

マイクロ波放電式小型中和器の磁場変更による引き出し電子電流の変化

Electron Extraction Current Change due to Magnetic Field Change in Microwave Discharge Miniature Neutralizer

○高崎 大吾・元木 嵩人・安宅 泰穂・オミネッティ ピエール・白須 健人・江塚 風也・小泉 宏之・小紫 公也（東大）

○Daigo Takasaki・Takahito Motoki・Yasuho Ataka・Pierre Ominetti・Kento Shirasu・Fuya Ezuka・Hiroyuki Koizumi・Kimiya Komurasaki(The University of Tokyo)

Abstract (概要)

The microwave discharge miniature ion thruster has a problem of low electron extraction current of the neutralizer. In a previous study, it was shown by numerical calculations that the electron current of the neutralizer increases by changing the magnetic field. In this study, the electron current was improved by running the neutralizer with the simulated magnetic field at a wider operating point than in the numerical calculation. Due to the changing magnetic field, collector current was improved from 9.5 mA to 11 mA at the operating point of 30 V collector voltage, 2.0 W microwave input power, and 20 $\mu\text{g/s}$ propellant flow rate. It was found that the increase in the electron current was due to the change in the electron loss caused by the change in the magnetic field.

記号の説明

A_o :	オリフィス穴面積
e :	電気素量
$g(\Delta\phi)$:	ポテンシャル障壁による効果を表す関数
I_c :	コレクタ電流
k :	ボルツマン定数
m :	電子密度
n_o :	オリフィスにおける電子密度
n_{out} :	中和器外部における電子密度
n_p :	プラズマ生成領域における電子密度
T_e :	電子温度
v_c :	コレクタ付近での電子速度
V_c :	コレクタ電圧
Γ_{in} :	プラズマ生成領域からオリフィスに流入する電子フラックス
Γ_{out} :	オリフィスから中和器外部へ流出する電子フラックス
λ_{in} :	プラズマ生成領域からオリフィスまでの距離
λ_{out} :	オリフィスからコレクタまでの距離
$\mu_{L,in}$:	プラズマ生成領域における電子の磁力線垂直方向移動度
$\mu_{L,out}$:	中和器外部における電子の磁力線垂直方向移動度
ϕ_o :	オリフィスにおける空間電位
ϕ_{out} :	中和器外部における空間電位

ϕ_p : プラズマ生成領域における空間電位

1. 研究背景

近年、CubeSat の打ち上げ数増加に伴い、CubeSat に搭載可能な小型推進機の研究開発が盛んに行われている。CubeSat に推進機を搭載することで、フォーメーションフライトや深宇宙探査といったような、軌道制御が必要なミッションを行うことができる¹⁻³⁾。しかしながら CubeSat に搭載する推進機には、体積・質量の厳しい制約が存在する上、高い安全性が求められる⁴⁾。

この要求を満たす解決策の一つとして、推進剤に水を用いた推進機の研究開発が進められている。従来推進剤として広く用いられてきたキセノンは、高圧の気相で保管することが必要となる。気相であるため液相・固相と比較して低密度となり体積が大きくなる傾向にあり、タンク内部と雰囲気気圧の差圧に耐えられるような肉厚の大きいガスタンクの搭載が構造重量の増加に繋がる。また、高圧ガスタンクは反応性の高い危険物として扱われ、ISS への搭載や相乗りには厳しい安全審査の合格が必要、あるいはそもそも不可能という場合が存在する。推進剤としての固体火薬は高密度かつガスタンクが不要という点から体積・質量の面で有利だが、危険性が非常に高い。一方で液体を推進剤とする場合には、常圧液相で保管し宇宙機に搭載することができる。液相であることから体積は比較的小さくすることができ、質量の大きいガスタンクも必要としない。液体の中でも特に水はそれ自体が無毒であり常圧で保管できるという点から、非常に高い安全性を有

