

PTFE シート供給式パルスプラズマスラスタの実験的研究

Experimental study on PTFE-sheet-fed pulsed plasma thruster

吉川 哲史, 百武 徹 准教授 (横浜国立大学), 國中 均 教授, 西山 和孝 准教授, 月崎 竜童 助教授 (ISAS/JAXA)

1. 諸論

1.1 電熱加速型パルスプラズマスラスタとその問題

今日、宇宙機の小型化が注目されている。このような宇宙機には、小型であり軽量、そして構造が簡素という性能が要求されている。これは宇宙機によるミッションにはコスト削減、リスク低減を重視する傾向があるからである。またロケットの余剰ペイロードに電気推進衛星を搭載し運転する計画も盛んであるからである。このような現状のもとで、固体推進剤としてポリテトラフルオロエチレン (PTFE ; Teflon®) を用いるパルスプラズマスラスタ (PPT) はこの要求を満たすことができる電気推進である。

本研究の対象である電熱加速型 PPT (同軸型 PPT) は、電磁加速型 PPT (平行平板型 PPT) と比較して比推力を犠牲にする代わりに大きな推力を発生できるため、衛星のより機敏な制御に向いている。しかし、電熱加速型 PPT には解決すべき問題が存在する。それは使用に伴いキャビティ (放電室) 径が拡大してしまい、インパルスビットが著しく低下してしまうことだ。これは固体推進剤として使用される PTFE がキャビティの役割も担っているためである。この事柄を解決すべく、PTFE シート供給式 PPT が先行研究にて考案された (Fig 1. 1)。

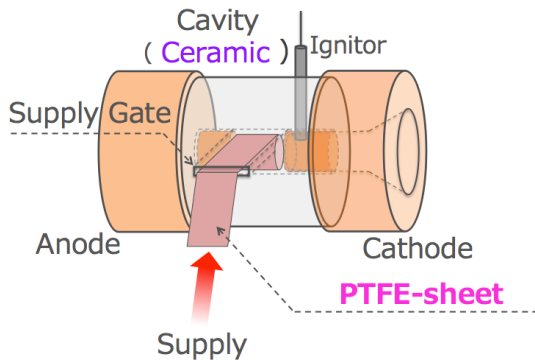


Fig 1.1 PTFE シート供給式 PPT の構造

1.2 PTFE シート供給式 PPT とその問題

PTFE シート供給式 PPT は、セラミック製のキャビティ内に供給口を通してシート状のテフロンを供給する同軸型 PPT である。設計コンセプトは、推進剤とキャビティの役割を分離したことである。キャビティはセラミック製であるためインパルスビット発生時に昇華されず、内径は変わらない。そのキャビティへ PTFE シートを推進剤として供給し続けることでインパルスビットを維持しようと試みたのである。コンセプト実証は既に成功しており、先行研究によってインパルスビット維持の実績が示されている。

一方で、テフロンシート供給式 PPT には新たに解決すべき固有の問題が大きく 3 点あることが明らかとなった。

- ① 供給された PTFE シートが完全昇華されずキャビティ内に残留するため、再供給が困難となってしまうこと (Fig 1. 2)
- ② キャビティ内壁が炭化してしまい、絶縁が保たれていたアノードカソード間が導通してしまうこと (Fig 1. 2)
- ③ PTFE シートの供給口と排出口から PTFE ガスがリークしてしまうこと (Fig 1. 4)

