

令和 2 年 6 月 23 日現在

機関番号：26402

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K14151

研究課題名(和文) 高次ラゲールガウスモードのGouy位相の可視化と光計測への応用

研究課題名(英文) Visualization of Gouy phase of higher order Laguerre Gauss mode and its application to optical measurement

研究代表者

小林 弘和 (Kobayashi, Hirokazu)

高知工科大学・システム工学群・准教授

研究者番号：60622446

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではラゲールガウス(LG)ビームの高次動径モードのGouy位相を伝搬に伴う強度分布の回転(Gouy回転)として可視化する実験を行なった。成果として、まず空間位相変調器の位相分布を最適化することで動径モード $p=10$ までを高精度に生成することに成功した。さらにGouy回転が動径モード $p$ に比例して増大することを実験的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

伝搬に伴い回転する強度分布を持った光ビームは微小粒子の光操作に応用可能である。またGouy位相に起因した強度分布の回転はGouy位相で誘起されるドップラーシフトとして理解することができる。したがって既存のドップラー速度計とは原理的に異なる速度計測が実現可能である。さらにGouy位相によるドップラーシフトは通常の線形ドップラーシフトとは符号が逆であるため、吸収分光などにおけるドップラー広がり低減する効果を持ち、分光測定やその他の光計測への応用が期待される。

研究成果の概要(英文)：We have studied about visualization of the Gouy phase for higher-order radial mode in Laguerre-Gaussian (LG) beam as the rotation of the intensity distribution with the propagation (Gouy rotation). As a result, we first optimize the phase distribution of the spatial light modulator (SLM), and then we have succeeded to generate the radial mode up to  $p=10$  with high accuracy. Furthermore, we experimentally demonstrated that the Gouy rotation can be increased in proportion to the radial mode  $p$ .

研究分野：光渦、非線形光学、量子光学

キーワード：グイ位相 光渦 動径モード 空間位相変調器

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

### (1). Gouy 位相

Gouy 位相は波が空間伝搬する際に普遍的に現れる位相量で、図 1(a) に示した平面波の波面 (図中の点線) からのズレとして現われる。ガウス関数型の断面強度分布を持った基本ガウシアンビーム  $LG_0^0$  の Gouy 位相は  $\phi_0(z) \equiv \tan^{-1}(z/z_R)$  [ $z_R$  はビーム径が  $\sqrt{2}$  倍になる距離 (レイリ長)] と表され、 $z_R$  が小さい場合、ビームスポット位置 ( $z = 0$ ) で位相が急峻に変化する [図 1(b)]. Gouy 位相は高い開口数の光学系やパルスレーザ生成、屈折率の高感度光計測など光波伝搬が関わる際に現われる非常に重要な光波パラメータである。

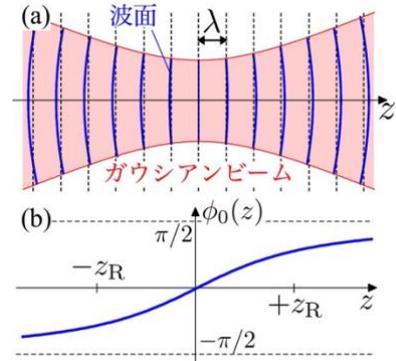


図 1. 基本ガウシアンビームの (a)波面と (b)Gouy 位相  $\phi_0(z)$

### (2). LG ビームの動径モード $p$ と方位角モード $l$

軌道角運動量を持つ光ビームであるラゲルガウス (LG) ビームは近年様々な分野で注目を集めており、空間モード分割多重通信や微粒子の回転操作 (光スパン)、量子情報・量子通信分野への応用が積極的に研究されている。近年では光波だけではなく X 線や電波、電子ビームなどでも LG ビームの応用が研究されている。

LG ビーム ( $LG_p^l$ ) は方位角モードを表わす整数  $l$  と動径モードを表わす整数  $p$  ( $\geq 0$ ) で特徴付けられる (図 2 参照)。ビーム断面の方各方向に  $2\pi l$  の位相分布を持ち、中心は位相特異点で強度の零点となる。  $|l| > 0$  のビームは波面が螺旋状となるため「光渦」とも呼ばれる。動径方向については  $(p+1)$  個の円環が存在し、隣り合う円環は位相差  $\pi$  を有する。また、LG ビームの Gouy 位相は  $(2p+l+1)\phi_0(z)$  と書け、同じレイリ長であっても高次 LG モードになると集光点付近でより急峻に位相変化が起こる。

