

ILT-APR Number 30
Issued: July 2018
ISSN 1340-6167

ILT2018年報

Annual Progress Report

2017-2018



公益財団法人 レーザー技術総合研究所
Institute for Laser Technology

は じ め に

当研究所は、1987 年の創立以来、レーザーおよびその関連産業の振興を図り、我が国の学術の進展と科学技術の発展に貢献することを目的として、レーザーとその応用に関する研究開発、調査、情報の収集・提供、人材の養成などの事業を鋭意推進してまいりました。この間、関係省庁、産業界、ならびに大学、研究機関の皆様方から、多大なご指導、ご支援を賜り、昨年度はお蔭様で創立 30 周年を迎えることができましたこと、心から感謝申し上げます。

近年の科学技術は、経済・社会に大きな影響を与え、人々のライフスタイルにまで影響を及ぼすなど、社会の中での重要性がますます増大しています。平成 30 年度科学技術白書においては、このような状況下での我が国の研究開発力の低下に懸念が示されており、これに対応するためには産官学が力を合わせイノベーションをけん引することが重要であるとされています。当財団は発足当初より産官学のコラボレーションの中で研究活動を行ってまいりましたが、平成 29 年度より大阪大学を初めとする諸大学、諸研究機関とさらに密接な関係を構築し共同研究を行う体制といたしました。またこのような体制・活動を通じて、高度な専門的知識を持ち、かつ慣習や常識にとらわれない柔軟な思想と斬新な発想を持った人材を育成・確保し、今後ますます社会の要請に応えられるよう全力を尽くす所存でございます。

同白書においては SDGs（持続可能な開発目標）と科学技術イノベーションの推進についても特集が組まれ、先進国の責務が示されています。特集の中ではインフラの整備の重要性にも着目されており、近年多発する大規模自然災害の被害を最小限にするためにも当研究所の取り組みは大変重要であると考えています。

また SDGs の理念と軌を一にするものとして、経済団体連合会が提唱する Society5.0 においては、革新技术を最大限に活用して経済成長と社会的課題の解決とを両立させることを謳っておりますが、当研究所はこれらの基礎となる技術の一つとしてロボットフォトリクス分野を立ち上げ、基礎研究の充実を図っています。これらの研究開発により、持続可能で明るく安全な未来の創出に向けて、科学技術イノベーションを今後とも強力に推進することとし、創立以来の理念である産官学の共創に向け、その力を最大限に発揮できるよう、全力で取り組んでまいります。

最後になりますが、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、その成果を広く情報発信することに努めております。この度、ここに平成 29 年度の研究成果と事業活動をまとめて、研究所年報第 30 巻を発行することができました。なにとぞご高覧の上、ご助言、ご指導くださいますようお願い申し上げます。

平成 30 年 7 月

公益財団法人 レーザー技術総合研究所
理事長 大 石 富 彦

ILT2018 年報 (Annual Progress Report 2017-2018)

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

Terahertz radiation from graphene surface plasmon polaritons	1
--	---

レーザープロセス研究チーム

建築部材等のレーザー加工	5
ゼロフォノンライン励起 Yb:YAG レーザーの発振特性	9
水衝突噴流冷却法を用いた常温駆動高出力 Yb:YAG レーザーの開発	13
Lasing Characteristics of Corner Cube Retro-Reflector Resonators	17
海上ラマンライダーの開発	21

レーザー計測研究チーム

実用化を目指すレーザーを用いたコンクリート欠陥検査	25
レーザー打音法の高速化と屋外検査装置の開発	28

レーザーバイオ化学研究チーム

液中レーザーアブレーションによるナノ粒子の作製と応用	32
----------------------------------	----

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同士の衝突に関する研究	35
大地震前の電離層における電子密度増加の物理メカニズムの研究	38

レーザー技術開発室

レーザー損傷しきい値データベース化試験結果 —1064nm 光学素子 100-on-1 試験—	44
---	----

発表論文リスト	51
事業報告書	59
組 織 図	75
構 成 員 一 覧	76
評 議 員	81
理 事 ・ 監 事	82
賛 助 会 員	83
お わ り に	84

研 究 報 告 書

Terahertz radiation from graphene surface plasmon polaritons

Laser energy research group

Dazhi Li, Makoto Nakajima¹, Masaki Hashida², Masahiko Tani³

¹Institute of Laser Engineering, Osaka University

²Advanced Research Center for Beam Science, ICR, Kyoto University

³Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

1. Introduction

Graphene is a monolayer sheet of carbon atoms tightly bound in a hexagonal honeycomb lattice and has great potential in applications for various fields due to its exceptional electronic, mechanical, and optical properties¹⁻⁷. Recently found surface plasmon polaritons (SPPs) on the graphene is expected to become a coherent and tunable terahertz radiation source with compactness, high power and high efficiency. Several researches have been conducted to extract terahertz radiation from the graphene SPPs⁸⁻¹⁴.

As is known, the SPP is a longitudinal wave, tightly combined along the surface of a uniform graphene structure, and is not converted to electromagnetic (EM) wave, because usually the dispersion curve of SPP does not cross the dispersion curve of transverse EM wave in (ω, k) plane. In order to make a crossing of SPP and EM wave dispersion curves and to extract terahertz radiation from graphene SPP, several sophisticated modifications such as to employ a precisely designed periodic structure or to apply a high electric field have been proposed¹⁴⁻¹⁶.

In this paper, we propose a sidewall structure to extract the terahertz radiation from SPPs. In this scheme, the high-precision fabrication and high electric field are not required. The three-dimensional effect of the sidewall structure could upshift the SPP mode to be close to the light line so that it is possible for harmonics of the SPPs to go above the light line and radiate. The physical mechanism is analyzed with three-dimensional theory, and the numerical results show that this technique could be an alternative to transform the SPPs into radiation.

2. Theory

We consider a three-dimensional Cartesian coordinate as shown in Fig. 1. An infinitely thin electron beam with a velocity v_0 moves in the z direction in the vacuum over a graphene sheet located on a dielectric substrate, which is assumed to occupy the entire space below the graphene sheet. Sidewalls assumed to be made of the perfect conductor are placed in the x direction, and the width of the gap between the sidewalls is chosen as $w=100\ \mu\text{m}$. Considering the fact that the width of an electron beam can be generated in several tens of micrometers, this value is feasible for the electron beam to travel through the system. With using the Maxwell's equations and boundary conditions, the dispersion relation between frequency ω and axial wave number k_z for the SPP modes can be directly

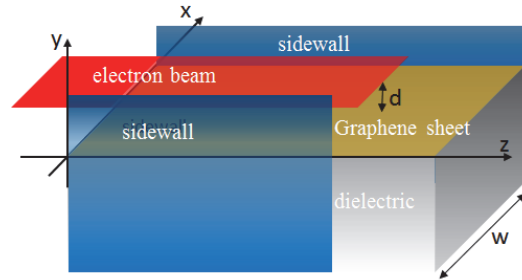


Fig.1 Schematic of graphene-based radiation structure driven by an electron beam.

derived as¹⁷⁾

$$\frac{\omega\mu_0\sigma_g}{\epsilon_0\mu_0\omega^2 - k_x^2} + \frac{\epsilon_r\epsilon_0\mu_0\omega^2 - k_x^2}{(\epsilon_0\mu_0\omega^2 - k_x^2)k_{2,y}} + \frac{1}{k_{1,y}} = 0. \quad (1)$$

The conductivity of graphene σ_g has been widely studied, and it can be expressed as

$$\sigma_g = \frac{je^2K_BT}{\pi\hbar^2(\omega + j\tau^{-1})} \left[\frac{\mu_c}{K_BT} + 2\ln(e^{-\frac{\mu_c}{K_BT}} + 1) \right] \quad (2)$$

where T is temperature, K_B is Boltzmann constant, τ is relaxation time. The wave vector components in Eq. (1) are written as

$$k_{1,y} = \sqrt{\omega^2/c^2 - k_x^2 - k_z^2} \quad (3)$$

$$k_{2,y} = \sqrt{\varepsilon_r \omega^2/c^2 - k_x^2 - k_z^2} \quad (4)$$

where $k_x = n\pi/w$, $n=1,2,3,\dots$, ε_r is permittivity of the dielectric substrate, and $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ is the velocity in the vacuum.

When $w \rightarrow \infty$, we have $k_x = 0$, and the equation becomes

$$\frac{\sigma_g}{\varepsilon_0\omega} + \frac{\varepsilon_r}{k_{2,y}} + \frac{1}{k_{1,y}} = 0 \quad (5)$$

which has been known as the two-dimensional dispersion equation established elsewhere¹².

3. Plasmon-polariton mode

With choosing the permittivity of the substrate as $\varepsilon_r = 11.7$, Eq.(1) and (5) can be numerically solved and the fundamental modes ($n=1$) are given as Fig.2. The light line in vacuum $\omega = ck_z$, in dielectric $\omega = k_z c/\varepsilon_r$, and the electron beam line $\omega = k_z c\beta$ are also plotted for comparison. Here $\beta = v_0/c$ is the Lorentz factor, and $\beta = 0.35$ is adopted in this calculation. Comparing with the two-dimensional result, the three-dimensional dispersion curve is lifted due to the sidewalls. There is an end point for the three-dimensional dispersion curve, which indicates the cutoff frequency induced by the sidewalls, and the cutoff frequency is about 0.56 THz. From the intersection point of the electron beam line with the dispersion curve, we know that the SPPs can be excited with a frequency of 0.59 THz. The threshold for radiation to occur in this configuration can be worked out as $\omega > ck_x \sqrt{1/(\varepsilon_r - 1/\beta^2)}$ by the radiation condition $k_{2,y} > 0$. Thus, the threshold for a beam with $\beta = 0.35$ is obtained as 0.8 THz, which is higher than the frequency of SPPs, resulting in that the excited SPP mode cannot radiate though it crosses the light line in the dielectric. However, we note that the second or higher order harmonics of the SPP mode can exceed the threshold and consequently becomes radiative. Next, we discuss the excitation of SPP

harmonics and demonstrate the radiation phenomenon.

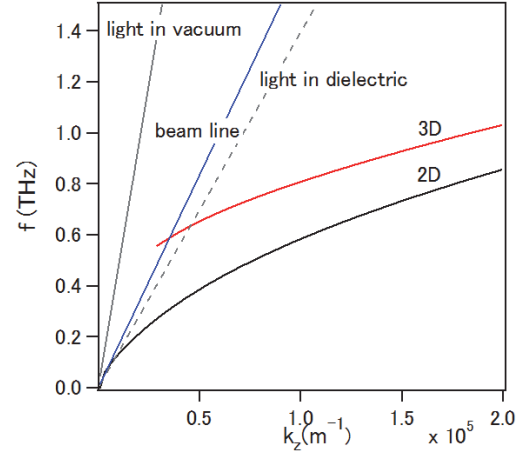


Fig.2 Dispersion relations for surface plasmon polaritons calculated with 2D and 3D equations.

4. Harmonic radiation

In all radiation sources using an intense electron beam, the mechanism leading to superradiance is beam bunching¹⁸. The spectral intensity of the radiation will be enhanced at the bunching frequency and its harmonics. In order to demonstrate the properties of harmonic radiation more clearly, we avoid the problem of bunching from an initially continuous beam. Instead, a train of bunches is assumed to drive the system. We consider the idealized case in which periodic line charges with a charge-density distribution Q in the x direction for a single line charge are supposed to move over the graphene sheet with velocity v_0 along the trajectory $y=d$. The width of the beam is assumed to be same as that of the structure. Considering the boundary of sidewalls, the amplitude of the field in the vacuum and dielectric can be derived as¹⁷

$$A_r = \xi \frac{\Phi_1 + \sigma_g k_y^i k_y^t \mu_0 \omega + (k_y^t - k_y^i) k_x^2}{\Phi_2 + \sigma_g k_y^r k_y^t \mu_0 \omega - (k_y^r + k_y^t) k_x^2} \quad (6)$$

$$A_t = \xi \frac{(k_y^i + k_y^r)(\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 - k_x^2)}{\Phi_2 + \sigma_g k_y^r k_y^t \mu_0 \omega - (k_y^r + k_y^t) k_x^2} \quad (7)$$

where

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{Q e^{jk_y d} e^{j2\pi \frac{\omega}{\omega_r}} - e^{-j2\pi \frac{\omega}{\omega_r} (N_b - 1)}}{2 e^{j2\pi \frac{\omega}{\omega_r}} - 1} \\ \Phi_1 &= (k_y^i \varepsilon_r - k_y^t) \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 \\ \Phi_2 &= (\varepsilon_r k_y^r + k_y^t) \varepsilon_0 \mu_0 \omega^2 \end{aligned}$$

$$k_y^i = \sqrt{\omega^2/c^2 - k_x^2 - (\omega/v_0)^2}$$

$$k_y^t = \sqrt{\epsilon_r \omega^2/c^2 - k_x^2 - (\omega/v_0)^2}$$

N_b is the total number of bunches, $\omega_r = 2\pi f_r$, and f_r is the repetition frequency of the periodic bunches. In order to be independent of influence from the electron beam, we define $A_r^u = A_r/Qe^{jk_y^i d}$ and $A_t^u = A_t/Qe^{jk_y^t d}$. Thus, the fields in the vacuum and dielectric regions can be calculated when the relevant parameters are given.

The amplitude of the z -directed electric field in the dielectric region has been calculated for a single bunch ($N_b = 1$) and is shown in Fig. 3(a). The frequencies of the excited SPP modes vary with the energy of electrons, and they are always lower

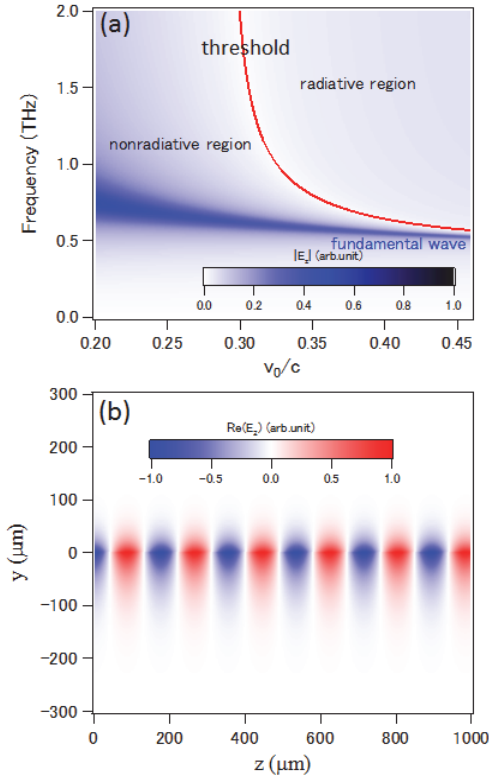


Fig.3 (a) The surface plasmon modes excited by various electron's energy, and the red line is the threshold of radiation. (b) The distribution of the electric field in vacuum and dielectric region for $v_0/c = 0.35$.

than the threshold of radiation, resulting in irradiative waves. The distribution of the z -directed electric field of the excited mode for $\beta = 0.35$ in the vacuum and the dielectric region is

given in Fig. 3(b). It is shown that the SPP mode is tightly combined along the surfaces of the graphene sheet and it shows a nonradiative pattern. We calculated a train of bunches with a total number of bunches $N_b = 30$ and the repetition frequency is chosen as the frequency of the excited fundamental mode. The calculation results are given in Fig.4. From Fig.4 (a) we know that higher order harmonics can be excited, and some of the second and third harmonics go through the threshold of radiation and drop into the radiative region. As an example, the distribution of the z -directed electric field for the case of $\beta = 0.35$ is demonstrated in Fig. 4(b), where the superposition of the fundamental and its second harmonic mode is plotted. It is

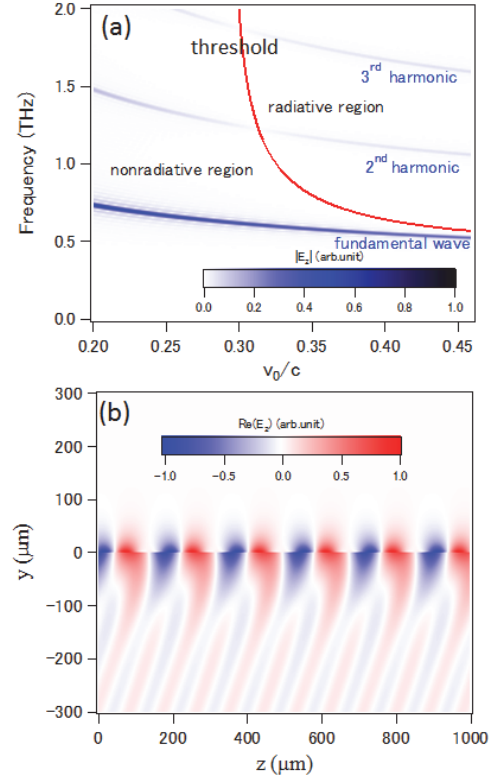


Fig. 4 (a) The surface plasmon modes and their second and third harmonics excited by a train of bunches. (b) The distribution of the fundamental and second harmonic waves for $v_0/c = 0.35$. The second harmonic radiates at 25.7 deg. in the dielectric region.

shown that the second harmonic wave with a frequency of 1.17 THz radiates in the dielectric region at an angle $\theta = \arctan(k_y^t/(\omega/v_0)) = 25.7$ deg., which corresponds to

the typical Cherenkov radiation.

5. Conclusion

In conclusion, we proposed a scheme to extract terahertz radiation from surface plasmon polaritons excited in the surface of a uniform graphene structure by an electron beam. A sidewall configuration is analyzed in three-dimensional theory and its function of lifting the surface plasmon mode is demonstrated with the help of numerical calculation. Furthermore, we found that some of harmonics of the surface plasmon mode are possible to radiate based on the sidewall structure. We consider to use a train of periodic electron bunches to excite the harmonics, and the physical mechanism is theoretically analyzed. The harmonics excitation and radiation have been demonstrated through numerical calculations, and it shows that this technique could be an alternative to transform the surface plasmon polaritons into radiation.

Acknowledgments

This work is partially supported by KAKENHI (JP16K04987, 25286063, 26600109) and Matsuo Foundation.

References

- 1) J. Horng, C.-F. Chen, B. Geng, et al., Phys. Rev. B 83, 165113 (2011).
- 2) M. Liu, X. Yin, E. Ulin-Avila, B. Geng, T. Zentgraf, L. Ju, F. Wang, and X. Zhang, Nature 474, 64 (2011).
- 3) Vakil and N. Engheta, Science 332, 1291 (2011).
- 4) C. Neto, F. Guinea, N. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, Rev. Mod. Phys. 81, 109 (2009).
- 5) K. Novoselov, A. K. Geim, S. Morozov, et al., Nature 438, 197 (2005).
- 6) L. Ju, B. Geng, J. Horng, C. Girit, et al., Nat. Nanotechnol. 6, 630 (2011).
- 7) K. Yang, S. Arezoomandan, and B. Sensale-Rodriguez, Terahertz Sci. Technol. 6, 223 (2013).
- 8) F. Rana, IEEE Trans. Nanotechnol. 7, 91 (2008).
- 9) B. Wang, X. Zhang, F. J. Garcia-Vidal, X. Yuan, and J. Teng, Phys. Rev. Lett. 109, 073901 (2012).
- 10) M. Farhat, S. Guenneau, and H. Bagci, Phys. Rev. Lett. 111, 237404 (2013).
- 11) M. Ryzhii and V. Ryzhii, Jpn. J. Appl. Phys., Part 2 46, L151 (2007).
- 12) S. Liu, C. Zhang, M. Hu, X. Chen, P. Zhang, S. Gong, T. Zhao, et al., Appl. Phys. Lett. 104, 201104 (2014).
- 13) T. Zhan, D. Han, X. Hu, X. Liu, S.-T. Chui, and J. Zi, Phys. Rev. B 89, 245434 (2014).
- 14) Sen Gong, Tao Zhao, Matthew Sanderson, Min Hu, et al., Appl. Phys. Lett. 106, 223107 (2015).
- 15) Yu. V. Bludov, N. M. R. Peres, and M. I. Vasilevskiy, Phys. Rev. B 85, 245409 (2012).
- 16) N M R Peres, Aires Ferreira, Yu V Bludov, et al., J. Phys.: Condens. Matter 24, 245303 (2012).
- 17) D. Li, Y. Wang, M. Nakajima, et al., Physics Letters A 380, 2181 (2016).
- 18) G. W. Hanson, J. Appl. Phys. 103, 064302 (2008).

建築部材等のレーザー加工

レーザープロセス研究チーム

藤田雅之

1. はじめに

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た。従来は加熱用光源としての CW レーザーであったが、高輝度ファイバーレーザーはアブレーションを伴う除去加工用光源としても使うことができるようになり、その利用範囲を拡大しつつある。

また、ビームデリバリーに関わる周辺機器も取り扱いやすく高性能なものが開発され、50,000 mm/s の掃引速度を可能とするガルバノスキャナが市販されている。このような高速掃引を利用すると、CW レーザーであっても試料に対してパルス的なレーザー照射を行うことができる。例えば、直径 1mm 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 $100 \mu\text{s}$ となる。見方を変えれば、CW レーザー光とガルバノスキャナを組み合わせ、掃引速度を変えることで試料に照射するフルエンスを幅広く変化させることができる。先の例では、レーザー出力 100 W に対して照射フルエンスは $100 \text{ W} \times 100 \mu\text{s} \div 1 \text{ mm}^2$ から、約 1.3 J/cm^2 に相当することになる。

本稿では、これまで技術相談で持ち込まれた様々な試料の中から建築部材に関係するものをピックアップし、

ファイバーレーザーで加工を試みた結果を報告する。これまでも建築用部材へのレーザー加工は kW 級炭酸ガスレーザーや YAG レーザーを用いて試されてきたが¹⁻⁶⁾、最近のレーザー光源とその周辺機器の性能向上により新たな局面を迎えようとしている。

用いたレーザーはフジクラ社製 CW ファイバーレーザー（FLC-300-A）で、主な仕様は最大出力 300 W、波長 1095 nm、 $M^2 < 1.3$ である。図 1 に実験配置を示す。コリメータ（ビーム径 5 mm^Φ ）から出射されたレーザー光を焦点距離 1000 mm の平凸レンズを用いて集光し、YE データ社製ガルバノスキャナを用いて試料上に掃引照射した。

2. 木材の塗装除去

まず、木材の塗装除去を紹介する。いわゆる、レーザークリーニングである。図 2(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^Φ で 154 W のレーザー光を集光し、掃引速度

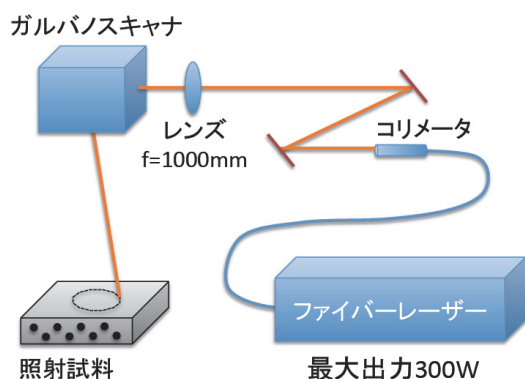


図1 実験配置

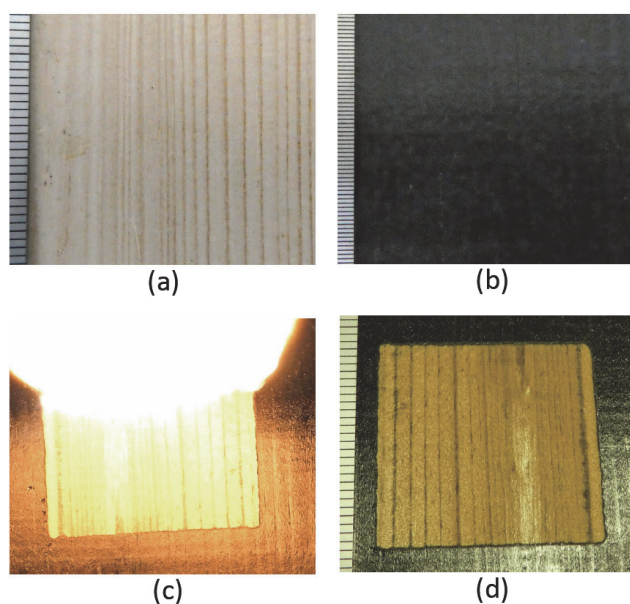


図2 (a) 塗装前の木材（松）の表面、(b) 塗装後の表面、(c) レーザー照射中の様子、(d) レーザー照射後の表面。

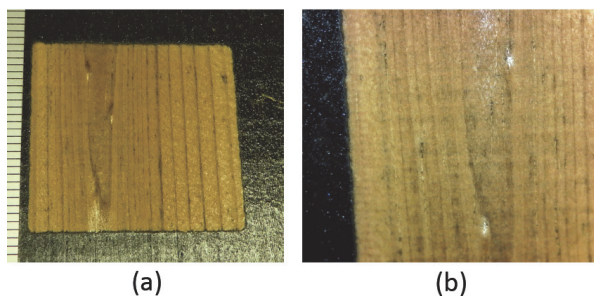


図3 (a) 塗膜除去後の表面、(b) 表面の拡大写真。

2,250 mm/s で 20 mm 角の領域を照射した。照射強度は約 5 kW/cm²、試料が受けた照射パルス幅は約 0.9 ms、フルエンスは 3.4 J/cm²に相当する。

図2(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2(d)に照射後の表面を示す。図2(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。図3(a)に別の除去例を示す。図3(b)は拡大した表面写真である。再現性良く塗膜の除去ができており、この状態であれば再塗装が可能となり木材を再利用することができると考えられる。

3. ニッケル鉱石の加工

次に、ニッケル鉱石のレーザー加工について紹介する。技術相談で提供を受けたニッケル鉱石は 20~40 mm 程度の不規則な形状で、原産地はフィリピンとのことであった。主な成分は、SiO₂ 38-48 %、MgO 33-38 %、Fe 5-10 %、Al₂O₃ 0.8-1.2 %で、僅かに Ni が 0.8-1.0 %含まれている。

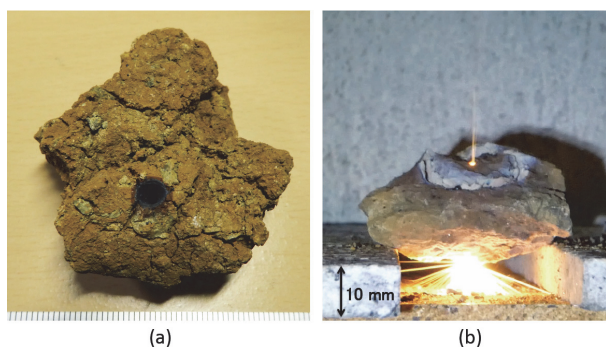


図4 ニッケル鉱石の貫通加工:(a) レーザー照射側から見た貫通痕、(b) 貫通した瞬間の映像。
(a)と(b)は異なる加工サンプル)

このニッケル鉱石にスポット径 0.6 mm^φで 140 W のレーザー光を集光して貫通加工を試みた。照射強度は約 50 kW/cm²となる。図4に厚さ約 20 mm のニッケル鉱石の (a) 貫通加工した試料をレーザー照射側から見た写真、(b) 貫通した瞬間を真横から撮影した写真(動画の一コマ)を示す。貫通に要した時間はビデオフレームの解析から約 0.6 秒であり、意外と短時間で貫通できた。

