

## 推進剤供給による電熱型 PPT のトータルインパルス向上

# Increment of the Total Impulse of an Electrothermal Pulsed Plasma Thruster by Propellant Feeding

○吉川 哲史(東大・院)・國中 均 (ISAS/JAXA)

○Tetsushi Yoshikawa(The University of Tokyo)・Hitoshi Kuninaka (JAXA)

### Abstract

In this paper, a propellant-fed PPT was manufactured in order to improve the total impulse of an electrothermal pulsed plasma thruster. An electrothermal PPT has a critical issue that the impulse bit decreases with increasing the number of operational shots due to an expansion of its cavity. The concept of the manufactured PPT is to maintain the impulse bit by keeping the cavity volume and shape. As the result of 50,000 shots operation, maintenance of the impulse bit was accomplished compared to the conventional PPT. Besides Supplied PTFE Rods were dominantly consumed compared to a PTFE cavity.

### 1. 緒言

近年の宇宙開発では、世界の政治的・経済的な理由で衛星の小型化が望まれている<sup>(1)</sup>。小型衛星には

- コストの削減
- 開発期間の短縮
- ミッション遂行上のリスク低減

の3つの利点が挙げられる。具体的には、小型の衛星で小規模であることによる製造コスト・試験コストの削減、ピギーバック衛星となることで打上げコストを小さくできる。小型化による設計期間・試作期間の短縮が期待できる。また、複数機の小型衛星によってフォーメーションフライトさせることで多機能大型衛星に匹敵する機能をもたせた場合、数機あるうちの1機に不具合が生じてもミッションを続行可能であって、多機能大型衛星1機と比較してリスク低減できる。

このようなメリットをもつ100 kg以下の小型衛星は、今後商用利用のために高度数100 kmの低軌道にて運用されることが予想される。しかし、低軌道での衛星の長期運用は、大気抵抗などの擾乱によって徐々に飛行高度が低下する。このため、これを補償し衛星の運用期間を長期化する上でスラスタ装置が必須となる。

衛星に搭載されるスラスタには化学推進、電気推進の2種類が存在するが、宇宙空間で運用する衛星には低推力・高比推力の電気推進が適している。パルスプラズマスラスタ(Pulsed plasma thruster : PPT)<sup>(2)</sup>は電気推進の一種であり、上述の小型衛星用スラスタ装置として注目されている。PPTは既に1960年代から実際に宇宙利用されてきた。PPT

の主な特徴は以下4点である。

- 構造が簡素であり、軽量(数100 g程度)
- 低消費電力(数W~数100W)
- 微小推力のパルス状出力
- 固体推進剤のPTFEを使用

PPTは、Figure 1.1に示すように構造が簡素であり、数10 kgで消費電力が数kW以上であるイオンスラスタ等と比べて非常に軽量、低消費電力である<sup>(3)</sup>。また、数100 μNs~数mNsの微小なインパルスビットを指定した時間間隔でパルス状に出力できるので、推力レベルの調整が任意に行える。さらに、PPTの推進剤として使用されるPTFE(Polytetrafluoroethylene: Teflon®)は常温固体で、キセノン等の気体推進剤と比較してタンクや加圧装置などが必要なく、化学的に安定で、ヒドラジンのような毒性もなく安全である。これらの点はピギーバック衛星となる上でも大変有利である。

PPTには電磁型、電熱型の2つの加速方式が存在する。電熱型PPTは電磁型と比較して投入エネルギーに対して得られる推力が大きい。このため、高度数100 kmの低軌道において小型衛星を長期間にわたって運用する場合、消費電力の制約や制御期間も限られてしまうという観点から電熱型PPTが望ましい。

しかしながら電熱型PPTには、致命的な欠点として連続作動に伴うインパルスの低下<sup>(3)</sup>、チャーリング<sup>(4)</sup>等によるミスショット・異常放電の発生といった問題を抱える。このため、電熱型PPTはその発生できるトータルインパルスに限りがある。スラスタ重量あたりのトータルインパルス(実効比推力)と比較すると、イオンエンジン $\mu 10$ やホ

ールスラスタ SPT シリーズは $\times 10^4$  m/s のオーダーであるのに対し、電熱型 PPT では高々 $10^2$  m/s のオーダーで著しく小さい。電熱型 PPT のトータルインパルス向上のため、これまで他研究機関にて、大キャパシタによる高エネルギー化・多放電室によるクラスタ化が行われてきた。これらの方法はいずれも小型衛星に搭載する上で強みであった軽量さ・コンパクトさを失い、チャーリング等の問題への根本的な解決策とはいえない。クラスタ化については、推力不均一によるロールトルクの発生により、姿勢制御系にさらなる負担を強いることになる。