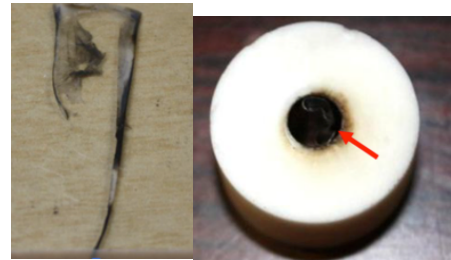


Fig 1.2 未昇華テフロンシートとキャビティ内壁の炭化

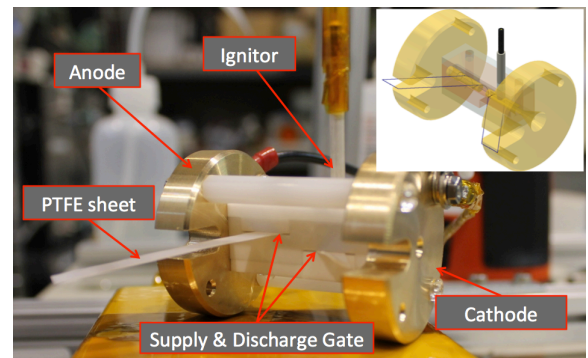


Fig 1.3 螺旋供給式キャビティを適用した PPT
右上は CAD 図



Fig 1.4 螺旋供給式 PPT 作動時の様子
及び供給口と排出口からリークした PTFE ガス

1.3 最近の取り組み：螺旋供給式キャビティ

問題①と②はPTFEシート供給式PPTが考案された当初からの課題であった。そこで、問題①と②を解決すべく螺旋供給式キャビティを設計した。

問題①に対しては、PTFEシートを供給口から挿入し、キャビティ内で螺旋状に1回転半させ、排出口から引き出すという手法で解決を試みた（Fig 1.3）。これによって未昇華PTFEはキャビティ内に残留しない。また問題②に対しては、螺旋状にPTFEシートを1周巻いた際に出来る隙間をなくせるような設計にしたこと。これによってセラミック製のキャビティの内壁がPTFEガスに晒されないようになることを期待した。

作動試験を行った結果、PPTとして正常に作動することはできたが、供給口及び排出口からのガスのリークが顕著に確認された。つまり、ここで問題③が解決すべき課題として浮上した。Fig 1.4では、供給口と排出口からノズルから噴射されているブルームと同じ色をしたPTFEガスがリークしていることが目視で確認できる。また、問題①は解決出来たものの、供給と排出の操作が手動でも困難であった。つまり螺旋供給式はPTFEシートの供給排出のし易さの観点からはあまり良いとはいえなかった。また、問題②は解決することが出来なかった。螺旋状に1周シートを巻いた際に出来る隙間をなくしたつもりであったが、この箇所から炭化が進行してしまっていた。これより、螺旋供給式キャビティではPTFEシート供給式PPTの問題を解決することが出来なかった。つまり、どの問題も未だ満足に解決するには至っていない。