次に、コア抜き加工(円柱状に試料をくり抜く加工)を試みた。ガルバノスキャナを用いて試料上で直径 22 mm の円に沿って 150 W のレーザー光を掃引速度 2.3 mm/s で集光照射した。その様子を図5に示す。図5(a)は第一回目の掃引時、(b)は 10 回目の掃引時の様子である。不規則かつ不均一な形状であるためか、貫通部と熔融部が交互に現れ、円加工を 10 回施してもコア抜きに至らなかった。図4に示した例から 0.6 mm^φのスポットが 0.6 秒で貫通することを考えると、1 mm/s の掃引速度で貫通が続くものと期待された。掃引速度 2.3 mm/s で

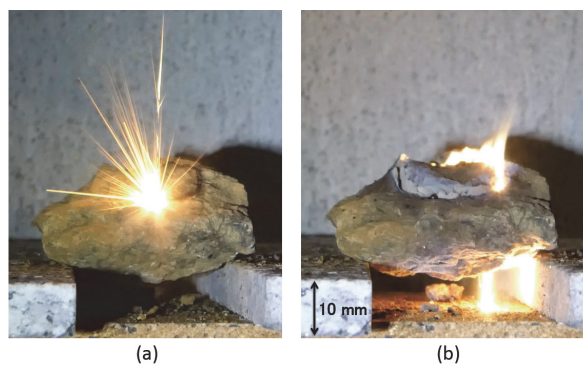


図5 掃引速度 2.3 mm/s での円加工の様子：
(a) 1 回目の掃引、(b) 10 回目の掃引。

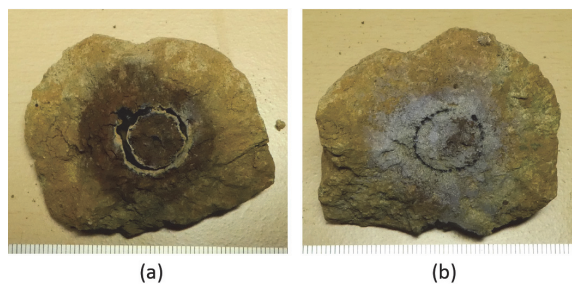


図6 掃引速度 0.14 mm/s での円加工の様子：
1 回掃引後の(a) 表面、(b) 裏面。

あれば数回の掃引でコア抜きが完了すると予測していたが、一旦溝が形成され始めると溝内でレーザー光が散乱されるためか、或いは溶融部が形成され溝の埋め戻しが始まるためか、貫通には至らなかった。図5(b)では、溝から吹き出すプラズマの幅と貫通して下方向に吹き出すプラズマの幅が数倍異なることが確認できる。

そこで、掃引速度を 0.14 mm/s に下げ、直径 16 mm の円に沿って 107 W のレーザー光を集光照射してみた。図6に加工試料の (a) 表面、(b) 裏面の写真を示す。裏面がミシン目状の円加工となり、コア抜きには至らなかった。

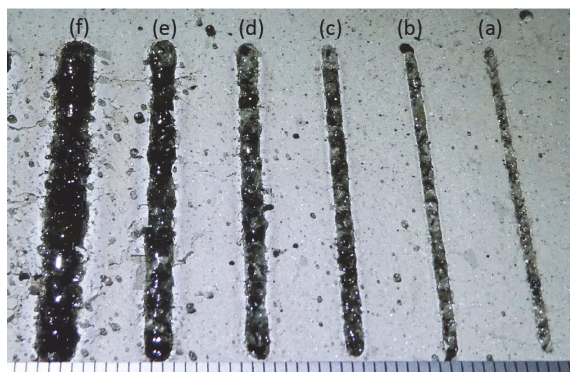


図7 掃引速度を (a) 22.5 mm/s、(b) 11.3 mm/s、(c) 4.5 mm/s、(d) 2.3 mm/s、(e) 1.13 mm/s、(f) 0.45 mm/s と変えながら形成したコンクリートの溶融ビード。

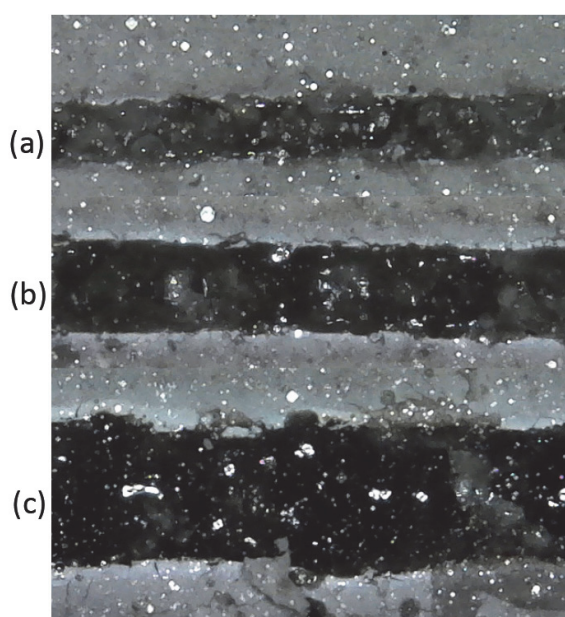


図8 図7(a), (c), (e)に相当するビードの拡大写真：掃引速度は(a) 22.5 mm/s、(b) 4.5 mm/s、(c) 1.13 mm/s。

った。コア抜きのためには、変調パルスを用いて入熱を制御する、切り幅を広げるなどの工夫が必要であると思われる。

4. コンクリートの溶融ビード形成

CW ファイバーレーザーの主要な用途として金属部材の溶接が挙げられる。同様のことをコンクリート等に対して行うことができるのであるだろうか？ コンクリートはセメントと骨材を混ぜて固めたものであり、その主成分はシリカ (SiO_2) である。レーザー光で溶融させることによりガラス化を誘起し、部材同士を接合できることが期待される。

金属溶接の条件出しにおいて、材料表面にビード（溶融部の盛り上がり）を形成して、その形成状態を確認する手法がとられることがある。同様のことをコンクリートに対して行ってみた。100 W のレーザー光を集光し掃引速度を変えながらビード形成を試みた。図7に掃引速度を、(a) 22.5 mm/s、(b) 11.3 mm/s、(c) 4.5 mm/s、(d) 2.3 mm/s、(e) 1.13 mm/s、(f) 0.45 mm/s と変えながら形成した溶融ビードの写真を示す。スポット径は 0.6 mm^ϕ であるため、照射強度は 35 kW/cm^2 となる。掃引速度 4.5 mm/s の場合、フルエンスは約 4 kJ/cm^2 に相当する。図8に同じ加工試料表面を拡大して観察した合成写真（図7の(a), (c), (e)に相当）を示す。掃引速度が遅くなるに従って

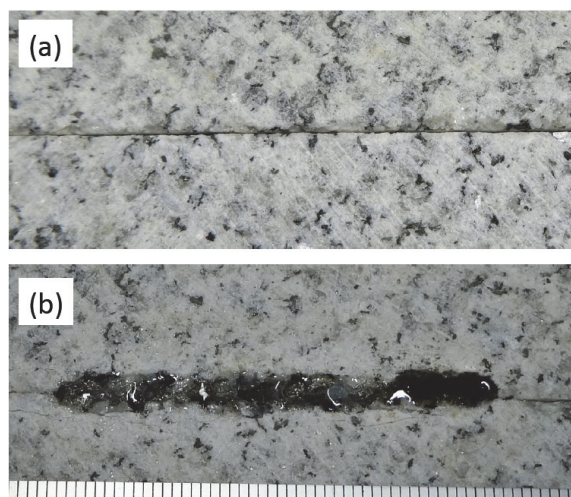


図9 2枚の石板の突き合わせ接合：
(a) 照射前、(b) 照射後。

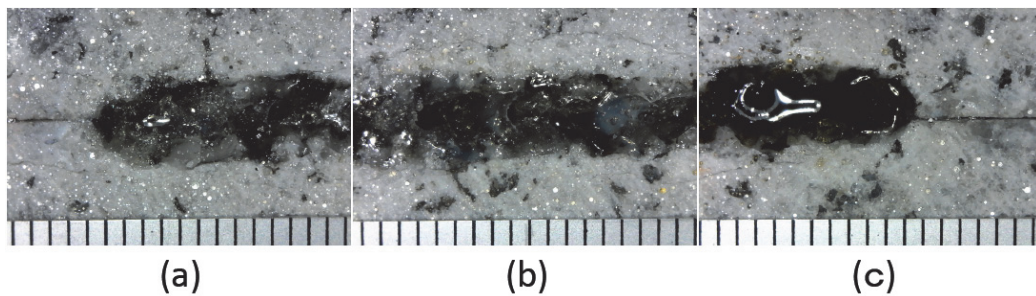


図10 図9(b)の接合部の拡大写真。

単位面積当たりの入熱量が増え、ビードの幅が広がりガラス化した盛り上がりが確認できた。

利用を想定した新たなレーザー加工の市場が開けてくるものと期待される。

5. 石板の接合

コンクリートをガラス化させて熔融ビードを形成できることが確認されたので、石材の接合を試みた。試料としてホームセンターで購入したガーデニング用の“みかげ石”に似せた石板を用いた。いずれにせよ、石材であるので主成分はシリカ (SiO_2) となる。図9に2枚の石板を突き合わせて接合した試料の (a) 照射前、(b) 照射後の写真を示す。レーザー出力は168 W、掃引速度は0.45 mm/s であった。照射強度は60 kW/cm²、照射フルエンスは60 kJ/cm²に相当する。また、図10にガラス化した接合部の拡大写真を示す。別の“みかげ石”でも照射を試みたが、安定的に接合を行うことができた。

6. まとめ

高輝度ファイバーレーザーを用いて建築部材等のレーザー加工を試みた。CW レーザーとガルバノスキャナを組み合わせることで、塗膜の除去から石板の熔融接合まで様々な加工を実現することができた。ファイバーレーザーがもつ安定性、堅牢性を活かすことで、屋外での

謝辞

本研究の一部は公益財団法人天田財団平成29年度一般研究開発助成により実施されたものであり、ここに感謝の意を表します。また、技術相談を通して快く試料をご提供いただいた各社様ならびにガルバノスキャナを無償貸与していただいた YE データ社様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 永井香織：, レーザー研究, **38** (10), pp.744-748, (2010).
- 2) 永井香織、ウィグナラージャ・シバクマラン、松井勇：セッコウ・石灰・セメント・地球環境の科学 **11** (313), pp.513-517, 2004-11-01.
- 3) 永井香織、杉本賢司：レーザー研究, **31** (1), pp.63-67, (2003).
- 4) 永井香織、市原英樹、ウィグナラージャ シバクマラン：日本建築学会構造系論文集, 547, pp.17-21, (2001).
- 5) M. Kobayashi, Y. Horikoshi, K. Nagai：, SPIE Vol.3887, pp.262-269, (1999).
- 6) K. Nagai, H. Hattori：SPIE.Vol.3887, pp.277-286, (1999).

ゼロフォノンライン励起 Yb:YAG レーザーの発振特性

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いため熱損失が小さい、また蛍光寿命が長いいため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、多くの研究が行われてきた。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、低温 (~100K) ならびに常温 (~300K) 動作の高平均出力固体レーザーの開発を目標に研究を進めている¹⁻³⁾。

高出力固体レーザー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、二つの手法を検討している。第一は媒質自体の発熱を抑制する手法の導入であり、常温動作においてはゼロフォノンライン (ZPL, 969 nm) 励起が有効と考えている。Yb:YAG は、図2に示すように、940 nm 付近と 969 nm 付近に吸収帯のピークを持ち、969 nm の吸収は ZPL による吸収に相当する。通常はスペクトル幅が広い 940 nm 帯を励起に用いるが、近年 VBG (Volume Bragg Gratings) 波長ロック型 LD が開発され、常温領域においてはバンド幅が狭い (~2.8 nm) ZPL 励起も可能となってきた。励起波長と発振波長 (1030nm) のエネルギー差が小さくなるため、969 nm 励起を用いた場合、940 nm 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る。TRAM の裏面に冷却水の噴流を直接吹き付けて除熱を行う衝突噴流冷却法の導入を進めている。この手法では、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。TRAM は

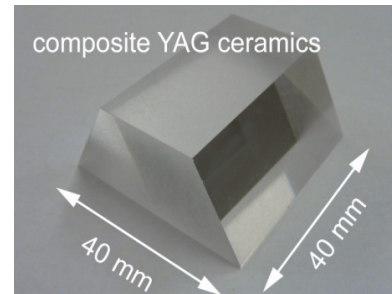


図1 Yb:YAG TRAM の外観

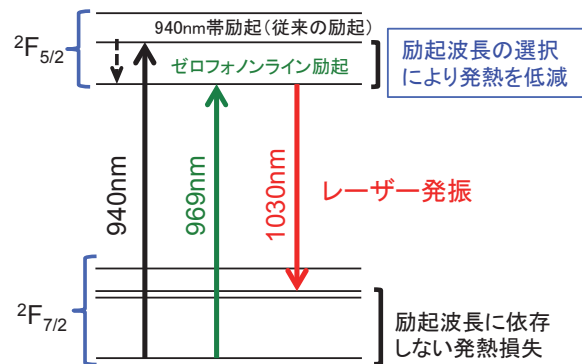


図2 Yb:YAG のエネルギー準位

底面に熱伝達率が低い全反射膜コーティングをする必要がなく、また強固なコンポジット構造を持つため Thin disk 型のような伝導冷却を必要とせず、より除熱効果の高い直接的な噴流冷却が可能である。

昨年度の報告では、開発の初期段階として 940 nm 励起による常温動作時の TRAM レーザー発振出力、およびその動作温度特性 (常温 ~80 °C) を計測した結果や、媒質の温度依存性因子を考慮して作成した出力予測モデルと、ゼロフォノンライン励起時の出力予測結果について報告し、969 nm での励起が発熱の抑制だけでなく出力に対しても有利に働く可能性があることを示した³⁾。本稿では、ZPL 励起によるレーザー発振実験を行い、940 nm 帯励起時とのレーザー特性比較を行った結果について述べる。

2. ゼロフォノンライン励起レーザーの発振出力特性

ZPL (969nm) 励起と通常の 940nm 励起における Yb:YAG TRAM のレーザー発振特性を比較した。試験配置を図 3 に、試験時の写真を図 4 に示す。ZPL 励起に用いた波長 969 nm の DILAS 社製ダイオードレーザー (<600 W) 以外は 940nm 励起時の実験配置と同一である³⁾。LD 光のビーム径は $\phi 2.3$ mm とした。水冷装置の背後から $\phi 3$ mm の噴流管を挿入し、噴流速度 9.2 m/s で常温の水を噴出させ、Yb:YAG 面を直接冷却した。TRAM の両側にそれぞれダイクロイックミラー (DM)、結合出力ミラー (OC、反射率 85 %) を配置して共振器を構成し、パワーメーター (PM) およびフォトダイオード (PD) によりレーザー発振出力を計測した。レーザー発振時の媒質の温度特性を取得するため、TRAM の励起部分から発生する Yb 蛍光スペクトルを分光器により計測した。スペクトル形状が媒質温度に依存して変化することを利用し、特定波長の温度に対する変化率から励起中心部の媒質温度 (熱平衡時) を算出した²⁾。媒質には、Yb:YAG 層の Yb 濃度 9.8 at%、層厚 0.6 mm の TRAM を用いた。

レーザー出力は、励起開始直後に最大値を示し、昨年の報告書でも述べたように³⁾、時間の経過とともに出力は減少する。励起開始後 1 秒程度で出力は安定し、それ以後はほぼ一定値を示す。安定出力が得られるのは、衝突噴流冷却によりレーザー媒質の温度上昇が抑制され、熱平衡に達したためである。

図 5 に、ZPL 励起と 940 nm 励起時のレーザー出力 (a) とレーザー媒質温度 (b) の吸収パワー依存性を比較した。レーザー出力、媒質温度ともに励起開始後熱平衡状態に達した後の安定動作時の値である。吸収パワーが 190 W における媒質の温度は、940 nm 励起に対し 112°C、ZPL (969 nm) 励起に対し 88°C で、初期温度 (25°C) からの温度上昇はそれぞれ 87°C、63°C となっている。媒質の温度上昇は冷却システムの除熱能力に依存するため、温度上昇分がそのまま発熱効率の指標を示すものではないが、ZPL 励起では 940 nm 励起に比べて

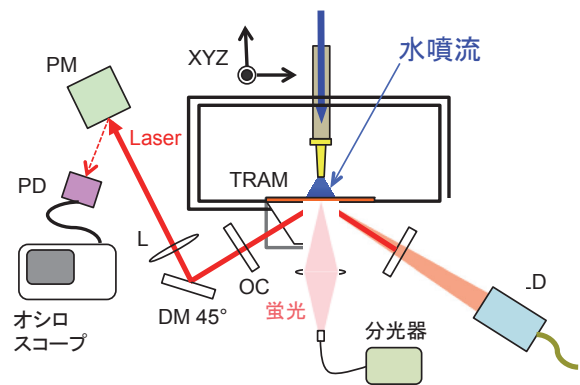


図 3 レーザー発振試験配置(水噴流冷却)。LD : 励起用ダイオードレーザー、DM : ダイクロイックミラー、TRAM : レーザー媒質、OC : 結合出力ミラー、L : レンズ、PM : パワーメーター (カロリーメーター)、PD : フォトダイオード

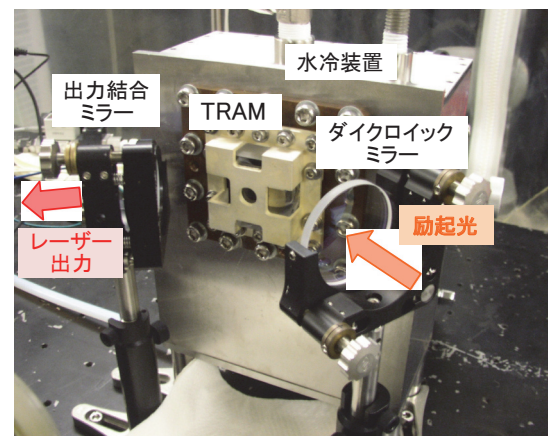


図 4 レーザーシステムの写真

媒質の温度上昇が2/3程度に抑制されていることがわかる。その結果、ZPL 励起では 940 nm 励起に比べて大きなレーザー出力が得られている。これにより、ZPL 励起の有効性が実験的に確認された。

図 6 に、励起開始直後のレーザー発振出力を ZPL 励起および 940 nm 励起で比較した。励起開始直後のレーザー媒質温度は初期温度 (25°C) と見なすことができることから、図 6 は媒質温度 25°C の条件でのレーザー発振特性を示しているといえる。媒質温度が同じであれば、ZPL 励起と 940 nm 励起でレーザー発振特性に差はないといえる。

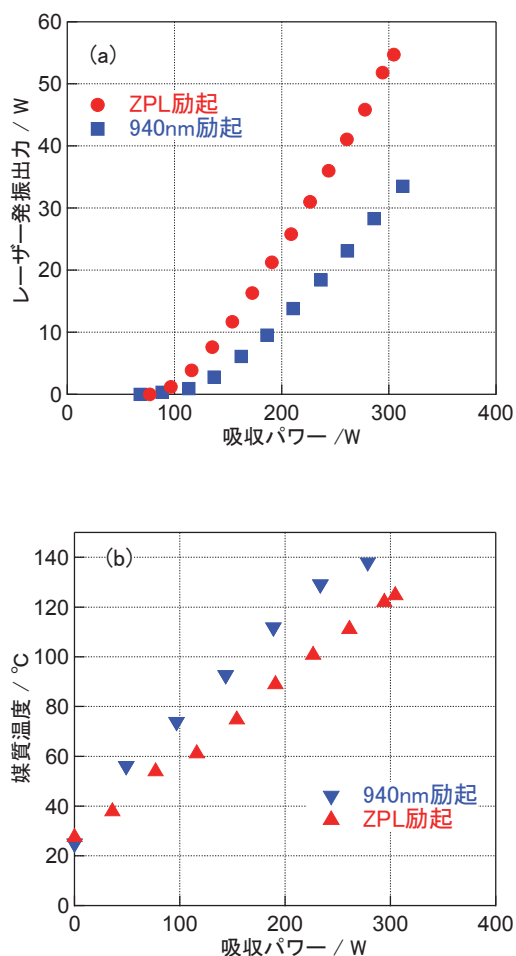


図 5 吸収パワーに対する (a) レーザー発振出力、
(b) 媒質温度。ZPL 励起では温度上昇が抑制
され、吸収パワーに対してより高い出力が
得られる。

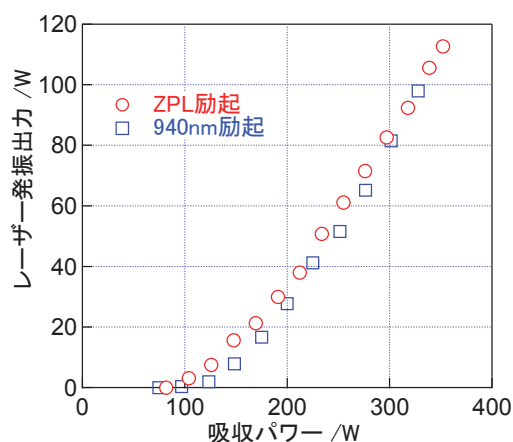


図 6 常温 (25°C) におけるレーザー発振特性。
媒質温度が同じであれば、969nm (ZPL) 励
起と 940nm 励起の出力はほぼ同一となる。

図 7 にレーザー出力の実験値と予測値を比較した。
実験で得られた ZPL 励起時の常温 (〜25 °C) における
発振出力特性と、出力予測モデル¹⁾から算出した予測出
力を比較したものを示す。横軸は LD 光の吸収強度
(kW/cm²)、縦軸は出力強度 (kW/cm²) である。実測
値と予測値は良い一致を示しており、作成したモデルが
ZPL 励起にも有効であることがわかる。図 7 には、昨年
度行ったプール冷却条件での 940 nm 励起における発振
出力の温度依存性の実験値、予測値¹⁾を併せて示した。
常温 (23 °C) での実験値および予測値と ZPL 励起時の
出力は類似性を示しており、動作温度が同じ場合には、
図 6 にも示したように、励起波長による出力への影響は
小さいことが理論的にも示された。

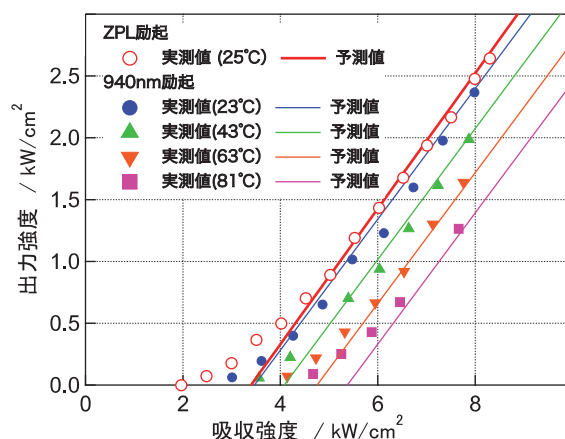


図 7 レーザー発振特性の実験値と予測値の比較

3. まとめ

本研究では、低出力ゼロフォノンライン (ZPL、969
nm) 励起光源を用いて Yb:YAG TRAM のレーザー発振
試験を行い、940 nm 励起時との比較からその出力特性
について検討した。その結果、発熱の少ない ZPL 励起
の方が、媒質の温度上昇が抑制されるため同じ吸収パワ
ーに対してより大きな出力を示すことがわかった。また
常温 (25 °C) における発振出力は、出力予測モデルに
よる予測値とよい一致を示し、作成したモデルが ZPL
励起による発振出力の予測にも有効であることがわか
った。

謝辞

本研究の一部は、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。

参考文献

- 1) H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga, H. Chosrowjan, M. Fujita, K. Takeshita, Y. Izawa, *Optics Express*, **20**, 21739-21748, 2012.
- 2) T. Sakurai, H. Chosrowjan, H. Furuse, S. Taniguchi, T. Kitamura, M. Fujita, S. Ishi, Y. Izawa, *Applied Optics*, **55**, 1351-1355, 2016.
- 3) ILT 2017 年報、pp. 9-13 .

