

令和元年5月20日現在

機関番号：14303

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05427

研究課題名(和文) 径偏光ビームの集光場における光と物質の相互作用を利用した極微小レーザに関する研究

研究課題名(英文) Study on nano/micro lasers applying interaction between the light of focused radially polarized beam and materials

研究代表者

北村 恭子 (Kitamura, Kyoko)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・講師

研究者番号：40635398

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、微小集光特性などで注目を集めてきた径偏光ビームにおいて、径偏光ビーム集光場におけるクローキング効果と金属による電場増強効果を用いた、ナノプラズモニックレーザおよび径偏光ビーム集光特性と誘電体構造を用いた、単一チップサブ波長自己集光レーザの2種の異なるタイプの極微小レーザを創製することを目指した。その結果、径偏光ビームを用いたプラズモニックレーザの可能性を示した。高効率な径偏光ビーム発生を可能にする新たなフォトリック結晶レーザを発明した。その表面加工により波長以下の微小光場形成が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、径偏光ビームの集光特性を利用したナノプラズモニックレーザの可能性を示した。また、サブ波長光場を実現する、自己集光型の半導体レーザの可能性を示したことにより、これまで多くの光学系を必要としてきた高分解能顕微鏡技術を、数ミリアダの半導体レーザワンチップで置き換えることを示した。これらの成果は、「径偏光ビーム」が、ナノレーザというマイクロチップ内集積化を前提とした微小光学領域においても、また顕微鏡などのマクロな技術における半導体レーザの領域においても、新機軸を創出するビームであることを示す成果である。

研究成果の概要(英文)：In this research, we attempted to realize two types of nano/micro lasers using peculiar focusing properties of radially polarized beams. Firstly, we investigated the possibility of nano-plasmonic laser which uses cloaking effect and electric field enhancement effect of metal nano-structure of focused radially polarized beam. Secondly, we attempted to develop self-subwavelength-focused single-chip lasers by using a radially polarized beam and dielectric material. As a result, we developed new type of photonic-crystal lasers which generate radially polarized beam efficiently. And we showed that the generation of subwavelength localized electric field can obtain by surface processing on the lasers.

研究分野：光量子電子工学

キーワード：径偏光ビーム フォトリック結晶 半導体レーザ プラズモニックレーザ

1. 研究開始当初の背景

光波は、波長、振幅/強度、偏光、位相といった様々な物理量を有する。従来、「光学」の分野において議論されてきたのは、これらの物理量が、空間的に一様なものである。近年、空間位相変調器や、様々な光学系を用いたレーザ共振器の開発により、偏光が空間的に制御された新たなビーム、ベクトルビームが注目されている。径偏光ビームは、ベクトルビームの最低次のモードである。このビームは、電界の偏光がビーム断面の中心から放射状に揃ったビームである。ビーム断面の中心が偏光の特異点となり、ドーナツ形状(強度分布)を有する。開口数(NA)の高いレンズで集光されると、ビーム進行(z)方向に偏光した成分が、強め合いの干渉条件を満たすため、光軸上にz方向に偏光した電界強度を形成できる。このため、2000年初頭より、微小集光など新奇な特性を有すると言われてきた。

以上のような学術的背景に対して、研究代表者らは、フォトニック結晶(PC)レーザを用い、フォトニック結晶を構成する、空気孔(格子点)の配列および構造の設計によって、様々なベクトルビームの発生を、半導体レーザで可能にしてきた(E. Miyai *et al.*, *Nature*, **441**, 946 (2006) や S. Iwahashi *et al.*, *Opt. Express*, **19**, 11963 (2011)など)。とりわけ、径偏光ビームに関しては、それまでの国内外の研究が理論解析に留まっていたのに対して、研究代表者らの「径偏光・狭リング形状ビーム」による、「長焦点深度・微小集光特性」(K. Kitamura *et al.*, *Opt. Express*, **18**, 4518 (2010))の実験実証により、国内外より高く評価いただいていた。光源開発の面からも、このような新奇集光特性を形成するビームをリング共振器を有するPCレーザによって、得ることに成功していた(K. Kitamura *et al.*, *APL*, **101**, 221103(2012))。

