

外部磁場印加によるマイクロ波放電式中和器の性能変化

Performance improvement of microwave discharge neutralizer applying an external magnetic field

○森田 駿也・谷 義隆(東大)・月崎 竜童・神田 大樹・西山 和孝・國中 均(宇宙航空研究開発機構)

○Shunya Morita・Yoshitaka Tani(The University of Tokyo)・
Ryudo Tsukizaki・Daiki Koda・Kazutaka Nishiyama・Hitoshi Kuninaka (JAXA)

Abstract (概要)

In order to adapt the microwave discharge ion thruster “ $\mu 10$ ” to more various missions, it is necessary to increase power consumption and to extend the operating life. In addition, the microwave discharge neutralizer also needs to have high current and long life. In this research, neutralizer magnetic field was changed to form a more optimal magnetic field by applying an external magnetic field and aim for improvement of neutralizer performance. It was possible to improve neutralizer performance up to 84mA current value increasing by appropriately weakening the magnetic field in the plume of the neutralizer. It is considered that this phenomenon was caused by suppression of abnormal diffusion derived from screw instability. Suppression of abnormal diffusion due to coil magnetic field was also confirmed by probe measurement. The improvement of neutralizer performance was caused by weakening an excessively strong external magnetic field in the plume of conventional microwave discharge neutralizer.

記号の説明

- D_{\perp} : 拡散係数
 m : 荷電粒子質量
 k_B : ボルツマン定数
 T : 温度
 ν : 衝突周波数
 q : 電荷
 B : 磁束密度

1. 緒言

小惑星探査機「はやぶさ」は2003年5月の打ち上げから7年の時を経て、世界初の小惑星サンプルリターンミッションを成功させた。この長期ミッションを可能にしたマイクロ波放電式イオンエンジン $\mu 10$ は、搭載された4台の累計作動時間約40000時間を達成し、世界一の宇宙実績と信頼性を確立した¹⁾。その実用性から、2014年12月に打ち上げられた小惑星探査機「はやぶさ2」にも搭載され²⁾、2018年1月現在も稼働を続けている。イオンエンジンは電気推進の一種であり、化学推進と比較して、比推力が一桁以上高いことから深宇宙探査ミッションに適用できる。今後イオンエンジンを用いて様々なミッションを行うに向けてイオンエンジンの性能向上が求められている。一方でイオンエンジンは正の電荷を放出する性質上、同電荷分の

電子を放出する中和器が必要不可欠であり、イオンエンジンの電流値増強に伴い、中和器の電流値増強も要求される。そこで本研究ではマイクロ波放電式中和器の性能向上を目的とする。

マイクロ波放電式中和器は高エネルギー電子を生成し、中性ガスと衝突させることでプラズマを生成している。この高エネルギー電子は2つの方法で生成される(図1)。まず一つ目は磁場に巻き付き電子のサイクロトロン周波数とマイクロ波の共鳴によるECR(Electron Cyclotron Resonance)加熱である。これはイオンエンジン $\mu 10$ と共通の電子加熱方法であり、加熱方法を共有することでマイクロ波系機器を共有しシステムをコンパクトにできる。二つ目の方法はイオンビームと中和器のポテンシャル差による静電加速(直流放電)である。本研究ではこの直流放電部に着目した。マイクロ波放電式中和器は放電室内部でECR加熱を行うため、永久磁石を放電室周囲に持つのだが、この磁石による漏れ磁場が直流放電部に存在する。プラズマ内に磁場が存在するとプラズマの拡散が抑えられ、磁場と平行な方向への電子の輸送が容易となる。

プラズマ内に磁場があり、サイクロトロン周波数が衝突周波数に比べて十分に大きい時、磁場に垂直な方向の拡散係数は以下のような近似式でかける³⁾。

$$D_{\perp} = \frac{mk_B T \nu}{q^2 B^2} \quad (1)$$

上式より、磁場に垂直な方向の拡散は磁束密度の 2 乗に反比例することが分かる。これは荷電粒子がローレンツ力により磁束密度に反比例するラーマ半径 r で磁力線に巻き付くように移動するためである。マイクロ波放電式中和器の直流放電部である陽光柱内部には中和器の磁石による漏れ磁場が存在し、中和器から下流へ伸びる磁場が形成されている。この磁場を変化させることで陽光柱内の磁場を変化させ拡散を抑え、より荷電粒子を磁場に平行な方向へ輸送しやすくする。

