

# 電極加速型スラスタ用ヘリコンプラズマ源の性能評価

○原田翔太, 馬場輝明, 横田茂, 佐宗章弘 (名大), 山崎拓也, 清水宏文 (三菱重工業)

Shota HARADA, Teruaki BABA, Shigeru YOKOTA and Akihiro SASOH

**Key Words: Electric propulsion, Helicon**

**Abstract:** Helicon wave plasma is one of the hopeful candidates of plasma source for high-power electric propulsion systems because its density is expected to be higher than  $10^{19} \text{ m}^{-3}$ . Research for the development of helicon plasma thruster has been focused on the electrodeless ion acceleration schemes, however any thrusters have never demonstrated the efficient acceleration. We propose the helicon plasma thruster which accelerates ions using electrodes. As a first step, we manufactured a plasma source and evaluated its performances. As a result, the propellant utilization efficiency reached 86 %. The exhausted ion energy was about 30 eV.

## 1. はじめに

ヘリコンプラズマ源<sup>1)-3)</sup>は RF(Radio Frequency) と呼ばれる MHz 帯の高周波電力を用いたプラズマ生成法の一つである。高周波放電方式の中では特に高密度である  $10^{19} \text{ m}^{-3}$  以上のプラズマ生成が可能であり, またイオンエンジン等の推進機とは異なり電極の損耗を考慮する必要がないため, 大電力電気推進向けのプラズマ源として注目されている。

ヘリコンプラズマを用いた電気推進機の研究は, その特徴を生かすため, 無電極加速方式に焦点の当てられたものが多い。代表的なものとして, AdAstra 社における VASIMR®(Variable Specific Impulse Magneto-plasma rocket)<sup>4)</sup>, オーストラリア国立大学における HDLT(Helicon Double Layer Thruster)<sup>5)</sup>, HEAT (Helicon Electrodeless Advanced Thruster)プロジェクト<sup>6)</sup>などが挙げられる。これらは, プラズマ加速方式がそれぞれ電熱加速型, 静電加速型, 電磁加速型と異なるが, プラズマの生成から加速まで無電極で行う完全無電極電気推進の研究である。これらはいずれも研究段階にあり, 有効な加速方式は未だに確立されていない。したがって, 現段階で加速方式は電極を用いた加速を含めて検討する必要があると考えられる。

本研究の目的は, ヘリコンプラズマの電極を用いた加速方式の提案および実証を行うことである。本稿においては, その前段階としてヘリコンプラズマ源を作成し, その性能評価およびプラズマ診断による推進機性能評価へ向けた準備を行ったので, その内容を報告する。

## 2. 実験装置

### 2.1. プラズマ源

本研究に用いたヘリコンプラズマ源を図 1 に示す。プラズマ源はプラズマ生成部となるセラミック管, 銅製のアンテナ, および磁場印加用コイルから構成される。

セラミック管は, 外径 34 mm, 内径 27 mm, 長さ 300 mm であり, 推進剤としてアルゴン(純度 99.9999 %)を上流から供給している。アンテナ下流でのプラズマの壁面損失を少なくするため, セラミック管はコニカルノズル形状のセラミック部品に接続されている。アンテナには長さ 170 mm のヘリカル型アンテナ<sup>7)</sup>を用いた。磁場の印加には, 巻数 1500 回の水冷式のソレノイドコイルを用い, コイル電流 13 A において z 方向の磁束密度が最大 130 mT の磁場を印加している。コイル中心軸上における z 方向の磁束密度分布を図 1 に合わせて示

す。ここで、コイルによる磁場の磁束密度が最大となる位置を  $z=0$  としている。高周波電力の供給には発振周波数 13.56 MHz, 最大出力 5 kW の RF ジェネレータ(RFK50ZH, 京三製作所製)およびマッチングボックス(MBK50, 京三製作所製)を用いている。

