

令和元年6月25日現在

機関番号：10106

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06968

研究課題名(和文) 太陽光を用いた省エネ型光通信システムの開発

研究課題名(英文) Development of energy saving optical communication system using solar-pumping

研究代表者

曽根 宏靖 (SONE, Hiroyasu)

北見工業大学・工学部・准教授

研究者番号：00333667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：構築した太陽光採光システムからの可視光を励起光として用い、エルビウム(Er)添加ファイバ(EDF)からの1550 nm帯の放出光特性(EDF長特性、Er濃度特性)について調査した。

また、イットリウム・アルミニウム・ガーネット(YAG)系材料による太陽光の吸収効果を調べた。YAGにネオジムを添加した結晶(Nd:YAG)とネオジム・クロム・セリウムを添加した結晶(Nd/Cr/Ce:YAG)は太陽光の吸収によって近赤外光が放出されることを確認した。さらに、効率的に可視光を取り入れるための波長フィルタの研究や高濃度イッテルビウム(Yb)添加ファイバを使ったレーザー構築についても調べた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本提案は太陽光をレーザーに変換することによってエネルギー密度を劇的に上げられ、かつファイバへの伝送を容易にしている点が特長である。太陽光集光に関しては、屋内でのレーザー加工用光源や熱源等、幅広い分野へと展開させられる可能性がある。例えば熱電変換や二酸化炭素の化学的分離処理時の熱源として利用可能である。超高速・大容量の光信号伝送に関しては、電力インフラと情報インフラが不十分な地域における光通信インフラ整備に期待できる。さらに、基礎研究段階において、太陽光照射時における光パルス信号発生や光増幅の基礎データが得られ、レーザー加工産業への展開も図ることができる。

研究成果の概要(英文)：Using the visible light from the solar light collection system as excitation light, we investigated the emission light characteristics (EDF length characteristics, Er concentration characteristics) from the EDF in the 1550 nm band.

In addition, the absorption effect of the YAG-based material by solar-light was examined. It was confirmed that Nd:YAG and Nd / Cr / Ce:YAG emitted light from near 1100 nm to near 1400 nm by absorption of solar-pumping. In addition, research on wavelength filters to efficiently take in visible light and laser system fabrication using bismuth-based high-concentration Yb-doped fiber were also investigated.

研究分野：工学・総合工学・エネルギー学

キーワード：自然エネルギーの利用 太陽光励起レーザー 太陽光採光システム 希土類添加ファイバ 量子効率 YAG系材料

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、再生可能エネルギーである太陽光を励起光源とした太陽光励起固体レーザーが注目を浴びている。

また、光通信で用いられるレーザー光(波長 1550 nm 帯)を効率良く増幅できる装置として、エルビウム(Er)添加光ファイバ(EDF)増幅器(EDFA)が広く用いられている。Erの吸収波長としては、主に半導体レーザー(LD)光からの 980 nm や 1480 nm の波長が用いられているが、487 nm, 521 nm, 653 nm などの可視波長でも吸収は可能である[1]。我々は、この点に注目し調査してきた[2]。

2. 研究の目的

我々は、太陽光励起ファイバ増幅器構築のための基礎データ収集のため、EDFの励起光として太陽光を用いた場合の諸特性について調査した。また、EDF以外にもYAG系材料を用いた太陽光による吸収と放出特性及び太陽光からの可視光を選択的に励起媒質に取り入れるバンドパスフィルタについて調査した。さらに、短尺の高濃度希土類添加ファイバを用いたファイバレーザーを構築し発振したパルス列を確認した。

3. 研究の方法

(1) 可視光吸収特性

励起光源にはハロゲンランプを使用した。励起光をレンズで集光しマルチモードEDF(MM-EDF)に入射し、ファイバから出射した光を分光器で測定した。使用したファイバは、EDFの長さが 59.3 cm, 29.7 cm, 14.8 cm のものと比較のためのマルチモードファイバ(MMF)である。また、1 mW 程度の 532 nm のレーザー光を用いて、1550 nm 波長帯の蛍光スペクトルを測定し、その結果からエネルギー変換効率(=量子効率)の見積もりも行った。

