

# 水推進剤の運用を想定した 低電力 DC アークジェットスラスタの研究開発

## Research and development of low-power DC arc jet thruster assuming operation of water propellant

○奥村 俊介・下垣内 勝也・三村 岳史・奥田 和宜  
田原 弘一・高田 恭子(大阪工業大学)・桃沢愛(東京都市大学)・野川 雄一郎(Splije)

○Katsuya Shimogaito・Takefumi Mimura・Kazuyoshi Okuda・Hirokazu Tahara Kyoko Takada(Osaka Institute of Technology)・Ai Momozawa (Tokyo City University)・Yuichiro Nogawa (Splije) Daisuke Nakata (Muran Institute of Technology)

### Abstract (概要)

An arcjet thruster is one of electric propulsion. The thrust of arcjet thrusters is higher compared to other electric propulsion thrusters. And its structure is simple. Hydrazine has been used as propellant for arcjet thrusters. However, as hydrazine has high toxicity, safety management is difficult. Therefore, it is necessary to develop a thruster using a low-toxicity propellant. In our research, we focused on using water as a low-toxicity propellant. In this study, we conducted a water operation experiment using a water-cooled arcjet thruster. As a result, we confirmed operation for about 10 seconds. Also, for long-term operation using water propellant, we developed the anode-radiation cooled arcjet thrusters and acquired fundamental performance with pure nitrogen. As a result, the thrust was about 180 mN, the specific impulse was about 310 s, and the thrust efficiency was about 15 %. We confirmed that the basic performance is higher than water-cooled arcjet thrusters.

### 1. 序論

アークジェットスラスタは他の電気推進機より推力が高く構造がシンプルで、化学推進機との推進剤の併用ができる利点を持つ。その高い推力を生かし人工衛星の軌道制御や姿勢制御、緊急時の回避運動に使用され日本やアメリカでは実用されている。しかし、実用されているアークジェットスラスタの推進剤にはヒドラジン( $N_2H_4$ )という毒性の高い物質が使用されている。ヒドラジンは安全管理が非常に難しく、取り扱いには防護服を着用する等の多くの時間やコストがかかってしまう。また、ロケット打ち上げ失敗時や衛星がヒドラジン燃料を残したまま軌道を外れて地球に落下した場合、人体や環境に与える被害が甚大となる。ヒドラジンの取り扱いの様子を図1に示す。現在では低毒性推進剤を用いたアークジェットの開発が進められている。我々の研究では、その推進剤の一つとして注目されているのが水推進剤である。さらに、アノード輻射冷却式の推進剤に水推進剤

である。水は人体的影響がなく安定した物質であることから安全管理などにコストがかからない上特殊な設備も必要ない。さらには水の入手に関しては、地上ではもちろんのこと、宇宙では国際宇宙ステーション(International Space Station : ISS)の水再生システム(Water Recovery System : WRS)といったシステムや月の堆積層(レゴリス)には酸素と水素が含まれており、化学分解で水を抽出できる<sup>2)</sup>。これらが確立されると入手に期待でき、その意義は大きい。しかし、水は蒸発潜熱が2258kJ/kgと高いため、供給前の熱変換でのエネルギー損失や初期作動の着火が困難といった問題がある。

本研究では低毒性推進剤として水推進剤を使用し水冷式低電力DCアークジェットスラスタでその作動実験を行った。また、性能向上のためアノード部を輻射冷却式に変更したアノード輻射冷却式低電力DCアークジェットスラスタを開発し、基礎性能の取得と水冷式との性能比較を行った。推進剤には着火応答性の高い窒素を用いての作動実験を行った。



図1 ヒドラジンの取り扱いの様子

## 2. 実験装置

**2.1. 実験装置の全体構成** 本実験で用いた実験装置の概略図を図2に示す。実験装置は真空チャンバ、真空排気装置、電源装置、推力測定装置、推進剤供給装置、ガスジェネレータ、アークジェットスラスタの7つで構成される。アークジェットスラスタは真空チャンバ内に設置されている。また、真空チャンバ内部の圧力はピラニ真空計を用いて測定している。

