

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年5月31日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360024

研究課題名（和文）超並列レーザー照射技術の開発と機能光デバイスの作製

研究課題名（英文）Super-parallel laser processing and a fabrication of optical devices

研究代表者

早崎 芳夫 (HAYASAKI YOSHIO)

宇都宮大学・オプティクス教育研究センター・教授

研究者番号：10271537

研究成果の概要(和文)：

本研究は、ホログラフィックフェムト秒レーザー加工に関して、これまでのレーザーパルスの空間的な制御に加えて、時間制御、偏光制御を同時に行い、これまでにないレーザーパルスによる物質励起を可能にして、高付加価値なレーザー加工を実現した。さらに、ポンプ・プローブ干渉顕微鏡によるレーザー誘起現象の観測を行い、励起領域の前方伸長現象や時空間ダブルパルスによる光励起の増強等の興味深い現象を発見した。

研究成果の概要(英文)：

We demonstrated spatial, temporal, and polarization controls of femtosecond laser pulses for efficient and precise laser processing. We also demonstrated the observations of spatiotemporal phenomena induced by a femtosecond laser pulse. The observation presented efficient and effective conditions of laser-matter interactions.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
22年度	8,600,000	2,580,000	11,180,000
23年度	3,000,000	900,000	3,900,000
24年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野:工学

科研費の分科・細目:応用物理学・工学基礎, 応用光学・量子光工学

キーワード: 光プロセッシング, ホログラフィ, フェムト秒レーザー

1. 研究開始当初の背景

フェムト秒レーザー加工は、レーザー加工技術の本来有する低排出性に加えて、その高い加工精度と新しい機能構造生成の特徴から、光電変換デバイスの表面修飾による高変換効率化や機能性ガラスの切断や穴空け等、環境光デバイスの製造行程の中で重要な役割を果たし、グリーンイノベーションの一役を担っている。その高精細化や高機能化の要求は、さらに大きく

なっている。

我々は、フェムト秒レーザーパルスをホログラムで多数に分岐して、3次元・高スループット・高光利用効率な加工を可能にするホログラフィックフェムト秒レーザー加工を開発した[Appl. Phys. Lett. **87**, 031101 (2005).]この技術は、フェムト秒レーザーパルスのエネルギーの3次元実空間に展開することによって得られる、新しい物質と光の相互作用を形成する。

我々は、並列なパルスを生成して、物質に照射する時に、パルスを時間制御して照射した時、ガラス中に誘起される屈折率変化が増強される現象を発見した。並列パルス照射が、単に加工スループットを上げる量的変化だけでなく、加工の形状や効率を質的に変化する技術であることを示した。これは、パルスエネルギーの空間と時間への展開である。これは、レーザー誘起現象の高精度な時間分解干渉計測によって発見できた現象であり、我々のスキルとノウハウの蓄積の結果である。

さらに、我々は、フェムト秒レーザーパルスを分光してスペクトル面に焦点距離のチャープした回折レンズを表示することで、時空間同時集光を実現した。これは、回折レンズに本質的に存在する波長分散を補正できると共に光学系内の分散も同時に補正できるため、集光点でフーリエ限界に近いパルスを得ることができた。これは、場所ごとに幅や形状の異なるパルスを生成できる等の3次元空間とスペクトル位相の同時制御を可能にする。

一方、フェムト秒レーザー加工応用では、半導体光検出器や太陽電池表面上へのリップル構造の形成による検出感度の高帯域・高感度化や、レーザーパルスの時間的偏光制御による分子の量子制御など、フェムト秒レーザーパルスの偏光制御が重要となっている。

これまでの研究は、フェムト秒パルスの時間プロファイルの制御や空間的なビーム成形、偏光制御の研究は、それぞれ行われていたが、それら光の自由度を同時に制御することは、有効な応用展開が予想されているにも拘わらず、行われてこなかった。それは、レーザーパルスの空間制御の有効性が、十分に認識されていなかったことと、並列パルスの高精度制御の難しさがあったと思われる。我々は、ホログラムを用いた並列パルスの先導的な研究開発において、ホログラム設計技術では、極めて高いスキルと豊富なノウハウを有しており、並列パルスの揺らぎはデバイスの揺らぎと同レベルまで達し、世界で最も均一な並列加工を実現していると自負している。