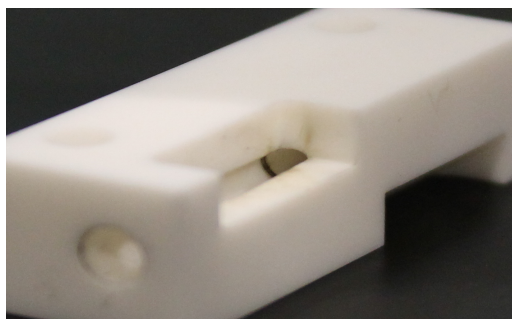


Fig 1.5 螺旋供給式PPTにおけるキャビティの炭化痕

本研究では、上記の3点の問題を解決することでPTFEシート供給式PPTを実現し、これによって電熱加速型PPTの性能低下を解消することを目的とする。

2. 新PTFEシート供給式PPTの設計

PTFEシート供給式PPTの3点の問題を解決すべく、Fig 2.1のようなセラミック製のキャビティを設計製作した。

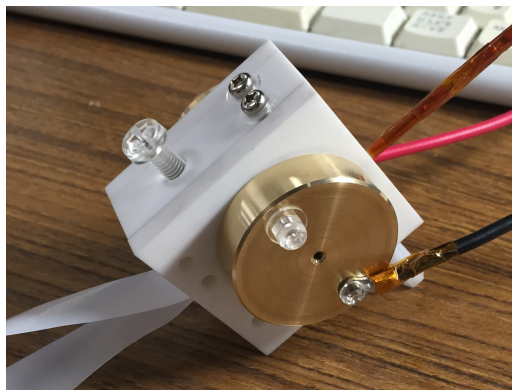


Fig 2.1 新しく設計制作したキャビティを適用したPPT

2.1 使用済みPTFEシートの排出機構

キャビティ内に残留するテフロンシートに対しては、前回の螺旋供給式に取って代わり、Fig 2.2のような供給排出方式を採用した。この方式はキャビティに対してPTFEシートを垂直に供給口から挿入し、アノードとカソードそれぞれに設けられたガイドに沿って1回転させ、再び供給口から引き出される仕組みとなっている。供給排出の操作はPTFEシートを排出方向へ引っ張るだけで実現できる。この方式をとったことで、供給排出の操作が螺旋供給式と比べ格段に容易となった。さらにPTFEガスからキャビティ内壁を保護するという面においても、螺旋供給式のようなシートを1周巻いた際の隙間が存在しないため優位となった。

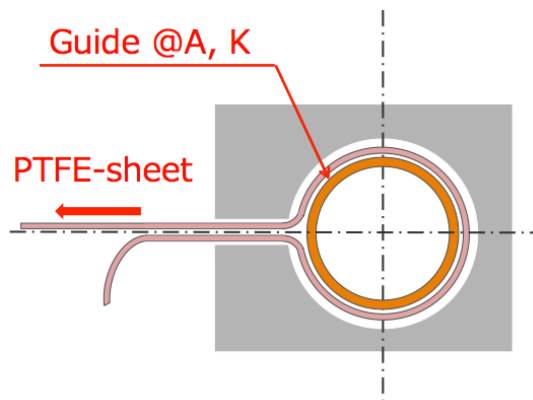


Fig 2.2 PTFEシートの供給排出方式

2.2 キャビティ内壁の炭化への対処

続いてキャビティ内壁の炭化に対しては、1度の供給排出操作によってキャビティに供給されたPTFEシートの使用回数を制限することで対処した。

この方法を採用した理由は、キャビティ内壁の炭化はPTFEシートがPPT作動によって昇華されていくうちに穴が空き、キャビティ内壁が露出するためであったからである（Fig 2.3）。このことは、以前の研究によって明らかとなった。

PTFEシートの使用回数は、実験的な経験に基づき100 shot分とした。

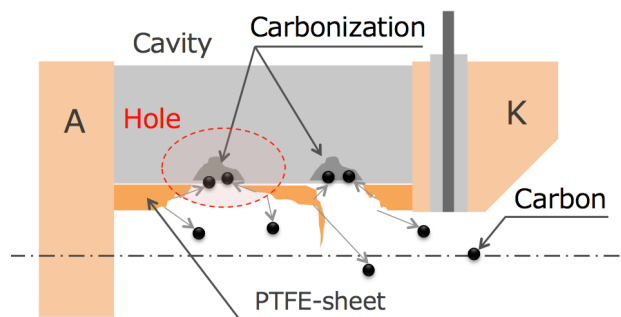


Fig 2.3 昇華に伴ってPTFEシートに生じた穴から炭化が進行する様子

2.3 PTFE ガスのリーク対策

供給排出口から PTFE ガスがリークしてしまう問題に対しては、Fig 2.4 のような手動開閉式の試作バルブを設けることで解決を試みた。

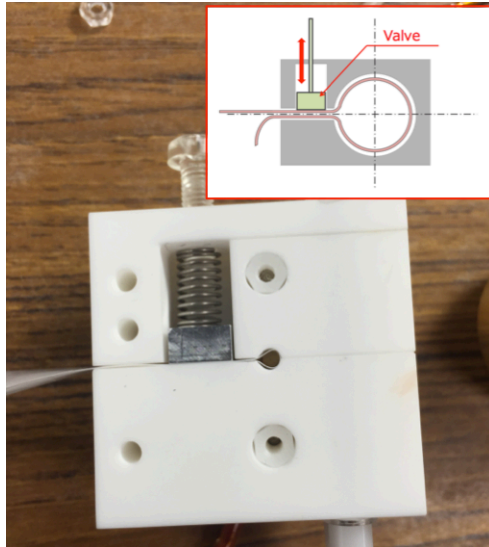


Fig 2.4 手動開閉式の試作バルブ

このバルブは押しバネによって PTFE シートを圧迫し、キャビティに供給される側の PTFE シートと排出される側の PTFE シートとの間に存在する隙間を無くす。これによって PTFE ガスは供給排出口への通り道を塞がれ、リークすることはないと期待した。