した推進剤であると言える。

水を推進剤として用いた CubeSat 用推進機の例に、東京大学が開発した水イオンスラスタが挙げられる⁵⁻⁷⁾。水イオンスラスタはスラストスタンドによる性能測定が行われており、中和器を無視したイオン源のみの作動では、最大推力 164 μN 、最大比推力 665 s であることがわかっている。しかしながら水イオンスラスタはキセノンを推進剤として用いた時と比べて中和器に必要な推進剤流量が大きい^{8,9)}。

水イオンスラスタ中和器の性能向上を目的とした研究の一つに、佐藤らが行った PIC-MCC 法による数値計算が挙げられる^{10,11)}。この数値計算では、中和器放電室内部の磁場形状を変更することにより、中和器からの引き出し電子電流が増加するという結果が得られた。しかし数値計算コストの高さから、計算が行われた中和器の作動条件は 1 条件のみに留まっている。また、マイクロ波投入電力が 0.3 W における計算であり、これは実作動の 1.0-2.0 W とは離れた作動点になっている。

そこで、本研究ではマイクロ波放電式水中和器の性能向上を目的とし、数値計算で扱われた磁場を用いて中和器を作動させた。さらに、磁場変更が中和器性能に与える影響の知見獲得を目的とし、数値計算で扱われたよりも広い作動点で中和器性能を測定した。

2. 実験装置

2.1 真空系 本研究における実験は直径 1.0 m、長さ 1.4 m のステンレス製真空チャンバ内で行った。排気は、真空チャンバに接続されているロータリーポンプ（大亜真空製 GHP-1300、排気速度 1300 L/min）とターボ分子ポンプ（島津製作所製 TMP-803M、排気速度 4800 L/min）によって行った。

2.2 マイクロ波放電式小型中和器 直径 20 mm、高さ 10 mm 程度の円筒形の放電室を有するマイクロ波放電式中和器を用いた。放電室内部にはハンドル型アンテナと 2 つのリング型磁石が同心円状に配置されており、軸対称の構造を有する。

2.3 水供給系 水供給系は、タンクとアキュムレータ、そしてその 2 つを繋ぐ配管上のレギュレーションバルブから構成される。タンク内には水と水蒸気が混在しており、タンク内温度を制御することによって飽和水蒸気圧を制御している。実験中、タンク温度は 22.0-24.0 $^{\circ}\text{C}$ に保たれている。アキュムレータには圧力計が接続されており、圧力が閾値を下回ったらレギュレーションバルブを 1 ms 開く、というバンバン制御により推進剤流量を制御した。水供給系については参考文献⁷⁾が詳しい。

2.4 マイクロ波供給系 中和器のマイクロ波アンテナは、DC ブロックを通して真空チャンバ外部のマイクロ波発振器やマイクロ波アンプと接続されている。マイクロ波発振器で

発振したマイクロ波はアンプを通して増幅され、アンテナへと伝わる。中和器側で放電などによる高電圧が生じてもアンプ側へ電流が流れて故障することがないように、マイクロ波投入路の途中には DC ブロックが介されている。

2.5 実験系全体図 実験系の全体図を図 2 に示す。図のように、中和器下流 10 mm の位置には電子捕集コレクタを配置した。コレクタに正の電圧 V_c を印加することによって中和器からの電子を捕集した。中和器の性能は、コレクタに流れる電流 I_c によって評価した。

