

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：32665

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K20914

研究課題名（和文）ゴーストイメージング吸収分光法による速度分布関数の3次元測定法の開発

研究課題名（英文）Development of three-dimensional measurement method of velocity distribution function by using ghost imaging absorption spectroscopy

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） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：吸収分光法には光の伝播路で積分された情報しか得られないという欠点がある。本研究では、ゴーストイメージングが構造化照明と受光信号の相関を利用していることに着目し、構造化照明の結像面に相関を局在化させることで吸収分光に3次元の空間分解能を持たせるとともに、再結合プラズマの測定へと応用することを目的としている。本研究で結像系を備えたゴーストイメージング吸収分光システムを開発した。疑似吸収体を用いた原理実証実験により、このシステムが吸収分光でありながら視線方向に分解能を有することを示した。また、高密度ヘリコン波プラズマ実験装置に適用し、準安定ヘリウム原子のゴーストイメージング吸収分光測定を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した技術は、ゴーストイメージングの構造化照明に結像系を導入し、視線方向に分解能を持つ吸収分光測定を可能にしている。人体や建築物の診断など、空間的な広がりを持つ物体の内部構造を可視化する需要は非常に高いと考えられる。今回開発した新しい可視化技術は、プラズマ診断にとどまらず、将来的には多くの分野での応用が期待される。この技術により、詳細な内部構造の解析が可能となり、特に医療や建築、材料科学などの分野で活用される可能性がある。

研究成果の概要（英文）：Absorption spectroscopy has the disadvantage of only obtaining information about the absorber integrated over the light propagation path. In this study, we focus on the fact that ghost imaging relies on the correlation between structured light and absorbed light intensity. Our aim is to develop a novel absorption spectroscopy method with three-dimensional spatial resolution by localizing the correlation on the imaging plane of structured light and applying it to the measurement of recombining plasma. We developed a ghost-imaging absorption spectroscopy system equipped with an imaging system. In a proof-of-principle experiment using a test target, we demonstrated that this system has resolution in the line-of-sight direction, despite being an absorption spectroscopy method. Additionally, we applied it to a high-density helicon wave plasma experimental device and performed ghost-imaging absorption spectroscopy measurements of metastable helium atoms.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：ゴーストイメージング シングルピクセルイメージング プラズマ分光

1. 研究開始当初の背景

これまでにレーザー誘起蛍光法や吸収分光法、トムソン散乱計測法等を用いて、プラズマ中の原子・イオン・電子の速度分布関数の測定を行ってきた。速度分布関数の分光計測は、様々なプラズマ研究において現象の理解に重要な役割を果たしてきたが、核融合実験装置やプラズマプロセス装置等、明確な目的があつて設計された装置においては、利用できる光路に対する制限が強く、測定できるパラメータが限られることがしばしばある。このような現状を打開するため、ドップラー分光法の高機能化の可能性について検討してきた。そうした中、情報ホトニクス分野で開発されたゴーストイメージングが構造化照明と受光信号の相関を利用していることに着目し、構造化照明の結像面を制御することで吸収分光に3次元の空間分解能を持たせる着想を得た。現時点でゴーストイメージングをプラズマ分光に導入した事例はなく、国内外で初の試みである。

2. 研究の目的

本研究は、ゴーストイメージング法を吸収分光に導入し、3次元の空間分解能を有するドップラー吸収分光法を開発することを目的としている。

光の吸収から物質の濃度を得る吸収分光法は、プラズマに限らず、さまざまな分野において簡便な測定法として用いられている。近年では、狭帯域の波長可変レーザーを用いたドップラー分光法の測定が可能となり、密度に加えて流れや温度も測定できるようになってきている。このように吸収分光法は科学研究における重要な測定法の1つとして確立しているが、光の伝播路で積分された情報しか得られないという大きな欠点がある。特にプラズマのように物理量が空間的に大きく変化し、それによって様々な現象が駆動されている系の研究においては、空間分解能を持つ簡便な測定法が渴望されている。本研究で提案するゴーストイメージング吸収分光法が確立されれば、プラズマ全体にわたるような大きな3次元構造を容易に観測することが可能となるとともに、他の研究分野への波及効果も大いに期待できる。

