

ECR 加熱型 RF プラズマスラスタの複数磁場におけるプラズマ特性調査

Investigation of Plasma Characteristics for RF Thruster with ECR Heating on Various Magnetic Field Configurations

○中川 慶哉（農工大・学）・伊藤 祥（農工大・院）・大塩 裕哉・西田 浩之（農工大）

○Yoshiya Nakagawa・Sho Ito・Yuya Oshio・Hiroyuki Nishida (Tokyo University of Agriculture and Technology)

Abstract

This paper presents experimental investigation of the RF plasma thruster with ECR (Electron Cyclotron Resonance) heating. We constructed the thruster system which can change magnetic fields variously and measured the plasma characteristics by the double probe to acquire knowledge of the effect of ECR heating. As a result, it is shown that Solenoid magnetic field designed in this study is more suitable for RF plasma source than other magnetic fields over 600 W RF power. The electron number density at 500 W of RF power with 200 W microwave power for ECR heating is 3.62 times higher than that of only RF power on Solenoid magnetic field. Under the total power of 500 W (RF+MW), the electron number density generated by RF with ECR heating is higher than the sum of that of ECR plasma and RF plasma. ECR heating on RF plasma thruster is effective on Solenoid magnetic field. It is expected that the performance of the RF plasma thruster with ECR heating we developed would be improved by ECR heating due to the increase of electron pressure in the discharge chamber.

1. 研究背景

大規模軌道間輸送や深宇宙探査のミッション時間の短縮のために、プラズマスラスタの大電力化¹⁾が要求されている。従来のプラズマスラスタはプラズマと直接接触する電極がプラズマによるスパッタ等により損耗することで、寿命が制限されてしまう。そこで大電力化と長寿命の両立のためにプラズマと直接接触する電極を持たない無電極プラズマスラスタが提案・研究されている。無電極プラズマスラスタのコンセプトの1つとして、RFプラズマスラスタがある。このスラスタは高周波(RF波)と静磁場を用いてプラズマを生成、発散形状の磁場である磁気ノズル²⁾でプラズマの圧力を運動エネルギーに変換し推力を得る。しかし、推進効率は10%程度³⁾と低く、性能向上のために様々なプラズマ生成・加速手法が研究されている。VASIMRでは静磁場と高周波(RF波)を用いて生成したヘリコンプラズマをイオンサイクロトロン共鳴(ICRH)によって加熱、磁気ノズルを通して加速することで推進効率72%という高性能を達成している⁴⁾。VASIMRはICRHによる加熱により放電管内の圧力と径方向圧力勾配を増加させることで磁気ノズルの推力増加をおこなっている。しかしながらICRHで加熱したプラズマの閉じ込めに強磁場(約2T)が必要であるため超伝導コイルが必要となり大型かつ複雑なシステムが必須となる。加えて、高性能達成には数百kW級の電力を要するため、近い将来の実用化は困難である。より小型・

簡素で低電力レベルにおいて無電極プラズマスラスタの高推進性能化が今後10-20年程度で提案されているミッション用として必要である。そこでプラズマ中のイオンではなく電子をマイクロ波によって加熱(ECR加熱)し、電子温度を上昇させてプラズマ圧力を高めることで推力を増強するECR加熱型RFプラズマスラスタのコンセプト⁵⁾がある。ECR加熱であれば、電子はイオンよりも質量が小さいのでICRHに対して必要な磁場強度を10分の1以下にでき、このコンセプトはシステムの小型化が期待できる。高効率な電子加熱のためには、これまでの無電極プラズマスラスタで提案されているプラズマ生成・排気のみに適した磁場形状^{6,7)}ではなく、新たに加熱を含めた最適磁場の検討が重要である。これまでにECR加熱型RFプラズマスラスタの実験がおこなわれた研究報告はなく、初期研究として中村らはPICシミュレーションを用いて放電管内に形成する磁場形状を複数に変更し、各磁場におけるプラズマの排気・加熱の性能を調査した⁸⁾。しかしながら、実用なパラメータ領域における解析は現状では困難であることに加え、すべての物理現象を含むためには、実験による原理検証が必要不可欠である。そこで、推進性能特性のための予備試験としてECR加熱に有効な磁場形状や動作パラメータを明らかにするためにプラズマ特性調査が課題となっている。本研究はECR加熱型RFプラズマスラスタのプラズマ特性調査を目的とし、磁場形状を変更可能なスラスタの開発と、複数磁場におけるRF単独印加時ならびにマイクロ波の重

