

令和 3 年 5 月 26 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H03000

研究課題名(和文) 光渦ドップラー分光法の開発と横方向流れ計測への応用

研究課題名(英文) Development of optical vortex spectroscopy and its application to measurement of traverse gas flow

研究代表者

荒巻 光利 (ARAMAKI, Mitsutoshi)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号：50335072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ビームを横切る方向の粒子の流れを検出することが出来る、光渦を光源とした分光法を開発した。光渦吸収分光および光渦飽和吸収分光では、光渦の位相特異点からの距離に反比例する方位角ドップラーシフトが観測され、理論と定性的に一致する結果を得た。一方で、シフト量の絶対値は理論の予想よりも数倍大きい値であり、ばらつきも大きいため、今後も測定系の改善を進める必要がある。光渦レーザー誘起蛍光(LIF)法に関しては、トポロジカルチャージが1の光源では、方位角ドップラーシフトの効果を観測できないことが確認され、新たに高次の光渦光源を開発した。今後はこれを用いた光渦LIF測定実験を進める予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、様々な分野で高度に制御したレーザー光が利用されており、超高精度な周波数標準、超短パルスによる時間分解測定や超高エネルギー密度状態の実現等の極限的な研究開発が行われている。一方で、光の空間構造に関しては、あまり利用された例がなく、今後の光利用において発展の余地が大いに残されている。本研究課題は、プラズマの分光測定に光渦を用いることを提案しており、光の位相空間構造をプラズマの測定に積極的に利用する初めての試みである。光渦吸収分光および光渦飽和吸収分光では、平面波を用いて観測される通常の分光スペクトルとは大きく異なる結果を得ており、光の位相空間構造制御による新しい分光技術の可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have developed spectroscopy methods using optical vortex beam, which can detect the particle flow in the perpendicular direction of the beam. In optical vortex absorption spectroscopy and optical vortex saturation absorption spectroscopy, azimuthal Doppler shifts that are qualitatively consistent with the theory were observed. The amount of the azimuthal doppler shift was inversely proportional to the distance from the phase singularity. Meanwhile, the absolute value of the Azimuthal Doppler shift is several times larger than the theoretical expectation. Hence, it is necessary to continue improving the measurement system. Regarding the optical vortex LIF spectroscopy, it was confirmed that the effect of azimuth Doppler shift could not be observed with an optical vortex at topological charge 1. Therefore, we have developed a new higher-order optical vortex light source. We plan to proceed the measurements using the light source.

研究分野：プラズマ分光

キーワード：光渦 吸収分光法 飽和吸収分光法 レーザー誘起蛍光法 プラズマ分光

1. 研究開始当初の背景

光渦とは、図1(a)に示すように進行方向にらせん状の等位相面とポインティングベクトルを持つ伝搬モードの光で、伝搬方向に垂直な断面でドーナツ型の強度分布と方位角方向に光の位相分布を持つ(図1(b)). 方位角方向1周の全位相変化は $2\ell\pi$ で表わされ、光渦のねじれの程度と向きを表わすパラメータ ℓ をトポロジカルチャージと呼ぶ. ビーム中心は位相特異点となり、急峻に光強度が減衰する. L. Allen等は、ねじれた波面を持つ光渦と原子の相互作用において、原子が光の進行方向を軸とする円筒座標系で、伝搬方向 z 、径方向 r 、方位角方向 θ の速度の3成分(v_z, v_r, v_θ)に対応したドップラー効果($\delta z \propto -kv_z, \delta r \propto -krv_r, \delta \theta \propto -\ell/r v_\theta$)を感じることを理論的に示した. この結果は、光渦が平面波と異なる原子励起特性を持つことを意味している.

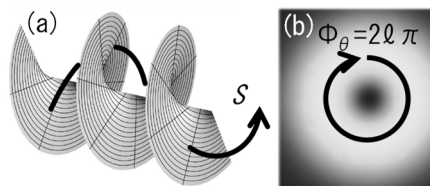


図1 (a)光渦の等位相面とポインティングベクトル \mathbf{S} , (b)断面内の光強度分布と位相変化 ϕ_θ .

これまでに申請者等は、ドップラーレーザー誘起蛍光(LIF)法を用いた原子・イオンの流れ計測、レーザートムソン散乱による電子のドップラー分光計測等、ドップラー効果を利用した粒子輸送の研究を行ってきた. 従来のドップラー分光法では、光の伝搬方向の運動しか検出できないため、計測用レーザーの光路に対する制約によって、測定によって得られる情報が制限されてきた. 光渦分光法を確立することで、光路による制限を緩和し、ドップラー効果を利用する分光法全般の利便性を画期的に向上させることができる.

2. 研究の目的

本研究では、光渦レーザーの特異な空間位相構造をプラズマ分光に利用することで、従来のドップラー分光法の常識を覆す、光路を横切る方向の速度に感度を持つドップラー分光法を開発し、プラズマ中の流れ計測に応用することを目的とする. 原子の速度分布計測を可能にするドップラー分光法は、プラズマのダイナミクス理解のために大変有効な手段であるが、速度に対する感度が励起レーザーの伝搬方向の1自由度に限られるという強い制約がある. 近年、光科学の分野で開発された光渦レーザーは、原子との相互作用におけるドップラー効果が速度の3自由度に働くことが理論的に示されている. この新たな光源をドップラーレーザー分光に導入することで、速度の選択性を拡張した分光測定を実現する.

3. 研究の方法

【光学系の高安定化】

光渦分光では、ビーム中心の位相特異点近傍で原子励起の空間分布を観測する必要がある. これには、光渦光源および光学系全体が高い安定性を有する必要があるため、現有の測定系を高安定化する.

【光渦飽和吸収分光法および光渦吸収分光法の開発】

図2に示すように、光が z 方向に伝搬する場合、速度空間における平面波の励起体積は V_z 軸に垂直なものに対して(図2(a)), 光渦の励起体積は V_z 軸に対して斜めとなる(図2(b)). この角度はビーム中心の位相特異点からの距離に依存して変化する. 光渦吸収分光では、この励起体積の配位の違いによるドップラー分光の空間変化から、横方向ドップラーシフトを取り出す. 光渦をプローブ光、平面波をポンプ光として光渦飽和吸収分光を行うことで得られるLamb dipの横方向ガス流依存性の計算例を図3に示す. 通常はドップラーフリーの信号であるLamb dipが横方向流速によってシフトしていることが分かる. このことは、ドップラー分光と比較して急峻に強度変化するLamb Dipを高分解な流れ計測の指標に利用できることを意味する. 本研究では、光渦吸収分光法および光渦飽和吸収分光法の両方を開発する.

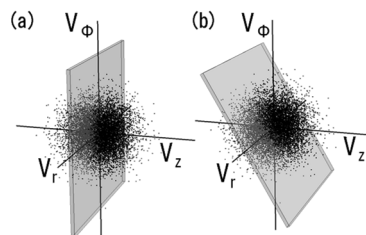


図2 速度空間における(a)平面波の励起体積, (b)光渦の励起体積.

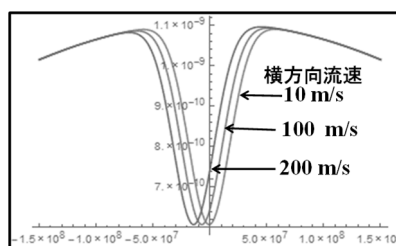


図3 光渦飽和吸収分光法で得られるLamb dipの流速依存性の計算例.

【光渦レーザー誘起蛍光(LIF)法の開発】

光渦吸収分光法は、従来は観測が不可能であった横方向

ドップラーシフトを簡便な測定系で観測できるという特徴があるが、プラズマ中で不均一に吸収されたビームの強度分布を観測する必要があり、必然的に光伝搬に伴う波動方程式の高次モード解の回折の影響を受ける可能性がある。これに対して光渦 LIF 法では、光渦は原子励起を行うのみであり、光渦が原子との相互作用の情報を受光系まで運ぶ必要がないため、複雑な光渦の伝搬特性を考慮する必要がない。簡便な受光系を用いて光渦 LIF を観測し、横方向の流れ検出に適用する。

4. 研究成果

【光学系の高安定化について】

本課題の研究開発により、光渦分光において光源の安定性が非常に重要であることが明らかとなり、研究期間を通じて強度、偏光、位相構造等の改善を継続的に行った。光強度および波長の安定性を改善するため、光源を TOPTICA 社製の外部共振器型半導体レーザー (DLC DL PRO) へと変更した。半導体レーザーのビームシェイプを改善するためにシングルモードファイバを用いているが、実験室環境の変化に依存して出力光の偏光方向が回転するため、ファイバ長を最短化するとともに断熱材による安定化を行った。空間モード純度が高い光渦を生成するため、光学部品の個体差まで考慮して最適なものを選定するとともに、微弱な反射光による干渉の影響も考慮して光学系を構築した。ガウシアンビームから光渦へのモード変換は、空間光変調器 (SLM) に表示したホログラムを用いる方法と 1/2 波長光渦リターダー (q-plate) による方法を用いた。SLM に用いるホログラムは、回折効率も考慮し、理論に近い強度・位相分布を持つ光渦を生成するよう最適化した。この方法では、ホログラムを変えることで光渦のトポロジカルチャージを容易に変更できるという利点があるが、SLM は液晶ディスプレイと同じ原理で動作しているため、液晶配位のリフレッシュに起因する位相ノイズを含むという欠点がある。一方で、q-plate による光渦生成は時間的に変化する部分がないため安定性は高いが、光学素子の離散的構造による高次成分の生成や 0 次光の混入の可能性が問題点としてあげられる。また、光渦分光では、ビーム中心の位相特異点に対して $100\ \mu\text{m}$ 以内程度でのスペクトルが重要となるため、ビームスポットの位置安定性も重要となる。本研究では、空気の揺らぎによるビームスポットの移動を抑えるため、光学系全体をプラスチック製ケースに収めて実験を行っている。現時点では、ビームスポットの揺らぎと光学部品の微弱な散乱光による干渉が大きなノイズ源となっており、本課題終了後も継続的に改良を行う予定である。

