

放電チャンネル形状による50J PPTの推進性能への影響

○進藤崇央, 森真也 (首都大学東京・院) 田尻啓祐, 田麥雄也 (首都大学東京・学)
青柳潤一郎, 竹ヶ原春貴 (首都大学東京)

本研究ではパルスプラズマスラスタ (Pulsed Plasma Thruster; PPT) の推進性能向上を目的とし、放電経路中の電気抵抗による損失を低減させたPPTを作製した。また、これの放電チャンネル形状を決定するための指針を得ることを目的とし、50 Jの投入エネルギー下で平行平板電極の幅および間隔を変化させる試験を行った。この結果、電極の形状により比推力が1700~3200 s、推進効率が18~27%の値をとることが確認された。

1. 研究背景

パルスプラズマスラスタ (Pulsed Plasma Thruster; PPT) は電磁加速型の小型電気推進機の一つである。PPT では多くの場合、固体推進剤としてポリテトラフルオロエチレン (Polytetrafluoroethylene; PTFE) が用いられる。このためタンクやバルブが不要であり、また固体推進剤を二つの電極で挟み込むことによりスラスタヘッドを成すため小型・軽量である。さらにキャパシタを充電した後パルス放電を行うため、数 W の低電力からでも作動が可能である。このため PPT は小型衛星への適用において有望な電気推進機である。しかしながら多くの PPT ではその推進効率が 10% 前後と低いという欠点を有する。

2. 研究目的

PPT の推進効率の低さは、以下の理由により引き起こされていると考えられる。

- 1) 放電によるプラズマの加速完了後も固体表面温度が高いままであることから加速に寄与しない推進剤が昇華し続けているため、推進剤の利用効率が低くなっている。
- 2) 放電経路中に不要なレジスタンスが存在しているため、プラズマ以外の箇所でエネルギーをジュール熱として損失している。
- 3) プラズマの加速に寄与する放電チャンネル形状が最適でないため、プラズマに対して十分な電磁加速力を与えることができていない。

本研究では上記 2) に対する解決として、放電経路中のレジスタンスを見積もることによりエネルギー損失を起こしている箇所を特定し、低レジスタンスの構造にすることによりエネルギー損失の少ない PPT の構築を行う。また 3) に対して、放電チャンネル形状を変更することにより推進性能への影響を評価する。

3. 放電経路中における損失評価

PPT の放電経路は一般に Figure 1 に示すように等

価 LCR 回路として表される。ここで等価回路はキャパシタ・伝送経路・プラズマの 3 つの要素に大別され、それぞれが直列に接続されている。これらの要素の内、プラズマにて消費されるエネルギーの一部は熱輻射や推進剤への熱の伝導等により損失を起こすものの、プラズマの加熱膨張や電磁加速力に寄与し推力を発生させるため、有効な消費エネルギーとみなせる。一方キャパシタや伝送経路にて消費されるエネルギーは推力の発生に寄与しないため、本研究ではこれらの箇所での消費エネルギーを損失として扱う。

ここでキャパシタと伝送経路においてレジスタンスによって損失するエネルギーは、各要素におけるレジスタンスと主放電電流の 2 乗の時間積分値との積として表される。またキャパシタに投入した電力に対する誘電損失の比は $\tan \delta$ として表される。従来本研究室で用いられていた(株)双信電機製マイカペーパーフィルムキャパシタでは 1 kHz 下で $\tan \delta < 0.1\%$ である。またフィルムキャパシタにおいては多くの場合、PPT の放電のリングング周波数である 100 kHz 付近において $\tan \delta < 1\%$ 以下であるため、誘電体損失は十分に少ないと考えられる。また素子電極には金属箔が用いられているため、キャパシタの等価直列抵抗 R_C は十分に低いことが考えられる。

