

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 11 日現在

機関番号：63902

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05365

研究課題名(和文) 光渦レーザーを横切る流れのドップラー分光計測

研究課題名(英文) Doppler Spectroscopy of crossing flow velocity using optical vortex laser

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：光渦はこれまでプラズマの計測に用いられていなかった。我々は、光渦を用いたプラズマ中粒子の流れ速度計測の原理実証を目指して、アルゴン準安定原子を対象とした光渦レーザー吸収分光実験を初めて行った。光渦による周方向ドップラーシフトは空間依存性をもつため、2次元計測した透過光強度から各位置におけるドップラーシフトを評価した。得られた周波数シフトは理論から予想させるものと定性的に一致した。一方、その絶対値は実際の速度よりかなり大きく、今後更なる検討が必要であることがわかった。

研究成果の概要(英文)：Optical vortex has not been used for plasma diagnostics so far. We firstly performed an optical-vortex laser-absorption-spectroscopy experiment of metastable argon neutrals aiming for the proof-of-principle of flow velocity measurement using optical vortex beams. Because the azimuthal Doppler shift in optical vortex has spatial dependence, we evaluated the Doppler shifts at various positions by two-dimensional distribution of transmitted light intensity. Obtained frequency shift qualitatively agreed with theoretically predicted spatial dependence. However, its absolute value was far large from the actual flow velocity of argon neutrals, which is left open and requires further study.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：光渦 ラゲールガウスビーム レーザー吸収分光 周方向ドップラーシフト プラズマ

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ことが知られており、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。しかしながら、レーザー分光は、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ているため、原理的に計測できるのはレーザー光の進行方向に射影した速度成分のみであった。実際の実験装置では、プラズマへのレーザー光の導入方向が装置の構造によって制限されるため、知りたい方向の速度成分が計測できない場合も多い。

そこで、我々は“光渦”と呼ばれる特殊なレーザー光に着目した。通常のレーザー光は“平面波”であり、図1(a)に示すようにその等位相面は進行方向に垂直な平面となっている。一方、光渦の等位相面は図1(b)のようにらせん状になっている。つまり、光渦はその進行方向に垂直な断面内で周回方向に位相の変化をもつことになる。この特異な位相構造のため、光渦中を運動する原子には通常のドップラー効果に加えて周方向のドップラー効果による吸収周波数のシフトも存在することがAllenらによって理論的に示されている[①]。従って、光渦レーザーを用いれば、これまで原理的に不可能であったレーザー光を横切る粒子の速度を計測できる可能性がある。しかしながら、本研究を開始するまで、プラズマのレーザー計測に光渦を利用した例は皆無であった。

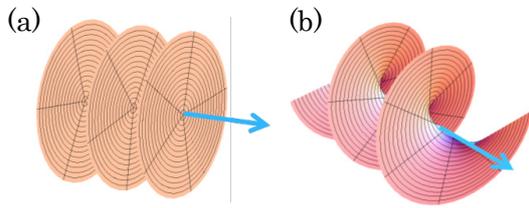


図1 (a) 平面波光と (b) 光渦の等位相面

2. 研究の目的

本研究は、近年多くの分野で注目されている光渦を用いたプラズマ中の粒子の流れ速度計測の原理実証と利用記述の確立を目的としている。従来のレーザードップラー分光で得られる情報は、入射レーザーの進行方向に射影した速度成分に限られていた。一方、光渦レーザーでは、通常のドップラー効果に加えて光路に対して周回方向にもドップラー効果が存在するため、流れ計測に新たな自由度を与えることが期待される。

3. 研究の方法

光渦をプラズマ計測に用いるのは、世界で初めての試みである。最初に、プラズマ中の準安定励起状態のアルゴン原子を対象とした中心波長 697nm の波長可変外部共振器型半導体レーザーを用いて、レーザーの基本発振モードであるエルミートガウスモードから

光渦であるラゲールガウスモードへの変換を試みる。レーザー波長や光渦のねじれ具合を表す指標であるトポロジカルチャージの制御性の観点から、液晶型の空間光位相変調器 (SLM) によるホログラム変換を行う。将来的には、より安価で簡単な光学系を使用することが望ましいため、軸方位分割位相差板 (q-plate) を用いた光渦生成法も試みる。

