

電気二重層キャパシタを用いた外部磁場印加型 2 次元 MPD スラスタの準定常作動評価に関する研究

Evaluation of Quasi-Steady Operation of Applied-Field 2D-MPD Thruster using Electric Double-Layer Capacitors

○井出 舜一郎(東大)・月崎 竜童・國中 均・西山 和孝(宇宙航空研究開発機構)

○Shunichiro Ide(The University of Tokyo)・Ryudo Tsukizaki・Hitoshi Kuninaka・Kazutaka Nishiyama (JAXA)

Abstract (概要)

In order to achieve quasi-steady operation of MPD thruster, we developed a power supply unit using an electric double layer capacitor. When the thruster was operated using this, we acquired different performance from the previous study. Furthermore, in order to confirm the quasi-steady state operation, the time characteristic of the performance was acquired by making the discharge time variable by the IGBT. As a result, we successfully confirmed quasi-steady operation by using tungsten electrodes with less electrode erosion.

1. 研究背景

1.1 MPD スラスタ Magneto-Plasma-Dynamics (MPD) スラスタ¹⁾は、電極間アーク放電と自己誘起磁場によるプラズマの電磁氣的加速を利用した電気推進機²⁾であり、ホールスラスタに次ぐ大推力推進機として注目されている。これまで主に研究されていた自己誘起磁場型 MPD は十分な推進効率を得るには数 MW もの大電力を要する。そこで本研究室では外部コイルによる磁場増強により 100kW 程度で作動できる外部磁場印加型 MPD³⁾が研究されている。

1.2 性能評価 MPD スラスタは主に瞬間的な大電力パルスを与えることで作動させている。作動中に放電電流が安定ならば電磁加速的に定常状態といえる⁴⁾ので、これを準定常状態と称して定常性能に換算評価している。

1.3 先行研究 本研究室では大電力パルス源に Pulse Forming Network (PFN) を用いていた。⁵⁾⁶⁾ PFN は複数のオイルコンデンサを一気に開放するため、図 1 のように波形が崩れてしまい、十分に準定常領域を確保できない上に、余分な放電は性能評価の誤差に直結する。PFN を用いた作動の準定常性には議論の余地が残されている。

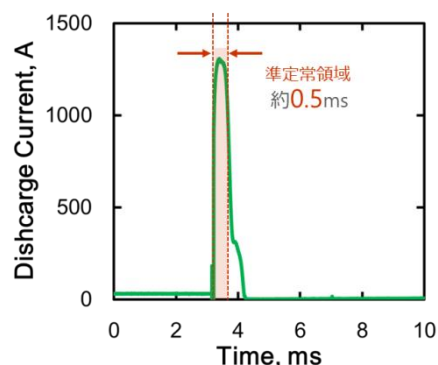


図 1 PFN による放電波形

1.4 研究目的 本研究では MPD スラスタにおいて準定常作動を達成し、準定常性を評価したい。そこで PFN に替わって、準定常領域を十分に確保できるように長時間放電が可能な電源を開発する。さらに放電時間を可変にすることで、推進性能の作動時間特性を取得する。これにより推進性能の準定常性を評価することができる。

2. 電源開発

2.1 設計方針 電力源に静電容量の高い電気二重層キャパシタを用いる。時定数が増加し、安定した電力が長時間供給できるため、十分な放電時間を確保できる。またスイ

スイッチングにはIGBTを用いる。放電のON/OFFを制御することで、放電時間を可変に切り取ることができる。

2.2 サージ軽減 kA 級の大電流を高速で遮断する際には遮断部に過渡的な高電圧インパルスが生じる。これは一般にサージとよばれ電気機器の破壊原因となる。本研究においても以下の方法によりサージ軽減に努めた。

- ・ 配線長を考慮したサージシミュレーション
- ・ スwitchingスピードの調節

2.3 作動試験 開発した電源を用いてMPDスラスタを作動させ、放電波形を確認した。図2に結果を示す。

PFN に比べると作動時間が伸びており、また高速にスイッチングできているので、波形の崩れも少ない。遮断時のサージが軽減できていることがわかる。しかし磁場を印加して放電を行うと、図3に示すように波形は大きく崩れることがわかった。この傾向は特に低流量時に顕著である。