疊印加時のプラズマ特性調査をおこなった。

2. ECR 加熱型 RF プラズマスラスタの原理

ECR 加熱型 RF プラズマスラスタの概要を図 1 に示す。上流から推進剤を注入し、放電管内で RF アンテナと静磁場により容量結合(CCP)または誘導結合(ICP), ヘリコン波によるプラズマが生成される。電子サイクロトロン周波数とマイクロ波の周波数が一致する ECR 共鳴層において、電子はマイクロ波のエネルギーを得て ECR 加熱される。電子温度の上昇によりプラズマの圧力が増加することで、磁気ノズルによる電磁推力の増加や放電管端面にかかるプラズマ圧力による推力の増加を狙う。

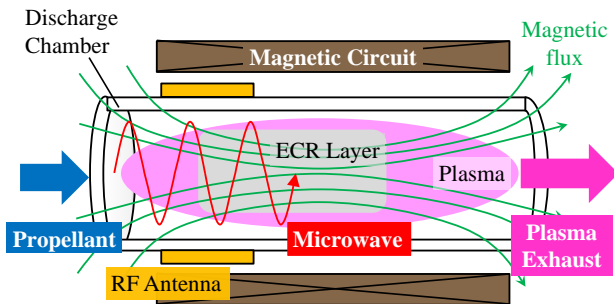


図 1 ECR 加熱型 RF プラズマスラスタの概略図

3. 実験装置・実験条件

実験装置の概略図を図 2 に示す。実験装置は真空チャンバの側壁に取り付けられ、マイクロ波送電用の同軸ケーブル、RF アンテナ、放電管、電磁コイルからなる。放電管内に複数磁場を形成するため、コイルを 7 つ並べて、流す電流の向きと大きさを変化させることで放電管内の磁場形状を変更可能な実験機を開発した。

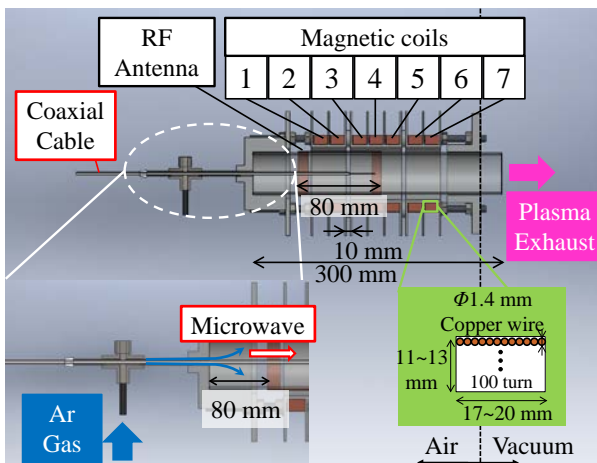


図 2 開発したスラスタの概略図

マイクロ波を印加するアンテナには同軸ケーブルの内部導体(φ0.91 mm)を用い、アンテナ部はアルミナのカバーで覆う。直線アンテナの場合、波長の 4 分の 1 の奇数倍の長さのときに共振状態となり、最も電磁波を放射することが知られている⁸⁾。よって、アンテナ長は波長の 4 分の 1 と

なる 30.6 mm とその 3 倍の 91.8 mm の 2 種類使用する。本研究では、マイクロ波電力は 200 W に固定する。印加するマイクロ波の周波数は 2.45 GHz なので、式(1)より ECR 層の磁場強度は 87.5mT となる。

$$\omega_{ce} = \frac{qB}{m_e}, \quad (1)$$

ここで、 ω_{ce} は電子サイクロトロン周波数、 q は電気素量、 B は磁場強度、 m_e は電子質量を表す。

有限要素法を用いた磁場解析ソフト FEMM を使用し、設計した ECR 層を含む磁場形状について図 3 に示す。本研究では 3 つの磁場形状についてプラズマ特性調査を行なった。それぞれを Solenoid 磁場, Cusp to Solenoid 磁場, Bow shape 磁場と名づける。以下に各磁場形状の狙いを示す。