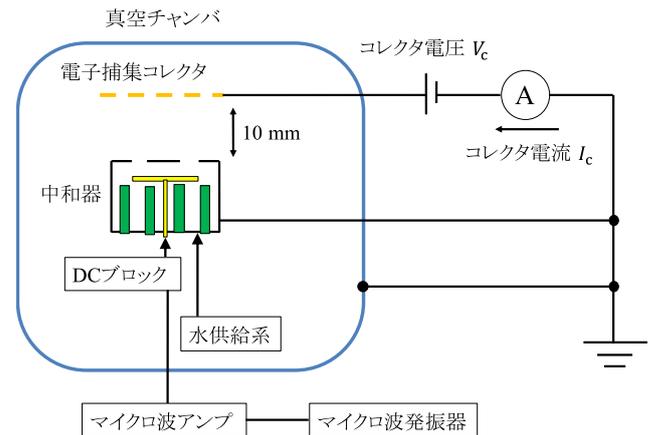


図 2 実験系全体図。

3. 実験条件

本研究では、2 つのリング型磁石の寸法を変更することで、2 種類の磁場を作った。1 つは従来から中和器で作動されてきた磁場形状で、以降これを MF-1 と呼称する。もう 1 つは佐藤らの数値計算によって電子電流が向上すると唆された磁場であり、以降これを MF-2 と呼称する。MF-1、MF-2 の磁場形状を図 1 に示す。磁場解析には有限要素法磁場解析フリーソフトの FEMM を用いて、軸対称仮定のもとで計算した。

また、MF-1 と MF-2 のそれぞれにおいて、コレクタ電圧、マイクロ波投入電力、推進剤流量、の 3 種類のパラメータを変化させて中和器を作動させた。パラメータの変化は 1 種類ずつ行った。各パラメータ掃引時の実験条件を、表 1-3 にそれぞれ示す。また、全実験に共通してマイクロ波周波数は 4.4 GHz で固定した。

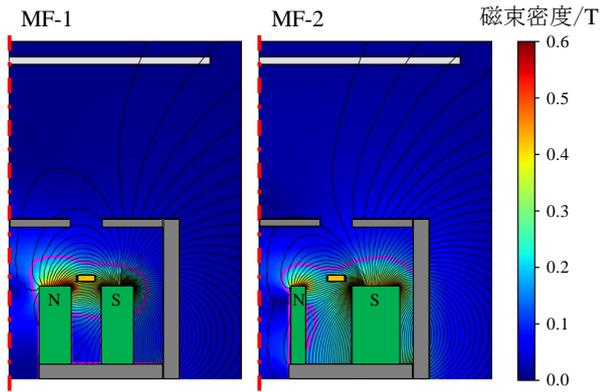


図1 本研究で用いた2種類の磁場の磁力線と磁束密度.
左: MF-1, 右: MF-2. 黄色はアンテナ, 緑は磁石, 白はコレクタを表す. ピンクの線はマイクロ波周波数 4.4 GHz に対応した ECR 領域を示す. また, 各画像左の赤い一点鎖線は中和器の中心軸を示す.

表1 コレクタ電圧掃引時の実験条件.

パラメータ	値
コレクタ電圧/V	0, 10, 20, 30, 40, 50
マイクロ波投入電力/W	2.0
推進剤流量/ $\mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	20

表2 マイクロ波投入電力掃引時の実験条件.

パラメータ	値
コレクタ電圧/V	30
マイクロ波投入電力/W	1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0
推進剤流量/ $\mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	20

表3 推進剤流量掃引時の実験条件.

パラメータ	値
コレクタ電圧/V	30
マイクロ波投入電力/W	2.0
推進剤流量/ $\mu\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$	10, 20, 30, 40

4. 実験結果

4.1 コレクタ電圧掃引 コレクタ電圧を変化させた時の, MF-1 と MF-2 それぞれにおけるコレクタ電流とコレクタ電圧の関係を図3に示す. コレクタ電流は常に MF-1 より MF-2 の方が大きい. また, コレクタ電圧が低い作動点においてはコレクタ電圧増加に対するコレクタ電流増加量が大きい. MF-1 においてはコレクタ電圧 0 V, 10 V の作動においてコレクタ電流が 2 mA 以下となっている.

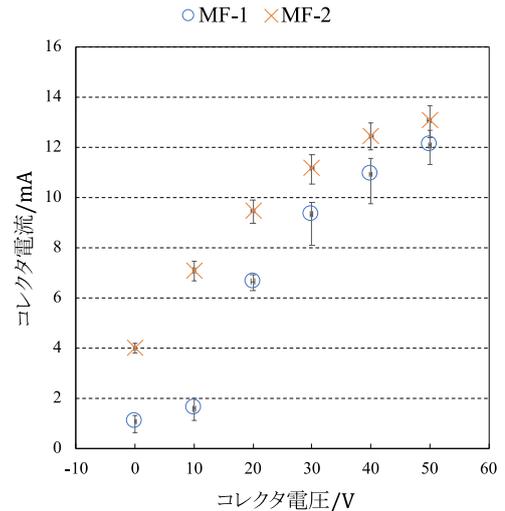


図3 コレクタ電流とコレクタ電圧の関係.

