

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01846

研究課題名（和文）波長可変・多重メガ光渦形成技術の確立

研究課題名（英文）Development of tunable and multiple mega optical vortex formation technology

研究代表者

中田 芳樹（Nakata, Yoshiki）

大阪大学・レーザー科学研究所・准教授

研究者番号：70291523

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、現時点で唯一膨大な数の光渦を形成する「メガ光渦」形成機構において、波長可変性および波長多重性を持たせる際の技術的な課題を明らかにし、それを克服することで可変波長メガ光渦形成装置を開発した。光源に光パラメトリック発信器を導入し、位相制御部にアルミミラーを反射面に持つ空間光変調器を用いることで、広い波長域にわたって設計通りの位相差を付与する機構を構成し、チューナブルなメガ光渦装置の開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の単独光渦の応用は多岐にわたる。例えば、2014年ノーベル賞を受賞したSTED超解像技術に加え、光渦多重通信、キラル構造や螺旋ファイバーの形成、結晶のキラル制御などが挙げられる。これらにメガ光渦を適用し、超多点同時作用を可能にすることで、ライブ超解像顕微鏡の実現や、多点作用による低確率現象の誘起と発見など、新しい展開が期待できる。さらに、広い波長域で動作する可変波長メガ光渦装置の開発は、多波長・超短パルス性を持つメガ光渦形成装置の開発の基盤技術となる。これらの新しい光の形態が、多分野で新たなアイデアと革新的な応用を誘発することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we identified and overcame the technical challenges associated with introducing wavelength tunability and wavelength multiplexing into the "mega optical vortex" formation mechanism, which is currently the only method capable of generating a vast number of optical vortices. By incorporating an optical parametric oscillator as the light source and using a spatial light modulator with an aluminum mirror as the reflecting surface in the phase control unit, we constructed a mechanism that imparts the designed phase shift across a wide wavelength range. This led to the successful development of a tunable mega optical vortex generator.

研究分野：レーザー科学

キーワード：レーザー 光渦 軌道角運動量 干渉 パターン 空間光変調器 可変波長 メガ光渦

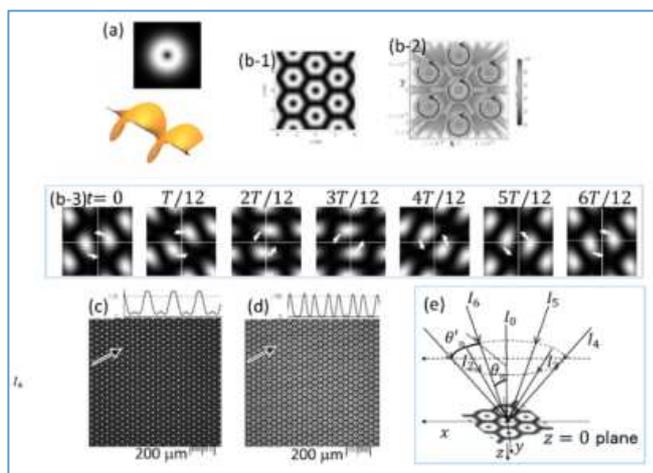
## 様式 C-19、F-19-1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

「光渦」は電磁波の一形態であり、光強度が0となる特異点を中心に円環状の光強度分布と螺旋状の波面を持つ(図1(a))。フォトニクスを中心に様々な研究が進められており、2014年には光渦の特異点を利用したSTED超解像顕微鏡がノーベル賞を得たことから一躍注目を浴びた。近年では、光渦加工によるキラル構造形成(千葉大・尾松、Nano Lett. 12, 3645 (2012))や光通信帯域増大への応用、キラル結晶制御など、活発な研究分野を構成している。

申請者らは、干渉する6ビーム間の位相差を $\Delta\phi_n = \phi_{n+1} - \phi_n = \pm\pi/3$ に設定した場合、光渦と同様に特異点を持つ円環状パターンが三角格子配列する事を発見した(図1(b-1,2))。また、円環状パターンの光強度の時間分解解析( $T = \lambda/c$ ,  $c$ :光速,  $\lambda$ :波長)を行ったところ、光渦と同様に特異点を中心に光スポットが回転し、軌道角運動量が $l = \pm 1$ の螺旋波面を形成する事が示唆された(図1(b-3))。これらのシミュレーション結果を基に特許を出願した(特開2019-219618)。次に、令和2年度からの挑戦的研究(萌芽)における単一波長レーザーを用いた実証実験では、6ビーム間に位相差が無い場合はガウシアンに相似したスポットが三角格子配列するが(図1(c))、 $\Delta\phi_n = \pm\pi/3$ では円環状パターンが三角格子配列する様子が観察され、全てが光強度ゼロの特異点を持つことが断面形状から確認された(図1(d))。以上より、これを「メガ光渦」と名付けた。

