

平成 22年 5月25日現在

研究種目：若手研究(B)  
 研究期間：2008 ～ 2009  
 課題番号：20760222  
 研究課題名（和文） フォトニック結晶レーザ等による微小光場の生成とその応用  
 研究課題名（英文） Generation of optical nano-fields by photonic-crystal lasers and their applications  
 研究代表者  
 酒井 恭輔 (SAKAI KYOSUKE)  
 京都大学・次世代開拓研究ユニット・助教  
 研究者番号：00456831

研究成果の概要（和文）：集光点において極微小な領域へ局在する光場を形成すると期待されるレーザビーム(径偏光ドーナツビーム)について、その集光点での光場分布の検証と応用技術への展開を目的に研究を行った。その結果、細い円環状の径偏光ビームが、半波長以下の幅で、焦点深度が数波長以上にもなる集光点を形成することを見出した。“Z 偏光”と呼ばれる電界からなるこの光場は、光加工やセンシング、超解像観測などに役立つ光源と期待される。

研究成果の概要（英文）：We investigated the details of the optical field generated by the radially polarized laser beam, which was expected to produce tiny sub-wavelength sized field. We have found that a narrow-width annular beam indeed produced a tiny focus, which had a half-wavelength width and long depth of focus more than several wavelengths. The resultant focus, which consists of so-called “Z polarization”, is expected to have a big impact on a range of applications, such as laser processing, sensing and super-resolution microscopy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：物理光学、レーザ物理、フォトニック結晶  
 科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス電子機器  
 キーワード：径偏光ビーム、z 偏光、超解像

## 1. 研究開始当初の背景

極微小な領域へ集光された光場と物質との相互作用は、バイオフォトニクス、光量子操作、近接場科学へとつながる重要な物理と応用可能性をもち、その研究意義は極めて大きい。研究開始当初、研究代表者が開発してい

たレーザデバイス(フォトニック結晶レーザ)から、微小領域へ集光可能と大きな期待を集める径偏光ビームが得られていた。しかし、本ビームの集光特性の詳細は明らかではなく、理論・実験の両面からの深い理解が重要課題であった。

## 2. 研究の目的

重要な物理と応用可能性の高い径偏光ビームの集光特性を、理論と実験の両面から明らかにすること。さらに、微小な光場を実現すること。

## 3. 研究の方法

径偏光ビームの集光点での電界分布を理論計算により明らかにすると共に、実験的にも測定し、その大きさを評価・検討する。

(1) 集光点での電界分布を解析可能な計算手法の確立。

(2) 集光点での光強度分布を精密に測定可能な実験系の構築。

(3) 微小な光場を形成する可能性を検討する。

## 4. 研究成果

(1) 径偏光ビームは、ビーム断面において電界ベクトルの方向に分布があり、集光点での電界分布を計算するためには、ベクトル回折理論を応用する必要がある。そこで、先行研究を参考に、数値解析手法を構築した。これにより、径偏光をはじめとして、ビーム断面で電界ベクトルに分布のある多様なビーム(ベクトルビーム)の解析が可能となった。また、ビーム断面の強度分布を様々に変化させた場合に対する集光点での電界分布の計算も可能となった。

まず、フォトニック結晶レーザより得られていた径偏光ビームに対して、集光点の電界分布を解析したところ、開口数の大きなレンズでの集光により、光軸上に振動する電界成分である”Z偏光”が形成されることを確認した。しかし、その他の電界成分が光軸の周りに存在するため、集光点の広がり幅は、波長より大きくなることも明らかになった(図1)。

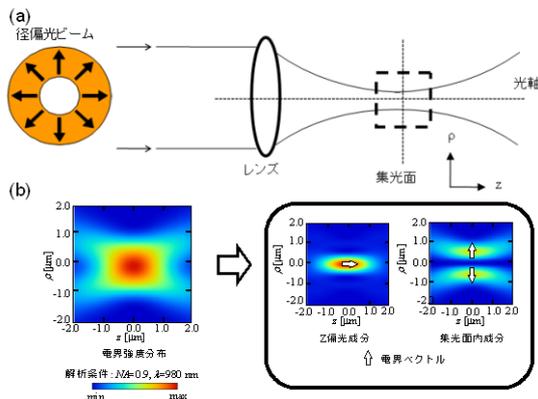


図1 (a) 解析空間の模式図. (b) 光軸を含む断面での集光点での電界強度分布.

