

水を推進剤とした MPD 推進機の研究

Study of MPD thruster using water propellant

○松浦 有佑(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)
・山根 直人・各務 聡(宮崎大学工学部機械設計システム工学科)

○Yusuke Matsuura(Department of Engineering, University of Miyazaki)・Yasuyuki Yano(Technical Center, University of Miyazaki) Naoto Yamane・Akira Kakami(Department of Mechanical Design Systems Engineering, University of Miyazaki)

Abstract

This paper describes the design and performance of 100 kW class Magneto Plasma Dynamics Thruster (MPDT) using water as liquid propellant. In general, MPDTs have large thrust-to-power ratio and high specific impulse among the electric propulsion devices, and use ammonium and hydrogen as propellant. However, hydrogen propellant requires high-pressure tank, and damages materials, and ammonium is reactive and toxic. Hence, we propose to use water as a MPDT propellant, focusing on the storability and non-toxicity. Use of water propellant will simplify the propulsion systems and reduce size and weight, because water necessitates no Cryotank nor chemically resistant materials. A 100-kW class prototype was designed to show that water-MPDT yielded a thrust using 1-kA class arc discharge currents.

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

近年、人工衛星を利用した衛星放送や気象観測等で、宇宙開発は、我々の生活に大きく貢献するようになった。2014年には、小惑星探査機の”はやぶさ2”がサンプル・リターンのために打ち上げられた。このような宇宙機には姿勢制御や軌道制御のための推進機が必要であり、これまでに、電気推進が宇宙探査機の主推進機として実用に供されてきた。しかし、これまで用いられてきた電気推進は消費電力が数 kW 程度であり、推力は 100 mN 程度と小さかった。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、他の電気推進機と比べて大推力かつ高い比推力が得られる 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、電磁力によってプラズマを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、アンモニアや、ヒドラジンなどの毒性のある液体推進剤か

水素などの気体推進剤を用いているため、推進剤の貯蔵に耐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、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、貯蔵が容易で耐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。

これまでの研究で、100 kW 級の H₂O-MPDT を試作し、作動の実証、及び放電電流電圧特性を評価した。今回は、推力による性能評価のため、推力測定装置の構築を行った。

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。まず、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。

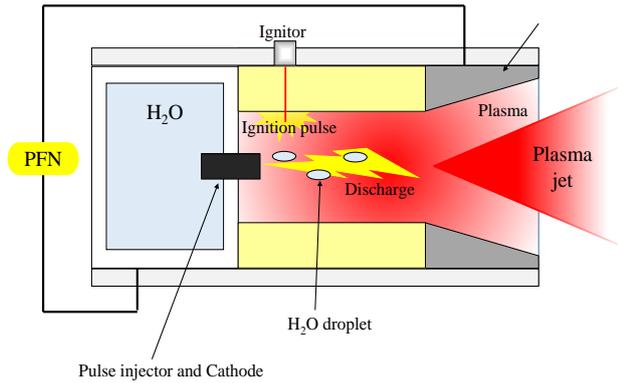


図1 Conceptual drawing of pulsed H₂O-MPDT

2.1 試作機 本研究で使用した試作機の概略図を図2に、写真を図3に、ノズルの諸元を表1に示す。パルス噴射器をカソードとし、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φ0.4 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、アノードと真空チェ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。

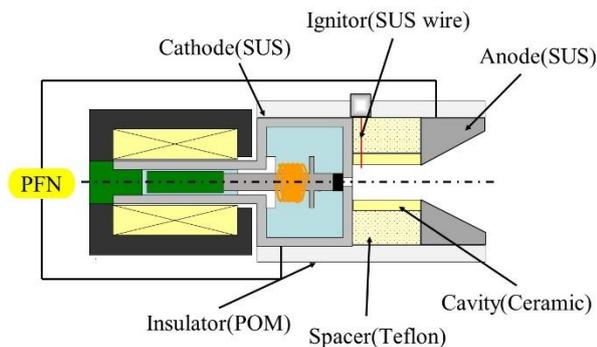


図2 Schematic diagram of the H₂O-MPDT

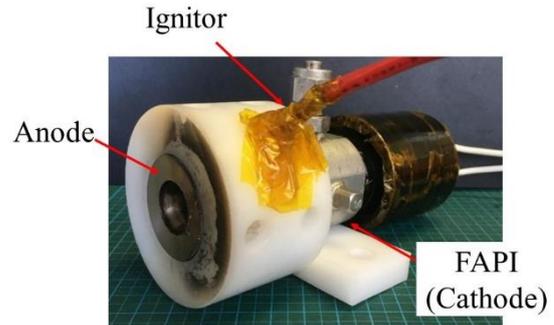


図3 Picture of the H₂O-MPDT

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、概形を図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、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、φ14 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φ300 μm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φ0.36 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、高い耐摩耗性が必要となる。よって、Kalrez(パーフロエラストマー)を用いた。Kalrezは、米デュポ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。

