

マイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ における 光ファイバを活用したプラズマ診断

月崎 竜童*, 小泉 宏之, 伊勢 俊之 (東京大学)
西山 和孝, 國中 均 (JAXA)

本研究では、推進剤の投入方法の変更がビーム電流の向上にいかにつながったのか解明するために、光ファイバを活用したプラズマ診断法を確立した。先端にレンズを融着した特殊な光ファイバプローブとレーザー吸収分光法を組み合わせることで、従来の金属プローブでは不可能だったビーム加速状態のマイクロ波放電式イオンエンジンのプラズマ診断を実現している。測定対象は励起中性粒子 Xe I 823.16 nm と Xe I 828.01 nm である。前者は準安定準位であり、吸収が大きく 1 cm 刻みの軸方向数密度分布を得た。後者は基底と共鳴遷移線を有するために、吸収が小さく空間分解能は 2 cm にとどまったが、寿命が充分短いため電子の局所的な情報を反映する。測定結果から、従来の導波管からの推進剤投入では導波管内部で中性粒子を励起させている電子の密度の最大値が存在することが判明した。推進剤の投入位置を導波管から放電室に変更することで、この導波管における電子を抑制し、ビーム電流の向上につながったと考えられる。

キーワード：レーザー吸収分光，キセノン，マイクロ波，イオンエンジン，光ファイバ

1. 序論

マイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ ¹⁾は小惑星探査機「はやぶさ」を通じて 4 機累計 39,600 時間の宇宙実績を達成し、現在は「はやぶさ 2」のみならず地球近傍での商用衛星の南北姿勢制御用推進機として、商用化も進められている。 $\mu 10$ は、宇宙実績を維持しつつ、更なる推進性能を主眼に様々な取り組みがなされた²⁾。特にグリッドの改良と推進剤キセノンの推進剤投入方法の変更は最大イオンビーム電流が 25%向上したが³⁾、未だイオン源内部のビーム加速状態のプラズマ診断方法は確立されていない。プラズマ生成と加速領域が一体となっているホールエンジンなどの電気推進機はブルーム診断が行われているが⁴⁾、イオンエンジンはグリッドによってプラズマ生成と加速が空間的に隔てられているために、イオンビーム加速状態の内部診断は難しい。これまでマイクロ波放電式イオンエンジンに関しては、船木ら⁵⁾によってプローブを用いてイオン源内部の電子温度計測行われ、中和器に関しては小野寺ら⁶⁾によってレーザー吸収分光法による中性粒子密度測定が行われている。しかしながらラングミュアプローブなどの金属プローブは、マイクロ波電磁場を乱し、また導電体のためビーム加速ができず推進剤流量を絞り加速状態を模擬することでしか計測は行われなかった。またスケールの小さい中和器にレーザー透過用の孔を空けることで、性能変化が起きるなど擾乱が大きかった。本研究では、光ファイバとレーザー吸収分光法を組み合わせることでイオン源内部の励起密度粒子の分布測定を実現した。⁷⁾ 以下に本測定系の利点を挙げる。

1. 誘電体のためマイクロ波電磁場を乱さない。
2. 石英から成り絶縁体のためビーム加速できる。

3. グリッド孔から光ファイバを導入することで、レーザー導入用の孔をあける必要が無い。また受光用孔はコーリメーションレンズによって、小さくできる。
4. ファイバを掃引することで、アーベル変換無しに空間分布を直接計測できる。

本測定に先立ち、必要となる励起温度を線対法によって求めた。次に励起速度分布測定では図 1 に示されるように 8.32 eV に励起された波長 823.16 nm の準安定中性粒子と、8.44 eV に励起された波長 828.01 nm の励起中性粒子を対象に測定を行った。

