

20cm 級マイクロ波放電型イオンエンジン $\mu 20$ における

最適マイクロ波周波数の調整

○足立 文也（横国大院・工），西山 和孝（ISAS/JAXA）

1. 背景

小惑星探査機「はやぶさ」に搭載された 10cm 級マイクロ波放電型イオンエンジン $\mu 10$ の大型版にあたる $\mu 20$ （図 1.1）の研究開発を行っている。現在では、 $\mu 20$ は研究開発当初に掲げた基本性能はほぼ達成され、一万時間の耐久試験まで終えている。また、 $\mu 20$ の宇宙作動実証を主な目的とした深宇宙探査技術実験ミッション（Demonstration and Experiment of Space Technology for Interplanetary voyage : DESTINY）の提案もされている。このことから分かる通り、 $\mu 20$ の研究開発は実用を視野に入れた段階に入っている。現状、残る課題の一つは、最適マイクロ波周波数の調整である。

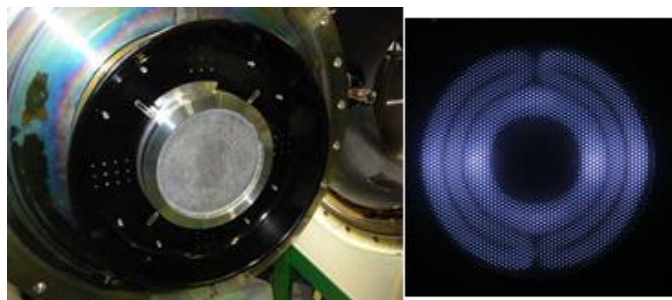


図 1.1 $\mu 20$ （右写真はプラズマ点火の様子）

2. 最適マイクロ波周波数

最適マイクロ波周波数とは、プラズマ点火または運転に最適なマイクロ波周波数のことである。システムの簡索性などの観点から、マイクロ波放電型イオンエンジンにおける理想は、運転最適マイクロ波周波数を用いても確実なプラズマ点火が可能であることである。しかし、現在の $\mu 20$ は運転最適マイクロ波周波数を用いても確実にプラズマ点火を行うことが大変難しい。

また、マイクロ波周波数は衛星に搭載されている通信機器等との干渉を及ぼさない周波数でなければならない。従って、 $\mu 20$ が運転最適マイクロ波周波数を

用いてもプラズマ点火が確実に行えるイオンエンジンになったとしても、その運転最適マイクロ波周波数は状況に応じて調整できることが望ましい。これまで、マイクロ波ケーブル長を変更することで、最適マイクロ波周波数を調整していた。

以上を踏まえた本研究の目的は以下のようになる。

- ・ $\mu 20$ を運転最適マイクロ波周波数のみで作動できるイオンエンジンにしたい。
- ・これまでとは異なる最適マイクロ波周波数の調整方法を確立したい。

本稿ではマイクロ波ケーブル長変更以外の最適マイクロ波周波数の調整方法を模索した結果を示す。具体的には、円筒型放電室の内径の寸法変更、マイクロ波送信用アンテナ長さの変更を行い、それぞれが最適マイクロ波周波数に与える影響を調べた。

3. 実験方法

3.1 点火最適マイクロ波周波数

放電室に投入したマイクロ波の反射電力が小さい時、放電室で共鳴が起こり、効率良く電子加熱を行っている状態であると考えられる。この考え方を基に、ここでは、放電室に推進剤なしの状態において反射電力が極小となる周波数を点火最適マイクロ波周波数とする。

非点火時におけるマイクロ波周波数とマイクロ波反射電力との関係、つまり反射率周波数特性は、ネットワークアナライザ（図 2.1）を用いて取得した。キャリブレーションはマイクロ波送信用アンテナ直下で行ったため、ここで取得した反射率周波数特性にはマイクロ波ケーブル等の影響は含まれておらず、放電室状態とアンテナ性能の影響のみが見えていていると考えられる。



図 3.1 ネットワークアナライザ

3.2 運転最適マイクロ波周波数

マイクロ波はプラズマ中と真空中とで異なる挙動をするため、マイクロ波放電型イオンエンジンの基本原理、構造上、基本的には点火最適マイクロ波周波数と運転最適マイクロ波周波数は異なる周波数になる。

ここでは、プラズマ点火中（推進剤流量は加速状態を模擬する流量）においてマイクロ波反射電力が極小となる周波数を運転最適マイクロ波周波数と定義する。

プラズマ点火中における反射率周波数特性の計測には、ネットワークアナライザは容易には適用可能でない。そのため、マイクロ波周波数を変化させながら、各周波数におけるマイクロ波電力と反射電力を計測し、その計測結果を用いて反射率周波数特性を取得した。但し、この実験方法では、アンプと放電室を繋ぐマイクロ波ケーブルの影響を除去できていない。

