

静電容量-印加電圧が外部磁場印加型パルスプラズマスラスタに与える影響

○ 森真也, 進藤崇央 (首都大学東京・院), 田尻啓祐, 田麥雄也

青柳潤一郎, 竹ヶ原春貴 (首都大学東京)

E-mail: ppt@astak3.sd.tmu.ac.jp

パルスプラズマスラスタ(PPT)は小型・軽量、低電力作動可能な電気推進機である。過去の研究により、PPTに外部磁場を印加すると性能が向上することが判明している。また、静電容量-印加電圧を変更することにより、性能が変化することが示唆された。よって、本研究では静電容量-印加電圧が外部磁場印加型 PPT に与える影響を評価したので報告する。

1.序論

パルスプラズマスラスタ(Pulsed Plasma Thruster: PPT)は電気推進機の一つであり、1960年代にアメリカ,ヨーロッパおよび旧ソ連で研究が始められ,1964年には旧ソ連の火星探査機 Zond-2 に搭載され,宇宙に進出した初めての電気推進となった¹⁾。PPT は他の電気推進機とは異なり固体推進剤を用いることが多いため,推進剤タンク,供給配管,機械的バルブ等が不要となり,小型で軽量な推進機である。さらに,PPT はパルス作動であるため力積のデジタル制御が可能となる。日本でも 1974 年ラムダ L-4SC-3号機,1981年 ETS-IVに PPT が搭載され,宇宙空間での試験が行われた。しかし,衛星の大型化により PPT の発生力積では要求力積を賄えなくなったため,PPT への関心が薄れ研究が中断された。だが,近年衛星の小型化が進むにつれ,小型化に対応することができる PPT の研究が再び活発になっている。しかし,PPT の推力電力比や推進効率 は他の推進機に比べ非常に低いというのが現状である。これら推進性能に関しては,外部磁場を印加することにより向上がすることが過去の研究より明らかになっている²⁾。しかし研究が行われた当時では性能向上をさせるに十分な強さの磁場を有した永久磁石は高価かつ大型であったため,簡素であり小型の構造を利点とする PPT へ適用した際にはその利点を喪失させることとなった。だが,1983年に佐川真人によってネオジム磁石が発表されて以来,現在に至るまで永久磁石のエネルギー積が向上し続けており³⁾,結果的に永久磁石の小型化に繋がっている。したがって現在においては安価かつ小型の永久磁石が入手可能なため,これを用いた場合に PPT の小型という特徴を崩すことなく推進性能を向上させることが期待できる。

2.外部磁場印加型 PPT の電磁加速力

PPT に外部磁場を印加した際,PPT の電磁加速力は自己誘起磁場由来のものと同様に外部磁場由来のものとの和となる。外部磁場印加型 PPT の性能を評

価する上で,外部磁場由来のインパルスビットがどのようなパラメータに依存するかを明らかにする必要がある。ここでは簡単のため, Fig. 1 に示すようにカレントシート幅が電極幅と同一であり,その厚みが無視できるほど十分に薄く,かつカレントシート中の電流密度が一様である場合を考える。このとき,外部磁場による推力 F_{ext} は以下ようになる。

$$F_{ext} = \int_x^{x+\delta} \int_0^h \int_0^d \vec{j} \times \vec{B}_{ext} dx dy dz \quad (1)$$

ここで, x はテフロン表面からカレントシートまでの距離, δ はカレントシート厚さ, h は電極間距離, d は電極幅, j は主放電電流密度, B_{ext} は外部磁場の磁束密度である。主放電電流はカレントシート中の電流密度の積分となるため以下のようになる。

$$J = \int_x^{x+\delta} \int_0^d \vec{j} dx dy \quad (2)$$

また簡単のために印加する外部磁場は一様であり,かつ z 方向成分のみを持つと仮定すると(1)式の B_{ext} は積分の外に出る。よって(1)式と(2)式より,(3)式が導かれる。