2. 研究の目的

(1)ホログラフィックフェムト秒レーザー加工の究極的高性能化を行う。並列パルスのピーク強度均一性 90%以上を維持しつつ、並列数を増大させる。レーザーパルスの空間制御だけでなく偏光制御も可能にする。

(2)時空間ダブルパルス法(プラズマ操作型レーザー加工)を、ポンプ・プローブ干渉顕微鏡を用いたレーザー誘起現象の時間分解観測により、

適切なレーザーパルスパラメータを探索する。

(3)回折光学素子において生じる波長分散の問題を解決する一方法として、回折格子による分光と計算機ホログラムの集光による回折型時空間レンズの集光特性と加工特性を評価する。

3. 研究の方法

(1)高性能レーザー加工システム

①光学系の構築

所有のフェムト秒レーザー(1kHz, 1mJ)を用いて、1000 並列加工を実現するために必要な事は、サンプル面での超短パルスを維持するための低光ロスのプリチャープ光学系、低分散・低ロスのリレー光学系、サンプル面での球面収差を補正するための収差補正光学系である。曲面ミラー、負分散ミラー、低分散ミラーや空間光変調素子の矩形開口に効率よくパルスを与えるためのビーム成形光学素子を導入する。

②計算機ホログラムの第2高調波最適化

99%以上の高い均一性が得られるホログラムを計算機の中で最適化できるが、それを実際の加工光学系で使ったときは、最高で 90%の均一性になってしまう。これまでに、我々は、加工システムの中でホログラムを最適化する手法を提案・実証してきた。これまでは、1光子吸収の観測を行っていたが、加工は多光子過程であり、パルス幅に依存しているため、より精密な最適化を行うために、2光子(第2高調波)強度を用いてホログラムの最適化を実施する。

③補償光学系の導入

ホログラム表示用の空間光変調素子に加えて、光学系や空間光変調素子の有する波面の歪み補正するための補償光学系を導入する。

④偏光制御の導入

空間光変調素子を2台カスケードに配置し、並列パルスの生成とその並列パルスの偏光制御を行う。

(2)時空間ダブルパルス法

ガラス内部に到達時間と照射位置の差を与えたダブルパルスを与えた時の、ポンプ・プローブ干渉顕微鏡による時間分解干渉計測を行い、その誘起現象の特性や加工特性を評価する。

(3)時空間レンズ

回折型時空間レンズを構築し、光軸上のパルス幅を計測し、その時空間集光を評価する。また、集光特性が回転対称なラジアル時空間レンズを構築する。

4. 研究成果

(1) 高密度な並列加工を実現するために、並列パルスの最小間隔を実験的に計測し、計算機シ

ミュレーションを通して理論的に考察した[Appl. Phys. A 107, 357 (2012)].

(2) ホログラムの波長分散による回折点の広がり を評価し、加工形状が光学非線形効果によって、先鋭化されることを発見した[Appl. Phys. A 111, 929 (2013)].

(3) パルス幅や集光形状に敏感な第2高調波の観測を用いてホログラムを最適化する手法を開発し、これまでの再生像の光強度の観測による方法と比べて、均一性の高い加工が可能となることを証明した。[Opt. Lett. 36, 2943 (2011)]

(4) ホログラムの波長分散を補正する新しい方法として開発したホログラフィック時空間レンズに関して、計算機シミュレーション及び実験を通して、その性能評価を行った。回折光学素子の本来有する波長分散だけでなく、光学系全体の波長分散を補正しながら、集光点での最短パルスになることを証明した。[Opt. Lett. 35, 139 (2010)]

(5) ポンププローブ顕微鏡を用いて、ガラス内部にフェムト秒レーザーが集光照射されてから、構造変化が起こるまでの素過程を時空間的に観測し、新しい現象をいくつか発見できた。(Opt. Express 19, 5725, 2011. Opt. Mat. Express 1, 1399, 2011).

