

極端小口径の高密度ヘリコンプラズマ特性

中川 叔紀* 藤墳 弘昌 佐藤 慶武 田中 瑛子

桑原 大介 篠原 俊二郎 (東京農工大学)

1. 諸言

電気推進ロケットエンジン^[1]は、化学ロケットエンジンと比べて比推力において非常に優れているため、深宇宙探査など宇宙空間での長期ミッションへの運用が期待されている。しかし、現在使用されているエンジンは、電極がプラズマと直接接触するため損耗が起り、寿命が制限される問題を抱えている。そこで本研究室では、プラズマと接触のない外部アンテナから高密度プラズマの励起を可能なヘリコンプラズマ^[2-5]を用いて、完全無電極構造のエンジンの開発を目指している。

2. 研究目的

一般的には大きい推力を得るために大型大電力の推進機を用いる研究が主にされているが、本研究では小型の推進装置の研究を行っている。小型の推進機の開発によって、小型・軽量を生かした姿勢制御などの小回りの必要な推進機としての運用や、複数の推進機をクラスタ化させることによる冗長性の獲得、また推進以外の目的でも、電気推進ロケットエンジンの中和器に用いる小型高密度プラズマ源や細管の内壁加工などのメリットが期待されている。

本研究では、本研究室で開発した小ヘリコン装置^[6,7] (Small Helicon Device: SHD)を用いて、以下の事を行った。

- ① 従来の最小径 20 mm^[6,8]以下の極端小口径でのプラズマ放電を行いプラズマ特性を比較
- ② 推進機としての性能評価およびガス種依存性調査の初期実験として、Ar と He の 2 種類のガスを用いて電子密度と流速の計測・比較

3. ヘリコンプラズマ

ヘリコンプラズマ^[9]とは、ヘリコン波によって励起されるプラズマのことであり、この波は管壁などによって境界を持つホイッスラー波(磁場に平行に進む右回りの円偏波)である。1 Pa 以下の低圧力下でも高密度 ($\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) 生成が可能であり、圧力や磁場強度、高周波電力 (radio frequency: rf) 周波数などで広い運転領域を持つ特徴がある。具体的な生成機構については精力的に研究が行われてお

り、ヘリコン波から TG 波 (Trivelpiece-Gould wave) へのモード変換による吸収過程が有力である。

Fig. 1 にヘリコンプラズマの分散関係を示す。電子密度 n_e と波数 $k_{//}$ が一定と仮定すれば、プラズマ径が小さいほど rf 周波数と磁場強度の比 f/B は大きくなる、すなわち小口径ヘリコンプラズマ生成には高い rf 周波数と低い磁場強度が適していると考えられる。

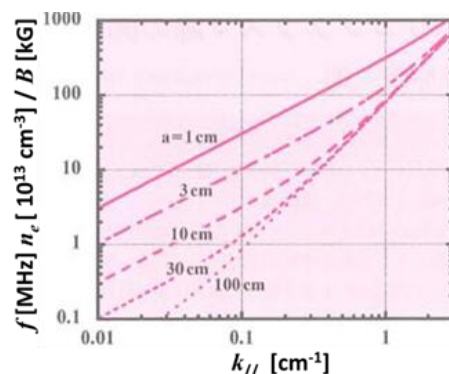


Fig. 1 Dispersion relation of helicon plasma.^[9]

4. 実験装置

実験に使用した小ヘリコン装置の概略図を Fig. 2 に示す。生成されたプラズマが噴射される真空チャンバー部は全長 865 mm、内径 165 mm と、本研究室のもう一つのプラズマ生成装置 Large Mirror Device (LMD^[10], 全長 1,700 mm、内径 450 mm) よりも小さい設計となっている。このチャンバーに石英管を接続し、プラズマを生成する。ゲージポートアダプタによって接続する石英管の内径と形状は自由に変えることができ、今回の実験では内径 20 mm, 10 mm, 5 mm, 3 mm で、長さはいずれも 453 mm のものを使用した。プラズマ生成アンテナには厚さ 0.2 mm の銅板で作成したダブルループアンテナを、外部磁場の印加には自作のコイル (幅 100 mm, 内径 94 mm, 外径 360 mm, 最大軸方向磁場強度 28 G/A) を使用した。プラズマの電子密度と流速の計測にはそれぞれ自作のラングミュアプローブとマッハプローブ^[11]を使用した。

