

## 1 研究テーマ

電気二重層コンデンサを用いたパルスプラズマスラスタの放電特性評価

## 2 研究の目的

パルスプラズマスラスタ (Pulsed Plasma Thruster: 以下 PPT) は固体推進剤を用いることができる人工衛星搭載用の電気推進ロケットである<sup>1)</sup>。図1はPPTの主な構成部品の概要である。1対の電極間に固体推進剤を配置し、電極間はコンデンサバンクを挟んで接続されている。PPTはコンデンサバンクに充電した電気エネルギーをイグナイタ放電により電極間で解放し(主放電)、固体推進剤を昇華、プラズマ化して電磁氣的、電熱的、空気力学的に加速、排気することで推力を発生する。固体推進剤を使うことにより推進剤の貯蔵・供給系が簡素になり、またその推進剤は一般に化学的に安定なPTFEを用いるため、PPTの推進系は小型化や高信頼性化が比較的容易に達成できる。ここ最近では質量が100 kg程度の超小型衛星の打上実績が増加傾向にあり<sup>2)</sup>、質量および体積の制限が厳しい超小型衛星用の推進系としてPPTを適用する研究や実用も増えてきている<sup>3,4)</sup>。

一般に、PPTは図2に示すとおり数J程度の充電エネルギーでも作動可能だが、低エネルギーほど推進効率が低くなる傾向がある<sup>5,6)</sup>。その推進効率は主放電エネルギーを蓄えるキャパシタバンクの静電容量を増やすことでも改善する傾向がある<sup>7)</sup>。静電容量を増やすことで放電周期も長くなり、PTFEの昇華プルームに効率的に放電エネルギーを伝えることができると考えられる<sup>8)</sup>。

現在、当研究室で使用しているキャパシタバンクは耐電圧と真空中設置の観点からマイカコンデンサを使用している。図3はその5  $\mu\text{F}$ のキャパシタバンクであり、静電容量が1  $\mu\text{F}$ のマイカコンデンサを5個並列接続している。

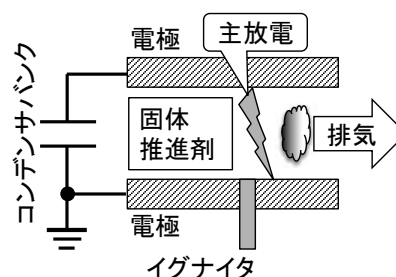


図1 パルスプラズマスラスタ構成

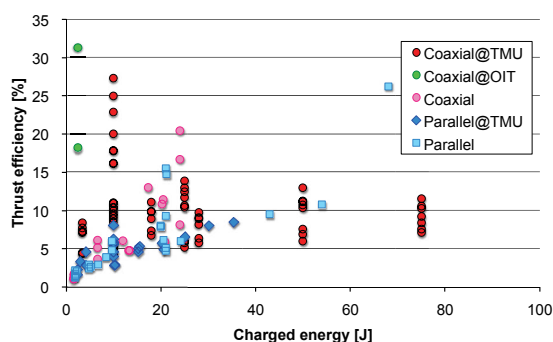


図2 PPTの投入エネルギーと推進効率の関係

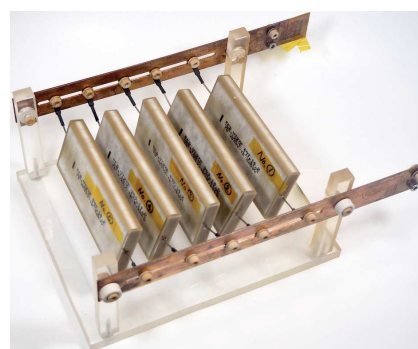


図3 5個並列マイカコンデンサバンク。静電容量5  $\mu\text{F}$ 、耐電圧3.5 kV。

静電容量を増やすためには、コンデンサの並列数を増やしたり、種類を変える方法が考えられる。アルミ電解コンデンサや EDLC は、マイカコンデンサと比べて静電容量が大きい反面、耐電圧が低い。特に EDLC は一般に数 V 程度の低い耐電圧で、数 F 程度の非常に大きい静電容量を有しており、宇宙用にも研究、実用されている<sup>9, 10)</sup>。そこで本研究では特に静電容量の大きい電気二重層コンデンサ (Electric Double Layer Condenser: EDLC) の主放電用キャパシタバンクを構築し、PPT に適用することで、推進効率の向上を目指す。EDLC コンデンサバンクと PPT を設計、製作し、主放電作動を検証した。