図1 (a) 一般の単独光渦の光強度分布と波面形状の模式図、(b-1)メガ光渦の2D及び(b-2)3Dシミュレーション結果。(b-3)メガ光渦の光強度時間分解解析。(c)通常の6ビーム干渉パターン及び(d)メガ光渦の観察結果( $\lambda = 532\text{nm}$ ,  $\theta_n = 0.72^\circ$ ,  $\Lambda = 48.8\mu\text{m}$ )。(e)6ビーム干渉の模式図。



### 2. 研究の目的

本手法は膨大な数の光渦を形成出来る現時点で唯一の手法である。本研究の課題は、本手法に波長可変性及び波長多重性を持たせる際の技術的な課題を明らかにし、それを克服する事で波長可変メガ光渦形成装置を開発する事である。波長に対する光強度分布の変化を調査し、将来的な多波長・超短パルス性を持つメガ光渦形成の原理検証とする。また、多点軌道角運動量の実証を行うための、顕微鏡下トラップ微粒子観察技術を開発する。

### 3. 研究の方法

上記の目的を達成する主な課題は1. 可変波長光源である光パラメトリック発信器(OPO)の導入と、2. 広帯域に対応する空間光位相変調器(SLM: spatial light modulator)の導入である。これを踏まえ、下記の研究テーマを設定した。

- ① メガ光渦の可変波長シミュレーターの作成と解析
- ② 光強度分布の時間分解解析による螺旋波面の調査
- ③ チューナブルなメガ光渦生成装置の構築
- ④ 可変波長メガ光渦の発生と観察
- ⑤ 位相差制御機構のチェック及び干渉パターン制御
- ⑥ 2波長干渉パターンの解析
- ⑦ メガ光渦を用いた金属加工
- ⑧ 顕微鏡下における微粒子トラッピング観察機構の開発

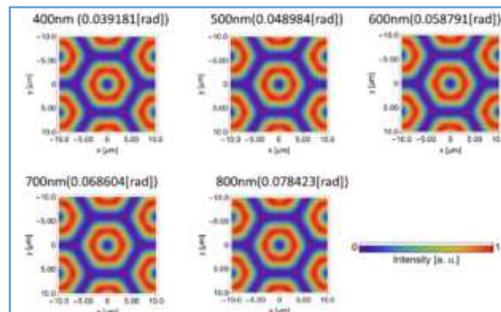
### 4. 研究成果

- ① メガ光渦の可変波長シミュレーターの作成と解析

これまでに開発した単一波長メガ光渦パターンシミュレーターについて、波長や干渉角など様々なパラメータを記述した外部ファイルを読み取ることでパラメータスキャン出来るよう改良した。図2に、400nmから800nmを入射光とし、干渉パターン周期が同じになるよう干渉角を設定した場合のメガ光渦シミュレーション結果を示す。シミュレーション結果から、光強度分布は波長及び軌道角運動量( $l = \pm 1$ )に対して変化しない事が分かった。つまり、波長毎に

干渉角と位相差が調整出来る機構を導入することで、可変波長メガ光渦が形成出来る事が分かった。

図2 波長及び干渉角に対するメガ光渦シミュレーション結果。干渉パターンを固定した。



② 光強度分布の時間分解解析による螺旋波面の調査

上記のシミュレーターで光強度分布の時間分解解析を行った。図1(b-3)と同様に、 $\omega t = 2\pi$ の周期で2つの対抗するスポットが特異点を中心に一周する様子が観察された。これは軌道角運動量  $l = \pm 1$ の螺旋波面を持つことを示している。

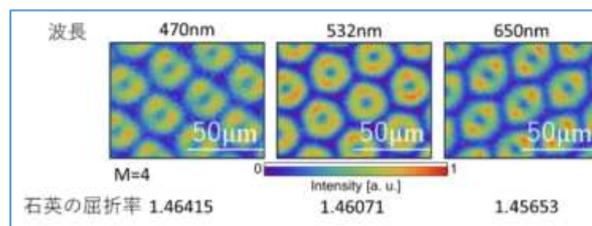
③ メガ光渦生成装置の構築

光源に EKSPLA 社 OPO、NT242 を導入した (パルス幅:4~6ns, Signal:405~709.99nm, idler:710~2600nm)。シグナルとアイドラー光を同軸にし、さらにポインティングを一致させることで、紫外から赤外までチューナブルなビームが得られるように構成した。これに対し、透過型回折格子によって発生した6ビームを空間光変調器 (SLM, X15213-07 (浜松ホトニクス社)、620-1100nm) に入射し、適切な位相差を与える事で干渉パターン (図1(e)) を形成した。干渉部に CMOS カメラ (ピクセルサイズ 2.4 $\mu$ m) を挿入し、光強度分布を静止画及び動画で計測できる構成にした。

④ 可変波長メガ光渦の発生と観察

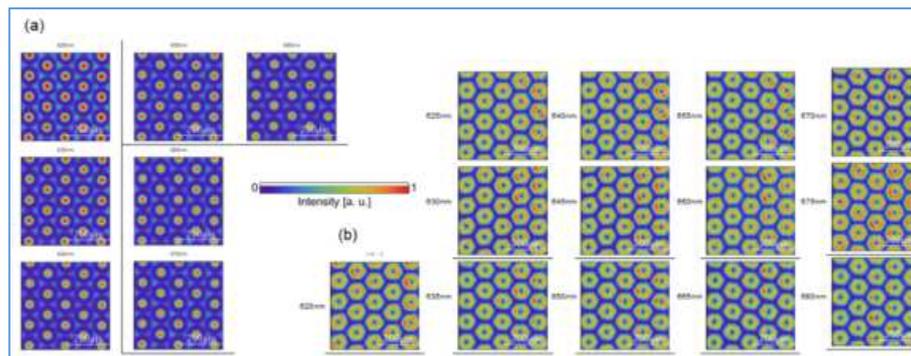
まず、旧来のメガ光渦形成方法において波長を変化させた場合を調査した。波長 532nm で位相差が  $\Delta\phi_n = \pi/3$  に設定された位相板を用いた場合に、470nm から 650nm に波長を変化させたときの光強度分布を図3に示す。設計波長である 532nm ではメガ光渦が形成されているが、波長が変化すると光路差及び石英の屈折率が変化のために位相差が設計値からずれてしまうため、メガ光渦が形成されなくなる。

図3 波長 532nm で位相差が  $\Delta\phi_n = \pi/3$  になるよう設計された位相板を用いた場合の、470nm~650nm における光強度分布の測定結果



次に、SLM と OPO のシグナル光の波長域が重畳する範囲内で波長をスキャンし、 $\Delta\phi_n = 0$  の場合の光強度分布を計測した結果を図4(a)に示す。全ての波長域において6ビーム干渉パターンが形成されており、過去のシミュレーションや加工結果と一致した (Appl. Opt. 51, 5004(2012), Appl. Surf. Sci. 417, 69 (2017))。画像毎の強弱及び画像内の強度分布は、ショット毎のビーム強度及びプロファイルの変化による。次に、 $\Delta\phi_n = -\pi/3$  の場合を図4(b)に示す。全ての波長でメガ光渦が形成されている。ここで、特定の波長に最適化された波長板を用いた場合 (図3) では 60nm の波長の変化でメガ光渦の形状が破綻していたのに対し、広帯域に対応した SLM を位相付与機構に導入する事で、60nm の波長変化において安定してメガ光渦を形成する事が出来た。

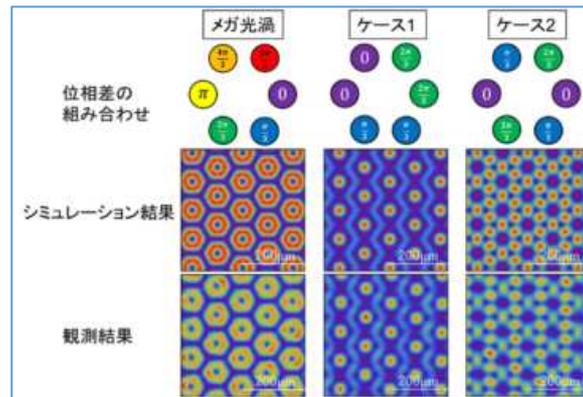
図4  $\Delta\phi_n = 0, -\pi/3$  の場合の光強度分布の測定結果。(a)  $\Delta\phi_n = 0$ 、620nm ~ 680nm まで 10nm 刻み。(b)  $\Delta\phi_n = -\pi/3$ 、620nm ~ 680nm まで 5nm 刻み。



⑤ 位相差制御機構のチェック及び干渉パターン制御

SLMによる6ビーム間の位相差独立制御機能をチェックする事を兼ねて、過去にシミュレーションで調べられた6ビーム間の位相差制御を利用した干渉パターン制御の検証を行った (Appl. Opt. 51, 5004(2012))。おおよそシミュレーション結果と一致した測定結果が得られた。測定結果における誤差は主にショット毎のビーム強度及びプロファイルの変化によるが、位相差制御の精度について検証を進める必要がある。