水衝突噴流冷却法を用いた常温駆動高出力 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

当研究所では、Yb:YAG TRAM (Total-Reflection Active-Mirror、全反射型アクティブミラー方式) を用いた常温で駆動する高平均出力固体レーザーの開発を進めている。高出力レーザー開発における最重要課題の一つにレーザー媒質の発熱対策があり、その手法として水噴流を媒質に直接吹き付けて冷却を行う衝突噴流冷却法¹⁾を導入している。この手法では、噴流の強制対流効果により高い冷却性能が得られ、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)による冷却能力の急激な低下を防止できる。TRAM は強固なコンポジット構造を持つため、噴流による直接冷却が可能である。レーザーの高出力化に向け、当研究所では三菱重工業と共同で新たに水噴流冷却装置を試作した。本稿では、製作した装置を用いて ZPL 励起によるレーザー発振実験を行い、出力の最適化を行うため冷却条件の変化や TRAM の Yb 濃度、層厚の違いが出力特性に与える効果について検証した結果を報告する。

2. 実験装置

図 1 にレーザー発振実験の配置図を示す。TRAM の背後から水を噴出させて底面を直接冷却する。水噴流の径は $\phi 7\text{mm}$ で、流速 20m/s 程度的高速まで流速を調整できる。冷却系には熱交換器およびヒーターを導入しており、冷却水温度の調整も可能である。ゼロフォノンライン (ZPL) の励起には最大 600 W の 969 nm (線幅 $<1\text{ nm}$) LD を用いた。LD のビーム径は $\phi 2.3\text{ mm}$ とした。TRAM の両側にダイクロイックミラー (DM) と出力ミラー (OC、反射率 85%) を配置して共振器を構成し、パワーメータ (PM)、およびフォトダイオード (PD) により発振出力を観測した。分光器 (SP) を用いて媒質の蛍

光スペクトルを同時計測し、スペクトル形状の温度変化から LD 励起中央部の媒質温度を算出した。

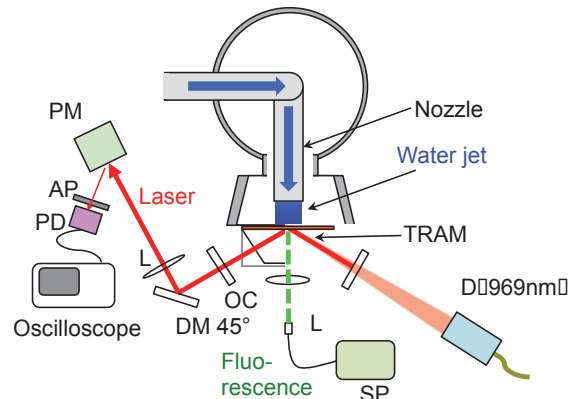


図 1 レーザー発振実験配置図

3. レーザー発振実験結果

3.1 冷却条件によるレーザー出力特性変化

水噴流法における冷却性能は主として、発熱体から冷媒への熱伝導性と、沸騰(この場合核沸騰)に伴う気化熱による除熱の2要素により決定される。この2要素を明確に分けることはできないが、熱伝導は噴流の速度(強制対流による冷却面での冷媒の入れ替わりの速さ)に大きく依存すると予測され、気化熱による除熱は、噴流速度だけでなく冷却水温度(沸騰温度との差)にも依存する可能性がある。これらについて検証するため、噴流速度、冷却水温度のそれぞれを変化させてレーザー発振実験を行い、冷却条件の違いによる出力特性の変化について検討した。

図2(a)に、噴流速度 5 m/s 、 10 m/s 、 17 m/s の各条件で計測したレーザー発振出力を示す。冷却水温度は $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$)、レーザー媒質には Yb 濃度 $5\text{ at\%}$ 、層厚 0.9 mm の TRAM を用いた。出力は噴流速度 17 m/s 時が最も大きく、 600 W の入力に対し 180 W の出力が得られた。一方、 5 m/s 時

の安定出力は 160W (600W 入力時) で、出力に 10 %以上の差が見られた。出力と同時計測した媒質温度 (励起中央部) を図 3 (b) に示す。媒質温度は噴流速度が小さくなると増加する。17 m/s 時に最も温度上昇が抑制されている。これらの結果は、噴流速度の増加により冷却性能が向上して媒質温度の上昇が抑制され、入力が同じ場合に出力はより増加することを示している。

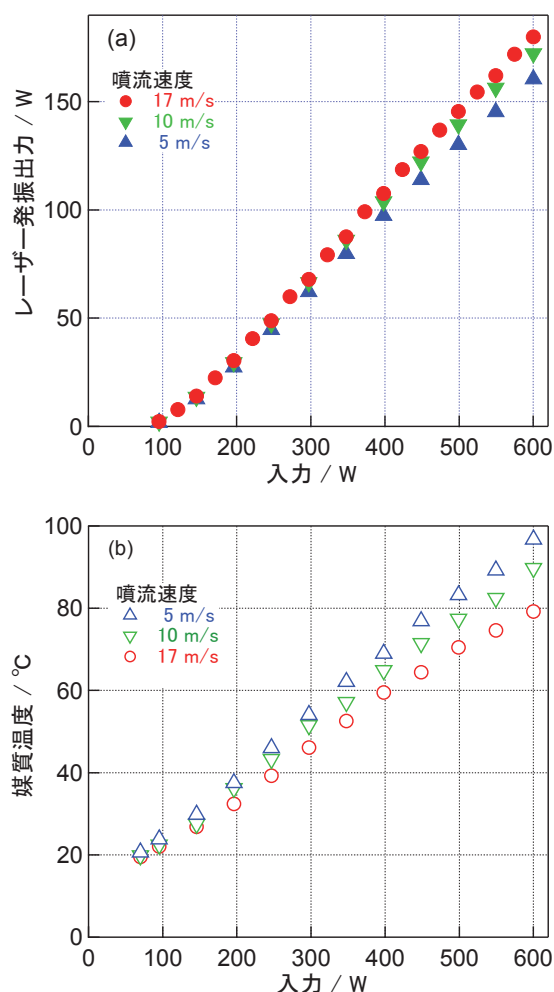


図 2 噴流速度を変化させた条件での入力に対する (a) レーザー発振出力、(b) 媒質温度 (冷却水温度 19 °C、Yb 濃度 5 at%、層厚 0.9 mm TRAM)。

図 3 に、冷却水温度を 19 °C (常温)、50 °C、75 °C に変えた条件で計測したレーザー出力を示す。媒質は Yb 濃度 5 at%、層厚 0.9 mm の TRAM、

噴流速度は 5 m/s とした。TRAM の光吸収率は媒質温度によって異なることから、吸収パワーに対して出力をプロットし、レーザー特性を比較した。冷却水温度が増加すると発振閾値は増大し、スロープ効率は 19 °C 時の ~ 50 % から 75 °C 時の ~ 40 % まで低下した。

これらの結果から、水噴流冷却において高噴流速度、低水温の冷却条件がレーザー発振の高効率化、高出力化に有利に働くことが明らかとなった。

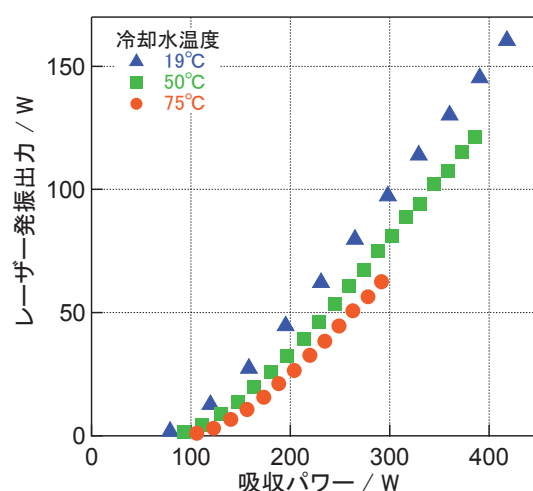


図 3 冷却水温度を変化させた条件でのレーザー発振特性 (噴流速度 5 m/s、Yb 濃度 5 at%、層厚 0.9 mm TRAM)。

3.2 レーザー出力特性の媒質効果

TRAM におけるレーザー出力特性は、Yb:YAG 層の Yb 濃度および層厚により異なる³⁾。常温駆動時の Yb 濃度および層厚のレーザー出力特性への効果について検討するため、Yb:濃度、層厚の異なる 2 種の TRAM (Yb 濃度 5 at%-層厚 0.6 mm TRAM、濃度 9.8 at%-層厚 0.4 mm TRAM) を用い、前項で用いた Yb 濃度 5 at%-層厚 0.9 mm の TRAM と同一条件でレーザー発振実験を行い、出力特性を比較した。噴流の速度は 17 m/s、水温は 19 °C とした。図 4 に、各 TRAM における発振出力を示す。レーザー特性を比較するため、出力は吸収パワーに対してプロットした。3 種の TRAM 全てにおいて 150 W 以上の出力が

得られた。最大出力は、Yb 濃度 5 at%-層厚 0.6 mm TRAM で 170W、Yb 濃度 5 at%-層厚 0.9 mm TRAM で 180W、Yb 濃度 9.8 at%-層厚 0.4 mm TRAM で 161W であった (600W 入力時)。Yb 濃度 5 at%-層厚 0.9 mm TRAM の 180W が最大であるが、これは Yb:YAG 層の層厚が厚く、入力に対する光吸収率も高くなるためである。吸収パワーに対する出力特性が最も高いのは、Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mmTRAM である。出力モデル²⁾による予測では、Yb:濃度が同じ場合には層厚の薄い TRAM の方が発振閾値は低下し、吸収パワーに対する出力特性はより高くなる。また層厚が同じ場合には、Yb:濃度が高い方が発振閾値は増加し、特性は低下する。Yb 濃度 9.8 at%-層厚 0.4 mm TRAM は、他の TRAM と比べ Yb 濃度は高いが、層厚が薄いので 2 種の Yb 濃度 5at% TRAM の中間の出力特性を示す。これらの結果から、3 種の TRAM のうち Yb 濃度 5at%-層厚 0.6mm の TRAM が吸収パワーに対するレーザー特性が最も高い媒質であることが実験的に確認された。

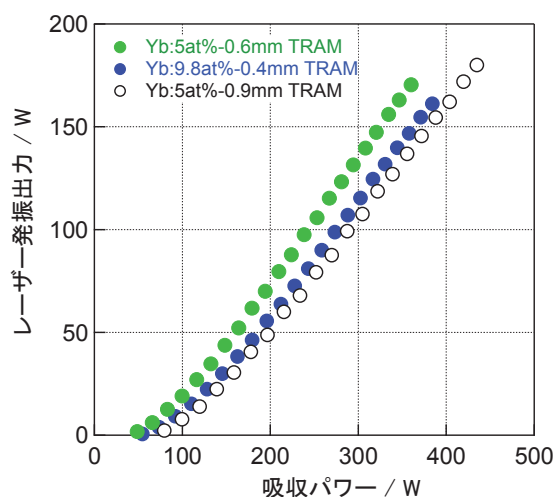


図 4 Yb 濃度、Yb 層厚の異なる TRAM のレーザー発振特性。Yb 濃度 5 at%-層厚 0.6 mm TRAM が最も高いレーザー出力特性を示す。

3.3 高出力化に向けたスケーリング

最も高いレーザー特性を持つ Yb 濃度 5 at%-層厚 0.6 mm TRAM と有利な噴流冷却条件 (噴流速度 17 m/s, 冷却水温 19℃) でのレーザー発振実験の結果に基づき、

出力予測モデル²⁾を用いた高出力スケーリングを行った。図 5 に、噴流冷却下 (噴流速度 17 m/s, 冷却水温 19℃) で発振する Yb 濃度 5at%-層厚 0.6 mm TRAM レーザーについて、励起ビーム径をそれぞれ $\phi 5$ mm、 $\phi 6$ mm、 $\phi 7$ mm とした際の吸収パワーと出力の関係を示す。励起波長は、現状で高励起条件での実験が可能な 940 nm とした。吸収密度の増大によりビーム径が小さい方が吸収パワーに対してより高い出力が得られるが、いずれの条件においても 2 kW 付近の吸収パワーで kW 級の発振出力が得られるものと予測される。今後、高励起条件でのレーザー発振実験を行い、kW 級の出力を目指して開発を進める予定である。

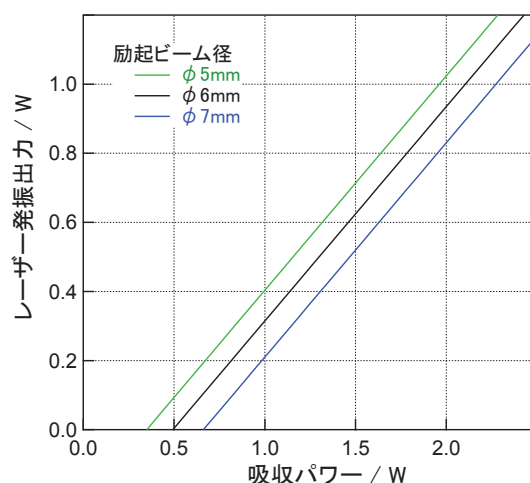


図 5 励起ビーム径 (緑線) $\phi 5$ mm、(黒線) $\phi 6$ mm、(青線) $\phi 7$ mm 時の吸収パワーに対する発振出力予測 (940nm 励起)。

4. まとめと今後

本研究では、Yb:YAG TRAM レーザーの高出力化に向け、高い冷却性能が得られる水噴流冷却装置を新たに試作してレーザー発振実験を行った。冷却条件 (噴流速度、冷却水温度) のレーザー出力特性への効果について検討し、高噴流速度、低水温での冷却が出力特性に有利に働くことを示した。また TRAM の Yb 濃度、Yb:YAG 層厚の効果について検討を行い、噴流冷却下で 150 W 以上の安定な発振出力 (最大 180 W) を得ると共に、低 Yb 濃度、低層厚 (Yb 濃度 5 at%-

層厚0.6 mm) の TRAM が最も高い出力特性を示すことを実験的に確認した。実験結果に基づいて高出力化に向けたスケーリングを行い、kW 級出力条件の予測を行った。今後、高励起条件でのレーザー発振実験の実施、冷却装置の改良による冷却性能のさらなる向上など、常温動作 kW 級高平均出力レーザーの開発に向け具体的な取り組みを行っていく予定である。

謝辞

本研究は、安全保障研究推進制度（研究課題名「ゼロフォノンライン励起新型高出力 Yb:YAG セラミックレーザー」）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) K. Hamamoto, T. Morioka, S. Nishikata, N. Inoue, J. Nakatani, S. Taniguchi, H. Chosrowjan, Y. Izawa, in “*Advanced Solid State Lasers (ASSL '15)*” *Technical Digest*, paper-ATu2A.41, 2015.
- 2) ILT 2017 年報, pp. 9-13 .
- 3) H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyana, H. Chosrowjan, M. Fujita, K. Takeshita, Y. Izawa, *Optics Express*, **20**, 21739-21748, 2012.

Lasing Characteristics of Corner Cube Retro-Reflector Resonators

Laser Process Research Team

Haik Chosrowjan and Seiji Taniguchi

1. Introduction

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

Corner-cube retro-reflectors (CCR) are optical components with interesting reflective and polarization characteristics. Various CCR properties have been addressed theoretically in numerous previous publications⁵⁾. One of their feature is that the collimated radiation incident at arbitrary direction is reflected back in the direction that is counter-parallel to the incident beam. Another feature is that the reflected beam has coherent properties which could be used for passive intra-resonator coherent beam combining (CBC). This process is schematically shown in Fig. 1 and briefly described in its caption. By rotation of the CCR one could also compensate the beam astigmatism induced by thermal load in the laser active medium. Finally, the retro-reflective property of CCR makes the resonators with CCRs extremely stable to the environmental vibrations. For these reasons CCRs are already used as total-reflecting mirrors in laser resonators⁶⁾.

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. So, in our previous report⁷⁾ we have presented experimental and calculated results on the basic polarization and reflection properties of the corner-cube. Near- and far-field intensity distribution profiles for depolarized, p- and s- polarized outputs of the CCR 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.

In this report, the lasing performance of the CCR based resonator has been addressed in comparison with conventional Fabry-Perrot (FP) resonator. Lasing threshold, slope efficiency, near- and far-field intensity distribution profiles have been monitored. Passive CBC effect inside the CCR resonator is demonstrated based on experimental results and mode calculations.

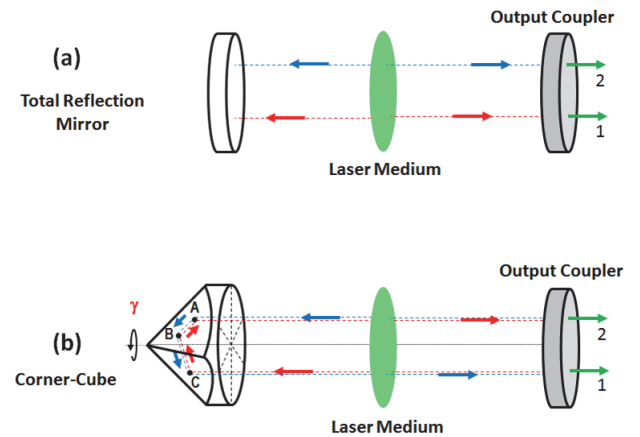


Fig. 1 Comparison between (a) Fabri-Perrot and (b) CCR based resonators. For large excitation spots and multi-mode operation, in case (a) the areas in the beam profile like 1 and 2 are not phase-locked, while in case (b) the areas 1 and 2 are phase-locked because of mutual injection in the resonator.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

2. Total internal reflection based CCR

CCRs are often fabricated using fused silica or various glass materials. For achieving retro-reflection of an optical beam, one can coat the reflective surfaces with different metallic or dielectric substrates or simply use them with well-polished but uncoated surfaces. In the later case the total internal reflection (TIR) phenomenon, characterized by critical incidence angle $\theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$, where $n_1 > n_2$, is used for the incidence beam retro-reflection. For high-power laser beam applications retro-reflectors with coated surfaces are not appropriate because of anticipated thermal degradation and damage of the coated surfaces. Hence, we used an uncoated CCR (N-BK7 glass, $n = 1.5071$ at 1030 nm, $\theta_c = 41.57$ degrees) where reflection is based on the TIR phenomenon.

3. Experimental results and discussion

The experimental resonator setup used in this study is schematically illustrated in Fig. 2.

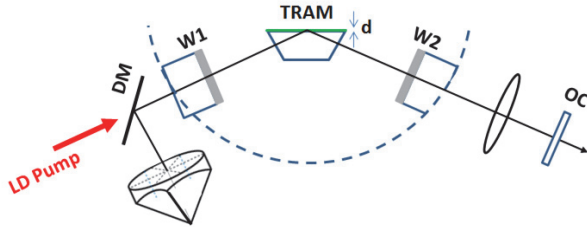


Fig. 2 Experimental setup diagram for comparative investigations of lasing characteristics for resonators with conventional high-reflecting mirror and a CCR: DM - dichroic mirror, W1, W2 - cryostat windows, OC - output coupler, TRAM - total reflection active mirror, d - Yb doped layer thickness. The cryostat perimeter is marked with the dotted line.

Cryogenically (LN_2) cooled Yb:YAG total reflection active mirror (TRAM) with 9.8 at % doped ytterbium and $d = 0.2$ mm thickness was used as an active medium. The total length of the resonator was set to be 460 mm while the LD excitation ($P_{\max} \sim 200$ W) spot was kept at ~ 1.8 mm in

diameter. Both, a conventional 100 % reflective mirror (Fabry-Perot (FP) resonator) and a CCR were used as high reflective elements in the resonator.

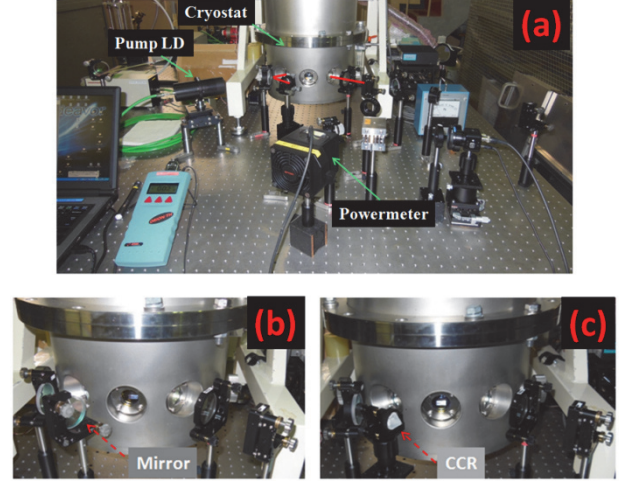


Fig. 3 (a) A snapshot of the cryogenic Yb:YAG laser system. The resonator is shown by a red solid line. (b) FP resonator with conventional 100 % reflective mirror. (c) CCR resonator with 100 % reflective corner-cube.

In Fig. 3 (a) a snapshot of the experimental laser setup is presented. Fig. 3 (b) and (c) show the interchangeable high-reflective mirror and CCR elements used in FP and CCR resonators, respectively.

In Fig. 4 the laser output power versus the absorbed pump power for both FP and CCR resonators are presented.

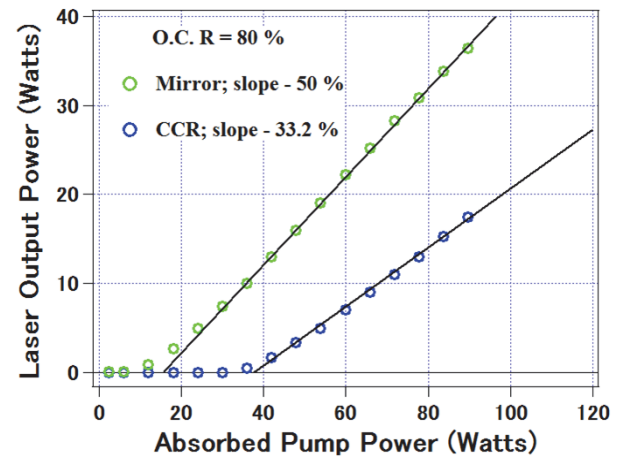


Fig. 4 Output- vs. absorbed pump power dependences for lasers with conventional- (mirror) and CCR high-reflective elements, respectively.

In both experiments the same 80 % reflective output coupler (OC) was used. The laser threshold and the slope efficiencies were measured to be about 700 W/cm² and 0.5 for the FP resonator, and 1.5 kW/cm² and 0.33 for the CCR resonator, respectively. The obtained slope efficiency for FP resonator matches well with our previous result of 0.525 using 84.6 % reflective OC⁸⁾. A 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 efficiency for CCR resonator is explained by the small beam diameter on the CCR incurring fractionally large losses due to the scattering on the tip and corners of the CCR.

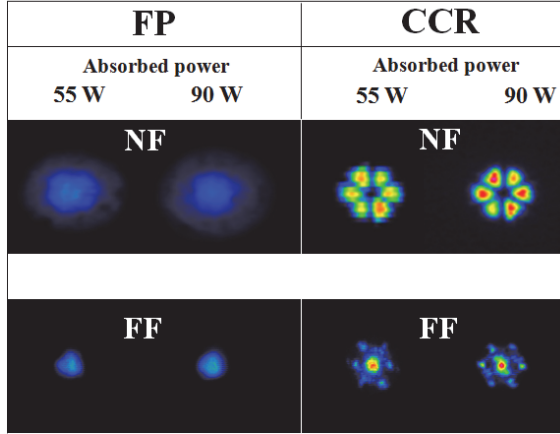


Fig. 5 NF (top) and FF (bottom) intensity distribution patterns of a FP (right) and CCR (left) laser beams for 55 W and 90 W absorbed pump power cases, respectively.

One of the merits using a 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 a CCR could possibly improve that detrimental thermal effect. However, in the available TRAM sample ($d = 0.2$ mm) the pump power ($P_{\max} \sim 200$ W) absorption ratio was only 0.45 and the thermal roll-over effect has not appeared at cryogenic temperatures. We are planning to study the possible thermal roll-over improvement effect in the CCR resonator at ambient temperature lasing experiments in the near future.

Near field (NF) and far field (FF) intensity distributions of

the FP and CCR resonator outputs have been also analyzed. In Fig. 5, NF and FF output intensity distributions of CCR 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. Based on resonator configuration one can also deduce that the FP resonator operates at multi-mode regime. On the other hand, although the NF intensity profiles for the CCR resonator look like the higher order TEM₀₃ Laguerre-Gaussian mode (LG03), the FF patterns show a strong symmetrical central peak surrounded by six weaker peaks (Fig. 5, bottom right). There have been different opinions for the reason why a CCR can contribute to improve the laser FF power focalization. Some considered the CCR resonator output to be a LG03 mode based solely on the NF profile of the output beam,⁹⁾ while some thought that the FF intensity distribution possesses quasi-phase conjugate characteristics¹⁰⁾. To clarify the origin of the CCR resonator output, we have performed model calculations of mode characteristics of CCR resonators based on Jones matrix formalism and Fresnel-Kirchhoff diffraction integral equation, and present obtained results in Fig. 6 together with the experimental results. Calculated NF and FF profiles of higher order TEM₀₃ Laguerre-Gaussian mode (LG03) are also presented for better comparison.

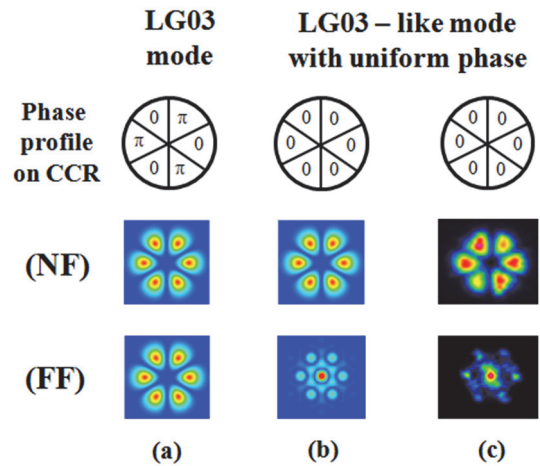


Fig. 6 (a column) Calculated NF and FF profiles of the LG03 mode; (b column) calculated, and (c column) measured NF and FF profiles of CCR resonator output.

When a CCR is viewed along a symmetric optical axis, the NF distribution of the output beam is seen to be divided into six fan-shaped segments by three reflected surfaces and edges of the CCR. The NF profiles of the (a) and (b) columns in Fig. 6 are identical. However, the calculated and measured FF patterns of the CCR resonator unambiguously demonstrate that the CCR resonator output is not a LG03 mode. The six separated beam parts are coherent (in-phase), indicating the coherent nature of the CCR reflected beams and hence, possibility of passive intra-resonator coherent beam combination (CBC), when a CCR is used as a high reflection element. The CCR based passive CBC in bulk solid-state lasers is especially promising for obtaining high energy pulsed beams, because in fiber laser based active CBC it is difficult to achieve high energy pulsed outputs.

5. Conclusions

Lasing properties of corner-cube (CCR, N-BK7 glass, $n = 1.5071$ at 1030 nm) retro-reflector based resonator in comparison with conventional Fabry-Perot resonator have been studied experimentally and theoretically for the aim to characterize intra-resonator passive coherent beam combining (CBC) phenomenon. The laser threshold and the slope efficiencies were estimated to be about 700 W/cm² and 0.5 and 1.5 kW/cm² and 0.33 for FP and CCR resonators, respectively. The maximum output power achieved from the CCR resonator was ~ 17.5 W.

Near field and far field intensity distribution profiles of CCR resonator output has been analyzed and compared with the calculations. Thermal effects for presently applied pump powers hardly affected the main features of the beam intensity profiles. Although the NF intensity profile for CCR looks like the higher order TEM₀₃ Laguerre-Gaussian mode (LG03), the FF pattern unambiguously demonstrates that the six separated beam parts are coherent and in-phase. The coherent nature of the CCR reflected beams opens a possibility of passive intra-resonator coherent beam combination when a CCR is

used as a high reflection element.

Presently efforts are made to demonstrate and study ambient temperature Yb:YAG TRAM laser radiation characteristics based on resonators with retro-reflective elements.

Acknowledgment

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

References

- 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) 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.
- 4) B. Singh, V. V. Subramanyam, S. L. Daultabad, and A. Chakraborty: Rev. of Sci. Instr., **81**, 073110; 1 – 4, 2010.
- 5) W. He, Y. Fu, Y. Zheng, L. Zhang, J. Wang, Z. Liu, and J. Zheng: Applied Optics, **52** (19), 4527 – 4535, 2013.
- 6) 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.
- 7) H. Chosrowjan and S. Taniguchi: ILT2017 Annual Progress Report, 14 – 19, 2017.
- 8) H. Furuse, J. Kawanaka, K. Takeshita, N. Miyanaga, T. Saiki, K. Imasaki, M. Fujita, and S. Ishii: Opt. Lett. **34** (21), 3439 – 3441, 2009.
- 9) Z. E. Bagdasarov, Ya. Z. Virnik, S. P. Vorotilin, V. B. Gerasimov, V. M. Zaika, M. V. Zakharov, V. M. Kazanskii, Yu. A. Kalinin, V. K. Orlov, A. K. Piskunov, A. Ya. Sagalovich, A. F. Suchkov, and N. D. Ustinov: Sov. J. Quantum Electron. **11**, 1465 – 1471, 1981.
- 10) M. X. Shen, S. M. Wang, L. G. Hu, and D. M. Zhao: Appl. Opt. **43**, 4091 – 4094, 2004.