原理実証実験として、スペクトルの取得が比較的容易なレーザー吸収分光を行う。実験には、核融合科学研究所の HYPER-I 装置を用いる。光渦中の方位角方向ドップラーシフトは、トポロジカルチャージと流速に比例し、特異点からの距離に反比例する。特に、流速がビーム内で一定であると考えられる場合には、ドップラーシフトがビーム内の位置によって正弦波的な振る舞いをすることが予想される。高空間分解能のビームプロファイラを用いた透過光強度の二次元計測により、ビーム断面内の各位置における吸収スペクトルを再構成することで、周方向ドップラーシフトの検出を試みる。吸収分光実験の光学系を図2に示す。

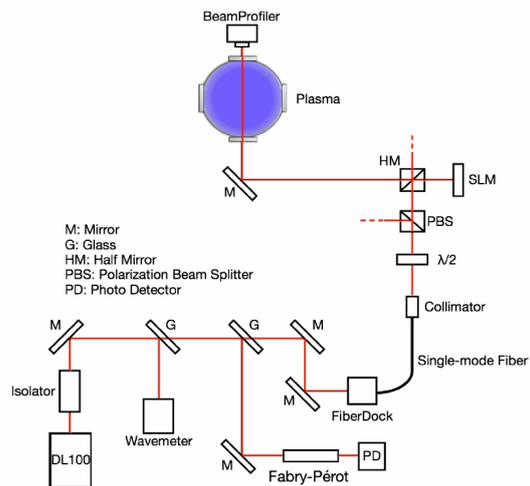


図2 光渦吸収分光実験の光学系

レーザー周波数を掃引しながら大量の透過光強度分布を画像として取得し、各ピクセルの強度変化から吸収スペクトルを再構成する。エルミートガウスモードを使用した場合のスペクトルのシフトからのずれが、光渦に特有の周方向ドップラーシフトとなる。実験では SLM に描画するホログラムを変更することで、光渦のトポロジカルチャージを制御する。

周方向ドップラーシフトを正確に評価するには、レーザー周波数を正確に知る必要がある。そのため、参照用の小型 RF プラズマ源を製作し、飽和吸収スペクトルを同時に取得することで、その Lamb ディップを絶対周波数基準とする。相対周波数の決定には、音響光学素子による Bragg 回折光を利用して校正した Fabry-Pérot 干渉計を用いる。

#### 4. 研究成果

図3にSLMに描画したホログラムと生成された光渦の強度分布を示す。中心付近のフォーク状のくびれ部分が光渦の中心である位相特異点に対応する。SLMの1次回折光として得られる光渦は、中心に強度0の位相特異点をもつため、ドーナツ状の強度分布となる。

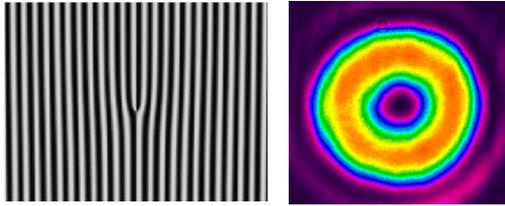


図3 ホログラム (左) と光渦 (右)

周方向ドップラーシフト量は特異点からの距離に反比例するため、実験では半径200 $\mu\text{m}$ の領域で透過光強度分布を計測した。レーザー周波数を掃引しながら1100枚の透過光強度画像を取得し、各ピクセルの強度変化から吸収スペクトルを再構成した。再構成した吸収スペクトルの一例を図4に示す。30%程度の吸収があり、スペクトルはガウス関数で良くフィッティングできる。

