創立 30 周年記念誌

レーザー総研30年の歩み

The 30th Anniversary

公益財団法人 レーザー技術総合研究所

目　次

あいさつ

創立 30 周年記念誌発刊にあたって　理事長 ---------- 1
創立 30 周年を迎えて　所長 ---------- 2

研究成果

レーザー計測

レーザー超音波計測年表　島田義則 ---------- 4
Development of laser-based system for remote inspection of unstable structures like highway bridges　オレグ・コチャエフ ---- 5
レーザーを用いた水中コンクリート構造物欠陥探査現地試験　倉橋真理 ---------- 13
レーザーリモートセンシングの研究展開　染川智弘 ---------- 16
テラヘルツ波の非破壊検査応用　李　大治 ---------- 19
レーザーブレークダウン分光法による碍子表面塩分計測技術の開発　島田義則 ---------- 25
時間分解レーザー計測による蛋白質の光励起メカニズム　谷口誠治 ---------- 27

レーザー開発

次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト　藤田雅之 ---------- 32
高出力クライオジェニックレーザーの開発　谷口誠治 ---------- 37
Frontiers of High Power Lasers: Coherent Beam Combining　ハイク・コスロービアン --- 40
メタマテリアルによる電磁波放射源開発基礎研究」　李　大治 ---------- 44

レーザープロセス

パルスレーザー加工の研究展開　藤田雅之 ---------- 51
液中レーザーアブレーションによるナノ粒子生成技術　谷口誠治 ---------- 58
光学素子のレーザー損傷　～その機構とデータベース～　本越伸二 ---------- 62
レーザーピーニング、核融合炉シミュレーション　古河裕之 ---------- 65

資料編

1．財団組織図 ---------- 68
2．発起人名簿 ---------- 69
3．歴代理事・監事、評議委員、技術企画委員、総務企画委員、企画委員 ---------- 70
4．賛助会員名簿 ---------- 84
5．受賞一覧 ---------- 85
6．泰山賞の贈呈 ---------- 87
7．特許一覧 ---------- 88
8．刊行物 ---------- 89
9．役職員・共同研究名簿 ---------- 91
10．OB研究者・職員の推移 ---------- 92
11．研究所30年の歴史と実績 ---------- 93
12．メディア掲載 ---------- 95

創立 30 周年記念誌発刊にあたり

理事長
大石富彦

レーザー技術総合研究所創立 30 周年記念誌の発行にあたりまして、一言ご挨拶申し上げます。

当レーザー技術総合研究所は、1987 年（当時）文部省、通商産業省、科学技術庁の 3 省庁共管により、大学等での光科学技術の基礎研究を踏まえ、それを産業界に結びつける研究開発を積極的に推進することを使命とし、設立されました。その後公益法人制度改革に伴い平成 24 年 4 月 1 日に公益財団法人へと改組されたことに伴い主務官庁は内閣府へと変わりましたが、おかげさまで本年 10 月 31 日で創立 30 周年を迎えることができました。これもひとえに関係省庁、企業、大学等研究機関の皆様のご指導、ご協力の賜物と厚く御礼申し上げます。

現在私たちを取り巻く環境においては、第 5 期科学技術基本計画にもあります通り、これから来るであろう大変革時代を前に、地球温暖化、エネルギー、資源問題等地球規模の課題が多々発生しており、その解決には科学技術の果たす役割がますます重要となっております。

中でも、これらすべての課題に横断的に対応可能な光科学技術は日々進歩・拡大し、その役割もますます重要になって参りました。これに伴い、我々が光科学技術の専門家集団として社会に貢献する機会も日々増えているのではないかと感じている次第です。

我々は設立当初より、産業への応用を念頭に置いた技術研究開発を考えて参りましたが、創立 30 周年を迎え、我々の研究開発の中でも、実用化したもの、あるいは実用化に向け射程距離に入ってきたものも出て参りました。本記念誌ではそういった応用研究から、より基礎研究に近い分野の研究まで、ここ 10 年程度の歩みを中心に、過去の歴史をまとめております。ご一読頂き、ご指導簿鞭撻を頂ければ幸甚でございます。

当研究所はこれからも、基礎研究ならびに開発研究について牽引的役割を果たすべく、先端的な研究活動を推進し、新技術の確立と産業の発展に貢献していく所存でございます。みなさまの益々のご支援、ご協力をお願い申し上げます。

創立 30 周年を迎えて

所長

井澤靖和

レーザー技術総合研究所は昭和 62 年（1987 年）に創立され、本年創立 30 周年を迎えることになりました。レーザーウラン濃縮研究からスタートし、レーザーによる微量分析、レーザー光化学、レーザー加工、レーザーレーダー、非破壊検査などへ、研究分野も原子力から電力、環境、宇宙、材料、バイオなどへと広がりました。レーザー誘雷、コンプトン散乱ガンマ線と核変換、太陽光励起レーザー、レーザー超音波など、当研究所の特長となる研究でも成果を上げることができました。

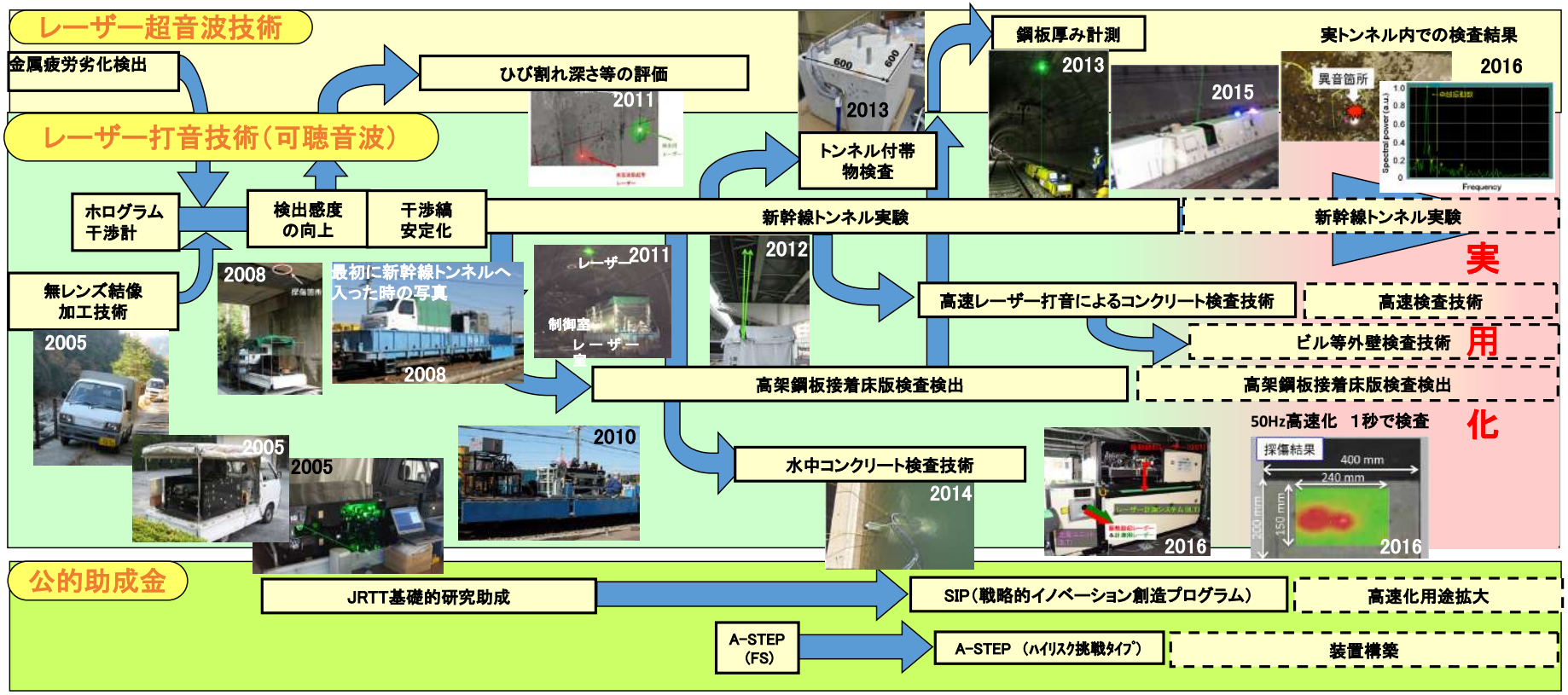
「（研究所）設立の目的は、大学において研究開発した光科学技術を踏まえ、レーザーに関する研究実績と工学の知見を産業界にスピンオフし、ニューテクノロジーを生み出し、科学技術立国の国是にいささかなりとも貢献したいという次第である。」これは当研究所の創設者山中千代衛先生の言葉です。当研究所では、産業界との連携・協力を最も重要なキーワードとして研究開発活動を進めてきました。科学研究費補助金などによる個人的研究を除き、競争的資金による研究を含めてほとんど全ての研究が産業界との共同研究になっています。山中先生は 30 周年を待つことなく、本年 2 月に逝去されましたが、その精神は受け継がれています。

本年 4 月、当研究所の「光学素子のレーザー損傷しきい値のデータベース」がレーザー学会産業賞（貢献賞）を受賞しました。この賞は、「レーザーに関する製品や技術、実用化、普及などで国内の関連産業の発展に貢献しうる優秀なものに贈呈する」ものとされています。当研究所では創立以来、多くの学協会から、当研究所の研究成果に対して、論文賞、進歩賞、奨励賞など様々な賞をいただきました。その数は 30 に達しようとしています。これらの賞の受賞者は全て研究者個人でしたが、このたびのレーザー学会産業賞の受賞者は研究所になっています。データベース構築に向けての研究者個人の地道な努力とこれに賛同して頂いた産業界の皆様のご協力がこの受賞につながったのでありますが、創立 30 周年という記念すべきときにあたり、当研究所が産業界への貢献で評価されたことを大変喜んでいます。

レーザーの発明以来半世紀を越え、レーザー技術は先進的な産業や科学の発展を支える必要不可欠な基盤技術に成長しました。本格的な光の時代を迎え、当研究所の役割はますます重要になるものと認識しています。所員一同初心に返り、未知・未踏へ挑戦する心を忘れず、大学や産業界と連携しながら積極的に研究に取り組むとともに、成果の普及・情報発信に努め、レーザー産業の振興・発展に貢献したいと考えます。長年にわたり皆様方から頂いた暖かいご支援、ご協力に対し心より感謝申し上げますとともに、今後とも、引き続きご指導、ご鞭撻賜りますようお願い申し上げます。

レーザー計測

レーザー超音波計測研究年表



2003 H15	2004 H16	2005 H17	2006 H18	2007 H19	2008 H20	2009 H21	2010 H22	2011 H23	2012 H24	2013 H25	2014 H26	2015 H27	2016 H28	2017 H29	2018 H30	2019 H31	2020 H32	2021 H33	2022 H34

レーザー計測

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

O. Kotyaev, Y. Shimada, S. Kurahashi
Laser measurement team

1. Introduction

Laser-based inspection of civil structures is one of the main research directions of the Laser Measurement Team [1, 2]. Initially, the main research interest was attracted to the development of a laser system for inspection of transportation tunnels. The use of photorefractive laser interferometry has demonstrated very promising performance in this filed [3]. In 2011, our team opened another direction – inspection of highway bridges. It turned out that reliable inspection of bouncing structures like bridges with the use of conventional homodyne or photorefractive laser interferometry was hardly possible. In this case, interferometry is strongly affected by instability of interference pattern, which is caused by irregular bouncing of the inspected bridge, especially under heavy traffic conditions.

Possible decision of the instability problem is switching from homodyne interferometry to heterodyning. However, this decision is complicated by using frequency-shifted laser beams and necessity of demodulation of resulted signals.

Another way to get more stable signal is employing the idea of two-beam probing [4]. Two closely (about 5-10 cm) distanced probing points on a bouncing bridge span are moving almost synchronously. As a result, interference between two signals from the probing points should be more stable than in case of conventional single-probe-beam sensing. In this case, interferometry is homodyne, nether frequency shift no further demodulation is needed.

The present report describes 5-year progress in the development of laser-based inspection system with the use of the two-beam probing idea.

2. Preliminary tests

2.1. Verification of the basic idea

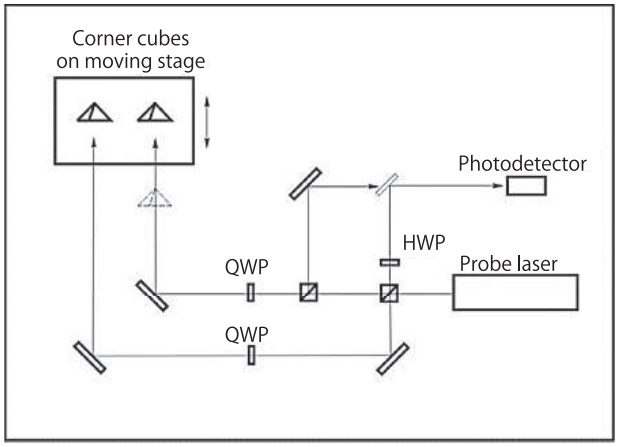


Fig. 1. Interferometer setup for verification of the two-beam probing idea. HWP and QWP are half- and quarter-wave plates. Dotted corner cube is on the interferometer table.

To verify the main idea, a simple interferometer with two corner cubes was used (Figure 1). The cubes were set on a moving stage simulating bridge span bouncing under heavy traffic. To compare with a conventional single-probe-beam interferometer, one of the cubes could be installed on the interferometer table and produce conventional reference beam.

In Figure 2, two detected signals (intensity fluctuation in moving interference pattern due to phase changing) obtained with the use of one- and two-probing interferometry are presented. In both cases, the moving stage was bouncing with 10-Hz frequency and 0.1-mm amplitude. Significant decrease of interference pattern instability is clearly visible. With one-beam probing, maximum rate of phase changing is more than 10 kHz. Time windows with comparatively low phase change rate are too short (less than 5 ms) for reliable inspection.

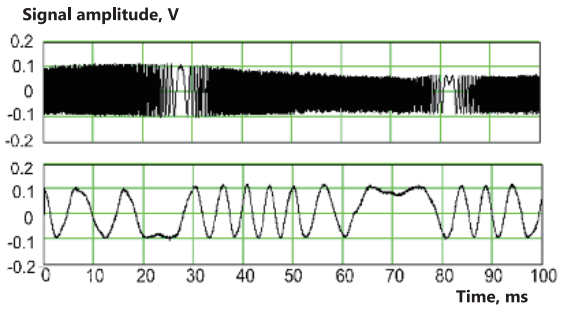


Fig.2. Phase change rate signals obtained with one-beam (top) and two-beam probing (bottom).

In contract, in two-beam probing interferometry, maximum phase change rate is about 200 Hz. It is not perfectly stable; however there exist long time windows (about 20 ms) with low phase change rate where reliable inspection is possible.

With these results, the basic idea of interference pattern stabilization via two-beam probing has been verified.

2.2. Detection of vibration – simulation of inspection procedure.

It should be reminded that laser-based inspection is based on laser initiation and laser detection of vibration in the inspected area. Defect recognition is based on big difference in vibration spectra obtained in healthy and defected cases. So, vibration detection is crucial.

To verify possibility of vibration detection, one of the corner cubes was replaced with a piezo-oscillator with metal membrane whose vibration simulated laser-initiated vibration over defect area. The second corner cube was replaced with a piece of metal. In these experiments, both probes were not reflected but scattered by rough surfaces. Resulting speckled signals were “cleaned” by a spatial filter.

In Figure 3, three records of detected piezo-oscillator vibration are demonstrated. Pre-set vibration frequency is 2 kHz.

Top: conventional one-probe interferometry; piezo-oscillator is not moving; 2-kHz vibration is clearly detected.

Middle: conventional one-probe interferometry; piezo-oscillator is moving; 2-kHz vibration is not detected.

Bottom: two-probe interferometry; piezo-oscillator is moving; despite of this 2-kHz vibration is clearly detected.

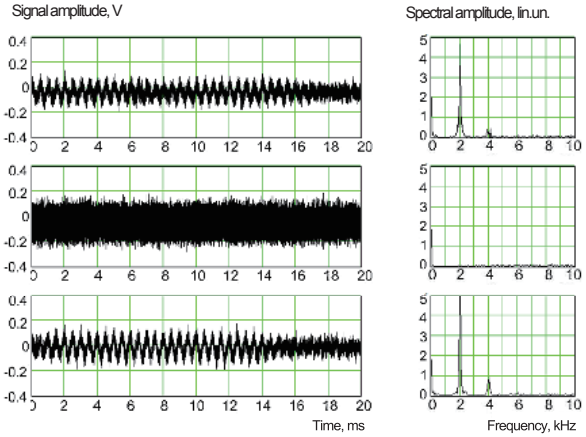


Fig.3. Detection of piezo-oscillator vibration (see text).

So, possibility of vibration detection under unstable conditions has been verified in these tests.

2.3. Field tests under real highway bridge – detection of vibration over defect area.

As the next step of the research, we delivered our two-beam probing interferometer under real highway bridge (Figure 4). The corner cubes were fixed on the bridge span.

Fig.4. First field tests under real highway bridge.

The bridge has known defects in metal/concrete interface where metal plate, usually fixed with epoxy on bridge span bottom, is detached from concrete. In these experiments, two corner cubes simulating probing points were used in various configurations with defect area; a

light hammer was used as a source of impact. Following figures present results of detection of moving interference pattern. The defect area boundary is indicated by chalk line with shading over defect situation. Red four-beam star indicates place and time of the hammer impact.

If two probe points are located in no-defect area, then no vibration will be initiated and detected. Interference pattern behavior is not changed (Figure 5). However, if at least one of the probe and impact point are located over defect, then significant change of interference pattern movement character will be observed after moment of impact (Figures 6 and 7).

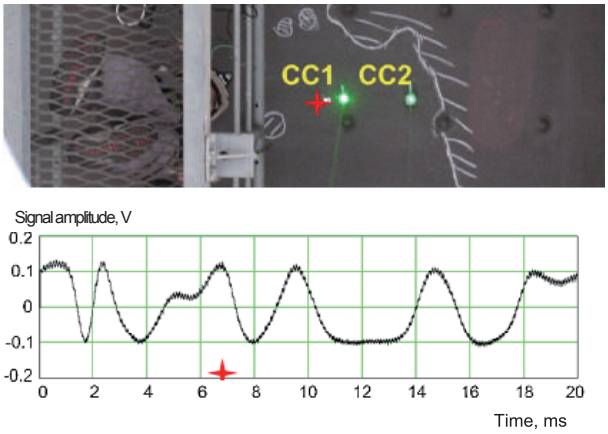


Fig.5. Both corner cubes are set in no-defect area.

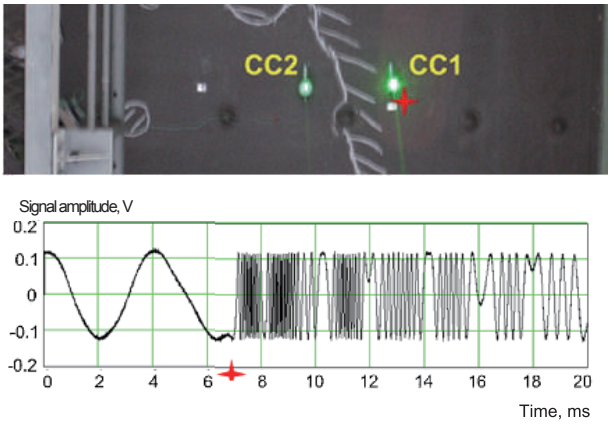


Fig.6. Corner cube CC1 and impact position area over defect area. Corner cube CC2 – in no-defect area.

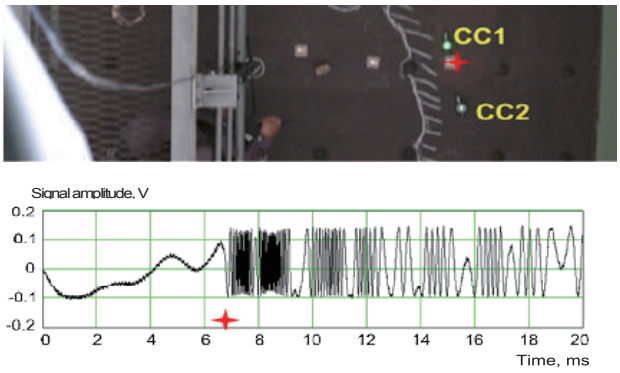


Fig.7. Both corner cubes are set over defect area.

This step of the research has finalized preliminary study. After that, we started the system prototype development.

3. Development of the system prototype

3.1. System layout.

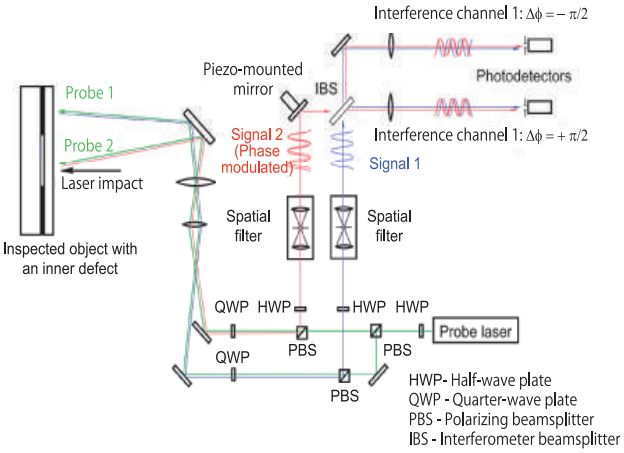


Fig.8. Optical setup of the system prototype. Detection unit.

In Figure 8, optical layout of the detection part is presented. CW Nd:YVO4-laser with output power up to 2 W is used as a probe/detection laser. Its radiation is split into two beams producing the Probes: Probe-1 will be used as a source of “reference beam”, Probe-2 is positioned close to impact point and is used as a source of the working signal. Scattered radiation of the probes is collected and two corresponding signals are formed. The signals interfere and interference result is detectied by two photodetectors. One of the interferometer mirrors will be mounted on piezo-actuator for stabilization of optimum phase shift (± π/2) in interference patterns.

Fig. 9. Laboratory setup. Interferometer and concrete sample.

Fig.10. Impact laser unit.

In Figure 9, laboratory system is shown. The two-beam probing interferometer is set on a vibration-proof table. A laboratory sample representing typical defect situation in highway bridges is located 7 meters away. Alltec CO2-laser (Figure 10) generating 5-J pulses (duration is 100 ns) is used as a source of laser impact. Actually, various lasers have been tested. However, only the CO2-laser produces effective but non-destructive impact. The other lasers (Ho:YAG and Na:YAG laser) damage protection paint, that is not acceptable.

Output beam of the CO2 laser has very poor divergence. So, in the first version of the system prototype, the impact beam path used an image relay to realize compact impact beam.

Impact beam and two probes are combined; and direction of all three beams is controlled by a specially designed scanner simultaneously.

3.2. Laboratory tests.

In laboratory, the system prototype was tested with the use of concrete/metal samples provided by KomaiHaltec company within A-step project. The samples are 450 × 450 × 150 mm concrete blocks with 5-mm thick steel plate fixed on concrete by epoxy (Figure 11). The samples have defects of metal/concrete interface. These defects are supposed to be detected by the laser-based system.

CO2 laser beam initiated vibration in the defect area and the two-beam probing system detected initiated vibration. Result of detection is shown in Figure 12.

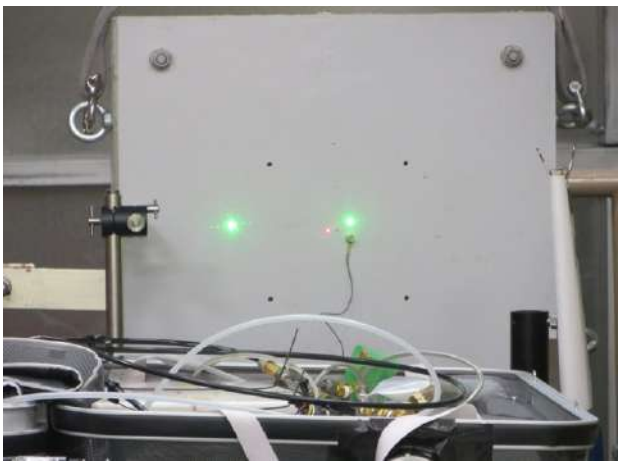


Fig. 11. Laboratory sample under inspection. Two green points are probe beams. Small red point is impact beam position. Four black points are corners of inner defect.

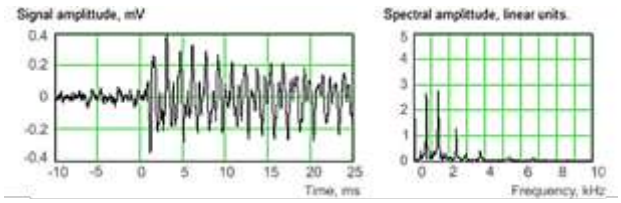


Fig. 12. Typical waveform and its spectrum detected in the laboratory sample center.

If positions of the probe and impact beams are changed over the inspected area, various modes of vibration can be initiated. Figure 13 presents result of moving probe and impact beams from the sample center to no-defect area.

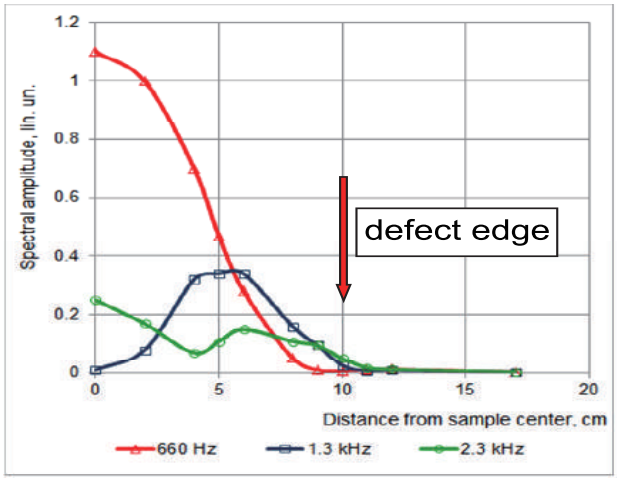


Fig.13. Initiation and detection of different modes over defect area in the laboratory sample.

The most important fact is that all the vibration modes are detected over defect area only. Beyond the defect edge, no vibration is detected. This fact provides criterion of defect recognition in the inspection procedure: presence of detectable vibration initiated by laser impact indicates

possible defect situation.

3.3. Field tests under real highway bridge.

The first version of the system prototype was delivered for field tests under real highway bridge [4]. It was the same bridge mentioned in chapter 2.3. Several small locations over the big defect area were used for the tests.

Following figures present various modes of vibration initiated and detected in the selected locations over the real bridge defect.

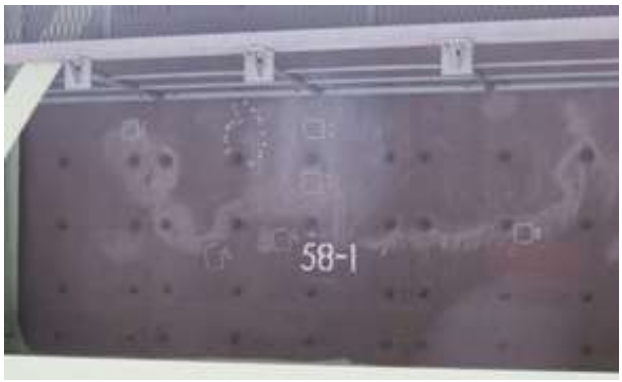


Fig. 14. Big defect area in the highway bridge span (within light-grey boundaries). Dotted chalk oval and small squares with numbers – chosen locations for the system tests.

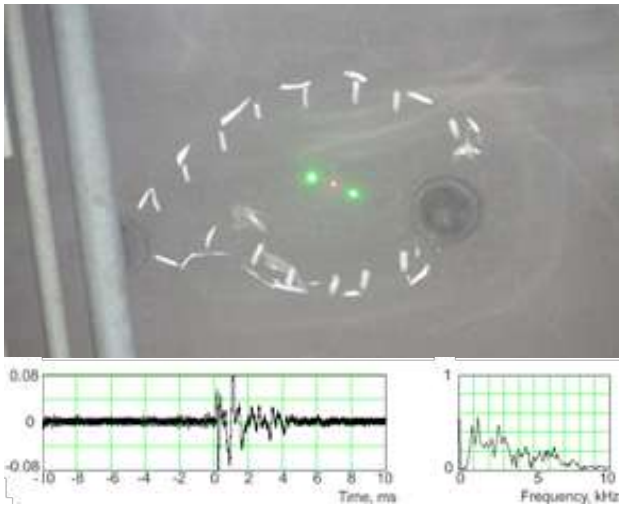


Fig.15-a) Vibration in the center of the dotted oval area.

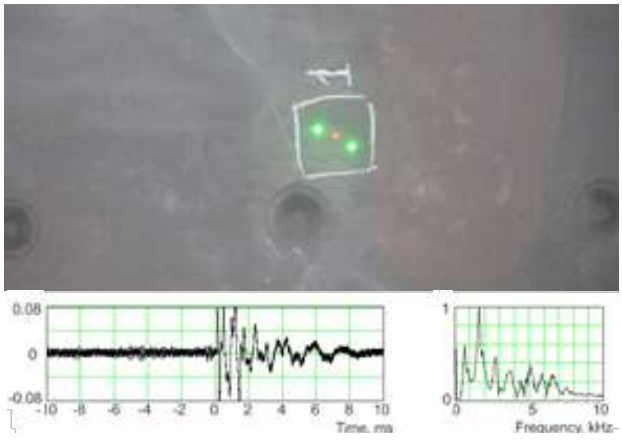


Fig.15-b) Vibration in chalk square number 1.

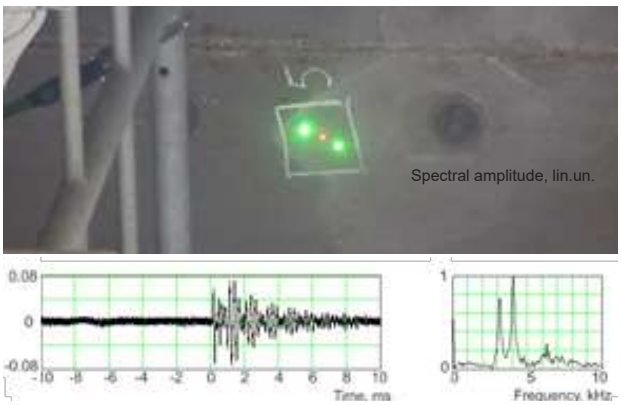


Fig.15-c) Vibration in chalk square number 5.

Fig.15 Laser initiated and detected vibration in the real highway bridge defect.

3.4. Algorithm of real-time data processing

Using the criterion of defect recognition, a special algorithm of real-time data processing has been developed and put into operation [5]. Th e algorithm software was designed by Tecall company.

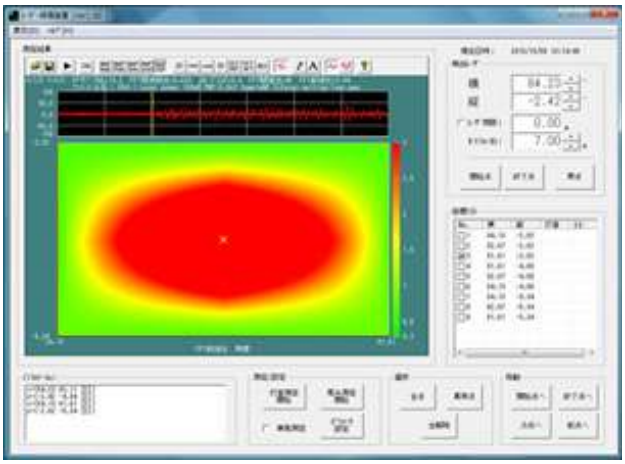


Fig.17-a) 2D map of scanned area.

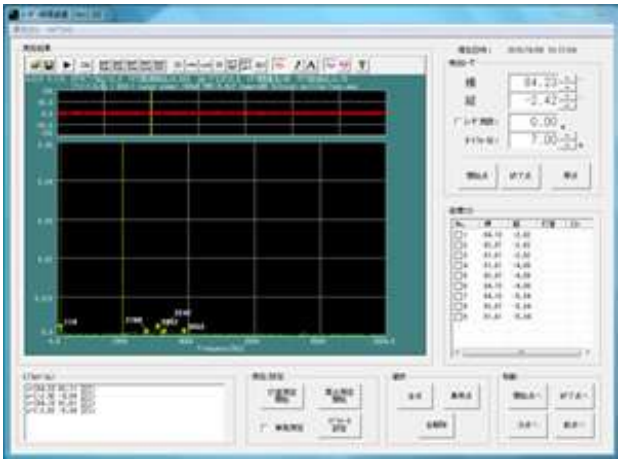


Fig.17-b) Spectrum of waveform of vibration in no-defect case.

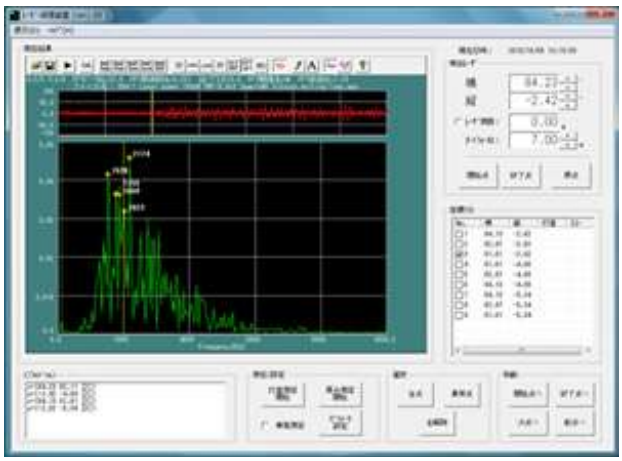


Fig.17-c) Spectrum of waveform of vibration over defect area.

Fig.17. The main window of the scan/processing algorithm.

With the use of the algorithm, it is possible to set the inspected area coordinates, start automatic scanning of the inspected area, and produce a 2-dimensional map of the inspected defect situation in real time with the scanning procedure. Figure 17 shows main windows of the algorithm software. This is the result of 9-point scanning (3 x 3 points, 10-cm steps) of the laboratory sample. Red area indicates defect situation. Green area is produced in no-defect case.

Spectra of waveforms before and after impact are analyzed. Comparison between resulting spectral amplitudes (both averaged and maximum) gives information of the defect presence. In Figure 17-b the signal obtained in no-defect area is displayed. The signal waveform amplitude is near noise level and corresponding spectral amplitude is practically zero. In contrast, Figure 17-c presents waveform and its spectrum of vibration initiated in the defect area. In this case, vibration signal is clearly seen after moment of impact (vertical yellow line), and its spectrum has high spectral amplitude.

Produced 2-D map and waveforms obtained in each map nod can be saved for further analysis.

4. System tests on KomaiHaltec site

4.1. Impact system modification

In the first version of the system prototype, the impact beam path was equipped with an image relay producing image of the CO2 laser output aperture to the inspected area surface. As it was mentioned in chapter 3.2, the CO2 laser used as an impact laser has poor quality of output beam. It is multimode, not homocentric and cannot be focused or collimated. Only imaging of output aperture can provide as compact as possible impact beam size. However, in this case, overall dimensions of the system become too big. Usual distance between laser-based inspection system and inspected bridge span is about 10 meters. That means, the shortest possible image relay (with 1:1 scale) will be 20 meters long. It is necessary to use imaging 5-meter-focus mirror or lens installed on the ground level in 10 meters after laser output. To realize all of this, the first mobile system prototype used two vehicles (Figure 18)

Fig.18. Two-carrier mobile system prototype.

This setup was not attractive for possible system users (like KomaiHaltec company). Fortunately, it was found that CO2 laser impact can be used without image relay with practically similar efficiency. So, the image relay was removed and all the system could be loaded on a single truck (Figure 19). The interferometer table is protected by a specially designed cover against sunlight, wind and acoustic noise.

Fig.19. One-carrier mobile system prototype.

4.2. Test with a bridge sample

The mobile system prototype was delivered to KomaiHaltec site for field tests. A huge piece of an old deconstructed bridge (Figure 20) was used for the experiments. In Figure 21, two-beam probing system is inspecting the bridge sample.

Fig.20. Bridge sample on the KomaiHaltec site.

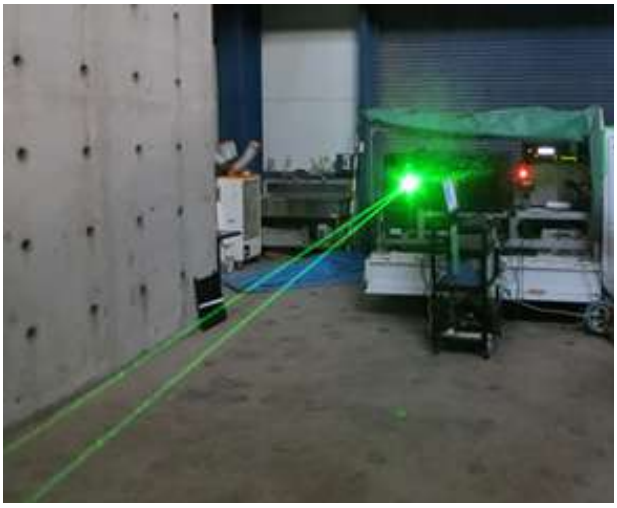


Fig.21. Two-beam probing system inspecting the bridge sample on the KomaiHaltec site.

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

In Figure 22, the bridge sample defect vibration with the longest life-time is presented. Life-time of laser initiated vibration here is about 6 ms. In the other defects, vibration life-time is even shorter. In contrast, vibration in the laboratory sample lives about 200 ms.

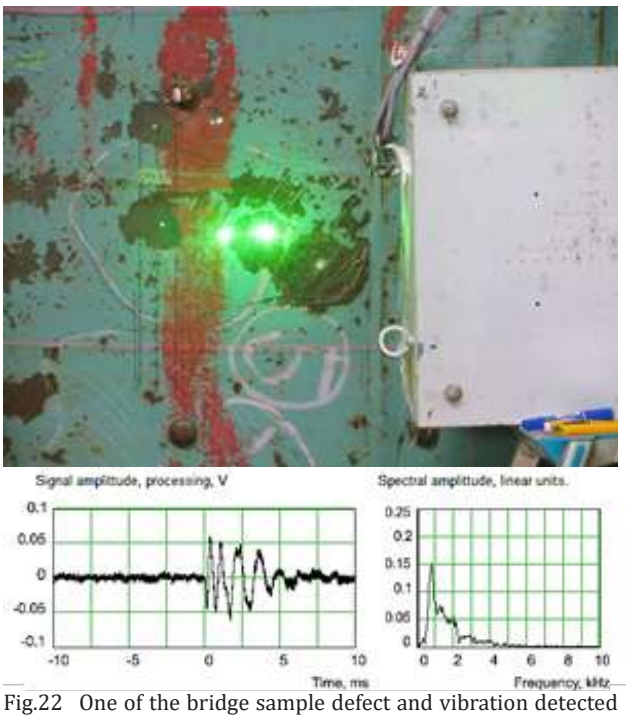


Fig.22 One of the bridge sample defect and vibration detected in this area.

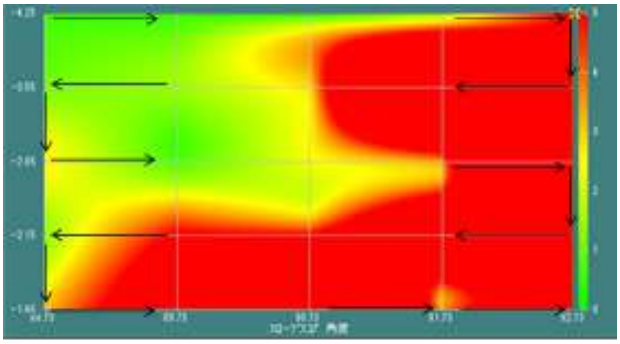


Fig.23. 2-D map of one of the bridge sample defects. Black arrows indicate direction of scanning.

Fig.24. The defect area and its 2-D map.

With the use of the real-time data processing algorithm it was possible to produce 2-dimenstional map of one of the defects (Figure 23). Overlapping the defect location by the generated map shows quite good correspondence between the defect and its map (Figure 24).

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

5. Brief conclusions.

During the last 5 years, the promising laser-based system for remote non-destructive inspection of civil structures was proposed, developed and tested. Its mobile prototype has been assembled and tested in the field conditions.The system uses two-beam probing homodyne interferometry. The technique has demonstrated promising results in inspection of bouncing structures like highway bridges. It may be a good alternative to much more complicated heterodyne interferometry.

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

References

1) O. Kotyaev, Y. Shimada. ILT Annual Progress Report, 2013.
2) O. Kotyaev, Y. Shimada, K. Hashimoto. Laser-Based Non-Destructive Detection of Inner Flaws in Concrete with the Use of Lamb Waves, Proceedings of the 9-th European Conference on Non-Destructive Testing. Berlin, Germany, 2006, p.23,
3) Y. Shimada, O. Kotyaev, N. Misaki et al. Development of Laset-based Remote Sensing System for Detecting Concrete Defects. Journal of the Japan Society for Non-destructive Inspection, vol. 61, 2012, p. 519 (in Japanese).
4) O. Kotyaev, Y. Shimada. ILT Annual Progress Report, 2014.
5) O. Kotyaev, Y. Shimada. ILT Annual Progress Report, 2016.

