

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04622

研究課題名（和文）光トラッピングを用いたランダムレーザーの発振制御

研究課題名（英文）Control of random laser emission using optical trapping

研究代表者

岡本 卓（Okamoto, Takashi）

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：40204036

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：ランダムレーザーの発振制御および発振効率向上を目的として、媒質中の散乱粒子が光トラッピングされたランダムレーザーの発光特性を調査した。粒子充填率が低い場合、光トラッピングにより無発振状態から発振状態へと切り替えが可能であること、および、粒子充填率が高い場合、光トラッピングは発振強度をより高めることが分かった。これは、粒子分布を不均一にすると発振効率が向上するという以前の研究結果に沿うものであった。さらに、発振状態の動的切り替えも可能であることを示し、所期の目的を達成した。また、トラップ粒子の分布状態シミュレーションも行い、各種パラメータとトラップ粒子分布の関係を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ランダムレーザーは光の散乱により発光する構造のため発振効率が低く、また、調整された共振器を持たないため発光制御が難しかった。本研究では、光トラッピングを用いてランダム構造を直接かつ実時間で制御するという新たな手法により、ランダムレーザーの発振効率向上および発振制御を目指した。結果として、従来のものよりも発振効率が高いレーザー発光が得られ、さらに発光特性が動的に制御可能となった。これにより、場合に依りてコヒーレンスなどの発光状態を切り替えられるレーザーを実現することができ、新たな顕微鏡やディスプレイ、医療用機器などの開発へとつながる。

研究成果の概要（英文）：The emission properties of random lasers with scattering particles optically trapped in the laser medium were investigated to control the random laser emission and improve the emission efficiency. It was found that optical trapping can switch the laser from a no-lasing state to a lasing state when the particle filling ratio is low and that the emission intensity was more enhanced at higher particle filling ratios, which is in line with our previous study that the emission efficiency improves when the particles are distributed inhomogeneously. Furthermore, dynamic switching of the lasing state was also shown to be possible, thus achieving the desired objectives. The simulation of the spatial distribution of trapped particles clarified the relationship between various parameters and the trapped particle distribution.

研究分野：光工学

キーワード：ランダムレーザー 光トラッピング 多重散乱 レーザー発振制御 空間光変調器 モンテカルロ・シミュレーション

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

不規則な共振器構造をもつランダムレーザーは、その空間的コヒーレンスの低さから画像ノイズとなるスペックルが発生しにくいレーザー光源として注目されている。しかしながら、光の散乱により発光する構造のために現状では発振効率が低い。また、調整された共振器を持たないため発光メカニズムが複雑であり、発振原理究明への障害となっている。本研究では、光トラッピングを用いてランダム構造を直接かつ実時間で制御するという、現在まで行われたことのない手法により、ランダムレーザーの発振効率の向上をめざす。さらに、ランダムレーザー媒質を構成する粒子の位置を精密に制御することにより、発光状態を自在に変化させる技術確立する。光トラップされた粒子よりなるランダムレーザー媒質の発光実験を実施し、本手法の有効性を検証する。また、光トラッピングと光増幅のシミュレーションを新たに組み合わせることで、本ランダムレーザーの発光特性を解析する。最終的に、発振効率が高く、かつ発光制御が可能なランダムレーザーの実現を目指す。

### 2. 研究の目的

本研究では、ランダムレーザー媒質を構成する散乱体粒子を光トラッピングにより位置制御する。本研究の目的は、(1)内部の発振状態を変化させることによって、発光効率の高いレーザー媒質構造を探索すること、(2)特定の粒子のみを位置制御することで、発光スペクトルや発光角パターンの実時間制御が可能かどうかを調べることで、である。

