

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03579

研究課題名(和文) 光渦レーザー誘起蛍光法によるイオンの多自由度流れ計測

研究課題名(英文) Measurement of multiple degrees of freedom flow of ions by optical vortex laser induced fluorescence method

研究代表者

吉村 信次 (Yoshimura, Shinji)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授

研究者番号：50311204

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)：光渦とは、らせん状にねじれた等位相面をもつ光である。本研究では、光渦レーザーの特異な位相空間構造を利用した光渦レーザー誘起蛍光(OV-LIF)法を開発し、プラズマ中の流れ計測に応用した。具体的には、光渦中の原子が感じる方位角方向のドップラー効果を利用することで、平面波レーザーでは原理的に測定が不可能なレーザー光を横切る流れの検出を試みた。数値計算によって、方位角方向ドップラーシフトがスペクトルに顕著な効果をもたらすパラメータを特定した。電極に負電圧を印加することでレーザーを横切るイオン流速を増加させた場合に、スペクトルの広がり(標準偏差)が増加することを観測した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザーを用いたドップラー分光計測は、その性質上、1次元計測であった。本研究では、位相が螺旋状の空間構造をもつねじれた光である光渦レーザーを用いることで、これまで原理的に不可能であったレーザーを横切る方向も含めた2次元の計測が可能であることを示した。光の内部構造を操作することで、レーザー計測の自由度を拡張できることを示した点に、本研究の学術的意義がある。産業界で用いられているプロセスプラズマへの適用が可能となれば、社会に対しても貢献できる。

研究成果の概要(英文)：An optical vortex is a light with a helically twisted equiphase surface. This study developed the optical vortex laser-induced fluorescence (OV-LIF) method, which utilized the unique phase space structure of optical vortex lasers and applied it to the flow measurement in plasmas. By using the azimuthal Doppler effect felt by atoms in the optical vortex, we have attempted to detect the flow across the laser beam, which is in principle impossible to measure with a plane-wave laser. Firstly, we identified the parameters where the azimuthal Doppler shift significantly affects the spectrum by numerical calculations. In addition, we observed that the spectral broadening (in its standard deviation) increased when the ion flow velocity across the laser was increased by applying a negative voltage to the electrode.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：光渦 レーザー誘起蛍光法 プラズマ 流れ レーザー計測

## 1. 研究開始当初の背景

プラズマは様々な流れ構造を自発的に形成する非平衡開放系であり、その研究には流れ計測が不可欠である。レーザー分光はプラズマ中の原子やイオンの流れを計測する強力なツールであるが、吸収される光の周波数が原子やイオンの運動によってドップラーシフトすることに基づいた計測であるため、レーザー光の進行方向に射影した速度成分しか原理的に知ることができなかった。一方、近年、情報通信分野やナノ加工分野において、“光渦”と呼ばれる特異な空間位相構造をもつ光が注目されている。従来の計測に用いられる平面波光の等位相面が進行方向に垂直なのに対し、光渦は螺旋状の等位相面をもつ。この事実は、レーザーを横切る方向に進む原子・イオンもドップラー効果を感じることを意味する。実際、Allen ら [1] によって 1994 年に光渦中を運動する原子が、通常ドップラー効果に加えて方位角方向のドップラー効果による共鳴周波数のシフトを感じる事が理論的に示されている。しかしながら、この効果をプラズマ計測に利用しようとする試みは世界的にもなされていなかった。

## 2. 研究の目的

本研究では、近年多くの分野で注目されている光渦レーザーの特異な空間位相構造を利用した光渦レーザー誘起蛍光 (OV-LIF) 法を世界に先駆けて開発し、プラズマ中の流れ計測に応用することを目的とする。光渦と相互作用する原子は、平面波とは異なり、速度の 3 自由度方向にドップラー効果が働くことが理論的に示されている。これにより、従来の平面波レーザーでは原理的に不可能であった光路を横切る流れに感度をもつドップラー分光が可能となる。これまで申請者が開発してきた光渦レーザー吸収分光法を光渦レーザー誘起蛍光法へと発展させることで、高空間分解能を実現し、より低密度の粒子種の検出も可能となることが期待される。本研究では、低密度であることからシングルパス吸収分光では計測できなかったプラズマ中の準安定励起イオンを対象とした光渦レーザー誘起蛍光法の原理実証実験を行う。