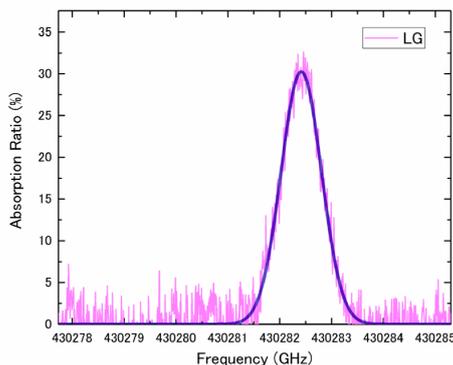


図4 再構成した吸収スペクトルの例

特異点を中心として半径一定(15ピクセル = 66 $\mu\text{m}$ )で角度を変化させて吸収スペクトルのドップラーシフト量を評価することで、シフト量の角度依存性を調べた。また、トポロジカルチャージ  $m = \pm 1$  のLGビームについて比較することで、トポロジカルチャージ依存性を評価した。結果を図5に示す。ここで、空間依存性をもたないエルミートガウスビームの吸収スペクトルのピークを周波数基準としている。図5より、光渦(ラゲールガウスビーム)の吸収スペクトルのドップラーシフトに、理論から予想される正弦波的依存性が確認できる。また、正弦関数の符号がトポロジカルチャージの符号を反転させることで反転していることがわかる。次に、周波数シフトの特異点からの距離に対する依存性を評価した。結果を図6に示す。流れに垂直な位置(90°、270°)におけるシフト量が特異点からの距離に反比例して減少していることがわかる。

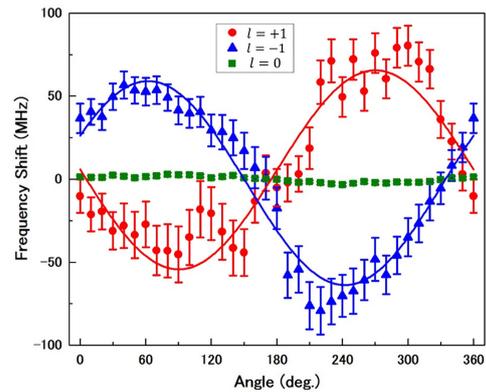


図5 周波数シフトの方位角依存性

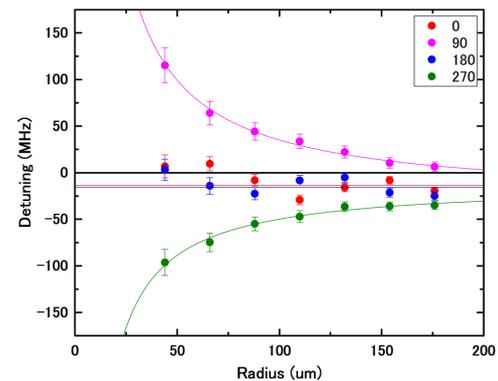


図6 周波数シフトの距離依存性

これらは、光渦中の原子の共鳴吸収周波数に現れる周方向ドップラーシフトと定性的に一致しており、光渦を用いることでこれまで感度のなかった方向の情報が得られたといえる。一方、シフトの絶対値から計算されるアルゴン原子の速度は数  $\text{km/s}$  となり、実験室プラズマで予想されるような値とはなっていない。この理由について、本研究期間内で明らかにするには至っていないが、ビームの形状や伝搬が理想的なものからずれている可能性がある。これらを解明し、光渦プラズマ分光を新しい計測として確立することは今後の課題である。

本研究で原理実証実験に用いたレーザー吸収分光法には、プラズマによるある程度の吸収が必要であるため微量存在する粒子には用いることができない。また、レーザーの光路に沿って吸収が続くため、空間分解能をもたせることができない。我々は、光渦レーザー吸収分光を光渦レーザー誘起蛍光法へと発展させることで、これらの欠点を克服すべく研究を進める計画である。

#### <引用文献>

- ① L. Allen et al., Optics Communications **112**, 141 (1994).

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① 吉村信次、荒巻光利、光渦の原理と応用研究の現状、プラズマ・核融合学会誌、

査読無、94 巻、2018、pp. 121-126、  
[http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF\\_JS PF/jspf2018\\_03/jspf2018\\_03-121.pdf](http://www.jspf.or.jp/Journal/PDF_JS PF/jspf2018_03/jspf2018_03-121.pdf)

〔学会発表〕(計 19 件)

