

水を推進剤に用いたパルス作動 MPD スラスタの試作と性能評価

Design of pulsed MPD thruster using water propellant

○中武 佑太(宮崎大学大学院工学研究科工学専攻)・矢野 康之(宮崎大学工学部教育研究システム工学科)
・岩切 希沙羅・各務 聡(宮崎大学工学部機械設計システム工学科)

○Yuta Nakatake(Department of Engineering, University of Miyazaki)・Yasuyuki Yano(Technical Center, University of Miyazaki)・Kisara Iwakiri・Akira Kakami(Department of Mechanical Design Systems Engineering, University of Miyazaki)

Abstract

Magneto Plasma Dynamic Thruster (MPDT), which has relatively large thrust and high specific impulse among the electric propulsion devices, is attracting attention as a next generation thruster. Conventionally, gaseous propellant such as ammonium were used for MPDT, whereas gaseous propellant requires pressure resistant tanks, and ammonia is reactive and toxic. In this study, we propose to use water as a MPDT propellant due to good storability and non-toxicity. Use of water propellant will simplify the thruster system and reduce the size and weight. We prototyped and tested a 100-kW class H₂O-MPDT to show that H₂O-MPDT yielded a 1-kA class discharge with 100-kW class discharge power. Firing tests in vacuum shows that the prototype yielded a 2-kA discharge current and discharge power up to 180 kW.

記号の説明

Δm : 噴射量
 F : 推力
 P : 投入電力
 E : 投入エネルギー
 I_{sp} : 比推力
 g : 重力加速度

1. 序論

現在、衛星放送や気象観測などの人工衛星を利用したサービスや、宇宙探査が世界的に進められ、宇宙開発は、科学の発展だけでなく我々の生活に大きく貢献するようになった。2003年には、小惑星探査機の“はやぶさ”が小惑星“イトカワ”からのサンプル・リターンのために打ち上げられ、2010年に見事達成した¹⁾。このような宇宙機には姿勢制御や軌道制御、軌道遷移のために推進機が用いられており、これまでに、電気推進は、人工衛星の軌道制御、宇宙探査機の主推進機として実用に供されてきた¹⁾。しかし、これまでのところ消費電力は数 kW 程度であり、推力は高々 100 mN と小さくなっている。そのため、将来の大規模な軌道間輸送や深宇宙探査ミッションなどには、大電力かつ大推力の電気推進が必要である^{2),3)}。

以上の背景から、本研究では、比推力が高く、他の電気推進機と比べて大推力が得られる MPD 推進機(Magneto Plasma Dynamic Thruster : 以降 MPDT)に着目した。一般に、MPDT は、推進剤を電気エネルギーによって電離させてプラズマを生成し、電磁力によって加速させることで推力を得る方式で

ある。しかし、従来の MPDT は、アンモニアなどの毒性のある液体推進剤が水素などの気体推進剤を用いているため、推進剤の貯蔵に高圧タンクを必要とし、推進機の小型化に限界があった。

そこで、本研究では、MPDT の小型化を実現するために、水を推進剤に用いた H₂O-MPDT を提案する。水は、貯蔵が容易で高圧タンクを必要としないことから、小型軽量化に貢献する。また、無毒であり、材料とほぼ反応しないため、地上試験や開発のコストを低くできる。

今回、100 kW 級の H₂O-MPDT の作動を実証し、放電電流電圧特性を評価するために、実験系の構築と H₂O-MPDT の試作評価を行った。すなわち、水の噴射量、充電エネルギーをパラメータとして、放電電流と放電電圧を測定し H₂O-MPDT の作動を実証する。なお、自己誘起磁場方式の実験を行うため準定常作動で 100 kW 級の定常作動を模擬した。

