

# 高電圧バスからダイレクトドライブを実現する アークジェット推進機に関する研究

## Study on high-voltage bus direct drive of arcjet thruster

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

### Abstract

This paper describes a arcjet thruster that is directly driven from high-voltage bus. 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. Moreover, next generation spacecraft would have 400-V buses, which enable effective transmit electric-power transmission due to the use of lower current. Hence, 400-V bus direct drive of arcjet thrusters would simplify the thruster systems by eliminating voltage converters and using lower-current cables. Thus, we focus on the angle of the cathode tip in order to increase the discharge voltage. In this study, we evaluate the effect on discharge voltage and arcjet performance by varying the cathode tip angle from 30° to 90°. Among the tested cathode, the tip angle at 60° yield the highest discharge voltage of 74.1 V. However, in this case, the performance, a specific impulse, a thrust efficiency, and a thrust-to-power ratio, lower than  $\alpha = 30^\circ$ .

### 記号の説明

- T: 推力
- P: 放電電力
- Va: 放電電圧
- $\alpha$ : カソード先端の角度

### 1. 緒言

国際宇宙探査協働グループ(ISECG)が 2013 年に公表した国際宇宙探査ロードマップの第 2 版(GER2)<sup>1)</sup>において、月近傍ミッション計画や有人小惑星探査ミッション、そして最終目的である有人火星探査ミッションに向け、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の必要性が明示された<sup>2)</sup>。その有効な候補として電気推進の中で推力の大きいアークジェット推進機があり、大電力化により、電極の損耗のために寿命が短くなるという課題はあるが、ミッションの時間短縮や高効率な軌道間輸送は可能になると考えられる。

また、近年では、400 V の高電圧の衛星バスが次世代バスとして期待されていることから、この高電圧の衛星バスから大電力アークジェット推進機を直接駆動することにより、電

圧変換が不要となる。また、駆動電流が低くてよいため、大電流用の太い電線が不要となる。以上より、アークジェットの 400V 作動は推進系の簡素化や軽量化に貢献するといえる。

以上の背景から、著作らは、高電圧バスからダイレクトドライブを実現するアークジェット推進機を提案してきた。そこで、本研究では、アークジェット推進機の高電圧作動のために、カソードの先端の角度に着目し、放電電圧や性能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°、ダイバージェント角が 30°、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、筐体内部の温度も高温になるため、カソード部と筐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。なお、今回は、安全に考慮し、推進剤を窒素とし

ており、カソードと絶縁体の間を通過してノズルへと流れる構造となっている。

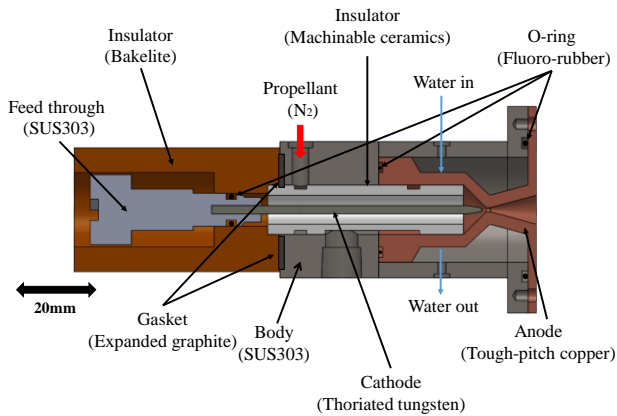


図1 水冷式アークジェット推進機

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

**2.2 カソードについて** 図2にカソード先端近傍の拡大図を、図3に試作したカソードの先端を示す。カソード先端の形状を円錐台とし、その角度 $\alpha$ を $30^\circ \sim 90^\circ$ まで $15^\circ$ 刻みで変更している。

**2.3 実験装置の概要** 本実験に用いる実験装置全体の概略図を図4に示す。直径1.0 m、長さ2.0 mの真空チャンバ内に試作した推進機を設置している。メカニカルブースターにより作動中の真空チャンバ内の背圧を7.0~9.0 Paまで減圧した。推進剤の窒素は、マスフローコントローラによって流量を一定に保っている。アーク放電電流は、定格500 V、30 Aの電源装置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、点火にはイグニッショントランスにより6 kVの高電圧パルスを実アノードとカソード間に供給した。なお、放電電流、放電電圧、プレナム室圧力、推力、窒素の流量は計測用のPCで記録した。