海上ラマンライダーの開発

レーザープロセス研究チーム

染川智弘、倉橋慎理、藤田雅之

1. はじめに

日本の領海・排他的経済水域は国土面積に比べて12倍程度と広く、海底鉱物資源・メタンハイドレート掘削、CO₂を海底地層に圧入して大規模削減を目指すCCS(Carbon dioxide Capture and Storage)等の有効な海底利用が計画されている。海底開発では資源探査手法の開発だけでなく、海底開発による海洋生態系・環境への影響評価が必要とされている。現状の採水測定では評価頻度・エリアに限度があり、海中での短時間・広範囲なモニタリング手法の開発が必要である。そこで、海底を効率よくモニタリングするために、水中ガスラマンライダーによる海中モニタリング技術を開発している。これまでに水に溶存しているCO₂ガスのラマン信号を用いて、20 m 先に設置した水と炭酸水の識別に成功し、水溶存ガスのラマンライダーによって海中のガスモニタリングが実施できる可能性を示したり。また、水に溶存しているCO₂ガス濃度の定量評価にも成功し²⁾、気泡・海水の影響評価も行った^{3,4)}。本手法はCO₂ガス以外への応用も可能であり、波長355 nmのレーザーを利用した水中メタンガスのラマン法による評価も行っている⁵⁾。

水中ガスラマンライダーによる海中モニタリングの可能性を評価するために、竹富島海底温泉での海上観測を実施した。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と比較的浅い箇所からメタンガスを70%程度含む火山性ガスの湧出があり、竹富島海底温泉と呼ばれている。本報告では武富島海底観測実験の前に実施した沼津のオキシーテックでの海上ラマンライダー動作試験と武富島海底温泉での船上観測について報告する。

2. 海上ラマンライダーの開発

図1に海上ラマンライダーのブロック図と写真を示

す。波長355 nm、出力120 mJ、繰り返し20 Hzのレーザーは鉛直下向きに海中に照射され、海中からの散乱光は直径20 cmの望遠鏡で集め、光ファイバーで光路30 cmの分光器に導く。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)が搭載されている。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。

システムは海上での観測を想定すると、塩害による機器のトラブル対策のために密閉する必要があるが、レーザー電源やCCDカメラなどの熱によって温度が上昇し、装置が不具合を起こす可能性がある。そのため、除塩フィルター付きのファンを取り付け、強制的にシステム内の排熱を行っている。このファンを動作させた状態では、温度上昇が緩やかになり、安定したレーザー出力を数時間得ることに成功した。また、温度上昇によるCCDカメラなどの測定機器に不具合も生じないことを確認した。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台で全システムの動作が可能であるため、船上での利用も容易である。

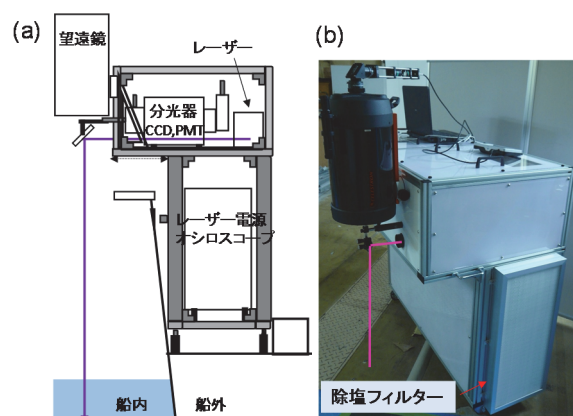


図1 (a)海上ラマンライダーの(a)ブロック図と(b)写真

3. 海上ラマンライダーの開発

3.1 沼津での動作試験

オキシテックの計測バージである SEATECH II は船内に3×7mの開口部を有し、冷暖房が完備された船内から海中（水深31m程度）にレーザーを照射することが可能である。阪大吹田キャンパスから沼津のオキシテックまではエアサスペンション・パワーゲート付きの4トントラックでの輸送となった。計測バージは船で5分程度の海上に停泊しており、海上ラマンライダーシステムはクレーンを用いて小型船で計測バージまで輸送した（図2(a)）。これらの輸送によって、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(b)に計測バージの開口部での海上ラマンライダー試験の様子を示す。ライダーシステムは開口部から海をのぞき込むように設置しており、落下防止のためにクレーンに命綱をかけて実験を実施した。計測結果の1例として、図3に本システムで得られた海水のラマンスペクトルを示す。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であり、～1600 cm^{-1} に見られる小さい信号が水の変角振動のラマン信号である。ラマンライダー信号、ラマンスペクトルの両信号ともに問題なく取得が可能であることを確認した。

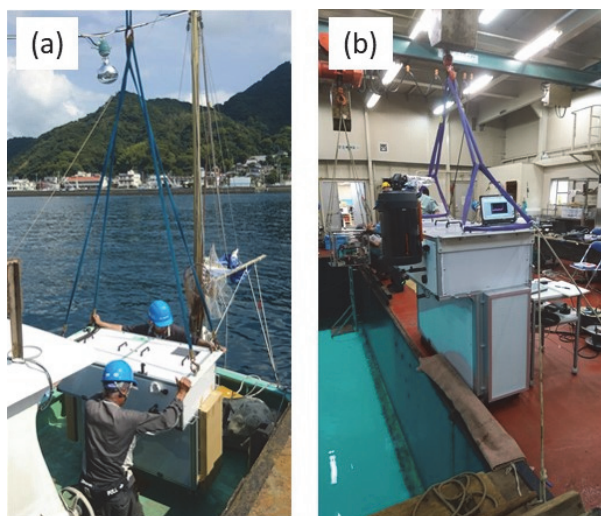


図2 (a)海上ラマンライダーシステムの計測バージへの積み込みの様子、(b)計測バージの開口部での海上ラマンライダー試験の様子

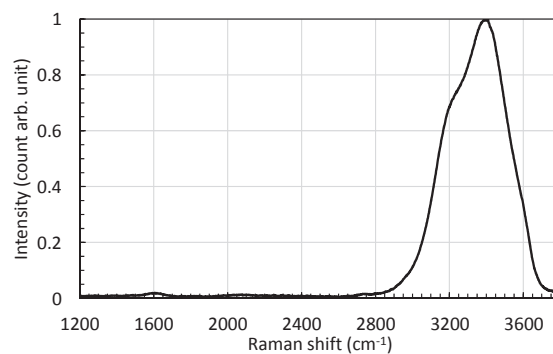


図3 計測バージでの海上ラマンライダーによる海水のラマンスペクトル

3.2 武富島海底温泉での船上観測

武富島海底温泉での海上観測はH30年の2月19日～23日の5日間にわたって、八重山漁協組合支所の協力のもと実施された。また、海上保安庁などの現地との調整はORE/シーサポートタッチの鈴木氏に事前に依頼した。武富島海底温泉は武富島の東港から東に約1kmの海上にあり、石垣島の八重山漁協組合支所の港から船で15分程度である。石垣島の離島ターミナルから武富島まで向かう定期船航路の近くであるために、30分間隔の定期船が通るたびに観測船が揺れた。

海上ラマンライダーシステムは阪大吹田キャンパスから4トントラックで大阪南港まで移動し、南港で木枠に梱包され（図4）、コンテナ輸送にて石垣島まで輸送された。船での輸送に全体で1週間程度かかるために、装置は防湿シートで保護している。八重山漁協組合支所にはコンテナを搭載した大型トラックで到着し、フォークリフトで木枠を取り出した（図5）。



図4 海上ラマンライダーシステムの木枠梱包の様子



図5 海上ラマンライダーシステムのコンテナから積み出しの様子

図6に漁船に搭載した海上ラマンライダーの写真と武富島海底温泉での観測の様子を示す。漁船の左側前方に海上ラマンライダーを設置し、ロープと木で漁船に固定した。漁船への積み込みはクレーンとフォークリフトを利用した。武富島海底温泉までは装置をブルーシート

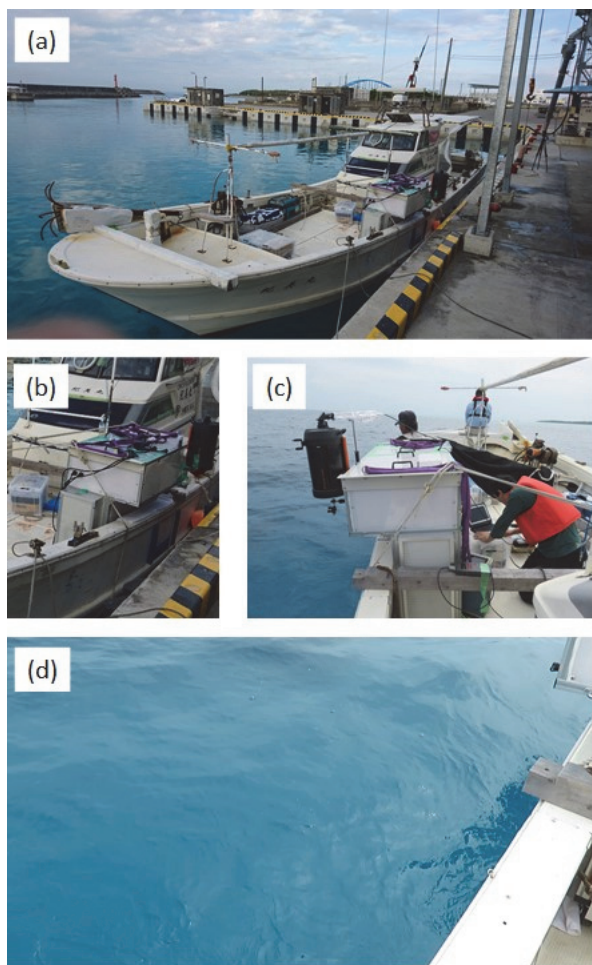


図6 (a),(b)漁船に搭載した海上ラマンライダーシステム、(c),(d)武富島海底温泉での観測の様子

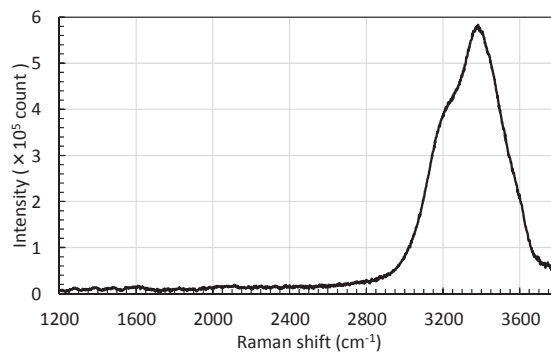


図7 武富島海底温泉での海上ラマンライダーシステムによるラマンスペクトル

で覆い、移動によって装置に海水がかかるのを防いだ。図6(c)が船上の海上ラマンライダー観測の様子であり、(d)の中心部に見られる気泡が海中から上がってきているメタンガス気泡の写真である。船は碇である程度、停泊させているが、レーザーを海中に照射している際は、船長が気泡の真上になるように船を微調整している。

図7に武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を示す。測定は1000回積算で実施した。図3に示した沼津での海水のラマンスペクトルと同じであるが、強度が小さい箇所ではノイズが大きいことがわかる。また、メタンのラマン信号は微弱であり観測ができていない。実際の海上では、波による太陽光の散乱が時々刻々変化するために、スペクトル測定において長時間の積算が難しいことがわかった。また、水のラマン波長である 3405 cm^{-1} のライダー信号は水深約20 mまで信号が得ることが可能であった。

4. まとめ

海底開発における海中の環境影響評価を効率的に実施するために、水中にあるガスのラマンライダーによる海中モニタリング手法の開発を行っている。小型漁船に搭載可能な海上ラマンライダーシステムを開発し、沼津のオキシーテックの計測バージにおいて動作試験を実施した後、武富島海底温泉にて海上観測を実施した。

今後は較正信号である水と計測ガスを同時に評価できる計測系の開発や、海上でのラマンスペクトルの取得に向けた検討を実施するだけでなく、小型・省電力

なライダーシステムの開発も行いたいと考えている。

謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP25871083, JP15H05336 の助成を受けたものです。

参考文献

- 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, M. Fujita: Proc. ILRC28, 011_172, 2017.
- 6) T. Somekawa, T. Kitamura, and M. Fujita: Extended Abstracts of the 24th Congress of International Commission for Optics, P3-08, 2017..

実用化を目指すレーザーを用いたコンクリート欠陥検査

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

1. はじめに

高度成長期に建設されたトンネルなどのコンクリート構造物の老朽化、およびそれを要因とする事故の発生が近年の問題となっている。また、地震などの災害も増えており、災害が生じた場合に構造物が健全であるかを迅速に判定する検査手法の確立が求められている。

当研究所では、検査したい箇所にパルスレーザーを照射して物体に振動を誘起し、発生した振動をレーザー干渉計で検出し、振動特性の違いから欠陥の有無を高速・高精度で遠隔検査するレーザー検査技術を開発してきた。研究内容は、西日本旅客鉄道(株)との共同研究によるトンネル覆工コンクリートの欠陥検査、駒井ハルテックや東京工業大学と共同で行ってきた鋼板接着床版の欠陥検査、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の下で量子科学技術研究開発機構と共同で実施してきた高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の研究開発に大別できる。SIPの成果については別に報告¹⁾があるので、本稿ではトンネル覆工コンクリートと鋼板接着床版の欠陥検査の成果について概要を述べる。

2. レーザーを用いた新幹線トンネル覆工コンクリート検査技術

当研究所では、2012年にレーザー検査装置をトロッコに積載した線路走行型レーザー検査装置を構築し、実



図1 中央通路自走型レーザー検査装置

際に新幹線トンネル内での覆工コンクリート検査試験を行った。また、近年では、山陽新幹線トンネル中央部にある幅約1mの中央通路を自走するレーザー検査装置を開発した²⁾。

図1に、中央通路自走型レーザー検査装置の写真を示す。本年度は、コンクリートに打撃を与えるインパクトレーザーの高出力化と高繰り返し化の開発を進めた。さらに実運用を考慮して、あらかじめ決められた位置に自動でレーザーを出射するオート照射機能や、得られた信号波形から検査箇所の健全性を自動判定する手法などの新機能を付加した。また、レーザー照射時には危険を知らせるランプが点灯するなどの安全対策も施した。

現在、山陽新幹線トンネル内で実験を継続し、打音検査法による欠陥検査との比較を行っており、数年後には打音検査に代わる技術として実用化を目指している。

3. レーザーを用いた鋼板接着高架橋床版の浮き箇所検査技術

高速道路などの高架橋床版にはコンクリート床版の強度を増加させるため、鋼板接着床版が用いられている。コンクリートと鋼板とを接着する接着剤が経年劣化などによりコンクリート床版から剥離すると、コンクリートと鋼板の一体構造を保つことができずに強度が低下する。鋼板接着床版の浮きを検査するために打音検査法が用いられているが、危険性をともなう高所作業が必要となることや、定量的なデータを蓄積することが困難であること等の課題があり、これに代わる安全で定量的な遠隔検査法の開発が求められている。

当研究所では鋼板接着床版の検査にもレーザー検査技術を用いることを提案し、実用化を目指した研究開発を行ってきた³⁾。本年度はコンパクトな可搬型レーザー検査装置を構築し、実橋梁の鋼板接着床版での浮きの計測実験を行った。また、鋼板の厚みを計測するためのレーザー超音波実験も行った。

3.1 鋼板接着床版の浮き検査技術

図2に可搬型レーザー検査装置の外観を示す。軽トラックにレーザー計測装置や制御装置および結果表示用のモニターなどを積載した。レーザー光の出射口部分に2軸ミラーを設置して、検査位置を大きく変化させたり、特定の検査位置でレーザー光をスキャンできるシステムとした。図2b)は高架橋床版検査時の写真で、レーザー光は垂直方向だけでなく、斜め45°上方向にも照射して計測が可能である。

打音法で浮きが検出された3箇所の欠陥部に対し、レーザー光のラスタースキャン(x、yの2軸スキャン)を行った。得られた検査結果を図3に示す。床版写真の上に検査結果を上書きした。縦横線の交点がレーザー照射箇所である。赤色部分が浮き(空隙)と判定された箇所、緑色は健全と判定された箇所である。レーザー照射箇所は離散的であるので、配色は各レーザー照射箇所の色から次の点の色までを内挿することで決定した。床版



a) 軽トラックに積載したレーザー検査装置



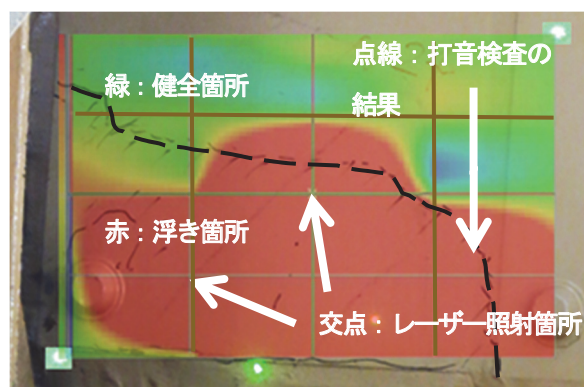
b) レーザー照射時の写真

図2 可搬型レーザー検査装置

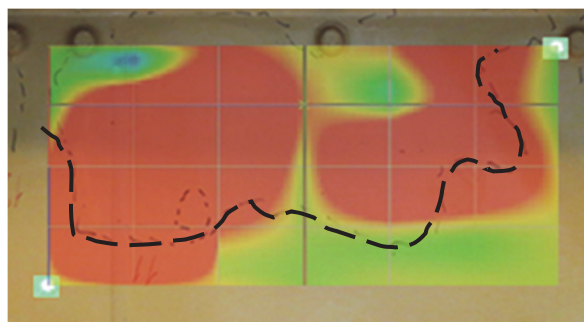
に点線でチョーキングされた部分は打音検査で浮きと判定された部分である。打音検査の間隔に比べてレーザー照射間隔距離が広いため、ハンマーによる検査結果と厳密には一致しないが、ほぼ浮きの領域を捉えることができた。また、騒音レベルが85 dBを超える状況でも計測が可能であることを確認した。

3.2 レーザー超音波法を用いた鋼板肉厚計測

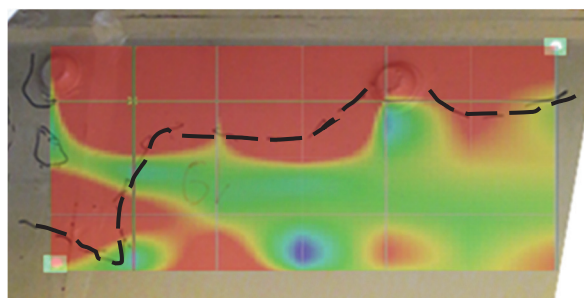
鋼板接着床版に浮きがあると、そこに雨水がたまり鋼板がさびて肉厚が薄くなっている可能性がある。このため、鋼板の肉厚を簡易に計測する技術が求められている。レーザー超音波を利用して鋼板肉厚を遠隔から計測する可



a) 浮き箇所1



b) 浮き箇所2



c) 浮き箇所3

図3 鋼板接着床版の浮きの検査結果

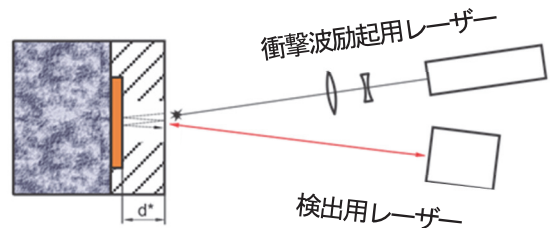
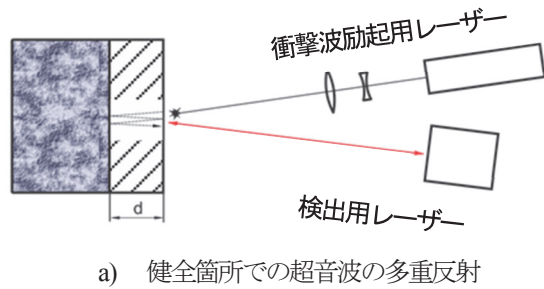


図4 レーザー超音波法を用いた鋼板肉厚計測

性能について検討した。図4に鋼板肉厚の計測原理を示す。パルスレーザーを鋼板に照射すると鋼板内部に超音波が発生する。超音波が鋼板裏面と表面を多重反射する時間(周期)を検出用レーザーで計測することで肉厚を計測する。多重反射するエコーの周波数 F_{ml} (1/周期) は次式で表される。

$$F_{ml} = V / 2d$$

ここで、 V は鋼板内の超音波速度、 d は肉厚である。超音波速度を 5.9 km/s、板厚を 5 mm とすると F_{ml} は

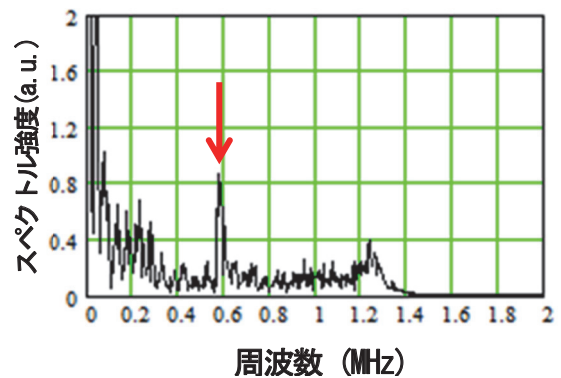
$$F_{ml} = 5.9 \text{ (km/s)} / \{2 \times 5 \text{ (mm)}\} = 0.59 \text{ (MHz)}$$

となる。鋼板が錆等により腐食して肉厚が 3 mm になると多重反射する周波数は

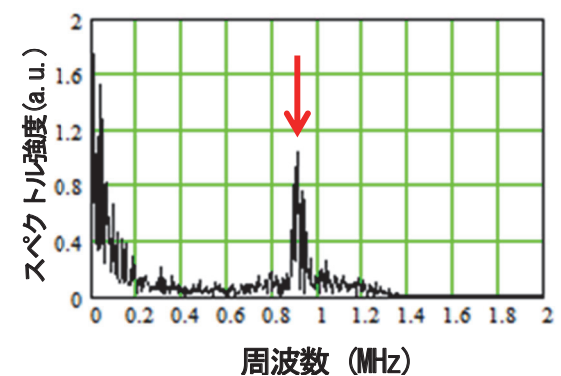
$$F_{ml} = 5.9 \text{ (km/s)} / \{2 \times 3.3 \text{ (mm)}\} = 0.89 \text{ (MHz)}$$

となり、健全時の 590 kHz より大きくなるので、肉厚の減少を判定することができる。

図5に実験結果を示す。実験では厚さ 5.0 mm と 3.3 mm の鋼板を用いた。超音波波励起用レーザーと検出用レーザーは鋼板表面上で数 cm 離して照射した。図5a) は鋼板厚さ 5.0 mm の場合で、多重反射周波数は 0.6 MHz であった。一方、3.3 mm 厚さの鋼板(同図 b) では多重反射周波数は 0.9 MHz であり、明確な差が見られる。



a) 鋼板肉厚 5.0 mm のスペクトル(卓越周波数 0.6 MHz)



b) 鋼板肉厚 3.3 mm のスペクトル(卓越周波数 0.9 MHz)

図5 鋼板肉厚を変化させた場合の超音波の多重反射スペクトル

この結果より、多重反射周波数を計測することで鋼板肉厚が評価できることを示した。

4. まとめ

本稿では、レーザーを用いたトンネル覆工コンクリート欠陥や鋼板接着床版の浮きを検出する技術の概要を紹介した。文献1)で紹介した高速検査技術の成果も含め、これらの技術の実用化に向けて鋭意努力を継続していく予定である。

参考文献

- 1) 倉橋慎理、島田義則: ILT2018 年報, pp.28-31
- 2) 島田義則, オレグコチャエフ, 倉橋慎理, 北村俊幸: レーザー研究, 45(7), pp.423-426, (2017).
- 3) O. Kotyaev, Y. Shimada, and S. Kurahashi: ILT2016 年報, pp.25-29.