### 3. 研究の方法

最初に、ランダムレーザー媒質の作製方法について説明する。レーザー色素 Rhodamine 590 を  $6.7 \times 10^{-3}$  mol/L 添加したエタノール水溶液 (エタノール: 67.9 wt%) を利得媒質とした。さらに、散乱体として直径 250 nm の球状酸化チタン ( $\text{TiO}_2$ ) 粒子を利得媒質中に分散させた。  $\text{TiO}_2$  粒子とエタノール溶液の屈折率は、それぞれ 2.7~3.0 (波長による) 1.36 である。作製した  $\text{TiO}_2$  分散色素添加エタノール溶液をスライドガラス上に滴下し、その上にカバーガラスを置いた。媒質サイズは一辺 10 mm、厚さ 0.2 mm である。ランダムレーザー媒質の一例を図 1 に示す。

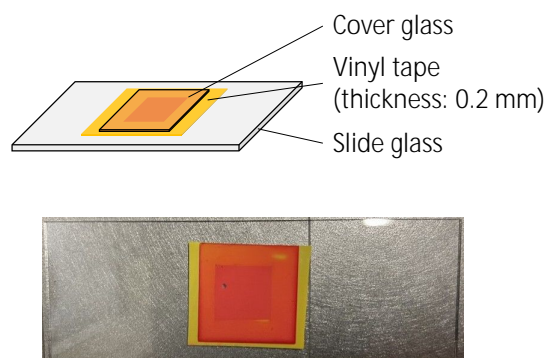


図 1 ランダムレーザー媒質

本研究で用いた実験系を図 2 に示す。波長 671 nm の連続波 (CW) レーザーからの光をコリメータで広げ、空間光変調器 (LCOS-SLM、Santec SLM-200) に照射した。そこから反射した光をダイクロイックミラーを介して対物レンズ (40 倍、NA: 0.5) に入射した。対物レンズの焦点位置を試料内部の中央高さに合わせ、そこで複数の粒子をトラップした。トラップ用の光波パターンは空間光変調器により制御する。

試料は、波長 532 nm、パルス幅 10 ns の Nd:YAG レーザービームにより励起した。励起ビームは、焦点距離 50 mm のシリンドリカルレンズを用いて試料表面に幅約 90  $\mu\text{m}$ 、長さ約 5 mm の線状に集光した。試料から出射した光は、直径 50 mm、焦点距離 60 mm のコレクターレンズ、励起光をカットするノッチフィルター、および光ファイバーを通して、光スペクトラムアナライザー (Ocean Optics HR2000) により検出された。検出角は約 45° である。各サンプルの発光スペクトルを 300 ms ごとに約 1 分間測定し、200 個のスペクトルデータを得た。スペクトル分解能は 0.2 nm である。

### 4. 研究成果

設計したトラップ光強度パターンおよび結像光学系で観察した粒子分布をそれぞれ図 3(a) と図 3(b) に示す。トラップ領域での 2 つの粒子集合体間の多重散乱により光の増幅が促進されることを期待し、間隔 15.7  $\mu\text{m}$  で 2 つのトラップスポットを設定した。図 3(b) より、2 つのレーザースポットに多くの粒子が凝集していることがわかる。