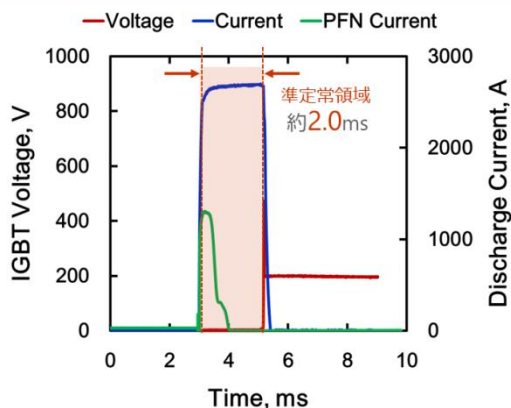


図2 放電波形の比較

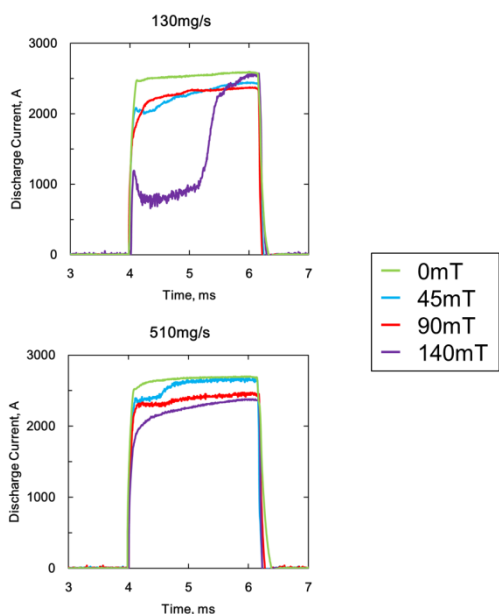


図3 磁場印加時の放電波形

3. 実験装置

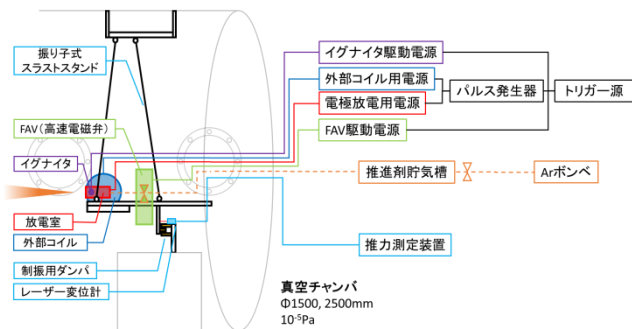


図4 実験系

3.1 電源系 開発した電源はスラスタヘッドの放電に加えて、複製を外部コイルの通電にも用いている。本電源はPFN に比べて充電電圧が低いため、低流量や強磁場条件では放電が開始しにくい。そのため着火用イグナイタを用いて、放電室壁面で瞬間的なスパークを発生させ、陰極表面の電子放出を促している。

3.2 推進剤供給系 推進剤のアルゴンは一度、貯気槽に充填され、放電室へは高速電磁弁によって約5ms間供給される。

3.3 測定系 各電圧は高電圧プローブを用いており、放電やコイル通電における電流は非接触プローブを用いている。推力測定には振り子式スラストスタンドを用いており、スラスト時の振動を外付けのレーザー変位計で読み取っている。