## 3. 研究の方法

まず、単純に従来のレーザー誘起蛍光 (LIF) 法の実験配位において、光源を光渦レーザーに置き換えた場合のスペクトルを取得する。光渦ビームは、簡便な q-plate と呼ばれる光学素子 (軸方位分割位相差板) に平面波ビームを入射して変換することで得る。初期実験には、レーザー誘起蛍光計測の実験系が整備されている九州大学の HYPER-II 装置 [2] を用いる。誘起蛍光はレンズと光ファイバーを用いた受光系を通して光電子増倍管で検出する。電子サイクロトロン共鳴プラズマ中のアルゴン準安定励起イオンを対象として LIF スペクトルを取得し、トポロジカルチャージ 1 の光渦ビームを用いた場合の OV-LIF スペクトルと比較する。

実験結果を解釈するためには、理想的な光渦ビームを用いた場合に取得される OV-LIF スペクトルがどのような形状になるのかを知る必要がある。これまで、そのような研究は行われていないため、本研究で OV-LIF スペクトルの数値計算コードを整備する。方位角方向ドップラーシフトの大きさは、ビーム断面内の位置に依存するため、ビーム断面内の微小領域からの寄与を数値的に積分することで OV-LIF スペクトルを得る。

より低密度のイオンを観測するには、光渦レーザーの強度を高める必要がある。半導体光アンプを所有する核融合科学研究所の HYPER-I 装置 [3] を用いて、引き続き実験を行う。市販の q-plate はトポロジカルチャージが低い (1 または 2) ため、空間光変調器 (SLM) にホログラムを描画して、その 1 次回折光として高次の光渦ビームを得る。方位角方向ドップラーシフトの大きさはレーザーを横切る流速に比例するため、プラズマ中に電極を挿入し大きな負の電圧を印加することでイオンを加速して実験する。電極前面のシース・プレシース領域ではイオンの密度も減少するため、OV-LIF 法を低密度のプラズマへ適用する模擬実験と考えることもできる。

## 4. 研究成果

HYPER-II 装置を用いた実験では、中心波長 668.61 nm の波長可変半導体レーザーを光源とした。平面波ビーム ( $HG_{00}$ ) および平面波ビームを q-plate によってトポロジカルチャージ 1 の光渦ビーム ( $LG_{01}$ ) に変換し、焦点距離 500 mm の平凸レンズを通して径方向ポートからプラズマへ入射した。図 1 に入射したビームの強度分布を示す。図 1 左はガウス分布をした平面波ビームである。一方、図 1 右のドーナツ状の強度分布は光渦に特徴的なもので、ビーム中心が位相の特異点

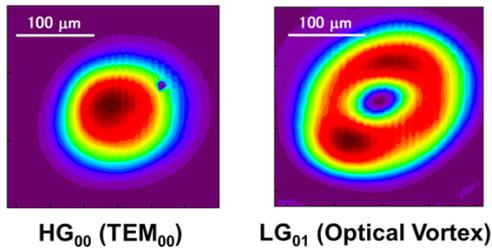


図1 入射ビームの強度分布  
(左:平面波ビーム、右:光渦ビーム)

となっているためこのような形状になる。ビームを入射した領域では 1.5 km/s 程度のイオン流れがあることがわかっている。この実験で得られたLIFスペクトルおよびOV-LIFスペクトルを図2に示す。スペクトルはイオン温度 0.1 eV を仮定したガウス分布で良くフィットできたが、平面波ビームを用いた場合と光渦ビームを用いた場合でスペクトル形状に有意な差は見られなかった。