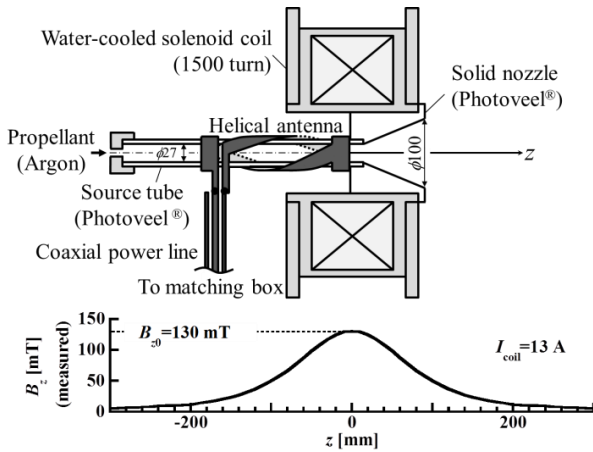


図 1 プラズマ源の概要

## 2.2. 真空チャンバー

本研究に用いた真空チャンバーを図 2 に示す。

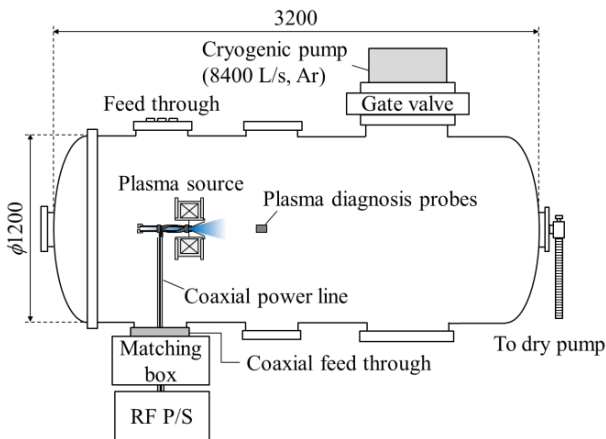


図 2 真空チャンバー

真空チャンバーは直径 1.2 m, 長さ 3.2 m を有し, ドライポンプ(116.7 L/s)による粗引きを行った後, クライオポンプ(8400 L/s, アルゴン)によって排気される。真空度はピラニゲージおよび電離真空計によって測定され, すべての実験条件を通して

$1.6 \times 10^{-2}$  Pa 以下に保たれていた。高周波電源およびマッチングボックスはチャンバー外に設置され, アンテナ-マッチングボックス間は長さ 600 mm の同軸二重円筒状の送電線によって接続している。

## 2.3. プラズマ診断プローブ

プラズマ源の性能評価として全イオン電流  $J_b$  の計測・プラズマ空間電位分布計測・イオンエネルギー分布関数 (Ion Energy Distribution function : IEDF) 計測を行った。

全イオン電流  $J_b$  の計測には, 大きさが  $225 \times 225$  mm の銅板を  $z=195$  mm の位置に設置し, コイルケースの電位より  $-100$  V の電圧を印加することでイオンコレクタとして用いて計測を行った。金属板によってイオン電流を測定する場合, 金属表面からの二次電子放出が起こると電流の過大評価につながる。イオンの運動エネルギーが比較的小さい場合でも, イオンの電離エネルギーと金属の仕事関数に起因する二次電子放出 (オージェ放出)<sup>8)</sup> が起こる。過去の文献<sup>9)</sup>から二次電子放出係数は 0.1 程度であると考えられるため, イオン電流計測には 10% 程度の誤差が含まれると考えられる。

空間電位計測には図 3 に示す RF compensated Langmuir probe<sup>10)</sup>を用いた。このプローブは, 13 MHz に自己共振周波数をもつチョークコイルと, プラズマに晒されるコイル状の電極を有している。この電極は 2.2 nF のキャパシタを介してプローブの回路に接続される。このため, 実質的なプローブの補修面は先端の  $\phi 0.3$  mm, 長さ 5 mm の円柱プローブである。図 4 (a)に  $z=385$  mm において計測したプローブの I-V 特性を示す。得られた I-V から図 4 (b)のように電子電流  $I_e$  の対数プロットを行い, 減速電界領域と電子飽和領域のフィッティング直線の交点から空間電位  $\phi$  を決定した。

