosrowjan</u> , <u>S. Taniguchi</u> , H. Yoshida, <u>N. Miyanaga</u>
題 目	Lasing Characteristics of Resonators with Retro-Reflective Elements
会議名	18th International Conference Laser Optics 2018 (ICLO2018), 4 - 8 June, 2018, St. Petersburg, Russian Federation
著 者	<u>M. Fujita</u> , M. Yoshida, <u>N. Miyanaga</u>
題 目	Formation of laser-induced periodic surface structure on transparent materials with metal coating by femtosecond lasers
会議名	19th International Symposium on LASER PRECISION MICROFABRICATION, 25-28 June 2018, Edinburgh, UK
著 者	<u>T. Somekawa</u> , <u>S. Kurahashi</u> , <u>M. Fujita</u> , J. Kawanaka
題 目	Development of the Marine Raman Lidar System
会議名	SPIE Remote Sensing, 10-13 September 2018, Berlin, Germany
著 者	<u>M. Fujita</u> , <u>T. Somekawa</u> , <u>N. Miyanaga</u> , R. Kodama
題 目	Cutting and Welding of Construction Materials
会議名	37th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 14-18 October 2018, Orlando, USA
著 者	<u>M. Fujita</u> , <u>S. Taniguchi</u> , <u>H. Chosrowjan</u> , <u>D. Li</u> , <u>S. Motokoshi</u> , <u>Y. Izawa</u> , S. Nishikata, T. Morioka, K. Hamamoto, H. Ikebuchi, Y. Ohtani, T. Kaneko, <u>H. Daigo</u>
題 目	Zero-phonon line pumped Yb:YAG TRAM laser oscillator with direct jet impingement cooling
会議名	SPIE. Photonics West LASE, 3-7 February 2019, San Francisco, USA

○レーザー計測研究チーム

著 者	M. Nishikino, N. Hasegawa, T. Kitamura, H. Okada, S. Kondo, K. Mikami, <u>S. Kurahashi</u> , <u>Y. Shimada</u> , T. Kawachi
題 目	Demonstration of High-speed Defect Inspection Technique for Simulated Tunnel using Laser Hammering Method
会議名	OPIC2018 LSSE2018, 2018, April 24-27, Yokohama, Japan

○バイオ化学研究チーム

著 者	T. Saiki, R. Ishi, <u>S. Taniguchi</u>
題 目	Recyclable Air Fuel Cells Using Sintered Nanopastes with reduced Zn nanoparticles prepared by Pulse Laser Ablation in Liquids
会議名	Laser Solutions for Space and the Earth 2018, 24-27 April, 2018,Yokohama,Japan

○レーザー技術開発室

著 者	<u>S. Motokoshi</u> , Y.Takemura, H.Ogawa, M.Yoshimura, K.Fujioka, T.Jitsuno, M.Yoshida
題 目	Study of laser-induced damage and defect by multiple pulses irradiation for silica glasses
会議名	Pacific-rim Laser Damage 2018, 25-26 April 2018,Yokohama,Japan
著 者	K.Yoshida, T.Okamoto, T.Mikami, H.Yoshida, J.Kawanaka, <u>N.Miyanaga</u> , <u>S.Motokoshi</u> , T.Jitsuno
題 目	Development of adaptively mixed thin film (AFTF) deposited by a dielectric material and a plastic
会議名	Laser damage 2018, 23-26 Sep., 2018,Boulder,USA
著 者	T. Jitsuno, H. Yoshida, J. Kawanaka, <u>N. Miyanaga</u> , <u>S. Motokoshi</u> , T. Okamoto, T. Mikami, K. Yoshida
題 目	High-reflectance mirror using a porous MgF2 coating
会議名	Laser damage 2018, 23-26 Sep., 2018,Boulder,USA
著 者	<u>S. Motokoshi</u> , K. Fujioka, T. Jitsuno, M. Yoshimura
題 目	A study of laser-induced damage and color center formation by multiple laser-pulses irradiation
会議名	Laser Application Conference, 7-8 November 2018,Boston,US

国内学会発表リスト

○レーザーエネルギー研究チーム

著 者	李大治、中嶋誠、楊金峰、谷正彦
題 目	高効率テラヘルツ電磁波放射体研究
会議名	応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月20日、名古屋国際会議場
著 者	李大治、Phan ThanhNhat Khoa、加藤康作、中嶋誠、北原英明、谷正彦、楊金峰
題 目	新型テラヘルツ電磁放射研究
会議名	GHz～THz帯発振源の開発と応用研究会、2019年3月4日、核融合科学研究所

○レーザープロセス研究チーム

著 者	藤田雅之
題 目	短パルスレーザーを用いた炭素繊維強化複合材の微細加工技術の開発
会議名	天田財団第二回レーザプロセッシング助成研究成果発表会、2018年4月25日、パシフィコ横浜アネックスホール
著 者	藤田雅之
題 目	短パルスレーザーを用いた炭素繊維強化複合材の微細加工技術開発
会議名	千葉県複合材料技術研究会特別講演会、2018年7月30日、千葉県産業支援技術研究所天台庁舎
著 者	藤田雅之
題 目	短パルスレーザーを用いた炭素繊維複合材料の微細加工
会議名	JPC関西5周年記念講演会、2018年7月31日、大阪大学レーザー科学研究所
著 者	藤田雅之
題 目	パルスレーザー加工の基礎、シミュレーションで見るパルスレーザー加工、CFRPのレーザー加工事例
会議名	レーザ加工の基礎と最適加工技術および量産における品質保証への応用セミナー、2018年8月29日、日本テクノセンター研修室
著 者	染川智弘、倉橋慎理、河仲準二、藤田雅之
題 目	海上ラマンライダー技術の開発
会議名	第36回レーザセンシングシンポジウム、2018年9月7日、茨城県立県民文化センター
著 者	櫻井俊光、染川智弘、松下拓樹、高橋丞二、井澤靖和、松澤勝
題 目	超短パルスレーザーによる道路構造物に利用される金属の撥水性付与技術に関する研究
会議名	第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月18日、名古屋国際会議場
著 者	染川智弘、倉橋慎理、河仲準二、藤田雅之
題 目	ラマンライダーによる海中モニタリング技術の開発
会議名	第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月19日、名古屋国際会議場
著 者	谷口誠治、ハイク コスロービアン、李大治、本越伸二、藤田雅之、井澤靖和、西方伸吾、森岡朋也、濱本浩一、池淵博、大谷雄一、金子毅、井上直樹、醍醐浩之
題 目	ゼロフォノンライン励起Yb:YAG TRAMレーザーの出力特性
会議名	第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月19日、名古屋国際会議場
著 者	ハイク コスロービアン、谷口誠治、宮永憲明
題 目	コーナキューブとアキシコンレトロフレクター共振器のレーザー特性
会議名	第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月20日、名古屋国際会議場
著 者	藤田雅之
題 目	ロボットフォトニクスによる産業創出
会議名	第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月20日、名古屋国際会議場