レーザー打音法の高速化と屋外検査装置の開発

レーザー計測研究チーム

倉橋慎理、島田義則

1. はじめに

トンネルや橋梁などに代表される日本国内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年代のいわゆる高度経済成長期に建設されており、高経年による老朽化が懸念されている。平成11年に起こった福岡トンネル、北九州トンネルのコンクリート塊落下事故や、平成24年に起きた笹子トンネル天井パネル落下事故など、重大事故が実際に起こってしまった例も見られる。耐用年数を超過した社会インフラは本来ならば全面的な建替えや改修などにより計画的に更新されることが望ましいとされるが、現状ではコスト面などの問題から点検や補修など適切な維持管理を施すことでインフラの延命化を図るものが多い¹⁾。新規の建設が減少していく現代において、上記の傾向はより顕著になるであろうことが予測される。

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、また、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（量研機構）、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年度には量研機構の開発した高出力高繰り返しレーザーと当研究所が開発した遠隔探傷技術を組み合わせて、従来の計測速度の約50倍に相当する秒間25点の速さでレーザーを走査させながら欠陥を計測することに成功した⁶⁾。平成28年度には速度を倍の秒間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し、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、量研機構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ドップラー振動計を用いた。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

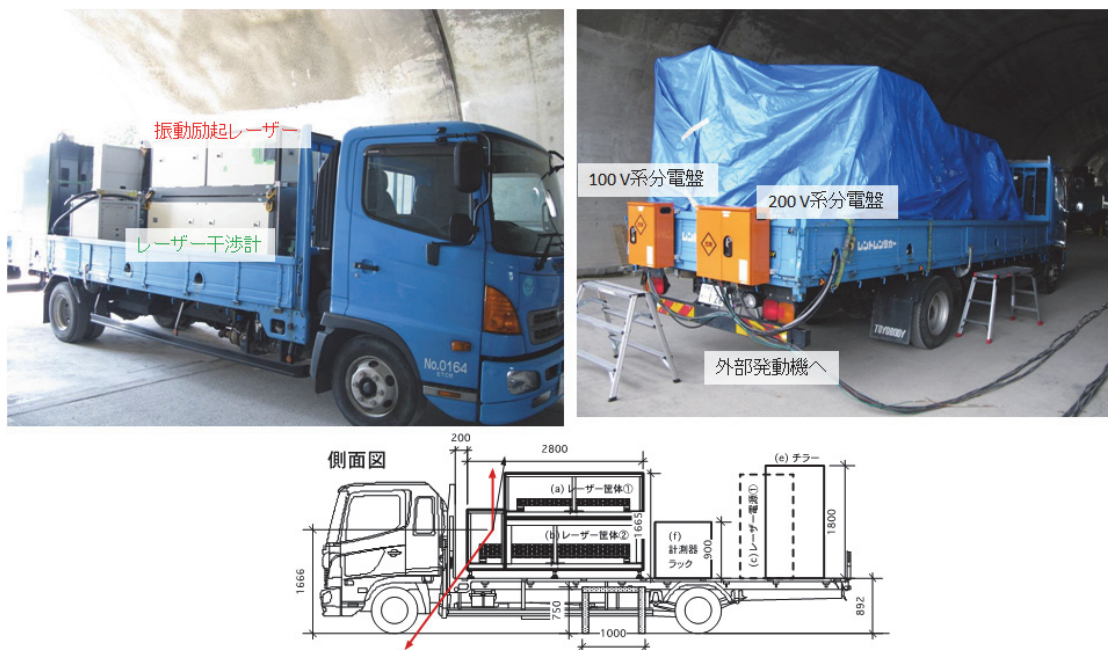


図1. 移動用車両に搭載した計測装置群の外観

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 検査装置の車載化

平成 28 年度には構築した検査装置を実験室外に持ち出してその性能試験を実施したが、平成 29 年度の目標は、1) 実際のトンネルに近い構造の模擬トンネルを使い、2) トンネル内で検査装置を移動させ、3) 複数の壁面領域を高速で走査して検査し、4) 検査装置の有効性を実証することとした。これらを達成するため、検査装置全体を 4 トントラックに搭載できるよう装置の小型化を進めた。図1に4 トントラックと検査装置の外観を示す。トラックの荷台にレーザー電源やチラー、制御機器を含めて、検査装置全体が搭載されている。ディーゼル発動機はトラックとは別の場所に設置し、100V、200V の二系統が分電盤と接続される。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。

3. 屋外実証試験

3.1 トラックのエンジンによる影響

本研究では、車両で任意の検査範囲近傍まで移動し、車両を一時停止させた状態で検査を行い、その領域における検査が終了した後、次の検査領域へ移動して再び検査を行う、という手順を繰り返すことを想定している。よって、車両がアイドリング状態であっても検査が可能であることが求められる。これを検証するため、エンジンの振動や騒音等が検査装置や検査結果に与える影響を確認する実験を行った。トラックの荷台、検査装置の筐体フレーム、検査装置内定盤のそれぞれに加速度センサーを設置し、トラックのエンジンをかけた状態でのデータ取得を行った。結果を図2に示す。加速度センサーから出力された時間波形（上）と、それを高速フーリエ変換（FFT）し周波数分解したデータ（下）の両方を表示している。アイドリング時のトラックのエンジンによる振動の主成分は、時間波形に見られる周期 40 ミリ秒程度のものだと考えられる。検査装置の筐体はトラックの荷台の上に直接設置されているため、トラックの荷台と筐体で加速度のレベルに差異は見られない。一方で、装置内定盤は防振機構を介して筐体に接続されており、定盤の加速度レベルは筐体の加速度レベルに比べて 20 デシベル程度低減されている。本装置の防振機構は、平成 28 年度の実験室外での試験に際して導入したもので

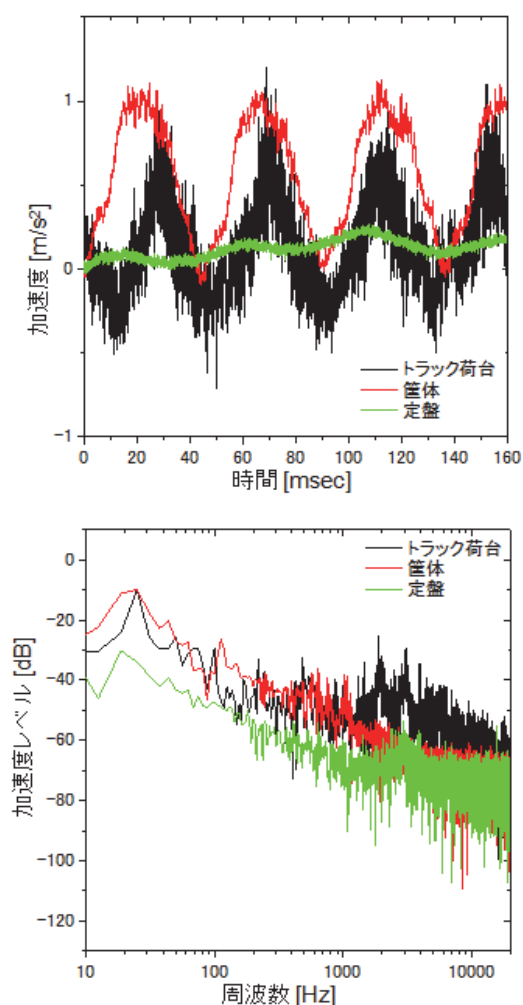


図 2. トラックのエンジン動作時に得られる各箇所における時間波形（上）と加速度スペクトル（下）

あり、本来は発電機や電源、チラーなどの振動がアスファルトを介して定盤に伝搬するのを防ぐ目的で設計したものであるが、この設計仕様は装置の移動に利用するトラックのエンジンに対する振動防止にも有効であることが実証できた。

3.2 模擬トンネルにおける実証試験

施工総研が所有する模擬トンネルにおいて、実証試験を実施した。模擬トンネルは延長 80m、高さ 7.8m、最大幅 12.4m で、その外観を図 3 に示す。壁は厚さ 20cm の吹付けコンクリート層と厚さ 30cm の覆工コンクリートの 2 層構造で、トンネル作業車の性能評価試験の他に、コンクリート補修材の開発テストや、照明などのトンネル設備の機能確認などに使用された実績を持つ。



図 3. 模擬トンネル外観

トンネル入り口から約 15m 入ったところの天頂部付近に、目地を横断する形で大きなひび割れが存在しており、この付近の領域を対象として移動型検査装置による検査を実施した。該当範囲は、事前に、我々自身が高所作業車を用いて近接打音検査を行い、異音部を検出し、欠陥があると判断した箇所である。

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、6m 離れた位置から、壁表面 270mm×270mm の領域を 30mm の間隔で検査した。計測点数は $10 \times 10 = 100$ 点である。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 4 に検査結果をまとめて表示した。背景の写真は壁表面の写真撮影画像で、中央部を水平方向に大きなひび割れが走っているのが見える。正方形のカラー画像は、外枠の大きさ 270 x 270mm 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され、緑色が健全部、赤色が欠陥部であることを表示している。領域 A と B は、車両を移動させることなく、二軸ミラーでレーザー照射光軸を変えただけで検査を実行した。図中の B 領域と C 領域の間は 1m ほど離れており、データ取得の際に車両の移動を伴っている。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。領域 C の赤色部と緑色部の代表的な測定点における振

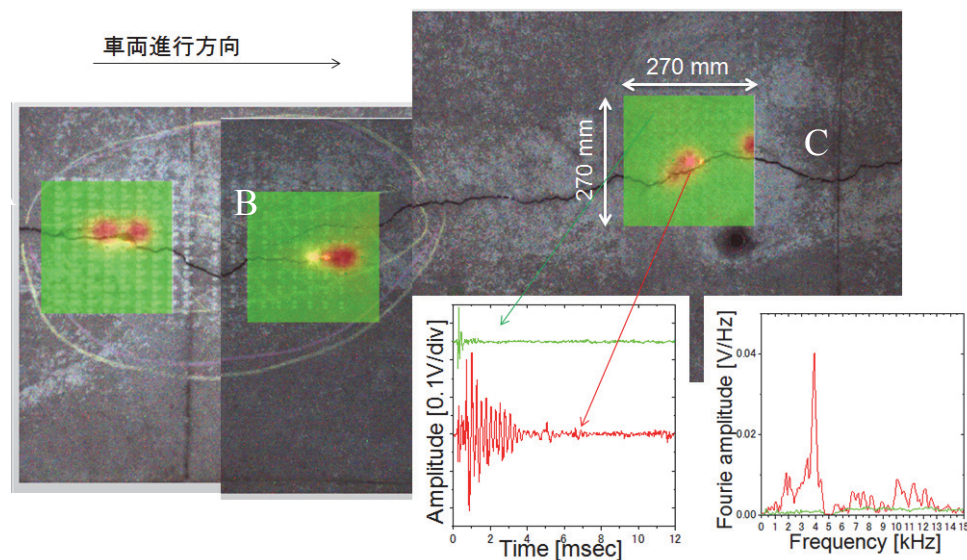


図4. 出力結果と代表点の時間波形とその振動スペクトル

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、その欠陥の大きさと厚みなどから決定される固有振動数で揺れる板振動が励起されやすいため、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。

得られた結果と、予め実施された打音検査による結果は概ね一致しており、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車載化を進め、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、模擬トンネル内において実証試験を行った。模擬トンネルで実際に生じた欠陥部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 2016
- 2) 島田義則 他: 非破壊検査, 61, 519-524, 2012.
- 3) 倉橋眞理 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 年報, pp24
- 6) S.Kurahashi et al.: J. Appl. Remote Sens. 12(1), 015009 (2018)
- 7) 倉橋眞理 他: ILT2017 年報, pp29-34

液中レーザーアブレーションによるナノ粒子の作製と応用

レーザーバイオ化学研究チーム¹、関西大学システム理工学部²

谷口誠治¹、佐伯 拓²

1. はじめに

液中レーザーアブレーション法は、ナノ粒子を簡便に作製できる手法として知られる。当研究所では、出発物質に金属酸化物を用い、本手法により一段階で還元・ナノ粒子化して金属ナノ粒子を作製する方法の研究を行っている。鉄やアルミ、マグネシウム、亜鉛等の金属は、水や空気と容易に反応して酸化することから、水素発生源や燃料電池、空気電池活物質などのエネルギー生成源に利用できるが、これらに反応表面積が非常に大きな金属ナノ粒子を適用すれば、エネルギー生成効率の大幅な向上が期待できる。さらに反応後に生成する金属酸化物をレーザーにより直接的に還元し、金属ナノ粒子に再生できれば、金属ナノ粒子を利用したエネルギー供給サイクルの構築も可能になると考えられる(図1)。これまでに当研究所では酸化第二鉄(Fe_2O_3)^{1,2)}、酸化アルミニウム(Al_2O_3)、酸化マグネシウム(MgO)^{3,4)}、酸化亜鉛(ZnO)⁵⁾などの金属酸化物を原料物質に用い、レーザーを用いた金属ナノ粒子作製実験や、生成ナノ粒子を用いた水素発生実験、電池性能試験など、応用に向けた検討を行ってきた。

液中アブレーション法を実際に利用するための最も重要な課題は、ナノ粒子作製のエネルギー効率(時間効率)の向上である。本手法は液中の原料物質にパルスレーザーを照射するという基本的に簡便で低コストの手法であるが、ナノ粒子の生成効率や粒径などの物性はレーザー波長、ターゲット(原料物質)の物性や溶媒の種類などの因子により左右されるため、効率向上のためにはこれらの因子について検証し、条件を最適化することが重要となる。これまでに、 ZnO をターゲットに用いてレーザー波長、原料物質の粒径、溶媒の種類になどによる生成効率の変化について検証し、エタノールを溶媒に用いた際にアセトニトリルやアセトン等の溶媒に比べ亜鉛(Zn)ナノ粒子の生成効率が顕著に高くなること

を明らかにした⁵⁾。この結果にはおそらく、アルコール分子の持つ還元性が関連するものと予測される。本研究では、メタノール等、分子構造(還元性)が異なる数種のアルコールを溶媒に用いて ZnO の液中レーザーアブレーション実験を行い、 Zn ナノ粒子の生成効率の比較からレーザー還元反応へのアルコール溶媒の寄与について検証した。

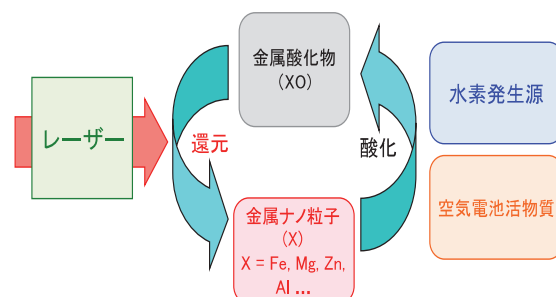


図1 金属ナノ粒子を利用したエネルギー供給サイクルの概念図

2. 実験

図2に実験配置を示す。反応槽には底部が円錐状のナシ型フラスコを用いた。 Zn 粉体と溶媒を加え懸濁液とした後空气中の酸素の影響を抑制するためアルゴン置換を行い、フラスコの底部からレーザーを打ち上げた¹⁾。底部は円錐状で光学レンズと同様の役割を果たすため、入射レーザーは懸濁液中で集光され高光強度での照射が可能となる。レーザー光源には、ナノ粒子生成効率が高い短波長(355nm)のナノ秒パルス Nd:YAGレーザー(第三高調波、強度 $\sim 50\text{mJ/pulse}$, 10Hz)を使用した。原料物質には、50 mgの平均粒径20 nmの酸化亜鉛粉体(ZnO 、純度99.9%、粒径 $\sim 20\text{ nm}$)を用いた。溶媒には分子構造の異なる4種のアルコール(メタノール(MeOH)、エタノール(EtOH)、イソプロピルアルコール(iso-PrOH)、イソブチルアルコール(iso-BuOH))をそれぞれ30 ml使用した(図3)。

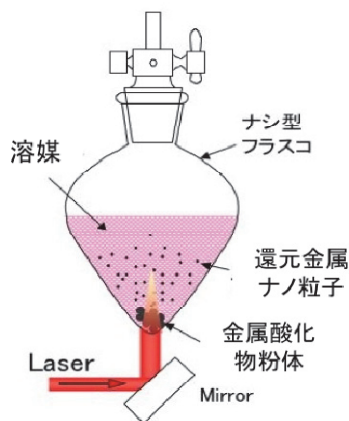


図2 液中レーザーアブレーション実験配置

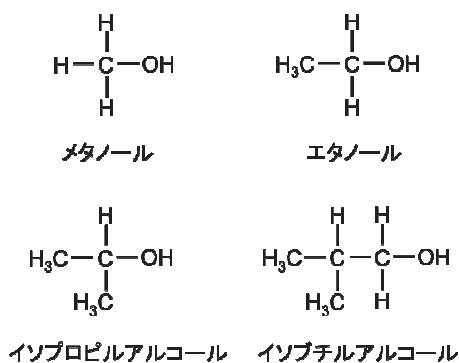


図3 アルコール溶媒（4種）の分子図

3. アルコール溶媒中における酸化亜鉛のレーザー還元

図4に、MeOH溶媒中におけるレーザーアブレーション実験時の写真を示す。照射前（0 min.）のZnOナノ粒子は白色であるが、照射時間の増加とともに黄～茶～黒色へと変化していく。この色彩の変化は、レーザー照射によりZnOナノ粒子が還元されてZnナノ粒子が生成し、照射時間とともにその生成量が増加することを示している⁶⁾。ZnO懸濁液の照射前とレーザー照射（15 min.）後の吸収スペクトルを比較したものを図5に示す。370nm付近に見られるのは原料物質（ZnOナノ粒子）の吸収帯である。レーザー照射後の試料では230nm付近に吸収帯が生成している。この吸収帯はZnナノ粒子に由来するものであり、その生成が確認できる。照射後の試料にはZnOの吸収帯も見られるが、これは未反応のZnOナノ粒子のものであると考えられる。

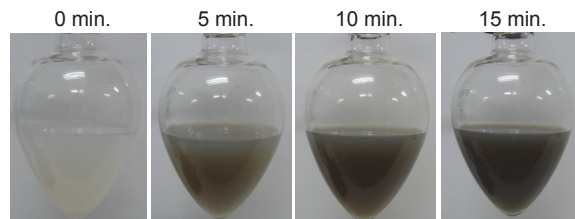


図4 メタノール溶媒中におけるZnO試料のレーザー照射後の写真（左から照射前（0min.）、5分、10分、15分照射後）。

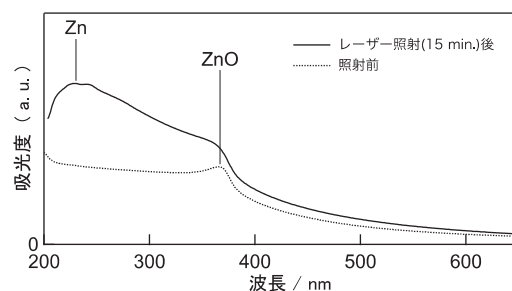


図5 レーザー照射前後のZnO懸濁液試料（MeOH中）の吸収スペクトルの比較

図6(a)に、4種の各溶媒中におけるZnO試料のレーザー照射（15分）直後の写真を示す。いずれの溶媒中でもZnナノ粒子生成に起因する茶～黒色への変化が見られた。その中で最も黒色化が進み生成効率が最も高いのはEtOH中であり、次いでiso-PrOH、iso-BuOH、MeOHの順に効率は低下する。MeOH中では、未反応のZnOが残留しているため、試料はやや灰色に見える。図6(b)に、照射後約12時間静置した試料の写真を示す。EtOH、iso-PrOH中では生成物はほぼ全て沈殿するが、iso-BuOH、MeOHでは沈殿は顕著ではない。ZnOのレーザーアブレーションでは、粒子径が20～30nmのZnナノ粒子が多く生成する（図7）。Znナノ粒子は凝集性が高く、粒子同士が凝集して粒子径が大きな2次粒子を形成するため、Znナノ粒子の生成量が多いEtOH、iso-PrOH中では生成物の沈殿が見られる。一方iso-BuOH、MeOH中では未反応のZnOナノ粒子が残留しており、Znナノ粒子の生成量も小さい。このためZnナノ粒子同士の2次粒子の形成が抑制され、沈殿を示さなくなるものと考えられる。

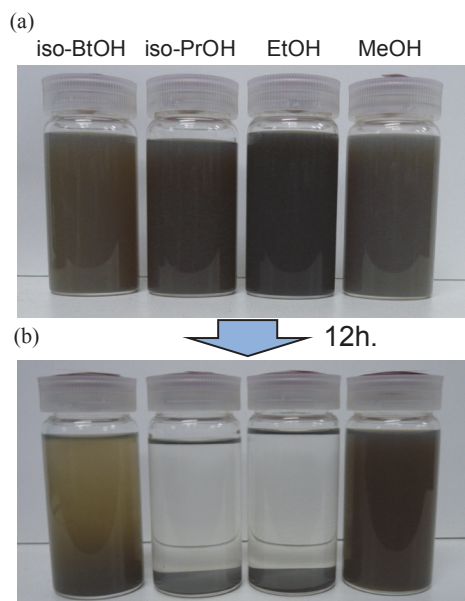


図6 4種のアルコール溶媒中におけるレーザー照射 (15分) 後の ZnO 試料の比較。(a) 照射直後、(b) 12時間静置後。

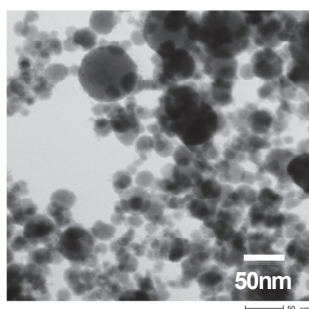
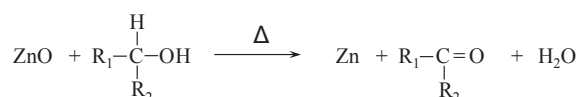


図7 レーザーアブレーションにより生成する Zn ナノ粒子の TEM 画像 (EtOH 中)。

ZnO の還元がアルコールとの反応で起こるとすると、反応は以下の式で表される。



ここで MeOH : $\text{R}_1=\text{R}_2=\text{H}$ 、EtOH : $\text{R}_1=\text{CH}_3$, $\text{R}_2=\text{H}$ 、iso-PrOH : $\text{R}_1=\text{R}_2=\text{CH}_3$ 、iso-BuOH : $\text{R}_1=(\text{CH}_3)_2\text{CH}$, $\text{R}_2=\text{H}$ である。この反応は求核置換反応の一種であり、反応効率は第一級アルコール (MeOH、EtOH) の方が第二級アルコール (iso-PrOH、iso-BuOH) よりも大きいと

予測された。しかし実験では、EtOH 中の反応性が最も大きいものの、MeOH 中では最も小さいという結果を得た。原因は明確ではないが、おそらくアルコール分子の β 位 (R_1 または R_2 の位置) に位置するメチル基 ($-\text{CH}_3$) が関与していると考えられる。この反応では、アルコール分子中のヒドロキシル基 ($-\text{OH}$) が電子吸引基として働くことが反応の主要因となっているが、近傍に電子供与性のメチル基が存在すると $-\text{OH}$ の電子吸引性が増し、反応性が高くなると考えられる。MeOH は β 位に $-\text{CH}_3$ を持たないことから、他のアルコールに比べ反応性が低下したものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、4種のアルコール溶媒を用いてレーザー還元 Zn ナノ粒子の作製を行い、分子構造の違いによる生成効率の変化について検討した。いずれのアルコール中においても Zn ナノ粒子の生成反応が見られ、アルコールが ZnO 還元には有用な溶媒であることを確認した。またエタノールを用いた際に最も高い生成効率を示したが、同様に第一級アルコールであるメタノール中では生成効率は低下した。この結果から、ZnO 還元の反応性にはアルコール分子中のメチル基の電子供与性が寄与することが示唆された。

参考文献

- 1) T. Okada, T. Saiki, S. Taniguchi, T. Ueda, K. Nakamura, Y. Nishikawa, Y. Iida, *ISRN Renewable Energy*, **2013**, 827681-1-7, 2013.
- 2) 谷口誠治, 月刊光アライアンス, 8月号, 20-23, 2013.
- 3) T. Saiki, S. Uchida, T. Karita, K. Nakamura, Y. Nishikawa, S. Taniguchi, Y. Iida, *Int. J. of Sustainable and Green Energy*, **3**, 143-149, 2014.
- 4) 佐伯 拓, 谷口誠治, 中村和広, 飯田幸雄, 電気学会論文誌 A, **135**, 559-564, 2015.
- 5) 谷口誠治, 月刊 OPTRONICS, **419**, 101-106, 2016.
- 6) ILT2017 年報, pp.35-38, 2017.

レーザー核融合液体壁炉チェンバー内の金属蒸気同士の衝突に関する研究

理論・シミュレーションチーム

古河裕之、乗松孝好¹

¹大阪大学レーザー科学研究所

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^{1,4)}。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⁾。

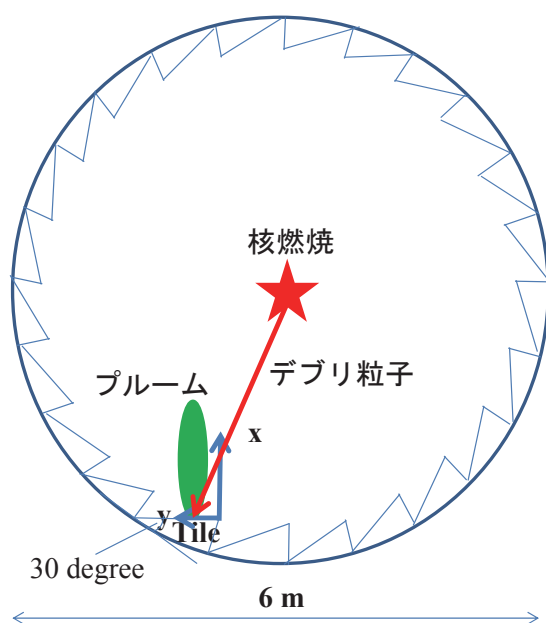


図1 KOYO-fastの液体壁チェンバー第一壁のタイル構造の概念図

「KOYO-fast」では、タイル構造を有する第一壁の表面からチェンバー内に向かって金属蒸気が飛散していく際に、ほぼタイル面に垂直な方向に飛散する。しかし、チェンバー内の液体壁近傍では、隣接する2つのタイルから飛散するプルーム同士は 15° の角度で衝突する。2016年度において、上記の条件を取り入れ、粒子法を用いて金属蒸気同士の衝突のシミュレーションを行い、金属蒸気同士が液体壁付近で衝突しても、チェンバー中心部への影響は少ない、ことを見出した。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。

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、2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 飛散した時点を初期位置とした。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、赤粒子の初期速度を 15° 回転して与えた。 $v_0 = 10\text{ km/s}$ とした。

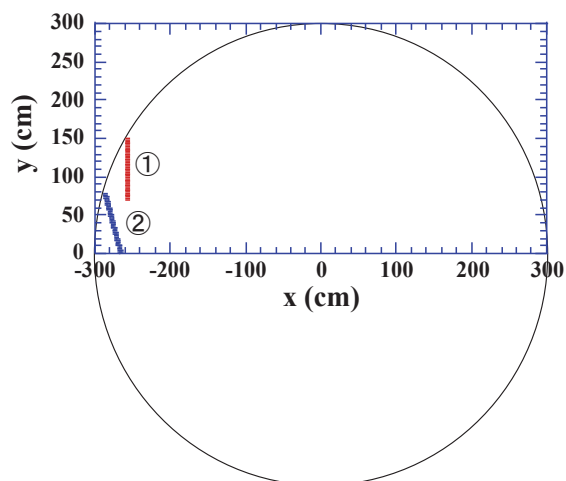


図2 金属蒸気の初期位置

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。チェンバー中心から半径 50 cm 程度の領域には、金属蒸気は拡散しなかった。この結果は、チェンバー中心近傍での金属蒸気の滞留の危険性は低い、ことを示唆するものである。

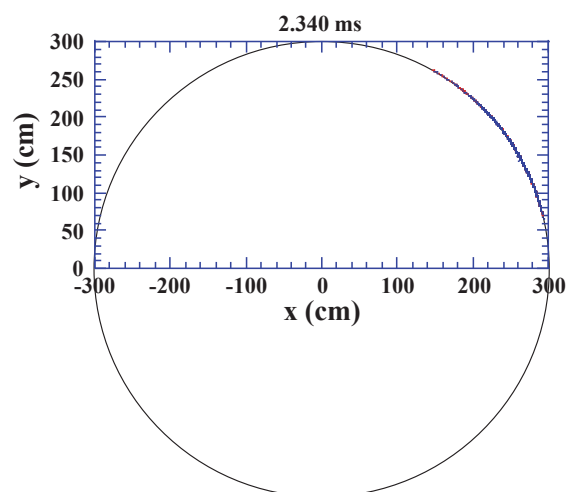
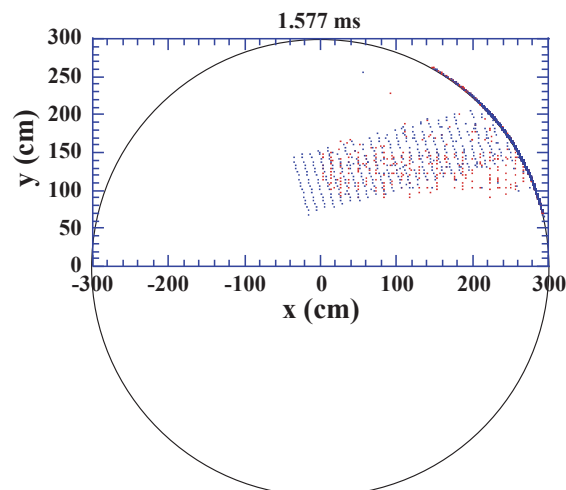
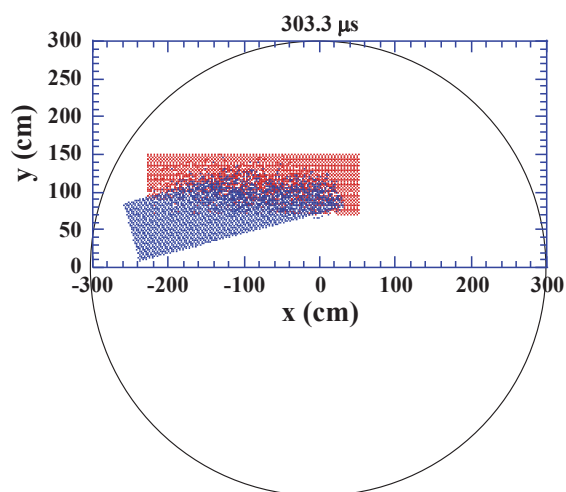


図3 粒子位置の時間発展

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、実際のチェンバーのサイズを考慮し、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、2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 飛散した時点を初期位置とした。チェンバー中心近傍での金属蒸気の滞留の危険性は低い、ことを示唆する結果が得られた。今後、より実際に近い条件でのシミュレーションを行う。

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, 三間園興, 苫米地顕, 山中千代衛:
プラズマ核融合学会誌, **82**, 617-627, 2006.
- 4) 神前康次, 乗松孝好, 古河裕之, 林巧, 惣万芳人, 西川正史,
苫米地顕: プラズマ核融合学会誌, **83**, 19-27, 2007.
- 5) Shinji Kawamoto, and Kenichi Nanbu ;
IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, **27** (1999)
1389-1397.