2. 試作した H₂O-MPD スラスタ

試作した H₂O-MPDT の作動原理を図 1 に示す。はじめに、所要量の水を噴射器によって電極間に供給し、イグナイタの高電圧パルスによって水の一部を電離させることにより少量のプラズマを生成する。このプラズマが電極間を短絡すると、PFN (Pulse Forming Network) から 2 kA クラスの電流が供給され、水がさらにプラズマ化するとともに自己誘起磁場が形成される。この磁場によってプラズマ中の電流は電磁力的に加速され、50 km/s のプラズマジェットとなり、推力が発生する。なお、所要量(100 μ g クラス)の水をパルス放電の直前に短時間で供給する必要があるため、パルス噴射器 (FAPI : Fast Acting Pulse Injector) を試作した。

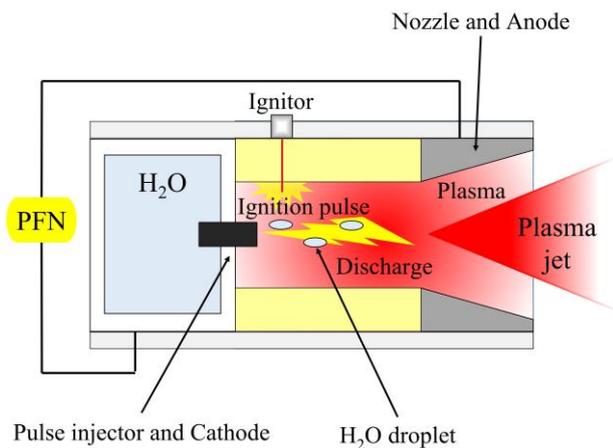


図 1 Conceptual drawing of pulsed H₂O-MPDT

2.1 試作機 本研究で使用した試作機の概略図を図 2 に、実物の写真を図 3 に、ノズルの諸元を表 1 に示す。パルス噴射器の噴射口板をカソードとし、ノズル形のアノードを設けた構造となっている。アノードとカソードはステンレス製であり、PFN に接続されている。

イグナイタの電極は $\phi 0.4$ mm のステンレス製ワイヤであり、主放電を誘起するために、カソードより 1 mm 離れたところに設けた。このイグナイタに、パルストランスで昇圧した最大 20 kV の電圧を印加した。

カソード、放電室、アノードは同軸状に配置しており、アノードと真空チャンバの間で異常放電させないためにジュラコン製のシールドで覆っている。また、アノードとカソード間のキャビティは長さ 10 mm であり、プラズマにも耐えられるように、耐熱性のセラミック製である。なお、イグナイタワイヤが挿入できるような小径の穴を設けている。

2.2 液体推進剤パルス噴射器 (FAPI) 噴射器の作動 ON/OFF の様子を図 4 に、外形を図 5 に示す。図 4 のように、待機時には圧縮ばねの復元力により、プッシュロッド先端のシーリングラバーをオリフィスに押し付け、水の流出を防いでいる。噴射の際には、ソレノイドに電圧を印加することにより、ステーター(固定鉄心)へプランジャ(可動鉄心)が引き寄せられる。すると、プランジャに固定されたプッシュロッドがオリフィスから引き離され、液滴が噴射される。その後、電圧印加を中断することにより、プッシュロッドは圧縮ばねの復元力によって原点に復帰し、噴射が終了する。

噴射口板は、 $\phi 14$ mm、厚さ 0.2 mm のステンレス鋼板であり、中央には高さ 1 mm の凸部を設けた。この凸部の頂点に $\phi 300$ μ m の噴射口を微小径ドリルで穿孔している。この構造により、シーリングラバーはオリフィスと点接触し、速やかかつ確実にバルブを開閉できる。

また、プッシュロッドの並進をスムーズにするため、テフロン製のガイドを用いた。磁気回路(プランジャ、ステーター、ヨーク)は、透磁率が高い S45C で製作し、コイルは $\phi 0.36$ mm ポリウレタン被膜銅線を 770 回巻いている。なお、コイルの電気抵抗は 15.9 Ω であった。