レーザー計測

レーザーを用いた
水中コンクリート構造物欠陥探査現地試験

倉橋慎理
レーザー技術総合研究所

1．はじめに

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すすめてきた。また、検査の対象をダムや水力発電所のサージタンク（流量の平準化を目的として備えられた貯槽類）、河川護岸など、常時滞水した状態で使用されるコンクリート構造物にまで拡げることをめざして研究開発を進め、屋外でも実験可能な装置を試作し、稼働中の実設備において試験を行った。

本稿では、水中コンクリートのレーザー探傷試験装置の開発と稼働中実設備における屋外試験について紹介する。

2．屋外試験

2.1　水中レーザー探傷装置の開発

室内実験では、振動励起用レーザーで水中のコンクリート表面を振動させ、振動計測用レーザーで水中の表面振動を検出することに成功しているが、屋外での実験を想定して、試作第 1 号機では水中コンクリート表面の励振にソレノイドコイルを利用することとした。装置は、振動励起用ソレノイドコイル（LE-73-11 耐水ソレノイドロック、タキゲン製造株式会社）、振動検出用レーザー（PDV-100 ポータブルデジタル振動計、Polytec 社）、ならびに検査面の観測、姿勢の確認用の CCD カメラと、これらを保持するためのアルミフレームからなっている。振動検出用レーザー、検査面観測用 CCD カメラは防水・防圧チャンバー内に格納した。ソレノイドコイルでガイドされるピストンと振動計測用レーザー光軸が検査面にほぼ垂直になるように、検査面との接触箇所にはガイドローラーを取り付けた。シャックルに通したワイヤーを用いて電動ホイストで装置を吊るし、水中での上昇・下降を行う。構築した水中レーザー探傷装置を図 1 に示す。

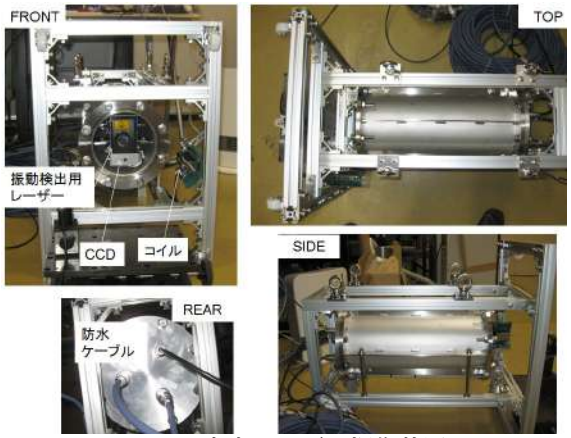


図 1　水中レーザー探傷装置

まず装置の水密試験、動作確認試験を行った。図 2 に試験の様子を示す。試験用に購入した水槽は、底面がアーチ状に盛り上がっていたり、側面が角度を持っていたりでコンクリートサンプルの設置に手間取った。また、浮力の影響が思った以上に大きく、打撃でサンプルがずれるなど、大気中では見られなかった現象が次々起こった。水中での試験の難しさを切実に感じた。

2.2　実設備屋外試験 1 日目

平成 27 年 3 月 2 日、寒さの残る中、関西電力が保有する山中の水槽において、構築した水中レーザー探傷装置を用いてコンクリート壁の健全性評価試験を行った。水槽は水力発電施設の一部であるため、発電設備との高低差が 100m 程度あって、傾斜のきつい高所に建設されている（図 3）。このような条件の中、実験装置等の運搬は人力で行われた（図 4）。搬入には専門家の力をお借りした。

図 2　水中レーザー探傷装置動作確認試験の様子

実験初日の午前中は物資の運搬と、電動ホイストを取り付けるための櫓の敷設で終了し、昼食を挟み、午後から計測試験を行った。電動ホイストに装置を取り付け、いざ水中へ（図 5）。コンクリート壁は底に行くほど厚くなるテーパー状になっており、ホイストでまっすぐ下ろしただけでは、当然装置はコンクリート壁と正対しない。スラスターによる姿勢制御など、ハイテクノロジーを駆使した計測装置を構築したいものではあるが、諸般の事情により姿勢制御は人力で行うこととなった（図 6）。装置にロープを結び外壁に立った人が引っ張る。単純だが、効果は大きかった。

計測を始めると、レーザー振動計からの出力信号にノイズが多く、振動の計測が困難であった。検査面を撮影している CCD カメラからの取得画像には、コンクリート表面付近に藻のようなものがふわふわと漂う様子が写っており、それによる散乱光がノイズの原因ではないかと予測された。

図 3 水槽施設の外観図

図 4 試験用物資運搬の様子

図 5　潜水する装置の様子

図 6 装置の姿勢制御を行う研究員ら

日も沈みかけ、頭の半分以上が「寒い」としか考えられなくなったため、1 日目の実験は終了となった。翌日対策を施すことを確認、内容はシンプルに “ 壁面をきれいにしよう ” だ。

図 7 コンクリート壁面の様子．赤く見えるのが
レーザー振動計の照射位置

2.3　実設備屋外試験 2 日目

二日目にして最終日である。昨日の検討を受け、用意してもらったデッキブラシを計測装置にくくりつけた、水中レーザー探傷装置改を用いて壁面のクリーニングを行った（図 8）。CCD 画像から受ける印象以上に壁面は汚れていたようで（図 9）、検査面の状態が計測に与える影響も考慮しておく必要があると思い知らされた。

苦労の甲斐もあり、水中において、抜水時に予め打音検査により確認された健全部と欠陥部（浮き）の判定を行うことが出来た（弊所平成 26 年度年間報告書にて詳細を報告）。

午前中には計測を終えることができ、午後には設備を撤収し、下山することが出来た。

図 8 デッキブラシを装着した装置．装置から飛び出た白い棒がブラシの柄．

図 9 クリーニング後のコンクリート壁面．壁面が露出し、レーザーの散乱が抑えられている．

3．おわりに

入所後初めての野外実験だったので、思い入れの強い屋外試験となった。九月の終わりごろに話が回ってきて、三月頭には装置を持って外で試験をするという話を聞いた当初は、いえ今でも、何を言ってるんだろうという気持ちであったが、屋外試験を実施してとりあえず結果を出す所まで出来たことは自分の中で大きい経験だったと思う。ここで得た経験をもとに、少しでも実現場に近い技術開発を行えるよう心掛けていきたい。

謝辞

寒い中実験の補助をしていただいたレーザー技術推進センター岸田知門氏、弊所総務部藤本勲氏に感謝いたします。本研究の遂行にご尽力いただき、また、その後の方針を示していただいた関西電力株式会社大坪祐介氏、安藤明宏氏、島原直樹氏に深く感謝申し上げます。本研究に関わり頂いた全ての方に謝意を示します。

図 10　左から著者、藤本、島田、岸田、本越

レーザー計測

レーザーリモートセンシングの研究展開

染川智弘
レーザープロセス研究チーム

1．白色光ライダー

白色光ライダーの開発は、千葉大の久世研究室との共同研究として、白色光長光路差分吸収分光法による大気中 CO_2 の計測[1]や、水蒸気、酸素の差分吸収ライダー（DIAL）の開発[2]に発展してきた。千葉大学環境リモートセンシング研究センター共同利用研究費で H22 年度から現在まで旅費等の支援をいただいている。その共同研究の中で、久世教授から「白色光ライダーに関してセミナーを開いてもらいたい」との依頼を受けて、千葉大で IHI の方にセミナーを行う機会があった。弊所の白色光ライダーシステムや、学生のころに見学したヨーロッパの TW レーザーを用いた環境計測プロジェクト「Teramobile」の紹介を行った。Teramobile は、ドイツのミュンヘンで開催された CLEO Europe に参加した際、Teramobile グループの一つであるベルリン自由大学に見学を依頼した。見学話が進んだ最後のころに、「ところで、今、Teramobile はベルリンにはなくて、リヨンだよ」とのこと。何のためにこれまでのやり取りがあったのだと憤慨したが、リヨンとも連絡が取れ、無事に見学をさせてもらえた。ただ、「励起レーザーが壊れているために、今は動かないよ」とのこと…。弊所のシステムもシードのフェムト秒レーザー、励起の YAG レーザー 2 台のどれか 1 台でも調子が悪いと TW レーザーは動かなくなる。TW レーザーシステムはあまり環境計測に向かないと紹介したところ、最後の質疑応答で、「実は日本版の Teramobile を作っています」との報告を受けた。今思えば、Teramobile は使えないと少々失礼なプレゼンをしてしまったが、千葉大・IHI との日本版 Teramobile を活躍させるための共同研究がスタートした。リボフラビンなどの生物由来タンパク質を噴霧して、多光子吸収計測や、レーザー誘起ブレークダウン分光法（LIBS）による遠隔識別手法の開発を実施した[3]。年に 1 ～ 2 回の 1 週間、観測機器を関東からトラックで輸送してきて関西にて実験をする定例行事となった。H23 ～ H26 年の 4 年間にわたり新しい白色光ライダーの応用研究が実施でき、ご尽力いただいた皆様に感謝したい。

白色光ライダーのシードレーザーであったフェムト秒レーザーが H28 年度に新しくなり、今後は容易に TW レーザーが起動できそうである。白色光ライダーとしては DIAL 法の開発を進めるとともに、リモート LIBS の研究を実施したいと考えている。

2．海洋計測に向けて

日本の領海・排他的経済水域は国土面積に比べて 12 倍も広く、世界第 6 位の面積であり、有益な海底開発が検討されている。海底開発として大きくメディアでも取り上げられているのが、海底熱水鉱床等の鉱物資源やメタンハイドレート等のエネルギー資源である。さらに、温室効果ガスである CO_2 を分離・回収して海底下に貯留する CCS（Carbon dioxide Capture and Storage）も北海道の苫小牧沖にて実証試験がスタートしている。このような海底開発における資源探査や開発に伴う環境影響評価をレーザーで効率よく実施できないかということで、水中のガスのラマン信号を指標とした、海中マッピング技術の開発を行っている。

本研究は関西電力の支援を受けてスタートした。火力発電所を持つ電力会社にとって CCS 事業実施時の環境影響評価は必須検討項目であるため、まず水中の CO_2 ガスをターゲットとして研究を開始した。研究開始当初は、CO_2 ガスを水に定量的に溶存させるチャンバーもなく、市販の炭酸水を計測した。PET 容器にレーザーを打ちこむのは破損などが起こり危険に思われたので、ガラス瓶に入った炭酸水を複数本購入したのを覚えている。炭酸水は空けると炭酸濃度が変化するので、栓を開けていないものや、開けて放置したものなど、今思えば大変雑な実験ではあったが、その実験により研究が発展していったと思うと感慨深い。水の透過が良い波長 532 nm のレーザーを炭酸水に照射し、水に溶存している CO_2 のラマン散乱を計測し、その瓶を 20 m 離れた位置に設置することで、リモート識別にも成功した[4]。その後は、科研費若手 B の支援を受けて、CO_2 気泡の測定や、海水の影響評価を実施し、基礎的な検討を終えた[5-7]。

図 1　海上ラマンライダーシステム

現在は科研費若手 A の支援を受けて、実際に竹富島海底温泉で海上ライダー観測を行うべく準備を行っている。竹富島海底温泉は、水深 20 m の位置からメタンガスを含む気泡の湧き出しがあり、海上からも気泡が確認できる。その海中から湧き出してくるメタン気泡にレーザーを照射することで海中モニタリングの実施可能性を検討している [8,9]。図 1 に現在開発している海上ラマンライダーシステムを示す。漁船にシステムを載せ、望遠鏡部が船外に出る配置で、レーザー光を下向きに海水中へ送出する。システムの中には計測機器、電源等が密閉容器に収められている。竹富島での海上観測では、相談に乗っていただいた環境総合テクノスの播本様、福原様、渡辺様に感謝したい。また、石垣島での観測コーディネートにご尽力いただいた屋良部様にも感謝したい。H29 年度には皆様のご尽力のおかげで、実際に竹富島海底温泉にて海上ラマンライダー試験を実施する予定である。

3．変圧器の健康診断

リモートセンシングではないが、変圧器の健康診断手法の開発も紹介したい。関西の変圧器のほとんどを管理しているかんでんエンジニアリングから、変圧器の診断をレーザーで簡易にできないかと相談を受けた。変圧器は、内部のコイル等が絶縁油で満たされた容器に入っている「油入り変圧器」が一般的に使用されている。油入り変圧器が加熱・放電等の異常を起こした際に、この絶縁油が分解され特有のガス成分が発生する。そのため、容器内の絶縁油を採取して、油に溶存しているガス成分を調べることで異常診断が行われている。油に溶存しているガス成分の検出は、2 章で紹介した水に溶存しているガス成分と同じ検出原理で評価できそうである。どちらかというと基礎科学であった水溶存ラマンの研究が産業にも応用できるとのことで、筆者としては産業界にアピールしやすい研究がスタートした。

研究当初は絶縁油にアセチレンガスを溶かしたサンプルを持参してもらっていたのだが、アセチレンのラマン信号がなかなか検出できない。結局は微量成分なので検出が難しかっただけなのだが、「サンプルにアセチレンが溶けていないのでは？」と何度も作成し直していただいたことを覚えている。密閉容器の蓋が内圧ではずれるくらい、油にアセチレンを溶存してもらったこともあった。油に溶存しているアセチレンはラマン法を用いることで定量評価が可能であることがわかり、従来の複雑な前処理を必要とする手法よりも優位性を示せた [10]。

油入り変圧器の異常には、油が分解した際のアセチレン等のガスだけでなく、コイルに巻かれた絶縁紙が分解する場合の 2 パターンがある。紙では、主成分のセルロースが分解して「フルフラール」という物質が生じる。

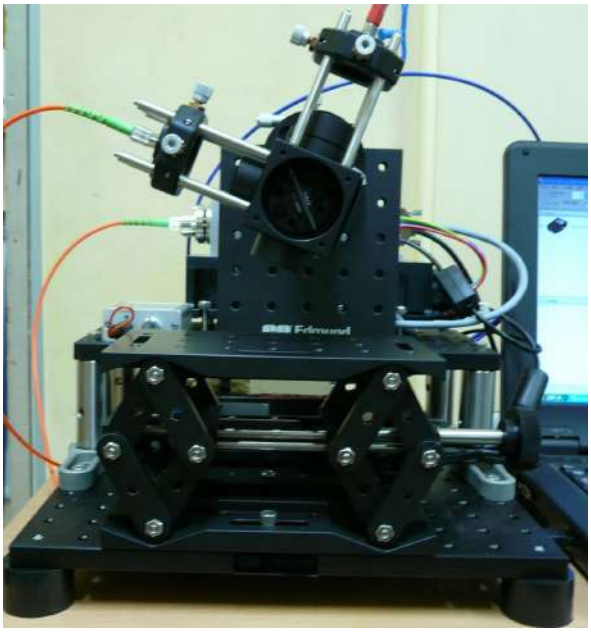


図 2　現場携帯型油種識別測定装置

これもラマン法で検出が可能であり [11]、本手法は油・紙由来の異常の診断も可能であった。さらに、紙由来の

異常診断溶存ガスである CO の検出も可能であり [12]、1台のシステムで複数の診断ガスを同時に検出できるラマン法の有効性も示すことができた。

油にレーザーを照射すると、アセチレンのような微量成分だけでなく、油自身の構造に由来するラマン信号も検出される。鉱物油、植物油など、油の種類によりラマンスペクトルの形状も異なるので、油種の識別も可能である。変圧器の配管の破損等の外部異常が生じた際の、絶縁油の漏油検出につながるのではないかと油種識別の研究もスタートした [13]。

変圧器の漏油の際は、生活環境にある他の油との識別が必要になる。さらに、現場での識別が望ましいとのことで小型・可搬型のシステムを作製した。図 2 に現場携帯型油種識別測定装置の写真を示す。30 cm 四方の大きさであり、光学部品の市販品を用いたため 14 kg と少し重いが、十分に一人で持ち運べる可搬型のシステムである。本システムは鉱物系絶縁油と植物系絶縁油や、鉱物系潤滑油、灯油等との識別が可能であり、さらに、水に浮かんだ油や土壌にしみ込んだ油の識別手法の検討も行った。異常が発生すれば、このシステムを現場に持って行き、測定しようと待っていたのだが、こういうときは異常が起きないものである。現在も異常に備えて待機中である。

参考文献

1) T. Somekawa, N. Manago, H. Kuze, and M. Fujita: Opt. Lett., 36, 4782-4784, 2011.
2) T. Somekwa, N. Manago, H. Kuze, and M. Fujita: Proc. of SPIE, 10006, 1000605, 2014.
3) J. Izawa, T. Yokozawa, T. Kurata, A. Yoshida, T. Somekawa, S. Eto, N. Manago, H. Horisawa, S. Yamaguchi, T. Fujii, and H. Kuze: Proc. of SPIE, 9253, 92530C-1, 2014.
4) T. Somekawa, A. Tani, and M. Fujita: Appl. Phys. Express, 4, 112401, 2011.
5) T. Somekawa, and M. Fujita: Proc. of ILRC26, S10-06, 2012.
6) T. Somekawa, T. Takeuchi, C. Yamanaka, and M. Fujita: Proc. of SPIE, 9240, 92400J, 2014.
7) T. Somekawa and M. Fujtia: EPJ Web of Conference, 119, 25017, 2016
8) T. Somekawa, M. Fujita: to be published in Proc. ILRC28, 2017.
9) T. Somekawa, T. Kitamura, and M. Fujita: to be published in Proc. ICO-24, 2017.
10) T. Somekawa, M. Kasaoka, F. Kawachi, Y. Nagano, M. Fujita, and Y. Izawa: Opt. Lett., 38, 1086-1088, 2013.
11) T. Somekawa, M. Fujita, Y. Izawa, M. Kasaoka, and Y. Nagano: IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 22, 229-231, 2014.
12) T. Somekawa, M. Kasaoka, Y. Nagano, M. Fujita, and Y. Izawa: Springer Proceedings in Physics, 177, 31-38, 2016.
13) 染川智弘、笠岡誠、中井政明、藤田雅之、井澤靖和 : レーザー学会、44 巻、pp272-275、2016 年 .

レーザー計測

テラヘルツ波の非破壊検査応用

李　大治[1]、本越伸二[2]
[1] レーザーエネルギー研究チーム
[2] レーザー技術開発室

1．はじめに

テラヘルツ波は周波数でいうと 0.1 ～ 10 THz、波長に換算すると 3 mm ～ 30 μ m 程度で、電波と可視光・赤外光の間に当たる領域の電磁波であり (図 1)、光と電波の両方の長所を兼ね備えている。プラスチックや紙等に対する透過率が高く、生体に害を与えないという特長もあり、材料物性を調べるのに有用である。しかし、光

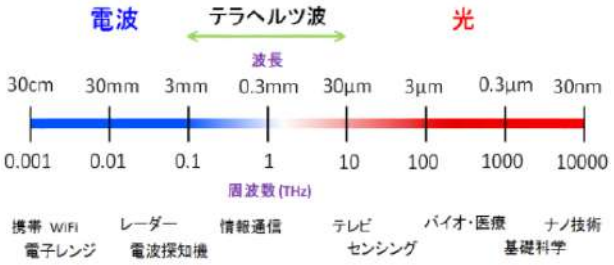


図 1 電磁波周波数領域と応用技術

源や検出器に適切なものがなかったため、電磁波利用における谷間とも呼ばれてきた。近年、様々なテラヘルツ波の発生方法が提案されている。大型のシンクロトロン放射設備により、数百 W のテラヘルツ波の発生に成功しているし、研究用としては、短パルスレーザー装置と光伝導アンテナを用いた装置が広く使用されるようになっている。また、より小型のものとして、量子カスケード半導体素子や、非線形光学結晶を用いた差周波テラヘルツ波発生技術などが、積極的に研究されている。テラヘルツ光源開発と同時に、応用研究も活発に進められ、様々な分野への応用が開拓されている。

我々は、関西電力からの受託研究をきっかけとして、電力分野で幅広く適用できる可能性があるテラヘルツ波を利用した設備診断技術に着目し、種々の検討を進めてきた。ここではこれまでに検討してきた研究例[1-7]を紹介する。阪大レーザー研の中嶋誠准教授、高野恵介助教、加藤康作研究員、福井大学の北原英明研究員に、実験装置の構築、計測精度の改善、データ解析技術などでご教示、ご協力を頂きながら研究を進めている。

2．テラヘルツ波透過測定系

実験装置としてテラヘルツ時間領域分光法を基にした図 2 に示すような計測装置を構築した。光源にはフェムト秒レーザーを用い、光伝導アンテナを利用してテラヘルツ波の発生と検出を行っている。チタンサファイアレーザー装置からのレーザー光は、半透鏡により励起光とプローブ光に分けられる。励起光を放射用光伝導アンテナに集光する。アンテナへのバイアス電圧を印加することにより、テラヘルツ帯の電磁波を発生させる。放射されたテラヘルツ波は、放物面鏡により、平行光に変換して検出系に伝送する。集光レンズ 2 枚を設置してビームスポットを作り、ビームスポットにサンプルホルダーを設置した。サンプルホルダーは 2 軸の移動ステージにより走査できるようになっている。一方、プローブ光は時間遅延ラインを通過して検出用光伝導アンテナのギャップ上に集光される。サンプルを透過したテラヘルツ波も検出用光伝導アンテナに集光され、プローブ光と

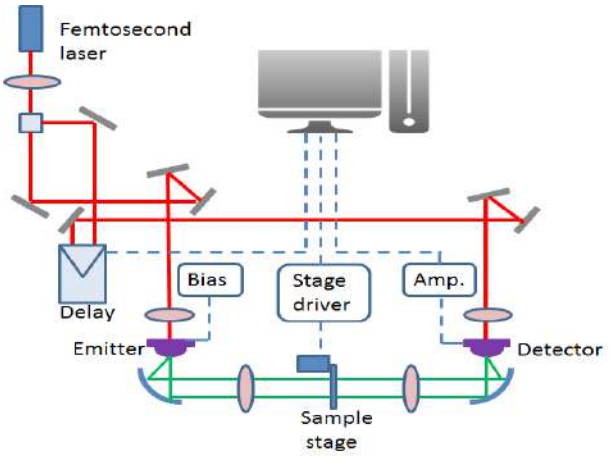


図 2　テラヘルツ波発生・計測装置概念図

時間的に一致した時刻のテラヘルツ波電場に応じた微弱電流を発生する。プローブ光の遅延時間を変えながら電流を検出することにより、テラヘルツ波電場の時間依存データを得る。開発したデータ収集・処理・制御用ソフトを用いて、テラヘルツ波電場の時間波形を自動的に解析し、その波形をフーリエ変換することにより周波数ス

ペクトルを得る。サンプル移動ステージを走査することにより、サンプル内部の欠陥や劣化等をイメージ化することが可能となる。図 3 に実験装置のテラヘルツ波の発生部、検出部、集光レンズ、サンプルステージ、時間遅延ライン、イメージングソフトの画面などを示す。

図 3 実験装置写真

電力設備の電気絶縁には、固体、気体、液体など多くの材料が使用されている。本研究では、代表的な 5 種類の固体材料 (シリコーンゴム、FRP、PVC、ポリエチレン、エポキシ) についてテラヘルツ波透過特性を評価した。測定した透過率スペクトルを図 4 に示す。ポリエチレンの透過率は全帯域で 1 に近いが、FRP の透過性は周

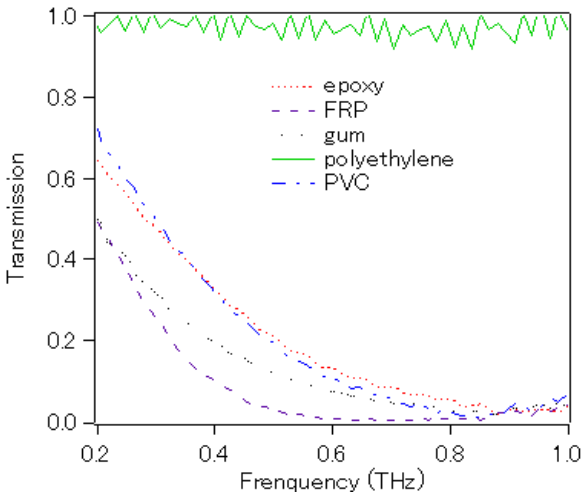


図 4 絶縁材料透過特性評価

波数に敏感で、0.2 THz で 0.5 の透過率が周波数とともに急激に減少する。その他の材料も FRP によく似た特性を示した。材料の透過性を把握することにより、個々の材料に対して適切な測定周波数を選ぶことが診断応用には重要である。模擬欠陥のあるサンプルを用いて透過 2 次元像を取得した。金属針を挿入したエポキシと内部に針の挿入痕を付けたポリエチレンとをサンプルに用いた。図 5(a) はエポキシサンプルの走査図である。金属の針はテラヘルツ波を透過しないため、きれいな影が見えている。図 5(b) はポリエチレンサンプルの走査図である。屈折散乱等による透過率の違いから針の挿入痕が確認できる。

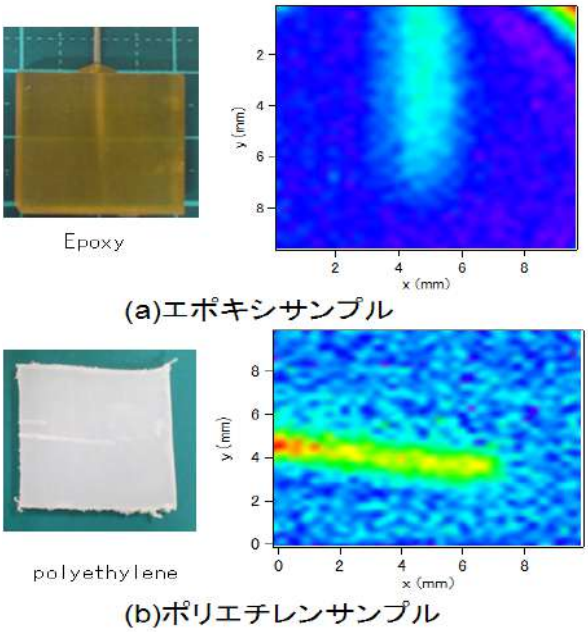


図 5 イメージングにより欠陥検出

3．テラヘルツ波反射測定系

電力ケーブルの欠陥検査をめざして、図 6 に示すような反射光を利用する測定系を構築した。テラヘルツ波を放物面鏡により平行波にした後、レンズ (焦点距離 362 mm) と 2 枚のミラーによって、入射角 8°でサンプルの表面に集光した。サンプルから反射されたテラヘルツ波をミラーとレンズ (焦点距離 200 mm) により検出用光伝導アンテナに伝送した。

電力用ケーブルには、架設場所、送電電力量などに応じて多くの種類が存在する。中でも、導線の周りをポリエチレン、架橋ポリエチレン樹脂で絶縁した OE、OC ケーブルや、ポリエチレン層の外側を塩化ビニルで被覆し耐環境性を向上させた CV ケーブルが広く利用されている。これら絶縁層は、温度により膨張収縮を繰り返し吸湿する。その結果、ポリエチレン内で水トリーの進展、絶縁破壊などの影響が現れる恐れがある。我々は、銅線と絶縁層の間に水が浸透した場合を想定し、模擬ケーブル浸水サンプルを作り、テラヘルツ波による検出を行った。図 7 に製作した模擬サンプルを示す。厚さ 0.4 mm のアルミニウム平板に直径 8 mm の穴を 3 つ開けた。アルミニウム板の前面に厚さ 2 mm の塩化ビニル板を密着し、後面の 2 つの開口部をテープで封じ、そのう

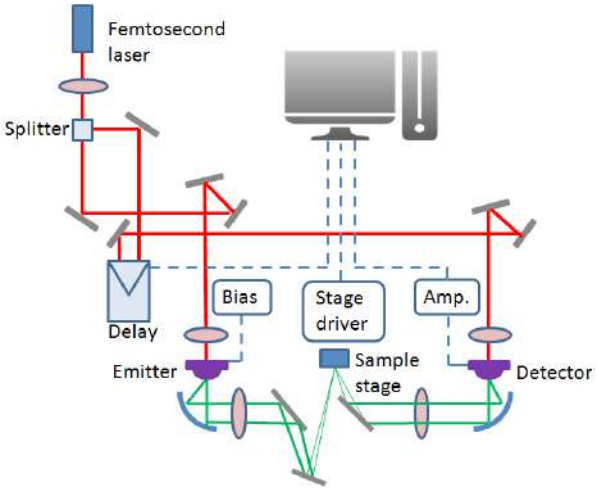


図 6　THz 発生・計測装置概念図

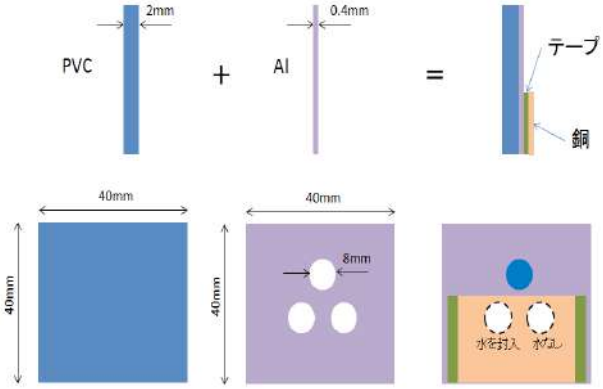


図 7　ケーブル被覆模擬サンプル概念図

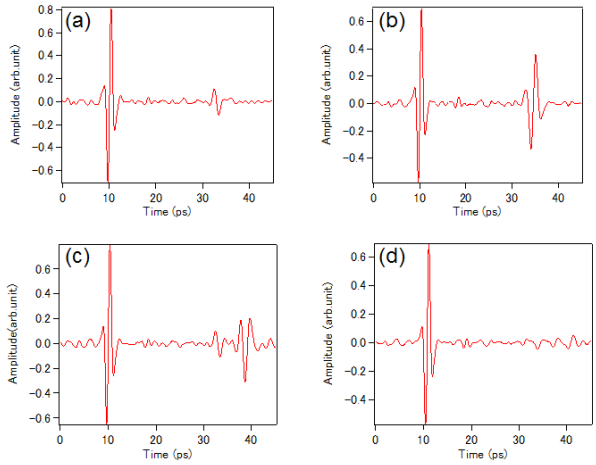


図 8　サンプルに反射された時間信号

ことも分かる。塩化ビニル板とアルミニウム板が密着した図 8(b) では、塩化ビニル板裏面の信号とアルミニウム表面の強い反射が重なっている。図 8(c) は塩化ビニル板と銅板との間に空気層を含む模擬剥離欠陥部の信号で、塩化ビニル板の裏面反射（33 ps 付近）と銅板の表面反射（38 ps 付近）が完全に分離して確認できる。更に、水を封入した模擬欠陥部では、図 8(d) に示すように、銅板表面からの反射は水に吸収されるため、図 8(c) で確認できた 38 ps 付近の信号は確認できなかった。また、33 ps 付近に存在した塩化ビニル裏面からの反射も減少した。これは、塩化ビニルと水との屈折率が近いために反射が減少したことによるものと考えられる。

4．テラヘルツ波反射測定系改良

空間分解能を改善するために、テラヘルツ波集光用レンズを焦点距離の短いものに代え、光学系を図 9 に示すように改良した。放物面鏡の後に、テラヘルツ帯半透過鏡)、レンズ (焦点距離 30 mm) をおき、サンプルの表面にテラヘルツ波を集光した。サンプルから反射したテラヘルツ波はテラヘルツ帯半透過鏡を通過し、放物面鏡により検出用光伝導アンテナに入射させた。

近年、外被材にシリコーンゴムを用いたポリマー碍子を適用した電力機器の使用が開始されているが、有機材からなるポリマー碍子の外部絶縁性能の経年変化についてはまだ十分な情報が得られていない。特に、ポリマーブッシングの FRP コアとシリコーンゴム外皮の剥離や水分の侵入については、外観の調査では確認できないことから、非破壊で内部の剥離等を検出する手法の開発が

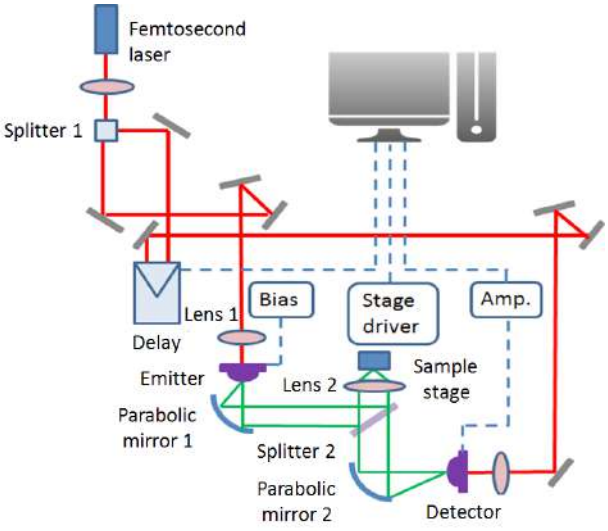


図 9　テラヘルツ波発生・計測装置概念図

望まれている。我々は、テラヘルツ波によるポリマー碍子の内部欠陥検出を想定し、模擬欠陥検出の測定を行った。シリコーンゴムと FRP の間に剥離や水の浸透した場合を想定し、模擬サンプルを作り、テラヘルツ波による検出を行った。図 10 に製作した模擬サンプルを示す。厚さ約 1 mm のアルミニウム平板に直径 10 mm の穴を一つ空けた。アルミニウム板の前面に厚さ約 4 mm のシリコーンゴム板を密着し、後面の開口部を FRP 樹脂で封じ、剥離欠陥を模擬した。また、穴の中に水を封

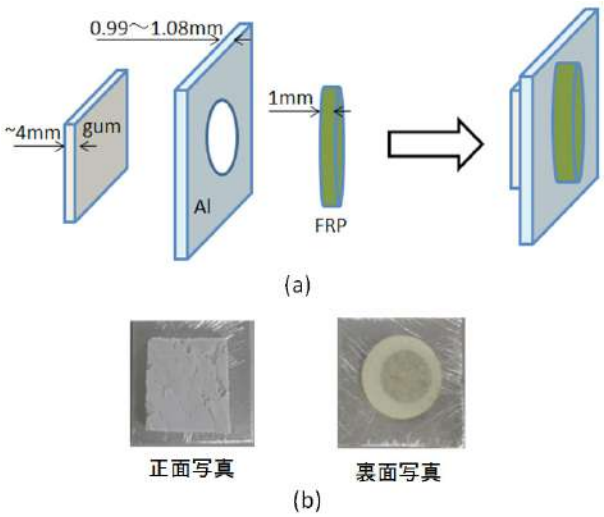


図 10 ポリマー碍管剥離、浸水（水を封入した場合）欠陥模擬サンプル。
(a) サンプル構造
(b) サンプル写真

入することにより、浸水欠陥を模擬した。図 10 (b) は、前後を貼り合わせた模擬サンプルの外観である。図 11 (a) は FRP 樹脂で封じない場合の反射時間波形の結果であり、シリコーンゴム板の表面（5 ps 付近）と裏面（50 ps 付近）からの反射ピークが見られる。裏面からの信

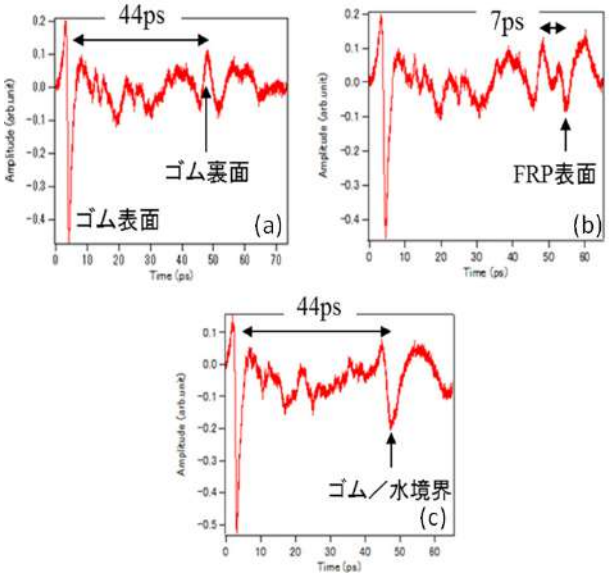


図 11 ポリマー碍管剥離模擬サンプルの反射波時間波形。(a) シリコーンゴムのみ、(b) 1mm の隙間（大気）、(c) 隙間 1mm に水を封じた場合

号はシリコーンゴムの吸収により減少することも確認できた。また、2 つの反射波の時間差より、シリコーンゴムの厚さが 4.1 mm であることが算出できた（シリコーンゴムの屈折率を 1.61 とした）。次に、FRP 樹脂で封じ 1 mm の隙間（空気）がある場合の結果を図 11(b) に示す。シリコーンゴムの裏面反射（48 ps 付近）と FRP 樹脂の表面反射（55 ps 付近）が完全に分離して確認できる。2 つピークの時間差より 1.0 mm の隙間であることが求まり、アルミニウム板に空けた穴の肉厚約 1 mm と一致することから反射波ピークの時間差よる隙間の算出が正しいことがわかる。さらに、隙間に水を封入した模擬欠陥では、図 11 (c) に示すように、シリコーンゴムと水の境界面からの反射信号の位相が反転することが確認できた。また、水と FRP 樹脂の境界面からの反射信号は、テラヘルツ波が水に吸収されるため現れない。以上の結果より、シリコーンゴムと FRP 樹脂が完全に密着している場合に比べて、隙間がある場合、水が浸入した場合では、反射波信号に違いがあり、この信号を確認することにより欠陥検出が可能である。

5．低周波数帯テラヘルツ波反射測定系

これまでの研究結果より、テラヘルツ波の反射波とノイズを明確に判別するためには、低周波数帯テラヘルツ波の利用が有効であることがわかった。そのため、我々は低周波数領域に特化した光伝導アンテナを採用した実験装置を構築した。テラヘルツ波の発生･検出試験を行い、入れ替えた発生器のテラヘルツ波の電場波形と周波数の特性を評価した。発生したテラヘルツ波の波形を図 12 に示した。比較のために、従来の発生器により発生されたテラヘルツ波の波形も同図に示した。発生周波数帯域が低周波数域に限定されるために、図の 10 ps の時間

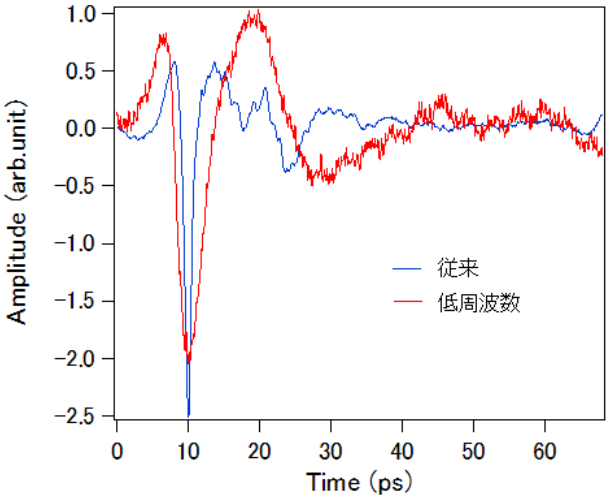


図 12 発生したテラヘルツ波の電場波形

位置にある信号の半値全幅は、従来の発生器では 0.7 ps であったのに対して、低周波数発生器では 3.6 ps に広がった。

実際のポリマー碍管は図 13(a) に示すように約 4 mm 厚みのシリコーンゴム外皮と FRP コアで構成される。

現在の実験装置では、ポリマー碍管そのままで計測するのが不可能であるため、サイズがサンプルステージに合うよう図 13(b) に示すようにポリマー碍管の一部を切り出した。その上、模擬欠陥を作るために、シリコーンゴムと FRP 樹脂境界面に沿って、ナイフ（厚さ 0.5 mm）で切り込みを入れ、空気層を持つ内部欠陥を製作した。シリコーンゴムの収縮性により、実際の空気層隙間のサイズは確認できないが、切り込みによる欠陥部は、10 mm × 10 mm × 0.1 mm 以下と見積もられる。図 14(a) に示すように、サンプルの欠陥なし部と欠陥部、

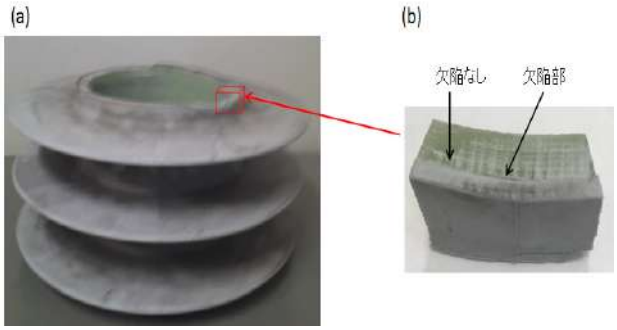


図 13 ポリマー碍子サンプル製作　(a) ポリマー碍管　(b) ナイフで切り込みにより空気層欠陥作成

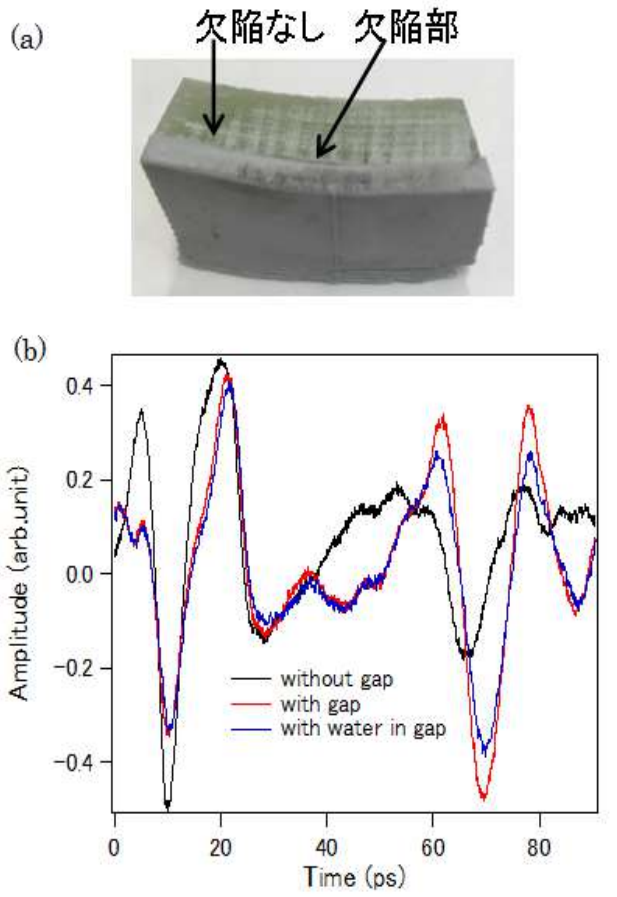


図 14 模擬欠陥検出実験。(a) 実験配置図　(b) 検出したテラヘルツ波時間波形

そして欠陥部に水を浸透させた場合にテラヘルツ波照射実験を行い、表面や界面から反射された波形を計測する。欠陥なし部の実験では、テラヘルツ波を入射すると、シリコーンゴム表面で一部を反射した後、吸収により減衰しながらシリコーンゴム内を伝搬する。そのあと、シリコーンゴムと FRP との境界面に反射され、更に吸収、減衰しながらシリコーンゴム表面から反射信号として検出される。その結果を図 14(b) の黒線で示す。表面反射から約 65 ps 遅れてシリコーンゴム／ FRP 樹脂境界の反射信号が検出された。空気層のある欠陥部照射の場合は、シリコーンゴムを伝搬したテラヘルツ波は、シリコーンゴムと空気層との境界面、および空気層と FRP との境界面でそれぞれ反射され表面へ戻る。検出された信号を図 14 (b) の赤線で示す。内部境界面からの反射信号を比べると、欠陥部からの反射信号は僅かな空気層（隙間）の存在で境界反射率が増大し、欠陥なしの場合の約 2 倍の大きさの反射光が見られる。この現象により、ポリマー碍管内部の隙間欠陥を識別できると言える。但し、低周波数域テラヘルツ波の時間信号の幅は広いため、シリコーンゴム裏面／空気、空気／ FRP 樹脂の 2 つの反射信号の分離はできず、隙間の厚さ測定はできない。また隙間に水を浸透させた場合の反射信号波形は図 14(b) の青線で、水が無い場合に比べて、僅かに反射信号が小さくなっている。これは、低周波数テラヘルツ波になったことにより水の吸収が減少したこと、また隙間が 0.1 mm と狭く完全に水で満たされていないためである。

6．まとめ

テラヘルツ波は新しい計測、分析手法を生み出している。その一つとして、我々は電力設備の絶縁材料内部の劣化診断について検討を行って生きた。これまでの実験成果は、全て環境の整った実験室内で、かつ光学定盤上での結果である。実際の電力設備設置現場は、屋外も多く、室内であっても粉塵、騒音に晒されるところも少なくない。そのような環境下においても、安定に、かつ正確に診断できる装置が要求される。今後、現場での適用を考え、装置の小型化、計測の高速化、耐環境性などの課題を検討し、多くの種類の絶縁材料に対して、計測・診断研究を展開する。

参考文献

1) D. Li, S. Motokoshi: Int. J. Magnetics Electromagnetism 2, 006 (2016)
2) 李大治、本越伸二テラヘルツ波によるポリマー碍子内部欠陥診断」応用物理秋季講演会 , 2016 年 9 月
3) 本越伸二、李大治、委託研究報告書「テラヘルツ波による電力設備診断技術に関する調査研究」平成 25 年 2 月
4) 本越伸二、李大治、委託研究報告書「テラヘルツ波による電力設備診断技術に関する研究」平成 25 年 9 月
5) 本越伸二、李大治、委託研究報告書「テラヘルツ波による電力設備診断技術に関する研究」平成 27 年 2 月
6) 本越伸二、李大治、委託研究報告書「テラヘルツ波による電力設備診断技術に関する研究」平成 28 年 2 月
7) 本越伸二、李大治、委託研究報告書「テラヘルツ波による電力設備診断技術に関する研究」平成 29 年 2 月

レーザー計測

レーザーブレークダウン分光法による碍子表面塩分計測技術の開発

島田義則
レーザー計測研究チーム

1．レーザーを用いた塩分計測を開始

弊所では平成21年度から変電所、送電線、配電線に使用される碍子表面に付着する塩分をレーザーで計測する技術開発を行った。

塩分は碍子の絶縁不良の主要因であるため、定期的にその付着量を計測し、一定量を越えた場合には洗浄を行う必要がある。従来の計測手法には筆洗（ふであらい）法などがあるが、この手法は蒸留水で付着塩分を完全に洗い流すのに熟練が必要で、時間も必要である等の課題がある。このため、レーザーブレークダウン分光法を用いて碍子を損傷させずに付着塩分量を計測する新手法の開発を行った。

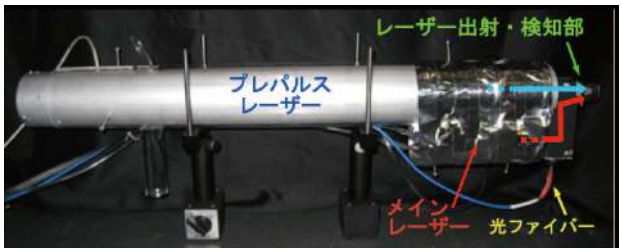


図１　初期の塩分密度計測装置

図２　ハンディ型計測装置による碍子付着塩分計測の様子

2．ダブルパルスを用いた計測方法

この計測方法では、2種類のパルスレーザーを組み合わせた（ダブルパルス方式）。開発当初は大きなプレパルスレーザーを手で持つタイプとしたため図1に示すような大きな装置となったが、最終的には光ファイバーを用いることによりハンディ型装置とした。（図2）。

ハンディ型装置の概念図を図3(a)に示す。自作した炭酸ガスレーザーをプレパルスレーザーに、マイクロチップレーザーをメインパルスレーザーに用いた。プレパルスレーザーを碍子表面に垂直に入射して付着塩分を飛翔させた後、発振タイミングを制御したメインパルスレーザーを碍子表面の手前に焦点がくるように斜め方向から集光入射し、塩分中のナトリウムのD線（589nm）を発光させてそのピーク強度を小型分光器で計測した。プレパルスレーザー光をファイバー伝送することにより手で持つことが可能となった（ハンディ型装置（図3(b)））。これにより操作性は大きく向上し、計測点1点あたりに

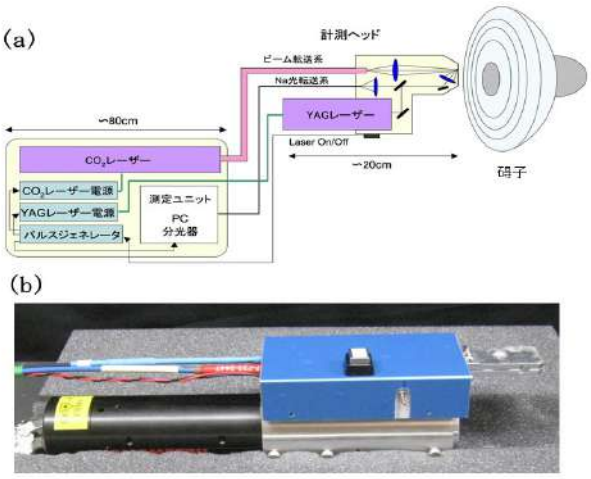


図３　(a) ハンディ型レーザー塩分密度計測装置構成、(b) 自作した計測ヘッド部の写真

要する時間を数秒にまで短縮できた。また、レーザー本体および電源部等の制御系をキャリーケース内に納めることで装置の運搬が容易となり、AC100Vの電源が確保できれば屋外での計測も基本的に可能である。

3．曝露碍子の塩分密度計測

ハンドホールド型装置を用いて屋外で曝露した碍子（曝露碍子）の塩分密度計測を行い、その性能評価を行った。サンプルには曝露時期、期間がそれぞれ異なり、塩分付着量も異なる 3 つの曝露碍子を用いた。レーザー計測の場合、1 度の測定で得られる密度は碍子上のある 1 点（1mm $^{\phi}$程度）に限られることから、曝露碍子全体の塩分密度を平均的に計測するため、碍子の裏面（ひだ）部分を 6 つの領域に分け、各領域で 24 点を選択し計 144 点の計測データを取得した。得られたデータは碍子の表面積を考慮した上で平均化し、碍子全体の塩分密度を示す値とした。計測点によってはナトリウム D 線のピークが得られない場合もみられたが、塩分は碍子上に不均一に（まばらに）付着していると考えられるため、それらの結果は計測点に塩分付着がないものとして平均値に含めた。曝露碍子全体の付着塩分密度は、レーザー計測後の碍子を用いて筆洗法により求め、レーザー法による結果と比較した。曝露碍子には塩分だけでなくさまざまな塩類が付着しているが、濃度計測には Na イオンメーターを用いており、碍子上に付着したナトリウム塩濃度と D 線のピーク強度を直接比較した。両計測値を比較した結果を図 4 に示す。両計測値はほぼ比例関係にあるため、検量線を作成することにより付着塩分の計測が可能である。レーザー法では、密度約 0.002 mg/cm^2 までの付着塩分が検出できる。碍子洗浄が必要な密度は 0.03 mg/cm2 であるため、本装置を用いれば少なくともその 10 分の 1 以下の低密度計測が可能である。

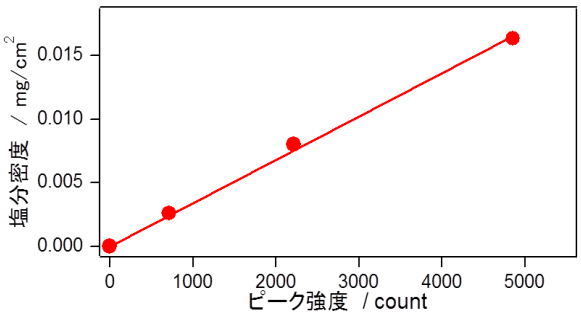


図 4　レーザー計測による曝露碍子の Na D 線ピーク強度の平均値と筆洗法により求めた付着塩分密度の比較

本装置は計測に必要な面積が微小であるため、検査後も塩分付着の履歴がリセットされずトレンド管理が可能である、碍子の部位別の塩分密度や付着塩分の分布が計測できる等、従来法にない利点も持ち合わせている。

本研究は関西電力からの受託研究により実施した。

参考文献

1) 島田義則、谷口誠治、本越伸二、加藤宏太、渡辺英世、河崎晋也、赤松浩和、中山勇、“レーザーを用いた碍子表面塩分計測”、レーザー学会学術講演会、(2012).
2) 島田義則、谷口誠治、本越伸二、“レーザーを用いた碍子表面塩分計測”、レーザー学会学術講演会、(2014).
3) 島田義則、谷口誠治、本越伸二、岸田知門、“レーザーを用いた碍子表面塩分計測”、電気学会 C 部門大会、(2014).