- ① 吉村信次、荒巻光利、寺坂健一郎、田中雅慶、Additional Doppler shift in absorption spectrum obtained by laser absorption spectroscopy using optical vortex beams、第 18 回レーザー応用プラズマ計測に関する国際ワークショップ、2017.
- ② 吉村信次、光渦レーザーを用いたドップラー吸収分光による流れ計測、第 1 回光渦自然科学研究会、2017.
- ③ 荒巻光利、山本将来、吉村信次、寺坂健一郎、森崎友宏、光渦分光法による位相特異点近傍の方位角ドップラーシフトの分布測定、Plasma Conference 2017、2017.
- ④ 山本将来、吉村信次、森崎友宏、寺坂健一郎、荒巻光利、光渦吸収分光における特異点近傍での吸収率、位相分布、ドップラーシフトの測定、日本物理学会第 73 回年次大会、2017.
- ⑤ 吉村信次、小澤直也、荒巻光利、寺坂健一郎、永岡賢一、田中雅慶、液晶ポリマー偏光素子を用いた光渦生成と吸収分光への適用、日本物理学会第 72 回年次大会、2017.
- ⑥ 小澤直也、吉村信次、荒巻光利、寺坂健一郎、田中雅慶、森崎友宏、永岡賢一、周方向ドップラーシフトに対するラゲールガウスビームの拡がりの効果、日本物理学会第 72 回年次大会、2017.
- ⑦ 荒巻光利、吉村信次、森崎友宏、寺坂健一郎、田中雅慶、戸田泰則、光渦飽和吸収分光における Lamb dip の周波数シフト、日本物理学会第 72 回年次大会、2017.
- ⑧ 吉村信次、荒巻光利、小澤直也、寺坂健一郎、田中雅慶、永岡賢一、森崎友宏、ラゲールガウスビームを用いた周方向ドップラー効果の観測 II、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016.
- ⑨ 荒巻光利、戸田泰則、吉村信次、森崎友宏、寺坂健一郎、田中雅慶、光渦レーザーを用いた飽和吸収分光におけるスペクトル形状の空間変化、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016.
- ⑩ 吉村信次、荒巻光利、小澤直也、寺坂健一郎、田中雅慶、永岡賢一、森崎友宏、Azimuthal Doppler shift of absorption spectrum in optical vortex laser absorption spectroscopy、第 58 回米国物理学会プラズマ物理分科会、2016.
- ⑪ 吉村信次、荒巻光利、小澤直也、寺坂健一郎、田中雅慶、森崎友宏、Laser absorption velocimetry using an optical vortex beam、第 69 回気体エレクトロニクス会議、2016.
- ⑫ 荒巻光利、吉村信次、戸田泰則、森崎友宏、寺坂健一郎、田中雅慶、Detection of beam-crossing Doppler shift using an optical vortex beam、第 69 回気体エレクトロニクス会議、2016.
- ⑬ 吉村信次、荒巻光利、小澤直也、寺坂健一郎、田中雅慶、森崎友宏、Proof-of-principle of laser absorption velocimetry using an optical vortex、第 7 回プラズマ分光に関する国際ワークショップ、2016.
- ⑭ 小澤直也、浅井翔馬、吉村信次、荒巻光利、寺坂健一郎、田中雅慶、森崎友宏、ラゲールガウスビームを用いた周方向ドップラー効果の観測、日本物理学会第 71 回年次大会、2016.
- ⑮ 吉村信次、浅井翔馬、荒巻光利、小澤直也、寺坂健一郎、田中雅慶、森崎友宏、HYPER-I 装置における光渦を用いたレーザー吸収分光、プラズマ・核融合学会第 32 回年会、2015.
- ⑯ 浅井翔馬、吉村信次、荒巻光利、小澤直也、寺坂健一郎、田中雅慶、森崎友宏、Development of Experimental System for Optical Vortex Laser Absorption Spectroscopy、第 57 回米国物理学会プラズマ物理分科会、2015.
- ⑰ 吉村信次、浅井翔馬、荒巻光利、寺坂健一郎、小澤直也、田中雅慶、森崎友宏、Initial Results of Optical Vortex Laser Absorption Spectroscopy in the HYPER-I Device、第 57 回米国物理学会プラズマ物理分科会、2015.
- ⑱ 吉村信次、Application of Optical Vortex to Laser Absorption Spectroscopy、第 17 回レーザー応用プラズマ計測に関する国際ワークショップ、2015。(招待講演)
- ⑲ 浅井翔馬、小澤直也、吉村信次、荒巻光利、寺坂健一郎、田中雅慶、森崎友宏、光渦レーザーを用いた中性粒子流速計測法の開発、日本物理学会 2015 年秋季大会、2015.

## 6. 研究組織

### (1) 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

### (2) 連携研究者

荒巻 光利 (ARAMAKI, Mitsutoshi)  
日本大学・生産工学部・教授  
研究者番号：50335072

寺坂 健一郎 (TERASAKA, Kenichiro)  
九州大学・総合理工学研究院・助教  
研究者番号：50597127