

同軸型パルス型プラズマ推進機の性能に対して液体推進剤の種類が与える影響

Influences of the liquid propellant kind on the performance of the coaxial PPT

○北富真言, 増井創一, 千葉麻里佳 (九工大・工・院), 黒木将太郎 (九工大・工・学)
橋武史 (九工大・工院), 各務聡 (宮崎大・工)

1. はじめに

近年, 小型人工衛星の推進機としてパルス型プラズマスラスト(Pulsed Plasma Thruster, PPT)が注目されている^[1]. PPTは電熱または電磁加速型の電気推進機であり, 小型・軽量かつ低消費電力作動が可能である. さらに, 10 - 1000 μNs の微小推力をパルス制御できるため, 高精度の姿勢制御, マヌーバ, フォーメーションフライトに利用できる. しかし, 従来の固体テフロンを推進剤に用いた PPT は, 主放電終了後も推進剤が昇華により過剰に流出すること, 推進剤の固体粒子が剥離することにより推進効率や比推力が低くなっていた. そのため, 水やエタノールなどの液体推進剤を用いた PPT(LP-PPT)が提案された. LP-PPTは, 推進剤の供給量を能動的に制御することにより性能向上を図る PPT であり, 従来の固体テフロン PPT と比べ高い性能を得ることが確認されている^[2]. また, 従来の固体テフロン PPT と同様に, 小型・軽量, 低電力作動が可能である.

本研究では, 過去の研究実績もある水・エタノール, エタノールの異性体であるジメチルエーテル(DME)を液体推進剤として用いた. 作動実証と性能評価から, 同軸型 LP-PPT の性能に対して液体推進剤の種類が与える影響を調べた.

2. 実験装置及び実験条件

Fig. 1 に同軸型 LP-PPT 試作機の概略図を示す. 同軸型 LP-PPT 試作機は, ノズル形状の陽極, 放電室のキャビティ, 陰極兼パルス噴射器が同軸上に配置されており, 陽極と陰極は主放電用キャパシタへ接続されている. パルス噴射器は, 電磁パルス方式であり, ソレノイドアクチュエータへの電圧印加によりロッドを動かし, 噴射口を開閉することで, 推進剤の噴射を制御する.

LP-PPT の動作は, 主放電用キャパシタを充電した状態で, パルス噴射器によってキャビティ内へ推進剤を供給することから始まる. この推進剤は真空中で急速に気化し電極間の圧力が上昇する. これにより, 自発放電が起こり, 主放電用キャパシタに蓄えられた電荷が一斉に開放されて主放電が誘起される. このとき, 推進剤はプラズマ化されるとともに, 電磁力学的・空気力学的に加速されてノズルから排出され, 推力を得る. 今回, 主放電の誘起にはイグナイタは用いず, 推進剤の気化による自発放電方式を用いた.

Table 1 に実験条件を示す. 同軸型 LP-PPT 試作機の推力測定は 0.03 Pa 以下まで減圧した真空チェンバ内で行った.

パルス噴射器の作動は, PC により制御している. 主放電用キャパシタは 4.5 μF , 充電エネルギー E は最大で 19 J, 充電電圧は最大で 2.91 kV である. なお, 充電エネルギー $E=0$ J は, 推進剤を噴射し, 放電を誘起させないことを示している. キャビティは, 直径を 3, 4, 5 mm と変化させパラメータとしてとり, 長さは 10 mm で固定し実験を行った. 1 回当たりの推進剤噴射量(マスショット) Δm は 10 - 50 μg の間で変化させパラメータとした. また, PPT のパルス状の推力(インパルスビット, 力積状の推力)は振り子式スラストターゲットを用いて測定した. 主放電電流・電圧波形はログスキーコイルと高電圧プローブを用いてオシロスコープで測定した.

3. 実験結果及び考察

主放電は, ほぼ全ての条件で 100 % 誘起された. しかし, 水を推進剤とした場合, $\Delta m=15$ μg 以下で自発放電は起きず, 主放電は誘起されなかった.

