

スーパー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

○杉本 諒（静岡大学）、月崎 竜童、國中 均、西山 和孝、細田 聡史（JAXA）、
須藤 孝宏、山極 芳樹（静岡大学）

Key Words: MPD thruster, Electric propulsion, Electric double-layer capacitors, applied field

1. 諸言

これまでに電気推進機は、その高い比推力を活かして静止衛星の長寿命化や、深宇宙探査の主推進機として実用化されてきた。これらに引き続き、惑星間・軌道間航行や軌道間の大規模輸送などが提案されており、このようなミッションを達成するためには大推力と高排気速度を両立する推進機が必要となる。

MPD スラスタ(Magneto-Plasma-Dynamic Thruster)¹⁾は、これらの要求を満たす電気推進機として有望視され、研究が行われてきた。しかし、現在までに主に研究が行われてきた自己誘起磁場型 MPD スラスタは、効率のよい作動を行うためには数 MW の電力が必要であるが、現時点において宇宙機に搭載できる電力を大きく超えるため、実用化には程遠い(国際宇宙ステーションで電力規模は 120kW 程度)。一方で外部磁場型 MPD スラスタは数百 kW クラスの電力で高効率を達成することが出来るために実用化が期待されており、ISAS/JAXA でもこのタイプの MPD スラスタの研究が行われ、様々な知見が得られている。この外部磁場型 MPD スラスタは将来的に定常作動することを目指しているが、現状では実験設備の制約から定常作動を行うことができない。従って、パルス電源を用いた準定常作動を定常換算して研究を行っている²⁾。しかし、現在の電源では放電時間は 0.5ms 程度であり、さらに全放電時間のうち放電電流が一定となる時間の割合が少ないため、準定常作動できているとは言い難い。したがって正確な定常換算ができていない可能性がある。そのため、放電時間を延ばすことで、放電電流が一定となる時間の割合を増やし、準定常といえる環境を作りたい。

本研究では、「放電時間の延長」、「放電時の電流変化を抑える」、「準定常環境の確認」すべてを満たすような電源の製作を目指し、手始めに放電時間が最

大 10ms となる外部磁場印加用の電源の製作を行った。また製作した電源を用いてスラスタ作動を行い先行研究と比較したうえで製作した電源が使用可能かどうか、放電用電源にも応用できるかどうかの確認を行った。

2. 外部磁場 2 次元 MPD スラスタ

MPD スラスタの推進原理は、放電室内に推進剤を供給し放電を起こすことによって推進剤を電離、プラズマ化する。また、発生した磁場とプラズマ内を流れる放電電流によりローレンツ力が発生する。このローレンツ力により推進剤プラズマが加速・排気され、この反力によって推力を発生させている。外部磁場型二次元 MPD スラスタは放電室両側にコイルが設置されているため、外部磁場によるローレンツ力の方向が直接排気方向を向くなどの特徴を持つ。従って性能特性と磁場強度の関係を解明すると共に、磁場形状の設計変更や最適化を行う事に適した MPD スラスタである。現在 ISAS/JAXA では図 1 のような外部磁場型二次元 MPD スラスタを使用して研究が行われている。このスラスタは電極間形状を可変にするために電極間距離と放電室長さをそれぞれ独立に変化させることができる。電極間距離は 8mm～20mm まで 2mm 刻みで設定でき、また放電室長さは 10mm～40mm まで 10mm ずつ変えることができる。放電室の両側には外部磁場印加用のコイルが設置されており、放電電流に直交する磁場をかけることができる。陽極は銅、陰極は 2%トリウム入りタングステンで出来ており加工の容易性から丸棒形状としている。

