

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とともに、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。平成 21 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し、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。

本年度は、ナノイメージングのためのベクトルビームの最適化、分解能の検討と生体細胞への適用を行い、実用性を持った新しいナノイメージング法として有用であることを実証した。また、リング状の強度分布を持つビームの集光特性を計算で求め、従来法よりもさらに小さな 2 種類のスポット(ブライต์およびダーク)が形成可能であることを見出した。さらに、光トラッピングへの応用展開を行い、理論と実験との比較検討を行った。

今後も、引き続き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)「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

(文中の引用番号等は(4-1)に対応する)

本研究は「ベクトルビームの光科学とナノイメージング」の題目の下で行っている。電場は本来ベクトル量であるので、電場の偏光方向がビーム全体で同じとしたスカラービームには無い、新しく電磁波本来の機能をベクトルビームは有していると、我々は期待して研究を進めている。本研究ではベクトルビームの優れた機能を探るとともに、その応用研究を進めることを目指している。本年度の成果として、ベクトルビームをナノイメージングリングへ適用することによって従来のレーザー走査型顕微鏡の空間分解能を大幅に向上できることを明らかにしたことを述べる。次に、リング状の強度分布を持ったベクトルビームの集光特性を計算で求め、より小さなスポットが得られることから、次世代のナノイメージングへの可能性を見出したことを紹介する。さらに、光トラッピングへの応用例について述べる。

#### 3.1 ベクトルビームを用いたナノイメージング

2007年に我々は、Laguerre-Gauss 型の強度分布を持つ純粋な径偏光ビームの集光特性をベクトル回折積分に従って計算し、Laguerre 多項式の次数が大きいほど小さなスポットが得られることを、明らかにしていた(Y. Kozawa and S. Sato, J. Opt. Soc. Am. A **24**, 1793 (2007))。例えば6重リングの強度分布をもつ径偏光ビームをNAが1のレンズで集光した場合、中央のスポット径は約 $0.38\lambda$ となり、これはRayleighやAbbeの分解能より大幅に小さくなることを示している。この結果を基に、液晶素子を用いて6重リング構造を持つ径偏光ビームを形成し、これを共焦点型レーザー顕微鏡に導入してイメージングの実験を行った。液晶素子の設計と動作確認は東北大学多元研グループが、イメージの取得と解析は北大グループが担当した。使用したレーザー光の波長は473nm、対物レンズのNAは1.2である。図1に示すように、ベクトルビームを使用することによって、直径173nmの蛍光ビーズのひとつひとつが明瞭に判別できることがわかる。つまり、200nm以下の空間分解能が得られていることを示している。従来の共焦点顕微鏡では、分解能を上げるために、短い波長のレーザー光や大きな開口数の対物レンズを用いても分解能は

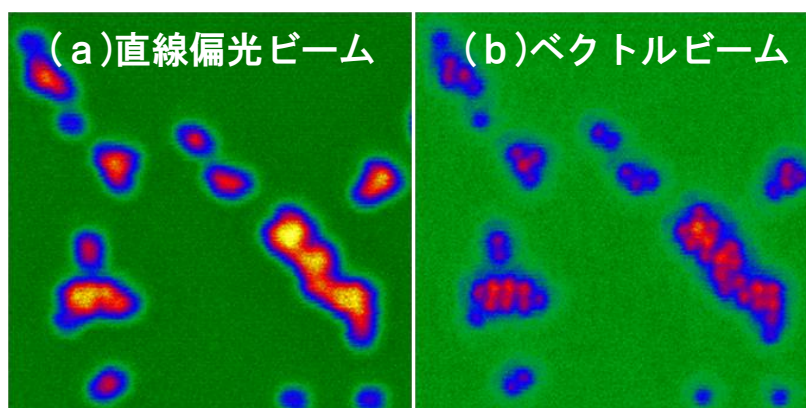


図1 ベクトルビームを用いた直径173nmの蛍光ビーズのイメージングの例。(a)従来の直線偏光ビーム、(b)ベクトルビーム。

200nm を超えることは大変難しかったが、本方法では市販の共焦点顕微鏡をそのまま利用し、照射するレーザービームをベクトル化しただけである。Laguerre-Gauss 型径偏光ビームを集光すると、複数のサイドローブが発生し、イメージングに影響を与えるが、図 1 から分かるように、共焦点ピンホールを小さくすることによって、サイドローブの影響をほぼ除去できる。実験で得られた蛍光ビームの発光強度分布は、計算値と良い一致をしていることも分かっており、ベクトルビームの効果が明確に表現されていると考えられる。図 2 に示すように、このベクトルビームは 2 光子顕微鏡の光源としても有効であり、サイドローブの影響もほとんど見られない。微小管の大きさは数 10nm と小さいため、ベクトルビームの使用による空間分解能の向上の効果は明確に見られないものの、像全体が滑らかとなっていることが見て取れる。