レーザー計測

時間分解レーザー計測による蛋白質の光励起メカニズム

～創薬分野への応用を目指して～

谷口誠治
レーザーバイオ化学研究チーム

1. はじめに

生体内には多種多様の蛋白質や酵素が存在し、各々がそれ特有の高い機能を示す。これらの機能性の要因を明らかにすることは、医療や創薬、化学、電子産業などさまざまな分野への応用への大きな足がかりとなる。当研究チームでは、超短パルスレーザーを光源とする時間分解計測法を用いて種々の蛋白質、酵素群の光励起ダイナミクスを観測することにより、それらの機能メカニズムを明らかとする研究を行ってきた。また最近、時間分解計測法の創薬への応用を目指して蛋白質の薬剤による機能抑制効果（機能阻害効果）に関する研究を展開している。レーザー総研創立 30 周年にあたり、本稿において過去 5 年間の主な研究成果をまとめる。

2．sub-10fs レーザーによる光活性蛋白質 PYP の光初期過程の観測

光活性黄色蛋白質 PYP（photoactive yellow protein, 図 1(a)）は青色光（~ 400nm）から逃げる性質（光負走光性）をもつ好塩菌中に含まれ、青色光を吸収する分子（p- クマル酸）を内包する。PYP は p- クマル酸の光吸収による trans-cis 異性化反応（図 1(b)）がトリガーとなり、蛋白質の構造変化を伴う中間体を経て元の状態に戻る（光サイクル反応）ことから、バクテリアの“目”の機能を果たす蛋白質と考えられている。このことから、PYP の機能メカニズムを明らかとすれば、高感度受光素子の開発などに有益な情報をもたらすものと期待される。本研究では、PYP の光反応のごく初期の過程をパルス幅約 7.5fs という超短レーザーパルスを用いた過渡吸収法により観測し、p- クマル酸の分子振動、つまり光励起直後に蛋白質内で分子が動く様子を直接的に捉えることを試みた。その結果、過渡吸収データにこれまで観測できなかった振動成分が確認され、モード解析によりこの振動が p- クマル酸内の芳香環の面内伸縮振動 (v25) モードにあたることがわかった（図 2）。また光励起時のこの振動モードの振動数は、暗条件のものと比較して低波数側にシフトしていることが明らかとなった。これらの結果は、p- クマル酸の異性化が光励起により生じる芳香環の歪みを起因として起こることを示しており、これまでに得られなかった新たな知見を報告することができた 1)。この研究は大阪大学レーザーエネルギー学研究センターおよび電気通信大学大学院先端超高速レーザー研究センター（レーザー計測システム）、京都大学大学院理学研究科（蛋白試料の精製）との共同で行われたもので、当時は多くの関係者の方々にお世話になった。この場を借りて感謝したい。

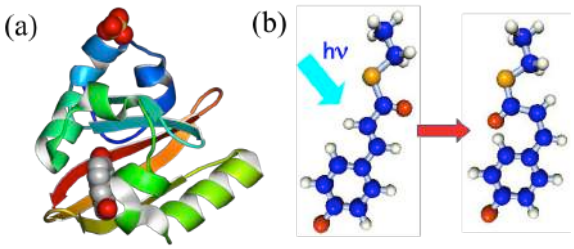


図 1 (a) PYP の立体構造、(b) p- クマル酸の光異性化反応

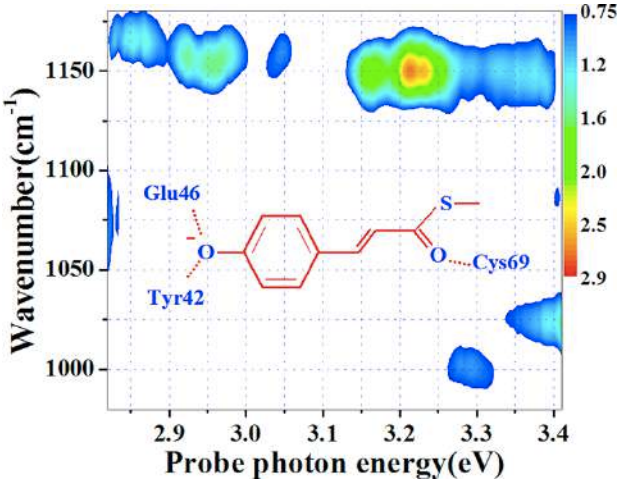


図 2 PYP に内包された p- クマル酸の光励起直後の分子振動モード (v25)

3．フラビン蛋白質の超高速電子移動メカニズム

我々が継続して行ってきた研究テーマに、蛋白質内で起こる特異的な光誘起超高速電子移動過程の解明がある。この反応の代表的なものが光合成初期過程であり、実際の蛋白質（光合成反応中心複合体）を対象とした研究は現在でも世界中で盛んである。これに対し我々は、主にフラビン蛋白質を対象とした研究を行ってきた。

フラビン蛋白質とは、補因子（蛋白質内で実際に機能する分子）としてフラビンアデニンジヌクレオチド（FAD）やフラビンモノヌクレオチド（FNM）などのリボフラビン誘導体を内包する蛋白質の総称である。生体内には多種多様のフラビン蛋白質が存在しており、主に体内物質の酸化還元反応を触媒する機能を担うが、その一方で FAD や FMN は青色光を吸収し、蛋白質を構成する周囲のアミノ酸残基の一部（チロシン、トリプトファンなど）から電子を引き抜く（電子移動反応）性質を持っている。またその速度は一般的な溶液中反応でのそれに比べ非常に大きい。このことは、蛋白質内で起こる高効率の電子移動反応が生命維持の重要な要因となっていることを端的に示しており、またフラビン蛋白質が光合成反応中心と同様、生体内高効率電子移動のメカニズムを解き明かすためのモデル蛋白質として用いることが可能であることを示している。この観点から我々は、種々のフラビン蛋白質を用いてそれらの光誘起電子移動反応を、主に自作したフェムト秒時間分解蛍光計測法（蛍光アップコンバージョン法）システム（図 3）2) を用いて観測するとともに、実験データの理論的分析を行ってきた。最近 5 年間に研究したフラビン蛋白質は、胃腸炎の要因となるピロリ菌（Helicobacter Pylori）内に含まれるピロリ菌フラボドキシン 3)、光合成細菌の一種である硫酸還元菌中に存在する FMN 結合蛋白質 4)、腐朽菌（Trametes multicolor）に含まれる 2- ピラノース酸化酵素 5, 6) などである。例としてピロリ菌フラボドキシン（図 4 (a)）のフェムト秒蛍光データを示す（図 5）。観測波長は 530nm、500nm である。蛍光はともに光励起直後から超高速電子移動反応に起因する急速な減衰を示し、蛋白質の立体構造との比較から電子移動反応は主として FMN と FMN に最も距離が近いチロシン(Tyr92、図 4 (b)）との間で起こることがわかる。

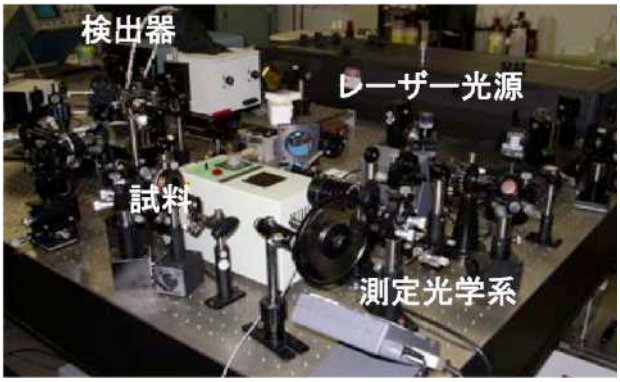


図 3　フェムト秒蛍光計測（アップコンバージョン）システムの写真

(a)　(b)

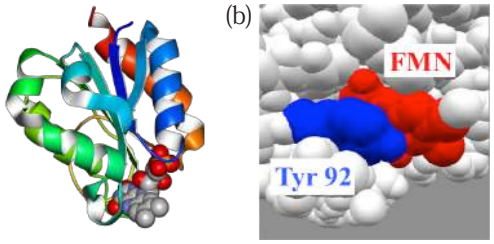
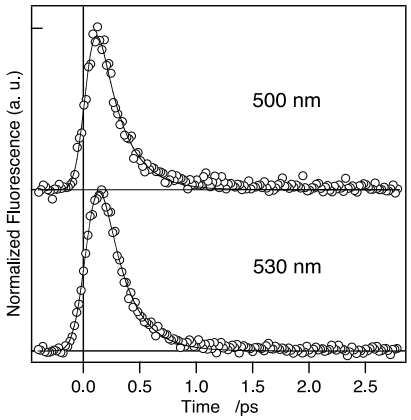


図 4　(a) ピロリ菌フラボドキシンの立体構造、
(b) 補因子 FMN、アミノ酸残基（Tyr 92）の 立体配置

図 5 ピロリ菌フラボドキシンのフェムト秒蛍光データ。



観測波長（上）500nm、（下）530nm

さらに我々は、このようにして得られた実験データを元に、蛋白質内電子移動速度の理論的な解析を進めている。解析には、溶液中反応の解析によく用いられる Kakitani-Matagа の理論式を拡張したものを用いている。この式を用いて溶液中反応との比較を行うことにより、蛋白質内電子移動の優位性の要因となるパラメータを決定することができると考えている。一方、電子移動速度を理論的に解析する際には、蛋白質の詳細な構造や、補因子およびアミノ酸残基の電子分布などの情報が必要となる。これに関して我々は、分子動力学（MD）計算、電子軌道（MO）計算により得られた情報を取り入れた解析を行ってきた。これまでに、FMN 結合蛋白質とその変異体（ミュータント）における理論解析結果について報告した 7, 8) が、今後他の蛋白質の反応を含めた体系的な電子移動理論モデルの構築に向け、さらに研究を進めていく。

4. 時間分解蛍光計測による蛋白質の機能阻害効果の研究

前項で述べた研究は、蛋白質反応のメカニズムに関する学術的、基礎的なテーマであるが、一方で我々は、時間分解レーザー計測技術のより実用的な利用法についても探索を行ってきた。応用へのヒントとなったのは、徳島大の福井清教授らによる、統合失調症患者の薬剤治療に関する報告である。彼らは統合失調症患者の脳内 D-アミノ酸の濃度が通常よりも低下しており、その要因が脳内で D- アミノ酸を分解（酸化）する機能を持つ D-アミノ酸酸化酵素（D-amino acid oxidase (DAAO)、図 6）の異常活性によるものであることをつきとめた。さらに彼らは、DAAO の反応を抑制する薬剤（機能阻害剤）の投与が脳疾患の治療に有効である、と指摘した。DAAO の反応およびその機能阻害効果を図示したものを図 7(a)、(b) にそれぞれ示す。DAAO は通常 D- アミノ酸を D- イミノ酸へと分解するが、阻害剤を投与すると DAAO 内の FAD と阻害分子が結合して錯体化し、アミノ酸の分解が抑制されることがわかる。一方、DAAO は補因子に FAD を有していることから、前項で述べたフェムト秒蛍光計測法を用いれば、その反応を観測すること可能である。このことから我々は、DAAO に種々の阻害剤を添加してそれぞれの光励起過程を比較することにより、薬剤として最も適した阻害剤の探索が可能であると

(a) (b)

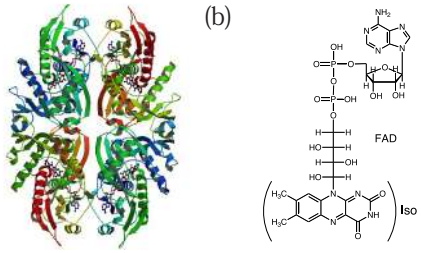


図 6 (a) ヒト由来 D- アミノ酸酸化酵素（human DAAO）の結晶構造、(b) 補因子 FAD の分子図

(a) (b)

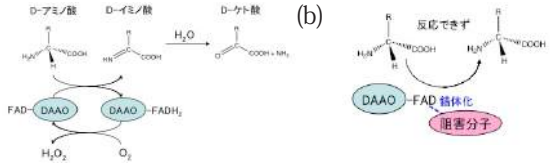


図 7 (a)DAAO の反応スキーム、(b) 阻害剤による機能阻害効果

考えた。蛋白質に薬剤を加え、その生理活性を計測する手法は実際の薬剤開発にもよく用いられるが、レーザー法を導入することにより、機能阻害効果についてのより有益な情報を得られる可能性もある。この観点から我々は、科学研究費補助金（基盤研究 (C) (一般)、課題番号 26410029）の支援の下、平成 26 年度から本研究を開始した。例として、図 8 に阻害剤に 4- アミノ安息香酸ナトリウムを用いた際のブタ腎臓由来 DAAO のフェムト秒蛍光データを示す（観測波長 525nm）。DAAO のみの試料（図中赤線）の場合、蛍光は 2 成分指数関数で減衰し、寿命はそれぞれ 3.7、37.8ps であるが、阻害剤を添加すると、FAD との錯体形成により DAAO の蛍光成分が低下し、約 300fs の速い減衰を示す錯体の蛍光が添加濃度に応じて強く表れる様子が観測される（図中緑、青線）。これらの実験データを解析することにより、DAAO と阻害剤の錯体化の効率、つまり機能阻害効果を定量的に見積もることができる。さらに特筆すべきは、DAAO の 2 種の寿命成分が蛋白質の構造異性体に由来するものであり、それぞれの阻害効果も異なることを明らかにしたことである 9, 10)。この結果は、阻害剤開発には蛋白質の構造因子を考慮することが重要であることを示すとともに、時間分解レーザー計測技術が、従来にない詳細な情報もたらす新手法として創薬の分野に応用可能であることを示している。我々はすでに、ヒト由来 DAAO やマラリアを媒介するマラリア原虫由来のアミノ酸代謝酵素（SHMT）など、実用に近い試料の研究を進めており、本手法の実用化を目指した研究を展開していく。

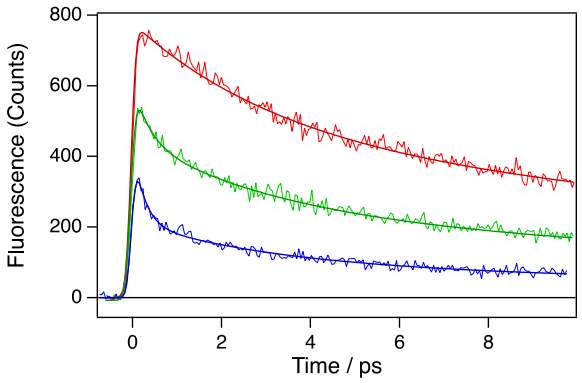


図 8 DAAO のみ（赤線）、阻害剤（18mM）添加時（緑線）、阻害剤（71mM）添加時（緑線）のフェムト秒蛍光データと蛍光寿命フィッティング曲線

5. 学術分野を跨いだ研究コラボレーション

蛋白質を対象とした我々の研究には、希少な蛋白質試料の作成技術を持つ研究グループの協力が必要である。ここでまとめた研究も、大阪市立大学大学院工学研究科北村研究室（フラビン蛋白質）をはじめ、北里大学薬学部生体分子解析学教室（DAAO）、京都大学大学院理学研究科生物物理学教室（PYP）など多くの研究室の協力を得て行われた。また最近、新たにタイの計算化学の研

究チーム（Chulalongkorn 大、Mahasarakham 大）との国際共同研究を開始し、MD、MO 計算法を用いた計測データの分析を進めている。学術分野を跨いだこのようなコラボレーション研究は、新技術の開発や学術的な発見には不可欠である。ご協力頂いた方々に深く感謝するとともに、今後も協力体制のさらなる発展に努めたい。

発表論文

1) J. Liu, A. Yabushita, S. Taniguchi, H. Chosrowjan, Y. Imamoto, K. Sueda, N. Miyanaga, T. Kobayashi, J. Phys. Chem. B, 117, 4818–4826, 2013.
2) H. Chosrowjan, S. Taniguchi, F. Tanaka, FEBS Journal, 282, 3003-3015, 2015.
3) K. Lugsanangarm, S. Pianwanit, A. Nueangaudom, S. Kokpol, F. Tanaka, N. Nunthaboot, K. Ogino, R. Takagi, T. Nakanishi, M. Kitamura, S. Taniguchi, H. Chosrowjan, J. of Photochem. Photobiol. A: Chemistry, 268, 58–66, 2013.
4) S. Taniguchi, H. Chosrowjan, F. Tanaka, T. Nakanishi, S. Sato, Y. Haruyama, M. Kitamura, Bull. Chem. Soc. Jpn., 86, 339-350, 2013.
5) H. Chosrowjan,, S. Taniguchi, T. Wongnate, J. Sucharitakul, P. Chaiyen, F.Tanaka, J. of Photochem. Photobiol. A: Chemistry, 234, 44-48, 2012.
6) S. Taniguchi, H. Chosrowjan, T. Wongnate, J. Sucharitakul, P. Chaiyen, F.Tanaka, J. of Photochem. Photobiol. A: Chemistry, 245, 33–42, 2012.
7) N. Nunthaboot, K. Lugsanangarm, S. Pianwanit, S. Kokpol, F. Tanaka, S. Taniguchi, H. Chosrowjan, T. Nakanishi, M. Kitamura, Computational and Theoretical Chemistry, 1030, 9-16, 2014.
8) N. Nunthaboot, K. Lugsanangarm, S. Pianwanit, S. Kokpol, F. Tanaka, S. Taniguchi, H. Chosrowjan, T. Nakanishi, M. Kitamura, J. of Photochem. Photobiol. A: Chemistry, 326, 60-68, 2016.
9) F. Tanaka, K. Lugsanangarm, N. Nunthaboot, A. Nueangaudom, S. Pianwanit, S. Kokpol, S. Taniguchi, H. Chosrowjan, Physical Chemistry Chemical Physics, 17, 16813-16825, 2015.
10) A. Nueangaudom, K. Lugsanangarm, S. Pianwanit,, S. Kokpol, N. Nunthaboot, F. Tanaka, S. Taniguchi, H. Chosrowjan, RSC Advances, ,10, 54096-54108, 2014.

レーザー開発

レーザー開発

次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト

藤田雅之
レーザープロセス研究チーム

◆次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト

2010年8月からNEDO「高出力多波長複合レーザー加工基盤技術開発プロジェクト(プロジェクトリーダー:尾形仁士)」が5カ年計画でスタートした。研究開発項目として、「①半導体レーザーの高出力化技術の開発」、「②レーザー高品位化技術の研究開発」、「③多波長複合加工技術の開発」の3つが設定された。レーザー加工用の光源開発と加工技術開発を同時並行して進めるプロジェクトであった。レーザー総研は、技術研究組合・次世代レーザー加工技術研究所(ALPROT、理事長:中井貞雄)の一員として「②レーザー高品位化技術の研究開発」に参画し、阪大レーザー研と協力してレーザー開発を進めることとなった。

技術研究組合員としてのプロジェクト参加は今回が始めてであった。NEDOからの研究費は組合の事務方において組合のルールに従って全て処理され、間接経費は組合の取り分となる。出張旅費の精算も組合の旅費規程で支払われる(レーザー総研よりも待遇が少し良かった)。大型物品の購入においては、入札の是非の判断は組合の規定に従い、手続きは組合事務で処理されるので研究者の負担が軽減されることになる。場合によっては国際入札を回避できることになる。備品は組合の資産となり、プロジェクト終了後に組合が解散した場合は大学又は国研に移管される。ある意味、美味しい仕組みである。一方、実験の都合でミラー1枚、ネジ1本が早急に必要となった場合でも組合事務方を通してしか入手できないので、臨機応変に試行錯誤を積み重ねる研究においては一抹のもどかしさを感じることとなる。

研究開発項目「②レーザー高品位化技術の研究開発」は幾つかのサブテーマから構成され、「(2)パルスレーザー増幅(ブースター)技術の開発」の中の「1)kW級ブースター増幅器の開発」及び「(3)高出力波長変換技術の開発」の中の「2)波長変換の高効率化技術の開発」にレーザー総研が参画した。

阪大レーザー研を中心としてZig-Zagスラブ型Nd:YAGレーザーの開発が進められた。実際のスラブレーザーができあがるまでは、レーザー総研はスラブ型レーザー媒質の熱解析やビーム伝搬のシミュレーションを担当し、レーザーが立ち上がった後は増幅ビームの波面測定・解析や波長変換結晶の反射防止膜の耐力試験などを分担し、レーザー研の研究支援(ある意味、裏方的な業務)を行った1-4)。

レーザー媒質の熱解析やビーム伝搬のシミュレーションは主に古河研究員が担当した。市販の熱解析コード(ANSYS、Solid Works等)を用いて励起されたレーザー媒質内に発生する熱応力の計算を行い、その計算結果を独自に開発したコードTHESLACに導入し光線追跡を行った。一例として2012年2月9日の技術開発会議で報告したレーザー媒質内を伝搬させた光の波面歪み計算結果を図1に示す。

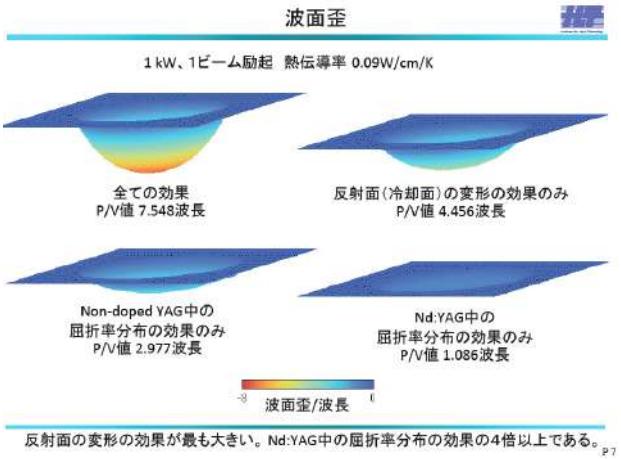


図1　励起されたレーザー媒質内を伝搬したレーザー光波面の計算結果

シミュレーションは様々な物理効果を同時に計算するものであるが、一方で人為的に特定の物理現象による効果だけを計算することもできる。波面歪みを引き起こす要因としては、熱応力に伴う屈折率の変化と変形した媒質境界面での反射の二つが考えられる。図1の左上は全ての効果を考慮した場合の波面歪みを示す。残りの3つは反射面の変形効果のみ、Non-doped YAG中の屈折率分布の効果のみ、励起光が吸収されるNd:YAG中の屈

折率分布の効果のみを考慮した結果である。これらの計算から、媒質の変形による効果が波面歪みに与える影響として最も大きなものであることが推定された。

2012 年 4 月からプロジェクト名称が「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」に変更（財源（勘定）も一般会計から特別会計に変更）となり、2012 年 8 月に中間評価が行われた。7 名の評価委員から下された評点は 3 点満点に対して、「事業の位置付け・必要性に対して」=2.3、「研究開発マネジメント」=1.1、「研究開発成果」=1.7、「実用化の見通し」=1.6 とやや辛口の結果であった。この中間評価を受けて、プロジェクト後半の研究計画を、より出口イメージを意識し、光源開発と加工技術開発が連携したものとなるように見直すこととなった。

平成 25-26 年度（2013-2014）の研究に対して実施計画書が変更され、研究開発項目は「１. CFRP 切断加工技術の開発」、「２. 大面積処理技術の開発」、「３. 粉末成形技術の開発」となった。レーザー総研は、「１. CFRP 切断加工技術の開発」のサブテーマである「(1) 高品位･高出力パルスレーザーの開発」の「①パルスレーザー高品位・高出力化技術の開発」の中の「1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」において「ナノ秒パルスの固体ブースター増幅器への供給及び CFRP 加工実験へのビーム供給」を、「2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発」において「固体ブースター増幅器の開発（H25 のみ）」と「ビーム結合ファイバーブースター増幅器の開発」と「波長変換の高効率化技術の開発」に参画した。

プロジェクト後半の主な研究開発は、4 本のフォトニック結晶ファイバー（PCF）出力をコヒーレント結合するモジュールを 3 セット作製し、それぞれのモジュールを異なる波長（1040nm, 1050nm, 1060nm）で動作させて 3 ビームを波長結合し 1.5kW の出力を実現し、さらに波長変換して 600W のグリーン、200W の UV のパルス出力を得るというものであった5-7)。ここでは、かねてからコスロービアン副主任研究員と谷口副主任研究員が研究を進めていたコヒーレントビーム結合の経験が役に立った。また、波長変換においては結晶中の温度分布を解析し、光軸方向に生じる温度勾配を補償する手法が李研究員と本越主任研究員により提案された。

2014 年 5 月 15 日に開催された技術開発会議で報告された内容を図 2 と図 3 に抜粋して示す。波長変換結晶内ではレーザー光の吸収により温度上昇が生じ、外部から単純に温度制御をかけても図 3 右下に示す様な光

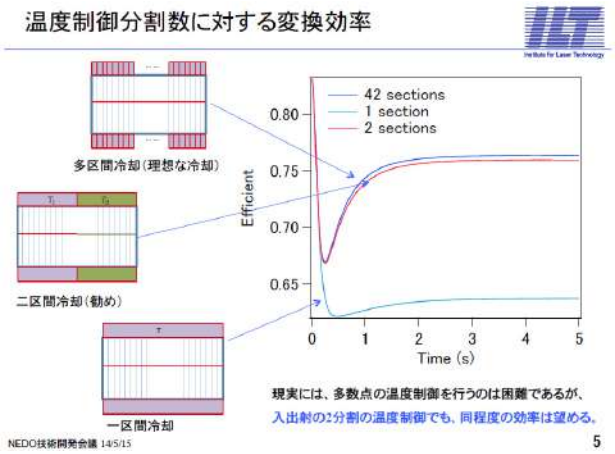


図 2　温度制御分割数に対する波長変換効率

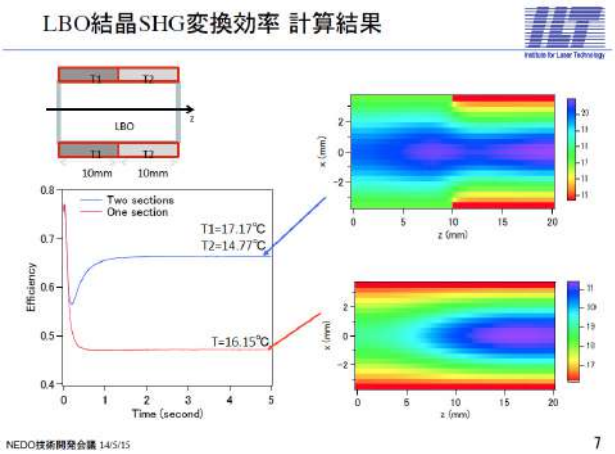


図 3　2 温度制御における SHG 変換効率および結晶内温度分布の計算結果（単一温度制御との比較）

軸に沿った温度分布が生じる。結晶の出口に近くなるほど温度が上がり、変換効率が低下する。これを補償するために、結晶の入り口から出口に向かって制御温度に勾配をもたせることを考えたわけであるが、制御温度を 42 分割と緻密に制御しても、2 分割としても結果に大きな違いがないことが見いだされた（図 2)。結晶内温度が定常状態に達するまで 2 秒ほどかかり、単一温度で制御した場合に比べて 20％ほど変換効率が改善することが示された。2 温度制御をかけた時の結晶内温度分布は図 3 右上に示す様に光軸に沿って均一となる。

2015 年に入り、基本波出力 1.5kW の目標値を達成すべくレーザー研、レーザー総研が一体となって実験を進めた。3 台のモジュールを同時に動かして出力光を結合していくのであるが、実験室の都合上 1 つのモジュールが離れた所に設置された。レーザー研の吉田氏、椿本氏の指示の下、レーザー総研のコスロービアンと北村両研究員が離れた 1 台を担当した。各モジュールに最低一人は付きっきりとなり、且つそれぞれで 500W 超の

平均パワーを絞り出していく作業が続いた。全部で 12 本の PCF 増幅器を動作させるのだが、いかんせん 12 本の PCF それぞれが個性を持っていることが分かってきた。各 PCF の出力を合計すると 1.8kW であったが、コヒーレント結合すると 1.4kW にしかならない。システムを一部組み替えて PCF をなだめすかしながら調整し、最終的に出力 1.52kW が達成された。

プロジェクトは 2015 年 3 月末で終了し、8 月 20 日に実施される事後評価への対応作業が進められた。また、ALPROT は 3 月末をもって解散し、4 月 30 日に清算運営委員会、5 月 12 日に最後の総会が開催された。

事後評価の評点は 3 点満点に対して、「事業の位置付け・必要性に対して」=2.6、「研究開発マネジメント」=2.4、「研究開発成果」=2.3、「実用化の見通し」=1.9 と、中間評価に対応してプロジェクトを組み直したことで高評価につながったと言えるのではなかろうか。

研究支援という立場での参画であったが、プロジェクト中にレーザー研と一緒に進めたビーム計測やコヒーレント結合実験、波長変換の解析、レーザー媒質の熱解析等、以後の研究に大いに役立つ知見が蓄積された。

◆ kW 級低温冷却 Yb:YAG レーザー開発

レーザー総研は 2007 年から三菱重工業（株）の委託を受けて大出力レーザーの開発を続けてきている。前記 NEDO プロでは研究支援という立場でレーザー開発に携わったが、それと並行して、別財源で kW 級低温冷却 Yb:YAG レーザー開発とコヒーレントビーム結合技術開発を行っていた。活動の詳細は本誌の谷口副主任研究員、コスロービアン副主任研究員の寄稿に記述されているので、ここでは大まかな流れを紹介する。

2000 年代後半から阪大レーザー研の宮永憲明教授、河仲準二准教授のご指導の下、古瀬裕章研究員を中心として液体窒素冷却 Yb:YAG レーザーの研究開発を進め、レーザー発振のダイナミクスや発振出力の温度依存性が明らかとなっていった 8-10)。励起用 LD の出力が限られていたため（業界で言うところの "pump limited"）、当初は数 100W レベルの発振実験が主であった。

2012 年にシード光となるファイバーレーザーや数 kW 出力の励起用 LD を導入し、研究は増幅試験へとシフトしていった。古瀬研究員が 2013 年 4 月に北見工業大学へ転出した後は、櫻井俊光研究員、谷口副主任研究員、コスロービアン副主任研究員が協力して kW 級出力の実験を進めた。（櫻井研究員は 2014 年 7 月に国立極地研究所へ転出、2016 年 7 月から寒地土木研究所研究員。）

励起パワーの増大に伴い、液体窒素の急激な沸騰（膜沸騰）が問題となり冷却手法の改善を迫られることとなった。クライオスタット内で液体窒素の撹拌を試みたが上手くいかず、最終的に噴流冷却を採用することとなった。2015 年に液体窒素噴流冷却システムを三菱重工が開発し、励起パワー 2.4kW に対して 1kW 以上の発振出力を 2 分以上にわたって安定的に得ることに成功した。さらに冷却システムを改良し、5kW 以上の励起パワーに対して 1kW 以上の増幅出力を 20 分以上にわたって安定的に得ることにも成功している 16)。また、この頃から室温水冷の可能性を検討し、予備実験を開始した。

◆新たなプロジェクトの試み

NEDO プロで得た知見、三菱重工からの委託研究の実績を元に、2016 年 5 月に安全保障技術研究推進制度へ「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」と題した研究提案を申請した。ヒアリングを経て、7 月 28 日付けで採択通知が送られてきた。平成 28 ～ 30 年度（2016 ～ 2018 年度）の 3 年間のプロジェクトが始まった。

これまでの研究との相違点は、（1）液体窒素冷却では無く、水冷方式を採用して kW 級のレーザー発振出力を目指す、（2）励起波長 940nm では無く、969nm の光で励起（ゼロフォノンライン励起）する、といった 2 点である。将来的な産業応用を考えると水冷方式への移行は自然な流れであるが、Yb:YAG を常温で動作させると発振効率が低下し熱負荷が増大する。そこで、発振波長に近い 969nm で励起することで発熱損失を約 30％低減しようという試みである。

Yb:YAG には大きな吸収ラインが 940nm と 969nm にあるが、969nm の吸収線幅が狭くて LD 励起には不向きであるとされてきた。近年、VBG (Volume Bragg Grating) を内蔵した線幅が狭い LD 光源が開発されゼロフォノンライン励起が可能となった。

2016 年 8 月下旬に PO（プログラムオフィサー）のサイトビジットがあり、さぁやるぞ、と気合いを入れたが、防衛装備庁との実施計画書のやり取りに約 3 ヶ月を要して、契約の締結は 10 月 17 日までずれ込んだ。NEDO とも JST とも違う独特の書類のやり取りがあった。初年度は実質 5 ヶ月の研究期間となってしまったが、実験設備を関西電力技術研究所内に移設し、レーザー発振実験をスタートさせた。

本制度による研究に関して世間では色々と誤解や矛盾が取りざたされているが、内容は基礎研究であり成果は公

開されるものである。残り２年間のプロジェクトを粛々と進め、成果をきちんと発信していきたい。

文中、一部敬称を略しています。

発表論文

1) K. Iyama, R. Bhushan, H. Furukawa, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, H. Fujita, M. Fujita, N. Miyanaga, Y. Tamaoki, Y. Kato, T. Kawashima, “Development of kW class Nd:YAG composite ceramic thin disc laser”, Photonics West, Solid State Lasers XXII: Technology and Devices, 859928, 2-7 February 2013, Moscone Center, San Francisco, USA.
2) H. Fujita, K. Iyama, R. Bhushan, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, M. Fujita, N. Miyanaga, and T. Kawashima, “Development of a kW class Nd:YAG ceramic thin disc laser for advanced laser machining”, ALPSp6-18, The 2nd Advance Lasers and Photon Sources, 23-25 April 2013, Pacifico Yokohama, Yokohama.
3) K. Iyama, H. Furukawa, H. Chosrowjan, T. Sakurai, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, H. Fujita, M. Fujita, N. Miyanaga, Y. Tamaoki, Y. Kato, T. Kawashima, “400W Nd:YAG composite ceramic thin-disc laser in 10ns pulse at 167kHz”, Photonics West, Solid State Lasers XXIII: Technology and Devices, 8959-27, 1-6 February 2014, Moscone Center, San Francisco, USA.
4) H. Fujita, K. Iyama, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, M. Fujita, N. Miyanagaa, and T. Kawashima, “High Power Nd:YAG Ceramic Thin Disc Laser for Advanced Laser Machining”, ALPS8-6, The 3rd Advance Lasers and Photon Sources, 22-25 April 2014, Pacifico Yokohama, Yokohama.
5) H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga, T. Yamamura, T. Sakagawa, M. Tsukamoto, H. Chosrowjan, T. Kitamura, M. Fujita, Y. Izawa, “Nanosecond Pulsed 1.5 kW Average-Output-Power Fiber Laser System Based on Yb-doped Rod PCFs for Filled-aperture Coherent and Spectral Combinations”, ALPS15-3, The 4th Advance Lasers and Photon Sources, 22-24 April 2015, Pacifico Yokohama, Yokohama.
6) H. Chosrowjan, T. Kitamura, S.Taniguchi, M. Fujita, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga, Y. Izawa, “High-power coherent beam combining (CBC): Beam quality and coupling efficiency in CBC”, ALPS18-4, The 5th Advance Lasers and Photon Sources, 17-20 May 2016, Pacifico Yokohama, Yokohama.
7) H. Chosrowjan, T. Kitamura, M. Fujita, S.Taniguchi, Y. Izawa, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga, “Coherent combining of high average power nanosecond pulse laser beams ”, ThR2-p04, The 17th International Conference Laser Optics, 27 June-1 July 2016, Holiday Inn St. Petersburg Moskovskye Vorota, St. Petersburg.
8) H. Furuse, J. Kawanaka, H. Chosrowjan, N. Miyanaga, T. Sakurai, M. Fujita, S. Ishii, K. Takeshita, Y. Izawa, “Study of wave-front distortion in cryogenic Yb:YAG TRAM laser and a novel Coherent Beam Combining (CBC) technique for ultra-high power laser systems”, AT4A.20, Advanced Solid State Photonics 2012, 29 January - 1 February 2012, Rancho Bernardo Inn, San Diego, California, U.S.A..
9) H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga, H. Chosrowjan, M. Fujita, K. Takeshita and Y. Izawa, “Output characteristics of high power cryogenic Yb:YAG TRAM laser oscillator,” Optics Express, 20(19), 21739-21748 (2012).
10) H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga, H. Chosrowjan, M. Fujita, S. Ishii, K. Takeshita, Y. Izawa, “Design of 10 kW-class laser system based on multiple-TRAM configuration with cryogenic Yb:YAG ceramics”, ALPS4-10, Advanced Lasers and Photon Sources Conference 2012, 26 - 27 April 2012, Pacifico Yokohama, Yokohama.
11) H. Chosrowjan, H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga, M. Fujita, K. Hamamoto, T. Yamada, and Y. Izawa, “A Novel Concept of Coherent Beam Combining (CBC) Technique for Applications in High Power Multichannel Laser Amplifier Systems”, ALPS4-4, Advanced Lasers and Photon Sources Conference 2012, 26 - 27 April 2012, Pacifico Yokohama, Yokohama.
12) T. Sakurai, H. Furuse, H. Chosrowjan, J. Kawanaka, N. Miyanaga, K. Hamamoto, T. Yamada, M. Fujita and Y. Izawa, “Temperature distribution characteristics in a cryogenic Yb:YAG TRAM laser medium”, ALPSp6-18, The 2nd Advance Lasers and Photon Sources, 23-25 April 2013, Pacifico Yokohama, Yokohama.
13) H. Chosrowjan, H. Furuse, M. Fujita, Y. Izawa, J.

Kawanaka, N. Miyanaga, K. Hamamoto, T. Yamada, “Interferometric phase shift compensation technique for high-power, tiled-aperture coherent beam combination”, Opt. Lett., vol.38, No.8, pp. 1277-1279 (2013).

14) H. Furuse, H. Chosrowjan, J. Kawanaka, N. Miyanaga, M. Fujita, and Y. Izawa, “ASE and parasitic lasing in thin disk laser with anti-ASE cap”, Optics Express, vol.21, No.11, 13118 (2013).

15) H. Furuse, T. Sakurai, H. Chosrowjan, J. Kawanaka, N. Miyanaga, M. Fujita, S. Ishii, and Y. Izawa, “Amplification characteristics of a cryogenic Yb3+:YAG total-reflection active-mirror laser”, Applied Optics, vol.53, No.9, pp.1964-1969 (2014).

16) K. Hamamoto, T. Morioka, S. Nishikata, N. Inoue, J. Nakatani, S. Taniguchi, H. Chosrowjan, Y. Izawa, “kW-class Zig-Zag Active-Mirror Laser Amplifier with Jet Impingement Cooling”, ATu2A-41, Advanced Solid State Laser Conference 2015, 4-9 October 2015, WISTA-Technology Park, Adlershof-Berlin, Germany.

