

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02028

研究課題名(和文) Erファイバーコムを用いた可視域デュアルコム分光に関する研究

研究課題名(英文) Dual-comb spectroscopy at visible wavelength range using Er fiber combs

研究代表者

洪 鋒雷 (HONG, Feng-Lei)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10260217

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 26,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、デュアルコム分光において、長時間運転が可能でメンテナンスフリーという実用性の観点から、可視域における信頼性の高いデュアルコム分光計を、光源発生から実証まで研究を進める。可視域光コムの発生では、導波路型周期的分極反転ニオブ酸リチウム結晶による広帯域コムの発生及びそのメカニズムの解明に成功した。また、開発した20 MHzの低繰り返し周波数光コムを用いたデュアルコム分光によってアセチレン分子の吸収スペクトルを観測した。さらに、可視域のよう素吸収線のデュアルコム分光による観測を行い、信号対雑音比においては背景フィッティングが有効であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：We have performed dual-comb spectroscopy using maintenance-free and reliable fiber combs. We establish a dual-comb spectrometer from the development of optical sources to the verification of the observed results. In the visible comb generation experiment, we performed broadband comb generation using wave-guide-type periodically poled lithium niobate crystal and revealed the mechanism of the broadening. We have also developed 20-MHz low-repetition-rate combs for high-resolution dual-comb spectroscopy. In this case acetylene absorption lines were observed. In the visible range, dual-comb spectroscopy were performed to observe absorption lines of molecular iodine. We found that a higher signal-to-noise ratio can be obtained by fitting the background signals.

研究分野：応用物理

キーワード：光コム レーザー分光 精密分光 デュアルコム分光 ファイバーコム 分子分光 原子分光 周波数安定化レーザー

1. 研究開始当初の背景

精密分光学は、100年も前からその歴史が始まり、量子物理学法則の発見、基礎定数の決定、時間や長さ標準の実現に大きく貢献してきた。その後、光源の進歩及びドップラー・フリーの高分解能分光手法の開発により、精密分光に関する研究は大きく発展してきた。20世紀の終わりに、「光周波数コム」によるレーザー周波数の絶対計測が実現され、この研究分野に大きなブレークスルーをもたらした。本研究は、光周波数コムの応用技術として、デュアルコム分光法を進展させ、高信頼性可視域デュアルコム分光の研究開発を行う。具体的には、Erファイバーレーザーをベースとした光コムを用いて、導波路型周期分極反転LiNbO₃結晶による可視域までの帯域の拡張を行い、使いやすく長時間稼働可能な高信頼性可視域デュアルコム分光の研究開発を行う。

2. 研究の目的

我々は、モード同期レーザーによる光周波数コムを用いた超精密レーザー分光及び光周波数標準の研究を進めてきた。その結果、Erファイバーレーザーを用いた光周波数コムシステムの高信頼性を見出し、Erファイバー型光コムの基礎及び応用研究を世界的にリードしてきた。光コム2台を使うデュアルコム分光法は、従来のフーリエ変換分光法と比べて分解能が高くかつ測定時間が短いため、燃焼ガスの分析などに役に立つと期待され、その実用化が望まれている。しかし、Erファイバーコムを用いた可視域のデュアルコム分光はまだ実現されていない。高効率の非線形波長変換デバイスによる光コムの広帯域化メカニズムを解明し、可視域のデュアルコム分光計を構築し、Erファイバーコムによる信頼性の高いデュアルコム分光を実証することを目指す。

3. 研究の方法

本研究は、デュアルコム分光において、長時間運転が可能でメンテナンスフリーという実用性の観点を捉え、可視域における信頼性の高いデュアルコム分光計を、光源発生から実証まで研究を進める。そのために、近赤外のErファイバーコムによる広帯域可視光コムの発生という課題を取り上げ、導波路型周期分極反転LiNbO₃結晶による広帯域近赤外コムから広帯域可視コムへのダイレクトな波長変換を実施し、そのメカニズムを解明する。さらに、発生した広帯域可視コムを用いて、デュアルコム分光計を構築し、赤から青まではヨウ素分子やYb原子などを使ってデュアルコム分光の実証を行う。また、新たに開発された分光計の性能評価を行い、その信頼性についても総合的な検証を行う。

