

エレクトロスプレー噴射パルスプラズマスラスタの エタノールを用いた基礎研究

Ignition capability of liquid pulsed plasma thruster injected by electro-spray using ethanol

○中山 絢斗(梨大・院)・青柳 潤一郎(梨大)

○Kento Nakayama・Junichiro Aoyagi (The University of Yamanashi)

Abstract (概要)

The space engineering laboratory in University of Yamanashi, we have been started to study about pulse plasma thrusters using liquid propellant. It aims to reduce loss of propellant by rate-time ablation and to apply chemical propellants such as HAN-based propellant in the future. In this research, we proposed a propellant feeding system with electro-spray and confirmed whether discharge control can be performed. We employed Ethanol as liquid propellant, and experimented some combinations of capillaries and PPT heads. We confirmed the occurrence of PPT discharge with electro-spray when droplets were applied to a 30 μm capillary. Also observed increase the impulse Bit of about 20 μNs due to discharge.

1. はじめに

近年、宇宙開発の分野で超小型の人工衛星に注目が集まっている¹⁾。背景にはこれら超小型衛星は開発コストが小さく、短いサイクルでの開発が可能で大学や民間企業が参入していることが挙げられる。それに伴い、これら超小型衛星のみの打ち上げなど、打ち上げの機会も増加している。一方、これら超小型衛星には推進機が搭載されていない物も多く、今後推進機の搭載によって、より多様なミッションへの適応や運用後のデブリ化防止対策などに期待がされている。

現在、超小型衛星への搭載が考えられている推進機の一つに電気推進機パルスプラズマスラスタ(以下PPT)が挙げられる。PPTは電気推進機で電気推進ゆえの高い比推力、そして固体推進剤を用いるためタンクやバルブの不要な簡易、小型な構造が特徴である。一方、常に推進剤が露出しているため、レートタイムアブレーションと呼ばれる推力に寄与しない推進剤の消費が発生、推進効率が低下する事が課題とされている。

山梨大学宇宙工学研究室ではこれまでPPT推進性能向上を目指して研究を行ってきた。本研究では新たに液体推進剤を使用したPPTの開発を目指し、エレクトロスプレー(Electrospray)現象での液体推進剤供給システムを提案、エタノールを用いてPPTの作動が可能か検証を行った。

2. 液体推進剤PPT/エレクトロスプレー概要

PPTに液体推進剤を適用するメリットとして、以下の事項が挙げられる。

- ・推進剤の供給を任意量で制御できる点
- ・多様な推進剤が使用可能になる事に点

他研究機関の先行研究では推進剤を機械式インジェクタで噴射供給する方法、多孔質素材に浸透させ固体推進剤の用に扱う方法などが用いられているが、本研究ではエレクトロスプレーを用い、電極間に推進剤を噴射、真空度を低下させ任意で主放電を誘起させることを目指した。

エレクトロスプレーとは溶液を満たしたキャピラリーと対向する電極間に高電圧を印加すると液滴がスプレーされる現象である。概要図をFig. 1に示す。キャピラリーに電圧をかけると、曲率の大きい先端に電場が集中、液滴の過剰電荷のクーロン反発と表面張力によりテイラーコーンと呼ばれる円錐が形成される。そして、クーロン力が表面張力と釣り合うRayleigh極限より大きくなった際、液滴がスプレーされ酸化、対向電極で還元される²⁾。nLオーダーの微小流量を供給可能なことから、質量分析やエレクトロスプレースラスタに用いられている。

