

# 同軸型パルスプラズマスラスタのクラスタ化による性能への影響評価

## Evaluation of Effects on Performance by Clustering of Coaxial Pulsed Plasma Thrusters

○長尾 真・工藤 怜・大澤 茜・竹ヶ原 春貴（首都大学東京）

○Makoto Nagao・Rei Kudo・Akane Osawa・Haruki Takegahara（Tokyo Metropolitan University）

### Abstract（概要）

Pulsed Plasma Thruster (PPT) is an electric propulsion using solid propellant, and it is lightweight, compact and has low power consumption, so it is suitable for micro-sat installation. In order to solve the small total impulse, the coaxial type PPT needs to be designed to accumulate many propellants such as propellant supply mechanism and clustering. In this study, we have tried to improve the total impulse by clustering 5J class coaxial type PPT already developed. We evaluate the impact on cluster performance of PPT by clustering and report the results.

### 記号の説明

$E_{in}$ :	スラスタヘッドに投入されるエネルギー
$E_0$ :	キャパシタに投入されるエネルギー
$R_{tran}$ :	伝送経路上の電気抵抗
$R_c$ :	キャパシタ等価直列抵抗
$J$ :	主放電電流
$D_A$ :	大気抵抗
$\rho$ :	空気密度
$V$ :	軌道速度
$C_D$ :	大気抵抗係数
$A$ :	衛星の断面積
$T$ :	大気補償できる時間
$I_{tot}$ :	PPT のトータルインパルス
$I_{bit}$ :	PPT のインパルスビット
$t$ :	PPT の作動間隔

### 1. 研究背景及び目的

近年、100 kg 以下の超小型衛星の需要が高まっているが、超小型衛星には形状、重量、消費電力に制限が設けられる。超小型衛星は基本的に推進系を搭載できないため、低軌道における衛星運用には大気抵抗などの影響で軌道が低下し、短時間で運用を終えてしまう。そこで、本研究室では大気抵抗補償向けに超小型衛星に適した電気推進機であるパルスプラズマスラスタ (PPT) を研究開発している。

PPT は電磁加速力を主推力とする平行平板型と電熱加速力を主推力とする同軸型に大別される。本研究では同軸型 PPT を扱う。図 1 に同軸型 PPT の概略図を示す。本研究で扱う同軸型 PPT は円筒形状の推進剤をアノード・カソードで挟んでおり、両電極をチャージされたキャパシタで繋いだ

構造となっている。

作動原理について説明する。

- 1) イグナイタ放電により少量の推進剤が昇華、プラズマ化
- 2) 推進剤キャビティにプラズマが充満し両極が短絡、主放電を形成
- 3) 主放電によるジュール加熱や輻射によって推進剤が昇華、プラズマ化し電磁加速及び電熱加速されて推力を得る

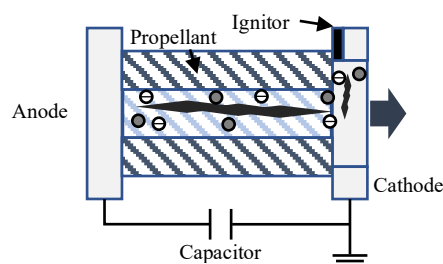


図 1 同軸型 PPT の概略図

本研究室で 2015 年度に小型衛星搭載用に 5 J 級同軸型 PPT である TMU-PPT-5C (以降 5C) を開発した。これを応用し、高度 400 km で 50 cm 級衛星の大気抵抗補償用推進機として 5C を 13 個クラスタ化した TMU-PPT-Cluster-01 を開発した。クラスタ化することでトータルインパルスを増大させることが期待できる。さらに、軽量化を施した TMU-PPT-Cluster-02 (以降 Cluster-02) を開発した<sup>2)</sup>。

本研究の目的は PPT のクラスタ化による性能への影響を評価することとした。そのため、5C と Cluster-02 の単体スラスタ長時間作動実験を行ない、評価した。