4. 研究成果

(1) 可視領域の光周波数コムを得るために

は非線形光学効果を利用した波長変換が一般的な方法である。波長1.55 μm中心で発振するモード同期ErファイバーレーザーをベースとしたErファイバーコムは、Er添加光ファイバー増幅器と高非線形ファイバーを用いて広帯域化することで、1.0-2.0 μm程度の波長広がりを得ている。我々は、広帯域化されたErファイバーコムの光を導波路型周期的分極反転ニオブ酸リチウム(WG-PPLN)結晶に入射し、その超広帯域スペクトル発生の最適化と発生メカニズムの解明を目指す。

図1に実験装置の概念図を示す。モード同期レーザーの出力は4分岐され、そのうちのひとつを広帯域化に利用している。光増幅器の増幅によりスペクトルは約1.5-1.6 μmに広がる。分散補償で増幅器の前にシングルモードファイバーを用いる。増幅器の後、高非線形ファイバーによりスペクトルの帯域は1.0 μmから少なくとも1.7 μmに広げられる。高非線形ファイバー後の光を可視まで広げるためにシングルモードファイバーをWG-PPLN結晶に空間的に近づけてカップリングを行う。結晶出射後の光は対物レンズでコリメートされ、分光器(Ocean Optics, USB2000)、光スペアナ(Agilent, 86145B)へと分けられ、それぞれスペクトルの広がり観測に用いられる。

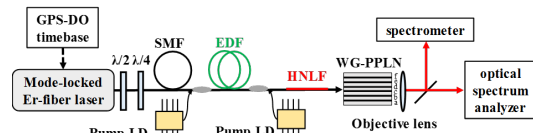


図1 実験装置の概念図。λ/2:1/2波長板、λ/4:1/4波長板、LD:半導体レーザー、EDF:エルビウム添加ファイバー、HNLF:高非線形ファイバー、WG-PPLN:導波路型周期的分極反転ニオブ酸リチウム結晶。

図2は可視領域まで広がったWG-PPLN結晶後のスペクトルの広がり一例であり、光スペアナを用いて350-750 nmと600-1700 nmの2つの波長範囲で測定したデータを繋げたものである。図の点線はノイズフロアであり、光スペアナの測定限界を表している。WG-PPLN後にスペクトルが短波長側に少なくとも400 nmまで広がっていることが分かる。また結晶には分極反転周期の異なる(28.50 μmから50 nm毎に28.75 μmまで)6種類の導波路があり、その導波路全てにおいて可視光の発生を観測した。

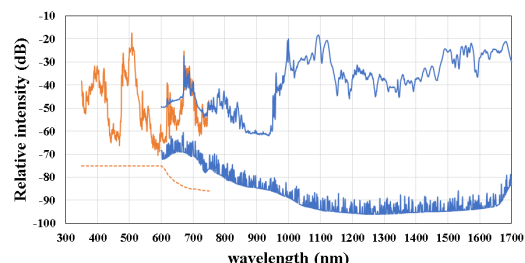


図2 観測された広帯域可視スペクトル

また、波長 532 nm 域で広帯域化によって得られた可視コムと連続発振の Nd:YAG レーザーとのビート信号を観測した。その結果、可視域において f_{CEO} の異なる光コムが 3 系統存在することがわかった。Nd:YAG レーザーの絶対周波数計測を実施することにより、3 系統の光コム f_{CEO} を計算することができた。これらの測定結果及び解析により、可視コムの主要な発生メカニズムは基本波コムの二次高調波発生によるものであることがわかった。

(2) デュアルコム分光の分解能を向上させるために、低い繰り返し周波数の光周波数コムの開発を行った。2 台の低繰り返し周波数光周波数コムでデュアルコム分光を行うことができれば、より密なスペクトルプロットを得ることができ、吸収線のより詳細な様子を観察することができる。