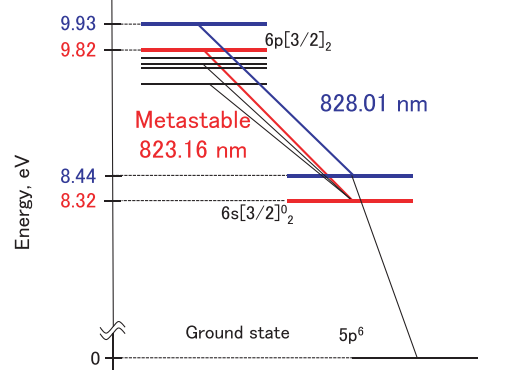


図 1 Xe I グロトリアン線図

2. 実験装置・測定系

〈2・1〉マイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ 図 2 にイオンエンジンの概略を示す。エンジンヘッドは導波管、放電室、グリッド、中和器によって構成される。導波管には推進

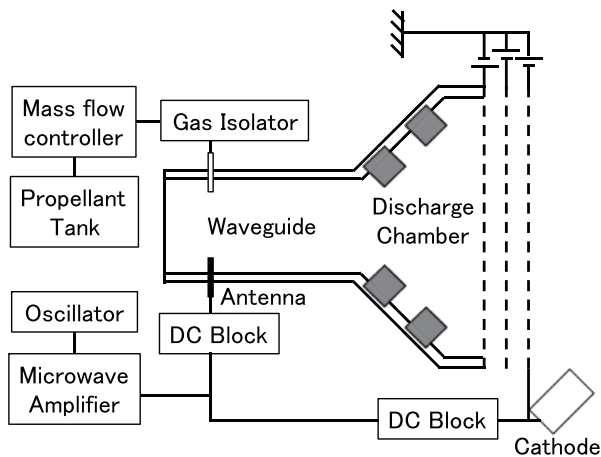


図2 マイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$

剤供給孔とマイクロ波アンテナが設けられ、キセノンおよびマイクロ波が放電室に供給される。放電室では、リング上の永久磁石 SmCo が取り付けられ、ミラー磁場を形成する。導波管から供給された 4.25 GHz のマイクロ波によって、0.15 T の磁力線にそって電子が ECR 加熱され、プラズマを生成している。生成されたイオンは、CFRP 製の平板グリッドによって静電加速され推力を生む。中和器からはイオンビームと等価の電子ビームが排気され宇宙機の電気的中性を保つ。「はやぶさ」に搭載されたイオンエンジンの緒元を表 1 に示す。

表 1 マイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ の性能緒元

開口径	105 mm
マイクロ波周波数	4.25 GHz
スクリーン電圧	1500 V
アクセル電圧	-350 V
中和器電圧	-30 V
マイクロ波電力	34 W
推進剤流量	2.00 sccm (0.197 mg/s)
ビーム電流	135 mA
推力	8.0 mN

〈2・2〉光ファイバプローブ 光ファイバの電気推進機の内部測定への応用は過去に JPL らによって直流放電式イオンエンジンやホローカソードに用いられている。^{7, 8, 9)} 本実験には、図 3 に示すようなレーザ出射用に特殊形状の光ファイバプローブを製作し用いた。(株)フォトリックサイエンステクノロジー社と技術協力でケーブルからプローブ部分まで一体となっている特殊なシングルモード光ファイバとなっている。先端部直径はアクセルグリッド孔と同じ直径 1.80 mm となっており、出射光がコリメートされるようにレンズが融着されており、石英製のため 1000 度以上の高い耐熱性を有する。

