

マイクロ波放電式小型イオンスラスタにおける プラズマのマイクロ波吸収率の測定

Measurement of Microwave Absorbance by Plasma of Miniature Microwave Discharge Ion Thruster

直井太郎¹, 小泉宏之¹, 國中均²
Taro Naoi, Hiroyuki Koizumi, and Hitoshi Kuninaka

Abstract

In this study, by electromagnetic analysis we found that Non-50 Ω line, the impedance of which isn't 50 Ω , in the miniature microwave discharge ion thruster $\mu 1$ was the resonator and microwave power inside the thruster could be formulated using S-parameters of non-50 Ω line. Measuring microwave absorbance by plasma, this formulation was verified and the possibility of estimating microwave absorbance from the shape of the resonator without experiments was suggested.

1. 緒言

近年, 小型衛星に関する研究および開発が活発に行われており, その成長は目覚ましい¹⁻³⁾. 低コスト・短い開発期間といったメリットを持つ小型衛星の台頭は衛星利用の閾値を下げ, 宇宙利用に大きな変革をもたらしている. そして, 衛星に搭載する推進系についても小型化の流れが拡大されようとしている. このような小型推進系は軽量かつ低電力作動が可能であること, そして高効率であることが求められている.

推進系の中でも電気推進機^{4,5)}はその高い比推力によって推進剤量を大幅に低減させることができ, 長期ミッションなどで大速度増分を必要とする小型衛星に適している. 特に, マイクロ波放電式イオンスラスタ^{6,7)}は構造の簡素さから小型化において他の電気推進機をリードしている. そのような中, 宇宙科学研究所および東京大学で研究が進められてきたマイクロ波放電式小型イオンスラスタ $\mu 1$ ⁸⁻¹¹⁾は, マイクロ波のスラスタ投入電力を 1 W に抑えた上で作動が可能であり, イオン生成コスト 250 W/A という高性能を誇っている.

小型衛星における使用可能電力の制限は搭載される電気推進機に対して大きな制約となる. そのため, 小型電気推進機は系全体の小型化のみならず, 消費電力を抑

えることが求められている. マイクロ波放電式イオンスラスタでは, マイクロ波電力の低減効果大きい. これは, マイクロ波電源のエネルギー変換効率は直流電源に対して低いためである.

イオンスラスタにおいて, マイクロ波は放電室のプラズマに電力を供給する. 通常, イオンスラスタの作動ではチューナーを用いてマイクロ波のマッチングを行なっているが, マイクロ波放電式小型イオンスラスタ $\mu 1$ はチューナーなしでの作動を実現させている. 構造の簡素化や小型化の面でもチューナーなしの作動の利点が多い. チューナーなしの作動での効率を上げるためにも, マイクロ波の反射成分を減らし, プラズマへの電力供給を多くすることが鍵となっている.

本研究では, 電磁場解析を行ってスラス



Fig. 1 マイクロ波放電式小型イオンスラスタ $\mu 1$

¹ 東京大学

² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

タ内部のマイクロ波の挙動を明らかにし、入射波や反射波などの各成分を定式化した。そして、スラスタ作動中にプラズマのマイクロ波吸収率を測定することで、上記式の信頼性を検証した。

2. 電磁場解析

2.1. 解析対象およびソフトウェア

本研究では、スラスタ内部のマイクロ波伝送線路（SMA コネクタ～放電室直前）と放電室を対象として電磁場解析を行った。上記線路において特性インピーダンスが $50\ \Omega$ であるものを「 $50\ \Omega$ 線路」、非 $50\ \Omega$ であるものを「非 $50\ \Omega$ 線路」と呼ぶものとする。なお、非 $50\ \Omega$ 線路内でも特性インピーダンスが複雑に変化しているが、すべてをまとめて非 $50\ \Omega$ 線路とする。非 $50\ \Omega$ 線路はアンテナ支持などの機械的要求からスラスタ内部に存在している。