大地震前の電離層における電子密度増加の物理メカニズムの研究

理論・シミュレーションチーム

古河裕之、山中千博¹、近藤斎²、杉浦繁貴²

¹大阪大学大学院理学研究科、²(株)コンポン研究所

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震 ($M_w=9.0$) において、北海道大学の日置により、地震発生 40 分前から震源上空の電離層総電子数 (TEC: Total Electron Content) の増大があったことが報告された¹⁾。一般に、測位衛星 (GNSS) から地上局に向けて発する電波が、電離層電子によって遅延を受けることを利用し、その視線方向の総電子数を算出する手法を GPSTEC 法と呼び、この手法を用いて見いだされた現象である。こうした TEC 異常 (Heki-TEC 異常現象) は、通常太陽活動と関連があり、磁気嵐など宇宙起源の現象では、全地球的に変化を及ぼしうるので、局所的な現象とは区別できる。日置は、1994 年から 2015 年までの $M_w=8$ 級以上の地震について震源上空の TEC を解析し、磁気嵐の時期を除いて、過去 18 回のすべての例で地震発生直前数十分以内に TEC 異常があったことを示した^{2,4)}。

実際は、地震と関係ない局地的な TEC 異常 (large scale traveling ionosphere disturbance: LSTID など) もあり、これが最も盛んな時期は 10 時間に一度程度、同様な現象があることも知られている。但し、LSTID は時間とともに発生点を移動させるので、震源上空に固定される地震先行現象とは異なっている。もし、地震前一時間以内に明解な「Heki-TEC 異常現象」が震源上空に確認された事象が、 n 回続けたとすると、それは、 $1/10$ の確率のクジを n 回続けて引くことに相当するわけで、この一致率から、この「Heki-TEC 異常現象」は、初めて科学的に意味のある地震先行現象ではないか、と考えられ始めている。

もっとも実用的な地震予測に用いるためには、予想の空振り率を算出する必要があり、統計的な

データ蓄積が求められている状況である。

地震前兆としての電磁気現象は、過去、電波の伝搬異常や雑音混入、電子機器の誤動作や電磁場変動、地電流の変化といったものが知られているが、「Heki-TEC 異常現象」は新しく知られた現象である。またこの現象を説明できる物理モデルはまだ存在しておらず、根拠となるモデルの構築が求められている。そのような背景のもと、レーザー技術総合研究所では、大阪大学大学院理学研究科、(株)コンポン研究所と共同で、大地震前の電離層における電子密度増加の物理メカニズムの研究を行っている。

本研究は、2 つの方向から遂行するもので、そのひとつは、岩石圏における電気分極を実験的に明らかにすることであり、もうひとつは、シミュレーションにより、電離層で起きていることを視覚化しようとするものである。実際、知られていないこの現象をモデル化するに当たって、我々は、trial and error 方式で望むこととした。すなわち、最初から矛盾ない正解を目指すのではなく、さまざまな可能性を考慮しつつ、除外できるモデルを選別し、あり得そうな解を絞り込んでいこうと考えている。以下では、我々が最もありそうだと考える電磁氣的な説明を基本にした場合を述べる。

「Heki-TEC 異常現象」が地震活動と関連するならば、それは地殻の状態変化に影響されたと考えるべきで、地震の直前においては、震源地殻に対する応力変化が進み (震源核形成)、その変動に伴い圧力の変化が臨界的になっていることが考えられる。そこで、圧力変化 (ゆらぎ) に伴う地殻の電気分極変動があれば、地震動の発生前に、分極電荷による電磁場発生が起こり、電離層の電子密度分布等に影響を与えることが想定できる。

我々は、定量的にその可能性を探るために、地下数 10 km 以浅での電気分極を仮定して、それが震源域上空電離層下部の電子密度へ与える影響を評価することを考えた。

ILT 年報 2017⁵⁾ では、現象のモデル化とそれを記述できる基礎方程式の導出、シミュレーションコードの作成などについて報告し、均一な電子密度を仮定した場合の初期的なシミュレーション結果を提示した。2017 年度は、初期電子密度の高度分布を現実的にしたほか、分極においては正負等量の電荷を考慮し、分極距離とその向きをパラメーターとした計算を実施した。

2. シミュレーションコード

本研究では簡単のため、平面地球で、プラズマの成分は電子と水素のみ、擾乱のない静かな電離層を仮定し、地球磁場は Y 方向に一様、 $B_{\text{earth}} = 25000 \text{ nT}$ とした。これは磁気赤道付近の状況に相当する。

地上（地中）における電気分極機構は、さまざまな過程があり得るが、観測されている地震前の TEC 変化が、時間とともに増大していることから、定常的な分極では説明ができないと考え、電荷量が単調増加するような分極を仮定した。実際は、モデルに従って電荷及び電流を与え、それが作る電磁場の時間発展を求め、電離層への影響を調べる。岩盤上の電荷により発生する電場、及び岩盤上の電流により発生する磁場は、ビオサバールの法則により求めた。

一般に、プラズマ物理の計算では、電子とイオンを別々に解く必要がある場合は、粒子コードで解くことが多い。もしくはフォッカープランク、第一原理分子動力学として、電子とイオンを別々に扱う。しかし、今回想定する時空間は、数 100km かつ 60 分程度と広大であり、粒子コード等では、スケールが大きすぎて、計算は現実的に不可能である。よって、本研究では、プラズマを流体として考えたシミュレーションを行った。

このシミュレーションでは、地殻側の分極機構

やその結果となる外部電磁場は、モデルとして与えている。与えられた非定常の外部電磁場のもとで、電離層及び大気層のプラズマの流体運動、及び分極による誘導電場を連立して解き、プラズマの密度の時間発展等を求めている。過去の Heki TEC 異常に関する先行研究としては、Kuo らによる電流注入モデル計算⁶⁾ があり、このほか、Kerry による地上電場の電離層影響仮説⁷⁾ があるが、実際に外部電場のもとで、数 100km 立方の空間と数十分の時間幅で計算を実施したのは我々が初めてである。

プラズマを流体として取り扱う場合は、そのほぼすべての場合で「プラズマ近似（局所的電荷中性近似）⁸⁾」を行い、イオンのみの 1 流体近似で解いている。しかし、プラズマ近似の最大の問題点は、外部電場（地球側の分極電荷による電場）に対するプラズマの応答が考慮できないことである。そこで本研究においては、プラズマ近似からスタートしつつも、分極電荷による電場に対するプラズマの応答を考慮できるように、モデルを開発した⁵⁾。時間刻みは、0.1 ミリ秒としているが、イオンのサイクロトロン運動スケールと、60 分の時間発展シミュレーションを行う必要性の兼ね合いで決定している。

以下のシミュレーションでは、マグニチュード M_w と震源域の、南北方向と東西方向の大きさ L_0 と W_0 の関係を、東北地方太平洋沖地震のケースに準じて、マグニチュード $M_w=9$ の場合を標準として次式で設定した⁹⁾。

$$\begin{aligned} L_0 &= 10^{0.55M_w-2.19} [\text{km}] \\ &= 575.440 \text{ km} \quad (M_w=9) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} W_0 &= 10^{0.31M_w-0.63} [\text{km}] \\ &= 144.544 \text{ km} \quad (M_w=9) \end{aligned} \quad (2)$$

震源核の大きさは、震源域の 5% とした。

$$f_0 = 0.05 L_0 = 28.772 \text{ km} \quad (M_w=9) \quad (3)$$

$$w_0 = 0.05 W_0 = 7.227 \text{ km} \quad (M_w=9) \quad (4)$$

最大電荷量 Q_{max} は、岩石破壊実験で得られた数値を、実際の断層幅長さに拡張した値を用いた。

$$Q_{\text{max}} = 1.17 \times 10^{-6} w_0 \times f_0 \text{ (C)} = 243.284 \text{ C} \quad (5)$$

時刻 t における電荷量は、以下ようになる。

$$Q(t) = Q_{\max} \begin{cases} 1 & t \leq t_c \\ \exp\left[-\frac{t-t_c}{\tau}\right] & t > t_c \end{cases} \quad (6)$$

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

シミュレーションコードに用いた基礎式の詳細は、文献 5 に譲る。

3. シミュレーション結果

地下 10–70 km 程度の場所での電気分極モデルに関し、以下の 2 つの先行分極現象モデルを仮定し、シミュレーションを行った。

Case 1) 震源核の先行的破壊のもとで現れた正電荷、電子がともに深層ガス流体の圧力で拡散し、流体が震源核領域を通過した時刻以降、電荷は再結合により指数関数的に減衰するとしたモデル。

Case 2) ケイ酸鉱物の酸素架橋における欠陥が、応力下で分極し、励起した正電荷が濃度拡散するモデル（フロイントの正孔励起モデル¹⁰⁾）。

まず、Case 1) の場合について述べる。Case 1) では、単位面積当たりの電荷発生量は榎本の岩石破壊実験の値を用いた。図 1 は、亀裂の表面に現れる電荷、及び鉛直方向に現れるとした場合の分極電荷の物理モデルの概念図である。 v_0 は電荷の移動速度。このモデルの場合、電荷は分極距離を保ったまま同じ速度で、-X 方向に移動している。

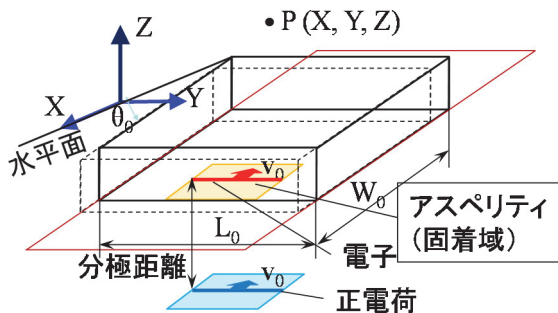


図 1 亀裂の表面に現れる電荷、及び鉛直方向の分極電荷の物理モデルの概念図。

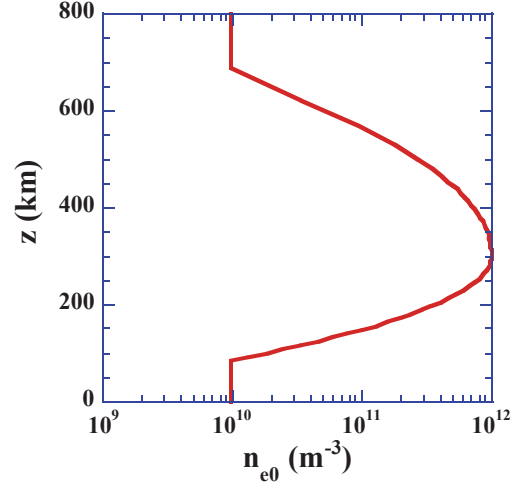


図 2 シミュレーションで用いた初期電子密度の高さ方向の分布

2017 年度は図 2 に示すように、文献 11 に従って初期電子密度の高度分布を与えた。また分極方向を鉛直、および浅い角度（ほぼ水平方向）になる場合について地下分極電荷の分極距離を、100 km, 50 km, 10km, と変えて、シミュレーションを行った。（実際は、鉛直分極で地下 100km のケースは大地震の震源核として想定しがたい深さであるが、計算の傾向を見るためのテストとして行っている）。

図 3 は、その結果の一部で、各々の時刻の電子数密度から初期電子数密度を引いたものを、該当領域で積分したものの時間発展、と電荷量の時間発展である。図中の c は、視線方向の積算値、 LA は電離層の全体で平均をとったものである。 $N_e(t)$, TEC unit の定義は、下記の通りである。

$$N_e^c(t) = \frac{1}{\Delta y} \int_{0km}^{450km} dz \int_{W_0/2-\Delta y/2}^{W_0/2+\Delta y/2} [n_e(y, z, t) - n_{e0}(y, z)] dy \quad (7)$$

$$N_e^{LA}(t) = \frac{1}{W_0} \int_0^{450km} dz \int_0^{W_0} [n_e(y, z, t) - n_{e0}(y, z)] dy \quad (8)$$

$$TEC \text{ unit} = 10^{16} / m^2 \quad (9)$$

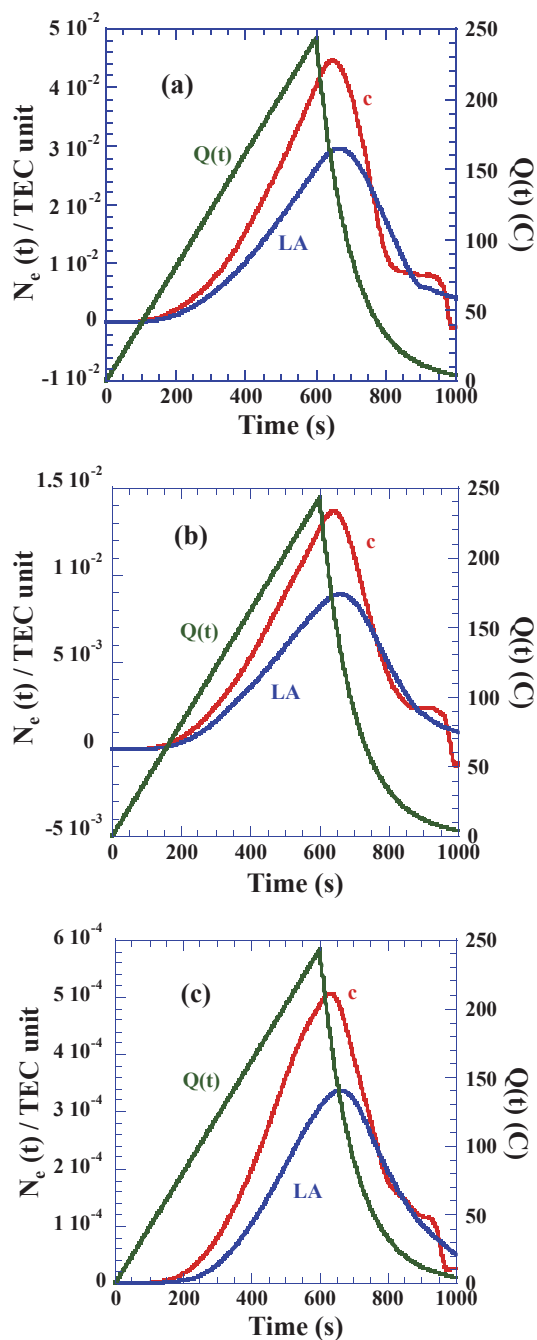


図 3 各々の時刻の電子数密度から初期電子数密度を引いたものを、該当領域で積分したものの時間発展と電荷量の時間発展の例
(a) 鉛直分極間距離 100 km、(b) 50 km、(c) 10 km

図 3 を見れば、同じ電荷量であれば大きな分極間距離を有した方が、電離層に大きな影響を与えることを示している。

図 4 は、分極間距離を 100 km とした場合の、600 秒後の電子密度分布の初期電子密度からの差である。震源域上空で電子数密度が増加してい

ることがわかる。図 5 は、1000 秒後の電子密度分布の初期電子密度からの差を示している。既に地上電荷も消失し、残余の電子密度が電離層に現れている状況を表している。

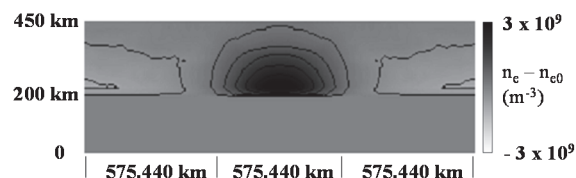


図 4 600 秒後の電子密度分布

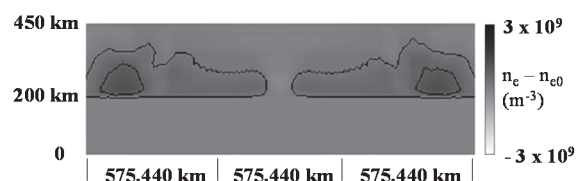


図 5 1000 秒後の電子密度分布

Case 2) フロイントモデルを用いた場合について述べる。図 6 にそのモデルを示す。正孔拡散速度は 100m/s とした。簡単のために拡散方向を、-X 方向に限定している。

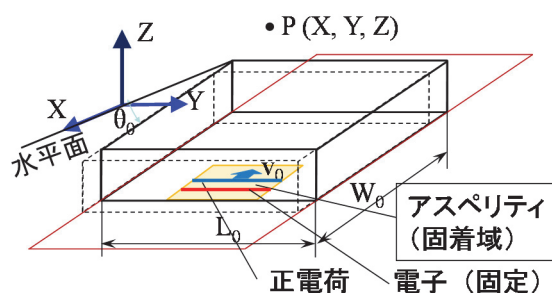


図 6 正孔励起により表面に現れる正電荷と分極電荷の物理モデルの概念図。

図 7 は、フロイントモデルを用いた場合の、電荷量の時間発展および、各々の時刻の電子数密度から初期電子数密度を引いたものを、該当領域で積分した値の時間発展である。地下の分極電荷の電荷量は 1000 秒間増加し続ける、とした。

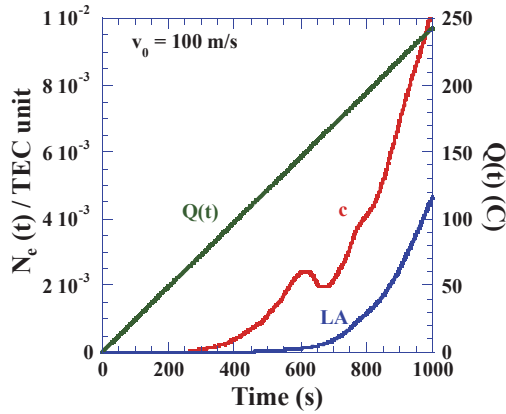


図 7 フロイントモデルを用いた場合の電荷量 $Q(t)$ の時間発展および該当領域で積分した電子密度増大量

図 8 は、600 秒後の電子密度分布の初期電子密度からの差である。図 9 は、1000 秒後の電子密度分布の初期電子密度からの差、である。

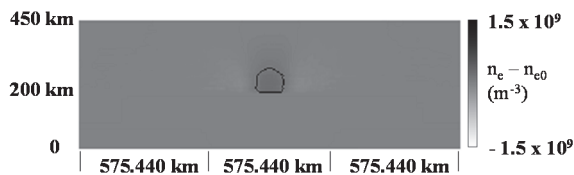


図 8 600 秒後の電子密度分布の初期電子密度からの差

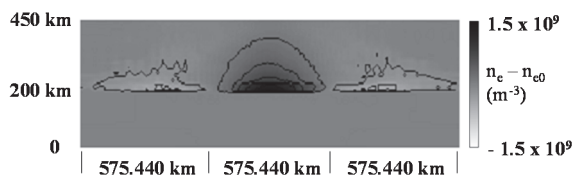


図 9 1000 秒後の電子密度分布の初期電子密度からの差

いずれにせよ、正負電荷を考慮した分極では、TEC 増大量としては 1-5% 程度であり、これだけでは、観測された最大の TEC 変化量 (2 TEC Unit 程度) には到達していないことがわかった。

4. 結言

震源域と震源核の大きさを地震のマグニチュードの関数とし、 $M_w = 9$ の場合を想定したシミュレーションを行った。

実際は約 250C の単調増加する正負分極電荷を 500km×140km 程度の地中空間に分散させ、一定時間後に電荷は指数関数的に減衰する状況を仮定した。

年は、現実的な初期電子密度の高度分布を与えたほか、ガス拡散、正孔励起モデルなどについての検討を行った。

本シミュレーションでは、擾乱のない静かなプラズマから出発し、過渡的に単調増加する持続時間の長い外部電磁場により、電離層電子が優先的に駆動されてその密度を上げるプロセスを模擬している。地表の分極電場の与え方は、恣意的であり検討の余地が多いが、それが電離層電子密度に影響を与えることは十分考えられることである。また 2017 年度のシミュレーションでは、地球磁場を水平としたままであったが、実際には地球磁場は傾いており、磁場方向によって電気伝導度の異方性があることが知られている。2018 年度は、より現実的な物理的描像を得るために、傾斜磁場の導入などモデルの改善を行う予定である。

参考文献

- 1) Heki, K. *Geophys. Res. Lett.* 38, L17312. (2011)
- 2) Heki, K and Y. Enomoto, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **120**, 7006-7020, (2015).
- 3) Heki, K., 2018, Parity, **33**, No.2. (in Japanese).
- 4) He, L. and K. Heki; *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **122**, 8659-8678, doi:10.1002/2017JA024012, 2017.
- 5) 古河裕之、山中千博、奥村暢朗、杉浦繁貴; *ILT 2017 年報* p 42 - 47 (2017).
- 6) C. L. Kuo, L. C. Lee and J. D. Huba; *J. Geophys. Res. Space Physics*, **119**, 3189-3205, doi:10.1002/2013JA019392.
- 7) Kelley, M. C., W. E. Swartz, and K. Heki, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, **122**, 6689-6695, doi:10.1002/2016JA023601, 2017.
- 8) 西川恭治、大林康二、若谷誠宏; 「連続流体物理学」朝倉現代物理学講座 - 9。

- 9) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による強震動：防災科学技術研究所
- 10) Friedemann T. Freund, Akihiro Takeuchi, Bobby W.S. Lau Physics and Chemistry of the Earth 31 (2006) 389–396
- 11) C. T Russell, J. G. Luhmann, R. J. Strangeway Space Physics, Ch. 2, Cambridge Univ. Press 2016.

Appendix プラズマの局所電荷中性の成立性

プラズマの局所電荷中性の成立性について、考察する。ポアソン方程式は、次のように書ける。

$$\nabla^2 \phi(r) = -\frac{e}{\epsilon_0} [\delta(r) + n_i(r) - n_e(r)] \quad (\text{A.1})$$

イオン密度、電子密度ともに、ポテンシャルに対してボルツマン分布を取るとすると、次の式が成立する

$$n_i(r) = n_0 \exp\left(-\frac{e\phi(r)}{k_B T}\right); n_0 \left(1 - \frac{e\phi(r)}{k_B T}\right) \quad (\text{A.2})$$

$$n_e(r) = n_0 \exp\left(\frac{e\phi(r)}{k_B T}\right); n_0 \left(1 + \frac{e\phi(r)}{k_B T}\right) \quad (\text{A.3})$$

ただし、 $e\phi / k_B T \ll 1$ という条件が必要である。

球対称の1次元を仮定し、(A.2) 及び (A.3) を用いると、ポアソン方程式は、次のように書ける。

$$\frac{\partial}{\partial r^2} \chi(r) = 2 \frac{e^2 n_0}{\epsilon_0 k_B T} \chi(r) = \chi(r) / \lambda_d^2 \quad (\text{A.4})$$

$$\phi(r) = \frac{\chi(r)}{r} \quad (\text{A.5})$$

(A.4) 式と (A.5) 式から、デバイ遮蔽ポテンシャルの式、が得られる。

$$\phi(r) = \frac{e}{r} \exp\left(-\frac{r}{\lambda_d}\right) \quad (\text{A.6})$$

$e\phi / k_B T \ll 1$ という条件下では、デバイ長以上の空間スケールでは、局所電荷中性が成立する、ということを示した。図 A.1 は、分極間距離 100 km、600 秒時の電離層の外部電位分布である。MV オーダーの電位がかかっており、 $e\phi / k_B T \gg 1$ なので、局所電荷中性は必ずしも成立しない。

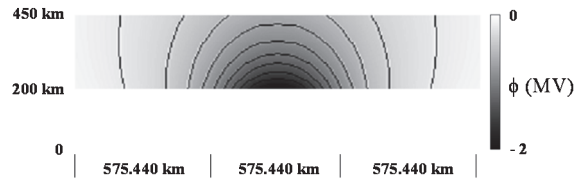


図 A.1 分極間距離 100 km、600 秒時の電離層の外部電位分布

レーザー損傷しきい値データベース化試験結果 —1064nm 用高反射ミラー 100-on-1 試験—

レーザー技術開発室

本越伸二、實野孝久¹

¹ 大阪大学レーザー科学研究所

1. はじめに

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

光学素子のレーザー損傷しきい値の標準化と情報発信を目的として、「レーザー損傷耐性データベース化試験（以下、データベース化試験）」を実施している。これは、評価する光学素子の仕様を毎回決め、その仕様に合った光学素子を参加企業から提供して頂き、同じ条件で試験を行うものである。これまで、波長 1064nm、532nm、355 nm、248nm のレーザー装置に用いる光学素子に対して試験を行ってきた¹⁾³⁾。各企業から提供された光学素子のレーザー損傷しきい値はそれぞれの企業に対してのみ報告するが、同時に、全ての試験結果をレーザー損傷しきい値の頻数分布としてレーザー総研のホームページ上で公開し、ユーザーにも確認して頂けるようにしている⁴⁾。表 1 に、これまで実施したデータベ

ース化試験の内容を示す。

これまでの試験は、1 パルスのレーザー照射に対して損傷の有無を判定する、1-on-1 と呼ばれる試験法を用いてきた。一方、レーザー利用の多くは、連続動作か、繰返しパルス動作である。そのため、繰返しパルス照射時の光学素子のレーザー損傷しきい値評価が望まれていた。

平成 29 年度は、1064nm 用高反射ミラーと反射防止膜に対して、100 パルスの繰返し照射を行い損傷の有無を判定する、100-on-1 試験によるデータベース化試験を行った。本報告書では、その高反射ミラーの結果について述べるとともに、過去に同一仕様で実施した 1-on-1 試験結果との比較をまとめた。

2. 繰返しパルスによる光学素子のレーザー損傷

1984 年に Wood らは、CO₂ レーザーパルス（波長 10.6μm、パルス幅 100ns）によりゲルマニウム基板のレーザー損傷しきい値を評価し、繰返しパルス周波数（10～100Hz）の増加に対して損傷しきい値が低下することを報告した⁵⁾。その報告では、損傷しきい値は繰返しパルス周波数に対する依存性は見られるが、照射パルス数に対して依存性が見られない。照射部分は発熱と熱拡散により少ないパルス数で一定の温度上昇で飽和するた

表 1 光学素子のレーザー損傷耐性データベース化試験の過去実施内容

型	角度・偏光	1064 nm	532 nm	355 nm	248 nm
ミラーコート	45°・P	○	○	○	○
反射防止コート	0°・	○	○	○	○
石英ガラス表面	0°・				○
ダイクロイックミラー	45°・P	○	○		
多層膜偏光子	56.5°・P,S	○			

め、パルス数を増加しても損傷しきい値は低下しないと考察されている。

一方、Merkle らは、Nd:YAG レーザー（繰返し周波数 10Hz、パルス幅 24ns）の基本波と 2 倍高調波パルスを用いて、水晶と石英ガラスに対し繰返し照射を行い、損傷しきい値を評価した。その結果、照射パルス数の増加に従い損傷しきい値は低下することを示している⁹⁾。彼らはパルス照射により微小吸収が発生し、照射パルス数の増加に伴い吸収が増加し、小さいパルスエネルギーでも損傷に至るものと考察している。また、我々の先行研究において、低吸収、または高熱伝導率のコーティング材料では、繰返しパルス（波長 1064nm、パルス幅 10ns、繰返し周波数 30Hz）照射でも損傷しきい値は低下しないという結果を得ている⁷⁾。低吸収であれば照射による発熱が少なく、また熱拡散により局所的な温度上昇を抑えることが、繰返しパルス動作時の高耐力コートには重要であることを示している。