プッシュロッド先端のシーリングラバーは、常に液体推進

剤に晒され、オリフィスの突起部との接触を繰り返すため、高い耐磨耗性が必要となる。よって、Kalrez(パーフロロエラストマー)を用いた。Kalrez は、米デュボン社が開発したエラストマー素材で、テフロンなどフッ素樹脂の持つ優れた耐薬品性・耐熱性を持ちつつ、ゴムの弾力性を兼ね備えた材料である。

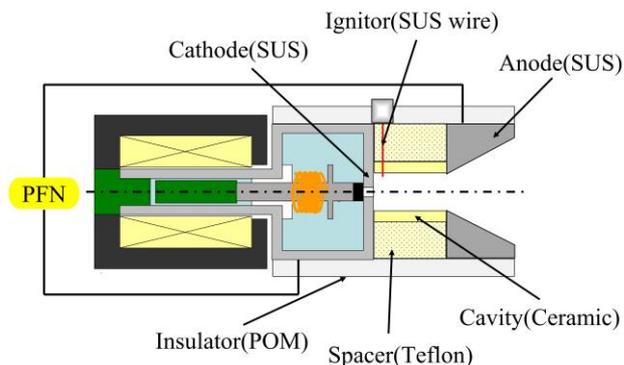


図 2 Schematic diagram of the H₂O-MPDT

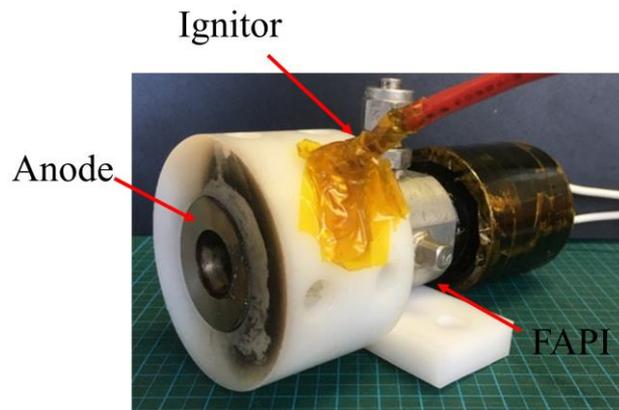


図 3 Picture of the H₂O-MPDT

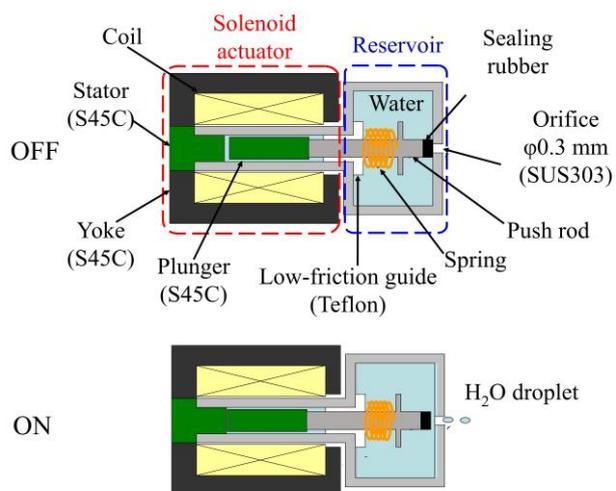


図 4 Schematic diagram of the FAPI

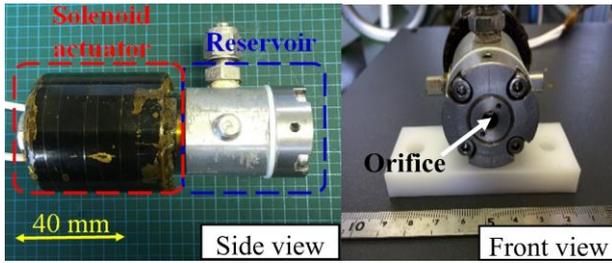


図 5 Picture of the FAPI

表 1 Specifications of the nozzle

Area ratio	30
Nozzle angular, °	30
Nozzle inlet diameter, mm	3
Nozzle outlet diameter, mm	16.4