2. 研究の目的

以上のような研究開始当初の背景に対して、本研究は、微小集光特性などで注目を集めてきた径偏光ビームの新たな価値創出を目指すものである。具体的には、径偏光ビーム集光場における光と金属ナノ構造および誘電体構造との相互作用に基づき、径偏光ビーム集光場におけるクローキング的効果と金属による電場増強効果を用いた、ナノプラズモニックレーザおよび径偏光ビーム集光特性と誘電体構造を用いた、単一チップサブ波長自己集光レーザの2種の異なるタイプの極微小レーザを創製する。

3. 研究の方法

上記の研究目的に対して、以下の研究を実施した。

径偏光ビーム集光場におけるクローキング的効果と金属による電場増強効果を用いた、ナノプラズモニックレーザ

- i. 3次元時間領域差分(FDTD)法による電磁界シミュレーションへのゲイン物質の導入
- ii. 金属-誘電体(ゲイン物質)-金属構造と集光径偏光ビームによるレーザ動作特性の検討

径偏光ビーム集光特性と誘電体構造を用いた、単一チップサブ波長自己集光レーザ

- i. 新規構造のフォトニック結晶(PC)レーザによる高効率な径偏光ビームの発生
- ii. 光線追跡等を用いた自己集光に適した合成レンズの設計

4. 研究成果

径偏光ビーム集光場におけるクローキング的効果と金属による電場増強効果を用いた、ナノプラズモニックレーザ

まず、径偏光ビームの集光場を再現しつつ、金属ナノ構造を導入することのできるシミュレーション基盤を構築する必要がある。集光場の再現には、数波長の伝搬が必要である。一方、金属ナノ構造の再現には、金属の表皮深さ以下、数nmのメッシュサイズを必要とする。これらを両立するため、Lumerical社のFDTD Solutionsを用いたシミュレーションモデルを構築した。ゲイン物質を導入するため、4準位系のレーザ物質を、同ソフトウェア内蔵の機能を用いて導入した。図1に構築したシミュレーションモデルの模式図を示す。

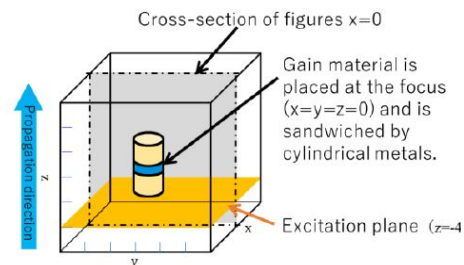


図1: 3次元FDTD法によるシミュレーションモデル模式図

図1のシミュレーションモデルを用いて、金の間に挿入したゲイン媒質のキャリア密度 N に対する電界分布の変化を検討した。図2に代表的な図を示す。この結果、 $N=2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ のとき、プラズモニックな電場増強効果が最大となることが分かった。また、 $N < 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の領域では、最大電場は金の間のゲイン媒質中に集中し、 $N > 5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の領域では、最大電場が入射側の金属の側面に集中し、ゲイン媒質は金属と同等の効果となることが分かった。

これらの検討を基に、最も電界増強効果が見られた条件において、ゲイン媒質の吸収波長に合わせて、励振したところ、図3に示すように、放出スペクトルに明確な長波長シフトが観測された。また、この時の電界強度分布の時間変化を観測したところ、この構造の光閉じ込め効果に起因する電場放出の遅延が見られた。さらに、金属材料を銀に変化させるなどの検討を行った結果、本結果が、金属-ゲイン物質-金属の構造における集光径偏光ビームによるプラズモニックな電界増強効果によって支持されたものであると結論付けた。今後は、金属-ゲイン物質-金属の分散関係にも着目し、バンド端効果を利用することで、レージング効果をより明確に示すことを目指す。

