

マイクロ波放電式中和器のアンテナ構造及び 磁場形状をパラメータとした特性評価

Characteristic Evaluation of Microwave Discharge Neutralizer using Antenna Structure and Magnetic Field

○森下 貴都(東大)・神田 大樹・月崎 竜童・西山 和孝・國中 均(宇宙航空研究開発機構)

○Takato Morishita (The University of Tokyo)
・ Daiki Koda ・ Ryudo Tsukizaki ・ Kazutaka Nishiyama ・ Hitoshi Kuninaka (JAXA)

Abstract (概要)

The microwave discharge neutralizer is a cathode using ECR heating for electrically neutralizing Xe ions emitted from an ion engine. This cathode is used for HAYABUSA and HAYABUSA2 and is expected to be used for various missions in the future. Recent studies have improved the performance of ion engines, and the improvement of neutralizers is required accordingly. In this research, we modified the structure of the antenna, which is a microwave launcher, and changed the shape of the magnetic field by changing the internal structure of the neutralizer. In the structure of the antenna, part of microwave is reflected at the interface with different impedance. In this paper, the impedance of the antenna part is matched to improve the performance. About the shape of the magnetic field, we aimed for performance improvement by increasing the mirror ratio. The performance of neutralizer was improved by determining the shape of the magnetic field so that the mirror ratio is high.

記号の説明

- Z: 特性インピーダンス
 ϵ : 誘電体の比誘電率
 D: 外部導体内径
 d: 内部導体外径
 R_m : ミラー比
 B_m : ミラー磁場中の最大磁束密度
 B_o : ミラー磁場中の最小磁束密度

1. 研究背景と目的

イオンエンジンの高性能化に伴い、Xe イオンを中和する中和器の性能向上が求められている。本研究で用いるマイクロ波放電式中和器は Electron Cyclotron Resonance (ECR) を利用した中和器であり、マイクロ波と磁場が重要な構成要素となる。

従って本研究では中和器の内部構造に注目し、マイクロ波を導入するアンテナ構造と内部磁場形状を変更する。この2つのパラメータをそれぞれ変更することにより中和器の性能を向上することを目的とする。

2. マイクロ波放電式中和器

2.1 各種中和器 本研究で扱うマイクロ波放電式中和器とホローカソードの特性を比較すると表 1 のようにまとめ

ることができる。ホローカソードは始動時にヒータにより約 1000K まで加熱する必要がある。これには予熱が必要であり取り扱いが難しい。またヒータの ON/OFF を繰り返すことによりヒータが断線する故障が多発している。また 500mA 付近に自己保温限界があり、ヒータに多くの電力を割かなければいけない。さらに大気暴露制限があり、約 1000 時間以上大気暴露することができないという難点がある。これに対しマイクロ波放電式中和器について取り扱いは容易である。ホローカソードのような取り扱いの難しさはない。但し、後述するように比較的放出電流が小さいという点が短所であり、これを克服することが先述の研究目的である。

表 1 ホローカソードとの比較^{1,2)}

μ 波放電式中和器		ホローカソード(BaO)
長所	取り扱いが容易	高電流
短所	低電流	ヒータの断線 500mA 付近でヒータ電力大 大気暴露時間の制限

2.2 各種中和器の動作領域 現在用いられている種々の中和器とマイクロ波放電式中和器の放出電子電流による比較を図 1 に示す。横軸が放出する電子・イオンの電流量であり横軸より上が中和器、下がイオン源を示す。図 1 に示す通り、マイクロ波放電式中和器は 100mA~200mA の領域で活躍している。これははやぶさ初号機やはやぶさ 2 で搭載されたイオンエンジン $\mu 10$ がこの領域で動作し、そのカソードと

して設計されたからである。1A より大電流では BaO や LaB6 のホローカソードが主流の電子源である。従ってマイクロ波放電式中和器とホローカソードの境界であるサブアンペア級においてマイクロ波放電式中和器が動作すれば、今後大電流化するであろうイオンエンジンや、小型ホールスラスタのカソードとして利用範囲が拡大すると考えられる。

