

令和 3 年 6 月 6 日現在

機関番号：32665

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K18771

研究課題名(和文)速度空間トモグラフィーによる速度分布関数のリアルタイム測定法の開発

研究課題名(英文)Development of real-time measurement method of velocity distribution function using velocity-space tomography

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) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で提案する速度空間トモグラフィー法は、光渦の励起体積が速度空間で異なる傾きを持って分布することを利用しており、パラメータ掃引を必要としない初めての速度分布関数測定法である。光渦の励起体積の配位はビーム断面内の位置に依存するため、吸収分光に用いると必然的に不均一に吸収される。欠陥構造を持つ光渦は伝搬に伴い構造が回転することが報告されており、不要な伝搬による構造変化を抑えると共に、プラズマ中を伝搬することによる構造変化を正確に観測する必要がある。本研究では、速度空間トモグラフィー法の基礎となる、吸収体を伝搬する光渦の特性を明らかにし、吸収により欠陥構造を持った光渦に対する測定系を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

プラズマの研究に限らず、物理系のダイナミクスを研究するあらゆる分野において、対象の速度分布関数は現象を理解する鍵となる。従来の速度分布関数測定では、何らかのパラメータ掃引に対する物理系の応答を利用するため、原理的にリアルタイム測定は不可能であった。本研究で提案する速度空間トモグラフィー法は、光渦の励起体積が速度空間で異なる傾きを持って分布することを利用しており、原理的にパラメータ掃引を必要としない初めてのリアルタイム速度分布関数測定法である。本研究では、速度空間トモグラフィー法の基礎となる、吸収体を伝搬する光渦の特性を明らかにし、吸収により欠陥構造を持った光渦に対する測定系を構築した。

研究成果の概要(英文)：The phase space tomography method proposed in this study utilizes the fact that the excitation volume of the optical vortex is distributed with a different angle in the velocity space and is the first velocity distribution function measurement method that does not require parameter sweeping. Since the configuration of the excitation volume of the optical vortex depends on the position in the beam cross-section, it is inevitably absorbed non-uniformly when applied for absorption spectroscopy. It has been reported that defected optical vortex rotates with propagation, and it is necessary to suppress structural changes due to unnecessary propagation and accurately observe structural changes due to propagation in plasma. In this study, we clarified the characteristics of the optical vortex propagating in the plasma, which is the basis of the velocity space tomography method. We also constructed a measurement system of the optical vortex with a defective structure by absorption.

研究分野：プラズマ分光

キーワード：光渦 速度空間トモグラフィー プラズマ分光

1. 研究開始当初の背景

近年、光科学の分野で開発された光渦とは、図1(a)に示すように進行方向にらせん状の等位相面をもつ伝搬モードの光のことで、進行方向に垂直な断面では中心の位相特異点に起因するドーナツ型の強度分布をもつ(図1(b)). 詳しくは後述するが、光渦は原子との相互作用において速度空間を扇形に覆う励起体積配位をもつという特徴がある. 速度空間で異なる配位にある励起体積は、実空間では、それぞれ光渦ビーム断面の円座標上の異なる位置にマッピングされる. 従って、吸収体を透過した光渦を画像計測して吸収率分布を求めることで、速度空間で異なる配位をもつ励起体積内の粒子密度を一度に取得することができる. これは、実空間におけるトモグラフィーに対応する測定を速度空間で行ったことを意味しており、速度空間トモグラフィー法と名付けた. 速度空間トモグラフ像を逆変換することで、速度空間における密度分布(速度分布関数)が得られる. この分光法は波長掃引を伴わないため、速度分布関数をリアルタイムで測定することができる. この測定法が確立されれば、プラズマ中の不安定性や乱流研究に非常に大きなインパクトを与えるとともに、他の研究分野への波及効果も大いに期待できる.

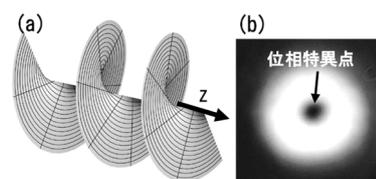


図1 光渦の(a)等位相面と(b)ビーム断面の光強度分布.