- Solenoid 磁場では放電管内に広範囲な ECR 層を形成し、下流の発散磁場でプラズマの加速排気をおこなう。
- Cusp to Solenoid 磁場は上流部の RF アンテナ近傍でプラズマ生成に適するカusp磁場を配置する。
- Bow shape 磁場は中央部の弓型ミラー磁場に ECR 層を形成し、ここに閉じ込めた電子を連続的に加熱することで高い加熱効果を狙う。

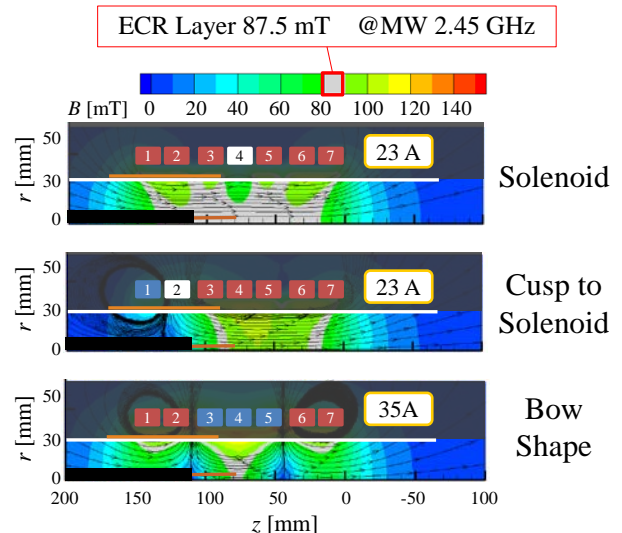
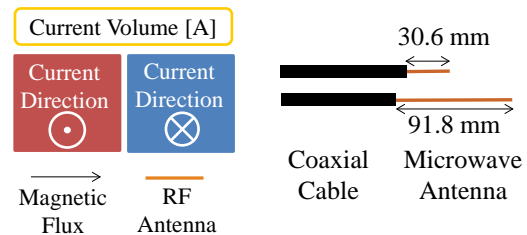


図 3 設計した磁場: Solenoid 磁場, Cusp to Solenoid 磁場, Bow shape 磁場

実験装置の概略図と各電源の動作電力を図 4 に示す。スラスタは真空チャンバ側壁に設置され、放電管には長さ 300 mm、内径 46 mm の PYLEX 管を用いる。RF の周波数は 13.56 MHz で固定し、RF アンテナには軸方向長さ 80 mm

のダブルサドルアンテナを用いる。プラズマ計測にはダブルプローブ(捕集面積: 3.9 mm^2)を使用し、プラズマ中の電子数密度および電子温度を測定する。計測点は最下流側コイル端面の中心の1点とし固定する。RFプラズマ生成回路およびマイクロ波回路はそれぞれ電源、整合器、アンテナから構成されている。