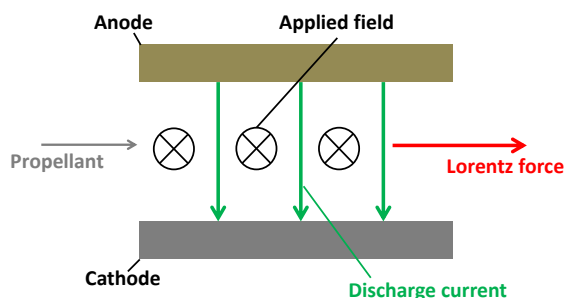


図1 外部磁場印加型2次元MPDスラスタの作動原理

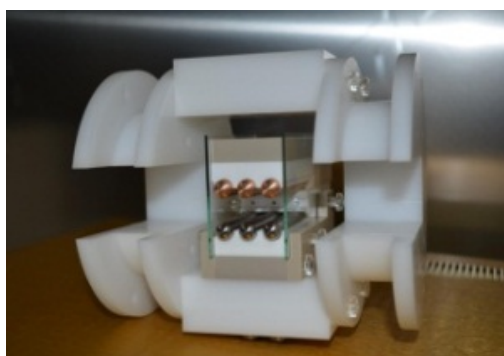


図2 外部磁場印加型2次元MPDスラスタ

3. 実験環境（現在の電源）

先行研究では、性能に関する外部磁場強度依存性を明らかにするために放電電流と外部磁場強度を独立に定められるような電源(PFN：Pulse Forming Network)を使用している²⁾。従って図3に示すように、放電電流用と外部磁場印加用に別の電源を用意することで、それぞれの電流量を独立に定めることができる仕様となっている。また以下では、放電用電源を PFN1、外部磁場印加用電源を PFN2 と称することとする。

しかし、現在の電源ではどちらも電流を供給できる時間は1ms以下となっている。PFN2を用いた場合の放電波形を図4に示す。先行研究では、図4のようなパルス状の放電電流を供給し、これを準定常とみなして実験を行っていた。このパルス時間は過去の当研究室のMPDスラスタの実験結果と整合性を取るために慣例的に定められた0.8msとみなしている。しかし、全放電時間に対して、放電電流が一定である時間が大きい場合、本当に準定常作動できているかは明らかでない。

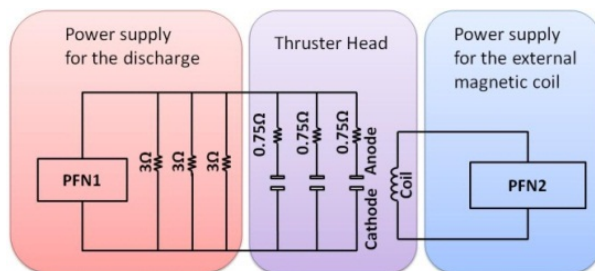


図3 電源構成図

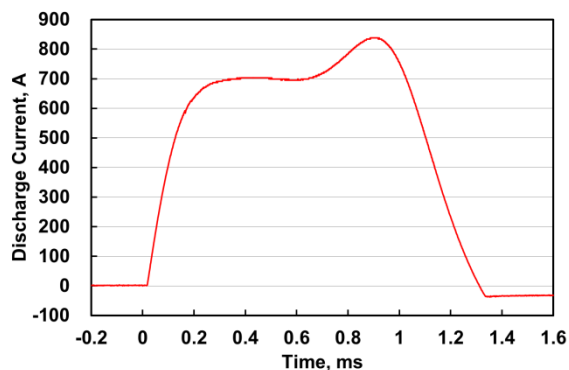


図4 PFN2を用いた放電波形

4. 準定常作動のための外部磁場印加用 PFN 設計

準定常作動させるためには、「立ち上がりと立ち下りの少ない電源の作成」、「作動時間の長い電源の作成」の2つの方法がある。ここで、前者は時間、コストがかかるうえにそれほど効果がないため、後者を選んで電源の作成をしている。本研究では外部磁場印加用の電源(PFN2)の作成を行った。

放電時間を延ばすために従来よりも静電容量の大きなスーパーキャパシタ(後述)と呼ばれるキャパシタを新たに適用した。このキャパシタの適用により、放電時間を延ばすことができたが、放電し続けると実験系がジュール発熱で大きな熱を発生し、配線が溶けてしまうことが熱解析から分かった。従って、それを避ける為に放電時間を任意に設定できるようなシステムが新たに必要となる。放電時間の設定方法は、「放電を中断させる」、「電流を別のところに逃がす」の2種類が考えられる。ここで、熱解析の結果から、10ms程度で放電を中断させることにより実験系に損傷を与えることなく安全に実験が行えることが分かった。従って、新たなキャパシタを適用し、放電時間可変で最大10ms程度の放電時間を持つ電源を設計した。今回設計した電源の回路図を図5に示す。