3. 研究の方法

ゴーストイメージング吸収分光法の原理

ゴーストイメージングとは、2次元撮像デバイスを用いることなく、空間的に分解能を持たない点型光検出器を用いて2次元画像を得る手法である。ゴーストイメージングの基本的な測定系を図1(a)に示す。ランダムな光強度分布 $I_r(x, y)$ を持つ構造化照明を生成する。この構造化照明をプローブ光として、透過率分布 $T(x, y)$ の測定対象に照射する。透過光をレンズで集光(空間積分)してフォトダイオード等の点検出器で積分値 b_r を測定する。 $I_r(x, y)$ の構造をランダムに変化させながらこの過程を繰り返し、測定対象の透過率分布像 $T(x, y)$ を得るのがゴーストイメージングの原理である。 $\langle \dots \rangle$ を r に関するアンサンブル平均とすると、以下の演算で $T(x, y)$ が得られる。

$$T(x_2, y_2) = \frac{\langle b_r I_r(x_2, y_2) \rangle - \langle I_r(x_2, y_2) \rangle \langle b_r \rangle}{|\langle I_r(x_2, y_2) \rangle|^2} \quad (1)$$

このように、点検出器で b_r を測定して $I_r(x_2, y_2)$ との相関計算によって吸収率分布 $T(x_2, y_2)$ を得るのがゴーストイメージングの測定原理である。本研究では、コンピュータと投影機によって生成されたランダムな古典的構造化照明を用いる計算機ゴーストイメージング法を吸収分光法に導入する。計算機ゴーストイメージングでは照明の空間構造が既知のため、リファレンス光を観測する必要がなく、点検出器によるプローブ光の観測のみで2次元画像が得られる。本研究では構造化照明に結像系を導入するため、照明が所望の構造で結像するのは結像面前後の被写界深度内に限定される(図1(b))。従って、この光源をゴーストイメージング吸収分光法に適用した場合、照明の空間構造との相互相関によって被写界深度内で吸収された成分のみが抽出され、視線方向に空間分解能を持った観測が可能となる。

4. 研究成果

図2(a)に試作したゴーストイメージングの光学系を示す。レーザー光は光ファイバで運ばれた後、拡散板によってインコヒーレント光に変換されてDMDに照射される。本研究では、10.8

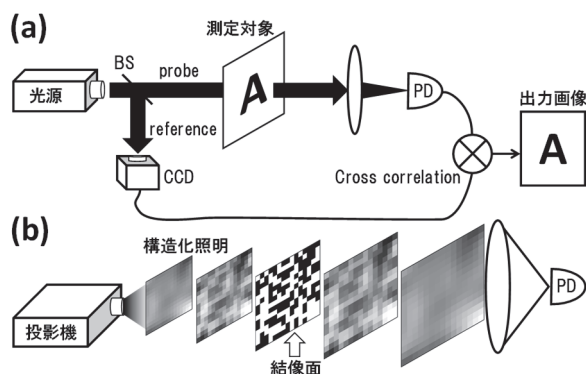


図1 (a)ゴーストイメージングの測定系, (b)結像系により空間分解能を持たせた構造化照明。

$\mu\text{m} \times 10.8\mu\text{m}$ のマイクロミラーが 1280×800 個集積された DMD を用いる. このマイクロミラーの角度を個別に制御することで, 所望の空間構造を持つ構造化照明を生成することが出来る. DMD によって生成された構造化照明は, $\phi = 75\text{mm}, f = 100\text{mm}$ のレンズを用いた 1 対 1 の結像系で結像される. 原理実証実験では, アクリル板に「P」と印字したテスト吸収体を結像面に配置した (図 2(b)). 構造化照明は, テスト吸収体を透過した後, 2 枚のレンズで集光されフォトダイオード (PD) によって強度の空間積分値が測定される. ランダムな構造化照明を PC で数万枚生成して DMD に転送し, 切り替える毎に PD で透過光強度を測定して (1) 式の演算を行うことで吸収体の画像が得られる.

ゴーストイメージング吸収分光法の視線方向における空間分解能を実証するため, 図 3 に示すように結像面に「P」と印字した吸収体を配置し, 光路上で結像面から離れた位置に「Q」と印字した吸収体を配置して測定を行った. 構造化照明は, 「P」および「Q」の 2 枚の吸収体で吸収されたのちに, PD で測定されている. 通常の吸収分光であれば光路上の吸収の影響が全て結果に反映されるため, 「Q」および「P」の文字が重なって画像化される. 図 4 に「Q」の位置を変えてゴーストイメージング吸収分光測定した結果を示す. 図 4(a)では, 結像面から 50mm の位置に「Q」を配置しているが, 再構成画像では「P」のみが画像化されている. このことは結像面から 50mm 程度離れると十分に構造化照明のコントラストが低下し, (1) 式の相関計算でその領域の吸収の情報が除去されて結像面の吸収体の構造だけが画像化されたことを意味している. 一方で, 図 4(b), (c)では 20mm および 10mm の位置に「Q」が配置されており, 再構成画像でも「P」, 「Q」の両方が画像化されている. これらの結果より, 図 2(a)のゴーストイメージングシステムでは, 視線方向に数 cm 程度の空間分解能があることが確認できた. この視線方向の空間分解能は結像系の NA を変更することによって制御できると考えられる.