(6) ガラス内部に並列パルス照射した時に誘起される現象の時間分解観測を行い、並列パルスによって同じエネルギーの単一パルスよりも大きな屈折率を誘起できることを発見し、その誘起現象の増強効果をパルス間隔の時間変化に対して計測し、80ps の時間差まで増強効果があることを示した。そのこのパルス照射方法を時空間ダブルパルス法と命名した。[Opt. Material Express 2, 691 (2012)]

(7) ラインビームにより、ITO 薄膜の剥離加工や金属の溝加工を実証した。この結果は、企業の関心を引き、共同研究に繋がった。

(8) パルス照射に伴う物質の屈折率の定量評価に関して、構造モデルのFDTD計算と回折計算と実験結果の比較から、構造のサイズや屈折率を推定する新しい手法を開発した(OPJ2011 で発表)

(9) 当初、加工システムにデフォーダブルミラー(DM)を導入予定であったが、DMのダメージしきい値が問題となった。DMの製造会社との共同

研究により、DMのダメージしきい値の測定を行った。1mJのレーザーをデバイズまで上げた時には、破壊しきい値を超えないことを示した(2013年3月応用物理学会にて発表)

(10) 2台の空間光変調素子を従属接続したベクトル波(偏光制御型)レーザー加工システムを構築し、並列ビームの偏光分布を制御し、回折点間の相互干渉を低減することで、2倍密な回折点の配置を実現した。また、配向制御されたフェムト秒レーザー誘起ナノ周期構造の同時並列作製を初めて実証した。[Opt. Express 21, 12987 (2013)]

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18件)

- ① Satoshi Hasegawa and Yoshio Hayasaki, “Polarization distribution control of parallel femtosecond pulses with spatial light modulators,” Optics Express Vol. 21, Iss. 11, pp. 12987-12995 (2013). 査読有
- ② Satoshi Hasegawa and Yoshio Hayasaki, “Nonlinear sharpening of holographically processed sub-microstructures,” Applied Physics A Vol. 111, Issue 3, pp. 929-934 (2013). 査読有
- ③ Takanori Ochiai, Daisuke Barada, Takashi Fukuda, Yoshio Hayasaki, Kazuo Kuroda, and Toyohiko Yatagai, “Angular multiplex recording of data pages by dual-channel polarization holography,” Optics Letter Vol. 38, pp. 748-750 (2013). 査読有
- ④ Akira Sato, Quang Duc Pham, Satoshi Hasegawa, and Yoshio Hayasaki, “Three-dimensional sub-pixel estimation in holographic position measurement of an optically-trapped nanoparticle,” Applied Optics Vol. 52, Iss. 1, A216-A222 (2013). 査読有
- ⑤ Quang Duc Pham, Yuichi Kusumi, Satoshi Hasegawa, and Yoshio Hayasaki, “Digital holographic microscope with low-frequency attenuation filter for position measurement of nanoparticle,” Optics Letters Vol. 37, Issue 19, pp. 4119-4121 (2012). 査読有
- ⑥ Quang Duc Pham, Satoshi Hasegawa, Tomohiro Kiire, Daisuke Barada, Toyohiko Yatagai, and Yoshio Hayasaki, “Selectable-wavelength low-coherence digital holography with chromatic phase shifter,” Optics Express Vol. 20, pp. 19744-19756 (2012). 査読有
- ⑦ Tomohiro Kiire, Daisuke Barada, Jun-ichiro