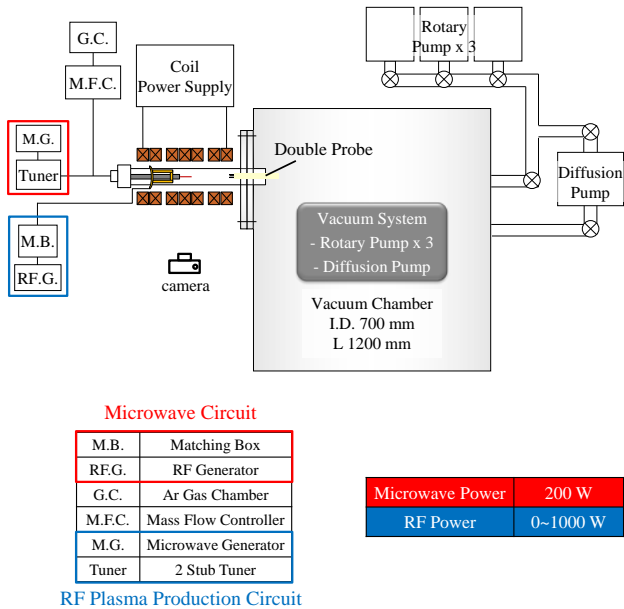


図4 実験装置の概略図および各電源の動作電力

4. 実験結果および考察

4.1 各磁場形状でのRFプラズマ特性調査 まず、マイクロ波を印加しない場合のプラズマ生成源としての評価をおこなうため、マイクロ波アンテナを取り外し、推進剤流量 0.2 mg/s で各磁場形状におけるプラズマ特性の調査をおこなった。RF電力に対する電子数密度の測定結果を図5に示す。電力を増加するにつれ、Cusp to Solenoid 磁場、Cusp 磁場、Bow Shape 磁場では1度のみ、Solenoid 磁場では2度、非連続的な密度増加が確認された。Solenoid 磁場の低電力側では他の磁場よりも電子数密度は低いものの、RF電力 600 W 付近で密度が非連続的に増加し、 $10^{17} \text{ [m}^{-3}]$ オーダーの密度に達した。これは、放電管内のプラズマがCCPからICPに遷移したと考えられる。さらに電力を上げた 800 W 以上の高電力側において電子数密度が再び非連続的に増加した。2段階で密度のジャンプがみられたことからICPからヘリコンプラズマに遷移したと考えられる。各磁場形状で密度ジャンプ時のRF電力値は異なっており、 600 W 以上のRF電力ではSolenoid 磁場が検討された磁場では最もプラズマ生成に適する磁場だと考えられた。Solenoid 磁場では磁力線が放電管軸に平行で、プラズマの壁面損失が他磁場に比べ抑制されたため電子数密度が大きくなったと考えられる。電子温度はどの磁場形状においても $4\sim 8 \text{ eV}$ の範囲であり、RF電力を増加させた密度ジャンプの後ではその前よりも電子温度が下がる傾向がみられる。

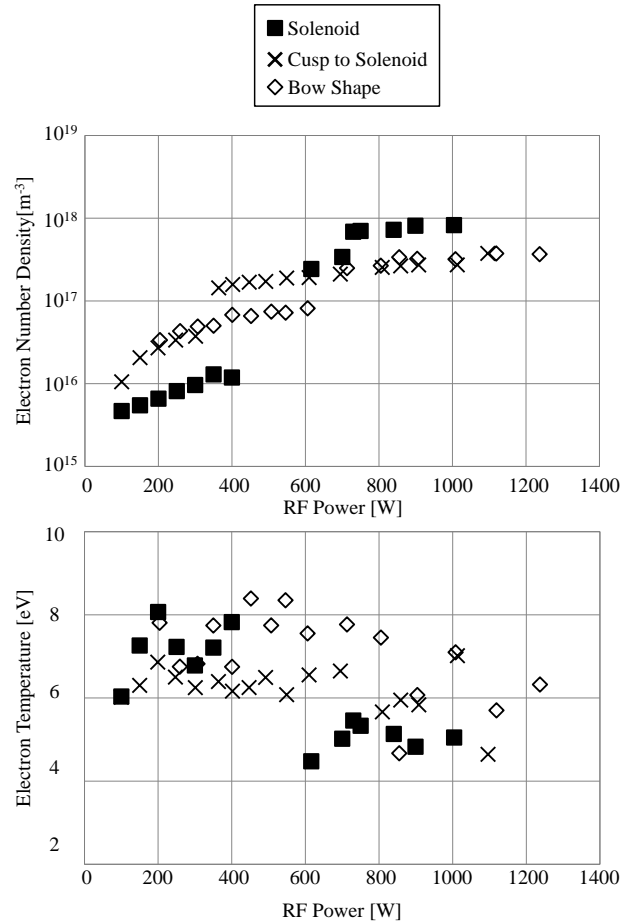


図5 各磁場形状におけるRF電力に対する電子数密度と電子温度

4.2 各磁場形状へのマイクロ波印加効果 次に、各磁場形状で生成されたRFプラズマへのマイクロ波(MW)の印加効果を議論する。マイクロ波アンテナ(アンテナ長 30.6 mm)を挿入し、推進剤流量 0.6 mg/s 、RF電力 500 W に固定してRFプラズマが生成された後、マイクロ波を印加する。図6にSolenoid 磁場での放電写真を示す。図4に示すカメラ位置からスラスタ全体を撮影した。RF電力 500 W 印加で生成したプラズマにマイクロ波を印加したところ、発光が明るくなることがわかった。