著者	藤田雅之
題目	社会を変えるパワーレーザー ～レーザー加工からインフラ診断まで～
会議名	パワーレーザー キックオフシンポジウム、2018年11月1日、銀杏会館
著者	藤田雅之、 <u>染川智弘</u> 、 <u>宮永憲明</u> 、 <u>兒玉了祐</u>
題目	建築部材等のレーザー加工
会議名	レーザー学会第527回研究会、2018年12月11日、高知市文化プラザかるぽーと
著者	<u>谷口誠治</u> 、 <u>ハイクコスロービアン</u> 、 <u>本越伸二</u> 、 <u>李大治</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>井澤靖和</u>
題目	ゼロフォノンライン励起Yb:YAG TRAMレーザーの出力特性
会議名	レーザー学会第527回研究会「新レーザー技術」、2018年12月11日、高知市文化プラザかるぽーと
著者	<u>染川智弘</u> 、 <u>倉橋慎理</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>河仲準二</u>
題目	ラマンライダーによる海上観測
会議名	レーザー学会学術講演会第39回年次大会、2019年1月13日、東海大学高輪キャンパス
著者	<u>染川智弘</u> 、 <u>倉橋慎理</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>河仲準二</u>
題目	ラマンライダーによる海上観測
会議名	第44回リモートセンシングシンポジウム、2019年3月8日、千葉工業大学
著者	<u>染川智弘</u> 、 <u>ハイクコスロービアン</u> 、 <u>谷口誠治</u> 、 <u>李大治</u>
題目	共鳴ラマンライダーに向けた深紫外波長可変光源の評価
会議名	第66回応用物理学会春季学術講演会、2019年3月9日、東京工業大学大岡山キャンパス
著者	<u>谷口誠治</u> 、 <u>ハイク コスロービアン</u> 、 <u>李大治</u> 、 <u>本越伸二</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、 <u>井澤靖和</u> 、 <u>西方伸吾</u> 、 <u>森岡朋也</u> 、 <u>濱本浩一</u> 、 <u>池淵博</u> 、 <u>大谷雄一</u> 、 <u>金子毅</u> 、 <u>醍醐浩之</u>
題目	水衝突噴流冷却を用いたYb:YAG TRAMレーザーの出力特性
会議名	第66回応用物理学会春季学術講演会、2019年3月9日、東京工業大学大岡山キャンパス

○レーザー計測研究チーム

著者	長谷川登、岡田大、近藤修司、三上勝大、北村俊幸、錦野将元、 <u>倉橋慎理</u> 、 <u>島田義則</u>
題目	レーザー打音法の道路トンネルにおける実証試験について
会議名	レーザー学会第523回研究会「レーザー応用」、2018年9月3日、ホテルグリーンピア南阿蘇
著者	<u>島田義則</u>
題目	ロボットフォトリクスによるインフラ診断
会議名	光とレーザーの科学技術フェア2018併設セミナー／光フォーラムサミット、2018年11月14日、科学技術館
著者	北村俊幸、岡田大、近藤修司、 <u>倉橋慎理</u> 、三上勝大、長谷川登、 <u>島田義則</u> 、錦野将元
題目	道路トンネル検査用レーザー打音装置の開発
会議名	レーザー学会学術講演会第39回年次大会、2019年1月12日、東海大学高輪キャンパス
著者	<u>倉橋慎理</u> 、北村俊幸、岡田大、三上勝大、近藤修司、長谷川登、錦野将元、河内哲哉、 <u>島田義則</u>
題目	レーザーを用いたコンクリート構造物内部欠陥高速検査技術の開発
会議名	レーザー学会学術講演会第39回年次大会、2019年1月13日、東海大学高輪キャンパス
著者	<u>倉橋慎理</u> 、北村俊幸、岡田大、三上勝大、近藤修司、長谷川登、錦野将元、河内哲哉、 <u>河中準二</u> 、 <u>島田義則</u>
題目	レーザーを用いたコンクリート構造物内部欠陥 検査手法の高速化と屋外検査装置の開発
会議名	平成31年電気学会全国大会、2019年3月14日、北海道科学大学
著者	御崎哲一、保田尚俊、 <u>島田義則</u>
題目	トンネル覆工コンクリートにおけるレーザー計測データの傾向
会議名	土木学会全国大会、2018年8月31日、北海道大学

○レーザーバイオ化学研究チーム

著 者	松田晶平、中島信昭、横山啓一、八ツ橋知幸、 <u>ハイク コスロービアン</u> 、 <u>谷口誠治</u> 、 <u>染川智弘</u>
題 目	アルコール溶液中での多光子励起による Eu^{3+} の光還元反応
会議名	2018年光化学討論会、2018年9月7日、関西学院大学上ヶ原キャンパス

○理論・シミュレーションチーム

著 者	<u>古河裕之</u> 、山中千博、近藤斎、杉浦繁貴
題 目	斜め磁場効果の導入、異方性を持つ電気伝導度の導入等の新しいシミュレーション
会議名	地震先行現象研究会、2018年12月24日、コンポン研究所
著 者	<u>古河裕之</u> 、 <u>大道博行</u>
題 目	レーザー加工時に発生するエアロゾルに関する理論的解析
会議名	原子力学会シンポジウム、2019年3月20日、茨城大学水戸キャンパス