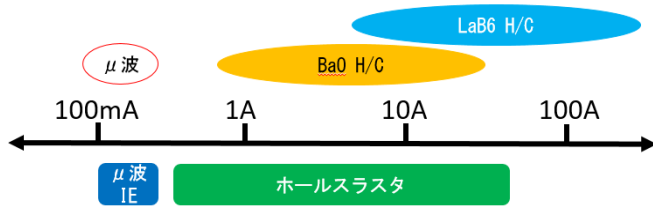


図1 各種中和器とイオン源の比較

2.3 構造 以降では断りがない限り中和器はマイクロ波放電式中和器を示すものとする。図2に中和器の断面図を示し構造を説明する。マイクロ波入力部はアンテナとその周囲を囲む絶縁体からなる。磁気回路については磁性体の上流ヨークと下流ヨーク、磁石から構成されており、放電室内で図2のような磁力線が形成されている。この磁場によるサイクロトロン周波数と同じ周波数のマイクロ波を導入することにより生じる ECR 領域が図2のように形成され、プラズマが発生する。本研究ではこのアンテナ構造と磁場形状について変更する。

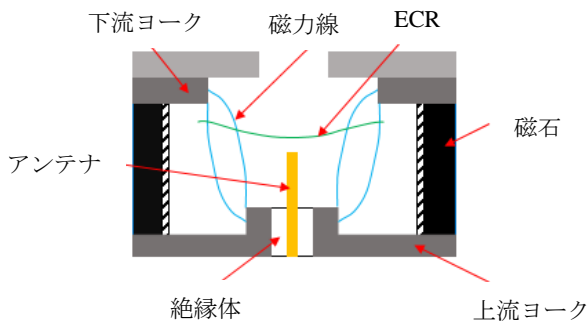


図2 中和器構造

3. アンテナ構造の変更

3.1 従来型のアンテナ構造 はじめに従来型のアンテナ構造について説明する。まず中和器に導入するマイクロ波伝送系を図3に示す。図3に示す通り発振器で4.2GHzのマイクロ波を発生させて、アンプにより8Wまで増幅したマイクロ波を中和器のSMA端子に伝送し、アンテナから放電室内へ伝播させる。この時発振器からSMA端子までは特性インピーダンスが全て50Ωで整合されているが、絶縁体・アンテナ部では50Ωではない。従って50Ω部分と非50Ω部分の界面で反射波が発生し、損失が生じ性能が悪化している可能性がある。

廉価版の実験室モデルのアンテナ構造部における特性インピーダンスを図4に示す。図4に示すように特性インピーダンスが3段階に分かれており、それぞれの部分で反射波が生じることによりマイクロ波が損失していると考えられる。はやぶさ初号機やはやぶさ2のFMでも特性インピーダンス整合が取れていない構造である。

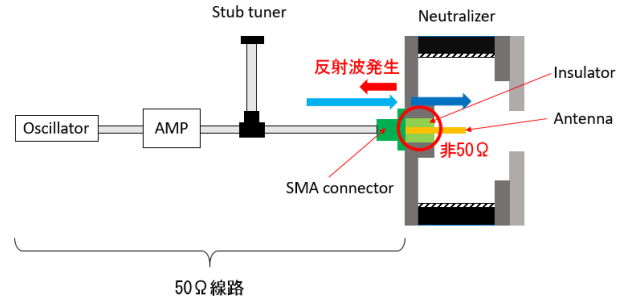


図3 マイクロ波伝送線路

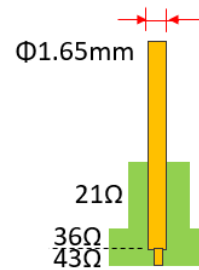


図4 実験室モデルの特性インピーダンス

3.2 アンテナ部の新設計 3.1節の問題を解決するアンテナ構造を設計した。設計に際しての条件として上流ヨークの内径Dは固定した(図5)。これは磁場形状を不変とするためである。このとき特性インピーダンスZは以下の式で表すことができる。

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \ln\left(\frac{D}{d}\right)$$

上式においてDは変えないため、dを変更して特性インピーダンスを決定する。

以上の条件から図6に示す3種類のアンテナを設計した。アンテナ径が実験室モデルと同じφ1.6mmアンテナ、各段においてインピーダンス整合したφ0.5mmアンテナ、作りやすさと整合性を折衷したφ1.0mmアンテナである。またSMA端子を変更したことにより3種類のアンテナは2段階の特性インピーダンスの変化にとどめることが出来た。

