

ホローカソードを用いた外部磁場印加型 MPD 推進機の開発状況

○横田茂，片岡久志，鶴生知輝，鄭裁勲，佐宗章弘（名大）

1. はじめに

近年，電気推進機による深宇宙探査や大型宇宙構造物構築のための物資輸送が計画されており¹⁾，電気推進機の大電力化についての研究が進められている。^{2,3)}中でも，Magneto-plasma-dynamic (MPD) スラスタは推力密度が高いため，コンパクトにすることができ，次世代の宇宙推進機として有望であるが，陰極の損耗や低い推力効率のため，未だ実用化されていない。しかしながら，一般に MPD 推進機は，大電力を投入するに従い効率が上昇することが知られているため，今後の大電力電気推進機という意味では，魅力的な推進機である。一方の陰極の損耗については，陰極上のスポット電流を避けるために，中空形状の陰極が用いられていることが多いが，それでも尚，長時間の耐久性を実現した例は報告されておらず，実機搭載を阻む問題である。

これに対し我々は，イオンエンジン等の中和器として長時間の作動実績のある，ガス作動式のホローカソードを陰極として用いる推進機を開発してきた。この推進機は，推力発生メカニズムの単純さのため，矩形形状をしている。この結果，現在のところ，Ar による作動をおこない， $I_p=5,100$ s にて，推進効率 18% を達成している。³⁾

一方で，ガス作動式ホローカソードは，キーパーと呼ばれる電子の引き出し電圧を印加する部分が主放電プラズマと接するため，損耗する可能性が高く⁴⁾，この矩形型推進機においても，一部損耗が観測された（図 1）。損耗するということは，放電室内部に金属原子が存在することとなるため，作動に影響があった可能性がある。本稿の主題は，その損耗が推進機の性能にどのように影響があったかを調べることである。そのため，推進機のキーパーを絶縁体のプレートで覆い，損耗がないとみなせる状態にして，推力および放電電圧を計測し，カバープレートのない状態と比較した。



図 1 陰極の損耗の状態

2. 実験装置

2.1 矩形型 MPD 推進機

図 2 に矩形型 MPD 推進機の概略図を示す。放電室は，奥行き 20 mm，高さ H mm の矩形形状であり，流れ方向の長さは 60 mm である。 H は 5 mm ~ 15 mm の間で可変である。放電室上面にモリブデン製の陽極を，下面にはホローカソード (DLHC-1000, Kaufman & Robinson 社) が配置されている。外部磁場は永久磁石と磁気回路によって放電室全体にわたってほぼ均一な外部磁場 (240 mT) を印加されている。損耗を防ぐためのカバープレートは厚さ 1 mm，流れ方向長さ 60 mm，幅 20 mm，中央部に $\phi 1$ mm の孔のあるアルミナ製プレートである。推進剤は Ar を用いた。

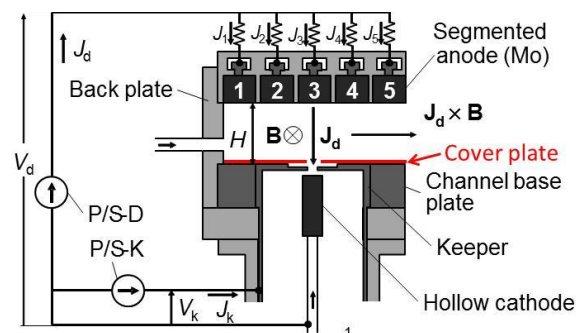


図 2 矩形型 MPD 推進機概略図

2.2 試験装置

実験は全て図 3 に示す直径 2 m，長さ 4 m の真空チャンバ内で行った。この真空チャンバは排気量 3.2×10^2 L/s のターボ分子ポンプと排気量 33 L/s のロータリーポンプによって排気され，推進剤を供給しない場合，チャンバ内の圧力は 1.0×10^{-3} Pa であり，推進剤 (Ar) 1.3 mg/s を流した場合で 5.5×10^{-2} Pa であった。放電電流，キーパー電流はチャンバ側面のフィードスルーから供給した。