3. 300 shot 作動試験とその結果

3.1 新キャビティのスラストとしての寸法条件

新キャビティの PPT としての寸法条件を Fig 3.1 に示す。セラミック製のキャビティ自体の内径は 3.0 mm であり、そこへ厚みが 0.1 mm の PTFE シートを供給する。このため、実質のキャビティ内径は 2.8 mm となっている。電極間距離は 10 mm で、イグナイタの中心から PTFE シートまでの最短距離は 4 mm である。カソードのノズルは内径 1.8 mm のストレートノズルとした。

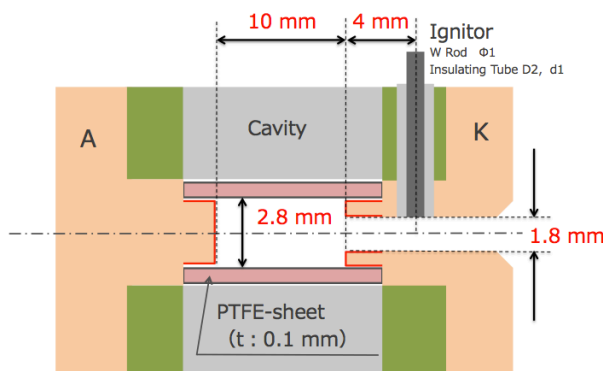


Fig 3.1 新キャビティのスラストとしての寸法条件

この新しい PTFE シート供給式 PPT の性能評価の比較対象として、全く同じ寸法条件の従来の電熱加速型 PPT を用意した。

3.2 300 shot 作動試験と作動条件

新 PTFE シート供給式 PPT の性能評価を行うため、300 shot の作動試験を行った。この試験には以下の目的があった。

- ・ 供給排出操作を含め、PPT として作動可能かどうかの検証
- ・ 従来の電熱加速型 PPT との性能比較
- ・ 新 PTFE シート供給式 PPT の問題点の提起

3.2.1 試験方法

300 shot 試験は以下の順序で行った。

- ① スラストスタンドに新 PTFE シート供給式 PPT を設置し、真空引き (1 mPa 未満) を行う
- ② 1st shot を行う前にスタンドのキャリブレーションを行う
- ③ 100 shot 分作動させ、20 shot おきにスラストスタンドを用いて性能取得を行う
- ④ 大気開放し、供給排出操作を行う
- ⑤ 新 PTFE シート供給式 PPT を分解し、PTFE シート及び各パーツの質量を電子天秤によって計測する。
- ⑥ 以上①～⑤の操作を追加で 2 回行う

操作①～⑤を Operation.01 とし、操作⑥において Operation.02 と Operation.03 とする。Operation 1 回につき、新 PTFE シート供給式 PPT を 100 回作動させるため、合計 300 shot の作動となる。

3.2.2 スラストスタンド

前項の操作③において性能取得に用いたスラストスタンドを Fig 3.2 に示す。

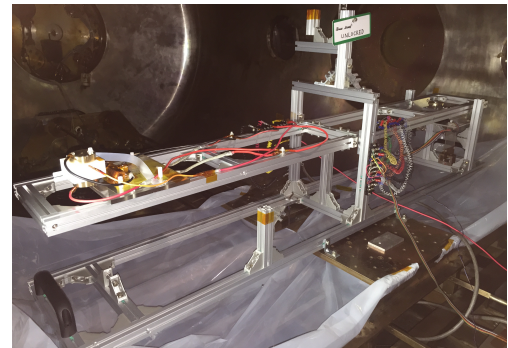


Fig 3.2 スラストスタンド外観

このスラストスタンドは PPT が推力を発生させた時、シーソーのように地上に対して水平な軸を中心に減衰振動する。PPT が発生するインパルスビットの計測は、この振動の波形をレーザ変位計によって取得し、理論的な減衰振動関数にフィッティングすることで行った。フィッティングによって得た減衰振動関数の振幅項を A とすると、インパルスビット I_{bit} は次式で表される。

$$I_{bit} = \frac{A I \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}{L_{PPT}} \quad \dots (3.1)$$