Fig. 2 に作動時の様子を示す. 推進剤を噴射したところ, 陽極出口からプルームが目視でき, 推力が発生することが確認できた. Fig. 3 に, 推進剤をエタノール, $E=19$ J, $\Delta m=20$ μg の主放電電流・電圧波形を示す. ここで, 主放電電流・電圧波形は, 推進剤の種類により変化しなかった. 主放電

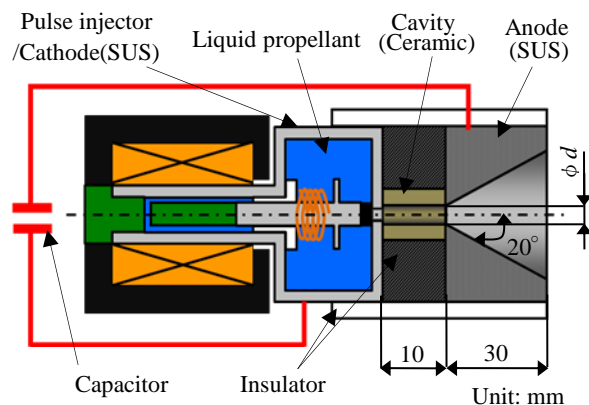


Fig. 1 同軸型 LP-PPT 試作機の概略図

Table 1 実験条件

真空チェンバ内圧力, Pa	≤ 0.03
キャパシタ充電エネルギー E , J	0 - 19
キャパシタ容量 C , μF	4.5
キャビティ直径, mm	3, 4, 5
キャビティ長, mm	10
1 回当たりの推進剤噴射量 Δm , μg	10 - 50

電圧は充電電圧の 2.91 kV から、主放電が誘起されるとともに 0 V にまで急激に低下している。主放電電流は 15 kA 程度のピーク値を有し、 μsec オーダーのパルスアーク放電を発生していることが確認できた。これは、従来型 PPT の作動時に見られたものと同様であり、自発放電を利用した同軸型 LP-PPT の作動を実証するものである。

Fig. 4 に、各推進剤におけるインパルスビット-充電エネルギーを示す。各推進剤ともに、充電エネルギーの増加に伴いインパルスビットは単調に増加した。また、各推進剤において、同充電エネルギーでのインパルスビットに大きな差は見られなかった。

次に、Fig. 5 に、インパルスビット-マスショット特性を示す。ここで、推進剤はエタノール、キャビティ直径は 3 mm である。各推進剤において同様の傾向が見られた。マスショットが数倍に増加してもインパルスビットは十数 μNs しか増加しなかった。さらに、マスショットの増加によるインパルスビットの増加量は、充電エネルギーによるインパルスビットの増加量と比べるとわずかであった。これより、マスショットを小さくし、充電エネルギーを高くすることで推進性能を向上させることが可能であると考えられる。

Fig. 6 は、キャビティ直径によるインパルスビットの違いを調べた結果である。ここで、推進剤はエタノール、 $\Delta m=20 \mu\text{g}$ 程度とした。各推進剤において同様の傾向が見られた。このグラフから、キャビティ直径を小さくすることで、インパルスビットは増加することがわかった。

以上の結果から、水、エタノール、DME において推進性能に大きな差は見られなかった。水とエタノールを液体推進剤として用いた場合、貯蔵や供給の面で問題があるが、DME を用いた場合には、適度な凝固点と蒸気圧を有するため、凍結防止用のヒータや供給用の加圧ガスが不要になる。それゆえ、DME-PPT は人工衛星の小型・軽量化という面で利点がある。

4. まとめ

- 自発放電による同軸型 LP-PPT の作動を確認した。
- インパルスビットは充電エネルギーに伴い、増加する。
- 推進剤を変えても推進性能に大きな差はなかった。
- マスショットを小さくすることで比推力を向上させることができる。
- キャビティ直径を小さくすることでインパルスビットは増加する。

参考文献

1. Burton, R. L. and Turch, P. J.: Pulsed Plasma Thruster, J. Propulsion and Power., Vol. 10, No. 5, Sep., pp.716-735, 1998.
2. 各務 聡:液体推進剤を用いたパルス型プラズマスラスタに関する研究.東京大学博士論文,2003.