推力の測定は，振り子式スラストスタンド⁵⁾を用いて行った。スタンドアーム内に銅管を設置し，推進剤を供給した。振り子の変位は，作動変圧器によって測定した。

2.3 実験条件

表 1 に実験条件を示す。ここで， \dot{m} ， J_d ， J_k ， B および H はそれぞれ，推進剤流量，放電電流，キーパー電流，磁束密度，および電極間距離である。すべての推進剤はホローカソードを通じて放電室内に供給した。

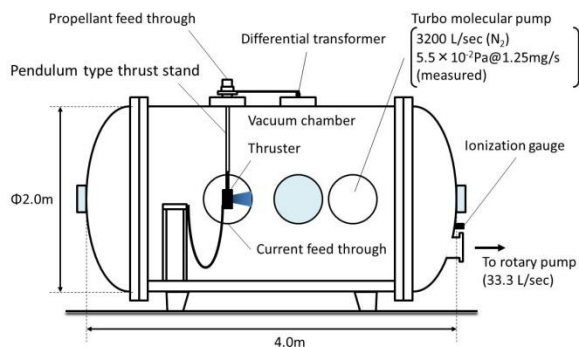


図3 真空系概略図

表1 作動条件

Control parameters	Values
\dot{m} , mg/s	0.42, 0.83, 1.3
J_d , A	5.0, 10, 15
J_k , A	2.0
B , mT	2.4×10^2
H , mm	5.0, 10, 15

3. 結果および考察

3.1 作動可能領域

表2に示すのは、作動パラメータと、その時の作動状況を示している。表中、✓は作動可能、×は電源の制約により作動不可、-はそもそも作動しなかったことを表す。この表から分かる通り、カバープレートを置くことにより、作動領域が狭まっていることがわかる。具体的には、低流量、大電流にしていくほど、作動が困難となっていく様子が見て取れる。

表2 作動状況一覧
(a) カバープレートあり

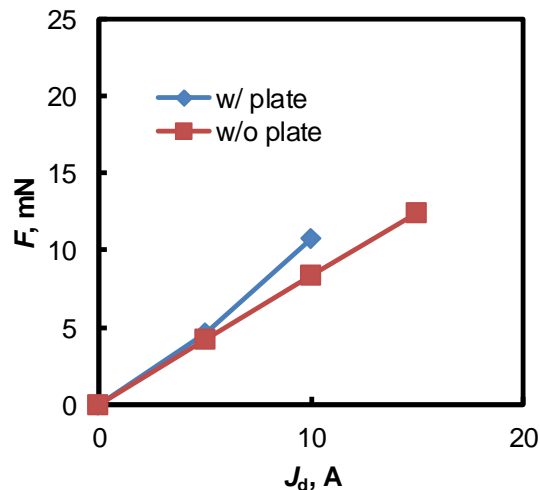
H , mm	\dot{m} , mg/s	J_d , A		
		5	10	15
5	2.08	✓	✓	✓
	1.25	✓	✓	✓
	0.83	✓	✓	✓
	0.63	✓	✓	✓
	0.42	✓	✓	×
	0.21	✓	✓	×
10	2.08	✓	✓	✓
	1.25	✓	✓	✓
	0.83	✓	✓	×
	0.42	-	-	-
15	2.08	✓	✓	×
	1.94	✓	✓	×
	1.25	✓	✓	×
	0.83	✓	×	×
	0.42	-	-	-
	0.21	-	-	-