一方で陽光柱内部の磁場強度が強すぎると逆に拡散が激しくなるという現象も確認されている^{4,6)}。陽光柱内の荷電粒子は縦磁場 B に巻き付くように旋回するが、電子とイオンの間には大きな質量差が存在するため、旋回運動に差が出てしまう。この差異によって周方向に電場が生じ、この電場と縦磁場による $E \times B$ ドリフトが起こる。このドリフトは磁束密度が大きくなるほど強くなり荷電粒子が拡散する方向に力が働く。この現象は螺旋形不安定性による異常拡散と呼ばれる⁴⁾。

これら 2 つの拡散の影響により、陽光柱プラズマの拡散を抑えるための縦磁場強度には最適値が存在する。陽光柱に縦磁場を加えると、始めは磁場強度が大きくなると単調にアノード電位が下がるが、ある臨界磁場強度以上になると逆に拡散が促進され、アノード電位が増加するという現象が見られる^{5,6)}。この現象はアノードと陽光柱内のプラズマ電位の差を測定することでも確認できる⁵⁾。

そこで、本研究ではコイルにより外部磁場強度を変化させ、中和器性能を向上させることを試みた。

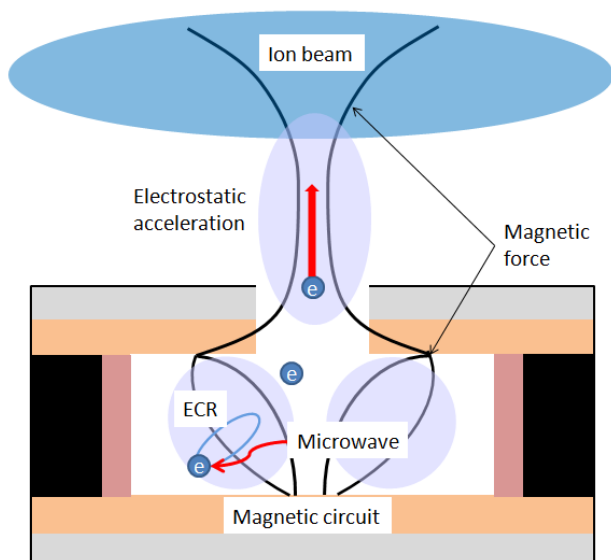


図 1 マイクロ波放電式中和器の電子加熱方法

2. 実験手法

2.1 実験装置 実験はイオンビームポテンシャルによる電子引き出しの代わりに、中和器前方にアノードプレー

トを配置した単体試験環境で行う。作動ガスは Xe で、断りのない限り、ガス流量 0.7 sccm、マイクロ波電力 8W、マイクロ波 4.25GHz、中和器電流 180mA で稼働させた。これは「はやぶさ 2」の作動パラメータに合わせている。中和器とアノード間距離は 11mm とした。これは中和器の地上耐久試験環境と合わせている。この中和器のオリフィス周囲に線径 0.6mm、内径 6mm、外径 23.3mm、厚み 3.5mm、巻数 250 巻のコイルを巻きつけ、中和器外部の磁場を変化させることで性能変化を調べた。オリフィスは底面厚み 1mm、外径 35mm の円盤から内径が 4mm、外径が 6mm、高さ 4mm のノズルが伸びた凸型の形状を用いた。材質は Al である。ノズル周囲にコイルを巻きその上から $\Phi 6$ mm の穴が開けられた厚さ 0.5mm のアルミ板をかぶせコイルをプラズマから保護した。

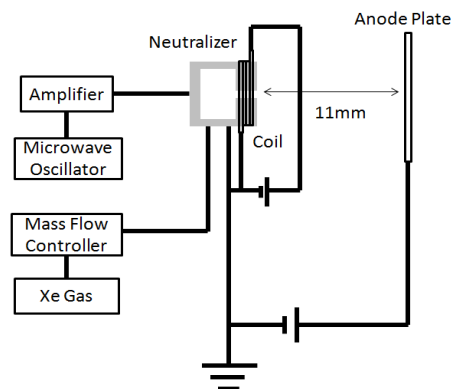


図 2 実験装置概略図

2.1 実験内容 コイルに電流を流し、中和器の磁場を変化させたときのアノード電位を測定した。このアノード電位が運用時の中和器電位に相当する。中和器の磁石方向は下流側(アノード側)が S 極になるように固定した。コイルは電流の向きによって磁場ベクトルが反転するため、本研究では外部の縦磁場 B を強めるようなコイル電流の向きを正方向とした。コイル電流は -1~1A まで 50mA 刻みで流し測定を行った。さらに、アノード電位を 35V で固定したときの中和器電流も測定した。この時のコイル電流は -1.1~0A まで 100mA 刻みで流した。