またキャパシタと放電チャンネルを繋ぐ伝送経路

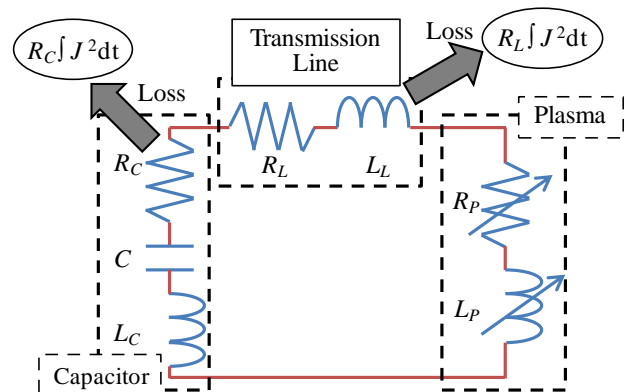


Figure 1. Equivalent Series LCR Circuit of PPT System

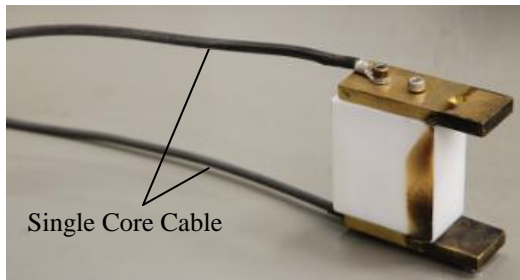


Figure 2. Photo of Previous Rectangular PPT

において、本研究では従来 Figure 2 に示すように単芯ケーブルを採用していた。ケーブルの導体断面積は AWG18 相当であり、往路復路合わせて 1 m 程度の長さを有する。このため従来の伝送経路においては接続部における接触抵抗等を無視しても 20 mΩ 程度のレジスタンスが存在していた。電流波形のフィッティングより求めた PPT の放電経路全体のレジスタンスは 60 mΩ 程度であるため、伝送経路のレジスタンス R_L によっておよそ 3 分の 1 のエネルギーがジュール熱に変換されていたこととなる。

4. 低レジスタンス PPT の製作

単芯ケーブルにより伝送経路のレジスタンスが高くなりエネルギー損失が増大しているため、本研究ではレジスタンス低減を目的として銅板を用いた。さらに伝送経路長を短くするため、放電チャンネル電極と固体推進剤から成るスラストヘッドとを一体とした形状を採用した。Figure 3 に本研究で製作した PPT の概略図を示す。これにより伝送経路におけるレジスタンスは、PPT の放電のリングング周波数である 100 kHz 付近における表皮効果を考慮しても 0.1 mΩ 以下となり、システム全体のレジスタンスの数十 mΩ のオーダーと比較して無視できる値となっている。また後述する放電チャンネル形状変更試験のため、電極間隔の調整が容易になるように伝送経路とカソード電極とをアルミのアンギュル材で接続してある。

また本研究ではオイルを含浸させたフィルムキャパシタをパルス電源として採用した。静電容量は 1 つあたり $10 \mu\text{F} \pm 10\%$ であり、これを 4 つ並列に接続することにより $38.4 \mu\text{F}$ のキャパシタバンクを形成している。本キャパシタバンクの $\tan \delta$ は 100 kHz の周波数において 1 % 以下と十分小さく、誘電体損失については無視することができ、また等価直列抵抗は 0.4 mΩ 程度とシステム全体のレジスタンスと比較して十分低い値であることから、キャパシタでのエネルギー損失についても無視することができる。

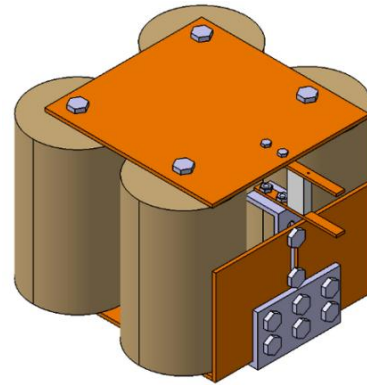


Figure 3. Schematics of Low Resistance PPT

5. 放電チャンネル電極形状変更試験

PPT の電磁加速力によるインパルスビットはインダクタンスを L 、プルームの噴射方向を x 軸として以下の式で表される^[1]。

$$I_{bitEM} = \frac{1}{2} \frac{dL}{dx} \int J^2 dt \quad (1)$$

上式のインダクタンス勾配および $\int J^2 dt$ は次のように表すことができる^[2]。

$$\frac{dL}{dx} \approx 0.6 + 0.4 \ln \frac{h}{w+t}, \quad \mu\text{H}/\text{m} \quad (2)$$

