

マイクロ波イオン源のプローブ診断

中井達也^{*1}, 宮本尚使^{*2}, 西山和孝^{*3}, 國中均^{*3}

Probe Measurements of a Microwave Ion Source

by

Tatsuya Nakai^{*1}, Takashi Miyamoto^{*2}, Kazutaka Nishiyama^{*3} and Hitoshi Kuninaka^{*3}

Abstract: Along with the development of microwave discharge ion engines, it is necessary that a analysis model of the ion sources is developed. As the first stage, probe measurements of the ion source of $\mu 20$, which is under the development now, were done. In the discharge chamber of $\mu 20$, it is expected that a certain circumferential distribution is exist because of the magnetic field and the gas ports in the discharge chamber. In this reseach, we got the distribution between inside magnet rows, which indicated an increase in electron temperatures and a decrease in plasma densities along the direction of the ∇B drift of electrons. Moreover, it is found that electron temperatures and plasma densities change in two different cases of the locations of the gas ports. These results shows that the best shape of the discharge chamber can improve the performance improvement of $\mu 20$.

Key words: Electric Propulsion, Microwave Discharge, Probe Measurement

概 要

マイクロ波放電型イオンエンジンの開発に伴い、そのイオン源の解析理論の構築が必要となっている。本研究ではその第一段階として、現在研究開発が進められている $\mu 20$ のイオン源に対してプローブ計測を行った。 $\mu 20$ のイオン源には、特徴である放電室内の磁場形状や推進剤の供給方法から、周方向の分布が存在する事が予想される。今回のプローブ計測により、内側の磁石列間において周方向の分布が確認された。電子の受ける ∇B ドリフトの方向に沿って、電子温度の増加とプラズマ密度の減少が見られた。また、推進剤の供給位置を変えた場合に電子温度・プラズマ密度に違いがあることがわかった。これらの結果より、放電室形状を最適にすることで $\mu 20$ の性能向上が期待できる。

1. はじめに

マイクロ波放電型イオンエンジンは、2003年5月にM-Vロケットによって打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ」に $\mu 10$ として搭載され、初めて実用化に至った。今後の深宇宙探査計画においてはさらなる高性能化・大推力化が求められているため、口径を $\mu 10$ の2倍とした $\mu 20$ の開発が現在進められている(表1)。これまでの研究では、放電室内の磁場形状、マイクロ波導入方法、推進剤の供給方法などを変えることにより性能改善が達成されてきた。しかしその一方で、マイクロ波

* 1 University of Tokyo

* 2 Kyushu University

* 3 JAXA/ISAS

放電により生成されたイオン源の内部状態については未だ明確な理解は得られていない。現在までイオンエンジンとして主流である直流放電型においては、Brophyらが構築した非常にシンプルなプラズマ生成モデルが存在する[1]。このモデルに参考にして、マイクロ波放電型についてもプラズマ生成モデルを構築することができれば、これからの性能向上に大きな影響を及ぼすといえる。そこで本研究では、そのモデルの構築に向けた初動段階として、プロープ測定によるマイクロ波イオン源の内部診断を行ったので、その結果について報告する。

表1 $\mu 10$ と $\mu 20$ の性能比較.

	$\mu 10$ (達成)	$\mu 20$ (目標)
ビーム口径	10 (cm)	20 (cm)
加速電極電圧	1500 (V)	1200 (V)
ビーム電流	140 (mA)	500 (mA)
マイクロ波電力	32 (W)	100 (W)
イオン生成コスト	220 (eV)	200 (eV)

2. マイクロ波イオン源 $\mu 20$

今回使用するマイクロ波イオン源 $\mu 20$ には、径 200 mm、奥行き 30 mm の放電室に磁石をリング状に極性を入れ替えながら 4 列並べてある (図 1)。中心のアンテナから供給される 4.25 GHz のマイクロ波が磁場が作り出す ECR 領域で電子を加熱し、プラズマが生成される。このプラズマ生成に重要な電子は、放電室下流側 (紙面手前方向) に向かって弱くなる磁場強度により、 ∇B の影響で、1-2 列間、3-4 列間では反時計回り、2-3 列間では時計回りに移動すると考えられる。それに対し、推進剤を供給するガスポートの位置は、放電室内において局所的に存在する。このことから、 $\mu 20$ の放電室内では周方向に対して何らかの特徴的な分布が存在するのではないかと考えられる。今回の実験では、この周方向の分布が確認できるかどうかを見る。