17) T. Sakurai, H. Chosrowjan, H. Furuse, S. Taniguchi, T. Kitamura, M. Fujita, S. Ishi, Y. Izawa, “Boiling effect in liquid nitrogen directly cooled Yb3+:YAG laser”, Applied Optics, vol.55, No.6, pp.1351-1355 (2016).

レーザー開発

高出力クライオジェニックレーザーの開発

谷口誠治
レーザーバイオ化学研究チーム

当研究所（以下 ILT）では 2007 年度から、三菱重工業株式会社（以下 MHI）の委託により高出力レーザーの開発を行っている。最終的な目標は、CW で 10kW 以上の安定出力を得ることにある。この要件を満たすため ILT では、大阪大学レーザーエネルギー学研究センター（現：レーザー科学研究所）宮永憲明教授、河仲準二准教授らの提案による、全反射型アクティブミラー方式（Total-Reflection Active-Mirror : TRAM、図 1）を用いた低温冷却（クライオジェニック）Yb:YAG レーザーの開発を進めてきた。低温で優れた動作特性を示す Yb:YAG と、従来のアクティブミラー方式で施されていた高反射膜を必要とせず発熱を抑制できる TRAM 方式を組み合わせることにより、より高出力、高品質のレーザー開発が可能であると期待される。2012 年度までには、TRAM により 200W 級の出力を得るとともに、10kW 級レーザーの設計 [1] やビーム結合試験 [2]、レーザー増幅試験 [3] などを実施し、着実に成果を上げてきた。

筆者が本研究に参加したのは、2013 年度からである。ILT のメンバーは、井澤靖和所長、藤田雅之主席研究員、ハイク・コスロービアン副主任研究員と、2007 年度からレーザー実験の主要メンバーであった古瀬裕章研究員（現：北見工業大学助教）の後任として入所した櫻井俊光研究員（現:寒地土木研究所研究員）で、当時は主に、励起光による TRAM の発熱（温度変化）に関する研究を計算、実験の両面から行っていた。この時問題となっていたのは、増幅試験を行っている際、液体窒素で冷却しているはずの TRAM の温度が、励起光を入射してしばらくすると窒素温度から急激に上昇（ジャンプ）する、という現象である。温度上昇は通常、加熱時間に従い徐々に起こるものであるから、この現象を説明するには別の過程の関与を考慮する必要がある。この時筆者はこの研究に直接関与はしていなかったのだが、観測データを見てこの要因が液体窒素の膜沸騰によるものであると気づいた。TRAM を加熱すると冷却面の液体窒素が沸騰（気化）を始め小さな気泡が生成するが、さらに温度上昇が進むと気泡は大きく成長する。ついには気化した窒素

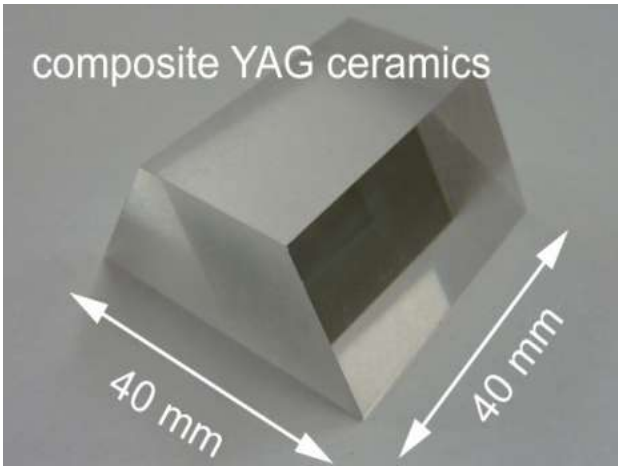


図 1　Yb:YAG TRAM の外観

が膜状となり表面を覆ってしまい冷却能力が一気に低下し、TRAM の温度も瞬時に上昇する。この現象を膜沸騰とよぶ。筆者は元々化学の出身であるため、当たり前と言えば当たり前の見解なのだが、これは他分野の知識も時には役に立つことの良い例である。

TRAM の温度ジャンプの原因は明らかとなったものの、本当の課題はこの先にある。つまりこの現象は、単に液体窒素で TRAM を冷却する（この手法をプール冷却とよぶ）のみでは、レーザー動作時に TRAM の温度が一気に上昇する瞬間があり、出力の不安定化や破損に繋がる可能性があることを示している。この問題を解決する方法の一つに冷却手法の改良がある。膜沸騰を抑えるには、①液体窒素の温度を 77K よりさらに低温まで冷却し、加熱表面で生成した気泡を液体により冷却して消滅させる（サブクール）、②液体窒素を流動させ、気泡を物理的に取り除く（強制対流）、という大まかにいって 2 つの方法がある。このとき MHI から提案があったのが噴流による冷却法である（衝突噴流冷却法）。ノズルから冷媒を噴出し冷却面に衝突させるこの手法は、上記の②にあたるが、加えて冷媒が常に入れ替わることにより熱の伝達が促進され、より高い冷却効果が期待できる。扇風機やパソコンの空冷ファンなどは空気を冷媒に用いた一般的な例である。しかしながら、77K 以下でしか

存在しない液体窒素を噴流に用いるには非常に大掛かりな装置が必要となり、また kW のレーザー出力を得るにはそれに応じた数 kW 級の励起光源を使用するため、大学の施設内で試験を行うことは事実上不可能であった。このため噴流冷却を用いた試験は MHI 側で行うこととなり、装置設計および試験準備に入った。この間に我々は、TRAM の熱計算 [4] や沸騰現象の熱解析 5) などを行った。2014 年度からは、櫻井研究員の退職にともない北村俊幸研究員（現：量子科学研究所研究機構研究員）がチームに加わり、高出力化への布石として（多重パス）CW 増幅における小信号利得の詳細な計測、TRAM 増幅レーザーをシード光に用いた 2 段 TRAM 増幅（図 2）、50W クラスの強シード光を用いた増幅試験などを実施し、レーザー増幅特性に関する基礎的な知見を蓄積していった。

図 2　2 段 TRAM 増幅試験時の写真

噴流冷却法による試験が始まったのは 2013 年度からである。民間施設での試験ということで、我々は実験支援という形で参加した。当然のことではあるが、試験開始当初はさまざまなトラブルが起こり、その対処にも追われたが、徐々に装置も安定化し、最終的には TRAM による 1kW の CW 発振出力を得ることに成功した。さらに次年度には、TRAM を 3 つ組み合わせた形状の ZiZa-AM（ZigZag Active-Mirror、図 3）を用いた増幅試験を

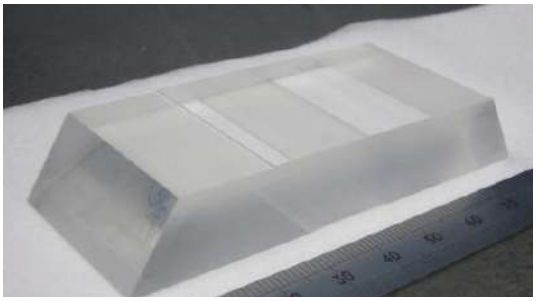


図 3　ZiZa-AM（ZigZag Active-Mirror）の外観

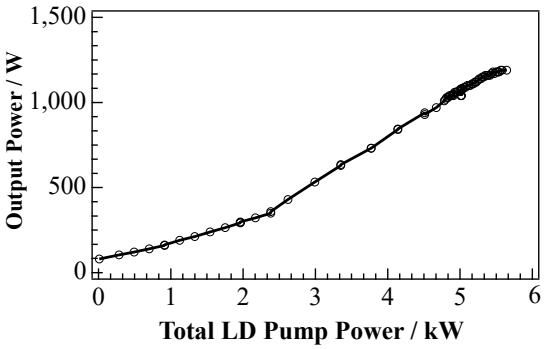


図 4　液体窒素噴流冷却を用いた増幅試験結果 [6]

行い、CW 増幅出力 1.2kW（100W シード）、30 分の安定出力を達成した（図 4）[6]。この記録は、低温冷却型の固体レーザーでは世界最高値である。これらの試験には企業側からの参加者が多く、皆が団結して試験に取り組んだ。得られた成果はその賜物である。

一方、ここでやはり問題となるのは装置の大型化である。液体窒素噴流装置は非常に大がかりなもので、このまま順調に高出力化が進んでも、レーザーシステム自体が大型化してしまう懸念もある。このことから我々は 2015 年度から、冷媒を水に切り替えた噴流冷却による常温動作 Yb:YAG レーザーの開発に着手している。水は液体窒素に比べ熱伝達率や気化熱が大きいため、より高い除熱作用が期待でき、また噴流装置もかなり簡略化・小型化できる。常温での Yb:YAG の動作特性は低温より劣るものの、噴流冷却により温度を安定化できればレーザーの高出力化も夢ではない。これまでに、水冷時の TRAM の出力特性やその温度効果、高出力化に向けたスケーリングの検討、水冷時の TRAM の熱計算、水噴流を用いた予備実験などを行ってきた。2016 年度からは防衛省安全保障制度の支援を受け、本格的に研究を進めているところである。今後の 2 年間、常温動作での kW 級のレーザー出力を目標に、その道筋を付けられるような研究成果を上げていきたいと考えている。

発表論文

1) H. Furuse, T. Sakurai, H. Chosrowjan, J. Kawanaka, N. Miyanaga, M. Fujita, S. Ishii, Y. Izawa, in "The Eighth Internaional Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA)" Technical Digest, paper - P.Mo-50, 2013.

2) H. Chosrowjan, H. Furuse, M. Fujita, Y. Izawa, J. Kawanaka, N. Miyanaga, K. Hamamoto, T. Yamada, Opt. Lett., 38, 1277-1279, 2013.

3) H. Furuse, T. Sakurai, H. Chosrowjan, J. Kawanaka, N. Miyanaga, M. Fujita, S. Ishii, and Y. Izawa, Applied Optics, 53, 1964-1969, 2014.
4) T. Sakurai, H. Furuse, H. Chosrowjan, J. kawanaka, N. Miyanaga, S. Ishii, M. Fujita, Y. Izawa, in “The 2st Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS '13)” Technical Digest, paper-ALPSp6-18, 107 – 108, 2013.
5) T. Sakurai, H. Chosrowjan, H. Furuse, S. Taniguchi, T. Kitamura, M. Fujita, S. Ishi, Y. Izawa, Applied Optics, 55, 1351-1355, 2016.
6) 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.

レーザー開発

Frontiers of High Power Lasers: Coherent Beam Combining

Haik Chosrowjan
Laser Process Research Team

I have joined the high power laser development research group about six years ago, and the 30th anniversary of ILT's establishment is a good opportunity to rethink and reevaluate our groups and also my individual results and achievements during that period.

Powerful lasers with high brightness and good beam quality are increasingly required for many real world applications. To reach higher intensities, one needs to increase the output power of the laser beam and at the same time keep or improve the beam quality. There are several possibilities to obtain high power, single-mode laser irradiation: (i) build a single source high power laser, (ii) coherently combine multiple low power laser beams or (iii) construct a multi-pass master oscillator power amplifier (MOPA) amplification system. In recent years we have pursued all three of these possibilities. We have studied temperature distribution, amplification and lasing characteristics of cryogenically cooled Yb:YAG laser active medium and demonstrated more than 1 kW continuous wave (CW) regime laser performance as well as 1.2 kW single pass amplification performance in 2015. [1-6)]

Back in 2012 we have suggested a novel coherent beam combining (CBC) technique for tiled-aperture beams called interferometric phase shift compensation (IPSC) technique (Fig. 1). On January 20th of 2012 a patent application was submitted7) and on April 26th of the same year it was presented at a prestigious international conference held in Yokohama[8)]. In April 2013 the details of the IPSC technique have been published in an international academic journal.[9)]

In the IPSC technique, we had set a goal toward scaling peak and average brightness of the laser beam beyond the limitations of any single source technology – develop a method for coherent combination of multiple kilowatt class laser beams in parallel (tiled-aperture design) using a simple, effective approach without complicated phase retrieval algorithms and control electronics.

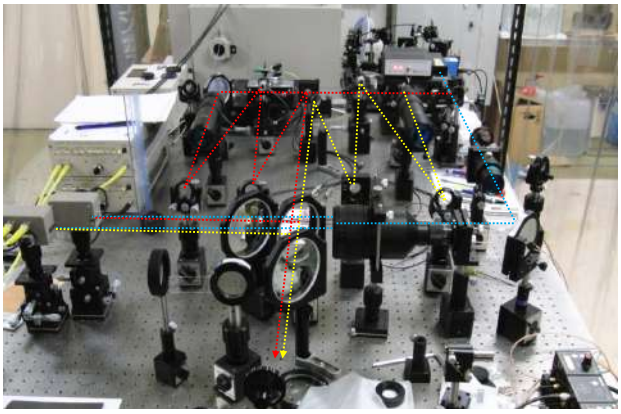
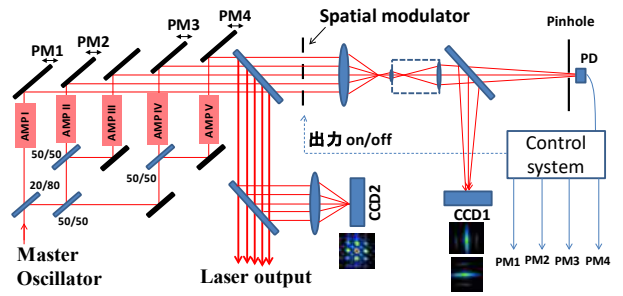


Fig. 1 A snapshot of the apparatus setup for "Interferometric Phase Shift Compensation" technique demonstration; Two channels and the reference beam paths are shown respectively by red, yellow and blue dotted lines for clarity.

As a proof of the principle, using a photodiode pair coupled piezo-actuator mirrors we demonstrated robust beam locking bandwidth (~ 1 kHz) and accuracy (~ λ/25) for two beam channels. We estimated that the performance of the technique can be further enhanced in terms of operation bandwidth and rms (~ λ/100) phase locking accuracy. This technique is not limited by single beam power or channel number restrictions, can be integrated into various MOPA architectures and perform with high speed and accuracy. It does not require frequency shifter (AOM) and explicit phase knowledge (phase retrieval algorithms are obsolete), hence is quite simple in implementation.

Another CBC technique based on a spatial filter, single detector and stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm was suggested in 2013 (Fig. 2).

On June 19th of 2013 a patent application was submitted[10)] and in January of 2014 the technique was presented at 34th biannual meeting of the Laser Society of Japan.[11)]



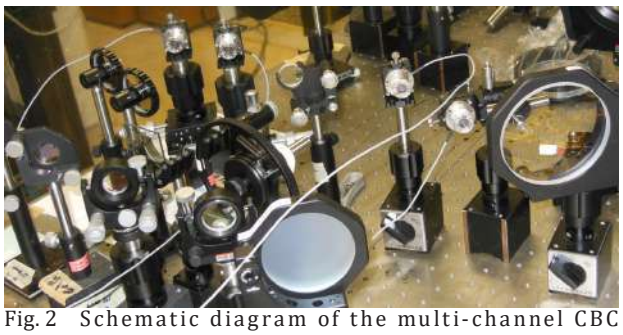


Fig. 2 Schematic diagram of the multi-channel CBC technique based on spatial filter, single detector and stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm (top); snapshot of the apparatus setup (bottom). Four channels and the reference beam paths are shown by color lines for clarity.

Details of this CBC technique with some application examples have been described in ILT's 2013 annual progress report and in other academic publications.[12,13)]

In the second technique, our goal was employing just a single photo-detector (PD) for all channels together with a simple phase control algorithm, because in some specific applications like in coherent LIDAR, employing just a single photo-detector (PD) for all channels together with simple phase control algorithm is desirable.

We proposed a simple solution to this problem by introducing a spatial modulator between the beam splitter and collimating optics in the path to the single detector. The idea was simple: dividing the N number of beams into clusters and doing CBC in sequence, with as small number of beams as possible. As a proof of a principle experiment, we constructed and demonstrated the new technique for 5 beams. The sensitivity for the constructed experimental set-up was estimated to be λ/30.

Although these techniques were intended for high-power laser CBC, there were only proof-of-principle experiments and no real applications could be done until the NEDO project "High-power laser development for efficient material processing applications" started. The goal was to develop single mode, 400 ps ~ 10 ns adjustable pulse duration, high repetition rate (500 kHz – 1 MHz), tunable (1040 nm ~ 1060 nm) high average power (~ 150 W) 12 laser amplifier units based on ytterbium (Yb) doped, large mode area (LMA) photonic crystal fibers (PCF).

In the final design of the laser system with kilowatts class average power, beam combining concept has been introduced as a practical mean to increase the output power and brightness of the laser system. We were

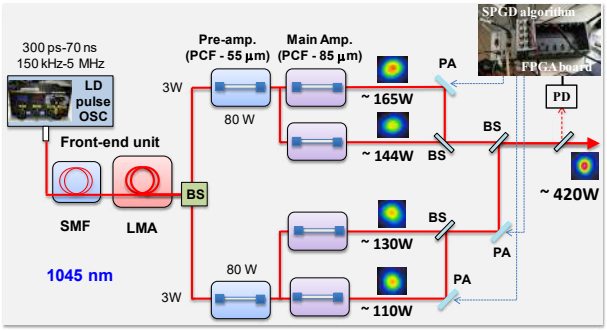


Fig. 3. Laser system design and basic architecture for four ns-pulse beam, single detector, filled aperture coherent beam combining

entrusted with the third unit of the four amplifier beams working at 1045 nm wavelength (Fig. 3).

Our goal within the project was coherently combining these four beams and delivering it to the neighboring room for further wavelength combining with other two units emitting at 1035 nm and 1040 nm, respectively.

From the very beginning of the project several problems emerged: First, our original CBC techniques were developed for tiled aperture design, while in the NEDO project, due to required second- and third- harmonics generation, filled aperture (FA) CBC was mandatory. Moreover, our techniques were intended for CW mode applications while in the NEDO project high repetition rate pulsed beams combination was required. For compactness of the system, single detector based feedback control was required, and finally, it should have at least 1 kHz bandwidth for fast and effective phase locking performance.

We carried out detailed quantitative analysis of pulsed beams interference visibility and coherence length influence on beam combining efficiency. The system stability and required phase-lock bandwidth tests have been performed as well. We modified the CW mode CBC technique into the pulsed mode CBC by simply employing a narrow bandwidth (low speed) photo-diode detector.

We consequently and persistently addressed all those challenges and a prototype CBC system based on binary-tree diffractive optical elements (in our case beam splitters) configuration was built. An algorithm based on the Bernoulli discrete probability distribution was developed, and proof of the principle experiments were successfully performed and demonstrated.[14)]

The final problem was still unsolved: Although the applied piezo-actuators had ~ 6 kHz bandwidths, the SPGD algorithm was running on a PC, and PCs have inherently slow latency time. After some consultations, we found a simple solution to this problem by introducing a field-programmable gate array (FPGA) unit with several kHz bandwidth resolution. First high-power (~ 50 W) CBC demonstration was successful.[15], [16)] Afterwards, we carefully studied all FA CBC degradation sources and optimized the system performance where possible.[17], [18)] High combining efficiency (~ 76 %) acceptable for the project was achieved. Finally, we got permission to use four laser amplifiers built by the ILE researchers.

The final system, shown in Fig. 4, was built and ready for integration into the wavelength beam combining system. To do that, we had to transfer the beam about 25 meters to the main experimental room. All precautions handling the high-power (~ 500 W average power) laser beam were met but... a curiosity was in the play. Namely, the combined beam power measured in the main room was always significantly lower than the beam power measured immediately after the CBC unit. We checked the mirrors used for beam propagation, measured the beam scattering losses in the air, etc. but during the whole day could not find the main reason for the ~ 100 W power loss. Clueless, desperate and tired, we did not know what to do and how to proceed, when a co-researcher discovered that the day before a new dichroic mirror at a different wavelength, just before the power-meter, was tested... well, eventually the problem was discovered and solved.

The NEDO project was successfully completed. More than 1.5 kW, ~ MHz repetition rate, ~ ns pulse infrared beam for advanced material processing applications such as cutting of thick carbon fiber reinforced plastics (CFRP) sheets, was obtained.[19-21)] Moreover, second harmonics (green) and third harmonics (blue) were also successfully

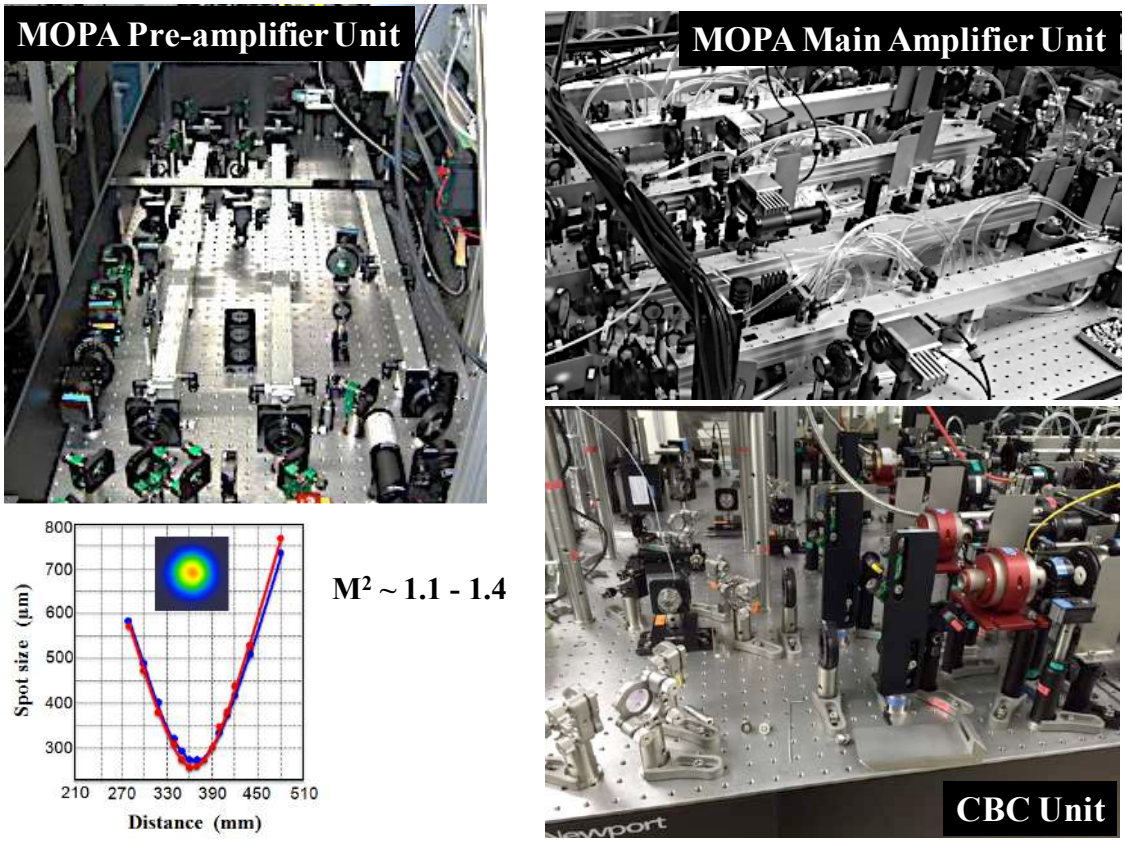


Fig. 4. Snapshots of high-power MOPA and CBC system: (clockwise from the top) MOPA pre-amplifier unit, main amplifier unit, CBC unit and the resulting beam's M2 beam quality parameter measurement example.

generated and applied in material processing field.

In summary, the NEDO project was an example of cooperation between ILT and ILE. For me personally it was a challenge, a challenge never to give up! The accumulated knowledge and learned lessons will always accompany and help me in my future work.

References

1) T. Sakurai, H. Furuse, H. Chosrowjan, J. Kawanaka, N. Miyanaga, S. Ishii, M. Fujita, and Y. Izawa: Proceedings of the ALPS'13, 107-108, 2013.
2) H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga, H. Chosrowjan, M. Fujita, K. Takeshita, and Y. Izawa: Opt. Express 20 (19), 21739-21748, 2012.
3) H. Furuse, H. Chosrowjan, J. Kawanaka, N. Miyanaga, M. Fujita, and Y. Izawa: Opt. Express 21 (11), 13118-13124, 2013.
4) H. Furuse, T. Sakurai, H. Chosrowjan, J. Kawanaka, N. Miyanaga, M. Fujita, S. Ishii, and Y. Izawa: Applied Optics, 53 (9), 1964-1969, 2014.
5) T. Sakurai, H. Chosrowjan, H. Furuse, S. Taniguchi, T. Kitamura, M. Fujita, S. Ishii, and Y. Izawa: Applied Optics, 55 (6), 1351-1355, 2016.
6) K. Hamamoto, T. Morioka, S. Nishikata, N. Inoue, J. Nakatani, S. Taniguchi, H. Chosrowjan, and Y. Izawa: Proceedings of the ASSL'15, 1-3, 2015.
7) 国内特許、特願 2012–009972、(特開 2013–148769) 「複数ビーム結合装置」(2012), 濱本浩一、山田隆弘、ハイクコスロービアン、古瀬裕章、藤田雅之、井澤靖和、河仲準二、宮永憲明
8) H. Chosrowjan, H. Furuse, J. Kawanaka, N. Miyanaga, M. Fujita, K. Hamamoto, T. Yamada, and Y. Izawa: Proceedings of the ALPS'12, 127-128, 2012.
9) H. Chosrowjan, H. Furuse, M. Fujita, Y. Izawa, J. Kawanaka, N. Miyanaga, K. Hamamoto, and T. Yamada: Opt. Lett. 38 (8), 1277-1279, 2013.
9) 国内特許、特願 2013 － 128814、(特開 2015–005572) 「ビーム結合装置、ビームの結合方法」(2013), 石井伸他、ハイクコスロービアン、古瀬裕章、藤田雅之、井澤靖和、染川智弘
10) H. Chosrowjan: 招待講演、レーザー学会第 34 回年次大会 , 北九州国際会議場、1 月 20 日 -22 日、2014.
11) H. Chosrowjan, S. Taniguchi, M. Fujita, H. Yoshida, N. Miyanaga, and Y. Izawa: レーザー学会第 4 7 1 回研究会報告、471 (5), 1-5, 2014.
12) T. Kitamura, H. Chosrowjan, T. Somekawa, M. Musha, and Y. Izawa: Special Issue on High Stability and High Brightness Laser Using Beam Combining Technique, The Rev. of Laser Engineering, 44 (6), 390-394, 2016.
13) H. Chosrowjan, S. Taniguchi, M. Fujita, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga, and Y. Izawa: Proceedings of the ALPS'14, 151-152, 2014.
14) G. Khosrovian, S. Taniguchi, M. Fujita, Y. Izawa, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, and N. Miyanaga: Proceedings of the Laser Optics'14, DOI: 10.1109/LO.2014.6886323 IEEE Xplore Digital Library, 2014.
15) T. Kitamura, H. Chosrowjan, S. Taniguchi, M. Fujita, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga, and Y. Izawa: Proceedings of the ALPS'15, 179-180, 2015.
16) H. Chosrowjan: Special Issue on High Stability and High Brightness Laser Using Beam Combining Technique, The Review of Laser Engineering, 44 (6), 357-362, 2016.
17) H. Chosrowjan, T. Kitamura, S. Taniguchi, M. Fujita, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, N. Miyanaga, and Y. Izawa: Proceedings of the ALPS'16, 268-269, 2016.
18) H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga, T. Yamamura, T. Sakagawa, M. Tsukamoto, H. Chosrowjan, T. Kitamura, M. Fujita, and Y. Izawa: Proceedings of the ALPS'15, 283-284, 2015.
19) H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga, H. Chosrowjan, T. Kitamura, T. Yamamura, and T. Sakagawa: Special Issue on High Stability and High Brightness Laser Using Beam Combining Technique, The Rev. of Laser Engineering, 44 (6), 363-368, 2016.
20) G. Khosrovian, T. Kitamura, M. Fujita, Y. Izawa, K. Tsubakimoto, H. Yoshida, and N. Miyanaga: Proceedings of the Laser Optics'16, DOI: 10.1109/LO.2016.7549703, IEEE Xplore Digital Library, 2016.

レーザー開発

メタマテリアルによる電磁波放射源開発基礎研究

李　大治
レーザーエネルギー研究チーム

1．はじめに

光通信に代表されるように、電磁波は情報伝送における重要な担い手である。近い将来、超高度情報化社会を迎えるにあたり、その重要性はますます高くなると予想される。ところが、電磁波と自然界に存在する物質との基本的な相互作用はほぼ理解されており、その利用に関しては限界も見え始めている。超高度情報化社会の実現へ向け、この限界を打開するために、新しい電磁的特徴を持つ人工物質（メタマテリアル）である左手系材料が注目されている。通常の物質では屈折率は正であり、その中を伝播する電磁波は電場、磁場、波数ベクトル（伝播方向）の方向が右手系の関係になるため右手系物質と呼ばれる。しかし、誘電率と透磁率が共に負の物質は、負の屈折率を有し、その中では電場、磁場、波数ベクトルの方向が左手系の関係を持つため、左手系物質と呼ばれる。このような系は全く新しい光学材料として機能する可能性を秘め、特異な屈折効果（図 1）や逆ドップラー効果、逆チェレンコフ放射等の電磁波現象が予想され、学術的基礎研究が活発に行われ、応用面の研究も展開されている。　務

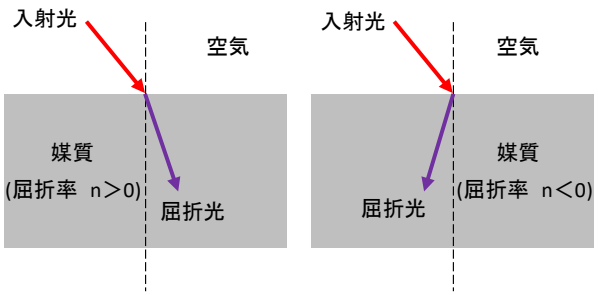


図 1　正屈折率と負屈折率媒質の屈折特性

一方で、小型の電子ビームを用いた電磁波放射装置はマイクロ波からテラヘルツ波までの広い帯域で重要な電磁波放射源として使われている。ところが、電子ビームと通常の誘電体や金属構造との相互作用を利用する電磁波の放射では、発振のための最低限の電流強度や放射強度に限界がある。しかし、金属を電磁波の周期よりも十分短い周期で加工した人工構造体では、構造をうまく設計すれば、有効誘電率や有効透磁率を同時に負にすることができる。このとき、屈折率は負となり、従来と異なる相互作用が期待でき、新しい物理メカニズムによる新型電磁波放射源の開発が可能と考えられる。

我々は、科学研究費と松尾学術振興財団の助成により、従来の電子ビーム放射を用いた電磁波放射の手法に、新たに登場した左手系メタマテリアルを導入し、新型光源を開発する研究を行ってきた[1-34]。兵庫県立大学の宮本修治教授、大阪大学の故萩行正憲教授、中嶋誠准教授、京都大学の橋田昌樹准教授、関西大学の浅川誠教授、大阪産業大学の綱脇恵章教授、UESTC（University of Electric Science and Technology of China）の Y. Wei 教授、Z. Yang 教授らと、主として理論面から共同研究を行っている。

2．相互作用新理論

表面電磁波を用いたコヒーレントな放射源（スミス･パーセル型やチェレンコフ型など）では、電子ビームと電磁波との相互作用を効率よく生じさせる必要があり、その放射機構を正しく物理的に表現し、正確な理論を導出することが不可欠である。我々は、電子ビームと周期構造体との相互作用のメカニズムに対する物理的イメージが、従来の理論でのそれと大きく異なる新発想を提案し、それを数学的に表現するために、新しい方程式を構築し、物理の本質を正しく反映した厳密な理論システムを確立した[5,8-10]。周期構造体グレーティング型放射源を例として新理論の発想を紹介する。

グレーティング表面電磁波の分散曲線とエネルギー流の伝播方式に関して従来の考えを説明する。表面電磁波の分散カーブ（図 2）を中心点で分け、左の半分と右の半分の領域で考える。左の半分の領域では、電磁波位相の伝搬方向が電磁波エネルギー流の方向と一致しており進行波と呼ばれる。右の半分では方向が逆となるため、後進波と呼ばれる。電子ビームが後進波と相互作用する場合は、電磁波エネルギーがグレーティングの末端から先端へ伝搬するため、自然にフィードバックがかかり、キャ

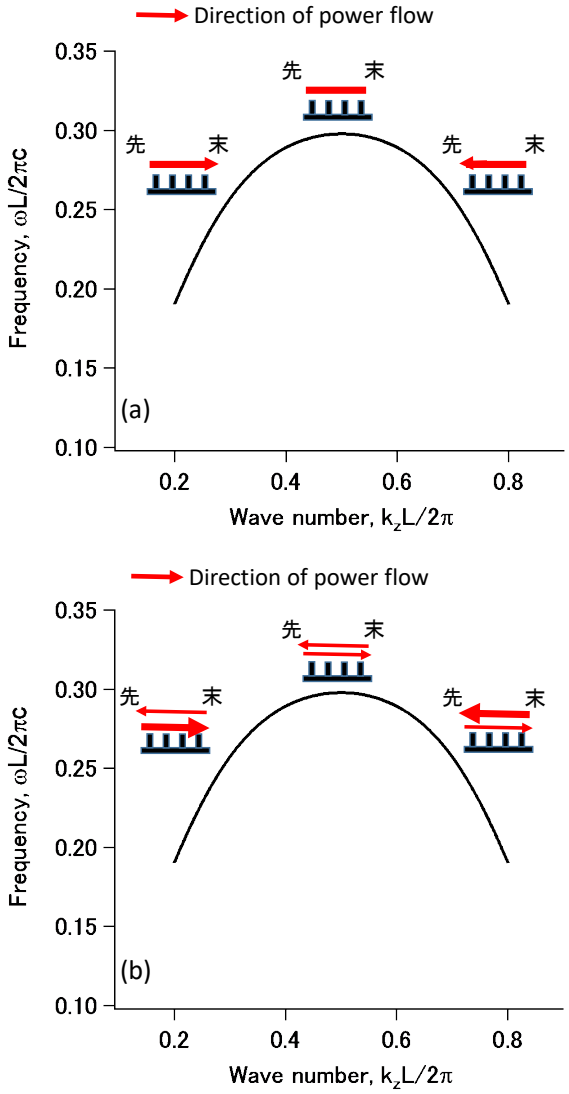


図２　表面電磁波の分散特徴曲線とエネルギー流の伝搬方式の (a) 従来理論の考えと (b) 新理論の考え

ビティを使わなくても発振が可能となる。ただし、共振器として末端に入力がないので、電磁場が末端に存在しないという境界条件が設定されている。一方、電子ビームが進行波と相互作用する場合には、エネルギーが先端から末端に伝搬するため、後進波のような自然なフィードバックが起こらないので、キャビティを使わないと発振できない。しかし、シミュレーションの結果では、進行波の場合でも後進波と同様にキャビティを使わなくても発振が可能となるため、理論結果と一致しない。さらに、中心点では、群速度がゼロになることで、エネルギー流がそこで止まるという怪異な考えになる。我々の新発想は従来の理論と異なり、分散カーブ上のどの位置でも末端向きと先端向きの電磁波が同時に存在するとしている。また、それぞれの電磁波の位相伝搬方向とエネルギー流の伝搬方向は一致している。右半分の領域では、末端向きのエネルギーよりも先端向きのエネルギーが多く、左半分の領域では、逆に先端向きエネルギーよりも末端向きのエネルギーが多い。中心点では、先端向きのエネルギーと末端向きのエネルギーが等しい。このように考えると、従来の理論の中に、位相伝搬方向がエネルギー流伝搬方向と逆になることや、中心点でエネルギーが止まることなどの異常な概念がなくなる。さらに、左半分でも先端に向かうエネルギーがあるため、右半分と同様に自然なフィードバックがあり、キャビティを使わなくても発振できるため、シミュレーションにより観測される結果と一致する。

この相互作用新理論はグレーティングをベースにして築くことにしているが、進行波管、後進波管、メタマテリアル新電磁材料などのあらゆる周期構造体と電子ビームとの相互作用に応用できる。

３．負の屈折率媒質による電磁モード特性

真空と誘電体との境界面に沿って伝搬する表面電磁波は、チェレンコフ型の電磁波放射源の開発に重要な役割を果たすことはよく知られていることである。一定の速度で誘電体表面を移動する電子ビームは、電子の速度と同期した位相速度を持つ表面電磁波と相互作用し、また、発振条件を満足させれば、電磁波が増幅されて空間に放出される。そのため、表面電磁波の研究は小型の電磁波放射源の開発に重要である。

我々は負の屈折率を有する媒質平板における電磁モードを研究した[1,2]。無限厚さ、有限厚さ、金属基板付きから構成された三つの媒質平板モデルを解析して、表面電磁モードの存在条件を導出した。その結果を図３に示す。

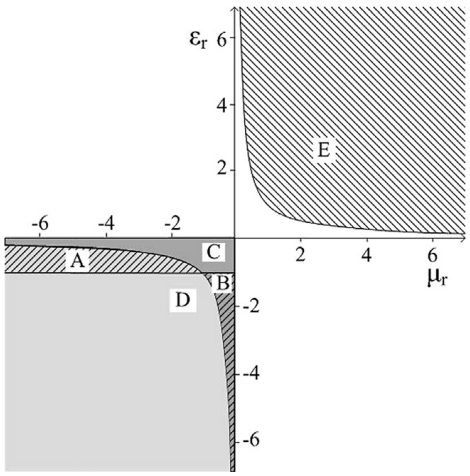


図３　平板モデルにおける電磁モード存在の誘電率と透磁率依存性

詳しい解説は参考文献 (2) に記述してあり、ここでは簡略に述べる。無限厚さの平板においては、正の屈折率の場合には表面電磁モードが存在しないが、負の屈折率の場合には、A と B の領域に存在する可能性がある。有限厚さと金属基板付きの平板においては、正の屈折率の場合には表面電磁モードが E の領域に存在する可能性があり、負の屈折率の場合には、A、B、C、D の領域、つまり全区域に存在することが可能である。境界条件を考慮してマクスウェル方程式を解くと、具体的な電磁モードを解析できる。計算の一例として負の屈折率有限厚さ平板において励起される二種類の電磁モードの磁場分布を図 4 に示す。モードの励起条件や電磁伝搬特性などの詳細は参考文献 (2) に記述した。

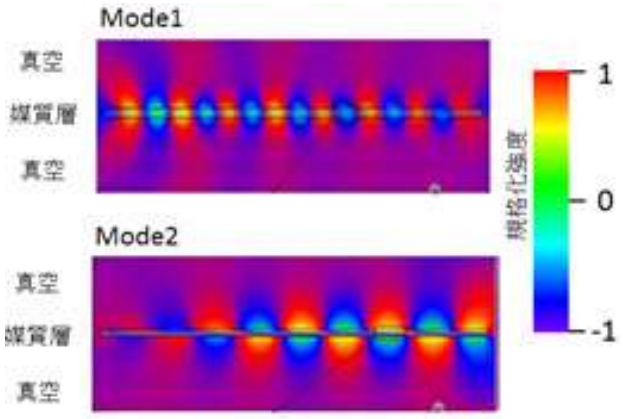


図 4　負の屈折率平板に励起される二種類の電磁モードの磁場分布図

4. 新型電磁波放射発振器

従来のチェレンコフ型電磁波放射を利用した発振器では、電子ビームと誘電体表面を伝搬する進行波との相互作用を維持するために、外部の反射機構によるフィードバックが不可欠である。一方、周期的な溝を持つ金属構造体を用いた後進波管型の発振器では、構造体表面を伝搬する後進波を利用するため外部の反射機構が不要となるが、後進波は電子ビームと相互作用した進行波と同時に構造体の表面（構造体外部）を伝搬するためフィードバックが弱く、これが装置の効率を低下させる要因となっている。我々は負の屈折率を持つ媒質表面に存在した、低エネルギーの電子ビームと相互作用できるような電磁波モードを発見した [1)]。この電磁波モードは負の屈折率物質に対してのみ現れるモードで、正の屈折率物質に対しては存在しないものである。この電磁波モードの特徴は、従来の誘電体や周期的な溝の構造体などの表面に存在する電磁波モードと異なり、媒質の表面を進行波のように伝播する一方、媒質内部では後進波のように伝播する。これを活用すれば、外部の反射機構が不要で、効率の高いチェレンコフ型電磁波放射発振器を実現することが可能となる。図 5 に示したように、媒質の表面を放射装置の末端に向けて伝搬する進行波は、電子ビームとの相互作用により増幅され、獲得したエネルギーは構造体内部の後進波を通じて先端（相互作用の開始点）に運ばれるため、外部の反射機構なしに自然なフィードバックを達成できる。前述の相互作用新理論を用いて解析とシミュレーションにより、相互作用の基礎原理を解明し、この発想を検証した。計算の一例として、図 6 に指数増幅の発振様子を示した。

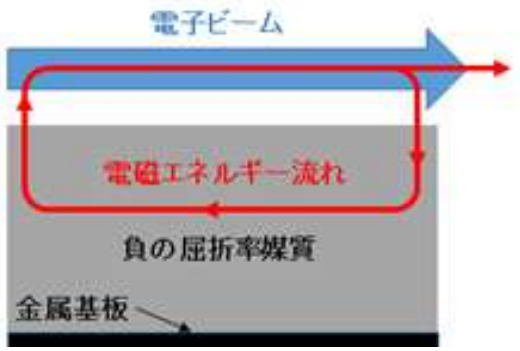


図 5 外部反射機構なしチェレンコフ型発振器

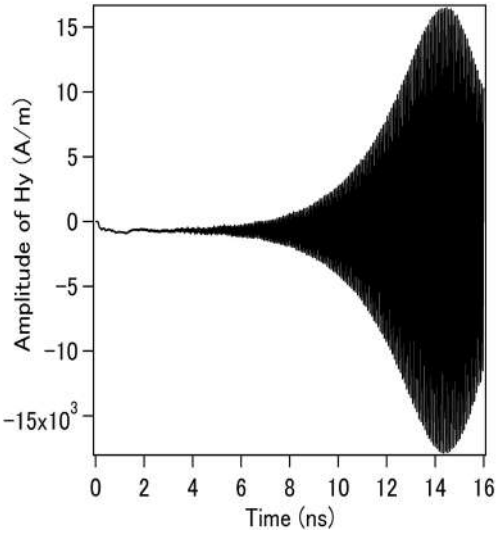


図 6　外部反射機構なしチェレンコフ型発振器の発振計算例

5．負の屈折率光学素子設計

誘電率と透磁率は電磁波モードの属性を決めるため、実際の応用には重要な研究項目である。前述の理論モデルを解析した結果により、実際の応用で要求される負の屈折率を実現できるような実際の人工材料をデザインした [35)]。誘電率と透磁率をコントロールできるような人工材料の研究は、現在も世界的に注目されているフロンティ

アな課題である。これまでの研究結果では、金属分割リングで透磁率をコントロールして金属棒で誘電率をコントロールする方法がある。分割リングと棒を周期的に配列することで放射機構用の平板形の構造体を作ることができる。分割リングと棒のサイズは波長より 10 倍程度小さいことが要求され、その構造のパラメータにより誘電率と透磁率が決まる。

デザインの一例として、電場と磁場三次元成分を持つ電磁波に対応できる負の屈折率を有する素子を図 7 に示した。金属は銅、基板材料は Rogers5880 を採用した。

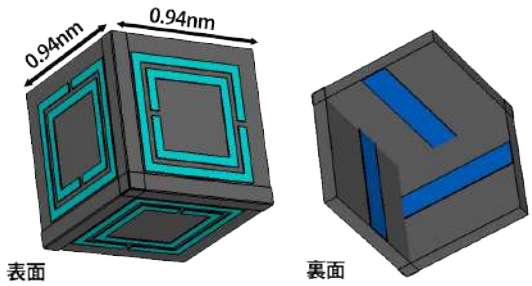


図 7　金属分割リングと棒を構成した負の屈折率を有する光学素子

構造のシミュレーション結果により、比誘電率と比透磁率を導出し、その結果を図 8 に示した。図 8 によると、25.6　GHz 付近で比誘電率と比透磁率が両方とも負になり、負の屈折率が得られている。このような素子を周期的に配列してから負の屈折理材料を構成する。

