

「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

光ビームの性質を現すパラメータとして偏光、位相、強度分布を挙げることができる。しかしながら、レーザービームとして研究・利用されてきたのは、ほとんどが空間的に均一な偏光分布とガウス型の強度分布を持つレーザービームであった。本研究では、偏光、位相、強度分布が空間的に不均一であるビームをベクトルビームとして捉え、その性質を詳しく調べることによって、光ビームが本来有している高いポテンシャルを探求すると共に、その特徴を生かした新しい応用分野の開拓を目的としている。そのために、安定で高品質なベクトルビームの発生方法の開発を進め、ベクトルビームの機能を有効に応用できると考えられるナノイメージングへの応用技術開発に取り組んでいる。

平成 20 年度は、まず、らせん状位相分布(トポロジカルチャージ)を持つベクトルビームの集光特性を明らかにするために、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考察した。ベッセル関数の特性を考慮することで、強く集光した場合でも完全に中空になるようなトポロジカルチャージを厳密に求めることができた。さらに、この方法が、円および直線偏光のラグールガウス型およびエルミートガウス型ビームについても適用できることを指摘し、具体的なトポロジカルチャージを求めることができた。

次に、より簡便なベクトルビームの発生方法を目指して、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方法の開発と、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。前者では、Nd:YAG ロッドの熱複屈折と熱レンズの両者を用いることにより、共振器ミラー以外の光学素子を用いずに、単一横モードで、出力が数 10W の径偏光および方位偏光ビームを選択的に発振できることを示した。M<sup>2</sup> の値も理論値に非常に近く、高いビーム品質であることが実証された。また、Yb ドープ光ファイバーを用いた増幅実験では、高次横モードビームである径偏光ビームが、偏光および強度分布を維持したまま増幅できることを実証し、従来技術によるカスケード的な増幅によって、飛躍な高出力化が可能であることを示すことができた。

次年度は、得られたレーザービームを用いて焦点付近での強度や偏光分布などの計測を行い、理論計算との比較を行なってベクトルビームの特性を探ると共に、ナノイメージング実現のための

パルス状のベクトルビームおよび顕微鏡光学系の開発・整備を重点的に進め、ベクトルビームを利用した初めての画像を得ることを目指す。

## 2. 研究実施内容

近年、光軸上の強度がゼロとなる中空のビームを利用した原子レンズや超解像顕微鏡などの研究が活発に行われている。光軸上で位相や偏光の特異点を持つビームは、近軸近似では光軸上での強度がゼロとなる。しかし、直線偏光 Laguerre-Gaussian ビームや径偏光ビームを強く集光した場合には、光軸上で強度がゼロとならないことも知られている。また、螺旋状位相シフトを持つ径偏光ビームも中空ビームとならないことが実験および計算によって示されている。我々は、螺旋状位相シフトを持つ光ビームが中空ビームとなるトポロジカルチャージの値を解析的に求めた<sup>1)</sup>。任意のトポロジカルチャージを持つ径偏光および方位偏光ビームを集光した場合の電場は、ベクトル回折理論に基づいて求めることができる。その結果、方位方向に強度の変化が無い、すなわち光軸に関して円筒対称なビームの場合には、Bessel 関数を含んだ積分の形になることを見出した。0 次の Bessel 関数だけが、変数がゼロの場合に値もゼロとなることを考慮すると、光軸上で必ず強度がゼロとなる中空ビームの条件を求めることができる。径偏光の場合、トポロジカルチャージ  $m$  が 0 および  $\pm 1$  の時は中空ビームとならないことが示され (図 1(a))、これまでの実験事実と一致する結果が得られた。方位偏光の場合は、 $m = \pm 1$  以外の時に中空ビームとなることが示された (図 1(b))。特に  $m = 0$  の時、電場の表式中の積分には 1 次の Bessel 関数のみが含まれており、光軸付近の暗い領域の幅が最も狭くなることが予測された。さらに、円偏光 Laguerre-Gaussian ビームが径偏光および方位偏光ビームの重ね合わせで表現できることを利用して、中空ビームとなる  $m$  の値を求めたところ、全軌道角運動量が 0 および  $\pm 1$  の時は中空ビームとならないことが示された。ハイブリッドモードビームや直線偏光 Laguerre および Hermite Gaussian ビームに対しても同様に議論できることが分かった。