**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り子式のスラストスタンドを用いた。その概略図を図5に示す。このスラストスタンドでは、推力により生じた振子の変位をレーザー変位計で計測し、変位により推力を算出した。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、電磁ダンパにより減衰させている。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。

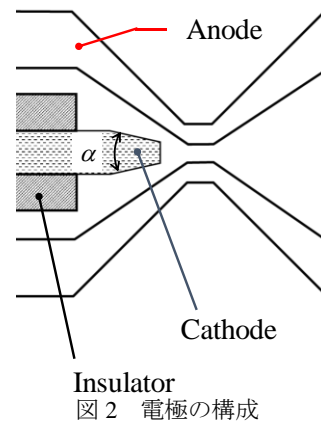
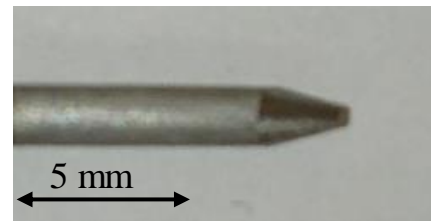
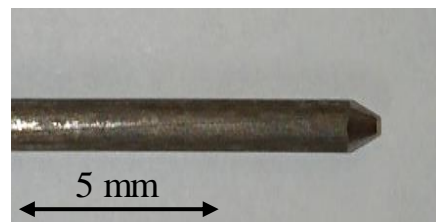


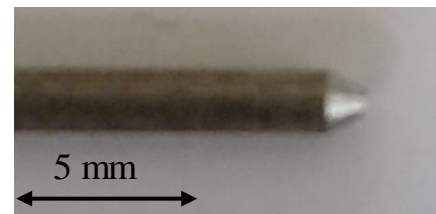
図2 電極の構成



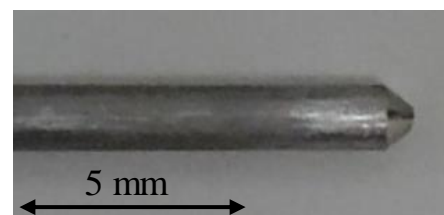
(a)  $\alpha = 30^\circ$



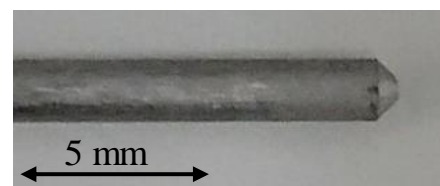
(b)  $\alpha = 45^\circ$



(c)  $\alpha = 60^\circ$



(d)  $\alpha = 75^\circ$



(e)  $\alpha = 90^\circ$

図3 カソードの先端の様子

### 3. 実験条件

表2に実験条件を示す。開放端電圧と放電電流はそれぞれ200 V, 25 Aに固定している。推進剤の流量を50 mg/sとしているが、これは、これまでの試作機では50 mg/s程度で最も性能が高くなったため性能がよくなったためである。また、カソード先端の角度を30°~90°まで15°刻みで変更し、アークジェット作動時間を300 sとしている。なお、1条件当たり3回試行して誤差を評価した。

表2 実験条件

作動ガス	N <sub>2</sub>
開放端電圧, V	200
放電電流, A	25
質量流量, mg/s	50
電極間距離, mm	1
作動時間, s	300
カソード先端の角度, $\alpha$ , °	30, 45, 60, 75, 90
試行回数	一条件に対して3回

### 4. 実験結果および考察

**4.1 放電電力, 推力, 放電電圧の時間履歴** 図6は、カソード先端の角度 $\alpha$ が30°の場合の放電電力, 推力, 放電電圧の時間履歴である。放電電力, 推力, 放電電圧の全てにおいて若干の変動が見られるが、比較的安定し、このときのアークジェットの様子は図7(a)のようにプルームが広がったハイモードのような作動であった。なお、 $P=1.81$  kW,  $T=60.7$  mN,  $V_d=72.5$  Vであった。一方で、 $\alpha=30^\circ$ の条件において、図7(b)に示すローモードのような作動も確認でき、このような現象は、 $\alpha=60^\circ$ を除くすべての条件で確認できた。更に、 $\alpha=90^\circ$ の条件ではイグニッションの際に一瞬だけ火花のようなプルームが確認できるだけで、主放電に移行しないことがあった。このことから、アークジェットの作動はカソード先端の角度に依存するといえる。

