

クラスタ化同軸型パルスプラズマスラスタの性能評価

Performance Evaluation of Clustered Coaxial Pulsed Plasma Thrusters

○長尾 真・西尾 美咲・小瀧 智範・新倉 秀幸・竹ヶ原 春貴（首都大学東京）

○Makoto Nagao・Misaki Nishio・Tomonori Kotaki・Hideyuki Niikura
Haruki Takegahara(Tokyo Metropolitan University)

Abstract (概要)

In recent years, the demand for micro-satellites has increased, but a micro-sat has severe restrictions on shape, weight and power. Therefore, a propulsion device called a Pulsed Plasma Thruster (PPT) is suitable for mounting a micro-sat. In this study, we developed PPT aimed at compensating atmospheric drag of micro-sat. To increase the total impulse of the PPT system, this PPT has a structure that fixes 13 propellants to one electrode plate and carries a lot of propellant. We perform performance evaluation test of PPT and report the results.

記号の説明

E_0 : 投入エネルギー

S : キャパティ表面積

L_{tot} : 回路インダクタンス

1. 研究背景及び目的

近年、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、電力の厳しい制限がある。そのため、超小型衛星は推進系を搭載できず、低軌道では大気抵抗等による外乱を受けて高度が落ち、運用を終えてしまう。そこで、超小型衛星搭載に適した推進機が求められる。本研究ではその推進機としてパルスプラズマスラスタ (PPT) を研究している。

本研究室では国際宇宙ステーションの日本実験棟搭載の超小型衛星放出機構を利用する事を想定して、衛星構体の底面 550 mm×350 mm×100 mm のサイズに収まる PPT¹⁾を開発した。この PPT (TMU-PPT-Cluster,以下 Cluster) は既に本研究室で開発された 5 J 級同軸型 PPT である TMU-PPT-5C (以下 5C) を 13 個クラスタ化した構造で、高度 400 km で約 6 ヶ月の大気抵抗補償を行うことが可能である。図 1 に 5C, 図 2 に Cluster を示す。衛星の重心軸上にスラスタが 1 つ配置され、そこを中心として 12 個のスラスタが対称に配置されている。

5C から以下の点を変更した。

- 電極を銅から SUS304 に変更
- イグナイタ固定方法を穴に差し込むタイプから溝に押し付けるタイプに変更

電極素材変更は 13 個のスラスタによる長時間作動を考慮して耐スパッタ性能向上のためであり、イグナイタ固定方法は製作上の理由から溝に変更した。

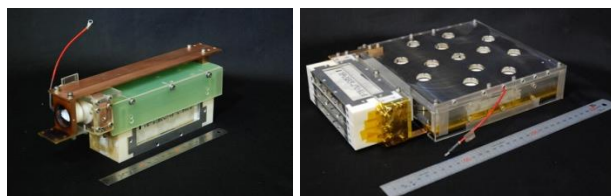


図 1 TMU-PPT-5C

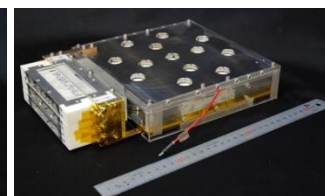


図 2 TMU-PPT-Cluster

本研究の目的は Cluster の一つのスラスタを長時間作動させ、推進性能を取得し評価することである。

2. PPT の作動原理

PPT は電極間に推進剤を挟み、チャージされたキャパシタで両極を接続している構造である。

PPT の作動原理は、まず、イグナイタ放電による推進剤の少量を昇華、プラズマ化させる。その後、電極間に高導電性の領域が広がって短絡し、キャパシタに蓄えられた電荷が一斉に流れ、主放電を形成する。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。この 1 サイクルが 1 ショットの作動原理である。

PPT には電磁加速が主である平行平板型と電熱加速が主である同軸型の 2 種類が存在する。本研究では同軸型 PPT を扱っている。図 3 に同軸型 PPT の概略図を示す。

