

# ヘリコン波プラズマ中における準安定原子の ゴーストイメージング吸収分光による計測

日大生産工(院)    ○久我 昂大  
日大生産工        荒巻 光利

## 1. まえがき

エネルギー問題を解決し得る次世代のエネルギー源として、核融合発電の実現が期待され、国際的に盛んな研究が行われている。核融合炉の実現に向けた課題の一つに、核融合炉からのHe灰の排気を担う装置であるダイバータ板への熱負荷の制御があげられ、この熱負荷を理解し制御するには、ダイバータ近傍のイオン、電子、中性子からなるプラズマの複雑な振る舞いの空間分布を精密に計測する必要がある。位相空間の粒子の分布構造は、プラズマ中の様々な現象を駆動しており、その観測はプラズマ観測における重要な課題である。近年、空間分解能を持たないフォトダイオード等の点型光検出器を用いて空間情報を有する画像を取得するゴーストイメージング(GI)と呼ばれる技術が注目されている。また、光源にデジタルマイクロミラーデバイス(DMD)を使用することで簡単な光学系で実現出来る計算機ゴーストイメージング(CGI)がその後提案された。

我々はプラズマの吸収分光に計算機ゴーストイメージング(CGI)を導入することで、ヘリコン波プラズマ中の準安定原子の空間分布を高い時間分解能を画像化する分光法を開発したので、その初期データについて報告する。

## 2. 計算機ゴーストイメージング

### 2.1 計算機ゴーストイメージングの概要

Fig.1に、計算機ゴーストイメージングの基本的な測定系を示す。計算機ゴーストイメージングは、プローブ光としてPCで作成したランダムな光強度分布を持つパターンを構造化照明として用いる。測定対象を通過した光をレンズで集光することで空間積分された透過光となり、フォトダイオード等の点検出器でパターンごとの透過光強度として検出される。この得られる透過光強度と構造化照明の相関計算を行うことで測定対象の像を再構成することができる。

また、計算機ゴーストイメージングの利点として、フォトダイオードなどの点型光検出器を用いて画像を得るため、安価なセンサーを使うだけで済むことや構造化照明との相関を利用し画像を得るため、ノイズに強い特性がある。

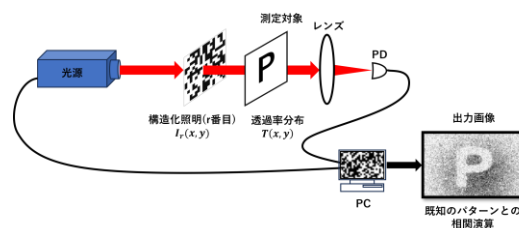


Fig.1 計算機ゴーストイメージングの概要

### 2.2 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において検出される透過光の空間積分を式(1)に表す。

$$b_r = \iint I_r(x,y)T(x,y)dx dy \quad (1)$$

ここで、 $I_r(x,y)$ は、 $r$ 番目に投影されたランダムパターンの光強度分布を示し、 $T(x,y)$ は、測定対象の透過率分布を示す。このことから、フォトダイオードで測定した値である光強度 $b_r$ は構造化照明 $I_r(x,y)$ と透過率分布 $T(x,y)$ の積を平面全体において合計した総量と一致する。

式(2)の $\langle \dots \rangle$ は、アンサンブル平均を表すものとする、

$$\begin{aligned} \langle b_r \rangle &= \langle \iint I_r(x_1,y_1)T(x_1,y_1)dx_1dy_1 \rangle \\ &= \iint \langle I_r(x_1,y_1) \rangle T(x_1,y_1)dx_1dy_2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \langle b_r I_r(x_2,y_2) \rangle &= \langle \iint I_r(x_1,y_1)T(x_1,y_1)dx_1dy_1 I_r(x_2,y_2) \rangle \\ &= \iint \langle I_r(x_1,y_1)I_r(x_2,y_2) \rangle T(x_1,y_1)dx_1dy_1 \end{aligned} \quad (3)$$

対象物の平面上 $(x_1,y_1)$ の構造化照明 $I_r(x_1,y_1)$ と透過光分布 $T(x_1,y_1)$ の積を空間積分する測定を行う。この測定を多数行い、その

Ghost imaging absorption spectroscopy  
of metastable atoms in a helicon wave plasma