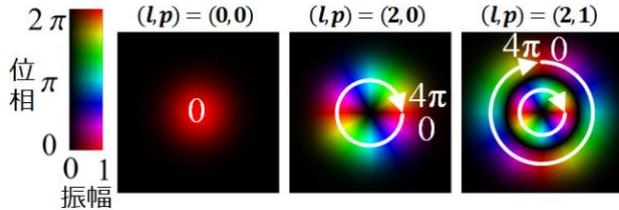


図 2. 動径モード  $p$ 、方位角モード  $l$  の LG ビーム  $LG_p^l$  のビーム断面における振幅分布と位相分布

本研究課題の根底にあるのは LG ビームの動径モード  $p$  の物理的な意味は何かという疑問である。方位角モード  $l$  については 1 光子の持つ軌道角運動量  $lh$  との物理的關係が明確であるが、動径モード  $p$  については離散化されたモードとしての物理的な意味やその有用性については未だに未解明な部分も多い。本研究では Gouy 位相との関係からこの問いにアプローチしていきたい。

## 2. 研究の目的

本研究では高次動径モードによる Gouy 位相を強度分布の回転 (Gouy 回転) で可視化し、その物理的な意味に迫るとともに、Gouy 位相で誘起されるドップラーシフトの観測及び光計測への応用を探ることを目的とする。これまで脚光を浴びてきた方位角モードではなく、未解明な部分が残る動径モードに注目し、Gouy 回転との関係から動径モードの物理的な意味とその有用性について探求する手法は申請者独自のものである。動径モードに対する理解が深まればすでに方位角モードを利用している光計測や量子工学の分野に大きく貢献できると考えている。また Gouy 位相によるドップラーシフトはこれまで実験的に観測された例がなく初の試みである。もし巨大な動径モードによる Gouy 位相のドップラーシフトが観測できれば、通常の線形位相によるドップラーシフトを集光点付近で打ち消すことができる。その場合、集光点付近ではドップラーシフトが起こらないため、原子集団に対するドップラーフリー分光への応用が可能ではないかと考えている。

## 3. 研究の方法

$LG_0^0$  モードと高次の方位角モード ( $|l| > 0$ ) を持つ LG ビームを重ね合わせると、ビーム断面内の位相差による干渉で位相特異点の場所が分裂する。特に  $|l| = 2$  の LG ビームとの重ね合わせを考えると、位相特異点のペアが原点に対して対称に現れるため、「光渦ダイポール」と呼ばれる。重ね合わせた二つの光ビームの位相差は強度分布の回転となって現れるため、伝搬に伴う Gouy 位相の違いから図 3 に示すように伝搬するに従って光渦ダイポールも回転する。この時、伝搬に伴う強度分布の回転角は  $\theta(z) = (2p + |l|)z / (lz_R)$  となる。 $\theta(z)$  は方位角モード  $l$  で大きくすることはできないが、動径モード  $p$  を大きくすれば回転角が増大する。したがって、Gouy 回転量は動径モードの性質をよく反映した物理的な現象となっている。

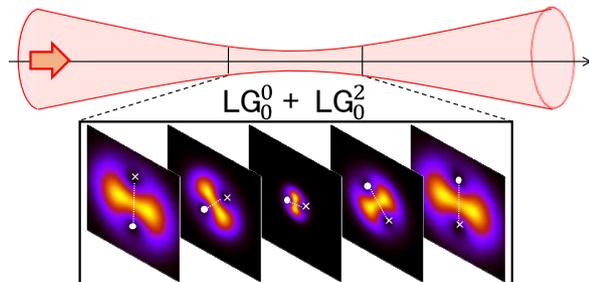


図 3. 高次 LG モードの伝搬に伴う強度分布の回転 (・×は位相特異点)

この時、伝搬に伴う強度分布の回転角は  $\theta(z) = (2p + |l|)z / (lz_R)$  となる。 $\theta(z)$  は方位角モード  $l$  で大きくすることはできないが、動径モード  $p$  を大きくすれば回転角が増大する。したがって、Gouy 回転量は動径モードの性質をよく反映した物理的な現象となっている。