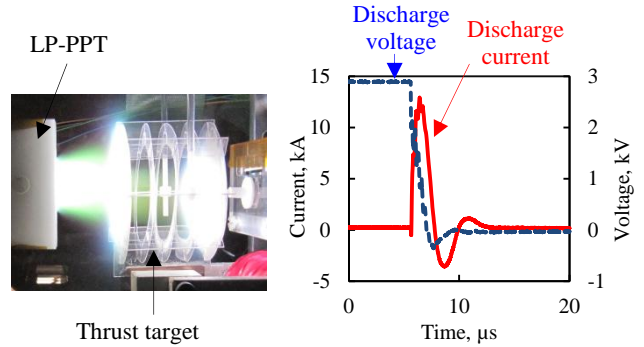


Fig. 2 作動時の様子

Fig. 3 主放電電流・電圧波形

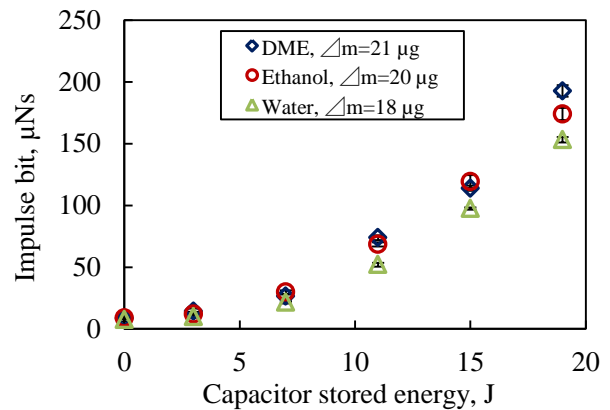


Fig. 4 各推進剤によるインパルスビット比較

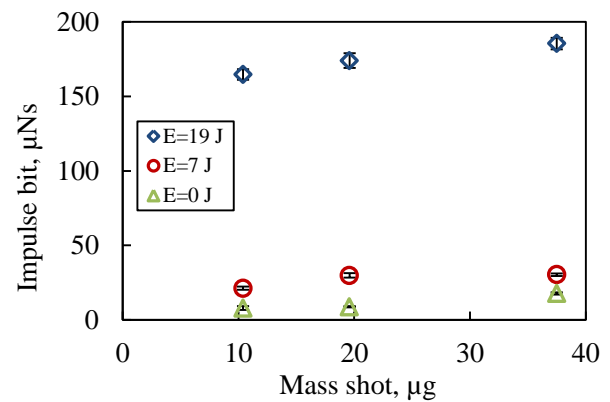


Fig. 5 インパルスビット-マスショット特性

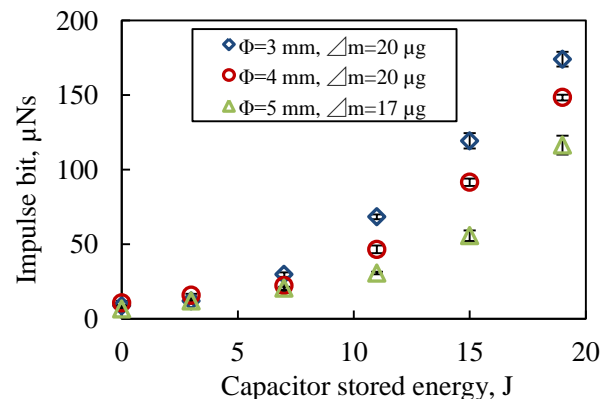


Fig. 6 キャビティ直径による影響