Kodai KUGA and Mitsutoshi ARAMAKI

アンサンブル平均を取ることで相関を用いたイメージング技術となっている。

$I_r(x_1, y_1)$ の自己相関関数は、

$$\begin{aligned} \langle I_r(x_1, y_1) I_r(x_2, y_2) \rangle \\ = \langle I_r(x_1, y_1) \rangle \langle I_r(x_2, y_2) \rangle \\ + |\langle A^*(x_1, y_1) \rangle \langle A(x_2, y_2) \rangle|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 $A$ は光波の振幅で $I_r = AA^*$ の関係がある。

$$\begin{aligned} \langle b_r I_r(x_2, y_2) \rangle \\ = \iint (\langle I_r(x_1, y_1) \rangle \langle I_r(x_2, y_2) \rangle \\ + |\langle A^*(x_1, y_1) \rangle \langle A(x_2, y_2) \rangle|^2) T(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \\ = \langle I_r(x_2, y_2) \rangle \langle b_r \rangle \\ + \iint |\langle A^*(x_1, y_1) \rangle \langle A(x_2, y_2) \rangle|^2 T(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \\ = \langle I_r(x_2, y_2) \rangle \langle b_r \rangle \\ + |\langle A^*(x_2, y_2) \rangle \langle A(x_2, y_2) \rangle|^2 T(x_2, y_2) \end{aligned} \quad (5)$$

式(6)を変形すると、

$$T(x_2, y_2) = \frac{\langle b_r I_r(x_2, y_2) \rangle - \langle I_r(x_2, y_2) \rangle \langle b_r \rangle}{|\langle I_r(x_2, y_2) \rangle|^2} \quad (6)$$

構造化照明 $I_r(x, y)$ をランダムに変化させ演算することで透過率分布 $T(x, y)$ を得られる。

### 3. ゴーストイメージング吸収分光法

Fig.2に本研究で導入した結像系を導入したゴーストイメージング吸収分光を示す。

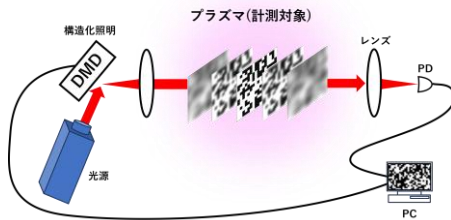


Fig.2 ゴーストイメージング吸収分光法

一般的なゴーストイメージングに用いられる構造化照明は結像面を持たないため、光路全体が測定対象となる。本研究では、結像系を導入することで、任意の結像面の情報を得ることが出来る。

### 4. 構造化照明

Fig.3にデジタルマイクロミラーデバイス(DMD)の動作原理を示す。CMOSセル上に格子状に配列した多数の可動式のマイクロミラー

の傾きを切り替えることで、光の照射を制御することができる表示素子である。

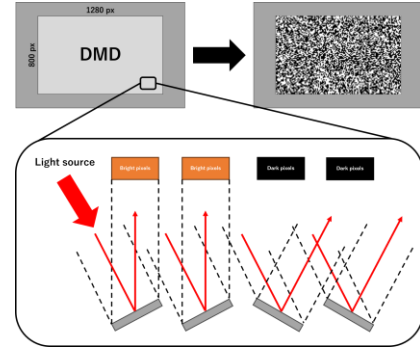


Fig.3 DMDの動作原理

構造化照明をFig.4に示す。今回使用したDMDのマイクロミラーは $1280 \times 800 px$ である。また、ピクセルビニングを $20 \times 20 px$ で行いピクセル間隔を $10 \times 10 \mu m$ としている。



Fig.4 構造化照明

## 5. 実験装置

### 5.1 ヘリコン波プラズマ実験

Fig. 5にヘリコン波プラズマ実験装置を示す。ヘリコン波プラズマ装置は、高周波電源装置からマッチングボックスを介してヘリカルアンテナに高周波電力を入力し、真空容器と接続された放電管内にプラズマを生成する。プラズマは、コイルによって生成された磁極線に従って輸送され、ダイバータ板を模擬したターゲットプレートに到達する。