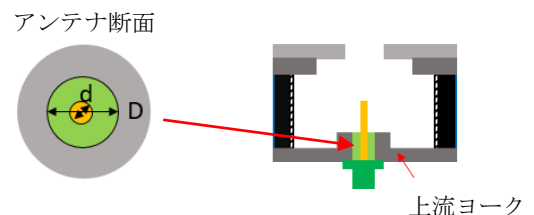


図5 特性インピーダンス

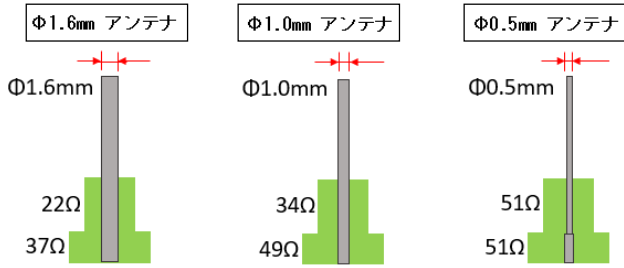


図6 新設計アンテナ

3.3 実験方法 新設計アンテナを試験するにあたり、ここで中和器の性能試験方法について説明する。はやぶさ初号機やはやぶさ2のようにイオンエンジンと共に中和器が作動する場合は、イオン源から放出されたXeイオンにより中和器から電子が自ずと引き出されて中和を行う。但しこの方法では中和器の性能を試験するために常にイオン源を稼働する必要がありコストがかかる。従って本研究では中和器の単体作動により性能試験を行う。コンフィギュレーションを図7に示す。イオン源の代わりに中和器下流にアノードを配置することにより電子を引き出す。この時のアノードの電圧と流れた電流により中和器の性能を評価する。

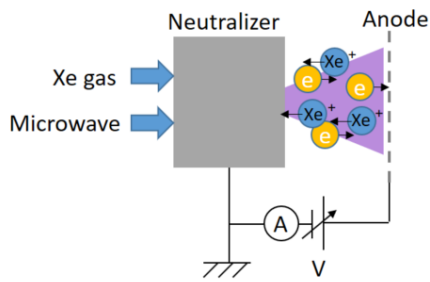


図7 中和器試験

3.3 実験結果 新設計アンテナについて性能試験結果を図8に、実験条件を表2に示す。図8は中和器の接触電圧と電子電流を表しており、低い接触電圧で高い電子電流が出せることが性能が良いと言え、つまり図8の右下に行くほど性能が良い。図8より180mA~250mA領域において実験室用アンテナよりΦ1.6mmアンテナの方が性能が良いことが分かる。

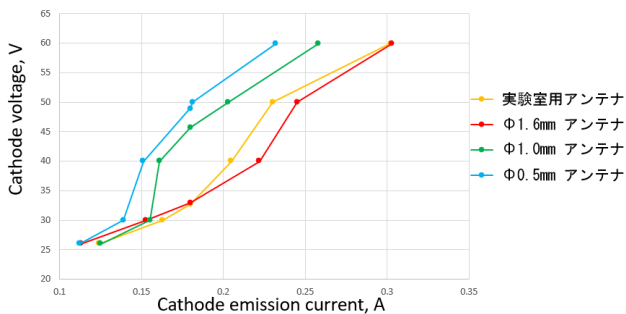


図8 性能試験方法

表2 実験条件

入力マイクロ波	8	W
マイクロ波周波数	4.2	GHz
Xe流量	0.7	sccm
真空度(Xe無)	2×10^{-4}	Pa
中和器磁石数	9	個

3.4 考察 図から分かったようにアンテナ径が小さくなるほど性能が悪化している原因としては、アンテナ表面積が小さくなってしまったことによる加熱範囲の減少が原因の1つとして考えられる。また非50Ω部分が共振器のような役割を果たしており、結果的に放電室内に強電場が形成される報告もある³⁾。従って本研究の中和器においても同様のことが起きている可能性があるためさらなる検証が必要である。

また、Φ1.6mmアンテナの方が従来型モデルより性能が良いことに関しては、図4と図6を比べて分かるように反射波が発生する界面が1つ少ないからであると考えられる。

4. 内部磁場形状の変更

4.1 従来型の内部磁場形状 続いてもう1つの変更点である内部磁場形状の変更について説明する。初めに従来型の内部磁場形状について図9に示し説明する。2.3項で示した通り磁気回路は上流ヨーク・磁石・下流ヨークの部品で構成されている。この磁気回路において上流ヨークと下流ヨークの間の放電室内で図9に示すような磁力線のミラー磁場が形成されている。ここで、ミラー比 R_m は以下の式で表すことが出来る。

$$R_m = \frac{B_m}{B_0}$$

上式に示すようにミラー磁場において最大磁束密度 B_m が小さいとミラー比が小さくなる。つまりミラー比の小さい方の強磁場領域から電子が逃げていくため、その結果電子閉じ込め時間が短くなる。