図6 (a): RF電力 500 W 印加時での放電写真, (b): RF電力 500 W と MW電力 200 W 重畳時での放電写真

そこでマイクロ波印加の有無で各磁場における電子数密度と電子温度を計測した。結果を図7に示す。RFとマイクロ波の重畳効果はSolenoid 磁場で電子数密度が3.62倍となり他磁場に比べ顕著にみられた。これはプラズマ中の電子

がマイクロ波により加熱され、中性粒子との衝突電離(ECR 放電)による電子数密度の増加や ECR 放電によるプラズマにより放電モードが CCP から ICP に変化したことによると考えられる。一方電子温度は、1eV 程度の差しかなく実験の誤差を考慮すると有意な変化は得られなかった。この原因としては、マイクロ波により加熱された電子が電離に使用されてしまったからだと考えられる。

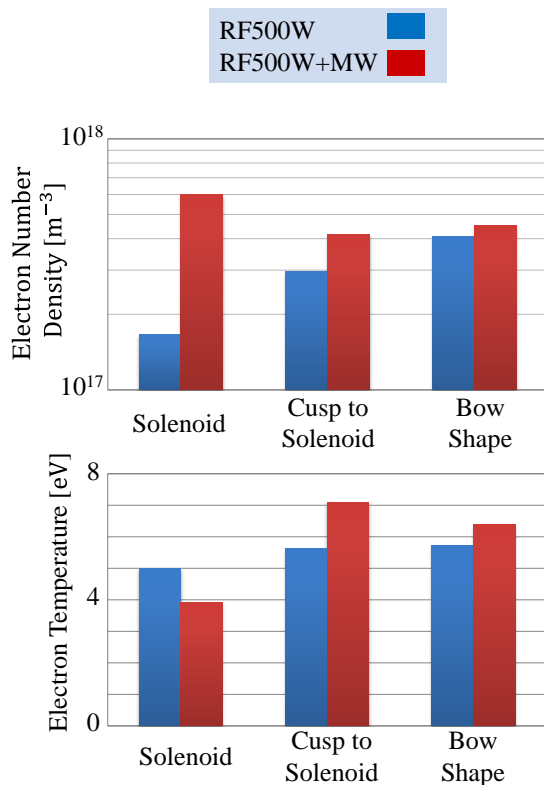


図7 各磁場形状における RF500 W 印加時および RF500 W+MW200 W 印加時での電子数密度と電子温度

4.3 RF 電力変更時のマイクロ波重畳効果 マイクロ波の効果が最も顕著であった Solenoid 磁場において、合計の投入電力に対してのプラズマ特性を調査するために RF 電力を変化させた時の電子数密度を図 8 に示す。横軸は投入した RF 電力とマイクロ波電力の合計値である。この実験ではマイクロ波アンテナをアンテナ長 91.8 mm に変更した。RF 単独印加時とマイクロ波重畳時の投入電力 500 W 以下で電子数密度を比較すると、重畳時は RF 単独印加時よりも電子数密度が高く、最大で 2.4 倍となった。また、RF 単独印加での電子数密度とマイクロ波単独での電子数密度(ECR プラズマ)を足し合わせた場合での電子数密度よりも高い。これは ECR プラズマ生成による電子供給で CCP から ICP(もしくは ICP からヘリコンプラズマ) への放電モードの遷移が生じたため、密度ジャンプが低電力でなされたと考えられる。一方で RF 電力 600 W 以上では RF 単独印加とマイクロ波重畳時で、電子数密度の変化は小さくなる。原因として、RF 電力に対するマイクロ波の電力が 200 W と小さく、マイクロ波の効果が表れなかったことや、マ