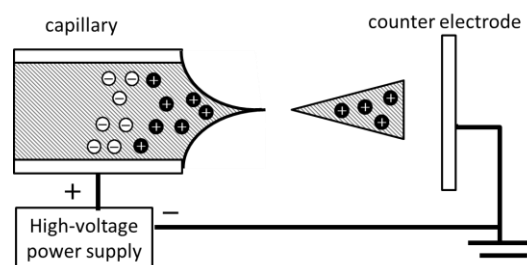


Fig. 1 Overview of Electro-spray

3. 実験装置

3.1 実験装置概要 実験装置の概要を Fig. 2 に示す. 実験装置は既存の点火装置を除いた PPT 実験装置, エレクトロスプレー装置, エレクトロスプレー用の PPT ヘッドで構成され, PPT ヘッドのカソードとエレクトロスプレーの対向電極を共有する回路となっている. キャパシタにはフィルムコンデンサを並列に接続したキャパシタバンクを使用 (合成容量:4.972 [μF]). インパルスビットは振り子式のスラストターゲットを用いて測定を行った.

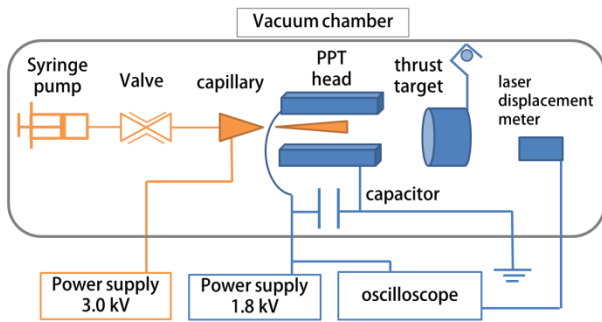


Fig. 2 Constitution of Experimental system

3.1 エレクトロスプレー装置 制作したエレクトロスプレー装置について Fig. 3 に示す. 本研究では自作したシリンジポンプを用いキャピラリーまでの送液を行った. 各部の接続には 1/16 インチのチューブと配管部品を用い, 真空引き中の溶液蒸発防止のためにキャピラリーとシリンジ間にピンチバルブを設けている. 流量制御は行わず, 常にシリンジに加圧をしている状態で実験を行った. 3 種の径のキャピラリーで実験を行い, φ10, 30 μm はエレクトロスプレー用のものφ100 μm は金属の細管を用いた. 詳細を Table 1 に示す.

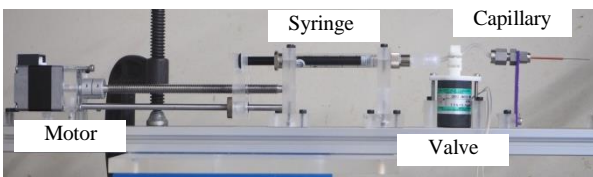


Fig. 3 Electro spray system

Table 1 Specification of capillary

Inner diameter	Model
φ10μm	Pico Tip Emitter FS360-20-10-CE
φ30μm	Pico Tip Emitter FS360-50-30-CE
φ100μm	SUS 304T Pipe

3.2 PPT ヘッド 本研究ではエレクトロスプレーによる推進剤供給のため, 下記のスラストヘッドを製作した. 電極には真鍮を用いている. 各ヘッドについて, 極性の反転が可能なのは反転させた場合の実験も行った.

➤ 同軸円筒型

パイプ状の二つの電極の中心から同軸方向にキャピラリーを挿入するスラストヘッド. 詳細を Fig. 4 に示す.

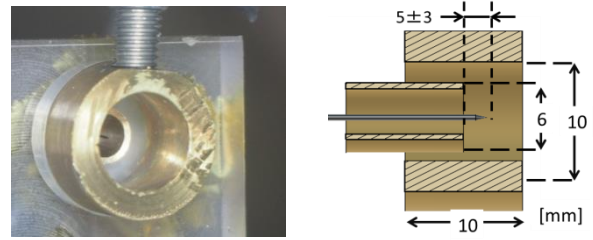


Fig. 4 Coaxial thruster head

➤ 平行平板型

固体推進剤を除いた一般的な平行平板型スラストヘッド. 詳細を Fig. 5 に示す. キャピラリーが推力方向と平行の場合, 推力方向と垂直の場合の 2 つ配置, またキャピラリー径により電極間距離を調整して実験を行った.