## 2. TMU-PPT-5C 長時間作動実験

**2.1 TMU-PPT-5C** 図2に5Cの写真を示す。電極・伝送経路は全て銅を使用している。5Cは2015年度に開発されたが、諸性能は10万ショットまでしか取得しておらず、EOL (End of Life) 性能が未取得であった<sup>3)</sup>。

本実験では過去の実験データと比較して性能を評価した。表1に実験条件を示す。実験条件は過去の実験と同じである。

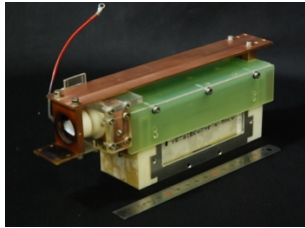


図2 TMU-PPT-5C

表1 実験条件

推進剤キャビティ長さ	30 mm
初期推進剤キャビティ径	3 mm
ノズル径	22 mm
キャパシタ静電容量	2.87 $\mu$ F
キャパシタ投入電圧	1.86 kV
キャパシタ投入エネルギー	5 J
イグナイタエネルギー	49 mJ
作動周波数	1 Hz
真空度	$1.0 \times 10^{-5}$ Torr

**2.2 長時間作動実験結果** 図3に作動写真を示す。25万ショットで推進剤に穴が空き、プルーム漏れを確認したため実験を終了した。また、20万ショットの写真から推進剤内部にチャーリング（炭素堆積）があることが確認できた。表2に5CのBOL (Beginning of Life) およびEOL性能を示す。ただし、EOLのマスショット、比推力、推進効率はや予測値である。図4にインパルスビットの履歴を示す。過去の実験と一致しており、再現性が取れている。24万ショットをEOLとすると、トータルインパルスは36.5Nsとなった。

図5に各ショットにおける主放電電流波形を示す。6万から15万ショットでイグナイタ作動から主放電が起こるまでの間隔が長くなっていることが確認できた。これは放電室体積が大きくなり、イグナイタ作動によって発生したプラズマの密度が低下して両極が短絡しづらくなったと考えられる。その後遅れが見られなくなったのは、推進剤内部のチャーリングによって両極間が短絡しやすくなったと考えられる。

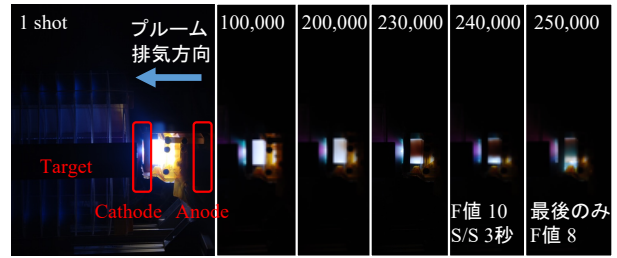


図3 各ショットのスラストヘッド写真

表2 5CのBOLおよびEOL性能

	Beginning of Life	End of Life
インパルスビット, $\mu$ Ns	310	81
マスショット, $\mu$ g	121	45
比推力, s	261	184
推進効率, %	7.94	1.46
推力電力比, mN/kW	62	16