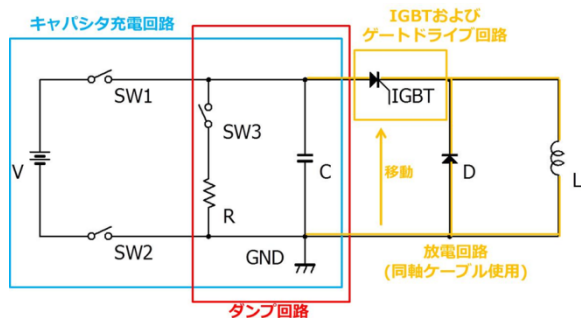


図5 電源回路図

4.1. スーパーキャパシタ

作成した電源にはスーパーキャパシタ(Maxwell Tech.のUltra Capacitorシリーズ, 耐圧48V, 容量165F, 内部抵抗 6.3m Ω)を使用した. 特徴として個体(電極)と液体(電解液)の界面に形成される「電気2重層」という状態を誘電体の代わりに使用している. その結果, 電極間距離が非常に短くなるため, 静電容量が大幅に上昇している. 逆に耐圧は低くなっている. 充放電は「電気2重層」へのイオンの吸着・脱着を利用することで行われる. キャパシタ外観を図6に示す.



図6 スーパーキャパシタ

4.2. IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)

IGBTとは半導体の一種であり, MOSFETをゲート部に組み込んだバイポーラトランジスタである. IGBTの最大のメリットは, 大電力の高速スイッチングが可能である. IGBTのスイッチのON・OFFは, ゲート・エミッタ間に電圧差を与えることにより行われる.+15~+20V程度の電圧差を与えるとON, -10V程度の電圧差を与えるとOFFとなる. そのため, 指定した時間 IGBT 駆動するための回路を作成して

いる(ゲートドライブ回路). IGBTの外観を図7に, IGBTを実際にスイッチとして使用し, 放電を遮断した様子を図8に示す.



図7 IGBT

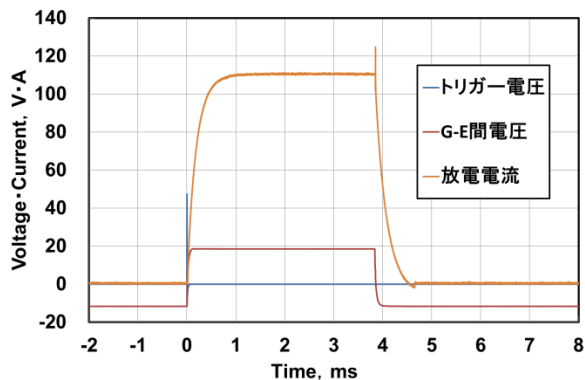


図8 20V 充電時の放電波形

4.3. 電源の作動

作成した磁場印加用電源を用いてスラスタのコイルへの放電を行った. キャパシタ充電電圧は10Vから最大250Vとしており, 放電時間は1~10msにしている. 充電電圧と放電電流の関係を図9に, 充電電圧と磁場強度の関係を図10に示す. 磁場強度は実測値を使用している.

