

論文の内容の要旨

論文題目 マイクロ波放電型イオンスラスタの磁場形状と推進性能に関する実験的研究
Experimental Investigation of the Effect of Magnetic Field Geometry
on the Microwave Discharge Ion Thruster Performance

氏名 谷 義隆

宇宙用電気推進機は、科学推進機に代わる宇宙用推進機として近年各国での研究開発が進められている。イオンスラスタは電気推進機の一つで、3000~10000 秒の高い比推力と、数万時間の長寿命が特徴であり、衛星の南北制御や軌道補償、深宇宙探査機などへの適用が拡大しつつある。イオンスラスタにより衛星のペイロード比向上や、長期に渡るミッションを可能とするなどの利点が存在する。

イオンスラスタには大きく分けて直流放電型・RF 放電型・マイクロ波放電型の3種類の方式が存在する。中でもマイクロ波放電型イオンスラスタは、電極を用いない無電極放電であることや、システムの簡素さから、長寿命かつ信頼性の高い方式と言える。この方式で、世界で初めて宇宙実証に成功したのは日本の JAXA の宇宙探査機「はやぶさ」に搭載された $\mu 10$ イオンスラスタである。軌道上で世界最長クラスの 40,000 時間級の作動を実証した。この $\mu 10$ イオンスラスタは「はやぶさ」の後継機の「はやぶさ 2」にも搭載され、2019 年 3 月現在も運用が続いている。

$\mu 10$ の持つ大きな課題の一つに、推力の増強がある。 $\mu 10$ はその最大推力が 10mN と、他の同口径のスラスタと比べて数十%低い。 $\mu 10$ を用いる将来ミッションとして、2020 年初頭に小惑星 Phaethon フライバイを目指す DESTINY⁺や、木星トロヤ群探査のためのソーラー電力セイル OKEANOS などが検討されている。これらのミッションでは、大きな ΔV を得るために「はやぶさ 2」比で 20%のイオン源性能向上が目標とされており、大推力化は解決すべき重要な問題の一つである。

本論文の目的は、 $\mu 10$ イオンスラスタの将来ミッションへの適用を目指し、12mN イオン源性能向上を行うものとする。加えて、性能向上の過程から得られた結果に基づいてマイクロ波放電型イオンスラスタの設計指針を提案することを目指す。

そこで、従来型放電室の磁気回路を改良した新型放電室を自作し、推進性能、内部イオン電流分布と放電電力性能の測定を行った。新型放電室での推進性能は最大ビーム電流 202mA を達成し、従来型放電室における 175mA から約 16%のビーム電流向上に成功した。ビーム電流向上が推力に寄与する性能向上かどうかを調査するために、プルーム内部の多価イオン電流比率と、プルーム発散角を計測した。その結果、それらから得られる多価イオン効率とビーム発散効率は従来型放電室と大きく変わらないものであった。得られた推力パラメータから計算された推力は 11.7mN、比推力は 3053 秒、推進効率は 39%であり、比推力を低下させることなく目

標としていたレベルの性能向上に成功した。

次に、グリッド直下におけるビームプロファイルを計測し、設計変更で予想されたプラズマ分布が得られているかを検証した。計測結果から、ビームピーク位置が変更した磁場形状に応じて変化しており、有効ビーム径が拡大していることが確認された。

性能向上の原因を調査すべく、放電室内部にガードリング付き平板プローブを挿入し、放電室内部壁面を6箇所に分けて流入するイオン電流分布を計測した。従来型放電室と比較すると、新型放電室では流入するイオン電流が増加していることが判明した。これはプラズマ生成量が増加していることを示すと考えられる。投入電力を変化させることなく、プラズマ生成量が増大しているということは、マイクロ波電力の吸収効率が増加したということを示唆している。

一方で、新型放電室では放電室内部から引き出されるイオンの割合は、低下してしまった。これは、(1) グリッド部へと輸送されるイオンの割合が低下していること、(2) グリッドのイオン透過率が低下していることの2つの要因によるものということがプローブ計測結果から判明した。(1)については、放電室内部でイオンのラーマー半径の補正をかけた実効的な引き出し体積を考えた際に、プラズマ生成領域の体積に対する直接グリッドへと輸送が行われる領域の割合が低下しているためと考えられる。(2)については、グリッド上流面のプラズマ密度が増加したため、グリッド上流面への凸面シースの張り出しが縮小したためと考えられる。それぞれの問題を解決するために、(1)については上下流ともにスラスト軸方向を向いた磁場配位の磁気回路を、(2)については薄型のグリッドを使用することを提案した。

放電室性能を調査するために、流量を固定してマイクロ波投入電力をノミナル作動点から±10W程度変化させた際の特性を調査した。この結果から、推進剤利用効率—イオン生成コストの値をプロットして、0次元モデルからカーブフィッティングによりマイクロ波吸収効率を見積もった。これより、イオン引き出し効率が低下した分を補う形でマイクロ波吸収効率が上昇し、結果として性能向上につながったと考えられる。

マイクロ波吸収効率に関して、加熱途中の電子がエネルギーを持ち去ると考え、種々の簡略化された仮定のもとに放電室内部をモデル化した。吸収効率に重要なファクターとして、(電子損失領域の体積) + (プラズマ生成領域の体積) に対する (プラズマ生成領域の体積) と、プラズマ生成領域内部のミラー比が考えられた。新旧放電室に対してこれらの値を計算してマイクロ波吸収効率を見積もってみると、新型放電室においてマイクロ波吸収効率が増加するという結果が得られ、実験結果と整合した。

以上から、新たな放電室を設計することで、従来から16%の推力向上に成功し、放電室の設計指針を磁場形状から簡易的に見積もる方法を提案することができた。