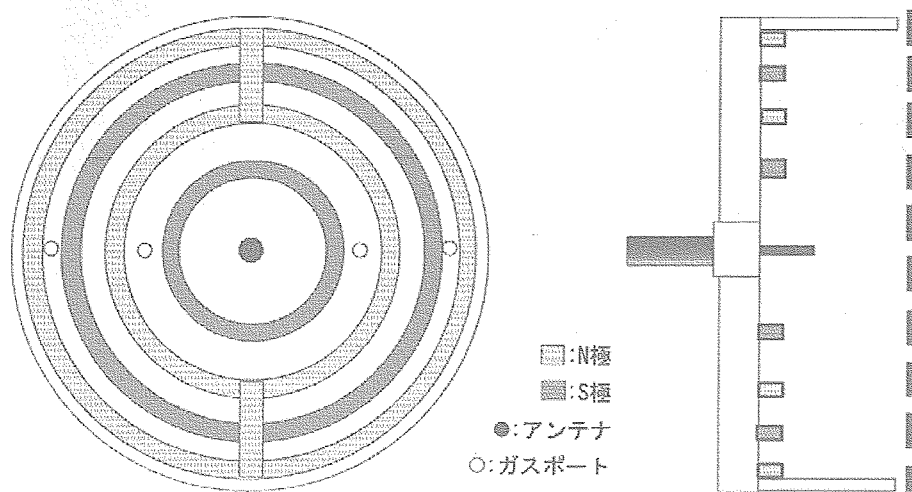


図1 $\mu 20$ の放電室.

3. 測定方法と条件

測定装置の概略を図 2 に示す。今回の実験はラングミュアプローブ法 (シングル) で行った。プローブには径 0.3 mm、長さ 4 mm のタングステン製の円筒プローブを使用した。プローブは 1-2 列間、3-4 列間に 60 度ごとに 6 本、根元が放電室に 5 mm 入ったところに設置した。真空装置には、宇宙科学研究本部の $\mu 10$ 耐久試験用真空容器を用いた。容器内の圧力は 1.0×10^{-4} Torr 程度である。推進剤は X_0 を使用した。

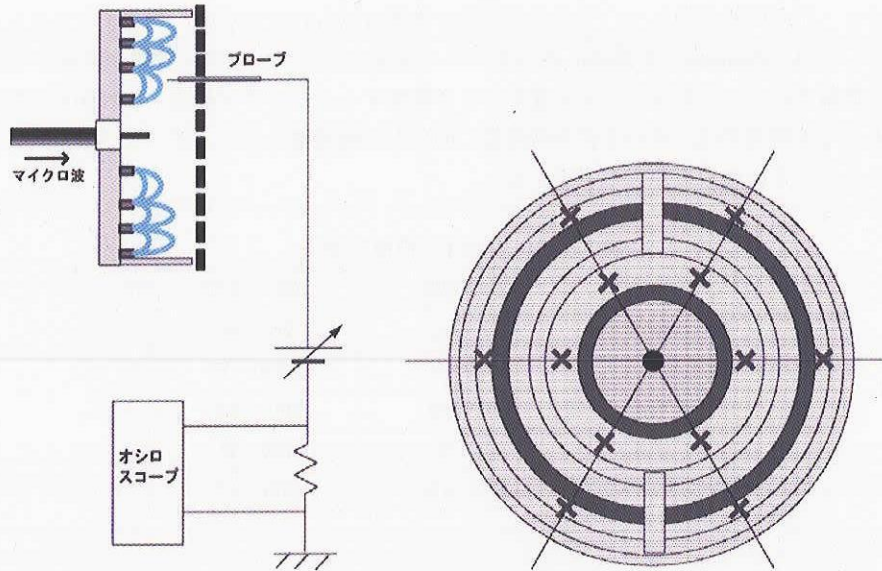


図2 装置概略図.

