

## 可視分光計測に基づく金属表面近傍における電子密度及び中性粒子密度の軸方向分布の評価

東園, 雄太  
九州大学応用力学研究所

坂本, 瑞樹  
九州大学応用力学研究所

小川, 和真  
九州大学大学院総合理工学研究科

尾崎, 和基  
九州大学大学院総合理工学研究科

他

<https://doi.org/10.15017/27062>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 137, pp.147-150, 2009-09. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

## 可視分光計測に基づく金属表面近傍における 電子密度及び中性粒子密度の軸方向分布の評価

東園 雄太\*1 坂本 瑞樹\*1 小川 和真\*2 尾崎 和基\*2 大山 亮平\*2 郷田 到\*2  
 霧 昭太郎\*2 庄司 多津男\*3 芦川 直子\*4 時谷 政行\*4 徳永 和俊\*1 増崎 貴\*4  
 大宅 薫\*5 相良 明男\*4 佐藤 浩之助\*1

(2009年7月31日受理)

### Axial Profiles of Electron and Neutral Densities near Metal Target Based on Visible Spectroscopic Measurement

Yuta HIGASHIZONO, Mizuki SAKAMOTO, Kazuma OGAWA, Kazuki OZAKI, Ryouhei OYAMA,  
 Itaru GOUDA, Shoutarou TSURU, Tatsuo SHOJI, Naoko ASHIKAWA, Masayuki TOKITANI, Kazutoshi  
 TOKUNAGA, Suguru MASUZAKI, Kaoru OHYA, Akio SAGARA and Kohnosuke SATO

E-mail of corresponding author: *yuta@triamp.kyushu-u.ac.jp*

#### Abstract

It is important to obtain spatial structure of plasma and neutral particles near plasma facing material in order to understand plasma dynamic and recycling phenomena in divertor region of magnetically plasma confinement device. In the compact PWI simulator APSEDAS, the ratio of helium visible lines at 667.8 nm and at 728.1 nm is measured to estimate electron density near tungsten target.  $H_{\alpha}$  intensity is also obtained from measurement using CCD camera. It is found that both the electron density and the  $H_{\alpha}$  intensity show similar distribution in which both parameters decrease toward the tungsten target. Based on the Monte Carlo simulation, the  $H_{\alpha}$  intensity due to the neutral particle from filling gas source sufficiently shows similar tendency with that captured by CCD camera and the electron density.

**Key words :** *edge plasma, helium emission,  $H_{\alpha}$  emission, Monte Carlo simulation*

## 1. 緒言

磁場を用いたプラズマ閉じ込め装置において、周辺プラズマの理解とその制御は必須の課題である。周辺プラズマは、スクレイブオフ層やプラズマ対向壁近傍の領域を差し、コアの閉じ込め領域と真空容器の間に位置し、両領域を結ぶ重要な領域である。主プラズマでは磁気面上で物理量はほぼ一定になるのに対して、周辺プラズマでは磁力線がダイバータやリミター板に当たり、壁との強い相互作用の結果、磁力線方向にも物理量が大きく変化する。この原因として、壁表面付近のプラズマ領域ではシースによるプラズマパラメータの変化、壁表面からの反射・または内部から放出される中性粒子とプラズマの衝突過程、壁内部への粒子の拡散などのさまざまな要因が絡んでいる。

先に述べたような壁近傍の複雑な現象を調べるために、分光法を用いた計測が多く行なわれている<sup>1, 2)</sup>。分光法では、プラズマから放射される光を分光し、各波長の分布形状や強度比を用いることによって、プラズマの密度や温度、原子・分子密度など、多くの情報を得ることができる。分光法は受動的な計測方法でありプラズマに擾乱を与えることがないため、シース電位によってプラズマパラメータが大きく変化する壁近傍の領域においても、適用が可能である。また、カメラを用いた発光観測は、機器の設置が簡便であることや、画像で得られる情報が二次元であること、近年の技術の進歩により計測感度の高いカメラが安価で手に入ることなどの利点から、プラズマ計測において注目を集めている<sup>3)</sup>。

本研究では、プラズマ対向壁近傍におけるプラズマと中性粒子の挙動を明らかにし、壁の状態まで含めた周辺プラズマの総合的な理解を得ることを目的としている。そこで本論文では、PWI 模擬実験装置 APSEDAS において、水素とヘリウムの混合プラズマを照射したタンゲステン試料