ここで、 I はスラストスタンドの慣性モーメント、 ω_n は固有振動数、 ζ は減衰比、 L_{PPT} は振動中心から PPT までの距離である。

また、PPT のマスショット Δm はインパルス発生前後におけるスラストスタンドのつり合い位置の変化 $\Delta \theta$ から求めることができる。

$$\Delta m = \frac{K \Delta \theta}{g L_{PPT}} \quad \dots (3.2)$$

式 (3.2) において、 K はスラストスタンドのねじりバネ定数、 g は重力加速度である。

3.2.3 電子天秤による質量測定

3.2.1 項の操作⑤において、電子天秤を用いて質量を計測した新 PTFE シート供給式 PPT を構成するパーツの名称を Fig 3. 3 に示す。

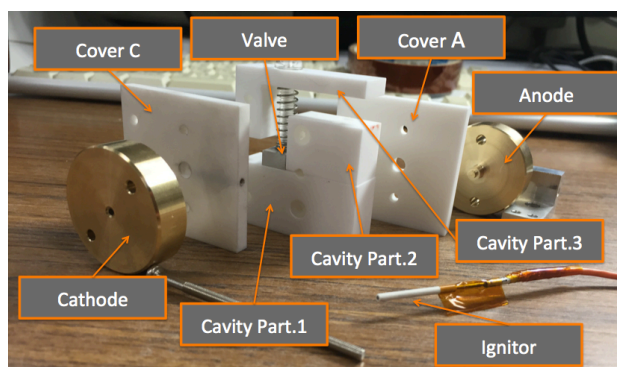


Fig.3.3 新 PTFE シート供給式 PPT の各パーツの名称

この質量測定には以下の目的があった。

- ① 新 PTFE シート供給式 PPT における PTFE ガスのリークの度合いを調べるため
- ② 各 Operation 終了時に PTFE シートの質量を計測し、実際のマスショットを求めるため

目的①において昇華した PTFE ガスは、ノズル以外の箇所からリークする以外に、再凝固してスラスタを構成する各パーツに付着する可能性がある。1 度の Operation が終了するたびに各パーツの質量を計測することでリークによるマスショットの損失の度合いについて調べることができる。

目的②については、スラストスタンドによって求めたマスショットの実験値と電子天秤による実測値を比較することで、実験値の正当性を評価するものである。

3.3 実験結果

300 shot 試験は、無事に終了した。新 PTFE シート供給式 PPT のセラミック製のキャビティが炭化することによって作動不能となることはなかった。供給排出も問題なく行うことができた。

3.3.1 作動時の様子

Fig 3.4 に新 PTFE シート供給式 PPT の作動時の様子を示す。

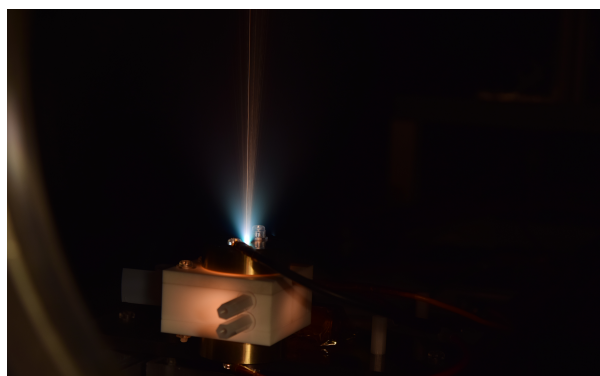


Fig.3.4 新 PTFE シート供給式 PPT 作動の様子

Fig 1. 4 の螺旋供給式キャビティを適用した PPT で観察されたような PTFE ガスのリークは観察されなかった。

3.3.2 インパルスビットおよびマスショット

各 Operation において取得されたインパルスビットおよびマスショットの結果を Fig 3.5 及び Fig 3.6 に示す。両グラフにおいて紫色のプロットは新 PTFE シート供給式 PPT との比較対象である従来の電熱加速型 PPT のものである。