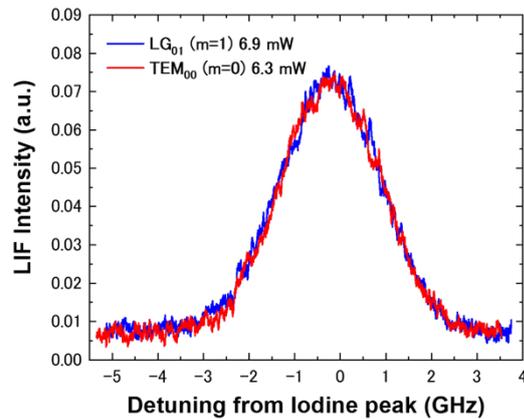


図2 得られたLIFスペクトル(赤:平面波ビーム、青:光渦ビーム)

この実験結果を解釈するために、スペクトル形状の数値計算を行った。簡単のため、光渦レーザーの強度分布は理想的な光渦ビームのものを使用し、レーザー誘起蛍光の強度飽和の効果は取り込んでいない。数値計算の結果、実験時のビーム半径 50 μm およびトポロジカルチャージ 1 では、レーザー誘起蛍光スペクトルに対する方位角方向ドップラーシフトの寄与は無視できる程度に小さいことがわかった。そこで、パラメータを変化させた数値計算を実行することで、方位角方向ドップラー効果によりOV-LIFスペクトルが有意に変形する条件を調べた。ビーム半径をより絞り、高次のトポロジカルチャージをもつ光渦を使用した場合、ビームを横切る高速のイオンの流れをスペクトル形状の変形から検出できる可能性が示された。結果を論文[4]として出版した。

数値計算により、有意なスペクトル変形を得るにはトポロジカルチャージ 10 でビーム半径が 15 μm 程度の光渦ビームを使って、10 km/s 程度の速い流れを計測する必要があることがわかった。市販の q-plate ではそのような大きなトポロジカルチャージの光渦を生成することができないため、SLMを用いたコンピュータ生成ホログラム法を用いた。回折効率の関係で光渦ビームの出力が落ちるため、半導体光アンプを所有する HYPER-I 装置で実験を行った。HYPER-I 装置で生成されるプラズマには 10 km/s という速い流れは存在しないため、プラズマ中に電極を挿入し、負電圧を印加することでイオンを加速した。

初期実験の結果を図3に示す。光渦ビームはトポロジカルチャージ 10 である。図3は、上から電極なし、浮遊電位の電極前面、-20 V にバイアスした電極前面で取得したOV-LIFスペクトルに対応している。電極なしの場合は、HYPER-II 装置を用いて行った実験と同様に、イオン温度 0.1 eV 程度のガウス分布に対応したスペクトルが得られ、その標準偏差は 0.88 GHz であった。次に、浮遊電位にした電極を挿入し、その前面のシース・プレシース領域で計測を行った。得られたOV-LIFスペクトルはやや広がっており、その標準偏差は 1.11 GHz となった。電極に -20 V を印加したところ、図3下のようなスペクトルの変形が観測され、その標準偏差は 1.28 GHz であった。なお、この場合に期待される最大流速は 7 km/s 程度となる。この実験では、良い SN 比でスペクトルを取得することができなかつたため、光渦レーザーを横切る流速の定量的評価には至らなかったが、今後、受光系の改良や光渦