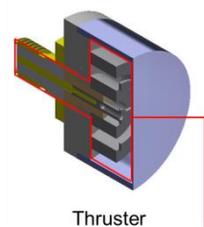
解析に用いたソフトウェアは、Femap (Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.) と PHOTO-WAVEj ω (株式会社フォトン) である。解析対象を CAD データとして Femap で読み込み、メッシュを作成した後に PHOTO-WAVEj ω で 3 次元有限要素解析を行った。また、解析結果を再び Femap に読み込ませることでポスト処理を行った。

2.2. 放電室電場の解析

プラズマのない状態（プラズマ点火前）における放電室電場の解析を行った。解析対象はモデル A、モデル B、 $50\ \Omega$ 線路モデルの 3 つである。

モデル A は、現行の $\mu 1$ における伝送線路形状を持ち、 $50\ \Omega$ 線路→非 $50\ \Omega$ 線路→ $50\ \Omega$ 線路→放電室の順にマイクロ波が伝搬される。モデル B は、非 $50\ \Omega$ 線路の形状のみがモデル A と異なる。 $50\ \Omega$ 線路モデルは、放電室まで特性インピーダンス $50\ \Omega$ の線路のみで構成されている。マイクロ波は特性インピーダンスの変わり目で反射するため、 $50\ \Omega$ 線路モデルでは放電室に至るまでの線路での反射は起こらない。

スラスタの SMA コネクタ側（上流）より $4.2\ \text{GHz}$ 、電力 $1\ \text{W}$ のマイクロ波を入射した場合を考えた。プラズマが存在しない



Thruster

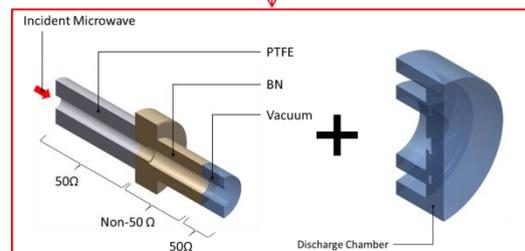


Fig. 2 解析対象：モデル A

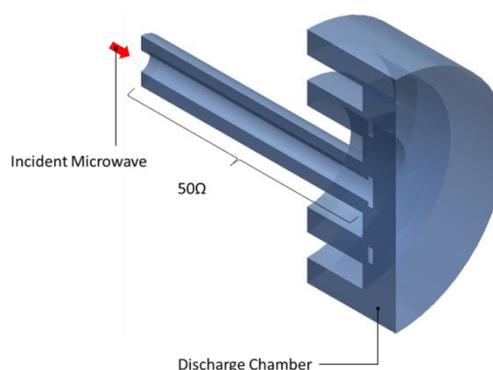


Fig. 3 解析対象： $50\ \Omega$ 線路モデル

ので、入射したマイクロ波は放電室に送られたのち、すべて反射して再び上流側へと戻っていく。解析対象の周囲は金属で覆われており、壁面損失や誘電損失は無視した。

まず、モデル A と $50\ \Omega$ 線路モデルの放電室電場強度を比較した。電場強度はマイクロ波によって発生する電場の振幅である。Fig. 4 および Fig. 5 のように、モデル A の方が強電場を放電室に形成することがわかった。単純に考えるならば、放電室までの線路で反射の起こらない $50\ \Omega$ 線路モデルの方が強電場を形成しそうであるが、当初の予測と反する結果が得られた。

この現象について、非 $50\ \Omega$ 線路が共振器の働きをしているためであると我々は考えた。つまり、放電室で反射して戻ってきたマイクロ波のうち、非 $50\ \Omega$ 線路で再び反射して放電室へと送られる成分が存在し、マイクロ波の重ね合わせがうまい具合に起こっていると考えたのである。

そこで、モデル A とモデル B を対象に非 50 Ω 線路の位置を変えた場合の放電室電場強度を同じく電磁場解析解析で求めた。非 50 Ω 線路が共振器となっているならば、その位置を前後に動かすことで放電室電場が周期的に変化するはずである。

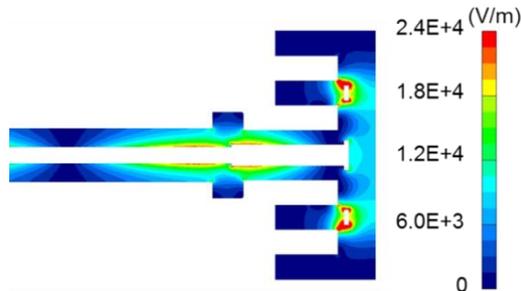


Fig. 4 放電室電場強度 (モデル A 断面)