(b) カバープレートなし

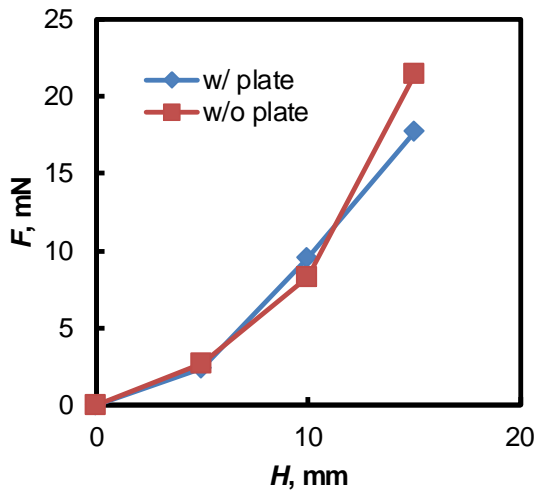
H , mm	\dot{m} , mg/s	J_d , A		
		5	10	15
5	2.08	✓	✓	✓
	1.25	✓	✓	✓
	0.83	✓	✓	✓
	0.63	✓	✓	✓
	0.42	✓	✓	×
	0.21	✓	✓	✓
10	2.08	✓	✓	✓
	1.25	✓	✓	✓
	0.83	✓	✓	✓
	0.42	✓	✓	✓
	0.21	✓	✓	✓
15	2.08	✓	✓	×
	1.94	✓	✓	×
	1.25	✓	✓	×
	0.83	✓	✓	×
	0.42	✓	✓	×
	0.21	✓	✓	×

3.2 推力特性

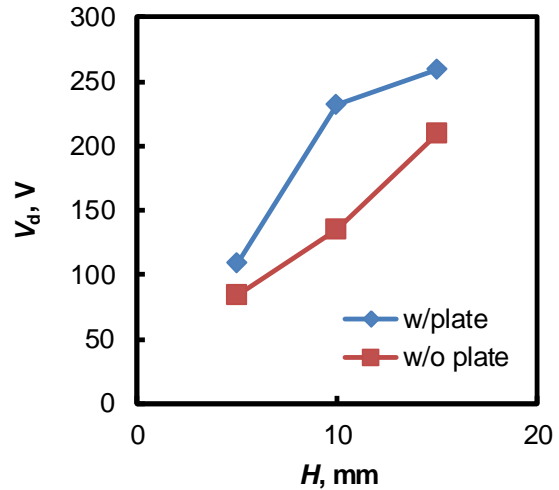
図4に示すのは、放電電流 J_d 及び電極間距離 H に対する推力 F の変化である。この図に示す通り、カバープレートの有無によって推力の特性、値ともに有意な差は存在しない。したがって、スパッタされて放電室内を浮遊する金属粒子が存在するとしても、それらは推力には寄与していないといえる。これは、推力発生機構として電磁推力が支配的な作動領域で作動させており、推力が推進剤流量によって変化しない領域であるため³⁾、スパッタ粒子が推進剤の一部となるならぬにかかわらず推力が変わらないと解釈できる。この結果から、前稿まで³⁾の報告で、少なくとも F と I_{sp} の値は信頼できるものであると検証されたと言える。



(a) 放電電流による変化 ($H=10$ mm)



(b) 電極間距離による変化 ($J_d=10$ A)
 図4 推力特性の比較 ($\dot{m}=1.25$ mg/s)

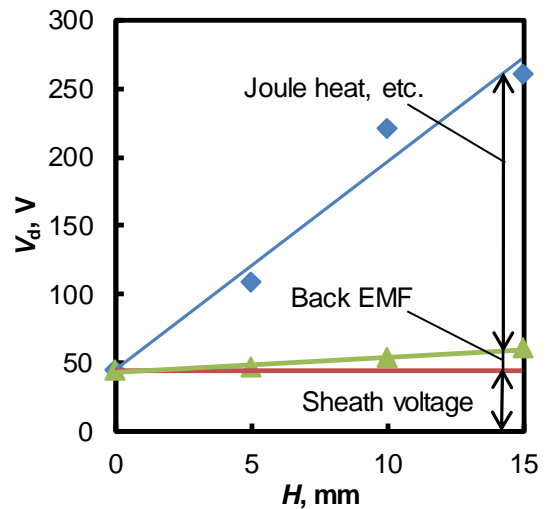


(b) 電極間距離による変化 ($J_d=10$ A)
 図5 電圧特性の比較 ($\dot{m}=1.25$ mg/s)