○レーザー技術開発室

著 者	小川遼、 <u>本越伸二</u> 、吉村政志、實野孝久、藤岡加奈、今西正幸、森勇介
題 目	繰返しパルス照射による石英ガラスのレーザー損傷の温度依存性
会議名	第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月19日、名古屋国際会議場
著 者	村上太朗、藤岡加奈、 <u>本越伸二</u> 、 <u>宮永憲明</u> 、山本和久
題 目	$\text{Cr}^{3+}/\text{Nd}^{3+}/\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$ セラミック粉体におけるエネルギー移乗過程の解析
会議名	第79回応用物理学会秋季学術講演会、2018年9月19日、名古屋国際会議場
著 者	<u>本越伸二</u>
題 目	高出力レーザー用光学薄膜の現状と今後の期待
会議名	光交流会オプトフォーラム、2018年10月17日、コリサーチ本社
著 者	<u>本越伸二</u>
題 目	高出力レーザー用光学薄膜とレーザー損傷
会議名	第30回光学薄膜研究会、2018年11月16日、機械振興会館
著 者	<u>本越伸二</u> 、藤岡加奈、吉村政志、實野孝久
題 目	高耐力光学薄膜とその応用
会議名	レーザー学会学術講演会第39回年次大会、2019年1月12日、東海大学高輪キャンパス

事業報告書

事業報告書

(平成 30 年度)

概 況

レーザー技術総合研究所は、レーザー及びその関連産業の振興を図り、我が国の学術の進展と科学技術の発展に貢献することを責務とし、レーザーとその応用に関する研究開発、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 30 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 30 年度の主な成果】

産業用レーザー開発プロジェクト研究においては、kW 級大出力固体レーザーの開発を進め、1kW を越える CW レーザー出力を実証したほか、高効率 UV レーザー光源の開発や、レーザー光を遠距離伝送する際に受ける大気擾乱による影響を補償する技術の開発、ビーム結合技術に関する研究等を実施した。

コンクリート構造体の健全性評価技術開発プロジェクト研究では、トンネル覆工コンクリートを対象として、構造物の経年劣化を高速で検査し、その健全性を評価する技術の開発を進め、道路トンネルにおける実証実験に成功した。

レーザーエネルギー分野においては、レーザーエネルギーの新しい応用分野の開拓を目指し、レーザーコンプトン散乱 γ 線の高度化や新型テラヘルツ光源の開発に関する研究等を実施した。

レーザープロセス分野では、短パルスレーザーを用いて金属・半導体等各種材料の加工特性に関する研究を進めるとともに、建築業界へのレーザー技術の普及を目指し、インフラ構造物へのレーザー加工適用性に関する研究を行った。また、レーザーによるナノ粒子生成技術の研究を進めた。

レーザー計測分野においては、インフラ構造物の健全性を診断する技術の高度化を進めるとともに、表面付着物や溶液の成分分析を目標としたレーザー誘起ブレークダウン分光法等を利用した高感度検出技術の研究や、レーザーリモートセンシングを利用した大気や海中環境の評価技術の研究等を実施した。

レーザーバイオ化学分野では、創薬、光機能素子などへの応用を目的とし、蛋白質・酵素の機能解明および薬剤による機能抑制に関する研究を進めた。

理論・シミュレーション分野においては、レーザーと物質の相互作用に関する理論的研究を幅広く行い、各研究チームが進める実験研究を支援した。また、地震先行現象が電離層に及ぼす効果をプラズマ物理の観点から評価した。

レーザー技術開発室においては、高出力レーザーとその応用システムに共通して利用される光学材料や光学部品の高性能化を目的に、光学素子の高耐力化研究や、光学素子メーカー等からの依頼によるレーザー損傷評価試験等を実施した。

普及啓発活動では、研究成果報告会の開催(7月、11月)、機関誌「レーザークロス」の発行(月刊)、ホームページおよびメール配信による情報発信、レーザーEXPO 2018への出展(4月)などを実施し、研究成果等の積極的な発信に努めた。

1. 役員等の異動

(理事)

年月日	就 任	退 任
H30.4.2	野田 英智	小森 憲昭
H30.5.2	安食 和英	宮口 仁一
H30.5.2	各務 浩文	山本 俊二
H30.5.2	佐藤 俊志	豊留 昭宏
H30.5.2	外井 康宏	中田 洋介
H30.6.26 (改選)	大石 富彦	
H30.6.26 (改選)	井澤 靖和	
H30.6.26 (改選)	中塚 正大	
H30.6.26 (改選)	安食 和英	
H30.6.26 (改選)	井上 哲也	
H30.6.26 (改選)	上原 拓也	
H30.6.26 (改選)	各務 浩文	
H30.6.26 (改選)	北島 尚史	
H30.6.26 (改選)	兒玉 了祐	
H30.6.26 (改選)	佐藤 俊志	
H30.6.26 (改選)	野田 英智	
H30.6.26 (改選)	外井 康宏	

(監事)

年月日	就 任	退 任
H30.5.2	福田 浩之	小林 英生

(評議員)

年月日	就 任	退 任
H30.11.2	重松 昌行	礒嶋 茂樹

2. 役員会等の開催

(1)理事会

第 26 回理事会 (平成 30 年 4 月 18 日 みなし決議)

決議事項

- ・臨時の第 20 回評議員会の招集及び目的である事項

報告事項

- ・第 19 回評議員会の決議内容

第 27 回理事会 (平成 30 年 5 月 30 日 関電会館)

決議事項

- ・平成 29 年度事業報告書
- ・平成 29 年度財務諸表
- ・内閣府への定期報告
- ・定時評議員会の日時及び場所ならびに目的である事項

報告事項

- ・職務執行状況の報告
- ・第 20 回評議員会（臨時）の決議内容

第 28 回理事会 (平成 30 年 7 月 12 日 みなし決議)

決議事項

- ・理事長及び副理事長並びに常務理事の選定

報告事項

- ・第 21 回評議員会の決議内容

第 29 回理事会 (平成 30 年 10 月 23 日 みなし決議)

決議事項

- ・臨時の第 22 回評議員会の招集及び目的である事項

第 30 回理事会 (平成 31 年 3 月 11 日 関電会館)