**4.2 放電電圧のカソード先端の角度に対する依存性** 図8に放電電圧とカソード先端の角度の関係を示す。なお、プロット点は3回の平均値を、エラーバーは3回の標準偏差を示している。 $\alpha=30^\circ \sim 60^\circ$ の範囲では角度が大きくなるにつれて放電電圧が高くなっていることが分かる。 $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 75^\circ$ の場合ではローモードのような作動をし放電電圧が低くなってしまった場合があった。そして、 $\alpha=60^\circ$ の場合が最も放電電圧が高くなり、このときの平均値は74.1 Vであった。一方で、 $\alpha=90^\circ$ の場合が最も放電電圧が低くなり、67.9 Vであった。

**4.3 カソード先端の角度が性能に及ぼす影響** 図9に比推力 $I_{sp}$ , 推進効率 $\eta$ , 推力電力比 $T/P$ のカソード先端の角度に対する依存性を示す。最も放電電圧が高くなった $\alpha=60^\circ$ で比推力が最も低くなったが、放電電圧が低くなった $\alpha=30^\circ$ の場合に最も比推力が高くなった。また、全体的に、性能は、従来のアークジェット推進機よりも低く、最大の比推力が得られた $\alpha=30^\circ$ においても、 $I_{sp}=96.0$  s,  $\eta=1.33$  %,  $T/P=26.9$

mN/kWにとどまった。このように、従来のアークジェット推進機より低性能になった原因として、作動時間が300 sと短かったために熱平衡状態に至らなかったこともある。また、本実験の後の実験の結果から、50 mg/s以上の領域で作動が安定する傾向にあったことから、流量50 mg/sは流量不足の可能性はある。

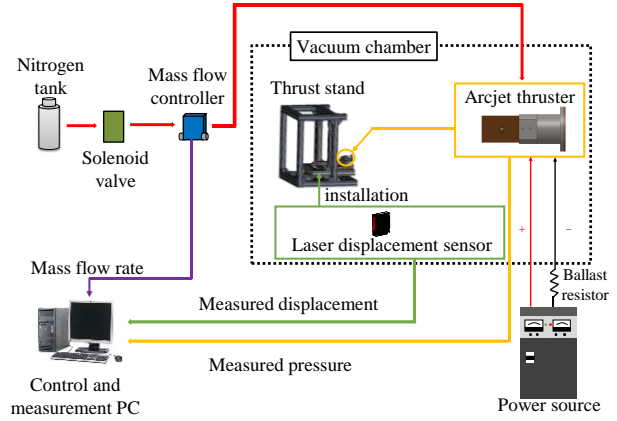


図4 実験装置の概略図

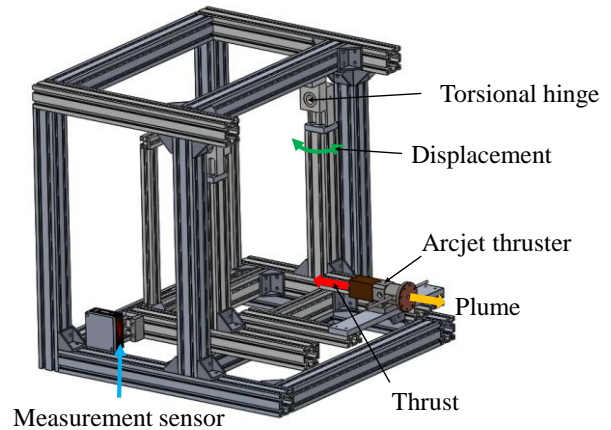


図5 スラストスタンド

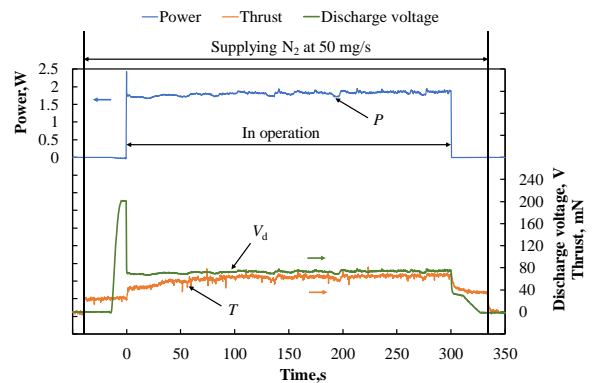


図6  $\alpha=30^\circ$ の場合の放電電力, 推力, 放電電圧の時間履歴の1例

**4.4 今後の予定** 4.1 ~ 4.3 に示した結果より、アークジェット推進機の高電圧化を目的としてカソード先端の角度に着目したが、放電電圧を高くできたが、比推力や推進効率が低下してしまうことがあった。したがって、今後は、カソード先端の角度だけでなく、電極間距離やカソードの直径、流量なども調節する予定である