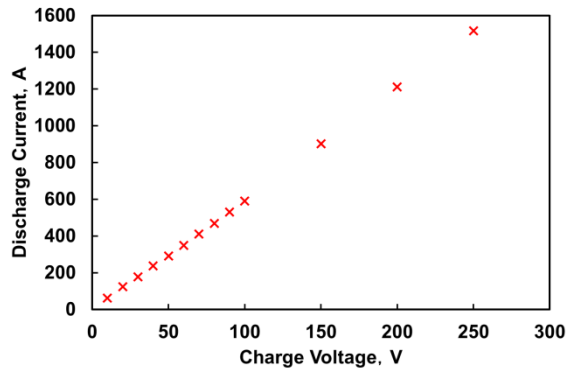


図 9 充電電圧と放電電流の関係

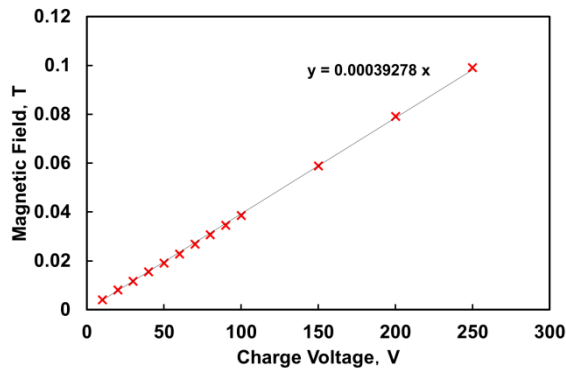


図 10 充電電圧と磁場強度の関係

また、放電時間可変な電源の製作を目標としているため、放電時間を変化させてコイルへの通電を行った。その際の放電波形を図 11 に、旧電源と新電源(5ms 作動時)の放電波形の比較を図 12 に示す。

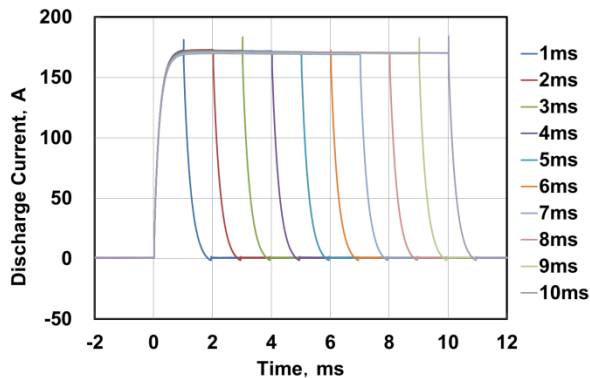


図 11 放電時間を変化させた放電

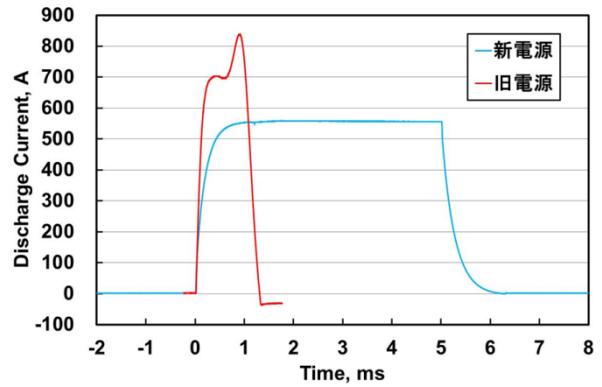


図 12 従来の電源との放電波形比較

図 11 より、ms オーダーの指定した時間での放電ができていることが確認できる。図 12 から、旧電源での放電(図 4)と比べて放電時間が延びており、全放電時間に対して、放電電流が一定の割合が増加しているのも確認できる。

5. 実験結果および考察

電源が完成したため、本研究で制作した電源が従来の電源で作動させた場合と変わりなく使用できるかどうかを、実際にスラスタを作動することで確かめた。正確な比較を行うため、先行研究と同じ条件でスラスタの作動を行った。条件を表 1 に示す。本研究では、磁場印加用電源のみの製作となったため、放電時間は先行研究と同様の 0.5ms となっている(コイル通電は 5ms)。推進剤流量と放電電圧の関係を図 13, 14 に、推進剤流量と推力の関係を図 15, 16 に示す。図 13, 15 は先行研究のデータであり、図 14, 16 は本研究での実験で取得したものである。

表 1 実験条件

パラメータ	条件
放電室長さ L	10mm
電極間距離 d	10mm
推進剤種	Ar
推進剤流量 \dot{m}	50,100,200,300mg/s
放電電流 $I_{\text{discharge}}$	$1.1 \pm 0.1\text{kA}$

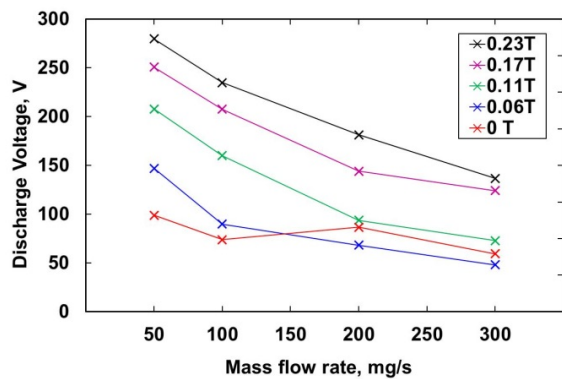


図 13 推進剤流量と放電電圧の関係(先行研究)