我々は、高分解能デュアルコム分光計のために、20 MHz という低繰り返し周波数の光コムを製作し、 f_{rep} とキャリアエンベロープオフセット周波数 (f_{CEO}) を周波数安定化した。モード同期 Er ファイバーレーザー共振器後の光スペクトルを図 3 (左) に示す。光スペクトルの半値全幅が 32 nm であった。 f_{rep} はマイクロ波の周波数基準にロックした。一方、低 f_{rep} のため f_{CEO} 信号のみをバンドパスフィルタで抜き出すのは難しい。そこで今回は、 f_{CEO} と同時に観測される $f_{rep} - f_{CEO}$ を互いにロックする方法で制御を行った。図 3 (右) は、スペクトラムアナライザで観測した制御された f_{CEO} 信号である。 f_{CEO} 信号の両脇にある制御発振の位置から、約 650 kHz の制御帯域が得られた。

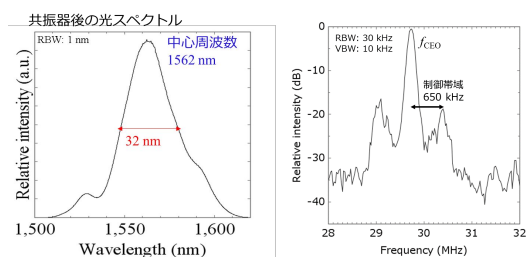


図 3 (左) Er ファイバーモード同期レーザーの光スペクトル。(右) 制御された f_{CEO} 信号

開発した 20 MHz の低繰り返し周波数光コムを用いたデュアルコム分光によってアセチレン分子の吸収スペクトルを観測した。2 台のコムの干渉によって得られた RF 領域のスペクトル情報を元に光領域の周波数値に計算し直してスペクトルを計算した。全体的に 2.8 THz の周波数範囲にわたってデータが取得できている。アセチレン分子 P(12) 吸収線において、1 GHz のドップラー拡がりの範囲において 50 以上のコム成分があり、通常ファイバーコムと比べて 2.5-5 倍の分解能向上を達成している (図 4)。

また青色では、波長 399 nm の外部共振器半導体レーザーを用いてホローカソードラ

ンプ中の Yb 原子の飽和吸収分光を行い、レーザーの周波数安定化を行うこともできた。

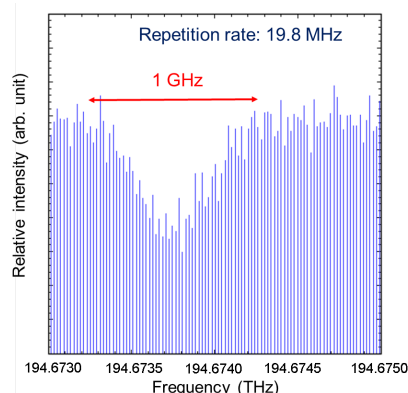


図 4 デュアルコム分光で観測されたアセチレン分子 P(12) 吸収線

(3) デュアルコム分光に向けて、2 台の Er ファイバーコムをレファレンス用 CW レーザーに同期し、相対線幅 1Hz 以下となっていることを確認した。

光コムの出力を Er ファイバーアンプで増幅し、チャープ付き導波路型 PPLN 結晶に入射して中心波長 780nm の第 2 次高調波コムを発生させた。高効率かつ広帯域な第 2 次高調波発生が可能な PPLN 結晶のチャープ量、結晶長などのパラメータを探り、出力パワー 20mW 以上、スペクトル幅 45nm 以上の第 2 次高調波コムを得た。

可視波長域のデュアルコム分光に向けて、Er ファイバーコム、チャープ付き導波路型 PPLN 結晶、高非線形フォトニッククリスタルファイバーを用いて可視波長域の広帯域コムを得た。また、フォトニッククリスタルファイバーも用いず、チャープ付き PPLN から発生する 3 次高調波でも同程度の可視広帯域コムが得られることが分かった。いずれの方法でもデュアルコムに使用できる可能性があり、まずは 500nm 帯のヨウ素分子の吸収スペクトル観測を目指す。

チャープ付き導波路型 PPLN 結晶を用いて Er ファイバーコムの波長 1.5 μ m 帯の光コムの 3 倍波を発生させ、デュアルコム分光による 500 nm 帯のヨウ素分子の吸収スペクトルを観測した。まずは、532 nm 帯の光コムを光バンドパスフィルタで切り出し、その範囲で観測された吸収線をヨウ素吸収線の周波数リストと照合し、一致することを確認した。SN 比を改善するために、コールドトラップを用いた吸収スペクトルの規格化や、背景フィッティングを用いた規格化を試みた。その結果、背景フィッティングが有効であることが分かった。

