

# ホローカソードと炭化水素ガスを用いた アークジェット推進機の電極損耗の抑制

## Reducing electrode erosion of arcjet thruster by use of hollow cathode and hydrocarbon

○岸田 利久(宮崎大学大学院工学研究科工学専攻機械・情報系コース)・鶴井 翔悟・各務 聡(宮崎大学工学部機械設計システム工学科)・矢野 康之(宮崎大学工学部教育研究支援技術センター)

○Toshihisa Kishida (Department of Mechanical Systems Engineering, University of Miyazaki)・Tsurui Shogo・Akira Kakami (Department of Mechanical Systems Engineering, University of Miyazaki)・Yasuyuki Yano (Technical Center, University of Miyazaki)

### Abstract

Today, high-power electric propulsion attracts attention for mass space transport; a high-power arcjet thruster is a promising option that allows effective mass transport with reduced mission period. However, high-power arcjet operation possibly aggravates cathode erosion to shorten the lifetime. In our previous study, to extend cathode life time, we use dimethyl ether (DME) as additive and cathode erosion was evaluated for nitrogen ( $N_2$ ) propellant with 3–5 % DME. We showed DME addition reduced cathode erosion; cathode erosion rate per power were 0.210  $\mu\text{g}/\text{kJ}$  and 0.154  $\mu\text{g}/\text{kJ}$  at mass ratio of DME of 0 % and 5 %, respectively. However, the arc discharge became unstable with increasing DME mass ratio in the range of 0–5 % because carbon adhered on the surface of cathode. Hence, we propose to use hollow cathode in order to isolate an additive from a propellant to adhere carbon only on the tip of cathode. In this paper, we focused on the effect to feed an additive around hollow cathode. Thus, we use  $N_2$  both a propellant and an additive. Cathode erosion rate per power were 0.0860  $\mu\text{g}/\text{kJ}$  at mass ratio of an additive of 15 %.

### 記号の説明

T: 推力  
P: 放電電力  
 $V_a$ : 放電電圧  
 $I_a$ : 放電電流  
 $\alpha$ : 比パワー

### 1. 緒言

国際宇宙探査協働グループ(ISECG)が 2018 年に公表した国際宇宙探査ロードマップの第 3 版(GER3)において、月近傍ミッション計画や有人火星探査ミッションなどが将来の宇宙開発として計画されている<sup>1)</sup>。これには、大規模な軌道間輸送用の推進機として大電力電気推進機が必要となり、ホールスラスト等がその有力な候補とされている<sup>2)</sup>。著者らは、他の電気推進に比して大きな推力密度を有し、大推力化が容易なアークジェット推進機もその候補になり得ると考え、研究を行っている。しかし、アークジェット推進機は、作動時に発生する大量のジュール熱によるカソードの損耗のために寿命が短いという特徴を有し、大電力化の趨勢に反してお

り、アークジェット推進機の長寿命化に関する技術開発は急務である。

これまでに、著者らは、推進剤にジメチルエーテル(以下、DME)を 3–5 % 添加し、炭素によってカソードを保護する方式を提案し、カソードの損耗の抑制の効果があることを明らかにした。一方で、炭素がカソード先端以外にも付着することで放電が不安定になっていた<sup>3),4)</sup>。そこで、カソード先端にのみ炭素を付着させるために選択的にカソードにホローカソードを用いて、推進剤と添加剤を分離して供給する方法を着想した。本研究では、その予備実験として DME の代りに窒素(以下、 $N_2$ )を添加剤とし、添加剤の流量比が性能やカソード損耗に及ぼす影響を評価した。

### 2. 実験装置

**2.1 試作した水冷式アークジェット推進機** 図 1 に試作した水冷式アークジェットの概略図を、表 1 にノズルの緒言をそれぞれに示す。電極の損耗を抑えるためにカソードにはトリエーテッドタングステンを使用した。また、水冷を行うアノードは、熱伝導に優れた銅(C1100)製であり、コンバージェント角が  $90^\circ$ 、ダイバージェント角が  $30^\circ$ 、開口比 50 と

なっている。アークジェット推進機の作動中は、管体内部の温度も高温になるため、カソード部と管体の絶縁には耐久性と機械加工性に優れているマシナブルセラミックスを使用している。また、フィードスルーには、中空部のみ添加剤を供給するための直径 2 mm の穴を設けている。