### 3 研究の方法

**3.1 電気二重層コンデンサバンク** 静電容量が 0.1 F、耐電圧が 5 V の EDLC を 200 個直列接続して、合成容量 500  $\mu$ F、耐電圧 1 kV の EDLC コンデンサバンクを作成した。図 4 に作成した EDLC コンデンサバンクの写真を示す。



図 4 200 個直列電気二重層コンデンサバンク。静電容量 500  $\mu$ F、耐電圧 1 kV。

**3.2 パルスプラズマスラスト** 本研究では単段放電式 PPT と二段放電式 PPT を設計、製作した。図 5 は単段放電式 PPT で、電極間距離 5 mm、電極幅 5 mm、チャンネル長さ 10 mm である。推進剤は PTFE を使用した。図 6 は二段放電式 PPT で、単段式 PPT の下流端から 5 mm 先の部分に電極間距離 5 mm、電極幅 5 mm、チャンネル長さ 20 mm の電極を 2 段目として設置した。推進剤は 1 段目上流部のみに設置し、同じく 1 段目に設置したイグナイタの点火により 1 段目の主放電を発生させ、そのプルームによって 2 段目の主放電が発生することを期待した。

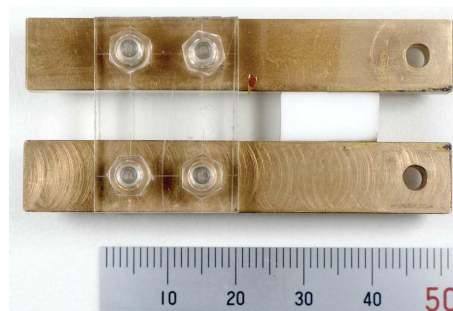


図 5 単段放電式パルスプラズマスラスト



図 6 二段放電式パルスプラズマスラスト

**3.3 実験全体概要** 実験装置概要を図 7 に示す。PPT は宇宙空間での利用を想定しているため、図 8 に示す直径 600 mm、長さ 1,000 mm の真空チャンバ内に設置して作動実験した。真空排気系は油回転ポンプとターボ分子ポンプで、実験中の真空度は  $3 \times 10^{-3}$  Pa 程度である。真空チャンバ内には PPT ヘッドの他に、静電容量が 5  $\mu$ F のマイカコンデンサ製キャパシタバンクと、放電電流測定用のログスキーコイルを設置した。後述する EDLC のキャパシタバンクと、充電用ならびにイグナイタ用電源、電圧プローブとオシロスコープは大気側に設置した。

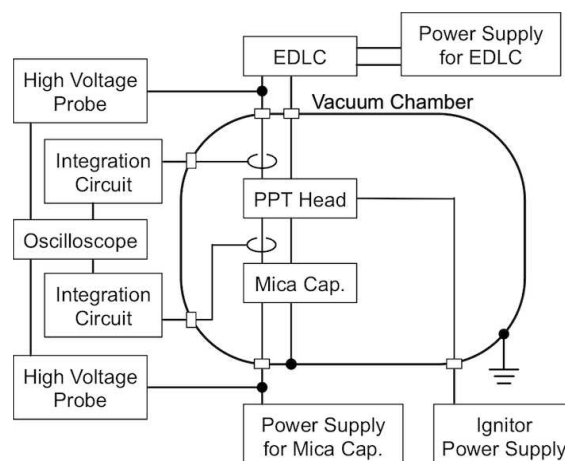


図 7 PPT 作動実験の装置構成

**3.4 実験条件** 単段式 PPT の実験条件を表 1 に示す。マイカキャパシタバンクまたは EDLC

を接続して主放電電圧を印加し、イグナイタ点火した際の主放電波形をオシロスコープで取得した。マイカコンデンサ接続時には、この PPT が従来と同様の主放電を発生させるのかと、低い電圧でも主放電が発生できるのかを確認した。

二段式 PPT の実験条件を表 2 に示す。1 段目にマイカキャパシタバンクを接続して 0 または 1,800 V 印加した。2 段目に EDLC を接続して 200 V から 896 V の 5 通りを印可した。これらの全 10 通りの組合せを実験した。



図 8 真空チャンバ. 直径 600 mm, 長さ 1,000 mm.