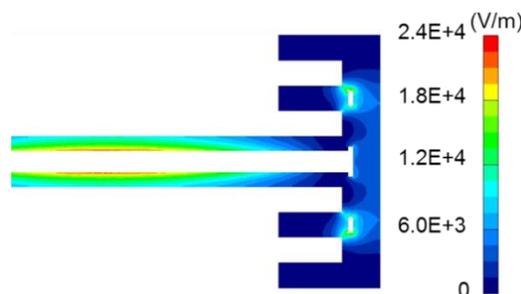


Fig. 5 放電室電場強度 (50 Ω 線路モデル断面)

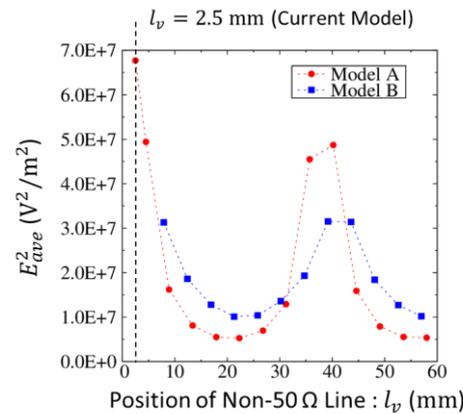


Fig. 6 放電室電場強度二乗平均の変化

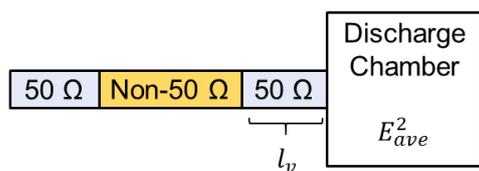


Fig. 7 各線路の位置関係

具体的には、放電室直前の 50 Ω 線路 (真空部分) の長さ l_v を変化させていき、各々でのスラスタ内部の電場分布を求めた。

Fig. 6 のように、放電室電場強度二乗平均 E_{ave}^2 が周期的に変化しているという結果が得られた。4.2 GHz のマイクロ波の真空における波長が 71.4 mm なので、放電室電場強度の二乗平均 E_{ave}^2 の周期は半波長になっていることもわかった。これは、共振器の性質と一致している。

現行のスラスタ形状はモデル A のうち $l_v = 2.5$ (mm) のものと同じである。放電室電場が強くなる点を取れていることがわかる。

以上のようにして、スラスタ内部の非 50 Ω 線路が共振器として働いていることを導いた。

2.3. S パラメータによる定式化

共振器として働いている非 50 Ω 線路の反射・透過特性を調べるため、Femap および PHOTO-WAVEj ω を用いて非 50 Ω 線路の S パラメータを計算した。ここでの S パラメータは波の振幅・位相情報をもつ複素数である。

モデル A およびモデル B の非 50 Ω 線路の S パラメータは Table 1 のようになった。ある一方向のみからマイクロ波が入射し

Table 1 各モデルの S パラメータ

Model Name	$ S_{11} ^2$	$ S_{21} ^2$
Model A	0.323	0.677
Model B	0.111	0.889
50 Ω Line Model	0	1

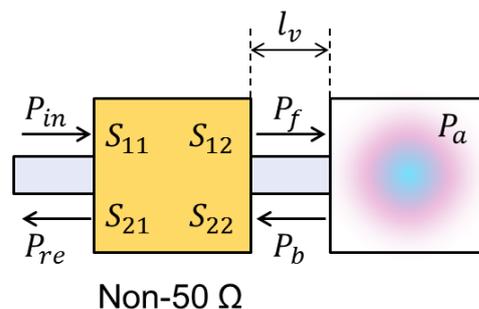


Fig. 8 スラスタ内部のマイクロ波電力

たとき、 $|S_{11}|^2$ はマイクロ波の反射量を、 $|S_{21}|^2$ は透過量をそれぞれ表す。

この S パラメータを用いることで、イオンスラスタ内部のマイクロ波電力の流れを定式化することができた。放電室直前の 50 Ω 線路上の進行波電力が放電室投入電力が、実際に放電室へ送られるマイクロ波の大きさとなる。放電室投入電力を P_f 、プラズマ吸収電力を P_a とすれば、それぞれ次式のように表せることを導いた。導出方法は後述する。