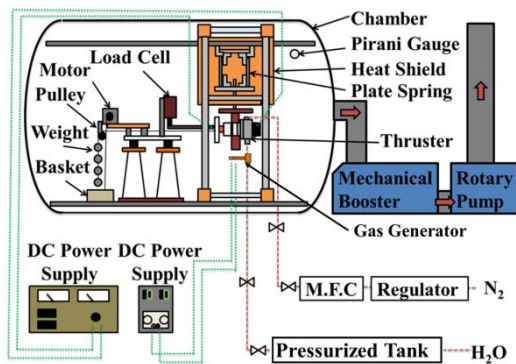


図2 実験装置概略図

**2.2. 真空チャンバ・真空排気装置** 真空チャンバはステンレス製であり内径が約1.2m、長さが約2mの円筒形である。内部の排気に使用されている真空排気装置はロータリーポンプであり、メカニカルブースターの2種類である。これらを併用して実験を行う。2種類の真空排気装置を併用したときの最高到達真空度は5Pa前後である。表1には真空排気装置の概要を記載する。

表1 真空排気装置概要

Vacuum Chamber, mm	Length 2,000 Inner Diameter 1,200
Rotary Pump, m <sup>3</sup> /h	Exhaust Velocity 600
Mechanical Booster, m <sup>3</sup> /h	Exhaust Velocity 6,000

**2.3. 推力測定装置** 推力測定装置はスラスタをフレームに取り付けられた4枚の板バネであるSUS304の板により吊り下げる機構である。原理としては、まずスラスタに推力が発生すると板バネがたわみ、同軸上にスラスタと丸棒で取り付けられた荷重測定機であるロードセルが押される。検出された荷重は電気信号としてロードセルから出力された値は、ロードセルとケーブルでつながれたデジタルインジケータに表示される。デジタルインジケータはデータロガーと接続されている。また、スラスタの噴射の熱により板バネに使用している4枚のSUS304の板が熱膨張し、測定値が変化することを防ぐため板バネ部分の周辺に銅製の熱遮蔽板を取り付けた。本研究で使用した推力測定装置の概略図を図3に示す。

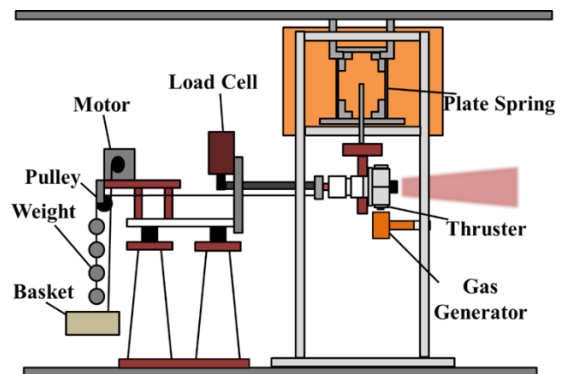


図3 推力測定装置の概略図

**2.4. 推進剤供給装置** 窒素はガスボンベからレギュレータによって適当な圧力に減圧した後マスフロコントローラによって設定された流量に調節し供給を行う。マスフロコントローラの精度及び温度シフトはそれぞれ±1.0%及び±1.0F.S/°Cである。水は加圧タンクにアルゴンを供給することでタンク内を加圧し、一定量を供給する。推進剤供給系の概略図を図4に示す。

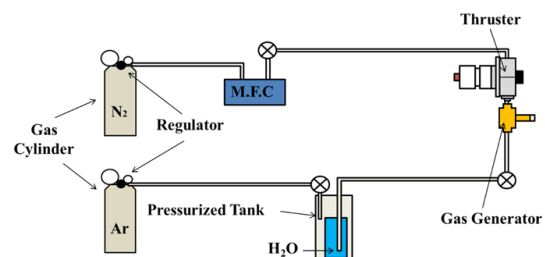


図4 推進剤供給系の概略図

**2.5. ガスジェネレータ** 本実験で使用した直接加熱型ガスジェネレータを用いて蒸気化させる方法を採用した。ガスジェネレータの材質は熱伝導率の高い銅を使用している。ガスジェネレータの内部には熱源であるグロープラグを装着しており、加圧タンクから送られてくる水推進剤を強制対流沸騰で直接加熱し蒸気化する。最大直径は約60mmである。初期モデルは流量が一定供給できていなかったため、ガスジェネレータの噴出口付近にオリフィスを取り付けた。蒸気化した水はオリフィスでチョークされ音速になる。このときのガスの流れを断熱変化と考えると、推進剤の理論質量流量 $Q_{theo}$ は次式で表せる。

$$Q_{theo} = aA_0P_0 \left( \frac{\gamma}{R_v T_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \quad (2-1)$$

ここで、オリフィスの流量係数を $a$ 、オリフィスの断面積( $m^2$ )を $A_0$ 、ガスジェネレータの内部の圧力(Pa)を $P_0$ 、ガスジェネレータ内部の推進剤の温度(K)を $T_0$ 、比熱比は $\gamma$ 、気体定数( $J / (K \cdot mol)$ )は $R$ 、モル質量( $Kg / mol$ )は $N$ 、水蒸気の気体定数( $J / (Kg \cdot K)$ )は $R_v (= R / N)$ となる。オリフィスの内径は現在の諸条件やオリフィスの流量係数は0.6を加味し0.5mmとなった。初期モデルを図5、改良モデルを図6に示す。