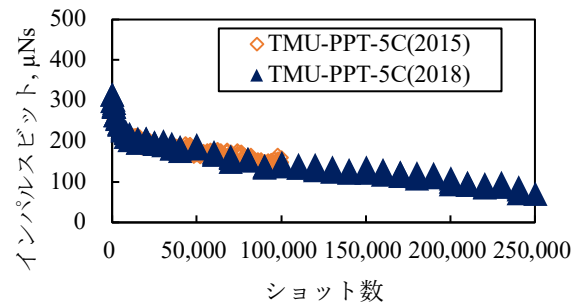


図4 インパルスビットの履歴

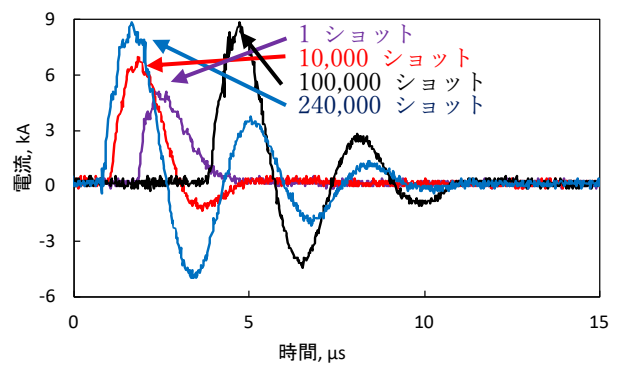


図5 各ショットにおける主放電電流波形

## 3. TMU-PPT-Cluster-02 長時間作動実験

**3.1 TMU-PPT-Cluster-02** 図6にCluster-02の写真を示す。Cluster-02はトータルインパルス増大を目的として5Cを13個クラスタ化したPPTである。電極は耐スパッタ性向上のためにSUS304、伝送経路は軽量化のためにA1050を使用している。アノードはSUS304の1枚板、カソード側はSUS304のノズルをスラストごとに、全てのノズルを同電位にするためのA1050の1枚板を使用している。

本実験条件はノズル径を 20 mm に変更してあるが、他は全て 5C と同じである。実験は Cluster-02 の中心に位置するスラスタヘッドを使用して 2 回 (1st と 2nd) 行なった。

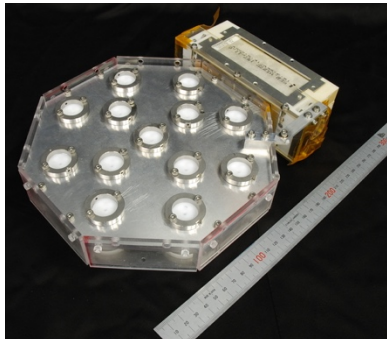
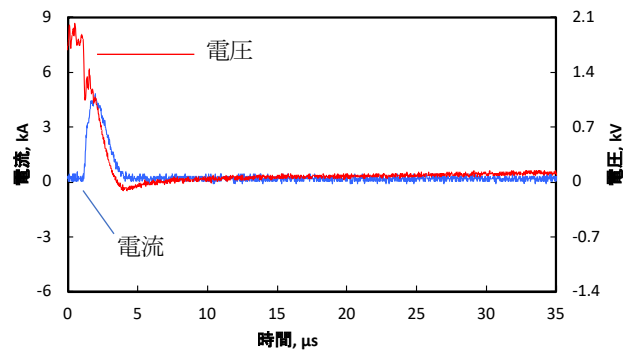
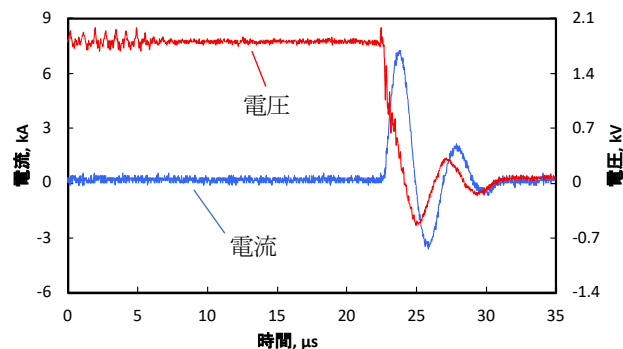


図 6 TMU-PPT-Cluster-02

**3.2 長時間作動実験結果** 1st は 67,820, 2nd は 50,000 ショットでミスショットが連発し、他スラスタの作動も確認したため実験を中断した。図 7 に 1st の 1 ショットと 60,000 ショットの主放電電流電圧波形を示す。ミスショット付近ではイグナイタ作動から主放電が起こるまでの間隔が長くなっていることを確認した。この現象は 5C でも確認できたが、5C はミスショットが一切なかった。



(a) 1 ショット時



(b) 60,000 ショット時

図 7 1st の主放電電流電圧波形

**3.3 ミスショットの考察** 5C と Cluster-02 の大きな違いは電極・伝送経路の形状・材質である。電極・伝送経路の電気抵抗は 5C が 1.7 mΩ, Cluster-02 が 8.3 mΩ と計算され、Cluster-02 の抵抗が大きいことがわかる。また、部品が多くなっているため、接触抵抗の増加も考えられる。そこで、伝送経路におけるエネルギーの損失が発生していると考えた。スラスタヘッドに投入されるエネルギーは以下の式で表される。

$$E_{in} = E_0 - \int (R_{tran} + R_c) J^2 dt \quad (1)$$

Cluster-02 と 5C は同じキャパシタを使用しているため、本計算ではキャパシタによる損失を無視した。図 8 に上式から求めたスラスタヘッド投入エネルギーのショット履歴を示す。これから Cluster-02 では電極・伝送経路におけるジュール損失が大きく、スラスタヘッドに投入されるエネルギーが減少したことがミスショットの原因と考えられる。