測定するプラズマは、A. $\mu 20$ としての性能が一番良い状態、B.性能が悪い状態、の二つの状態とした。ここでいう $\mu 20$ としての性能というのは、引き出しイオンビーム電流値が大きいかどうかを意味する。このA、B、二つの状態で違うのは、ガスポートの位置である。Aの状態では1-2列間、3-4列間とも0度と180度、Bでは1-2列間の0度、90度、180度、270度となっている（中心から右にのびる半直線を0度とし反時計回り正）。それぞれの場合で加速試験を行った際の $\mu 20$ の写真を図3に示してある。また、二つの状態についての諸パラメータを表にしたものが表2である[2]。

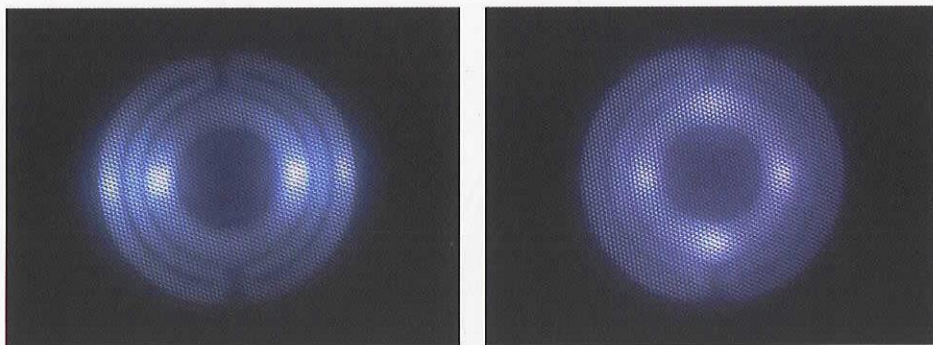


図3 加速時の写真（左がA、右がBの状態）.

実際の測定ではイオンの加速はせず、グリッドの代わりにパンチングメタルを用意し、その穴からプローブを挿す。放電室内は加速時の状態に模擬する。具体的には推進剤流量を調整する事で放電室内の圧力を加速時と非加速時で等しくする。非加速時での適切な流量を求める式が次式である。

表2 各測定状態のパラメータ.

	A	B
マイクロ波周波数 (GHz)	4.25	4.25
マイクロ波電力 (W)	100	100
推進剤流量 (sccm)	9.6	10.7
非加速時流量 (sccm)	5.2	9.4
イオンビーム電流 (mA)	501.2	418.4

$$\begin{aligned} \dot{m}_{ac} &= \dot{m}_{ac}\eta + C_G p_{ac} && \text{: 加速時} \\ \dot{m}_{non} &= C_P p_{non} && \text{: 非加速時} \\ \dot{m}_{non} &= \frac{C_P}{C_G} (1 - \eta) \dot{m}_{ac} \end{aligned}$$

ここで、 \dot{m}_{ac} 、 \dot{m}_{non} はそれぞれ加速時、非加速時の推進剤流量、 C_G 、 C_P はそれぞれグリッド、パンチングメタルのコンダクタンス、 p_{ac} 、 p_{non} はそれぞれ加速時、非加速時の放電室内圧、 η は推進剤利用効率である。放電室とパンチングメタルはグラウンドにおとしてある。

4. 測定結果

図4に電子温度 T_e 、図5にプラズマ密度 n_p の算出結果を示す。ほとんどの測定点において、ECRプラズマで顕著に現れる二温度分布(図6参照)が見られた(EEDFにおいてグラフの尾っぽが2つの直線で表現される.)。よって、図4に関しては上段に低い電子温度、下段に高い電子温度の値を示してある。まず図4のAの場合についてであるが、内側の1-2列間の値を見るとガスポートの位置から反時計回りに値が高くなっていくのがわかる。中心のアンテナに対して180度反対の場所でもこの傾向が現れている。これに対して、Bの状態では6点でほとんど差は見られなかった。また、Aでは二温度であるが、Bではほとんど一温度分布である。一方、外側の3-4列間のプラズマでは、A、B、どちらの場合も位置により値にバラつきがあり、周方向依存の分布を確認する事ができない結果となった。