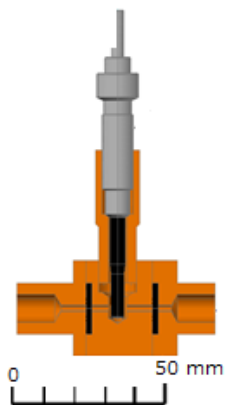


図5 初期モデル

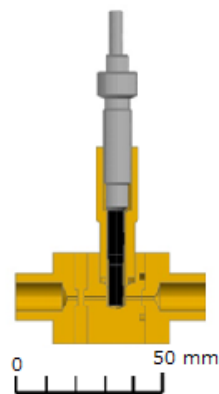


図6 改良モデル

**2.6. 水冷式アークジェットスラスタ** 本実験で使用した水冷式アークジェットスラスタの本体写真と断面図を図7と図8に示す、電極部の概略図を図9に示す。また、電極部の各種寸法を表2に記す<sup>3,4)</sup>。水冷式アークジェットスラスタでは、アノードとカソード付近に水冷を施している。この水冷式アークジェットスラスタは全長が132.5mm、最大直径は90.0mmで構成部品としては主にボディ、ソケット、絶縁体、カソード及びカソードホルダ、そしてアノード及びアノードホルダである。ボディの材質は絶縁、耐熱性に優れたポリカーボネートを使用している。推進剤に水推進剤などの酸素を含むものを使用するため、ソケットの材質は、耐食性に優れたSUS304を使用しており、また、各 부품の接触面には推進剤の漏れ、冷却水の漏れを防ぐためにOリングを使用している。絶縁体の材質は、絶縁、低熱伝導率を持つマコールを使用している。



図7 水冷式アークジェットスラスタ本体写真

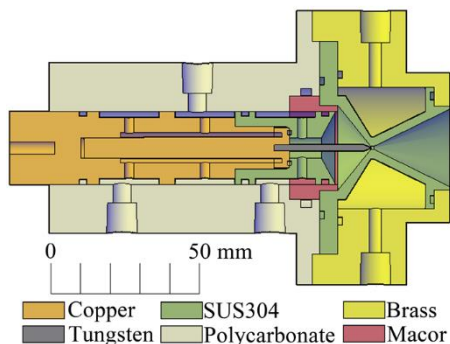


図8 水冷式アークジェットスラスタ断面図

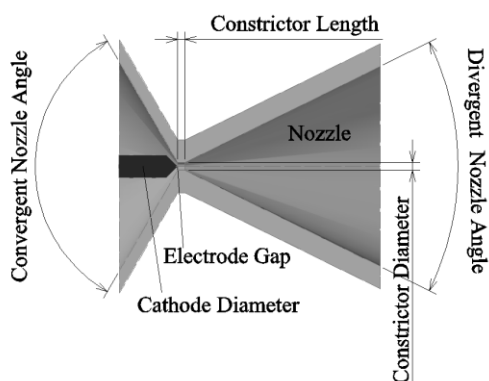


図9 水冷式アークジェットスラスタ電極部形状

表2 水冷式の電極部の各種寸法

Cathode Diameter, mm	3.0
Constrictor Length, mm	1.0
Constrictor Diameter, mm	1.0
Divergent Nozzle Angle, deg.	52
Convergent Nozzle Angle, deg.	102
Electrode Gap, mm	0.0

2.6. アノード輻射冷却式アークジェットスラスタ アノード輻射冷却式アークジェットスラスタの本体写真と断面図を図10と図11、電極部の概略図を図12に示す。また、各種寸法を表3に記す。このアークジェットスラスタは全長146.7mm、最大直径は98mmである。材質の変更点は、アノード部には輻射率の高いカーボン、ボディ本体はコストが安く絶縁性の高いポリブチレンテレフタレート(PBT)である。また電極部形状は水冷式のものと同じ形状にしている。絶縁体を推進剤供給口周りに設けることによりガスジェネレータを電氣的に独立させた。また、推進剤供給口から放電室までの距離を短くし、さらに推進剤供給口を蒸気化した水とその他の推進剤に分けている。

