

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：26402

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25790068

研究課題名(和文)円錐鏡を用いた空間モード多重化通信用高次ヘリカルビームの生成

研究課題名(英文)Generation of higher-order helical beam for spatial mode multiplexing by using conical reflector

研究代表者

小林 弘和 (Kobayashi, Hirokazu)

高知工科大学・工学部・講師

研究者番号：60622446

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：螺旋形状の波面を持つヘリカルビームは、同一の周波数帯域を用いて光通信を多重化する空間モード多重化通信への応用で注目を集めている。本研究では、円錐面上の鏡による反射を利用してヘリカルビームの生成とモード変換を実装する新たな手法の提案と実験的な検証を行なった。まず円錐鏡を利用することで非常に広い波長域の可視光に対してヘリカルビームの生成を確認した。さらに円錐鏡に多重反射させることで高次のヘリカルビームの生成することにも成功した。また、通常は直接観測することのできない光の偏光状態を、ヘリカルビームの強度分布として可視化する新たな偏光測定手法を考案し、実験検証を行なった。

研究成果の概要(英文)：Optical beam with helically-shaped wavefront, called as helical beam, has attracted growing interest for application of spatial mode multiplexing, which can increase communication capacity in single frequency. In this study, we proposed and experimentally confirmed generation and mode conversion of the helical beam by using conically-shaped reflector. First, we confirmed generation of the helical beam in broad wavelength region of visible light. Moreover, it has become possible to generate the higher-order helical mode by multiple reflections on the conical reflector. Also, we proposed and experimentally demonstrated a new procedure to visualize optical polarization state as the intensity distribution of the helical beam.

研究分野：量子光学、非線形光学、光計測、光通信

キーワード：光制御 波面制御 光渦 空間モード多重化通信 円錐鏡 弱測定

1. 研究開始当初の背景

(1) ヘリカルビームと空間モード多重化伝送

ドーナツ型の強度分布とらせん状の等位相面(波面)を持つヘリカルビームは位相のねじれ具合(一重らせん、二重らせん…)に対応して多数の空間モード(モード番号 $l=1,2, \dots$ )を持つ。これを $l$ 次のヘリカルビームと呼ぶ。

ヘリカルビームは光による微粒子操作やレーザ加工技術など様々な分野での応用が期待されているが、特に将来必要とされる超大容量通信技術への応用が注目を集めている。これは空間モード $l$ の異なる光に異なるデータを載せることで、同一の周波数帯域を用いて多重化を可能とする技術で、「空間モード多重化通信」と呼ばれる。この手法には空間モード $l$ が大きな高次のヘリカルモードの生成が不可欠である。またパルス化した光にデータを載せる場合には広い波長域でヘリカルモードを生成する手法が必要とされる。

(2) 円錐鏡を用いたヘリカルビームの生成

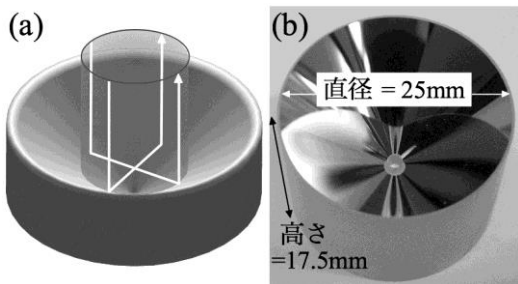


図 1. (a)円錐鏡面での反射の概念図と(b)実際に作製した円錐鏡

ヘリカルビームの生成やモード変換を行なうにはらせん形状となるように波面を制御する必要がある。レンズなどの一般的な波面制御素子は空間的に異なる光学距離を設けることで位相差を生み出し、波面を制御するが、この場合位相量は波長に依存するため、広い波長域で動作させることが難しく、空間的に不均一な構造が必要になるという問題点がある。