**2.2 ホローカソードについて** 本研究で使用したホローカソードの概略図を図 2 に、中空部の断面図を図 3 に示す。直径 1.6 mm のトリエーテッドタングステンを 3 本束ねており、それによってできる隙間をホロー部分として用いる。ホローカソードを使用した作動試験では、図 4 に示すように推進剤と添加剤を別々に供給した。

**2.3 従来型のロッドカソード** 本研究では、2.2 節で述べたホローカソードと比較のため従来型のロッドカソードも使用した。従来型のロッドカソードは  $\phi 4$  mm 概略図を図 5 に示す。なお、図 6 に示すようにロッドカソードの用いた作動試験では、推進剤のみを供給した。

**2.4 推力測定** 推力測定には、真空チャンバ内に設置した振子式のスラストスタンドを用いた。その概略図を図 7 に示す。このスラストスタンドは、推力による変位をレーザ変位計で計測し、推力を算出している。また、推力の急激な変化により振子に不要な振動が誘起されるため、電磁ダンパを用いている。これは、レーザ変位計の出力から CR 微分回路により振子の速度を求め、制御用のアクチュエータのアンプに供することにより、振子の振動を減衰させるものである。なお、このスラストスタンドはロードセルと校正用のアクチュエータを用いて校正した。

**2.5 実験装置の概要** 実験装置全体の概略図を図 8 に示す。推進剤と添加剤の  $N_2$  は、マスフローコントローラによって流量を一定に保つとともに、電磁弁を用いて供給の開始と中断を行う。アーク放電電流は、定格 500 V, 30 A の電源からバラスト抵抗を経てアークジェット推進機に供給している。また、点火時のみイグニッショントランスにより高電圧パルスを実アノードとカソード間に供給し、アーク放電を誘起する。なお、放電電流、放電電圧、プレナム室圧力、推力、推進剤の  $N_2$  および添加剤の  $N_2$  の流量を計測用の PC で記録した。

### 3. 実験条件

表 2 に実験条件を示す。ホローカソードとロッドカソードの 2 種類のカソードを用いて実験を行い、共にカソード先端の角度は  $90^\circ$  とした。開放端電圧と放電電流はそれぞれ 300 V, 25 A に固定している。ホローカソードを使用した場合に、添加剤の流量比を 0~15% の範囲で変化させ、アークジェット推進機の性能やカソード損耗の抑制の効果を評価した。また、作動時間を 3000 s としているが、これは、予備実験において、推力は時間とともに増加するが、約 2200 s 後から上昇しなくなり、ほぼ一定になる傾向が得られたためである。

