

## 論文の内容の要旨

論文題目 液体推進剤を用いたパルス型プラズマスラスタに関する研究

氏名 各務 聡

### 1. 研究の背景

宇宙開発の高効率化、コストダウン化により、人工衛星のマイクロ化や大型構造物の超軽量化が積極的に行われようとしている。それらの推進システムには付加価値が高く、比推力が大きい小型の電気推進機が必要不可欠である。

PPT(Pulsed Plasma Thruster)は、小型・軽量、高信頼性という優れた長所を持っていることから有力な小型電気推進機の候補であり、各国で研究開発が進められている。その一方で、PPTの主流である固体推進剤PPTには解決すべき問題点がある。第1にコンタミネーションの問題である。固体推進剤PPTの唯一の推進剤であるテフロンは、コンタミネーションの原因となる炭素とフッ素からなる物質である。フッ素や炭素は、太陽電池パネルや観測用の光学系に影響を与えることが懸念されており、また、炭素が電極やテフロンの表面に付着することによってPPTが暴走することも報告されている。これまで代替推進剤の研究も行われたが、推進性能や耐環境性の観点からテフロンが最もよいとされており、現在に至ってもなおテフロンが推進剤として利用されている。

第2に推進剤供給の問題がある。PPTを繰り返し作動させるとテフロンは均等に消費されずに中心部がくぼむように消費されていく。すると、推進剤とプラズマの距離が変化するためにミスファイアが起きる。また、推進剤表面におけるアブレーションによって推進剤を供給しているため、推進剤供給量に変化し推進性能の低下する可能性がある。

### 2. 研究目的

以上のような背景を鑑み、本研究では液体推進剤を使用したPPT（以下、液体推進剤PPT）を提案する。低コンタミネーションが期待できる液体推進剤を噴射器によって供給し、コンタミネーションや推進剤供給の問題に対処するのである。気体を推進剤として用いても、コンタミネーションや推進剤供給の問題に対処できるが、気体貯蔵用の耐圧容器が必要となり重量増加につながるため、小型・軽量が求められるPPTには不向きである。また、気体の拡散速度の関係からマイクロ秒の応答時間をもつバルブが必要となり推進剤供給系が複雑化する。それに対し液体は、貯蔵容器の耐圧は蒸気圧程度でよく、液体が気化するのにミリ秒程度の時間を要することから気体用噴射器ほどの厳しい応答時間が求められない。以上のような理由で本研究では液体を利用すること至った。

液体推進剤PPTは、適量の液体を噴射器によって放電チャンネル内に供給し、噴射された推進剤をイグナイタにより点火し、推進剤をプラズマ化して推力を得るのである。すなわち、推進剤供給も放電もパルスので行うのである。PPTの亜種として、推進剤を定常的に供給し、高い繰り返し周波数でパルス放電を行う推進機が研究されているが、推進剤利用効率の関係から放電の繰り返し周波数が高くなるに越したを得ないため、低電力化が難しい。一方、液体推進剤PPTは、推進剤供給と放電がともにパルス動作なので任意の時間間隔で作動させることができ、消費電力を変化させても推進性能は一定のままである。また、推力レベルを繰り返し周波数で制御できる、すなわち推力のデジタル制御が可能になるため、宇宙機の推力制御システムを小型化することもできる。

このように液体推進剤PPTは、固体推進剤PPTの長所と液体推進剤の長所をあわせ持つことができる推進機であるといえる。

本研究は、マイクロスラスタの実現を目指し、低コンタミネーションが期待できる水や低級アルコールを推進剤として利用したときに液体推進剤PPTが作動することを実証し、液体推進剤PPTが十分な比推力や推進効率を持ち合わせた推進機であることを示すことを目的とする。

### 3.液体推進剤 PPT 用噴射器

液体推進剤 PPT 用の噴射器には下記の 4 つの性能が求められる。①小型・軽量、②低リーク流量、③微量の推進剤供給、④推進剤供給に要する時間（以下、噴射時間）が十分に短い。①②は自明である。③は PPT のように低消費電力の推進機において必要不可欠な条件である。効率と比推力の定義式から必要な噴射量を算出すると、20 J クラスの液体推進剤 PPT では 40 $\mu$ g の推進剤を噴射する必要がある。④は推進剤利用効率に影響する。真空中に噴射された推進剤は、放電チャネル外に向かって飛行すると同時に気化するため、噴射時間が長くなると、推進剤が放電により加速される前に放電チャネル内から流出してしまうからである。

先述の 4 条件を満たす噴射器は存在しないため、高速の噴射器（以下、FGI, Fast Gating Injector）を試作し、液体推進剤 PPT 用の噴射器が実現可能であることを示した。この噴射器は、応答速度を短くするために応答時間が 3 ms のアクチュエータを搭載した遮断弁型の噴射器である。