(2) 太陽光励起特性

励起光は、ラフォーレエンジニアリング社製追尾型太陽光採光システム「ひまわり」XD-50S/12AS[3]で集光され、10 m の 12 芯の石英ガイドファイバで伝送された正午付近の太陽光を用いた。ガイドファイバからの出射光パワーをサーマルセンサ型光パワーメータ(可視モード)で測定したところ、太陽光(12 芯合計)は 6 W であった。太陽光は、各芯の合波が困難であるため、あるいは熱損傷の影響も考慮し 12 芯の中の 1 芯のみを使用した。また、各光源には近赤外域も存在する。そのため、今回は EDF からの純粋な蛍光を観測するため、850 nm 以下のみを透過させるショートパスフィルタ(ソーラボ社製 FESH850、透過帯域 490 nm ~ 850 nm, 透過率 90 % 以上、遮断帯域 850 nm ~ 1600 nm OD 値 5 以上、1600 nm 付近以上は遮断域外)をガイドファイバ直後に使用した。EDF には、0.98 μm において 1.85 dB/m の吸収特性を有するコア径 70 μm の CorActive 社製 MM-EDF (HPA-Er-70-01)を用いた。また、ガイドファイバ端とショートパスフィルタ、MM-EDF 端への結合は、フレネル反射による損失や熱損傷を防ぐため屈折率マッチングオイルを塗布し直付けた。

(3) YAG 系材料の吸収・放出特性

$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (イットリウム・アルミニウム・ガーネット)は、通称 YAG (ヤグ)と呼ばれるガーネット系の結晶である。Nd や Ce, Yb を添加して、レーザー用途に使用することもある。YAG の結晶を製造する過程でイットリウムを数%のネオジムでドーピングした結晶を Nd:YAG という。これを用いた Nd:YAG レーザは、研究、産業(溶接、印字、加工)、医療用レーザーとして使われている。我々はこの YAG 系材料について調査してきた[4,5]。本調査では、可視光を吸収する Nd:1 %, Cr:0 % 添加、3 ミリ厚の Nd:YAG、Nd:1%, Cr:3 % 添加、3 ミリ厚の Nd/Cr:YAG、Nd:1 %, Cr:0.1 %, Ce:0.2 % 、5 ミリ厚の Nd/Cr/Ce:YAG を用いた。

励起光源は(2)で用いたラフォーレエンジニアリング社製追尾型太陽光採光システムひまわりで集光され、直径 1 mm の石英ガイドファイバ 12 芯で構成された 10.2 m のバンドル石英ファイバによって伝送された太陽光を使用した。また、放出光のスペクトルをより確認しやすくするために(2)で用いた 850 nm 以下の光のみを透過させるショートパスフィルタを可視光吸収材料直前に用いた。

(4) 簡易的な可視光波長バンドパスフィルタに関する研究

簡易的なバンドパスフィルタとして Lyot-Filter[6]の手法を用いた。Lyot-Filter は偏光板で挟んだ複屈折媒質(位相差フィルム)を多層積層することで特定波長の鋭い透過スペクトルを実現している。この原理に基づき、位相差フィルムの枚数を換えることにより異なる色を透過できる。この構成でシミュレーション予測を行い、その予測をもとにフィルタを作製し実証した。

(5) Bi 系高濃度 Yb ファイバレーザーの作製

Bi 系ファイバは、濃度消光を抑えながら Yb を高濃度に添加することが可能である。そのため短尺のファイバでも十分な増幅を行うことができ、石英による分散効果を抑え、分散補償素

子を省略することが可能である。本調査では、Bi 系高濃度 Yb ファイバ(YDBF) を用いて、ファイバレーザの作製を試みた。

YDBF を増幅媒質として用いてレーザ共振器を構成し、パルス発振を試みた。励起光源は中心波長 976 nm、最高出力 550 mW の LD を使用した。励起光をコリメータレンズを通して平行光にし、ミラーで反射して YDBF のコア中に入射させる。YDBF はコア径 5.3 μm 、Yb 濃度 4.0×10^4 ppm (1 mol)[7]、ファイバ長 23.5 cm のものを使用した。ファイバ長が短いため、分散量が少ないと考えられる。そのため、共振器内での分散補償を必要としない。パルス列観測では、高速光検出器とデジタルオシロスコープを使用した。