開発したゴーストイメージング吸収分光システムを, 高密度ヘリコン波プラズマ実験装置に適用した. プラズマは 13.56MHz, 500W の高周波電力をヘリカルアンテナに印加することで生成されている. ガス種はヘリウム

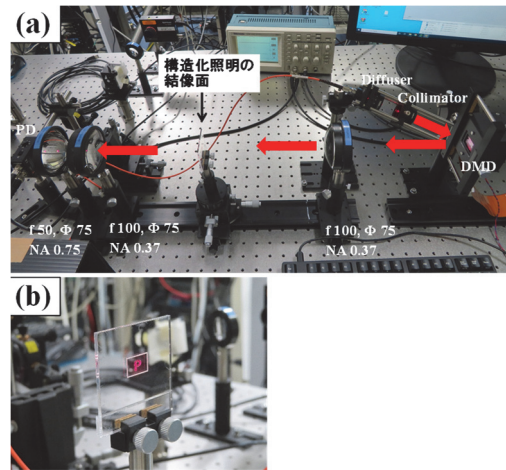


図2 (a)ゴーストイメージングの光学系, (b)原理検証に用いた吸収体.

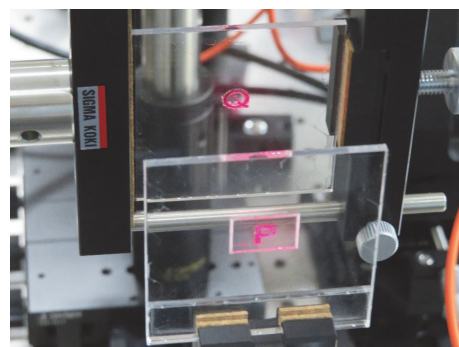


図3 視線方向空間分解能検証

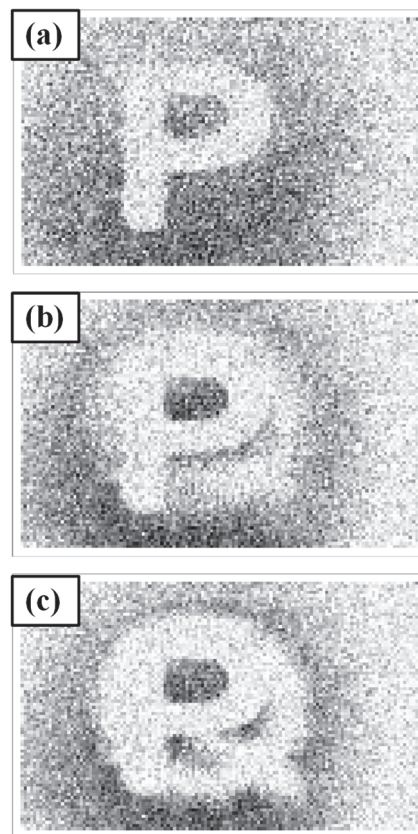


図4 視線方向分解能検証の検証. 結像面から「Q」吸収体の距離, (a) 50mm, (b) 20mm, (c) 10mm.