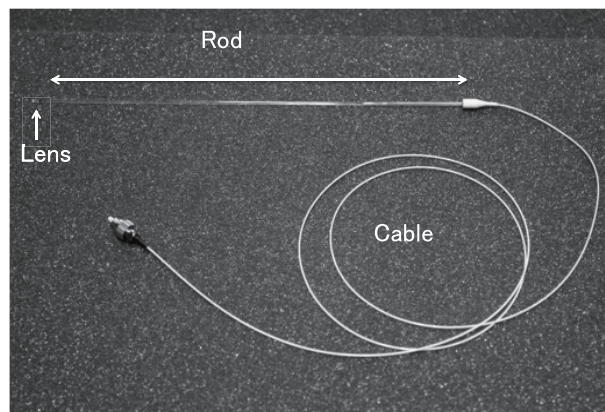


図 3 レーザ吸収分光用シングルモード光ファイバプローブ

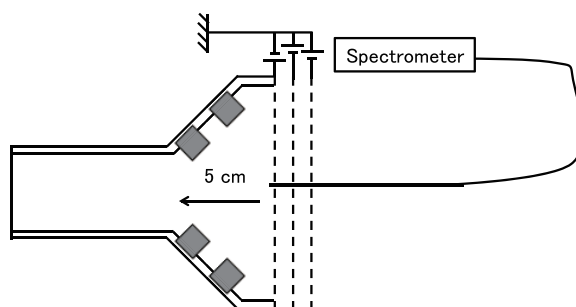


図 4 相対強度法による電子励起温度測定系。光ファイバをスクリーングリッドから 0 cm と 5 cm の距離に設置した。

〈2・3〉電子励起温度測定 図 4 に発光分光法の測定系を示す。集光用にはマルチモード光ファイバを用いた。レーザ吸収分光と同様に、中心軸にファイバを挿入した。エッシエル型分光器を用いて波長 400-830 nm 領域を測定し、標準光源を用いて波長に対する受光感度の強度補正を行っている。

相対強度法では局所熱平衡を仮定し、A 係数既知の複数の発光強度を比較することで電子励起温度を測定できる。電子励起温度を強度比の関係を式(1)に示す。

$$\ln\left(\frac{\epsilon\lambda}{A_{ji}g_{ji}}\right) = -\frac{E_j}{k_B T_{ex}} + \alpha \quad (1)$$

電子励起温度は、式(1)の左辺を縦軸、エネルギーを横軸にすることで、直線の傾きから求まる。ここで α は任意の定数であり、電子励起温度は縦軸の絶対値には依存しない。用いた波長ラインは 480.70 nm (11.015 eV), 491.651 nm (10.958 eV), 618.24 nm (11.694 eV), 631.81 nm (11.683 eV), 688.216 nm (11.487 eV), 823.16 nm (9.821 eV) である。

〈2・4〉励起中性粒子数密度軸方向分布測定系 光ファイバとレーザ吸収分光法を組み合わせた測定系を図 5 に示す。レーザから出た光は、イオンエンジン、エタロン、波長計、放電管に並列に分岐される。イオンエンジンは小惑星探査機「はやぶさ」用耐久試験装置内部¹⁰⁾に設置され、レーザ光は光ファイバフィードスルーにより真空槽内部に導入される。本実験ではプローブ部分はグリッドの中心孔に

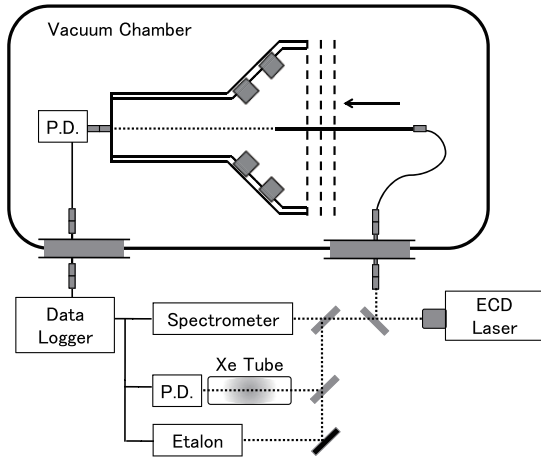


図 5 光ファイバを活用したイオンエンジン内部におけるレーザー吸収分光法。P. D. は Photo Detector, ECD は External Cavity Diode を表す。

挿入され、精密ステージでホルダごと軸方向に稼動することができる。レーザーから出射された光は、導波管底板にもうけられた、レンズによって集光され光ファイバを通じフォトディテクタで電圧変換され記録される。イオンエンジンの作動条件は発光分光測定時と同じである。実験的に積分吸収係数を軸方向に微分することで、式(2)を用いて軸方向の密度分布が求められる。本測定の実験条件を表 2 に示す。

