

「先端光源を駆使した光科学・光技術の融合展開」
平成 20 年度採択研究代表者

佐藤 俊一

東北大学多元物質科学研究所・教授

ベクトルビームの光科学とナノイメージング

§ 1. 研究実施の概要

本研究は、光ビームの性質を表す重要なパラメータである偏光、位相、強度分布に注目し、これらが総括的に制御された光ビームをベクトルビームとして捉え、その振る舞いを理論および実験の両面から詳細に調べることによって、新規な特性を明らかにし、それらを生かした新しい応用研究の萌芽を見出すことを目的としている。また、応用展開のひとつとして期待されているナノイメージングに対し、ベクトルビームの優れた特性を生かした方法論の確立とその具体的な実施も目指している。

本研究の開始年度である平成 20 年度には、まず、ベクトル回折理論から導かれる強度分布に対する積分形式の解についての考察、熱効果を用いた Nd:YAG レーザーからのベクトルビームの発生法の開発、Ybドープダブルクラッド光ファイバーを用いた径偏光ビームの増幅実験を行なった。また、ナノイメージング実現のための、光源を含めたシステム整備を行った。

本年度は、理論的に予測されているいくつかのベクトルビームの発生を実現するとともに、ベクトルビームの特徴のひとつである微小スポット形成に関する研究を中心に研究を進めた。また、ベクトルビームのナノイメージングへの応用研究を進め、空間分解能の向上した顕微鏡イメージを取得することができた。

今後は、ベクトルビームの集光特性の実験的検討と理論との比較、半導体レーザーベース光源の高機能化・ベクトル化、ベクトルビームの新しい応用の開拓、ベクトルビームによるナノイメージングなどを推進していく予定である。

§ 2. 研究実施体制

(1)「東北大学 I」グループ

① 研究分担グループ長:佐藤 俊一 (東北大学、教授)

② 研究項目

- 基本ベクトルビームの開発
- 高次ベクトルビーム発生と集光特性検証
- ベクトルビーム評価とナノイメージング検証

(2)「東北大学Ⅱ」グループ

① 研究分担グループ長:横山 弘之 (東北大学、教授)

② 研究項目

- 波長、パルス幅可変ベクトルビーム開発

(3)「生理学研究所」グループ

① 研究分担グループ長:根本 知己 (生理学研究所、教授)

② 研究項目

- バイオナノイメージングの検証、超分子複合体の配向、機能可視化

(4)「北海道大学」グループ

① 研究分担グループ長:根本 知己 (北海道大学、教授)

② 研究項目

- バイオナノイメージングの検証、超分子複合体の配向、機能可視化

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する。)

円筒対称な偏光分布を持つ光ビームは、ベクトル波動方程式の解として得られるが、考える座標系や対称性などによって複数の解が存在する。1990年代に Bessel-Gaussian および Laguerre-Gaussian ベクトルビームが理論的に見出され、最近では、Modified Bessel-Gaussian ベクトルビームも報告されている。いずれの場合にも、最低次の横モードはドーナツ型の強度分布を持つ径偏光および方位偏光ビームであり、実験的にも報告されているが、高次の横モードは複雑な強度と偏光分布を持ち、レーザー共振器からの直接発生の報告は極めて少ない。本研究グループは、いくつかの高次横モードベクトルビームの発振に成功した。

まず、円環状の低反射領域を持つ偏光選択性を持つフォトニック結晶ミラーを用いて、複数のリング構造からなる Laguerre-Gaussian ベクトルビーム発生を確認した。ここでは、既に報告している2重リング構造を持つベクトルビーム発生と同じミラーを用いているが、共振器設計を変えることにより、5次までの Laguerre-Gaussian ベクトルビームを得ることができた。図1は3次と4次のビームの強度および偏光分布の例である。このような高次横モードビームは、本研究者が既に報告しているように、従来の光ビームに比べ、より小さなスポット径が得られることが期待されている。(Y. Kozawa and S. Sato, J. Opt. Soc. Am. A, **27**, 399 (2010))