で、磁場配位は約 600G で一様とした。準安定ヘリウム原子の 1083nm の遷移による吸収を測定する。このため、構造化照明を生成するための光源として 1083nm の DFB レーザーを用いる。DFB レーザーの波長を 276.73THz (1083.32nm) に固定して、ゴーストイメージング吸収分光測定を行った。図 5(a)に測定したプラズマ終端板近傍の拡大画像と測定領域を示す。測定範囲は 27mm×17 mm の赤枠内である。準安定ヘリウム原子の空間分布を可視化するため、プラズマの有無で透過光強度分布を測定した。図 5(b)にプラズマが生成されていない場合の透過率分布を示す。白色は透過光強度が低い領域を示しており、黒い領域は透過光強度が高い部分を示している。横軸および縦軸は 100 μm を単位として表示されている。400 μm 以下の白い部分が終端電極を表しており、その右側は吸収がないため透過光強度が高くなっている。周辺部で透過光強度が低くなっているのは、光学系によって集光しきれなかった領域と考えられる。図 5(c)にプラズマ生成時の透過光強度分布を示す。終端板まで到達しているプラズマによって準安定ヘリウム原子が生成されるため、終端板よりも上流の領域で全体的に透過光強度が低下している。図 5(b), (c)から求めた吸収率の空間分布を図 6 に示す。終端板近傍では吸収率は非常に小さくなっており、装置上流に向かって吸収率が上昇している。このことは、装置上流でプラズマ密度が高く、終端板表面で消滅するプラズマの分布と整合性のある結果であり、ゴーストイメージング吸収分光法によって吸収率分布が可視化できたことを示している。

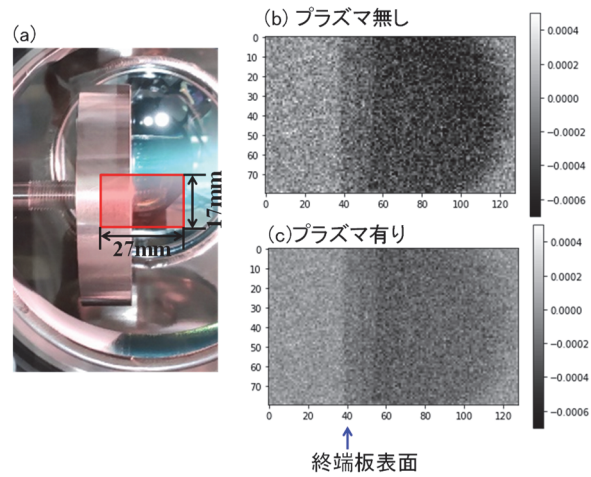


図 5 (a)ゴーストイメージング吸収分光による測定領域, (b) RF 電力 OFF 時の透過光分布, (c) RF 電力 ON 時の透過光分布。

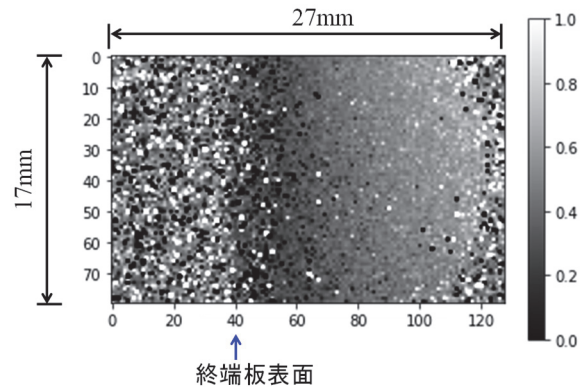


図 6 終端板前面における吸収率分布。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 山口一樹, 藤村哲也, 大館暁, 長壁正樹, 荒巻光利
2. 発表標題 ゴーストイメージング吸収分光法のための高速データ処理プログラムの開発
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第39回 年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Aramaki
2. 発表標題 Fundamental plasma research by using high-precision spectroscopy techniques
3. 学会等名 International Workshop on High Energy Science and Related Research (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荒巻光利, 福田一貴
2. 発表標題 ゴーストイメージング吸収分光法の視線方向分解能の検討
3. 学会等名 物理学会 第77回 年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荒巻光利
2. 発表標題 ゴーストイメージング技術のプラズマ分光への展開
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第38回 年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒巻光利, 福田一貴
2. 発表標題 ゴーストイメージングのプラズマ吸収分光法への導入に関する検討
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福田一貴, 荒巻光利
2. 発表標題 ゴーストイメージング吸収分光法のための構造化照明の開発
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会 第37回 年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryusei Koyama, Mitsutoshi Aramaki
2. 発表標題 Visualization of metastable helium distribution using ghost imaging absorption spectroscopy
3. 学会等名 Global Plasma Forum
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mitsutoshi Aramaki, Ryusei Koyama
2. 発表標題 Development of Ghost Imaging Absorption Spectroscopy
3. 学会等名 20th International Symposium on Laser-Aided Plasma Diagnostics (国際学会)
4. 発表年 2023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
研究分担者	大野 哲靖 (OHNO Noriyasu) (60203890)	名古屋大学・工学研究科・教授 (13901)	

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