この他、東北大未来科学センターグループが開発した半導体レーザーをベースとした高性能光源を用いたイメージングの実験も、北大グループで並行して進めており、EYFP を発現させたマウスの脳神経細胞蛍光像を得ている。従来の固体レーザーを用いた場合に比べ、背景ノイズが格段に減少しており、細かい構造が鮮明な 3 次元画像を得ることが出来ている。今後ベクトル化することによって、さらに空間分解能の向上したイメージングを目指す。

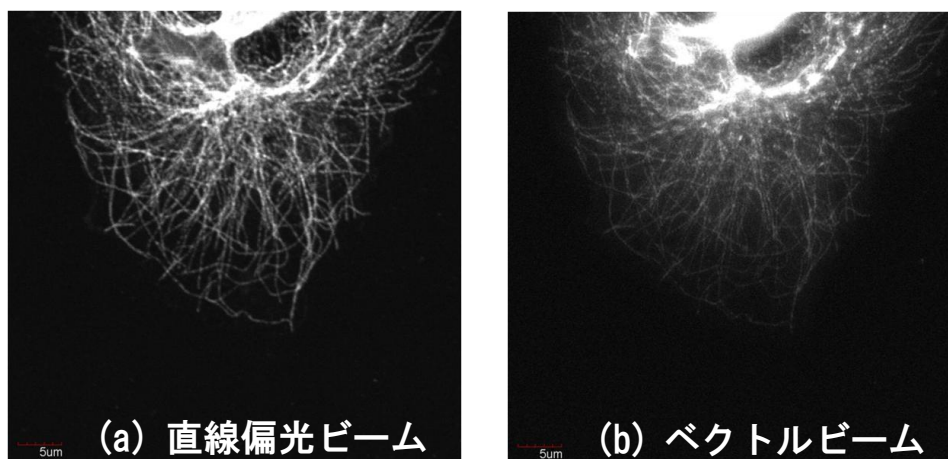


図 2 COS-7 細胞内の微小管の 2 光子励起蛍光像。(a)直線偏光ビーム、(b)ベクトルビーム。レーザー波長は 780nm。

### 3.2 リング状ベクトルビームの集光特性

次に、ベクトルビームの強度分布が幅の狭い単一のリング状である場合について、焦点付近での強度分布の計算をベクトル回折積分に基づいて行った。単一リング状の強度分布を持つ径偏光ビームは、既にも実験的に得られており(S. Sato and Y. Kozawa, *Opt. Lett.* **34**, 3166 (2009))、ここではその集光特性を探る目的で行った。使用した BBO 結晶の非線形感受率のテンソル成分によって、実験で得られた径偏光ビームは 6 回対称性を持った強度分布となっている。計算ではこの 6 回対称性を仮定して行い、さらにはらせん状位相分布に対する変化を調べた。図 3 はレンズの開口数が 0.95、リング幅がその半径の 40 分の 1 と仮定した時の結果を示しているが、ここで  $m$  はらせん状位相分布の回転数 (Topological charge) である。 $m=0$  の場合には、6 回対称性を反

映した強度分布が得られているが、 $m$  が大きくなるにつれて、光軸に近い位置での光強度が強くなり、 $m$  が 3 の時には光軸上で明るいスポットを形成することがわかる。このときの光軸付近のスポット径は軸方向電場成分で  $0.386\lambda$ 、全強度でも  $0.405\lambda$  となっており、このNAでの理論的な極限值  $0.379\lambda$  に非常に近いことが分かる。強度分布が  $m$  に依存する現象は、6 回対称な強度分布の起源となる位相分布と、らせん状位相分布との総和効果として理解することが出来る。つまり、 $m$  が 3 の時にビームの位相回転成分のひとつがゼロとなるため、光軸上にピークを持つ強度分布が得られる。同時に位相が 6 回転する成分も発生するので、これに起因した回転対称な強度分布も並存する。ここで注目すべきは、図の右側に示した光軸を含む面内での強度分布が、光軸方向(図では水平方向)に細長く、波長の 8 倍以上にも達することである。こういったベクトルビームに特有と思われる集光特性は、回転対称性をもたないリング状偏光ビームで、より顕著に見出すことができ、さらに小さなスポット径を持つスポットおよびダークスポットが得られることが分かっている。これらの特性は、今後のナノイメージングにとって重要な役割を果たすと考えられる。