4. 研究成果

(1) 可視光吸収特性

MMF を基準とした各 MM-EDF のファイバ長における波長-吸収の特性を Fig.1 に示す[8]。今回の実験では、407 nm、452 nm、487 nm、521 nm、653nm で吸収を確認した。さらに、487 nm、521 nm、653 nm の吸収波長についてファイバ長-吸収特性を調べた。その結果を Fig.2 に示す[8]。その結果、521nm が 487 nm、653 nm に比べて吸収係数 α が大きい事が分かった。また、532 nm \rightarrow 1550 nm への変換効率 (= 量子効率) の見積もりを行った。その結果、エネルギー変換効率は約 10%であった。

以上の成果から、太陽光を励起光として用いることにより光吸収がある程度期待できることが確認された。

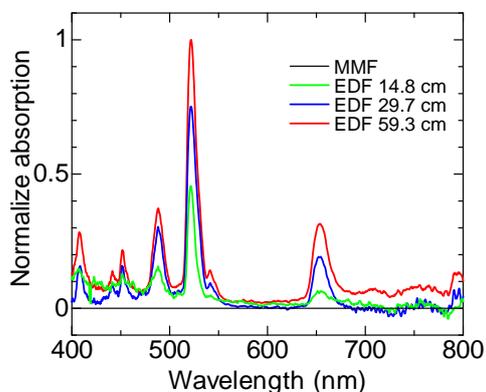


Fig.1 各ファイバ長における波長-吸収特性[8]

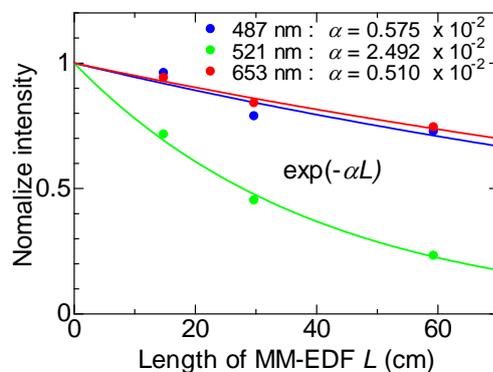


Fig.2 各吸収波長におけるファイバ長-吸収特性[8]

(2) 太陽光励起特性

太陽光を励起光として MM-EDF へ入射した際の 1500 nm 帯の蛍光スペクトル特性を調べた。14.1 cm、18.7 cm、29.0 cm、108.4 cm の各長さの MM-EDF を用いた場合における 1500 nm 帯の蛍光スペクトルの様子を Fig.3 に示す[9]。また、Fig.3 の各長さにおける蛍光スペクトルの最大値について調べた結果を Fig.4 に示す[9]。これらの結果より、太陽光励起により、波長 1500 nm 帯の大きな蛍光を確認した。これは、MM-EDF の長さは長くなるとファイバ内での光の損失が大きくなり、短すぎると EDF の励起効果が薄れたためであると考えられる。今回の実験環境において最適な EDF 長は 18.7 cm 付近であることがわかった。

以上の成果から、太陽光集光には既存の太陽光採光システムを用いることが有効であることが実証された。また、(1)で示した吸収効果により 1500 nm 帯の光信号を増幅させられる可能性があることが確認された。今後は、より高光量の太陽光のシングルモードファイバ入射を試み、ファイバ共振器に組み込んでパルス発振器を構築したい。

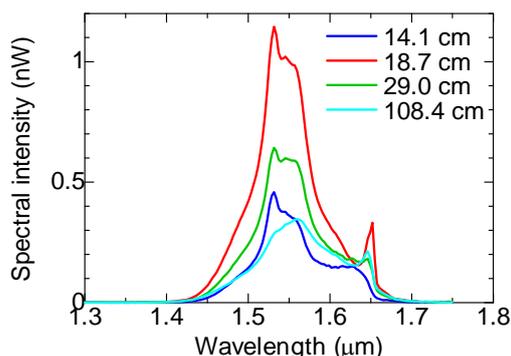


Fig.3 各 MM-EDF 長における 1500 nm 帯の蛍光スペクトル[9]