表 2 実験条件

推進剤流量	1.00, 2.00, 3.00 sccm (0.0983, 0.197, 0.295 mg/s)		
マイクロ波電力	34 W		
反射マイクロ波電力	9 W	6-11 W	11-12 W
測定位置	0-15 cm(1 cm 刻み)		
波長挿引速度	1.1 Hz		
サンプル数	10		

$$n_i(x) = \frac{8\pi}{\lambda^2 A_{ji}} \frac{g_i}{g_j} \left[1 - \exp\left(-\frac{\Delta E_{ij}}{k_B T_{ex}}\right) \right]^{-1} \frac{dK}{dx} \quad (2)$$

3. 結果と考察

〈3・1〉電子励起温度測定 図 6 に、イオンビーム加速状態におけるエネルギー準位に対する発光強度の変化を示す。直線の傾きからは、電子励起温度は表 3 のようになった。

表 3 電子励起温度測定結果

導波管流量	放電室流量	0 cm	-5 cm
1.00 sccm	0 sccm	0.44 eV	0.47 eV
2.00 sccm	0 sccm	0.65 eV	0.60 eV
3.00 sccm	0 sccm	0.67 eV	0.63 eV
0 sccm	2.00 sccm	0.42 eV	0.42 eV
0 sccm	3.00 sccm	0.52 eV	0.42 eV
0 sccm	4.00 sccm	0.68 eV	0.52 eV

導波管投入、放電室投入のいずれにおいても推進剤流量の増加にともなって、電子励起温度は減少する傾向にあることが認められた。また電子温度に比べ低く収まっており、これはイオンエンジン内が衝突優勢の平衡プラズマではないため、電子-中性粒子衝突が頻繁に行われず平衡に十分なエネルギー交換が行われていないことを示唆している。

電子励起温度の軸方向変化が、式(2)を用いて得られる数密度に対してどの程度変化を与えるのか検証をおこなった。図 7 に電子励起温度に対する数密度の変化を示す。低温領域では数密度の上昇に寄与が非常に小さいことがわかる。表 3 の電子励起温度測定結果では最小で 0.42 eV、最大で 0.67 eV であり上準位の誘導放出に起因する下準位数密度の上昇率は 3%から 12%範囲に収まっている。軸方向には放電室からの 4.00 sccm 投入したときが最も変化しており、その影響は数密度比にして 6%程度である。但し、図 6 では直線上にデータ点がのっていない。これは励起状態がボルツマン分布になっていないことを表している。エネルギー準位の高い 11.5 eV 付近では LTE が成り立たず、9.5 eV から 11 eV の範囲で励起温度を求めた場合、励起温度は高くなり密度分布にも影響を及ぼす可能性がある。密度分布を正確に求めていく上で、今後課題が残る。具体的には非平衡プラズマの数励起密度と電子温度・密度を関係づける測定系として、衝突輻射モデル¹¹⁾や、KCD モデル^{12, 13, 14)}などがある。

〈3・2〉励起中性粒子数密度軸方向分布測定 導波管導入時の Xe I 823.16 nm の数密度分布を図 8 に示す。従来の導波管底部からの推進剤供給では、数密度の最大値が導波管に存在していることがわかった。電子-中性粒子衝突によって生成された中性粒子は、寿命が十分長く¹⁵⁾平均自由行程が 20 cm - 2 m であるので等方的に散乱し壁面と衝突し基底状態となる。壁面に衝突した励起中性粒子は 2 次電子放出をすることが知られており^{16, 17)}、導波管内でのプラズマ密度が上昇する。