これに対して、我々は波長に依存しない位相量である幾何学的位相を利用してヘリカルモード変換を行なう光学素子を考案した。幾何学的位相は光の偏光や伝搬方向(波数ベクトル)など状態の変化に伴って生じる位相量である。図 1 に示した頂角 90 度の円錐面に鏡面加工を施した円錐鏡が考案したヘリカルモード変換素子である。図 1(a)に示すように、円錐鏡に入射した光は円錐面で 2 回反射されて元の方角へ戻るが、円錐面での反射方向、すなわち波数ベクトルの方向が中心からの方位角によって異なる。したがって入射光はすべての場所で同じ光学距離を伝搬し

て元の方角へ反射されるにもかかわらず、波数ベクトルの変化の違いによって場所ごとに異なる幾何学的位相を得る。円錐鏡は光学的ロスがなく、広い波長域で動作可能で、シンプルな構造であるため作製が容易という従来のヘリカルビーム生成法にはない特徴を備えている。また、入射光の偏光によって幾何学的位相の符号が異なり、左回りと右回り円偏光の場合には、モード $l$ をそれぞれ  $l+2$  と  $l-2$  に変換することができる。したがって、入射偏光によってヘリカルモード変換の符号を自由に選択することができる。

2. 研究の目的

本研究では、空間モード多重化通信の実現に向けて、円錐鏡を用いて高次のヘリカルビームを生成する小型で安価な光学システムを構築するとともに、ヘリカルビームの新たな応用先を開拓することを目的とする。

円錐鏡を用いたヘリカルビーム生成システムにおいては、まず広い波長域で通常のガウシアンビーム( $l=0$ )から $l=\pm 2$ のヘリカルビームへのモード変換を確認する。次に円錐鏡に多重反射させることで高次のヘリカルビームが生成されることを確認する。これにより、広い波長域で高次のヘリカルモードを生成できるシンプルで小型の光学システムの構築が可能であることを示して、空間モード多重化通信への応用を支える基盤技術とする。

さらにヘリカルビームの新たな応用先として、光の偏光状態の可視化に利用する。一般に光の偏光状態はポアンカレ球(赤道が直線偏光、極が円偏光)と呼ばれる球面上の一点として表わすことができる。しかし、これを直接的に観測することはこれまでできなかった。本研究では弱測定と呼ばれる量子測定の考え方を基にして、ポアンカレ球上の一点 $|\psi\rangle$ をステレオ射影した点 $\psi$ をヘリカルビームの断面強度分布における中心暗点の位置として可視化する新たな手法を提案し、原理検証を行なう[図 2 参照]。これにより、偏光状態の変化をヘリカルビームの暗点の位置の変化として直接的に可視化することが可能となる。

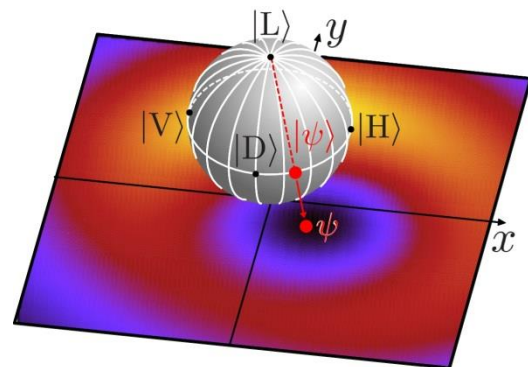


図 2. ポアンカレ球上の偏光状態のステレオ射影とヘリカルビームの暗点位置

### 3. 研究の方法

#### (1) ヘリカルビームの生成確認方法

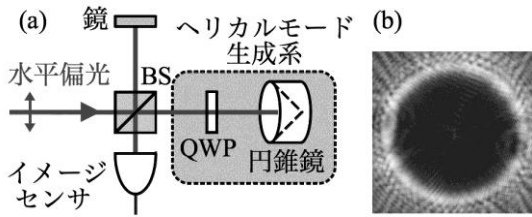


図 3. (a) ヘリカルビームの生成確認実験系 (b) 円錐鏡からの反射光強度分布

ヘリカルビーム生成の有無は図 3(a)に示したマイケルソン干渉計を用いて通常の光ビームと円錐鏡からの反射光の干渉縞が螺旋状になることから確認する。円錐鏡からの反射光の典型的な光強度分布を図 3(b)に示す。ビームスプリッタ(BS)で分波し、片方は通常の鏡、もう一方は円錐鏡で反射させる。円錐鏡の手前の1/4波長板(QWP)の角度を45度と135度のどちらにするかによって、円錐鏡への入射偏光が右回りと左回りの円偏光となるため、円錐鏡における+2次か-2次のモード変換を選択できる。また、円錐鏡面における多重反射による高次のヘリカルビームの生成も同様の実験系を用いて確認する。