次に図5についてであるが、Aの内側では電子温度ほど顕著ではないが反時計回りに減少している。特にガスポートの手前で極端に密度が低くなっている。Bでは周方向の分布を確認できないが、Aに比べ各点で値が低い、という結果になった。外側ではやはり値にバラつきが出た。プローブ測定自体の測定精度という問題があるが、特徴のある分布が得られているといえる。

性能の良い状態Aの内側において今回得られたような分布が存在する理由は、電子の加熱過程を考慮すると理解できる。1-2列間において、ガスポートの位置からドリフト運動により反時計回りに移動する。移動している途中でマイクロ波周波数に対応するECR領域で加熱されることにより、電子温度が高くなる。半周した電子は、ガスポートに突入するとそこから湧き出た中性粒子と衝突して電離が起こり、そのエネルギーを失う。ガスポートを抜け出た電子は再び磁気トラックを走り加熱され、ガスポート周辺で冷まされる。それを証明するようにガスポート直前ではプラズマ密度が低く、ガスポートの位置でプラズマ密度が増加している。一方性能の悪い状態Bでは、ガスポートの数に対し磁気トラックの距離が短いため電子が十分に加熱されず、電離に必要なエネルギーを持っていないので効率良くプラズマを生成できていない。図5のBの結果を見るとAと比べてプラズマ密度が一様に低いことがわかる。

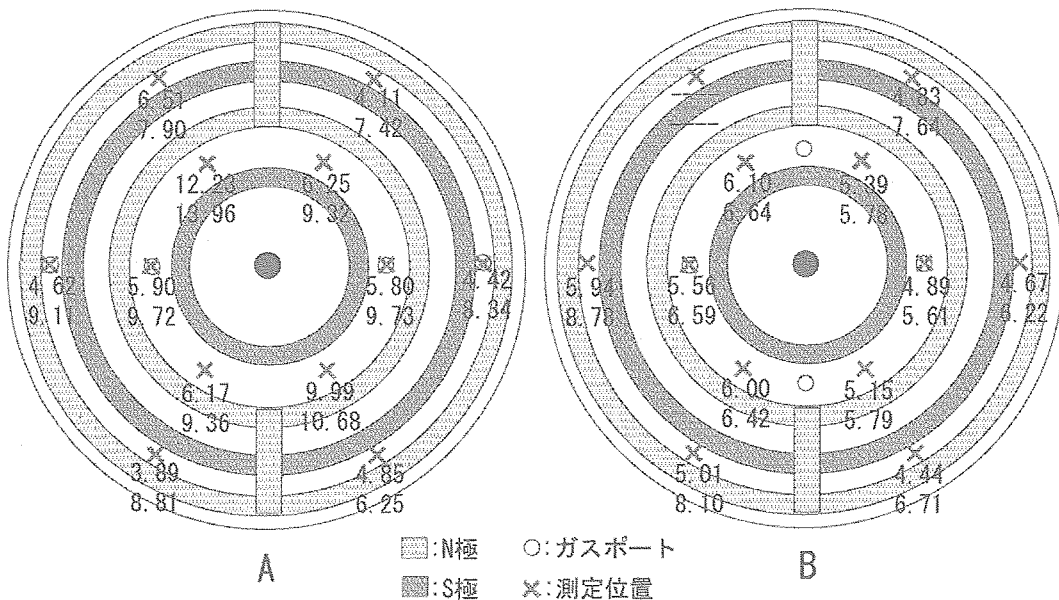


図4 測定結果 (電子温度 [eV]).