- Sugisaka, Yoshio Hayasaki, and Toyohiko Yatagai, "Color digital holography using a single monochromatic imaging sensor," *Optics Letters* Vol. 37, pp. 3153-3155 (2012).
- ⑧ Yoshio Hayasaki, Mitsuhiro Isaka, Akihiro Takita, Satoshi Hasegawa, Saulius Juodkazis, "Photo-acoustic sub-micrometer modifications of glass by pair of femtosecond laser pulses," *Optical Material Express* Vol. 2, pp. 691-699 (2012). 査読有
- ⑨ Yoshio Hayasaki, Maki Nishitani, Hidetomo Takahashi, Hirotsugu Yamamoto, Akihiro Takita, Daichi Suzuki, and Satoshi Hasegawa, "Experimental investigation of the closest parallel pulses in holographic femtosecond laser processing," *Applied Physics A* Vol. 107, No. 2, pp. 357-362 (2012). 査読有
- ⑩ Takayuki Higuchi, Quang Duc Pham, Satoshi Hasegawa, and Yoshio Hayasaki, "Three-dimensional positioning of optically-trapped nanoparticles," *Applied Optics* Vol. 50, H183-H188 (2011). 査読有
- ⑪ Yoshio Hayasaki, Keisuke Iwata, Satoshi Hasegawa, Akihiro Takita, and Saulius Juodkazis, "Time-resolved axial-view of the dielectric breakdown under tight focusing in glass," *Optical Materials Express* Vol. 1, 1399-1408 (2011). 査読有
- ⑫ Satoshi Hasegawa and Yoshio Hayasaki, "Second harmonic optimization of computer-generated hologram," *Optics Letters* Vol. 36, Iss. 15, pp.2943-2945 (2011). 査読有
- ⑬ Yoshio Hayasaki, Mitsuhiro Isaka, Akihiro Takita, and Saulius Juodkazis, "Time-resolved interferometry of femtosecond-laser-induced processes under tight focusing and close-to-optical breakdown inside borosilicate glass," *Optics Express* Vol. 19, Issue 7, pp. 5725-5734 (2011). 査読有
- ⑭ Kouhei Kimura, Satoshi Hasegawa, and Yoshio Hayasaki, "Diffractive spatiotemporal lens with wavelength dispersion compensation," *Optics Letters* Vol. 35, No. 2, pp. 139-141 (2010). 査読有
- ⑮ 早崎芳夫, 伊坂充弘, 長谷川智士, 田北啓洋, "時空間ダブルパルス照射法を用いたフェムト秒レーザー加工," *ケミカルエンジニアリング* Vol. 56. No.1, pp.45-49 (2011)
- ⑯ 長谷川智士, 早崎芳夫, "ホログラフィックフェムト秒レーザー加工による透明材料内部の3次元構造の作製," *光技術コンタクト* Vol. 49, No. 7, pp. 22-28 (2011).
- ⑰ 長谷川智士, 早崎芳夫, "ホログラフィックフェムト秒レーザー加工," *OPTRONICS* Vol.30 No.359, pp. 95-101 (2011).
- ⑱ 早崎芳夫, "フェムト秒レーザー誘起現象の時間分解干渉顕微鏡観測," *応用物理* 第 82 巻, 第2号, pp.129-132 (2013).
- [学会発表](計 199 件)
(招待・依頼講演)
- ① 早崎芳夫, 市川哲雄, デンタルメモリー 本人認証のための歯への情報記録, *VISION Japan 2010*, (パシフィコ横浜, 2010 年 4 月 21 日)
- ② Yoshio Hayasaki, Holographic femtosecond laser processing, Seminar in University Jean Monnet (Saint-Etienne, France, June 15,2010).
- ③ 早崎芳夫, 空間光変調とフォトン数制御による情報処理と材料加工, 第 27 回ナノフォトンクスオープンセミナー(東京大学, 2010 年 6 月 15 日).
- ④ 早崎芳夫, 時空間ダブルパルス照射法, 新技術説明会(科学技術振興機構, 市ヶ谷, 2010年 6 月 30 日)
- ⑤ 早崎芳夫, 宇都宮大学オプティクス教育研究センターにおける教育研究とホログラムを用いたフェムト秒レーザー加工, 北関東地区化学技術懇話会, 記念講演会(宇都宮, 2010 年 7 月 13 日).
- ⑥ 早崎芳夫, ホログラフィックフェムト秒レーザー加工, 新技術説明会(水戸)(水戸市桜川「茨城県産業会館」, 2010 年 7 月 22 日)
- ⑦ 田北啓洋, 早崎芳夫, 高精度 FDTD 法を用いたナノ屈折率構造の解析, 第 11 回情報フォトンクス研究グループ研究会 講演予稿集, pp.29-34(日光市, 2010 年 9 月 25 日)
- ⑧ 早崎芳夫, インTRODukトリートク, *Optics & Photonics Japan 2010*, 講演予稿集 pp.186-187,(中央大学, 2010 年 11 月 8-10 日)
- ⑨ 田北啓洋, 早崎芳夫, レーザー誘起現象のデジタルホログラフィック顕微鏡観測, *Optics & Photonics Japan 2010*, 講演予稿集 pp.198-199,(中央大学, 2010 年 11 月 8-10 日)
- ⑩ 早崎芳夫, フェムト秒レーザーによる加工と計測,精密工学会メカノフォトンクス専門委員会(宇都宮大学,2010 年 12 月 7 日)
- ⑪ 早崎芳夫, フェムト秒レーザーを用いたホログラフィック計測・加工, 第 2 回日本鉄鋼協会フォーラム講演会, (神田,2011 年 2 月 18 日)
- ⑫ Yoshio Hayasaki and Satoshi Hasegawa, Time-resolved interferometry of femtosecond-laser-induced processes, 10th Euro-American Workshop on Information Optics (WIO2011), (Benicassim, Spain, June 19-24, 2011).
- ⑬ Yoshio Hayasaki and Satoshi Hasegawa,

