

平成22年 5月20日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20860004  
 研究課題名（和文）二重リング径偏光レーザー光による光ケージの実現と不透明微粒子操作  
 研究課題名（英文）Generation of the optical cage by using a double-ring-shaped radially polarized beam for manipulating opaque particles  
 研究代表者  
 小澤 祐市（KOZAWA YUICHI）  
 東北大学・多元物質科学研究所・助教  
 研究者番号：90509126

## 研究成果の概要（和文）：

本研究では、高次径偏光レーザー光が有する特異な集光特性を光トラッピング法へ適用した新しい微粒子捕捉法の実現を目指し、その基盤技術の開発を行った。まず、レーザー光の偏光分布が放射状であり、且つ多重リング状強度分布を有する高次径偏光レーザー光の発生に初めて成功し、その発生手法を確立した。さらに、径偏光ビームの集光特性に関して、焦点に発生する軸方向電場の実験的な検出手法を見出した。

## 研究成果の概要（英文）：

The aim of this research was to establish the fundamental technology for the novel optical trapping of opaque particles. First, single-transverse higher-order radially polarized beams were selectively generated from a Nd:YAG laser cavity by using a reflectivity-modified polarization-selective photonic crystal mirror. Second, the longitudinal electric field of a tightly focused radially polarized beam was experimentally demonstrated by means of second harmonic generation.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,330,000	399,000	1,729,000
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,530,000	759,000	3,289,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用光学・量子光工学

キーワード：高性能レーザー，光ピンセット，光源技術，量子エレクトロニクス，軸対称偏光

## 1. 研究開始当初の背景

レーザー光が生み出す光圧力を応用した光トラッピング（光ピンセット）法は、光に対して透明な微粒子や細胞を非接触で精密に操作することが可能であり、細胞生物学や

微小メカニクス分野において必須技術となっている。しかしながら、従来法では捕捉可能な粒子が限定されるという大きな課題が残されていた。特に、半導体や金属・磁性体といった材料からなる多くの微粒子は、高

屈折率もしくは光に対して不透明であることに起因して、従来法による3次元的捕捉は困難とされている。

一方、レーザー光の偏光が、ビーム断面において放射状に分布した径偏光ビームは、直線・円偏光には無い特異な集光特性を有するビームとして近年注目されている。特にビーム断面において二重リング状強度分布を有する高次径偏光ビームについては、強く集光することで、光で囲まれた微小空間を焦点に形成する光ケージ特性を有することが数値計算により指摘されている。この焦点に形成される光ケージは、従来法では困難であった不透明微粒子の3次元的な捕捉に極めて有効であることが予想され、高次径偏光ビームを用いることで光トラッピング法における適用範囲の大幅な拡大が十分に期待される。しかしながら、このようなビームを発生させる手法は報告されてはならず、また高次径偏光ビームの集光特性について実験的な報告も皆無であることから、新しい光トラッピング法の開発に向けた基盤技術の確立が急務となっている。

## 2. 研究の目的

本研究は、半径方向に偏光したレーザー光で、かつその断面における強度分布が二重リング状であるような高次径偏光ビーム発生法の開発を行う。また、光ケージ特性に代表される径偏光ビームが持つ集光特性について、さらなる理論的・実験的な検証を行う。これらを通じて、高次径偏光レーザー光が有する特異な集光特性を用いた新しい光トラッピング手法の実現に向けた基盤技術の確立を目指すものである。

## 3. 研究の方法

### (1) Nd:YAG レーザー共振器からの高次径偏光ビームの直接発生：

これまでの研究により、自己クローニング技術による同心円構造のフォトニック結晶ミラーをレーザー共振器の共振器ミラーとすることで、径偏光での選択的なレーザー発振が可能である[図 1(a)参照]。しかしながら、従来のフォトニック結晶ミラーでは、径偏光の選択的な反射が可能となるが、発振横モードはレーザー共振器内にアパーチャーを挿入することによる基本モード発振か、高次のマルチ横モード発振となってしまう。そこで、フォトニック結晶ミラーに対して、リング状に低反射部を施すことで、強制的に高次の径偏光単一横モード発振を試みる[図 3(b)参照]。フォトニック結晶ミラー面上に設けた円環部が二重リング径偏光モードにおける中間の節の位置と一致する場合、二重リングモー

ドには無損失となるのに対し、それ以外のモードは大きな反射損失を受けるため、他のモードの発振が抑制できると考えられる。

本研究では、高次径偏光ビームの光トラッピングへの適用を目指し、波長 1064 nm で連続波(CW)発振可能な Nd:YAG レーザー共振器を構築する。レーザー発振における出力特性・発振ビームの評価を詳細に行うことで、二重リング状強度分布を有する高次径偏光ビームの安定かつ高効率な単一横モード発振が得られる最適条件(ミラーの曲率、共振器長、リング状の損失溝の半径)を明らかにする。光トラッピング用光源として用いるため、出力 1 W 程度での高次径偏光単一横モード発振を目指す。