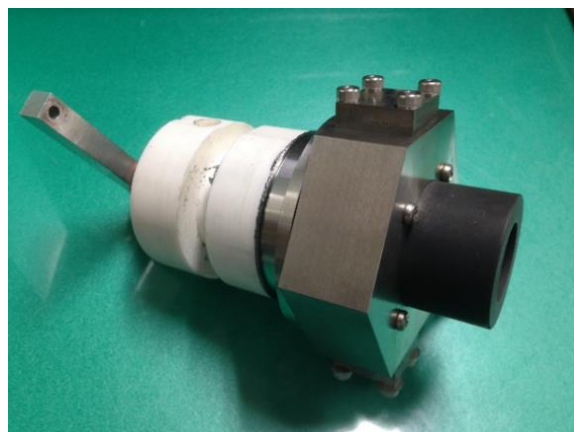


図10 アノード輻射冷却式アークジェットスラスタ本体写真

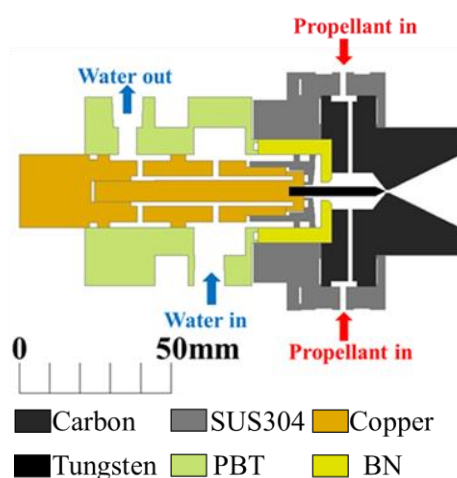


図11 アノード輻射冷却式アークジェットスラスタ断面図

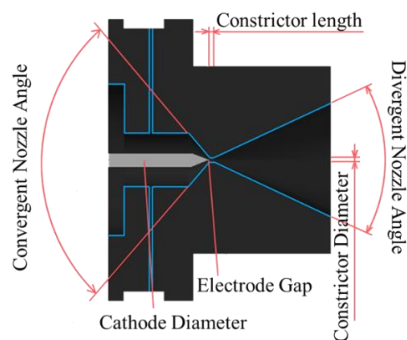


図12 アノード輻射冷却式アークジェットスラスタ電極部形状

表3 アノード輻射の電極部の各種寸法

Cathode Diameter, mm	3.0
Constrictor Length, mm	1.0
Constrictor Diameter, mm	1.0
Divergent Nozzle Angle, deg.	52
Convergent Nozzle Angle, deg.	102
Electrode Gap, mm	0.0

### 3. 実験結果

#### 3.1. 水冷式アークジェットスラスタを用いた水作動実験

水冷式アークジェットスラスタの推進剤に水推進剤を用いて作動実験を行った。水は潜熱が大きく単体での着火が困難であるため窒素を用いて初期着火を行う。予備加熱を行った後、窒素の流量を減らし、水推進剤を徐々に供給していき噴射確認を行う。水推進剤の供給には加圧タンクを用いて一定流量の供給を行えるようにし、ガスジェネレータを介して水を蒸気化し供給を行う。過去の実験においてアノードの水冷によって蒸気化した水が液体に戻り作動が停止することが起こったため、アノードの冷却水を止めて実験を行った。本実験では窒素の流量 80mg/s で初期着火後水の供給を開始し窒素の供給を絞り水単体での作動を試みた。スラスタへの投入電流は 19A、水の流量は 33.3mg/s。実験条件を表 4 に記す。窒素流量 0mg/s、水 25.2mg/s のとき青白いプルームが確認できた。だが、この状態もわずか 10 秒しか持たず、その後断続的な供給となり作動が停止してしまった。プルームの様子を図 13 に示す。

表 4 実験条件

Propellant	Nitrogen	Water
Flow Rate	80mg/s	25.2mg/s
Current	19A	



図 13 水噴射の様子

#### 3.2. アノード輻射冷却式アークジェットスラスタの基礎性能取得実験及び水冷式との性能比較

開発したアノード輻射冷却式アークジェットスラスタを用いての窒素での基礎性能取得を行い過去に行われた水冷式の基礎性能取得のデータとの比較を行った。本実験では、スラスタに窒素を流し初期着火を行う。まず、窒素の流

量 135mg/s、投入電流 17A で初期作動を行う。安定作動後、60, 50, 40mg/s に設定し、その状態を 15 秒データ取得した。その後、電流を 16, 15, 14A に設定し、同様に 15 秒ずつ取得した。実験条件を表 5 に記す。