4.2 マイクロ波投入電力掃引 マイクロ波投入電力を変化させた時の, MF-1 と MF-2 それぞれにおけるコレクタ電流とマイクロ波投入電力の関係を図4に示す. MF-1 と MF-2 とともに, マイクロ波投入電力の増加に対してコレクタ電流が線形に増加する傾向が確認できる. ただしその増加割合は MF-1 より MF-2 の方が大きく, マイクロ波投入電力の大きい作動点においてコレクタ電流の差も大きい.

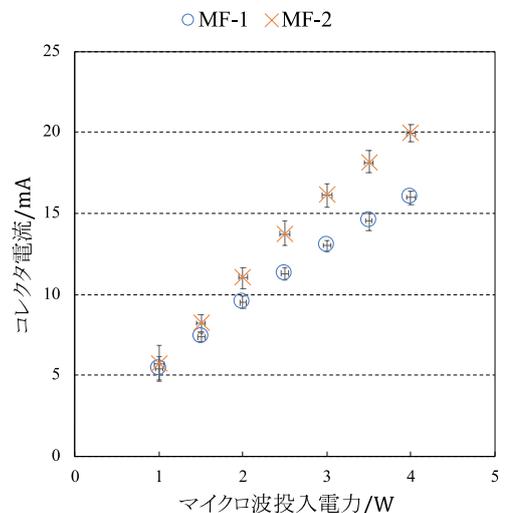


図4 コレクタ電流とマイクロ波投入電力の関係.

4.3 推進剤流量掃引 推進剤流量を変化させた時の, MF-1 と MF-2 それぞれにおけるコレクタ電流と推進剤流量の関係を図5に示す. 低流量の作動においては, MF-1 と MF-2 のコレクタ電流はエラーバーの範囲内で一致している. 一方で高流量においては, MF-1 ではコレクタ電流はほぼ不変であるのに対し, MF-2 ではわずかな増加傾向が確認できる.

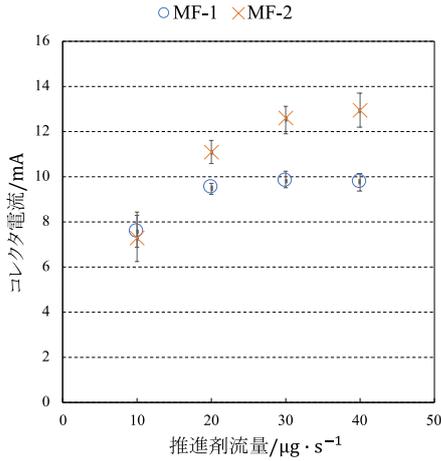


図5 コレクタ電流と推進剤流量の関係.

5. 考察

5.1 電子輸送メカニズムの仮定 コレクタ電圧、マイクロ波投入電力、推進剤流量をそれぞれ変化させた時のコレクタ電流の傾向は、MF-1 と MF-2 において異なることが実験結果からわかった。MF-1 と MF-2 はリング型磁石の寸法とそれにより形成される磁場が異なるのみで、それ以外の実験条件は等しい。電子はラーマー半径が小さく、磁力線の影響を大きく受けながら運動する。そこで、実験で確認されたコレクタ電流傾向の違いが電子の輸送メカニズムに起因するものであると仮定して、コレクタ電流値のモデル化を行う。

MF-1 と MF-2 の磁力線形状に着目すると、MF-1 では中和器オリフィス付近で磁力線がオリフィスと平行に形成されている。一方で MF-2 では磁力線がオリフィス穴を垂直に貫き、そのままコレクタへと向かっている。したがって、MF-1 では電子は磁力線垂直方向に輸送され、MF-2 では磁力線平行方向に輸送されていると考えられる。