$$P_f = \left| \frac{S_{21} \exp\{j(-2\pi l_v / \lambda)\}}{1 - S_{22} \Gamma_d \exp\{j(-4\pi l_v / \lambda)\}} \right|^2 P_{in} \quad (1)$$

$$P_a = (1 - |\Gamma_d|^2) P_f \quad (2)$$

ここで、 Γ_d は放電室でマイクロ波がどれだけの振幅・位相変化で反射されるかを表す反射係数である。反射係数 Γ_d を用いることでプラズマがどれだけマイクロ波を吸収するかを扱うことも可能となった。つまり、「放電室電場の解析」と違い、プラズマ点火後も考慮することができるのである。ただし、スラスタ内部の線路における損失（誘電損失および壁面損失）は無視し、消費されるマイクロ波電力はすべてプラズマに吸収されるものとした。

マイクロ波電力の式の導出方法を示す。導出にはシグナルフローグラフを利用した¹²⁾。上流側 50 Ω 線路と非 50 Ω 線路の境界をポート 1、非 50 Ω 線路と下流側 50 Ω 線路との境界をポート 2、下流側 50 Ω 線路と放電室との境界をポート 3 とし、各

ポートにおける複素振幅 a および b を定義した。信号伝達の係数には S パラメータおよび反射係数 Γ_d 、透過係数 T_{lv} を用いた。透過係数 T_{lv} は下流側 50 Ω 線路の長さ l_v による位相変化を表す係数で、次式のように表せる。

$$T_{lv} = \exp\{j(-2\pi l_v / \lambda)\} \quad (3)$$

このようなシグナルフローグラフを導入したことにより、各複素振幅は次式のように表すことができた。ただし、スラスタへの入射波に相当する複素振幅 a_1 を基準とした。

$$a_1 = 1 \quad (4)$$

$$a_2 = \frac{T_{lv}^2 S_{21} \Gamma_d}{1 - T_{lv}^2 S_{22} \Gamma_d} a_1 \quad (5)$$

$$a_3 = \frac{T_{lv} S_{21}}{1 - T_{lv}^2 S_{22} \Gamma_d} a_1 \quad (6)$$

$$b_1 = \left(1 + \frac{T_{lv}^2 S_{21} S_{12} \Gamma_d}{1 - T_{lv}^2 S_{22} \Gamma_d} \right) a_1 \quad (7)$$

$$b_2 = \frac{S_{21}}{1 - T_{lv}^2 S_{22} \Gamma_d} a_1 \quad (8)$$

$$b_3 = \frac{T_{lv} S_{21} \Gamma_d}{1 - T_{lv}^2 S_{22} \Gamma_d} a_1 \quad (9)$$

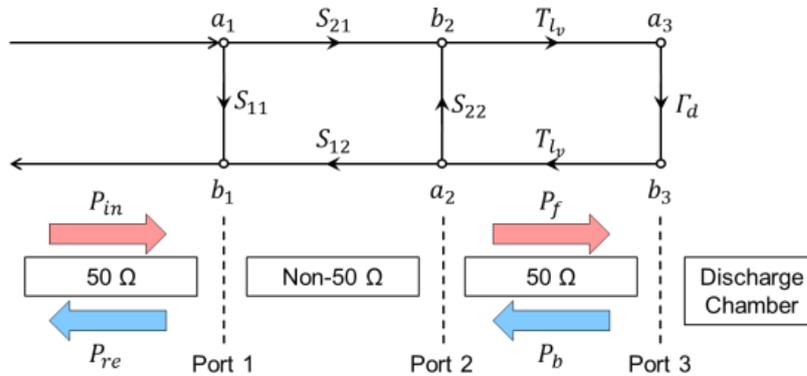


Fig. 9 シグナルフローグラフ

マイクロ波電力は複素振幅の絶対値の二乗であるので、各マイクロ波電力の式を次式のように表すことができた。ただし、 P_{in} はスラスタへの入射電力、 P_{re} はスラスタからの反射電力、 P_b は放電室反射電力である。