水、メタノール、エタノール、ブタノール、エチレングリコールを推進剤としたとき、FGI によって真空中に推進剤を噴射することが出来た。噴射量は、アクチュエータに印加する電圧を調節することによって 3 $\mu$ g から 120 $\mu$ g の範囲で可変であった。また、ショットごとの噴射量のばらつきは小さく噴射は安定していた。このときの消費電力は充電エネルギーの 4%に抑えることができた。

噴射器の重量に注目すると、重量はタンク込みで約 300 g であった。PPT 用のコンデンサの重量が 400 g であるから妥協できる範囲であろう。近年、小型化の技術が発展しており、MEMS(Micro Electro Mechanical System)のようなマイクロファブリケーション技術を応用すればさらなる軽量化は可能であろう。

1000 フレーム/秒の高速カメラを用いて噴射された推進剤を観察し噴射時間を測定した。噴射時間は 3 $\mu$ g 噴射したときに 1 ms であったが、噴射量と共に増加し 120 $\mu$ g の推進剤を噴射したときに 4 ms であった。推進剤が気化する時間と比較することによって噴射時間を評価すると、真空環境下において液体推進剤がどのように質量が変化するかを計算した。推進剤として期待される水と低級アルコールの場合、噴射されてから 1ms 経過したときには推進剤の 90%が液体として残っており、噴射後 10ms 経過しても 80%以上の推進剤が液体のとしてのこっていた。この結果から 1~4ms という噴射時間は十分に短いといえよう。

以上のように液体推進剤 PPT 用噴射器の条件を満たしており、液体推進剤 PPT 用の噴射器は実現可能であるといえる。

### 4.液体推進剤 PPT の推進性能

液体推進剤 PPT の性能を測定するために、20J の液体推進剤 PPT の試作機を製作した。推進剤を供給してからイグナイタを作動させたところ、イグナイタを作動させてから約 20 $\mu$ s 後に主放電が誘起され液体推進剤 PPT が作動した。精製水、メタノール、エタノール、ブタノールのいずれを推進剤としたときでも、充電エネルギーが 1~20 J、噴射量が 3~60 $\mu$ g の範囲でミスファイアなく放電が誘起された。すなわち、液体推進剤 PPT は固体推進剤 PPT と同じエネルギー及び噴射量で作動することが示されたといえる。

液体推進剤 PPT が十分な推進性能を持っているかを評価するために、ねじり振り子式のスラストスタンドを製作した。このスラストスタンドを用いて、水や低級アルコールを推進剤として充電エネルギーや噴射量を変化させて推力を測定した。推進剤、充電エネルギー、噴射量によらず、推力は安定して発生しており、ショットごとの推力のばらつきは推力の平均値の 9%程度であった。推力の特性に注目すると、噴射量を一定にしたとき推力は充電エネルギーに比例していたが、充電エネルギーを固定して、噴射量を変化させても推力はほとんど増加しなかった。このことから、液体推進剤 PPT は固体推進剤 PPT と同じく電磁加速型の推進機であるといえる。

推力が上記のような特性を持つことから、本研究で得られた最高の推進性能は、充電エネルギーが 20 J、噴射量が 3 $\mu$ g の時に得られ、比推力が 4300 秒で推進効率が 13%であった。20J クラスの固体推進剤 PPT の比推力が 800 秒、推進効率 8%程度であることを考えると、試作機の性能は十分に従来の PPT に匹敵するといえよう。

また、推進剤を精製水、メタノール、エタノール、ブタノールに変えても推進性能はほとんど変化しなかった。従って、ミッションの要求に応じて推進剤を自由に選択することができる。すなわち、低コンタミネーションが必要となる光学測定を行うミッションでは水を推進剤として利用し、逆に多少のコンタミネーションが許されるミッションで、小型軽量化が求められる場合は、凝固点がきわめて低いメタノールを推進剤にすることが考えられる。

## 5. 結論

1. マイクロスラスタを実現するために、液体推進剤を用いたPPT、「液体推進剤PPT」を提案した。液体推進剤PPTの試作機を用いてその作動試験を行ったところ、充電エネルギー・推進剤消費量が固体推進剤PPTと同じレベルで液体推進剤PPTが作動することが確認された。また、得られた推進性能は固体推進剤PPTを上回るものであった。
2. 低級アルコールから水にいたるまで、様々な推進剤で作動した。水や低級アルコールは、毒性がなく貯蔵しやすいのみならず、反応性も強い原子を含まないことから、低コンタミネーションが期待できる。特に、水は炭素原子すらも含まないため、固体推進剤PPTのように電極やテフロン推進剤表面に炭素が付着することがなく、暴走しない安定な推進機になることが期待できる。また、充電エネルギーが同じ場合、推進剤の種類によって推進性能が変化しなかったことから、推進剤をミッションにあわせて自由に選択できる。
3. インパルスビットは、充電エネルギーにのみ依存し、液体推進剤噴射量やイグナイタ遅延時間を変化させてもほとんど変化しなかった。