チャープした周期分極反転二オブ酸リチウム (PPLN) 導波路を用いて 500nm 帯の光コムを発生させ、可視デュアルコム分光計を構築した。図 5 にセットアップを示す。図 6 は、観測したデュアルコム分光で観測したヨウ素分子のスペクトルを示す。ここでは、波

長 532 nm のバンドパスフィルタを用いて光のスペクトル帯域を制限した。ヨウ素分子の吸収スペクトルが複数観測されており、データベースの周波数と一致していることが確認できた。

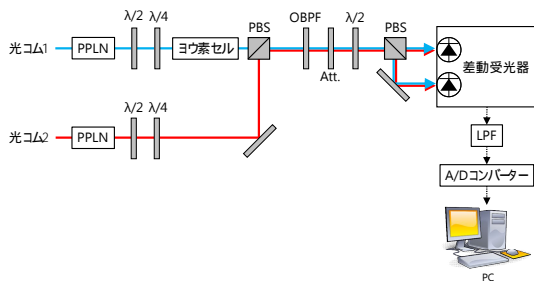


図5 可視デュアルコム分光計のセットアップ。 $\lambda/2$: 1/2 波長版、 $\lambda/4$: 1/4 波長版、PBS: 偏光ビームスプリッタ、OBPF: 光バンドパスフィルタ、LPF: RFローパスフィルタ。

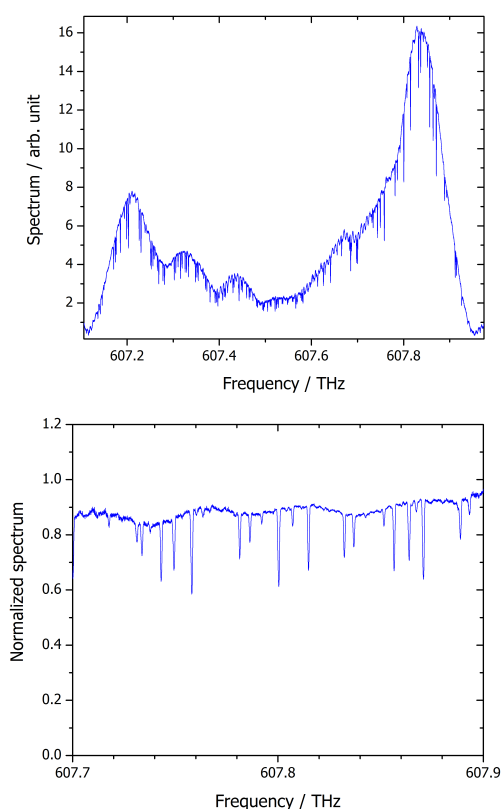


図6 デュアルコム分光で観測したヨウ素分子のスペクトル。下は、セルなしで測定した結果を使って規格化し一部分を拡大したスペクトル。

セルの有無では規格化がそれほど機能しなかったため、別の手法を考案した。吸収線データベースの値を使って、スペクトルデータ上から吸収がある部分を取り除き、多項式フィットで背景スペクトルを取得して規格化した。図7は、アセチレン分子の吸収スペクトルで試みた結果である。青線が取得したスペクトルデータで、赤線が多項式フィットで得た背景スペクトルである。青線を赤線で割り算したのが緑線のスペクトルで、規格化が良く働いていることが確認できた。この手法を用いれば、ヨウ素スペクトルのS/N向上も期待できる。

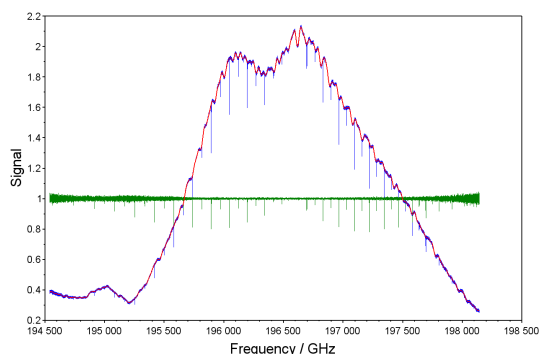


図7 背景スペクトルをフィッティングで取得する方法の実演結果。このときのサンプルにはアセチレン分子を用いた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計8件)

Yusuke Hisai, Kohei Ikeda, Haruki Sakagami, Tomoyuki Horikiri, Takumi Kobayashi, Kazumichi Yoshii, Feng-Lei Hong, “Evaluation of laser frequency offset locking using an electrical delay line,” *Applied Optics*, 査読有, in press.