\*1 九州大学応用力学研究所

\*2 九州大学大学院総合理工学研究科

\*3 名古屋大学工学研究科

\*4 核融合科学研究所

\*5 徳島大ソシオテクノサイエンス

近傍の可視分光計測を行なった結果、及び考察の内容を述べる。具体的には、分光器を用いて測定したヘリウムの発光強度比からを試料近傍での電子密度を評価、及び CCD カメラを用いて  $H_{\alpha}$  線強度の軸方向分布を測定し、電子密度との比較を行なった結果を述べる。さらに、中性粒子輸送シミュレーション (DEGAS) を用いて、試料近傍の  $H_{\alpha}$  線強度と電子密度の軸方向分布の関係を考察を行なった結果について述べる。

## 2. 実験装置

Fig.1 には、本論文で用いた PWI 模擬実験装置 APSEDAS の模式図を示している。APSEDAS では真空容器上部の石英ガラス管の外側に取り付けたヘリカル型のアンテナに高周波 (13.56 MHz) を重畳し、直径 50 mm の円筒型のプラズマを生成している。本論文では、水素とヘリウムの混合プラズマを用いており、流量比は  $H_2 : He = 3 : 1$  である。容器内の封入ガス圧は 20 mTorr で調整を行なっていて、磁場は 0.05 T でプラズマ全体でほぼ一定である。ガラス管で生成されたプラズマは、真空容器下部に設置したステージ表面の金属に照射される。本実験で用いている金属はタングステンとステンレスである。金属近傍のプラズマや材料表面の状態を実時間で測定するための各計測器が取り付けられており、反射率を測定する分光測定器、静電プローブ、水晶発振子を用いた膜圧計、放射温度計などがある。本論文では、真空容器側面のガラス窓からプラズマを見込むように可視域の分光器と CCD カメラを用いて、金属表面近傍において可視分光の分布測定を行なった。分光器はツェルニターナ型のものを用いており、測定波長領域は 200 ~ 950 nm、波長分解能は 2 nm である。この分光器の波長スペクトルにおいて、ヘリウムの発光ライン

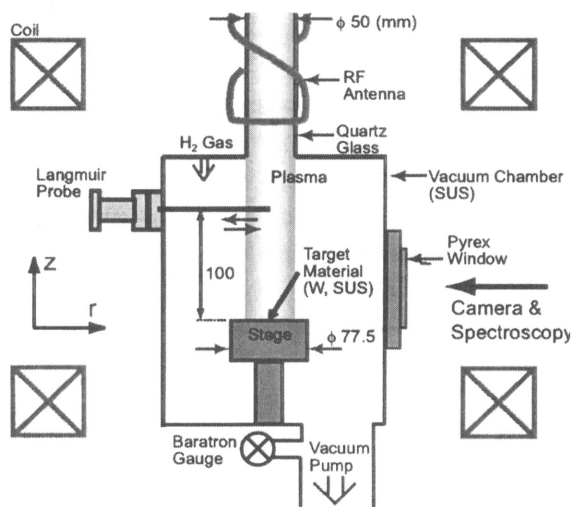


Fig. 1 Schematic draw of APSEDAS.

(667.8 nm、728.1 nm) に注目し、両強度の比から軸方向の電子密度の評価した。CCD カメラ測定では、CCD カメラ前面に水素のバルマー系列線である  $H_{\alpha}$  線 (656.3 nm) の波長領域のみを透過する干渉フィルターを設置し、電子密度・温度及び水素原子・分子の密度情報を持った発光を観測した。

## 3. 実験・解析結果

Fig.2 には、水素・ヘリウム ( $H_2 : He = 3 : 1$ ) の混合プラズマを可視分光器で測定した際の波長スペクトル分布、また Fig. 3 には CCD カメラで撮影した  $H_{\alpha}$  線強度の 2 次元画像を示している。Fig.2 のスペクトル分布において  $HeI$  の 2 種類の波長 (667.8 nm、728.1 nm) に注目し、両強度の比から電子密度の見積もった。この 2 つの波長を用いて、電子密度を評価する方法に関しては、参考文献<sup>4)</sup>を基にしている。また、APSEDAS のような背景ガス圧の高い (~ 20 mTorr) 装置では、光の吸収過程が無視できず、その効果を考慮してスペクトルの強度を評価する必要が出てくる場合があるが、後述するように今回の測定ではプラズマの密度が  $2 \times 10^{17} m^{-3}$  程度であるため、参考文献<sup>5)</sup>の Fig.2 にあるように、光学的に厚い場合でも問題はないとして、光の吸収の効果を無視して電子密度を算出した。