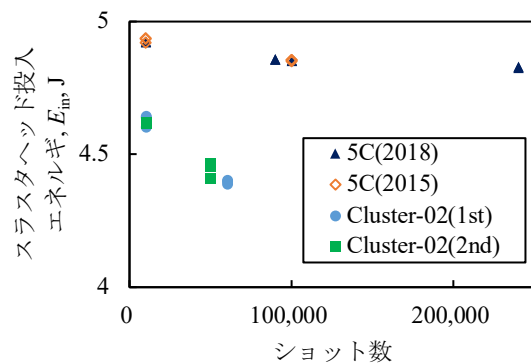


図 8 スラスタヘッド投入エネルギーのショット履歴

他スラスタの誤作動の原因について考える。カソードノズルは 5 mm と短く、イグナイタはその中間に設置されている。そのため、イグナイタ放電によって発生したプラズマがノズル外に出て他スラスタの放電室に移動し、そこで主放電が誘起されたと考えた。対策として、カソードノズル長さを長くするために 5 mm 長さのカソードノズルを重ねて装着した。

カソードノズルを装着した上で、キャパシタ投入エネルギーを 10 J (キャパシタ投入電圧 2.64 kV) に上げて、1st のスラスタで実験を再開した。

**3.4 実験再開後の結果** 5 J から合わせて 24 万ショット作動し、5C の EOL を 24 万ショットとしたため本実験を終了した。図 9 に 5C や Cluster-02 (1st, 2nd) のインパルスビット履歴を示す。5 J で作動させていたデータでは 5C と同等のインパルスビット履歴を示した。5 J ではトータルインパルス 12 Ns, 10 J で 39 Ns を達成した。単体で 51 Ns であり、推進剤を 13 個搭載しているため推進剤全て同じ条件で動いた場合、Cluster-02 の予測トータルインパルスは 663 Ns と計算される。

図 10 にショットごとに比較した主放電電流波形を示す。投入エネルギーを上げることで主放電の遅れがなくなることが確認できた。

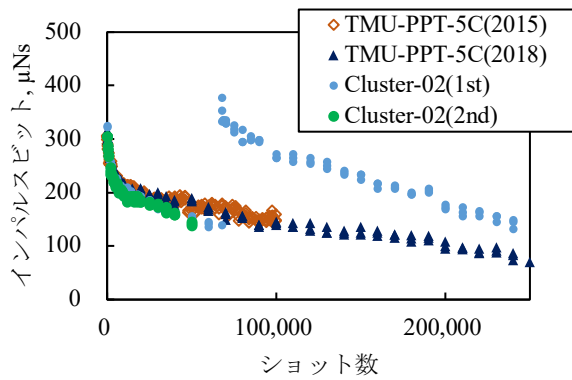


図9 5C と Cluster-02 のインパルスビット履歴

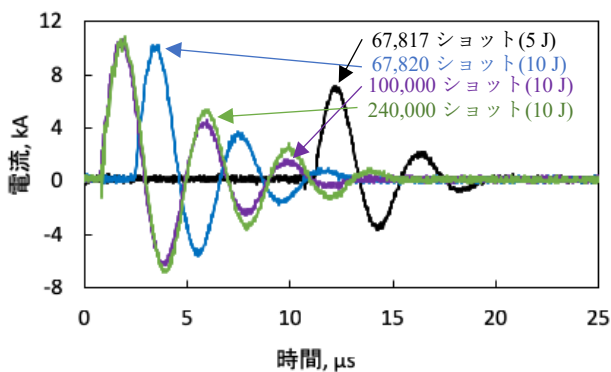


図10 ショットごとの主放電電流波形

#### 4. Cluster-02 大気抵抗補償シミュレーション

Cluster-02 の開発目的である大気抵抗補償ミッションについて検討してみる. PPT の1ショットあたりのインパルスビットと PPT の作動間隔に衛星が受ける大気抵抗の力積が釣り合うことで, 大気抵抗の補償が可能になるとした. 図 11 に大気抵抗補償を模式化したグラフを示す.