2. 研究の目的

本研究は空間位相構造を制御した光を利用して、粒子系の速度分布関数をリアルタイムで測定する分光法の開発を目的としている.

プラズマの研究に限らず、物理系のダイナミクスを研究するあらゆる分野において、対象の速度分布関数は現象を理解する鍵となるため、様々な測定法が開発されている. 従来の速度分布関数測定では、波長や電圧等、何らかのパラメータ掃引に対する物理系の応答を利用するため、原理的にリアルタイム測定は不可能であった. 本研究で開発する速度空間トモグラフィー法は、原理的にパラメータ掃引を必要としない初めてのリアルタイム速度分布関数測定法である.

3. 研究の方法

光渦のドップラーシフト δ は、微小項を無視すると円筒座標系で $\delta = -kV_z - (\ell/r)V_\phi$ と表わされる (V_z, V_ϕ : 光の伝搬方向および方位角方向の速度, k : 波数, ℓ : 等位相面のねじれを表すトポロジカルチャージ, r : 位相特異点からの距離). 平面波のドップラーシフトは $-kV_z$ で表わされるので、その励起体積は V_z 軸に垂直な配位となる(図2(a)). 一方、光渦のドップラーシフトには $-(\ell/r)V_\phi$ という方位角速度に依存する項が加わるので、励起体積が速度空間で傾いた平面として定義される(図2(b)). 方位角方向ドップラーシフトの項が r に反比例しているため、励起体積の速度空間中での傾きは図3(a)に示すようにビーム中心からの距離に依存して変化する. 図3(a)①~④に示した励起体積に対応する実空間の位置をビーム断面に示したのが図3(b)である. この図が示すように、光渦の実空間での2次元吸収分光計測によって、速度空間に分布する各励起体積内の粒子密度を一度に取得することができる. 光渦の速度空間中の励起体積配位は、実空間で行われる通常のトモグラフィー測定のビーム配位に対応している. 従って、既に確立された実空間のトモグラフ像解析法によって速度空間トモグラフ像を解析し、速度分布関数の速度空間での構造をリアルタイムに可視化することができる. 本測定法では、測定対象の速度空間は光渦の中心 $100 \mu\text{m}$ 程度の領域にマッピングされる. この大きさはイオンや中性原子が関わるプラズマ中の構造よりも十分小さいため、本方法による V_ϕ ベクトルの測定は、デカルト座標系における V_x, V_y の測定と近似的に等価となる. 従って、速度空間トモグラフィー測定では速度空間の3次元分布が

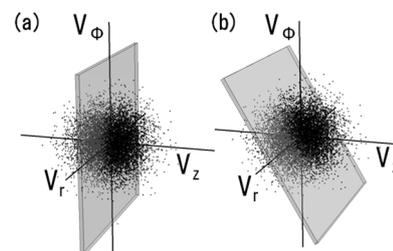


図2 速度空間における粒子分布と(a)平面波の励起体積, (b)光渦の励起体積.

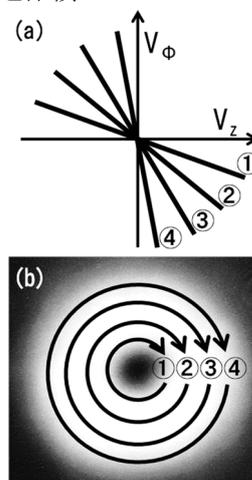


図3 (a) 速度空間中の励起体積分布と(b)対応する実空間領域

得られることになる。本研究で用いた実験系を図4に示す。光源には外部共振器型ダイオードレーザー (ECDL) を用いる。光渦トモグラフィーでは、強度および位相の空間モード純度が高い高精度な光渦が必要となる。そのため、ECDL の出力をシングルモードファイバおよびピンホールを通すことでビーム品質を向上させ、1/4 波長板と光渦リターダを用いて光渦へと変換する。プラズマで吸収された光渦の空間分布は 4f 光学系で CMOS カメラに転送され、記録される。