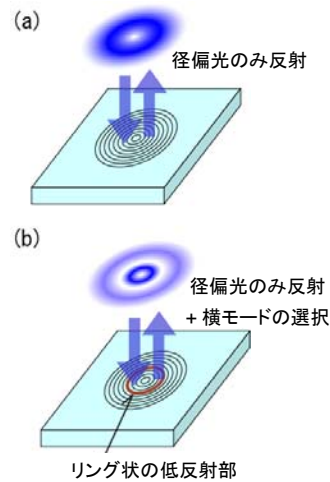


図 1. (a)従来のフォトニック結晶ミラー。  
(b)高次横モード発振のための構想

### (2) ZnSe 結晶を用いた第 2 高調波発生による軸方向電場の実験的検証：

径偏光ビームは強く集光した場合に、焦点において軸方向に振動する成分が強く発生する。しかしながら、この軸方向電場は、焦点近傍に局所的に発生する成分であるため、遠視野において簡便にその発生を検出することは困難であった。そこで、本研究では光の非線形過程に着目し、特に第 2 高調波発生における偏光依存性の利用を試みる。すなわち、径偏光ビーム集光により発生する軸方向電場に起因した第 2 高調波を遠方にて観測することを目指す。

具体的には、大きな非線形感受率を有する(100)ZnSe 結晶に、径偏光ビームおよびそれに直交した偏光を有する方位偏光ビームを強く集光し、発生した第 2 高調波を遠方にて観察する。方位偏光ビームは、軸方向電場が全く発生しないため、得られた第 2 高調波の強度分布について基本波の偏光による差異を検証し、径偏光集光による軸方向電場の寄与について考察する。

(3)高次径偏光ビームの集光特性の理論的検討：

高次径偏光ビームについて、さらにビーム断面において螺旋状の位相シフトを有する場合の集光特性について数値計算を行う。数値計算はベクトル回折理論に基づき、種々の偏光分布・強度分布を有するビームについて、集光レンズ直前に螺旋状位相シフトを付加し、強く集光した場合の焦点近傍における強度分布を計算する。特に、焦点における光強度がゼロとなり、その周りが光で囲まれる光ケージ特性について、螺旋状の位相シフトの効果を検討する。

#### 4. 研究成果

(1) Nd:YAG レーザー共振器からの高次径偏光ビームの直接発生：

径偏光のみを 90% 反射するフォトニック結晶ミラーに対して、直径 550  $\mu\text{m}$ 、幅 50  $\mu\text{m}$  のリング状低反射部をミラー中心に設けた。これを出力ミラーとした Nd:YAG レーザー共振器から、二重リング状強度分布を有する径偏光ビームの直接発生に成功した[図 2(a)]. 発生したビームの強度分布に対するフィッティングおよびビーム品質測定結果から、2 次の径偏光単一横モード発振であることが確認された。

また、高次の径偏光ビームがラゲール・ガウス型の強度分布と伝播特性を有することに着目し、レーザー共振器の構成についてさらなる検討を行った。その結果、レーザー共振器内にレンズを挿入し、その位置を調整するだけで、3-5 重のリング状強度分布を有する 3 次から 5 次までの高次径偏光ビームについて選択的な発振が可能であることを示した[図 2(b)-(d)].

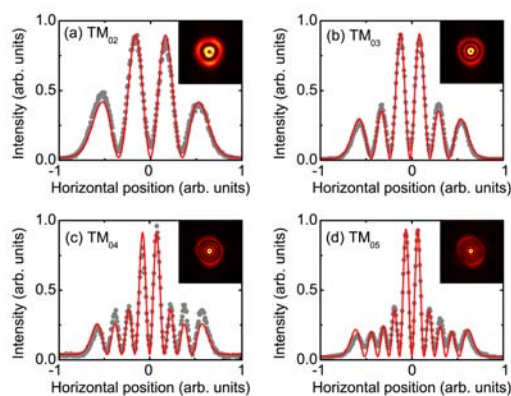


図 2.高次径偏光ビームの直接発生。(a)-(d)は、それぞれ本研究で発生に成功した 2 次から 5 次の次数を有する高次モードの強度プロファイルおよび横断面強度分布。