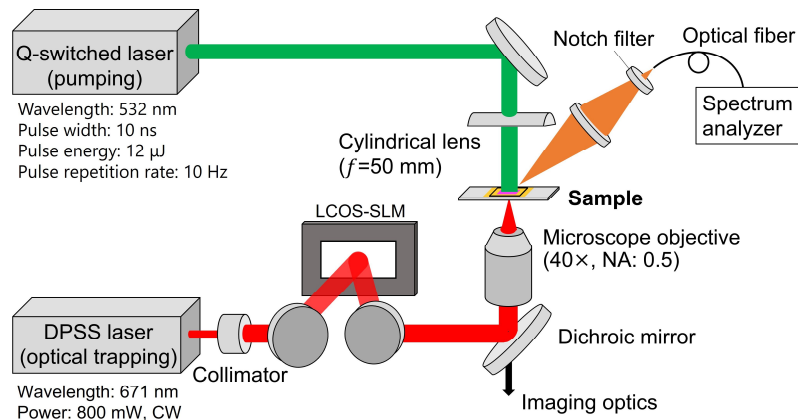


図2 光トラップされた粒子を持つランダムレーザー媒質の発光実験系

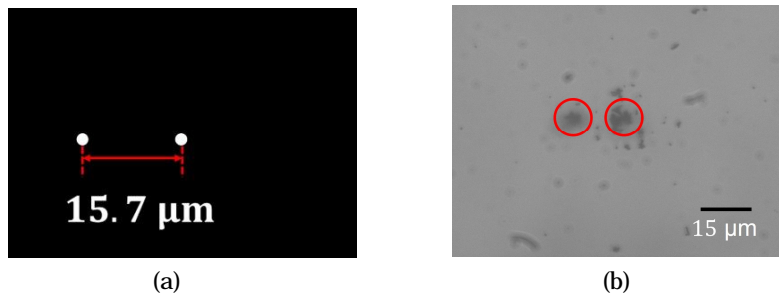


図3 2点での光トラップ。(a) 設計されたトラップ光強度パターン、(b) 観測された粒子分布。

微粒子トラッピングがランダムレーザーの発光スペクトルにどのような影響を与えるか調査した。体積充填率 0.2% と 1.0% の粒子サンプルで測定したスペクトルの例を図4に示す。トラップ光自体が強く散乱されることを防ぐため、粒子濃度は通常のランダムレーザーに比べて低く設定した。体積充填率 0.2% の場合、トラップ光なしではほとんど発光しなかったが、それ以外の場合は発光スペクトルにいくつかの鋭いスパイクがあり、コヒーレント・ランダムレーザー発振の特徴を示した。トラップ光を照射した際は1秒程度でスペクトルが変化したが、トラップ光

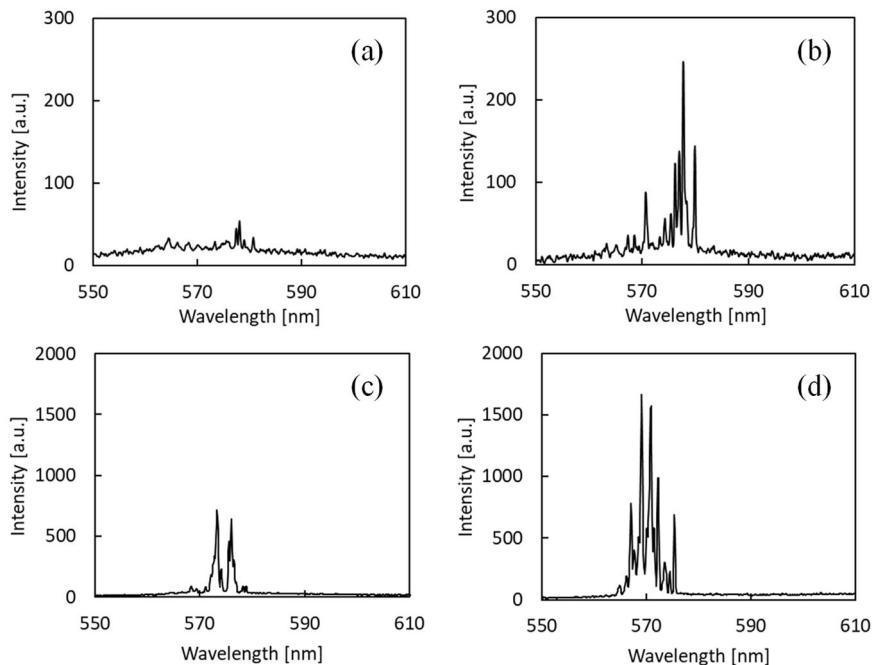


図4 トラップ光の有無による発光スペクトルの違い。(a) 0.2%・トラップ光なし、(b) 0.2%・トラップ光あり、(c) 1.0%・トラップ光なし、(d) 1.0%・トラップ光あり。