$$P_{in} = |a_1|^2 \quad (10)$$

$$P_{re} = |b_1|^2 \quad (11)$$

$$P_f = |b_2|^2 = |a_3|^2 \quad (12)$$

$$P_b = |a_2|^2 = |b_3|^2 \quad (13)$$

$$P_a = P_{in} - P_{re} = P_f - P_b \quad (14)$$

式(14)は誘電損失および壁面損失を無視した系のエネルギー保存の関係式でもある。これらの式を組み合わせ、式(2)のような P_a の式を得ることができた。

さて、このようにして導出されたマイクロ波電力の式を「放電室電場の解析」によって得られた結果と比較した。具体的には、非50Ω線路の形状のみが異なるモデルAとモデルBについて、「Sパラメータによる

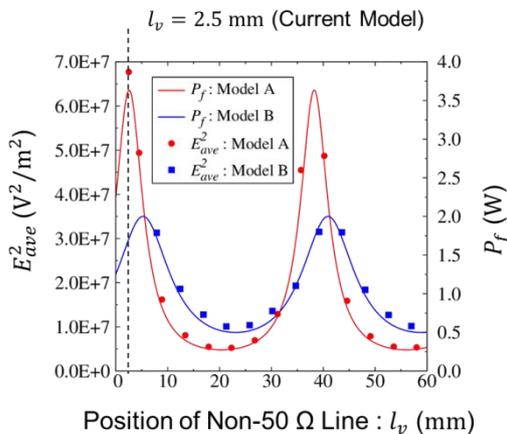


Fig. 10 「放電室電場の解析」と「Sパラメータによる定式化」における結果の比較

る定式化」で求めた放電室投入電力 P_f と、「放電室電場の解析」で求めた放電室電場強度二乗平均 E_{ave}^2 を比較した。

比較方法として、非50Ω線路の位置 l_v を変化させたときの放電室投入電力 P_f と放電室電場強度二乗平均 E_{ave}^2 のグラフを重ね合わせた。マイクロ波電力と電場強度の二乗は比例関係にあるため、放電室投入電力 P_f に比例して放電室電場強度二乗平均 E_{ave}^2 が変化するはずである。よって、グラフより $P_f / E_{ave}^2 \cong \text{Const.}$ を読み取ることができれば、「Sパラメータによる定式化」が正しいと言える。

ただし、プラズマ点火前を考えたため、放電室ですべてのマイクロ波が反射されるとして反射係数 Γ_d を定めた。また、放電室投入電力 P_f については、スラスタへの入射電力 $P_{in} = 1$ (W)として考えた。

グラフ上で放電室投入電力 P_f と放電室電場強度二乗平均 E_{ave}^2 で重ねたところ、モデルAおよびモデルBの両者において $P_f / E_{ave}^2 \cong \text{Const.}$ であるという結果が得られた。したがって、「Sパラメータによる定式化」でスラスタ内部におけるマイクロ波挙動の傾向は予測可能であることがわかった。

以上のようにして、「Sパラメータによる定式化」でマイクロ波電力をパラメータ表示し、マイクロ波挙動の傾向を予測することができることを示した。マイクロ波電力の式には非50Ω線路(共振器)の位置 l_v がパラメータとして入っており、ある共振器形状ではどの位置で放電室電場が最大になるかわかるという知見も得られた。

3. 実験

3.1. 実験目的

スラスタ内部のマイクロ波電力に「Sパラメータによる定式化」を適用した場合、放電室における反射係数 Γ_d によってプラズマの電力吸収を扱う。放電室内部のプラズマの状態によってマイクロ波がどのように反射するかが決まるため、反射係数 Γ_d は放電室形状とプラズマ吸収電力 P_a の係数である。

反射係数 Γ_d があらかじめわかっ

ば、非 50 Ω 線路の S パラメータを計算することで実験なしでもプラズマ吸収電力 P_a を予測することが可能となり、最適な非 50 Ω 線路の形状や位置を検討することが可能となる。