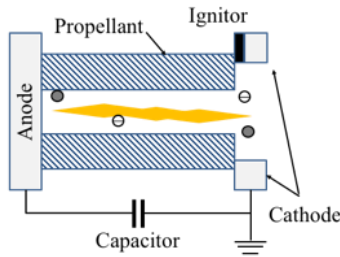


図3 同軸型 PPT 概略図

3. 先行研究

3.1 個別性能作動試験²⁾ 先行研究として各スラスタの初期性能を評価した。性能のパラツキはほとんどなく 5C と比較しても同程度の性能を得た。表 1 にその結果を示す。

表 1 Cluster と 5C の性能比較表

	Cluster	5C
Impulse Bit (1 shot), μNs	272 ~341	303
Impulse Bit (500 shot), μNs	260 ~314	287
Specific Impulse, s	255 ~293	257
Thrust Efficient, %	6.59 ~9.08	7.24
Thrust to Power Ratio, mN/kW	52.9 ~63.7	57.5
Mass shot, μg	100 ~114	121
Total Resistance, m Ω	168 ~200	235

3.2 交互作動試験¹⁾ Cluster では電極を一体化したため、各スラスタは同時に作動できない。そのため、対称に配置されているスラスタを交互に作動させる事で回転トルクを打ち消して推進方向に力積を得る。そこで対称に位置する2つのスラスタが交互に作動でき、同程度のインパルスビットが発生するか確認試験を行った。図4に作動させる2つのスラスタの位置関係を示す。図5に Cluster を振り子式スラストスタンド(T.S.)に搭載した写真を示す。これの揺れ幅に着目して2種類の波形をとる。

図6(a)に b-1 で発生させた振幅を打消すように B-1 を作動させた場合の試験結果を示す。また、図6(b)に b-1 で発生させた振幅を重ね合わせるように B-1 を作動させた場合の試験結果を示す。

この結果から2つのスラスタが同程度のインパルスビットで想定した交互作動が行えることがわかった。

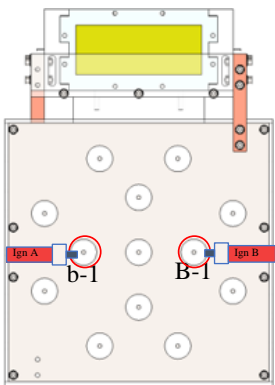


図4 スラスタの位置関係

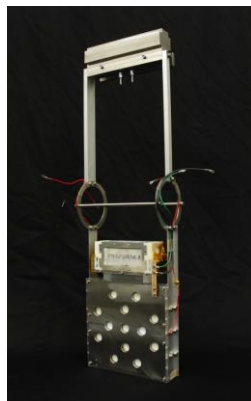
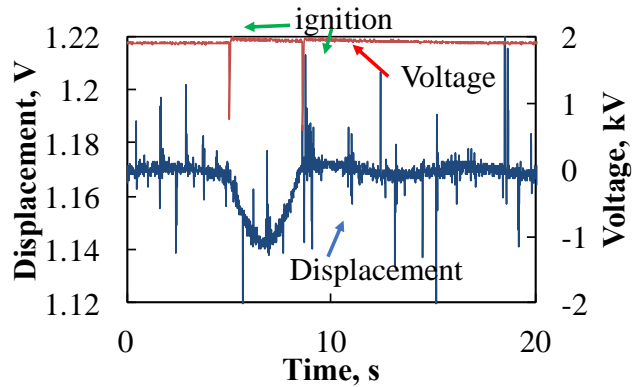
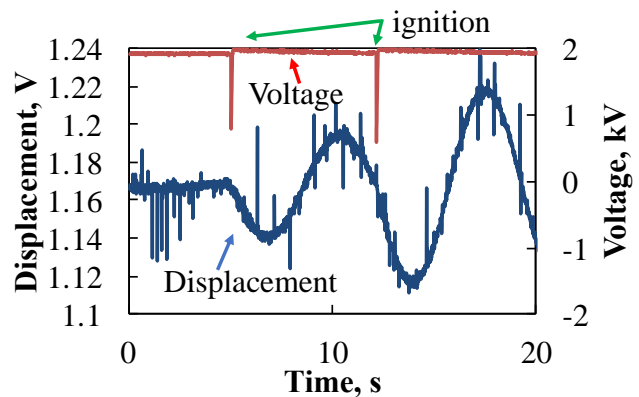


図5 搭載型振り子式 T.S.



(a) インパルスビット打消し



(b) インパルスビット増幅
図6 交互作動時の振幅変化

4. 単体長時間作動試験

一つのスラスタを長時間作動させて性能を取得した。測定項目はインパルスビット、主放電電流電圧波形、マッシュショットである。推進剤を新しくして中心の A-1 とその隣に位置する B-1 で試験を行った。図7にその位置関係を示す。表2に実験条件を示す。これは今までの先行研究内の試験と同じである。

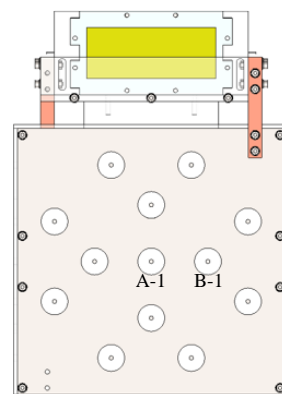


図7 カソード側から見た A-1, B-1 の位置関係

表2 実験条件

Cavity Length, mm	30
Cavity Diameter, mm	3
Input Energy, J	5
Ignitor Energy, mJ	49
Operation Frequency, Hz	1

4.1 ミスショット連発による問題 実験を行なっていたところ、1500 ショット付近でミスショットが連発した。この原因は、イグナイタ固定方法を変更したためと考えられる。今回の Cluster は製作の都合上、溝の形状で固定していた。従来、本研究室ではカソードの穴にイグナイタがはまるよう固定していた。Cluster の固定方法ではイグナイタが不安定になりミスショットが連発したと考えられる。図8にカソード板、図9にイグナイタ固定方法の従来と今回の相違を示す。

空間を埋めてイグナイタを安定化させるため、二種類の接着剤を利用した。表3に使用した接着剤の種類を示す。A-1には銀ペースト、B-1にはセラミックで固定しその表面にイグナイタ端面と同様の条件にするためにカーボン懸濁液を塗布した。

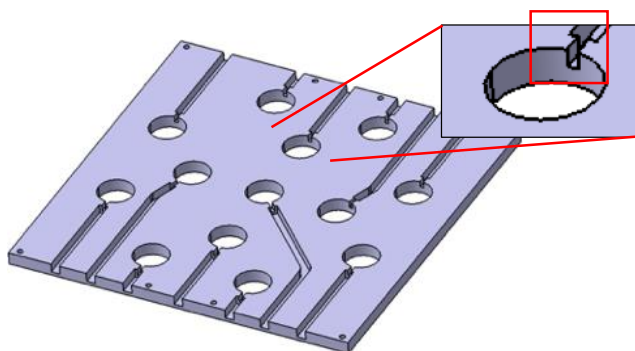


図8 カソード板の概略図

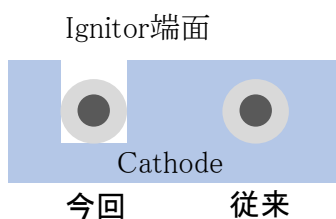


図9 イグナイタ固定方法の相違

表3 接着剤の種類

接着剤	性質
A-1	銀ペースト 高導電性
B-1	セラミック+ カーボン懸濁液 耐熱性 絶縁性

4.2 再試験時の実験結果 イグナイタを接着後の再試験の結果は5Cと比較して以下の通りになった。図10にインパルスビット、図11にマスショットの履歴を示す。A-1は37,553ショット、B-1は21,556ショットで作動不能とな

った。インパルスビット及びマスショットは5Cと比べても同程度の数値となった。

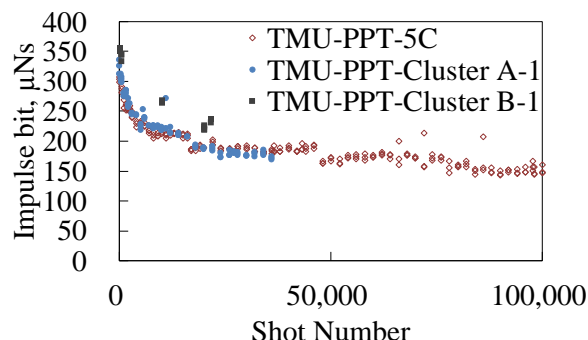


図10 インパルスビットの履歴

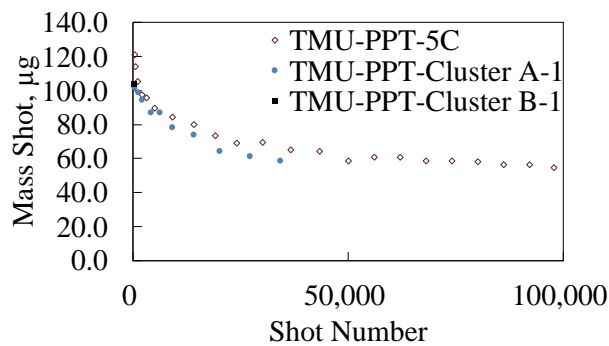
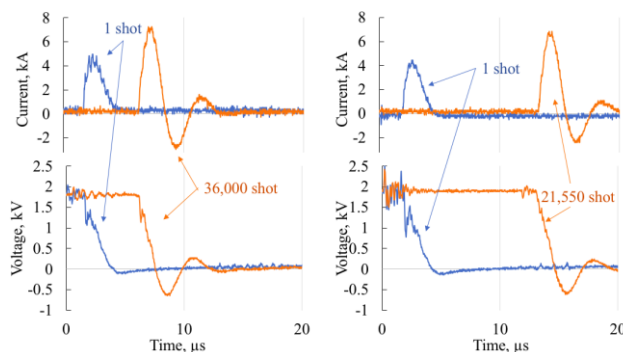


図11 マスショットの履歴

図12(a)はA-1、図12(b)はB-1の主放電電流電圧波形を示し、上は電流、下は電圧を示す。時間0秒でイグナイタ放電が行われている。1ショットと作動不能付近のショット時の波形から、作動不能付近のショットでは、イグナイタ作動から主放電が起こるまでの遅れ時間が長いことがわかる。また、作動不能付近のショット時の波形を比較するために、図13にA-1と5Cの36,000ショット時の波形を示す。イグナイタ放電が起こってから主放電が起こるまでの遅れ時間がA-1は長いことがわかる。



(a) A-1(1 & 36,000 shot) (b) B-1(1 & 21,550 shot)

図12 主放電電流電圧波形

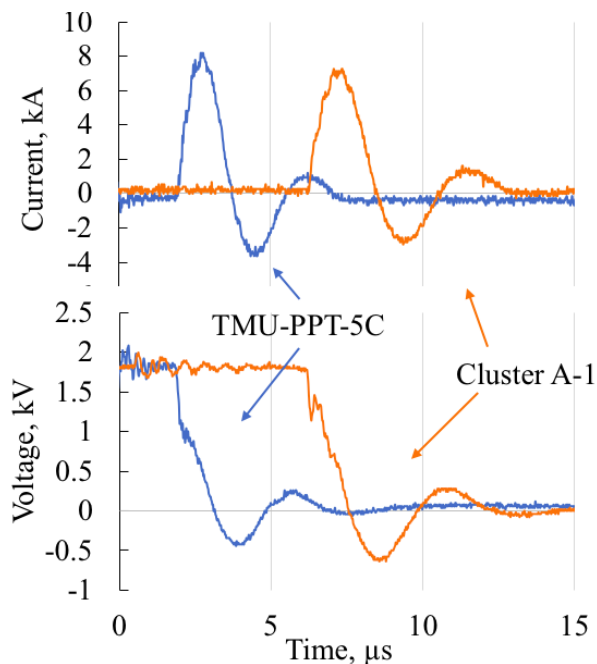


図 13 36,000 shot 時の A-1 と 5C の主放電波形

4.3 作動不能の考察 まず、電源系の故障は見られなかった。そこで、対策をいくつか行なった。

- キャパシタチャージ電圧を 1.88 kV から 2.00 kV (投入エネルギー 4.96 J から 5.74 J) に上げた
- イグナイタチャージ電圧を 1.2 kV から 1.8 kV (エネルギー 49 mJ から 110 mJ) に上げた
- アノード側のコンタミネーション除去

