

テフロンシート供給式パルス型プラズマスラスタの実験的研究

Experimental study on Teflon-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 (ISAS/JAXA), 小泉 宏之 准教授 (東京大学)

1. 諸論

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、固体推進剤としてテフロン®を用いるパルス型プラズマスラスタ (PPT) はこの要求を満たすことができる電気推進機である。

本研究の対象である同軸型 PPT は、平行平板型 PPT と比較して比推力 (燃費) 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、この PPT は解決すべき点がある。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テフロン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、テフロンシート供給式 PPT が先行研究にて考案された (Fig 1. 1)。

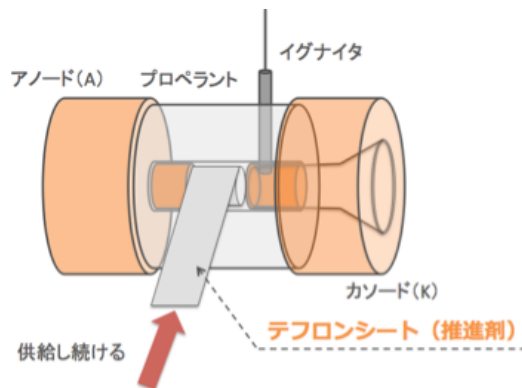


Fig 1.1 テフロンシート供給式 PPT の構造

テフロンシート供給式 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。径が不変のキャビティにテフロンシートを供給し続けることでインパルスビットは維持される。先行研究によってインパルスビット維持の実績を得ることができた。

一方で、テフロンシート供給式 PPT 固有の解決すべき点が大きく分けて 2 点あることが明らかとなった。①供給されたテフロンシートは完全昇華に至らずキャビティ内に残留し、再度の供給を困難にしてしまうということ (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. 3) の 2 点である。



Fig 1.2 未昇華テフロンシート

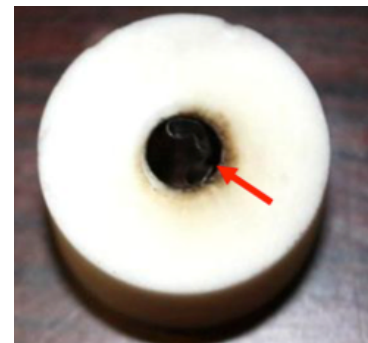


Fig 1.3 キャビティ内壁の炭化

そこで本研究では、上記のテフロンシート供給式 PPT の 2 点の課題を解決し長時間作動を可能とすることを目的とした。

2. 課題の解決策

テフロンシート供給式 PPT の 2 点の解決すべき点に対し、それぞれに解決策を提案し実証した。

2.1 使用済みテフロンシートの排出機構

キャビティ内に残留するテフロンシートに対しては、螺旋状に供給することで供給だけでなく排出も行えるキャビティ (螺旋供給式キャビティ) の設計によって解決を試みた。Fig 2. 1 は螺旋供給式キャビティの CAD 図である。

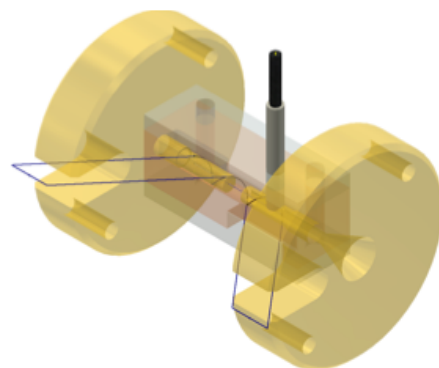


Fig 2.1 螺旋供給式キャビティ CAD 図

このキャビティは幅 6 mm のテフロンシートをキャビティ中心軸に対して約 50° の角度から供給すれば、テフロンシート間の隙間はほぼなく螺旋状に 1 回転半できるような設計となっている。

2.2 キャビティ内壁の炭化の原因

続いてキャビティ内壁の炭化に対しては、まず仮説を 2 つ立て、その仮説に基づく対策として保護シートの適用を考案した。

2.2.1 〈仮説 1〉昇華に伴いシートに生じる穴、縮れ

炭化の仮説の 1 つ目として、使用を重ねたことでテフロンシートに穴が空く、または縮れが生じキャビティ内壁が露出し、ここから炭化が進行することが挙げられる。Fig 2.2 は炭化の〈仮説 1〉を図示したものである。