$$F_{ext} = hJB_{ext} \quad (3)$$

外部磁場による推力が(3)式のようになり,(3)式を放電時間 τ で積分することにより外部磁場によるインパルスビット(電磁加速力)が導出できる。

$$I_{bit,ext} = \int_0^\tau F_{ext} dt = hB_{ext} \int_0^\tau J dt \quad (4)$$

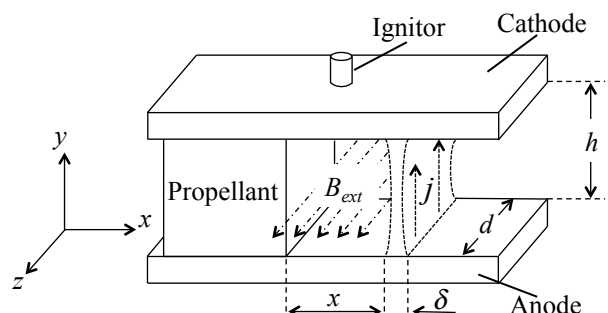


Fig.1 Calculation model

PPT の放電が減衰振動の場合、放電電流 J は(5)式のようになる。

$$J = \frac{V_0}{\omega L_0} e^{-[(R/2L_0)t]} \sin \omega t \quad (5)$$

$$\omega = \left(\frac{1}{L_0 C} - \frac{R_0^2}{4L_0^2} \right)^{1/2}$$

ここで、 V_0 は印加電圧、 ω は放電の角周波数、 L_0 は回路の初期インダクタンス、 C はキャパシタの静電容量、 R_0 は回路の初期抵抗、 t は放電開始からの時間である。(5)式を(4)式に代入することにより、外部磁場によるインパルスビット（電磁加速力）が得られる。

$$I_{bit,ext} = \frac{hB_{ext}V_0}{\omega L_0} \int_0^\tau e^{-[(R_0/2L_0)t]} \sin \omega t dt \quad (6)$$

(6)式のように外部磁場によるインパルスビットは電極間距離 h 、外部磁場の磁束密度 B_{ext} 、印加電圧 V_0 、静電容量 C 、回路の初期インダクタンス L_0 、回路の初期抵抗 R_0 の関数となる。

ここで、省略のため $k=R_0/2L_0$ とおくと

$$\int_0^\tau e^{-kt} \sin \omega t dt = \frac{\omega}{k^2 + \omega^2} - \frac{e^{-k\tau}}{k^2 + \omega^2} (k \sin \omega \tau + \omega \cos \omega \tau)$$

となり、PPT の放電がキャパシタに蓄えられた電荷を一度の放電で十分に放出する場合には τ を無限とすることが可能であり、(7)式が導かれる。

$$I_{bit,ext} = hB_{ext}CV_0 = hB_{ext}Q_0 \quad (7)$$

(7)式より、外部磁場によるインパルスビットはキャパシタに蓄えられる電荷量に依存する可能性がある。

3. 研究目的

前述の計算より、外部磁場によるインパルスビットはキャパシタに蓄えられた電荷量に依存する可能性がある。よって、本研究ではキャパシタが蓄える電荷量のパラメータである静電容量と印加電圧を変更し実験を行い、導出した式の妥当性を検証し、静電容量と印加電圧が外部磁場によるインパルスビットに与える影響を評価することを目的とする。

4. 実験装置・実験条件

4-1. 平行平板型 PPT

本研究で用いた平行平板型 PPT の概略図と断面図を Fig.2, Fig.3 に示す。PPT の電極には幅 5mm、厚さ 3.5mm の銅を用い、電極間距離を 10mm にして配置している。推進剤には PTFE

(Polytetrafluoroethylene)を用いている。放電チャンネルは 20mm であり、上流側から 10mm の部分まで PTFE で側面を覆われている。外部磁場を印加した際、イグナイタにより発生する電子が加速され、電極間が短絡するのに十分なプラズマが供給されず主放電が誘起されないことがあるため⁴⁾、側面を PTFE で覆うことによりイグナイタで発生するプラズマを増加させ、主放電の誘起を容易にすることを目的とし、PTFE に U 字形の昇華面を持たせている。