Fig.3 の丸印で示されるプロットには、ヘリウム強度比から算出したタングステン試料近傍における電子密度の軸方向分布を示している。 $Z = 0 mm$  が試料表面位置に対応している。エラーバーの横軸の範囲は検出器の視野 (~ 4 mm)、縦軸には APSEDAS においてプローブ測定で通常求められる電子温度の範囲、5 ~ 20 eV の範囲で算出した電子密度の値に対応している。また、グラフ中に実線

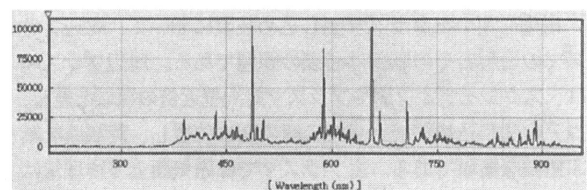


Fig. 2 Visible spectrum on  $H_2$  75 %,  $He$  25 % plasma.

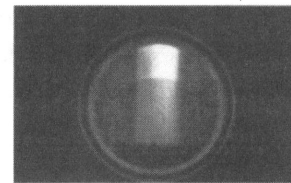


Fig. 3  $H_{\alpha}$  images measured by CCD camera.

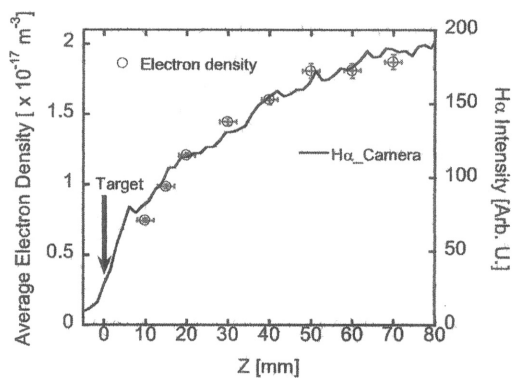


Fig. 4 Axial profiles of average electron density derived from the ratio of helium visible line and  $H_{\alpha}$  intensity captured by CCD camera.

で示されるプロットは、CCD カメラで撮影した  $H_{\alpha}$  線強度の軸方向分布を示している。これを見てわかるように、両分布は、特に  $Z > 10 \text{ mm}$  の範囲で近い形状を示しており、試料近傍へ減少する分布となっていることが分かる。

電子温度が  $1 \text{ eV}$  以上であり、 $H_{\alpha}$  線強度に対する再結合による効果を無視できる場合、 $H_{\alpha}$  線強度は以下の式で表わされる。

$$I_{H_{\alpha}} \propto n_e(n_H R_1 + n_{H_2} R_2),$$

ここで、 $n_e$  は電子密度、 $n_H$ 、 $n_{H_2}$  は水素原子・分子密度、 $R_1$  及び  $R_2$  は電子温度および電子密度の関数で、ポピュレーション係数と呼ばれる量である<sup>6)</sup>。Fig.3では、電子密度と  $H_{\alpha}$  線強度の間に相関があることが示された。残る中性粒子密度、及び電子温度の効果を調べることで、 $H_{\alpha}$  線強度分布を決定する物理量の解釈を行なうことができる。そこで、 $H_{\alpha}$  線強度に対する中性粒子密度分布の効果を調べるため、中性粒子輸送シミュレーションコード (DEGAS) を用いて解析を行なった。

DEGAS コードでは、3次元体系のプラズマ中における種々の原子・分子過程に基づいて、中性粒子の軌跡をモンテカルロ法に用いて追跡し、中性粒子密度、温度等を求めることができる<sup>7)</sup>。Fig.5には、DEGAS で用いたシミュレーションモデルを示している。このシミュレーションモデルは、3次元のメッシュで APSEDAS 真空容器、タングステン試料のステージの構造を再現し、またプラズマの領域には、電子・イオンの密度、温度を定常で与える。今回の計算では、メッシュに与える電子・イオン密度には、ヘリウムの発光強度比から算出した電子密度分布を導入した。また、電子温度・イオン温度は  $10 \text{ eV}$  で一定に与えた。DEGAS ではこのようなプラズマパラメータに加えて、メッシュ内部に中性粒子源を与え、そこから放出され

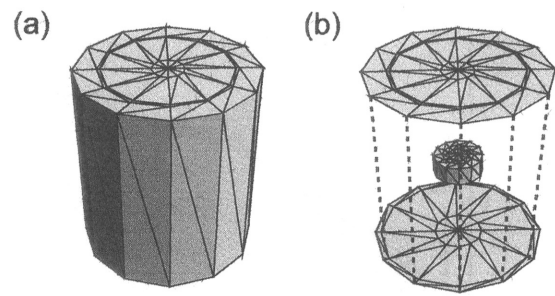


Fig. 5 Schematic view of DEGAS mesh structure. (a) Vacuum vessel. (b) Inner image (Stage).

