

## 共焦点 LIF 法を用いたヘリコン波プラズマ中の Ar イオン速度分布計測

○吉場 稜 1), 皆川 裕貴 1), 寺坂 健一郎 2), 吉村 信次 3), Jacob McLaughlin 4),  
Frederic Skiff 5), Earl Scime 4), 荒巻 光利 1)

1) 日大生産工, 2) 崇城大, 3) 核融合科学研究所, 4) ウェストバージニア大, 5) アイオワ大

### 1. はじめに

ヘリコン波プラズマにおけるイオン加熱や輸送機構の解明は、プラズマ物理学における重要な研究課題である。1) そのためには、イオンの速度分布関数を高い空間分解能で測定することが不可欠となる。レーザー誘起蛍光 (LIF) 法は、イオンの速度分布を非接触で測定する有力な手法であるが、従来の測定系では光学調整が煩雑で、測定点の空間走査が困難という課題があった。

本研究ではこの課題を克服するため、共焦点レーザー顕微鏡の原理を応用し、励起光学系と蛍光検出系を一体化した「共焦点 LIF 測定系」を新たに開発した。本システムは、高い空間分解能と S/N 比を維持したまま、測定点の高速な二次元走査を可能とする点に特徴がある。本報告では、開発途中である共焦点 LIF 測定系の詳細な構成を報告する。

### 2. レーザー誘起蛍光 (LIF) 法

LIF (レーザー誘起蛍光) 法とは、プラズマ中のイオン速度分布関数 (IVDF) を非摂動的に測定する手法であり、レーザー光で特定の原子・分子を励起し、それによって引き起こされる発光を観測し、励起スペクトルを得て、その強度からの原子・分子の濃度を知り、スペクトル分布から温度を知る方法である。

### 3. 共焦点レーザー誘起蛍光法

共焦点レーザー誘起蛍光 (LIF) 法は、レーザー光をプラズマに入射させるための光軸と、プラズマからの蛍光を観測するための光軸を完全に一致させる「同軸光学系」を基本とする、極めて高い空間分解能を持つ先進的な計測技術である。従来までの LIF 光学系と共焦点 LIF 光学系の模式図を Fig. 1, Fig. 2 に示す。1)

この同軸かつ共焦点の光学系により、真空容器に一つの小さな観測ポート (覗き窓) さえあれば、従来は複数のポートを必要としたり、アクセス自体が不可能だったプラズマ中心部などの詳細な診断が可能になる。この特長は、観測ポートが限られる核融合実験装置や半導体製造装置などにおいて、極めて大きな利点となる。

また、レーザーを入射させるための楕円ミラーを、対物レンズのすぐ後ろに設置することで、集光する光の中心部分が意図的にブロックされ、光の断面がドーナツのような形になる。その「ドーナツの穴」の部分で、入射するレーザー光が通り抜ける。この構造により、強力なレーザー光と、集めたい微弱な蛍光が、測定したい焦点以外では決して交わらないようになっている。これにより、迷光が検出器に入るのを劇的に減らすことができる。2)

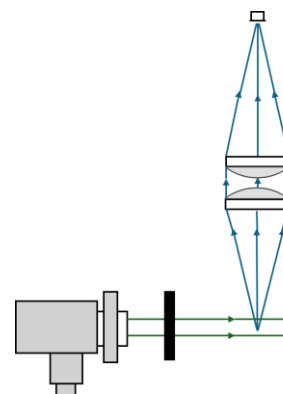


Fig. 2 従来までの LIF 光学系

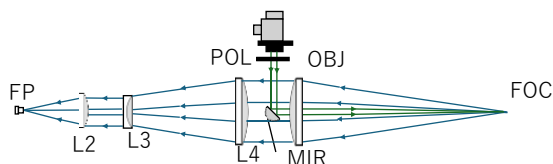


Fig. 3 共焦点 LIF 光学系

#### 4. ヘリコン波プラズマ装置

Fig. 4 に現在使用しているヘリコン波プラズマの実験装置を示す。この装置では、周波数 13.56 MHz、最大出力 3 kW の高周波電源を使用し、プラズマを作り出している。磁場は 5 つのコイルを配置することで均等に保たれており、現在その強度は 600G に設定されている。真空容器には観察用の複数の窓が取り付けられており、これにより実験の進行状況や内部のプラズマの様子を視覚的に確認することが可能である。ヘリコン波プラズマを生成する手順としては、まず真空容器内をロータリーポンプと分子ポンプを用いて十分に真空状態にし、その後、マスフローメーターを通じてヘリウムガスを供給する。次に、マッチングボックスでインピーダンスを調整し、13.56 MHz の高周波電場を高周波電源からアンテナに供給することで、Fig. 4 において左側から右側に向けてヘリコン波プラズマが形成される。