従来型中和器のミラー磁場では図9の拡大図に示すように、上流ヨークのエッジ部分から伸びる磁力線は下流ヨークのエッジ部分に繋がっていない。逆も同様で、下流ヨークのエッジ部分から伸びる磁力線も上流ヨークのエッジ部分に繋がっていない。従ってこの磁力線により形成されるミラー磁場の弱い方、つまりエッジ部分に入っていない方の強磁場部分の B_m は小さく、ミラー比が小さくなってしまっている。図9に示す磁場形状の従来型中和器のミラー比は2程度となってしまう。ミラー比が小さくなれば、電子閉じ込め時間が小さくなってしまふ。従ってその分電子による加熱量が減少し、プラズマ密度が小さくなり中和器性能が悪くなってしまふと考えられる。

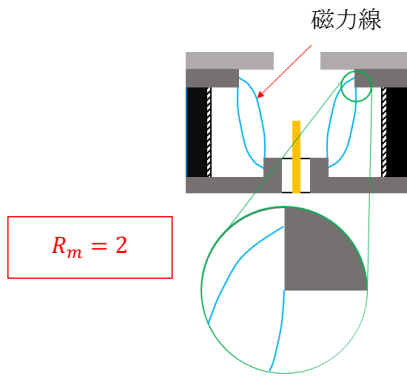


図9 従来型内部磁場形状

4.2 磁気回路の設計 前項で説明した通りミラー比が小さければ性能悪化が懸念される。逆に、ミラー比が大きければその分電子閉じ込め時間が大きくなり、その分電子による加熱量が増加する。その結果プラズマ密度が大きくなり、中和器性能が改善することが考えられる。

従ってミラー比を大きくする内部磁場を形成するように新しい下流ヨークを設計した(図10)。図10に示すように、下流ヨークの内側の厚みを薄くすることで拡大部に示すように磁力線を一致させた。この結果ミラー比を10.7まで増加させることが出来た。

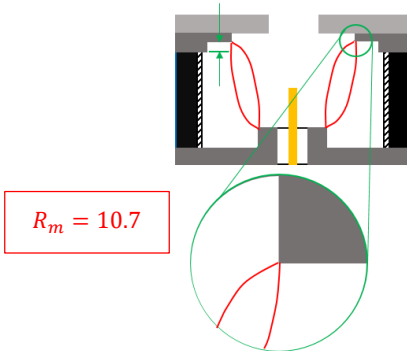


図10 改良型中和器

4.3 実験結果 改良型中和器の性能試験を行った。実験コンフィギュレーションは3.3節と同様である。実験結果を図11~13に示す。また実験条件を表3に示すとおり、流量・磁石数をパラメータとして性能を取得した。

図11について、200mA以上の高電流域において性能が向上したことが分かる。接触電圧40V時において約20mA分の電子電流が増加した。

図12では磁石数を増やして計10個として試験を行った。磁石数を増やした結果、従来型中和器と改良型中和器の性能差はより顕著なものとなり、接触電圧40V時において約40mA増加した。

図13には磁石数を10個とし、Xe流量も1.5sccmに増加した結果を示している。流量を増やした場合では低電流域においても性能差が表れ、接触電圧30V時でも50mA増加し