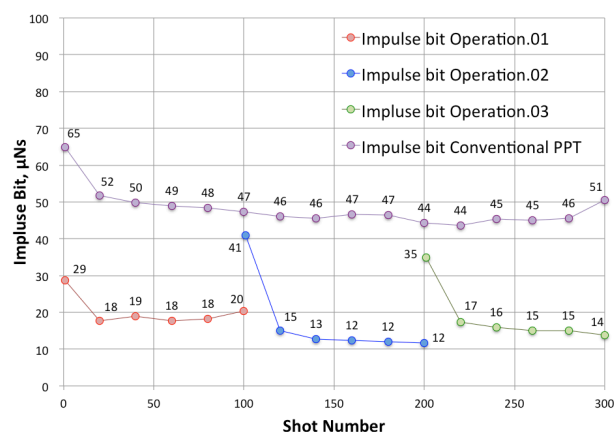


Fig.3.5 インパルスビットの測定結果

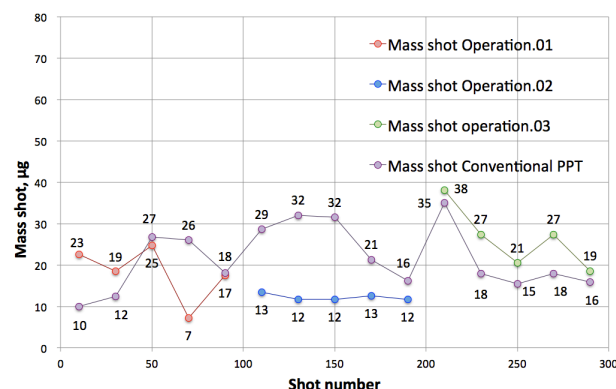


Fig.3.6 マスショットの測定結果

Fig 3.5 より、新 PTFE シート供給式 PPT のインパルスビットは、従来の電熱加速型 PPT のインパルスビットの約 33 % しかないことが分かった。

一方で、Fig 3.6 のマスショットについてはグラフ全体で見ると、おおよそ同じであった。ただし、両者の平均をとって比較すると、新 PTFE シート供給式 PPT は 19 µg であったのに対し、従来の電熱加速型 PPT では 22 µg とやや後者の方が上回る結果となった。また、電子天秤によるマスショットの実測値は 30 ~ 40 µg であり、実験値が実測値より 33 ~ 50 % 下回る結果となった。

3.3.3 各パーツの質量変化

次の表に各 Operation 終了時にとったパーツの質量およびその変化量を示す。Table 3.1 において赤字で示されているのは、前の Operation 終了時から質量が増加したことを示している。Operation.02 終了時に、ほとんどのパーツの質量が増加する結果となった。

Table 3.1 各パーツの質量と変化量

		before Operation	after Operation.01	after Operation.02	after Operation.03
		[g]	[g]	[g]	[g]
Anode	AVE	79.7889	79.7885	79.7881	79.7879
	ΔM		0.0004	0.0004	0.0001
Cathode	AVE	78.6174	78.6169	78.6166	78.6164
	ΔM		0.0005	0.0003	0.0002
Cover A	AVE	24.3293	24.3287	24.3334	24.3321
	ΔM		0.0006	0.0047	0.0013
Cover C	AVE	24.1652	24.1645	24.1666	24.1695
	ΔM		0.0007	0.0021	0.0030
Cavity part.1	AVE	32.9244	32.9243	32.9267	32.9257
	ΔM		0.0001	0.0024	0.0011
Cavity part.2	AVE	13.5967	13.5965	13.5973	13.5963
	ΔM		0.0002	0.0008	0.0010
Cavity part.3	AVE	12.8728	12.8725	12.8739	12.8733
	ΔM		0.0003	0.0014	0.0006
Valve	AVE	2.6733	2.6732	2.6728	2.6727
	ΔM		0.0001	0.0004	0.0001
Ignitor	AVE	5.0146	5.0143	5.0144	5.0140
	ΔM		0.0003	0.0000	0.0004
Total	SUM(AVE)	274.3157	274.2801	274.2868	274.2808
	ΔM		0.0355	0.0067	0.0061