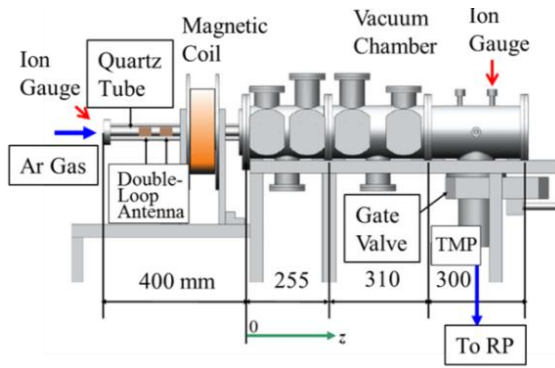


Fig. 2 Small Helicon Device (SHD).

5. 実験結果

5.1 小口径プラズマ放電

rf アンテナ直下 ($z = -265$ mm) における内径 20 mm での各周波数の電子密度 n_e の rf パワー P_{rf} に対する依存性を Fig. 3 に示す. ガス流量は 20 sccm (ガス圧約 1.8 Pa), コイル電流 I は 20 A で一定とした. rf 周波数 $f = 7, 50, 70$ MHz, 外部磁場の有無いずれの場合でも n_e は P_{rf} に対して増加した. 7 MHz のとき rf パワー $P_{rf} \sim 800$ W で急激な n_e の上昇 (密度ジャンプ) が起こり, 1 kW で $n_e \sim 10^{13}$ cm $^{-3}$ が得られた. これは ICP (Inductively Coupled Plasma: 誘導性結合型プラズマ) からヘリコンプラズマへ放電モードが移行したものと考えられる.^[12] $f = 50, 70$ MHz の場合は, 600 W までは 7 MHz の場合よりも高い n_e を示したが, 急激な密度ジャンプは見られなかった.

しかし Fig. 4 において, 50, 70 MHz では 7 MHz よりも低パワーでのプラズマ放電が可能であり, 最小で約 1 W での生成が確認された. 50 MHz では 7 W, 70 MHz では 2 W 前後で 10^8 cm $^{-3}$ から 10^{10} cm $^{-3}$ への密度ジャンプが見られた. これは, CCP (Capacitively Coupled Plasma: 容量性結合型プラズマ) から ICP へ放電モードの移行と考えられる.

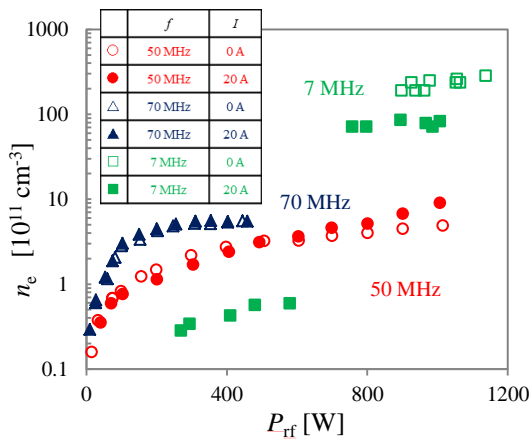


Fig. 3 n_e ($z = -265$ mm) as a function of P_{rf} with inner diameter of 20 mm ($P_{rf} = 0 - 1200$ W).

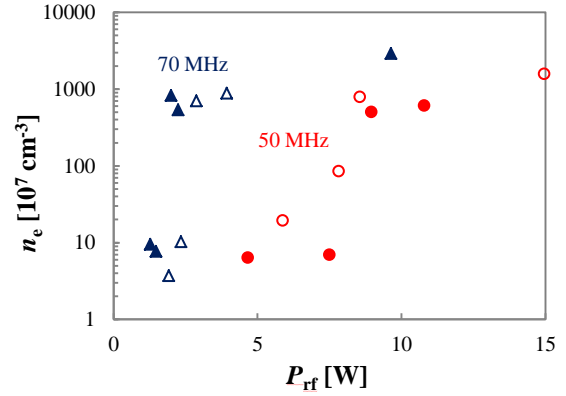


Fig. 4. n_e ($z = -265$ mm) as a function of P_{rf} in inner diameter of 20 mm ($P_{rf} = 0 - 15$ W).