3.3 最適マイクロ波周波数調整方法の模索

これまではマイクロ波ケーブルの長さを調節することにより、最適マイクロ波周波数の調整がされてきた。しかしながら、その方法は単純な試行錯誤の連続というような作業になりやすく、決して利便性の高い方法とは言えない。そこで、ケーブル長の変更以外の最適マイクロ波周波数の調整方法を模索し、マイクロ波放電型イオンエンジンの実用性の向上を目指した。

本稿では、薄厚円筒型放電室の内径とマイクロ波送信用アンテナの長さを変更し、それぞれの寸法変更が最適マイクロ波周波数に与える影響を調べた。

4. 実験結果と考察

4.1 放電室内径と最適マイクロ波周波数の関係

非点火中と点火中において、放電室内径を縮小した時の反射率周波数特性を以下に示す。（ノミナルの放電室内径は $\phi 200$ である。）

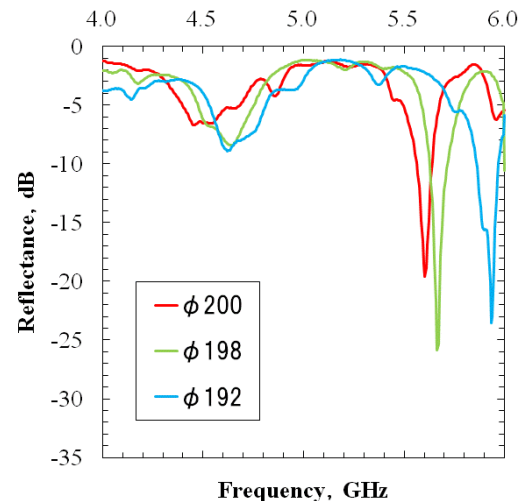


図 4.1.1 非点火中における反射率周波数特性

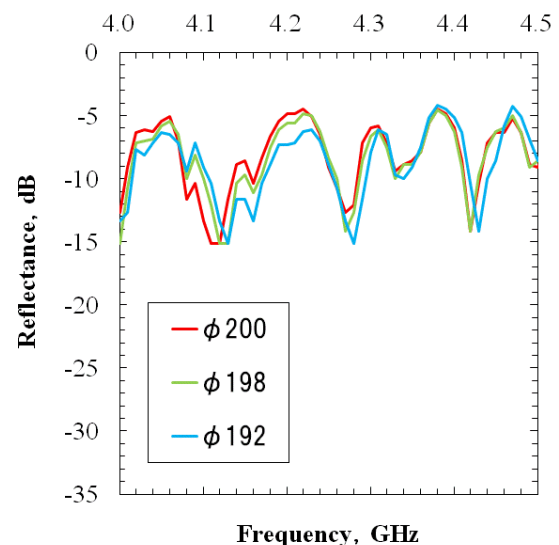


図 4.1.2 点火中における反射率周波数特性, 推進剤流量 4sccm

図 4.1 より、非点火中において放電室内径を縮小すると、反射率が極小となる周波数、つまり点火最適マイクロ波周波数は高くなっていることが分かる。また、図 4.2 より、プラズマ点火中においては放電室内径を縮小させても大きな変化はないことが分かる。

4.2 アンテナ長さと最適マイクロ波周波数の関係

非点火中、点火中において、マイクロ波送信用アンテナ長さを変更したときの反射率周波数特性を以下に示す。(ノミナルアンテナ長さは17.6mmである.)