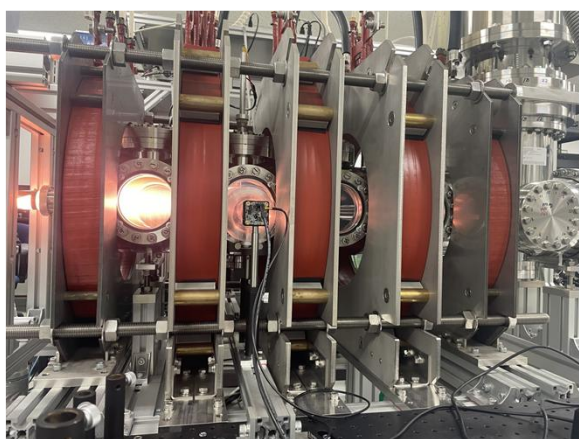


Fig. 4 ヘリコン波プラズマ装置

#### 5. 共焦点顕微鏡の設計

本研究では、光学設計ツール ZEMAX を用いて共焦点顕微鏡の光学配置および焦点計算を行った。励起光源として 波長 668nm のレーザー を用い、これにより生成される波長 442.7nm の蛍光を観測する。

共焦点顕微鏡には 4f 光学系を導入している。4f 光学系は 2 枚のレンズを配置して物体を正確に結像させる方式である。今回用いたアクロマートレンズは Fig. 5 に示すように、凸レンズと凹レンズを貼り合わせて構成され、入射方向によって焦点距離が異なる。また、ZEMAX を用いた共焦点顕微鏡の設計と焦点距離の算出結果を Fig. 6 に示す。ZEMAX による計算の結果、凸レンズ側から入射した場合の焦点距離：173.084mm，凹レンズ側から入射した場合の焦点距離：170.658 mm となった。よって、4f 光学系におけるレンズ間距離は 341.316mm と求められた。

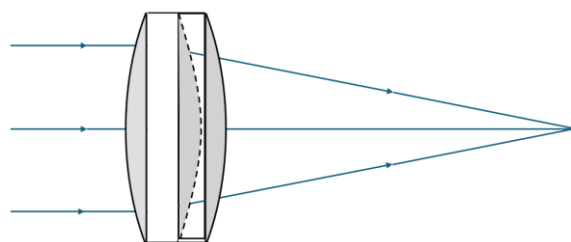


Fig. 5 アクロマートレンズ

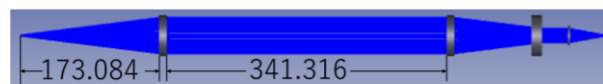


Fig. 6 ZEMAX を用いた焦点距離の算出結果

#### 6. まとめと今後の展望

本研究では、共焦点レーザー誘起蛍光 (LIF) 法を実現するための顕微鏡システムについて、光学設計ソフトウェア ZEMAX を用いた光学設計を行った。各アクロマートレンズの焦点距離、そしてレンズ間の最適な配置距離を詳細に算出し、高精度なプラズマ診断を行うための共焦点光学系としての基本設計を完了した。

今後は、今回算出した設計値に基づき、実際に光学系を構築する。十分な性能が確認できた後、本光学系をプラズマ実験装置に設置し、最終目標であるプラズマ内部のイオン速度分布計測を開始する計画である。

#### 参考文献

- 1) Kenichi NAGAOKA, Masayuki YOKOYAMA, Yasuhiko TAKEIRI, Katsumi IDA, Mikio

YOSHINUMA,Seikichi MATSUOKA, Hisamichi  
FUNABA, Shigeru MORITA,  
Takashi MUTOH, Tetsuo SEKI, Katsunori IKEDA,Masaki  
OSAKABE, Katsuyoshi TSUMORI,Yoshihide  
OKA,Osamu KANEKO and the LHD Experimental  
Group, (2008), Ion Heating Experiments Using  
Perpendicular Neutral Beam Injection in the Large Helical  
Device, Plasma and Fusion Research, 3,S1013

2) Derek S. Thompson,Miguel F. Henriquez,Earl E.  
Scime,Timothy N. Good, (2017), Confocal laser induced  
fluorescence with comparable spatial localization to the  
conventional method, Review of Scientific  
Instruments, 88(10)

3) Miguel F. Henriquez ,Derek S. Thompson,Andrew J.  
Jemiolo,Earl E Scime, (2018), Demonstration of  
confocal laser induced fluorescence at long focal lengths,  
Review of Scientific Instruments, 89(10)

4) K J Stevenson, T J Gilbert, T N Good, M Paul, P Shi, R  
Nirwan,P Srivastav,T E Steinberger and E E Scime, (2024) ,  
RFantenna helicity dependent particle heating in a helicon  
source.Plasma, Source Science and Technology, 33(4)