

【助成 38 -01】

無電極プラズマ推進機による革新的スペースデブリ除去技術の確立

研究者 東北大学 大学院工学研究科 准教授 高橋和貴

〔研究の概要〕

地球周辺のスペースデブリは、小型のものを含めると 50 万個以上存在するとされており、デブリの除去技術の開発は喫緊の課題である。デブリを減速し高度を下げることで、大気圏突入による燃焼で処理を行う手法が有効であるが、非接触でそれを実現可能な手法が確立されてない。本研究では、一台の推進機から双方向プラズマ流噴射を実現し、デブリの減速と宇宙機の正味推力の制御が可能な無電極磁気ノズルプラズマ推進機を用いたスペースデブリ除去技術を開発することを目的としている。特に、当該推進方式において、大型デブリの除去を実現するために必要な推進性能が、消費電力 3-5kW、推力 50-60mN、比推力 2000 秒であるとの試算報告があり、この性能を室内実験で得ることを目的としている。

〔研究経過および成果〕

無電極磁気ノズルプラズマ推進機は、高周波プラズマ源によって発生したプラズマ流が磁気ノズル中を膨張する際に、自発的な加速・運動量変換過程を経て噴射されることで推力を発生させる方式であり、無電極構造であることから数 kW 級の大電力でも長期間の作動が可能になると期待されている。これまでの研究で、推進機の上流・下流を開放端として、磁場配位を制御することで、上流・下流へと噴射されるプラズマ流を制御し、結果として、プラズマ流照射によるデブリの減速と、逆方向へのプラズマ流噴射によって推進機の正味の推力をゼロに保つことが可能であり、スペースデブリ除去に有用な方式であることが示されてきた。一方で、数 t 級の大型デブリ除去のためには、推力 50-60mN、消費電力 3-5kW 級、比推力 2000 秒の作動が必要であることが報告されており、当該方式においてこの性能を達成することが求められている。また、宇宙ミッションを遂行する上で、推力ベクトルの制御や高周波システムの制御性の向上等も必要な

技術であり、本研究ではこれらの課題に関して室内実験を中心として研究開発を行った。

これまでの筆者らによる推力モデルでは、大口徑化によって推進性能が向上する可能性が見出されており、本研究では、上述の推進性能を達成するために、直径 10cm の推進機開発を行い、推進性能の評価を行った。

図 1(a)には、推力計測結果の高周波電力依存性を示している。ここでは、燃料となるアルゴンガスの流

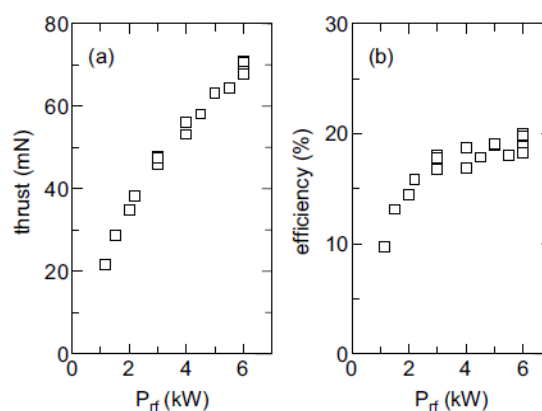


図 1: (a) 推力の高周波電力依存性. (b) 推進効率の高周波電力依存性.

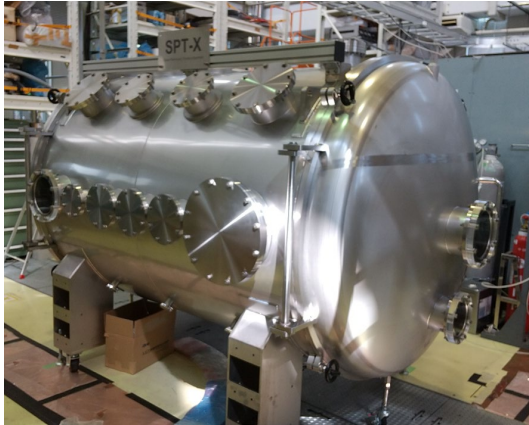


図 2: SPT-X 装置外観.

量は 70sccm としてある. 高周波電力の増加に伴い推力が増加し, 電力 5kW 程度で 60mN の推力が得られていることが分かる. またこれらの結果から見積もられる比推力は 2500 秒以上であり, 目標値を達成することが出来たといえる (発表論文 3).

推進機として高周波プラズマ源を使用する際の大きな課題の一つが, 電源と負荷のインピーダンス整合であり, 産業用プラズマ源では可変コンデンサを用いた整合器が一般的に使用されている. 一方で, 宇宙機の場合には小型化, 応答性, 自律制御等が求められる. そこで今回, 周波数可変アンプと組込み型の制御ボードを内蔵した高周波システムを試作し, 5msec 以内で高速にインピーダンス整合を実現可能な技術開発に成功した (発表論文 1).

また, 発生するプラズマ流の方向を制御し, 減速力および推力のベクトルを制御する機構として, 磁気ノズルを変形させる磁気ステアリング手法の室内原理実証実験にも成功している. これにより, これまでに実証されてきた加速・減速・デブリ除去モードでの軸方向の推力制御に加えて, 水平方向の推力, すなわち推力ベクトル制御機構も搭載可能であることが明らかになり, デブリ除去ミッションへの適用の可能性が

拡大したといえる (発表文献 4,5).

今回の研究では, 一連の実験において, 推進機のテストチャンバーサイズに起因する実験上の制約が課題となるケースが度々生じている. そこで, 直径 1.5m, 長さ 2m の比較的大型のスペースチャンバー (SPT-X 装置) の立ち上げを実施し, さらに推進機開発を進めるための基盤設備を整備し, 今後も推進性能の向上を進める予定である (図 2).

[発表論文]

1. Kazunori Takahashi, Ryoji Imai, Kengo Hanaoka, “Automatically controlled frequency-tunable rf plasma thruster: Ion beam and thrust measurements”, *Frontiers in Physics*, 9, 639010 (2021).
2. Kazunori Takahashi and Hidemasa Hanaoka, “Direct measurement of thrust induced by a magnetron sputtering source”, *Applied Physics Letters*, 118, 154101 (2021).
3. Kazunori Takahashi, “Magnetic nozzle radiofrequency plasma thruster approaching twenty percent thruster efficiency”, *Scientific Reports*, 11, 2768 (2021).
4. Ryoji Imai, Kazunori Takahashi, “Demonstrating a magnetic steering of the thrust imparted by the magnetic nozzle radiofrequency plasma thruster”, *Applied Physics Letters*, 118, 264102 (2021).
5. Ryoji Imai, Kazunori Takahashi, “Deflections of dynamic momentum flux and electron diamagnetic thrust in a magnetically steered rf plasma thruster”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 55, 135201 (2022).