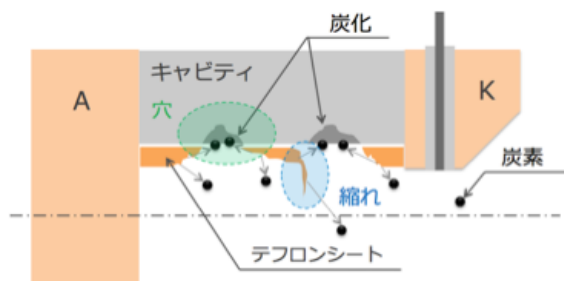


Fig 2.2 昇華に伴いテフロンシートに生じる穴、縮れからの炭化

これは先行研究の結果 (Fig 1.2) より正当である。

2.2.2 〈仮説 2〉キャビティ内壁側のテフロンシートの昇華による直接的な炭化

2 つ目の仮説は、主放電の際テフロンシートは両面が昇華しており、キャビティ内壁側のテフロンシートの昇華が内壁を直接炭化させているということである。Fig 2.3 は〈仮説 2〉を簡単に図示したものである。

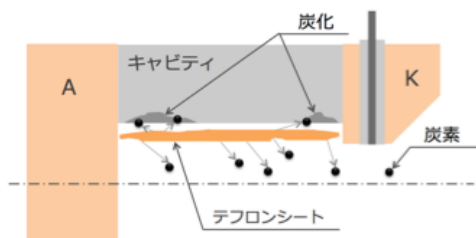


Fig 2.3 キャビティ内壁側のテフロンシート昇華による炭化

〈仮説 2〉は真偽が定かではないので検証する必要がある。

2.3 仮説に基づく炭化防止策

前節の 2 つの仮説に基づき、この仮説を同時に解決できるような方法を考案した。

2.3.1 保護シートによる炭化防止

Fig 2.4 のように供給するテフロンシートのキャビティ内壁側の面に保護シートを適用することを考えた。

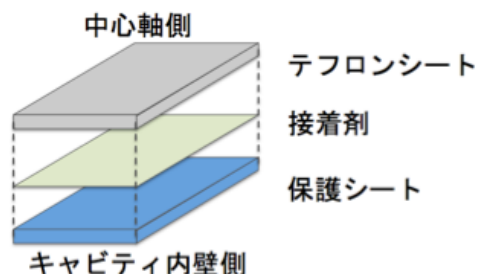


Fig 2.4 保護シートのテフロンシートへの適用

保護シートをテフロンシートに接着することで、

- テフロンシートに穴が空いても、保護シートによってキャビティ内壁は露出しない。
 - キャビティ内壁側のテフロン昇華は保護シートによって放電電流から保護されることで生じない。
- という 2 つの効果を期待できる。このことから〈仮説 1〉と〈仮説 2〉を同時解決できると期待した。

2.3.2 テフロンシートの使用を穴が空かない程度に限定することによる炭化防止

前節において〈仮説 2〉の真偽は不明であるということ述べた。以下に挙げる炭化防止の方法は〈仮説 2〉が偽であった場合有効となる手段である。つまり、テフロンシートを使用する際、穴が空かない程度の使用に限定しそこで排出するという方法である。

〈仮説 2〉が偽ならば、炭化の原因は〈仮説 1〉のみであるからこの方法で十分炭化を防止できるはずである。一方でもし真ならば、この方法でも炭化を生じてしまうはずである。つまり、テフロンシートの使用の限定というこの方法を試行することは〈仮説 2〉の実証実験も兼ねる。

3. 実験方法と実験結果

3.1 螺旋供給式キャビティの実証

螺旋供給式キャビティを実際に製作した。Fig 3.1 は螺旋供給式キャビティを適用したテフロンシート供給式 PPT (螺旋供給式 PPT) の写真である。

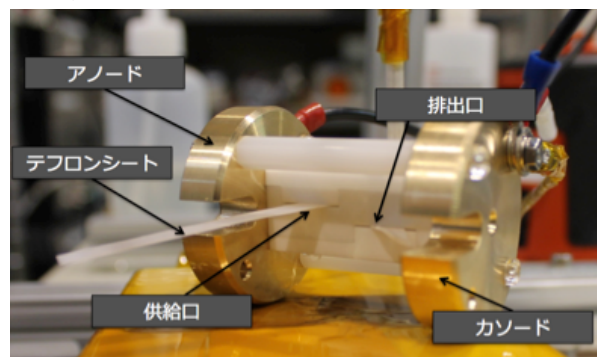


Fig 3.1 螺旋供給式 PPT

実証実験は、①手動によるテフロンシートの供給排出、②真空チャンバー内 (10 mPa 未満) での作動試験、③放電電流測定 の 3 種類を行った。この結果、螺旋供給式 PPT は手動によるテフロンシートの供給排出に成功し、また同軸型 PPT として 30 ショットの正常作動にも成功した。Fig 3.2 は螺旋供給式 PPT の作動の様子である。



