

小型 VASIMR 推進に向けた無電極プラズマ装置開発

星野優介、伊澤裕紀、鈴木清孝（東北大院工）、松浦宏太、高橋和貴、安藤晃（東北大工）

1. はじめに

深宇宙探査ミッションや小惑星捕獲ミッション (ARM) を実現するためには、長寿命で信頼性があり、高推力と高比推力を合わせ持った推進機が必要となる。この推進機の有力候補の一つとして VASIMR (VARIABLE Specific Impulse Magnetoplasma Rocket) があげられる[1]。

VASIMR はプラズマと電極の直接接触がない無電極推進機であり、推力と比推力をコントロールすることで目的地に短期間で到達することができる。この推進機実現に向けて Ad Astra Rocket Company で主に実験が行われており、200 kW で最大、推力 5.7 N、比推力 5000 s、推進効率 72% を達成している[2]。

VASIMR の開発における研究課題として、①ヘリコン波による高密度プラズマ生成、②イオンの高周波加熱、③磁気ノズルによるプラズマ流加速、④磁力線からのプラズマ離脱がある。本研究室でも、この推進機実現に向け東北大学 HITOP (High density Tohoku Plasma) 装置において、各セクションで詳細な研究を行ってきた[3-5]。その結果、ヘリウムと水素のイオン加熱に成功し、ヘリウムに関してはイオン温度が 50 eV まで増加し、比推力 10000 s 以上を達成した[6]。

しかしながら、さらなる高推力を目指したアルゴンプラズマでの実験では、ラーマ半径の影響でイオン熱エネルギーの飽和現象が見られ、加熱効率が低下する結果となった。この課題解決には更なる強磁場が必要であった。そこで我々は、強磁場が生成可能な小型無電極プラズマ生成・加熱装置を新たに開発した。この装置では、アルゴンイオン加熱の効率改善を図る。そして、高推力を達成可能な小型 VASIMR 推進の実現を最終目標としている。

推力を大きくするためには、 $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 程度の高密度プラズマのイオン加熱が必要となることから、まず、高密度プラズマ生成のために磁場配位等の条件最適化を行った後、プラズマの基礎特性を取得した。そしてその後イオン加熱を実施した。イオン加

熱には、HITOP 装置で効率よくイオンが加熱された実績のあるライトヘリカルアンテナを利用した。その結果について報告を行う。

2. 実験装置

本研究で開発した無電極プラズマ生成・加熱装置を図 1 に示す。実験装置は全長 70 cm、内径 6.4 cm のガラス管の周りに磁場コイルが取り付けられている。装置はプラズマ生成部とイオン加熱部に大別される。

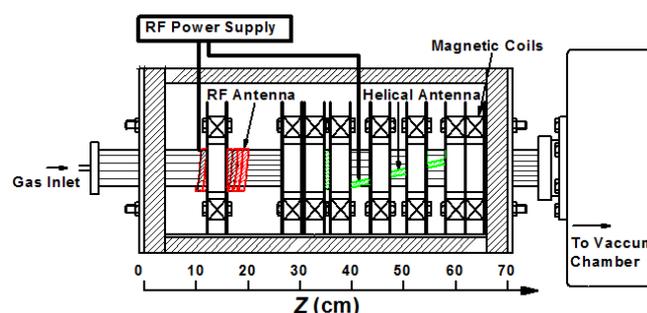


図 1 無電極プラズマ生成・加熱装置

プラズマ生成部では、RF アンテナによる高周波放電によってプラズマを生成する。電源には 80% 以上の高い DC - RF 変換効率をもつ FET インバータ電源を利用し、比較的 low 周波数な 200 - 300 kHz での動作を行う。低周波化することでプラズマ表皮厚が増加すること、また、300 kHz 周波数帯でのヘリコン波励起による高密度プラズマ生成の例があることがこの周波数を用いる主な理由である[7]。

イオン加熱部では、ライトヘリカルアンテナにより波動を励起する。この波動がイオンと共鳴し、エネルギーを与えることでイオンが加熱される。この際、アルゴンのイオンサイクロトロン周波数と投入する RF 周波数が一致する必要がある。200 - 300 kHz 利用時の共鳴磁場強度は、最大 0.79 T となるため、強磁場が必要となる。本装置は 60 ms 程度のパルス幅を持った電流を流すことで、プラズマが準定常放電している 5 ms の間に一定の強磁場が得られ

るように設計されている。また、9個の外部磁場コイルは取り外し可能で、位置と電流値を調節することで最適な磁場配位を形成することが可能である。今回の実験で用いた動作周波数200 kHzでのイオン加熱用磁場配位を図2に示す。イオン加熱が起こる共鳴点は、 $Z = 60$ cm周辺である。また、磁気プローブによって測定した磁場強度の実測値も理論値と共に示した。これより、実測値が理論値とよく一致していることが分かる。なお、本論文で示すデータはすべて図2の磁場配位を利用している。