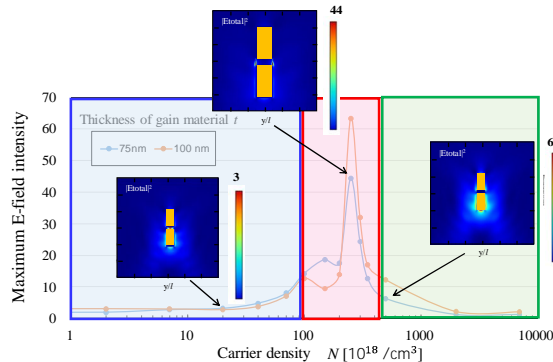


図2：キャリア密度の変化に対する最大電界強度の変化と電界強度分布

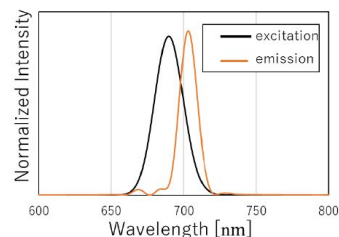


図3：放出スペクトル

径偏光ビーム集光特性と誘電体構造を用いた、単一チップサブ波長自己集光レーザ

単一チップサブ波長自己集光レーザを実現するため、新たな発振原理により、効率よく径偏光ビームを発生することのできる、フォトニック結晶レーザを発明した。まず、正方格子のフォトニック結晶において、2次元共振状態を形成しつつ、上方回折効果を持たない、M点のバンド端共振効果を利用した。これに対して、径偏光ビームの特徴である、ドーナツ形状の強度分布を与えるため、フォトニック結晶面における中心を原点として円周方向に、異なる回転角度方向にビームを射出することのできるような、波数ベクトルを、フォトニック結晶を形成する各格子点の位置に変調を与えることで、導入した。さらに、中心から放射状に偏光させるため、格子位置変調の向きを図4に示すように、空間的に連続的に変化させて与えた。図5に得られたビームの遠視野像と偏光特性を示す。これにより、従来はTMモードの利用やリング共振器を利用する必要のあった径偏光ビームの発生に対して、TEモードを用い、フォトニック結晶の2次元大面積共振効果を利用しての径偏光ビームの発生が可能となった。そのため、今後高出力化も展望することのできる構造と言える。

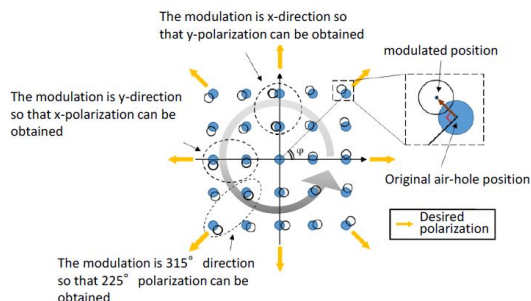


図4：径偏光ビームの高効率な発生のための新たなフォトニック結晶構造の模式図

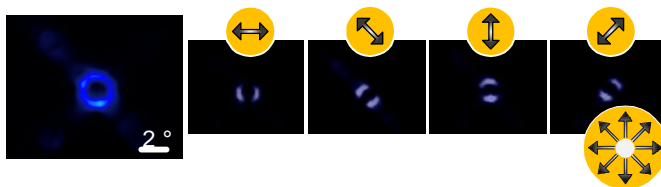


図5：新たに発明したフォトニック結晶レーザより得られた径偏光ビームの遠視野像

次に、このように発明したデバイスを用いて、発光面に加工を施すことにより、自己集光に適した構造の設計を行った。光線光学的に検討を行い、さらにその結果を3次元FDTD法で再現するアプローチで設計した。その結果、150 μm 厚、電極直径30 μm のデバイスから発生する径偏光ビームに対して、その表面に、曲率半径215.8 μm のリング状の掘り込みを形成することで、波長以下の微小な光場を表面に形成できることが明らかとなった(図6)。

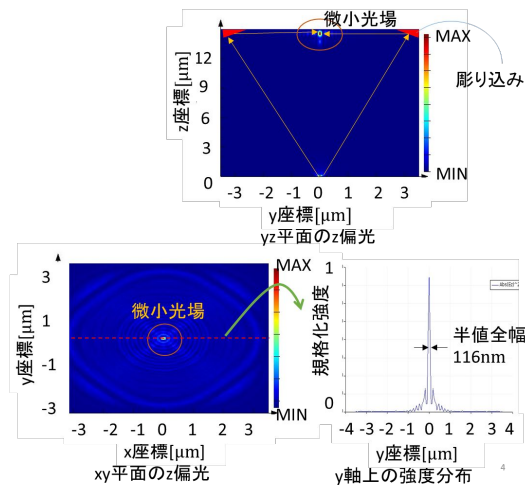


図 6 : 3次元 FDTD 法を用いた発光面加工構造の設計 (計算資源の都合上、1/10 スケールの構造で解析)