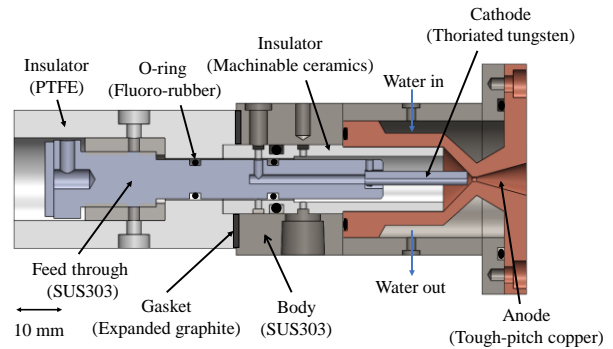


図 1 水冷式アークジェット推進機

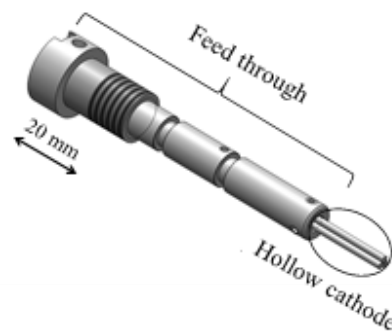


図 2 ホローカソードの概略図

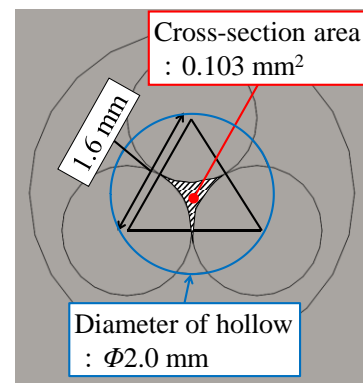


図 3 ホローカソードの中空部の拡大図

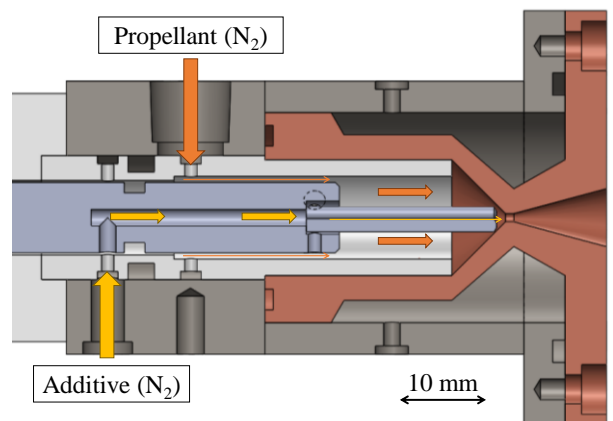


図 4 ホローカソードを用いた場合

表1 ノズルの緒言

|               |     |
|---------------|-----|
| コンストリクタ直径, mm | 1.0 |
| コンストリクタ長さ, mm | 1.0 |
| 開口比           | 50  |
| 電極間距離, mm     | 1.0 |

表2 実験条件

|                                              |                                                                    |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| The shape of cathode                         | hollow: $\phi 1.6 \text{ mm} \times 3$<br>rod: $\phi 4 \text{ mm}$ |
| The cathode tip angle, $^{\circ}$            | 90                                                                 |
| Open circuit voltage, V                      | 300                                                                |
| Discharge current, A                         | 25                                                                 |
| Propellant / Additive                        | $\text{N}_2 / \text{N}_2$                                          |
| Total mass flow rate, mg/s                   | 100                                                                |
| Mass ratio of an additive( $\text{N}_2$ ), % | 0, 1, 5, 10, 15                                                    |
| Operation time, s                            | 3000                                                               |

#### 4. 実験結果および考察

**4.1 ロッドカソードを用いた作動試験結果** 図9に従来型のロッドカソードを用いた場合の推力, 質量流量, 放電電圧, 放電電流の時間履歴を示す. 流量 100 mg/s のときにアーク放電が不安定でローモードになったため, 一度 200 mg/s に増やしているが, それでもなおローモードの作動が頻繁に生じた. そこで, ローモードからハイモードに移移させるためアーク放電の点火と中断を繰り返した. そして, 作動が安定してから流量を 100 mg/s に戻している.

ローモードが現れる場合は, ローモードとハイモードの作動の合計時間が 3000 s になるようにした. なお, 安定後に得られた推力, 放電電力, 比パワーはそれぞれ 225 mN, 2.74 kW, 27.4 MJ/kg であった.

**4.2 ホローカソードを用いた作動試験結果** 図10は, ホローカソードを用いた場合の一例であり, 添加剤の流量比が 5% のときの時間履歴である. 図10のように, ホローカソードを用いた場合は, 点火直後からハイモードで作動することが多く, 作動は比較的安定していた. また, ホローカソードを用いた場合でも作動時間が約 2200 s 後に推力の上昇が止まり, ほぼ一定になっていることが分かる. ゆえに, 今回試作したホローカソードでも従来のアークジェット推進機と同様な作動が得られたと言える. なお, 安定時の推力, 放電電力, 比パワーはそれぞれ 194 mN, 2.56 kW, 25.6 MJ/kg であった.

**4.3 性能評価** 図11に添加剤の流量比を変化させると放電電力が変化するため, 比パワーを用いて性能を評価した. この結果を Fig. 12 に示す. 比パワーの増加に伴って比推力や推進効率が増加していることが分かる. しかし, 比推力や推進効率は比パワーに依存し, 実験では比パワーが異なるため比推力と推進効率から性能の優劣を判断できない.

そこで, 推力電力比に着目すると, 添加剤の流量比に依らずほぼ一定である. そのため, 同じ比パワーであれば, 比推力と推進効率に差が現れないと考えられる. したがって, アークジェット推進機の性能はカソードの形状や中空部に流れる添加剤の流量比により変化しないと言える.