(2) フォトニック結晶レーザより得られている径偏光ビーム(波長:980 nm)の集光点での光強度分布を測定するため、ナノメートルオーダーの精度を有する光学系を構築した。半波長(490 nm)程度の分布を測定するためには、10 nm以下の分解能が必要である。また、大きな開口数(0.9)のレンズを用いて集光するため、光の発散角度は大きくなり、集光点の近傍での受光が必須となる。こうした条件を満たす方法として、フォトダイオードの表面に形成した金属片を集光点で走査し、光電流量を測定するナイフエッジ法を使用した光学系を構築した(図2(a))。ナイフエッジ法においては、隣接測定点からの光強度の変化量が信号となる。しかし、そもそものレーザ強度の揺らぎ等も、ノイズとなって信号に含まれる問題がある。そこで、光源、光学部品、受光部の揺らぎ成分を全て精査し、測定精度を最大限向上させる工夫を行った。

その結果、図2(b)の右図に示すように、集光面内での光強度分布の測定が可能となった。ノイズは大きいですが、信号処理(隣接平均:赤線)により、計算結果(同左図)と良く対応する結果を得ることに成功した。これにより、実験的にもZ偏光が中心に形成されることを確認したことになる。

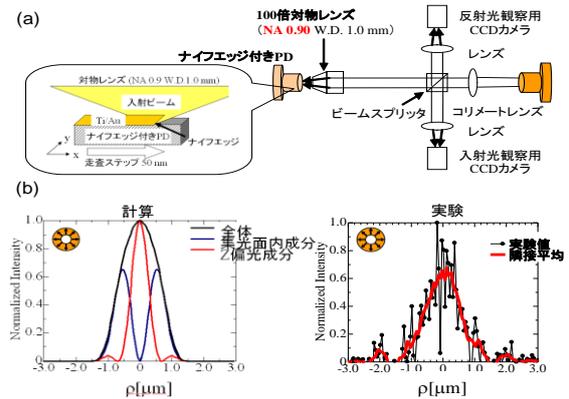


図2 (a) 構築した測定系の模式図. (b) 集光点の電界強度分布に対する計算結果と実験結果.

(3) 以上の検討により、径偏光ビームの理論解析および実験的評価が可能となった。そこで、径偏光ビームを用いて微小な光場を形成する方法について、検討を進めた。図2(b)左図より分かるとおり、集光点の中心にはZ偏光が小さな光場を形成するが、一方その他の集光面内成分が、光場の分布を広げている。そこで、集光面内成分を除去することができれば、微小な光場の実現が可能となることが分かる。集光直後の光を考えると、ビーム内側の光が、より多く集光面内成分を形成する

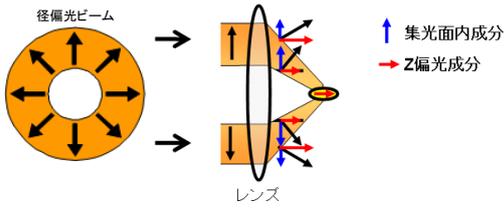


図3 径偏光ビーム集光時の電界成分.