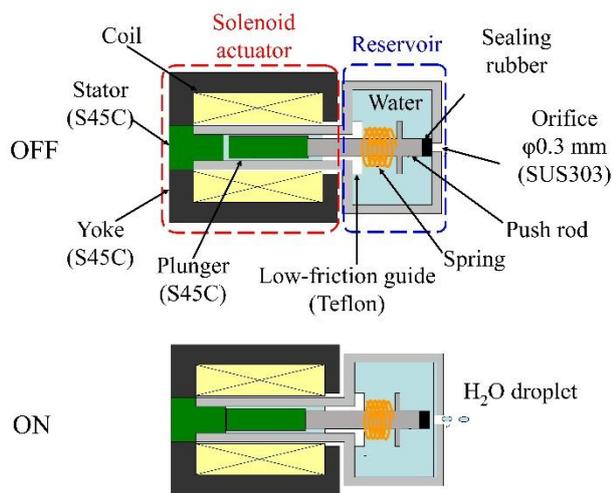


図4 Schematic diagram of the FAPI

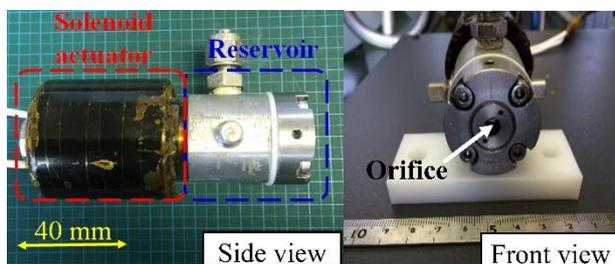


図5 Picture of the FAPI

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。

3.3 推力測定装置 推力を測定するために、水平振り子型のスラストスタンドを製作した。図6に概形を示す。ヒンジを支点とする振り子を推力により変位させ、この時の振り子の変位を分解能 0.5 μm のレーザ変位計により測定することで推力を評価する。また、較正試験には、ネオジウム磁石とコイルを用いて数 ms のインパルスを与える較正装置を使用した。

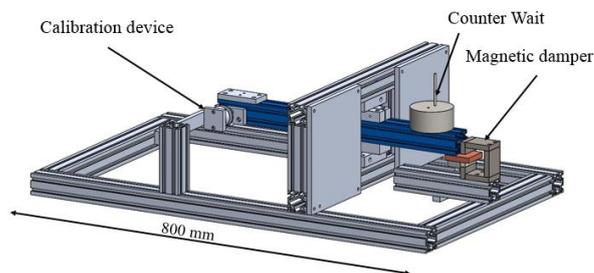


図6 Picture of the thrust stand

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。

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

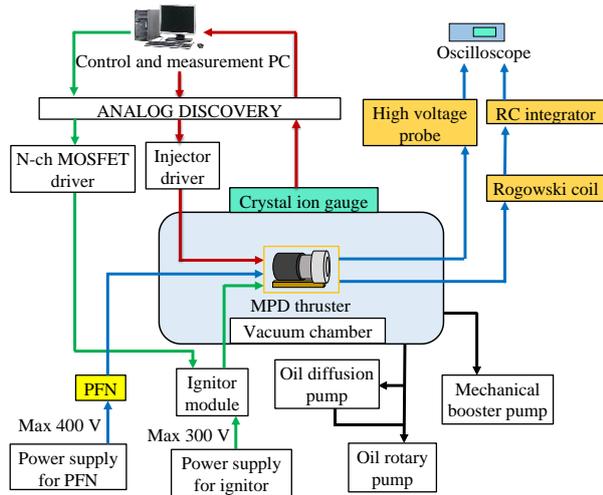


図 7 Schematic of an experimental apparatus

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 8, 放電電力の時間履歴を図 9 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たといえる。

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、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 10 に、放電電流-消費電力のグラフを図 11 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 11 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。

