

〈一般研究課題〉 100W級電気推進機における電子ビームを
活用した推進剤電離手法の確立
助成研究者 国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学
市原 大輔



100W級電気推進機における電子ビームを 活用した推進剤電離手法の確立

市原 大輔
(国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学)

Developing propellant ionization scheme by using electron beam in 100-W-class electric propulsion

Daisuke Ichihara
(Tokai National Higher Education and Research System Nagoya University)

Abstract :

In this study, we demonstrated a comparable thrust performances in electrostatic acceleration type electric propulsion, in which the applied magnetic field had the diverging section for ion acceleration, which was followed by the field-free section to neutralize the propellant, by using filament cathode compared to conventional hollow cathode operation. The input power to realize a stable operation was 155 W and 325 W for filament and hollow cathode, respectively. By using the filament cathode, thrust increased with increasing input power whereas discharge current was saturated. The maximum specific impulse and thrust efficiency were 1770 s and 23% with 356 W of input power. These performances were comparable level of the conventional hollow cathode operation and we successfully suppressed the input power by using the filament cathode.

1. はじめに

小型宇宙機群を活用した地球観測は、その開発費用・期間及び打ち上げコストが削減可能なことから、防災・測位・気象予報・通信など人類の生活環境の向上に対して多岐にわたる貢献が期待されている。特に高度300km程度の地球近傍軌道は地上との通信や観測精度の向上といった観点から今後の活用が検討されている。しかしながら、このような低軌道では地球大気からの空気抵抗が無視できず、軌道高度を維持するためには電気推進機(電気エネルギーによって電離させた推進剤を、

加速/排気して推力を得る推進機)による動力航行が必須である。小型宇宙機の場合、電気推進機への投入電力は100W程度に制限される。これは推進剤の電離に投入可能な電力量の低下に直結するため、軌道維持に必要な推力の発生には小電力作動下における電離反応の促進が大きな課題である。単位時間・単位体積当たり生成されるイオン数は推進剤粒子の数密度と電離衝突反応の反応速度定数との積に比例する[1]。このうち、反応速度定数は電子温度の増加関数である[2]。電気推進機で一般に用いられる熱電子放出型電子源では放出電子の温度は高々5eVであるため反応速度定数の向上は期待できない。そこで市原ら[3]は推進剤粒子の数密度向上を目的とし、陽極近傍のみから局所的に推進剤を供給する陽極近傍電離手法を提案した。その結果推進剤の電離が促進され、電離電圧の比較的高いアルゴン推進剤(15.8 eV)であってもクリプトン(13.9 eV)やキセノン(12.1 eV)と同程度の推力性能を達成している[4]。本研究ではこの成果に注目し、陰極にフィラメントカソードを用いることで従来のホローカソードを用いた作動では不可能な低電力作動を試み、その際の推力性能を比較する。

2. 実験装置

2.1. スラスタヘッド

製作した推進機の概要図を図1に示す。リング型陽極と下流の陰極(電子源)との間に発散磁場を印加した。発散磁場は2つのサマリウムコバルト磁石(①外径33 mm, 内径23 mm, 長さ20 mm, ②外径65 mm, 内径55 mm, 長さ15 mm)と電磁軟鉄とからなる磁気回路を用いて印加し、下流のカस्प域に前述の電子源を設置している。この時、磁場強度は放電室中心部にて75 mT, 陽極表面にて250 mTであった。リング型陽極は銅製、内径27 mmであり陽極内部には外径24 mmのセラミックプレート設けた。これによりリング型陽極内面とセラミックプレート外面との間に幅1.5 mmのスリットを確保し、本スリットを通じて放電室内部に推進剤を供給した。推進剤は純度99.99%のキセノンを使用し市販の流量計(Model3660, コフロク株式会社)にて供給流量を制御した。陰極には従来用いられてきた市販のホローカソード(DLHC-1000, Kaufman & Robinson Inc.)と線径0.3 mmの1%トリウム入りタングステン線を用いて自作したフィラメントカソードとの2種類を用意した。