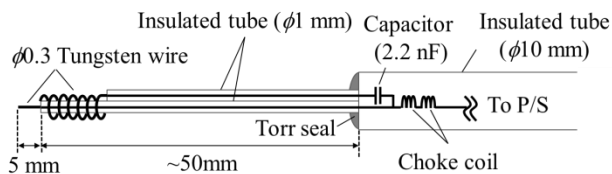


図 3 RF compensated Langmuir probe の回路図

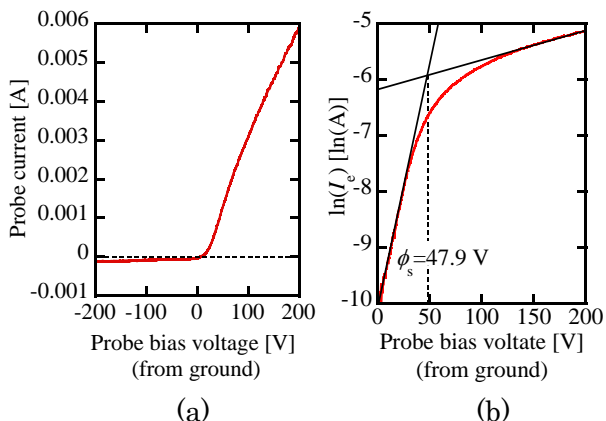


図 4 (a) I-V 特性, (b)電子電流の対数プロットによる空間電位決定方法. ( $Q=14$  sccm,  $P_{rf}=500$  W,  $z=385$  mm)

IEDF の計測には、図 5 に示す 3 グリッド式の Retarding Potential Analyzer (RPA)<sup>11)</sup>を用いた。プラズマに直接さらされる第 1 グリッドはフローティングとなっている。第 2 グリッドは、電子の流入を防ぐためチャンバー電位より  $-200$  V の電圧が印加されている ( $V_{2nd}$ )。第 3 グリッドはイオンのエネルギーを選択するためのグリッドであり、 $-100$  V ~  $+200$  V で電圧を掃引している ( $V_{3rd}$ )。第 3 グリッドの電位を超えるエネルギーをもつイオンのみがイオンコレクタまで到達し、電流信号として計測される。イオンコレクタ電流は  $15$  k $\Omega$  の抵抗を用いて計測した。IEDF の計測は、RPA を  $z=385$  mm の位置に設置して行った。

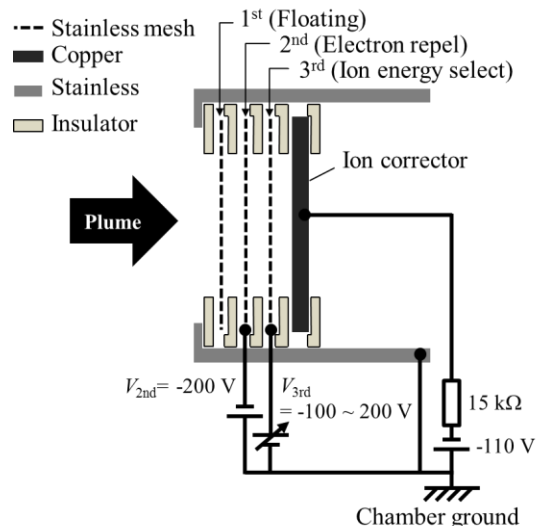


図 5 RPA の回路図

### 3. 実験結果

#### 3.1. 全イオン電流計測

全イオン電流  $J_b$  の計測結果から、プラズマ源の評価パラメータとして、推進剤利用効率  $\eta_u$  とイオン生成コスト  $C_i$  を算出する。 $\eta_u$  と  $C_i$  は以下の式で表される。

$$\eta_u = \frac{J_b}{e \frac{\dot{m}}{M_i}} \quad [-] \quad \text{式 1}$$

$$C_i = \frac{P_{rf}}{J_b/e} \quad [\text{eV/ion}] \quad \text{式 2}$$

ここで、 $e$ 、 $m$ 、 $M_i$ 、 $P_{rf}$  はそれぞれ電荷素量[C]、質量流量[kg/s]、イオン質量[kg]、RF 電力[W]を表す。図 6 に推進剤流量 14 および 29 sccm のときの  $\eta_u$  と  $C_i$  の関係を示す。14 sccm において  $\eta_u$  は最大で 86 % に達したが、この時のイオン生成コストは 1688 eV と高く、高周波電力の損失が大きいことがわかる。また、推進剤流量を 29 sccm に増やした際、 $\eta_u$  が下がる傾向にある。