- Holographic femtosecond laser processing for producing a three-dimensional structure in a transparent material, Collaborative Conference on 3D & Materials Research (3DMR), (Jeju, South Korea, June 27–July 1, 2011).
- ⑭ 早崎芳夫, ホログラフィックフェムト秒レーザー加工, (財)藤沢市産業振興財団, 産業支援事業, “企業人のための”わくわく大学見学(宇都宮大学見学会)(宇都宮大学, 2011年7月21日)
 - ⑮ 早崎芳夫, レーザーを利用した微細加工とワークの評価技術, とちぎ光産業振興協議会 平成23年度第1回加工技術分科会(宇都宮大学, 2011年7月27日).
 - ⑯ Yoshio Hayasaki and Satoshi Hasegawa, ISOT2011 International Symposium on Optomechatronic Technologies, (Hong Kong, Nov. 1-3, 2011).
 - ⑰ Yoshio Hayasaki and Takayuki Higuchi, Digital Holographic position measurement of a nanoparticle trapped in optical tweezers, The First Korea–Japan Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHIP2011), pp. 3-4, (Seoul, Korea, Nov. 9-12, 2011)
 - ⑱ 樋口敬之, 早崎芳夫, 光ピンセット中のナノ粒子の3次元位置計測, 平成23年第4回ホログラフィック・ディスプレイ研究会(宇都宮大学, 2011年11月15日).
 - ⑲ Yoshio Hayasaki, Holographic femtosecond laser processing, 2011 Taiwan–Japan Bilateral Symposium in Nano/Bio–Photonics, (Tainan, Taiwan, Nov 20–24, 2011).
 - ⑳ Yoshio Hayasaki and Satoshi Hasegawa, Holographic femtosecond laser processing with an adaptive control, SPIE, 2011 Smart Nano+Micro Materials and Devices (Melbourne, Australia, Dec 4–7, 2011).
 - 21 Yoshio Hayasaki, Three-dimensional position measurement of optically-trapped nanoparticles using digital holography, NMI Symposium, (National Measurement Institute, Lindfield, Australia, Dec. 9, 2011)
 - 22 早崎芳夫, オプティクス教育研究センターの研究, 地域産学官共同研究拠点整備事業, 研究交流会(香川大学, 2012年1月12日)
 - 23 早崎芳夫, ホログラフィックフェムト秒レーザー加工システムの開発, 宇都宮大学工学部点検・評価委員会企画「突出した研究プロセスの紹介(2012年1月24日)
 - 24 早崎芳夫, サブ波長構造計測のための複素振幅型デジタル超解像顕微鏡の開発, 第59回 応用物理学関係連合講演会, シンポジウム「デジタルオプティクス」(早稲田大学, 2012年3月15–18日)
 - 25 早崎芳夫, 樋口敬之, 光ピンセット中のナノ粒子の3次元位置計測, ホログラフィック・ディスプレイ(HODIC)研究会, 2011年度鈴木・岡田記念賞受賞講演(千葉大学, 2012年5月25日)
 - 26 早崎芳夫, 時間分解干渉顕微鏡によるフェムト秒レーザー誘起現象の観測, 第49回光波センシング研究会(東京理科大学森戸記念会館, 2012年6月6日)
 - 27 早崎芳夫, デジタルホログラフィーの基礎, 光応用技術シンポジウム, Senspec2012(パシフィコ横浜, 2012年6月7日)
 - 28 早崎芳夫, 光と研究のはなし, 埼玉大学理工学研究科, 情報工学特別講義 II(埼玉大学, 2012年6月8日)
 - 29 Yoshio Hayasaki and Akira Sato, Three-dimensional position measurement of a gold nanoparticle trapped in optical tweezers using in-line low-coherence digital holography, The Workshop on Information Optics (WIO2012), (Quebec, Canada, August 20 – 24, 2012)
 - 30 Yoshio Hayasaki, Holographic femtosecond laser processing for high-speed fabrication of sub-wavelength structures, 4th International Workshop on Perspectives of Optical Imaging and Metrology (Holomet 2012), (Utsunomiya, Japan, July 24 – 26, 12)
 - 31 Yoshio Hayasaki, Holographic femtosecond laser processing, JSAP–OSA Joint Symposia (The 73rd JSAP Autumn Meeting, 2012) (Ehime Univ. & Matsuyama Univ., Sep. 11–14, 2012)
 - 32 Yoshio Hayasaki, “Holographic position measurements of optically-trapped gold nanoparticle,” The second Japan–Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics 2012 (DHIP2012) (Tokushima, Nov. 19–21, 2012).
 - 33 早崎芳夫, 近赤外画像を用いた食品混入異物の検出, オプトロニクス社, 光技術で安心・安全セミナー「光技術で守る食の安全」(東京都立産業貿易センター浜松町館, 2012年11月29日).
 - 34 早崎芳夫, デジタルホログラフィーの使い方, 第22回三次元工学シンポジウム(パシフィコ横浜, 2012年12月5日)
 - 35 早崎芳夫, 空間光変調素子の使い方 –計算機ホログラムを用いた並列フェムト秒レーザー加工への応用を通して-, H24年度フォトリソ技術フォーラム 合同研究会(大阪科学技術センター, 2012年12月14日)
 - 36 早崎芳夫, ホログラフィックフェムト秒レーザー加工, 第4回UUOサロン(工学技術者の集い)(板橋区立ハイライフプラザ, 2012年12月18日)
 - 37 早崎芳夫, 時間分解干渉顕微鏡によるフェ