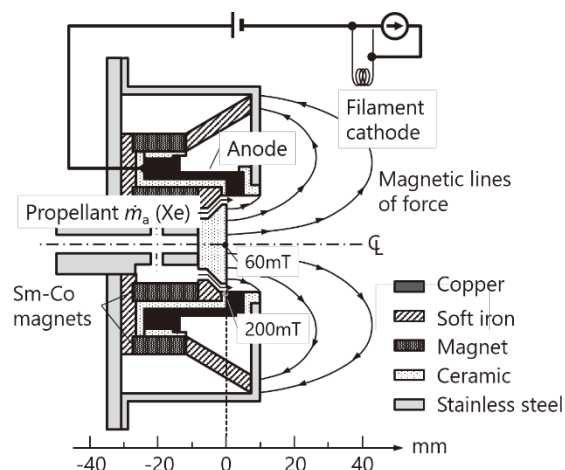


図1 スラスタヘッドの概念図

2.2. 実験条件

実験は全て直径1.2 m, 長さ3.2 mの真空チャンバー内で行い, 排気速度8200 L/sのクライオポンプ(CRYO-U20, /s, ULVAC CRYOGENICS Inc.)にて排気した. 実験条件を表 1に示す. 各電子源に対して推進剤流量および放電電圧を0.41 mg/s - 0.68 mg/s, 250 V - 400 Vの範囲でそれぞれ変化させた際の推力と放電電流とを測定した. 放電電圧の印加には市販の直流電源(N8935A, Keysight Technologies)を用いた. ホローカソードおよびフィラメントカソードの作動には定電流電源KC8002(Kaufman & Robinson Inc.)とPWR800L(菊水電子工業株式会社)とをそれぞれ使用した. ホローカソードの作動に必要なキセノンガスの流量は0.49 mg/s, キーパー電流は2 Aで固定した. 推力測定には分解能0.2 mNを有する重力振り子式スラストスタンド[4]を用いた.

表 1 実験条件一覧

Parameter	Symbol	Unit	Filament cathode	Hollow cathode
Propellant	-	-	Xe	Xe
Flow rate	\dot{m}_a	mg/s	0.41-0.68	0.41-0.68
		(Aeq)	0.3-0.5	0.3-0.5
Discharge voltage	V_d	V	250-400	250-325
Filament power	P_f	W	100, 150	
Cathode flow rate	\dot{m}_c	mg/s	-	0.49
		(Aeq)	-	0.36
Keeper current	J_k	A	-	2.0

3. 実験結果

3.1. フィラメントカソードでの作動特性

まず初めにフィラメントカソードへの供給電力 P_f が放電電流 J_d に及ぼす影響を取得した. $P_f = 100$ Wもしくは150 Wにおける放電電圧 V_d と J_d との関係を図 2に示す. P_f に応じて J_d は8倍以上異なり, $P_f = 150$ Wにて J_d が増大した. フィラメントからの熱電子放出量はフィラメントの表面温度の増加関数[1]であることから P_f が大きいほど熱電子放出量が増加し推進剤の電離に必要な電子が放電室内部に十分供給された結果 J_d が増加したと考えられる. 以降 P_f は150 Wに固定した.

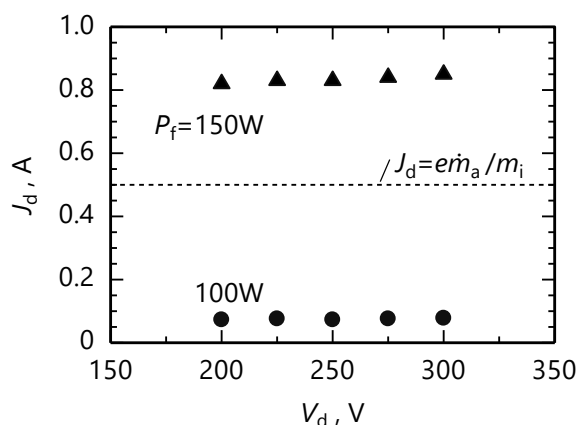


図 2 フィラメント電力に応じた放電電流特性, $m_a = 0.68$ mg/s.