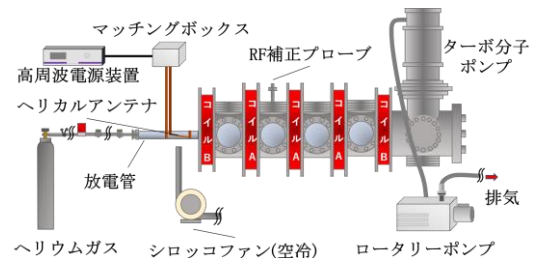


Fig.5 ヘリコン波プラズマ実験装置

## 5.2 GI実験装置

Fig. 6に設置したGI実験装置を示す．ヘリコン波プラズマ核融合学会実験装置内のプラズマ中の任意の結像面の情報を得る．

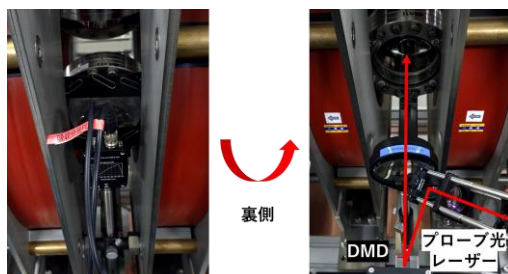


Fig.6 GI実験装置

## 6. 実験方法及び計測方法

レーザー波長 $1083.206\text{ nm}$ の光源を使用し，光ファイバーで伝送し，ディフューザーを用いてコヒーレント光に変換し，DMDに照射することで構造化照明を生成する．構造化照明は，レンズによってヘリコン波プラズマ内で結像面を持ち，集光された光はフォトダイオードで検出される．その後，フォトダイオードによって検出された光強度と構造化照明のランダムパターンとの相関計算を式(6)で行うことで，プラズマ中の任意の結像面での再構成画像を得ることができる．

ヘリコン波プラズマ実験装置は，Fig. 5において，ガス圧 $40\text{ mTorr}$ ，ガス流量 $300\text{ ccm}$ に一定に保ち，周波数 $13.56\text{ MHz}$ の高周波電源装置からマッチングボックスを介してヘリカルアンテナにRFパワー $1\text{ kW}$ を入力する．放電の繰り返し周波数は $50\text{ Hz}$ ，放電時間は $2\text{ ms}$ とした．

## 7. 実験結果および検討

本実験では，ヘリコン波プラズマ装置のプラズマ終端板付近における準安定ヘリウム原子のゴーストイメージング吸収分光法による計測を行い，パルス放電ヘリコン波プラズマのプラズマ終端板近傍における準安定ヘリウム原子の吸収率分布の時間変化の画像を得た．Fig.7に放電開始後，放電開始( $0\text{ }\mu\text{s}$ )，プラズマ立ち上がり( $50\text{ }\mu\text{s}$ )，放電安定後( $1000\text{ }\mu\text{s}$ )，放電終了後 $500\text{ }\mu\text{s}$ のアフターグロー( $2500\text{ }\mu\text{s}$ )の終端板近傍の再構成画像を示す．

パルスヘリコン波プラズマで時間変化を計測した．このとき時間分解能は $2\text{ }\mu\text{s}$ である．

計測の結果，ヘリコン波プラズマ装置のプラズマ終端板近傍における準安定ヘリウム原子

の吸収率分布の時間変化をゴーストイメージング吸収分光によって得られた．

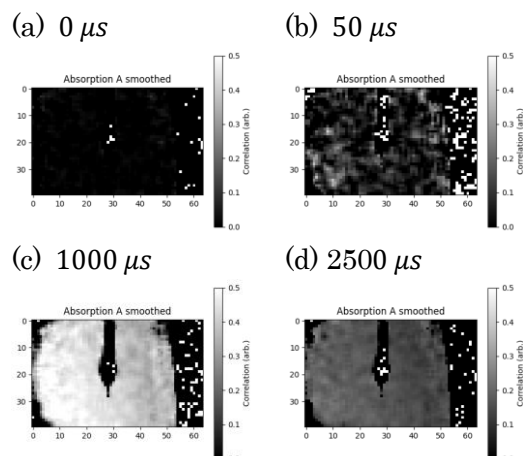


Fig.7 準安定ヘリウム原子の吸収率分布の時間変化

## 8. まとめ

ゴーストイメージング吸収分光法を用いて，プラズマ終端板近傍における準安定原子の吸収率分布の時間変化を時間分解能 $2\text{ }\mu\text{s}$ で再構成画像として得た．この計測法によってパルスヘリコン波プラズマ中の準安定原子を高速に2次元計測することが可能になった．

今後の展望として，準安定ヘリウム原子の吸収率分布を記述する計算式について，再度検討する必要がある．

## 参考文献

- 1) 澁谷 九輝，“シングルピクセルイメージングに関する研究”，徳島大学博士論文(2018)．
- 2) Yaron Bromberg, Ori Katz, and Yaron Silberberg, “Ghost imaging with a single detector”, PHYSICAL REVIEW A, Vol. 79, No. 5, (2009) pp. 053840.