洪鋒雷, 小林拓実, 吉井一倫, 「小型周波数安定化レーザーとその応用」, *OPTRONICS*, 査読無, Vol.36, 2017, pp.111-115.

洪鋒雷, 「時間周波数標準と光コムの現状」, *電気学会誌*, 査読無, Vol.137, 2017, pp.418-421.

DOI: 10.1541/ieejjournal.137.418

Sho Okubo, Kana Iwakuni, Koichi M.T. Yamada, Hajime Inaba, Atsushi Onae, Feng-Lei Hong, and Hiroyuki Sasada, “Transition dipole-moment of the $\nu_1 + \nu_3$ band of acetylene measured with dual-comb Fourier transform spectroscopy,” *Journal of Molecular Spectroscopy*, 査読有, Vol.341, 2017, pp.10-16.

DOI: 10.1016/j.jms.2017.09.001

Feng-Lei Hong, “Optical frequency standards for time and length applications,” *Measurement Science and Technology*, 査読有, vol.28, 2017, pp.12002.

DOI: 10.1088/1361-6501/28/1/012002

Youichi Bitou, Takumi Kobayashi, and Feng-Lei Hong, “Compact and inexpensive iodine-stabilized diode laser system with an output at 531 nm for gauge block interferometers,” *Precision Engineering*, 査読有, Vol.47, 2017, pp.528-531.

DOI: 10.1016/j.precisioneng.2016.07.008

Takumi Kobayashi, Daisuke Akamatsu, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Sho Okubo, Takehiko Tanabe, Masami Yasuda, Atsushi Onae, and Feng-Lei Hong,

“Absolute frequency measurements and hyperfine structures of the molecular iodine transitions at 578 nm,” Journal of the Optical Society of America B, 査読有, Vol.33, 2016, pp.725-734.

DOI: 10.1364/JOSAB.33.000725

Takumi Kobayashi, Daisuke Akamatsu, Kazumoto Hosaka, Hajime Inaba, Sho Okubo, Takehiko Tanabe, Masami Yasuda, Atsushi Onae, and Feng-Lei Hong, “Compact iodine-stabilized laser operating at 531 nm with stability at the 10^{-12} level and using a coin-sized module,” Optics Express, 査読有, Vol.23, 2015, pp.20749-20759.

DOI: 10.1364/OE.23.020749

〔学会発表〕(計 57 件)

吉井 一倫, 野邑 寿仁亜, 田口 佳穂, 久井 裕介, 洪 鋒雷, 「導波路型 PPLN による広帯域光コム発生とその非線形過程」, 日本物理学会第 73 回年次大会, (2018)

朝比奈 優, 山田 優子, 久井 裕介, 吉井 一倫, 洪 鋒雷, 「コンパクトな光学系を用いた高速制御型ファイバークム」, 日本物理学会第 73 回年次大会, (2018)

吉井 一倫, 朝比奈 優, 池田 孝介, 山田 優子, 久井 裕介, 大久保 章, 稲場 肇, 洪 鋒雷, 「高速制御型 Er ファイバークムの開発とコムを用いた分光」, 分子分光学会, (2018)

吉井 一倫, 野邑 寿仁亜, 田口 佳穂, 久井 裕介, 洪 鋒雷, 「導波路型 PPLN から発生する広帯域光コムのオフセット周波数計測」, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, (2018)

洪 鋒雷, 「光コムの高コヒーレント化と広帯域化」, 東北大学電気通信研究所共同プロジェクト研究会「光波とマイクロ波をシームレスに繋ぐフルコヒーレント通信・計測システムに関する研究」, (2017)

吉井 一倫, 朝比奈 優, 増田 裕行, 中川 賢一, 洪 鋒雷, 「無変調狭線幅アセチレン安定化レーザーの開発」, 日本物理学会秋季大会, (2017)