3. 実験装置

本研究で使用した実験装置の概略図を図 6 に示す。噴射後にイグナイタを作動させるため、タイミングを正確に制御しなければならない。そこで、タイミング制御には、任意の波形を発生できる信号発生器(Analog discovery)を用いた。また、放電電流はログスキーコイルにより、放電電圧は、高電圧プローブを用いて測定し、オシロスコープに記録した。

3.1 PFN(Pulse Forming Network) MPDT の作動には kA オーダーの電流が必要なため PFN を製作した。PFN は LC ラダー回路の一種で、パルス形成線路(PFL)の分布インダクタンスとキャパシタンスをインダクタとコンデンサで構成したものであり、数百 ns 以上の比較的長いパルスを得るのに適している。製作した PFN の緒元を表 2 に示す。目標放電時間 1 ms、放電電流 2 kA とした。プラズマの抵抗は約 100 mΩ であると予測されるため、インピーダンスマッチングのために、PFN の特性インピーダンスが 100 mΩ となるように設計した。今回は、730 μF のコンデンサと 7 μH のインダクタからなるラダーを 7 段にした。

表 2 Specifications of the PFN

Capacitance, μF	5110±10 %
Rated voltage, V	800
Inductance, μH	7.0
Number of stages	7
Discharge time, ms	1±10%
Max charge energy, J	409
Characteristic impedance, mΩ	100

3.2 真空排気系 本研究で用いたステンレス製の真空チャンバは、直径 1 m、長さ 1.5 m の円筒形をしている。この真空チャンバの減圧には、本排気のための油回転ポンプ(排気速度 670 L/min)と油拡散ポンプ(排気速度 1,100 L/s)を利用

し、また、粗引きのためのメカニカルブースターポンプ(排気速度 28,350 L/min)を用いた。はじめに、メカニカルブースターポンプにより粗引きして 2 分程度で 100 Pa まで減圧する。その後、油拡散ポンプにより排気すると、約 1 時間程度で背圧は 5.0×10^{-3} Pa 程度まで減圧することができる。

4. 実験条件

PFN の充電エネルギーと噴射量をパラメータとして、H₂O-MPDT の作動実験と放電電流と電圧の測定を行った。表 3 に実験条件を示す。H₂O-MPDT を作動させる際の真空チャンバ内背圧は、 7.0×10^{-3} Pa 以下とし、充電エネルギーは 0 から 409 J の範囲で変化させた。噴射量は、以下の式を用いて算出し、その近傍の値を実験条件とした。

$$\Delta m = \frac{F}{P} \cdot \frac{E}{I_{sp}g} \quad (1)$$

推力電力比(F/P)を 10 mN/kW、比推力を 2000 s、投入エネルギーを最大の 409 J と仮定すると、 Δm は、0.21 mg となる。そこで、噴射量は、0.15 mg、0.2 mg とした。なお、推力電力比と比推力は、気体推進剤 MPDT の一般的な値を参考に用いているが、初期の実験であるためやや低めの値にした。

時刻 t は、噴射器の駆動信号が送られるタイミングを 0 s とする。イグナイタは $t=7$ ms で作動させた。というのも、高速度カメラを用いて噴射口の液滴を観察したところ、 $t=7$ ms 程度で噴射が完了していたためである。

表 3 Experimental conditions for the H₂O-MPDT

Back pressure, Pa	$< 7.0 \times 10^{-3}$
Capacitor stored energy E , J	102, 160, 230, 313, 409
/charged voltage, V	/200, 250, 300, 350, 400
Mass shot Δm , mg	0.15, 0.20
Ignition timing, ms	7