$$\int J^2 dt = \frac{E}{R_{tot}} \quad (3)$$

ここで h : 電極間隔, w : 電極幅, t : 電極厚さ, E : 放電開始以前にキャパシタに蓄えられた静電エネルギー, R_{tot} : 放電経路のレジスタンスの総和である。したがって電磁加速力によるインパルスビットは次のように書き直される。

$$I_{bitEM} \cong \frac{1}{2} \left(0.6 + 0.4 \ln \frac{h}{w+t} \right) \frac{E}{R_{tot}} \quad (4)$$

これより放電チャンネル電極形状が推進性能に影響を与えていることが分かる。本研究では放電チャンネル電極形状を変化させることによる推進性能の変化を取得、評価を行った。Table 1 に試験に用いた放電チャンネルの形状および作動回数を、Figure 4 に放電チャンネルの概略図を示す。

Table 1. Shot Number of Each Electrode

| | | Electrode Width, w , mm | | |
|---------------------------|----|---------------------------|-------------|-------------|
| | | 10 | 15 | 20 |
| Electrode Gap h , mm | 20 | 5,000 shots | 50 shots | 50 shots |
| | 30 | 5,000 shots | 50 shots | 50 shots |
| | 40 | 5,000 shots | 50 shots | 50 shots |
| | 50 | 5,000 shots | 5,000 shots | 5,000 shots |

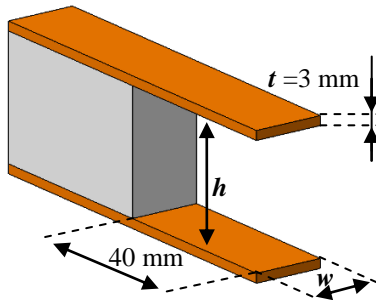


Figure 4. Schematic of Electrode Geometry

電極形状は Table 1 に示したように電極間隔 h 、電極幅 w を変化させ、計 12 通りの形状を適用した。また全ての電極において厚さを 3 mm、放電チャンネル長を 40 mm としている。また電極幅が 15, 20 mm の場合、電極間隔が 50 mm 以外の 6 通りの形状においてはその作動回数を 50 shots とした。これは当該形状の電極を適用した場合に主放電の電流ピーク値がキャパシタバンクの許容する値寸前となるため、キャパシタ保護を目的として作動回数を制限したことによる。50 shots のみ作動させた際には推進剤の減少量が少なかったためマスショットを取得することができず、インパルスビットおよび放電波形のみを取得した。

6. 試験結果

Figure 5 に各電極形状に対するインパルスビットの変化を示す。これより電極間隔の拡大に伴いインパルスビットが増大する傾向にあることが分かる。また電極間隔が狭い場合には電極幅が細い方がインパルスビットが高くなり、電極間隔が 50 mm となった場合にはこの傾向が反転していることが分かる。この理由として放電チャンネルのインダクタンス勾配増加に伴い電磁加速力が増大していること、また Figure 6 に示すように、推進剤の昇華面積が増加することによるマスショットの増大に伴い電熱加速力が増大していることが考えられる。ここで電磁加速力と電熱加速力の評価をするため、各電極形状に対する電磁加速力の変化を Figure 7 に、電磁加速力に対する測定したインパルスビットの変化を Figure 8 に示す。ここで電磁加速力は放電チャンネルのインダクタンス勾配および測定した電流波形を用いて (1) 式より算出した。Figure 7, 8 において算出した電磁加速力が実測のインパルスビットよりも高い値となっているが、これはインパルスビットおよび電流波形の測定誤差、実際のインダクタンスと (2) 式による近似との差等に起因するものである。Figure 7 より電極間隔を広げてゆくことによりインパルスビット中における電磁加速力が増大してゆき、間隔が 50