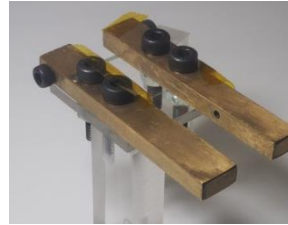
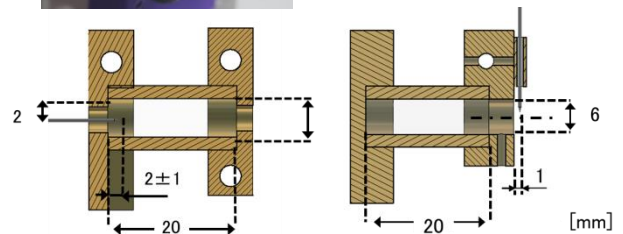


Fig. 5 Parallel plate thruster head

➤ 電熱加速同軸型

内径φ6 mm のガラス管をキャビティに用いた電熱加速型の同軸スラストヘッド. 推力方向と平行でキャビティ内部にエレクトロスプレーを噴射する配置, ノズル近傍から推力方向と垂直にエレクトロスプレーを噴射する配置の 2 種で実験を行った. 詳細を Fig. 6 に示す. 平行に配置したヘッドについて, 今回製作したヘッドではキャピラリー挿入用の穴の密閉ができなかったため, ノズルと同径の穴が両側に開いている.



(a) Electro spray horizontal (b) Electro spray nozzle side

Fig. 6 Electrothermal thruster head

4. 試験

4.1 主放電試験 製作した装置を組み込み、エレクトロスプレーにより主放電が誘起されるか試験を行った。実験条件についての詳細を **Table 2** に示す。本実験では以下の理由から液体推進剤に無水エタノールを用いた。

- ▶ 先行研究の液体 PPT で使用実績があり、エレクトロスプレー質量分析においても溶媒として使用されている点
- ▶ 揮発性であり、保温装置など凍結防止対策が不要な点
- ▶ HAN などの液体推進剤と比較し腐食性が低く、既存のチャンバー設備で使用が可能な点。

Table 2 Experiment condition

エレクトロスプレー印加電圧	3.0 [kV]
キャパシタ充電電圧	1.8 [kV]
投入エネルギー	8.0 [J]
推進剤	無水エタノール
真空度	10 ⁻² [Pa] オーダ

実験装置の操作は以下の手順で行った。

- 1) PPT 電源装置によりキャパシタに充電
 - 2) エレクトロスプレー電源によりキャピラリーに電圧印加
 - 3) バルブを開放、シリンジポンプにより送液
 - 4) エレクトロスプレー又は主放電の発生を確認後、エレクトロスプレー電源を操作し主放電の任意制御が可能か検証
- キャピラリーごとの試験結果を以下に示す。また、実験条件について赤い電極をアノードとする。

・ φ100 μm キャピラリー

実験結果を **Table 3** に示す。100 μm キャピラリーでは流量が大きすぎるためか、飛沫状に液滴が飛んでしまう、液滴とカソードが導通してスプレーが発生しないなどエレクトロスプレーの発生が不安定になる場合が確認された。

Table 3 φ100 μm capillary discharge experiment

Configuration	Electro spray.	Discharge
	Occurred	Uncontrollable
	-	-
	Unstable	Uncontrollable
	Unstable	Uncontrollable
	Occurred	Uncontrollable

RED electrode = Anode
Parallel plate electrode distance = 10 [mm]

・ φ30 μm キャピラリー

実験を行った結果を **Table 4** に示す。電熱同軸型（挿入側アノード）を除き、エレクトロスプレーの発生状態に関わらず主放電は発生しなかった。連続でエレクトロスプレーを発生させ続けても放電が起きなかったことから、瞬間的な推進剤の供給量、または噴霧が十分でなく電極間の真空度を十分に低下できていないことが原因と考えられる。