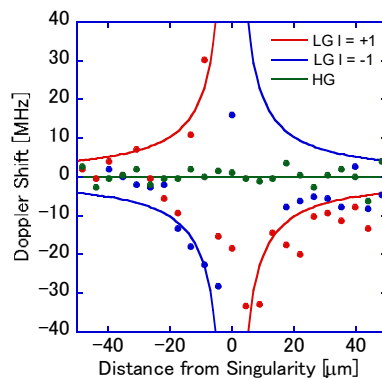


図 4 光渦吸収分光法で観測した方位角ドップラーシフト。

【光渦吸収分光法および飽和吸収分光法の開発】

放電管に沿ったガス流に対して 45° 傾けた方向で平面波を用いた通常の飽和吸収分光を行いガス流速の校正を行った。光渦をガス流に対して垂直な方向から入射し、光渦吸収分光および光渦飽和吸収分光を行った。光渦飽和吸収分光では、プローブ光に光渦、ポンプ光に平面波を用いた。図 4 に光渦吸収分光によって得られた方位角ドップラーシフトの位相特異点からの距離依存性、図 5 に光渦飽和吸収分光によって得られた Lamb Dip シフトの位相特異点からの距離依存性を示す。いずれも位相特異点からの距離に反比例する傾向は見られたが、シフト量が理論値よりも大きく、ばらつきも大きい結果となった。今後、光学系の更なる安定化等の改良を進める予定である。

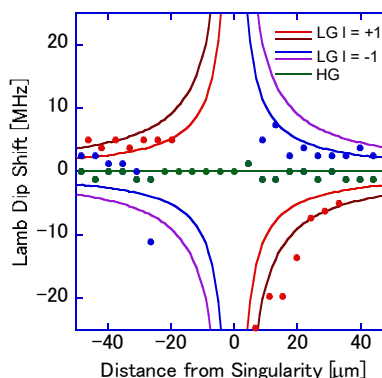


図 5 光渦飽和吸収分光法で観測した Lamb dip のシフト。

【光渦 LIF 法の開発】

弱発散型磁場配位をもつ HYPER-I 装置では、磁力線方向へ超音速のイオン流れが存在する。光渦 LIF 法の開発では、このイオン流を測定することを目的とした。電気光学変調器 (EOM) を用いてレーザー光を高周波変調しロックイン検出することで、シングルパスでの吸収が見えない準安定状態のイオンを測定対象粒子とすることが可能となる。図 6 に試験的にトポロジカルチャージが 1 の光渦を用いて観測した光渦 LIF スペクトルを示す。LIF 信号をロックイン検出しているため、空間分解能を持つ

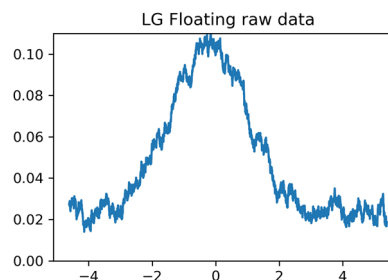


図 6 光渦 LIF スペクトル。

た画像測定は困難であり、光渦全体からの LIF 信号を積分してスペクトルを得ている。方位角ドップラーシフトの効果は位相特異点近傍で光強度が低下している領域で大きくなるため、LIF 信号への寄与が小さく、積分値では十分な効果を観測することが出来ていない。そこで、より大きな方位角ドップラーシフトの効果を得るため、トポロジカルチャージが大きな光渦を用いることを計画し、数値解析を行った。図 7 にトポロジカルチャージが 10 の場合の光渦 LIF スペクトルの数値計算の結果を示す。この結果から、積分値であっても高次の光渦を用いることで、方位角ドップラーシフトの効果を十分に観測できることが示されたため、高次の光渦光源を開発した。今後、この光源を用いた光渦 LIF 測定を行っていく予定である。