イクロ波が中心軸近傍の高密なプラズマにカットオフされ、低密度領域に伝播されたことが考えられる。

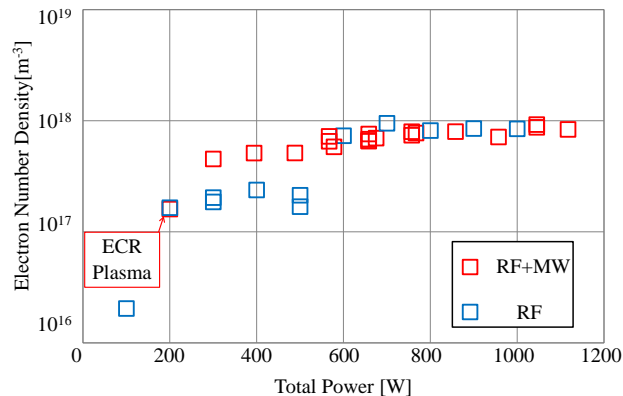


図8 Solenoid 磁場における RF 単独印加時と RF と MW 重畳印加時の合計電力に対する電子数密度

5. まとめ

本研究では、複数磁場を形成可能な ECR 加熱型 RF プラズマスラスタの実験機開発、複数磁場におけるプラズマ源性能の議論のため RF プラズマ特性調査と各磁場での ECR 加熱時のプラズマ特性をプローブ計測により調査した。

- ・本研究で開発したスラスタにおいてプラズマ生成に適した磁場は、600 W 以上で Solenoid 磁場であった。
- ・複数磁場への RF 電力 500 W で生成したプラズマにマイクロ波 200W を印加した場合には、他磁場に比べ Solenoid 磁場で電子数密度の顕著な増加がみられたものの、電子温度の有意な増加はどの磁場においても確認されなかった。
- ・Solenoid 磁場において RF 電力を変更しマイクロ波重畳効果を調査したところ、RF とマイクロ波の合計電力 500W 以下において、マイクロ波を重畳印加した場合には RF 単独印加時よりも電子数密度は高く、最大で 2.4 倍となった。さらに RF プラズマと ECR プラズマの足し合わせた電子数密度よりも高い結果を得た。

開発した ECR 加熱型 RF プラズマスラスタでは ECR 加熱での密度増加により、推進性能の向上が期待できることが示された。本来の狙いであったマイクロ波印加による電子温度の上昇のためには、衝突電離を避けるために放電管内の中性粒子数を減らす、すなわち管内圧力を下げることがあると考えられる。

参考文献

- 1)国際宇宙探査協働グループ(ISECG)：国際宇宙探査ロードマップ(GER), 2013 年。
- 2)Ahedo, E., *et al.* “Two-dimensional Supersonic Plasma Acceleration in a Magnetic Nozzle”, *Physics of Plasmas*, **17**, 073501, (2010), pp. 1-15.
- 3)Takahashi, K., *et al.* “Performance Improvement of a Permanent Magnet Helicon Plasma Thruster”, *Journal of Applied Physics D: Applied Physics*, **46**, 352001, (2013), pp. 1-5.

- 4) Longmier, B. W., *et al.* “VASIMR VX-200 Performance Measurements and Helicon Throttle Tables Using Argon and Krypton”, 32nd International Electric Propulsion Conference, IEPC-2011-156, (2011).
- 5) 中村隆宏, 他, 「RF プラズマスラスタの推力強化を目指した磁気ノズルにおける ECR 加熱の数値解析」, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2015-4304, 2015 年.
- 6) Shamrai, K. P., *et al.*, “Wave stimulated phenomena in inductively coupled magnetized plasmas” *Plasma Phys. Control Fusion.*, **47**, (2005).
- 7) Takahashi, K., *et al.*, “Approaching the Theoretical Limit of Diamagnetic-Induced Momentum in a Rapidly Diverging Magnetic Nozzle”, *Physical Review Letters*, **110**, 195003, (2013), pp. 1-5.
- 8) 笠岳幸, 「マイクロ波放電型イオンエンジンのアンテナ設計最適化に向けた電磁波伝播解析」, 九州大学修士論文, 2006 年.