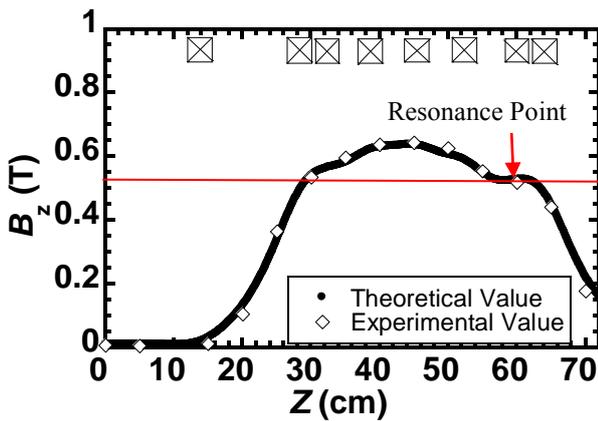


図2 ICRF加熱磁場配位 (RF周波数200 kHz)

3. 実験結果

まずはプラズマ生成のみを行い、基礎パラメータの取得を行った。図3は、生成用RFアンテナに投入する電力を変化させた時のプラズマ密度と電子温度の変化を示したものである。

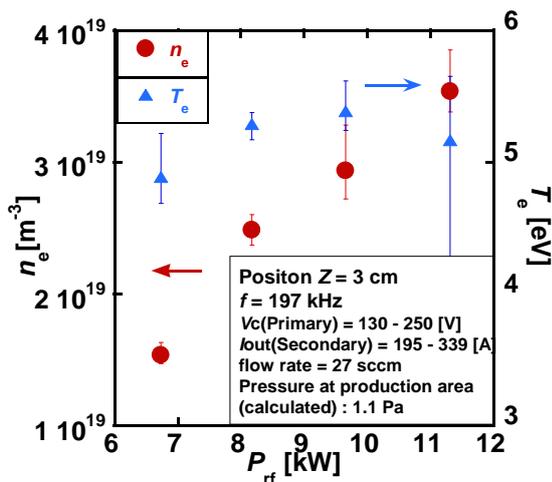


図3 プラズマ密度と電子温度の電力依存

RFアンテナの位置は $Z = 9 - 19$ cm、プローブ測定位置は $Z = 3$ cm、動作周波数は 197 kHz、プラズマ生

成部のガス圧はおよそ 1.1 Pa である。結果より、RFパワーの増加にしたがってプラズマ密度が線形的に増加していることが確認できる。一方で、電子温度は電力による変化は見られなかった。また、最大で $3.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ の高密度アルゴンプラズマが生成されていることが分かった。

次にガラス管中心部における、密度のZプロファイル測定を行った。結果を下図4に示す。

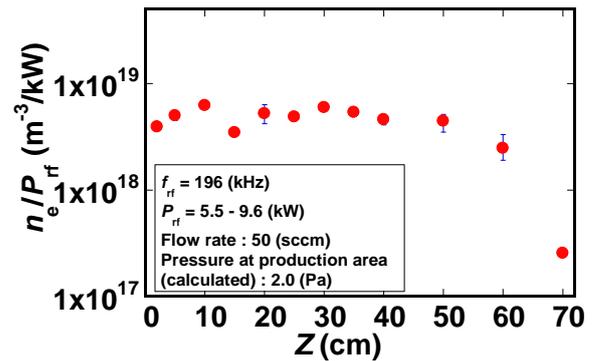


図4 プラズマ密度のZプロファイル

投入電力が一定とならなかったため、プラズマ密度が規格化してあることに注意する必要がある。加熱部 ($Z = 60$ cm) では、投入電力 5.7 kW で密度が $3.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ であった。上流部で生成されたプラズマが磁場にそって損失なく下流部に流れており、加熱部においても高密度プラズマが得られたと考えられる。

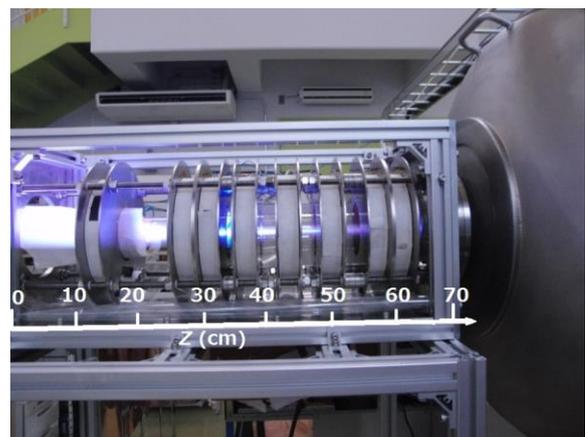


図5 放電の様子

図5に、プラズマ生成のみを行った時の放電の様子を示す。図から、プラズマ生成部(上流)はガラス管全体にプラズマが分布しているのに対し、加熱

部（下流）では磁場の影響でイオンのラーマ半径が小さくなり、プラズマの径が細くなっていることが分かる。加熱用ヘリカルアンテナはガラス管の外に巻くため、プラズマとの距離が離れてしまう。そのため、加熱効率が低下することが考えられる。したがって、加熱部のプラズマの径に合わせたガラス管を設計する必要がある。