4. 性能取得

開発した電源によりMPDスラスタを作動させて各性能を取得し、PFNの場合と比較した。放電時間は2.0msで推進剤流量と外部磁場強度は以下の表1のとおりである。

表1 各データ点の外部磁場強度と推進剤流量

今回のデータ

mg/s \ mT	80	130	170
0	○	△	×
45	●	▲	×
90	○	△	×
140	●	▲	×

PFNのデータ

mg/s \ mT	50	100	200
0	●	▲	×
80	●	▲	×
160	●	▲	×

4.1 電気特性 放電時におけるプラズマ中の電気特性についてプロットした。放電電流に対して、放電電圧を図5、プラズマインピーダンスを図6、投入電力を図7に示す。

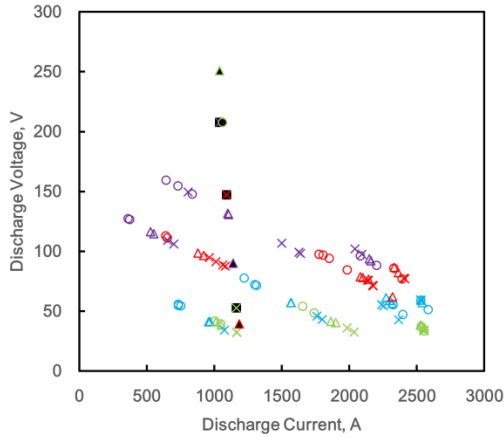


図5 放電電流 vs 放電電圧

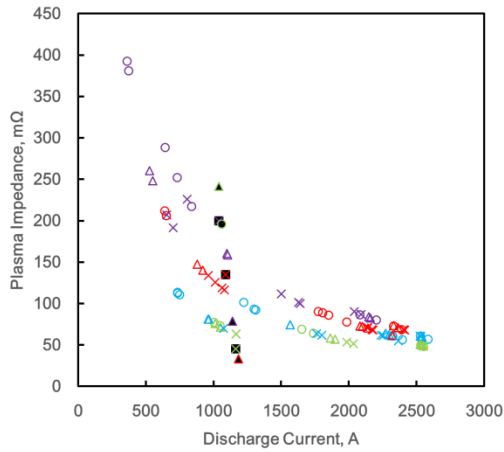


図6 放電電流 vs プラズマインピーダンス

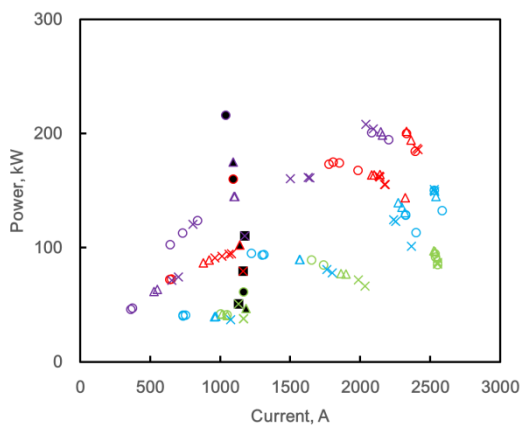


図7 放電電流 vs 投入電力

放電電圧は電流に対する傾向はみられなかった。低流量または強磁場において増大する。プラズマインピーダンスは $50\text{-}400\text{m}\Omega$ の範囲で、低電流または強磁場において増大する。投入電力は電流に対して増加し、磁場が強いほど電力消費が大きい。