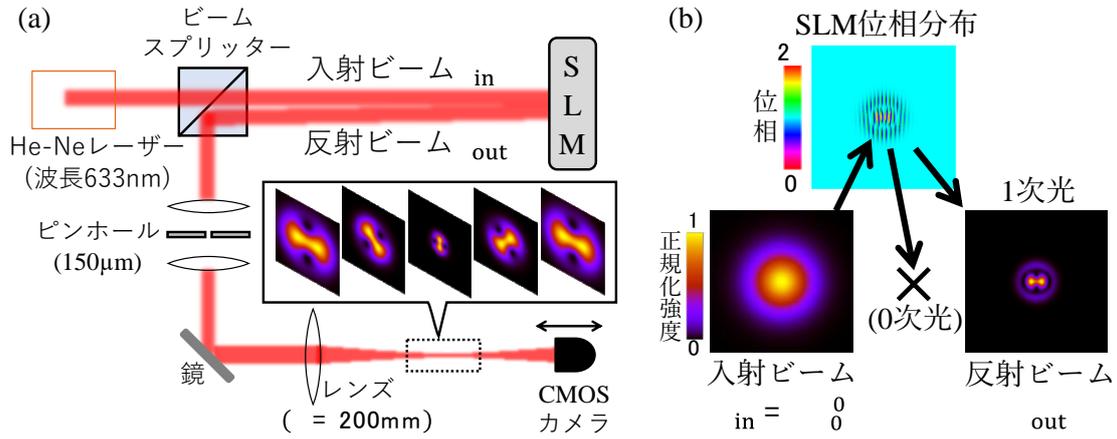


図 4. (a) 実験系 (b) SLM 位相分布による回折を利用した高次動径モードの生成

実験的に Gouy 回転量を正確に得るためには安定度の高いシングルパスの光学系とノイズに弱い強度暗点の位置を正確に測る測定系が必要である。研究初期段階では光渦リターダと呼ばれる LG ビームの方位角モード生成に使用される素子を 2 枚利用して  $LG_0^0$  と  $LG_2^2$  の重ね合わせ状態を生成していたが、より高次の動径モードを高精度に生成する手法として、空間位相変調器 (SLM) を用いた図 4(a) の実験系を用いた。波長 633nm の HeNe レーザ光を SLM に入射して  $LG_0^0$  と  $LG_p^p$  の重ね合わせ状態を生成し、0 次回折光などの余分な光波をピンホールを用いて除去する。その後、 $f = 200\text{mm}$  のレンズで集光し、集光点付近における Gouy 位相による強度分布の回転を CMOS カメラを前後に動かしながら観測する。

SLM 上に表示する位相分布はブレード型の位相回折格子に類似しており、一次回折光として所望の光ビームが生成されるように設計する。回折格子の位相深度を調整することにより、回折効率が調整できるため、1 次回折光の強度と位相の両方を制御することが可能である。

また SLM の位相分布を用いて二つのモードの和と差 ( $LG_0^0 \pm LG_p^p$ ) を生成することで互いに角度が 90 度異なる二つの光渦ダイポールが生成され、これらの強度分布を CMOS カメラで別個に観測して差分を取れば、ダイポールの強度暗点の位置が正負の極大値の位置として正確に測定できる。