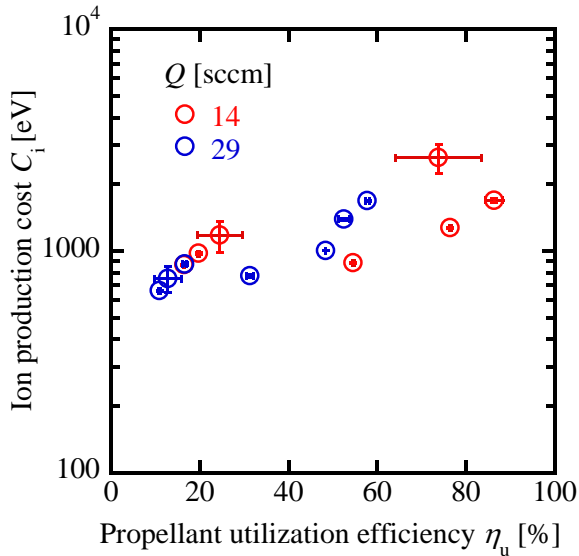


図 6  $\eta_u$  と  $C_i$  の関係

### 3.2. 空間電位分布計測

図 7 にプラズマ源下流領域での、 $z$  軸上の空間電位分布計測の結果である。下流に行くにつれて、空間電位が低下し、30 V 以上の電位差が生じている。プラズマ源下流は拡散磁場となっており、磁気ノズルの効果によって上流の電子の熱エネルギーに起因した電界が生じていると考えられる。

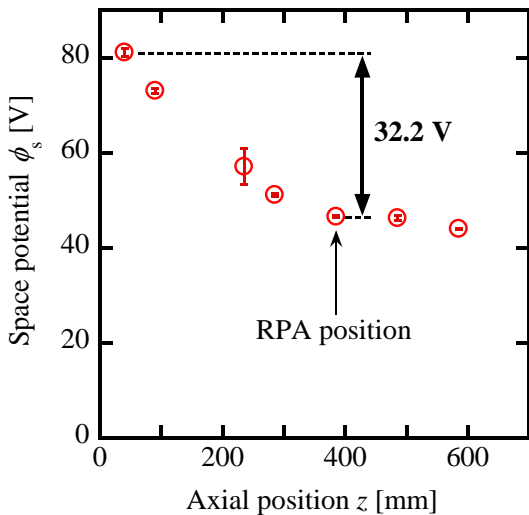


図 7  $z$  軸上の空間電位分布 ( $Q=14$  sccm,  $P_{rf}=500$  W)

### 3.3. IEDF 計測

図 8 にプラズマ源から流れ出るプラズマの IEDF の一例を示す。図中の青線が第 3 グリッドの電圧  $V_{3rd}$  を掃引したときのイオンコレクタ電流信号である。この曲線に関してフィッティングを行い、 $V_{3rd}$  に対する一次微分をとることで、赤線の IEDF を算出した。

この図から分かる通り、IEDF には二つのピークが存在する。40 V 付近のピークは空間電位を表し<sup>12)</sup>、熱運動のみで流入する遅いイオンであると考えられる。すなわち、40 V が並進運動のエネルギーゼロに相当する。それに対し、70 V 付近にもう一つのピークが存在することから、一部のイオンが約 30 eV に加速されていることがわかる。これは空間電位分布計測におけるプラズマ源下流に生じる電位差とおおよそ一致しており、拡散磁場中にできる電界によって加速されたイオンであると考えられる。