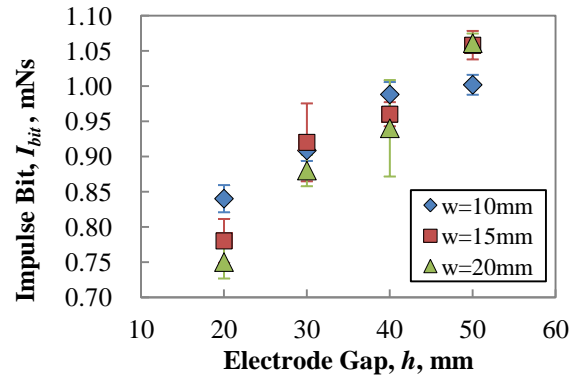


Figure 5. Impulse Bit as a Function of Electrode Geometry

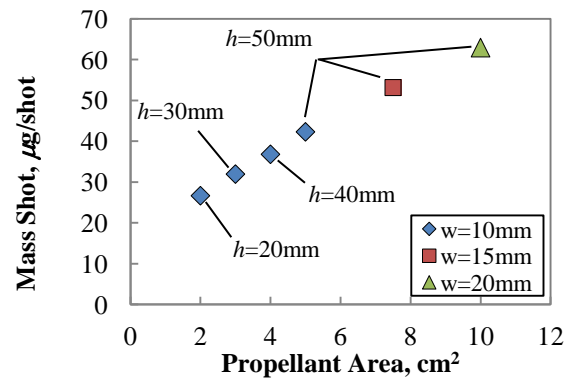


Figure 6. Mass Shot as a Function of Propellant Area

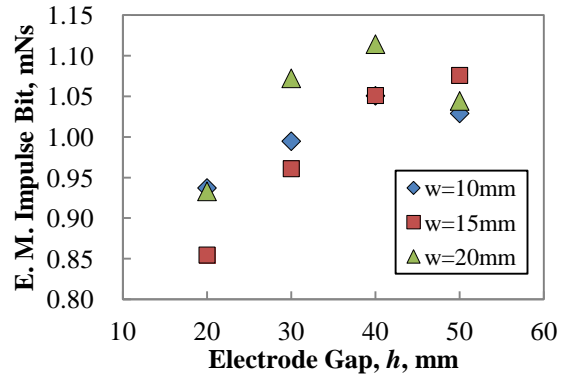


Figure 7. Calculated Electro Magnetic Impulse Bit as a Function of Electrode Geometry

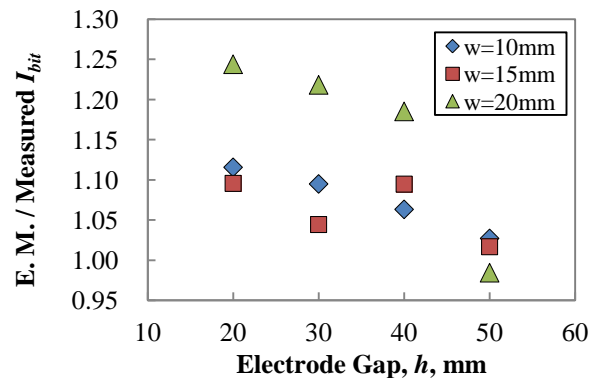


Figure 8. Calculated Electro Magnetic / Measured Impulse Bit Ratio

mm となった場合に電極幅 10, 20 mm のものにおいては減少している。また Figure 8 は縦軸の値が高い程インパルスビットに占める電磁加速力の割合が高いことを示しており、この図から電極間隔を拡大することにより電磁加速力の割合が減少し、電熱加速力が増大していることが分かる。これは電極を拡大することにより、電磁加速力以上に電熱加速力が増大する傾向があることを示している。

次に Figure 9 に電極形状による比推力の変化を示す。ここで Figure 6 よりマスショットが推進剤昇華面積に比例している傾向が見られたため、マスショットを取得していない 6 通りの電極形状においてもこの傾向より比推力を予測した。予測値は図中に白抜きのシンボルとして表す。この図より電極間隔を狭めることにより、また電極幅を細めることにより比推力が増大する傾向が確認された。これは Figure 6 に示すようにマスショットが推進剤昇華面積に比例して増減していること、また Figure 8 に示すように、電極間隔や電極幅によりインパルスビットにおける電磁加速力の成分が変化することに起因している。