4. 新 PTFE シート供給式 PPT の性能と課題

4.1 PTFE ガスのリークとマスショット

前章の結果から、新 PTFE シート供給式 PPT は PTFE ガスがノズル以外の箇所からリークしていると推察される。Table 3.1 より、Operation.02 終了時にほとんどのパーツの質量が増加しているからである。加えて、以下の Fig 4.1 と Fig 4.2 は PTFE ガスが再凝固したものと思われる黒い物質が各パーツに付着した様子を示す

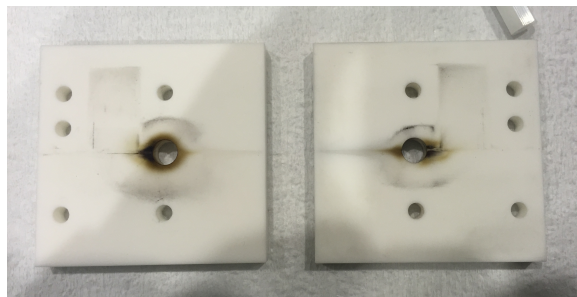


Fig 4.1 Cover A と C におけるリーク痕

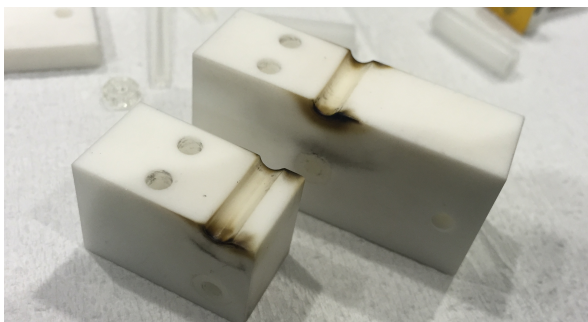


Fig 4.2 Cavity Part.1 と 2 におけるリーク痕

これらの写真からもリークしていたことが分かる。両図において黒い物質が付着している箇所は、パーツとパーツの面接触による接合部であり、本来 PTFE ガスに晒されない箇所である。また、試作バルブが上下する空間にも黒い物質が付着した痕が観察できる。これらから、昇華した PTFE ガスは全てカソードのノズルから放出されず、パーツ間の面接触部における隙間や、試作バルブとカバー A、C との隙間などに侵入していたことが分かる。また、Fig 3.4 から目視できる PTFE ガスが観察されていないことから、リークした PTFE ガスはそのほとんどがリーク箇所からスラスト外へは放出されず、再凝固してパーツに付着したと考えられる。

仮にこの仮説が真ならば、パーツの質量増分の合計は PTFE シートのマスショットよりも小さくなければならない。しかし、本実験ではそうはならず、Operation.02 におけるパーツの質量増分が 10 mg に対して、PTFE シートのマスショットが 3.5 mg という結果となった。このようになった原因としては、毎回 Operation を終了するたびに大気開放を行ったために各パーツの表面に大気中の水分等が付着してしまったことが挙げられる。

マスショットにおいて、新 PTFE シート供給式 PPT の実験値が従来の電熱加速型 PPT の実験値より若干下回っていることは、上記によって説明できる。つまり、リークした後スラストのパーツに付着した PTFE ガスの分だけマスショットが減少したということである。

Operation.03 においてカバー C の質量のみが増えている。これは、スラスト方向においてカバー C より上流に位置するパーツに付着していた再凝固した PTFE ガスが、インパルスビット発生の際に再び昇華され、カバー C に再付着したか、ノズルを介して放出された可能性があることを示している。

4.2 インパルスビット

Fig 3.5 より、新 PTFE シート供給式 PPT のインパルスビットは従来の電熱加速型 PPT のインパルスビットと比較して 3 分の 1 程度しかない。この原因として考えられるのは、新 PTFE シート供給式 PPT の構造上の問題で 2 点ある。

