

K-37

## 同軸型パルスプラズマスラストにおける推進剤形状および材料が推力特性に与える影響 Effect of propellant shape and material on propulsion characteristics in coaxial pulsed plasma thrusters

○新井涼太<sup>1</sup>, 渡部政行<sup>2</sup>  
Ryota Arai<sup>1</sup>, Masayuki Watanabe<sup>2</sup>

In recent years, the development of small satellites has been attracting attention due to the trend towards lower costs in space exploration. For this reason, the development of compact electric propulsion systems is also becoming increasingly important with the increasing number of small satellites. The pulsed plasma thruster (PPT) is one type of electric propulsion system that can be made compact. The objective of this research is to adopt a low-cost, lightweight, low-power pulsed plasma thruster (PPT) for installation on small satellites. Specifically, two key factors were focused in this research: the shape of the propellant and its materials.

### 1. 実験背景・目的

近年、人工衛星の打ち上げコストは減少傾向にある。そのため、総重量 100kg 以下に定義され、安価で短期間で開発が可能な超小型人工衛星の開発が注目されている。一般的に小型の人工衛星はそのペイロード比の関係から、電気推進機を搭載できていない。そのため、宇宙空間で遂行できるミッションの幅も狭く、また空気抵抗などの影響により、高度が低下し、デブリ化する可能性も高くなる。以上のことから、小型人工衛星においても推進機の搭載が重要であり、そのため小型電気推進機の開発が重要となっている。

本研究室では、電気推進機の中でも比較的小型で安価、低電力で稼働可能な電気推進機である「パルスプラズマスラスト(Pulsed Plasma Thruster: 略して PPT)」の研究開発を行っている[1]。PPT は、電磁加速が主な推進機構である平衡平板型と、電磁加速に電熱加速を加えた同軸型の2種に大別できる。本研究では高推力が望める同軸型 PPT を研究対象とする。

一般的な電気推進機はその推進剤に気体を用いる。PPT の最大の特徴は、推進剤にテフロンなどの固体を用いていることである。ガスリザーバーやバルブなどが不要となり、そのため小型化等につながる。テフロンに代表される従来の固体推進剤は、融点が高い。本研究では、テフロン等の交換頻度の少ない素材より、融点が低く消耗が早く、推進効率が向上するような他の固体素材を選定することで、ミッションの効率化をより追及することを研究目的とする。また、放電路に沿った推進剤の形状と、推進剤の材料変更が、どのように推力特性に寄与するのかを明らかにすることも本研究の目的の一つとした。

### 2. PPT の動作原理および推進剤の特性

図 1 に同軸型 PPT の概略図と放電路の様子を示す。PPT は電気推進機の一つであり、固体を推進剤を使用するのが特徴である。電極部の構成として、陽極(Anode)、陰極(Cathode)、イグナイタ等が挙げられる。陰極、陽極部には SUS316 を採用し、イグナイタ電極にはタングステンを採用した。その他、イグナイタ用電源、主放電用電源、主放電用キャパシタ等から構成される固体燃料を利用するため、ガスリザーバーや配管、バルブといった複雑な構造が不要で、小型かつ単純な構造は、超小型衛星への実装に適している。また、パルス放電を用いて微小推力を任意の時間間隔で発生させることで、他の電気推進機に比べ、精密な姿勢制御が可能であることも大きな利点である。

次に、本研究で用いる同軸型 PPT の動作原理を示す。まずイグナイタ電極 - 陽極間に高電圧放電を発生させ、推進剤の一部を昇華、プラズマ化させる。これは陰極 - 陽極間で高伝導性の領域を形成し、両電極間

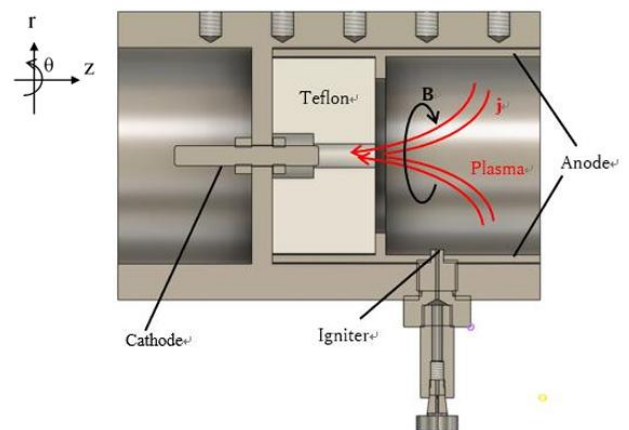


Figure 1. Thrust generation mechanism of coaxial PPT

が短絡され、キャパシタ内の電荷が放電され、主放電が形成される。この主放電により推進剤がさらに昇華し、主放電電流  $j$  とその自己誘起磁場  $B$  が作るローレンツ力  $j \times B$  により電磁力的加速を受け、同時に高エンタルピー気体の膨張による気体力学的加速も受ける。加速されたプラズマは放電領域を広げつつスラスト外へ排出され、推力となる。以上の過程を 1 ショットとして任意の時間間隔でパルス的に発生させることができる。