次に、 V_d に対する推力 F および J_d の関係を図 3 に示す。いずれの推進剤流量 \dot{m}_a においても V_d の増加に対して F は単調に増加した一方で J_d は頭打ちとなった。取得した \dot{m}_a および V_d に対する F の依存性は静電加速推力の傾向を示しており放電室内で生成したイオンが電極間の加速電荷により静電加速されていることが分かった。

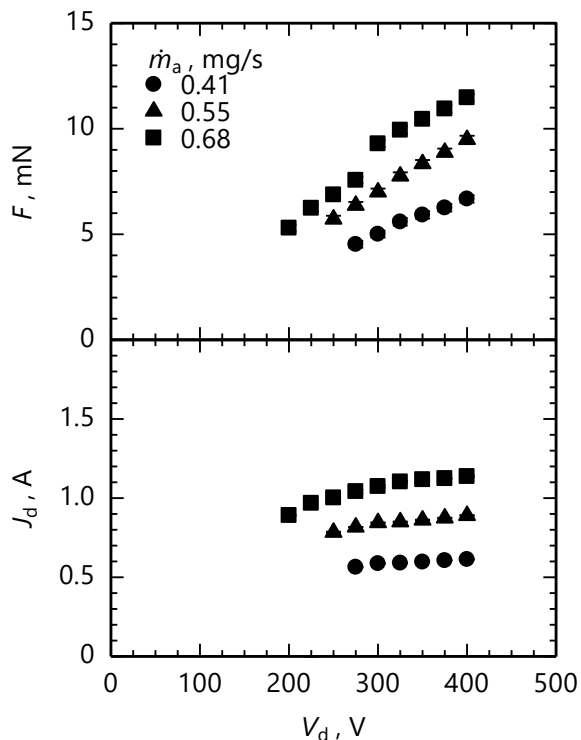


図 3 フィラメントカソードにおける推力及び放電電圧特性, $P_f = 150$ W.

スラスターヘッドへの投入電力 P_a ($\equiv J_d V_d$)に対する比推力 $I_{sp,a}$ ($\equiv F/(\dot{m}_a g)$)と推力性能 η_a ($\equiv F^2/(2\dot{m}_a P_a)$)との依存性を図 4 および図 5 にそれぞれ示す。ここで g は重力加速度である。 \dot{m}_a に依らず P_a の増加に伴い $I_{sp,a}$ は増加し最大で1770 s ($\dot{m}_a = 0.55$ mg/s, $V_d = 400$ V)であった。 η_a も同様の傾向を示しており最大で23%となった。