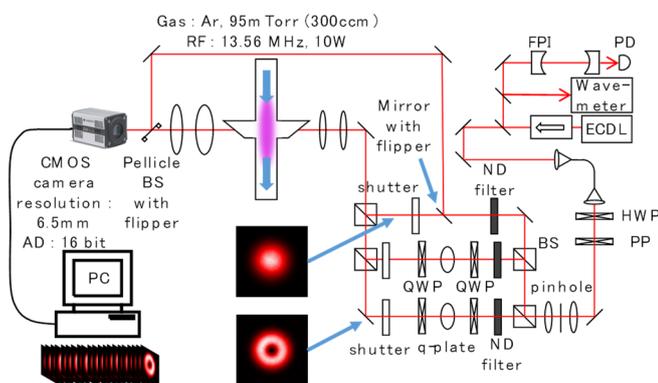


図4 光渦トモグラフィーの実験系

4. 研究成果

光渦トモグラフィーでは、ビーム断面内の吸収率分布から速度空間分布を求めるため、プラズマによって吸収を受けた光渦の光学的な理解が重要となる。図5は、本研究を開始した当初に図4とは異なる実験系を用いて行った光渦吸収分光で得られた吸収率分布である。レーザーの光路を右から左に横切るガス流があるプラズマに光渦を導入して吸収分光を行い、特異点近傍の約 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ の範囲を拡大して表示している。この測定では、(1) 負の吸収率が観測される領域がある、(2) 吸収率分布の構造が傾いている、という2点において当初想定していた単純な吸収分光では説明できない結果を得た。

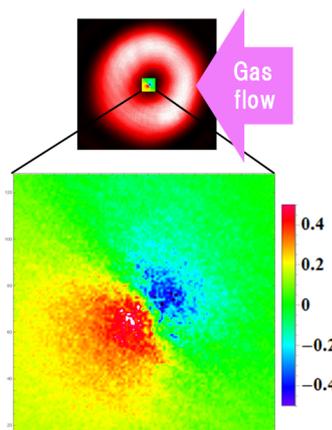


図5 光渦吸収分光による吸収率分布

通常のレーザー吸収分光に用いるガウシアンビームと本研究で用いる光渦では、伝搬に伴うグイ位相変化に大きな違いがある。光渦のグイ位相は、一般的なグイ位相にラゲール・ガウシアン (LG) モードの次数に依存した $2p + |l| + 1$ という係数が掛かる。本研究では、 $p = 0, l = \pm 1$ の光渦を測定に用いているが、ECDL のビーム形状はガウシアンビームとして高品質ではないため、光渦に変換する際に容易に高次の LG モードが混入する。一方で、ビームに

垂直な流れがあるプラズマの吸収分光に光渦を用いた場合、図6(a)に示すように吸収率が空間的に非一様なため、必然的に高次の LG モードが生成される。前者の高次の LG モードは不要な成分のため、空間フィルタでビーム品質を向上させることで可能な限り排除した。一方で、後者の高次 LG モードは、本研究で測定を目指しているプラズマによる吸収で生成された成分であり、その構造を正しく観測する必要がある。吸収体や遮蔽物によりビームの一部が欠損した光渦は高次の LG モードの重ね合わせで表わされる。伝搬に伴って各次数成分が異なるグイ位相変化をすることで、欠陥構造が回転することが報告されている。光渦の焦点からレイリー長の範囲で光渦が吸収され伝搬した場合の吸収率分布を図6(b)に示す。吸収率の空間構造が $\pi/4$ 回転する現象が再現されている。回転角度は、吸収が起こった位置に依存しているため、光渦吸収分光法は伝搬方向の吸収が起こった位置を検出できることを示している。一旦生成された欠陥構造は、プラズマを出たあとも伝搬に伴って回転を続けるため、4f 光学系の焦点はプラズマ源の窓の位置に合わせてあり、プラズマ外での構造回転を排除してカメラに記録している。このような予備実験の結果を取り入れて開発されたのが、図4の実験系である。これにより、負の吸収率は観測されなくなり、構造の回転角度についても定量的な評価が可能となった。図7(a), (c)に図4の実験系で観測した方位角ドット