る中性粒子の軌道をモンテカルロ法を用いて計算し、中性粒子の密度、温度等の情報を算出する。今回の計算では、中性粒子源として真空容器に封入する水素分子、プラズマを照射するステージ面に水素原子、及び分子を与えて、それぞれ計算を行なった。各中性粒子源のシミュレーションで求めた中性粒子密度、及びシミュレーションに与えた電子密度、温度を用いて算出した  $H_{\alpha}$  線強度の分布を、Fig.6 に示している。また、グラフには、ヘリウムの発光強度比から求めた電子密度と CCD カメラの  $H_{\alpha}$  線強度の軸方向分布も合わせて示している。これを見ると、3種類の中性粒子源におけるシミュレーション結果では、試料に粒子源を与えた場合、 $Z > 20 \text{ mm}$  の領域において平坦な形状であるのに対して、装置内に充填した水素分子の計算結果では、試料から離れるにつれて増加する分布となった。 $Z > 20 \text{ mm}$  において規格化を行なった場合、充填した水素の計算結果は、特に  $Z > 10 \text{ mm}$  の領域で電子密度や CCD カメラの画像計測結果と近い形状となっている。これらの結果から、金属表面近傍の  $H_{\alpha}$  線強度分布は試料近傍へ減少する電子密度と強い相関があることがわかった。また、中性粒子源は、試料から  $10 \text{ mm}$  以上離れた領域では、充填した水素分子が主に起因していることが示唆された。

#### 4. 結言

PWI 模擬実験装置 APSEDAS において、可視分光器及び CCD カメラを用いて、ヘリウム・水素の混合プラズマを照射したタングステン試料近傍の可視光測定を行なった。ヘリウムの発光強度比から見積もった電子密度と CCD カメラで測定した  $H_{\alpha}$  線強度は、試料方向へ減少する分布となり、両分布は近い形状となった。中性粒子輸送シミュレーションコード (DEGAS) を用いて、3種類の中性粒子源の計算において  $H_{\alpha}$  線強度分布を見積もったところ、充填した水素分子を模擬した計算において、CCD カメラの  $H_{\alpha}$  線画像の軸方向分布と近い形状となった。これらの結果から、 $H_{\alpha}$  線強度分布は試料近傍へ減少する電子密度と強い相関がありことがわかった。また、中性粒子源は、試



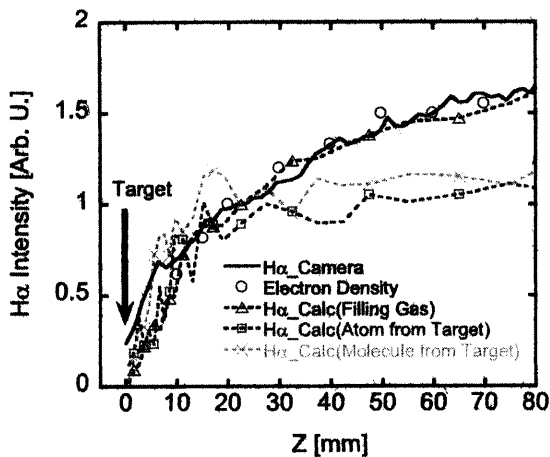


Fig. 6 Axial profiles of  $H_{\alpha}$  intensity captured by CCD camera and  $H_{\alpha}$  intensity calculated by DEGAS simulation in the case of the simulation of filling gas source and atom and molecule source from tungsten target source. Data are normalized at  $Z = 20 \text{ mm}$ .

料から  $10 \text{ mm}$  以上離れた領域では、充填した水素分子が主に起因していることが示唆された。

## 5. 謝辞

本研究は、特別研究員奨励費の助成を受けたものである。また、本研究の一部は、核融合科学研究所 LHD 計画共同研究 (NIFS06KOBP009) より援助を受けた。

## 参考文献

- 1) K. Shimada, *et al.*, J. Nucl. Mater. **290-293** 478 (2001).
- 2) K. Kobayashi, *et al.*, J. Nucl. Mater. **266-269** 850 (1999).
- 3) S. J. Zweben, *et al.*, Phys. Plasma, **9** (2002) 1981-1989.
- 4) M. Goto, *et al.*, J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. **76** (2003) 331.
- 5) F. B. Rosmej, *et al.*, Contrib. Plasma Phys. **48** (2008) 243.
- 6) T. Fujimoto, *et al.*, J. Appl. Phys. **66** (1989) 2319.
- 7) D. Heifetz, *et al.*, J. Comput. Phys. **46** (1982) 309.