4.2 推進特性 次に放電作動による推進特性をプロットした。放電電流に対して推力を図8に、比推力を図9に、推進効率を図10に示す。

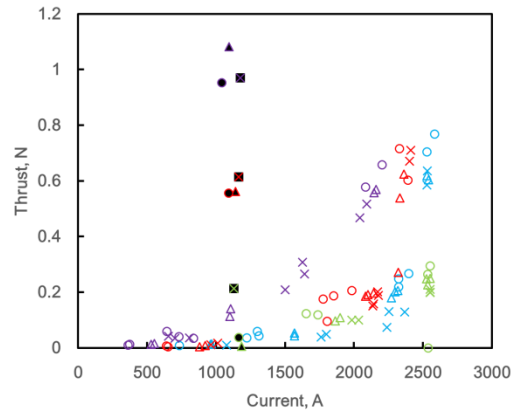


図8 放電電流 vs 推力

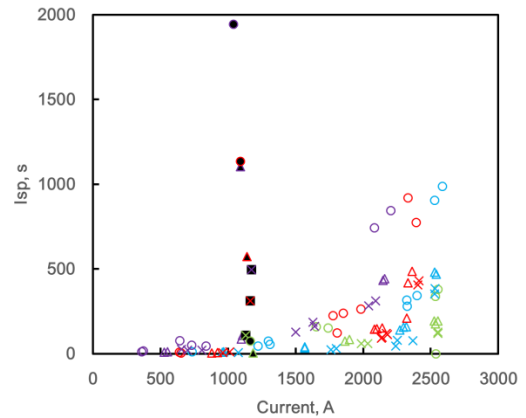


図9 放電電流 vs 比推力

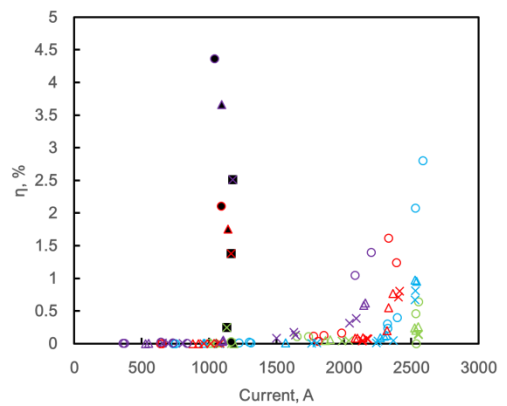


図10 放電電流 vs 推進効率

推力は 2kA 以下ではほとんど出でおらず、2kA をこえると有意な値を示し始めている。また先行研究と同様に流量に対する依存性はみられず、電磁加速が行われていると考えられる。比推力も推力と同様に低電流では性能が悪い。2500A においては流量 80mg/s で約 1000s に到達している。推進効率も同様である。2500A において流量 80mg/s で約 3% と先行研究に比べて低い値となった。

次に推力電力比を示す。まず比推力に対する推進効率のプロットを図 11 に示す。その傾きは推力電力比に相当する。さらに放電電流に対する推力電力比を図 12 に示す。

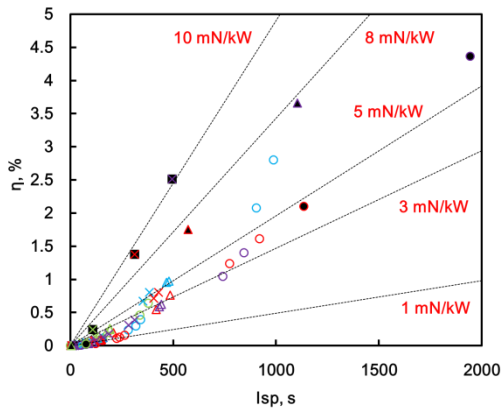


図 11 比推力 vs 推進効率

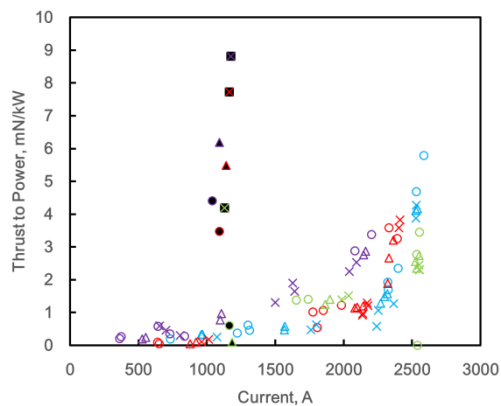


図 12 放電電流 vs 推力電力比

磁場印加時においては先行研究と同様に 3-10mN/kW の範囲である。また先行研究では推力電力比が強磁場または高流量で増大する傾向がみられる。本研究では流量に依存性はみられなかったが、同じ電流レベルにおいては強磁場のほうが推力電力比は増大しているように見える。

4.3 電極損耗 電気特性・推進特性の取得後、銅製の陽極図 13 のように新品に比べて損耗しているのが確認できた。



Figure 13 銅陽極の損耗

5. 準定常作動

図 14 のように放電時間を 0.3-3.0ms まで可変にして推進性能を取得した。これを作動時間に対してプロットすると、推進性能の作動時間依存性を確認することができる。推進性能が作動時間に対して一定であれば、準定常作動であるといえる。データは各条件 3 点取得し、標準偏差で誤差を評価している。