4-2. 外部磁場

対称な磁場を形成するため同強度の磁場を発生するネオジウム磁石を対称な位置に同方向で配置し、強い磁力線のループを形成するためにヨークを取り付けている。概要図を Fig.4 に示す。ネオジウム磁石は残留磁束密度 1.24T、表面磁束密度 0.56T、着磁方向長さ 30mm、幅 10mm、高さ 30mm である。ヨークには構造用鋼である SS400 を用いた。磁気閉回路による z 方向磁束密度の x 方向分布を Fig.5 に示す。放電チャンネル内においては磁束密度の z 方向成分は y, z の位置には依存しない。また外部磁場の磁束密度は主放電が作り出す自己誘起磁場と同じオーダーであるため、推進性能を変化させるに十分な強さを有している。また、外部磁場は PPT が放電初期に作る自己誘起磁場と同方向に印加している。これは前述の数式においける B_{ext} が正となる方向であるため、電磁加速力を増加させる働きを持つ。

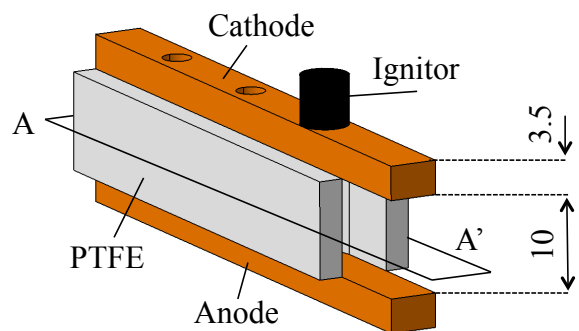


Fig.2 Schematic of PPT

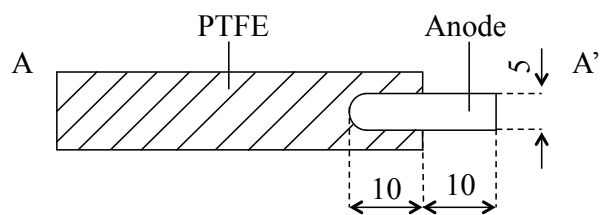


Fig.3 A-A' cross sectional view

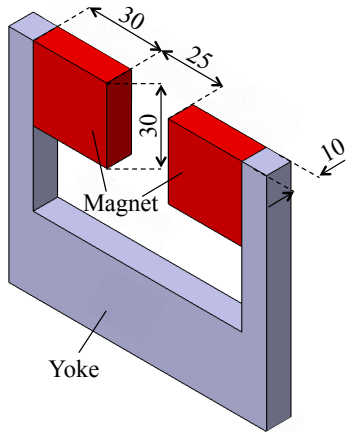


Fig.4 Schematic of magnets with yoke

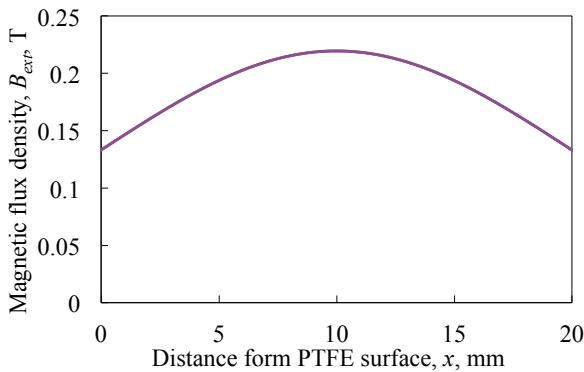


Fig.5 External magnetic field distribution

4.3.実験条件

キャパシタに蓄えられる電荷量が推進性能へ与える影響を評価するため2通りの実験を行った。一つはキャパシタに蓄えられるエネルギーを固定し、静電容量および印加電圧を変化させることにより、蓄えられる電荷量が推進性能に与える影響を評価する実験である。他方は、静電容量を固定し、印加電圧を変化させることにより、エネルギーおよび電荷量の変化が推進性能に与える影響を評価する。投入エネルギーを固定した際の実験条件を Table 1 に示す。また静電容量を固定した際の実験条件は静電容量 $9.41\mu\text{F}$ であり、印加電圧を 0.6kV から 1.6kV まで 0.1kV ずつ変更し実験を行った。両者の実験ともに、外部磁

Table 1 Experimental condition at $E=\text{constant}$

Capacitance μF	Voltage kV	Electric charge $\times 10^{-3}\text{C}$	Energy J
2.17	2.76	5.99	
5.64	1.72	9.70	
8.80	1.37	12.1	8.3
14.07	1.08	15.2	
17.07	0.98	16.7	