Fig 3.2 螺旋供給式 PPT 作動時の様子

放電電流測定の結果、寸法条件を同一にした従来の同軸型 PPT の放電電流と波形の傾向が一致したことが確認できた。また以上放電等もなかった。Fig 3.3 は放電電流の波形を示したものである。

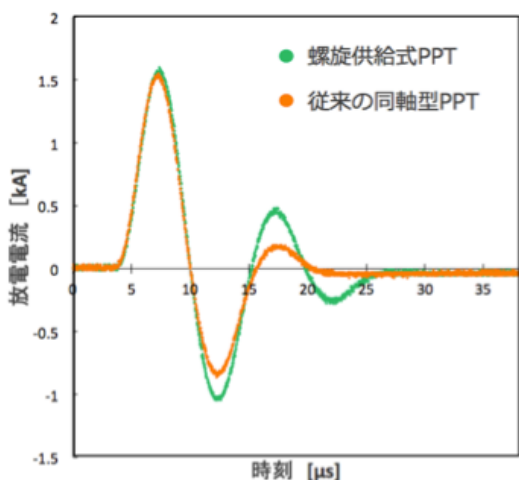


Fig 3.3 螺旋供給式 PPT と従来の同軸型 PPT との放電電流の比較

以上の結果から、螺旋供給式キャビティによる残留テフロンシートへの対策は一定の成果が得られた。

3.2 炭化防止策の実証

3.2.1 保護シートの有用性の実証実験とその結果

炭化の原因の〈仮説 1〉と〈仮説 2〉を同時解決できると期待している保護シートには耐熱性、電気絶縁性に優れたガラステープを選定した。Fig 3.4 はテフロンシート（厚み：0.1 mm）にガラステープ（厚み：0.18 mm）を接着したものの写真である。

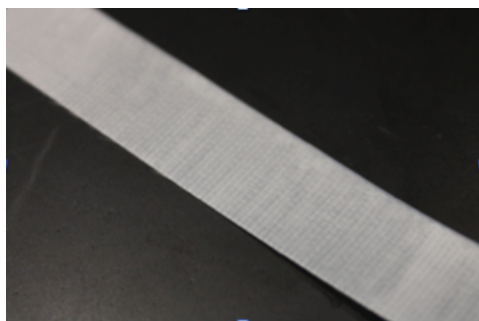


Fig 3.4 テフロンシートにガラステープを接着したもの

この保護シートを適用したテフロンシート（保護処理テフロンシート）を先行研究にて使用された従来のテフロンシート供給式 PPT（キャビティ内径：5 mm、電極間距離：9 mm）に供給し、主放電が起きなくなるまでショットを繰り返した。

この実験の結果、約 1,160 Shot を達成し炭化の回避に成功した。Fig 3.5 は保護処理テフロンシート供給式 PPT の作動時の様子である。

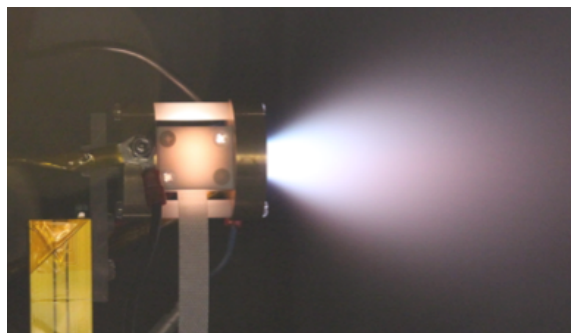


Fig 3.5 保護処理テフロンシート供給式 PPT 作動の様子

1,160 Shot 後のキャビティの様子を確認したところ、のように炭化を回避しており、また保護処理テフロンシートはテフロン部の箇所はほとんど昇華していることを確認した。