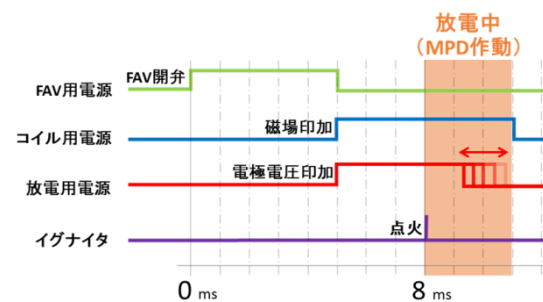


図 14 作動時間を変えた作動のシーケンス

5.1 銅電極による作動 はじめにノミナルのセットアップ(放電室に銅陽極とタングステン電極の電極対を 3 つ)を用いて試みた。推進剤流量は 130mg/s に固定し、外部磁場強度を 4 段階に変えている。各磁場強度における放電電流波形を図 15 に示す。次に作動時間に対してインパルス、推力、推進効率、推力電力比をプロットした結果を図 16 に示す。

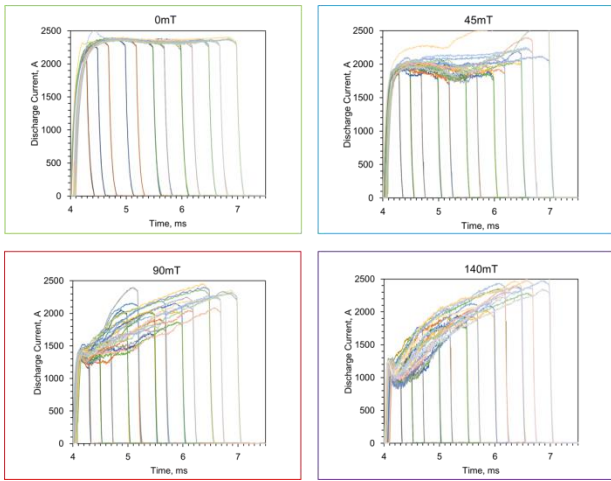


図 15 銅電極での放電波形

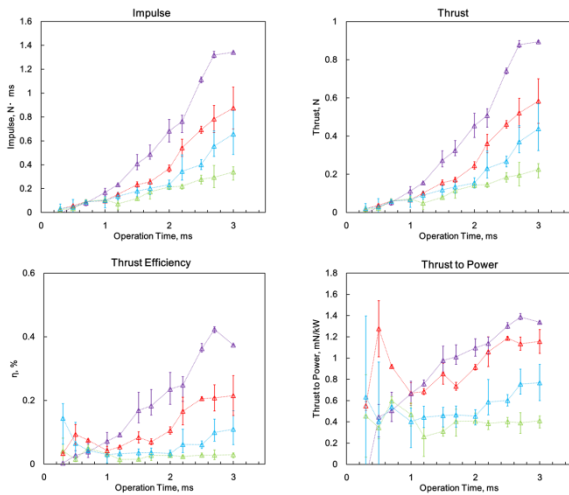


図 16 銅電極での推進性能の作動時間特性

磁場を増加させると波形が崩れてしまい、また異なる放電波形になるデータ点も存在している。これでは準定常作動とはいえず、推進性能も概して作動時間によって変動している。実験後の電極の様子を図 17 に示す。(左：銅陽極 右：タングステン陰極)



図 17 実験後の電極の様子

性能取得時と同様に銅陽極の損耗が激しい。磁場印加時の波形の崩れは、陽極損耗による電極表面状態の変化による可能性がある。

5.1 タングステン電極による作動 波形の崩れが電極損耗によるものかどうか確認するため、損耗の少なかった陰

極のタングステン棒を陽極にも用いて、図 18 のように電極を変更して、作動を試みた。



図 18 電極の変更

各磁場強度における放電電流波形を図 19 に示す。次に作動時間に対してインパルス、推力、推進効率、推力電力比をプロットした結果を図 20 に示す。なおこのセットアップでは 0mT と 40mT は電流レベルを合わせるために、充電電圧を低くして着火しており、放電が起こりにくく、データが取得できなかった。