を切った後は数分のオーダーで変化した。これは、トラップ光を入れたときは、そのトラップ力で粒子を集められるが、トラップ光を切った後は、粒子のブラウン運動による拡散でのみ分布が変化するためである。

発光スペクトル特性は、最大スパイク強度、平均スパイク強度、スパイク数の3つのパラメータで評価した。トラップ光を照射した場合としない場合の平均最大スパイク強度および平均スパイク数を図5に示す。図5(a)より、トラップ光を照射(ON)した場合、いずれの充填率の場合も最大スパイク強度が増加した。これは、トラップされた粒子の局所充填率が周囲粒子の充填率よりも高くなり、強い光散乱を生じさせたためであると考えられる。スパイク強度の増加率は、充填率0.2%の方が充填率1.0%の場合よりも大きい。これは、充填率0.2%ではレーザー発振していない状態から発振状態へと変化したためである。これに対し、図5(b)に示すように、スパイク数はトラップ光を照射すると充填率0.2%では増加し、1.0%では逆に減少するという、異なる結果が得られた。

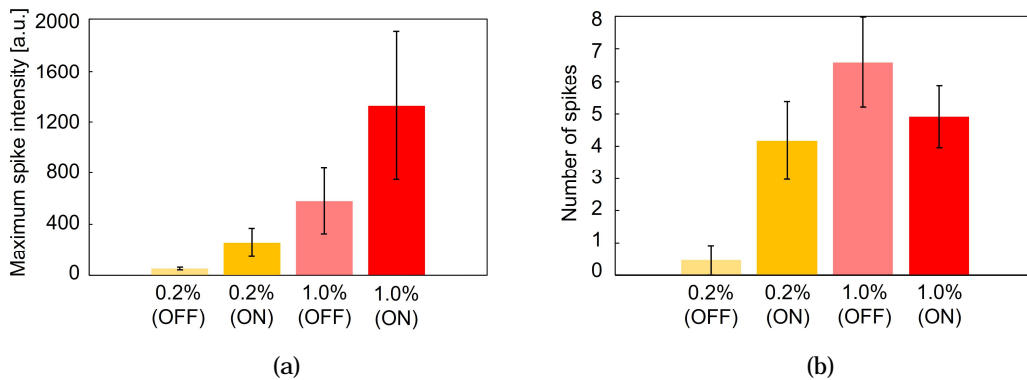


図5 トラップ光の有無による発光スペクトルの (a) 最大スパイク強度と (b) スパイク数の違い。

異なるトラップ光強度における発光スペクトルの最大スパイク強度とスパイク数を図6に示す。図6(a)、(b)に示すように、最大スパイク強度は15 mWのトラップスポットよりも7.5 mWのトラップスポットの方が高いが、スパイク数はほぼ同じであった。トラップ光強度が高いほど、トラップ領域により多くの粒子が集まり、その周囲に残る粒子は少なくなる。この結果は、トラップされる粒子とされない粒子の数には最適な比率が存在することを示唆している。