#### (2) ヘリカルビームによる偏光状態観測

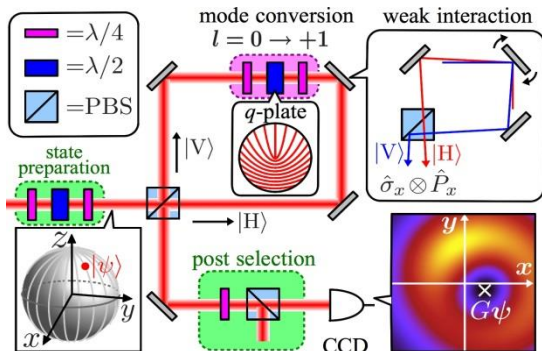


図 4. ヘリカルビームによる偏光状態可視化の実験系

ヘリカルビームを用いて偏光状態を直接的に可視化するために、図 4に示す偏光サンヤック干渉計を用いる。観測したい偏光状態を持った光ビームを干渉計に入射し、水平偏光|H>と垂直偏光|V>に分離する。干渉計内では軸対称偏光素子(q-plate)と呼ばれる光学素子と1/4波長板を用いて入射光をヘリカルビームに変換して、鏡の傾きにより水平偏光と垂直偏光の間に微小な光路差を設ける。干渉計の射出光に対して円偏光成分のみを CCDカメラで観測すると、偏光状態をヘリカルビームの暗点の位置として直接的に可視化することが可能になる。

### 4. 研究成果

#### (1) 円錐鏡を用いた広波長域のヘリカルビーム生成と高次ヘリカルビーム生成

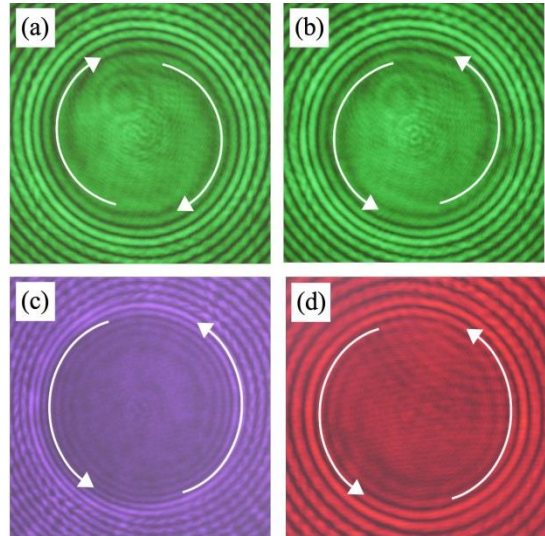


図 5. 円錐鏡からの反射光と通常の光波との干渉縞。(a) 532nmの右回り円偏光、(b) 532nm、(c)440nm、(d)633nmの左回り円偏光をそれぞれ入射したときの干渉縞。

図 1(b)に示した円錐鏡を用いて図 3(a)の干渉計を構築して干渉縞を観測した。光源として440nm、532nm、633nmの三種類の可視レーザー光を用いて各波長域で円錐鏡によるヘリカルビームの生成を確認した結果を図 5に示す。まず532nmにおいて、1/4波長板の角度を45度と135度にする事で、円錐鏡への入射偏光を右回りと左回りの円偏光とした際の干渉縞を図 5(a)と(b)に示す。それぞれ右回りと左回りの二重らせん干渉縞が確認できているため、 $l=\pm 2$ のヘリカルビームが入射偏光に応じて生成されていることが分かる。