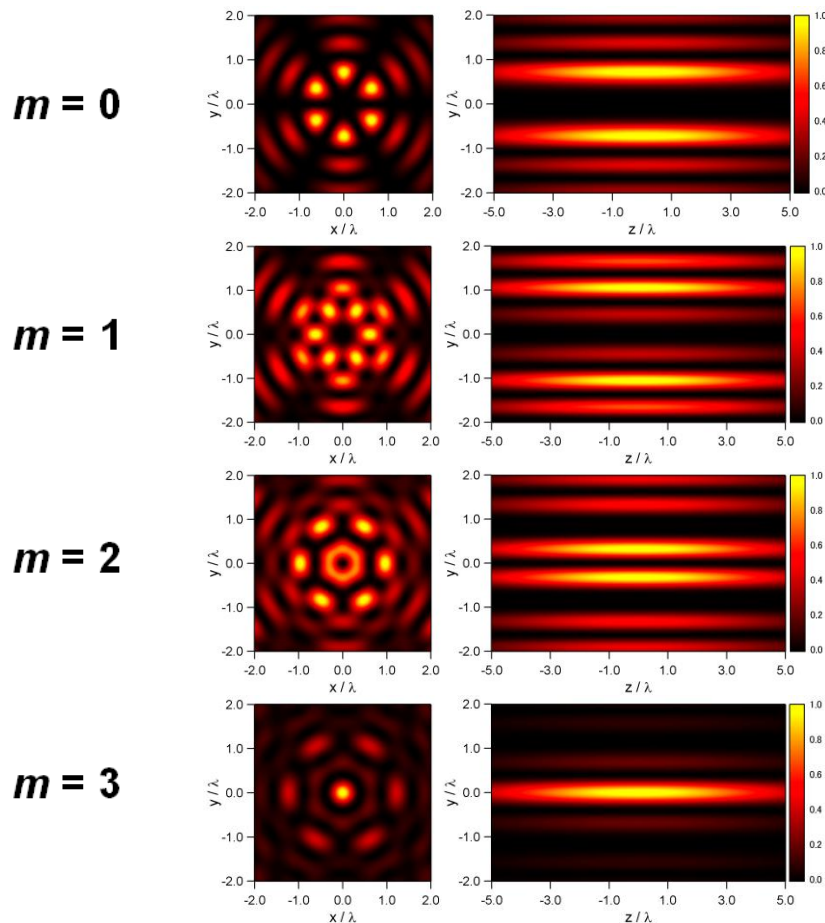


図3 6回対称性の強度分布を持つリング状偏光ビームの集光特性。 $m$ はらせん状位相分布の回転数を表す。

### 3.3 ベクトルビームを用いた光トラッピング

最後にベクトルビームの光トラッピングへの応用について述べる。ビームを光軸に垂直な平面に集光した場合、径偏光および方位偏光ビームの光線は、それぞれ全て p 偏光および s 偏光に対応する。このことから、物体表面での反射率が異なるため光トラッピングに対しても異なる効果が得られることを我々は計算によって示していた(H. Kawauchi, Y. Kozawa and S. Sato, *Opt. Lett.* **32**, 1839 (2007))。このことを実験的に検証するために、必要な数ワットの出力を持つベクトルビームを開発し、光学顕微鏡を用いて、微小粒子の光トラッピングを行い、トラップ力の測定を行った。その結果、光軸方向の力は径偏光ビームのほうが大きいこと、半径方向の力は方位偏光ビームのほうが大きいことがわかり、理論と良い一致を示すことが出来た(Y. Kozawa and S. Sato, *Opt. Express* **18**, 10828 (2010))。

## §4. 成果発表等

### (4-1) 原著論文発表

#### ● 論文詳細情報

- (1) Akihiko Ito, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, “Generation of hollow scalar and vector beams using a spot-defect mirror”, *Journal of Optical Society of America A*, Vol. 27, No. 9, pp.2072-2077 (2010)(DOI:10.1364/JOSAA.27.002072)
- (2) Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, “Optical trapping of micrometer-sized dielectric particles by cylindrical vector beams”, *Optics Express*, Vol. 18, No. 10, pp.10828-10833 (2010) (DOI:10.1364/OE.18.010828)
- (3) W. C. Shen, C. W. Cheng, M. C. Yang, Y. Kozawa, S. Sato, “Fabrication of novel structures on silicon with femtosecond laser pulses”, *Journal of Laser Micro/nanoengineering*, Vol. 5, No. 3, pp.229-232 (2010) (DOI: 10.2961/jlmn.2010.03.0009)

### (4-2) 知財出願

- ① 平成22年度特許出願件数(国内 0 件、国際 1件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 1 件、国際 1件)