上述の結果は、繰返しパルス数、周波数の条件が違ふものの、全て繰返し照射による熱蓄積が光学素子の損傷しきい値の低下要因であることを述べている。しかし、近年、パルスエネルギーの小さいフェムト秒パルスレーザーにおいても、繰返し照射によりレーザー損傷しきい値が低下するという報告がある⁸⁾。パルスエネルギーが小さいため、発熱量も小さい。これは熱以外に損傷しきい値を下げる要因があることを示唆している。

このように、繰返しパルス照射により光学素子のレーザー損傷しきい値が低下する事実は共通の理解となっているが、その物理的過程については十分に理解されていない。

3. 評価光学素子の仕様

100-on-1 データベース化試験を行った 1064nm 光学素子の特性仕様と、参加企業数、試料数を表 2 に示す。第 19 回の評価対象は、レーザー装置内で多く使用されている入射角 45° で、P 偏光に対して 99.5%以上の反射率を持つ高反射膜とした。P 偏光で S 偏光と同じ反射率を得るためには、より多くの層数が必要となる。また、一

表2 データベース化試験光学素子仕様

	第19回	第20回
	高反射膜	反射防止膜
波 長 [nm]	1064	
パルス幅 [ns]	8.5	
入射角度 [°]	45	0
偏 光	P	-
反射率 [%]	>99.5	<0.5
基板材料	指定なし	石英ガラス
基板研磨状態	光学研磨	RMS<10 Å
裏面研磨状態	指定なし	表面と同様
参加企業数	5	12
評価試料数	16	40

般に、P 偏光の方がレーザー損傷しきい値は低くなる。第 20 回は、レンズやウィンドウの表面にコートされる入射角 0° の反射防止膜を対象とした。反射防止膜の場合には、コートする基板の材質、粗さによりレーザー損傷しきい値が変化するため、基板を表面粗さ 10Å以下に研磨された合成石英ガラスと指定した。また、ガラス裏面も同程度のエネルギー密度のレーザー光に曝されることから、裏面の表面粗さも表面と同程度であることを要求した。

参加した企業数と個数は、第 19 回では 5 社 16 個、第 20 回では 12 社 40 個であった。

4. 評価装置と方法

レーザー損傷しきい値評価試験には、波長 1064 nm、パルス幅 8.5 ns、繰返し周波数 5Hz の Q スイッチ Nd:YAG レーザー（Spectra Physics 社 Quanta-ray）を使用した。縦モード、横モードともに単一モード発振器の出力を焦点距離 1500 mm のレンズを用いて試料上に集光した。試料に照射するレーザーの時間波形、エネルギーは、PIN ダイオードとエネルギーメータでそれぞれ計測した。また、試料表面と等価なイメージ点に CCD カメラを設置し、試料上のビーム形状およびビームサイズを計測した。照射レーザー光のエネルギーは、1/2 波長板とプレート型偏光子を用いて調整した。機械式シャッターをレーザー光路内に挿入し、開口時間 20 秒に設定して、試料への照射パルス数を 100 パルスに制御した。

評価方法には、100-on-1（100 パルス照射毎に損傷の有無に関わらず照射位置を移動する）試験法を採用した。照射前後の試料表面をノマルスキー顕微鏡（50 倍）により観察して損傷発生の有無を確認した。レーザー損傷しきい値は、損傷が発生した最小エネルギー密度として決定し、照射ガウス分布のピークエネルギー密度で表した。損傷しきい値はパルス幅の 1/2 乗に比例することから、全てのしきい値はパルス幅 10ns の場合に換算し表記した。

5. 高反射膜のレーザー損傷しきい値

図 1 に測定した 1064nm 用高反射ミラーの損傷しきい値の頻度分布を示す。第 19 回のデータベース化試験に用いた 16 個の試料の中で、損傷しきい値の最大値は $159.7\text{J}/\text{cm}^2$ 、最小値は $34\text{J}/\text{cm}^2$ で、最大値と最小値の間に約 5 倍の開きが見られた。これら 2 つの試料において、損傷しきい値付近のエネルギー密度で照射した時の損傷の様子を図 2 に示す。損傷しきい値の低い試料（b）では、多層膜の表面層が剥がれている様子が確認できる。つまり、表面層近くの境界に高い電界強度が存在し、境界部分から損傷を引き起こしていると考えられる。一方、高い損傷しきい値の試料（a）では、表面層が僅かに膨張しているか、もしくは屈折率変化を起していることが

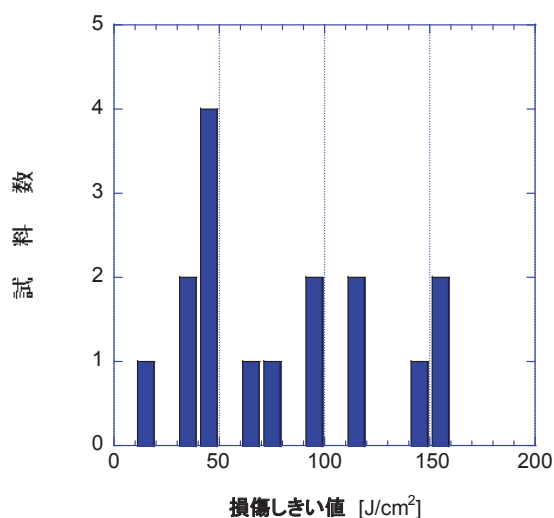
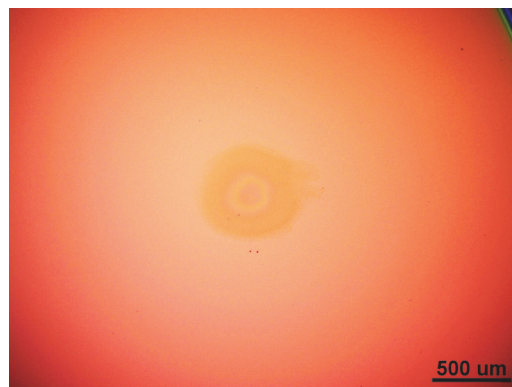
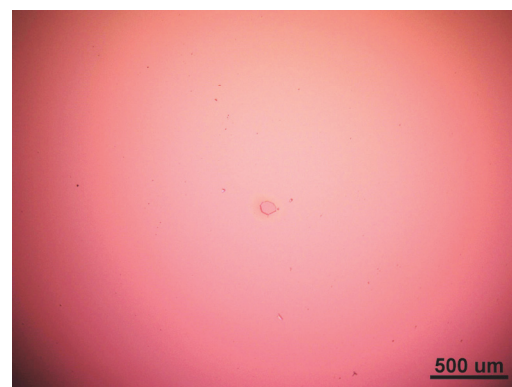


図 1 1064nm 用高反射ミラー100-on-1 データベース化試験結果



(a) 損傷しきい値が最大の試料



(b) 損傷しきい値が最小の試料

図 2 損傷しきい値付近の損傷形状

色の変化で確認できる。これら 2 つの試料では、多層膜構造の設計の段階で大きな違いがあることが分かる。今回の最頻数の損傷しきい値は $40\text{--}50\text{J}/\text{cm}^2$ であった。

6. 単一パルスによるレーザー損傷しきい値データベースとの比較

平成 20 年度（第 1 回）と平成 25 年度（第 11 回）に、同様の仕様の光学素子に対して 1 パルス照射による損傷しきい値を求めるデータベース化試験（1-on-1 試験）を既に実施している。今回の繰返しパルス 100-on-1 の結果と比較するために、図 3 に第 11 回データベース化試験の結果を示す。このときの参加は 8 社、試料数 18 個であり、今回とほぼ同じである。そのときの試料の中で損傷しきい値最大値は $222\text{J}/\text{cm}^2$ 、最小値は $7\text{J}/\text{cm}^2$ であった。また最頻数しきい値は $30\text{--}40\text{J}/\text{cm}^2$ が得られている。今回の 100-on-1 試験結果と比較すると、最大値

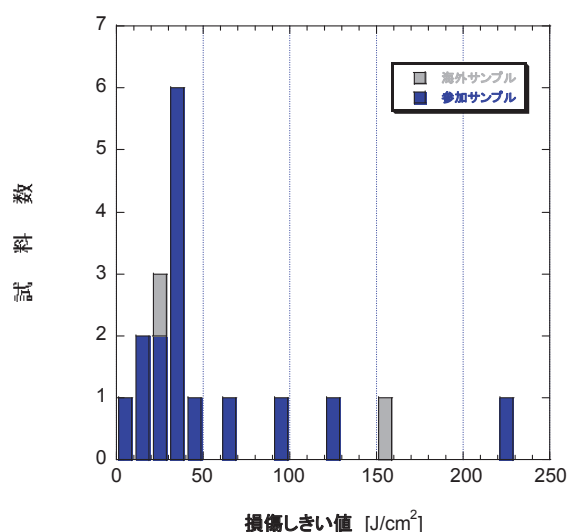


図 3 1064nm 用高反射ミラー1-on-1 データ
ベース化試験結果 (第 11 回) 9)

222J/cm² の試料を除くと、頻度分布はほぼ同じと見ることが出来る。これは、繰返しパルス照射により損傷しきい値は低下する過去の結果と異なる。今回のデータベース化試験は、繰返し周波数が 5Hz と比較的低い周波数で実施したため、繰返しパルスによる影響が小さく、1-on-1 の結果と差がでなかったものと考えられる。

7. まとめ

平成 30 年度に実施した波長 1064 nm 用高反射ミラーに対する繰返しパルスによる 100-on-1 損傷しきい値デ

ータベース化試験結果についてまとめ、過去の単一パルス (1-on-1) 試験結果との比較を行った。100-on-1 損傷しきい値頻度数分布は、1-on-1 試験の場合とほぼ同じである。この結果は、繰返し周波数 5Hz では、繰返しパルスによる損傷しきい値の低下は顕著に現われないことを示している。

今後、高繰返しレーザー装置を整備することにより、繰返し周波数、繰返しパルス数に対するデータを蓄積し、寿命評価へ繋げていく。

参考文献

- 1) 本越伸二他: ILT 2017 レーザー技術総合研究所, 2017.
- 2) S.Motokoshi, et al.: Proc. of Laser-Induced Damage in Optical Materials 2010, SPIE **7842**, 78420F-1, 2011.
- 3) S.Motokoshi, et al.: Proc. of Laser-Induced Damage in Optical Materials 2011, SPIE **8190**, 81900I-1, 2012.
- 4) <http://www.ilt.or.jp/kenkyukai.html>
- 5) R.M.Wood, et al.: Nat. Bur. Stand (US) Spec. Publ. 669 (1984)44.
- 6) L.D.Merkle, et al.: Nat. Bur. Stand. (US) Spec. Publ. 669 (1984)50.
- 7) S.Motokoshi, et al.: Jap. J. Appl. Phys. 33 (1994) L1530.
- 8) M.Mero, et al.: Opt. Engineering 44 (2005) 051107.
- 9) 本越伸二他: ILT 2014 レーザー技術総合研究所, 2014

発 表 論 文 リ ス ト

発表論文リスト

○レーザーエネルギー研究チーム

著 者	<u>D. Li</u> , Y. Wang, M. Nakajima, M. Tani, M. Hashida, M. R. Asakawa, Y. Wei, and S. Miyamoto
題 目	Coherent radiation at the fundamental frequency by a Smith-Purcell free-electron laser with dielectric substrate
論文誌名	Appl. Phys. Lett, 110, 151108, (2017)
著 者	K. Mori、K. Mori, M. Hashida, T. Nagashima, <u>D. Li</u> , Kensuke Teramoto, Yoshihide Nakamiya, Shunsuke Inoue, and Shuji Sakabe
題 目	Directional linearly polarized terahertz emission from argon clusters irradiated by noncollinear double-pulse beams
論文誌名	Appl. Phys. Lett, 111, 241107 (2017)

○レーザープロセス研究チーム

著 者	<u>T. Somekawa</u> , T. Kitamura, and <u>M. Fujita</u>
題 目	Analysis of Taketomi Submarine Hot Spring Seawater for Laser Remote Sensing in Water
論文誌名	Extended Abstracts of the 24th Congress of International Commission for Optics, P3-08, (2017)
著 者	<u>M. Fujita</u> , <u>T. Somekawa</u> , M. Yoshida, N. Miyanaga, T. Nakase, and T. Kobayashi
題 目	Femtosecond-Laser-Induced Surface Texturing of Al-Si Alloy for Lower Friction Surface
論文誌名	Proceedings of Lasers in Manufacturing Conference 2017, #178, (2017)
著 者	<u>H. Chosrowjan</u> , <u>S. Taniguchi</u> , T. Kitamura, <u>M. Fujita</u> , and <u>Y. Izawa</u>
題 目	Quantitative analysis of CW-regime, multi-pass amplifier output characteristics including optical losses
論文誌名	ALPS'17, The 6th Advanced Lasers and Photon Sources, ALPS14-6, 1-2, (2017)
著 者	<u>T. Somekawa</u> and <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	Proc. ILRC28, 011_172, (2017)
著 者	藤田雅之、 <u>染川智弘</u> 、宮永憲明
題 目	微細加工 こんなレーザーが今後求められる
論文誌名	第87回レーザー加工学会講演論文集、pp.117-120、(2017)

○レーザー計測研究チーム

著 者	<u>S. Kurahashi</u> , K. Mikami, T. Kitamura, N. Hasegawa, H. Okada, S. Kondo, and M. Nishikino, T. Kawachi, <u>Y. Shimada</u>
題 目	Demonstration of Laser Remote Sensing for Internal Concrete Defects using a 25-Hz Inspection Speed
論文誌名	Journal of Applied Remote Sensing, 12(1), 015009, (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> 、北村俊幸
題 目	レーザーのコンクリート欠陥診断への利用
論文誌名	レーザー研究、第45巻、第7号、p.399-402、(2017)
著 者	<u>島田義則</u> 、 <u>倉橋慎理</u> 、北村俊幸
題 目	レーザーを用いたコンクリート欠陥技術の開発
論文誌名	光学、Vol.46、No.8、p.318-322、(2017)

著者	倉橋慎理、本越伸二、島田義則、大坪祐介、島原直樹
題目	レーザーを用いた水中コンクリート構造物の欠陥検査技術の開発
論文誌名	レーザー研究、第45巻、第7号、p.423-426、(2017)
著者	錦野将元、倉橋慎理、北村俊幸
題目	レーザー打音高速検査システムの開発
論文誌名	建設機械、2017年5月号、(2017)

○レーザーバイオ化学研究チーム

著者	K. Lugsanangarm, A. Nueangaudom, S. Pianwanit, S. Kokpol, N. Nunthaboot, F. Tanaka, <u>S. Taniguchi</u> , and <u>H. Chosrowjan</u>
題目	Dynamics of the Protein Structure of T169S Pyranose 2-Oxidase in Solution: Molecular Dynamics Simulation
論文誌名	Proteins: Structure, Function, and Bioinformatics, Vol.85(10), pp.1913-1924, (2017)
著者	A. Nueangaudom, K. Lugsanangarm, S. Pianwanit, S. Kokpol, N. Nunthaboot, F. Tanaka, <u>S. Taniguchi</u> , and <u>H. Chosrowjan</u>
題目	New aspects in the structure of D-amino acid oxidase from porcine kidney in solution: Molecular dynamics simulation and photoinduced electron transfer
論文誌名	Full Chapter in the Book "Amino Acid - New Insights and Roles in Plant and Animal", Chapter4, ISBN 978-953-51-3242-4, Chapter 4, pp.75-106, (2017)

○レーザー技術開発室

著者	<u>S. Motokoshi</u> , Y. Takemura, M. Yoshida, T. Jitsuno, M. Yoshimura
題目	Laser-induced damage in silica glasses with double pulses irradiation
論文誌名	ALPS'17, The 6th Advanced Lasers and Photon Sources、, ALPS17-7,1-2,(2017)

国際学会発表リスト

○レーザーエネルギー研究チーム

著 者	<u>D. Li</u> , M. Nakajima, M. Hashida, M. Tani, M. Asakawa
題 目	Coherent radiation in terahertz regime from a composite grating
会議名	MTSA2017-OptoX NANO、2017年11月20日、Okayama, Japan

○レーザープロセス研究チーム

著 者	<u>M. Fujita</u> , <u>T. Somekawa</u> , M. Yoshida, N. Miyanaga, T. Nakase, T. Kobayashi
題 目	Femtosecond-Laser-Induced Surface Texturing of Al-Si Alloy for Lower Friction Surface
会議名	Lasers in Manufacturing 2017, 26-29 Jun 2017, Munich, Germany
著 者	<u>H. Chosrowjan</u> , <u>S. Taniguchi</u> , T. Kitamura, <u>M. Fujita</u> , <u>Y. Izawa</u>
題 目	Quantitative analysis of CW-regime, multi-pass amplifier output characteristics including optical losses
会議名	The 6th Advance Lasers and Photon Sources, 18-21 April 2017, Yokohama, Japan
著 者	<u>T. Somekawa</u> , <u>M. Fujita</u>
題 目	Raman Spectroscopic Measurements of CH ₄ Gas and CH ₄ Dissolved in Water for Laser Remote Sensing in Water
会議名	28th International Laser Radar Conference ILRC28, 25-30 June 2017, Bucharest, Romania
著 者	<u>T. Somekawa</u> , T. Kitamura, <u>M. Fujita</u>
題 目	Analysis of Taketomi Submarine Hot Spring Seawater for Laser Remote Sensing in Water
会議名	The 24th Congress of the International Commission for Optics ICO-24, 21-25 August 2017, Tokyo, Japan

○レーザー計測研究チーム

著 者	<u>S. Kurahashi</u> , T. Kitamura, H. Okada, S. Kondo, K. Mikami, N. Hasegawa, M. Nishikino, <u>Y. Shimada</u>
題 目	Development of High-speed Defect Inspection Technique for Concrete Structure using Laser Hammering Method
会議名	Laser Solution for Space and the Earth 18-21 April 2017, Yokohama, Japan

○バイオ化学研究チーム

著 者	T. Saiki, S. Uchida, <u>S. Taniguchi</u>
題 目	Recyclable Air Fuel Cells Using Sintered Nanopastes with reduced Mg nanoparticles prepared by Pulse Laser Ablation in Liquids
会議名	2017 CLEO Conference, 16-18 May 2017, San Jose, CA, USA

○レーザー技術開発室

著 者	<u>S. Motokoshi</u> , Y. Takemura, M. Yoshida, T. Jitsuno, M. i Yoshimura
題 目	Laser-induced damage in silica glasses with double pulses irradiation
会議名	The 6th Advanced Lasers and Photon Sources, 18-21 April 2017, Yokohama, Japan
著 者	Y. Takemura, <u>S. Motokoshi</u> , M. Yoshida, T. Jitsuno, M. Yoshimura
題 目	Dependences of laser-induced damage threshold on pulse separation time for silica glasses
会議名	The 24th Congress of the International Commission for Optics, 21-25 Aug. 2017, Tokyo, Japan

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
題 目	スミス・パーセル効果を用いたテラヘルツ帯光源開発研究の発展
会議名	テラヘルツ波科学技術と産業開拓第182委員会第32回研究会、2017年8月1日、大阪産業大学梅田サテライトキャンパス
著 者	李大治、中嶋誠、橋田昌樹、谷正彦、浅川誠
題 目	複合グレーティングによる電磁モード分散特性解析
会議名	第78回応用物理学会秋季学術講演会、2017年9月7日、福岡国際会議場
著 者	李大治、本越伸二
題 目	テラヘルツ波による電力設備劣化・欠陥検出の研究
会議名	電気材料技術懇談会、2017年9月27日、堂島リバーフォーラム
著 者	Phan ThanhNhat Khoa、李大治、加藤康作、谷正彦、吉村政志、中嶋誠
題 目	Research on the Radiative Eigenmodes in Terahertz Wave Region from Metallic Slit Array
会議名	第65回応用物理学会春季学術講演会、2018年3月7日、早稲田大学西早稲田キャンパス
著 者	李大治、中嶋誠、橋田昌樹、谷正彦、浅川誠
題 目	新型放射を用いたスミス・パーセル自由電子レーザー
会議名	レーザー学会学術講演会第38回年次大会、2018年1月24日、京都市勧業館みやこめっせ
著 者	李大治、Phan ThanhNhat Khoa、加藤康作、中嶋誠
題 目	スミス・パーセル共鳴放射
会議名	GHz～THz帯発振源の開発と応用研究会、2018年2月21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、染川智弘
題 目	微細加工 こんなレーザが今後求められる
会議名	第87回レーザ加工学会講演会、2017年4月5日、産総研臨海副都心センター
著 者	藤田雅之
題 目	レーザーダイシングの開発と低ダメージ化・応用展開
会議名	AndTech社セミナー、2017年7月26日、高砂ビル 2F CMC+AndTech FORUM セミナールーム
著 者	染川智弘、藤田雅之
題 目	竹富島海底温泉の海水評価と海上ラマンライダーシステムの開発
会議名	レーザセンシングシンポジウム、2017年9月1日、情報通信研究機構
著 者	染川智弘、大塚昌孝、前田佳伸、藤田雅之
題 目	フェムト秒ダブルパルスLIBS法による信号増強効果のフルーエンス依存性
会議名	第78回応用物理学会秋季学術講演会、2017年9月5日、福岡国際会議場
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
題 目	ゼロフォノンライン励起Yb:YAG TRAMレーザーの発振特性
会議名	第78回応用物理学会秋季学術講演会、2017年9月5日、福岡国際会議場
著 者	ハイクコスロービアン、谷口誠治
題 目	コーナーキューブレトロフレクター共振器のレーザー特性
会議名	第78回応用物理学会秋季学術講演会、2017年9月6日、福岡国際会議場

著 者	藤田雅之、谷口誠治、 <u>ハイク コスロービアン</u> 、李大治、 <u>本越伸二</u> 、井澤靖和、西方伸吾、森岡朋也、濱本浩一、田枝正寛、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レーザーの熱特性
会議名	レーザー学会学術講演会第38回年次大会、2018年1月24日、京都市勧業館みやこめっせ
著 者	染川智弘、藤田雅之、宮永憲明
題 目	海上ラマンライダーの開発
会議名	レーザー学会学術講演会第38回年次大会、2018年1月25日、京都市勧業館みやこめっせ
著 者	染川智弘、大塚昌孝、久世宏明、前田佳伸、 <u>藤田雅之</u> 、宮永憲明
題 目	レーザー誘起ブレイクダウン分光法を用いた大気中エアロゾルのリモート成分分析手法に向けて
会議名	第43回リモートセンシングシンポジウム、2018年3月9日、首都大学東京秋葉原サテライトキャンパス
著 者	谷口誠治、 <u>ハイク コスロービアン</u> 、李大治、 <u>本越伸二</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、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65回応用物理学会春季学術講演会、2018年3月17日、早稲田大学西早稲田キャンパス
著 者	<u>ハイク コスロービアン</u> 、谷口誠治
題 目	アキシコンレトロリフレクター共振器のレーザー特性
会議名	第65回応用物理学会春季学術講演会、2018年3月18日、早稲田大学西早稲田キャンパス
著 者	染川智弘、 <u>倉橋慎理</u> 、 <u>藤田雅之</u> 、宮永憲明
題 目	海上ラマンライダーの開発
会議名	第65回応用物理学会春季学術講演会、2018年3月20日、早稲田大学西早稲田キャンパス

○レーザー計測研究チーム

著 者	<u>島田義則</u>
題 目	レーザーが拓くコンクリートインフラ構造物の健全性評価技術
会議名	スマートインフラセンサ利用研究会、2017年6月28日、関西情報センター
著 者	御崎哲一、保田尚俊、 <u>島田義則</u> 、篠田昌弘、江本茂夫
題 目	レーザーを用いた新幹線トンネル覆工コンクリート欠陥検査手法の開発
会議名	土木学会全国大会、2017年9月11日、九州大学
著 者	藤田雅之、 <u>島田義則</u> 、 <u>オレグ コチャエフ</u> 、 <u>倉橋慎理</u>
題 目	レーザーを用いたコンクリート欠陥の高速遠隔検査技術の開発
会議名	フォトニクス技術フォーラム、2017年10月2日、大阪科学技術センター
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査技術
会議名	平成29年度地域中核企業創出・支援事業特別講演会 ロボットフォトニクス産業の創出を目指して、2017年10月24日、大阪科学技術センター
著 者	<u>島田義則</u>
題 目	レーザーによるインフラ非破壊診断
会議名	第9回光科学フォーラムサミット、光科学による新たな産業応用、2017年11月15日、科学技術館
著 者	三上勝大、中島大輔、北村俊幸、長谷川 登、岡田登、岡田大、近藤修司、錦野修司、錦野将元、 <u>倉橋慎理</u> 、 <u>島田義則</u> 、名倉武雄、河奈裕正、松 守雄、中村雅也
題 目	レーザ誘起振動 波診断 による固定具設置強度の評価
会議名	レーザー学会学術講演会第38回年次大会、2017年1月25日、京都市勧業館みやこめっせ

著 者	倉橋慎理、北村俊幸、岡田大、近藤修司、三上勝大、長谷川登、李大治、錦野将元、河内哲哉、乗松孝好、 <u>島田義則</u>
題 目	屋外利用を目指したレーザーによるコンクリート構造物内部欠陥検出の高速化技術の開発
会議名	レーザー学会学術講演会第38回年次大会、2017年1月25日、京都市勧業館みやこめっせ
著 者	<u>島田義則</u> 、倉橋慎理、オレグ コチャエフ、長谷川登、錦野将元、三上勝大、北村俊幸、岡田大、近藤修司、河内哲哉、乗松孝好
題 目	レーザーを用いたコンクリート欠陥リモートセンシング技術
会議名	電気学会 光・量子デバイス研究会 社会課題解決のための光源技術 、2018年3月2日、東海大学 湘南キャンパス
著 者	倉橋慎理、北村俊幸、岡田大、近藤修司、三上勝大、長谷川登、李大治、錦野将元、河内哲哉、乗松孝好、 <u>島田義則</u>
題 目	レーザーによる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30年電気学会全国大会、2018年3月15日、九州大学伊都キャンパス

○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	TEC変化に影響を及ぼす地下電気分極の深さ依存性および方向依存性
会議名	地震先行現象研究会、2018年3月21日、コンボン研究所

○レーザー技術開発室

著 者	竹村有輝、 <u>本越伸二</u> 、吉村政志、實野孝久、藤岡加奈、小川 遼、吉田 実
題 目	繰返しパルスレーザーによる石英ガラスの損傷しきい値と透過率の評価
会議名	レーザー学会学術講演会第38回年次大会、2018年1月24日、京都市勧業館みやこめっせ
著 者	<u>本越伸二</u>
題 目	石英ガラスのレーザー損傷
会議名	第3回光材料・応用技術研究会、2017年11月10日、宝塚ホテル

事業報告書

事業報告書

(平成29年度)

概況

レーザー技術総合研究所は、レーザーおよびその関連産業の振興を図り、我が国の学術の進展と科学技術の発展に貢献することを責務とし、レーザーとその応用に関する研究開発、調査、情報の収集・提供、人材の養成などの事業を鋭意推進すべく活動してきた。平成29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29年度の主な成果】

