

「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

H23 年度 実績報告

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. 研究実施体制

(1)「東北大学Ⅰ」グループ

① 研究代表者:佐藤 俊一 (東北大学多元物質科学研究所、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の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 主たる共同研究者:横山 弘之 (東北大学未来科学技術共同研究センター、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)「北海道東北大学」グループ

① 主たる共同研究者:根本山 知己 (北海道大学電子科学研究所、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

§ 2. 研究実施内容

(文中の引用番号等は(3-1)に対応する)

本研究では、光ビームの重要なパラメータである、強度、位相、偏光を精密に制御したベクトルビームの特性を実験および計算的手法の両面から明らかにするとともに、微小スポット形成能や強い軸方向電場を利用したナノイメージングの実現を目的としている。

これまでに、様々なベクトルビーム発生法を開発し、安定、高出力、高機能なベクトルビームを実現するとともに、特に強く集光した場合の焦点付近での強度や、位相、偏光分布の計算を行い、従来のスカラービームには無い新しい特性を明らかにしてきた。また、ナノイメージングへ応用する上で適切な光源や光ビーム制御法の開発を並行して進めてきた。

平成 23 年度は、究極的な微小スポット形成に適切であると考えられる高次横モードを持つベクトルビームの発生法の開発およびその集光特性の探求を中心に進め、同時にベクトルビームを用いたナノイメージングの実現を図った。

まず、光ビームの横モード制御法として、損失および利得の空間分布を制御する方法の有効性を確認する実験を行った。ふたつの光ファイバーからの励起光を薄板状のレーザー媒質に照射することによって形成した利得分布に応じて、様々な高次横モードの光ビームが発振することを確認した⁵⁾。損失を制御する方法では、点欠陥ミラーを用いて極めて高品質なドーナツモードビームの発振に成功した⁶⁾。次に、瞳面に障害物がある場合の Laguerre および Bessel-Gaussian ビームの集光特性を計算によって求めたところ、スカラービームに比べ自己治療効果が高いことを見出した^{2,3)}。これは、ベクトルビームが強度だけでなく偏光も円筒対称性を有していることに起因しているためであると推察される。さらに Laguerre-Gaussian および Bessel-Gaussian ビームに対して、スカラービームとベクトルビームを表す式を変形することによって、高次のモードも含めてお互いに変換可能であることを証明した⁷⁾。式の変換においては、軌道角運動量を表すらせん状位相とスピン各運動量を表す円偏光との関連式が重要な役割を果たすことがわかった。

ナノイメージングに関しては、ベクトルビームの中でも微小スポットを形成することが計算によって示されている多重リング径偏光ビームを、液晶デバイスを用いて作製し、共焦点レーザー顕微鏡に適用した。その結果、直線偏光に比べ約 30% 小さなスポットが形成され、横方向の空間分解も同様に向上することを実証した¹⁾。図 1 は生体試料から得られた画像であり、より微細な構造が明瞭に判別できることが分かる。デジタルデコンボリューションによる空間分解能の向上に関しても検討を進めている。

本研究では、多光子効果バイオイメージングのための光源として、半導体レーザーベースの波長 1030 nm のピコ秒パルス光源の開発を進めているが、ピークパワーが 10-20 kW で平均パワーが 2 W の試作光源を 2 光子顕微鏡に適用した。その結果、図 2 のように 4 週令の H-line マウスにおいて、世界で初めて、海馬 CA1 ニューロンの *in vivo* 観察に成功した。即ち、脳表から 1 mm を越える深部到達性を実現し、その結果、大脳新皮質全層 (I-VI)、及び白質、白板の観察が可能となった。これは、光源のパワー、ビームの安定性と 1 μ m という波長に負うところが大きい

現在さらなる深部観測を実現するための光源の改良に取り組んでいる。

半導体量子構造のナノイメージングについては、昨年度誘導放出による脱励起効果 (STED 効果) を確認したのに続き、今年度は中空レーザービームの STED 効果により、図3に示すように顕微光学系による通常イメージングに比して約30%の分解能の向上 (超解像効果) を実現した。

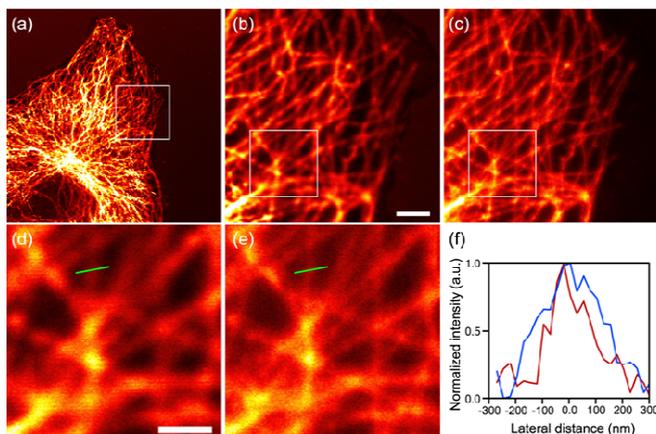


図1 AlexaFluor488 で染色した COS-7 の微小管の共焦点顕微鏡像。(a)全体像。(b), (d)直線偏光ビーム、(c), (e)6重リング径偏光ビーム。(f) (d)および(e)での緑の線に沿った強度プロファイル