また、中和器のガス流量や中和器電流値の依存性も検証するため、それぞれを変化させたときのアノード電位も取得した。ガス流量は 0.5~1.1 sccm まで 0.2 sccm ずつ変化させて測定し、中和器電流は 140~200mA まで 20mA ずつ変化させて測定した。コイル電流は負方向のみ流した。

加えて、前章で述べたように陽光柱の拡散と磁束密度強度には最適値が存在し、横軸を磁束密度、縦軸をアノードとプラズマの電位差とした時に、その最適値を極小とする下に凸のグラフが書けるはずである。拡散が抑制されたことを確かめるため、 $\Phi 2$ mm のアルミナ菅で覆われた、 $\Phi 0.3$ mm、露出長さ 1mm のタングステン線をプローブングミュアプローブによってプラズマの測定を行った(図 3)。プローブは中和器下流方向に 2mm、6mm、8mm の位置で測

定した。コイル電流は0mA, -300mA, -600mA, -900mAの4通りで実験を行った。各プローブ位置での磁場強度はガウスメータによって測定した。プローブ測定は中和器電流180mAの定電流稼働とアノード電位40Vの定電圧稼働の2通りで行った。

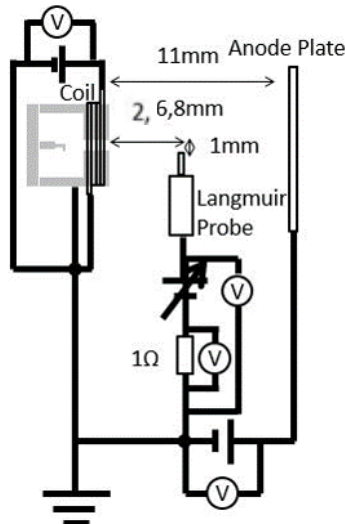


図3 プローブ測定実験概略図

3. 実験結果

コイルに電流を流し、中和器磁場を変化させたときのアノード電位測定結果を図4に示す。電流を正方向に流し、外部磁場を強めても電位はあまり変化していないが、負方向に流し外部磁場を弱めた場合、電位が低下して性能が向上したあと、急激に性能悪化が生じた。

特に性能が大きく変化する負方向のコイル電流による影響に着目し、定電圧稼働での中和器電流の測定を行った結果を図5に示す。この場合でもコイル電流により性能が向上して中和器電流が増加した後、急激に性能が悪化して中和器電流が減少するという傾向が見て取れる。

次に中和器のパラメータを変化させた場合について実験を行った。図6はガス流量を変化させたときの結果である。流量を大きくすると、性能悪化へ転じるコイル電流値の絶対値が大きくなり、グラフが左側にずれていることが見て取れる。図7は中和器電流を変化させたときの結果である。電流値を減少させると、性能悪化のピーク位置がコイル電流値の絶対値が高い方へ移動しており、電流値にも多少の依存性があることが分かる。

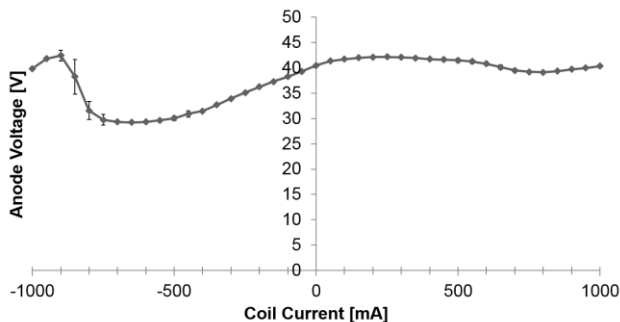


図4 コイル電流による性能変化(定電流稼働:180mA)

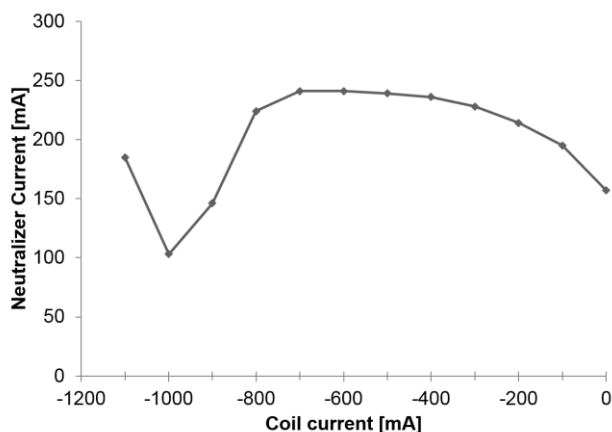


図5 コイル電流による性能変化(定電圧稼働:35V)