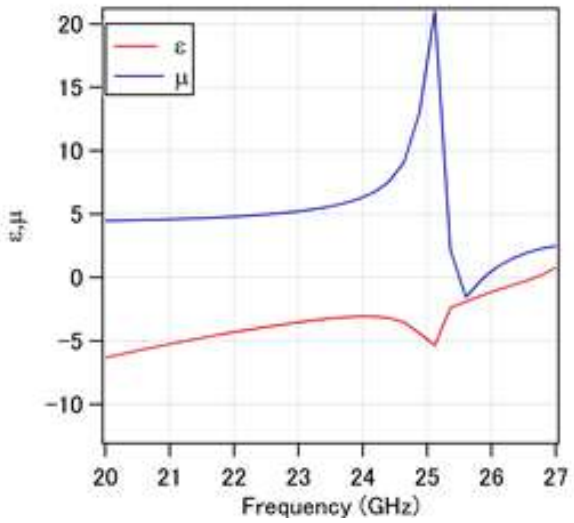


図 8 比誘電率と比透磁率の周波数依存性

6．まとめ

電磁人工材料メタマテリアルは、世界的に注目されており、小型で高出力電磁波を発生する装置を製作するための、重要な構成材料と期待される。人工材料では、必要な誘電率と透磁率をデザインできるため、従来の誘電体では不可能な物理現象を生じさせることができる。本研究では、従来の電子ビーム放射を用いた電磁波放射の手法に、新たに登場したメタマテリアルを導入し、従来の限界を打ち破る新型光源（特にテラヘルツ放射源）を開発する基礎研究を実施した。今までの研究結果によると、負の屈折率グレーティングにより誘起されたスミス・パーセル自然放射は正の屈折率、あるいは金属グレーティングで誘起されるスミス・パーセル自然放射より強く、それを電子放射装置に応用するとコヒーレントなテラヘルツ放射の出力が高めることが可能と考えられる。また、負の屈折率媒質については、表面波の存在条件とその電磁的性質、及びその物理メカニズムを明らかにした。その上に、従来の低エネルギー電子ビームによる電磁波発振器の原理と異なり、外部の反射機構を使わず、自然なフィードバックを用いた効率の高い電磁波発生用の共振器を提案した。これらの成果は、非線形光学効果によるレーザー励起のテラヘルツ波発生にも応用可能となり、テラヘルツ波工学とその応用に大きな影響を与えると予想される。今後、メタマテリアルと他の新規光電子材料（例えば、グラフェン）を結合し、性能の高い光源を目指して新たな放射メカニズムを探求する。

参考文献

1) D.Li, Y.Wang, M.Hangyo, Y.Wei, Z.Yang, S.Miyamoto., Appl. Phys. Lett. 104, 1940102 (2014)
2) Y.Wang, Y.Wei, D.Li, M.Hangyo, Y.Gong, J.Feng, Physics Letters A 378, 2345 (2014)
3) Minghao Zhang, Yanyu Wei, Guo Guo, Lingna Yue, Yuanyuan Wang, Xianbao Shi, Xianfeng Tang, Yubin Gong, Wenxiang Wang, and Dazhi Li, Japanese Journal of Applied Physics 53, 036201 (2014)
4) 橋本智、陳彩華、小林花綸、川田健二、李大治、天野壮、宮本修治、電気学会論文誌　C、134、495 (2014)
5) D.Li, M.Hangyo, Z.Yang,Y.Tsunawaki, Y.Wei, Y.Wang, S.Miyamoto, M.R.Asakawa and K.Imasaki, Terahertz science and technology 6, 189 (2013)
6) Xiaopin Tang, Zongjun Shi, Ziqiang Yang, Dazhi Li, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 703, 64 (2013)
7) T.Fu, Z.Yang, Z.Shi, F.Lan, D.Li, X.Gao, PHYSICS OF PLASMAS 20, 023109 (2013)
8) D.Li, M.Hangyo, Y.Tsunawaki, Z.Yang, Y.Wei, SMiyamoto, M.R.Asakawa, K.Imasaki, Appl. Phys. Lett. 100, 191001

(2012)
9) Dazhi Li, M.Hangyo, Y.Tsunawaki, Z.Yang, Y.Wei, S.Miyamoto, M.R.Asakawa and K.Imasak, International Free-Electron Laser Conference Proceedings, 85 (2012)
10) D.Li, M.Hanygo, Y.Tsunawaki, S.Miyamoto, K.Imasak, International Symposium on Frontiers in THz Technology, 26-30 Nov. 2012, Nara, Japan
11) 李大治、高野恵介、中嶋 誠、宮本修治、「負の屈折率媒質 による電子ビームからの電磁波放射」、応用物理学会春季学術講演会、2015 年 3 月
12) 李大治、萩行正憲、宮本修治、「負の屈折率平板表面電磁モード研究」、応用物理学会春季学術講演会、2014 年 3 月
13) 李大治、萩行正憲、宮本修治、今崎一夫、「グレーティングによるテラヘルツ電磁波放射の新理論」レーザー学会第 454 回研究会、2013 年 12 月
14) 李大治、萩行正憲、宮本修治、今崎一夫、「グレーティングによる放射の理論研究」、応用物理学会秋季講演会、2013 年 9 月
15) 李大治、萩行正憲、今崎一夫、「メタマテリアルによるテラヘルツ放射源の研究」、応用物理学会春季学術講演会、2012 年 3 月
16) Luqi Zhang, Yanyu Wei, Minghao Zhang, Guo Guo, Yuanyuan Wan, Minghao Zhang, Zhigang Lu, Yubin Gong , Wenxiang Wang , Dazhi Li, Proceddings of International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves, 934(2014)
17) Chong Ding、Yanyu Wei, Luqi Zhang, Guo Guo, Yuanyuan Wang, Minghao Zhang, Zhigang Lu, Yubin Gong, Wenxiang Wang, Dazhi Li, Proceedings of International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves, 936 (2014)
18) Minghao Zhang、Yanyu Wei, Lingna Yue, Jin Xu, Zhigang Lu, Tao Tang, Dazhi Li, Proceedings of International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves, 933(2014)
19) Yuanyuan Wang、Yanyu Wei, Dazhi Li , Zhaoyun Duan, Yubin Gong, Wenxiang Wang, IEEE International Vacuum Electronics Conference proceeding, 465(2014)
20) 李大治、高野恵介、中嶋 誠、宮本修治「負の屈折率媒質による電子ビームからの放射の基礎研究」ミリ波・テラヘルツ波研究会、2015 年 2 月 27 日
21) Yuanyuan Wang、Yanyu Wei, Dazhi Li, Keisuke Takano, Makoto Nakajima, PHYSICS OF PLASMAS 22,083111, (2015)
22) D. Li ,Y. Wang, Y. Wei, Z. Yang, S. Miyamoto, IEEE Xplore, DOI:10.1109/IRMMW-THz.2015.7327572
23) 李大治、高野恵介、中嶋誠、宮本修治「負の屈折率媒質を用いた Cherenkov 自由電子レーザー」第６３回応用物理学会春季学術講演会、2016 年 3 月 20 日、東工大
24) 李大治、中嶋誠、橋田昌樹「グラフェンによるテラヘルツ波放射」マイクロ波、ミリ波、テラヘルツ波の技術とそのプラズマ加熱・計測への応用、2016 年 1 月 20 日、核融合科学研究所
25) D. Li, Y.Wang, M.Nakajima, M.Hashida, Y.Wei, S.Miyamoto, Physics Letters A 380, .2181 (2016)
26) Yuanyuan Wang,Yanyu Wei, Dazhi Li, Wanghe Wei, Guo Guo, Luqi Zhang, Chong Ding, Yubin Gong, Jinjun Feng, Gun-Sik Park, Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves 37, 10552016）
27) Minahara Takemura,Fukuko Yabu, Yuji Kuboda, Dazhi Li, Soichiro Yamaguchi, Makoto R. Asakawa, J. Jpn. Soc. Infrared Science & Technology 26, 50（2016）
28) D. Li,Y. Wang, M. Nakajima, M. Hashida, Y. Wei, S. Miyamoto, M. Tani, Proceedings of International Conference Infrared, Millimeter and Terahertz waves, DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2016.7758931
29) Yuanyuan Wang,Yanyu Wei, Wanghe wei, Xianbao Shi, Xia Lei, Qian Li, Hairong Yin, Jin Xu, Luqi Zhang, Chong Ding, Yubin Gong, Wenxiang Wang, Dazhi Li, IEEE International Vacuum Electronics Conference proceedings, DOI: 10.1109/IVEC.2016.7561872
30) Wanghe Wei,Yanyu Wei, Lingna Yue, Zhigang Lu, Luqi Zhang, Minzhi Huang, Yubin Gong, Wenxiang Wang, Dazhi Li, IEEE International Vacuum Electronics Conference proceedings, DOI: 10.1109/IVEC.2016.7561888
31) Chong Ding,Yanyu Wei, Yuanyuan Wang, Qian Li, Xia Lei, Wenxiang Wang, Dazhi Li, Yubin Gong, IEEE International Vacuum Electronics Conference proceedings, DOI: 10.1109/IVEC.2016.7561870
32) 李大治、中嶋誠、橋田昌樹「グラフェン表面プラズモンポラリトンによる電磁波放射」応用物理学会春季学術講演会、2017 年 3 月 15 日

33) Dazhi Li, Masahiko Tani, Makoto Nakajima, Makoto R. Asakawa, Masaki Hashida, The 6th International Workshop on Far-Infrared Technologies, 7-9 Mar. 2017,Fukui, Japan
34) 李大治「基本波で放射するスミス・パーセル自由電子レーザー」GHz ～ THz 帯における高電力発振源の開発と応用研究会 , 2017 年 1 月 27 日
35) D. Li, Y. Wang, Y. Wei, Z. Yang, S. Miyamoto, IEEE Xplore, DOI: 10.1109/IRMMW-THz 2015. 7327759

レーザープロセス

レーザープロセス

パルスレーザー加工の研究展開

藤田雅之
レーザープロセス研究チーム

1. レーザー転写

2006年6月から2009年3月までの3年間、NEDOプロ「高集積・複合MEMS製造技術開発事業」において「多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術」開発に携わったことで、MEMSの聖地とも言える東北大学江刺研究室、ひいてはMEMS業界とつながりを持つようになった。

2011年～2012年に江刺研の田中秀治先生から新たなレーザー転写という研究開発でお声がけをいただいた。内閣府最先端研究開発支援プログラム「マイクロシステム融合研究開発」(プロジェクトリーダー:江刺正喜)の「ヘテロ集積化初期試作：ヘテロ集積化プロセス技術の研究開発」(サブテーマ責任者:田中秀治)でレーザー転写をMEMSウェハに適用しようとするものであった。図1にレーザー転写の概念図を示す。具体的にはサファイア基板上に形成された強誘電体であるBST（チタン酸バリウムストロンチウム: Barium Strontium Titanate）をレーザーを用いて剥離し、別のウェハ基板に転写するのであるが、まずは剥離（接着力の低下）を引き起こすレーザー照射条件（波長、パルス幅、集光強度、掃引速度等)を調べることにした。試料は東北大学で作製され、レーザー総研は様々な波長/パルス幅（800nm/100fs, 1064nm/10ns, 1064nm/200ns, 532nm/10ns, 532nm/700ps, 355nm/20ns）のレーザーを用いて剥離の条件出しを行った。このうち355nm/20nsは東北大学から貸与されたレーザーであった。

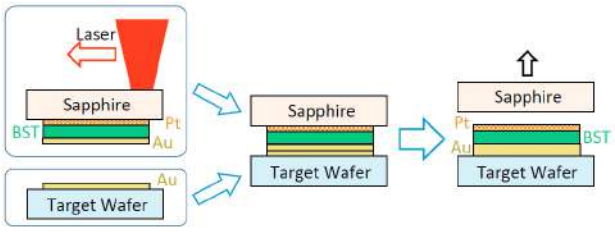


図1　レーザー転写の概念図

条件出しで一番困ったことは、試料の状態がばらついていたことである。異なるチャンバーで製作された試料の特性が異なり、サファイアとBSTの間にあるPt層の厚みが全くモニターされていなかった。Pt層はレーザーが直接照射されるため、そこでのレーザー吸収とPt層の挙動が鍵となると考えていたのだが。試料のバラツキも含めて安定な剥離を実現する条件を見いだすことが求められていると感じた。

東北大学との間で試料と照射・剥離結果をやり取りしながら様々なレーザー照射を2年間試みた結果、波長が短くパルス幅が長いほど剥離に要するレーザーパワーが低下し、ガウシアン分布よりもフラットトップの照射強度分布の方がさらに低パワーで剥離/転写が可能であることが確認できた。予算が限られ、互いに距離があったためか、レーザー照射前後でのBSTの物性等に関して議論することもなく2年間の委託研究が終了した。以後は東北大学で研究開発が続けられ、東北サイドでの研究担当であった佐本哲雄さんは2015年に博士論文をまとめて学位を取得された。

2013年3月に開催された江刺正喜先生の最終講義と退職祝賀会に出席させていただいたが、学界はもとより産業界からも海外からも多くの方々が参加されていた。先生のお人柄が偲ばれるエピソードが紹介され、MEMSという新分野、一時代を築かれた偉大な先生であると感じた次第である。

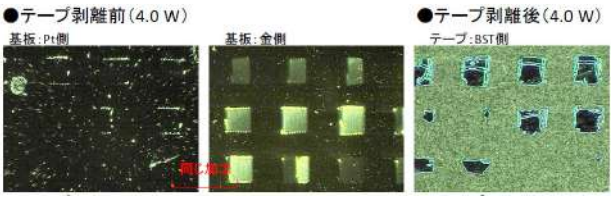


図2　波長/パルス幅が532nm/10nsのレーザーで500 μm角の領域を照射した試料の顕微鏡写真

2.CFRPのレーザー加工

CFRPのレーザー加工技術開発プロジェクトがNEDOにおいて2010年から5年間続けられた。2012年4月からはプロジェクト名称が「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」に変更され、研究開発項目「1.

CFRP 切断加工技術の開発」のサブテーマ 「(2) CFRP 加工技術の開発」と「(3) パルスレレーザー CFRP 用加工システムの開発」で産総研が中心となって研究開発が進められた。当該プロジェクトでレーザー総研はレーザー開発を担当したため、加工技術開発に携わることはなかった。

このプロジェクトは、2008 年度に（財）製造科学技術センターで行われた調査研究、2009 年度の NEDO 省エネ事前研究の流れを汲むもので、レーザー総研は当初から参画していたが、加工技術開発センターが技術研究組合傘下の産総研（つくば）に置かれた（人・モノ・金の距離が懸念された）ことと、超短パルスレーザー加工が含まれなかったことから分担を見送り、独自の路線で CFRP のレーザー加工技術開発に取り組むこととした。2009 年度の事前研究では厚さ約 2mm の CFRP をレーザー加工したが、超短パルスレーザーの平均出力が小さいために多大な時間を要してしまった。加工品質に非の打ち所が無いものの、“ 超短パルスレーザーは使えない ” という誤解が生じてしまった。確かに、厚さ数 mm の

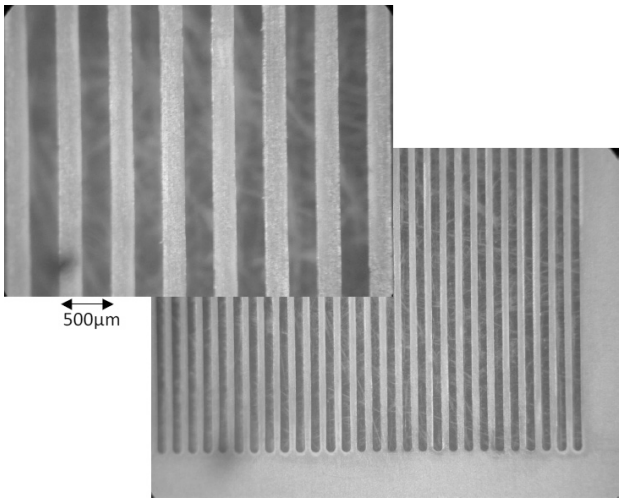


図 3　フェムト秒レーザーで厚さ 100 μ m の一方向 CFRP に幅 250 μ m、長さ 30mm のスリットを形成

CFRP 加工においては実用性が低いと判断されても仕方がなかったのであるが、その加工品質を何とか活かせないかと考えた。そこで、2011 年度の NEDO 省エネ事前研究では厚さ数 100 μ m の極薄 CFRP を対象とする研究をスタートさせた。

この 2011 年度のプロジェクトは、NEDO 省エネルギー革新技術開発事業／事前研究で、研究題目は「レーザー精密加工を用いた次世代マスク製造技術の事前研究」、研究開発責任者は三菱化学テクノリサーチ社（MCTR）の三田雅昭氏であった。2010 年春から提案書の準備をし、2010 年秋の公募に対して、超短パルスレーザーの特徴を活かした CFRP の超精密加工を提案することとなった。中身は、蒸着用メタルマスクを CFRP マスクで置き換えようとする技術開発である。これは三田さんの発案によるもので、調査会社で活躍しておられた三田さんは様々な産業界におけるニーズ、シーズ、課題、裏話等々、知識が豊富な方であった。

残念ながら、2010 年秋の提案は不採択となった。そこで、再度三田さんのアイデアを盛り込んだ研究を 2011 年春に提案することとなった。当時、三田さんは電子デバイスの配線や電極形成を印刷技術で行う「プリンテッドエレクトロニクス」の将来性に惹かれ、阪大産研の菅沼先生の研究会に参加されていた。蒸着配線にしろ、印刷配線にしろ、どちらもマスクが必要となる。耐久性や軽量性に着目して 2 種類の CFRP マスク（蒸着マスクと印刷マスク）を開発する提案を 3 者（MCTR、レーザー総研、阪大産研）共同で行い、2011 年 7 月 15 日付けで採択通知が届いた。

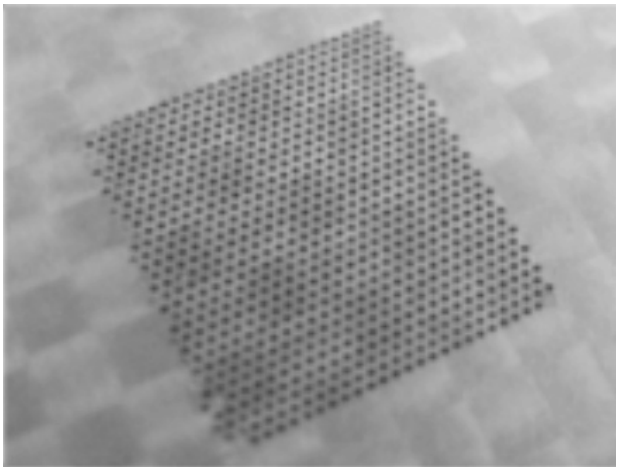


図 4　フェムト秒レーザーで厚さ 300 μ m のクロス CFRP に直径 400 μ m の穴加工を施してメッシュを形成

MCTR が m 級大型マスクの構造解析や材料設計、レーザー総研で CFRP マスクを試作し、阪大産研が CFRP マスクで配線をスクリーン印刷した簡易ディスプレイの試作を担当した。100 μ m 厚の一方向 CFRP に幅 250 μ m のスリットを加工したり（図 3）、クロス CFRP に 400 μ m 角や丸のメッシュを加工し（図 4）、蒸着やスクリーン印刷を試みた。また、産研では富士通テン社の協力を得て 3cm 級の有機 EL 発光デバイスの試作を行い、発光が確認された。

事前研究を無事に終了し、次の提案に向けた準備を進めた。次のステップは実用化研究となる。大学や研究所は後ろに下がり、出口企業を前面に出して提案しないと土俵に上がれない。三田さんを中心に、材料メーカー、

加工メーカー、蒸着メーカー、ディスプレイメーカーと大企業・中堅企業相手に交渉を重ねつつ、予備実験を行った。フェムト秒レーザーでは実用的な加工時間が達成できないのでピコ秒レーザーの可能性を探るべく、2012年7月には浜松ホトニクス社の福満氏を頼り、浜ホト製ピコ秒レーザー MOIL を使ったお試し加工を実施した（図5、図6）。また、蒸着メーカーの協力の下、小型ではあるが実際に CFRP マスクを用いて有機 EL を蒸着し、発光や汚染度の確認実験を行った。

結局、2012 年から 1 年かけて最大 7 機関と提案準備・交渉を進めたが、各社対応に温度差があり、話は立ち消えとなってしまった。出口に近い企業ほど、もっと見通しが立ってから持っておいで、というスタンスであった。川上から川下まで一気通貫で体制を立ち上げるには、それなりの技術の熟成が必要であることを痛感した。

2013 年度に入り近畿大学・前田佳伸先生の学生 2 名が研究に参加してくれることとなった。大河弘志君と大塚昌孝君である。卒論から修論までの 2 年半、大いに活躍してくれた。

大塚君のレーザー加工研究は卒研だけであったが（修士では染川研究員の下でレーザー計測のテーマに取り組んでもらった）、微細周期構造形成とナノインプリント

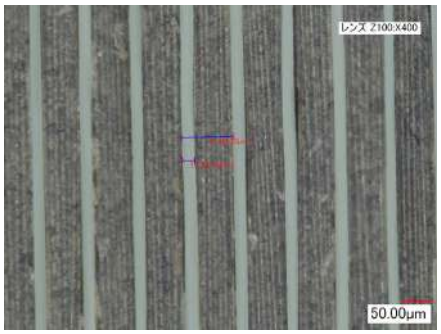


図5　浜松ホトニクス社製ピコ秒レーザー MOIL で厚さ約 100 μm の一方向 Pitch 系 CFRP に幅 30 μm、ピッチ 100 μm のスリットを形成（浜ホト社提供）

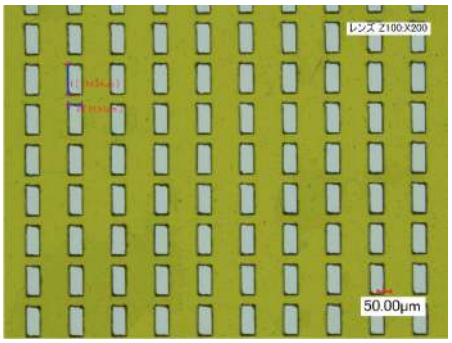


図6　浜松ホトニクス社製ピコ秒レーザー MOIL で厚さ 25 μm のポリイミドフィルムに 100 μm 級のスロットを形成（浜ホト社提供）

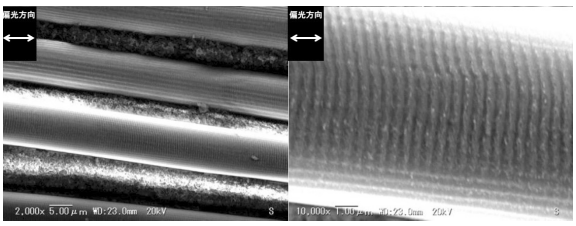


図7　炭素繊維表面に形成されたナノ周期構造の SEM 像。白色光を照てると虹色に発色する。

に挑戦してもらった。近畿大学・西籔和明先生の協力を得て、ステンレス板上に形成したナノ周期構造を樹脂に転写できないか試してもらった。素人のやっつけ仕事ではあったが、かろうじて樹脂を虹色に光らせることに成功した。CFRP の加工も手伝ってもらったが、真っ黒のはずの CFRP が虹色に光っていることに気付いた。図7に示す様に、炭素繊維の表面にナノ周期構造が形成されていたのである。

大河君には 2 年半みっちりと CFRP のレーザー加工に取り組んでもらった。彼が撮った加工試料の SEM 像は 3,000 枚を優に越える。手持ちのチタンサファイアレーザー（波長 800nm、パルス幅 100fs, 200ps）を使った加工は染川副主任研究員の努力により、やり尽くした感があった。そこで、阪急茨木市駅前（当時）に開発拠点を置くスペクトロニクス社（SPNX 社）に頼み込んで、ピコ秒レーザー（波長 266nm、パルス幅 35ps）を使わせてもらうことにした。SPNX 社に大河君を派遣し、岡田社長、営業の南さん、技術の折井さんの協力を得て、製品化前のバラック状態のレーザーを使って CFRP の切断実験を行った。波長、パルス幅共に短いため、条件を最適化すると熱影響が殆ど見られない加工が実現した（図8）。

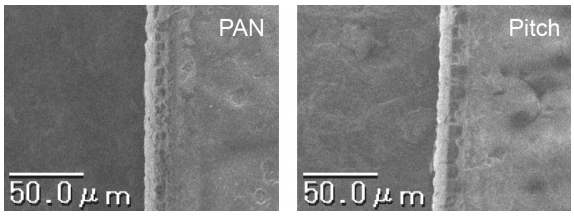


図8　スペクトロニクス社製ピコ秒レーザー（波長 266nm）で厚さ約 100 μm の一方向 CFRP を切断加工

レーザーによる過剰な加熱を避けるためには、超短パルスと言えども、高速掃引が不可欠となる。通常は数 100 万円するガルバノスキャナを使ってビームを掃引するのであるが、SPNX 社は高速掃引の加工実験に図9に示す高速モーターを利用していた。これを使えば、高価なガルバノスキャナは不要で、レーザー波長を変える

度にミラーを交換する必要も無い。ちょっとした実験テクニックを学んだ。この簡易掃引システムは後日 SPNX

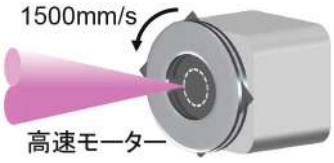


図 9　スペクトロニクス社で学んだ高速掃引の工夫。

社から購入することとなり、波長・パルス幅依存性の実験で大いに重宝した。

2014 年 4 月に国際会議 OPIC でスペクトラ・フィジックス社（SP 社）の Raj Patel 氏から、CFRP の加工に SP 社のレーザーを使ってみないか、と共同研究の提案を受けた。我々が使っていた極薄 CFRP サンプルに興味を持った様であった。こちらが CFRP サンプルを持ってカリフォルニアの SP 社に行くか、SP 社がレーザーを持って大阪に来るか、どちらかである。“CFRP は戦略物資に指定されているから国外に持ち出すのは難しい ” と答えると、“ 分かった、じゃぁ、レーザーを送る ” と言うのである。メールと電話で NDA（秘密保持契約）や実験計画の文書を取り交わした。

2014 年 9 月、阪大のテクノアライアンス棟 8 階にカリフォルニアから大きな木箱が届いた。平均出力 60W（当時最大）の UV レーザー（波長 355nm、パルス幅 2ns ～ 100ns）、QUASAR である。数日後には SP 社日本法人の技術者が来て、あっという間にレーザーが使える状態になった。早速、レンズを 1 枚置いて、SPNX 社から購入した高速モーターにサンプルを装着して加工を試みた。手持ちのパワーメーターは 30W までしか測れないので、とりあえず 25W で実験を行ったのであるが、試料が燃えて部屋中が臭くなった。cm クラスの高速モーターでは対応できないハイパワーだったのである。15W で何とか実験できるようになったが、サンプルの大きさに対して入熱が大きく、思うような結果が得られなかった。

事の次第を電話会議で SP 社に伝えると、60W が測れるパワーメーター、ガルバノスキャナ光学系 1 式が追加で送られてきた。レーザーもガルバノスキャナも極めて高機能なものが揃ったのであるが、いずれも PC 制御であり、使い方を覚えるだけで一苦労である。業を煮やしたのか SP 社はとうとう人も派遣してきた。

2014 年 12 月 15 日から 1 週間、SP 社から Jim Bovatsek 氏が X’mas 前にはるばるカリフォルニアからやってきて一緒に実験を手伝ってくれることとなった（図 10）。レーザー出力を 60W に設定しても、PC 制御でレーザーの ON/OFF とガルバノ掃引を同期させることで必要最小限の入熱で加工が可能となった。結局、4 日間で約 40 枚の加工試料（各試料に対して 4 ～ 5 カ所を加工）を作成することができた。解析すべき加工痕は約 200、大河くんは SEM に付きっきりとなった。

次いで、2015 年 3 月 23 日の週にも Jim 氏が来日し第 2 回目の共同実験を行い、4 月 15 日にレーザーが撤収された。図 11 に 2 回目の実験で作成したスリットを示す。条件を最適化すれば、超短パルスレーザーと遜色の無い微細加工ができることが分かってきた。

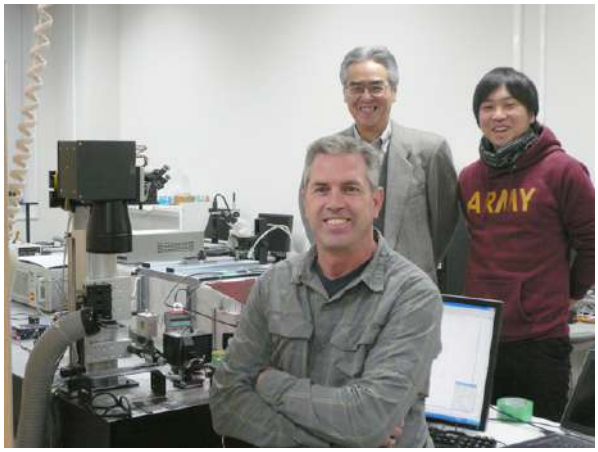


図 10　実験室にて。後ろ右が大河君、前が Jim 氏

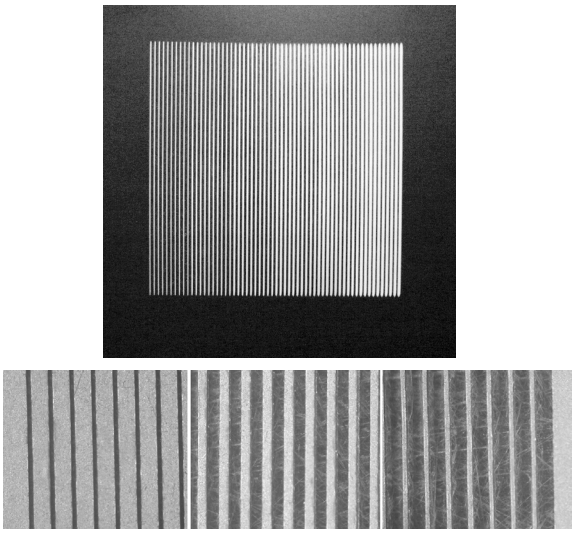


図 11　スペクトラ・フィジックス社製ナノ秒レーザー（波長 355nm）で厚さ約 100 μ m の一方向 CFRP にピッチ 500 μ m で形成したスリット。左から右へ徐々にスリットの開口を広げている。上は全体、下は拡大写真。

SP 社との共同研究成果は、ALPS2015、LiM2015、ICALEO2015 と 3 回の国際会議で発表したが、「実験室を阪大から借り、学生を近大から借り、レーザーを SP 社から借りて・・・」と、借り物競走の自慢のようなイ

ントロで話を始めたものである。皆様のご協力の賜物であった。データ解析は 2016 年半ばまで続いた。

2014 年度には、公益財団法人天田財団から一般研究開発助成をいただいた。研究課題は「短パルスレーザーを用いた炭素繊維強化複合材の微細加工技術の開発(AF-2014218)」である。2008 年度以降、手持ちの（或いは、借りてきた）レーザーを総動員して CFRP を切り刻んできた成果をまとめることにした。

図 12 に横軸パルス幅、縦軸波長で該当する加工結果の SEM 像をまとめたチャートを示す。これを見ると、パルスレーザーを用いた CFRP 加工のパルス幅・波長依存性の傾向が一目瞭然となる。パルス幅と波長が短い程、熱影響領域（ここでは、樹脂が蒸発して炭素繊維が露出した領域）が小さくなることが分かる。ただし、加工の善し悪しはパルス幅と波長だけではなく、集光強度も影響してくるために、実は 3 軸目として集光強度も考慮した三次元のチャートにすべきなのであるが、そこまでは手が回らなかった。

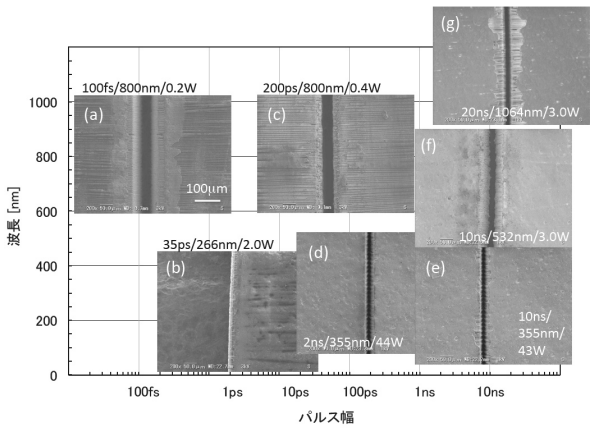


図 12　パルスレーザーを用いた CFRP 加工のパルス幅・波長依存性

熱影響領域が小さいと言うことは、吸収されたレーザーエネルギーが効率よくつかわれていることに相当するはずである。そこで、物理的に除去効率を評価してみた。照射エネルギー（吸収エネルギーではない）当たり除去された CFRP の質量を計算した結果が図 13 である。加工効率（mg/kJ）を円の面積で表現した。短パルス、短波長ほど円が大きくなり、効率が良い事が分かる。

一方で、“ 超短パルスレーザーは加工速度が遅く、実用性が低い ” という現実もある。産業界に目を向けたレーザー総研の立場としては、実用性の観点から評価することも重要となる。そこで、大胆にもレーザー装置の市場価格をエイヤで仮定して、経済的な加工効率を g/ 円の単位で評価してみた 35)。図 14 に g/ 円の単位で評価した CFRP のレーザー加工効率のパルス幅，波長依存性を示す。図 13 とは異なり、装置価格が手ごろなナノ秒レーザーが優位に立つのである。つまるところ、CFRP 加工に適したレーザーとは、ニーズに対して加工

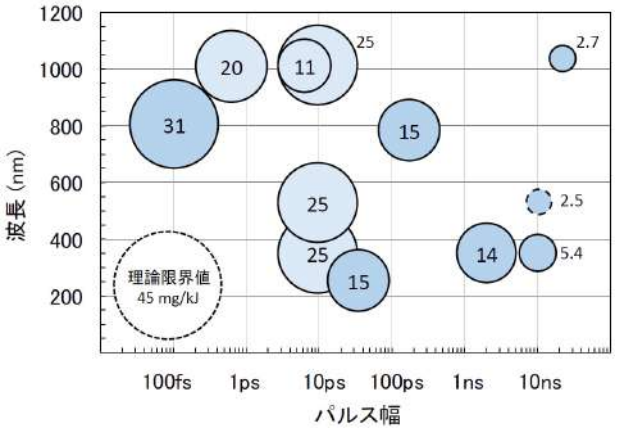


図 13　mg/kJ の単位で評価した CFRP のレーザー加工効率のパルス幅，波長依存性。それぞれの円の面積は加工効率（mg/kJ）に比例

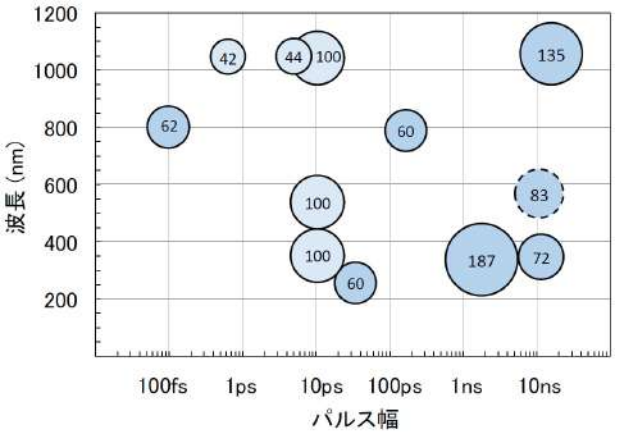


図 14　g/ 円の単位で評価した CFRP のレーザー加工効率のパルス幅，波長依存性。それぞれの円の面積は加工効率（g/ 円）に比例

コスト、品質、加工速度等のトレードオフで決まることになる。

図 12 ～図 14 をまとめるに当たり、大河君の 2 年半に亘る卒業研究のデータが非常に役に立った。ウサギのように目を真っ赤にしながら根気よく SEM 解析を続けた大河君に感謝を申し上げる次第である。彼は 2016 年 4 月、（株）アマダに就職した。

文中、一部敬称を略しています。

発表論文

1) S. Tanaka, M. Yoshida, H. Hirano, T. Somekawa, M. Fujita and M. Esashi, “Wafer-to-Wafer Selective Flip-Chip Transfer by Sticky Silicone Bonding and Laser Debonding for Rapid and Easy Integration Test”, Proceedings of IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2013, 20-24 Jan. 2013, pp.271-274.
2) T. Samoto, H. Hirano, T. Somekawa, K. Hikichi, M. Fujita, M. Esashi, S. Tanaka, “Wafer-to-wafer transfer process of barium strontium titanate metal-insulator-metal structures by laser pre-irradiation and gold-gold bonding for frequency tuning applications”, Proceedings of IEEE 26th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2013, 20-24 Jan. 2013, pp.171-174.
3) M. Fujita, T. Somekawa, T. Samoto, H. Hirano, K. Hikichi, S. Tanaka, and M. Esashi, “Laser Selective Transfer Process of Barium Strontium Titanate (BST) on a Sapphire Substrate”, Proceedings of ICALEO2013, 7-10 Oct. 2013, paper# M503, Miami (2013).
4) T. Samoto, H. Hirano, T. Somekawa, K. Hikichi, M. Fujita, M. Esashi and S. Tanaka, “Wafer–to–wafer transfer process of barium strontium titanate for frequency tuning applications using laser pre-irradiation”, J. Micromech. Microeng. 25 (2015) 035015.
5) 藤田雅之、田中秀治、宮永憲明、「積層 MEMS のためのレーザー支援ダイシング技術」、レーザ加工学会誌 Vol. 22, No. 2, pp.8-13 (2015).
6) 藤田雅之、「レーザ加工が得意な公設試　総論」、オプトロニクス , vol.388, No.4, pp.144-145 (2014).
7) 藤田 雅之，染川 智弘，尾崎 巧，吉田 実，宮永 憲明、中瀬拓也、小林　隆、「フェムト秒レーザーを用いた Al-Si 合金の低摩擦化加工」、レーザー研究、42 巻、4 号、pp.341-344 (2014).
8) 藤田雅之、「高輝度レーザーの産業利用」、放射線と産業 , 第 137 号（12 月 1 日）, pp.10-13 (2014).
9) 藤田雅之、「レーザーを用いたドライプロセス」、ケミカルエンジニヤリング、61（10）pp744-749 (2016).
10) M. Fujita, T. Somekawa, T. Ozaki, M. Yoshida, N. Miyanaga, “Dual Beam laser Grooving of CFRP by pulsed lasers”, LPCC-5-1, Proceedings of International Symposium on Laser Processing for CFRP and Composites 2012, 26 - 27 April 2012, Yokohama (2012).
11) M. Fujita, T. Somekawa, T. Ozaki, M. Yoshida, N. Miyanaga, “Dual Beam laser Grooving of CFRP by pulsed lasers”, Proceedings of ICALEO2012, 23-27 Sept. 2012, paper# M1202, Anaheim (2012).
12) 中井貞雄、井澤靖和、藤田雅之、近藤公伯、大道博行、三間圀興、佐宗章弘 ,「レーザー核融合の産業波及効果」、オプトロニクス , vol.369, No.9, (2012) pp.134-142.
13) 藤田雅之、染川智弘、「超短パルスレーザを用いた CFRP の微細加工」、第 78 回レーザ加工学会講演論文集 , ISBN-978-4-947684-79-0, (2012) pp.95-97.
14) 藤田雅之、「CFRP の切断・穴あけ・トリミング　3. ミクロ加工」、オプトロニクス , vol.373, No.1, (2013) pp.104-106.
15) 藤田雅之、「超短パルスレーザによる複合材料の微細加工」、光アライアンス , vol.24, No.1, (2013) pp.7-11.
16) M. Fujita, T. Somekawa, and N. Miyanaga, “Micromachining of CFRP with ultra-short laser pulses”, Proceedings of Laser Processing for CFRP and Composite Materials 2013, 23 - 25 April 2013, LPCC3-2, Yokohama (2013).
17) 藤田雅之、「技術シーズを活用した研究開発テーマの発掘　第 7 章　超微細加工を実現する技術シーズからの研究開発テーマの発掘　第 3 節　フェムト秒レーザーを活用した研究開発テーマの発掘」、（株）技術情報協会　平成２５年 7 月 31 日 .
18) 藤田 雅之，染川智弘、「ハイパワーレーザを用いた CFRP の微細加工」、レーザ加工学会誌、20 巻、1 号、pp.34-38 (2013).
19) M. Fujita, T. Somekawa, N. Miyanaga, “Micromachining of CFRP with ultra-short laser pulses”, Physics Procedia, vol.41, pp.629-632 (2013).
20) M. Fujita, H. Ohkawa, M. Otsuka, T. Somekawa, Y. Maeda, Y. Orii, K. Inaba, G. Okada, and N. Miyanaga, “Micromachining of Thin CFRP with UV-ps Laser Pulses”, Proceedings of The First Smart Laser Processing Conference, SLPC9-3, 22-24 April 2014, Yokohama (2014).
21) M. Fujita, H. Ohkawa, M. Otsuka, T. Somekawa, Y. Maeda, Y. Orii, K. Inaba, G. Okada, and N. Miyanaga, “Micromachining of Thin CFRP with Ultra-Short Pulse Lasers”, Stuttgart Laser Technology Forum 2014, 24 - 25 June 2014, Stuttgart.

22) M. Fujita, H. Ohkawa, M. Otsuka, T. Somekawa, Y. Maeda, T. Matsutani, Y. Orii, K. Inaba, G. Okada, N. Miyanaga, “Micromachining of thin CFRP with UV-ps laser pulses”, Proceedings of ICALEO2014, 19-23 Oct. 2014, paper# M601, San Diego.
23) K. Takahashi, M. Tsukamoto, S. Masuno, Y. Sato, H. Yoshida, K. Tsubakimoto, H. Fujita, N. Miyanaga, M. Fujita, H. Ogata, “Influence of laser scanning conditions on CFRP processing with a pulsed fiber laser”, J. Materials Processing Technology, 222 (2015) pp.110–121.
24) M. Fujita, H. Ohkawa, T. Somekawa, T. Matsutani, Y. Maeda, J. Bovatsek, R. Patel, N. Miyanaga, “High Power UV Laser Processing of CFRP with Various ns Pulse Waveforms”, Proceedings of The 4th Advance Lasers and Photon Sources, ALPSp14-26, 22-24 April 2015, Yokohama.
25) M. Fujita, H. Ohkawa, T. Somekawa, T. Matsutani, Y. Maeda, J. Bovatsek, R. S. Patel, N.Miyanaga, “High Power UV Laser Processing of CFRP with Short ns Pulses and Pulse Splitting”, Proceedings of Lasers in Manufacturing 2015, Tu_A31_2-1, 22-25 June 2015, Munich.
26) 藤田雅之、「適用拡大する CFRP の成形・加工・リサイクル技術最前線　第 2 編　加工技術　第 2 章　レーザー微細加工技術　第 2 節 ハイパワーレーザーによる CFRP 微細加工技術」、株式会社エヌ・ティー・エス , pp.121-131　(2015 年 6 月).
27) 藤田雅之、「高出力超短パルスレーザーを用いた炭素繊維複合材加工技術（解説）」、光学、Vol.44, No.9, pp.341-349 (2015).
28) 藤田雅之、「CFRP のレーザー加工　（特集：レーザー加工の最先端）」、光アライアンス、Vol.26, No.10, pp.6-10 (2015).
29) J. Bovatsek, M. Fujita, R. Patel, “Carbon Fiber Reinforced Polymer Machining: Demonstrating Speed and Quality using a High Power UV Laser”, Proceedings of ICALEO2015, paper# M303, 18-22 Oct. 2015, Sheraton Atlanta, Atlanta.
30) M. Fujita, H. Ohkawa, T. Somekawa, Y. Maeda, T. Matsutani, N. Miyanaga, “Evaluating Performance of CFRP Laser Cutting with Ultra-Short Pulses”, ICALEO2015, paper# M301, 18-22 Oct. 2015, Sheraton Atlanta, Atlanta.
31) M. Fujita, H. Ohkawa, T. Somekawa, M. Otsuka, Y. Maeda, T. Matsutani and N. Miyanaga, “Wavelength and Pulsewidth Dependences of Laser Processing of CFRP ”, SLPC8-2, The 2nd Smart Laser Processing Conference 2016, 17-19 May 2016, Pacifico Yokohama, Yokohama
32) M. Fujita, H. Ohkawa, T. Somekawa, M. Otsuka, Y. Maeda, T. Matsutani, N. Miyanaga, “Wavelength and pulsewidth dependences of laser processing of CFRP”, Physics Procedia, 83, pp.1031-1036 (16-SEP-2016).
33) M. Fujita, H. Ohkawa, T. Somekawa, Y. Maeda, T. Matsutani, J. Bovatsek, R. Patel, N. Miyanaga, “High Power UV Laser Processing of CFRP with Various ns Pulses”, Proceedings of ICALEO 2016, paper #M204, 16-20 Oct. 2016, Sheraton San Diego.
34) 藤田雅之、「レーザーを用いた多層・複合材料の加工」、オプトロニクス , vol.419, No.11, pp.95-100 (2016).
35) 藤田雅之、染川智弘、宮永憲明、「微細加工　こんなレーザが今後求められる」、第 87 回レーザ加工学会講演論文集 , 2017 年 4 月 5 日 , pp.117-120 (2017).