決議事項

- ・平成 31 年度事業計画書
- ・平成 31 年度収支予算書及び資金調達及び設備投資の見込みについて
- ・臨時の第 23 回評議員会の招集及び目的である事項

報告事項

- ・職務執行状況の報告
- ・第 22 回評議員会（臨時）の決議内容

(2)評議員会

第 19 回評議員会 (平成 30 年 4 月 2 日 みなし決議)

決議事項

- ・理事の選任
- 報告事項
 - ・第 25 回理事会（臨時）の決議内容
- 第 20 回評議員会（平成 30 年 5 月 2 日 みなし決議）
- 決議事項
 - ・理事の選任
 - ・監事の選任
- 報告事項
 - ・第 26 回理事会（臨時）の決議内容
- 第 21 回評議員会（平成 30 年 6 月 22 日 関電会館）
- 決議事項
 - ・平成 29 年度財務諸表の承認
 - ・改選期に伴う理事の選任
- 報告事項
 - ・第 27 回理事会の決議内容
 - ・平成 29 年度事業報告
- 第 22 回評議員会（平成 30 年 11 月 2 日 みなし決議）
- 決議事項
 - ・評議員の選任
- 報告事項
 - ・第 28 回理事会（臨時）の決議内容
 - ・第 29 回理事会（臨時）の決議内容

3. 賛助会員状況

平成 30 年度末会員数 40 社 82.5 口

4. 学会および論文発表

学会発表 52 件（国内：36 件、国外：16 件）
論文発表 37 件（国内：26 件、国外：11 件）

5. 特許等出願件数

平成 30 年度出願件数 5 件
平成 30 年度末特許保有件数 28 件（登録済：19 件、公開済：20 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】

産業用レーザーの高性能化のため、レーザーの大出力化、短波長化に取り組むとともに、波面制御に関する研究を開始した。

(1) 大出力レーザーの開発

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寄与するため、kW 級大出力固体レーザーの開発を進め、1kW を超える CW レーザー出力を実証し、さらなる高出力化の検討を行った。

(2) 高効率 UV レーザー光源の開発

可視域で発振する Pr 添加フッ化物ファイバーレーザーを用いた高効率・高輝度紫外光源の開発を進め、ファイバー端面コート of 反射率の向上を図り、励起 LD の結合効率を改善することにより、中間目標値を達成した。

(3) 波面補償技術の開発

レーザー光を遠距離伝送する際に受ける大気擾乱による影響を補償するため、レーザー光の波面を制御する可変形鏡の開発に着手した。

(4) ビーム結合に関する研究

レーザーの大出力化に有効なビーム結合技術に関し、コーナークューブや円錐レンズを用いた光共振器を構築し、出力レーザーの共振器内コヒーレントビーム結合効果を検証した。

〔関連する主な受託・共同研究〕

- ・ゼロフォノンライン励起新型高出力 Yb:YAG セラミックレーザ
- ・高速移動物体への遠距離・高強度光伝送のための予測的波面制御の開発
- ・アキシコンを用いた共振器内コヒーレントビーム結合技術開発と応用
- ・革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発

【コンクリート構造体の健全性評価技術開発プロジェクト研究】

トンネル覆工コンクリートを対象として、コンクリート構造体の経年劣化を高速で検査し、健全性を評価する技術開発を進めた。当研究所が開発したコンクリート

高速診断技術と量子科学技術研究開発機構が開発した高繰り返しレーザー技術を組み合わせた車載型レーザー高速検査装置を構築し、大阪府や奈良市の道路トンネルにおいて実証実験を行った。浮き欠陥の高速検査に成功し、ハンマーによる打音検査との整合性もよいことを確認した。

〔関連する主な受託・共同研究〕

- ・レーザーを活用した高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の研究開発

【レーザーエネルギー研究チーム】

レーザーエネルギーの新しい応用分野を開拓するため、テラヘルツ波の光源開発と、電力設備等の診断や検査への適用に関する研究を行った。

(1) レーザーコンプトン散乱 γ 線の高度化と核変換に関する研究

コンプトン散乱 γ 線の高輝度化をめざして多重レーザービームの発生機構を検討した。エネルギー回収型加速器との組合せで γ 線出力の改善が期待できる。

(2) テラヘルツ波の発生と応用に関する研究

金属周期構造とメタマテリアルの複合構造体からの電磁波放射機構を理論とシミュレーションにより解析し、高強度、単色テラヘルツ波発生の可能性を示した。複合構造体を試作し、電磁モードの検証実験や電子線駆動による放射実験を実施した。

〔関連する主な受託・共同研究〕

- ・テラヘルツ光源の開発研究
- ・複合放射構造体を用いた放射光発生 of 基礎研究

【レーザープロセス研究チーム】

レーザー加工特性の評価試験、基礎技術開発を行うとともに、レーザープロセス技術の高度化に資する基盤技術を開発した。

(1) 短パルスレーザー加工に関する研究

フェムト秒からナノ秒領域のパルスレーザーを用いて金属・半導体等各種材料の加工特性に関する研究を進めた。

(2) インフラ構造物へのレーザー加工適用性に関する研究

建築業界へのレーザー技術の普及を目指し、CW ファイバーレーザーを用いたインフラ構造物の切断、補修、表面クリーニングに関する研究を行った。

(3) レーザーによるナノ粒子生成技術の研究

高融点材料のナノ粒子作製技術の研究を進めるとともに、核廃棄物処理を目的

としたアクチノイドイオンの液中レーザー還元技術の基礎研究を開始した。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・インフラ構造物へのレーザー加工適用性の研究

【レーザー計測研究チーム】

高架橋や建築物などのインフラ構造物の健全性評価や環境中の微量物質分析に適用できる新しいレーザー計測技術の開発研究を進めている。

(1) 非破壊診断技術の高度化研究

インフラ構造物の欠陥検出に利用するレーザー干渉計のロバスト化を進め、鉄道トンネルなどの実環境で安定した振動計測が可能な装置を構築し、現場試験でその有効性を確認した。また、AIを取り入れた欠陥判定アルゴリズムの構築を進めた。