表 1 単段放電式 PPT 印加電圧

| Capacitor           | Discharge Voltage, V | Charge Energy, J     |
|---------------------|----------------------|----------------------|
| Mica<br>5 $\mu$ F   | 100                  | $2.5 \times 10^{-2}$ |
|                     | 200                  | $1.0 \times 10^{-2}$ |
|                     | 400                  | $4.0 \times 10^{-1}$ |
|                     | 500                  | $6.3 \times 10^{-1}$ |
|                     | 1,000                | $2.5 \times 10^0$    |
| EDLC<br>500 $\mu$ F | 1,800                | $8.1 \times 10^0$    |
|                     | 200                  | $1.0 \times 10^1$    |
|                     | 448                  | $5.0 \times 10^1$    |
|                     | 632                  | $1.0 \times 10^2$    |
|                     | 776                  | $1.5 \times 10^2$    |

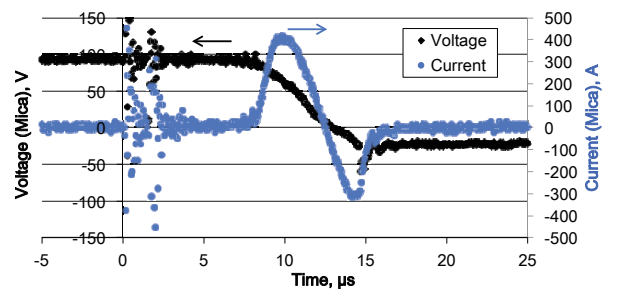
表 2 二段放電式 PPT 印加電圧

| Capacitor       | Discharge Voltage, V | Charge Energy, J  |
|-----------------|----------------------|-------------------|
| 1st Stage:      | 0                    | 0                 |
| Mica, 5 $\mu$ F | 1,800                | $8.1 \times 10^0$ |
| 2nd Stage:      | 200                  | $1.0 \times 10^1$ |
| EDLC,           | 448                  | $5.0 \times 10^1$ |
| 500 $\mu$ F     | 632                  | $1.0 \times 10^2$ |
|                 | 776                  | $1.5 \times 10^2$ |
|                 | 896                  | $2.0 \times 10^2$ |

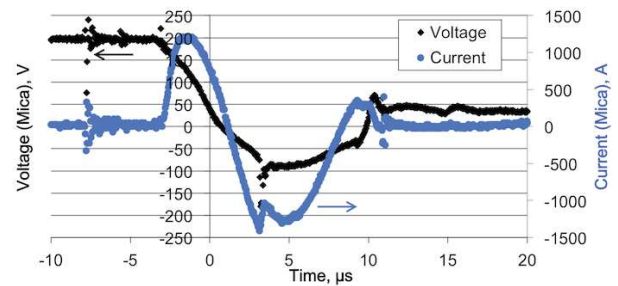
## 4 研究の成果

4.1 単段放電式 PPT 作動試験結果 単式放電段 PPT にマイカコンデンサを接続し、印加電圧 100 V とした場合の放電波形を図 9(a)に示す。図 9(a)から電圧降下と電流が流れていることが確認できたので、マイカコンデンサでは 100 V でも主放電は発生することを確認した。このときの放電電流のピーク値は 400 A であった。次に図 9(b)にマイカコンデンサに 200 V を印加した場合の放電波形を示す。200 V では一般的な平行平板 PPT の電圧波形のように電圧の極性が反転する傾向が見られた。さらに、印加電圧を 200V, 400 V, 500 V, 1,000 V, 1,800 V と上昇した場合でも、主放電の発生による電圧降下を確認し、図 9(c)に示す印加電圧 1,800 V の場合では放電電流のピーク値は 10 kA まで上昇した。