次に円錐鏡面での多重反射による高次ヘリカルビームの生成を確認するために図 6(a)に示す実験系を構築した。光源として532nmのレーザー光を使用した。円錐鏡での反射光はBS2によって一部はBS1へと透過するが、一部は上方に反射されたあと鏡によってBS2に回帰して、その一部が円錐鏡に再び入射する。伝搬に伴う回折によりドーナツ型の光強度分布が広がっていくことを利用して、円錐鏡面で二回反射された光ビームのみを

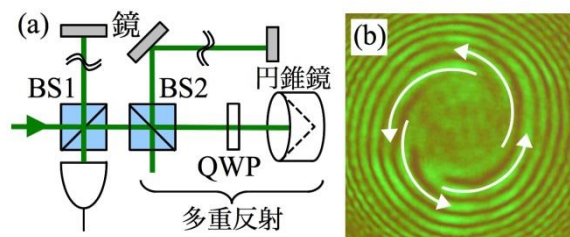


図 6. (a)円錐鏡面の多重反射を用いた高次ヘリカルビームの生成系と (b) 干渉縞

分離し、通常の光ビームとの干渉縞を観測した。円錐鏡への入射偏光を左回り円偏光としてときの結果を図 6(b)に示す。左回りの四重らせんの干渉縞が観測されているため、 $\ell=4$ の高次ヘリカルビームが生成されていることがわかった。入射偏光を右回りと円偏光とすれば $\ell=+4$ のヘリカルビームが生成される。以上の結果より、円錐鏡を用いることで440nm~633nm という広い波長域にわたってヘリカルビームが生成可能であり、多重反射させることで高次のヘリカルビームも生成できることが実証された。

## (2) ヘリカルビームを用いた偏光状態の可視化の実験結果

入射偏光を直線偏光としたときの結果を図 7 に示す。1/2 波長板の角度  $\theta/2$  を変化させることで入射の直線偏光の角度を回転させながら、最終的なヘリカルビームの強度分布を CCD カメラで観測した。ドーナツ型の光強度分布の内部にある強度最小の暗点の位置を白色の×印で示している。ポアンカレ球上の赤点は暗点の位置から推定された偏光状態をポアンカレ球上に描いた点である。青色の点線はポアンカレ球上の赤道であり、理論上はこの点線上に入射偏光状態がある。偏光状態がポアンカレ球上で赤道上を動くのに対して、ヘリカルビームの暗点の場所はビーム断面の原点を中心にして回転していることがわかる。これはポアンカレ球上の点のステレオ射影点の動きと一致する。

直線偏光状態だけではなく、一般的な楕円偏光状態に対しての測定結果を図 8 に示す。1/2 波長板と 1/4 波長板(角度  $\theta$ ) を組み合わせて楕円偏光状態を準備して、角度  $\theta$  を変化させながら観測すると、ポアンカレ球上での偏光状態の変化をステレオ射影した動きがヘリカルビームの暗点の動きによく対応していることが分かる。