以上を踏まえて、MF-1 と MF-2 で電子がコレクタまで輸送される様子を図6のようにモデル化した。このモデルでは電子が移動する領域を、1. 赤く示されたオリフィス領域、2. それより内側のプラズマ生成領域、3. 外側の中和器外部、の3つに分割して考える。プラズマはこのそれぞれの領域において異なる電子密度 n 、空間電位 ϕ を有すると仮定して計算を進めていく。単純化のため、電子温度 T_e は全ての領域で等しいとした。

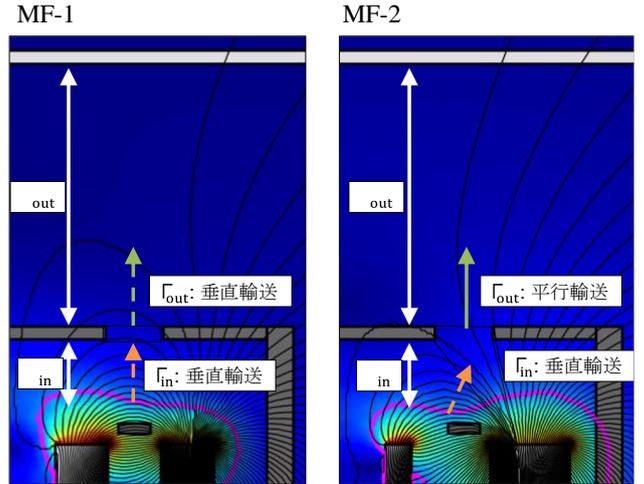


図6 MF-1 と MF-2 における領域分割によるモデル化.

5.2 モデルの定式化 まず、プラズマ生成領域からオリフィス領域へと流入する電子フラックス Γ_{in} とオリフィス領域から中和器外部へと流出する電子フラックス Γ_{out} が等しいという式を考える。

$$\Gamma_{in} = \Gamma_{out} \quad (1)$$

ここで、 Γ_{in} は電子の磁力線垂直方向の拡散を考慮して、次のように表す。

$$\Gamma_{in} = \frac{\mu_{L,in}}{\lambda_{in}} \left[-\frac{n_p + n_o}{2} (\phi_p - \phi_o) + \frac{kT_e}{e} (n_p - n_o) \right] \quad (2)$$

Γ_{out} は MF-1 と MF-2 で表現が異なる。MF-1 では磁力線垂直方向の電子輸送を考えるため、 Γ_{in} と同様にして

$$\Gamma_{out,MF-1} = \frac{\mu_{L,out}}{\lambda_{out}} \left[-\frac{n_o + n_{out}}{2} (\phi_o - \phi_{out}) + \frac{kT_e}{e} (n_o - n_{out}) \right] \quad (3)$$

一方で、MF-2 では磁力線垂直方向の輸送を考える。オリフィスにおける電子密度と熱速度の積によってフラックスが与えられるとして、

$$\Gamma_{out,MF-2} = n_o \sqrt{\frac{2kT_e}{m}} \quad (4)$$

5.3 コレクタ電流の計算 各文字に入力する具体的な値を示す。まず、プラズマ生成領域における電子密度 n_p 、電子温度 T_e 、空間電位 ϕ_p は、グローバルモデルにより求める。すなわち、放電室内が準中性かつ空間的に一様な定常プラズマと仮定し、中和器の各作動点に対して粒子数保存、電荷保存、エネルギー保存の3式を連立して計算を行った。

次に、プラズマ生成領域とオリフィスとの距離 λ_{in} は、磁場解析結果における ECR 領域とオリフィスとの距離を参照して $\lambda_{in} = 2 \text{ mm}$ とする。また、本実験ではコレクタをオリフィス下流 10 mm の位置に設置していることから、 $\lambda_{out} = 10 \text{ mm}$ とする。さらに ϕ_{out} は各実験中のコレクタ電圧 V_c に等しいとする。