産業用レーザー開発プロジェクト研究においては、大出力固体レーザーに必要とされる基盤技術の開発を目標にレーザー発振実験を行い、室温での動作特性を解析することによりゼロフォノンライン励起方式の発熱低減効果を確認した。

コンクリート構造物健全性評価技術開発プロジェクト研究では、トンネル覆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研究を進めた。

レーザーエネルギー分野においては、テラヘルツ光源開発のため、複合構造体における電磁波の放射特性を理論解析により予測し、新型テラヘルツ波放射の可能性を示した。また、テラヘルツ波の設備の診断や検査への応用に関する研究を進めた。

レーザープロセス分野では、フェムト秒パルスを用いて金属・半導体等各種材料の加工特性に関する研究を進め、微細周期構造の応用について検討を行うなど、レーザープロセスの高性能化に資する基盤技術を開発した。また、酸化亜鉛の溶液中還元と微細化、空気電池への応用を目標に、溶媒効果などナノ粒子作製の高効率化について研究を進めた。

レーザー計測分野においては、リモートセンシング技術を高架橋などのインフラ構造物健全性評価に適用するための技術開発に加え、大気中エアロゾルの遠隔成分分析に向けた基礎検討、水中レーザーモニタリングの実現に向けた海上でのラマンライダー試験の実施、産業応用を目指した赤外域でのガスの吸収計測に関する基礎研究を実施した。

レーザーバイオ化学分野では、創薬、蛋白質の光デバイスなどへの応用を目的とし、蛋白質・酵素などの機能解明および薬剤による機能阻害効果に関する研究を進めた。

理論シミュレーション分野においては、レーザーと物質の相互作用に関する理論的研究を幅広く行い、各研究チームが行う実験研究を支援するとともに、レーザーピーニングやレーザー加工など産業応用に有用なデータを提供した。

レーザー技術開発室においては、レーザー加工特性の評価手法に関する基礎技術開発を行った。また、可視光ファイバーレーザーでは、ファイバー端面処理の改善によって多層膜ミラーコート耐性向上を図るなど、新材料・新技術の開発にも力を入れている。

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 2017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
H29.4.11	兒玉 了祐	疇地 宏
H29.9.21	北島 尚史	小野寺正洋

(評議員)

年月日	就 任	退 任
H29.8.9	河内 哲哉	内海 渉
H29.8.9	西内 誠	加藤 有一
H29.8.9	木島 和夫	仙藤 敏和

2. 役員会等の開催

(1)理事会

第22回理事会 (平成29年6月2日 関電会館)

決議事項

- ・平成28年度事業報告書
- ・平成28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15回評議員会(臨時)の決議内容

第 23 回理事会 （平成 29 年 7 月 25 日 みなし決議）

決議事項

- ・臨時の第 17 回評議員会の招集及び目的である事項

報告事項

- ・第 16 回評議員会の決議内容

第 24 回理事会 （平成 29 年 8 月 28 日 みなし決議）

決議事項

- ・臨時の第 18 回評議員会の招集及び目的である事項

報告事項

- ・第 17 回評議員会（臨時）の決議内容

第 25 回理事会 （平成 30 年 3 月 13 日 関電会館）

決議事項

- ・平成 30 年度事業計画書
- ・平成 30 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
- ・諸規程の変更及び制定
- ・臨時の第 19 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 18 回評議員会（臨時）の決議内容

(2)評議員会

第 15 回評議員会 （平成 29 年 4 月 11 日 みなし決議）

決議事項

- ・理事の選任

報告事項

- ・第 20 回理事会（臨時）の決議内容
- ・第 21 回理事会の決議内容

第 16 回評議員会 （平成 29 年 6 月 21 日 関電会館）

決議事項

- ・平成 28 年度財務諸表の承認

報告事項

- ・第 22 回理事会の決議内内容
- ・平成 28 年度事業報告

第 17 回評議員会 （平成 29 年 8 月 9 日 みなし決議）

決議事項

- ・評議員の選任

報告事項

- ・第 23 回理事会（臨時）の決議内容

第 18 回評議員会（平成 29 年 9 月 21 日 みなし決議）

決議事項

- ・理事の選任

報告事項

- ・第 24 回理事会（臨時）の決議内容

3. 賛助会員状況

平成 29 年度末会員数	41 社	84.5 口
--------------	------	--------

4. 学会および論文発表

学会発表	39 件	（国内：30 件、国外：9 件）
------	------	------------------

論文発表	15 件	（国内：6 件、国外：9 件）
------	------	-----------------

5. 特許等出願件数

平成 29 年度出願件数	2 件
--------------	-----

平成 29 年度末特許保有件数	25 件	（登録済：23 件、公開済：0 件）
-----------------	------	--------------------

I 研究開発および調査事業

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

1. 研究調査事業

【産業用レーザー開発プロジェクト研究】

省エネルギー効果が期待されるレーザー加工技術の発展に活用するため、kW 級大出力固体レーザーの開発を進めている。室温動作レーザーの発振特性を解析し、ゼロフォノンライン励起方式で発熱低減効果を確認した。

[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 セラミックレーザー

【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とを組み合わせた検査システムを構築して、施工技術総合研究所の模擬トンネルで性能確認試験を実施し、50Hz での高速検査が可能であることを実証した。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・レーザーを活用した高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の研究開発

【レーザーエネルギー研究チーム】

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

(1) 複合構造体によるテラヘルツ波放射の研究

金属周期構造体と誘電体を組み合わせた複合構造体からの電磁波の放射特性を、理論とシミュレーションにより解析し、指向性がよく単色の新型テラヘルツ波放射光源の可能性を示した。複合構造体の製作と検証実験の検討を開始した。

(2) テラヘルツ波による設備の診断・検査研究

シリコンゴムやプラスチック材料などの電力設備用絶縁材料について、その内部欠陥をテラヘルツ波で診断するための基礎実験を実施してきた。テラヘルツ波反射信号により、絶縁材料内部の剥離、浸水などの異常を診断できることを実験で検証した。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・テラヘルツ光源の開発研究
- ・メタマテリアルによるコヒーレント放射光の基礎研究

【レーザープロセス研究チーム】

レーザー加工特性の評価試験、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) フェムト秒レーザー加工に関する研究

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

(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

インフラ構造物へのレーザー加工応用を目指して、CW ファイバーレーザーを用いたコンクリートや鉄筋等の切断、補修に関する基礎研究を開始した。

(3) レーザーによるナノ粒子生成技術の研究

酸化亜鉛の溶液中還元と微細化、空気電池への応用を目標に、溶媒効果などナノ粒子作製の高効率化について研究を進めた。また、タングステンなどの高融点材料のナノ粒子作製成技術の研究も進めた。

[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) レーザーを用いたリモートセンシング技術に関する研究

高架橋床版検査をめざして開発してきたレーザー差動干渉技術を、三津屋跨線橋(十三, 大阪)や阪東大橋(放出, 大阪)などの現場で実環境試験し、鋼板床版欠陥の遠隔計測の有効性を実証した。

(2) レーザーを用いた環境評価技術の研究

大気中のエアロゾルや有害ガス、海水中のガス成分などの遠隔分析に向けた基礎検討を実施した。また、共鳴ラマンライダーの開発とそれに必要な深紫外域の波長可変レーザーの検討を開始した。

[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

- ・ レーザーラマン散乱を用いた海水溶存成分測定法の開発
- ・ 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
- ・ レーザーによる石炭サイロ内 CO 濃度測定の実現性に関する調査研究
- ・ 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】

蛋白質・酵素の光デバイス、創薬などへの応用を目的とし、蛋白質等の機能解明および薬剤による機能阻害効果に関する研究を進めた。

(1) 時間分解レーザー計測による生体関連物質の機能研究

光合成の最終段階で電子授受を行うフラビン蛋白質の反応過程に関し、軌道計算による溶液中蛋白構造変化の予測および分光計測による実験的検討を行なった。

(2) 薬剤による生体内酵素の機能制御メカニズムの研究

統合失調症の要因となる d-アミノ酸酸化酵素の異常活性を抑制できる薬剤分子の光促進効果について分光計測による研究を進めた。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・ 時間分解蛍光計測による蛋白質の機能阻害効果の研究

【理論・シミュレーションチーム】

レーザーと物質の相互作用に関する理論的研究を幅広く行い、各研究チームが行う実験研究を支援するとともに、レーザーピーニングやレーザー加工など産業応用に有用なデータを提供した。

(1) レーザーアブレーションとその応用に関する理論的研究

レーザー吸収による加熱、相変化、応力発生、残留応力生成などを含め、大気中や水中でのレーザーアブレーション過程を記述するシミュレーションコードを精緻化し、レーザーピーニング、レーザー加工の動的過程の解析を進めた。

(2) レーザー核融合炉設計に関する理論的研究

レーザー核融合炉液体壁のアブレーションで発生する金属蒸気の衝突現象を、実チャンバーサイズでシミュレーション解析し、チャンバー排気系の設計指針となりうるデータを提供した。

(3) 地震先行現象におけるプラズマ物理研究

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、当該域上空電離層の電子密度変動現象を解析した。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・プラズマ物理からみた地震前電離層電子密度変化に関する研究

【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す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」を通して、レーザー損傷しきい値のデータベース構築を進めた。

(1) 繰返しレーザー照射時のレーザー損傷機構の解明

石英ガラス (SiO_2) 材料に紫外光を照射すると、 Si-Si や Si-O-O-Si 欠陥に起因する真空紫外光の吸収によって Si^* (E' センター) が生成する。これは可逆的欠陥であることから、生成-再結合モデルを考え、再結合時間定数を数値解析により求めた。ガラス純度により時間定数が異なり、透過率および損傷しきい値低下に影響を及ぼすことを示した。

(2) レーザー損傷評価試験

光学素子メーカー14社から依頼のあった20件のレーザー損傷評価試験を行い報告した。

(3) 新しいレーザー材料、新しいレーザー技術の開発

可視域で発振する Pr 添加フッ化物ファイバーレーザーは LD 励起が可能で、波長変換を利用した高効率・高輝度紫外光源として期待されている。LD 光を入射するファイバー端面への新しい多層膜コート技術を開発した結果、損傷耐力が向上し、励起用 LD パワーを増加させることが可能となった。

太陽光励起レーザーの材料として期待されている Nd, Cr:YAG 中で、Cr から Nd へのエネルギー移乗過程を解析し、高温動作において増幅利得向上することを明らかにした。

[関連する主な受託・共同研究]

- ・革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発

2. 各種研究会活動

当研究所の研究開発活動を効率的・発展的に推進するため、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、超音波診断などの相談・要望に対し、積極的に取り組んだ。65 件の技術相談に対応し、そのうち 29 件が受託研究へ結び付いた。

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

学界との連携では、大阪大学レーザー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)宇宙航空研究開発機構(JAXA)、(国)日本原子力研究開発機構(JAEA)、(国)量子科学技術研究開発機構（QST）、(財)光産業技術振興協会(OITDA)、(財)大阪科学技術センター(OSTEC)、(財)近畿高エネルギー加工技術研究所(AMPI)、(社)レーザー学会(LSJ)、(社)レーザープラットホーム協議会(LPF)、(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）、韓国原子力研究所(KAERI)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. 受託研究

展示会、ホームページなどを通して受託試験の広報を行い、技術相談窓口で依頼を受けて 20 件のレーザー損傷評価試験を行うなど、計 32 件の受託研究を実施した。(公募によるものを除く。)

7. 補助事業

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

- (1) 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) 海底開発による環境影響評価に向けたラマンライダーによる海中モニタリング技術の開発 (若手研究 A)
- (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) 反射機構を必要としないチェレンコフ型テラヘルツ波放射発振器に関する基礎研究(松尾学術研究助成)
- (5) レーザー三次元造形による石英ガラス回折光学素子の直接創成 (天田財団 一般研究開発助成)
- (6) 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)

II 普及啓発活動事業

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

1. 人材の育成

大学、関連研究機関、企業など、共同研究先や技術相談の依頼元から若手研究員を受け入れ、技術指導を行うことにより、レーザー技術に関する人材育成を行った。

2. 研究成果報告会

大阪ならびに東京にて、平成 28 年度の研究成果を報告する研究成果報告会 (ILT2017)を開催した。

7月21日 千里ライフサイエンスセンター（大阪）
11月14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 2017 4月19日～21日 パシフィコ横浜（神奈川）
- ・第2回レーザー科学技術フェア 11月14日～16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。また、韓国原子力研究所(KAERI)等との共同研究を実施した。主なものは以下のとおり。

- (1) International Laser Radar Conference 28, ILRC28 (6月, ルーマニア)
- (2) Lasers in Manufacturing 2017, LiM2017 (6月, ドイツ)
- (3) International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications 2017, DICTA 2017 (11月, オーストラリア)

6. その他

レーザーによるコンクリート内部欠陥の高速検出技術の成果について以下のメディアに取り上げられた。

- (1) 日本経済新聞（平成29年7月1日夕刊一面）
- (2) 日経新聞 Web 版（平成29年7月1日）
<https://www.nikkei.com/article/DGXMZ018374150R00C17A7AM1000/>
- (3) NHK サイエンス ZERO（平成29年7月30日放送）

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

レーザーによるエネルギー開発に向けた有識者会議での提案を提言としてまとめ、文部科学省事務次官へ提出する等の慣性核融合エネルギー開発事業の推進をめざした活動を支援した。

2. 出版物の刊行

平成 28 年度の研究成果を年報にまとめ、刊行した。また、創立 30 周年記念誌を刊行した。

- ・「ILT2017 年報」（2016～2017）（平成 29 年 7 月発行）
- ・「レーザー総研 30 年の歩み」（平成 29 年 7 月発行）

3. 泰山賞の贈呈

創立 30 周年記念講演会にて第 9 回泰山賞の表彰式を行い、レーザー科学技術の分野で永年にわたり抜群の功績を上げた個人に功績賞を、近年著しい業績を上げたグループに進歩賞を贈呈した。

4. 創立 30 周年記念講演会、祝賀会

平成 29 年度に当財団が創立 30 周年を迎えたのを機に、レーザー技術のさらなる普及啓発活動を推進すべく、創立 30 周年記念行事を実施した。

（1）記念講演会

- ・日時：平成 29 年 7 月 21 日（金）15：00～17：00
- ・場所：千里ライフサイエンスセンター
- ・参加者：約 150 名

【プログラム】

①泰山賞贈呈式

◇レーザー功績賞 三間 罔興 氏

「レーザー核融合をはじめとするレーザープラズマ科学研究推進への貢献」

◇レーザー進歩賞 平等 拓範 氏

「固体レーザーの小型化と非線形光学波長変換の先駆的研究」

②開会挨拶

理事長 大石富彦

③記念講演

◇「レーザー技術総合研究所の30年」

所長 井澤 靖和

◇「関西経済の現状と課題」

関西経済連合会相談役 森 詳介 氏

④閉会挨拶

副所長 中塚 正大

(2) 記念祝賀会

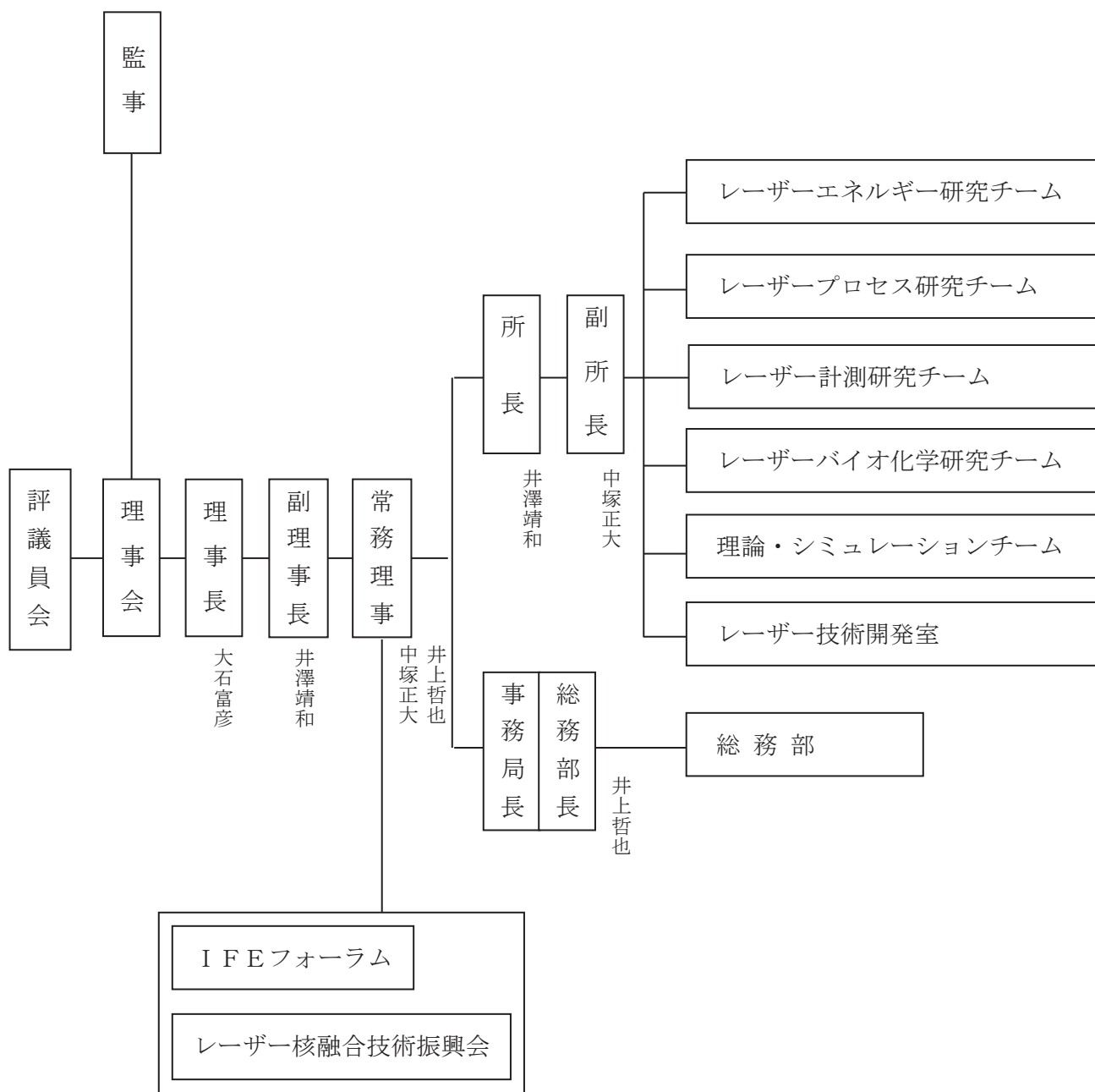
- ・日時 : 平成29年7月21日(金) 17:30～19:00
- ・場所 : 千里阪急ホテル クリスタルホール
- ・参加者 : 約120名

(3) 創立30周年記念誌の発行

「レーザー総研30年の歩み」(平成29年7月21日発行)

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	大石富彦 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 研究員	井澤靖和（兼務） 李 大治
【レーザープロセス研究チーム】	主席研究員 （チームリーダー） 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）	本越伸二
【総務部】	事務局長 総務部長 マネージャー マネージャー マネージャー 事務員	井上哲也（兼務） 井上哲也（兼務） 幸脇朱美 小野田理恵 藤本 勲 藤田淑子
【特別研究員】	京都大学 名誉教授 元日新電機株式会社 元三菱電機株式会社 三重県立看護大学 名誉教授 元東京工業大学 准教授 大阪市立大学 特任教授 大阪大学 名誉教授 元日本原子力研究開発機構	毛利明博 鈴木泰雄 田畑則一 田中文夫 糟谷紘一 中島信昭 宮永憲明 大道博之

（平成 30 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	特任教授	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	准教授	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	助教	古瀬裕章
京都大学化学研究所	教授	阪部周二
京都大学化学研究所	准教授	橋田昌樹
京都大学大学院理学研究科	教授	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
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
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
日本電気株式会社		伊藤良峻
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	三間罔興
兵庫県立大学高度産業科学技術研究所	特任教授	望月孝晏
兵庫県立大学工学部・大学院工学研究科	教授	宮本修治
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	教授	仁木秀明
福井大学大学院工学研究科	教授	金邊 忠
福井工業大学工学部	教授	西村博明

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
 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	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
主幹研究員	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
研究員	三上勝大
	近藤修司
	岡田 大

評 議 員
理 事・監 事
賛 助 会 員

評 議 員

(敬称略)

評議員	礪嶋茂樹	住友電気工業株式会社 研究開発本部 電力・エネルギー・超電導 担当技師長
	尾崎 博	富士電機株式会社 発電事業本部 事業統括部 主幹
	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
	木島和夫	関西電力株式会社 原子燃料サイクル室長
	佐々木孝友	大阪大学 名誉教授
	田中健一	三菱電機株式会社 開発本部 技術統轄
	中田公明	パナソニック株式会社 エコソリューションズ社 ものづくり革新本部 生産技術開発センター長
	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
	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

(平成30年5月末現在)

理 事・監 事

(敬称略)

理事長	大石富彦	関西電力株式会社 取締役常務執行役員
理 事	井澤靖和	大阪大学 名誉教授
	中塚正大	大阪大学 名誉教授
	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
	安食和英	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
	上原拓也	東芝エネルギーシステムズ株式会社 プラントサービス・応用技術開発 主幹
	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長
	兒玉了裕	大阪大学 レーザー科学研究所 所長・教授
	佐藤俊志	富士電機株式会社 関西支社 営業第二部長
	野田英智	中部電力株式会社 技術開発本部 技術企画室長
	外井康宏	日本電気株式会社 関西支社 官公第一営業部長
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

(平成30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
株式会社ケイ・オプティコム	前田建設工業株式会社
光伸光学工業株式会社	三重光学株式会社
株式会社神戸製鋼所	株式会社三井住友銀行
ジオマテック株式会社	三菱重工業株式会社
株式会社島津製作所	三菱電機株式会社
清水建設株式会社	株式会社レイソルテクノロジーズ
住友電気工業株式会社	一般社団法人レーザー学会
	合計40社

お わ り に

レーザー技術総合研究所 平成 29 年度成果報告書 (ILT2018 年報第 30 巻)を取りまとめました。大阪と東京で開催する成果報告会においてその内容をご報告し、皆様からご批判、ご教示を頂きたいものと願っています。

昨年度は、これまで進めてきた NEDO プログラムによる「革新的小型・高効率 UV レーザー光源の開発」、安全保障技術研究推進制度による「ゼロフォノンライン励起新型高出力 Yb:YAG セラミックレーザー」、SIP（戦略的イノベーションプログラム）による「レーザーを活用した高性能・非破壊劣化インフラ診断技術の開発研究」、A-STEP ハイリスク挑戦タイプによる「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」に加えて、安全保障技術研究推進制度による「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」にも参画し、国の研究機関、大学、産業界と連携して、産業用レーザー技術開発、インフラ構造物の遠隔非破壊探傷技術開発、環境計測技術開発の 3 つのプロジェクト研究を進めました。

チーム研究では、レーザー加工、テラヘルツ波光源の開発と非破壊検査への応用、レーザー分光による微量成分分析、液中レーザーアブレーションと光化学、生体関連物質の機能研究、レーザープラズマシミュレーション研究、光学素子の損傷評価や高耐力化研究などを継続して進め、成果の積み上げを図ってきました。レーザー加工では、木材やコンクリート部材の塗装除去、切断・補修など建築部材への適用性研究に着手しました。レーザー分光ではライダー計測システムを漁船に搭載して海上からの水中観測に挑戦し、実環境での海洋計測をめざす活動を開始しました。テラヘルツ光源開発では、これまでの理論シミュレーション研究の成果を実証すべく、周期構造体からのテラヘルツ放射の実験研究に着手しました。また、酸化亜鉛の溶液中還元・ナノ粒子化と空気電池への応用をめざす研究、光励起による蛋白質の機能解明研究、地震先行現象におけるプラズマ物理研究などを実施しました。光学素子の損傷評価を中心とするご相談やご依頼も増加しており、ご要望に対応できる体制などを検討してまいります。

当研究所は昨年創立 30 周年を迎えました。研究員一同初心に還り、研究開発活動を積極的に推進し、わが国の産業活力向上に貢献できるよう、鋭意努力する所存でございます。長年にわたる皆様方のご指導、ご協力に深く感謝申し上げますとともに、これからも相変わりがせず、ご支援、ご鞭撻下さいますようお願い申し上げます。

平成 30 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

ILT2018 年報

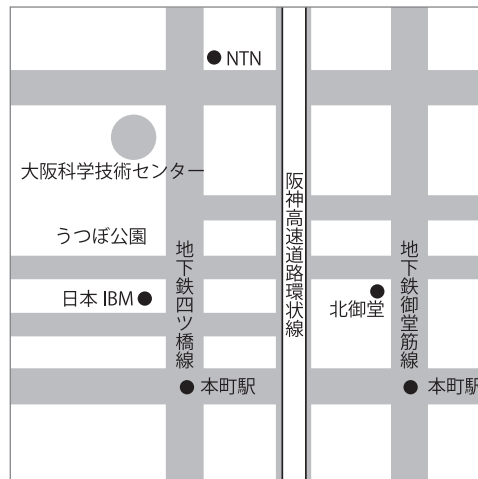
平成 30 年 7 月 発行

公益財団法人 レーザー技術総合研究所

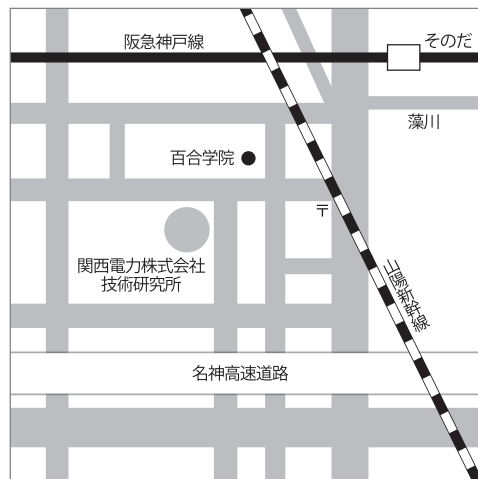
〒 550-0004 大阪市西区靱本町 1 丁目 8 番 4 号
大阪科学技術センタービル 4 F

TEL (06) 6443-6311 (代)

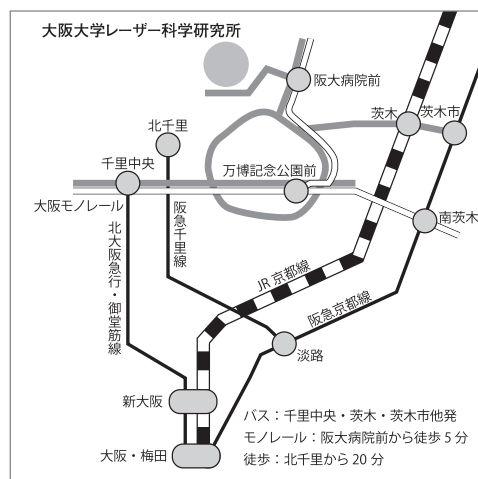
公益財団法人 レーザー技術総合研究所



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