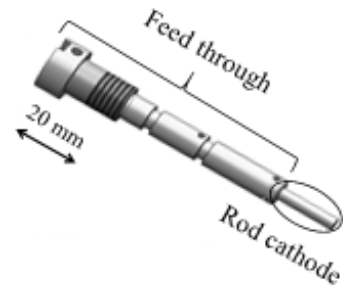


図5 ロッドカソードの概略図

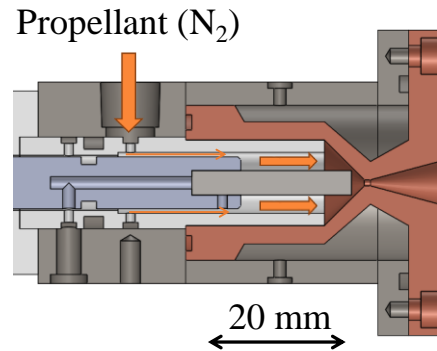


図6 ロッドカソードを用いた場合

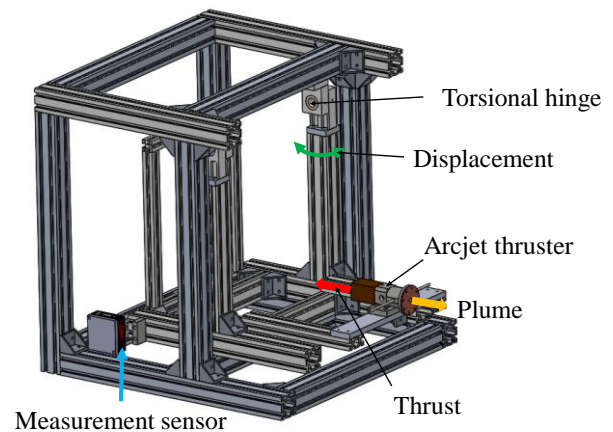


図7 スラストスタンド

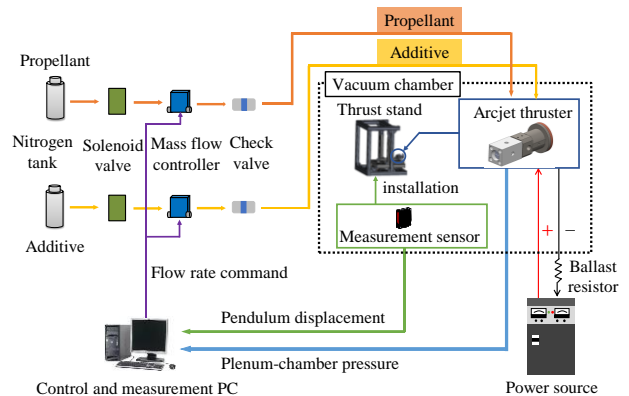


図8 実験装置の概略図

**4.4 カソードの損耗の抑制の評価** 図 12 に、中空部に流れる添加剤の流量比とカソード損耗率の関係を示す。ここで、カソード損耗率とは、単位時間当たりのカソード損耗量を放電電力で除した値のことである。まず、ロッドカソードを用いた場合とホローカソードの添加剤の流量比が 0% の場合を比較すると、カソード損耗率はそれぞれ  $0.253 \mu\text{g}/\text{kJ}$  と  $0.233 \mu\text{g}/\text{kJ}$  とほぼ同じであることが分かる。このことから、カソード形状によってカソード損耗率は変化しないといえる。そして、ホローカソードに総流量の 1~5% の  $\text{N}_2$  を流すと、カソード損耗率が増加する傾向があり、5% の時に最大  $0.331 \mu\text{g}/\text{kJ}$  となった。一方で、ホローカソードへの流量を 10~15% まで増加させると、カソード損耗率が減少し、15% のときに最小  $0.0860 \mu\text{g}/\text{kJ}$  を得た。

この結果より、中空部に流れる添加剤の流量比を 10% 以上にするだけで、カソードの損耗の抑制に効果があるといえる。

**4.5 今後の方針** 推進剤に DME を添加することによりカソードの損耗が減り、さらにホローカソードを適用しても損耗を抑えられた。これらの結果より、今後は、 $\text{N}_2$  のかわりに添加剤を DME とし、炭素をカソードに形成して損耗を抑制する方法を試みる。そして、DME の濃度が 10% 以上の条件で行い、本研究で得られた結果と比較することで、DME の使用によるカソード損耗の抑制の効果への有用性を評価できると考えている。

## 5. 結 言

本研究では、高電圧衛星バスから直接駆動可能な大電力アーケジェット推進機を試作評価し、以下の結論を得た。

1. 大電力アーケジェット推進機の長寿命化のためにカソードの長寿命化を図った。
2. 長寿命化のために、ホローカソードを用いて中空部にのみ炭化水素ガスを流す方式を提案した。
3. 本研究では、ホローカソード近傍にのみ添加剤を流すことによるアーケジェット推進機への影響を調査した。
4. 中空部に流れる添加剤( $\text{N}_2$ )の流量比を 0~15% の範囲で変化させたが、推力電力比がほぼ同等であったことから、アーケジェット推進機の性能には影響しないと分かった。
5. 中空部に流れる添加剤の流量比を 10% 以上にすると、カソードの損耗の抑制の効果があることを明らかにした。
6. 今後の研究の方針として、添加剤を DME に変更し、DME の使用によるカソード損耗の抑制の効果への有用性を評価する。

## 参考文献

- 1) ISECG, The Global Exploration Roadmap, 2018
- 2) 杵淵 紀世志, 長尾 直樹, 齊藤 靖博, 沖田 耕一, 國中 均, 大型電気推進実現に向けた試験設備構想と世界状況, 平成 25 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2013-024, 2014.