図 9 に導波管から推進剤を流した時の Xe I 828.01 nm の数密度分布を示す。グリッドから 9 cm のところに、密度のピークがあることがわかる。これはマイクロ波の定在波の腹の位置と一致している。Xe I 823.16 nm とは違い寿命が短いことから¹⁸⁾、この場所で電子と励起衝突が起きていることを示唆している。マイクロ波の定在波で電子が得るエネルギーは励起準位のエネルギーに比べ非常に小さいことから、放電室にある ECR 領域で加速され電子が内周磁石の磁力線に沿って導波管に漏れてきていることと推察される。この磁力線を変更するか、推進剤の粒子分布を変更することによって、この領域における電子密度を抑制することが対策として考えられる。実際に推進剤の放電室投入をおこなった図 10, 11 では、導波管の励起中性粒子数密度が減少していることが確認できる。4.25 GHz のマイクロ波のカットオフ密度が $2.1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ なので、それに匹敵するプラズマ密度が導波管内に生成された場合は、放電室へのマイクロ波供給がうまくいかず、効率的に ECR 加熱できなくなり、ビーム電流の減少を引き起こす。カットオフ密度に到

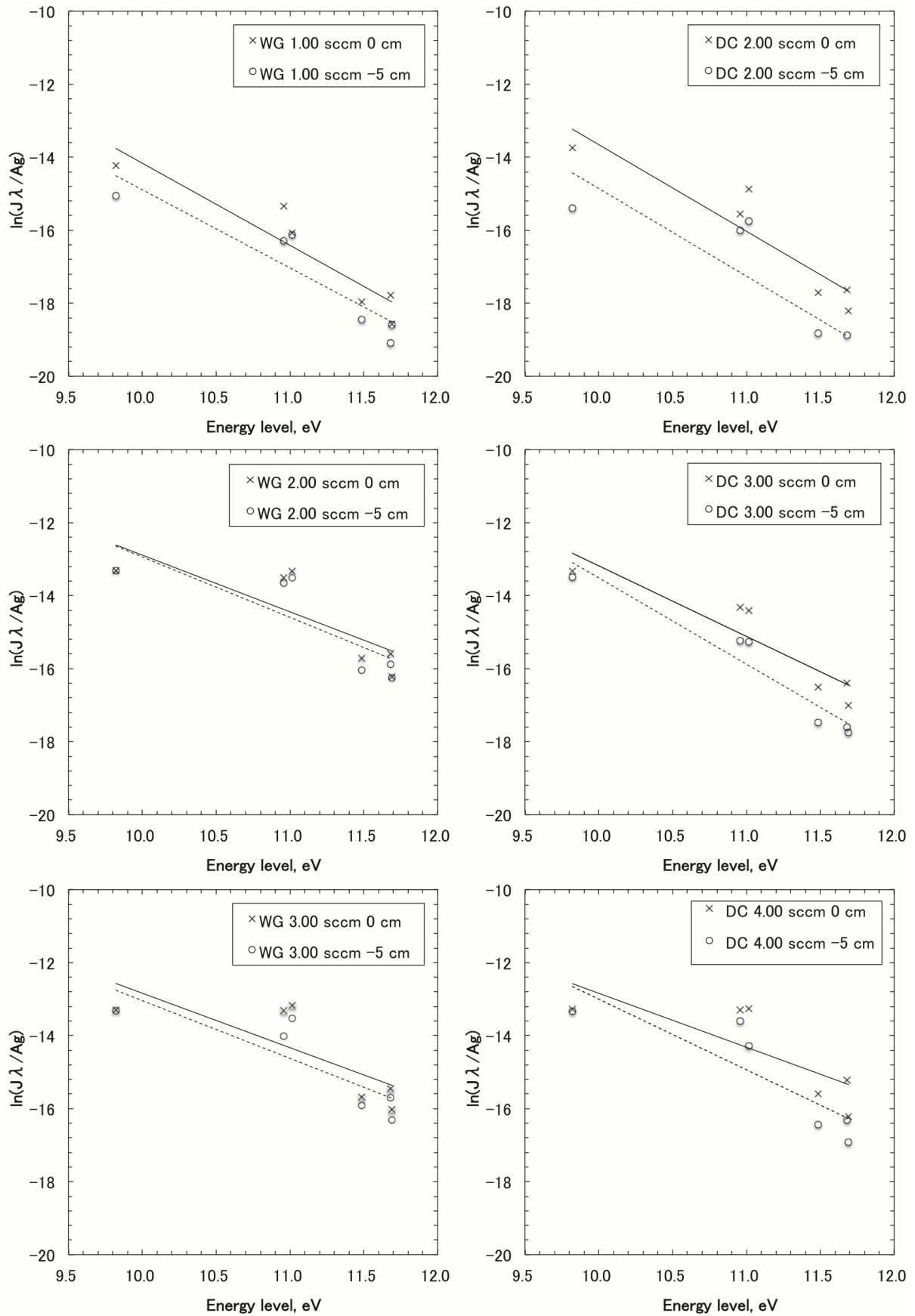


図6 電子励起温度測定結果. 最小2乗法により傾きを求めた. 実線がプローブ位置0 cm, 破線が-5 cmに対応する.

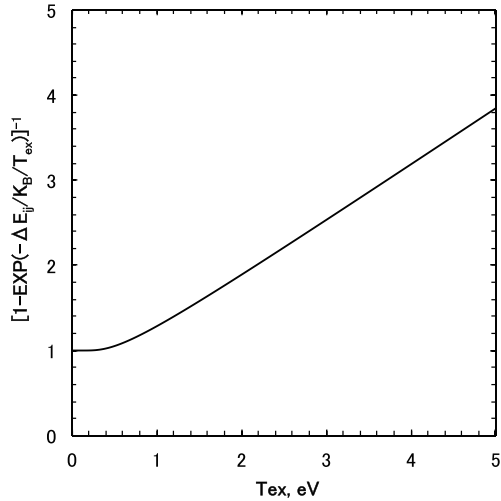


図 7 電子励起温度に対する数密度変化. 縦軸は式(2)における電子励起温度に関する項.