レーザープロセス

液中レーザーアブレーション法による ナノ粒子作製技術

谷口誠治
レーザーバイオ化学研究チーム

1．レーザー還元金属ナノ粒子の作製と エネルギー生産への応用

筆者は 2010 年頃から、液中レーザーアブレーション法を用いて金属酸化物の還元・ナノ粒子化を簡便に行う技術について検討を行ってきた。その発端となったのは、当研究所において開発が行われた、地上太陽励起レーザー装置を用いた応用研究である。当時太陽エネルギーの利用法として、太陽熱により酸化鉄を直接還元し、得られた鉄を水と反応させて水素を発生させる手法や、レーザーにより酸化マグネシウムを直接還元する手法などが報告されていたが、それぞれの方法には一長一短があり、実用性にも課題があるように思われた。そこで筆者は、液体中で金属酸化物を太陽励起レーザーによりアブレートして還元、ナノ粒子化することで、太陽エネルギーを金属ナノ粒子という形で蓄積できるのではと考えた。鉄やマグネシウム、亜鉛といった金属は水と反応して水素を発生するが、バルクの状態では表面酸化のため水素発生効率が悪くなってしまう。これに対し、金属ナノ粒子は表面積が非常に大きく、反応の高効率化が期待でき、水素発生源や空気電池などへの応用も可能となる。本稿では、この 5 年間に実施した、出発物質に酸化鉄、酸化マグネシウム、および酸化亜鉛を用いた研究結果をまとめる。

2．液中レーザーアブレーション法

液中レーザーアブレーション法とは、水などの溶媒中にターゲットとなるバルク材料を配置し、その上にパルスレーザー光を照射する、というシンプルな手法である。原理図を図 1 に示す。高い強度を持つパルスレーザー光は、原料物質を瞬時に加熱して気化あるいは原子化・プラズマ化（アブレート）するが、原子化された物質は周囲の溶媒により拡散を抑制されるとともに、溶媒分子への熱伝達により冷却され凝集、ナノ粒子化する。生成したナノ粒子は溶媒中に分散し、安定化する。つまりこの手法では、溶媒が微小な反応チャンバー、冷却剤といった多くの役割を同時に果たしており、この特徴から近

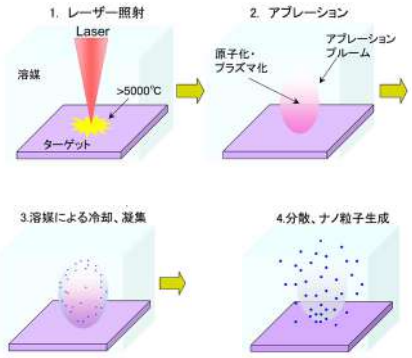


図 1　液中レーザーアブレーション法の原理図

年、本手法は簡便なナノ粒子作成法として注目されるようになった。余談になるが、図 1 は筆者が作成したものであるが、とある学会の研究発表で、面識のない他大学の学生がこの図をスライドに用いて原理説明を行っていた。この図は研究報告やホームページなどで公開済みであり、作成時はなるべく分かりやすいものを、と考えていたため、図を使用してもらい嬉しくもあったが、同時に一旦公開したものは当人の知らぬところで何かしらの影響を与えている、ということも実感した。

3．酸化鉄の還元・ナノ粒子化と水素生成[1,2]

本研究の最初のターゲットに選んだのは酸化第二鉄（Fe_2O_3）である。その理由は、第一に鉄（ナノ粒子）を用いた水素生成に関する研究例が多く報告されていたこと、第二に鉄の場合、酸化状態の変化により色彩が変化すること、による。研究を始めた当初は、レーザー装置はあるものの生成物の物性分析に必要な機器がなく、ともかくまず目で見て判断できる試料で実験を、と考えた上での選択であった。また実験に際しては、レーザー照射方法などにいくつかの改良を加える必要があった。金属酸化物は通常粉体であるため、レーザー光を照射するには工夫が必要であり、また一旦還元された試料の空気中の酸素との再酸化を抑制するため、容器内を不活性ガスで置換することも重要である。これらの要件を満たすため、本研究では反応槽に梨型フラスコを用いた方法

を考案した。図 2 に実験配置を示す。この方法では粒径が大きな金属酸化物はフラスコの底部に沈殿するため、レーザーを下から打ち上げることにより、原料への直接照射が可能である。またフラスコの底部はレンズと同様の役割を果たすため、レーザー光は試料内部で集光することから、高強度での照射も可能となる。この手法を用いてからは、ナノ粒子生成の時間効率や回収率も向上した。例として、図 3 に酸化第二鉄の液中レーザー照射実験前後の写真を示す。光源には波長 1064 nm、出力 1 W、繰り返し周波数 10 Hz、パルス幅 8 ns の Nd3+:YAG レーザーを用い、15 分間照射を行った。溶媒には有機溶媒（アセトン）を用いた。照射前の試料（図 3 (a)）は、Fe_2O_3 の持つ赤色を呈しているが、レーザー照射後には黒色に変化（図 3 (b)）し、磁性を示すようになった。さらに遠心分離を行うと、灰色を呈する生成物が先に沈殿することがわかった（図 3 (c)）。この結果は、Fe_2O_3 が黒色の第一酸化鉄（Fe_3O_4）、あるいは銀白色の鉄（Fe）へと還元されたことを示している。さらに、透過型電子顕微鏡（TEM）により生成物を観測すると、粒子径が数 nm ～ 30 nm の球形のナノ粒子が多く生成しており（図 4）、液中レーザーアブレーション法による金属酸化物の還元・ナノ粒子化が可能であることが明らかとなった。さらに、レーザー照射後に回収した生成物を用いて水上置換法による水素発生実験を行ったところ、水素の生成を確認するとともに、気体発生量から作成試料の組成はレーザー還元によって生じた鉄（Fe）ナノ粒子が主成分である可能性が高いことがわかった。

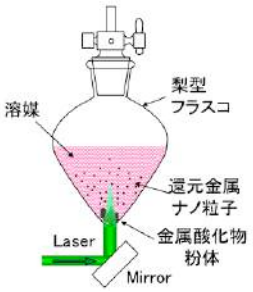


図 2　液中レーザーアブレーション実験配置

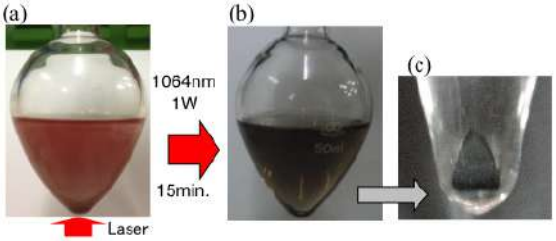


図 3　　(a) レーザー照射前、(b)15 分照射後、
(c) 遠心分離後の酸化第二鉄

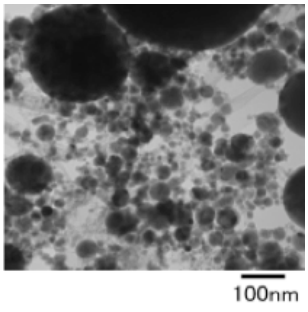


図 4 レーザー照射後の酸化第二鉄の明視野 TEM 画像

本研究により、レーザーを用いて金属酸化物から水素を発生させる一連の流れを実験的に示すことができた。光源を太陽励起レーザーに置きかえ、出発物質には水素生成後に残る酸化鉄を用いれば、太陽エネルギーを用いたクリーンな水素生産サイクルの構築も可能となる。実用化への壁は高いが、そのための課題を一つ一つ克服していくことが今後重要となる。この研究を通じて改めて感じたのは、ナノ粒子の研究を進めるにはやはりその物性（粒子径、組成、結晶構造など）の詳細な分析が必要、ということである。物性分析には X 線回折などのさまざまな装置、とりわけ透過型電子顕微鏡（TEM）による分析は非常に重要である。研究当初は全くつてがなく観測をどうするか思案していたところ、幸いにも阪大の超高圧電子顕微鏡センターの TEM を使わせていただく機会を得た。また資金についても、H25 年度ひょうご科学技術協会研究助成の支援を受け、研究を進めることができた。ご協力いただいた方々に感謝したい。

4．金属ナノ粒子の空気電池への応用 [3~6)]

クリーンなエネルギー供給源として期待されている燃料電池の一種で、最近注目されているものに金属空気電池がある。燃料電池は負極の活物質に水素を用いるが、空気電池は活物質に亜鉛やアルミニウム、マグネシウム等の純金属を用いており、水素に比べ取り扱いが容易である。また正極の活物質には空気中の酸素を用いることから、正極の活物質を必要とせず、その分電池内に負極の活物質を多く充填できる。このため空気電池には、従来の電池に比べて放電容量を大きくできるという利点があり、リチウムイオン電池に代わる電源としての利用が期待される。補聴器用の亜鉛電池（図 5）や、災害時用のマグネシウム電池など、すでに実用化されているものもある。

一方、空気電池の問題は、使用後に金属が酸化（水酸化）するため、再利用するには金属を再還元する必要が

あるという点にある。最近は充電可能な二次電池化を目指した研究も多いが、実用化には至っていない。そこで筆者らは、液中レーザーアブレーション法を用いれば生成する金属ナノ粒子を負極の活物質に利用でき、さらには使用後の電池を回収して金属酸化物を再還元・微細化することで、電池のリサイクルも可能になるのではと考え、研究を開始した。原料には、酸化マグネシウム（MgO）[3, 4]、酸化アルミ（Al_2O_3）[5]、および酸化亜鉛（ZnO）[6]を用い、酸化鉄と同様の手法でレーザー照射実験を行った。ここで問題となったのは、試料の変化を目視で確認できない、ということである。MgO、Al_2O_3, ZnO の粉体はいずれも白色であり、還元され金属となってもそれらの色は銀白色で、酸化鉄のような明確な色彩の変化は見られないものと予想された。実際に MgO、Al_2O_3 を用いた際には、粉体の微細化は確認できたものの、色の変化はほとんど見られなかったため、レーザー照射の条件を定めるのに大変苦労した。一方、ZnO では、エタノールを溶媒に用いた際に試料が黒色に変化した。この結果は予想外でもあったが、照射後の試料を STEM で観測すると、粒径 30nm 付近の粒子が多数生成していた。また EDX（エネルギー分散型 X 線回折）による組成分析で、生成粒子の組成は 96% が亜鉛で酸素は 3%、しかも粒子表面にのみ存在することが明らかとなり（図 6）、高純度の亜鉛（Zn）ナノ粒子の生成が確認された。亜鉛ナノ粒子の色についてはなかなか報告例が見つからなかったが、最近市販されるようになった Zn ナノ粒子粉体を調べてみると、黄色（American Elements 社）または黒色（US research Nanomaterial 社）との報告があり、実験結果と一致した。おそらく、粒径や 2 次粒子の影響などにより色彩が変化するものと考えられる。

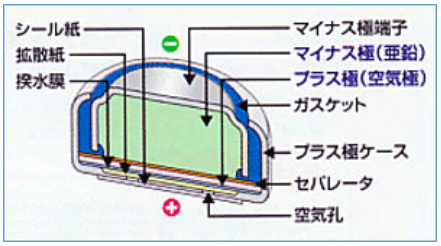


図 5　亜鉛空気電池の構造（電池工業会 HP（http://www. baj.or.jp）より）

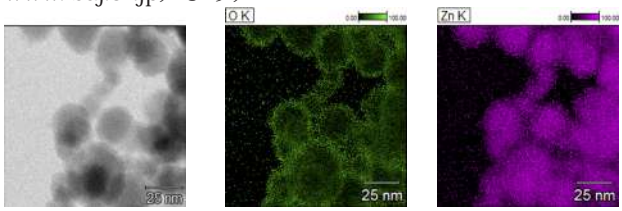


図 6　レーザー照射後の酸化亜鉛の組成分析結果
（左）明視野 STEM 画像、（中）酸素、（右）亜鉛

筆者らは、レーザー照射後の試料を用いて実際に負電極を作製し、空気電池への応用が可能かについても検討してきた。負電極は、レーザー照射後乾燥した試料と Ag ペーストを混合してペースト化した後、Mg などの基板上に塗布し、ホットプレートで焼成したものである。（図 7(a)）。この電極を用いて空気電池（図 7 (b)）を作製したところ、白色 LED を点灯させることができた（図 8）。またその起電力は、負極にバルクの金属板を用いたものに比べて 10% 以上高くなることがわかった。ナノ粒子を焼成して作製した負電極は多孔質構造を持つため反応表面積が大きく、また電解液も電極内に浸透しやすいものと考え、当初の予測と一致した結果を得ることができた。

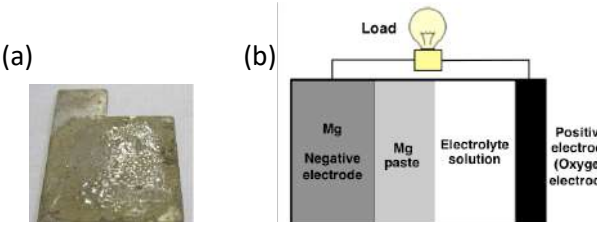


図 7　(a) レーザー還元 Mg ナノ粒子を用いて作製した負電極の写真、(b) 空気電池の模式図

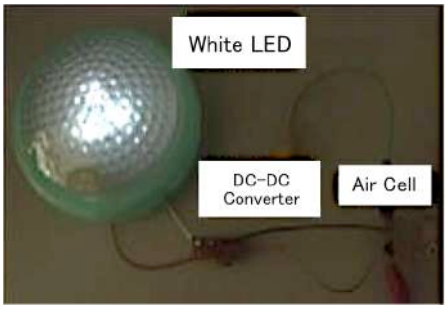


図 8　作製した空気電池による LED 点灯実験

5．まとめ

本研究により、レーザーを用いて作製したナノ粒子が水素生成や空気電池といったエネルギー分野に応用可能であることを示すことができた。今後は、レーザーを用いた液中イオン還元による核廃棄物処理 7) や、ナノ粒子のレーザー加工など、本手法を用いた応用の幅を広げていきたいと考えている。本稿で述べた一連の研究は、関西大学システム理工学部電気電子情報工学科佐伯准教授との共同研究として行われたもので、毎年研究室の学生を受け入れてきた。最初は学生が一人で実験を進められるように、と考えていたのだが、実験に使用したパルスレーザーは光強度が高く、安全面を考えるとレーザーの扱いに不慣れな学生を一人にする訳にもいかない。結局は毎回実験に付き添うことになってしまったが、これもまたよい経験である。

発表論文

1) T. Okada, T. Saiki, S. Taniguchi, T. Ueda, K. Nakmura, Y. Nishikawa, Y. Iida, ISRN Renewable Energy, 2013, 827681-1-7, 2013.
2) 谷口誠治、月刊光アライアンス、8月号、20-23, 2013.
3) T. Saiki, S. Uchida, T. Karita, K. Nakamura, Y. Nishikawa, S. Taniguchi Y. Iida, Proceeding of The 3rd Advanced Lasers and Photon Sources (ALPS'14), 161, 2014.
4) 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.
5) 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.
6) 谷口誠治、月刊 OPTRONICS、419、2016.
7) N. Nakashima, K. Yamanaka, M. Saeki, H. Ohba, S. Taniguchi, T. Yatsuhashi, J. of Photochem. Photobiol. A: Chemistry, 319, 70-77, 2016.

レーザープロセス

光学素子のレーザー損傷 ～その機構とデータベース～

本越伸二
レーザー技術開発室

1. 単一パルスから繰返しパルスへ

従来の高繰返しレーザーパルスは、パルス幅が長い、またはパルスエネルギーが小さいものであったが、レーザー材料、周辺素子の改良により、kHz 以上の繰返し周波数を持ちながら、短パルス、高エネルギー装置が開発され、応用が広がっている。　繰返し周波数や、照射パルス数の増加に従い、光学素子のレーザー損傷しきい値が低下することは、多く論文で報告されている。我々の過去の研究では、その原因について、繰返しパルス照射による熱の蓄積であることを実験的、理論的に証明してきた。しかし、近年、超短パルスレーザー光による繰返し照射においても、1 パルスの損傷しきい値に比べて低下することが報告された。超短パルスレーザー光は高いピーク強度を持つが、平均エネルギー、つまり熱エネルギーは小さい。そのため、上述した熱の蓄積以外の損傷しきい値低下の要因を調べる必要が出てきた。

熱の蓄積でないとすると、連続 2 パルスでも損傷しきい値に影響があらわれると考えた。そこで、繰返し周波数（時間間隔）を変えた場合の連続 2 パルスのレーザー損傷しきい値の評価を始めた。できるだけ損傷過程を単純化したいと考え、合成石英ガラスの内部損傷を測定対象とした。合成石英ガラスは多くのグレードがあるが、その品質は安定している。またガラス表面と違い研磨工程、研磨材、保管状態などによって損傷しきい値に影響がでない。また、照射レーザーには波長 193nm の ArF エキシマレーザーを使用することにした。近赤外や可視域では石英ガラス吸収が小さく、損傷を起こすためには紫外に比べて大きなレーザーエネルギーが必要である。また 1064nm の光子エネルギーでは、石英ガラスのバンドギャップエネルギーを超えるためには 6 ～ 7 光子励起が必要とされるのに対して、波長 193nm では 2 光子励起で可能となり、単純な損傷過程を考えることができる。　この研究は、共同研究をしている近畿大学理工学部の吉田実教授の学生であった竹村有輝君（現：近畿大学大学院修士 2 年)が担当してくれた。この結果、1 パルス照射のレーザー損傷しきい値に比べて、2 パルス照射の損傷しきい値は、パルス間隔が短くなるに従い低くなり、またその低下の割合は低純度の石英ガラスの方が大きくなることが判った。つまり、レーザーパルス照射の余韻は、数 ms 後まで残り、それが次のパルスによる損傷の要因となることを示している。

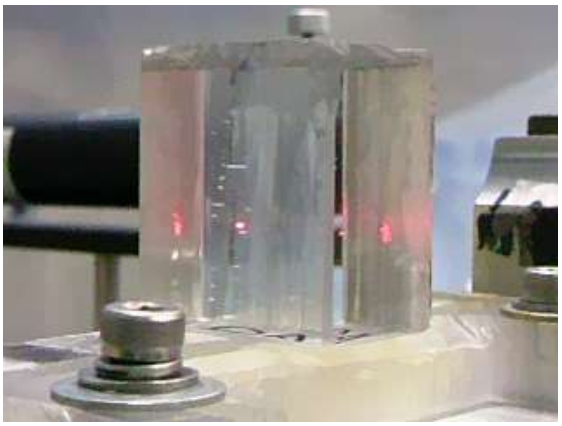


図 1　2 パルスレーザー損傷試験の様子
（ガラス内部の輝点は、損傷による He-Ne レーザー光の散乱）

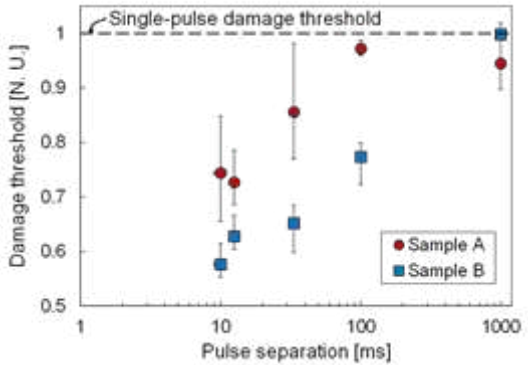


図 2　2 パルス時間間隔に対するレーザー損傷しきい値。縦軸は 1 パルス損傷しきい値で規格化。

一方、紫外光照射による石英ガラス材料の透過率劣化については、既に多くの論文、報告がある。これは、紫外光のフォトンエネルギーにより、化学構造欠陥が生成されるためとして知られている。上述の 2 パルスによるレーザー損傷しきい値低下の要因を探るために、同じ石英ガラス試料に対して低エネルギー密度による長時間照射を行い、その透過率変化を計測した。その結果、照

射開始初期の急激な透過率低下の傾きは、繰返しパルス周波数の増加に従い大きくなり、またその変化は低純度の試料の方が大きくなることが確認された。この変化の傾向は上述の 2 パルスレーザー損傷しきい値の低下の傾向と一致することから、繰返しパルスによる損傷しきい値低下の要因は化学構造欠陥によるものと考えられる。今年から、竹村君の後輩である近畿大学 4 年生の小川遼君も加わり、更に詳細な研究が進められ、繰返しパルス照射によるレーザー損傷の物理過程、高耐力光学素子開発に繋げていきたい。

2. データベース化試験とレーザー学会産業賞

基礎研究と同時に、企業から依頼された光学素子のレーザー損傷耐性試験を進めてきた。

依頼される試験の多くは、Nd:YAG レーザーとその高調波に対する損傷評価試験であり、これはレーザー技術推進センターから出向している岸田知門氏が一手に担ってくれている。装置そのものはレーザー損傷評価用としてシステムが組まれているが、装置の稼働が 10 年を超えてきたこともあり、年々評価よりも装置メンテナンスに時間がとられるようになってきた。

近年、レーザー装置の多様化に伴い、違う波長の依頼も多くなっている。波長 193nm、248nm のエキシマレーザーや、波長 800nm のチタンサファイアレーザーについては、その都度レーザー損傷評価用に光学系を組んで対応している。　平成 20 年度から開始した「レーザー損傷しきい値データベース化試験」も 18 回を超えた。これは、毎回 1 つの光学素子の仕様を決定し、試料の提供を光学素子メーカーに呼びかけ、同一条件で試験を行うことにより、比較可能な損傷しきい値データを報告するものである。参加光学素子メーカーにとっては、自社製品を他社のものと比較可能となり、光学素子ユーザーにとっては装置の設計や光学素子を使用する上でのエネルギー上限の目安となる。現在までに、延べ 222 社、577 個の光学素子のデータを蓄積できたことになる。それぞれの結果は、レーザー総研のホームページにて公開している。平成 29 年度、このデータの蓄積を評価して頂き、レーザー学会産業賞「貢献賞」を受賞した。また、今年度より、10Hz の繰返しパルスによるデータベース化試験を開始する。光学素子メーカーと協力し、高耐力光学素子開発を進めていきたい。

表 1　データベース化試験参加数

年度	回	光学素子種類	企業数	試料数
H20	1	1064nm用ミラー	19	41
	2	1064nm用ARコート	22	57
H21	3	532nm用ミラー	25	69
	4	532nm用ARコート	18	65
H22	5	355nm用ミラー	17	41
	6	355nm用ARコート	14	40
H23	7	248nm用ミラー	11	26
	8	248nm用ARコート	11	29
H24	9	1064nm透過/532nm反射コート	7	21
	10	1064nm透過/532nm反射コート	7	21
H25	11	1064nm用ミラー	8	18
	12	1064nm用ARコート	9	30
H26	13	532nm用ミラー	9	18
	14	532nm用ARコート	12	33
H27	15	1064nm偏光子	9	15
	16	1064nm偏光子	9	15
H28	17	355nm用ミラー	7	13
	18	355nm用ARコート	7	25

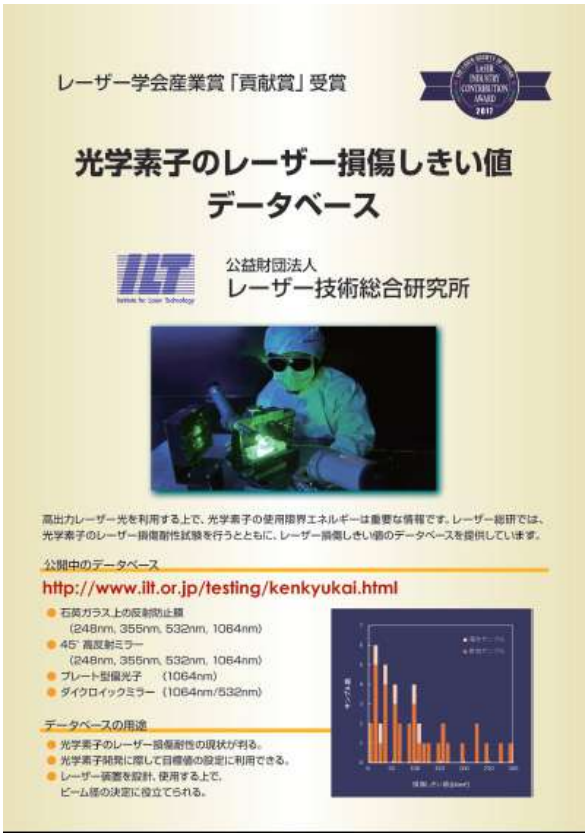


図３　レーザー学会産業賞「貢献賞」受賞パネル

謝辞

多大なるご協力を頂きました大阪大学レーザー科学研究所實野孝久招聘教授に謝意を表します。

試料提供のご協力を頂きました「高耐力光学素子研究会」の参加企業の皆さんに感謝の意を表します。

レーザープロセス

レーザーピーニングのシミュレーション、及びレーザー核融合炉設計研究

古河裕之
理論・シミュレーションチーム

1．レーザーピーニングのシミュレーション

レーザー技術総合研究所では、大阪産業大学及び近畿大学と共同で、レーザーピーニング及びその産業応用に関して精力的に研究を行っている。レーザーピーニングは、金属表面処理技術の 1 つであり、類似技術にショットピーニングがある．レーザーピーニングでは，レーザー誘起衝撃波によって金属の塑性変形を引き起こし、ピーニング効果として表層に圧縮残留応力や加工硬化を付与する。現在、原子力・宇宙航空産業を中心に実用化されている [1]。

図 1 に、レーザーピーニングの原理図を示す。閉じ込め層（大気、水等）を介した短パルスのレーザー照射により、金属表面がアブレーションし、アブレーション生成プルームの急激な膨張が閉じ込め層の慣性により抑えられ、大きな圧力が金属表面に付与される。その圧力が金属の降伏応力を超えると，塑性変形が起こり、表層部が伸展し、未変形部の拘束によって圧縮残留応力が付与される。この圧縮残留応力が，疲労特性の改善、耐応力腐食割れ特性の向上に寄与する。

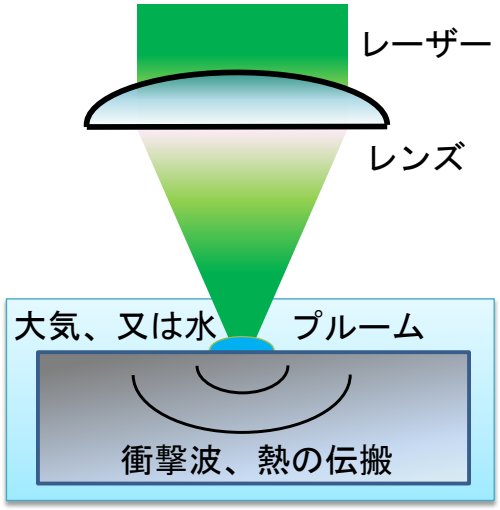


図 1　レーザーピーニングの原理図

本研究において、レーザーピーニング条件の最適化を目的とし、統合シミュレーションコードを開発した [2-5]。統合シミュレーションを行った結果、塑性応力の空間分布の時間発展が固体金属内部の温度分布の時間発展に影響されることを、新たに見出した。

固体金属は、閉じ込め層により閉じ込められた高温のプルームにより、再加熱される。塑性応力の生成に関して、この効果が重要であることが示唆された。熱の伝搬に応じて、圧縮塑性応力から引張塑性応力に転じる可能性がある、ことが示唆された。

次の 5 年においては、現在考慮されていない、閉じ込め媒質によるレーザー光の吸収、閉じ込め媒質の沸騰、閉じ込め媒質のイオン化などを考慮し、レーザーピーニングパラメーターの最適化を行う。

2. レーザー核融合炉設計研究

レーザー技術総合研究所では、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターと共同で、レーザー核融合炉設計研究を行っている。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 6-9)。液体壁は、

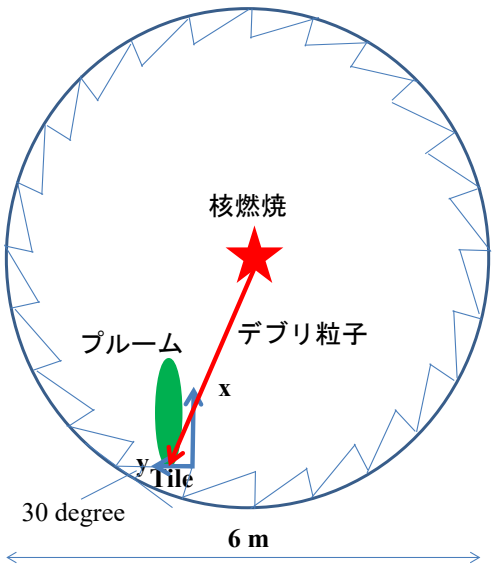


図 2　KOYO-fast の液体壁チェンバー第一壁のタイル構造の概念図

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 2 に示すように、第一壁から飛散したプルームがチェンバー中心部に集中しないように、第一壁を角度を付けたタイル構造にしている [6, 9]。

本研究により、1 枚のタイルから吹き出すプルームは、タイルの表面に対して垂直な方向にほぼ直進するため、チェンバー中心近傍でのプルーム同士の衝突は殆どない、ことが示された。しかし、チェンバー内の液体壁近傍では、隣接する 2 つのタイルから飛散するプルーム同士は 15 °の角度で衝突する。そこで、上記の条件を取り入れ、粒子法 10) を用いてプルーム同士の 3 次元シミュレーションを行った。その結果、液体壁近傍での 2 つのプルーム同士の衝突は、チェンバー中心近傍でのプルーム同士の衝突に大きな影響を与えない、ことが示唆された。図 3 は、チェンバー内のプルーム同士の衝突の概略図である。

次の 5 年においては、これらの結果を基に、チェンバー内の金属蒸気の 3 次元的挙動を明らかにし、チェンバー内の金属蒸気の排気の条件を明らかにする。

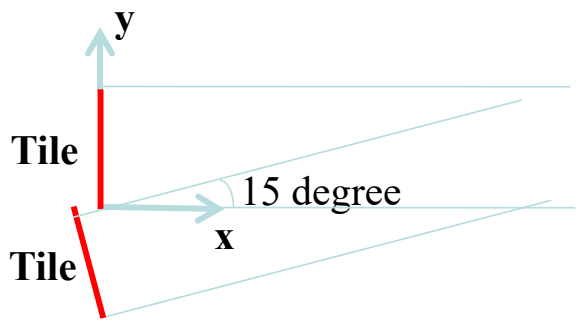


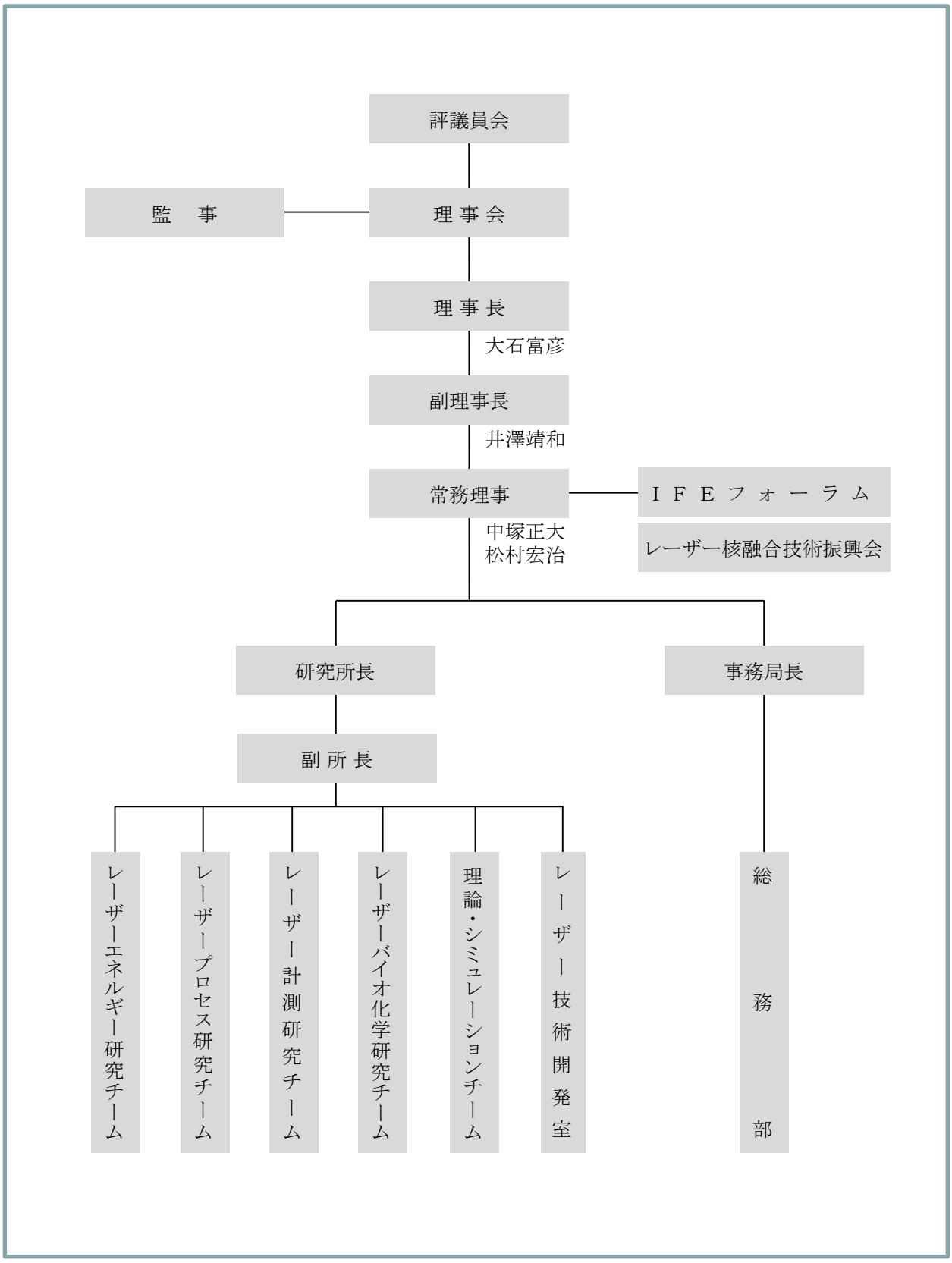
図 3　チェンバー内のプルーム同士の衝突の概略図

参考文献

1) K. Ding and L. Ye, “Laser shock peening”, Woodhead Publishing Limited, 1-44, 2006.
2) 古河裕之、部谷学、中野人志 : レーザー研究 , 24, 784-791, 2014.
3) 古河裕之 : レーザー研究 , 36, 742-746, 2008.
4) 古河裕之、藤田和久、森谷信一 : プラズマ核融合学会誌 , 87, 642-649, 2011.
5) K. Ding, and L. Ye: ‘Laser shock peening Performance and process simulation’, CRC Press, 2006..
6) H. Furukawa、T. Norimatsu : Plasma and Fusion Research、**11** 1405084-1~1405084-5, 2016.
7) 古河裕之 , 乗松孝好 : プラズマ核融合学会誌 , 87, 51-55, 2011.
8) 古河裕之 , 城﨑知至 , 神前康次 , 乗松孝好 , 疇地宏 , 西川雅弘 , 田中和夫 , 三間圀興 , 苫米地顕 , 山中千代衛 : プラズマ核融合学会誌 , 82, 617-627, 2006.
9) 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.
10) 越塚誠一、柴田和也、室谷浩平：粒子法入門、丸善出版。

資料編

1.財団組織図


評議員会
監　事
理事会
理事長
大石富彦
副理事長
井澤靖和
常務理事
中塚正大
松村宏治
ＩＦＥフォーラム
レーザー核融合技術振興会
研究所長
事務局長
副所長
レーザーエネルギー研究チーム
レーザープロセス研究チーム
レーザー計測研究チーム
レーザーバイオ化学研究チーム
理論・シミュレーションチーム
レーザー技術開発室
総務部

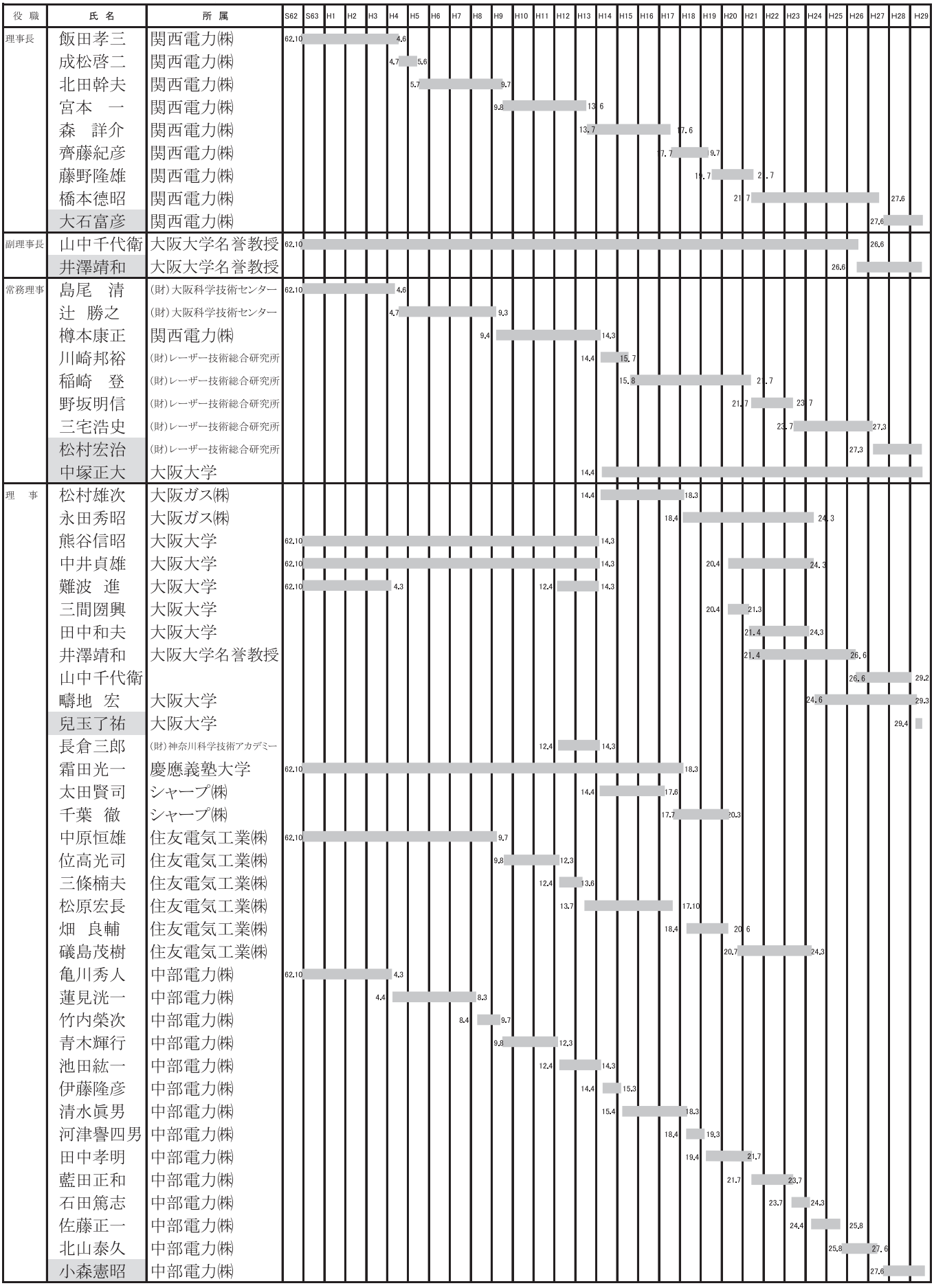
2.発起人名簿

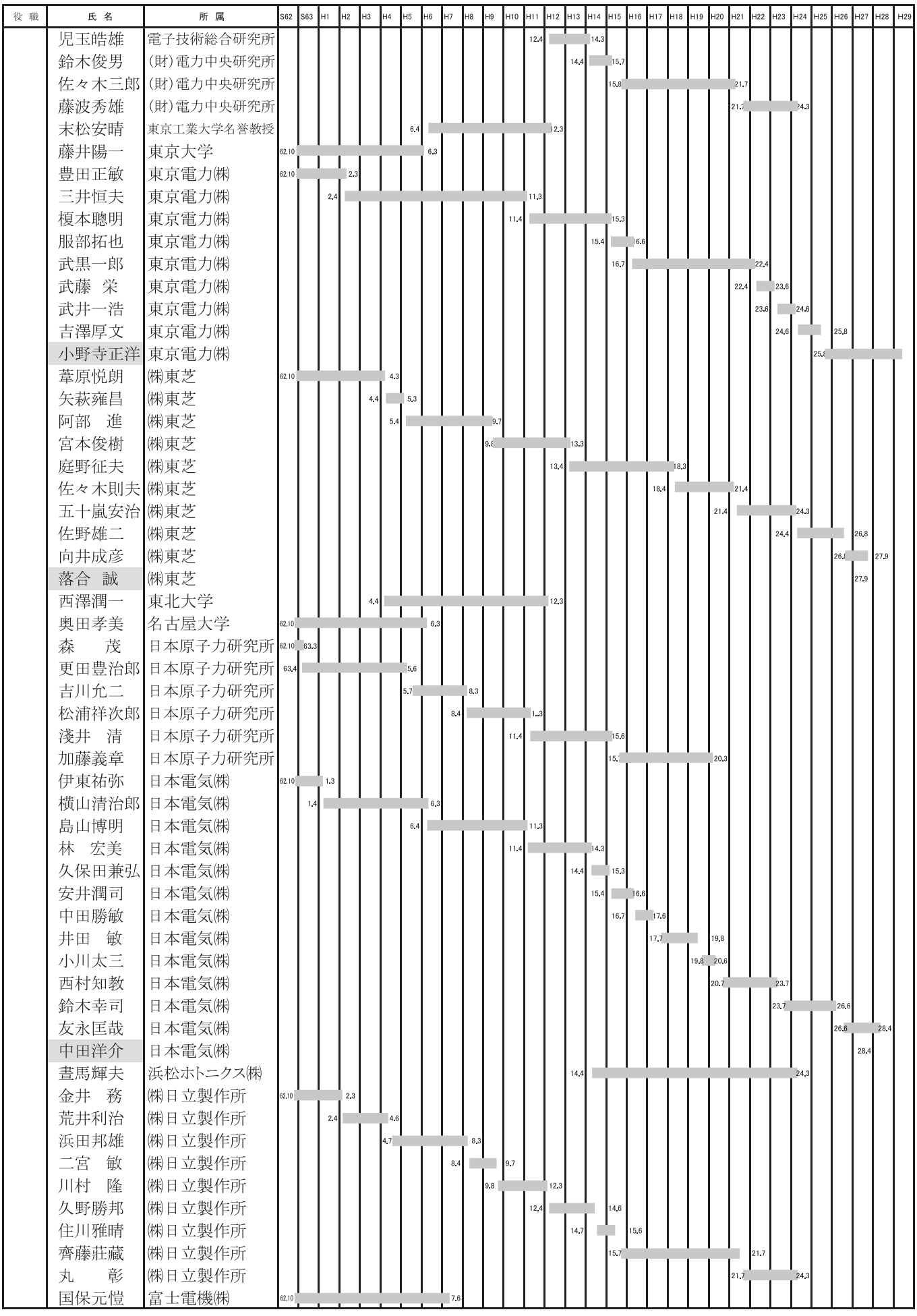
氏 名	役職(1987年当時)
赤﨑 正則	九州大学 工学部 教授
葦原 悦朗	㈱東芝 常務取締役
渥美 和彦	東京大学 医学部 教授
飯田 孝三	関西電力㈱ 取締役副社長
伊藤 憲昭	名古屋大学 理学部 教授
大島 恵一	東京大学 名誉教授
岡田 實	大阪大学 名誉教授
奥田 孝美	名古屋大学 工学部 教授
垣花 秀武	上智大学 工学部 教授
片山仁八郎	三菱電機㈱ 取締役会長
金井 務	㈱日立製作所 常務取締役
河島 信樹	宇宙科学研究所 教授
熊谷 信昭	大阪大学 総長
佐野 忠雄	大阪大学 名誉教授
更田豊治郎	日本原子力研究所 東海研究所 副所長
霜田 光一	慶應義塾大学 理工学部 教授
菅田 栄治	大阪大学 名誉教授
関口 忠	横浜国立大学 工学部 教授
関本 忠弘	日本電気㈱ 社長
宅間 宏	電気通信大学 新型レーザー研究センター 所長
豊田 浩一	理化学研究所 半導体工学研究室 主任研究員
豊田 正敏	東京電力㈱ 取締役副社長
中井 貞雄	大阪大学 レーザー核融合研究センター長
中里 良彦	富士電機㈱ 取締役副社長
中根 秀彦	三菱重工業㈱ 常務取締役
難波 進	大阪大学 基礎工学部 教授
西澤 潤一	東北大学 電気通信研究所長
早川 茂	松下電器産業㈱ 専務取締役
藤井 陽一	東京大学 生産技術研究所 教授
伏見 康治	大阪大学、名古屋大学 名誉教授
水科 篤郎	京都大学 名誉教授
宮島 龍興	理化学研究所 理事長
山崎 巍	中部電力㈱ 常務取締役
山中千代衛	大阪大学 名誉教授
吉原經太郎	分子科学研究所 教授