そこで、現在の放電室形状における反射係数 Γ_d を求めるために、マイクロ波吸収率 α_n を測定した。マイクロ波吸収率 α_n は次式で与えられる。

$$\alpha_n = P_a / P_{in} = \frac{\left| \frac{S_{21} \exp\{j(-2\pi l_v / \lambda)\}}{1 - S_{22} \Gamma_d \exp\{j(-4\pi l_v / \lambda)\}} \right|^2}{\times (1 - |\Gamma_d|^2)} \quad (15)$$

マイクロ波吸収率 α_n は入射電力に対する吸収電力の割合であり、スラスタ稼動時における正味のマイクロ波吸収率である。複素数である反射係数 Γ_d は、非 50 Ω 線路形状の違う 2 種類のモデルでのマイクロ波吸収率 α_n から求める必要がある。

3.2. 実験方法

スラスタ直前に方向性結合器を挿入することで反射波を取り出し、検波器で DC 信号に変換して読み取った。スラスタ稼動時の反射係数 Γ_d を求めるために、グリッドに電圧を印加してイオンを加速させた

状態で測定を行った。

実験にはモデル A、モデル C、モデル D の 3 つを使用した。各モデルは非 50 Ω 線路形状のみが異なり、放電室形状やグリッドなどのその他の諸元はすべて同じである。Femap および PHOTO-WAVEj ω で計算した非 50 Ω 線路の S パラメータは Table 2 のようになった。

実験モデルの形状は既知であるため、マイクロ波電力の式において実験前に不明なパラメータは反射係数 Γ_d のみである。複素数である反射係数 Γ_d を、次式のように単一波に対するマイクロ波吸収率 α_1 (実数)、および放電室で反射された時の位相変化を δ_d で表した。

$$\Gamma_d = \sqrt{1 - \alpha_1} \exp(j\delta_d) \quad (16)$$

ここで、単一波に対するマイクロ波吸収率

Table 2 実験モデルの S パラメータ

Model Name	$ S_{11} ^2$	$ S_{21} ^2$
Model A	0.323	0.677
Model C	0.164	0.836
Model D	0.214	0.786