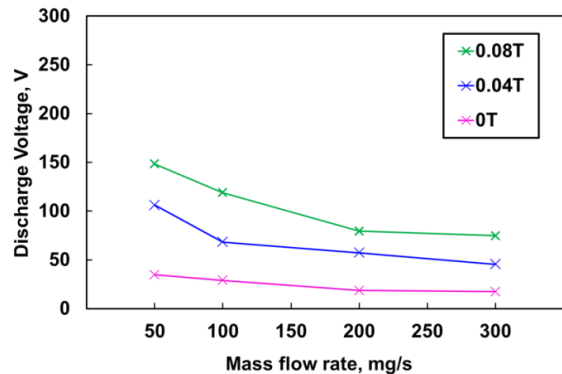


図 14 推進剤流量と放電電圧の関係

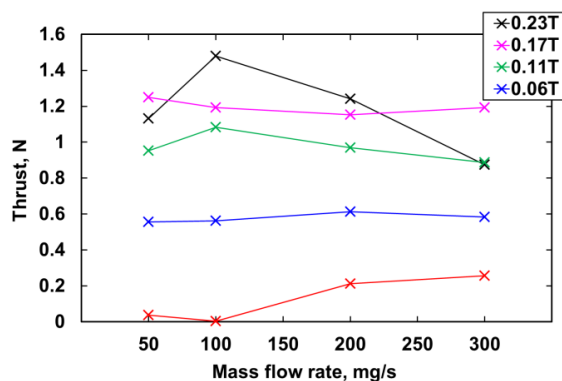


図 15 推進剤流量と推力の関係(先行研究)

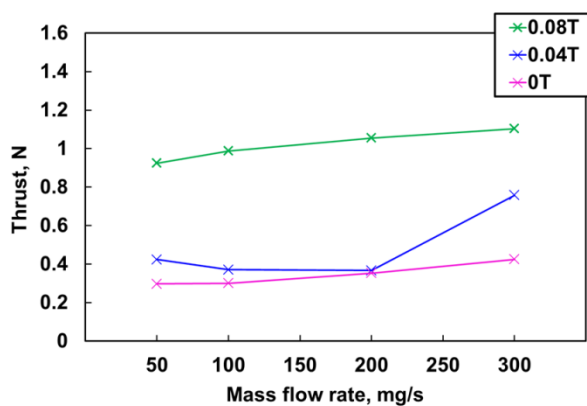


図 16 推進剤流量と放電電圧の関係

図 13, 14 を比較すると, 先行研究と同様の傾向が見て取れる. しかし, 0T 作動時の放電電圧については傾向に違いが見られ, 本研究のものが小さな値を示すものとなった. また, 図 15, 16 については, 0.08T でのデータは比較的似た傾向が見て取れたが, 0, 0.04T のものは, 先行研究と大きな違いが出ることとなった. この原因についてだが, 先行研究で使用していたスラストスタンドを一度組み替えていることに問題があると考えられる. その結果として, スタンドの振幅の影響がない放電電圧は先行研究と似た傾向が得られ, 影響のある推力に関しては大きな違いが出てしまった. この結果から, 本研究で製作した電源は先行研究と同様の出力を持ちつつ, 放電時間を伸ばすことに成功したといえる. しかし, 推力測定にばらつきが出たことからわかるように, スラストスタンドに関しては, 今後修正を加え, 再現性のあるものにしていく必要があると考えられる.

6. 結言

スーパーキャパシタと IGBT を使用し, 放電時間が可変で最大 10ms の放電時間を持つ電源の設計製作を行いスラストに適応させた. これにより, 従来使用されてきた電源の 10 倍の放電時間での作動を可能にした. また, 放電時の電流変化を 1%未満に抑えることに成功した. 新電源での磁場印加によるスラスト作動から新電源の妥当性を証明するとともに, 放電用電源への応用の道筋をたてた.

参考文献

- 1) R.G.Jahn, "Physics of Electric Propulsion,". McGraw-Hill, New York, 1968
- 2) 田窪将也, "直交外部磁場型 2 次元 MPD スラストに関する研究", 横浜国立大学大学院工学府システム統合工学専攻機械システム工学コース修士論文, 2013.