そこで、瞬間流量を増やすことができないかと考え、**Fig. 7** に示すようにキャピラリーの先端に液滴を付与した状態で電圧を印加しエレクトロスプレーを発生させ実験を行った。この結果、電圧印加時に流量の多いエレクトロスプレーを発生させる事ができ、同時に主放電の発生を確認することができた。該当する条件を表の中下線で示す。尚、付与した液滴は目算で 3.3 [mg] 以上と考えられ放電により加速される推進材料に対し過剰である。本実験ではこの条件で実験を行ったが、PPT に適用するには流量制御を行い適切な流量を供給する必要がある。

Table 4 φ30 μm capillary discharge experiment

Configuration	Electrospray	Discharge
	Unstable	No discharge
	Occurred	<u>Controllable</u> <u>(Add droplet)</u>
	Uncontrollable	No discharge
	Occurred	<u>Controllable</u> <u>(Add droplet)</u>
	Occurred	<u>Controllable</u> <u>(Add droplet)</u>
	Unstable	Uncontrollable
	Occurred	<u>Controllable</u> <u>(Add droplet)</u> ⇒ Uncontrollable (Charring)
	Unstable	<u>Controllable</u> <u>(Add droplet)</u>

Red Electrode = Anode
Parallel plate electrode distance = 10 [mm]



Fig. 7 Droplet on capillary

・ $\phi 10 \mu\text{m}$ キャピラリー

実験結果について Table 5 に示す. 平行平板の一部でセッティングの都合上エレクトロスプレーの確認が行えなかったため, 未確認とする. 主放電について下線部を引いた条件について, エレクトロスプレー電圧 ON/OFF する際やエレクトロスプレー. を発生させたままの状態でごく稀に発生する事を確認した. また, 平行平板型では 電極間距離を 5 [mm] にしなければ主放電が発生しなかったが電熱同軸型 (挿入電極カソード) では 20 [mm] の電極間距離で主放電が発生した. これはキャビティにより真空度の低下が発生しやすくなっているからと考えられる.

Table 5 $\phi 10 \mu\text{m}$ capillary discharge experiment

Configuration	Electrospray	Discharge
	Occurred	No discharge
	No Occurred	No discharge
	N/A	No discharge
	N/A	No discharge
	Occurred	<u>Irregular</u>
	-	-
	Occurred	<u>Irregular</u>
	-	-

Red electrode = Anode
Parallel plate electrode distance = 5 [mm]

4.2 放電写真・電圧波形 放電の制御が行えた, $30 \mu\text{m}$ キャピラリーでの電磁加速型の放電写真・電圧波形を Fig. 8 に, 電熱加速型の放電写真・電圧波形を Fig. 9 に示す. それぞれ電極間での放電が確認でき, キャパシタも完全に放電されていることが確認できた. また, 固体推進剤 PPT の放電電圧波形と同様の放電波形を得られた事から, 正常に放電が発生していると考えられる.