石英管内径 10 mm の場合の電子密度の rf パワー依存性を Figs. 5 と 6 に示す. 測定位置は Fig. 5 が $z = 65$ mm (真空チャンバー内), Fig. 6 が $z = -40$ mm (石英管内) である. ガス流量は 5 sccm (ガス圧約 1.6 Pa) とした. P_{rf} と共に n_e は上昇し, $f = 12$ MHz, $I = 20$ A の場合は密度ジャンプも得られた. 石英管内で $n_e \sim 10^{12}$ cm $^{-3}$, 真空チャンバー内で $n_e \sim 10^{11}$ cm $^{-3}$ が得られた.

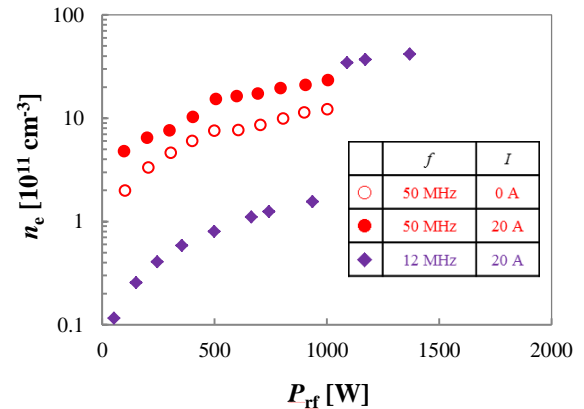


Fig. 5 n_e ($z = -40$ mm) as a function of P_{rf} with 10 mm i.d..

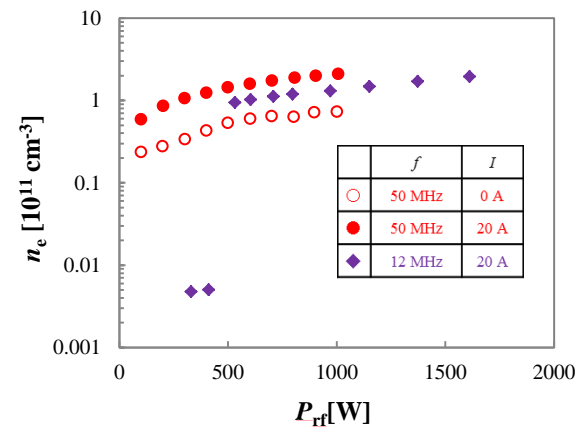


Fig. 6. n_e ($z = 65$ mm) as a function of P_{rf} with 10 mm i.d..

更なる小型高密度プラズマ源の開発のため、石英管内径 5 mm での高密度プラズマの生成を試み、放電に成功した。ラングミュアプローブが放電を阻害するため石英管内に挿入出来ず、計測位置は真空チャンバー内 ($z = 65$ mm) のみとした。電子密度の rf パワー依存性を Fig. 7 に示す。ガス流量は 5 sccm (ガス圧 約 60 Pa) とした。内径 10 mm では真空チャンバー内で n_e は 10^{11} cm $^{-3}$ 、石英管内で 10^{12} cm $^{-3}$ を得られ、5 mm においても石英管外で $n_e \sim 10^{11}$ cm $^{-3}$ が得られていたことから、石英管内の n_e は約 10^{12} cm $^{-3}$ と推定できる。また、生成されたプラズマがヘリコンプラズマであるかどうかの確認が必要だが、磁化 ICP としては従来の内径 20 mm よりも小さい世界最小径のものである。内径 3 mm でもプラズマの放電にも成功した (Fig. 8, rf 周波数 70 MHz, ガス流量 0.04 sccm, $P_{rf} \sim 650$ W)。プラズマが真空チャンバーに届かなかったため、 n_e の計測は出来なかった。しかし、分光器によって Ar のスペクトルは観測できた。