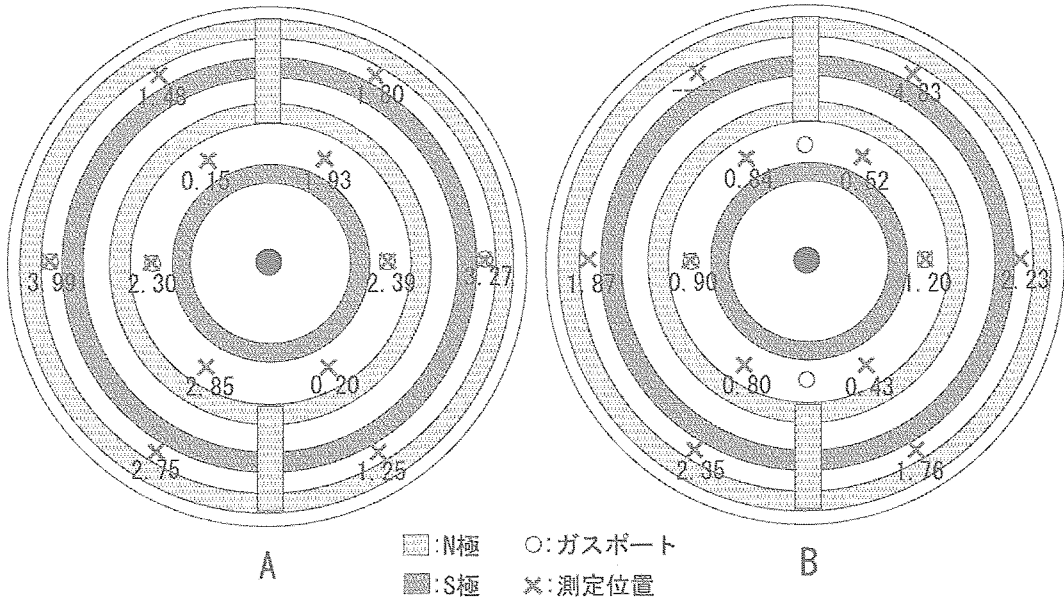


図5 測定結果 (プラズマ密度 [10^{12} cm^{-3}]).

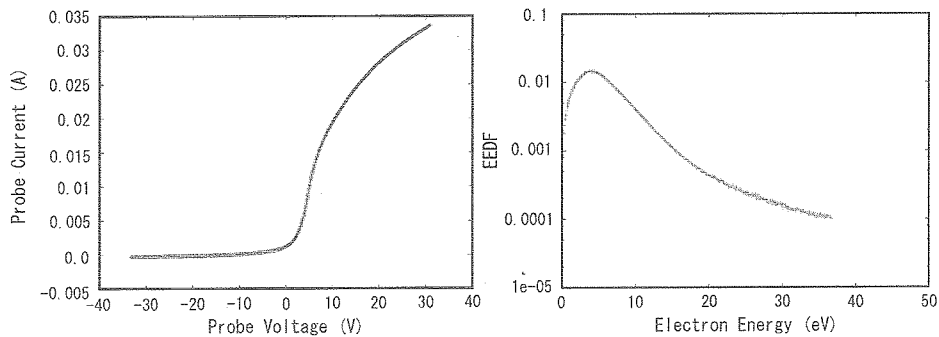


図6 測定結果の一例 (左がプローブ特性, 右がそのEEDF).

5. ま と め

今回の測定実験からは、 $\mu 20$ としての性能が良い状態の内側のプラズマにおいて、電子の動く方向に沿って電子温度・プラズマ密度に変化がある、という結果が得られた。外側のプラズマにおいては、何らかの特徴を見出すには難しい結果となった。当然これらの測定データだけでは、放電室内の状態を明確に把握しプラズマ生成理論を構築するまでには到底及ばない。まず、特に外側において、測定点の数が少なかった。また、放電室内でのマイクロ波の電界強度分布の影響も考慮すべきで、電界強度プローブによる測定も今後必要となるだろう。これらの測定によりマイクロ波イオン源の特徴についてさらなる理解が得られれば、 $\mu 20$ の放電室内を効率の良くプラズマが生成できるような最適形状に換えることができ、より一層の性能向上が期待できる。この性能評価も含めて今後実験を進める予定である。

参 考 文 献

- [1] John R. Brophy and Paul J. Wilbur, "Calculation of Plasma Properties in Ion Sources", AIAA Journal, Vol.24, No.9, September 1986, pp.1516-1523.
- [2] Kazutaka Nishiyama, Yukio Shimizu, Hitoshi Kuninaka, Takashi Miyamoto, Miho Fukuda and Tatsuya Nakai, "Research and Development Status of Microwave Discharge Ion Thruster $\mu 20$ ", IEPC, November 2005.