#### 4. 研究成果

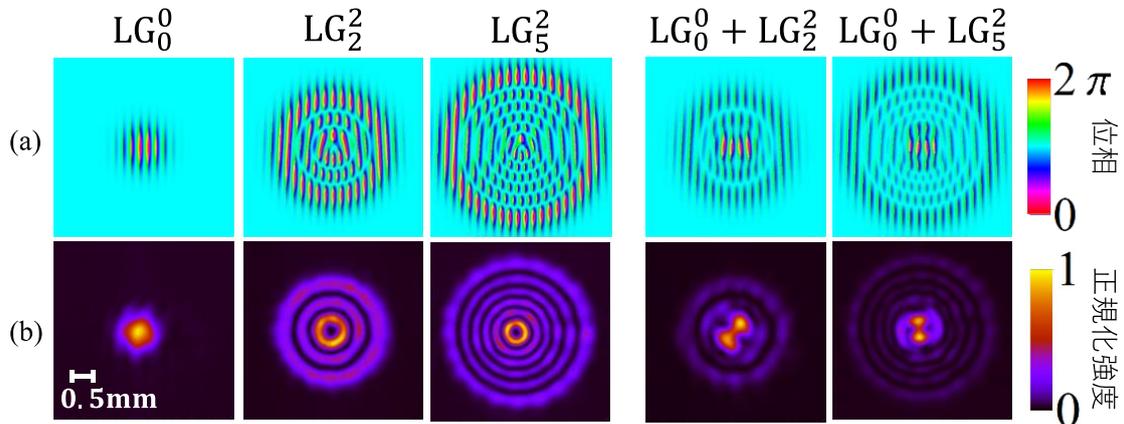


図 5. (a) 高次動径モード  $LG_p^p$  を生成する SLM の位相分布と (b) 生成されたビームの強度分布

まず高次動径モードの生成の結果を図 5 に示す。図 5 の 1 列目が基本ガウスモード、2 列目と 3 列目が高次動径モードを単独で生成するために必要な SLM 位相分布と実験的に生成されたビームの強度分布の観測結果である。動径モード  $p$  に対して  $(p + 1)$  個の円環状の分布が綺麗に生成されていることがわかる。図 5 の 4 列目と 5 列目は基本ガウスモードと高次動径モードの重ね合わせ状態を生成する SLM 位相分布と強度分布の観測結果である。どちらも光渦ダイポールを構成していることがわかる。

さらに本研究では高次の動径モードをより高精度に生成するために、SLM 位相分布と実際に生成されるビームの分布の関係を理論計算し、所望の振幅分布に対して逆 sinc 関数を用いた変換を施して位相深度に適用することで、LG ビームの高精度生成が可能であることを明らかにした。また、SLM 位相分布のパラメータを変化させながら実験的に得られた LG ビームの生成精度を評価し、最も精度の高いパラメータを採用することで、最終的には動径モード  $p = 10$  まで高精度で生成することに成功した。パラメータの最適化の一例として、SLM 位相分布で生成するビーム径のパラメータを変化させながら生成精度を評価した結果を図 6 に示す。生成精度としては、実

験的な強度分布と理論分布のピクセル毎の差分の絶対値を正規化した値を用いた。図6 フィッティング曲線より、生成ビーム径を 0.54mm とした場合にもっとも生成精度が高くなることがわかる。SLMの位相分布はブレード回折格子により入射する基本ガウスモードの一部を切り取って1次回折光とすることで所望のLGモードを実現しているが、ビーム径パラメータはどの範囲を切り出してLGモードを生成するかを決めている。入射ビームには強度雑音などの雑音があるため、切り出す範囲を最適化することで生成精度の向上が見込めることがわかった。

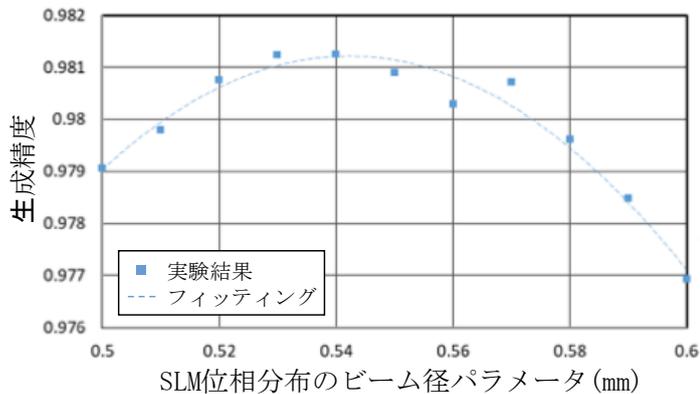


図 6. SLM 位相分布のビーム径パラメータと生成精度の関係

次に $p = 10$ までの動径モードと基本ガウスモードの重ね合わせ状態をレンズで集光したときの強度分布の回転角を測定した結果を図7に示す。回転角の変化は逆正接関数の理論曲線とよく一致しており、高次動径モードの生成と強度分布の回転角の測定がともに高精度に実現されていることがわかる。また理論通り動径モード $p$ に比例して回転角が増大していることも実証することに成功した。

本研究で培った動径モード生成技術を用いて $p = 10$ 以上のLGビームを生成し、対物レンズなどで集光して移動物体に照射すれば、集光点付近における急激な強度分布の回転に起因して物体の移動速度に応じた信号を得ることができる。これはGouy位相により誘起されたドップラーシフトであり、既存のドップラー速度計で用いられる線形ドップラーシフトとは異なる原理に基づいた速度計測が実現可能であることを意味する。また、Gouy位相によるドップラーシフトと線形ドップラーシフトは符号が逆であるため、例えば集光点付近の原子集団に対する吸収分光を考えた場合、通常は原子の運動によるドップラーシフトで吸収曲線の幅は原子の吸収線よりも広がるが、これをGouy位相によるドップラーシフトで抑制することができる。残念ながら本研究ではドップラーシフトの観測までには至らなかったため今後の課題である。