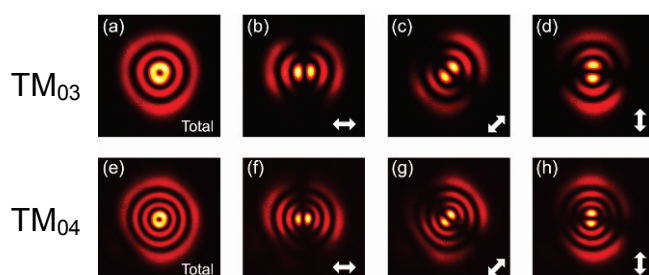


図1 発生した3次および4次の多重リング状 Laguerre-Gaussian ベクトルビームの強度（左列）および偏光分布（右側3列）。

次に、偏光方向が方位角方向で回転する高次横モードの Laguerre-Gaussian ベクトルビームと、Bessel-Gaussian ベクトルビームの発生について述べる。いずれの場合も、予測される光ビームは光軸上での強度がゼロになることから、実験においては、共振器ミラーのひとつに中心に低反射領域を持つミラーを使用している。図2に示すように、強度分布はリング型であるが、偏光が方位角方向に回転していることがわかる。同様にして、花びら状の強度分布を持つ6次と7次の Bessel-Gaussian ベクトルビームの発生も確認された。

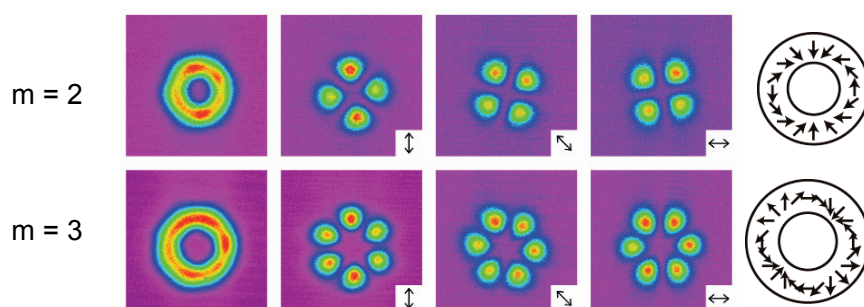


図2 発生した2次および3次の偏光回転型の Laguerre-Gaussian ベクトルビームの強度（左列）および偏光分布（内側3列）。右列は偏光分布の模式図。

小さなスポット径は円環状の径偏光ビームによっても得られることが期待されている。本研究では、複屈折性結晶を用いる第2高調波発生過程における角度位相整合条件を利用することによって、極めて幅の狭い円環状径偏光ビームの発生を確認した。c軸カットのBBO結晶に方位偏光のチタンサファイアレーザー光を照射すると、図3(a)のように、ほぼ6回対称性を持つ円環状の第2高調波が観測された。基本波が径偏光の場合は、(b)のように予測通り円環状ビームの発生は観測されなかった。(c)は発生した第2高調波の偏光と位相分布の模式図であり、強度を含めた3つの光パラメータの分布がよく制御されていることがわかる。(S. Sato and Y. Kozawa, Opt. Lett., 34, 3166 (2009))

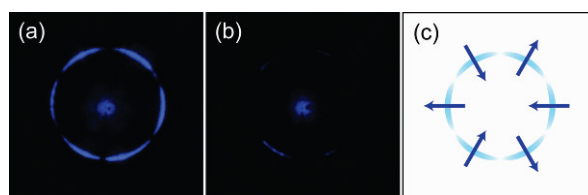


図3 発生した第2高調波の強度分布。(a)および(b)は基本波がそれぞれ方位および径偏光の場合。(c)は(a)の偏光と位相分布の模式図。

本研究グループでは、ベクトルビームを基本波とした場合、使用する複屈折性結晶への入射角に応じて、発生する第2高調波のパターンが大きく変化することを実験的に確認している。本年は、そのパターンを計算によって求め、実験結果の妥当性を確認した。計算においては、従来個別に行われていた手法を統合し、ベクトルビームの焦点での電場分布、非線形分極分布および遠視野での第2高調波の分布を異なる方法で個別に求めた。(A. Ohtsu, Y. Kozawa, and S. Sato, Appl. Phys. B, 98, 851 (2010))