ことが分かる(図3). 従って、集光面内成分を除去するには、ビーム内側の成分を抑制することが有効であると考えられる。

こうした予想に基づき、ビーム内側の光強度を零とし、外側に細い強度分布とした径偏光ビームの集光点での電界強度分布を検討した(図4). 外径に対する内径の比( $\delta$ )を大きくしていき、計算した結果、強度が零となる内側の領域を拡大するにつれて、集光面内成分が減少し、相対的にZ偏光成分が主成分となることが分かった。同時に、集光点の幅が低下することを見出した。図5に、外径に対する内径の比( $\delta$ )を変化させた場合の集光点の半値全幅を示す。比較のために、直線偏光のガウスビームを同条件( $NA=0.9$ )で集光させた場合の幅も示すが、 $\delta$ が0.5以上の場合には、径偏光ビームの集光点の幅がガウスビームより小さくなることが分かる。

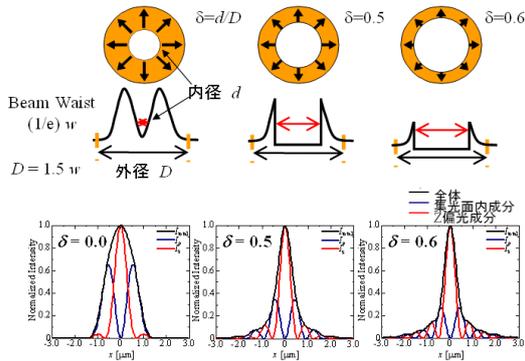


図4 光強度が零のビーム内側の領域を変化させた場合の集光点の電界強度分布.

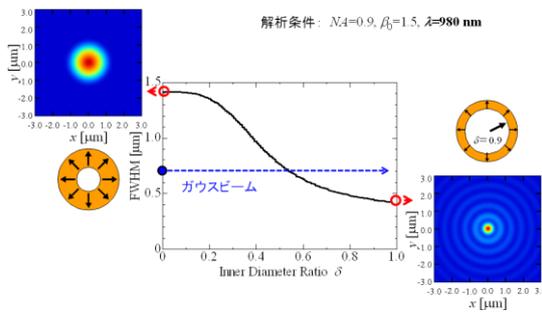


図5 外径に対する内径の比( $\delta$ )を変化させた場合の集光点の半値幅の変化.

以上の理論結果を実験的にも確認するため、図2(a)の光学系のうち、集光用の100倍対物レンズの直前に、ビーム内側の光強度を阻止するフィルタを設置し、測定を行った。図6に結果を示す。ビーム外径に対する内径の比( $\delta$ )を大きくしていくにつれ、実験的にも集光点幅が低減することが確認できた。

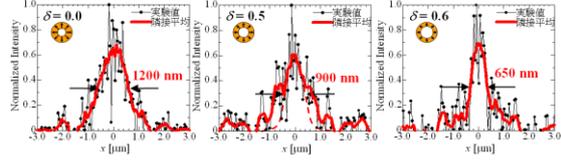


図6 外径に対する内径の比( $\delta$ )を変化させた場合の集光点断面の光強度分布. 図4 下図の理論結果と対応.

さらに、光軸方向の変化も調べたところ、内径比( $\delta$ )を大きくするにつれて、焦点深度が伸びることを見出した。図7に、(a)  $\delta=0.0$  および (b)  $\delta=0.8$  の場合の光軸を含む断面での光強度分布を示す。 $\delta=0.8$  の場合には、半波長程度の幅の集光点が、数波長程度の距離に渡って伸びていることが分かる。また、その主成分は、Z偏光成分であることも明らかになった。また実験においても、同様の特徴を確認することに成功した。

微小で焦点深度の長い集光点は、光学システムの分解能向上と容易な調整を実現すると期待される。さらに、Z偏光が主体となる集光点では、物質との特異な相互作用が実現されるものと考えられる。粒子の加速、効率的な表面プラズモンの励振、配向分子の3次元観測など、多様な応用が示唆されており、今後、これらの可能性を示していきたい。