(2) レーザーを用いた成分分析技術の研究

表面付着物や溶液の成分分析を目標として、レーザー誘起ブレイクダウン分光法、エリプソメトリーやラマン分光法を利用した高感度検出技術の基礎的・開発的研究を実施した。また、共鳴ラマン効果を用いた多種多様な有害物質の遠隔計測をめざして、深紫外波長可変光源を利用した共鳴ラマン効果の研究を開始した。

(3) レーザーを用いた環境評価技術の研究

レーザーリモートセンシングを利用して、大気中の有毒エアロゾル・ガスの遠隔検知や、海底開発における海中環境影響評価に向けた研究を実施するとともに、有毒ガスの漏えいモニタリングなどの産業応用に向けた研究を実施した。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・レーザーによる補強橋梁床版欠陥部のリモートセンシング技術開発と実用化
- ・海底開発における環境影響評価に向けた水中ライダーシステムの開発
- ・レーザーを用いた水中油検出可能性の検討
- ・コンクリート構造物表面の遠隔塩分濃度評価手法の開発
- ・レーザーによる安定液の自動計測に関する研究
- ・フェムト秒レーザーを用いたレーザー誘起ブレイクダウン分光法に関する研究
- ・共鳴ラマン効果による大気中微量有害物質遠隔計測技術の開発

【レーザーバイオ化学研究チーム】

創薬、光機能素子などへの応用を目的とし、蛋白質・酵素の機能解明および薬剤による機能抑制に関する研究を進めた。

(1) 薬剤分子によるフラビン酵素の機能抑制に関する研究

統合失調症などの要因となるヒト由来フラビン酵素について、薬剤分子によってその機能が抑制される過程を蛍光分光計測により調べた。

(2) 時間分解レーザー計測による光合成関連酵素の機能研究

光合成初期過程で触媒として働くフェレドキシン:NADP⁺還元酵素の機能が、環境条件で変化する様子を明らかにするため、時間分解蛍光計測により蛋白構造の観測を試みている。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・超高速レーザー分光によるフェレドキシン:NADP還元酵素の構造予測と反応解析

【理論・シミュレーションチーム】

レーザーアブレーションやプラズマ生成など、レーザーと物質の相互作用に関する理論的研究を幅広く行い、各研究チームが進める実験研究を理論・シミュレーション面から支援した。また、地震先行現象が電離層に及ぼす効果をプラズマ物理の観点から評価した。

(1) 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

アブレーション過程の中で取扱の困難であった相変化、応力、固体中の圧力伝搬、残留応力生成などを含めて、大気中や水中のレーザーアブレーション過程を記述するシミュレーションコードの開発を継続して進めている。コードの精緻化、多次元化を図り、レーザー加工性能の評価に適用して産業界に有用なデータを提供した。

(2) レーザー核融合炉設計に関する理論的研究

液体壁型レーザー核融合炉内部の金属蒸気の動的挙動を解析し、レーザー核融合炉設計技術の研究進展に貢献した。

(3) 地震先行現象の物理メカニズム研究

地震の発生に先立って起こる地震先行現象が電離層に及ぼす効果をプラズマ物理の観点から検討し、巨大地震先行現象の解明をめざしている。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・地震先行現象の物理メカニズム研究

【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して利用される光学材料や光学部品の高性能化をめざして基礎技術開発を行っている。レーザー損傷評価試験を実施し、「高耐力光学素子研究会」を通じて、レーザー損傷しきい値のデータベース構築を

進めた。

(1) 光学素子の高耐力化研究

紫外レーザー光を石英ガラスに照射すると内部に欠陥が形成され、レーザー損傷の原因となるが、ガラスを加熱することにより、欠陥の生成に伴う透過率低下が抑制され、レーザー損傷しきい値が最大 1.3 倍向上することを確認した。

(2) レーザー損傷評価試験

光学素子メーカー等からの依頼により、18 件のレーザー損傷評価試験を行った。また、第 19 回、20 回レーザー損傷しきい値データベース化試験で、波長 1064nm 用光学素子に対して、繰返し 5Hz パルスによる 100-on-1 試験を行った。

2. 各種研究会活動

当研究所の研究開発活動を効率的・発展的に推進するため、関連各界の意見・情報収集の場として、次のような研究会を開催し、当研究所の事業の活性化を図った。

[実施した主な研究会]

- ・次世代レーザー技術応用研究会
- ・高耐力光学素子研究会

3. 産学官連携の推進

ホームページ上の技術相談窓口等で受け付けた、企業の技術開発・改良に対する支援、光学部品の損傷評価、微細加工、超音波診断など 70 件以上の相談・要望に対し、積極的に取り組んだ。

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

学界との連携では、大阪大学レーザー科学研究所等との共同研究をはじめ、国内外の大学と積極的に連携を図りながら研究を行った。

産学官の連携では、企業、大学等と連携を図りながら、国や(国)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)などが主導する産学官連携プロジェクト研究に参画した。

4. 関連団体との連携

(国)日本原子力研究開発機構(JAEA)、(国)量子科学技術研究開発機構(QST)、(財)光産業技術振興協会(OITDA)、(財)大阪科学技術センター(OSTEC)、(財)近畿高エネルギー加工技術研究所(AMPI)、(社)レーザー学会(LSJ)、(社)レーザープラットフォーム協議会(LPF)、(特非)光科学アライアンス、(特非)日本フォトニクス協議

会関西支部(JPC 関西) など関連団体とも積極的に情報交流や人的交流を図り、これらの団体と連携してわが国のレーザー技術の発展と普及に寄与する活動を推進した。

5. 公募研究

国等が公募を行っている各種競争的研究資金の獲得に努め、本年度は以下の採択課題に参加した。

- (1) レーザーによる補強橋梁床版欠陥部のリモートセンシング技術開発と実用化
((国) 科学技術振興機構 研究成果最適展開支援プログラム A-STEP 産学共同促進ステージ ハイリスク挑戦タイプ)
- (2) レーザーを活用した高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の研究開発
((国) 科学技術振興機構 戦略的イノベーション創造プログラム SIP)
- (3) 革新的小型・高効率 UV レーザー光源の開発((国) 新エネルギー・産業技術総合開発機構高輝度・高効率次世代レーザー技術開発)
- (4) ゼロフォノンライン励起新型高出力 Yb:YAG セラミックレーザ(安全保障技術研究推進制度)
- (5) 共鳴ラマン効果による大気中微量有害物質遠隔計測技術の開発(安全保障技術研究推進制度)
- (6) 高速移動物体への遠距離・高強度光伝送のための予測的波面制御の研究(安全保障技術研究推進制度)