ている。また、接触電圧40V時では50mA分の電子電流が増加した。接触電圧60Vで約470mAの電子電流を放出することが可能である。

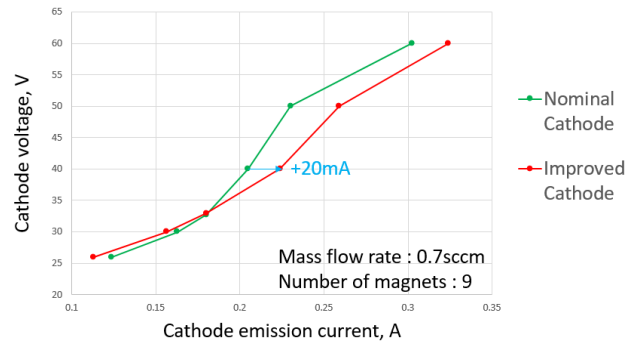


図11 Xe 0.7sccm, 磁石数9個

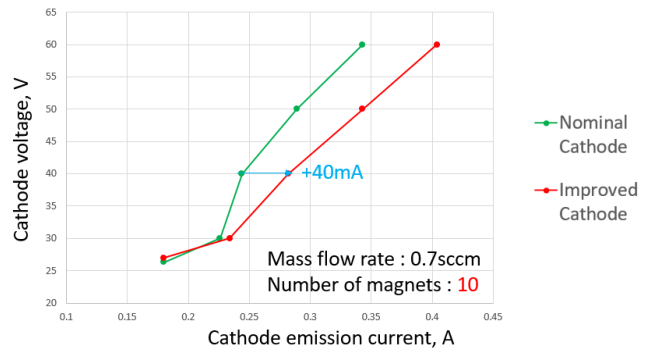


図12 Xe 0.7sccm, 磁石数10個

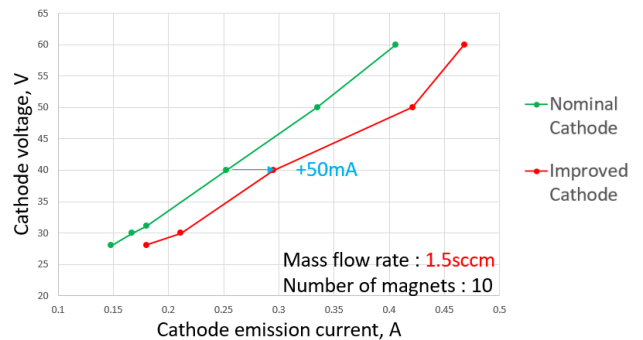


図13 Xe 1.5sccm, 磁石数10個

表3 実験条件

入力マイクロ波	8	W
マイクロ波周波数	4.2	GHz
Xe流量	0.7, 1.5	sccm
真空度(Xe無)	2×10^{-4}	Pa
中和器磁石数	9, 10	個

4.4 考察 図11~13の各場合において改良型中和器は従来型よりも性能が改善している。これは設計時における予想通り、ミラー比を向上したことにより電子閉じ込め時間が増加

してその分電子の加熱量が増えたことでプラズマ密度が増加したので性能が向上したと考えられる。

5. 結 言

本研究では中和器の性能向上を目標として内部構造に注目し、2つのアプローチをとった。アンテナ構造の変更と内部磁場形状の変更である。

アンテナ構造の変更については、特性インピーダンスの整合により性能向上を目指した。磁気回路を不変とするためにアンテナ径を細くすることで整合したが、アンテナ径を小さくするほど性能が悪化した。これはアンテナ径が小さくなることによる加熱範囲の減少が1つの要因であると考えられるが、今後さらなる検証が必要であると考えられる。一方、反射波発生面を1つ減らしたΦ1.6mm アンテナは若干の性能向上がみられた。

内部磁場形状の変更については、中和器内部のミラー磁場におけるミラー比を向上することにより性能向上を目指した。このために上流ヨークと下流ヨークのエッジ部分から伸びる磁力線を一致させる構造を設計した。この結果、高電流域において性能が向上した。これはミラー比を大きくしたことにより電子閉じ込め時間が増加して、その分電子の加熱量が増えたことでプラズマ密度が増加し、性能が向上したからであると考えられる。今後は高電流域における性能向上を活かして大電流化が見込まれるイオンエンジンや低電力ホールスラストのカソードとして応用可能か検討する。

参考文献

- 1) H. Kuninaka, N. Hiroe, K. Kitaoka, Y. Ishikawa and K. Nishiyama : Microwave Plasma Contactor, IEPC-93-040, International Electric Propulsion Conference, Seattle (Sept. 1993).
- 2) G.J. Williams, Jr., M.T. Domonkos, K.J. Shand, J.M. Haas, L.B. Ling and A.D. Gallimore : Near- field Investigation of Ion Emitted from a Hollow Cathode Assembly Operating at Low-Power, AIAA-98-3658(1998).
- 3) Taro Naoi, Hiroyuki Koizumi and Kimiya Komurasaki. : Measurement of Microwave Absorbance by Plasma of a Miniature Microwave Discharge Ion Thruster, JSASS, 2014, pp.Pb_91-Pb_96.