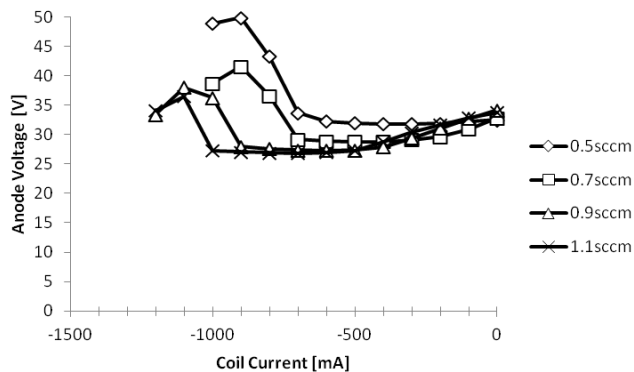


図6 ガス流量依存性

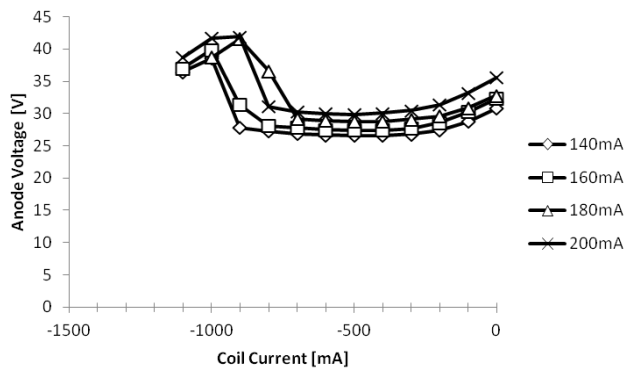


図7 中和器電流依存性

次にプローブ測定の結果を示す。まず定電流稼働のときのアノードとプラズマの電位差を図8に示す。図の横軸は各プローブ位置での軸方向の磁束密度である。この結果から各位置で15~20mTの間に極小値を持つV字のカーブをとり、いずれも臨界磁場周辺の異常拡散の傾向と一致している。続けて、定電圧稼働の時の陽光柱内部の電子数密度を図9に示す。先ほどとは逆に臨界磁場で電子数密度が極大値を持つカーブを取ることが分かる。

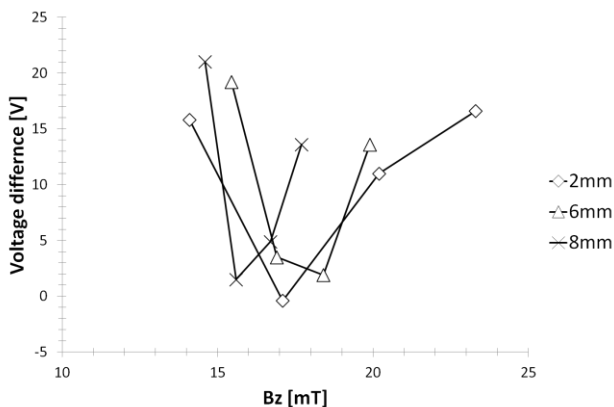


図8 磁束密度と陽光柱アノード間電位差の関係 (定電流稼働:180mA)

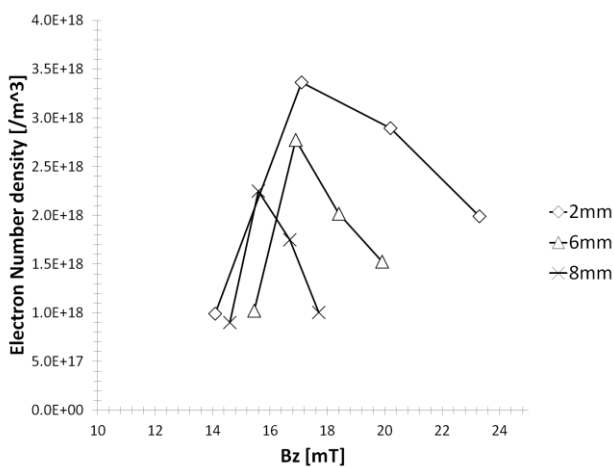


図9 磁束密度と陽光柱内電子数密度の関係 (定電圧稼働:40V)

4. 考察

中和器陽光柱外部の磁束密度をコイルによって弱めることで中和器電圧が低下することが実験により示された。この傾向はガス流量や中和器電流値にも依存性を持つが、大きな傾向としては変化せず、従来のマイクロ波放電式中和器の外部磁場を弱めるとアノード電位が低下し性能が向上するが、あるコイル電流値の大きさを超えると接触電圧が増大し性能悪化へと転じる。