そこで本研究では、推進剤供給方式による電熱型 PPT のトータルインパルス向上を試みる。放電室内部に固体推進剤を供給し続けることによって放電室容積および形状を維持する。これにより、発生インパルスの維持および放電室容積拡大に伴って発生するチャーリング等の発生を緩和できると期待する。

## 2. 電熱型 PPT に適用する推進剤供給方式

### 2.1 設計指針

これまでの研究結果によって、推進剤供給式 PPT にへの要求事項は 5 つ存在するものとした。これらをクリアすることが設計指針となる。

- ① 供給方法 (供給する PTFE の形状・供給装置)
- ② 供給口からのブルーム漏れの防止
- ③ キャビティ容積・形状の維持
- ④ ミスショットしない設計
- ⑤ 異常放電しない設計

製作した推進剤供給方式を適用した電熱型 PPT (推進剤供給式 PPT) を以下に示す。上記の①～⑤を満足するような設計を施している。

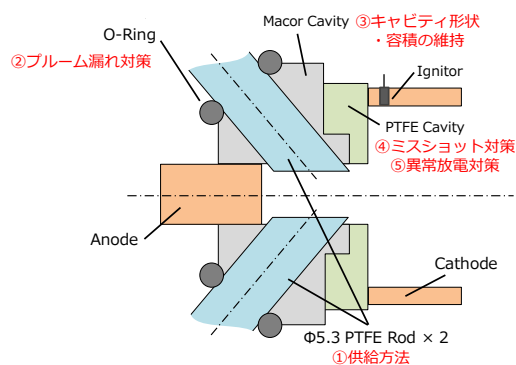


図 1 推進剤供給式 PPT 構造

### 2.2 ①・② 供給方法とブルーム漏れの防止

まず、「①供給方法」についてであるが、ここでは供給装置ではなく供給する PTFE の形状について触れる。供給する PTFE の形状はロッド (丸棒) とした。選定理由は「②供給口からのブルーム漏れの防止」の観点から、円形断面であるロッドであれば Ultra-Torr に代表される O リングに

よる封止が簡便に行える点で最適であると判断したためである。PTFE バー (角棒) や PTFE シート (薄板) の場合エッジが存在するため、この箇所においてリーク防止が難しい。またシートの場合は連続作動時において、その形状を保てないといった問題が存在するため不採用となった。

### 2.3 ③ キャビティ容積・形状の維持

「③キャビティ容積・形状の維持」は、上記で確定した供給される PTFE ロッドの主放電による昇華量が、供給先であるキャビティの昇華量と比較して、十分に大きくことが条件となる。言い換えれば、キャビティが昇華されず、供給されるロッドのみが昇華されるような環境であればキャビティ容積・形状の維持において理想的であるということである。選択肢として、キャビティの材質として PTFE・添加物充填 PTFE もしくは高密度 PTFE・セラミックが挙げられる。

まず、PTFE キャビティに PTFE ロッドを供給する場合について述べる。PTFE キャビティの使用に際し、供給したロッドの本数は 8 本であり、キャビティ内壁 (PTFE キャビティ+PTFE ロッド 8 本) の表面積に占めるロッド端面の割合が十分にある状況を構築した。これにより PTFE ロッド 8 本が PTFE キャビティと比較して優位に昇華されることが期待された。しかしながら結果として期待された効果は得られない。具体的には、2000 ショット作動後において昇華量におけるロッド 8 本と PTFE キャビティの比は 70:30 であったのに対し、10,000 ショット後では 57:43 に落ち込み、ロッド 8 本の昇華の優位性が失われてしまう。加えて、キャビティおよびロッド端面の昇華が不均一であり、キャビティは供給されるロッドの生え際付近が優先的に昇華され、ロッドは端面が先細くなるように昇華される。

続いて添加物充填 PTFE および高密度 PTFE は、従来の PTFE と比較してキャビティ容積の維持において有利である。添加物充填 PTFE や高密度 PTFE はガラスビーズを添加する、冷却過程などの製造工程を工夫するなどして PTFE を高密度化したものである。PTFE が高密度化することで、主放電によって従来 PTFE の場合と同質量昇華された場合でも、昇華体積を小さくできる。ガラスビーズ充填 PTFE なら、従来の PTFE と比較して 30 % 程昇華量が少なく、キャビティ容積維持において優位性を期待できる。ただし、キャビティ材質は根本的には PTFE であるため、従来の PTFE キャビティにロッドを供給した場合の昇華不均一な現象は防止できないと思われる。

3 番目の方法として、セラミック製のキャビティに PTFE ロッドを供給する方法がある。セラミックは耐熱性に優れ、PPT の主放電による大電流でも昇華されない。そこに PTFE ロッドを供給すれば、その箇所においては PTFE ロッドのみ昇華されるといった理想的なキャビティ環境を構築できる。こういった観点から、キャビティ容積・形状の維持を目的としてセラミックキャビティを選定した。使用した素材はマコール<sup>®</sup>で、切削加工が可能なマシナブルセラミックである。