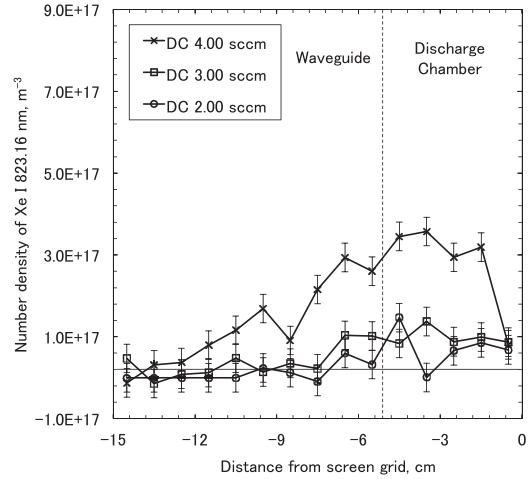


図 10 Xe 放電室導入 2.00, 3.00, 4.00 sccm における Xe I 823.16 nm 数密度分布

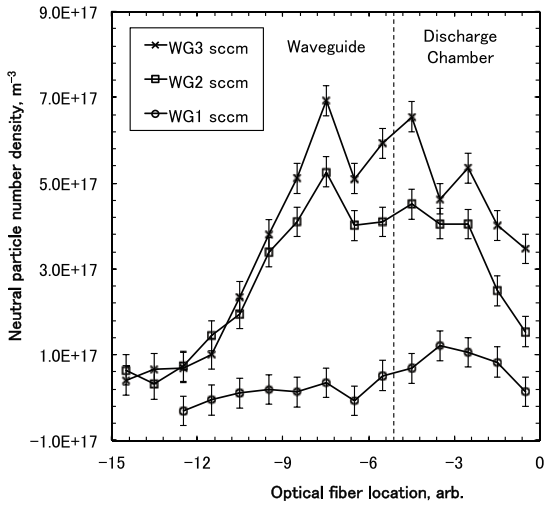


図 8 Xe 導波管導入 1.00, 2.00, 3.00 sccm における Xe I 823.16 nm 数密度分布

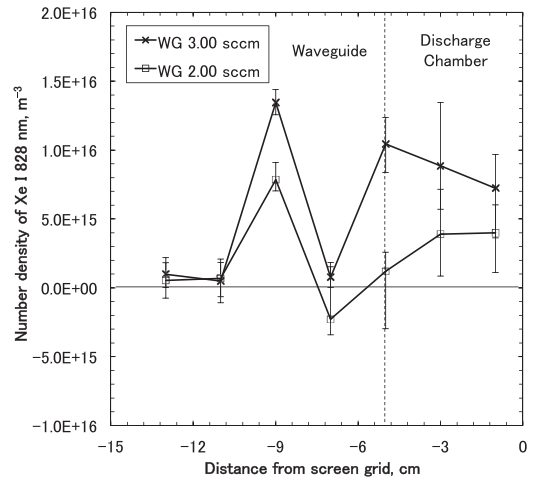


図 11 Xe 放電室導入 2.00, 3.00, 4.00 sccm における Xe I 828.01 nm 数密度分布

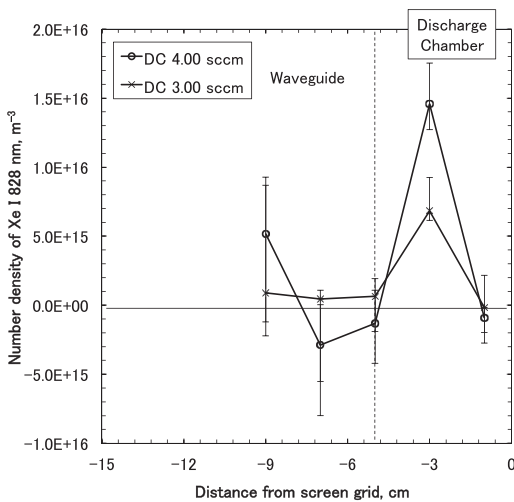


図 9 Xe 導波管導入 1.00, 2.00, 3.00 sccm における Xe I 828.01 nm 数密度分布

達せずとも、導波管内でマイクロ波が電子加熱や中性粒子の励起によってエネルギーを失うことは ECR 領域への伝搬を阻害するので避けるべきである。マイクロ波放電式イオンエンジンの設計指針としては、導波管におけるプラズマを抑制することが重要である。

4. 結論

レーザ吸収分光法と光ファイバを用いて、イオンエンジン内部の励起された準安定 Xe I 823.16 nm と基底と共鳴遷移線を有する Xe I 828.01 nm の中心軸方向数密度分布を求めた。従来の導波管からの推進剤導入では、導波管の定在波のマイクロ波の腹の位置に密度の最大値が記録された。放電室からの推進剤導入によって、このピークは抑制され、ビーム電流の増強につながり性能向上に至ったと考えられる。