次に、本実験でテフロン以外に選定した 2 種類の推進剤についてその特性等を説明する。まずポリプロピレン (PP) は、一般に量産されている、安価な樹脂である。融点は  $160^{\circ}\text{C}$  程度で、テフロンの融点である  $327^{\circ}\text{C}$  より低く、テフロンは C-F 結合と呼ばれる、最も強力な一重結合により形成されている。PP は結合力の弱い共有結合によって構成されており、電離しやすくテフロンよりプラズマ化しやすいと考えられる。もう一種の素材はポリアミド 11 (PA11) とよばれる、ひまし油から得られる植物由来樹脂[2]であり、使用および生産時の環境へのリスクが小さいことが大きな特徴である。融点は  $202^{\circ}\text{C}$  程度で、テフロンより低く、C-H 結合が多いものの、一部に C=O 結合と呼ばれる二重結合が存在しており、電離のしやすさという観点では懸念が残る。

### 3. 実験方法

放電実験の手順を次に示す。本実験で使用する実験装置の概略図を図 2 に示す。真空容器内に PPT の電極部を挿入し、イグナイタ用電源と主放電用電源のケーブルを接続する。実験時、真空容器内の到達真空度は

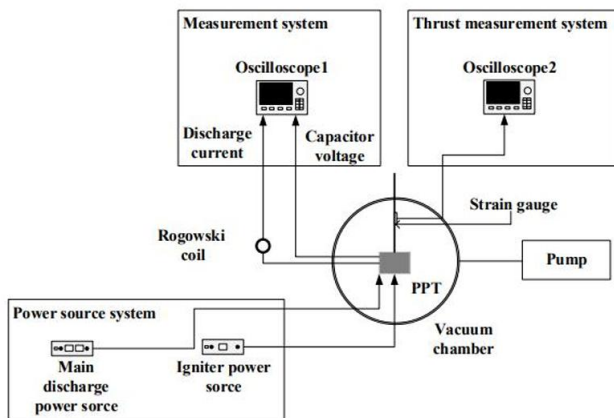


Figure 2. Schematic diagram of experimental device

$10^2 \sim 10^3$  Pa 程度である。実験では、オシロスコープを用い放電時の充電電圧と放電電流の時間変化を計測する。放電電流は自己積分型ロゴウスキーコイルを用いて計測する。これは測定電流周りに生じる磁界により誘起される電圧を積分して電流を計測するので、非接触で大電流を計測することができる。推力測定系では歪みゲージを用いた推力測定装置で推力を測定する。推進剤の消費量は、放電前後の質量を電子天秤で計測し、その差から得る。上記の放電実験を、テフロン (PTFE) のほかに、先述した 2 種の固体推進剤 (PP, PA11) を用いて行う。

### 4. シミュレーション結果

陰極-陽極間に印加された高電圧により電場 (等電位線) が形成され、その電場に対し垂直な電気力線が形成される。放電はこの電気力線に沿った、放電可能な放電路で発生する。電場シミュレーションの結果を図 3 に示す。この図より、推進剤は絶縁物であるので、放電路は円錐状の中心部の空間に発生することがわかる。テフロン以外の 2 種の固体推進剤については、融点の低さと結合の強さの観点から、PTFE に比べ昇華量は増加すると予想する。また、各推進剤の比推力、推進剤の形状による推力特性への影響も報告する予定である。

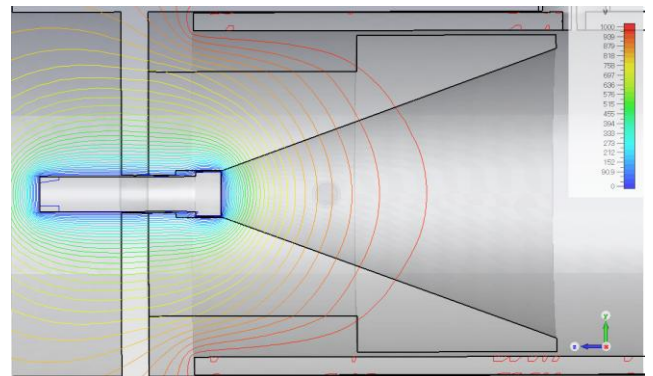


Figure 3. Simulation of the Potential of the PPT

### 5. 参考文献

- [1] 栗田恭一・荒川義弘:「電気推進ロケット入門」, 2003
- [2] 宮保淳・安田真穂. ヒマシ油由来エンジニアリングプラスチック ポリアミド 11 の特長と用途展開, 2009