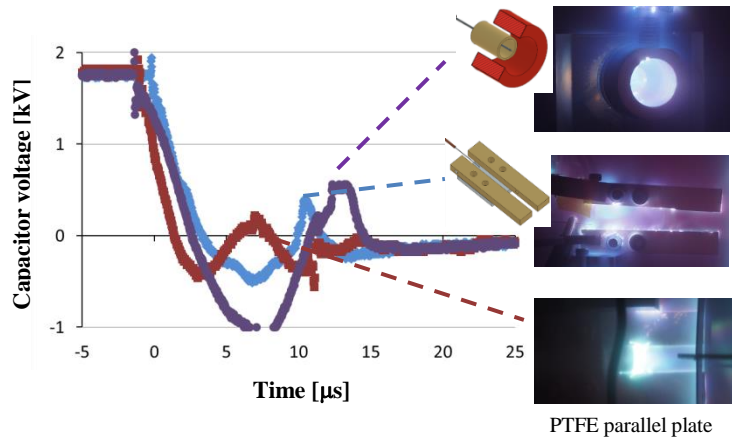


Fig. 8 Electromagnetic PPT Time vs Capacitor voltage

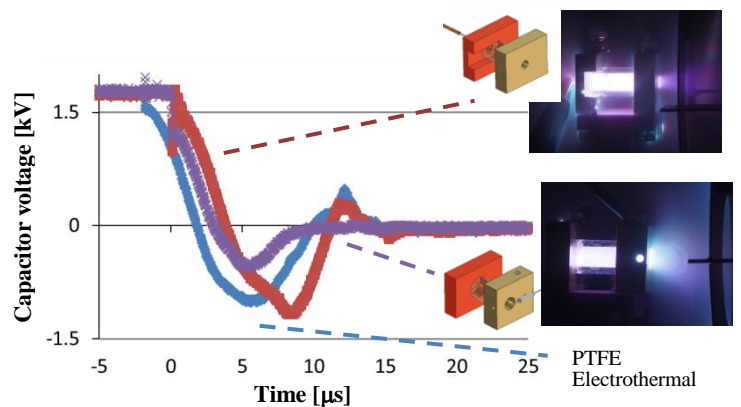


Fig. 9 Electrothermal PPT Time vs Capacitor voltage

4.3 インパルスビット測定 主放電試験において任意で主放電を発生させる事ができた条件について, インパルスビットの測定を行った. 主放電時の液滴の付与はエレクトロスプレーの電源を 5~10 秒ほど停止することで行った.

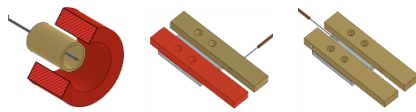
まず, 電磁加速型 PPT ヘッド測定結果を Table 6, Fig. 10 に示す. 同軸型, 平行平板(エレクトロスプレー垂直)ではエレクトロスプレーのみの噴射で約 $20 \mu\text{Ns}$ 程度, 主放電が発生することにより $40 \mu\text{Ns}$ 後半のインパルスビットの測定ができた. このことから主放電により推進剤の加速が行われていることが推測できる. 主放電による約 $20 \mu\text{Ns}$ 程度の推力増分について, 他研究機関の先行研究³⁾と比較しやや少ない増分であり, エレクトロスプレーによる供給の影響によるものか今後検証する必要があると考えられる.

次にショット毎のインパルスビットを比較した際, 最大 $25 \mu\text{Ns}$ 程度のバラツキがあることが確認された. 先の先行研究において, 主放電のエネルギーにより加速される推

進剤は μg オーダであり、それ以上の推進剤供給を行って放電に寄与する推力増分が無いことが確認されている。そのため、このバラツキはエレクトロスプレーによるものと考えられ、キャピラリー先端に付与する液滴量の差が影響していると考えられる。今後、厳密な流量制御を行い主放電に必要な最低限の推進剤を安定して供給し、検証を重ねる必要がある。

最後に、平衡平板（エレクトロスプレー平行）については小さな推力しか測定ができなかった。チャンネル長が長く最適化が不適切な可能性があるため、今後改良し再測定を行いたい。

Table 6 Average Impulse Bit (Electromagnetic)



Electromagnetic (Average) [μNs]	Coaxial	Electropray perpendicular	Electropray horizontal
Discharge	49.0	46.5	22.7
Electropray. only	22.7	21.0	-

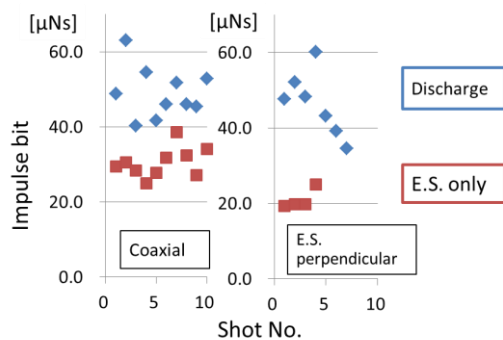


Fig. 10 Impulse Bit / shot (Electromagnetic)