謝辞

本研究は日本学術振興会特別研究員奨励費(22・5571, 2010)の助成を受けたものである。ここに謝意を記す。

参考文献

- (1) H. Kuninaka: "Development and Demonstration of a Cathode-less Electron Cyclotron Resonance Ion Thruster", *Journal of Propulsion and Power*, Vol.14, No.6, pp.1022-1026 (1998)
- (2) K. Nishiyama, S. Hosoda, M. Usui, R. Tsukizaki, H. Hayashi, Y. Shimizu, and H. Kuninaka: "Feasibility Study on Performance Enhancement Options for the ECR Ion Thruster $\mu 10$," *Trans. JSASS Space Tech. Japan*, Vol. 7, pp. Pb_113-Pb_118 (2009)
- (3) R. Tsukizaki, H. Koizumi, S. Hosoda, K. Nishiyama and H. Kuninaka: "Improvement of the Thrust Force of the ECR Ion Thruster $\mu 10$ ", *Transaction of the Japan Society for Aeronautics and Space Science, Aerospace Technology Japan*, Vol. 8, pp.Pb_67-Pb_72 (2010)
- (4) S. Yokota, M. Matsui, D. Sako, N. Yamamoto, H. Koizumi, K. Komurasaki, H. Nakashima, and Y. Arakawa: "Diagnostics of Hall Thruster Plume by Laser Absorption Spectroscopy," 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, AIAA2006-5028, Sacramento, CA, USA(2006 - 7)
- (5) I. Funaki, H. Kuninaka, Y. Shimizu, and K. Toki: "Plasma Diagnostics and numerical modeling of a microwave ion engine", 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cleveland, Ohio, USA, (1998 - 7).
- (6) N. Onodera, and H. Kuninaka: "Electron Emission Mechanics of Microwave Discharge Neutralizer", 26th International Electric Propulsion Conference, IEPC-99-160, Kitakyusyu, Japan (1999 - 10) (1999)
- (7) R. Tsukizaki, H. Koizumi, K. Nishiyama, and H. Kuninaka: "Measurement of axial neutral density profiles in a microwave discharge ion thruster by laser absorption spectroscopy with optical fiber probes", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 82, No. 12, pp. 123103(2011)
- (8) D. M. Goebel, K. K. Jameson, R. M. Watkins, and I. Katz: "Hollow cathode and keeper - region plasma measurement using ultra-fast miniature scanning probes", 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 2004-3430 (2004)
- (9) K. K. Jameson, D. M. Goebel, I. Mikellides, and R. M. Watkins: "Local neutral and plasma parameter measurements in a Hollow Cathode Plume", 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 2006-4490 (2006)
- (10) A. Sengupta, D. M. Goebel, and A. Owens: "Neutral density measurements in an NSTAR ion thruster", AIAA-2006-4491, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Sacramento, California, USA, (2006 - 7)
- (11) Yang, J., Yokota, S., Kaneko, R. and Komurasaki, K.: Diagnosing on Plasma Plume from Xenon Hall Thruster with Collisional-Radiative Model, *Physics of Plasma*, 17(2010), pp.103504
- (12) Chiu, Y., Austin, B. L., Williams, S., Dressler R. A., and Karabadzahk, G. F.: Passive Optical Diagnostic of Xe-propelled Hall Thrusters. I. Emission Cross Section, *Journal of Applied Physics*. 99(2006), pp. 113304
- (13) Karabadzahk, G. F., Chiu, Y., and Dressler, R. A.: Passive Optical Diagnostic of Xe-propelled Hall Thrusters. II. Collisional - Radiative Model, *Journal of Applied Physics*, 99(2006), pp. 113305
- (14) Dressler, R. A., Chiu, Y., Zatsarinny, O., Bartshat, K., Srivastave, R., and Sharma, L.: Near-infrared Collisional Radiative Model for Xe Plasma Electrostatic Thrusters: The Role of Metastable Atoms, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(2009), pp. 185203
- (15) C. Z. Dong, Z. C., S. Fritzsche, and B. Fricke: "Theoretical study of 5p56s - 5p6 spectra of neutral xenon," *European Physical Journal D*, Vol. 40, No. 3, pp. 317 - 323 (2006)
- (16) H.D. Hagstrum, P. Petrie and E. E. Chaban: Interaction of He+ and Ne+ ions with Ni(100)-K and Cu(100)-K surfaces having variable potassium coverage, *Physical Review* Vol. 38, pp. 10264-10279 (1988)
- (17) A. R. Baragiola, V. E. Alonso, J. Ferron, and A. Oliva-Florio: "Ion-Induced Electron Emission from Clean Metals", *Surface Science*, Vol. 90, pp.240-255 (1979)
- (18) L. Allen, D. G. C. Jones, and D. G. Schofield: "Radiative Lifetime and Collisional Cross Section for Xe I and II," *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 7, No. 7, pp. 842 - 847 (1969 - 7)