1 点目は、前節で述べたように PTFE ガスが新 PTFE シート供給式 PPT のパーツ間の隙間にリークしていたため、インパルスビットに寄与できるマスショットの量が減少してしまったということである。

2 点目は、新 PTFE シート供給式 PPT にはキャビティから試作バルブまでの間にシートが通る空間があり、この空間分だけキャビティ容積が従来のものと比較して大きくなっている。これよりインパルスビット発生時のキャビティ内の圧力が小さくなりインパルスビット低下につながったと考えられる。

4.3 新 PTFE シート供給式 PPT の現状と課題、今後の展望

以上まで述べてきた事柄により、現状においては未だ PTFE シート供給式 PPT は実用可能であるとはいえない。そこで、今後より実用へ近づくために PTFE シート供給式 PPT の現状と問題点、そしてそれに対する今後の展望として以下にまとめた。

4.3.1 PTFE シートの供給排出

今の設計は、PTFE シートをスラスト軸に対して垂直にキャビティに挿入する方式であり問題なく行えている。現状はキャビティ内に未昇華 PTFE シートが残留してしまうことを防ぐため、ある程度使用した PTFE シートは排出する方式をとっているが、推進剤利用効率の観点から排出を行わなくても済むような方式を模索する必要があるかもしれない。

4.3.2 PTFE ガスのリーク

試作バルブを用いて対策を試みたが、今回は失敗に終わった。バルブでは対処しきれないソケット間の隙間等からリークが確認されたからである。このため、今後の対策としてパーツ間の接合をより強力なものとする必要がある。また、パーツの面接触部を鏡面加工することで限りなく隙間を無くす必要がある。

4.3.3 キャビティ内壁の炭化

今回の 300 shot 試験においては、アノードからカソードにかけて導通してしまうような炭化は生じなかった。現状は問題ないといえる。ただし、PTFE ガスのリークによってパーツ間の接合部が炭化しているため、これが今後アノードカソード間を導通させる可能性は否めない。今後、より作動回数の多い試験を行う予定である。その結果次第で、前項で述べた対策以外にまた別の対策をしなければならない可能性がある。

5. 結論

本研究により得た結論を以下に列挙する。

- 新 PTFE シート供給式 PPT を設計製作し、電熱加速型 PPT の性能維持を試みた
- PTFE シートの供給排出およびアノードカソード間の炭化は現状では問題ない。
- PTFE ガスのリーク対策として試作バルブを試したが、それでは対処しきれないソケット間の隙間からリークが生じた。
- PTFE ガスのリークが原因の 1 つとなって、インパルスビットおよびマスショットは従来の電熱加速型 PPT より低い。

<参考文献>

- [1] 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.
- [2] 大阪工業大学「電気推進ロケットエンジン搭載小型スペースシッププロジェクト」
www.oit.ac.jp/elc/~satellite/index.html
- [3] Tanaka, M., Kisaki, S., Ikeda, T., and Tahara, H., “Research and Development of Pulsed Plasma Thruster Systems for Nano-Satellites at Osaka Institute of Technology”, 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Oct. 9-12, 2012, Seoul, Korea, 517-522
- [4] Egami, N., Inoue, Y., Nakano, S., Ikeda, T., and Tahara, H., “Research and Development of Nano-Satellite PROITERES with Electric Rocket Engines at Osaka Institute of Technology”, 2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Oct. 9-12, 2012, Seoul, Korea, 523-528
- [5] Palumbo, D. J. and Guman, W. J., “Effects of Propellant and Electrode Geometry on Pulsed Ablative Plasma Thruster Performance,” AIAA-75-409, March 1975.
- [6] 班太郎, 「テフロンシート供給式パルス型プラズマスタの実験的研究」, 東京大学修士論文, 2012.
- [7] 斉藤健史, 「粉体推進剤を用いたパルス型プラズマスタの実験的研究」, 東京大学修士論文, 2007.