## 2.4 ④・⑤ ミスショット・異常放電対策

前項にてセラミックキャビティが選定されたが、セラミックキャビティに PTFE ロッドを供給するだけでは、異常放電およびミスショットが発生し、正常な作動ができない。結論から述べれば、セラミックキャビティとカソードの間に PTFE キャビティを直列に接続する必要がある。

カソード側での PTFE キャビティの存在は、イグニッションしたにも関わらず主放電が誘起されないミスショットを防止する上で必要である。前項において添加物充填 PTFE としてアルミナ充填 PTFE を試行した際、数 100 ショット程度でミスショットが発生した。イグニタ近傍の PTFE が不足し、主放電を誘起するプラズマの素が生成されなかったためという仮説のもと、アルミナ充填 PTFE とカソードとの間に厚み 0.5 mm の PTFE シートを挟んで作動を行った結果、こちらは 10,000 回以上作動した。故にイグニタ近傍に PTFE が十分に存在している必要がミスショットを防止する上で必要であると言える。もちろん、イグニタ近傍（カソード近傍）で生成したプラズマをアノードまで浸透させ主放電を誘起するためには、電極間にかけてキャビティ内に十分な PTFE が存在しなければならない。実際、PTFE ロッドが供給されていないマコールキャビティと PTFE キャビティを直列につないでキャビティを成した場合には、ミスショットが生じる。

このカソード側に設置される PTFE キャビティは異常放電防止の役割も兼ねる。PPT の原則として、数 kV 印加された電極間の絶縁が PTFE によって可能となるのは、主放電によって PTFE 壁面が昇華され続け常にカーボンフリーな壁面が維持されるためである。マコールキャビティに PTFE ロッドを供給する場合、マコールキャビティ壁面には PTFE 由来のカーボンが付着し、その領域は電導性をもつ。つまり、マコールキャビティ～アノード・カソードのいずれかの間に常に PTFE キャビティが介在しなければ異常放電が発生することとなる。その上で、カソード側にミスショット防止のために存在する PTFE キャビティは、異常放電防止のために重要な存在となる。「③キャビティ容積・形状の維持」のためには、この PTFE キャビティも供給方式に当てはめるのが理想であるが、供給方式を取る場合、供給部と被供給部との結合部は少なからず隙間が存在し、そこはカーボン汚染されやすく結果として異常放電防止ができない。

## 3. 試験条件

製作した推進剤供給式 PPT の連続作動試験を行った。投入エネルギーは 20 J とし、作動周波数は 1 Hz で行った。また、2,000 ショット作動おきに大気開放し、手動による PTFE ロッド供給を行った。また、性能取得はシーソー型スラストスタンドを用い、PPT のマスショットはスラストを分解することなく本スタンドを用いてリアルタイムに測定された。

## 4. 連続作動結果および考察

推進剤供給式 PPT の 50,000 ショット作動におけるインパルスビットの履歴を図 2 に示す。2,000 ショットおきに行った PTFE ロッドの追加供給によってその都度インパルスビットが回復していることが確認できる。インパルスの水準が徐々に低下しているが、これは PTFE キャビティが昇華されることでキャビティ容積が拡大したことに起因すると推察される。しかし、同じ試験条件で取得した従来の電熱型 PPT のインパルスビットの履歴と比較すると、初期～20,000 ショットまでのインパルスで従来に劣るものの、性能維持の効果によりそれ以降は推進剤供給式 PPT が逆転している。