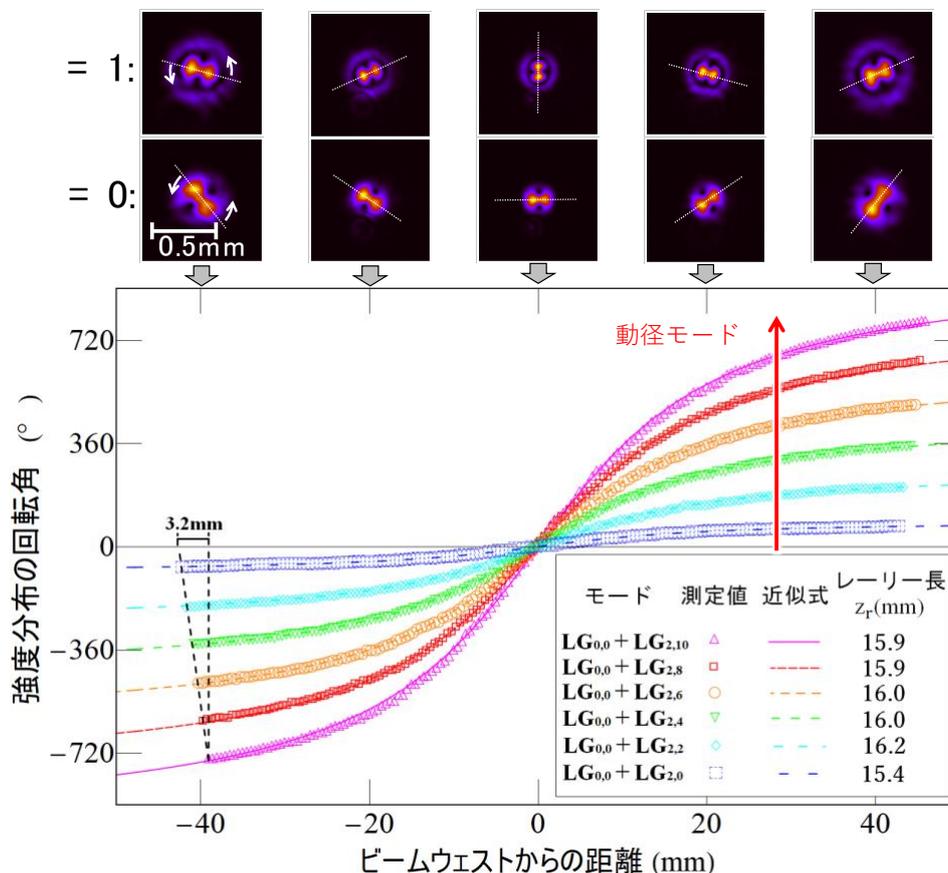


図 7. ビームウェストからの距離と強度分布の回転角の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Satoru Takashima, Hirokazu Kobayashi, and Katsushi Iwashita	4. 巻 100
2. 論文標題 Integer multiplier for the orbital angular momentum of light using a circular-sector transformation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 63822
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1103/PhysRevA.100.063822">https://doi.org/10.1103/PhysRevA.100.063822</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 横川 恒助, 小林 弘和, 岩下 克
2. 発表標題 高次モードの光渦の伝搬による光強度分布回転
3. 学会等名 2019年度応用物理・物理系学会 中国四国支部 合同学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hirokazu Kobayashi, Satoru Takashima, Katsushi Iwashita
2. 発表標題 Integer Multiplier for Orbital Angular Momentum of Light
3. 学会等名 5th International Conference on Optical Angular Momentum (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横川 恒助, 小林 弘和, 岩下 克
2. 発表標題 光渦の伝搬による光強度分布回転
3. 学会等名 OPE研究会2019年度4月研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横川 恒助, 小林 弘和, 岩下 克
2. 発表標題 光渦の伝搬による光強度分布回転
3. 学会等名 OPE研究会2019年度4月研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 弘和
2. 発表標題 幾何学変換を利用したOAM通信操作と動径モードによるGouy回転の増幅
3. 学会等名 第4回光渦討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横川 恒助, 小林 弘和, 岩下 克
2. 発表標題 光渦の強度分布の回転によるGouy位相の可視化
3. 学会等名 電気関係学会四国支部連合大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	岩下 克  (Iwashita Katsushi)		

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力 者	鹿野 豊  (Shikano Yutaka)		