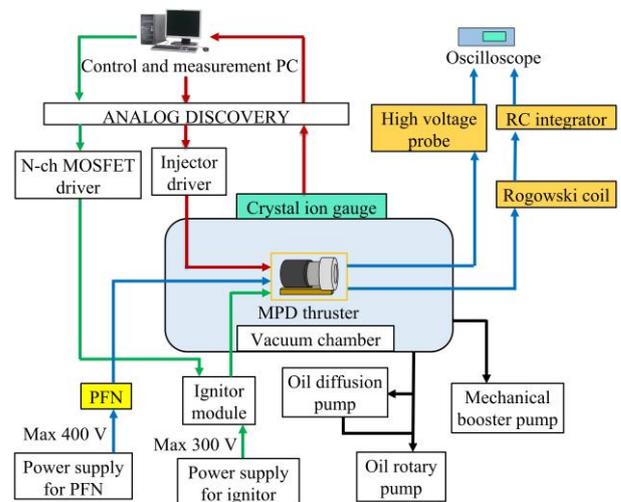


図 6 Schematic of an experimental apparatus

5. 実験結果及び考察

5.1 放電電流・電圧の時間履歴 代表的な放電波形の例として充電電圧 400 V, 噴射量 0.15 mg の時の放電電流・電圧の時間履歴を図 7, 放電電力の時間履歴を図 8 に示す。時間は噴射器の駆動信号が印加された時間を 0 s としている。このときの放電電流のピーク値は 2.1 kA, 放電電流の時間平均は 1.6 kA, 放電電圧の時間平均は 108 V, 放電時間は 1.32 ms, 消費エネルギーは 231 J であった。このように放電時間は、目標値の 1 ms とほぼ同じであることから、試作した PFN は問題なく作動したといえる。また、放電電流は、ほぼ矩形形状であり、平均で 1.6 kA であったことから、水を推進剤としても MPDT を作動させることができるといえる。

また、他の推進剤噴射量, 充電電圧でも、放電電流は、1 kA を超える矩形形状をしていたことから、H₂O-MPDT の作動を実証できたといえる。

5.2 電流電圧特性 噴射量を 0.15 mg と 0.20 mg とし て充電電圧を 200 から 400 V で変化させたときの電流電圧特性を図 9 に、放電電圧-消費電力のグラフを図 10 に示す。エラーバーは、同一条件で 5 回作動させたときの標準偏差である。図 10 より、充電電圧 300 V から 100 kW を超えており、充電電圧を最大の 400 V にした場合には、約 180 kW の放電電力が得られた。このように、100 kW 級の H₂O-MPDT の作動を実証することができた。