6. 受託研究

展示会、ホームページなどを通じて受託研究の広報を行い、技術相談窓口等で依頼を受け、レーザー損傷評価試験も含め 33 件の受託研究を実施した。(公募によるものを除く。)

7. 補助事業

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

- (1) グラフェン表面プラズモンを用いたテラヘルツ広帯域電磁波発振器と増幅器の研究開発(基盤研究 C)
- (2) 海底開発における環境影響評価に向けた水中レーザーリモートセンシング手法の開発(基盤研究 B)
- (3) アキシコンを用いた共振器内コヒーレントビーム結合技術開発と応用(基盤研

究 C)

- (4) 超高速レーザー分光によるフェレドキシン：NADP 還元酵素の構造予測と反応解析(基盤研究 C)
- (5) インフラ構造物へのレーザー加工適用性の研究(天田財団 一般研究開発助成)
- (6) 高効率テラヘルツ光源を目指す新型電磁放射原理の実験検証(双葉電子記念財団 自然科学研究助成)

Ⅱ 普及啓発活動事業

レーザー技術の普及啓発活動として、情報の発信・提供、人材交流などの事業を以下のとおり実施した。

1. 人材の育成

大学、関連研究機関、企業などとの共同研究や技術相談を通じ、若手研究員の技術指導を行うことによりレーザー技術に関する人材育成に貢献した。

2. 研究成果報告会

大阪ならびに東京にて、平成 29 年度の研究成果を報告する研究成果報告会(ILT2018)を開催した。

- ・ 7 月 20 日 千里ライフサイエンスセンター (大阪)
- ・ 11 月 13 日 科学技術館 (東京)

3. 機関誌等の発行

機関誌「Laser Cross」の月 1 回の発行および電子メールでの情報配信により、当研究所の研究成果やレーザーに関する国内外の研究開発動向など、幅広い情報の提供を行った。

4. 展示会への出展

関係団体が主催する光技術やレーザーに関する展示会へ積極的に出展し、当研究所の広報活動に努めた。

- ・ レーザーEXPO 2018 4 月 25 日～27 日 パシフィコ横浜 (神奈川)
- ・ 第 3 回レーザー科学技術フェア 11 月 13 日～15 日 科学技術館 (東京)

5. 国際交流

海外のレーザー技術の開発動向や産業応用に関連した情報を収集するとともにレーザー関連団体や関係研究機関との情報交換・人材交流を図るため、計 6 の国際会議へ参加した。

- (1) OPIC 2018 (4 月, 日本)
- (2) 18th International Conference on Laser Optics (ICLO 2018) (6 月, ロシア)
- (3) 19th International Symposium on Laser Precision Microfabrication 2018 (6 月, 英国)
- (4) SPIE Remote Sensing 2018 (9 月, ドイツ)
- (5) Laser Applications Conference 2018 (11 月, 米国)
- (6) Photonics West LASE 2019 (2 月, 米国)

Ⅲ そ の 他 事 業

1. IFE (慣性核融合エネルギー : Inertial Fusion Energy) フォーラム活動

レーザー核融合によるエネルギー開発に向けた有識者会議や産学共創を目指す委員会活動などを支援した。

2. 出版物の刊行

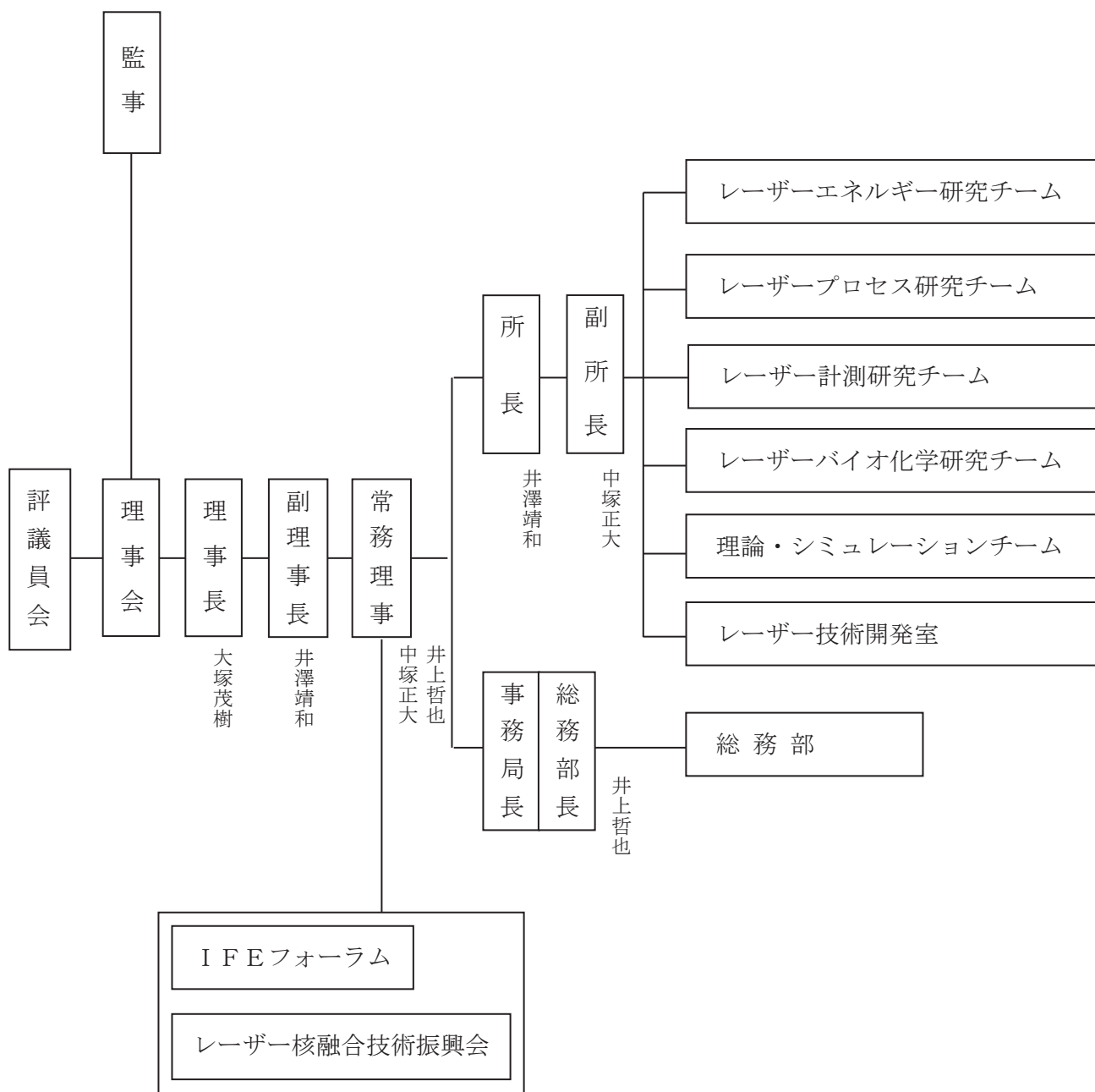
平成 29 年度の研究成果を年報にまとめ、刊行した。
・「ILT2018 年報」(2017～2018) (平成 30 年 7 月発行)