Figure 10 に電極形状による推進効率の変化を示す。この図においてマスショットの傾向から予測した推進効率の値は図中に白抜きのシンボルとして表す。実測した推進効率に関しては、電極幅 10 mm のものにおいて、多少上下するものの比較的高い値をとっている。一方電極幅を広げた際には推進効率が減少していることが分かる。これはインパルスビットの増大分以上にマスショットが増加したためである。さらに予測値を加味した場合、電極幅が 15, 20 mm の場合においても推進効率が電極幅に依存する傾向が見られた。

7. 過去の PPT との性能比較

Table 2 に今回作製した低レジスタンス PPT の推進性能の代表値と、過去本研究室で作製された PPT との性能の比較を示す。これより同エネルギーにおいて推進性能が大きく向上していることが分かる。

8. 結論

放電経路中における損失を評価することにより以下の知見および結果を得た。

- ・ 伝送経路を単芯ケーブルから銅板に変更することにより、レジスタンスを低減させた PPT の製作を行った。
- ・ 電極間隔を広げることによりインパルスビットの増加を確認した。またマスショットが推進剤昇華面積に比例する傾向を示し、推進効率が電極幅に依存する可能性が示された。

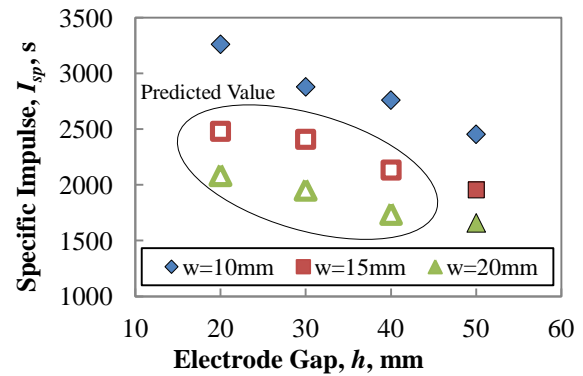


Figure 9. Specific Impulse as a Function of Electrode Geometry

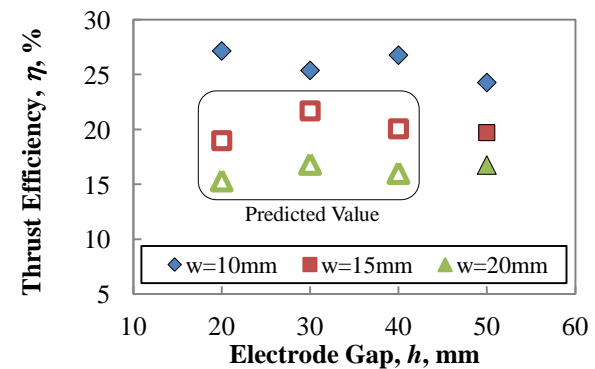


Figure 10. Thrust Efficiency as a Function of Electrode Geometry

Table 2. Comparison with Previous and New PPT Performance

| | Previous PPT | New PPT |
|---|--------------|---------|
| Input Energy | 50 J | 50 J |
| Impulse Bit | 0.4 mNs | 1 mNs |
| Thrust-Power Ratio (At 1 Hz Operation) | 8 μN/W | 20 μN/W |
| Specific Impulse | 1,100 s | 2,740 s |
| Thrust Efficiency | 4.30% | 27% |
| Circuit Resistance | 60 mΩ | 30 mΩ |

- ・ 電極形状を変更することによりインパルスビットが 0.75~1.06 mNs, 比推力が 1,700~3,200 s, 推進効率が 18~27 % の範囲で変化することが確認された。

参考文献

- [1] Robert G. Jahn "Physics of Electric Propulsion" McGraw-hill Book Company 1968
- [2] R. L. Burton, P. J. Turchi, "Pulsed Plasma Thruster" *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 5