

ゴーストイメージングによるプラズマ可視化の現状と課題

日大生産工 ○荒巻 光利

1. はじめに

本研究では、量子光学の分野で開発されたゴーストイメージングに相関領域の制御系を導入して吸収分光に応用することで、3次元の空間分解能を有する吸収分光法を開発している。

ゴーストイメージング吸収分光法は、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強力な測定法となる。本研究では、新しく開発したゴーストイメージング吸収分光法を、非接触プラズマの観測に適用することを計画している。非接触プラズマは、電離進行プラズマ中の電子およびイオンが拡散しながら中性原子・分子と相互作用することで冷却され、再結合断面積が増加することで生成される。従って、その生成メカニズムの理解には電離進行領域から再結合領域へ至るプラズマの3次元空間構造を明らかにすることが必須となる。また、ゴーストイメージング吸収分光法には「測定領域の拡張性」、「2次元撮像デバイスを用いない2次元像の取得」といった特徴があり、この新たな分光法が確立されれば将来的に強力な測定法と成り得る。本講演では、ゴーストイメージング吸収分光法の開発状況と課題について報告する。

2. 計算機ゴーストイメージングの原理

計算機ゴーストイメージングの基本的な測定系を図1に示す。ゴーストイメージングでは、空間分解能を持たない点型光検出器を用いて2次元画像が得られる。計算機で生成した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

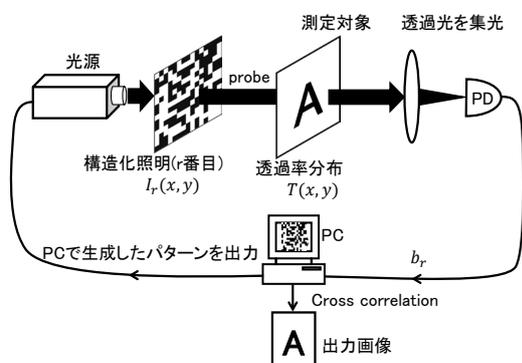


図1 ゴーストイメージングの基本的な測定系。

$T(x, y)$ 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 $b_r (= \iint I_r(x, y) T(x, y) dx dy)$ 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以下の演算を行うことで $T(x, y)$ を得るのがゴーストイメージングである¹⁾。

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

ここで、 $\langle \dots \rangle$ はアンサンブル平均を表す。

本研究では、計算機ゴーストイメージングの構造化照明に結像系を導入することで、構造化照明と測定対象の相関関係を結像面に局在化させる。式(1)の相関計算により、構造化照明が結像している領域での吸収によって $T(x_2, y_2)$ が得られるため、吸収分光法に視線方向の空間分解能を持たせることができる。この手法はゴーストイメージングとしても初めての試みである。

3. 視線方向分解測定の実証

図2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、 $10.8 \mu\text{m} \times 10.8 \mu\text{m}$ 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。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

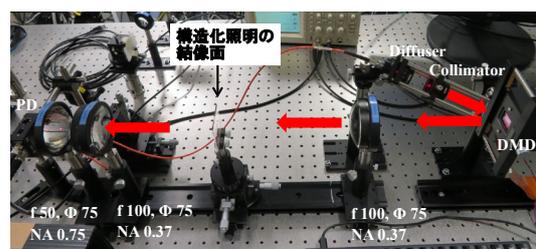


図2 ゴーストイメージングの光学系，(b)原理検証に用いた吸収体。

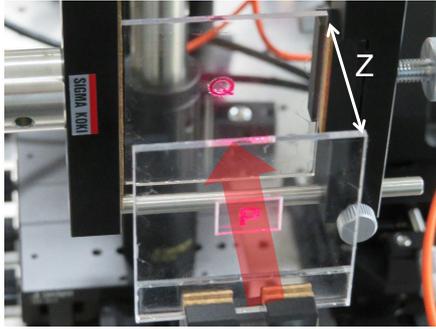


図3 視線方向空間分解能検証。

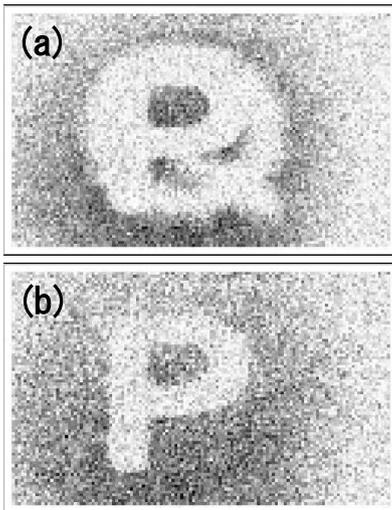


図4 視線方向分解能検証の検証. 結像面から「Q」吸収体の距離, (a) $z = 10\text{mm}$, (b) $z = 50\text{mm}$.

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。一方で, 図4(b)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。これらの結果より, 図2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。



図5 高密度ヘリコン波プラズマ実験装置。

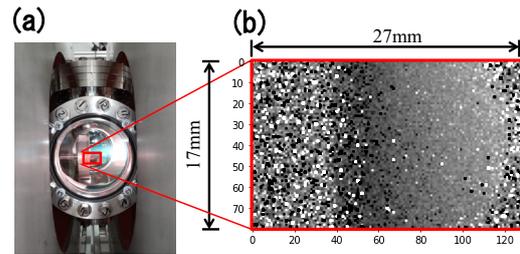


図6 高密度ヘリコン波プラズマ実験装置。

4. プラズマ分光への応用

開発したゴーストイメージング吸収分光システムを, 図5に示す高密度ヘリコン波プラズマ実験装置に適用した。図6(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 $27\text{mm} \times 17\text{mm}$ の赤枠内である。図6(b)にゴーストイメージングで可視化された準安定ヘリウム原子による吸収の空間分布を示す。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ることを示している。

5. まとめ

新たに開発したゴーストイメージング吸収分光システムの原理実証実験および高密度ヘリコン波プラズマへの試験的な適用実験に成功している。一方でコントラストの改善や測定時間の短縮等, 多くの課題が明らかになっている。講演では, これらの課題に対するAI技術の適用可能性について議論したい。

参考文献

- 1) J. H. Shapiro, Phys. Rev. A **78**, 061802(R) (2008).