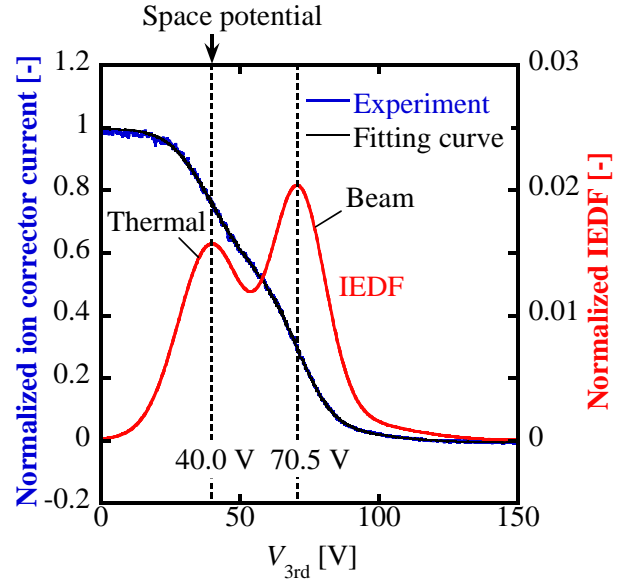


図 8 規格化したイオンコレクタ電流信号および IEDF ( $Q=14$  sccm,  $P_{rf}=500$  W)

## 4. まとめ

ヘリコンプラズマの電極を用いた加速方式の実証へ向け、プラズマ源を作成し、その性能評価お

よびプラズマ診断によるスラスタ性能評価へ向けた準備を行った。

- ・ プラズマ源の効率は Ar, 14 sccm の場合, 最大推進剤利用効率 86 %, この時のイオン生成コストは 1688 eV だった。
- ・ 空間電位計測から得られた電位差と, IEDF から求まるイオンのエネルギーはおおよそ一致した。
- ・ プラズマ加速機構がない場合, 磁気ノズルにより約 30 eV に加速されたイオンを計測した。

### 参考文献

- 1) F. F. Chen, "Plasma Ionization by Helicon Waves," *Plasma Physics and Controlled Fusion*, Vol. 25, No. 6, pp.1245-1257, 1991.
- 2) 庄司多津男, 坂和洋一, "ヘリコン波プラズマ," *プラズマ核融合学会誌*, 第 74 巻, 第 1 号, 1998.
- 3) S. Shinohara, "Recent Topics on High Density Plasma Production by Helicon Waves," *Journal of Plasma and Fusion Research*, Vol. 78, No. 1, 2002.
- 4) F. R. ChangDiaz, J. P. Squire, *et al.* : The Physics and Engineering of The VASIMR Engine, Proc. of 36<sup>th</sup> JPC, AIAA-2000-3756, pp1-8
- 5) C. Charles, C. Costa, R. W. Boswell, *et al.*, "Helicon Double Layer Thruster," *IEPC-2005-290*
- 6) S. Shinohara, H. Nishida, K. Yokoi, T. Nakamura, *et al.* "Research and Development of Electrodeless Plasma Thrusters Using High-Density Helicon Source: The Heat Project," *IEPC-2011-056*
- 7) T. Shoji, Y. Sakawa, *et al.* "Plasma Production by Helicon Waves," *Plasma Source Science and Technology*, No. 2, 1993.
- 8) 川村孝式, "小特集 プラズマ再結合 2. 再結合過程 2.3 表面再結合," *プラズマ核融合学会誌*, 第 74 巻第 6 号, 1998.
- 9) H. D. Hagstrum, "Auger Ejection of Electrons from Tungsten by Noble Gas Ions," *PHYSICAL REVIEW*, Vol. 129, No. 6, pp325-334, 1954.
- 10) P. A. Chatterton, J. A. Rees, *et al.*, "A Self-compensation Langmuir Probe for Use in RF (13.56 MHz) Plasma System," *Vacuum*, Vol. 42, No. 7, pp.489-493, 1991.
- 11) B. E. Beal and A. D. Gallimore, "Energy Analysis of a Hall Thruster Cluster," *IEPC-2003-035*
- 12) T. Lafleur, C. Charles and R. W. Boswell, "Detailed Plasma Potential Measurement in a Radio-frequency Expanding Plasma Obtained from Various Electrostatic Probes," *PHYSICS OF PLASMAS*, Vol. 16, 2009.