本研究で得られた高次モードビームは、いずれも理論的な強度分布や伝播特性とよく一致することを確認し、これまでは理論的予

測に留まっていた高次径偏光ビームの実証に初めて成功した結果といえる。

(2) ZnSe 結晶を用いた第 2 高調波発生による軸方向電場の実験的検証：

連続波における出力 1 W、波長 1064 nm の径偏光ビームおよび方位偏光ビームを開口数 0.5 の非球面レンズにより ZnSe 結晶の (100)面に垂直に集光した。ZnSe 結晶では位相整合条件は満たすことが出来ないため、基本波の焦点が結晶表面にある場合のみ、波長 532 nm の第 2 高調波発生を確認した。発生した第 2 高調波をレンズにより平行にし、ビームプロファイラによりその強度分布を測定した。その結果、径偏光を基本波とした場合、発生した第 2 高調波はドーナツ状に近い強度分布[図 3(a)]であったのに対し、方位偏光を基本波とした場合は、強度が弱く 4 つのスポット状の強度分布[図 3(b)]を有する第 2 高調波が発生した。ZnSe 結晶中に誘起される非線形分極は、 $P_x = E_y E_z$ ,  $P_y = E_z E_x$ ,  $P_z = E_x E_y$  の 3 種類である。つまり、径偏光を基本波とした場合、焦点に軸方向電場( $E_z$ )が存在することで、 $P_x, P_y$ 成分を誘起可能であるのに対し、方位偏光では  $E_z = 0$  となるため、 $P_z$ 成分のみが誘起される。誘起される非線形分極が異なることで、遠方における第 2 高調波の強度分布に差異が生じたと考えられる。すなわち、本結果により、径偏光集光により焦点に生ずる軸方向電場の存在を遠方にて観測できたことを示している。

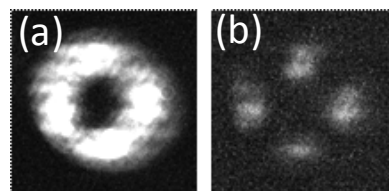


図 3 (100)ZnSe 結晶から発生した第 2 高調波の強度分布。それぞれ、(a)径偏光、(b)方位偏光を基本波とした場合を示す。

(3)高次径偏光ビームの集光特性の理論的検討：

レンズの開口数が 1.2 の水浸対物レンズを想定した強い集光条件において、二重リング径偏光ビームに螺旋状の位相分布を付加した場合について数値計算を行った。入射ビーム径を変化させることで、焦点において光ケージが発生する条件を見出した。この光ケージは、通常の二重リング径偏光による光ケージと比べ、焦点から半径方向に対して 47% 小さな空間を形成することが予測された。これにより、焦点近傍に存在する微粒子に対しては、さらに小さな領域への閉じ込めが可能であると思われ、光トラッピングに対して極めて有効な特性であることが期待される。

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 9 件)

1. Y. Kozawa and S. Sato, "Demonstration and selection of a single-transverse higher-order-mode beam with radial polarization," J. Opt. Soc. Am. A **27**, 399-403 (2009) 査読有
2. A. Ohtsu, Y. Kozawa, and S. Sato, "Calculation of second-harmonic wave pattern generated by focused cylindrical vector beams," Appl. Phys. B **98**, 851-855 (2009) 査読有
3. Y. Kozawa and S. Sato, "Dark-spot formation by vector beams," Opt. Lett. **33**, 2326-2328 (2008) 査読有
4. Y. Kozawa and S. Sato, "Single higher-order transverse mode operation of a radially polarized Nd:YAG laser using an annularly reflectivity-modulated photonic crystal coupler," Opt. Lett. **33**, 2278-2280 (2008) 査読有

[学会発表] (計 10 件)

1. Yuichi Kozawa, "The effect of the longitudinal electric field of a radially polarized laser beam for second harmonic generation" Advanced Solid-State Photonics, 平成 22 年 2 月 1 日, サンディエゴ(米国)
2. 小澤祐市, "軸対称偏光レーザービームを用いたZnSe(100)からの第 2 高調波発生" 応用物理学会学術講演会, 平成 21 年 9 月 9 日, 富山市
3. Yuichi Kozawa, "Selective generation of radially polarized Nd:YAG laser beams of higher-order transverse mode" Conference on Laser and Electro-Optics, 平成 21 年 6 月 4 日, バルチモア (米国)
4. Yuichi Kozawa, "Optical trapping efficiency measured for dielectric particles by using cylindrical vector beams" Optical Trapping Applications, 平成 21 年 4 月 28 日, バンクーバー(カナダ)
5. 小澤祐市, "高次径偏光ビームの選択的単一横モード発振" 応用物理学関係連合講演会, 平成 21 年 4 月 1 日, つくば市
6. 小澤祐市, "軸対称偏光ビームによるダークスポット形成", 応用物理学会学術講演会, 平成 20 年 9 月 4 日, 春日井市
7. 小澤祐市, "フォトニック結晶ミラーを用いた高次径偏光単一横モード発振" 応用物理学会学術講演会, 平成 20 年 9 月 3 日, 春日井市

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称: レーザー共振器  
発明者: 佐藤俊一, 小澤祐市  
権利者: 東北大学  
種類: 特許権  
番号: 2008-148917  
出願年月日: 2008 年 6 月 6 日  
国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
取得年月日:  
国内外の別:

[その他]

特に無し

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小澤 祐市(YUICHI KOZAWA)

東北大学・多元物質科学研究所・助教

研究者番号: 90509126

(2) 研究分担者

( )

研究者番号:

(3) 連携研究者

( )

研究者番号: