

推進剤供給機構を有する電熱加速型パルスプラズマスラスタの研究

Study on Propellant Feed Mechanism of Electrothermal Pulsed Plasma Thruster

○嶋田 悠斗・大堀 一樹(山梨大・院)・青柳 潤一郎(山梨大)
○Yuto Shimada・Ohori Kazuki・Aoyagi Junichiro(The University of Yamanashi)

Abstract (概要)

We designed two types of pulse plasma thrusters (PPT) with a propellant feeding mechanism to prevent deterioration of impulse bit during continuous operation of electrothermal PPT. One of the type of PPT uses four plate propellants and the other uses a cylindrical propellant. Poly-tetra-fluoroethylene (PTFE) was employed as propellant in both PPTs. Common to each PPTs, we measured impulse bits by thrust stand in high vacuum and calculated specific impulse and thrust efficiency with stores energy of 8.0J and cavity length of 20mm. As a result, a PPT using plate propellants could not operate more than 500 shots because of generating charring in gap of cavity. A PPT using cylindrical one got contingent electrical continuity by charring at 1400 shots. In this paper, we report propulsive performance in detail for the two PPTs mentioned above.

記号の説明

I_{bit} : インパルスビット, μNs
 Δm : マスショット, μg
 I_{sp} : 比推力, s
 η : 推進効率, %

1. はじめに

近年、開発期間の短さや、開発コストの低さから小型衛星の打ち上げ数が増加傾向にある¹⁾。小型衛星にはコストの削減や開発期間の短縮、リスク低減といった利点があるが、小型衛星ではペイロードの制限から搭載できる機器に限りがあるため、小型、軽量の推進機への感心は高まっている。そのような状況で注目されているのが電気推進であり²⁾、なかでもパルスプラズマスラスタ(Pulsed Plasma Thruster : PPT)³⁾は、その簡便な構成や比推力の高さから小型衛星への適用が期待されている。PPTは排気推進剤の加速機構の違いから、電磁加速型PPTと電熱加速型PPTに分類される。電熱加速型PPTは電磁加速型PPTと比較して、比推力こそ劣るものの、インパルスビット(1ショットあたりに発生させる力積)を大きく取ることが可能である。そのため、人工衛星に短時間で速度増分を与えなければならないような場面では、電熱加速型PPTは優位に立つ。しかし、電熱加速型PPTはショット数の増加に伴いインパルスビットが低下するという欠点を持つ⁴⁾。この原因は動作を重ねることでキャビティが拡大してしまうためである。本研究では推進剤を供給する機構を付与した電熱加速型PPTを考案し、そのような欠点を克服した電熱加速型PPTを開発することを目的としている。本稿では新規に製作した2種類のスラスタヘッドの作動実験から得られた推進性能について報告する。

2. 実験方法

本研究におけるPPTの作動実験は、真空チャンバ(直径600mm、長さ1000mm)内で行った。インパルスビットは50~200ショットごとに前後計5回ずつ、本研究室で製作したスラスタターゲット^{5,6)}を使用して計測した。PPT作動時の電流、電圧波形の計測にはそれぞれログスキーコイルおよび高電圧プローブを用いた。また、実験前後の推進剤の質量測定を行った。真空チャンバを含む全体の実験系の構成について図1に示す。

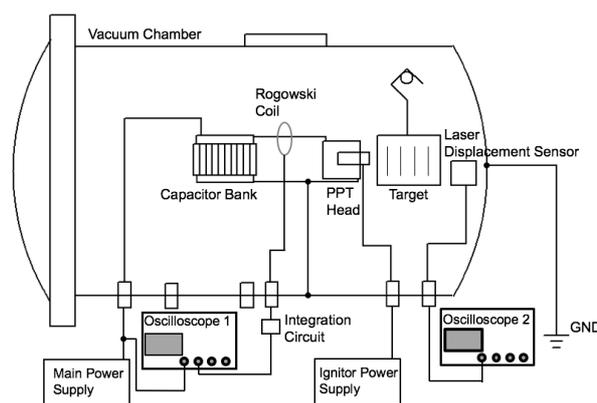


図1 実験系全体の構成

本実験ではキャパシタバンクへの充電キャパシタンスを $4.93\mu\text{F}$ 、充電電圧を 1.88kV としたので、充電エネルギーは 8.71J となる。実験時の真空度は $1.1\times 10^{-2}\sim 5.3\times 10^{-2}\text{Pa}$ の範囲内である。なおこれらの値は本論文のすべての実験について共通である。

3. 四面供給型 PPT

3.1 概要 本研究で製作した四面供給型 PPT の概略図を図 2 に示す。この PPT は 4 枚の板状推進剤をそれぞれ供給することによって、正方形のキャビティを形成する。それぞれの推進剤は消費に伴い外力に押されることによって供給される機構となっている。

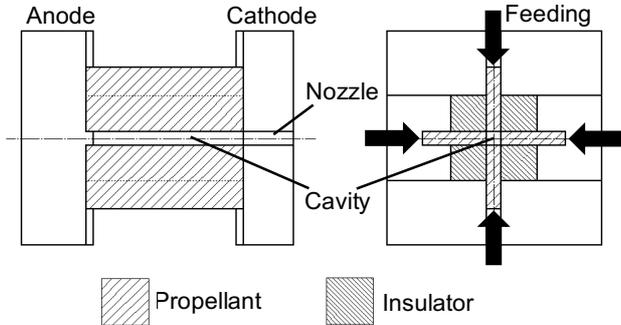


図 2 四面供給型 PPT

図 3 に実際に設計した四面供給型 PPT の CAD モデルを示す。図 3 では省略しているが、実際のスラスタヘッドでは電極周囲をハウジングによって完全に取り囲む状態となる。板状推進剤はハウジング側面からコイルばねによる力を受け、消費に伴い押し出される機構となっている。推進剤の厚さは 2mm とした。また、本 PPT では四枚の推進剤によって正方形断面のキャビティを形成しているが、キャビティの角に当たる部分からのプルームの漏れを防ぐことを目的として、それぞれ四箇所直方体のガラス部材を配置した。

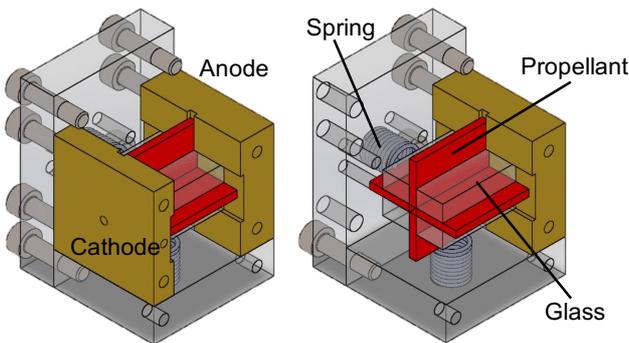


図 3 四面供給型 PPT 概略図

図 4 に実際に製作した四面供給型 PPT の写真を示す。電極に真鍮、ガラス部材にネオセラム、ハウジングにはアクリル樹脂、推進剤はポリテトラフルオロエチレン(PTFE)を使用している。また、表 1 にスラスタの性能に関わるキャビティ部の諸元を示す。本 PPT では板厚 2mm の推進剤によってキャビティを形成するため、キャビティの断面積は 4mm^2 となる。ノズル径は $\phi 2\text{mm}$ とした。

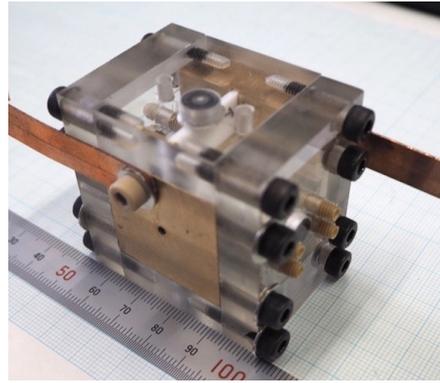


図 4 四面供給型 PPT の外観

表 1 四面供給型 PPT 代表寸法

Cavity length [mm]	Cavity area [mm ²]	Cavity volume [mm ³]	Nozzle area [mm ²]
20	4(2×2)	80	3.14

3.2 実験結果と考察 図 5 に四面供給型 PPT 作動時の様子を示す。作動時の画像で確認する限りではプルームの漏れは確認されなかったが、実験後の推進剤の様子(図 6)を観察すると、外部にプルームが漏れ出した痕跡が見て取れた。今回製作した PPT はキャビティの周囲をハウジングによって完全に囲っていたため、漏れ出したプルームがハウジング内に留まり、写真では外部への放出として観察できなかったものと考えられる。

ショット数については最大 501 ショットという結果であった。ショット数が伸びなかった理由として、推進剤およびガラスへの炭素付着(図 6, 図 7)によって、電極間が短絡し自走放電を起こしたことが挙げられる。このチャーリングは PTFE とガラスが重なり合う部分の空隙に昇華した炭素成分が溜まることによって発生したものである。

プルームの漏れおよびチャーリングの問題を解決する方法として、PTFE とガラスとの密着性を向上させることが挙げられる。しかしながら、密着性の向上に伴いショット数が増加することで推進剤が消費され、新たな空隙の発生、ひいてはチャーリングが起きる懸念があり、根本的な解決に至るとは考えにくい。

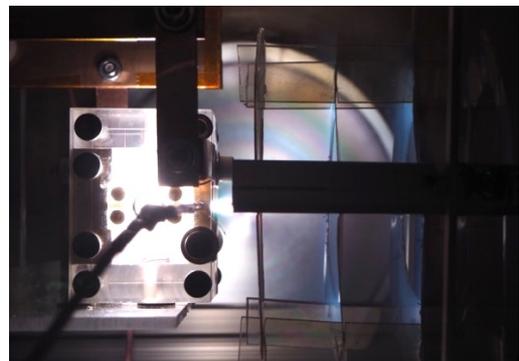


図 5 四面供給型 PPT 作動時の様子

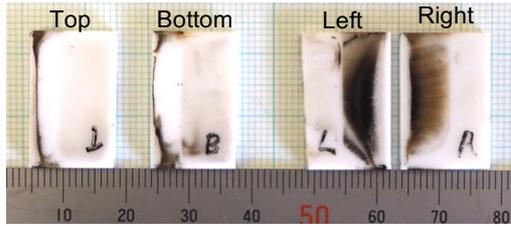


図6 実験後の推進剤



図7 実験後のガラス部材

501 ショットまで PPT を作動させたときのインパルスビットの推移を図8に示す。グラフ内のプロットは5回計測したインパルスビットの平均値であり、エラーバーはその標準偏差である。インパルスビットはおおむね $100\mu\text{Ns}$ で推移しており、明確な低下は確認されなかった。しかし、現状ではショット数が少なすぎるため推進剤の供給が行えたかどうかの確認は難しい。今後の課題としてショット数が増加したときのインパルスビットの推移および、推進剤の消費傾向について確認する必要があると言える。

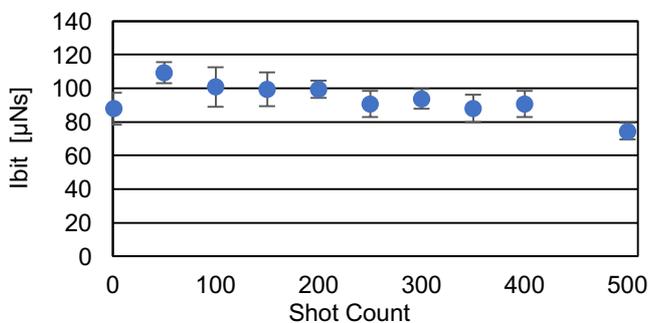


図8 インパルスビットの推移(四面供給型 PPT)

表2に本実験で得られた四面供給型 PPT のマスショット、比推力および推進効率を示す。比推力は 69.4s と低い値を示しているが、これはマスショットに対してインパルスビットが低い値を示したためである。インパルスビット低くなったのは、先に挙げたプルームの漏れが主たる原因であり、推進性能を向上させるためにも、推進剤とガラスとの空隙によるプルームの漏れを防ぐ必要があると言える。また、同様の理由で推進効率も低い値を示した。

表2 各推進性能(四面供給型 PPT)

Mass shot	Specific impulse	Thrust efficiency
Δm [μg]	I_{sp} [s]	η [%]
139.0	69.4	0.4

4. PTFE ロッド PPT

4.1 概要 四面供給型 PPT ではキャビティ部に炭素成分が溜まりうる空隙が存在することが大きな問題であった。このことを踏まえ、主放電に曝される箇所に隙間が存在しないような構造になるよう考案したのが図9, 10に示す PTFE ロッド PPT である。このスラストヘッドはガラス管を電極で挟み、ガラス管内部に棒状の PTFE を挿入することでキャビティ部の空隙が存在しないような構造になっている。この PPT では将来的に棒状 PTFE をキャビティ外部から連続的に供給することを目標としているが、今回は基礎研究として PTFE ロッド PPT の動作実証および推進剤消費の傾向を明らかにすることを目的として、動作実験を行った。

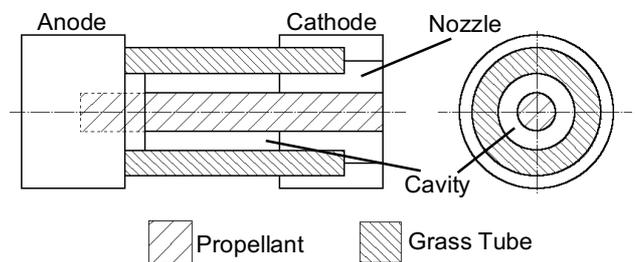


図9 PTFE ロッド PPT

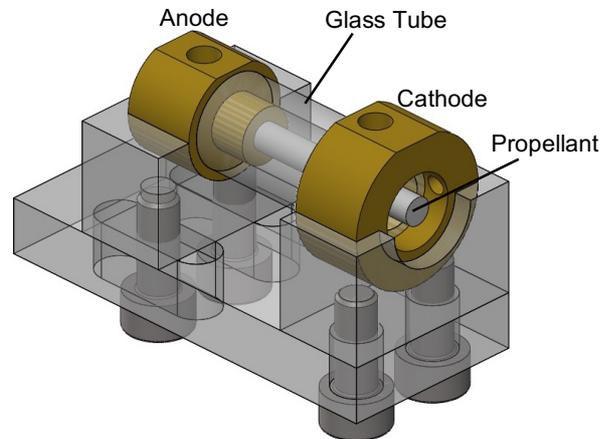


図10 PTFE ロッド PPT の CAD モデル

実際に製作した PTFE ロッド PPT の外観を図11に示す。電極は真鍮、ガラス管にソーダ石灰ガラス、推進剤に PTFE を用いている。また、PTFE ロッド PPT の主要寸法を表3に示す。ガラス管内径は 6mm 、PTFE 棒直径は 3mm なことより、ガラス管と PTFE 棒とのギャップは 1.5mm となる。四面供給型 PPT と比較してキャビティの長さは 20mm と同一であるが、キャビティの体積については5倍程度大きくなっている。



図 11 PTFE ロッド PPT 外観

表 3 PTFE ロッド PPT 代表寸法

Grass Tube bore [mm]	PTFE diameter [mm]	Cavity length [mm]	Cavity volume [mm ³]	Nozzle area [mm ²]
6	3	20	424	8

4.2 実験結果と考察 PTFE ロッド PPT 作動時の様子を図 12 に示す。本実験において得られた PTFE ロッドの最大ショット数は 1400 ショットであった。1400 ショット以降は図 13 に示すようなガラス管外部での放電が頻発するようになったため実験を中止したが、1400 ショット間での自走放電等の不具合は確認されなかった。ガラス管外での放電が発生した原因としては、キャビティ外部のアノード-カソード間の絶縁が不十分だったことが挙げられる。本 PPT は構造上キャビティ内部の電極間距離よりも、キャビティ外部の電極間距離のほうが短く、ガラス管外での放電が発生しやすかった状態であった。この問題については、カソード電極をテープ等で絶縁することで改善されると考えられる。

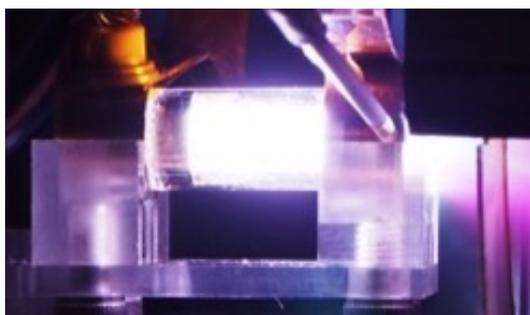


図 12 PTFE ロッド PPT 作動時の様子



図 13 ガラス管外部での放電

実験後のガラス管の様子を図 14 に示す。1400 ショット作動させた後のガラス管内壁には薄くチャーリングがみられるものの、自走放電は確認されていない。しかしながら、チャーリングはアノード付近で顕著に発生しており、ショット数の増加に伴いカソード側へ成長していく傾向がみられた。1400 ショットの時点では、アノード付近の濃いチャーリングはガラス管の 1/4 程度まで伸びてきており、今後ショット数に対してチャーリングがどの程度まで成長するのか確認する必要があるといえる。また、図 15 は 498 ショット目の、図 16 は 502 ショット目の PPT 作動時の様子であるが、アノード付近の顕著なチャーリングについて、PPT の作動によって剥がれ落ちることを確認している。これは、主放電エネルギーによって付着した炭素成分が剥がされ、推進剤と共に排気されたものと考えられる。このような自浄作用はチャーリングを嫌う PPT にとって好ましいものであるといえる。しかしながら、1000 ショット以降はアノード付近のチャーリングはほぼ剥がれないという結果を確認した。



図 14 実験後のガラス管

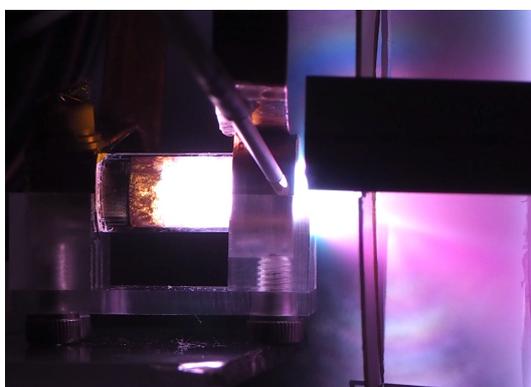


図 15 498 ショット目の作動時の様子

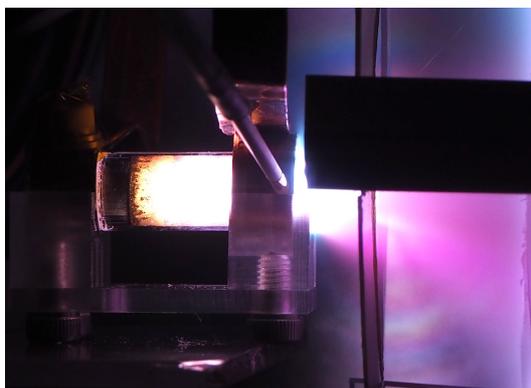


図 16 502 ショット目の作動時の様子

実験後の推進剤の様子を図 17 に示す。図 17 より推進剤に生じるチャーリングに偏りがあることから、推進剤の消費についても偏りが生じていることが予想される。特に、イグナイタ挿入方向側の面において推進剤の消費が良好であり、反対側ではチャーリングが生じていることが見て取れる。この原因としては、ガラス管内で主放電によるプラズマがイグナイタ側に偏ってしまったためだと考えられる。可能な限り均一な推進剤の消費を得られるようにするため、今後キャビティのスケール変更や投入エネルギーの改善等を行い推進剤消費の傾向についてより詳しく調査する必要があるといえる。

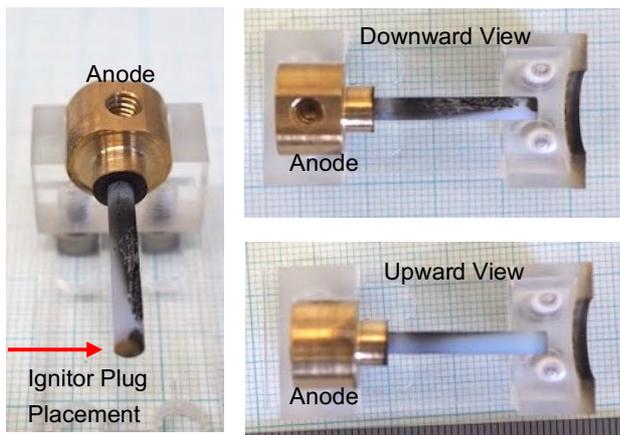


図 17 実験後の PTFE ロッド

図 18 に PTFE ロッド PPT のショット数に対するインパルスビットの推移を示す。インパルスビットは 200 から 400 ショットの間で最大値 110 μ Ns を出したが、ショット数の増加に伴い低下傾向にあることがわかる。この原因としては、推進剤のチャーリングによって、ショット数の増加に伴い推進剤の昇華面積が徐々に減少したためだと考えられる。

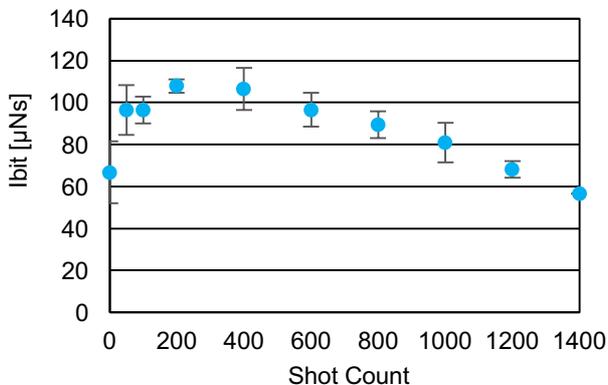


図 18 インパルスビットの推移(PTFE ロッド PPT)

実験結果より算出した PTFE ロッド PPT の、マスショット、比推力および推進効率の値を表 4 に示す。四面供給型 PPT と比較してマスショットは少ない結果となった。この要因として、放電に曝される推進剤の面積が四面供給型 PPT と比較して PTFE ロッド PPT では約 1 割小さいことと、キャビティの体積が 5 倍以上大きいことが挙げられる。PTFE ロッド PPT では、推進剤の昇華面が小さいうえに、キャビティ体積が大きいことで放電によるプラズマ密度が小さくなり、マスショットが小さくなったものと考えられる。加えて、推進剤のチャーリングによって PTFE ロッド PPT ではさらに推進剤の昇華面が減少したことも、マスショットの減少に影響を与えていると考えられる。また、PTFE ロッド PPT は、四面供給型 PPT と比較して比推力、推進効率ともに大きい値を示すことが分かった。これは、四面供給型 PPT に比べ、PTFE ロッド PPT ではインパルスビットは同程度ながら、マスショットが 9 割程減少したためである。

表 4 各推進性能(PTFE ロッド PPT)

Mass shot Δm [μ g]	Specific impulse I_{sp} [s]	Thrust efficiency η [%]
15.1	370	2.1

本実験で得た PTFE ロッド PPT の放電時のログスキーコイルの出力波形を図 19 に示す。本来であれば得られた出力波形より電流値を算出するべきだが、本研究室では現時点でログスキーコイルの校正が出来ていないため、本論文ではログスキーコイルの出力電圧を示している。図 19 より電流波形は大きくダンピングしている事がわかる。一般に電熱加速型 PPT は電磁加速型 PPT と比較して放電電流波形のダンピングは小さくなる傾向にあるが、本実験ではそのような傾向は見られなかった。さらに、電熱加速型 PPT はキャビティ体積が増加するとダンピングが大きくなる傾向があり、今回制作した PTFE ロッド PPT はキャビティの寸法設定が適切で無かった可能性がある。

今後は、ガラス管内径、PTFE 直径、キャビティ長を変更し、キャビティ形状が変化することによって、放電電流波形がどのように変化するか確認する必要があるといえる。

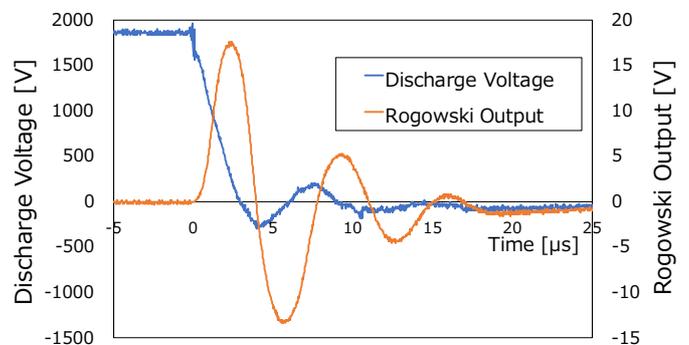


図 19 放電電流波形および放電電圧波形

5. 結論

本研究によって得られた結果を以下にまとめる。

• 四面供給型 PPT

- i. 連続動作性能
 - 最大ショット数は 501 ショット。
 - キャビティ付近に生じる空隙を低減し、ショット数を増加させることは可能であると考えられる。しかし、ショット数が増加し推進剤が消費されることで新たな空隙が発生する可能性もあり、根本的な解決法であるとは言えない。
- ii. インパルスビット
 - 約 100 μNs ほどで推移。
 - 501 ショットまでではインパルスビットの明確な低下は見られない。
- iii. 比推力および推進効率
 - 比推力は 70-85s, 推進効率は約 0.5%程度。

• PTFE ロッド PPT

- i. 連続動作性能
 - 最大ショット数は 1400 ショット。
 - 自走放電は確認されなかったが、ガラス管内には軽微なチャーリングがみられた。
- ii. インパルスビット
 - インパルスビットは最大 110 μNs 程度。
 - 400 ショット以降のインパルスビットは低下傾

向にある。この原因は、チャーリングによる PTFE ロッドの昇華面積の減少だと思われる。

- iii. 比推力および推進効率
 - 比推力は 370s, 推進効率は 2%程度。
- iv. 放電電流波形
 - 放電電流波形はダンピングが大きく、設計したキャビティの体積が大きすぎたと考えられる。
 - キャビティのスケール則の変更および、投入エネルギーの改善等により電流波形がどのように変化するか確認する必要があるといえる。

参考文献

- 1) THE TAURI GROUP, "State of the Satellite Industry Report," SATELLITE INDUSTRY ASSOCIATION, 2016.
- 2) 田原弘一, "最近の電気推進機の開発研究とプラズマ技術," Science and Nuclear Fusion Research, 大阪大学, 2007.
- 3) R.L.Burton, and P.J.Turchi, "Pulsed Plasma Thruster," Journal of Propulsion and Power, 1998.
- 4) 枝光敏章, 田原弘一, "高インパルス発生用電熱加速型パルスプラズマスラスタの性能特性と連続作動試験," 日本航空宇宙学会, 大阪大学, 2006.
- 5) 大堀一樹, "小型パルスプラズマスラスタの振り子式インパルス測定評価に関する研究," 山梨大学, 2015.
- 6) R.Yanagi, and I.Kimura, "A New Type Target for the Measurement of Impulse Bits of Pulsed Plasma Thrusters," International Electric Propulsion Conference, University of Tokyo, 1981.
- 7) 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.