ムト秒レーザー誘起現象の観測, 強光子場
科学研究懇談会, 宇都宮大学, 2013年1月
12日)

- 38 Yoshio Hayasaki and Satoshi Hasegawa,
Parallel femtosecond laser processing with
vector-wave control, Progress in Ultrafast
Laser Modifications of Materials, (Cargèse,
Corsica, France, 14-19 April 2013).
- 39 早崎芳夫, 計算機ホログラムを用いたベクトル波フェムト秒レーザー加工, 第79回レーザー加工学会, 講演論文集 pp.159-162 (関西大学, 2013年5月7, 8日)
- 40 早崎芳夫, フェムト秒レーザー誘起現象の時間分解干渉イメージング, 平成25年第2回 ホログラフィック・ディスプレイ研究会(電気通信大学, 2013年5月31日)

上記の招待依頼講演に加えて, 国際会議発表
43件, 国内会議発表 116件

[産業財産権]

○出願状況(計1件)

名称: 光強度計測装置

発明者: 谷田貝豊彦, 喜入朋宏, 早崎芳夫, 茨田大輔, 廻谷朋行

権利者: 宇都宮大学

種類: 特願

番号: 2011-124751

出願年月日: 平成23年6月3日

国内外の別: 国内

○取得状況(計1件)

名称: 血管位置検出装置

発明者: 早崎芳夫, 森本正文, 片山勝博, 小島幸雄

権利者: 徳島大学

種類: 特許

番号: 4648329

取得年月日: 2010年12月17日

国内外の別: 国内

[その他]

- ① 早崎芳夫, 樋口敬之, 2011年度, HODIC 鈴木・岡田記念賞, 技術部門賞, 「光ピンセット中のナノ粒子の3次元位置計測」, HODIC Vol. 31, No. 4, (Nov 2011).
- ② 佐藤聡, 早崎芳夫, The 2nd Opt-Bio Symposium UU-BOS Outstanding Poster Paper Award (Dec. 12, 2012)
- ③ EnCollege 物理7月号(Benesse 進研ゼミ高校講座)「18歳のきみへ, 科学者たちのメッセージ「個人情報など大切なデータを爪に記録!」」(2010.7) (2011.7) (2012.7) (2013.7).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

早崎 芳夫 (HAYASAKI YOSHIO)

宇都宮大学・オプティクス教育研究センター・
教授

研究者番号: 10271537