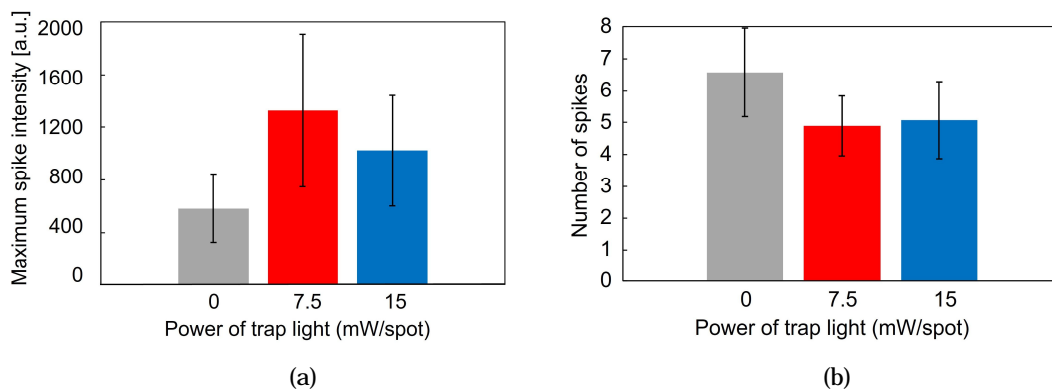


図6 トラップ光の強度による発光スペクトルの (a) 最大スパイク強度と (b) スパイク数の違い。(粒子の体積充填率1.0%)

散乱体粒子を光トラップした利得媒質からのランダムレーザー発振の特徴を調べるため、トラップなし、7.5 mW/spotのトラップ光、15 mW/spotのトラップ光の3つの場合について、最大スパイク強度とスパイク数の関係を調べた。結果を図7に示す。光トラッピングによってスパイク数が減少し、最大スパイク強度が増加する。この傾向は7.5 mWのトラップ光でより顕著である。先行研究では、不均一な散乱体分布をもつランダムレーザーの発振は、より少ない波長に集中し、各発振波長のスペクトル強度が大きくなることが示された。今回、散乱体の空間配置が異なるにもかかわらず、同様の特徴を持つスペクトルが得られている。この事実は、散乱体の不均一な分布が発振波長数を制限し、各発振波長での強度を増加させることを示唆している。

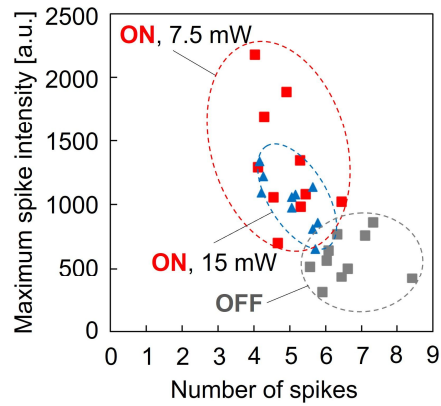


図7 最大スパイク強度とスパイク数の関係。(粒子の体積充填率 1.0%)

上記の実験的研究と合わせて、光トラップされた粒子の空間分布をシミュレーションにより求めた。結果の一例を図8に示す。実験と同じ粒子を用い、トラップ光強度 7.5 mW、トラップスポット直径  $1.64 \mu\text{m}$ 、粒子数 30 個のときの粒子分布である。同じトラップ光条件であっても、媒質の粘度によりトラップされた粒子の空間分布の広がりや凝集は異なってくる。実験に用いた媒質の粘度に一番近い図8(a)では、粒子はかなり凝集して存在することが分かった。