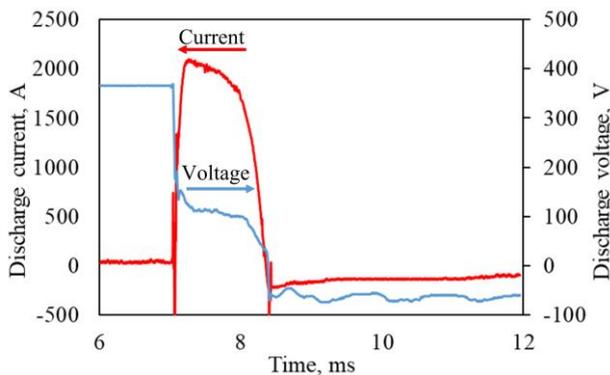


図 7 Time history of discharge current and voltage

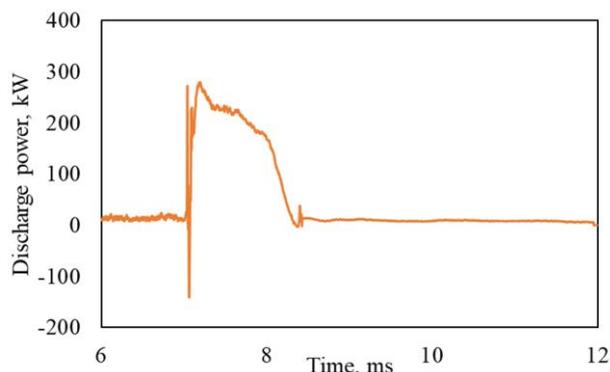


図 8 Time history of discharge power wave

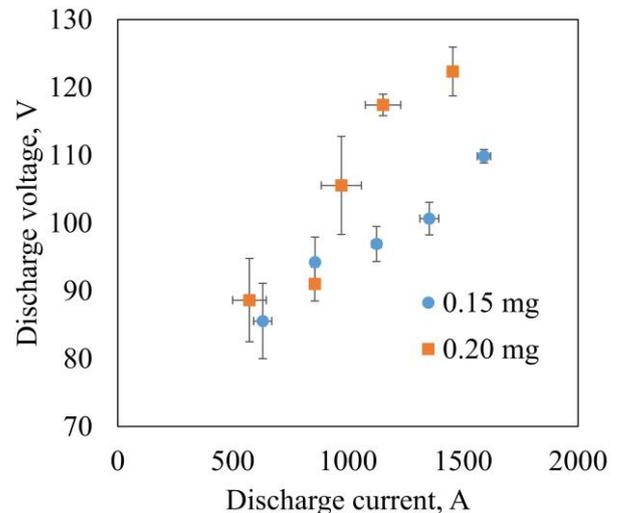


図 9 Discharge voltage dependence on the discharge current

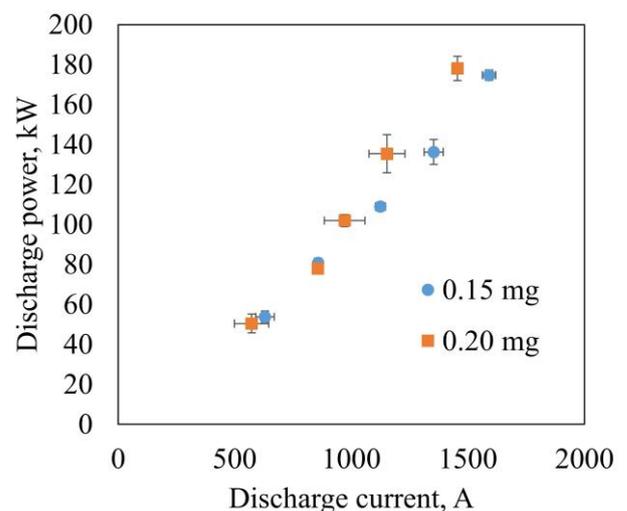


図 10 Discharge power dependence on the discharge current

6. 結論

本研究では、MPDT の小型化のために、貯蔵が容易な水を推進剤とする 100 kW 級の H₂O-MPDT を提案した。以下が結論である。

- 準定常作動の H₂O-MPDT の実験系を構築し、試作機の放電電流電圧特性を評価した。
- 噴射量 0.15 mg, 0.20 mg における放電電流電圧特性を取得した。
- 今回は 40 kW から 180 kW の放電電力が得られ、目標とする 100 kW での作動を実証することができた。

参考文献

- 1) 國仲均：宇宙探査から発するイノベーション～「はやぶさ」小惑星探査の事例～, 第 30 回宇宙環境利用シンポジウム講演集, 2016.
- 2) 栗木恭一, 荒川義博：電気推進ロケット入門, 東京大学出版会, 2003.
- 3) 國仲均：電気推進の研究・開発・宇宙利用の方向性について, 2006 年度宇宙関連プラズマ研究会講演集, 2007, pp.67-74.
- 4) 田原弘一：輻射冷却式大電力 DC/MPD アークジェットスラスタの開発, 平成 24 年度宇宙輸送シンポジウム講

演集録, 2013.

- 5) 窪田健一, 薄井由美, 船木一幸, 奥野喜幸 : パルス作動 MPD スラスタにおける電流波形及び推進剤種の影響に関する数値的研究, 日本航空宇宙学会論文集 Vol. 57, 2009, pp.482-492