そこで、加熱部付近でプラズマの径方向分布の測定を行った。結果を図6に示す。グラフから、プラズマの径は1.7 cm程度で減衰し、ゼロに近づくことが分かった。これは、生成部のプラズマの径をガラス管の内径であると仮定すると、ミラー比から計算したプラズマの径と良く一致した。この結果を踏まえ、ガラス管の内径をZ=25 cmで6.4 cmから4.1 cmに細くなるよう改良した。

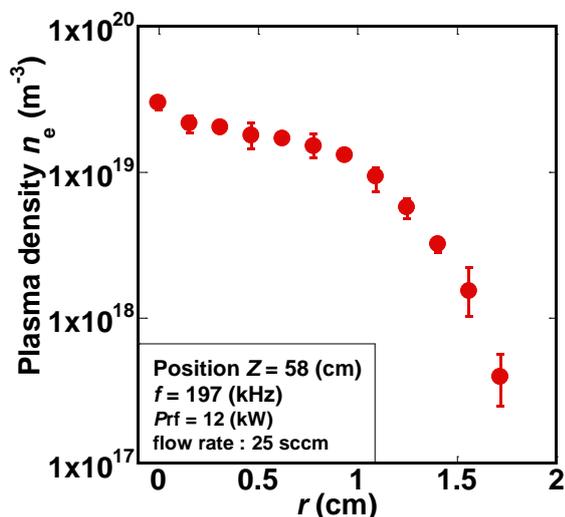


図6 プラズマ密度の径方向分布

生成部の最適化、加熱のセッティングが完了したため、イオン加熱を実施した。今回の実験では、加熱の効率改善を目的としているため、生成部と加熱部に投入する電力は変化させず、一定の比率で行った。まずは、容易に測定できる静電プローブにより密度測定を行い、加熱ありとなしで比較を行った。結果を図7に示す。加熱用ヘリカルアンテナの位置はZ=27-50 cmに設置した。投入電力は、イオン加熱なしの 때가6.3 kW、イオン加熱ありの 때가、プラズマ生成4.5 kW、イオン加熱3.4 kWとした。実験では、単一電源でプラズマ生成とイオン加熱の電力を投入した関係で、マッチング周波数が変化した。よって、イオン加熱の共鳴点が変わらないよう、磁場強度の調整を行い、Z=60 cm付近で共鳴が起

こるようになった。

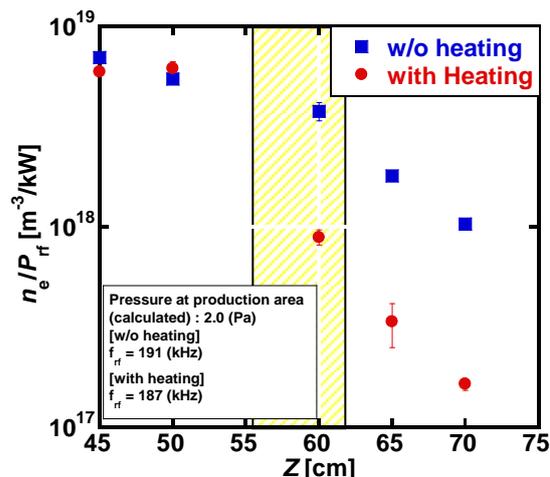


図7 加熱有無でのZプロファイル

図からイオン加熱ありでは、共鳴領域付近まで密度が緩やかに減少し、磁場発散部で加熱なしに比べてより大きく減少した。これは、加熱によりイオンのエネルギーが増加し、磁気ノズルでイオンのエネルギーが流速に変化、流束一定の関係から密度が減少したためと考えられる。しかし、エネルギーの測定を行っていないため、詳細な議論はできない。よって今後、さらなる測定が必要である。

4. まとめ

小型 VASIMR 推進実現に向け、無電極プラズマ生成・加熱装置を開発した。200 kHz 周辺の高周波放電でプラズマを生成したところ、下流部においても $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 以上の高密度アルゴンプラズマが得られていることが確認された。また、生成部の投入電力を増加させるとプラズマ密度は線形的に増加した。これは、比推力可変を達成するという観点から重要である。また、加熱部のプラズマ径が、磁場の影響でミラー比程度まで絞られていた。そのため、下流部でガラス管を細くするよう改良し、イオン加熱実験を実施した。プラズマ密度は、加熱なしに比べ、加熱ありでは磁場発散部で急激に減少し、加熱が行われていることが推測された。しかし、密度の測定のみでは詳細な議論はできないため、今後はイオンエネルギー、流速の測定を行い、定量的評価を行うことで効率改善を図る。

5. 参考文献

- [1] F.R. Chang Diaz AIP Conference Proceedings
2001, Vol. 595 Issue 1, p3
- [2] Edger A. Bering et.al., AIAA-2011-1071 (2011)
- [3] 萩原達也 他, 平成 20 年度宇宙輸送シンポジウム (2008)
- [4] 渡部博 他, 平成 24 年度宇宙輸送シンポジウム (2012)
- [5] A.Ando et.al., Plasma and Fusion Research
Vol.3 (2008)
- [6] A.Ando et.al., Phys. Plasma **13**, 057103 (2006)
- [7] A.Ando et.al., Rev. Sci. Instrum., **81** (2010)