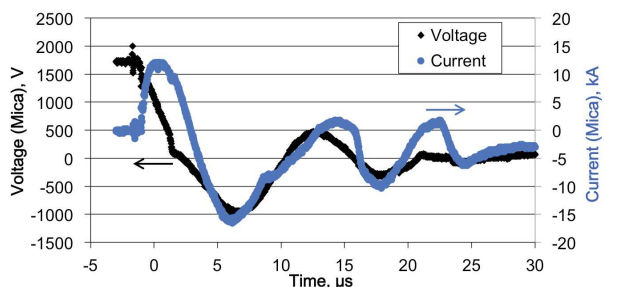
次に単式段 PPT に EDLC を接続し、印加電圧 776 V とした場合の電流、電圧波形を図 10 に示す。図 10 から電圧降下は確認できた



(a) 印加電圧 100 V



(b) 印加電圧 200 V



(c) 印加電圧 1,800 V

図 9 5  $\mu$ F マイカコンデンサを用いた単段放電式パルスプラズマスラスタの放電波形

ものの、放電電流に変化が見られなかった。印加電圧 200 V, 448 V, 632 V の場合でも同様に、放電電流が確認できなかったため、EDLC を用いた場合 PPT は主放電が発生しておらず、EDLC に充電されたエネルギーが電極間で解放されていなかったと考えられる。その原因として、EDLC が大気側に設置したことで、真空チャンバ内の PPT と距離が離れ、伝送経路における損失が大きかったことが考えられる。または、EDLC 適用によって放電時間が長くなると考えられるため、イグナイタ点火における少量の PTFE 昇華では、その放電時間を誘起、維持できなかったとも考えられる。

**4.2 二段放電式 PPT 作動試験結果** 二段放電式 PPT で 1 段目の電圧を 0 V とした場合、イグナイタ点火による 2 段目の放電は確認できなかった。次に 1 段目と 2 段目の電圧をそれぞれ 1,800 V と 200 V にした場合の放電波形を図 11(a) に示す。1 段目の放電は単段式 PPT の場合と同様だった。1 段目の放電開始と共に 2 段目の電圧降下も確認できたが、電流波形に大きな変化は見られなかった。次に 1 段目と 2 段目の電圧をそれぞれ 1,800 V と 896 V にした場合の放電波形を図 11(b) に示す。図 11(b) も図 11(a) と同様に 2 段目の電圧降下が確認できたが、電流波形は 2 段目の印加電圧 200 V の場合とほぼ同じで大きな変化が見られなかった。1 段目の電圧が 1,800 V, 2 段目の電圧が 448 V, 632 V, 776 V の場合でも、同様の傾向だった。よって、単段式 PPT と同様に、二段式 PPT でも EDLC による主放電が確認できなかった。単段式に比べて、2 段目の電極間にプルームは多く供給されていると考えられるが主放電を誘起できなかった。この原因として EDLC と PPT の接続距離が長く、伝送経路での損失が大きいことが考えられる。

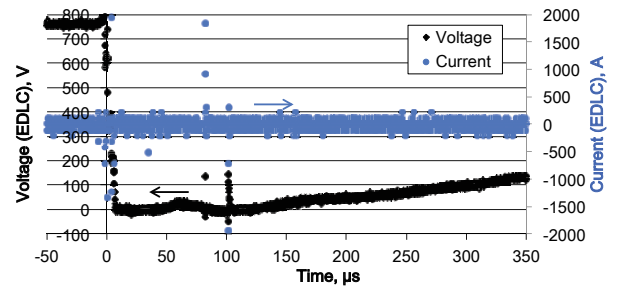
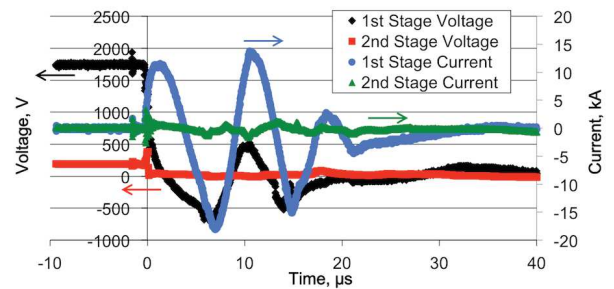
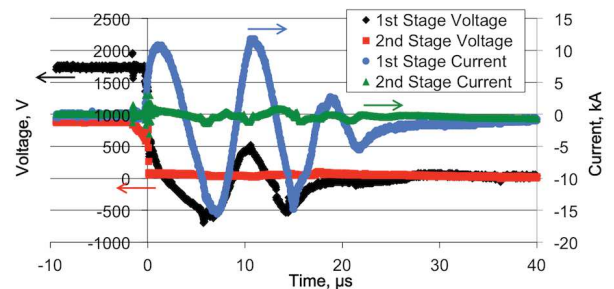