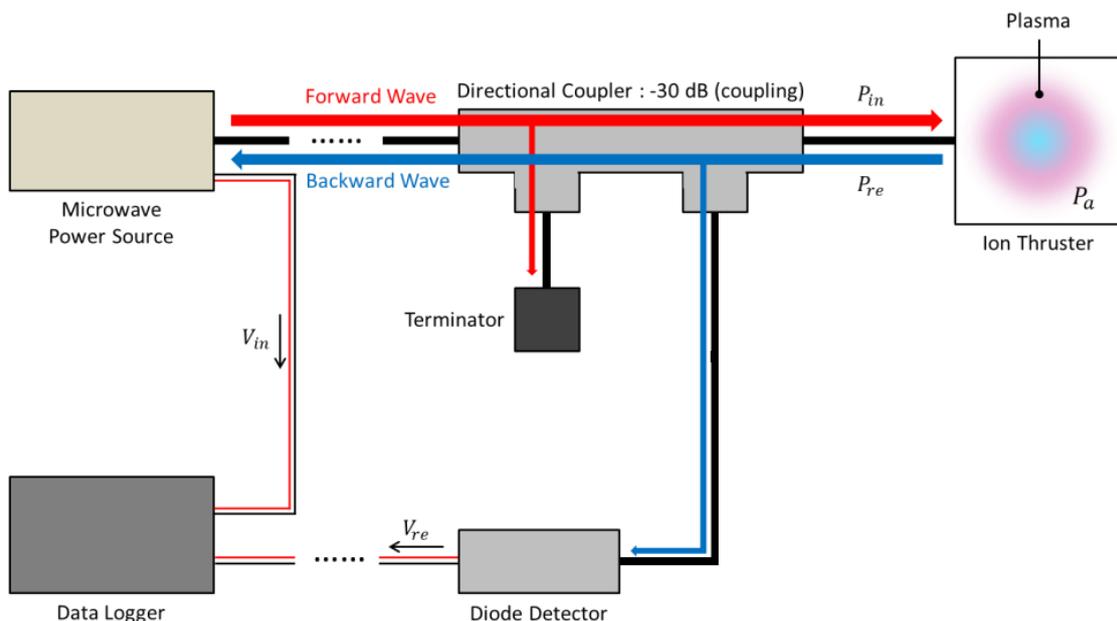


Fig. 11 実験装置配置図

α_1 とは、放電室に入ってきた共振されていないマイクロ波がどれだけ吸収されるかを表している。

よって、2つの実験結果より単一波に対するマイクロ波吸収率 α_1 および放電室で反射された時の位相変化 δ_d を計算し、現

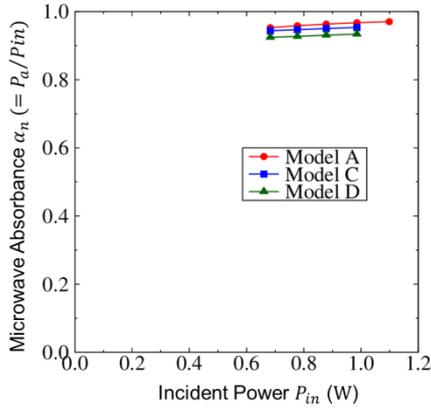


Fig. 12 マイクロ波吸収率の比較

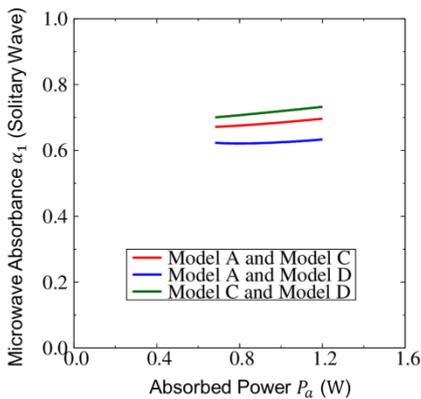


Fig. 13 放電室における単一波に対するマイクロ波吸収率

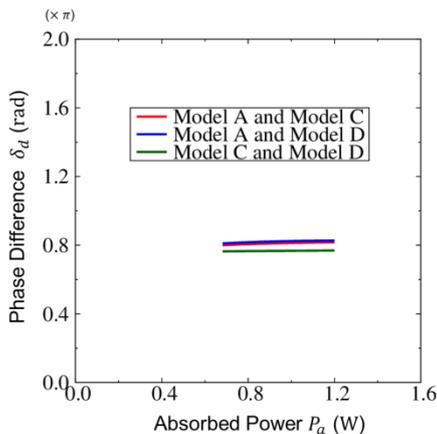


Fig. 14 放電室における位相変化

行の放電室形状における反射係数 Γ_d を把握した。

3.3. 実験結果

各モデルにおけるマイクロ波吸収率 α_n を測定すると、その大きさはモデル A→C→D の順であるという結果が得られた。Table 2 の S パラメータより、マイクロ波の通りやすさは C→D→A の順である。単にマイクロ波が通りやすい線路を使用すれば、プラズマに多くのマイクロ波電力を吸収させられるわけではないことが確認できた。つまり、非 50 Ω 線路が共振器として働いていることの確認をすることができた。

次に、2つの実験結果より反射係数 Γ_d を導出した。ここでは、複素数である反射係数 Γ_d を表す2つの実数、 α_1 (単一波に対するマイクロ波吸収率)と δ_d (放電室で反射された時の位相変化)について、プラズマ吸収電力 P_a による変化をグラフにした。

グラフより、単一波に対するマイクロ波吸収率 α_1 と放電室で反射された時の位相変化 δ_d はどのモデルの組み合わせでもおおよそ同じ値であることがわかった。これより、現在の放電室形状において反射係数 Γ_d がプラズマ吸収電力 P_a に対しておおよそどれくらいの値を取るかを求めることができた。

マイクロ波吸収率の測定より求めた反射係数 Γ_d は、導出の際に使用したモデルによって値に誤差が出てしまった。「S パラメータによる定式化」における仮定では、「マイクロ波の誘電損失および壁面損失を無視し、反射波以外のマイクロ波電力はすべてプラズマに吸収される」としたことから、反射係数 Γ_d のより正確な値を求めるには誘電損失や壁面損失を考慮する必要があると考えられる。