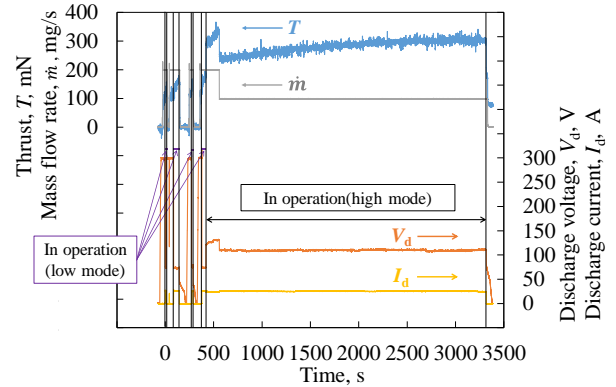


図 9 ロッドカソードを用いた場合の推力, 質量流量, 放電電圧, 放電電流の時間履歴

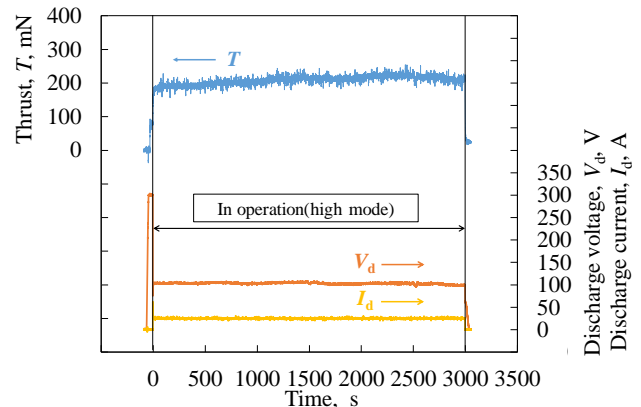


図 10 ホローカソードを用いた場合の推力, 放電電圧, 放電電流の時間履歴

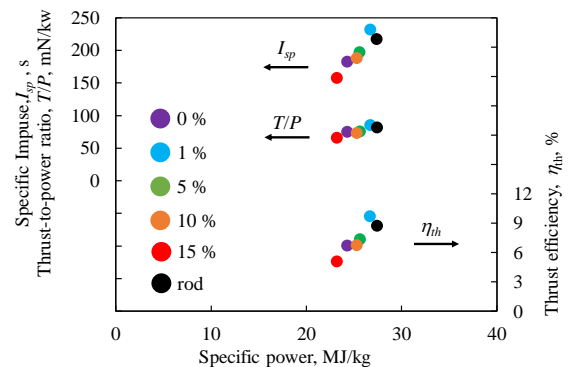


図 11 比推力, 推進効率, 推力電力比の比パワーに対する依存性

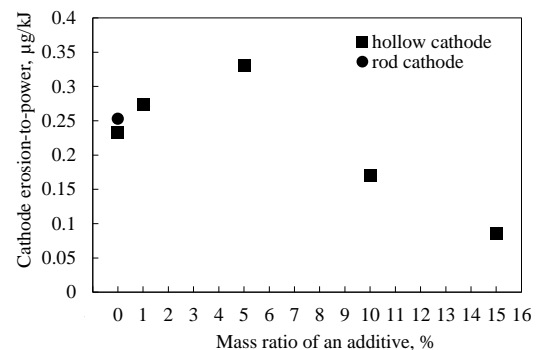


図 12 カソード損耗率と添加剤の流量比の関係

- 3) 村田 浩章, 各務 聡, 岸田 利久, 矢野 康之, ジメチルエーテルの添加によるアークジェットの電極損耗の抑制, 平成 28 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2016-004, 2014
- 4) Toshihisa Kishida, Hiroaki Murata, Yasuyuki Yano, Akira Kakami, 400-V Bus-Direct Driven High-Power Arcjet Thruster Using Dimethyl ether as Additive for Extending Lifetime, ISTS-2017-b-43, 2017