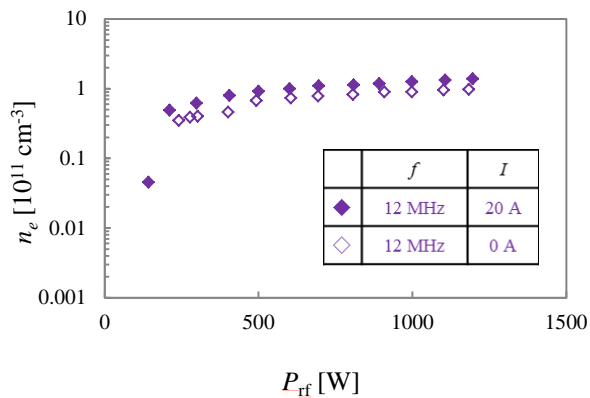


Fig. 7 n_e ($z = 65$ mm) as a function of P_{rf} with 5 mm i.d., changing I .

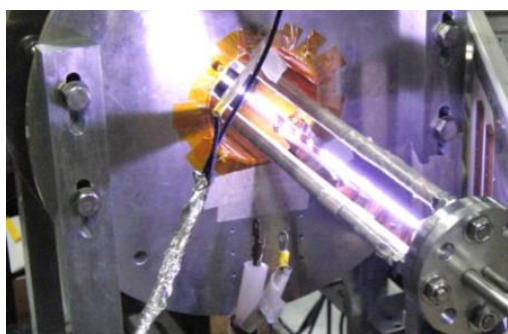


Fig. 8 Discharge with 3 mm i.d..

5.2 電子密度とイオン流速のガス種依存性

石英管内径 20 mm で Ar を用いた場合の電子密度と流速 v の rf パワー依存性を計測した。石英管内径は 20 mm, rf 周波数は 12 MHz, 計測位置は $z = 95$ mm (コイル直下) とした。 $P_{rf} \sim 300$ W で 10^{10} cm $^{-3}$ から 10^{11} cm $^{-3}$ への n_e のジャンプが見られ、同時に流速は約 1,300 m/s から約 600 m/s に

低下した。密度ジャンプが起こった後は rf パワーに比例して電子密度は上昇したが、流速はほとんど変化しなかった。

次に、ガス種を He に変えて同様の実験を行い、電子密度 n_e と流速の rf パワー P_{rf} に対する依存性を計測した。発光の様子を Fig. 9 に示す。Ar での放電と比べて電子密度が低く、プラズマの発光も弱かった。これは、Table 1 にあるように、He が Ar と比べて約 1.4 倍の第一イオン化エネルギーを持つため、同じ rf パワーでも電離度が低くなったことが原因と考えられる。マッハプローブによるイオン流速の計測に関しては、コイル電流 20 A で最大値約 3,700 m/s と Ar ガスの 3 倍近い速度を得た。これは、Table 1 より、He の質量が Ar の約 0.1 倍と非常に軽いことが原因と考えられる。

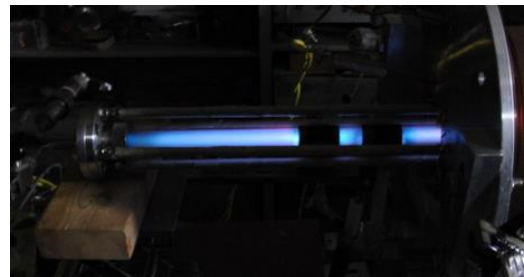


Fig. 9 Discharge with i.d. of 20 mm using He gas.