中和器外部の電子密度 n_{out} はコレクタにおける電子密度に等しいと考えて、次のように計算できる。

$$n_{\text{out}} = I_c / (ev_c A_0) \quad (5)$$

ここで I_c はコレクタに流入する電子電流で、実験値を用いる。 A_0 はオリフィス穴面積である。 v_c はコレクタ付近での電子速度で、これは次のようにオリフィスとコレクタの間でのエネルギー保存式より計算する。

$$-e\phi_0 = \frac{1}{2}mv_c^2 - e\phi_{\text{out}} \quad (6)$$

以上の2式から n_{out} を計算できるが、この結果を n_0 と比較すると $n_{\text{out}} \ll n_0$ であることがわかる。(3)式に代入することを考慮して、以降は単純化のため $n_{\text{out}} \approx 0$ として計算を進める。

オリフィスにおける電子密度 n_0 は常に n_p の定数倍であると仮定して、 $n_0 = \beta n_p$ とする。ただし β は $0 < \beta < 1$ を満たす定数で、フィッティングパラメータとして扱い実験値との比較によって値を決定する。

最後に、MF-1での中和器外部における電子の磁力線垂直方向移動度 $\mu_{\perp, \text{out}}$ は、中和器内部の移動度と等しい、すなわち $\mu_{\perp, \text{out}} = \mu_{\perp, \text{in}}$ とする。

以上により、MF-1とMF-2で残っている未知数は ϕ_0 、 $\mu_{\perp, \text{out}}$ 、 β の3つとなる。 $\mu_{\perp, \text{out}}$ 、 β をフィッティングパラメータとして扱うことで、 ϕ_0 を計算する。ただしMF-1、MF-2ともに、コレクタ電圧30V、マイクロ波投入電力2.0W、推進剤流量20 $\mu\text{g/s}$ での実験値とモデル計算値が一致するように $\mu_{\perp, \text{out}}$ 、 β を定めた。その他の作動点では、こうして求めた $\mu_{\perp, \text{out}}$ 、 β の値を用いて、 ϕ_0 を計算した。

以上の計算により、最終的にMF-1のコレクタ電流 $I_{\text{MF-1}}$ 、MF-2のコレクタ電流 $I_{\text{MF-2}}$ は次のように表せる。

$$I_{\text{MF-1}} = e\Gamma_{\text{out, MF-1}} A_0 g(\phi_0 - V_c) \quad (7)$$

$$I_{\text{MF-2}} = e\Gamma_{\text{out, MF-2}} A_0 g(\phi_0 - V_c) \quad (8)$$

ただし $g(\Delta\phi)$ はポテンシャル障壁の効果を表す関数であり、電子がマクスウェル分布に従うと仮定して、次のように表すことができる。

$$g(\Delta\phi) = \begin{cases} 1, & \Delta\phi < 0 \\ \exp\left(-\frac{e\Delta\phi}{kT_e}\right), & \Delta\phi \geq 0 \end{cases} \quad (9)$$

$\Delta\phi \geq 0$ のときには、ポテンシャル障壁 $\Delta\phi$ を乗り越えられるほどのエネルギーを有していない電子はコレクタ到達前に逆流し、中和器のオリフィス下流面で衝突し損失する、と考える。

こうして計算された $I_{\text{MF-1}}$ 、 $I_{\text{MF-2}}$ を、実験結果と比較する。モデルによって再現できている点、再現できていない点を確認し、実際に起きている電子輸送メカニズムを探る。

5.4 コレクタ電圧掃引実験との比較 モデル計算結果、実験結果におけるコレクタ電流とコレクタ電圧の関係を図7に示す。これより、コレクタ電圧0-30Vの範囲におけるコレクタ電流の急激な立ち上がりが再現されているとわかる。

しかし、MF-2のモデルでは、コレクタ電圧30-50Vにおける電流増加傾向は現れず、この作動点でコレクタ電流がほ

んど一定値となっている。これらの作動点ではいずれも $g(\phi_0 - V_c) = 1$ となっており、モデル上は関数 $g(\Delta\phi)$ の効果によるコレクタ電流増加は存在し得ない状況となっている。また、グローバルモデルによる n_p 、 T_e 、 ϕ_p の計算結果は V_c に依存しない。よって式(4)、(8)を考慮すると、モデル上で V_c に依存して $I_{\text{MF-2}}$ が変化するには、 n_0 に V_c への依存性が必要となる。したがって $n_0 = \beta n_p$ という仮定が現実に即しておらず、MF-2においては V_c によって n_0 が定まる物理が存在する可能性が示唆される。