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

1. S. Noda, K. Kitamura, T. Okino, D. Yasuda and Y. Tanaka, “Photonic-crystal Surface-emitting Lasers: Review and Introduction of Modulated-Photonic Crystals,” Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 23, No. 6, 4900107 (invited Review paper) (2017).
2. K. Kitamura, M. Kitazawa, S. Noda, “Generation of optical vortex beam by surface-processed photonic-crystal surface-emitting lasers,” Optics Express, Vol. 27, No. 2, pp.1045-1050 (2019).
3. 北村恭子、沖野剛士、安田大貴、信岡俊之、野田進, “フォトニック結晶レーザによるビーム走査,” 月刊オプトロニクス 115 巻 pp.29-32 (2017).
4. 北村恭子, “フォトニック結晶レーザによる新奇ビームの発生,” 光アライアンス 28 巻 pp.6-10 (2017).
5. 北村恭子, “面発光レーザによる光渦の生成,” 光学 46 巻 pp.439-443 (2017).
6. 北村恭子, “フォトニック結晶レーザ単一素子によるビーム波面・形状制御,” 光技術コンタクト 2018 年 12 月号 Vol.56, No.12 (2018).

〔学会発表〕(計 41 件)

1. K. Kitamura, and S. Noda, “Creation of Small and Strong Electric Fields by Using a Dielectric Structure and a Focused Radially Polarized Beam,” The Optical Manipulation Conference (OMC) 2015 of the Optics & Photonics International Congress (OPIC) 2015, OMC8-3 (2015).
2. T. Okino, K. Kitamura, D. Yasuda, Y. Liang and S. Noda, “Position-modulated Photonic-crystal Lasers and Control of Beam Direction and Polarization,” The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2015), SW1F.1 (2015).
3. K. Kitamura, and S. Noda, “Generation of Strong Electric Fields with Pure Longitudinal Polarization by Using a Dielectric Structure and a Focused Radially Polarized Beam,” The Conference on Lasers and Electro-Optics/European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC 2015)CK-13.6 (2015).
4. K. Kitamura, and S. Noda, “Photonic-crystal Lasers for Needle-like Focus Properties (Invited),” International Symposium on Optical Memory 2015 (ISOM'15) Tu-F-02 (2015).
5. K. Kitamura, M. Kitazawa and S. Noda, “Study of Surface Processing onto Photonic-crystal Lasers for Generating Optical Vortex Beam,” The Optical Manipulation Conference (OMC) 2016 of the Optics & Photonics International Congress (OPIC) 2016 OMC4-6 (2016).
6. D. Yasuda, K. Kitamura and S. Noda, “Realization of Two-dimensional Beam Steering by Position-modulated Photonic-crystal Lasers,” The 25th International Semiconductor Laser Conference (ISLC2016) ThC6 (2016).
7. M. Kitazawa, K. Kitamura and S. Noda, “Generation of Optical Vortex Beam emitted by Surface-processed Photonic-crystal Lasers,” The 24th General Congress of the International Commission for Optics (ICO-24) Th3E-06 (2017).
8. K. Kitamura, M. Yone, A. Nishigo and S. Noda, “Vector Beam Generation Using Modulated Photonic-crystal Lasers,” The 24th General Congress of the International Commission for Optics (ICO-24) Th3E-07 (2017).

9. K. Kitamura and H. Obuchi, "Investigation of plasmonic lasing by using focused radially polarized beam," The Optical Manipulation Conference (OMC) 2019 of the Optics & Photonics International Congress (OPIC) 2019 OMC4-2 (2019).
10. 北村恭子, 安田大貴, 野田進, "(依頼講演) フォトニック結晶レーザによる 2 次元ビーム走査," 電子情報通信学会レーザ量子エレクトロニクス研究会 信学技報, vol. 115, no. 46, LQE2015-6, pp. 29-32, (2015).
11. 西本昌哉, 前川享平, 石崎賢司, 北村恭子, 野田進, "MBE 空孔埋め込み法における原子状水素表面処理に関する検討," 第 76 回 応用物理学会秋季学術講演会, 15p-2C-1 (2015).
12. 北村恭子, 安田大貴, 野田進, "フォトニック結晶レーザの機能性付加に向けた表面加工の検討," 第 76 回 応用物理学会秋季学術講演会 16a-2A-11 (2015).
13. 安田大貴, 北村恭子, 野田進, "2 次元ビームフォトニック結晶レーザの格子・デバイス構造の検討(II)," 第 76 回 応用物理学会秋季学術講演会 16a-2A-13 (2015).
14. 前川享平, 西本昌哉, 石崎賢司, 北村恭子, 野田進, "円偏光ビームを射出するフォトニック結晶レーザ構造の検討 斜めエッチング法を用いた新構造の提案," 第 76 回 応用物理学会秋季学術講演会 16a-2A-7 (2015).
15. 安田大貴, 沖野剛士, 北村恭子, 野田進, "(招待講演) フォトニック結晶レーザ-ビーム射出方向と偏光特性の制御-," 電子情報通信学会総合大会 C-4-18 (2016).
16. 前川享平, 西本昌哉, 安田大貴, 石崎賢司, 北村恭子, 野田進, "傾斜した空孔を有するフォトニック結晶構造の作製 円偏光ビームの射出に向けて," 第 63 回 応用物理学関係連合講演会 20p-P4-4 (2016).
17. 安田大貴, 西後淳貴, 北村恭子, 野田進, "2 次元ビーム走査可能なフォトニック結晶レーザの検討 (III)," 第 63 回 応用物理学関係連合講演会 21a-S621-10 (2016).
18. 北村恭子, 野田進, "(招待講演) フォトニック結晶レーザによる偏光・位相・偏向制御とその展開," 第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会 14p-A41-3 (2016).
19. 北澤美紀, 北村恭子, 野田進, "フォトニック結晶レーザの表面加工による光渦ビームの生成とその評価," 第 77 回 応用物理学会秋季学術講演会 15p-B4-18 (2016).
20. 北村恭子, "(招待講演) 先進センシング分野を支える微小集光レーザの開発," 第 197 回 センシング技術応用研究会 (2016).
21. 北村恭子, "(招待講演) 径偏光ビームの特異な集光場における電場増強効果に関する研究," 応用物理学会・量子エレクトロニクス研究会 「光-物質相互制御～制御技術の進展と新しい物理の探求～」 (2016)
22. 北村恭子, 野田進, "フォトニック結晶レーザによる高機能射出ビーム制御," 第 9 回 文部科学省「最先端の光の創成を目指したネットワーク研究拠点プログラム」シンポジウム (2017).
23. 北村恭子, 野田進, "(招待講演) フォトニック結晶レーザによる様々な形状・偏光/位相分布ビームの発生 光圧の自在なデザインに向けて," 第 64 回 応用物理学春季学術講演会 14p-413-2 (2017).
24. 米雅子, 北村恭子, 野田進, "変調フォトニック結晶レーザを用いたベクトルビームの発生," 第 64 回 応用物理学春季学術講演会 15a-E205-11 (2017).
25. 知念毅, 吉田一晶, 北村恭子, 野田進, "変調フォトニック結晶レーザによる多重リング状ビームの発生とその集光特性," 第 78 回 応用物理学会秋季学術講演会 8a-S44-10 (2017).
26. 吉田一晶, 米雅子, 知念毅, 北村恭子, 野田進, "変調フォトニック結晶レーザによるベクトルビームの発生 II 様々なベクトルビームの発生制御," 第 78 回 応用物理学会秋季学術講演会 7p-PA1-8 (2017).
27. 西後淳貴, John Gelleta, 田中良典, 北村恭子, 野田進, "変調フォトニック結晶レーザにおける格子点形状、変調シフト量の検討," 第 78 回 応用物理学会秋季学術講演会 6p-A405-22 (2017).
28. 北村恭子, 野田進, "(招待講演) 変調フォトニック結晶レーザによるビーム操作," レーザー学会第 8 期第 8 回「レーザー照明・ディスプレイ専門委員会」(2017).
29. 北澤美紀, 北村恭子, 野田進, "(査読あり) フォトニック結晶レーザの表面加工による光渦ビームの生成," 第 36 回 電子材料シンポジウム We1-4 (2017).
30. 尾淵浩也, 北村恭子, "径偏光ビームの集光場における光 物質間相互作用," 第 2 回 集積光デバイスと応用技術研究会 「IoT 時代の集積フォトンクス」P03 (2017).
31. 田中良典, 北村恭子, 野田進, "変調フォトニック結晶レーザによるビーム走査," レーザー学会学術講演会 第 38 回 年次大会 S6-3 (2018).
32. 西後淳貴, 北村恭子, 深谷昌弘, 田中良典, Gelleta John, 野田進, "楕円格子点変調フォトニック結晶レーザの作製と評価," 第 65 回 応用物理学春季学術講演会 19p-C301-12 (2018).
33. 田上智基, 北村恭子, 末永幸平, 石崎賢司, 野田進, "ニューラルネットワークによるフォトニック結晶格子点構造の 3 次元モデリングの検討," 第 65 回 応用物理学春季学術講演会 20a-P3-1 (2018).
34. 尾淵浩也, 北村恭子, "径偏光ビームの集光特性を利用したプラズモニックレーザ検討," 第