4. 本研究のまとめ

マイクロ波放電式小型イオンスラスタ $\mu 1$ について、スラスタ内部の電磁場解析を行うことで、非 50 Ω 線路が共振器として機能していることが判明した。非 50 Ω 線路とは、スラスタ内部の放電室に至るまでのマイクロ波が通る線路のうち、特性インピーダンスが 50 Ω でない線路のことで

ある。

また、シグナルフローグラフを用いることでスラスタ内部のマイクロ波電力の流れを定式化した。この定式化と電磁場解析の結果はよく一致していたので、非 50Ω 線路の S パラメータや放電室における反射係数 Γ_d があらかじめわかっているならば、実験なしにプラズマの吸収電力を、つまりスラスタの性能を検討することができることを示した。

放電室におけるマイクロ波の反射係数 Γ_d があらかじめわかっているならば、「 S パラメータによる定式化」によるマイクロ波電力の式を適用すれば、非 50Ω 線路の S パラメータを解析で求めることで実験なしにスラスタ性能良し悪しを予測することができる。そこで、複数のモデルにおいてスラスタ稼働中のマイクロ波は吸収率を測定し、「 S パラメータによる定式化」で用いた式をもとに反射係数 Γ_d を導出した。

複素数である反射係数 Γ_d は 2 つの実験結果より求める必要があるが、実験した 3 つのモデルの内どの 2 つの組み合わせでもおよそ反射係数 Γ_d 同じ値になった。これにより、「 S パラメータによる定式化」でおおよその性能予測は可能であること、および現在の放電室形状における反射係数 Γ_d の値（正確にはプラズマの吸収電力によって変化する）が明らかになった。

放電室形状を変えた場合も同様の手法により反射係数 Γ_d を求めれば、非 50Ω 線路の S パラメータでスラスタ内部のマイクロ波電力の挙動を予測することが可能となる。つまり、スラスタ内部伝送線路形状の設計指針を立てることができる。

参考文献

- 1) 中須賀真一, 松永三郎: CanSat 計画—日米大学による手作り小型衛星への挑戦—, 日本航空宇宙学会誌, **48** (2000), pp. 589-596.
- 2) 斎藤宏文, 水野貴秀: “れいめい” 衛星の開発と小型高機能衛星の展望, 日本航空宇宙学会誌, **56** (2008), pp. 88-96.
- 3) Vadim Zakirov, LI Luming (李路明): Propulsion Challenges for Small Spacecraft: 2005, TSINGHUA SCIENCE AND TECHNOLOGY, **11** (2006), pp. 507-514.
- 4) 栗木恭一, 荒川義博: 電気推進ロケット入門, 東京大学出版会, 2003.
- 5) 荒川義博: 電気推進の基礎, プラズマ・核融合学会誌, **77** (2001), pp. 765-771.
- 6) 荒川義博 監修, 國中均, 中山宜典, 西山和孝 共著: イオンエンジンによる動力航行, コロナ社, 2006.
- 7) 國中均, 堀内泰男, 西山和孝, 船木一幸, 清水幸夫, 山田哲哉: 「はやぶさ」搭載マイクロ波放電型イオンエンジン, 日本航空宇宙学会誌, **53** (2005), pp. 203-210.
- 8) 小泉宏之, 國中均: 超低電力小型マイクロ波放電式イオンエンジンのアンテナ設計方法, 日本航空宇宙学会論文集, **57** (2009), pp. 234-243.
- 9) Koizumi, H., Kuninaka, H.: Development of a Miniature microwave discharge ion thruster driven by 1 W microwave power, Journal of Propulsion and Power, **26** (2010), pp.601-604.
- 10) 小泉宏之, 國中均: 小型衛星搭載用の小型低電力イオンエンジンの開発状況, 宇宙科学技術連合講演会講演集 (CD-ROM), **54** (2010).
- 11) 小泉宏之, 小紫公也, 荒川義博, 青山順一, 山口耕司: 小型イオン推進システムのエンジニアリングモデル試験状況, 宇宙科学技術連合講演会講演集 (CD-ROM), **56** (2012).
- 12) David M. Pozar: Microwave Engineering, Wiley, 4 edition (2011)