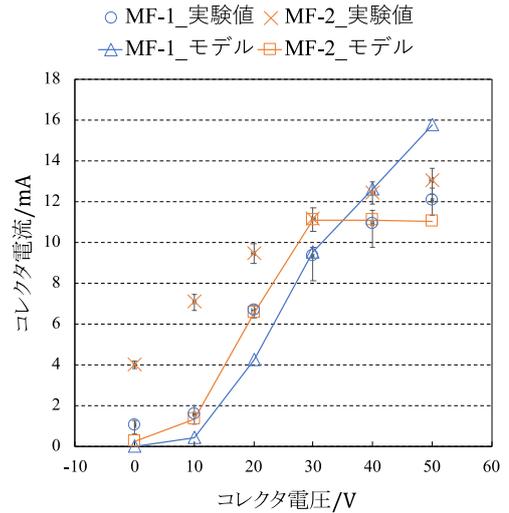


図7 コレクタ電圧掃引時の、実験値とモデルの比較。

5.5 マイクロ波投入電力掃引実験との比較 モデル計算結果、実験結果におけるコレクタ電流とマイクロ波投入電力の関係を図8に示す。マイクロ波投入電力に対してコレクタ電流が線形に増加する傾向はモデル上でも再現されている。さらに、常にMF-2の方がコレクタ電流が大きいという関係性も、実験と同様モデル上でも示されている。

マイクロ波投入電力の増加は、グローバルモデル上では電子密度の増加につながる。式(3)や(4)を考えると、コレクタ電流が電子密度の1乗に比例しているのは実験上でも当てはまると考えられる。

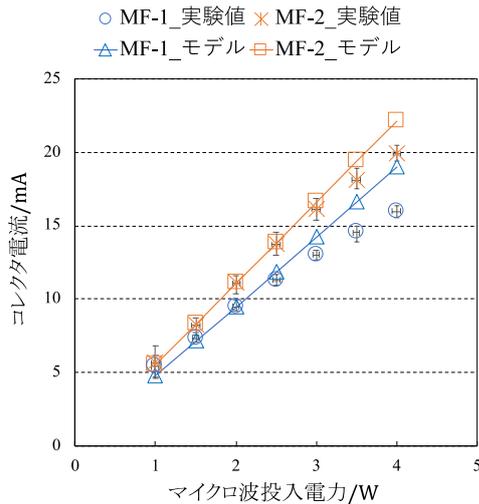


図8 マイクロ波投入電力掃引時の、実験値とモデルの比較。

5.6 推進剤流量掃引実験との比較 最後に、コレクタ電流と推進剤流量の関係を図9に示す。推進剤流量 $10 \mu\text{g/s}$ においてMF-1とMF-2のコレクタ電流が低いという点はモデルにも表れている。一方で、高流量の作動点においても、MF-1, MF-2ともにモデル上ではコレクタ電流が増加し続ける傾向となった。MF-1における高流量でコレクタ電流が横ばいになる傾向は再現できておらず、実験と反する結果となった。グローバルモデルを基に考えると、推進剤流量を増加させることは電子密度の増加、電子温度の減少、空間電位の減少に繋がる。前節で考察したマイクロ波投入電力に対する傾向から、電子密度に対する依存性は大きく外れていないと推測される。よって、実際には電子温度あるいは空間電位に対する依存性がモデルと異なる形で表れている可能性が示唆される。