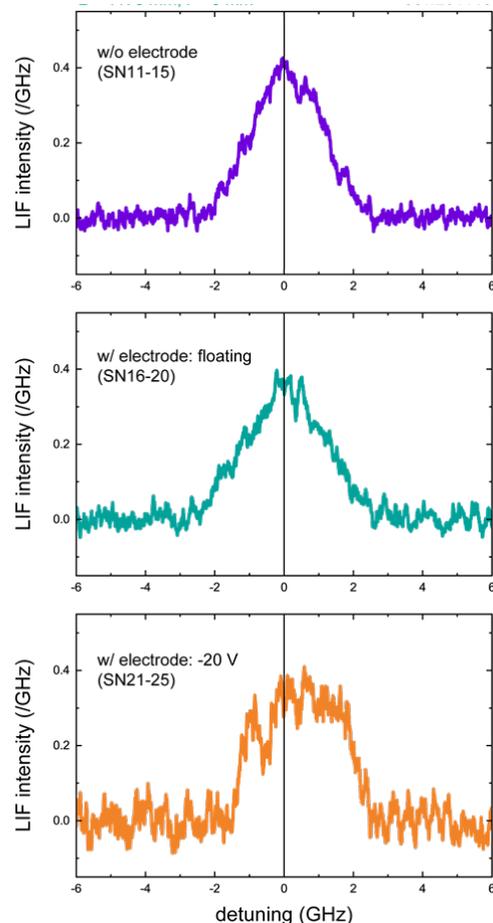


図3 実験で得られたOV-LIFスペクトル形状の変化(上から、電極なし、浮遊電位の電極あり、-20Vバイアスした電極あり)

ビームの品質改善を行うことで、より SN 比の大きな OV-LIF スペクトルを取得できると考えている。

本研究課題により、レーザー誘起蛍光法に光渦ビームを用いることで、これまで原理的に不可能であったレーザーを横切る流れに感度をもつ新しい計測を実現できることが示された。今後、更なる改良を行い光渦レーザー誘起蛍光法を確立することで、産業応用プラズマにおける基板へのイオン入射流束の測定など、波及効果が期待される。

<引用文献>

- [1] L. Allen et al., Optics Communications **112**, 141 (1994).
- [2] K. Terasaka et al., Journal of Plasma Physics **81**, 345810101 (2015).
- [3] S. Yoshimura et al., Journal of Plasma Physics **81**, 345810204 (2015).
- [4] S. Yoshimura et al., Japanese Journal of Applied Physics **59**, SHHB04 (2020).

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 Yoshimura Shinji, Terasaka Kenichiro, Aramaki Mitsutoshi	4. 巻 59
2. 論文標題 Modification of laser-induced fluorescence spectrum by additional azimuthal Doppler effect in optical vortex beams	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SHHB04 ~ SHHB04
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ab72cb	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9件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 S. Yoshimura, K. Terasaka, M. Aramaki
2. 発表標題 Measuring ion flow velocity toward negatively biased electrode using optical vortex beams
3. 学会等名 73rd Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉村信次, 寺坂健一郎, 荒巻光利
2. 発表標題 光渦レーザーを用いたプラズマ流計測の現状と展望
3. 学会等名 第37回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shinji Yoshimura, Kenichiro Terasaka, Mitsutoshi Aramaki
2. 発表標題 Laser-induced fluorescence Doppler spectroscopy using higher-order Laguerre-Gaussian modes
3. 学会等名 19th Laser Aided Plasma Diagnostics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinji Yoshimura, Kenichiro Terasaka, Mitsutoshi Aramaki
2. 発表標題 Modification of laser-induced fluorescence spectrum by additional azimuthal Doppler effect in optical vortex beams
3. 学会等名 XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉村信次、寺坂健一郎、荒巻光利
2. 発表標題 高次Laguerre-Gaussianモードを用いたレーザー誘起蛍光法の検討
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第36回年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉村信次、寺坂健一郎、荒巻光利
2. 発表標題 光渦ビームを用いたレーザー誘起蛍光計測の検討
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinji Yoshimura, Kenichiro Terasaka, Mitsutoshi Aramaki
2. 発表標題 Laser-induced fluorescence measurements using optical vortex beams
3. 学会等名 60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉村信次、寺坂健一郎、荒巻光利
2. 発表標題 光渦レーザー誘起蛍光法によるイオン流速計測
3. 学会等名 第35回 プラズマ・核融合学会 年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 吉村信次、寺坂健一郎、荒巻光利
2. 発表標題 光渦レーザー誘起蛍光スペクトルに対する方位角方向ドップラーシフトの寄与
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関