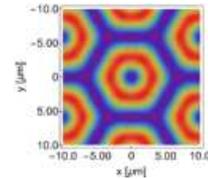
図5 ビーム間の位相差制御による6ビーム干渉パターンの制御。上：シミュレーション結果、下：測定結果。画像の上が6ビーム位相差の組み合わせを表している。 $\lambda = 630\text{nm}$ 。



⑥ 多重波長メガ光渦：2波長の場合

波長の異なるメガ光渦を重ね合わせたときの光強度分布を明らかにするため、図2で示した波長が400nmと800nmのメガ光渦を重ね合わせたときの積算値の光強度分布のシミュレーションを行った。両波長ともx方向の直線偏光である。結果は図6の通り、単一波長の場合と全く同じ光強度分布が得られた。また、両波長の初期位相に関わらず同じ結果となった。

図6 400nmと800nmのメガ光渦の重ね合わせ



⑦ メガ光渦を用いた金属加工

Nd:YAGレーザーのSHG(532nm)を用いてメガ光渦を形成し、厚さ $3\mu\text{m}$ の金薄膜にシングルショット加工を行った。ショットエネルギーは $5\text{mJ}$ 、メガ光渦の周期は $10\mu\text{m}$ である。図7に光学顕微鏡像を示す。メガ光渦が持つドーナツ状の光強度分布が反映された加工が行われていることが分かる。ここで、円環の中央が特異点に該当し、従来の単独光渦を用いた加工ではこの部分が突起構造になっている可能性がある。詳細は $\text{nm}$ の分解能を持つ3次元形状の測定装置が必要である。

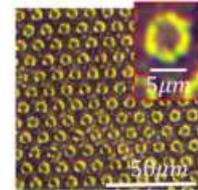


図7 メガ光渦を用いた金薄膜の加工：光学顕微鏡像

⑧ 微粒子トラッピングによる軌道角運動量の実証へ向けた予備実験

多点軌道角運動量を実証する方法として、微少な粒子を光トラッピングし、その挙動を解析する手法を確立する必要がある。ここでは予備実験として溶液中に溶解させた個々の高分子鎖やナノビーズのラマン/蛍光顕微分光計測を行い、顕微蛍光追跡を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nakata Yoshiaki, Tsubakimoto Koji, Shiraga Hiroyuki, Miyanaga Noriaki, Kosaka Yuki, Yoshida Masataka	4. 巻 12
2. 論文標題 Simulation of optical radiation force distribution in interference patterns and necessary conditions for chiral structure formation on dielectrics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 15264-15264
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-18615-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Nakata Yoshiaki, Tsubakimoto Koji, Miyanaga Noriaki, Narazaki Aiko, Shoji Tatsuya, Tsuboi Yasuyuki	4. 巻 11
2. 論文標題 Laser-Induced Transfer of Noble Metal Nanodots with Femtosecond Laser-Interference Processing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanomaterials	6. 最初と最後の頁 305 ~ 305
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/nano11020305	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計25件（うち招待講演 7件/うち国際学会 12件）

