

「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

H24 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

(文中に番号がある場合は(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、優れた微小スポット形成能や電場のベクトル性などを生かしたナノイメージングの実現を目的としている。

平成 24 年度は、継続して行っている高品質・高機能ベクトルビームの開発に加え、ベクトルビームの微小スポット形成機構や合波したベクトルビームの焦点での強度、位相、偏光特性の解析を進めるとともに、ベクトルビームを用いたナノイメージングの高機能化を図った。また、新規の研究課題として進めている、脳深部 *in vivo* イメージングのための半導体レーザーをベースとしたピコ秒レーザー光源の改良を行った。

まず、ベクトルビームが形成する微小スポット特性について検討を行った。ベクトルビームの代表例である径偏光ビームを強く集光すると、焦点付近に強い軸方向電場が発生し、アッペの分解能よりも小さな光スポットが形成されることが知られていた。最も小さなスポットは理想的な円環ビームによって形成されると予測されているが、我々のグループでは多重リング構造を持つ高次ラゲールガウスビームも、ほぼ同様の微小スポットを形成することを数値シミュレーションによって明らかにし、ナノイメージングで実証してきた。しかし、強度分布が全く異なる二つのビームが同じような強度分布を持つ機構はこれまで明らかでなかった。我々は、ベッセル関数とラゲール多項式との類似性に着目してラゲールガウスビームの表式を数学的に検討し、高次のラゲール多項式がひとつの円環とベッセル関数とに分離され、焦点では、それぞれが小さなスポットと大きな直径を持つ円環状の強度分布を形成することで、おおよそ説明できることを見出した<sup>1)</sup>。さらにこれらふたつの振幅分布が、光軸付近では位相が反転していることに起因して、中心スポットの幅をより小さくする協同的な現象が生じていることを見出した。この成果は、高次ラゲールガウス型径偏光ビームが、超解像顕微鏡用レーザー光源として実用性が高いことを裏付けるものと考えられる。

次に、ベクトルビームの新たな機能や特性を探るため、ふたつの同種のベクトルビームを合波した場合<sup>2)</sup>と、ふたつの異種のベクトルビームを合波した場合<sup>4)</sup>の焦点での強度分布や伝搬特性を数値シミュレーションによって検討した。らせん状の位相分布を付加した同種のベクトルビームを合波すると、光波は軸対称な偏光、位相、強度分布を持ち、これらは伝搬とともに光軸を中心に回転することを見出した(図 1)。強度分布が円筒対称性を失うのは、不均一な偏光分布によって生じる干渉の結果で

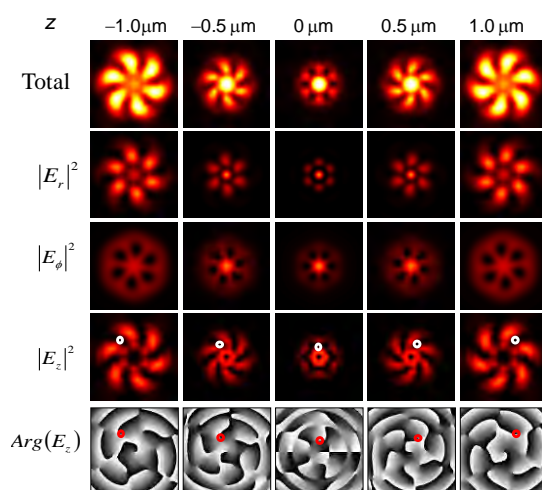


図1 らせん状位相分布を持つふたつの径偏光ビームを合波した場合の焦点前後での強度、偏光および位相分布の変化の例。

ある。また、伝播に伴う偏光、位相、強度分布の回転は、それぞれの光波が持つ異なる Gouy 位相に起因しており、焦点付近で顕著に現れる。異種のベクトルビームを合波した場合、偏光の特異点として知られる c 点 (c-point)、l 線 (l-line) と v 点 (v-point) の発生とその位置および伝播に伴う移動と生成消滅について Stokes 場をもとに検討し、一般的な法則を見出した。特に興味深い現象として、符号の異なるふたつの c 点が合流すると v 点に転換することが挙げられる。ここで見出された現象は、ベクトルビームによって初めて生み出される特徴のひとつであり、偏光の特異点光学の発展にも大きく貢献するものと期待される。