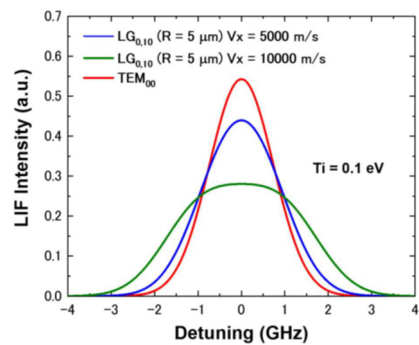


図 7 高次の光渦による LIF スペクトル。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Emika ABE, Kenichiro TERASAKA, Shinji YOSHIMURA, Mitsutoshi ARAMAKI and Masayoshi Y. TANAKA	4. 巻 14
2. 論文標題 Observation of axial neutral-gas flow reversal in an ECR plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 1201066
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Takumi HADA, Toshiki IKEDA, Mika YOSHIDA, Katsuhisa KITANO, Kei SHINADA, Mitsutoshi ARAMAKI	4. 巻 14
2. 論文標題 Propagation of plasma bullet in impurity-controlled working gas: from standard to ultrapure atmospheric pressure plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Plasma and Fusion Research	6. 最初と最後の頁 3406068
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 2件/うち国際学会 5件）

1. 発表者名 荒巻光利, 山本将来, 皆川裕貴, 田中樹, 吉村信次, 寺坂健一郎, 森崎友宏
2. 発表標題 光渦吸収の空間分布と速度空間における粒子分布の関係
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 皆川裕貴, 小林弘和, 吉村信次, 寺坂健一郎, 森崎友宏, 荒巻光利
2. 発表標題 光渦吸収分光におけるビーム品質がスペクトル形状に及ぼす影響
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 寺坂健一郎, 松尾拓実, 吉村信次, 荒巻光利, 田中雅慶
2. 発表標題 非正常現象に対する中性粒子効果検証のための時間分解 LIF 計測
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 皆川裕貴, 小林弘和, 吉村信次, 寺坂健一郎, 森崎友宏, 荒巻光利
2. 発表標題 光渦吸収分光における回折の影響とスペクトル形状の評価
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 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 M. Aramaki, M. Yamamoto, S. Yoshimura, K. Terasaka, T. Morisaki
2. 発表標題 Development of Optical Vortex Doppler Spectroscopy: Azimuthal Doppler Shift and Phase Gradient
3. 学会等名 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Aramaki, M. Yamamoto, S. Yoshimura, K. Terasaka, T. Morisaki
2. 発表標題 Application of optical vortex to gas flow measurement in plasma
3. 学会等名 The 37th JSST Annual International Conference on Simulation Technology (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Mitsutoshi Aramaki, Masaki Yamamoto, Hirokazu Kobayashi, Shinji Yoshimura, Kenichiro Terasaka, Tomohiro Morisaki
2. 発表標題 Diffraction effect on spectral line shape of optical vortex Doppler absorption spectroscopy
3. 学会等名 60th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics Co-Located with the 71st Annual Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 荒巻光利, 山本将来, 小林弘和, 吉村信次, 寺坂健一郎, 森崎友宏
2. 発表標題 光渦吸収分光における局所吸収に対する回折の効果
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 山本将来, 小林弘和, 吉村信次, 寺坂健一郎, 森崎友宏, 荒巻光利
2. 発表標題 光渦吸収分光における回折の影響
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第35回年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本将来, 吉村信次, 森崎友宏, 寺坂健一郎, 荒巻光利
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 M. Aramaki
2. 発表標題 Inevitable Limitation of Plane Wave Laser Spectroscopy, and a Solution by Using Structure of Light
3. 学会等名 1st Asia-Pacific Conference on Plasma Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Yoshimura, M. Aramaki, K. Terasaka, M. Y. Tanaka
2. 発表標題 Additional Doppler shift in absorption spectrum obtained by laser absorption spectroscopy using optical vortex beams
3. 学会等名 18th Laser Aided Plasma Diagnostics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 光渦飽和吸収分光におけるLamb dipの周波数シフト
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 荒巻光利, 山本将来, 吉村信次, 寺坂健一郎, 森崎友宏
2. 発表標題 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
3. 学会等名 Plasma Conference 2017
4. 発表年 2017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
研究分担者	北野 勝久 (Kitano Katsuhisa) (20379118)	大阪大学・工学研究科・准教授 (14401)	
研究分担者	吉村 信次 (Yoshimura Shinji) (50311204)	核融合科学研究所・ヘリカル研究部・准教授 (63902)	
研究分担者	寺坂 健一郎 (Terasaka Kenichiro) (50597127)	九州大学・総合理工学研究院・助教 (17102)	

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
---------	---------