しかしこれらの対策を行った後も作動は確認されなかった。

また、過去の研究³⁾から連続作動を行うために必要な PTFE キャビティ表面積に対する投入エネルギー関係式(1)が示されている。

$$E_0/S \geq 1.0 \text{ [J/cm}^2\text{]} \quad (1)$$

これに着目し、Cluster 及び 5C に対して計算した。表 4 にその関係を示す。

表 4 キャビティ表面積に対する投入エネルギー密度

	$E_0/S, \text{ J/cm}^2$
Cluster A-1 (実験終了後)	0.748
Cluster B-1 (実験終了後)	0.889
TMU-PPT-5C (100,000 shot 後)	0.560

過去の PPT と今回の PPT の形状が違うため、5C が必要とされる投入エネルギー密度が小さくても作動できることから、上式の関係は今回の PPT には成り立たないと考えられる。また、5C の投入エネルギー密度が A-1, B-1 より小さく、上の対策による投入エネルギー増加に対しても A-1, B-1 が作動しないことから、投入エネルギーの観点から見れば作動しない原因とは関係ないことがわかる。

作動不能付近のショット時では、イグナイタ放電から主放電が起こるまでの遅れ時間が長くなっている。これはイ

グナイタ放電によってアノードカソード間に高導電性のプラズマが広がりづらいこと、または昇華量の低下、プラズマ不足のいずれかが原因であると考えられる。しかし、イグナイタエネルギーを上げた対策で主放電が誘起されなかったことから、イグナイタエネルギーの不足によるものではないと考えられる。

ただし、このイグナイタ放電から主放電が起こるまでの遅れ時間が長い現象により、イグナイタ周辺に問題があると考えられる。

この放電波形から求めた回路インダクタンスを表 5 に示す。5C より Cluster の回路インダクタンスはわずかに大きい、ショット数で変化していないため問題ではないと考えられる。

表 5 回路インダクタンス

	$L_{tot}(10,000 \text{ shot}), \text{ nH}$	$L_{tot}, \text{ nH}$
Cluster A-1	145±3	140±3(36,000 shot)
Cluster B-1	132±5	136±8(21,550 shot)
TMU-PPT-5C	98±6	98±7(100,000 shot)

原因は未だ不明であるが、イグナイタ周辺が問題と考えられ、今後も調査する必要がある。

5 まとめと今後の課題

5.1 まとめ

- TMU-PPT-Cluster のインパルスビットやマッシュショットなどの推進性能は基となっている TMU-PPT-5C に相当
- イグナイタの固定方法 (穴・溝) は穴の方が良い
- 投入エネルギーやイグナイタエネルギー、エネルギー密度、回路インダクタンスに関係なく作動しなくなった

5.2 今後の課題

- 作動不能原因を引き続き調査
- 軽量化及びイグナイタ固定方法を穴に戻した新 Cluster⁴⁾ の評価

参考文献

- 1) 山下大治郎, “超小型衛星搭載大気補償用パルス型プラズマスラスタの開発”, 平成 28 年度首都大学東京修士論文
- 2) 長尾真, “クラスタ化同軸型パルスプラズマスラスタの各推進機の性能評価”, 平成 28 年度首都大学東京卒業論文
- 3) Junji Uezu et al, “Study on Pulsed Plasma Thruster Configuration to Expand Impulse Bit Range”, IEPC-2005-234, 2005
- 4) 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”, 平成 29 年度首都大学東京卒業論文