Table 1 Molecular weight and First ionization energy

ガス種	H2	He	Ar	Xe
分子量[g/mol]	2.016	4.003	39.95	131.3
第一イオン化エネルギー[eV]	13.60	24.59	15.76	12.13

6. 結論と今後の課題

6.1 小型プラズマ源の開発

小口径高密度プラズマ源の開発を目的として、従来の最小径 20 mm^[6, 8]以下の内径でプラズマ生成を試みた。

実験の結果、以下のことが分かった。

- 内径 20 mm, rf 周波数 7 MHz で電子密度 10^{13} cm $^{-3}$ 達成.
- rf 周波数が高いほど低パワー領域で高密度、高パワー領域では逆の傾向
- 50, 70 MHz では 5 W 以下の低パワーでもプラズマ生成が可能 (電子密度 10^{10} cm $^{-3}$)
- 磁化 ICP としては世界最小径の 5 mm での放電と電子密度の計測に成功 (電子密度 10^{11} cm $^{-3}$)
- 内径 3 mm でのプラズマ放電に成功

本実験では、内径 3 mm での放電には成功したが、プローブが挿入できず電子密度の計測が出来なかったこと、生成されたプラズマが ICP かヘリコンプラズマかの判別が出来なかったことが今後の課題として残った。更なる小口径

高密度プラズマ源の開発も考慮に入れて、今後の予定として以下のことを行っていく。

- ・内径 3 mm での電子密度の計測
- ・内径 1 mm でのプラズマ放電
- ・Intensity Ratio の測定による電子密度とイオン温度の計測
- ・波動の計測による ICP とヘリコンプラズマの判別

6.2 推進性能の評価

小型高密度プラズマ源の推進装置としての性能評価と He 放電の初期実験として, Ar と He の 2 種類のガス種でプラズマを生成し、推力に関わる重要なパラメータである流速をマッハプローブによって計測してそれぞれを比較した。その結果、下記のことが分かった。

- ・マッハプローブを用いて内径 20 mm でのプラズマ流速の計測に成功
- ・Ar 放電で rf パワー 200 W で流速約 1,300 m/s。300 W 付近で 10 倍程度の電子密度のジャンプ。同時に流速が 600 m/s まで減速
- ・He でのプラズマ放電に成功。電子密度 10^{11} cm^{-3} , 流速 3,700 m/s
- ・Ar 放電と比べて、He 放電は低い電子密度、高い流速
- He 放電および流速の計測に成功はしたが、マッハプローブはプラズマに電極を挿入し計測を行うためにプラズマを乱し、加えて高周波ノイズの大きい石英管内では大きな誤差を出してしまう可能性がある。推進装置としてのさらなる評価も考慮して、今後は下記のことを行っていく。
- ・He 放電の高密度化
- ・磁場配位の調整や永久磁石の使用による流速の増加
- ・流速と電子密度の軸方向分布の計測による推力の算出
- ・H₂, Xe の放電とパラメータ計測
- ・レーザー誘起蛍光法による流速の絶対計測

参考文献

- [1] 栗木恭一・荒川義博: 電気推進ロケット入門, 東京大学出版会 (2003).
- [2] R. W. Boswell : Phys Lett. **33A** (1970) 457.
- [3] S. Shinohara : Jpn. J. Appl. Phys. **36** (1997) 4695.
- [4] R. W. Boswell and F. F. Chen : IEEE Trans. Plasma Sci. **25** (1997) 1229.
- [5] F. F. Chen and R. W. Boswell : IEEE Trans. Plasma Sci. **25** (1997) 1245.
- [6] D. Kuwahara, A. Mishio, T. Nakagawa and S. Shinohara: Rev. Sci. Instrum. **84** (2013) 103502.
- [7] T. Nakagawa, S. Shinohara, D. Kuwahara, A. Mishio and H. Fujitsuka: J. Phys. Soc. Jpn. Suppl. **83** (2014) in press.
- [8] O. V. Batishchev: IEEE Trans. Plasma Sci. **37** (2009)

1570.

- [9] 篠原俊二郎, 日本物理学会誌 **64** (2009) 519.
- [10] S. Shinohara, S. Takechi and Y. Kawai: Jpn. J. Appl. Phys. **35** (1996) 4503.
- [11] プラズマ・核融合学会編, プラズマ診断の基礎, 名古屋大学出版会 (1990).
- [12] S. Shinohara, T. Hada, T. Motomura, K. Tanaka, T. Tanikawa, K. Toki, Y. Tanaka and K. P. Shamrai : Phys. Plasmas **16** (2009) 057104.