

小型マイクロ波放電式イオンエンジンにおける中性粒子数密度測定

○杉田裕人 (静大・院), 小泉宏之 (東大), 國中均 (ISAS/JAXA)
山極芳樹 (静大), 松井信 (静大)

1. 緒言

近年では大型の電気推進が有人探査や新宇宙探査への適用のために開発が進められている。だがその一方で、小型の電気推進開発の必要性も増している。従来の大型の衛星と比べて、小型衛星は打ち上げにかかる費用が少なく、失敗のリスクも少ない。そのために技術実証を目的に小型衛星の開発・研究が盛んに行われている。

このような背景の中、ISAS/JAXA において 1cm 級のマイクロ波放電式イオンスラスタ $\mu 1$ (Fig. 1) が研究・開発されている¹⁾。このスラスタは 50kg 級の小型衛星への搭載を目的としている。マイクロ波電力 1[W]での作動が可能であり、中和器も含めて開発が進められている。

しかし現在では、 $\mu 1$ の推進剤利用効率は通常サイズのイオンスラスタに比べ低いという欠点があり、最適化が求められている。小型スラスタにおける最適設計を行うためには、狭い範囲でのプラズマ生成現象を把握することが重要であり、そのために放電室内のプラズマ状態を実測することが必要である。

本研究目的は小型イオンスラスタ $\mu 1$ の内部プラズマの実験的計測を行い、その結果から高モデル化を行い、 $\mu 1$ の性能を向上させることである。実験的計測には、内部状態を観測可能な $\mu 1$ 可視化モデルを使用した計測を行っている。

また、イオンスラスタは長時間作動できることが要求され、開発コスト・時間ともに多くを寿命耐久試験に費やさなければならない。このために改良を含めた新機種開発が進みにくいという難点があり、解決策として寿命評価試験を数値解析で代替するという試みが進められている。この数値解析の計算結果とイオンスラスタ内部計測結果を比較することは精度検証において有用な手段となる。

2. マイクロ波放電式小型イオンスラスタ : $\mu 1$

マイクロ波放電式イオンスラスタは ECR 加熱によりプラズマを生成し、イオンをグリッドシステムで静電加速させて外部に排出することによって推力を得ている。また、マイクロ波放電式イオンスラスタは、負電圧を印加することによって中和器としても適用が可能である。

マイクロ波放電式イオンスラスタ $\mu 1$ は ISAS/JAXA において開発されており、 μ シリーズ最小の小型イオンスラスタであり、その他には $\mu 10$, $\mu 20$ があり、引き出し口径が何 cm であるかにちなんで μ 以下の数字が与えられている。 $\mu 1$ の開発目的は、20~50kg 級の衛星に搭載する分散型イオンスラスタシステムの構築である。そのため、小惑星探査機はやぶさに搭載された $\mu 10$ を単純にサイズダウンしたわけではなく、小型化に際し様々な工夫がなされている。イオン生成部の形状や条件の最適化が行われ、アンテナ形状およびグリッド形状も独自の特徴的な進歩を遂げている。これまでの研究成果として、1つのスラスタでのイオン源および電子源の切り替え作動(両極性作動)の実証、低電力動作の実証がなされている。



Fig. 1 Miniature Ion Engine ($\mu 1$)

3. レーザー吸収分光法

レーザー吸収分光法は、測定する粒子のエネルギー準位にレーザーの波長を合わせ、その準位の広がりよりも十分に狭いスペクトル線幅を持つレーザーの波長を掃引するこ

とにより行う。波長を合わせたレーザーを入射すると、対象の粒子は励起準位に遷移するため、粒子の数密度数に応じてレーザー光の吸収が起きる。吸収係数 k 、長さ d_0 の一様な物質を通過するレーザー強度 I_t は入射強度 I_0 に対して以下の Beer-Lambert の法則により表される。

$$I_t = I_0 \exp(-kd_0) \quad (1)$$

吸収係数 k は振動数 ν の関数であり、数密度 n とは以下の関係がある。

$$\int k(\nu) d\nu = \frac{\lambda^2 g' A n}{8\pi g} \quad (2)$$

上式において g 、 g' はそれぞれ下準位、上準位の縮退度であり、 A はアインシュタインの A 係数である。すなわち、吸収プロファイルを振動数 ν で積分することで数密度 n を求めることが可能である。今回実験で対象とした粒子はキセノンの準安定準位中性粒子である 823nm (Xe I 823) である。Xe I 823 は寿命が 40[s] 以上と非常に長いため、吸収率が高く測定が容易であるため、実験系の妥当性を確認するためには適している。

4. 実験装置

4.1 $\mu 1$ 可視化モデル

本研究で使用した $\mu 1$ 可視化モデルを Fig. 2 に示す。本研究では、側面に平面ガラスを用いることで可視化を行っている。平面ガラスを使用したことで放電室形状が直方体となり、 $\mu 1$ と異なったものになっているが、永久磁石のサイズや放電室高さは $\mu 1$ から変更していない。また、この可視化モデルではグリッドシステムは設けていない。