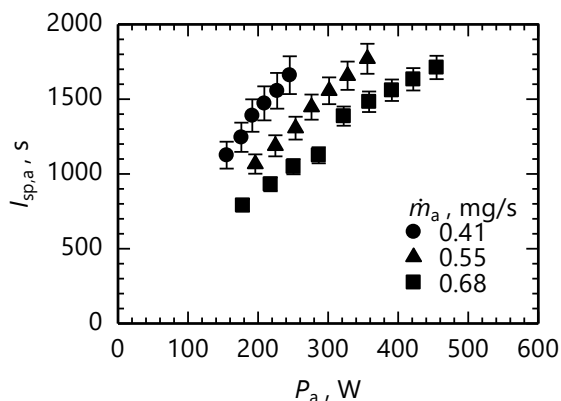


図 4 P_a に対する $I_{sp,a}$ の依存性, $P_f = 150$ W

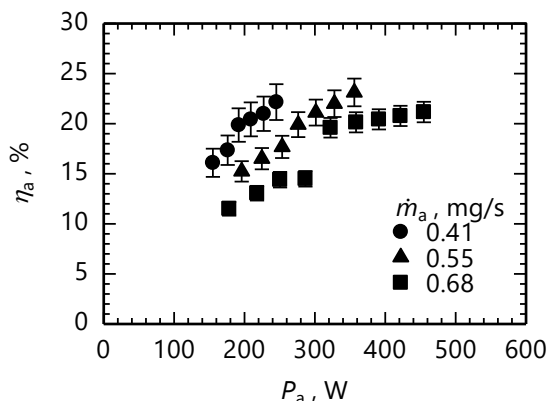


図 5 P_a に対する η_a の依存性, $P_f = 150$ W

3.3. 電子源の違いによる推力性能評価

電子源にフィラメントカソードおよびホローカソードをそれぞれ用いた場合の $I_{sp,a}$ および η_a 算出結果を図 6 および図 7 それぞれに示す。横軸は推進剤単位質量当たりの投入エネルギー P_a/\dot{m}_a である。 P_a/\dot{m}_a が同一の場合推力性能に違いは見られなかった。フィラメントカソード使用時の P_a (> 155 W) はホローカソード使用時の P_a (> 325 W) に対して半分以下であることからフィラメントカソードの採用により従来のホローカソードと同程度の推力性能を維持しつつ低消費電力での作動を実現できた。

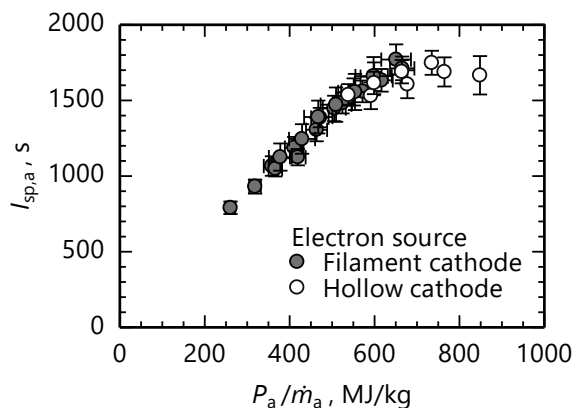


図 6 P_a/\dot{m}_a に対する $I_{sp,a}$ の依存性, $P_t = 150$ W, $m_c = 0.49$ mg/s.

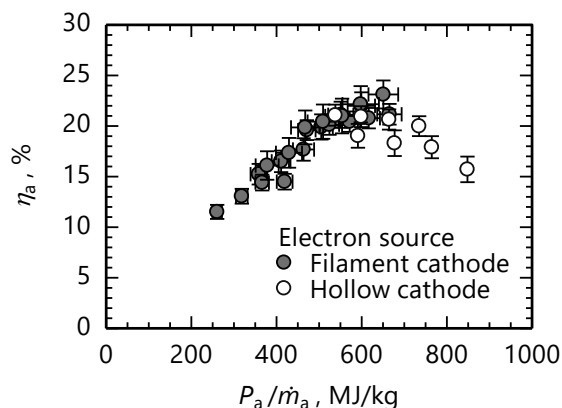


図 7 P_a/\dot{m}_a に対する η_a の依存性, $P_t = 150$ W, $m_c = 0.49$ mg/s.

参考文献

- 1 D. M. Goebel et al., *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*, John Wiley & Sons (2008).
- 2 M. A. Lennon et al. "Recommended data on the electron impact ionization of atoms and ions: Fluorine to Nickel," *J. Phys. Chem. Ref. Data* **17**, pp. 1285-1363 (1988).
- 3 D. Ichihara et al., "Effects of magnetic field profile near anode on ion acceleration characteristics of a diverging magnetic field electrostatic thruster," *J. Appl. Phys.* **122**, 043302 (2017).
- 4 D. Ichihara et al., "Similar thrust performance in diverging-magnetic-field electrostatic thruster with monoatomic propellants," *J. Propul. Power* **35**, pp. 236-238 (2019).