- 79 回 応用物理学会秋季学術講演会 18p-231C-6 (2018).
35. 坂田諒一, 田中良典, 石崎賢司, 井上卓也, De Zoysa Menaka, 國師渡, 宮井英次, 北村恭子, 野田進, “変調フォトニック結晶レーザにおける変調方式の検討,” 第 79 回 応用物理学会秋季学術講演会 19a-225B-8 (2018).
 36. 石崎賢司, 坂田諒一, 國師渡, 田中良典, De Zoysa Menaka, 初田蘭子, 吉田昌宏, 宮井英次, 北村恭子, 野田進, “空孔埋め込み再成長法による変調フォトニック結晶レーザの作製,” 第 79 回 応用物理学会秋季学術講演会 19a-225B-9 (2018).
 37. 田上 智基, 北村 恭子, 末永 幸平, 石崎 賢司, 野田 進, “(査読あり) Three-dimensional Modeling of Photonic-crystal Lattice-structure by Using Neural Network,” 第 37 回電子材料シンポジウム We1-12 (2018).
 38. 鈴木亮彌, 北村恭子, 野田進, “(査読あり) Design of Photonic Crystal Lasers Generating Optical Vortex Beams,” 第 37 回電子材料シンポジウム We1-14 (2018).
 39. 北村恭子, “(招待講演)フォトニック結晶レーザによる出射ビーム制御—単一チップレーザで光の物理量をどこまで制御できるか—,” 平成 30 年電気関係学会関西連合大会 G8-6 (2018).
 40. 尾淵浩也, 北村恭子, “径偏光ビームの集光特性を利用したプラズモニックレーザの検討 II,” 第 66 回 応用物理学会春季学術講演会 9a-M116-8 (2019).
 41. 坂田諒一, 田中良典, 石崎賢司, 岩田錦太郎, 深谷昌弘, 井上卓也, De Zoysa Menaka, 北村恭子, 野田進, “変調フォトニック結晶レーザにおける変調方式の検討(),” 第 66 回 応用物理学会春季学術講演会 12p-W631-5 (2019).

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1 件)

名称：フォトニック結晶レーザ
発明者：野田進, 北村恭子, 米雅子
権利者：京都工芸繊維大学・京都大学
種類：特願/PCT
番号：2017-035887 PCT/JP2018/007246
出願年：2017 年 (国内) 2018 年 (PCT)
国内外の別：国内・国外

〔その他〕

ホームページ等
京都工芸繊維大学 先進センシング工学研究室
<http://www.cis.kit.ac.jp/~kyoko/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：
ローマ字氏名：
所属研究機関名：
部局名：
職名：
研究者番号 (8 桁):

(2)研究協力者

研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

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。