

山梨県若手研究者奨励事業 研究成果概要書

所属機関	山梨大学 大学院総合研究部 工学域
職名・氏名	准教授・青柳 潤一郎

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¹⁾。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。

一般に、PPT は数 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^{2,3)}。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⁴⁾。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⁵⁾。

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。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。そこで本研究は比較的大きな静電容量の電気二重層コンデンサ (Electric Double Layer Capacitor: EDLC) を PPT のキャパシタバンクに適用し、推進効率の向上を目指す。EDLC の主放電用キャパシタバンクを構築し、PPT の主放電作動を検証した。

- 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) 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).
- 3) 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).
- 4) Abdolrahim Rezaeiha, Tony Schönherr: An Overview of Essential Parameters on Ablative PPT Performance, IEPC-2011-341 (2011).
- 5) R. Intini Marques, S.B. Gabriel, F. de Souza Costa: The Two-Stage Pulsed Plasma Thruster, IEPC-2009-250 (2009).

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 μ F, 耐電圧 1 kV の EDLC コンデンサバンクを作成した。図 1 に作成した EDLC コンデンサバンクの写真を示す。



図 1 200 個直列電気二重層コンデンサバンク。静電容量 500 μ F, 耐電圧 1 kV。

留意事項

- ① 3 枚程度で作成してください。
- ② 特許の出願中等の理由により、一定期間公表を見合わせる必要がある箇所がある場合であっても、所定の期日までに公表可能な範囲で作成・提出してください。当該箇所については、後日公表可能となった際に追記して再提出してください。

3.2 パルスプラズマスラスタ 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。二段放電式 PPT を図 2 に示す。1 段目は電極間距離 5 mm, 電極幅 5 mm, チャンネル長さ 10 mm である。その下流端から 5 mm 先の部分に 2 段目として電極間距離 5 mm, 電極幅 5 mm, チャンネル長さ 20 mm の電極を設置した。推進剤は PTFE を使用し、1 段目上流部のみに設置した。

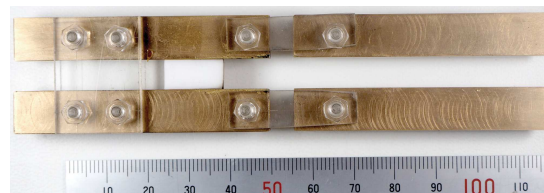


図 2 二段放電式パルスプラズマスラスタ

3.3 実験全体概要 PPT の作動実験は、宇宙空間の真空を模擬した直径 600 mm, 長さ 1,000 mm の真空チャンバ内で行った。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 3×10^{-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 μ 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ゴスキーコイルを設置した。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。

3.4 実験条件 単段放電式 PPT の作動試験では、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。二段放電式 PPT の作動試験では、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 の 2 通りを、2 段目に EDLC を接続して 200 V から 896 V の 5 通りをそれぞれ印可し、これらの全 10 通りの組合せを実験した。

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 3 に示す。図 3 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。また、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、電圧降下を確認し、その際の放電電流は印加電圧と共に増加した。

次に単式放電段 PPT に EDLC を接続し、印加電圧 776 V とした場合は、電圧降下は確認できたものの、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つたため、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、維持できなかつたとも考えられる。

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つた。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 4 に示す。図 4 から 2 段目の電圧降下が確認できるが、電流波形は大きな変動が見られなかつた。これは 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、単段放電式 PPT と同様に、二段放

留意事項

- ① 3 枚程度で作成してください。
- ② 特許の出願中等の理由により、一定期間公表を見合わせる必要がある箇所がある場合であっても、所定の期日までに公表可能な範囲で作成・提出してください。当該箇所については、後日公表可能となった際に追記して再提出してください。

電式 PPT でも EDLC による主放電が誘起していなかったと考えられる。単段放電式に比べて、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ため、EDLC と PPT の接続距離や、電極形状について更なる検証が必要であると考えられる。

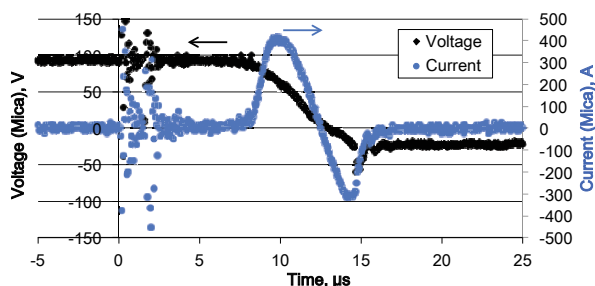


図 3 5 μF マイカコンデンサを用いた単段放電式パルスプラズマスラストの放電波形。印加電圧 100 V。

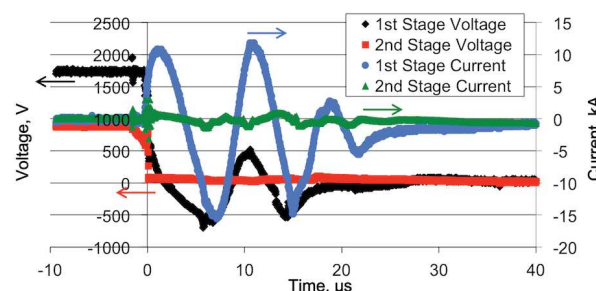


図 4 二段放電式パルスプラズマスラストの放電波形。1 段目：5 μF マイカコンデンサ，2 段目：500 μF 電気二重層コンデンサ。

5 今後の展望

今後は EDLC を使った PPT の主放電誘起を実現するために、EDLC と PPT の接続距離を短くすることで伝送経路での損失を減らしたり、より放電しやすい電極形状を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、マッシュット、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。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。

留意事項

- ① 3 枚程度で作成してください。
- ② 特許の出願中等の理由により、一定期間公表を見合わせる必要がある箇所がある場合であっても、所定の期日までに公表可能な範囲で作成・提出してください。当該箇所については、後日公表可能となった際に追記して再提出してください。