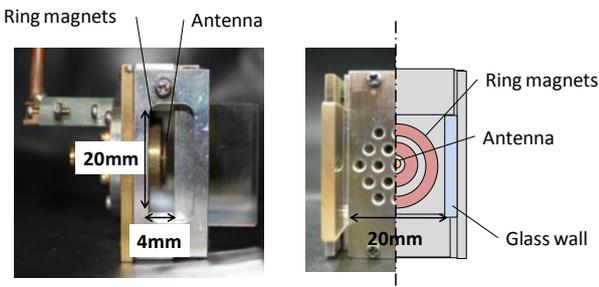


Fig. 2 $\mu 1$ visualized model

4.2 測定システム

本実験で用いた実験装置の概略図を Fig. 3 に示す。レーザー源として半導体レーザーを用いており、温度変調と電流変調により波長を調整する。吸収プロファイルの検出にはファンクションジェネレータを用いた電流変調により変調周波数 10Hz、変調幅約 20GHz で変調させて測定を行った。レーザー光は測定対象である真空チャンバ内の可視化 $\mu 1$ 以外に、いくつかの機器へ分岐されている。大まかに波長を調整するための波長計、細かい波長校正を行うエタロン、チャンバ外で吸収プロファイルの参照するためのキセノン放電管である。レーザー光はフォトディテクタで受光し、電気信号として出力され検出する。

そして、光学台上でレーザー光を光ファイバーに導入し、真空チャンバ内にレーザーを導入している。チャンバ内部ではコリメートレンズを通して平行光にして可視化 $\mu 1$ を通過させ、コア径 50 μm の光ファイバー端面を利用して受光している。そのため、空間分解能は 50 μm 程度が期待できる。可視化 $\mu 1$ 内のレーザーパス部分の概略図を Fig. 4 に示す。

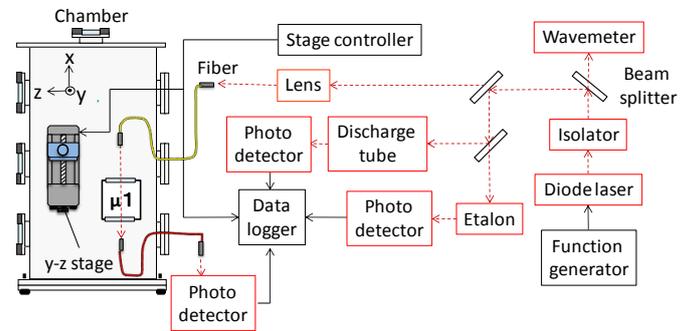


Fig. 3 Experimental setup

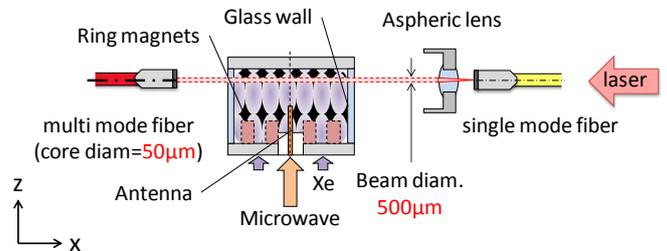


Fig. 4 $\mu 1$ visualized model and laser probe pass

また、可視化 $\mu 1$ にレーザーを導入する部分と受光する部分は一体型の部品となっており、それらは二軸ステージ上に設置されている。チャンバ内に固定された $\mu 1$ に対して二軸ステージを稼働させてレーザーパスを動かすことで、 yz 方向の二次元分布取得を可能にしている。ステージはそれぞれステッピングモータ駆動であり、外部からプログラムにより制御可能であり、自動で多点測定を行い、二次元分布データを効率よく取得することを可能にした。また、ステージ制御用の信号を実験時に同時に取得し、そのデータを基に、密度分布解析を行えるプログラムを作成した。

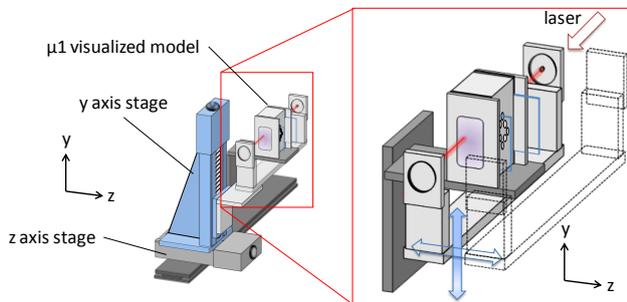


Fig. 5 2D distribution measurement system

5. 実験結果

Fig. 6 に可視化 $\mu 1$ のアンテナ中心から 1mm の点で得られた吸収プロファイルを示す。この吸収プロファイルは、可視化 $\mu 1$ に投入するマイクロ波電力を遮断し、プラズマが消失した時のデータを基に算出した。また、図中には参照用のキセノン放電管で得られた吸収プロファイルも示している。吸収プロファイルの形が大きく異なるのは内部の磁場が影響していると考えられるが、可視化 $\mu 1$ 内部でも吸収プロファイルを確認することが出来た。