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

● 論文詳細情報

- 1) W. Tomosugi, T. Matsuda, T. Tani, I. Kotera, K. Saito, K. Horikawa, T. Nemoto, and Ta Nagai, "An ultramarine fluorescent protein with high photostability and pH insensitivity", Nature Methods, 6, 351-353 (2009), doi:10.1038/nmeth.1317.
- 2) Y. Takatsuru, M. Yoshitomo, T. Nemoto, K. Eto, J. Nabekura, "Maternal separation decreases the stability of mushroom spines in adult mice somatosensory cortex", Brain Res., 1294, 45-51 (2009), doi: 10.1016/j.brainres.2009.07.092.
- 3) Y. Takatsuru, D. Fukumoto, M. Yoshitomo, T. Nemoto, H. Tsukada, J. Nabekura, "Neuronal circuit remodeling in the contralateral cortical hemisphere during functional recovery from cerebral infarction", J. Neurosci., 29, 10081-6 (2009), doi: 10.1523/JNEUROSCI.1638-09.2009.
- 4) S. Sato and Y. Kozawa, "Radially polarized annular beam generated through a second-harmonic-generation process", Optics Letters, 34(20), 3166-3168 (2009), doi:10.1364/OL.34.003166.
- 5) N. Matsuda, H. Lu, Y. Fukata, J. Noritake, H. Gao, S. Mukherjee, T. Nemoto, M. Fukata, M. Poo, "Differential Activity-Dependent Secretion of Brain-Derived Neurotrophic Factor from Axon and Dendrite", J Neurosci. 29(45), 14185-98. (2009), doi: 10.1523/JNEUROSCI.1863-09.2009.
- 6) E. Ohta, T. Itoh, T. Nemoto, J. Kumagai, S. B.H. Ko, K. Ishibashi, M. Ohno, K. Uchida, A. Ohta, E. Sohara, S. Uchida S. Sasaki, T. Rai, "Pancreas-specific aquaporin 12 null

- mice showed increased susceptibility to caerulein-induced acute pancreatitis”, *Am J Physiol Cell Physiol*, 297(6):C1368–78. (2009), doi: 10.1152/ajpcell.00117.2009.
- 7) Y. Ebisuno, K. Katagiri, T. Katakai, Y. Ueda, T. Nemoto, H. Inada, J. Nabekura, T. Okada, R. Kannagi, T. Tanaka, M. Miyasaka, N. Hogg, T. Kinashi “Rap1 controls lymphocyte adhesion cascade and interstitial migration within lymph nodes in a RAPL-dependent and -independent manner. ”, *Blood*, 115 (4), 804–814 (2010), doi: 10.1182/blood-2009-03-211979.
 - 8) A. Sato, K. Kono, K. Saito, K. Sato, and H. Yokoyama, “A high-peak-power UV picosecond light pulse source based on a gain-switched 1.55 μ m laser diode and its application for time-resolved spectroscopy of blue-violet materials,” *Optics Express*, 18 (3), 2522–2527 (2010), doi: 10.1364/OE.18.002522.
 - 9) A. Ohtsu, Y. Kozawa, and S. Sato, “Calculation of second-harmonic wave pattern generated by focused cylindrical vector beams”, *Appl. Phys. B*, 98 (4), 851–855 (2010), doi: 10.1007/s00340-009-3833-0.
 - 10) 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 (3), 399–403, (2010), doi:10.1364/JOSAA.27.000399

(4-2) 知財出願

- ① 平成21年度特許出願件数(国内2件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内3件)