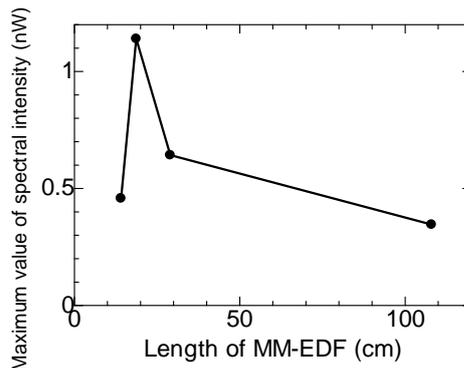


Fig.4 MM-EDF--蛍光ピーク値特性[9]

(3) YAG 系材料の吸収・放出特性

可視光吸収材料の吸収特性を調べるために、白色光源を用いた結果を Fig.5 に示す。可視光帯で吸収が起きていることが確認できた。特に赤で示した Nd/Cr:YAG は波長 600 nm 付近の吸収が特に大きかった。

また、太陽光の吸収・放出特性を調べた結果を Fig.6 に示す。これらの結果からは、1100 nm から 1400 nm 付近で放出光を確認できた。可視域で見比べると、Nd:YAG のほうが Nd/Cr/Ce:YAG より光強度が強いが、1100 nm から 1400 nm 付近の放出は Nd/Cr/Ce:YAG のほうが大きいことからセリウムを添加することで吸収・放出率が良くなることがわかった。

以上の成果から、YAG 系材料を用いた場合でも添加物を選定することで、太陽光の吸収による近赤外光の放出効果の有効性が示された。今後の太陽光励起媒質の開発に期待したい。

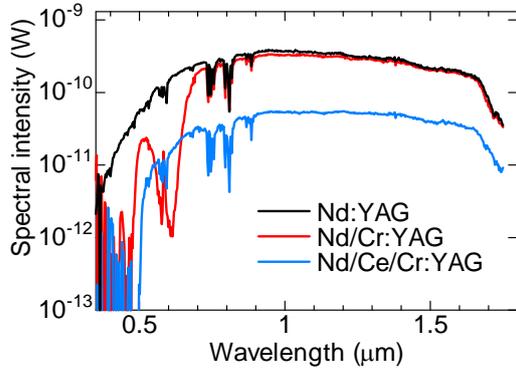


Fig.5 各 YAG 系材料の吸収特性

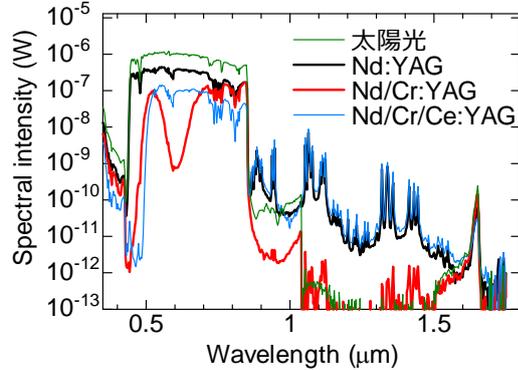


Fig.6 太陽光励起による各 YAG 系材料の放出特性

(4) 簡易的な可視光波長バンドパスフィルタに関する研究

ここでは、一例として青色を識別するためのバンドパスフィルタについて報告する。青色を識別するための Lyot-Filter[6] の構成は偏光板 3 枚に位相差が 140 nm のフィルムを 3 枚と 6 枚を間に挟んだ。青色に関する透過率特性及び各色 LED の発光特性を Fig.7 に示す[10]。橙色実線はシミュレーション結果を示す。黒色実線は実験結果である、橙色実線と黒色実線の縦軸は右軸で示す。灰色実線は青色セロハンの透過特性を示し、青緑赤破線は各色の LED の発光特性を示す。その結果、青色のシミュレーションで予測した透過波長と実験による透過波長の結果がほぼ一致した。また、最大透過率強度は色つきセロハンより劣るが、隣の緑色信号との識別度の向上を確認できた。

以上の成果から、太陽光からの可視光を選択的に励起媒質に取り入れる簡易型バンドパスフィルタの有効性を確認した。このフィルタを用いることにより、提案システムにおける発熱等の原因をもたらす不要な波長の光を排除することが可能になる。