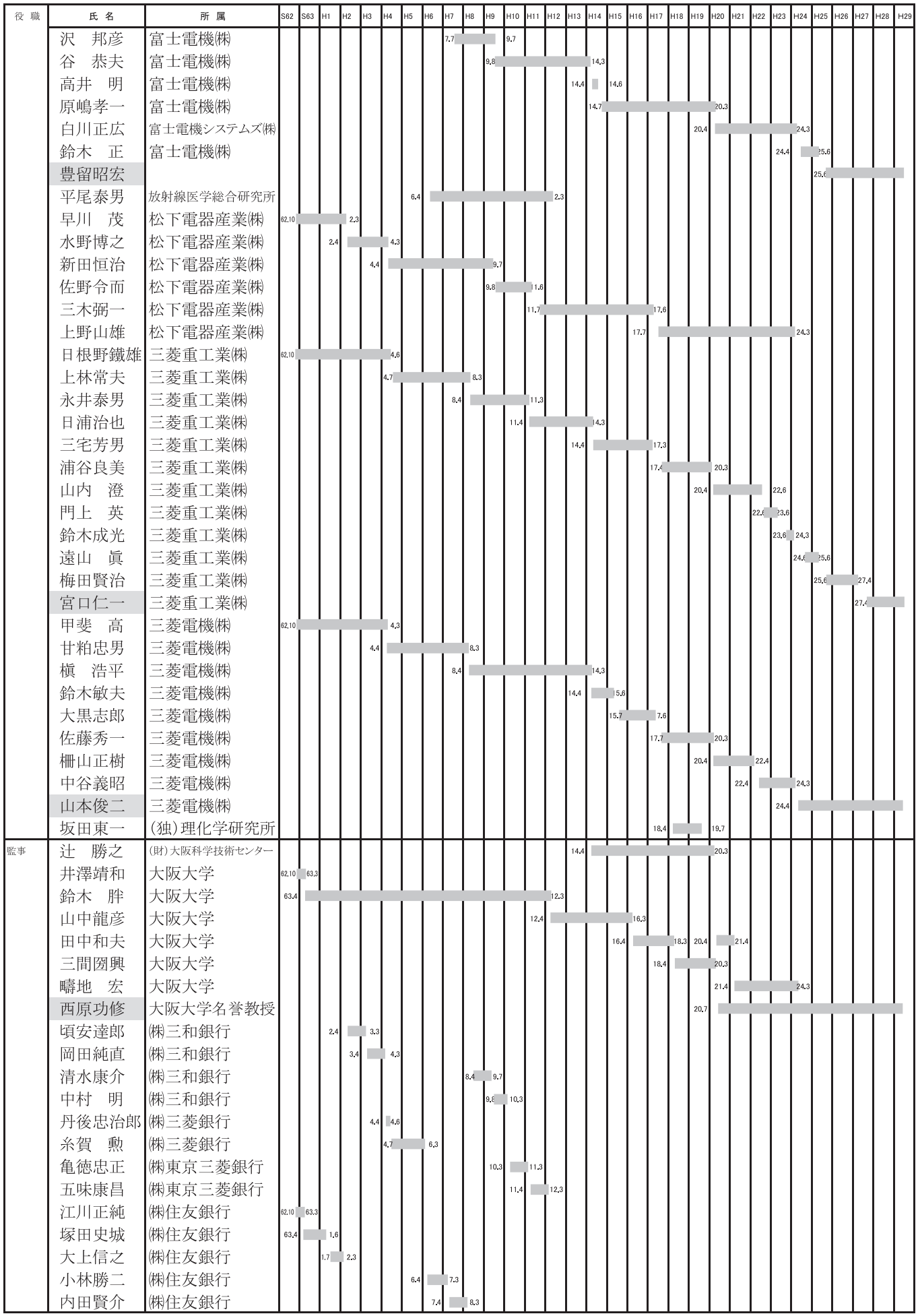
3. 歴代理事、監事、評議員、総務委員、技術企画委員、総務企画委員、企画委員

歴代理事、監事

※所属は就任時のもの
は現職




役職
氏名
所属
S62 S63 H1 H2 H3 H4 H5 H6 H7 H8 H9 H10 H11 H12 H13 H14 H15 H16 H17 H18 H19 H20 H21 H22 H23 H24 H25 H26 H27 H28 H29
児玉皓雄 電子技術総合研究所 12.4 14.3
鈴木俊男 (財)電力中央研究所 14.4 15.7
佐々木三郎 (財)電力中央研究所 15.8 21.7
藤波秀雄 (財)電力中央研究所 21.7 24.3
末松安晴 東京工業大学名誉教授 6.4 12.3
藤井陽一 東京大学 62.10 6.3
豊田正敏 東京電力㈱ 62.10 2.3
三井恒夫 東京電力㈱ 2.4 11.3
榎本聰明 東京電力㈱ 11.4 15.3
服部拓也 東京電力㈱ 15.4 16.6
武黒一郎 東京電力㈱ 16.7 22.4
武藤 栄 東京電力㈱ 22.4 23.6
武井一浩 東京電力㈱ 23.6 24.6
吉澤厚文 東京電力㈱ 24.6 25.8
小野寺正洋 東京電力㈱ 25.8
葦原悦朗 ㈱東芝 62.10 4.3
矢萩雍昌 ㈱東芝 4.4 5.3
阿部 進 ㈱東芝 5.4 9.7
宮本俊樹 ㈱東芝 9.8 13.3
庭野征夫 ㈱東芝 13.4 18.3
佐々木則夫 ㈱東芝 18.4 21.4
五十嵐安治 ㈱東芝 21.4 24.3
佐野雄二 ㈱東芝 24.4 26.8
向井成彦 ㈱東芝 26.8 27.9
落合 誠 ㈱東芝 27.9
西澤潤一 東北大学 4.4 12.3
奥田孝美 名古屋大学 62.10 6.3
森 茂 日本原子力研究所 62.10 63.3
更田豊治郎 日本原子力研究所 63.4 5.6
吉川允二 日本原子力研究所 5.7 8.3
松浦祥次郎 日本原子力研究所 8.4 1..3
淺井 清 日本原子力研究所 11.4 15.6
加藤義章 日本原子力研究所 15. 20.3
伊東祐弥 日本電気㈱ 62.10 1.3
横山清治郎 日本電気㈱ 1.4 6.3
島山博明 日本電気㈱ 6.4 11.3
林 宏美 日本電気㈱ 11.4 14.3
久保田兼弘 日本電気㈱ 14.4 15.3
安井潤司 日本電気㈱ 15.4 16.6
中田勝敏 日本電気㈱ 16.7 17.6
井田 敏 日本電気㈱ 17.7 19.8
小川太三 日本電気㈱ 19.8 20.6
西村知教 日本電気㈱ 20.7 23.7
鈴木幸司 日本電気㈱ 23.7 26.6
友永匡哉 日本電気㈱ 26.6 28.4
中田洋介 日本電気㈱ 28.4
畫馬輝夫 浜松ホトニクス㈱ 14.4 24.3
金井 務 ㈱日立製作所 62.10 2.3
荒井利治 ㈱日立製作所 2.4 4.6
浜田邦雄 ㈱日立製作所 4.7 8.3
二宮 敏 ㈱日立製作所 8.4 9.7
川村 隆 ㈱日立製作所 9.8 12.3
久野勝邦 ㈱日立製作所 12.4 14.6
住川雅晴 ㈱日立製作所 14.7 15.6
齊藤莊藏 ㈱日立製作所 15.7 21.7
丸 彰 ㈱日立製作所 21.7 24.3
国保元愷 富士電機㈱ 62.10 7.6

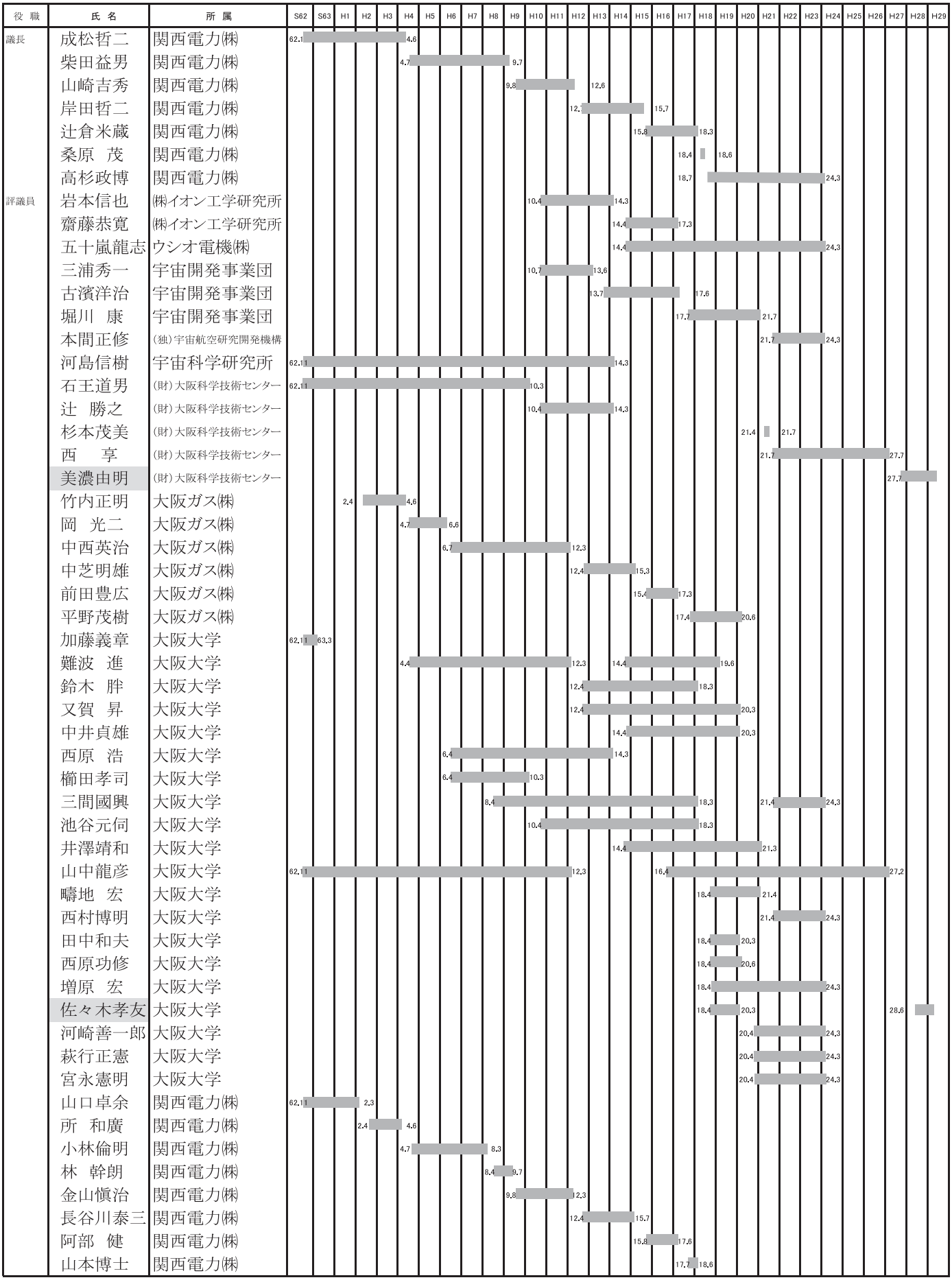

役職
氏名
所属
S62 S63 H1 H2 H3 H4 H5 H6 H7 H8 H9 H10 H11 H12 H13 H14 H15 H16 H17 H18 H19 H20 H21 H22 H23 H24 H25 H26 H27 H28 H29
沢　邦彦 富士電機㈱ 7.7 9.7
谷　恭夫 富士電機㈱ 9.8 14.3
高井　明 富士電機㈱ 14.4 14.6
原嶋孝一 富士電機㈱ 14.7 20.3
白川正広 富士電機システムズ㈱ 20.4 24.3
鈴木　正 富士電機㈱ 24.4 25.6
豊留昭宏 25.6
平尾泰男 放射線医学総合研究所 6.4 2.3
早川　茂 松下電器産業㈱ 62.10 2.3
水野博之 松下電器産業㈱ 2.4 4.3
新田恒治 松下電器産業㈱ 4.4 9.7
佐野令而 松下電器産業㈱ 9.8 11.6
三木弼一 松下電器産業㈱ 11.7 17.6
上野山雄 松下電器産業㈱ 17.7 24.3
日根野鐵雄 三菱重工業㈱ 62.10 4.6
上林常夫 三菱重工業㈱ 4.7 8.3
永井泰男 三菱重工業㈱ 8.4 11.3
日浦治也 三菱重工業㈱ 11.4 14.3
三宅芳男 三菱重工業㈱ 14.4 17.3
浦谷良美 三菱重工業㈱ 17.4 20.3
山内　澄 三菱重工業㈱ 20.4 22.6
門上　英 三菱重工業㈱ 22.6 23.6
鈴木成光 三菱重工業㈱ 23.6 24.3
遠山　眞 三菱重工業㈱ 24.6 25.6
梅田賢治 三菱重工業㈱ 25.6 27.4
宮口仁一 三菱重工業㈱ 27.4
甲斐　高 三菱電機㈱ 62.10 4.3
甘粕忠男 三菱電機㈱ 4.4 8.3
槇　浩平 三菱電機㈱ 8.4 14.3
鈴木敏夫 三菱電機㈱ 14.4 5.6
大黒志郎 三菱電機㈱ 15.7 7.6
佐藤秀一 三菱電機㈱ 17.7 20.3
柵山正樹 三菱電機㈱ 20.4 22.4
中谷義昭 三菱電機㈱ 22.4 24.3
山本俊二 三菱電機㈱ 24.4
坂田東一 (独)理化学研究所 18.4 19.7
監事
辻　勝之 (財)大阪科学技術センター 14.4 20.3
井澤靖和 大阪大学 62.10 63.3
鈴木　胖 大阪大学 63.4 12.3
山中龍彦 大阪大学 12.4 16.3
田中和夫 大阪大学 16.4 18.3 20.4 21.4
三間圀興 大阪大学 18.4 20.3
疇地　宏 大阪大学 21.4 24.3
西原功修 大阪大学名誉教授 20.7
頃安達郎 ㈱三和銀行 2.4 3.3
岡田純直 ㈱三和銀行 3.4 4.3
清水康介 ㈱三和銀行 8.4 9.7
中村　明 ㈱三和銀行 9.6 10.3
丹後忠治郎 ㈱三菱銀行 4.4 4.6
糸賀　勲 ㈱三菱銀行 4.7 6.3
亀徳忠正 ㈱東京三菱銀行 10.3 11.3
五味康昌 ㈱東京三菱銀行 11.4 12.3
江川正純 ㈱住友銀行 62.10 63.3
塚田史城 ㈱住友銀行 63.4 1.6
大上信之 ㈱住友銀行 1.7 2.3
小林勝二 ㈱住友銀行 6.4 7.3
内田賢介 ㈱住友銀行 7.4 8.3

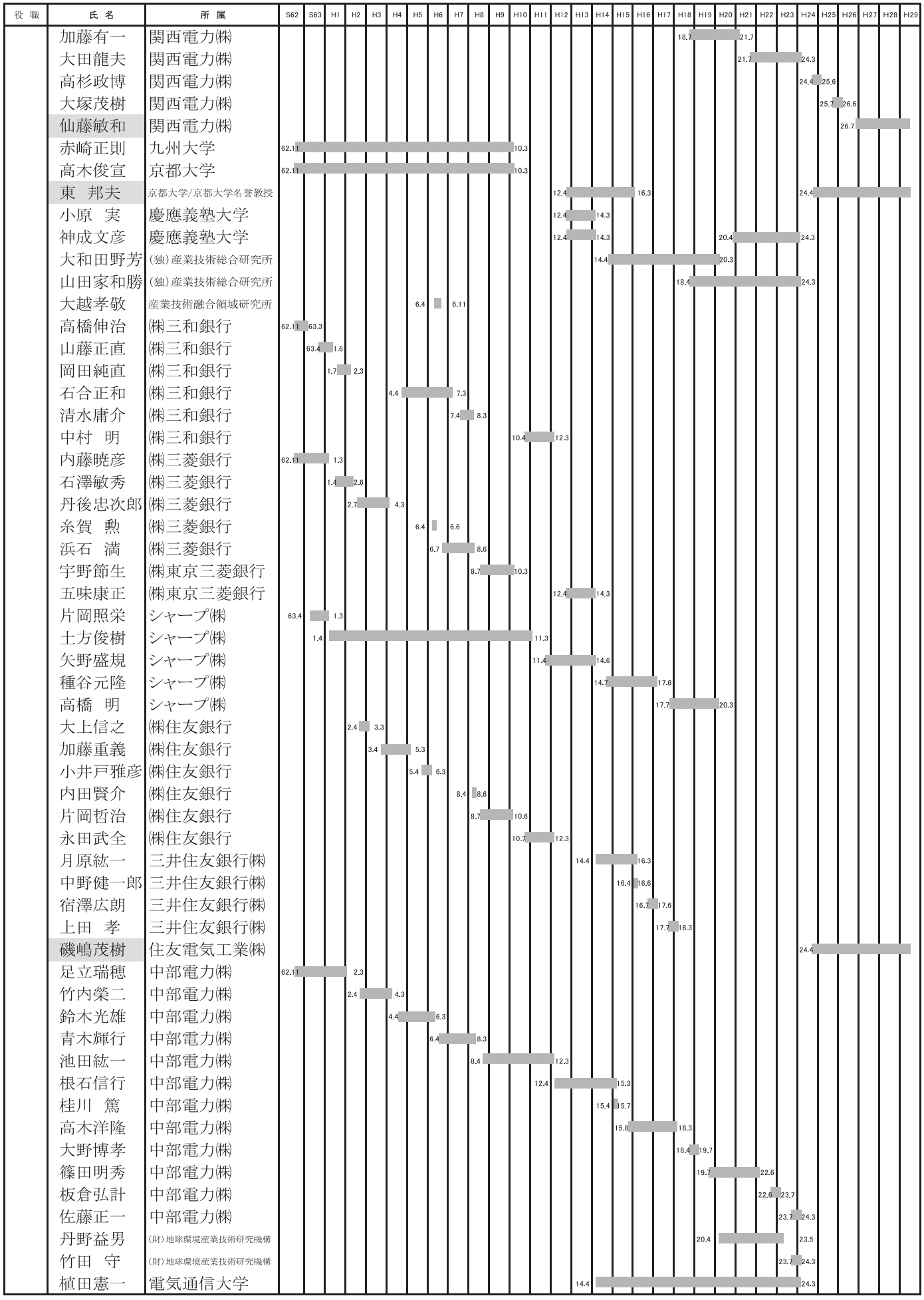
役職	氏名	所属	S62	S63	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
	井上　正	㈱住友銀行													12.4		12.6																
	廣田　正	㈱住友銀行														12.7	3.6																
	月原紘一	㈱住友銀行															13.7	14.3															
	西本達也	㈱三井住友銀行																			18.4			19.7									
	貞苅　茂	㈱三井住友銀行																					19.7			22.6							
	岩西　徹	㈱三井住友銀行																								22.6			25.4				
	岡田　勉	㈱三井住友銀行																										25.4		27.4			
	湯浅英生	㈱三井住友銀行																												27.4		28.4	
	小林英生	㈱三井住友銀行																														28.4	
	日根野文三	日根野公認会計士事務所																									24.4						

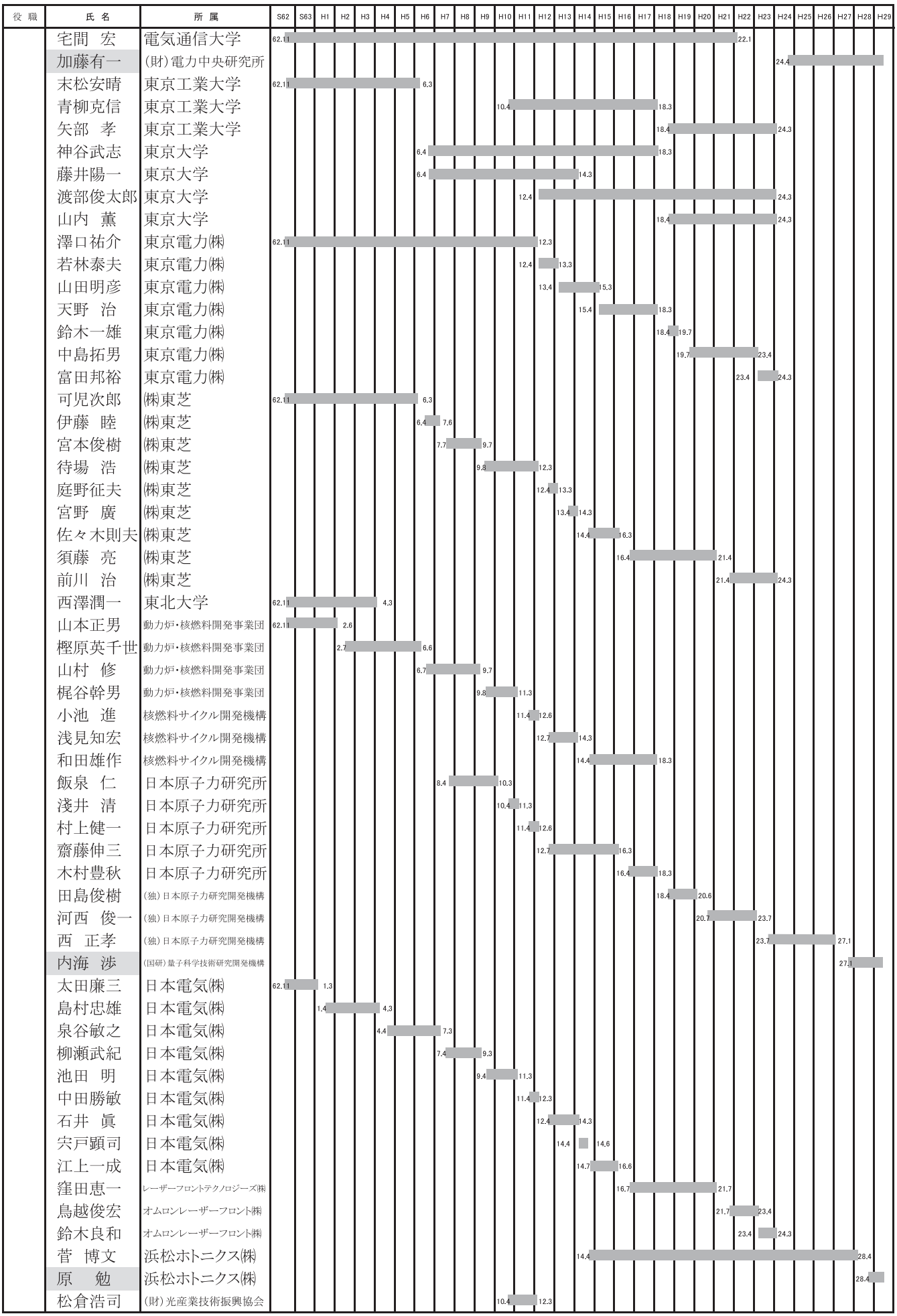
歴代評議員

※所属は就任時のもの
は現職

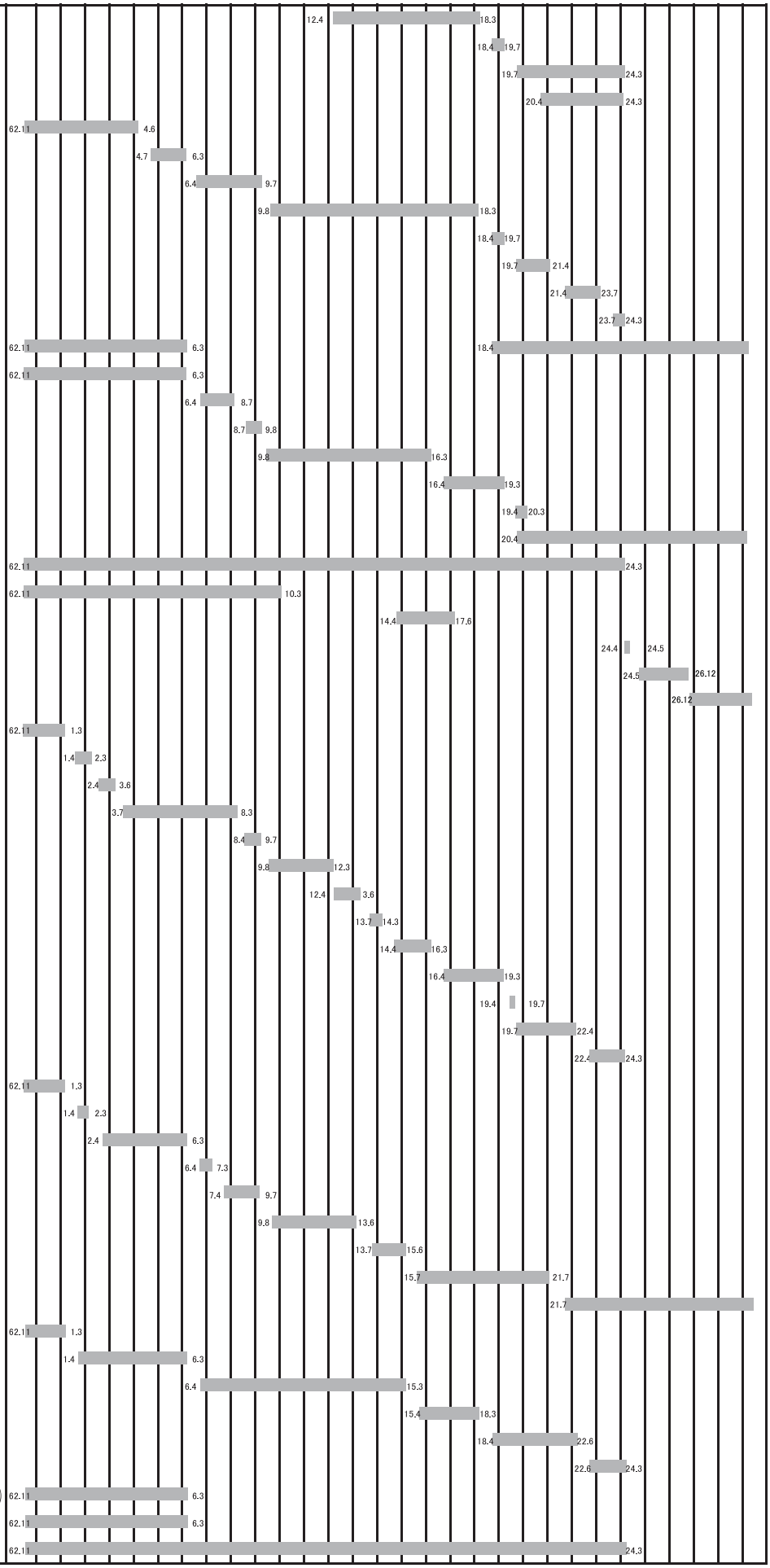
H24.4公益財団法人に移行後は、議長はその都度評議員会で選出




役職
氏名
所属
S62 S63 H1 H2 H3 H4 H5 H6 H7 H8 H9 H10 H11 H12 H13 H14 H15 H16 H17 H18 H19 H20 H21 H22 H23 H24 H25 H26 H27 H28 H29
加藤有一 関西電力㈱ 18.7 21.7
大田龍夫 関西電力㈱ 21.7 24.3
高杉政博 関西電力㈱ 24.4 25.6
大塚茂樹 関西電力㈱ 25.7 26.6
仙藤敏和 関西電力㈱ 26.7
赤崎正則 九州大学 62.11 10.3
高木俊宣 京都大学 62.11 10.3
東 邦夫 京都大学/京都大学名誉教授 12.4 16.3 24.4
小原 実 慶應義塾大学 12.4 14.3
神成文彦 慶應義塾大学 12.4 14.3 20.4 24.3
大和田野芳 (独)産業技術総合研究所 14.4 20.3
山田家和勝 (独)産業技術総合研究所 18.4 24.3
大越孝敬 産業技術融合領域研究所 6.4 6.11
高橋伸治 ㈱三和銀行 62.11 63.3
山藤正直 ㈱三和銀行 63.4 1.6
岡田純直 ㈱三和銀行 1.7 2.3
石合正和 ㈱三和銀行 4.4 7.3
清水庸介 ㈱三和銀行 7.4 8.3
中村 明 ㈱三和銀行 10.4 12.3
内藤暁彦 ㈱三菱銀行 62.11 1.3
石澤敏秀 ㈱三菱銀行 1.4 2.6
丹後忠次郎 ㈱三菱銀行 2.7 4.3
糸賀 勲 ㈱三菱銀行 6.4 6.6
浜石 満 ㈱三菱銀行 6.7 8.6
宇野節生 ㈱東京三菱銀行 8.7 10.3
五味康正 ㈱東京三菱銀行 12.4 14.3
片岡照栄 シャープ㈱ 63.4 1.3
土方俊樹 シャープ㈱ 1.4 11.3
矢野盛規 シャープ㈱ 11.4 14.6
種谷元隆 シャープ㈱ 14.7 17.6
高橋 明 シャープ㈱ 17.7 20.3
大上信之 ㈱住友銀行 2.4 3.3
加藤重義 ㈱住友銀行 3.4 5.3
小井戸雅彦 ㈱住友銀行 5.4 6.3
内田賢介 ㈱住友銀行 8.4 8.6
片岡哲治 ㈱住友銀行 8.7 10.6
永田武全 ㈱住友銀行 10.7 12.3
月原紘一 三井住友銀行㈱ 14.4 16.3
中野健一郎 三井住友銀行㈱ 16.4 16.6
宿澤広朗 三井住友銀行㈱ 16.7 17.6
上田 孝 三井住友銀行㈱ 17.7 18.3
磯嶋茂樹 住友電気工業㈱ 24.4
足立瑞穂 中部電力㈱ 62.11 2.3
竹内榮二 中部電力㈱ 2.4 4.3
鈴木光雄 中部電力㈱ 4.4 6.3
青木輝行 中部電力㈱ 6.4 8.3
池田紘一 中部電力㈱ 8.4 12.3
根石信行 中部電力㈱ 12.4 15.3
桂川 篤 中部電力㈱ 15.4 15.7
高木洋隆 中部電力㈱ 15.8 18.3
大野博孝 中部電力㈱ 18.4 19.7
篠田明秀 中部電力㈱ 19.7 22.6
板倉弘計 中部電力㈱ 22.6 23.7
佐藤正一 中部電力㈱ 23.7 24.3
丹野益男 (財)地球環境産業技術研究機構 20.4 23.5
竹田 守 (財)地球環境産業技術研究機構 23.7 24.3
植田憲一 電気通信大学 14.4 24.3


役職
氏名
所属
S62 S63 H1 H2 H3 H4 H5 H6 H7 H8 H9 H10 H11 H12 H13 H14 H15 H16 H17 H18 H19 H20 H21 H22 H23 H24 H25 H26 H27 H28 H29
宅間 宏 電気通信大学 62.1 22.1
加藤有一 (財)電力中央研究所 24.4
末松安晴 東京工業大学 62.1 6.3
青柳克信 東京工業大学 10.4 18.3
矢部 孝 東京工業大学 18.4 24.3
神谷武志 東京大学 6.4 18.3
藤井陽一 東京大学 6.4 14.3
渡部俊太郎 東京大学 12.4 24.3
山内 薫 東京大学 18.4 24.3
澤口祐介 東京電力㈱ 62.1 12.3
若林泰夫 東京電力㈱ 12.4 13.3
山田明彦 東京電力㈱ 13.4 15.3
天野 治 東京電力㈱ 15.4 18.3
鈴木一雄 東京電力㈱ 18.4 19.7
中島拓男 東京電力㈱ 19.7 23.4
富田邦裕 東京電力㈱ 23.4 24.3
可児次郎 ㈱東芝 62.1 6.3
伊藤 睦 ㈱東芝 6.4 7.6
宮本俊樹 ㈱東芝 7.7 9.7
待場 浩 ㈱東芝 9.8 12.3
庭野征夫 ㈱東芝 12.4 13.3
宮野 廣 ㈱東芝 13.4 14.3
佐々木則夫 ㈱東芝 14.4 16.3
須藤 亮 ㈱東芝 16.4 21.4
前川 治 ㈱東芝 21.4 24.3
西澤潤一 東北大学 62.1 4.3
山本正男 動力炉・核燃料開発事業団 62.1 2.6
樫原英千世 動力炉・核燃料開発事業団 2.7 6.6
山村 修 動力炉・核燃料開発事業団 6.7 9.7
梶谷幹男 動力炉・核燃料開発事業団 9.8 11.3
小池 進 核燃料サイクル開発機構 11.4 12.6
浅見知宏 核燃料サイクル開発機構 12.7 14.3
和田雄作 核燃料サイクル開発機構 14.4 18.3
飯泉 仁 日本原子力研究所 8.4 10.3
淺井 清 日本原子力研究所 10.4 11.3
村上健一 日本原子力研究所 11.4 12.6
齋藤伸三 日本原子力研究所 12.7 16.3
木村豊秋 日本原子力研究所 16.4 18.3
田島俊樹 (独)日本原子力研究開発機構 18.4 20.6
河西 俊一 (独)日本原子力研究開発機構 20.7 23.7
西 正孝 (独)日本原子力研究開発機構 23.7 27.1
内海 渉 (国研)量子科学技術研究開発機構 27.1
太田廉三 日本電気㈱ 62.1 1.3
島村忠雄 日本電気㈱ 1.4 4.3
泉谷敏之 日本電気㈱ 4.4 7.3
柳瀬武紀 日本電気㈱ 7.4 9.3
池田 明 日本電気㈱ 9.4 11.3
中田勝敏 日本電気㈱ 11.4 12.3
石井 眞 日本電気㈱ 12.4 14.3
宍戸顕司 日本電気㈱ 14.4 14.6
江上一成 日本電気㈱ 14.7 16.6
窪田恵一 レーザーフロントテクノロジーズ㈱ 16.7 21.7
鳥越俊宏 オムロンレーザーフロント㈱ 21.7 23.4
鈴木良和 オムロンレーザーフロント㈱ 23.4 24.3
菅 博文 浜松ホトニクス㈱ 14.4 28.4
原 勉 浜松ホトニクス㈱ 28.4
松倉浩司 (財)光産業技術振興協会 10.4 12.3

	灘本正博	(財)光産業技術振興協会
	伊藤隆一	(財)光産業技術振興協会
	小谷泰久	(財)光産業技術振興協会
	加藤義章	光産業創成大学院大学
	是井良朗	㈱日立製作所
	杉野栄美	㈱日立製作所
	林　勉	㈱日立製作所
	河原　暲	㈱日立製作所
	羽生正治	㈱日立製作所
	長澤克己	㈱日立製作所
	小田　篤	㈱日立製作所
	竹内　力	㈱日立製作所
	望月孝晏	姫路工業大学/兵庫県立大学
	中野秀男	富士電機㈱
	雪島伊乙夫	富士電機㈱
	小林　修	富士電機㈱
	井上　隆	富士電機㈱
	秋定俊裕	富士電機㈱
	白川正広	富士電機システムズ㈱
	尾崎　博	富士電機システムズ㈱/富士電機㈱
	吉原經太郎	分子科学研究所
	大塚喜弘	北海道大学
	吉田昭彦	松下電器産業㈱
	横谷洋一郎	パナソニック㈱
	山本修一	パナソニック㈱
	中田公明	パナソニック㈱
	田中史郎	三菱重工業㈱
	荻野周雄	三菱重工業㈱
	下田成章	三菱重工業㈱
	白鳥邦治	三菱重工業㈱
	金氏　顯	三菱重工業㈱
	饗場洋一	三菱重工業㈱
	中原　豊	三菱重工業㈱
	三村　泰	三菱重工業㈱
	大橋正雄	三菱重工業㈱
	向井　卓	三菱重工業㈱
	岡田敬三	三菱重工業㈱
	鈴木成光	三菱重工業㈱
	遠山　眞	三菱重工業㈱
	大西良一	三菱電機㈱
	土井貞春	三菱電機㈱
	岩本雅民	三菱電機㈱
	野間口有	三菱電機㈱
	廣　三壽	三菱電機㈱
	山中晤郎	三菱電機㈱
	山田忠利	三菱電機㈱
	八木重典	三菱電機㈱
	田中健一	三菱電機㈱
	新谷　健	三菱電線工業㈱
	四ッ谷雅實	三菱電線工業㈱
	今田善之	三菱電線工業㈱
	須藤恭秀	三菱電線工業㈱
	厨子敏博	三菱電線工業㈱
	谷口浩一	三菱電線工業㈱
	山下和彦	御幣島化学工業㈱
	関口　忠	横浜国立大学
	豊田浩一	理化学研究所



	石川哲也	理化学研究所	18.4 — 24.3
	緑川克美	理化学研究所	20.4 — 24.3
	森岡　昇	レーザー濃縮技術研究組合	62.11 — 15.6

歴代評議員選定委員

役職	氏名	所属	平成24年	平成25年	平成26年	平成27年	平成28年	平成29年	平成30年
評議員選定委員	高杉政博	関西電力㈱	24.5 — 25.6						
	大塚茂樹	関西電力㈱		25.7 — 26.6					
	仙藤敏和	関西電力㈱			26.7 — 28.4				
	西原功修	大阪大学名誉教授	24.5 — 28.4						
	三宅浩史	(公財)レーザー技術総合研究所	24.5 — 27.3						
	松村宏治	(公財)レーザー技術総合研究所			27.3 — 28.4				
	佐々木孝友	大阪大学名誉教授	24.5 — 28.4						
	阪部周二	京都大学	24.5 — 28.4						

歴代総務委員

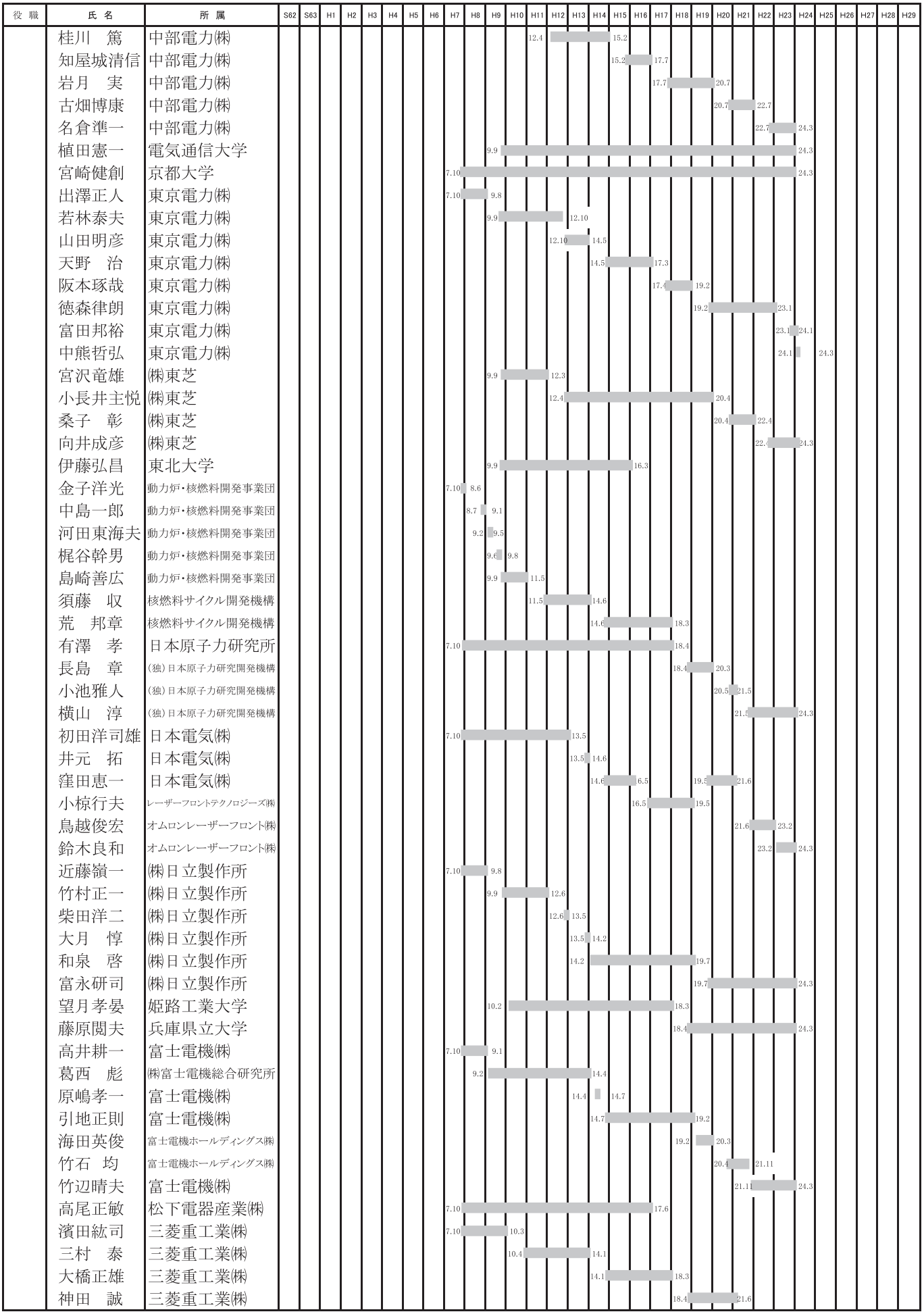
役職	氏名	所属	S62	S63	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
	前田　肇	関西電力㈱	62.11 — 6.3																														
	山崎吉秀	関西電力㈱								6.4 — 7.9																							
	辻　勝之	(財)大阪科学技術センター	62.11 — 1.7																														
	曾和正夫	(財)大阪科学技術センター						4.7 — 7.9																									
	井澤靖和	大阪大学	62.11 — 7.9																														
	竹内榮次	中部電力㈱	62.11 — 63.10																														
	葛島正生	中部電力㈱		63.10 — 5.3																													
	神長茂里雄	中部電力㈱							5.4 — 6.8																								
	成瀬喜代士	中部電力㈱								6.9 — 7.9																							
	高城　眞	東京電力㈱	62.11 — 4.3																														
	木嶋貞郎	東京電力㈱						4.4 — 7.9																									
	阿部　進	㈱東芝	62.11 — 3.3																														
	橋本　弘	㈱東芝				3.4 — 6.2																											
	宮本俊樹	㈱東芝							6.3 — 7.5																								
	後藤征一郎	㈱東芝									7.6 — 7.9																						
	福田令文	日本電気㈱	62.11 — 2.3																														
	水澤宏治	日本電気㈱			2.4 — 7.9																												
	和嶋常隆	㈱日立製作所	62.11 — 2.3																														
	小笠原英雄	㈱日立製作所			2.4 — 6.2																												
	近藤嶺一	㈱日立製作所							6.2 — 7.9																								
	平田　寛	富士電機㈱	62.11 — 7.4																														
	櫛田正弘	富士電機㈱								7.5 — 7.9																							
	佐藤広栄	三菱重工業㈱	62.11 — 63.5																														
	豊田行雄	三菱重工業㈱	63.4 — 3.3																														
	鹿島浩生	三菱重工業㈱					3.4 — 4.3																										
	中元弘之	三菱重工業㈱						4.4 — 6.4																									
	濱田紘司	三菱重工業㈱								6.5 — 7.9																							
	浅野俊郎	三菱電機㈱	62.11 — 2.3																														
	槙　浩平	三菱電機㈱			2.4 — 5.3																												
	大黒志郎	三菱電機㈱						5.4 — 7.9																									