可視化 $\mu 1$ 内部で吸収プロファイルを確認することが出来たので、密度分布測定を実施した。Fig. 7 に Xe I 823nm の二次元密度分布計測結果を示す。測定空間は側面の平面ガラスをレーザーが通過可能な 20mm×3mm のアンテナ根元からグリッド部分（壁面）までを測定空間とした。格子間隔は 0.1mm である。図中の黒い部分はアンテナやグリ

ッドを表している。この部分はレーザーが通過することが出来ないため、解析不可能とした。

結果をみるとアンテナ上部では $10^{16} \sim 10^{17} [\text{m}^{-3}]$ オーダーの値が得られており、これは ECR プラズマ源としては妥当な値であると考えられる。また、壁面近くでは密度値が低く、ゼロ付近の値を取る点も見られたが、これは測定の感度に問題があり、吸収率が低い点での測定精度が低いと考えられる。

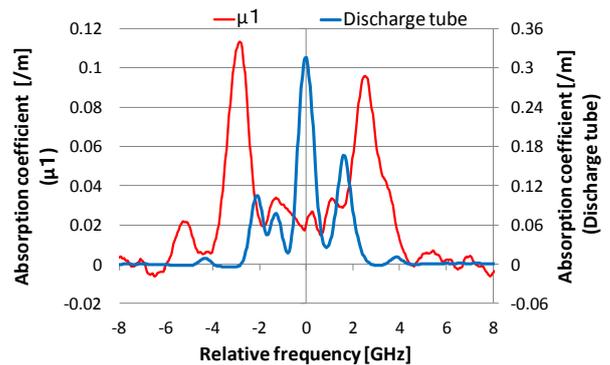


Fig. 8 An example of absorption profile (Xe I 823nm)

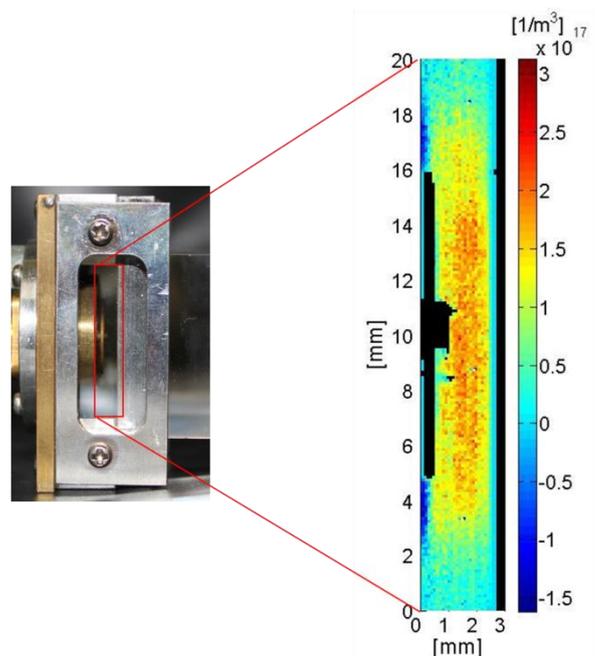


Fig. 7 Measurement space and density distribution (Xe I 823nm)

6. 結論

本研究で得られた $\mu 1$ 内部の中性粒子数密度測定に関する研究を行った。主な結果は以下の通りである。

- (1) $\mu 1$ 可視化モデルを用いた吸収分光法による 2 次元密度分布取得のための実験系を構築した
- (2) 励起中性粒子密度分布測定を行い、 $10^{16} \sim 10^{17} [\text{m}^{-3}]$ オーダーの ECR プラズマ源として妥当な値が得られた。

謝辞

本研究は平成 22-26 年度科学研究費補助金（若手研究 A, 課題番号 22686080）の補助を受けたものであり、ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) Koizumi, H. and Kuninaka, H., "Low Power Micro Ion Engine Using Microwave Discharge," AIAA Joint Propulsion Conference, AIAA-2008-4531, 2008.
- 2) Hiroyuki Koizumi and Hitoshi Kuninaka "Ion Beam Extraction and Electron Emission from the Miniature Microwave Discharge Ion Engine $\mu 1$ ", IEPC-2009-178, 2009
- 3) プラズマ・核融合学会 編: プラズマ診断の基礎と応用 コロナ社 2006
- 4) Ryudo Tsukizaki, Hiroyuki Koizumi, Satoshi Hosoda, Kazutaka Nishiyama and Hitoshi Kuninaka "Numerical Density Measurement of Neutral Particles in Microwave Discharge Ion Engine $\mu 10$ ", 宇宙輸送シンポジウム 2010