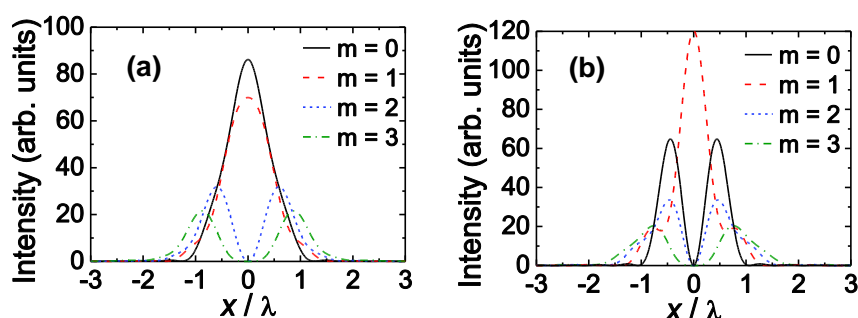


図1 トポロジカルチャージ  $m$  を持つ(a)径偏光および(b)方位偏光ビームの焦点での強度分布の計算結果

ビーム断面内において放射状に偏光が分布する径偏光ビームは、材料加工や穴あけ等の材料加工プロセス用光源として注目されている。我々は、十分な出力と高品質な径偏光レーザービームを得るため、Yb ドープダブルクラッドファイバーを用いることで径偏光ビームの増幅が可能であることを実証した<sup>2)</sup>。種光として用いる径偏光ビームは、 $c$  軸カット

Nd:YVO<sub>4</sub> レーザー共振器から発生させた。図 2 に示すように、径偏光ビームおよび半導体レーザー（波長 975 nm）による励起ビームを Yb ドープ光ファイバーに導入し、ファイバーからの出射ビームを観測した。波長 1066 nm のレーザー光に対して、径偏光ビームに相当する LP<sub>11</sub> モードが伝播するように、コア径 15 μm の光ファイバーを使用している。図 3 に、種光（上段）および半導体レーザー光を光ファイバーに導入して増幅した場合（下段）の強度分布を示す。図 3 より、増幅後も出射ビームの偏光および強度分布が維持され、径偏光であることが確認された。入射励起光の出力が 2.8 W の場合、種光の出力 100 mW に対して 1.1 W の出力が得られた。また、種光出力を大きくすることで、ASE の効果を低減できることが分かった。

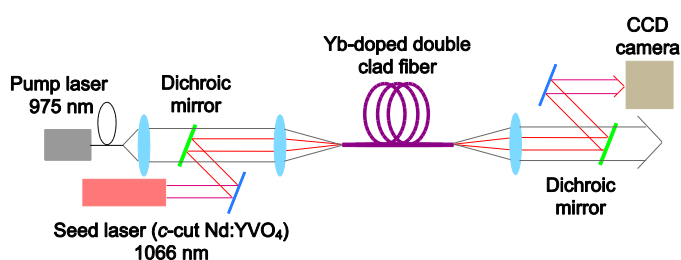


図 2 Yb ドープ光ファイバーを用いた径偏光ビーム増幅の装置の概念

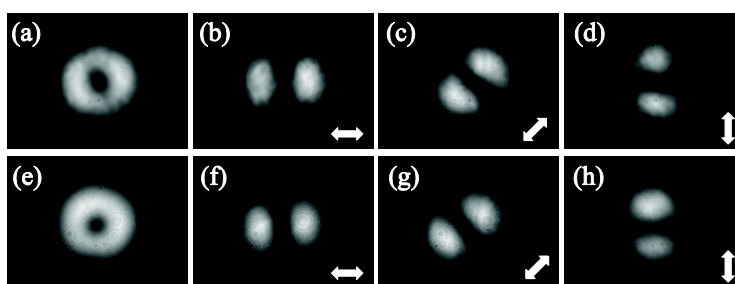


図 3 入射した径偏光ビーム（上段）と増幅されたビーム（下段）の強度分布。(a)および(e)：全強度分布、(b)-(d)および(f)-(h)：直線偏光板透過後の強度分布。矢印は直線偏光板の向きを示す。

次に、我々はレーザー媒質の熱複屈折に着目し、極めて簡便な共振器構成で径および方位偏光ビームを選択的に発振できることを実証した<sup>3)</sup>。レーザー媒質として、半導体レーザー側面励起の Nd:YAG レーザーロッドを使用した。図 4 に示すように、用いたレーザー共振器は 2 枚の平面ミラーからなる極めて簡単な構成となっている。Nd:YAG ロッドは複数の半導体レーザーによって側面から励起されており、熱複屈折および熱レンズ効果が発生する。熱レンズ効果により、Nd:YAG ロッドは凸レンズとして機能する。レーザーの閾値付近では、出力ビームはランダム偏光のガウス型ビームであるが、ポンプ光強度を上げていくと方位偏光ビームとなった後、発振が停止する。さらに強度を上げると、径偏光ビーム、ランダム偏光、方位偏光ビームと変化し、再び発振が停止する。径および方位偏光ビームで発振したときのビームの強度分布の例を図 5 に示す。最大出力は共に約 40W であ