図8のプローブ測定結果から、いずれのプローブ位置で

もプラズマとアノードの電位差を測定したときに15~20mTを極小値とする下に凸のグラフが描かれた。このことから本研究で得られた中和器の性能向上は陽光柱プラズマの拡散の抑制によるものと考えられる。更に、図9の測定結果から、図8で極小値をとる臨界磁場において電子数密度が最大となることが判明した。陽光柱内部では電子密度とイオン密度が同程度であると考えられ、この結果から、臨界磁場周辺ではプラズマ密度が増大することが分かる。

以上の測定結果から、現状のマイクロ波放電式中和器は陽光柱内プラズマの螺旋形不安定性由来の半径方向への異常拡散が激しく起こっていると考えられる。コイル磁場により縦磁場を抑えることで径方向の異常拡散を抑え、その結果陽光柱内部のプラズマ密度が増加する。陽光柱内のプラズマ密度が濃くなることでアノードと中和器間の荷電粒子の輸送が容易になり、中和器電圧を抑制できたと考えられる。一方で、コイル磁場の大きさを強くすると縦磁場の大きさが小さくなるため異常拡散は抑えられるが、古典物理範囲での縦磁場によるプラズマ拡散の抑制効果が減少してしまう。そのため、径方向の拡散が激しくなり陽光柱内部のプラズマ密度が急激に低下する。結果、荷電粒子の輸送が困難になり、中和器電圧の急激な増加が生じたとかんがえられる。中性粒子密度や電流値などのパラメータが変化すると陽光柱の拡散抑制傾向も変化することが知られており⁵⁾、図6,7のようにガス流量や中和器電流に依存性があることも、中和器性能向上が拡散の抑制によるものであることの裏付けとなる。

また図4では、中和器陽光柱内部の磁束密度をコイルによって強めても中和器電圧はあまり変化しないことも判明した。これは、陽光柱内部の縦磁場をコイルによって強めても、現状異常拡散が優勢になっているために中和器の性能向上が得られなかったと考えられる。実際、従来の研究でも陽光柱のパラメータによっては異常拡散が生じると、ある磁場強度以降では磁場強度を増加させても電位差があまり変化しない場合があることが報告されており⁵⁾、本研究のマイクロ波放電式中和器でも同様の状態であったと考えられる。ただし、陽光柱のパラメータによっては一定範囲までは磁場強度を増加させても電位差に変化がないが、ある磁場強度からまた電位差が変化し、急激に電位差が減少するような現象も存在することが報告されており⁵⁾、より強力な縦磁場にすることで電位差を抑えられる可能性はある。

5. 結言

本研究結果から、従来は重視されてこなかったマイクロ波放電式中和器の外部磁場を変化させることでも性能向上が可能であることを立証した。このことは、従来考えられてきた内部磁場形状設計に加えて、外部磁場形状の設計の必要性を示すものであり、今後のマイクロ波放電式中和器の開発・改良指針に大きな影響を与えるものである。

また、現状のマイクロ波放電式中和器の外部プルームはすでに螺旋形不安定性による異常拡散が優位であり、現在

も解明されていない点の多いマイクロ波放電式中和器の新たな知見の一つとなる。

本研究は、改良点がコイルの追加という簡素なものでありながら、最大 84mA の中和器電流の増大や 10V の接触電圧の抑制から見て取れるようにその効果はかなり大きい。そのため、本研究で使用したマイクロ波放電式中和器のみならず、多くの同システムの中和器に適応可能であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 細田 聡史, 國中 均, :イオンエンジンによる小惑星探査機「はやぶさ」の帰還運用, Journal of Plasma and Fusion Research, 86, 5(2010).
- 2) K. Nishiyama, S. Hosoda et al. , :Development and Testing of the Hayabusa2 Ion Engine System, Transactions of the Japan Society
- 3) Francis F. Chen, :Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, Springer, 2015.
- 4) F. C. Hoh, . :Screw Instability of Plasma Column, The Physics of Fluids, 5 (1962), pp. 22-28.
- 5) K. Adati, Y. Iida et al. , :Stabilizing Effect of Radial Plasma Density Distribution on Helical Instability, The Physics of Fluids, 9 (1966), pp. 1464-1475
- 6) 伊藤 智之, 山本 賢三, :陽光柱内の伝搬振動に及ぼす縦磁界の影響, 電気学会雑誌, 83, 893 (1963.), pp. 163-170,