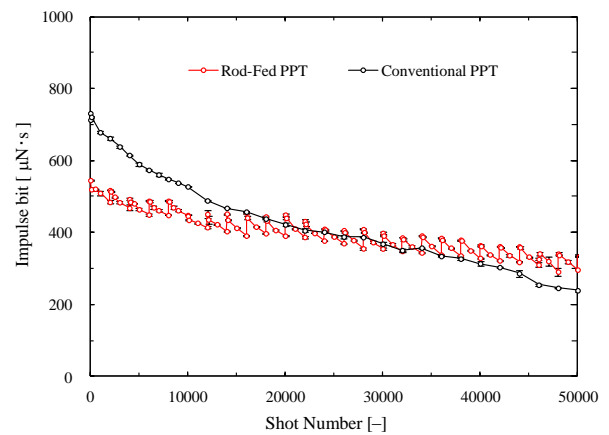


図 2 インパルスビットの履歴

続いて、消費した推進剤質量の履歴を図 3 に示す。50,000 ショット後において、2.7 g を推進剤として消費したことがわかる。この質量は、従来の電熱型 PPT では  $\phi 5.5$  のキャビティ直径から作動開始した場合、およそ  $\phi 13.6$  に拡大したことを意味する。図 4 は 50,000 ショット後におけるカソード側から見たキャビティの写真であるが、マコールキャビティは期待した通り昇華されておらず、ロッドも端面が均一に昇華されている。また PTFE キャビティは最下流が最も径が拡大しておりその長さは 11.2 mm であった。このことから、従来の場合で  $\phi 5.5$  から 13.6 にキャビティが拡大した場合に匹敵する質量を PTFE ロッドの昇華量が占めていたことがわかる。これにより、推進剤供給式 PPT によるキャビティ容積・形状の維持が行えたことが実証されたとと言える。

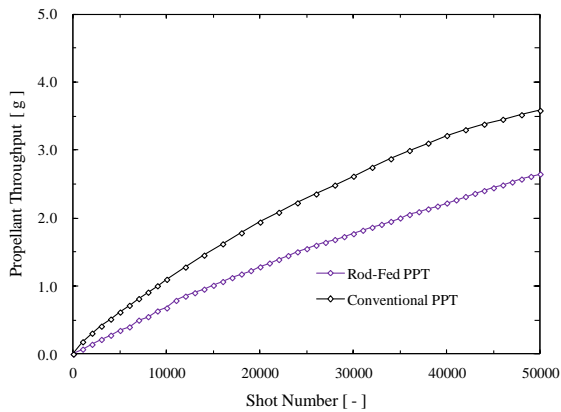


図3 消費推進剤質量の履歴

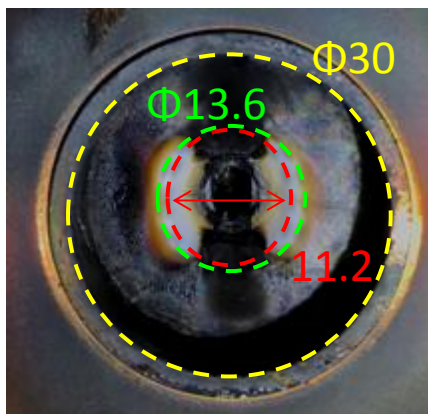


図4 50,000 ショット後のキャビティの様子

## 5. まとめ

本研究では、電熱型 PPT の連続作動によるキャビティ容積拡大に起因するインパルス低下が招く低トータルインパルスを改善すべく、推進剤供給式 PPT を試作・試験した。ブルーム漏れなく供給できるとして、PTFE ロッドが供給する推進剤として選定され、昇華されないマコールキャビティに PTFE ロッドを供給し、マコールキャビティとカソードの間に PTFE キャビティを直列に配置した。この結果、従来と比較しキャビティ形状・容積を維持しつつ、ミスショットや異常放電が生じない設計を可能とした。50,000 ショットの連続作動試験の結果、

- 2,000 ショットおきの手動によるロッド供給によって従来と比較して、インパルスビットの維持を達成した
- シーソー型スラストスタンドによる消費推進剤質量の測定結果によって、全昇華量の殆どを PTFE ロッドの昇華量が占め、実際のキャビティの様子からもキャビティ容積・形状が従来と比べ維持された

今後の改良として、PTFE キャビティのチャーリング防止を行わなければならない。図に示すように、チャーリン

グは PTFE ロッドが供給される方向から 90 度位相のずれた箇所に発生しており、PTFE キャビティでのチャーリングの発生は PTFE ロッドの供給方向が関わっている可能性がある。チャーリングが進行すると、異常放電の発生が懸念されるので、今後の研究によって原因究明および対策がなされるべきである。

## 参考文献

- 1) 折井武, 「小型衛星の動向と応用」, 『会報宇宙-21 世紀日本の宇宙戦略』第 54 号, 2006 年 3 月, pp. 173-184.
- 2) Burton, R. and Turchi, P. "Pulsed Plasma Thruster", *Journal of Propulsion and Power*, 1998, Vol. 14, No. 5, pp. 716-735.
- 3) Daiki Mimura, Kyohei Umeda, Yohei Kitazono, Takahiro Shindo, Junichiro Aoyagi, and Haruki Takegahara "Evaluation of Pulsed Plasma Thruster Performance by Increase Electric Power" In 32nd International Electric Propulsion Conference, Wiesbaden, Germany, September 11-15, 2011. IEPC-2011-306
- 4) Keidar, M., Boyd, I., Antonsen, E. L., Gulczinski III, F. S., & Spanjers, G. G. (2004). Propellant Charring in Pulsed Plasma Thrusters. *Journal of Propulsion and Power*, 20(6), 978-984. <https://doi.org/10.2514/1.2471>