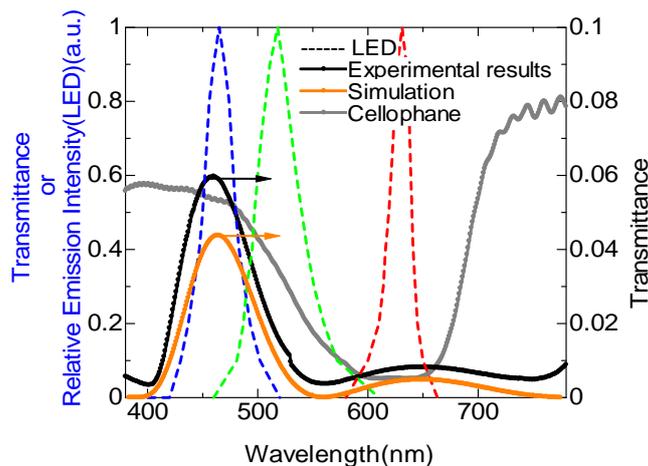


Fig.7 青色に関する透過率特性及び LED の発光特性[10]

(5) Bi 系高濃度 Yb ファイバレーザの作製

観測した CW モード同期パルス列を Fig.8 に示す[11]。パルス列の間隔は 1 ns で 1 GHz の高繰り返し率であった。これは 23.5 cm で 1 つのモード同期パルスが生成されていると考えられる。同様な光学系で YbF を用いた報告例[12] (コア径 4 μm、Yb 濃度 1.3×10^4 ppm (0.5mol)、ファイバ長 23 cm、LD 励起パワー 500 mW) での結果より、小さい励起パワーでパルス列を確認できた。

以上の成果から、(2)で得られた長さの短尺の希土類添加ファイバを用いることで分散補償素子が不要になり、簡素なファイバレーザーの構築が可能であることが分かった。

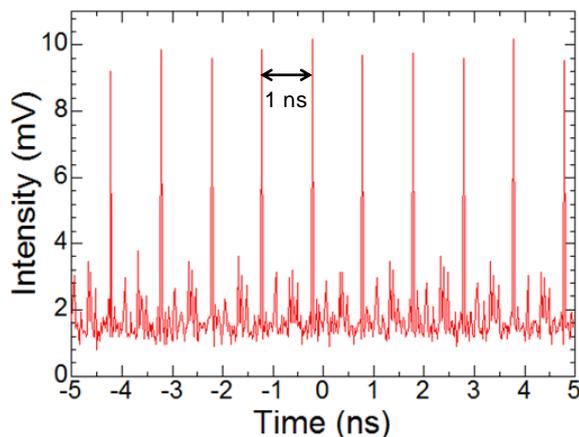


Fig.8 モード同期パルス列[11]

<引用文献>

- [1] L. Htein, W. Fan, P. R. Watekar, W. Han, *Opt. Lett.*, vol. 37, pp.4853-4855 (2012).
- [2] 加藤, 大友, 古瀬, 本越, 本田, 藤本, 曾根, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, p.04-455(2015).
- [3] K. Mori, 14th National Congress of the Illumination Engineering Institute of Japan, Apr.3(1981).
- [4] 梅津, 古瀬, 曾根, 川村, 平賀, 安原, 第 52 回応用物理学会北海道支部/第 13 回日本光学会北海道支部 合同学術講演予稿集, p.80(2017).
- [5] 梅津, 古瀬, 安原, 曾根, 川村, 平賀, レーザー研究, vol. 45, no. 4, pp.231-235(2017).
- [6] B. Lyot : *Annales d'Astrophysique*. vol. 7, p.31 (1944).
- [7] S. Nakamura, Y. Hikita, and H. Sone, *Far East Journal of Electronics and Communications*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-22 (2013).
- [8] 河野, 小野, 古瀬, 曾根, 第 52 回応用物理学会北海道支部/第 13 回日本光学会北海道支部合同学術講演会予稿集, p.32(2017).
- [9] 小田, 馬場, 古瀬, 中村, 曾根, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集, p.03-446(2019).
- [10] M. Fukuyama, K. Harada, S. Sugawara, H. Furuse, S. Nakamura and H. Sone, *Far East Journal of Electronics and Communications*, vol. 17, pp. 147-153 (2017).
- [11] 竹内, 中村, 古瀬, 曾根, 平成 29 年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会講演予稿集, p.212(2018).
- [12] D. Yoshitomi et al., *Optical Society of America*, paper CMA2, (2009).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

1. 小田, 馬場, 古瀬, 中村, 曾根, 「太陽光励起によるエルビウム添加光ファイバーの蛍光特性」 2019 年 第 66 回 応用物理学会春季学術講演会予稿集, p.03-446(2019). (査読無)
2. 竹内, 中村, 古瀬, 曾根, 「正常分散受動モード同期ビスマス系高濃度 Yb 添加ファイバレーザー」平成 29 年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会講演予稿集, p.212(2018). (査読無)
3. 河野, 山下, 古瀬, 中村, 曾根, 「太陽光励起ファイバー増幅器のための基礎的研究」第 53 回応用物理学会北海道支部/第 14 回日本光学会北海道支部合同学術講演会予稿集, p.71(2018). (査読無)
4. 竹内, 中村, 古瀬, 曾根, 「ビスマス系高濃度 Yb 添加ファイバレーザーへの検討」第 53 回応用物理学会北海道支部/第 14 回日本光学会北海道支部 合同学術講演会予稿集, p.70(2018). (査読無)
5. 河野, 小野, 古瀬, 曾根, 「可視光励起ファイバ増幅器の基礎的研究」第 52 回応用物理学会北海道支部/第 13 回日本光学会北海道支部 合同学術講演会予稿集, p.32(2017). (査読無)

6. Momoka Fukuyama, Kenji Harada, Shiori Sugawara, Hiroaki Furuse, Shinki Nakamura and Hiroyasu Sone, "Lyot-filter design method with dispersion in the visible light region," Far East Journal of Electronics and Communications, vol. 17, no. 1, pp. 147-153 (2017). (査読有)
(<http://dx.doi.org/10.17654/EC017010147>)

7. 梅津, 古瀬, 安原, 曾根, 川村, 平賀, 「透光性 YAG セラミックスの近赤外熱光学特性,」 レーザー研究, vol. 45, no. 4, pp.231-235(2017). (査読有)

8. 梅津, 古瀬, 曾根, 川村, 平賀, 安原, 「透光性 YAG セラミックスの近赤外熱光学特性,」 第 52 回応用物理学会北海道支部/第 13 回日本光学会北海道支部 合同学術講演予稿集, p.80(2017). (査読無)

[学会発表] (計 6 件)

1. 小田, 馬場, 古瀬, 中村, 曾根, 「太陽光励起によるエルビウム添加光ファイバーの蛍光特性,」 2019 年 第 66 回 応用物理学会春季学術講演会予稿集, p.03-446(2019).

2. 竹内, 中村, 古瀬, 曾根, 「正常分散受動モード同期ビスマス系高濃度 Yb 添加ファイバーレーザー」平成 29 年度 電気・情報関係学会北海道支部連合大会講演予稿集, p.212(2018).

3. 河野, 山下, 古瀬, 中村, 曾根, 「太陽光励起ファイバー増幅器のための基礎的研究」第 53 回応用物理学会北海道支部/第 14 回日本光学会北海道支部合同学術講演会予稿集, p.71(2018).

4. 竹内, 中村, 古瀬, 曾根, 「ビスマス系高濃度 Yb 添加ファイバーレーザーへの検討」第 53 回応用物理学会北海道支部/第 14 回日本光学会北海道支部 合同学術講演会予稿集, p.70(2018).

5. 河野, 小野, 古瀬, 曾根, 「可視光励起ファイバ増幅器の基礎的研究,」 第 52 回応用物理学会北海道支部/第 13 回日本光学会北海道支部 合同学術講演会予稿集, p.32(2017).

6. 梅津, 古瀬, 曾根, 川村, 平賀, 安原, 「透光性 YAG セラミックスの近赤外熱光学特性,」 第 52 回応用物理学会北海道支部/第 13 回日本光学会北海道支部 合同学術講演予稿集, p.80(2017).

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：古瀬 裕章

ローマ字氏名：FURUSE Hiroaki

所属研究機関名：北見工業大学

部局名：工学部

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：50506946

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：中村 真毅

ローマ字氏名：NAKAMURA Shinki

部局名：茨城大学

部局名：理工学研究科 (工学野)

職名：准教授

研究者番号 (8 桁)：90323211

※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、研究者個人に帰属されます。