さらに純粋な偏光状態を確率的に混合した部分偏光状態についても、ステレオ射影を二回施すことで測定可能であることも実験的に可能であることも示した。

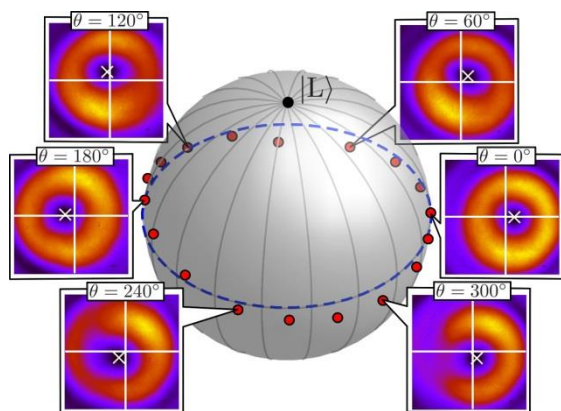


図 7. ポアンカレ球上の直線偏光状態とヘリカルビームの暗点の測定結果

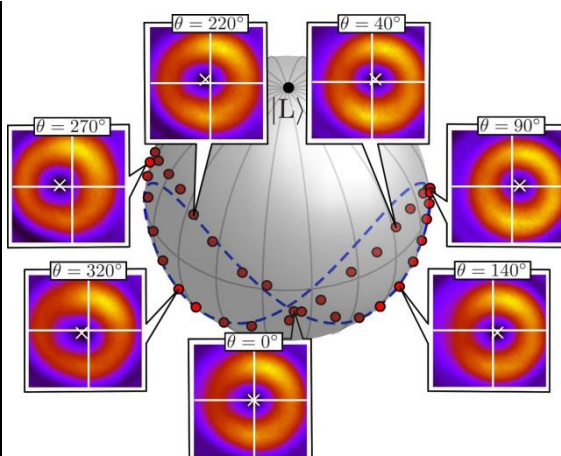


図 8. ポアンカレ球上の楕円偏光状態とヘリカルビームの暗点の位置の測定結果

以上の結果から、ポアンカレ球上の偏光状態をヘリカルビームの暗点の位置として直接的に可視化できることが実証された。測定精度に改善の余地はあるものの、理論的な表現だったポアンカレ球を直接可視化できる手法として非常に有用であると考えられる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① Hirokazu Kobayashi, Koji Nonaka, and Yutaka Shikano, “Stereographical visualization of a polarization state using weak measurements with an optical-vortex beam”, *Physical Review A*, 査読あり, vol. 89, 053816 (2014).

[学会発表] (計 11 件)

① 小林弘和, Yusuf Turek, Chang-Pu Sun, 鹿野豊, “光波の自由空間伝搬モードを測定系とした弱測定 of 定式化”, 日本物理学会春季大会, 早稲田大学(2015 年 3 月)

② Hirokazu Kobayashi and Yutaka Shikano, “Weak measurement formalism for paraxial wave optics”, International Workshop on Weak Value and Weak Measurement, 招待講演, Tokyo Institute of Technology, Japan (2015 年 3 月)

③ 坂本憲司郎, 小林弘和, 岩下克, “円錐鏡を用いた広波長域の光渦の生成”, 電気関係学会四国支部連合大会, 徳島大学(2014 年 8 月)

④ 小林弘和, 鹿野豊, “光渦ビームを用いた弱測定による偏光混合状態の直接測定”, 日本物理学会春季大会, 東海大学(2014 年 3 月)

⑤ Yutaka Shikano and Hirokazu Kobayashi, “Stereographical Visualization of Polarization State using Weak Measurement with Optical Vortex Beam”,

Interdisciplinary Workshop on Quantum Device, 招待講演, 国立情報学研究所(2014年3月)

⑥小林弘和, 鹿野豊, “光渦を用いた弱測定による偏光状態の可視化”, 基礎物理学研究所研究会 量子情報の新展開, 京都大学(2014年3月)

⑦Yutaka Shikano and Hirokazu Kobayashi, “Stereographical Tomography of Polarization State using Weak Measurement with Optical Vortex Beam”, FIRST International Symposium on Topological Quantum Technology, 東京大学(2014年1月)

⑧Yutaka Shikano and Hirokazu Kobayashi, “Stereographical Tomography of Polarization State using Weak Measurement with Optical Vortex Beam”, 量子情報 FIRST2013 全体会議, 東京大学(2013年12月)

⑨Hirokazu Kobayashi and Yutaka Shikano, “Direct observation of Poincare sphere using weak measurement with optical vortex beam”, Quantum Information Technology Symposium (QIT), 早稲田大学(2013年11月)

⑩Yutaka Shikano and Hirokazu Kobayashi, “光渦を使った量子トモグラフィ”, Symposium on New Frontiers of Quantum Photonic Network, 招待講演, 電気通信大学(2013年11月)

⑪小林弘和, 鹿野豊, 野中弘二, “光渦ビームを用いた弱測定による偏光状態の直接測定”, 日本物理学会秋季大会, 徳島大学(2013年9月)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 弘和 (KOBAYASHI, Hirokazu)  
高知工科大学・システム工学群・講師  
研究者番号: 60622446