場を印加しない場合とした場合の2通りの推進性能を取得している。

5. 実験結果・考察

投入エネルギーを一定にし、静電容量と印加電圧を変更し行った実験の結果と(4)式を用いて計算した外部磁場によるインパルスビットをFig.6に示す。(4)式による計算には実験で取得した電流波形を用い、外部磁場の磁束密度 B_{ext} はFig.5に示す分布の平均値とした。また、計算値は外部磁場によるインパルスビットと自己誘起磁場によるインパルスビットの和として示しており、自己誘起磁場によるインパルスビットは外部磁場を印加していない実験結果より $100\mu\text{Ns}$ としている。ここで外部磁場を印加しない実験については、試験装置の不具合から2度実験を行ったのみである。Fig.6より、外部磁場を印加した場合、キャパシタに蓄えられる電荷量が $15\times 10^{-3}\text{C}$ に至るまでキャパシタに蓄えられる電荷量に対しインパルスビットがおよそ線形に増加しており、計算値も同様の傾向を示している。キャパシタに蓄えられる電荷量が $17\times 10^{-3}\text{C}$ の場合においては放電が途中で停止したためインパルスビットが減少した。この際の電流波形をFig.7示す。Fig.7において、赤色の線が一般的な電流波形であるが、青色の線のような半

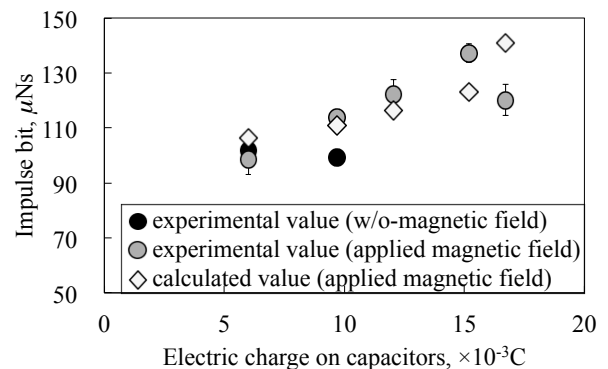


Fig.6 Experimental results at $E=\text{constant}$

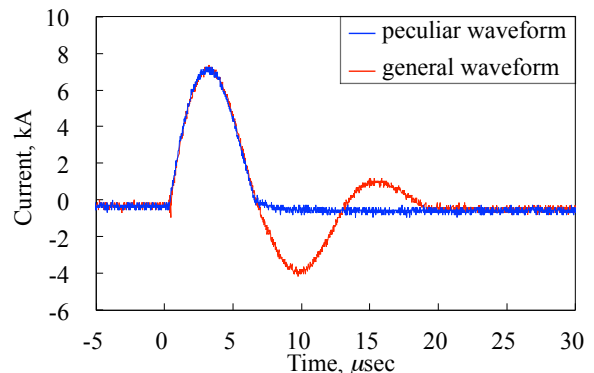


Fig.7 Current waveform at $17\times 10^{-3}\text{C}$

波長で放電が終了するという現象が実験中数多く見られ、全体の90%以上を占めた。自己誘起磁場によるインパルスビットについては、電流が半波長で終了することにより、初期にキャパシタに蓄えられたエネルギーをすべて放出することなく放電が終了したため自己誘起磁場によるインパルスビットの電磁加速成分が減少した。また、外部磁場印加時に放電が半波長で終了することによりマッシュが減少することは過去の研究においても同様の傾向を示しており⁵⁾、結果的に電熱加速成分が減少した可能性がある。また、電流値が負にならないことにより、電流の時間積分値が増加し、計算値が増加したことから、外部磁場によるインパルスビットの電磁加速成分は増加したと考えられる。

静電容量一定で電圧のみを変更した実験結果を Fig.8 に示す。外部磁場印加時のインパルスビットと外部磁場を印加していない状態のインパルスビットの差が外部磁場によって発生したインパルスビットと考えられるため、インパルスビットの差と(4)式を用いて計算した値を Fig.9 に示す。Fig.8 より、外部磁場を印加していない状態では、インパルスビットは印加電圧に対して二次関数的な増加、すなわちエネルギーに対して線形的な増加を示しており、過去の研究と同様の傾向を示している⁶⁾。一方、外部磁場