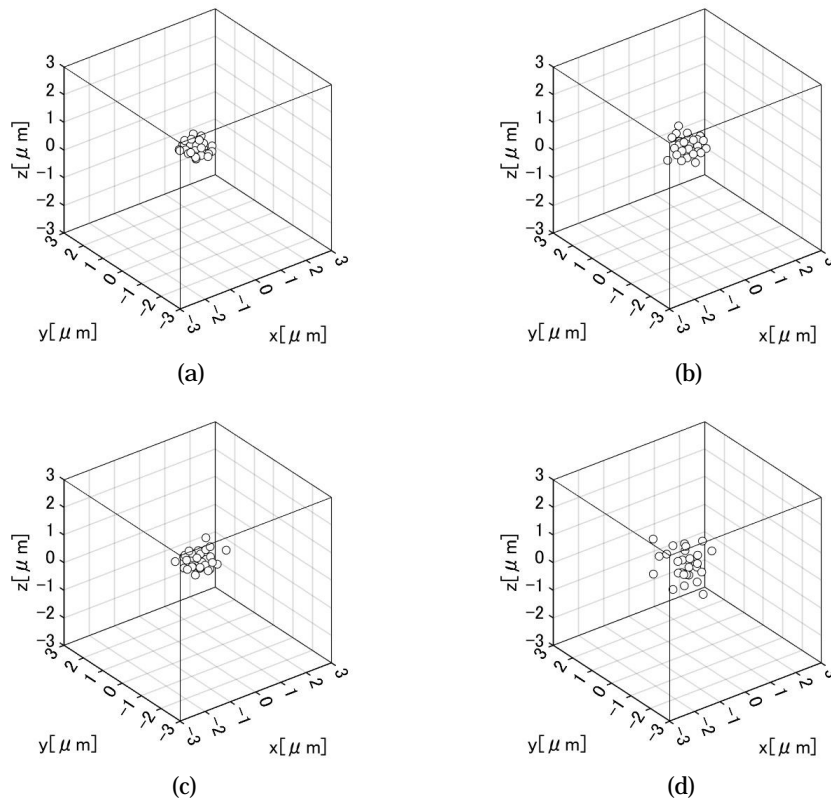


図8 光トラップされた粒子の空間分布。媒質粘度：(a)  $1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、(b)  $20 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、(c)  $100 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 、(d)  $1000 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。

本研究では、光トラップされた粒子よりなるランダムレーザーの発光特性を調べた。粒子の体積充填率が 0.2% と小さいランダム利得媒質では、粒子を光トラップすることにより、弱い散乱媒質でもレーザー発振を起こすことができた。また、粒子の体積充填率が 1.0% の媒質では、発振波長の発光強度向上を実現した。したがって、光トラッピングを用いてランダムレーザー発光のオン・オフを切り替える、あるいは発振波長数やその強度を変化させることが可能であることが明らかとなった。今後は、規則的に並んだ光スポットやランダムに分布した光スポットなどのトラップパターンが、ランダムレーザー発光に与える影響を調査する。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Okamoto Takashi	4. 巻 11851
2. 論文標題 Emission characteristics of random lasers and their control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE (LDC 2021)	6. 最初と最後の頁 72-74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2601617	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Okamoto Takashi, Imamura Keigo, Kajisa Kouki	4. 巻 508
2. 論文標題 Inverse design of two-dimensional disordered structures for spectral optimization of random lasers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 12775
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optcom.2021.127775	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kaku Takashi, Yokoi Naomichi, Okamoto Takashi	4. 巻 2022
2. 論文標題 Active control of random lasing using the optical trapping technique	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2022)	6. 最初と最後の頁 P_CTh1_14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Okamoto Takashi, Kajisa Kouki, Ohshige Ryo	4. 巻 2022
2. 論文標題 Design of scatterer configuration for spectral optimization of random lasers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, Technical Digest Series (Optica Publishing Group, 2022)	6. 最初と最後の頁 CTHP1G-06
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松尾悠太, 横井直倫, 岡本卓
2. 発表標題 光トラッピングによるランダムレーザー媒質の構造制御
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田生, 岡本卓
2. 発表標題 非増幅領域や非散乱領域をもつランダムレーザー媒質の発光シミュレーション解析
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 黄チン, 岡本卓
2. 発表標題 散乱領域と増幅領域を分離したランダムレーザー媒質の発光実験
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加治佐考起, 岡本卓
2. 発表標題 時間領域差分法を用いた2次元ランダムレーザーの構造設計および構造誤差が発光特性に与える影響の解析
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 加来鷹志, 横井直倫, 岡本卓
2. 発表標題 光トラッピング技術を用いた微粒子ランダムレーザー媒質の動的制御
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大重諒, 岡本卓
2. 発表標題 指定した発光帯をもつランダムレーザーの構造設計および構造誤差の影響
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福嶋剛, 岡本卓
2. 発表標題 3Dプリンターを用いたランダムレーザーの設計および作製
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	横井 直倫  (Yokoi Naomichi)  (60353223)	公立千歳科学技術大学・理工学部・准教授   (20106)	

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
---------	---------