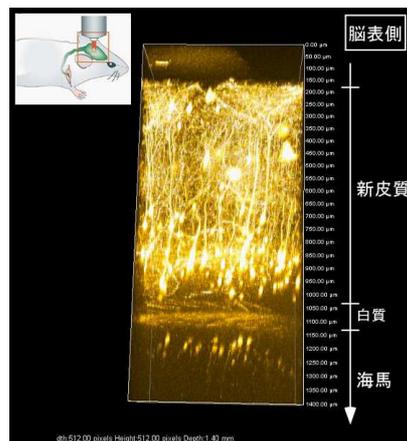


図2 麻醉下の生体マウス脳の *in vivo* イメージング。今までは観察不可能な深部に存在する海馬 CA1 ニューロンが世界で初めて *in vivo* 観察できた。

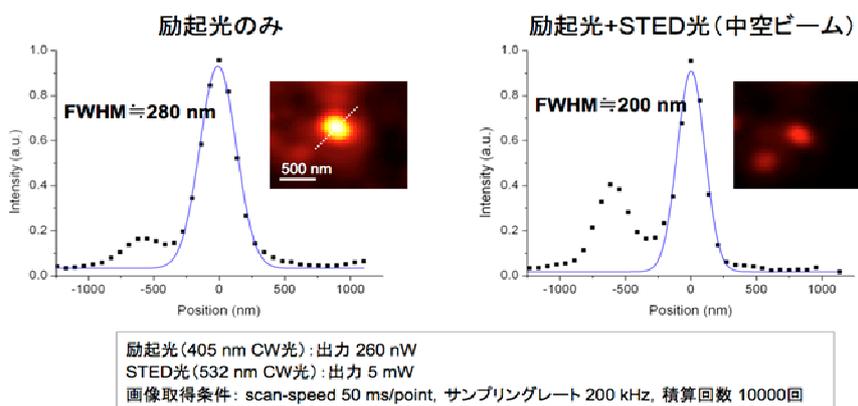


図3 中空ビーム脱励起光 (STED 光) の照射による青色発光 InGaN 単一量子井戸 (SQW) 構造試料内の発光パターンの超解像効果の実測例。

§3. 成果発表等

(3-1) 原著論文発表

- 論文詳細情報

1. Y. Kozawa, T. Hibi, A. Sato, H. Horanai, M. Kurihara, N. Hashimoto, H. Yokoyama, T. Nemoto, and S. Sato, "Lateral resolution enhancement of laser scanning microscopy by a higher-order radially polarized mode beam," *Optics Express*, **19**(17), 15947-15954 (2011) (DOI: 10.1364/OE.19.015947).
2. S. Vyas, Y. Kozawa, S. Sato, "Self-healing of tightly focused scalar and vector Bessel–Gauss beams at the focal plane", *Journal of Optical Society of America A*, **28**(5), 837-843 (2011) (DOI: 10.1364/JOSAA.28.000837)
3. S. Vyas, M. Niwa, Y. Kozawa, S. Sato, "Diffractive properties of obstructed vector Laguerre–Gaussian beam under tight focusing condition", *Journal of Optical Society of America A*, **28**(7), 1387-1394 (2011) (DOI: 10.1364/JOSAA.28.001387)
4. M. Sawada, N. Kaneko, H. Inada, H. Wake, Y. Kato, Y. Yanagawa, K. Kobayashi, T. Nemoto, J. Nabekura, and K. Sawamoto, "Sensory input regulates spatial and subtype-specific patterns of neuronal turnover in the adult olfactory bulb", *Journal of Neuroscience*, **31**(32), 11587-11596 (2011) (DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0614-11.2011)
5. K. Shimohira, Y. Kozawa, S. Sato, "Transverse mode control by manipulating gain distribution in a Yb:YAG ceramic thin disk", *Optics Letters*, **36**(21), 4137-4139 (2011) (DOI: 10.1364/OL.36.004137)
6. K. Kano, Y. Kozawa, S. Sato, "Generation of a purely single transverseMode vortex beam from a He-Ne laser cavity with a spot-defect mirror", *International Journal of Optics*, **2012**, 359141 (2012) (DOI: 10.1155/2012/359141)
7. P. Senthilkumaran, J. Masajada, S. Sato, "Interferometry with vortices", *International Journal of Optics*, **2012**, 517591 (2012) (DOI:

10.1155/2012/517591)

(3-2) 知財出願

① 平成 23 年度特許出願件数(国内 0 件)

② CREST 研究期間累積件数(国内 3 件)