山田 優子, 朝比奈 優, 池田 孝介, 大久保 章, 稲場 肇, 大苗 敦, 吉井 一倫, 洪 鋒雷, 「低繰り返し周波数光コムの周波数安定化」, 日本物理学会秋季大会, (2017)

岩國 加奈, 大久保 章, 山田 耕一, 稲場 肇, 大苗 敦, 洪 鋒雷, 佐々田 博之, 「デュアルコム分光によるアセチレン分子の衝突広がりのオルト/パラ依存性の観測」, 日本物理学会秋季大会, (2017)

大久保 章, 岩國 加奈, 山田 耕一, 稲場 肇, 大苗 敦, 洪 鋒雷, 佐々田 博之, 「デュアルコム分光法による振動遷移モーメントの決定: アセチレン $\nu_1 + \nu_3$ バンド」, 第 11 回分子科学討論会, (2017)

大久保 章, 岩國 加奈, 山田 耕一, 洪 鋒雷, 佐々田 博之, 稲場 肇, 「ファイバレーザーベース広帯域デュアルコムの開発と分光応用」, レーザー学会第 511 回研究会「ファイバレーザー技術」(招待講演), (2017)

菅田 徹也, 山田 優子, 大久保 章, 小林 拓実, 稲場 肇, 大苗 敦, 中川 賢一, 吉井 一倫, 洪 鋒雷, 「低繰り返し周波数モード同期ファイバレーザーの開発と周波数制御」, 日本物理学会第 71 回年次大会, (2016)

山田 優子, 菅田 徹也, 大久保 章, 小林 拓実, 稲場 肇, 大苗 敦, 吉井 一倫, 洪 鋒雷, 「低繰り返し周波数モード同期ファイバレーザーの増幅と広帯域化」, 日本物理学会第 71 回年次大会, (2016)

久井 裕介, 池田 幸平, 堀切 智之, 小林 拓実, 吉井 一倫, 洪 鋒雷, 「位相同期と周波数ロックによるレーザーの周波数安定化」, 日本物理学会第 71 回年次大会, (2016)

吉井 一倫, 久井 裕介, 洪 鋒雷, 「波長 561 nm 小型ヨウ素安定化半導体レーザーの開発」, 日本物理学会第 71 回年次大会, (2016)

菅田 徹也, 山田 優子, 大久保 章, 小林 拓実, 稲場 肇, 大苗 敦, 吉井 一倫, 洪 鋒雷, 「低繰り返し周波数モード同期ファイバレーザーの開発と周波数制御」, 第 11 回ナノテク交流シンポジウム, (2016)

山田 優子, 菅田 徹也, 大久保 章, 小林 拓実, 稲場 肇, 大苗 敦, 吉井 一倫, 洪 鋒雷, 「低繰り返し周波数モード同期ファイバレーザーの増幅と広帯域化」, 第 11 回ナノテク交流シンポジウム, (2016)

久井 裕介, 池田 幸平, 堀切 智之, 小林 拓実, 吉井 一倫, 洪 鋒雷, 「位相同期と周波数ロックによるレーザーの周波数安定化」, 第 11 回ナノテク交流シンポジウム, (2016)

洪 鋒雷, 「光周波数標準の発展と応用」, 2015 年度応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会 (招待講演), (2015)

洪 鋒雷, 「光コムと周波数安定化レーザー」, 第 23 回関東量子情報 Student Chapter 研究会 (招待講演), (2015)

Feng-Lei Hong, “Advanced Time and Frequency Transfer; Applications of Optical Clocks and Frequency Combs,” Asia Pacific Workshop on Time and Frequency (招待講演, 国際学会), (2015)

(他 37 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://hong-lab.ynu.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

洪 鋒雷 (HONG, Feng-Lei)
横浜国立大学・大学院工学研究院・教授
研究者番号：10260217

(2)研究分担者

大久保 章 (OKUBO, Sho)
産業技術総合研究所・物理計測標準研究部
門・主任研究員
研究者番号：30635800

(3)連携研究者

吉井 一倫 (YOSHII, Kazumichi)
横浜国立大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：90582627

稲場 肇 (INABA, Hajime)
産業技術総合研究所・物理計測標準研究部
門・研究グループ長
研究者番号：70356492

佐々田 博之 (SASADA, Hiroyuki)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号：30146576