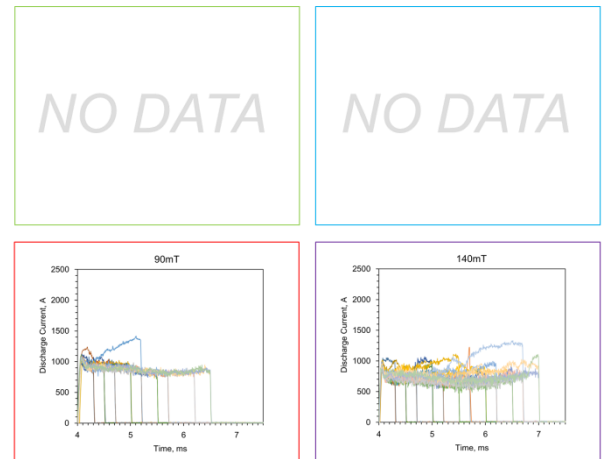


図 19 タングステン電極での放電波形

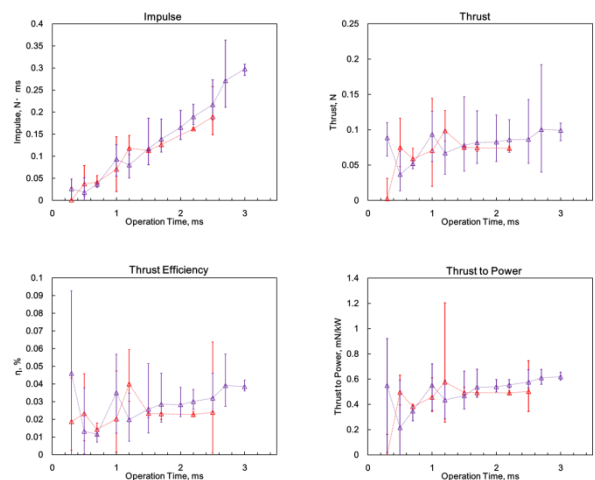


図 20 タングステン電極での推進性能の作動時間特性

電極対を1つにしているので電流レベルは1kAに下がっているが、放電波形の崩れは少なく、準定常的に作動していることがわかる。また推進性能も推力、推進効率、推力電力比ともに1.0msをこえたあたりから一定値を示すようになっていく。性能は低いもののMPDスラスタにおいて準定常作動の確認を行うことができた。

6. 今後の方針

本研究では準定常作動の確認ができることを示したものの、スラスタ自体の推進性能が先行研究に比べて悪い。そこで損耗の少ないタングステン電極を3対用いて性能取得と準定常作動の確認を行う。また性能低下におけるその他の要因として以下が挙げられる。

- ・電極3本に均等に電流が流れていない
- ・磁場がローレンツ方向に正しく印加されていない
- ・推進剤が正しく供給されていない

これらの要因を検討しつつ、先行研究以上の性能向上方法として以下を考えている。

- ・推進剤に水素を用いる
- ・印加磁場を増強する
- ・勾配磁場コイルを用いる

参考文献

- 1) R.G.Jahn “*Physics of Electric Propulsion*”, McGraw-Hill, NewYork, 1968.
- 2) M. Martinez-Sanchez “Spacecraft Electric Propulsion—An Overview”, *Journal of Propulsion and Power*, Vol.14 No.5 pp.688-699, 1998.
- 3) 中田大将, 岩川輝, 國中均 “直交外部磁場型 2次元 MPD アークジェット”, 宇宙航空研究開発機構特別資料: 大電力化/モジュール化電気推進に関する研究会, JAXA-SP-08-013 pp.51-62, 2009.
- 4) R. Albertoni, P. Rossetti, F. Paganucci, M. Andrenucci, M. Zuin, E. Martinez, R. Cavazzana “Experimental Study of a 100-kW class Applied-Field MPD Thruster”, *32nd International Electric Propulsion Conference*, IEPC-2011-110, 2011.
- 5) 岩川輝, 中田大将, 國中均 “外部磁場を印加した 2D MPD スラスタの挙動” H20 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2008-18, 2009.
- 6) 杉本諒, “電気二重層キャパシタを用いた外部磁場印加型 2次元 MPD スラスタの開発” 静岡大学大学院工学研究科機械工学専攻航空宇宙講座修士論文, 2014