3. 泰山賞の贈呈

7 月の成果報告会にて第 10 回泰山賞の表彰式を行い、レーザー科学技術の分野で近年著しい業績を上げた 2 名に進歩賞を贈呈した。

組 織 図 構 成 員 一 覧

組織図



構 成 員 一 覧

	理事長 副理事長・所長 常務理事 常務理事・副所長	大塚茂樹 井澤靖和 井上哲也 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 主席研究員	井澤靖和（兼務） 藤田雅之（兼務）
【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） 上席研究員 副主任研究員	藤田雅之 染川智弘 ハイク コスロービアン(兼務)
【レーザー計測研究チーム】	主任研究員 （チームリーダー） 副主任研究員 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 倉橋慎理
【レーザーバイオ化学研究チーム】	チームリーダー 副主任研究員 副主任研究員	中島信昭 ハイク コスロービアン 谷口誠治
【理論・シミュレーションチーム】	チームリーダー 研究員	井澤靖和（兼務） 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 坂本高保
【総務部】	事務局長 総務部長 マネージャー マネージャー 事務員	井上哲也（兼務） 井上哲也（兼務） 幸脇朱美 小野田理恵 藤田淑子
【特別研究員】	元日新電機株式会社 三重県立看護大学 名誉教授 元東京工業大学 准教授 大阪市立大学 特任教授 大阪大学 名誉教授 元日本原子力研究開発機構	鈴木泰雄 田中文夫 糟谷紘一 中島信昭 宮永憲明 大道博之

（令和元年7月現在）

【共同研究員】

大阪大学レーザー科学研究所	所長	兒玉了祐
大阪大学レーザー科学研究所	教授	斗内政吉
大阪大学レーザー科学研究所	教授	山本和久
大阪大学レーザー科学研究所	教授	河仲準二
大阪大学レーザー科学研究所	教授	重森啓介
大阪大学レーザー科学研究所	教授	千徳靖彦
大阪大学レーザー科学研究所	教授	藤岡慎介
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	坂和洋一
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	中嶋 誠
大阪大学レーザー科学研究所	講師	時田茂樹
大阪大学レーザー科学研究所	助教	椿本孝治
大阪大学レーザー科学研究所	招へい教授	疇地 宏
大阪大学レーザー科学研究所	特任教授	乗松孝好
大阪大学レーザー科学研究所	招へい教授	實野孝久
大阪大学大学院工学研究科	教授	栗津邦男
大阪大学大学院基礎工学研究科	教授	宮坂 博
大阪大学大学院理学研究科	准教授	山中千博
大阪大学接合科学研究所	教授	節原裕一
大阪大学接合科学研究所	教授	塚本雅裕
大阪工業大学工学部	教授	西口彰夫
大阪産業大学工学部	教授	草場光博
大阪産業大学	教授	部谷 学
大阪市立大学大学院理学研究科	教授	八ツ橋知幸
岡山大学大学院自然科学研究科	助教	西川 亘
核融合科学研究所	准教授	岩本晃史
核融合科学研究所	助教	安原 亮
関西学院大学理工学部	教授	玉井尚登
関西大学システム理工学部	教授	浅川 誠
関西大学システム理工学部	准教授	佐伯 拓
北見工業大学	准教授	古瀬裕章
京都大学化学研究所	教授	阪部周二
京都大学化学研究所	准教授	橋田昌樹
京都大学大学院理学研究科	教授	大須賀篤弘
京都大学大学院工学研究科	助教	保田尚俊
近畿大学理工学部	教授	吉田 実
近畿大学理工学部	教授	橋新裕一
近畿大学理工学部	教授	中野人志
近畿大学生物理工学部	助教	三上勝大
摂南大学工学部	教授	田口俊弘
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所	研究員	櫻井俊光
千葉大学環境リモートセンシング研究センター	教授	久世宏明
千葉工業大学	教授	藤本 靖
電気通信大学 企画調査室	特任教授	植田憲一
電気通信大学大学院情報理工学研究科	教授	西岡 一
株式会社電気評論社	常務取締役	松村宏治
東京工業大学大学院総合理工学研究科	講師	河村 徹
東京工業大学大学院情報理工学研究科	教授	廣瀬壮一
東北大学大学院工学研究科	教授	田中秀治
東北大学大学院理学研究科	准教授	柴田 穰
台湾国立交通大学	講座教授	増原 宏
光産業創成大学院大学	教授	藤田和久
光産業創成大学院大学	特任教授	三間囃興
兵庫県立大学高度産業科学技術研究所	客員教授	望月孝晏
広島大学大学院工学研究科	教授	遠藤琢磨
広島大学大学院工学研究科	准教授	城崎知至