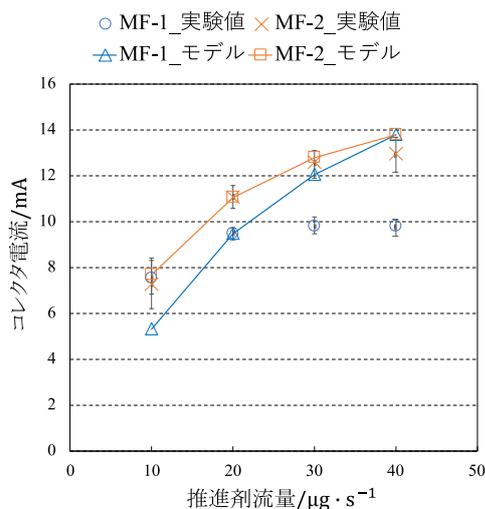


図9 推進剤流量掃引時の、実験値とモデルの比較。

6. 結論

本研究では、マイクロ波放電式中和器をMF-1とMF-2の2種類の磁場で作動させた。また、それぞれの磁場において異なる電子輸送メカニズムを仮定した上で電子電流をモデル化し、実験結果と比較した。本研究によって以下のような結果・知見が得られた。

- MF-1とMF-2の2つの磁場で中和器を作動させると、低投入電力や低推進剤流量の作動点を除いてほとんどの点でMF-2の方がコレクタ電流が大きかった。
- コレクタ電圧30V、マイクロ波投入電力2.0W、推進剤流量 $20 \mu\text{g/s}$ の作動点では、磁場をMF-1からMF-2へと変更することでコレクタ電流が9.5mAから11mAへと増加した。
- 電子輸送メカニズムを考慮したモデル化によって、マイクロ波投入電力に対するコレクタ電流の増加傾向を示すことができた。
- 高いコレクタ電圧や、高推進剤流量における実験結果は、モデル上では再現できなかった。

参考文献

- 1) Stephanie, D., Caleb, W., Lorena, C. and Davin, G. : 2020 Nano/Microsatellite Market Forecast, 10th Edition, SpaceWorks, 2020.
- 2) Armen, P. and Alessandro, G. : CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting space science missions, Progress in Aerospace Sciences, **88**(2017), pp.59-83.
- 3) Kristina, L. : Propulsion for CubeSats, Acta Astronautica, **134**(2017), pp.231-243.
- 4) Jose, C., Odelma, T. and Gustavo, F. : A Review of Propulsion System for CubeSats, Proceedings of the ASME 2018 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume1: Advances in Aerospace Technology, Pittsburgh, 2018,
- 5) Yuichi, N., Daiki, T., Hiroyuki, K. and Kimiya, K. : Design and Test of a $100 \mu\text{N}$ -class Thrust Stand for a Miniature Water Ion Thruster with CubeSat, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, **16**(2018), No.7, pp.673-678.
- 6) Yuichi, N., Hiroyuki, K., Hiroki, K. and Kimiya, K. : Performance Characterization of a Miniature Microwave Discharge Ion Thruster Operated with Water, Acta Astronautica, **157**(2019), pp.294-299.
- 7) Yuichi, N., Yasuho, A., Hiroyuki, K., Hiroki, K. and Kimiya, K. : Experimental Characterization of the Microwave-Discharge Water Ion Thruster for CubeSat, The 36th International Electric Propulsion Conference, Austria, 2019.
- 8) Hiroyuki, K., Kimiya, K., Junichi, A. and Koji, Y. : Engineering Model of the Miniature Ion Propulsion System for Nano-satellite: HODOYOSHI-4, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, **12**(2014), No.29, pp.19-24.
- 9) Hiroyuki, K., Hiroki, K., Kazuya, Y., Jun, A., Yuichi, N., Yusuke, N., Shunichi, K., Toshihiro, M., Ryu, F., Junichi, N. and Kimiya, K. : Initial Flight Operations of the Miniature Propulsion System Installed on Small Space Probe: PROCYON, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, **14**(2016), No.30, pp.13-22.
- 10) Yosuke, S., Hiroyuki, K., Masakatsu, N. and Yoshinori, T. : Electron Extraction Enhancement via the Magnetic Field in a Miniature Microwave Discharge Neutralizer, Journal of Applied Physics, **126**(2019), No.24.
- 11) Yosuke, S., Hiroyuki, K., Masakatsu, N. and Yoshinori, T. : Electron Loss Mechanisms in a Miniature Microwave Discharge Water Neutralizer, Physics of Plasmas, **27**(2020), No.6.