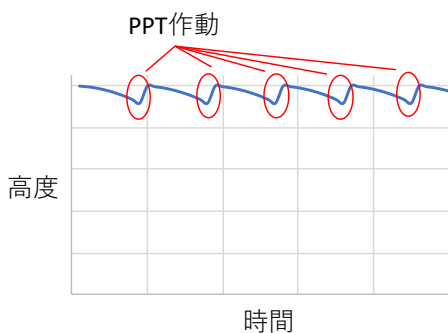


図11 PPT 作動による衛星高度の補償

衛星は軌道高度が低いほど大気抵抗の影響を大きく受け, 高度が下がってしまう. 衛星が受ける大気抵抗は以下の式で表される.

$$D_A = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A \quad (2)$$

衛星断面積 0.19 m<sup>2</sup>, 軌道高度 400 km, 空気密度 2.80×10<sup>-12</sup> g/m<sup>3</sup>, 大気抵抗係数 2.5 の条件で計算すると, 大気抵抗は 39 μN となる. PPT のトータルインパルスが補償期間に衛星が受ける大気抵抗の力積と一致するという式は以下のように表される.

$$D_A \cdot T = I_{tot} \quad (3)$$

上式から Cluster-02 の単体スラスタで補償期間は 15 日と求まる. さらに Cluster-02 には 13 個のスラスタを搭載しているため約 195 日大気抵抗補償することが可能という計算結果となった. PPT の作動間隔はインパルスビットと大気抵抗を用いて以下の式で求められる.

$$t = \frac{I_{bit}}{D_A} \quad (4)$$

この式から, PPT の作動間隔はキャパシタ投入エネルギー 5 J, 10 J とともに 3~8 秒ごとに 1 回という計算結果になった.

ただしこの計算結果は Cluster-02 のキャパシタ投入エネルギーを 5 J と 10 J に変更することを想定している. この運用方法では電源が大変複雑になり, 単純構造である PPT の特徴を失わせてしまう. 投入エネルギーを一定で使うことが望まれるため, 今後改良が必要である.

#### 5. 結論

本研究では低電力同軸型 PPT の長時間作動実験による性能推移および EOL 性能を評価した. それを元にしたクラスタ化 PPT のスラスタ単体長時間作動実験により以下の結論を得た.

- 低電力同軸型である TMU-PPT-5C は 24 万ショット安定的に作動し, トータルインパルス 36.5 Ns を達成した
- 低電力クラスタ化同軸型 PPT である TMU-PPT-Cluster-02 の単体スラスタは 5C より作動可能なショット数が減少した. その原因は電極・伝送経路の電気抵抗の増加, それに伴うエネルギー損失の増加によってスラスタヘッドに投入されるエネルギーが不足したことである
- エネルギーを 5 J から 10 J に上げることで合計 24 万ショット作動し, トータルインパルス 51 Ns を達成した
- 意図しない他スラスタの誤作動はカソードノズルを 5 mm から 10 mm に変更することで防げた
- Cluster-02 の開発目的である大気抵抗補償ミッションの計算を実施し, Cluster-02 は軌道高度 400 km で約 195 日の大気抵抗補償を行えることを確認した

#### 参考文献

- 1) 栗木恭一, 荒木義博, 電気推進ロケット入門, 東京大学出版会, pp.157~177, 2003
- 2) 新倉秀幸, クラスタ化同軸型パルスプラズマスラスタの軽量化試作検討, 2017 年度首都大学東京卒業論文
- 3) 長尾真, 他, クラスタ化同軸型パルスプラズマスラスタの性能評価, STEP-2017-014, 2017 年度宇宙輸送シンポジウム