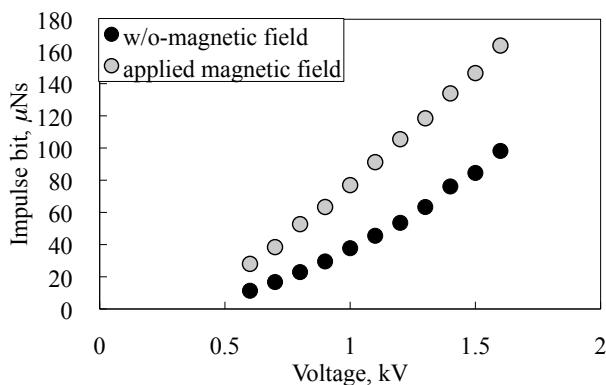


Fig.8 Experimental results at $C=\text{constant}$

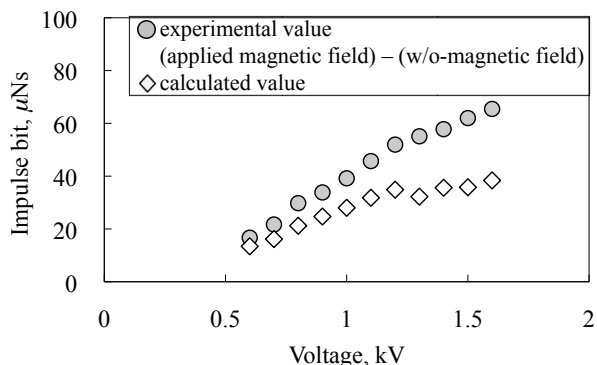


Fig.9 Comparison between experimental value and calculated value

印加時において、Fig.9 より、外部磁場によるインパルスビットは印加電圧に対し線形的な増加を示しており、計算値も同様の傾向を示している。また、Fig.8 より、全体にわたり外部磁場印加をしていないときに比べ、外部磁場印加を行った状態の方がインパルスビットは大きい。計算値と実測値を比較すると、インパルスビットの増加傾向は一致するが、値としては異なり、最大で40%程度の違いが存在する。考えられる要因として、計算値は電磁加速成分のみを考慮しており、電熱加速成分を加味していない、外部磁場は一様だと仮定しているが、実験では一様でないこと等が挙げられる。よって、今後はマッシュを測定し、外部磁場による電熱加速成分への影響を評価することが重要である。

6. 結論

外部磁場によるインパルスビットを表す式を導き、実験を行うことで以下の結論を得た。

- 導出した式は電磁加速力のみを考慮しているため、定性的には実験値と一致するが、定量的には一致しない。理由としては、電熱加速成分を考慮していない、導出式は外部磁場を一様と仮定している等が挙げられる。
- 導出式を用いて計算した値と実験値は傾向が同じであるため、導出式は妥当だと考えられる。
- 外部磁場印加時のインパルスビットはキャパシタに蓄えられる電荷量に対し一次関数的な増加を示す。

参考文献

- 竹ヶ原春貴，“電気推進ロケット入門” 栗木恭一，荒川義博編，第8章，東京大学出版会，pp.157-181，2003
- 竹ヶ原春貴，“外部磁場による固体プロペラント・パルス型・プラズマスラスタの性能向上に関する研究”，東京大学院工学研究科航空学専門課程学位論文，1985
- 浜野正昭，“ネオジム磁石のすべて”，佐川真人監修，第1章，アグネ技術センター，pp.1-14，2011
- 進藤崇央，三村大樹，森真也，青柳純一郎，竹ヶ原春樹，“平行平板型 PPT の磁場印加による性能評価実験”，平成23年度宇宙輸送シンポジウム，2012，STEP-2011-059
- 森真也，進藤崇央，田尻啓祐，青柳潤一郎，竹ヶ原春貴，“平行平板型パルスプラズマスラスタにおける外部磁場印加時の性能評価”，第56回宇宙科学技術連合講演会，2012年，3J10
- R. L. Burton and P. J. Turchi，“Pulsed Plasma Thruster”，*Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 5, pp. 716-735,1998