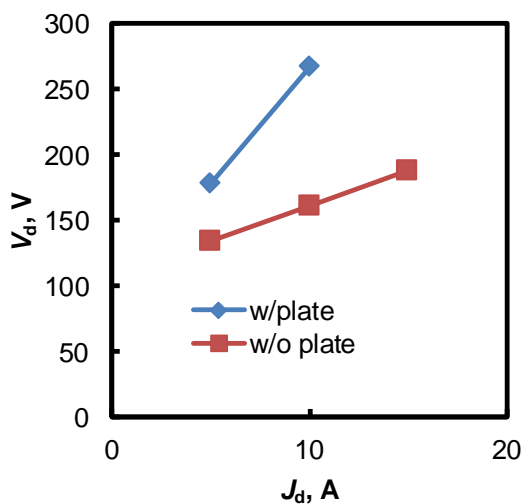
3.3 電圧特性

図5に示すのは、 J_d および H に対する V_d の特性である。これらの図から、 J_d および H が大きいほど V_d も大きくなるという傾向はカバープレートの有無によらないが、カバープレートがある場合は、ない場合に比べて、 V_d が大きい。この電圧上昇によって、表2で示した通り、作動領域が狭まったものと考えられる。

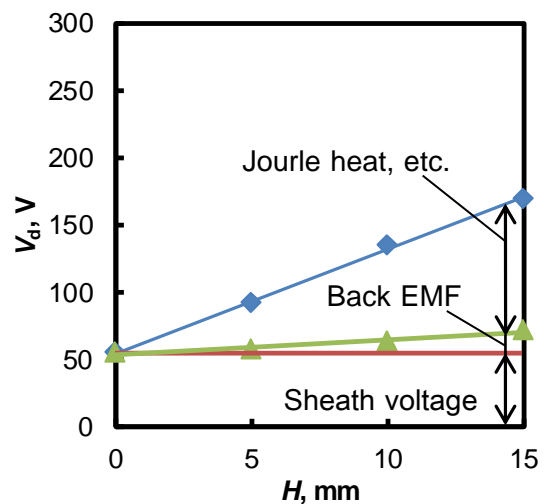
次に、この電圧の内訳について調べたものが、図6である。電圧の内訳の算出方法については、参考文献³⁾を参照されたい。これらの図から、シーツ電圧、逆起電力分はどちらも変わらないが、カバープレートを置くことによって、ジュール熱と電子の圧力勾配による分が増えていることがわかる。これは、金属粒子がなくなったことによる電気伝導度の低下、もしくは、カバープレートの $\phi 1$ の孔を通り抜けるための抵抗による分と考えられる。



(a) カバープレートあり



(a) 放電電流による変化 ($H=10$ mm)



(b) カバープレートなし

図6 放電電圧内訳 ($\dot{m}/H=0.083$ mg/s/mm, $J_d=5$ A)

5. まとめ

ホローカソードを用いた外部磁場印加型矩形形状 MPD 推進機について、ホローカソードキーパー部の損耗を防ぐために、カバープレートを設置して推進性能の評価を行い、以下の知見を得た。

- 1) 推力はカバープレートの有無による変化はなかった。
- 2) 放電電圧はカバープレートをつけることで上昇した。これにより、作動可能領域が狭まった。
- 3) この電圧の上昇分は、ジュール熱等による分であり、逆起電力とシース電圧については変化がなかった。

参考文献

- 1) <http://www.globalspaceexploration.org/wordpress/>
- 2) N. Yamamoto, T. Miyasaka, et.al. “Developments of Robust Anode-layer Intelligent Thruster for Japan IN-space propulsion system,” IEPC Paper 2013-244 (2013).
- 3) S. Yokota, D. Ichihara, H. Kataoka, S. Harada, A. Sasoh, “Steady-State, Applied-Field, Rectangular MPD Thrusters,” IEPC Paper 2013-246 (2013).
- 4) D. Goebel, I. Katz, “Fundamental of Electric Propulsion, Wiley, pp.243-324 (2008).
- 5) A. Sasoh and Y. Arakawa, “A High-Resolution Thrust Stand for Ground Tests of Lowest Space Propulsion Devices,” Review of Scientific Instruments, Vol.64, pp. 719-723 (1993).