り、用いた励起光源の出力を考慮すると、単一横モードの出力としては十分な値であると  
 考えられる。また、共振器長の変化に伴う偏光の変化は、Nd:YAG ロッドの熱複屈折性と  
 熱レンズ効果を考慮した光共振器の安定性ダイアグラムに基づいて説明することを示した。  
 すなわち、まず、ポンプ光強度に応じて変化する熱レンズ効果のために、共振器は安定性  
 ダイアグラム上を直線的に移動することになる。また、熱複屈折によって常光線と異常光  
 線に対する屈折率が異なるため、径および方位偏光のみが安定になる領域が発生する。こ  
 のため、閾値付近では、共振器は径および方位偏光の両方が安定な領域にあり、ランダム  
 偏光であるが、ポンプ光強度の増加とともに常光線だけが安定になる領域に達し、方位偏  
 光となる。その後は不安定領域に入り、レーザー発振が一度停止した後、異常光線だけが  
 安定な領域に達して径偏光ビームとなる。さらにランダム偏光となった後、再び方位偏光  
 になる。この説明に基づけば、最も出力の大きな径偏光あるいは方位偏光ビームを得るた  
 めの共振器を容易に設計することができる。

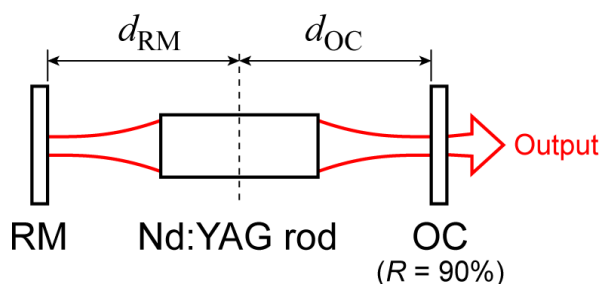


図4 熱効果を利用した Nd:YAG レーザー共振器の概念図

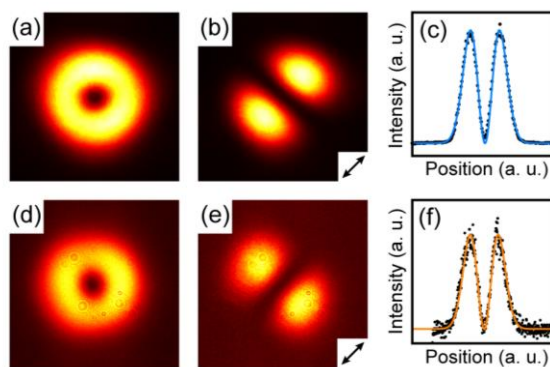


図5 発振したレーザー光の強度分布。上段：径偏光、下段：方位偏光。(a)と(d)：前強度  
 分布、(b)と(e)：直線偏光板透過後の強度分布、(c)と(f)：強度プロファイル。

ナノイメージングについては、研究推進のために必要な装置や条件等の精査、準備を中心  
 に行った。具体的には、まず、既製品の生物用正立型走査型レーザー共焦点顕微鏡をベースにし、  
 ベクトルビームを外部から導入可能とするような光学設計と外部レーザー導入光学系の導入を終  
 えた。蛍光検出には高感度検出器を採用することとした。また、蛍光タンパク質、量子ドット、蛍光  
 マイクロビーズの選定を行い、空間分解能の検証プロトコルを完成させた。特に蛍光タンパク質に

においては、新たに FASTR 法、低温培養法などの先端的な遺伝子工学技術の導入に成功し、大腸菌による大量発現系を構築した。この蛍光タンパク質に関する研究成果は、多光子励起過程を用いた新規多重蛍光イメージング法への展開が期待できる。最後に、現有の Ti:Sapphire レーザー光をベクトルビームに変換して光学顕微鏡へ導入し、その適応可能性を確認した。

### 3. 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 (自然科学研究機構 生理学研究所、研究教育職員(准教授))

#### ②研究項目

超分子複合体の配向、機能可視化

### 4. 研究成果の発表等

#### (1) 論文発表 (原著論文)

1. Shunichi Sato and Yuichi Kozawa, “Hollow vortex beams,” J. Opt. Soc. Am. A 26 (1), 142-146 (2009).
2. Tatsuya Chubachi, Yuichi Kozawa and Shunichi Sato, “Amplification of a radially polarized laser beam using an Yb-doped double-clad fiber,” Opt. Lett. 34 (6), 716-718 (2009).
3. Akihiko Ito, Yuichi Kozawa and Shunichi Sato, “Selective oscillation of radially polarized laser beam induced by thermal birefringence and lensing,” J. Opt. Soc. Am. B 26 (4), 708-712 (2009).

#### (2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 1 件 (CREST 研究期間累積件数 : 1 件)