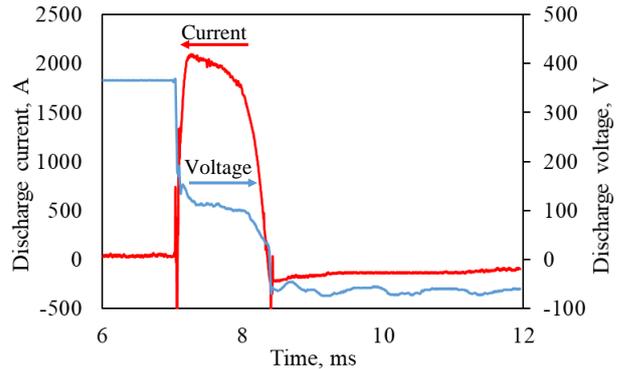


図 8 Time history of discharge current and voltage

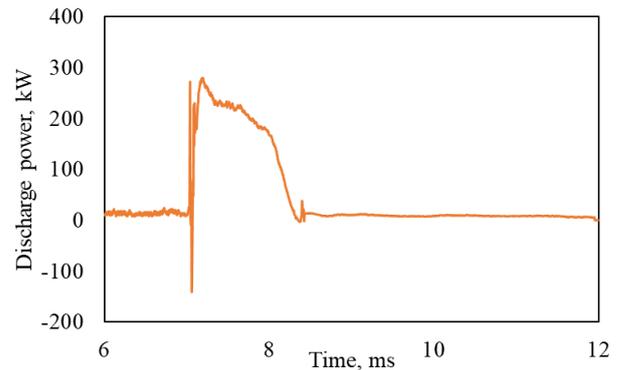


図 9 Time history of discharge power wave

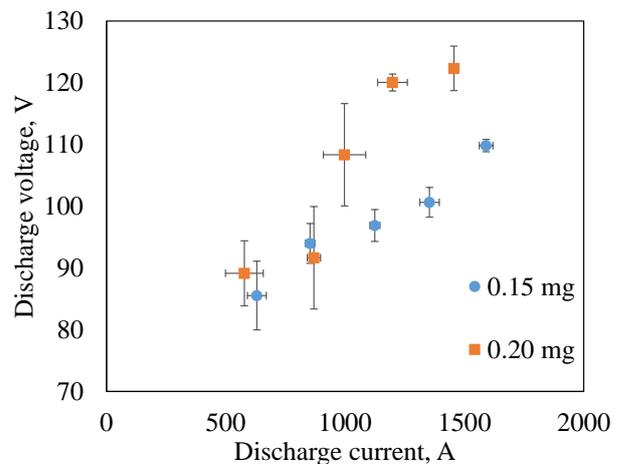


図 10 Discharge voltage dependence on the discharge current

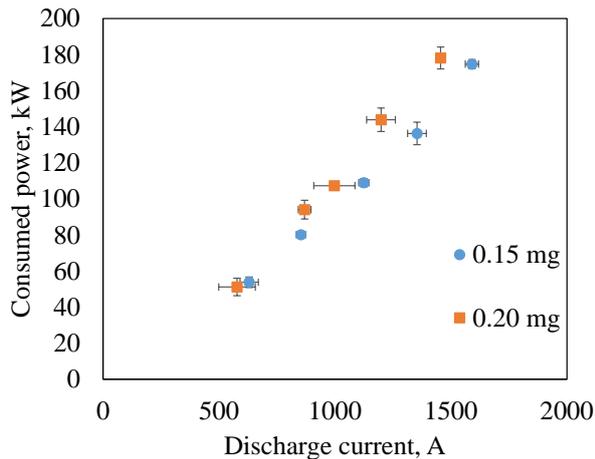


図 11 Discharge power dependence on the discharge current

5.3 プラズマ抵抗 噴射量を 0.15 mg, 0.20 mg としたときの放電電流-プラズマ抵抗のグラフを図 12 に示す。この時の設計プラズマ抵抗は 100 mΩ である。図 12 より放電電流の増加に伴い、プラズマ抵抗は減少した。このことは、放電電流が増加することで、電気伝導度が増加したことが原因と考えられる。また噴射量の増加に伴い抵抗が増えていることから、放電によって水を十分に電離できておらず、中性粒子が増加してしまっている可能性がある。今後、液滴をより細かくして検証を行う。

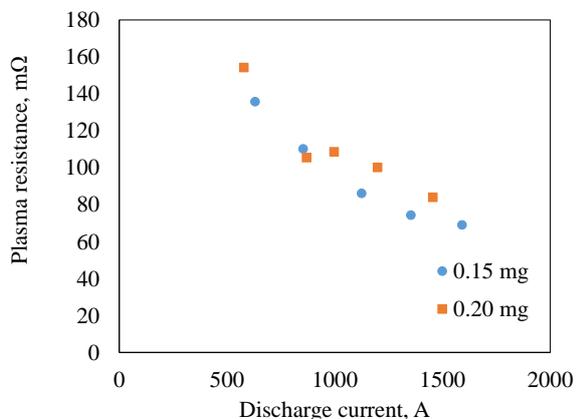


図 12 Plasma resistance dependence on the discharge current

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。
- 推力測定装置の構築が完了し、推力測定を行う予定。

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