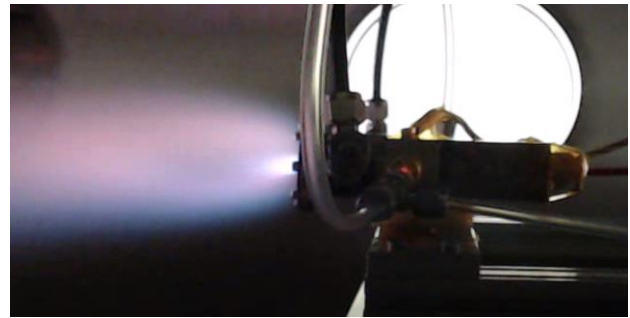
## 5. 結 言

本研究において、以下の結論が得られた。

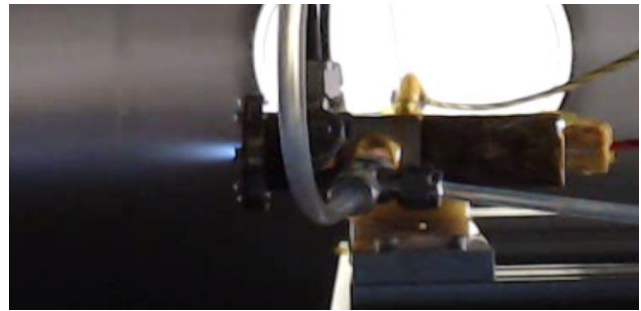
- 高電圧バスからダイレクトドライブを実現するアークジェットを試作し、高電圧化の方法としてカソード先端の角度に着目した。
- $\alpha = 30^\circ \sim 60^\circ$  の範囲では角度が大きくなるにつれて放電電圧が高くなり、 $\alpha = 60^\circ$  の場合が最も放電電圧が高くなり、このときの平均値は 74.1 V であった。
- 一方で、最も放電電圧が高かった  $\alpha = 60^\circ$  の場合に性能が低下し、放電電圧が低く出ている  $\alpha = 30^\circ$  の場合に最も性能が高くなった。
- そのため、高電圧作動と性能向上の両立のため、極間距離やカソードの直径、流量などをパラメータとする予定である。

## 参考文献

- 1) 国際宇宙探査協働グループ (ISECG) : 国際宇宙探査ロードマップ (GER) 第 2 版, 2013 年 8 月
- 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.
- 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) Kakami, A., Beppu, S., Maiguma and M., Tachibana, T.: Thrust Evaluation of Arcjet Thruster Using Dimethyl Ether as a Propellant, Trans. JSASS, 55(2012), pp. 116-122.
- 5) 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



(a) ハイモードのような作動



(b) ローモードのような作動

図 7 アークジェットの作動時のプルームの様子

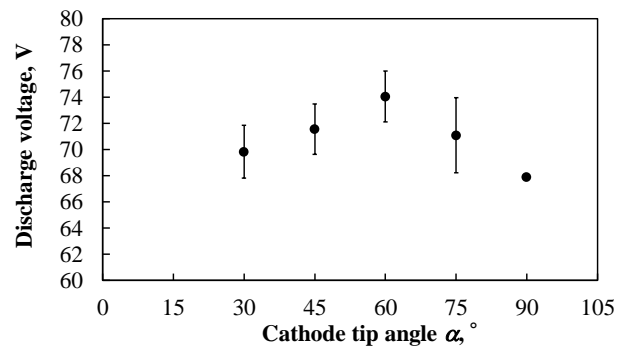


図 8 放電電圧のカソード先端の角度に対する依存性

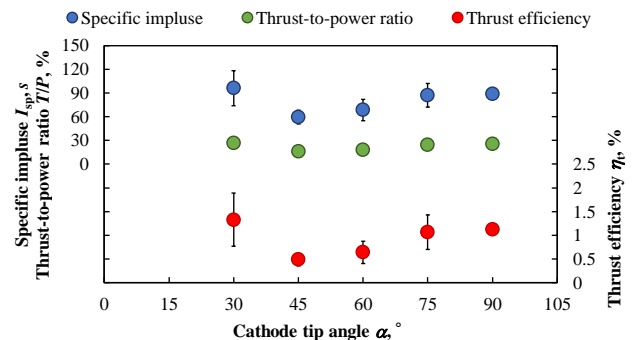


図 9 比推力, 推進効率, 推力電力比のカソード先端の角度に対する依存性