次に電熱加速型についての測定結果を **Table 7**, **Fig. 11** に示す。まず、電熱型（エレクトロスプレー平行）について、キャピラリー挿入口からのブルーム漏れのためか放電の推力増分が殆ど確認できなかった。

電熱加速型（エレクトロスプレーノズル近傍）について、エレクトロスプレーのみで $125 \mu\text{Ns}$ 程度、主放電が発生する事により $145 \mu\text{Ns}$ 程度のインパルスビットを測定した。このことから電熱型においても、主放電により推進剤の加速が行われていることが推測できる。また、主放電による約 $20 \mu\text{Ns}$ 程度の推力増分について、他研究機関の先行研究⁴⁾と比較し同程度の増分であり、キャビティ内に十分に推進剤が供給されていると考えられる。一方、エレクトロスプレーのみのインパルスビットが他のヘッドと比較し非常に大きい。電磁加速型と同様に推進剤供給量の制御を行い、原因の分析をする必要があると考えられる。

Table 7 Average Impulse Bit (Electrothermal)



Electrothermal (Average) [μNs]	Electrospray horizontal	Electrospray nozzle side
Discharge	37.4	143.7
Electrospray only	33.4	126.4

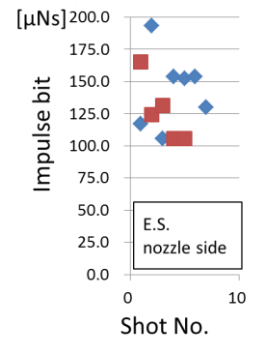


Fig. 11 Impulse Bit / shot (Electrothermal)

5. 結論

本研究ではPPT実験装置にエレクトロスプレー装置を組み込み、エレクトロスプレー噴射によるPPT作動の可能性について検証を行った。実験により得られた結果を以下に示す。

- エレクトロスプレー
 - ▶ スラスタヘッドの電極間でエレクトロスプレーの発生を確認
 - ▶ $\phi 100 \mu\text{m}$ キャピラリーを中心とした一部条件では、流量過多により不安定に
- 主放電誘起条件
 - ▶ $\phi 30 \mu\text{m}$ キャピラリーの先端に液滴を付与し、瞬間流量を増やすことにより任意による主放電発生を確認
 - ▶ 電熱加速型のように閉鎖したスラスタヘッドを用いることで、短絡が発生しやすくなる事を確認
- インパルスビット測定
 - ▶ 電磁加速型、電熱加速型共に主放電により $20 \mu\text{Ns}$ 程度のインパルスビット増加を確認
 - ▶ エレクトロスプレーによるものと思われる推力のバラツキを確認

今後の課題として、以下の事項が挙げられる。

- ▶ シリンジポンプの流量制御を行い、エレクトロスプレーの安定発生、マスショットの制御
- ▶ 電圧印可時間、エレクトロスプレー発生のパルス化
- ▶ 電極形状の最適化

参考文献

- 1) Space Works Enterprises, Inc(SEI), “Nano/Microsatellite Market Forecast , 8th Edition,” 2018.
- 2) 平岡 賢三, “基礎から学ぶマススペクトロメトリー／質量分析の源流 第八回 エレクトロスプレーの基礎,” 一般社団法人 日本質量分析学会, 2010.
- 3) 小泉 宏之, 各務 聡, 小柴 公也, 荒川 義博, “パルス型プラズマスラスタにおける液体推進剤噴射に関する実験的研究,” プラズマ応用科学, Vol.9, pp.23-30,2001., 2001.
- 4) 北富 真言, 増井 創一, 千葉 麻里佳, 黒木 将太郎, 橘 武史, 各務 聡, “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,” STEP-2012-069.