福井大学大学院工学研究科
 福井工業大学工学部
 福岡工業大学工学部
 福岡工業大学情報工学部
 防衛大学校システム工学部
 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
 山梨大学大学院総合研究部工学域
 山梨大学大学院総合研究部工学域
 立命館大学情報理工学部
 立命館大学総合科学技術研究機構
 量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門
 量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門
 量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門
 量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門
 量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門
 量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門

教授	金邊 忠
教授	西村博明
教授	河村良行
教授	中村龍史
准教授	篠田昌弘
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
准教授	宇野和行
教授	陳 延偉
客員教授	七田芳則
レーザー医療応用研究 グループリーダー	山川考一
上席研究員	佐々木明
主幹研究員	長谷川登
グループリーダー	錦野将元
主席研究員	近藤修司
主幹研究員	岡田 大

評 議 員
理 事 ・ 監 事
賛 助 会 員

評 議 員

(敬称略)

香川秀司	パナソニック株式会社 ライフソリューションズ社 ものづくり革新本部 生産技術開発センター 所長
河内哲哉	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学研究部門 関西光科学研究所長
佐々木孝友	大阪大学 名誉教授
重松昌行	住友電気工業株式会社 技術開発本部 技師長
田中健一	三菱電機株式会社 開発本部 技術統轄
西内 誠	一般財団法人大阪科学技術センター 専務理事
原 勉	浜松ホトニクス株式会社 常務取締役 中央研究所長
東 邦夫	京都大学 名誉教授
水田 仁	関西電力株式会社 原子燃料サイクル室長
美濃由明	一般財団法人電力中央研究所 理事
望月孝晏	兵庫県立大学 名誉教授
山田裕之	富士電機株式会社 発電プラント事業本部 発電事業部 副事業部長

理 事・監 事

(敬称略)

理事長	大塚茂樹	関西電力株式会社 常務執行役員
理 事	井澤靖和	大阪大学 名誉教授
	中塚正大	大阪大学 名誉教授
	井上哲也	公益財団法人レーザー技術総合研究所 常務理事
	上原拓也	東芝エネルギーシステムズ株式会社 パワーシステム事業部 原子力先端システム設計部 参事
	各務浩文	三菱電機株式会社 関西支社 原子力部長
	北島尚史	東京電力ホールディングス株式会社 東京オリンピック・パラリンピック プロジェクト統括室 室長
	兒玉了祐	大阪大学 レーザー科学研究所 所長・教授
	齋藤公秀	日本電気株式会社 関西支社 官公第一営業部長
	佐藤俊志	富士電機株式会社 関西支社 営業第二部長
	戸塚猛喜	中部電力株式会社 技術開発本部 技術企画室長
	中原 隆	三菱重工業株式会社 パワードメイン原子力事業部 原子力技術部長
監 事	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
	福田浩之	株式会社三井住友銀行 大阪本店営業第二部長

(令和元年7月現在)

賛 助 会 員

(50音順)

会社・団体名	
一般財団法人大阪科学技術センター	大成建設株式会社
有限会社岡本光学加工所	株式会社ダイヘン
株式会社オプトサイエンス	株式会社竹中工務店
オムロンレーザーフロント株式会社	一般財団法人電力中央研究所
鹿島建設株式会社	東芝エネルギーシステムズ株式会社
株式会社片岡製作所	西日本旅客鉄道株式会社
株式会社環境総合テクノス	日新電機株式会社
一般財団法人関西情報センター	日本電気株式会社
関西電力株式会社	パナソニック株式会社
関電不動産開発株式会社	浜松ホトニクス株式会社
関電プラント株式会社	一般財団法人光産業技術振興協会
株式会社きんでん	株式会社日立製作所
株式会社熊谷組	富士電機株式会社
光伸光学工業株式会社	前田建設工業株式会社
株式会社神戸製鋼所	株式会社三井住友銀行
ジオマテック株式会社	三菱重工業株式会社
株式会社島津製作所	三菱電機株式会社
清水建設株式会社	株式会社レイソルテクノロジーズ
住友電気工業株式会社	一般社団法人レーザー学会
	合計38社

ILT2019 年報

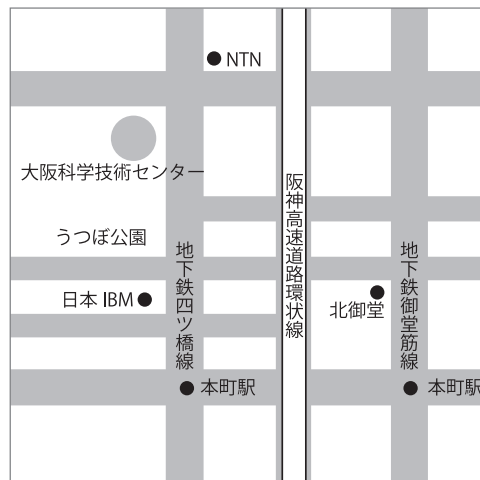
令和元年7月 発行

公益財団法人 レーザー技術総合研究所

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

TEL (06) 6443-6311 (代)

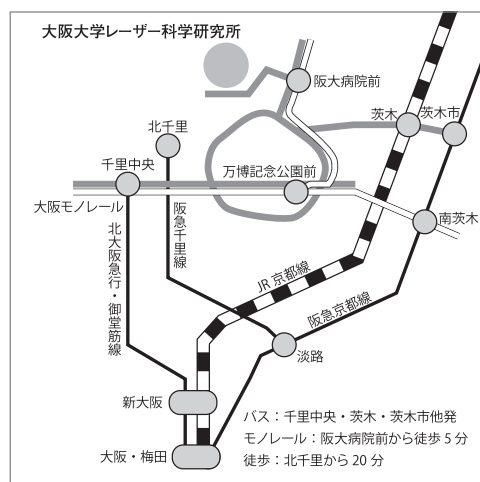
公益財団法人 レーザー技術総合研究所



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



研究部／ 尼崎市若王寺3丁目11番20号 〒565-0871
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
大阪大学レーザー科学研究所
TEL.06-6878-1264
FAX.06-6878-1568



Institute for Laser Technology