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、共焦点レーザー顕微鏡に続いて、2 光子吸収顕微鏡に適用した。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。さらに、ベクトルビームの特徴の一つである、縦方向(光軸方向)へ長く伸びた分布を持つことを利用して、時間的に試料が光軸方向に動いてもピントの合った画像を得ることに成功した。この方法は、焦点深度が長い新しいタイプの 2 光子顕微鏡であると言える。次に、波長と強度分布の両方が異なるふたつの励起光ビームを用いた STED 顕微鏡を構築し、新たにマトリクス状の量子井戸構造パターンを持つ InGaN 単一量子井戸構造の試料を作製し、その観察を行った。その結果、図2に示すように、誘導放出による強い消光効果の再確認と、ドーナツ状の強度分布を持つ STED 光ビームにより 50% に近い超解像効果を確認することができた。

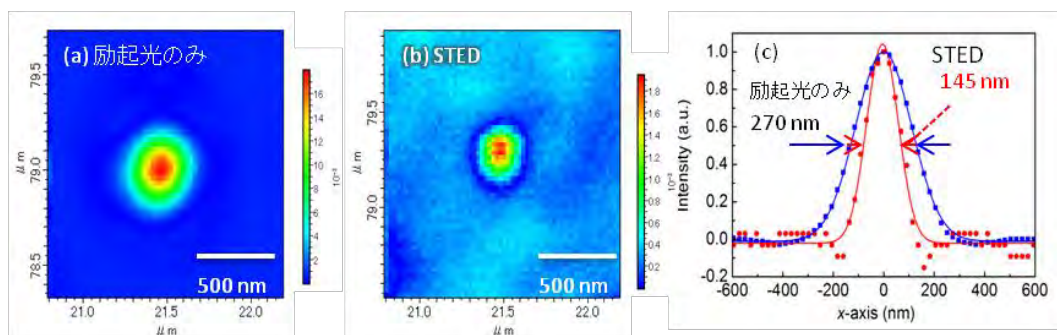


図2 InGaN 単一量子井戸構造の発光分布 (a)励起光のみの場合の発光イメージ、(b)STED 顕微鏡による発光イメージ、(c)強度プロファイルの比較

本研究では、半導体レーザーの特徴を生かした新しい光源開発の一環として、波長 1 ミクロン帯のピコ秒パルス光源の多光子効果バイオイメージングへの適用を図っており、世界で初めて、海馬 CA1 ニューロンの *in vivo* 観察に成功し、その成果を論文として公表した<sup>3)</sup>。さらに海馬全体の観察を目指して、ピコ秒パルス発生の方法や増幅方法を総合的に見直して安定性や出力向上を図っている。特に、ピコ秒光パルスを生成するレーザー発振器を、電気パルス駆動の利得スイッチング(GS)動作の LD で置き換えるために、新規デバイス試作およびその高速変調モジュール実装に注力して研究を進めており、現在、生体試料での *in vivo* 観察実験に適用しているところである。

### §3. 成果発表等

#### (3-1) 原著論文発表

- 論文詳細情報

1. Yuichi Kozawa and Shunichi Sato, “Focusing of higher-order radially polarized Laguerre-Gaussian beam”, *Journal of Optical Society of America A*, **29**(11), 2439-2443 (2012) (DOI: 10.1364/JOSAA.29.002439)
2. Sunil Vyas Yuichi Kozawa, and Shunichi Sato, “Twisted longitudinally polarized field in the focal region”, *Applied Physics B*, **110**(1), 7-14 (2013) (DOI: 10.1007/s00340-012-5239-7)
3. Ryosuke Kawakami, Kazuaki Sawada, Aya Sato, Terumasa Hibi, Yuichi Kozawa, Shunichi Sato, Hiroyuki Yokoyama, and Tomomi Nemoto, “Visualizing hippocampal neurons with in vivo two-photon microscopy using a 1030 nm picosecond pulse laser”, *Scientific Reports*, **3**, 1014 (2013) (DOI: 10.1038/srep01014)
4. Sunil Vyas, Yuichi Kozawa, and Shunichi Sato, “Polarization singularities in superposition of vector beams”, *Optics Express*, **21**(7), 8972-8986 (2013) (DOI: 10.1364/OE.21.008972)

#### (3-2) 知財出願

- ① 平成 24 年度特許出願件数(国内 2 件)
- ② CREST 研究期間累積件数(国内 5 件)