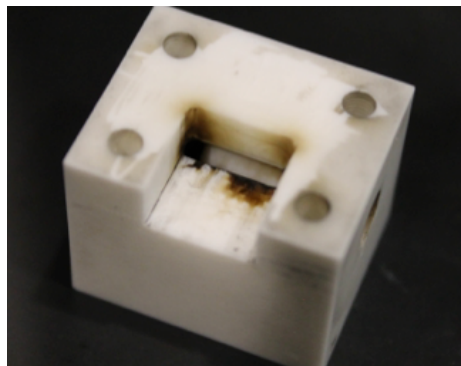


Fig 3.6 保護処理テフロンシート供給式 PPT の 1,160 後のキャビティの様子

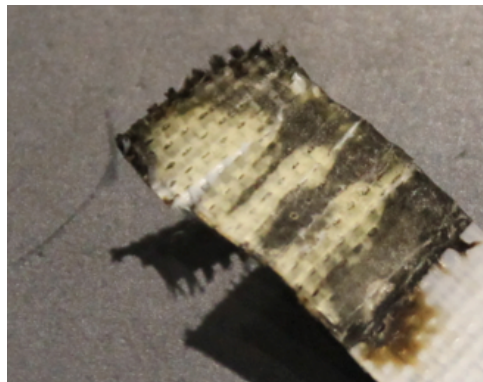


Fig 3.7 1,160 Shot 後の保護処理テフロンシート

この結果から保護シートに炭化防止における一定の効果を確認した。

3.2.2 〈仮説2〉の実証実験を兼ねたテフロンシートの使用の制限による炭化防止の実証実験とその結果

ここでは、厚み0.3 mmのテフロンシートを前項と同一のテフロンシート供給式PPTに供給し、1,160 Shot分の主放電を繰り返した。前項において合計厚みが0.28 mmの保護処理テフロンシートは1,160 Shotでほとんどのテフロン0.1 mm分が昇華していた。このことから厚み0.3 mmのテフロンシートを用いて1,160 Shotの主放電を生じさせれば、おおよそ0.2 mm程度残ることになり穴は空かないだろうと考えた。この実験後のキャビティおよびテフロンシートの様子をそれぞれ、に示す。

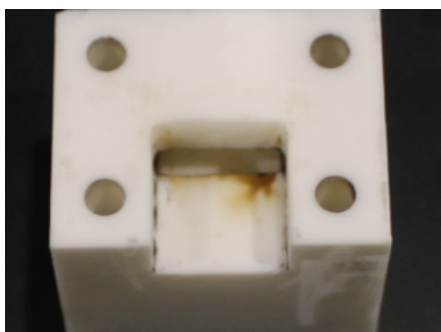


Fig 3.8 厚み0.3 mmテフロンシートを供給した場合の1,160 Shot後のキャビティの様子



Fig 3.9 1,160 Shot後の0.3 mmのテフロンシート

この結果からは前項同様、キャビティ内壁は炭化から免れておりテフロンシートも穴が空いていないことが分かる。つまり、テフロンシートの使用を穴が空かない程度の利用に制限することは炭化防止において有効であることが分かった。そして、炭化の原因の〈仮説2〉キャビティ内壁側のテフロンシート昇華による直接的な炭化という説は否定された。

4. 考察

4.1 螺旋供給式キャビティの効果と欠点

螺旋供給式キャビティはテフロンシートの供給排出を行うことができた。さらに実際の作動の様子と放電電流の傾向から、同軸型PPTとして正常作動可能であることも確認することができた。しかし、2つの課題が浮き彫りとなった。1つは螺旋状に供給したテフロンシートの間隙に炭化の跡を発見したことである (Fig 4.1)。



Fig 4.1 螺旋供給式キャビティに生じた炭化の跡

この炭化は、設計段階では発生しないはずであったがそれにも関わらず生じてしまったことである。アノードカソード間の導通に直結する現象であるため対策が必要だが、供給方式を根本から考え直す必要がある可能性がある。

2つ目は、螺旋供給式PPTは主放電の際、供給口と排出口からプルームが確認されたことである。これはインパルスビットに損失を与える可能性がある。このためスラストスタンド等を用いてインパルスビットの測定を行い、従来と比較してどれほどの損失となっているかを把握した上で具体的な対策をとる必要がある。

以上より、螺旋供給式キャビティはテフロンシートの残留を解決することは可能であるが、キャビティの炭化、インパルスビットの損失の可能性という2つの課題が残るといった結果となった。

4.2 保護シートの有用性について

保護シートによる炭化回避はガラステープによって成功し、その有効性が示された。しかし一方で、テフロンシートを穴が空かない程度までの使用によっても炭化を回避できるということが分かった。これより、現状では保護シートの有用性はテフロンシートのみの場合と比較して決定的だとはいえない。しかし、推進剤利用効率およびテフロンシートのみを使用よりも安定的な排出を行えるという点で将来的に可能性があるといえる。つまり、より性能のよい保護シートを模索することは衛星の長時間作動ミッションにおいて非常に有用であると考えられる。

5. 結論

本研究により得た結論を以下に列挙する。

- 螺旋供給式キャビティによってキャビティ内におけるテフロンシートの残留の課題を解決した。
- 保護シートによって炭化の回避に成功した。
- 穴が空かない程度にテフロンシートの使用を制限することによっても炭化の回避に成功した。したがってキャビティ内壁側のテフロンシートの昇華による直接的な炭化の仮説は考えられない。

<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ラスタの実験的研究」, 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ラスタの実験的研究」, 東京大学修士論文, 2007.