歴代技術企画委員

役 職	氏 名	所 属	S62	S63	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
委員長	西村寅雄	関西電力㈱			1.7		3.3																										
	青木正寛	関西電力㈱				3.4					7.9																						
委員	河島信樹	宇宙科学研究所			1.7						7.9																						
	松原健夫	(財)大阪科学技術センター			1.7		3.6																										
	三間圀興	大阪大学			1.7				5.6																								
	加藤義章	大阪大学							5.7		7.9																						
	久保宇市	近畿大学			1.7						7.9																						
	三井　勉	住友電気工業㈱			1.7		3.6																										
	野田伸雄	住友電気工業㈱					3.7				7.9																						
	品田知章	中部電力㈱			1.7			4.3																									
	小林　勇	中部電力㈱						4.4	5.9																								
	鈴木光雄	中部電力㈱							5.10		7.9																						
	高城　眞	東京電力㈱			1.7				5.6																								
	木嶋貞郎	東京電力㈱							5.7		7.9																						
	岸重雄	㈱東芝			1.7						7.9																						
	竹之内一哲	㈱東芝			1.7		3.3																										
	大西紘一	動力炉・核燃料開発事業団					3.4	4.3																									
	金子洋光	動力炉・核燃料開発事業団						4.4			7.9																						
	鹿園直基	日本原子力研究所			1.7						7.9																						
	守部紀夫	日本電気㈱			1.7						7.9																						
	佐藤忠	㈱日立製作所			1.7						7.9																						
	高井耕一	富士電機㈱			1.7						7.9																						
	和佐清孝	松下電器産業㈱			1.7		3.6																										
	高尾正敏	松下電器産業㈱					3.7				7.9																						
	坂井廣	三菱重工業㈱			1.7						7.9																						
	永井昭夫	三菱電機㈱			1.7		3.6																										
	田中光雄	三菱電機㈱					3.7		5.6																								
	大場寛	三菱電機㈱							5.7		7.9																						
参与	西川禎一	大阪府			1.7		3.3																										
	森清圀生	大阪府					3.4	4.6																									
	広沢孝夫	大阪府						4.7			7.9																						
	長谷川純彦	(財)関西産業活性化センター			1.7		3.6																										
	灘本正博	近畿通商産業省			1.7		3.6																										
	佐伯英隆	近畿通商産業省					3.7	4.6																									
	染川弘文	近畿通商産業省						4.7	5.6																								
	丸山芳樹	近畿通商産業省							5.7		7.9																						
	和佐清孝	(財)地球環境産業技術研究開発機構						5.4			7.9																						

歴代総務企画委員

役職	氏名	所属	S62	S63	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
委員長	山崎吉秀	関西電力㈱									7.10		9.8																				
	梶井孝泉	関西電力㈱											9.9		11.9																		
	横手光洋	関西電力㈱													11.9		13.9																
	松尾雄一郎	関西電力㈱															13.9	14.7															
	桑原　茂	関西電力㈱																14.7			18.3												
	高杉政博	関西電力㈱																				18.4		18.8									
	木村　仁	関西電力㈱																					18.8		19.10								
	長谷泰行	関西電力㈱																						19.10	20.7								
	合澤和生	関西電力㈱																							20.7		23.7						
	大濱稔浩	関西電力㈱																									23.7	24.3					
委員	河島信樹	宇宙科学研究所									7.10																	24.3					
	中島信昭	大阪市立大学																				18.4						24.3					
	曾和正夫	(財)大阪科学技術センター									7.10		9.8																				
	小川裕策	(財)大阪科学技術センター											9.9							16.7													
	宮上逸郎	(財)大阪科学技術センター																		16.7				20.3									
	西田泰裕	(財)大阪科学技術センター																					20.4		20.5								
	菅　敏昭	(財)大阪科学技術センター																							20.7		23.7						
	井上哲也	(財)大阪科学技術センター																									23.7	24.3					
	中西英治	大阪ガス㈱									7.10				11.7																		
	中芝明雄	大阪ガス㈱													11.7		14.7																
	前田豊広	大阪ガス㈱																14.7		16.7													
	平野茂樹	大阪ガス㈱																		16.7				20.6									
	井澤靖和	大阪大学									7.10														21.3								
	増原　宏	大阪大学												10.2								18.3											
	中塚正大	大阪大学														12.4		14.3															
	田中和夫	大阪大学														12.4				16.3													
	西村博明	大阪大学																		16.3								24.3					
	粟津邦男	大阪大学																				18.4						24.3					
	森　勇介	大阪大学																						20.4				24.3					
	萩行正憲	大阪大学																				18.4		20.3									
	斗内政吉	大阪大学																						20.4				24.3					
	兒玉了祐	大阪大学																							21.4			24.3					
	白神宏之	大阪大学																							21.4			24.3					
	宮永憲明	大阪大学																							21.4			24.3					
	森井　浩	関西電力㈱														12.10		14.2															
	森　　修	関西電力㈱															14.2		14.7														
	胡内勝彦	関西電力㈱																14.7	14.12														
	山崎　啓	関西電力㈱																14.11	15.4														
	森　秀夫	関西電力㈱																	15.4						21.7								
	上田和夫	関西電力㈱																							21.7			24.3					
	塩見俊也	関西電力㈱														12.10		14.6															
	片山和彦	関西電力㈱																14.6		17.3													
	大森　武	関西電力㈱																			17.4		19.10									
	福谷　稔	関西電力㈱																					19.11		20.1								
	萩原利也	関西電力㈱																							20.1		22.4						
	寺井　功	関西電力㈱																									22.4	24.3					
	野田伸雄	住友電気工業㈱									7.10			10.1																			
	高田博史	住友電気工業㈱												10.1						16.1													
	奥田泰弘	住友電気工業㈱																		16.1								24.3					
	和佐清孝	(財)地球環境産業技術研究機構									7.10		9.8																				
	金井謙二	(財)地球環境産業技術研究機構											9.9		11.7																		
	吉村　進	(財)地球環境産業技術研究機構													11.7		13.6																
	米澤武敏	(財)地球環境産業技術研究機構															13.6				17.3												
	木村邦夫	(財)地球環境産業技術研究機構																			17.4			20.3									
	鈴木光雄	中部電力㈱									7.10		9.8																				
	向山　翼	中部電力㈱											9.9		12.3																		


役職
氏名
所属
S62
S63
H1
H2
H3
H4
H5
H6
H7
H8
H9
H10
H11
H12
H13
H14
H15
H16
H17
H18
H19
H20
H21
H22
H23
H24
H25
H26
H27
H28
H29
桂川　篤
中部電力㈱
12.4
15.2
知屋城清信
中部電力㈱
15.2
17.7
岩月　実
中部電力㈱
17.7
20.7
古畑博康
中部電力㈱
20.7
22.7
名倉準一
中部電力㈱
22.7
24.3
植田憲一
電気通信大学
9.9
24.3
宮崎健創
京都大学
7.10
24.3
出澤正人
東京電力㈱
7.10
9.8
若林泰夫
東京電力㈱
9.9
12.10
山田明彦
東京電力㈱
12.10
14.5
天野　治
東京電力㈱
14.5
17.3
阪本琢哉
東京電力㈱
17.4
19.2
徳森律朗
東京電力㈱
19.2
23.1
富田邦裕
東京電力㈱
23.1
24.1
中熊哲弘
東京電力㈱
24.1
24.3
宮沢竜雄
㈱東芝
9.9
12.3
小長井主悦
㈱東芝
12.4
20.4
桑子　彰
㈱東芝
20.4
22.4
向井成彦
㈱東芝
22.4
24.3
伊藤弘昌
東北大学
9.9
16.3
金子洋光
動力炉・核燃料開発事業団
7.10
8.6
中島一郎
動力炉・核燃料開発事業団
8.7
9.1
河田東海夫
動力炉・核燃料開発事業団
9.2
9.5
梶谷幹男
動力炉・核燃料開発事業団
9.6
9.8
島崎善広
動力炉・核燃料開発事業団
9.9
11.5
須藤　収
核燃料サイクル開発機構
11.5
14.6
荒　邦章
核燃料サイクル開発機構
14.6
18.3
有澤　孝
日本原子力研究所
7.10
18.4
長島　章
(独)日本原子力研究開発機構
18.4
20.3
小池雅人
(独)日本原子力研究開発機構
20.5
21.5
横山　淳
(独)日本原子力研究開発機構
21.5
24.3
初田洋司雄
日本電気㈱
7.10
13.5
井元　拓
日本電気㈱
13.5
14.6
窪田恵一
日本電気㈱
14.6
16.5
19.5
21.6
小椋行夫
レーザーフロントテクノロジーズ㈱
16.5
19.5
鳥越俊宏
オムロンレーザーフロント㈱
21.6
23.2
鈴木良和
オムロンレーザーフロント㈱
23.2
24.3
近藤嶺一
㈱日立製作所
7.10
9.8
竹村正一
㈱日立製作所
9.9
12.6
柴田洋二
㈱日立製作所
12.6
13.5
大月　惇
㈱日立製作所
13.5
14.2
和泉　啓
㈱日立製作所
14.2
19.7
富永研司
㈱日立製作所
19.7
24.3
望月孝晏
姫路工業大学
10.2
18.3
藤原閲夫
兵庫県立大学
18.4
24.3
高井耕一
富士電機㈱
7.10
9.1
葛西　彪
㈱富士電機総合研究所
9.2
14.4
原嶋孝一
富士電機㈱
14.4
14.7
引地正則
富士電機㈱
14.7
19.2
海田英俊
富士電機ホールディングス㈱
19.2
20.3
竹石　均
富士電機ホールディングス㈱
20.4
21.11
竹辺晴夫
富士電機㈱
21.11
24.3
高尾正敏
松下電器産業㈱
7.10
17.6
濱田紘司
三菱重工業㈱
7.10
10.3
三村　泰
三菱重工業㈱
10.4
14.1
大橋正雄
三菱重工業㈱
14.1
18.3
神田　誠
三菱重工業㈱
18.4
21.6

役職	氏名	所属	S62	S63	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	H8	H9	H10	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
	木村敏也	三菱重工業㈱																							21.6		23.4						
	宮口仁一	三菱重工業㈱																									23.4	24.3					
	松宮正幸	三菱電機㈱									7.10				11.7																		
	路次安憲	三菱電機㈱													11.7	12.6																	
	阪上武温	三菱電機㈱														12.6			15.1														
	谷　衛	三菱電機㈱																	15.1					20.3									
	小橋秀一	三菱電機㈱																						20.5	21.4								
	織戸浩一	三菱電機㈱																							21.4			24.3					
	田代英夫	理化学研究所											10.2											20.3									
	堀　保恵	関西電力㈱									7.10			10.1																			
	西嶋健一	関西電力㈱									7.10		9.8																				
	林　良樹	関西電力㈱											9.9			12.3																	
	鈴木一弘	東京電力㈱									7.10	8.8																					
	蓮池　透	東京電力㈱										8.9	9.8																				
	加藤俊明	東京電力㈱											9.9			12.3																	
	水澤宏治	日本電気㈱									7.10	8.1																					
	奥村泰彦	日本電気㈱									8.2		8.8																				
	高尾正敏	松下電器産業㈱									7.10					12.3																	
	大黒志郎	三菱電機㈱									7.10			10.1																			
	塩見俊也	関西電力㈱											10.1			12.3																	
	深見晴男	三菱電機㈱											10.1			12.3																	

歴代企画委員

役 職	氏 名	所 属	H24	H25	H26	H27	H28	H29
委員長	大濱稔浩	関西電力㈱	24.6	25.12				
	仙藤敏和	関西電力㈱		25.12	26.6			
	木島和夫	関西電力㈱			26.6			
委員	中島信昭	大阪市立大学	24.6					
	井上哲也	(財)大阪科学技術センター	24.6			27.6		
	石津京二	(財)大阪科学技術センター				27.6		
	粟津邦男	大阪大学	24.6					
	兒玉了祐	大阪大学	24.6					
	白神宏之	大阪大学	24.6					
	斗内政吉	大阪大学	24.6					
	西村博明	大阪大学	24.6					
	宮永憲明	大阪大学	24.6					
	森　勇介	大阪大学	24.6					
	鈴木良和	オムロンレーザーフロント㈱	24.6	25.10				
	沖野圭司	オムロンレーザーフロント㈱		25.10				
	上田和夫	関西電力㈱	24.6			27.3		
	横井賢二郎	関西電力㈱	24.7		26.4	27.3	27.6	
	山畑和樹	関西電力㈱		25.12	26.6			
	出来尚之	関西電力㈱			26.6	27.3		
	寺井　功	関西電力㈱	24.6	24.7				
	田中正人	関西電力㈱	24.7		26.6			
	山口浩司	関西電力㈱			26.6	27.12		
	近東正明	関西電力㈱				27.12		
	奥田泰弘	住友電気工業㈱	24.6					
	名倉準一	中部電力㈱	24.6	25.7				
	野田英智	中部電力㈱		25.7				
	植田憲一	電気通信大学	24.6					
	宮崎健創	京都大学	24.6					
	富田邦裕	東京電力㈱	24.6					
	中熊哲弘	東京電力㈱	24.6		26.7			
	武田和仁	東京電力㈱			26.7			
	向井成彦	㈱東芝	24.6					
	近藤公伯	(独)日本原子力研究開発機構	24.6					
	富永研司	㈱日立製作所	24.6		26.1			
	藤原閲夫	兵庫県立大学	24.6					
	竹辺晴夫	富士電機㈱	24.6					
	宮口仁一	三菱重工業㈱	24.6	25.5				
	濱崎　学	三菱重工業㈱		25.5		27.7		
	富田　淳	三菱重工業㈱				27.7		
	大谷浩二	三菱電機㈱	24.6					

4. 賛助会員名簿

（平成29年6月現在、50音順）

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

5. 受賞一覧

名　称	受賞者	受賞テーマ	受賞年月
レーザー学会奨励賞	藤原関夫 出口博史 畠山卓也	固体化電源を用いた銅蒸気レーザー（CVL）の研究	平成2.5
レーザー学会業績賞論文賞	又賀　昇	エキサイプレックス化学の開拓と展開	平成7.5
レーザー学会業績賞進歩賞	今崎一夫 藤田雅之 浅川誠	コンパクト自由電子レーザー装置の開発研究	平成7.5
電気学会電気学術振興賞進歩賞	内田成明 山中龍彦 河崎善一郎 足立幹雄	世界で初めてレーザー誘雷の実証に成功	平成10.5
レーザー学会業績賞進歩賞	内田成明 島田義則 安田裕彦 本越伸二 山中千代衛 他	レーザー誘雷の実証研究	平成10.5
電気学会優秀論文発表賞	島田義則	レーザー誘雷における強電離弱電離プラズマを用いた放電誘導実験	平成12.5
クリタ水・環境科学財団助成金	島田義則	水中に於けるレーザープラズマ誘起放電とその制御に関する研究	平成14.8
レーザー学会業績賞進歩賞	橋田昌樹 古河裕之 塚本雅裕 藤田雅之 井澤靖和	フェムト秒レーザーアブレーションによる新加工領域の特徴とナノ構造形成	平成16.5
プラズマ・核融合学会論文賞	西村博明 島田義則 砂原　淳 河村　徹 他	レーザー生成球対称Snプラズマからの極端紫外光(EUV)放射特性	平成17.11
大阪府知事賞	李　大治	Study on superradiant Smith-Purcell radiation	平成19.6
松尾学術振興財団松尾学術研究助成金	砂原　淳	レーザー生成プラズマ中の輻射輸送における光電離・光励起過程の導入	平成19.10
電気学会電気学術振興賞論文賞	藤田雅之 宮永憲明 江刺正喜 他	Debris-Free-LASER-AssistedLow-Stress Dicing for Multi^Layered MEMS	平成21.5
レーザー学会業績賞進歩賞	藤田雅之 宮永憲明 江刺正喜 田中秀治 他	積層MEMSのためのパスルレーザー支援デブリフリー低ストレスダイシング技術の開発	平成21.5
レーザー学会優秀論文発表賞	染川智弘	白色光偏光ライダーの開発	平成21.5
倉田記念日立科学技術財団倉田奨励金	ハイク　コスロピアン	光活性タンパク質の光電導効果の研究	平成22.1
倉田記念日立科学技術財団倉田奨励金	李　大治	ブラッグ反射機能を用いたテラヘルツスミス・パーセル放射減の研究開発	平成22.1
日本鉄道協会坂田記念賞	御崎哲一 島田義則 篠田昌弘	レーザー超音波リモートセンシングによるコンクリート欠陥の非破壊検査法の開発	平成22.5
応用物理学会講演奨励賞	古瀬裕章	全反射アクティブミラーレーザーの高出力化	平成22.3
堀場雅夫賞	染川智弘	高強度フェムト秒レーザーを用いた白色光ライダーの開発	平成22.10
光産業技術振興会創立30周年記念功労賞	藤田雅之		平成22.12
レーザー学会優秀論文発表賞	古瀬裕章	次世代大出力レーザーのためのジグザグアクティブミラー増幅器の開発	平成23.5
レーザ・レーダ研究会廣野賞	染川智弘		平成23.9
住友財団環境研究助成金	櫻井俊光	パルスレーザーを利用した、極地氷床コアに含まれる微生物の分光解析	平成24.10
光科学技術研究振興財団研究助成金	李　大治	メタマテリアルを用いた放射光発生の基礎研究	平成25.2
国際科学技術財団研究助成金	櫻井俊光	氷コアに含まれる人為起源物質と生命環境起源物質の計測技術に関する研究	平成25.4
ひょうご科学技術協会学術研究助成金	谷口誠治	液相レーザーアブレーションによる活性金属ナノ粒子生成と水素生産への応用	平成25.5
レーザー学会業績賞進歩賞	御崎哲一 高橋康将 瀧浪秀元 島田義則 オレグコチャエフ 江原季映 篠田昌弘	レーザーを用いたトンネル覆工コンクリート欠陥検査法の研究	平成25.5
土木学会技術開発賞	御崎 哲一 島田 義則 オレグコチャエフ 篠田 昌弘 江本 茂夫	レーザーによる非接触計測技術を用いたコンクリート剥離検査装置の開発	平成26.6
松尾学術振興財団松尾学術研究助成金	李　大治	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	平成26.10
天田財団レーザプロセッシング 一般研究開発助成金	藤田雅之	短パルスレーザーを用いた炭素繊維強化複合材の微細加工技術の開発	平成26.11
日本板硝子材料工学助成金	本越　伸二	多光子吸収過程によるガラス三次元造形	平成27.4
レーザー学会業績賞論文賞	東口武史 藤岡慎介 砂原 淳 柳田達哉 溝口 計	EUV露光光源の研究開発の現状	平成27.5
天田財団レーザプロセッシング 一般研究開発助成金	本越　伸二	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	平成27.11
日本鉄道サイバネティクス協議会表彰「論文賞」	御崎哲一 島田義則 篠田昌弘	レーザを用いたコンクリート剥離検知装置の開発	平成28.5
第42回リモートセンシングシンポジウム部会奨励賞	染川智弘	コヒーレント白色光を用いた長光路差分吸収分光法による大気中CO2の計測	平成29.3
レーザー学会産業賞功績賞	レーザー技術総合研究所	光学素子のレーザー損傷しきい値のデータベース	平成29.4

	レーザー学会業績賞進歩賞 島田義則他 平成25.5
	土木学会技術開発賞 島田義則他 平成26.6
	レーザー学会業績賞論文賞 砂原 淳他 平成27.5
	日本鉄道サイバネティクス協議会表彰「論文賞」 島田義則他 平成28.5
	第42回リモートセンシングシンポジウム部会奨励賞 染川智弘 平成29.3
	レーザー学会産業賞功績賞 公益財団法人レーザー技術総合研究所 平成29.4

6. 泰山賞の贈呈

第1回 ： 平成21年7月16日			
	レーザー功績賞	霜田光一	マイクロ波分光学からメーザー レーザーに及ぶ永年にわたる光科学技術の先導的研究
	レーザー進歩賞	宮永憲明 實野孝久	高エネルギーペタワットレーザーLFEXの開発
第2回 ： 平成22年7月13日			
	レーザー功績賞	宅間　宏	レーザー科学の振興と発展に対する永年にわたる顕著な貢献
	レーザー進歩賞	緑川克美	高出力アト秒レーザーの開発と応用研究
第3回 ： 平成23年7月12日			
	レーザー功績賞	山中千代衛	大出力レーザーと慣性核融合の先導的研究ならびにレーザー学会創立等による永年の科学技術への顕著な貢献
	レーザー進歩賞	植田憲一	稀ガス・ファイバー・セラミックスレーザーの高出力化開発とその応用に関する研究
第4回 ： 平成24年7月18日			
	レーザー功績賞	豊田浩一	レーザーマイクロプロセスの研究とレーザー科学技術の発展に対する貢献
	レーザー進歩賞	渡部俊太郎	超短パルス高強度レーザーとコヒーレント短波長光発生に関する先駆的研究
第5回 ： 平成25年7月10日、7月17日			
	レーザー功績賞	中井貞雄	レーザー核融合研究と高出力レーザー開発への貢献
	レーザー進歩賞	石川哲也	X線自由電子レーザーSACLAプロジェクトの推進
第6回 ： 平成26年7月11日			
	レーザー功績賞	加藤 義章	大出力レーザーの研究開発と光科学の推進への貢献
	レーザー進歩賞	菅　博文 川嶋利幸 山中正宣	半導体レーザー励起高出力固体レーザーの開発
第7回 ： 平成27年7月10日			
	レーザー功績賞	井澤靖和	レーザーの原子力 核融合および産業分野への応用に関する研究の推進
	レーザー進歩賞	大道博行 河内哲哉	レーザー生成X線レーザーの開発とその応用に関する先駆的研究
第8回 ： 平成28年7月15日			
	レーザー功績賞	伊賀健一	面発光レーザーの発明と光エレクトロニクス発展への永年にわたる貢献
	レーザー進歩賞	兒玉了祐	超高強度レーザーによるプラズマフォトニクスの先駆的研究
第9回 ： 平成29年7月21日			
	レーザー功績賞	三間圀興	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	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

7. 特許一覧

公開番号	発明の名称
2004-354535	光学媒質の光入出射部処理方法
2005-147813	レーザ超音波による材料非破壊検査方法及び装置
2006-276282	光学媒質の光入出射部処理方法
2008-200698	円筒内周面の周期構造体加工方法と円筒内周面の周期構造体加工装置
2008-200699	外周体の周期構造体加工方法と外周体の周期構造体加工装置
2009-030996	干渉縞安定化装置およびそれを用いた非破壊検査装置
2009-023215	積層体の割断方法
2009-081235	n型酸化物半導体の特性制御方法（酸化チタンの特性制御方法）
2009-105006	EUV光の放射方法、および前記EUV光を用いた感応基板の露光方法
2010-177340	ダイシング方法およびエキスパンド装置
2011-245492	金属表面加工方法及び金属表面加工装置
2012-230053	ひび割れ深さ測定装置及び測定方法
2013-029399	欠陥検査装置
2012-199201	極端紫外光生成装置及び極端紫外光生成方法
2015-148442	物質特定システムおよび物質特定方法
2013-148769	複数ビーム結合装置
2015-005572	ビーム結合装置、ビーム結合方法
2015-052551	油中成分測定方法、及び油入電気機器

外国特許

出願番号	発明の名称
2014074005	物質特定システムおよび物質特定方法(PCT)
13738607.4	複数ビーム結合装置（EP）
2.0138E+11	複数ビーム結合装置（CN）
14368559	複数ビーム結合装置（US）
2014128306	複数ビーム結合装置（RU）

8. 刊行物一覧

書籍名	著　者	発行日
レーザーと未来社会	山中千代衛　編	昭和60.10
レーザーセンシングとその応用	山中千代衛　編	昭和63.9
レーザーと宇宙	河島信樹	昭和63.9
レーザー同位体分離とレーザー技術開発	山中千代衛　編	昭和63.11
最近のレーザー技術とプロセッシング	山中千代衛　編	昭和63.12
最近の自由電子レーザー開発の動向とその応用	三間圀興、冨増多喜夫	平成元.6
最近のレーザー事情	山中千代衛	平成2.2
新型レーザーが拓く先端技術	山中千代衛　編	平成2.3
レーザーを用いた有機材料開発の最前線を探る	増原　宏	平成2.4
21世紀とハイテクノロジー	山中千代衛	平成2.8
大型放射光施設計画　-6　GeV　SOR-	原　雅弘、岩崎　準	平成2.11
レーザープロセス技術の最先端（Ⅰ）	山中千代衛　編	平成3.1
レーザーで拓く細胞工学	粕谷敬宏	平成3.1
ハイパワーレーザー最新技術	山中千代衛　編	平成3.6
光科学のフロンティア	角戸正夫	平成3.7
X線レーザープロセス技術の最先端	山中千代衛　編	平成3.12
レーザープロセス技術の最先端（Ⅱ）	山中千代衛　編	平成4.2
自由電子レーザーの現状と応用	今崎一夫	平成4.2
新しい極短波長光源を求めて	加藤義章	平成4.3
極超低温を達成する　-レーザーによる冷却-	清水富士夫	平成4.5
21世紀エレクトロニクス　-最も東洋的なるものを求めて-	柏木　寛	平成4.5
フロンティアメディカルレーザー	渥美和彦	平成4.5
レーザーを用いた計測技術	山中千代衛　編	平成4.10
ILT5年の進歩	レーザー技術総合研究所　編	平成4.11
超高速光エレクトロニクス	末松安晴	平成5.3
光通信で築く未来情報化社会の展望	山中千代衛　編	平成5.5
レーザーの生体効果と医学	神川喜代男	平成5.10
固体レーザーの魅力を探る	山中千代衛　編	平成5.11
レーザーセンシングの最前線を探る	山中千代衛　編	平成6.1
ソリトン通信	長谷川晃	平成6.5
レーザーで拓く近未来マシン	浮田宏生	平成6.9
スラブレーザー研究開発の現状と展望	望月孝晏	平成6.11
新しい光源が拓く最先端技術	山中千代衛　編	平成7.2
光散乱計測	朝倉利光	平成7.3
生物フォトンの計測とその応用	稲葉文男	平成7.10
レーザー応用センシング	山口一郎	平成8.3
原子光学とその応用	宅間　宏	平成9.3
ビジュアル　レーザーの科学	レーザー技術総合研究所　編	平成9.9
ILT the 10th anniversary　Laserとともに10周年	レーザー技術総合研究所　編	平成9.10
光と蔭	「光と蔭」編集委員会	平成12.10

レーザーと現代社会	レーザー技術総合研究所　編	平成14.10
ILT the 15th anniversary　レーザーと現代社会	レーザー技術総合研究所　編	平成14.11
光と蔭のはざまに	山中千代衛	平成17.5
慣性核融合開発史–レーザー核融合研究パイオニア物語–	山中千代衛	平成18.9
20年の進歩	山中千代衛　編	平成19.10
ILT the 20th anniversary　光科学技術の拓く新天地	レーザー技術総合研究所　編	平成19.11
レーザー総研25年の進歩	レーザー技術総合研究所　編	平成24.7
光と蔭のあや	山中千代衛	平成27.3

9. 役職員・共同研究員名簿

理事長	大石富彦
副理事長・所長	井澤靖和
常務理事	松村宏治
常務理事・副所長	中塚正大

構成員

レーザーエネルギー研究チーム

チームリーダー	井澤靖和（兼務）
研究員	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）	藤田雅之
副主任研究員	ハイク・コスロービアン（兼務）
副主任研究員	染川智弘

レーザー計測研究チーム

主任研究員（チームリーダー）	島田義則
副主任研究員	谷口誠治（兼務）
副主任研究員	オレグ・コチャエフ
研究員	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	中島　信昭
研究員	ハイク・コスロービアン
研究員	谷口　誠治

理論・シミュレーションチーム

チームリーダー	井澤靖和（兼務）
研究員	古河裕之

レーザー技術開発室

主任研究員（室長）	本越伸二
研究員	岸田知門

総務部

事務局長	松村宏治（兼務）
総務部長	松村宏治（兼務）
マネージャー	幸脇朱美
マネージャー	小野田理恵
マネージャー	藤本　勲
事務員	藤田淑子

特別研究員

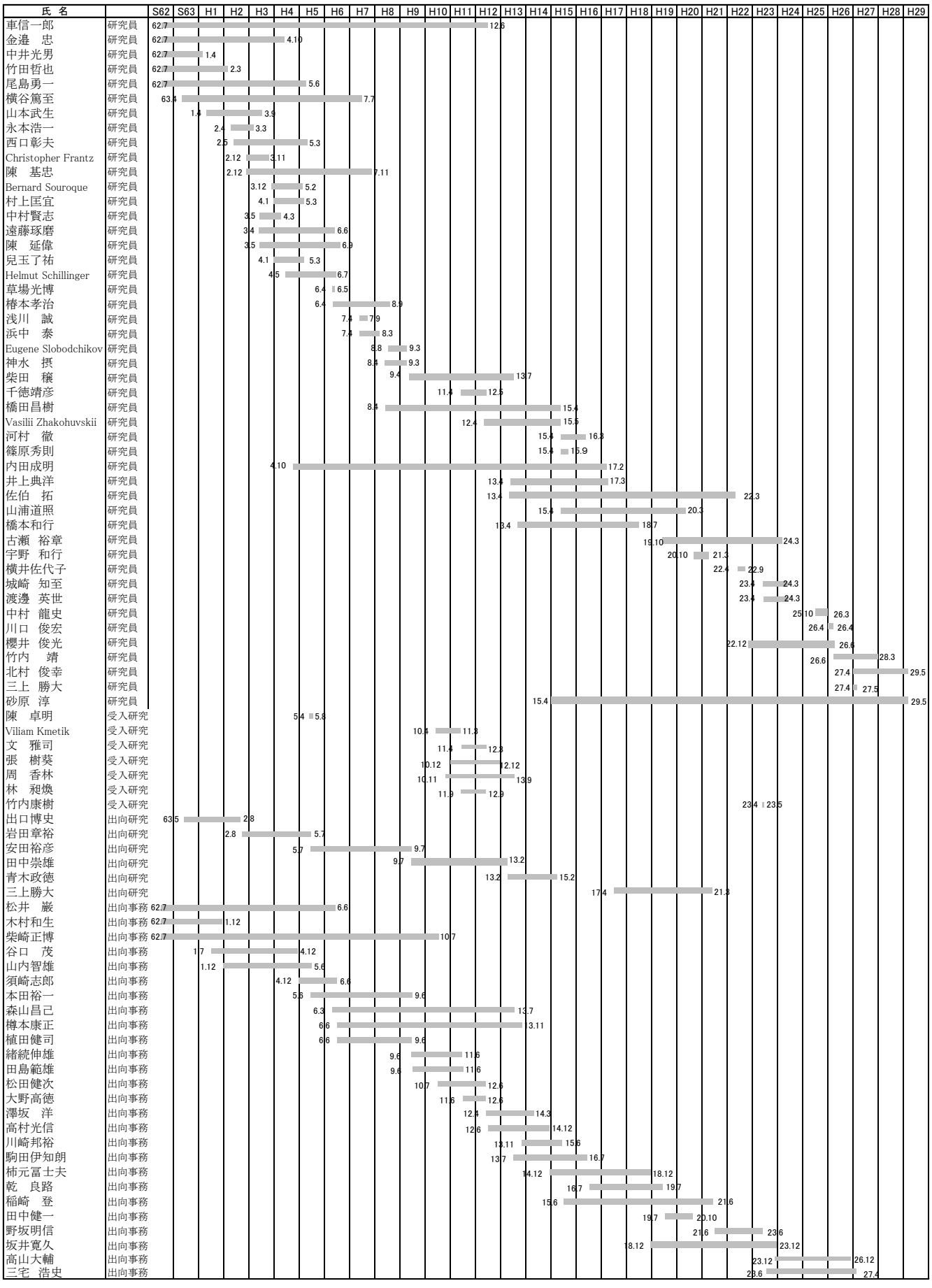
京都大学	名誉教授	毛利明博
元日新電機㈱		鈴木泰雄
元三菱電機㈱		田畑則一
三重県立看護大学	名誉教授	田中文夫
元東京工業大学	准教授	糟谷紘一
大阪市立大学	名誉教授	中島信昭
（公財）レーザー技術総合研究所		今﨑一夫

共同研究員

大阪大学レーザー科学研究所	教授	千徳　靖彦
大阪大学レーザー科学研究所	教授	斗内　政吉
大阪大学レーザー科学研究所	教授	西村　博明
大阪大学レーザー科学研究所	教授	乗松　孝好
大阪大学レーザー科学研究所	教授	藤岡　慎介
大阪大学レーザー科学研究所	教授	宮永　憲明
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	河仲　準二
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	坂和　洋一
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	重森　啓介
大阪大学レーザー科学研究所	准教授	中嶋　誠
大阪大学レーザー科学研究所	講師	時田　茂樹
大阪大学レーザー科学研究所	助教	椿本　孝治
大阪大学レーザー科学研究所	特任教授	疇地　宏
大阪大学レーザー科学研究所	招へい教授	實野　孝久
大阪大学大学院工学研究科	教授	栗津　邦男
大阪大学大学院工学研究科	教授	兒玉　了祐
大阪大学大学院基礎工学研究科	教授	宮坂　博
大阪大学大学院理学研究科	准教授	山中　千博
大阪大学接合科学研究所	教授	節原　裕一
大阪大学接合科学研究所	教授	塚本　雅裕
大阪大学光科学センター	特任教授	佐々木孝友
大阪工業大学工学部	教授	西口　彰夫
大阪産業大学工学部	教授	草場　光博
大阪市立大学大学院理学研究科	教授	八ツ橋知幸
岡山大学大学院自然科学研究科	助教	西川　亘
核融合科学研究所	准教授	岩本　晃史
核融合科学研究所	助教	安原　亮
関西学院大学理工学部	教授	玉井　尚登
関西大学システム理工学部	教授	淺川　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
近畿大学理工学部	教授	中野　人志
近畿大学理工学部	教授	橋新　裕一
近畿大学理工学部	教授	吉田　実
近畿大学理工学部	教授	前田　佳伸
高知工業高等専門学校	准教授	赤松　重則
高知工業高等専門学校	准教授	芝　治也
摂南大学工学部	教授	田口　俊弘
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
電気通信大学大学院情報理工学研究科	教授	西岡　一
電気通信大学　企画調査室	特任教授	植田　憲一
東京工業大学大学院情報理工学研究科	教授	廣瀬　壮一
東京工業大学大学院総合理工学研究科	講師	河村　徹
東北大学大学院工学研究科	教授	田中　秀治
東北大学大学院理学研究科	准教授	柴田　穣
台湾国立交通大学	講座教授	增原　宏
日本原子力研究開発機構福島研究部門楢葉遠隔技術開発センター	上席嘱託	大道　博行
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　圀興
大阪産業大学	准教授	部谷　学
兵庫県立大学大学院工学研究科	教授	藤原　閑夫
兵庫県立大学高度産業科学技術研究所	所長	宮本　修治
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
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	城﨑　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	金邉　忠
福岡工業大学工学部	教授	河村　良行
福岡工業大学情報工学部	准教授	中村　龍史
防衛大学校システム工学郡	准教授	篠田　昌弘
北海道大学大学院工学研究院	教授	足立　智
北海道大学大学院工学研究院	教授	長谷川靖哉
宮崎大学産学・地域連携センター	准教授	甲藤　正人
山梨大学大学院医学工学総合研究部	教授	張本　鉄雄
山梨大学大学院医学工学総合研究部	准教授	宇野　和行
立命館大学情報理工学部	教授	陳　延偉
立命館大学総合科学技術研究機構	客員教授	七田　芳則
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	主幹研究員	佐々木　明
量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門光量子科学研究部	主幹研究員	長谷川　登
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	研究グループリーダー（レーザー医学開発ユニット）	山川　考一
量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門光量子科学研究部	サブリーダー	錦野　将元
量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門光量子科学研究部	研究員	三上　勝大
量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門光量子科学研究部研究企画室		近藤　修司
量子科学技術研究開発機構量子ビーム科学研究部門光量子科学研究部研究企画室		岡田　大

10.OB 研究者・職員の推移

10.OB研究者・職員の推移



11. 研究所30年の歴史と実績

原子力・エネルギー応用

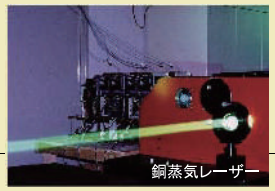
レーザーウラン濃縮関連

レーザー同位体分離技術（1987～2000）

銅蒸気レーザーウラン濃縮開発（1987～1990）

LD励起固体レーザーシステム化（1996～）

FELを用いた安定同位体分離の基礎研究（1997～1999）



波長可変固体レーザー開発（1990～1995）

核種消滅処理技術の応用（1995～）

レーザー光学反応と群分離の基礎研究（1990～1993）

レーザークリーニング、レーザー除染（1996～1999）

電力・社会基盤関連

レーザー誘雷（1990～）

エネルギー輸送技術の調査研究（1989～1994）

地球環境問題

環境保全CO_2固定化（1990～2004）

新物質・材料その他

レーザー加工

高平均出力YAGスラブレーザー開発（1989～1990）

高輝度繰り返しスラブレーザー開発（1990～1994）

超高強度、極短パルスレーザーの開発（1990～）

フェムト秒レーザーによる非熱加工（1999～）

レーザープラズマX線源（1991～1995）

自由電子レーザー開発（1989～2000）

ナノ周期構造形成（1999～）

生物・医学応用

生体の光機能メカニズムの解明（1998～）

財団の沿革

1987年
- 4月・設立準備室
- 5月・設立発起人会開催
- 10月・財団法人設立許可
- 10月・飯田孝三理事長就任
- 11月・財団設立総会開催
- ・第1回理事会開催

1988年
- 3月・総務委員会設置
- ・試験研究法人
- 11月・レーザー技術調査委員会発足

1989年
- 4月・第四研究部設置
- 7月・技術企画委員会設置

1991年
- 10月・第14回自由電子レーザー国際会議
- ・第1回組織委員会、実行委員会開催

1992年
- 4月・成松啓二理事長就任
- 8月・ICFフォーラムおよびレーザー核融合技術振興会設置
- ・第14回自由電子レーザー国際会議(FEL'92)開催
- 11月・創立5周年記念行事実施

1993年
- 4月・自由電子レーザー研究会設置
- ・7月北田幹夫理事長就任

1994年
- 11月・極限光量子プロセス技術研究会設置
- （～平成8年度）

1995年
- 4月・第五研究部設置
- 11月・総務企画委員会設置、第1回委員会開催

1997年
- 7月・レーザー誘雷野外実験成功記者発表
- 8月・宮本一理事長就任
- 10月・設立10周年記念行事「シンポジウム」開催

1998年
- プロジェクト・チーム研究制導入

1987 | 1990 | 1995 | 2000

レーザーに架ける夢、レーザーが拓く未来

太陽光励起レーザー開発（2001～）

レーザーロケット推進（2001～2005）

γ線発生（2001～）

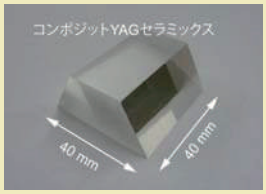
レーザーエネルギー伝送（1999～2005）

200W級模擬太陽光励起レーザーの開発に成功（2005）

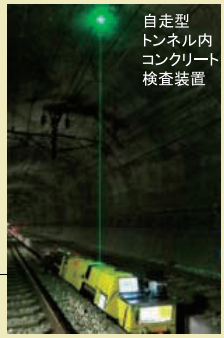
光学素子損傷しきい値のデータベース化（2007～）

γ線によるヨウ素核変換に成功（2007）

高出力Yb:YAGレーザーの開発（2007～）



クライオジェニックレーザーでkW出力を達成（2015）



新幹線トンネルの検査に成功（2011）

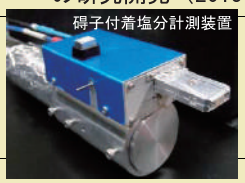
トンネル内コンクリート探傷（2002～）

高架橋検査技術（2010～）

テラヘルツ波による非破壊診断技術（2012～）

碍子付着塩分計測装置の開発（2010～2015）

非破壊劣化インフラ診断技術の研究開発（2015～）



変圧器油種識別技術（2010～2016）

ダイオキシンの検出、分解（2000～2006）

非平衡プラズマによる排ガス無害化（2001～2003）

水中ラマンライダー（2008～）

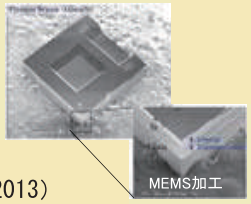
温室効果ガス検出

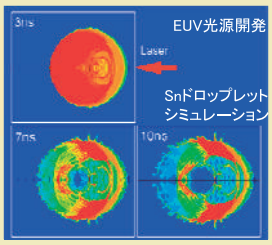
極短紫外（EUV）光源開発（2003～2016）

MEMS加工技術開発（2006～2013）

CFRP材料加工（2009～2016）

レーザー融雪実験（2013）





スミス-パーセル型テラヘルツ自由電子レーザー研究（2004～）

コヒーレントビーム結合技術の開発（2010～）

顕微分光装置の開発（2005～2010）

レーザーによるナノ粒子合成（2010～）

2005年
7月・齋藤紀彦理事長就任

2008年
7月・橋本徳昭理事長就任

2015年
7月・大石富彦理事長就任

2001年
7月・森詳介理事長就任

2007年
7月・藤野隆雄理事長就任
11月・設立20周年記念行事「シンポジウム」開催

2017年
7月・創立30周年記念事業開催

2002年
11月・設立15周年記念行事「シンポジウム」開催

2012年
4月・公益財団法人へ移行
7月・創立25周年記念事業開催

2009年
4月・井澤靖和所長就任
7月・レーザー発明50周年記念泰山賞創設

2006年
レーザー技術開発室設置

2005 | 2010 | 2015 | 2017～

12. メディア掲載

2014.4.10	コンクリート内部欠陥検出（車両開発）	北日本新聞
2016.1.11	コンクリート内部の欠陥の検出速度を従来の50倍（0.5Hz→25Hz）に向上	朝日新聞、日本経済新聞
2016.1.12		電気新聞
2016.2.1		読売新聞
2017.1.1	・コンクリート内部欠陥検出の屋外実験成功 ・検出速度を50Hzに向上	科学新聞
2017.2.15		日経産業新聞
2017.7.1	模擬トンネルでコンクリート内部欠陥検出実験成功	日本経済新聞

創立30周年記念誌

発行／公益財団法人　レーザー技術総合研究所
〒550-0004　大阪市西区靱本町1丁目8番4号
大阪科学技術センタービル4F
TEL 06-6443-6311 FAX 06-6443-6313
URL http://www.ilt.or.jp/
編集／公益財団法人　レーザー技術総合研究所
製作／公益財団法人　レーザー技術総合研究所
発行日／平成29年7月21日
不許複製

Institute for Laser Technology