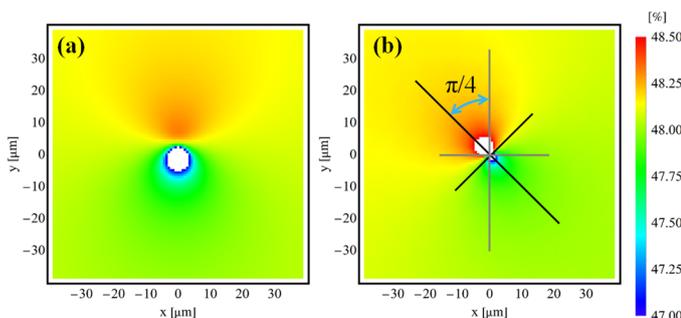


図6 光渦吸収分光による吸収率分布の理論計算。(a) 伝搬の効果を見ない、(b) 伝搬の効果を検討。

ラーシフトの空間分布，図7(b)，(d)に角スペクトル法による数値計算で得られた方位角ドップラーシフトの分布を示す．図7(a)，(b)はトポロジカルチャージが+1，図7(c)，(d)はトポロジカルチャージが-1の光渦における結果である．方位角ドップラーシフトの構造は，トポロジカルチャージの符号とともに反転し，傾きも数値計算とほぼ一致している．これらの結果は，光渦の伝搬特性まで考慮した光渦吸収分光測定系が開発できたことを示している．今後は，レーザー波長を吸収中心から僅かに離調させて測定した吸収率分布を解析することで，速度空間での粒子分布へと変換する解析プログラムの整備を進める計画である．また，本研究ではプラズマ中の中性ガス流を主な測定対象として開発を進めたが，より流速の早いイオン流を用いた研究を進めるための高密度ヘリコン波プラズマ装置の開発も進めており，プラズマ中の複数粒子種に対する速度空間トモグラフ測定へと展開していくことを計画している．

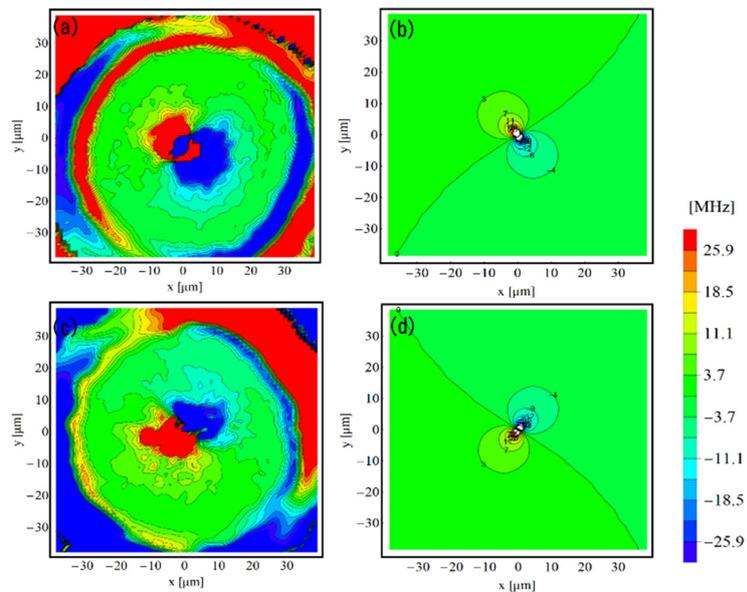


図7 光渦吸収分光による方位角ドップラーシフト分布．
 (a) $l=+1$ の観測結果，(b) $l=+1$ の理論計算，(c) $l=-1$ の観測結果，(d) $l=-1$ の理論計算．

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15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 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

1. 発表者名 山本将来, 吉村信次, 森崎友宏, 寺坂健一郎, 田中雅慶, 戸田泰則, 荒巻光利
2. 発表標題 光渦分光における横ドップラーシフトの検出
3. 学会等名 プラズマ科学のフロンティア2017研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

荒巻研究室ホームページ http://aramaki-lab.ee.cit.nihon-u.ac.jp/index.html

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