1. 発表者名 浅瀬 有希、檜垣 寧々、東海林 竜也
2. 発表標題 金ナノ粒子を用いて作製したプラズモン光ファイバによるナノ粒子の光捕捉の検討
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田 匡志、森本 雅夕、東海林 竜也
2. 発表標題 ナノリンクル構造を用いた高分子ナノ粒子の光捕集
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 浅瀬有希、東海林竜也
2. 発表標題 テーパー光ファイバを用いたプラズモン光捕捉の実証
3. 学会等名 2023年 光化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 吉田匡志、東海林竜也
2. 発表標題 水素化チタンナノ構造体を用いた光ピンセット法の開発
3. 学会等名 2023年 光化学討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上田 翔平, 平川 裕人, 椿本 孝治, 中田 芳樹, ジャッケル ヘンドリック
2. 発表標題 干渉パターンを利用したレーザー誘起ドット転写法の開発II
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋期学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田匡志, 森本雅夕, 東海林竜也
2. 発表標題 チタンナノリンクル構造体を用いた光ピンセット法の探求
3. 学会等名 2022年 光化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 浅瀬有希, 檜垣寧々, 東海林竜也
2. 発表標題 金ナノ粒子を用いたプラズモン光ファイバピンセットの開発
3. 学会等名 2022年 光化学討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 東海林竜也, 飯田京子, 坪井泰之
2. 発表標題 金ナノ粒子を内包したリポソーム単粒子からの分子放出挙動の顕微蛍光追跡
3. 学会等名 第21回高分子ミクروسフェア討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 平川 裕人, 椿本 孝治, 白神 宏之, 中田 芳樹
2. 発表標題 空間光位相変調器と4f光学系を用いた六角形フラットトップビーム整形法の実証
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中田芳樹, 白神宏之
2. 発表標題 超短パルスレーザーを用いた新奇ナノ周期構造の形成
3. 学会等名 電子材料研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平川 裕人, 小坂 悠起, 椿本 孝治, 白神 宏之, 中田 芳樹
2. 発表標題 位相グレーティングと空間周波数フィルタリングを用いた六角形フラットトップビーム整形
3. 学会等名 第82回応用物理学秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平川裕人, 森塚 翼, 小坂悠起, 椿本孝治, 白神宏之, 中田芳樹
2. 発表標題 位相グレーティングと空間周波数フィルタリングを用いた超高精度ビーム整形
3. 学会等名 第551回 光・量子デバイス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小坂 悠起, 平川 裕人, 森塚 翼, 椿本 孝治, 白神 宏之, 宮永 憲明, 中田 芳樹
2. 発表標題 円偏光干渉パターンを用いたカイラル構造の多点同時形成
3. 学会等名 第68回応用物理学学会春期学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiki Nakata
2. 発表標題 Macro and Micro Beam Shaping and Nanoprocessing (Keynote)
3. 学会等名 4th international conference on optics, photonics and lasers (OPL) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Satoshi Yagi, Yuto Hirakawa, Yoshiki Nakata
2. 発表標題 Efficiency of Beam Shaping Using Spatial Frequency Filtering Combined with Aspheric Lens Pair
3. 学会等名 12th asia-pacific laser symposium (APLS 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshiki Nakata
2. 発表標題 Deposition of nanodot array by laser-induced dot transfer technique using interference pattern
3. 学会等名 International Workshop on Laser Material Processing and Applications (LMPA 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Asase, T. Shoji
2. 発表標題 Fabrication of a plasmonic optical fiber using gold nanoparticles for optical trapping of polymeric nanospheres
3. 学会等名 The 31st International Conference on Photochemistry (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Yoshida, T. Shoji
2. 発表標題 Optical trapping of polymer nanospheres using titanium nano-wrinkle structures
3. 学会等名 The 31st International Conference on Photochemistry (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Shoji, M. Morimoto, M. Yoshida
2. 発表標題 Exploring nanostructure-assisted optical tweezers toward mechano-bactericidal activity analysis
3. 学会等名 The 31st International Conference on Photochemistry (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshiki Nakata
2. 発表標題 Structural/Shaped Laser Beams for Nanostructuring of Materials (Tutorial)
3. 学会等名 CLEO (Conference on Lasers and Electro-Optics) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Nakata, S. Ueda, Y. Hirakawa, H. Jackel
2. 発表標題 Deposition of Multiple Nanodots by Laser-induced Dot Transfer Technique Using Interference Pattern
3. 学会等名 3rd International Workshop on Frontiers in Lasers and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Ueda, H. Shiraga, N. Miyanaga, Y. Nakata, H. Jackel
2. 発表標題 Parameter study of laser-induced dot transfer technique using interference pattern
3. 学会等名 Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XXVIII (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Asase, T. Shoji
2. 発表標題 Fabrication of Plasmonic Optical Fiber using Silane Coupling Agents for Optical Manipulation
3. 学会等名 The 13th Asia-Pacific Conference on Near-Field Optics (APNF013) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Nakata, Y. Hirakawa, T. Aoyama, Y. Kosaka, K. Osawa
2. 発表標題 Extremely flattop polygon beam extraction from a Gaussian beam by using a virtual phase grating
3. 学会等名 2nd International Workshop on Frontiers in Lasers and Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshiki Nakata
2. 発表標題 Beam shaping to extremely flattop polygon by using a virtual phase grating
3. 学会等名 2nd International Summit on OPTICS, PHOTONICS AND LASER TECHNOLOGIES (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>受賞</p> <p>1. 2021年度大阪大学レーザー科学研究所年未報告会 ポスター賞 B4 学生賞 上田 翔平(中田が指導する学生)</p> <p>2. 令和4年度コニカミノルタ画像科学奨励賞&lt;優秀賞&gt; 東海林竜也</p> <p>3. 第4回プラズモニク化学研究会若手奨励賞 東海林竜也</p>
---

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	東海林 竜也  (Shoji Tatsuya)  (90701699)	神奈川大学・理学部・准教授     (32702)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関