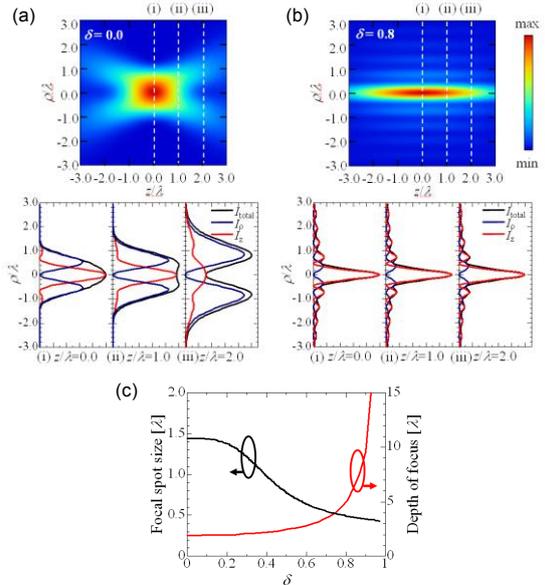


図7 光軸を含む集光点断面の光強度分布. (a)  $\delta=0.0$  と (b)  $\delta=0.8$ . (c)  $\delta$  に対する集光点の幅と焦点深度の変化.

## 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 1 件)

- ① K. Kitamura, K. Sakai, and S. Noda, “Sub-wavelength focal spot with long depth of focus generated by radially polarized, narrow-width annular beam,” Optics Express, 査読有り, vol. 18, No. 5, 2010, pp. 4518-4525 (2010).

[学会発表] (計 10 件)

- ① 北村恭子, 黒坂剛孝, 酒井恭輔, 岩橋清太, 高山直樹, 野田 進, “径偏光・狭リング形状ビームを出射するフォトニック結晶レーザーデバイス構造の提案と基礎特性の評価” 第 56 回応用物理学関係連合講演会、2010 年 3 月 19 日、東海大学.
- ② 北村恭子, 酒井恭輔, 高山直樹, 野田 進, “FDTD 法を用いた径偏光ビームの集光解析” 第 56 回応用物理学関係連合講演会、2010 年 3 月 18 日、東海大学.
- ③ 北村恭子, 酒井恭輔, 黒坂剛孝、高山直樹、國師渡、宮井英次、大西大、野田進 “2 次元フォトニック結晶レーザーの出射ビームの FDTD 法による集光解析” 第 70 回応用物理学学会学術講演会、2009 年 9 月 8 日、富山大学.
- ④ K. Kitamura, K. Sakai, Y. Kurosaka, E. Miyai, W. Kunishi, D. Ohnishi, and S. Noda, “Tight Focal Spot and Long Depth of Focus by Radially Polarized, Narrow-Width Annular Beams from Photonic-Crystal Lasers,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO '09), 2 Jun, 2009, Baltimore, USA.
- ⑤ 北村恭子, 酒井恭輔, 黒坂剛孝、高山直樹、國師渡、宮井英次、大西大、野田進 “2 次元フォトニック結晶レーザーの出射ビームの集光特性 II” 第 56 回応用物理学関係連合講演会、2009 年 3 月 31 日、筑波大学、
- ⑥ K. Kitamura, K. Sakai, and S. Noda, “Characterization of the Focused Doughnut Beam Generated by Photonic-Crystal Lasers, ” 27th Electric Materials Symposium, 10 July, 2008, Shuzenji.

[図書] (計 2 件)

- ① 酒井恭輔, 野田進, (社) レーザー学会, レーザー研究, 2009, pp. 689-693 (2009).
- ② 野田進, 酒井恭輔, アドコム・メディア株式会社, 2009, O PLUS E, pp. 1271-1276.

[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ー  
発明者: 酒井恭輔、他 3 名  
権利者: 京都大学  
種類: 特許  
番号: 特願 2010-044255  
出願年月日: 2010 年 3 月 1 日  
国内外の別: 国内

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 恭輔 (SAKAI KYOSUKE)  
京都大学・次世代開拓研究ユニット・助教  
研究者番号: 00456831

(2) 研究分担者

該当無し

(3) 連携研究者

該当無し