図 10 500  $\mu\text{F}$  電気二重層コンデンサを用いた単段放電式パルスプラズマスタの放電波形。印加電圧 776 V。



(a) 印加電圧 1 段目 1,800 V, 2 段目 200 V



(b) 印加電圧 1 段目 1,800 V, 2 段目 896 V

図 11 二段放電式パルスプラズマスタの放電波形。1 段目：5  $\mu\text{F}$  マイカコンデンサ、2 段目：500  $\mu\text{F}$  電気二重層コンデンサ。

## 5 今後の展望

今回の研究で EDLC を用いた PPT の作動が確認できなかったため、まずはその主放電電誘起を実現するための実験装置や実験条件の改修を行う。EDLC と PPT 間の伝送経路での損失を減らすため、実験装置を再検証して続距離を短くすることを試みる。また、PPT の主放電は電極形状によっても起きやすさが変化するため、電極形状も改めて検証する予定である。主放電が誘起する条件を明らかにした後、PPT の推力、マスショット、比推力、推進効率などの推進性能を取得し、従来の PPT と比較をするとともに、性能向上の指針を明らかにしていく。

## 6 研究成果の発信方法（予定を含む）

本研究成果は 2019 年 1 月に開催された宇宙輸送シンポジウムで発表した<sup>11)</sup>。今後は研究室ホームページで本研究の取り組みについて紹介すると共に、今後実施する新たな研究成果と一緒に国内ならびに国際的な学会での発表や学術論文誌への投稿を計画している。

## 参考文献

- 1) 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, pp.157-181.
- 2) Space Works Enterprises, Inc.: Nano/Microsatellite Market Forecast, 9th Edition, (2019).
- 3) Rikio Muraoka, Shuya Kisaki, Chen Huanjun, Masato Tanaka, Hirokazu Tahara, Takashi Wakizono: Research and Development of Osaka Institute of Technology PROITERES Nano-Satellite Series with Electric Rocket Engines, IEPC-2013-103 (2013).
- 4) 趙 孟佑, Necmi Cihan Orger, Alarcon Cordova, Rodrigo Jose, Marcos Hernandez, 増井 博一, 山内 貴志, 金 相均, Vu Bui Tran Duy, Tran Quang Vinh, Lim Wee Seng, Cheng Tee Hiang: 2U キューブサット搭載パルスプラズマスラスタによる姿勢・軌道制御~Aoba VELOX-IV の地上検証~, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, 3B13 (2017).
- 5) 青柳潤一郎, 竹ヶ原春貴, 田原弘一: 大電力パルスプラズマスラスタ研究開発に向けての考察, 2011 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2011-058 (2012).
- 6) Molina-Cabrera P., Herdrich G., Lau M., Fausolas S., Schoenherr T., Komurasaki K.: Pulsed Plasma Thrusters: a worldwide review and long yearned classification, IEPC-2011-340 (2011).
- 7) Abdolrahim Rezaeiha, Tony Schönherr: An Overview of Essential Parameters on Ablative PPT Performance, IEPC-2011-341 (2011).
- 8) R. Intini Marques, S.B. Gabriel, F. de Souza Costa: The Two-Stage Pulsed Plasma Thruster, IEPC-2009-250 (2009).
- 9) 鵜野 将年, 曾根 理嗣, 豊田 裕之, 廣瀬 和之, 田島 道夫, 齋藤 宏文: 電気二重層キャパシタの宇宙機適用研究, 宇宙航空研究開発機構特別資料, 06-006, pp.9.25-9.30 (2006).
- 10) Shunichiro Ide, Ryudo Tsukizaki, Kazutaka Nishiyama, Hitoshi Kuninaka, Evaluation of Quasi-Steady Operation of Applied Field 2D-MPD Thruster using Electric Double-Layer Capacitors, IEPC-20147-208 (2017)
- 11) 青柳 潤一郎, 宮下 倫音, 両角 翔太, 岩崎 亮太, 中山 絢斗: パルスプラズマスラスタへの電気二重層コンデンサ適用の実験検証, 2018 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2018-008 (2019).