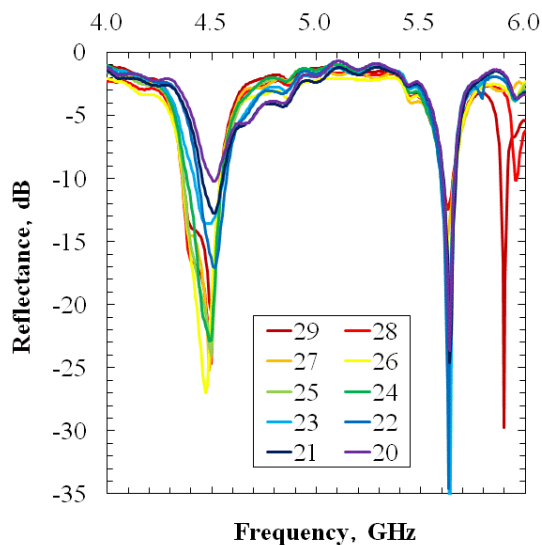


図 4.2.1 非点火中における反射率周波数特性, アンテナ長さ 20~29mm

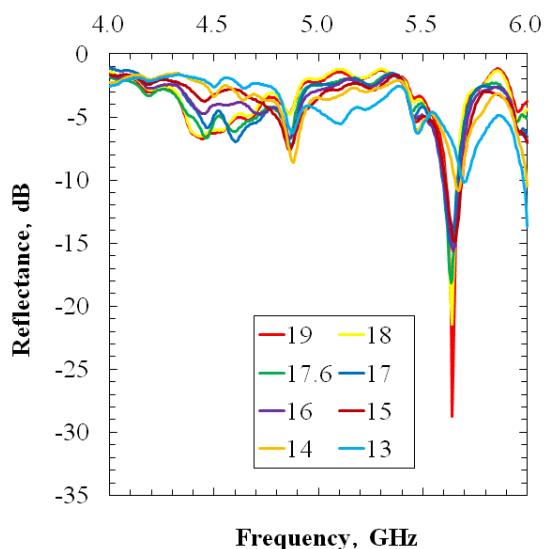


図 4.2.2 非点火中における反射率周波数特性, アンテナ長さ 13~19mm

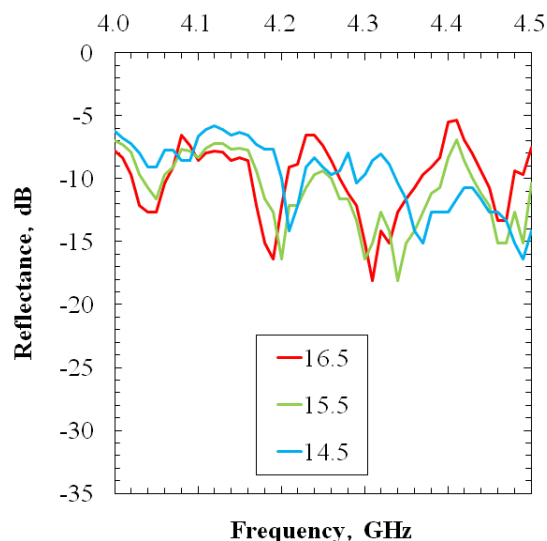


図 4.2.3 点火中における反射率周波数特性, アンテナ長さ 14.5~16.5mm, 推進剤流量 4sccm

図 4.2.1, 4.2.2 より, 非点火中においてはアンテナ長さが 20mm 以上か以下によって, 周波数 4.5GHz 付近に最適周波数が存在するか存在しないかの違いがあった. 4.5GHz 付近以外では, アンテナ長さの違いによって, 大きな違いは見られなかった.

図 4.2.3 より, プラズマ点火中において, アンテナ長さを短くすると, 運転最適マイクロ波周波数は高くなった.

5. 結論

5.1 放電室内径と最適マイクロ波周波数の関係

放電室内径を縮小させると点火最適マイクロ波周波数が高くなることが分かったが, 一方, 放電室内径の縮小は運転最適マイクロ波周波数には大きな影響を及ぼさなかった.

これらの結果より, 放電室内径の寸法変更により運転最適マイクロ波周波数を変化させずに点火最適マイクロ波周波数を調整できる可能性が見出された.

5.2 アンテナ長さと最適マイクロ波周波数の関係

20~29mm の範囲, または 13~19mm の範囲でアンテナ長さを変更する場合には点火最適マイクロ波周波数は大きく変化しない. 一方, アンテナ長さを短くすると運転最適マイクロ波周波数は高くなることが示された.

これらの結果より, アンテナ長さの寸法変更により

運転最適マイクロ波周波数を調整できる可能性が見出された。

5.3 総括

放電室内径の寸法変更により点火最適マイクロ波周波数を、アンテナ長さの変更により運転最適マイクロ波周波数を、それぞれ独立に調整できる可能性が本研究により見出された。

6. 今後

本稿で得られた知見を基に、 $\mu 20$ の点火最適マイクロ波周波数、運転最適マイクロ波周波数を調整し、運転最適マイクロ波周波数を用いても確実にプラズマ点火を行えるようにする。

また、アンテナ長さの寸法変更により運転最適マイクロ波周波数を 4.25GHz に調整し、そのことを実験的に確認、実証することでマイクロ波ケーブル長の変更以外の最適マイクロ波周波数の調整方法を確立する。

7. 参考文献

- [1] 西山和孝, 細田聡, 足立文也, 深宇宙探査技術実証ミッション DESTINY のミッションモジュール初期検討, 平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2011-034, 2012.
- [2] Kazutaka Nishiyama, Microwave Frequency Tuning of an ECR ion thruster, 28th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS-2011-b-31, 2011.