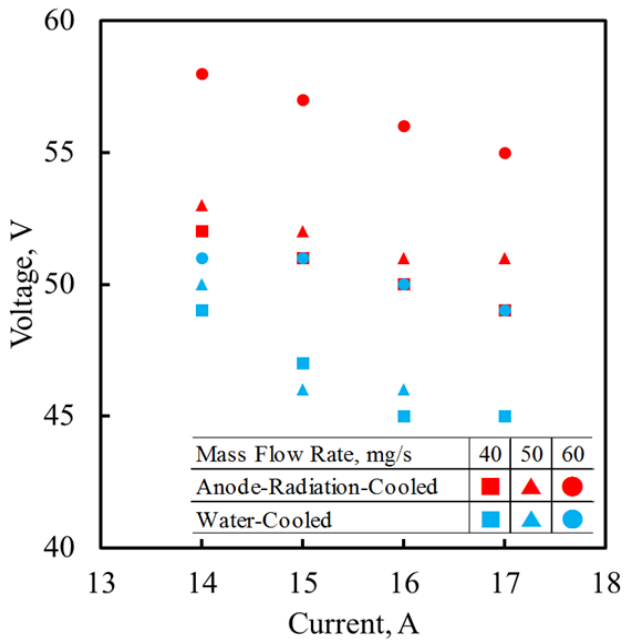
結果、投入電力 16A、流量 60mg/s の場合、アノード輻射冷却式の方が推力約 180mN、比推力約 310s、推進効率約 15% という結果となった。水冷式との比較を行ったところ水冷式の方は同様の場合推力約 125mN、比推力約 210s、推進効率約 6% であったため、アノード輻射冷却式の基礎性能のほうが高いことが分かった。噴射時の写真を図 14 に示す。さらに基礎性能及び水冷式との比較を行ったデータを図 15 に示す。

表 5 実験条件

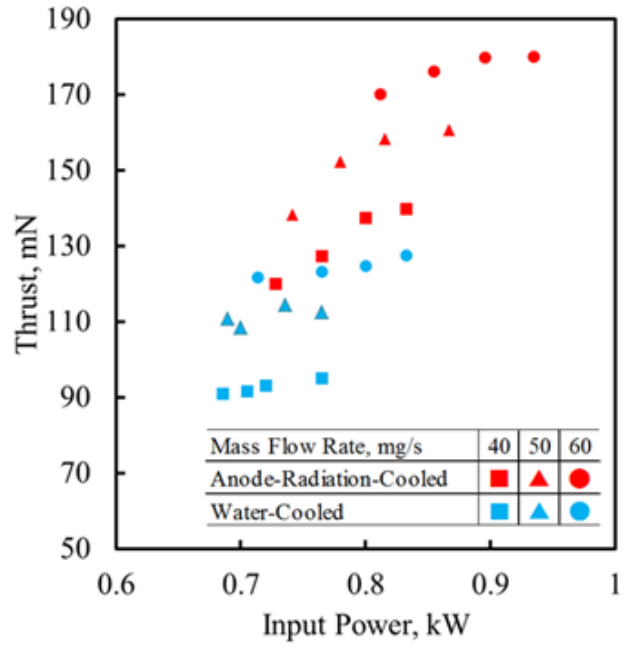
Propellant	Nitrogen
Flow Rate, mg/s	40, 50, 60
Current, A	14, 15, 16, 17



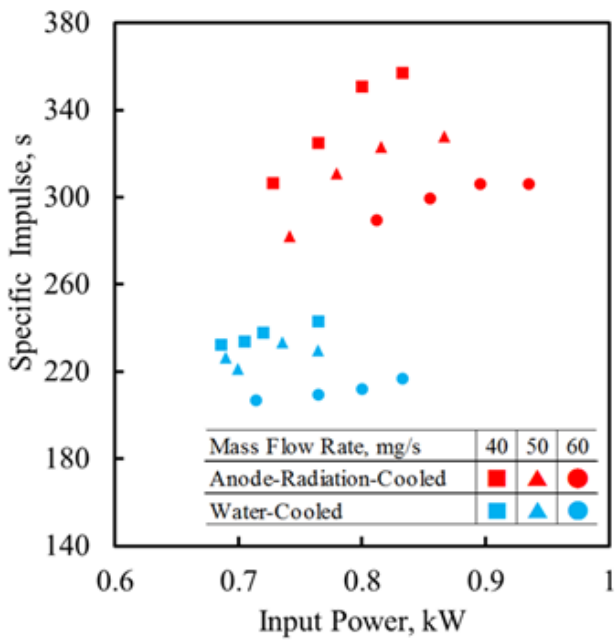
図 14 窒素噴射の様子



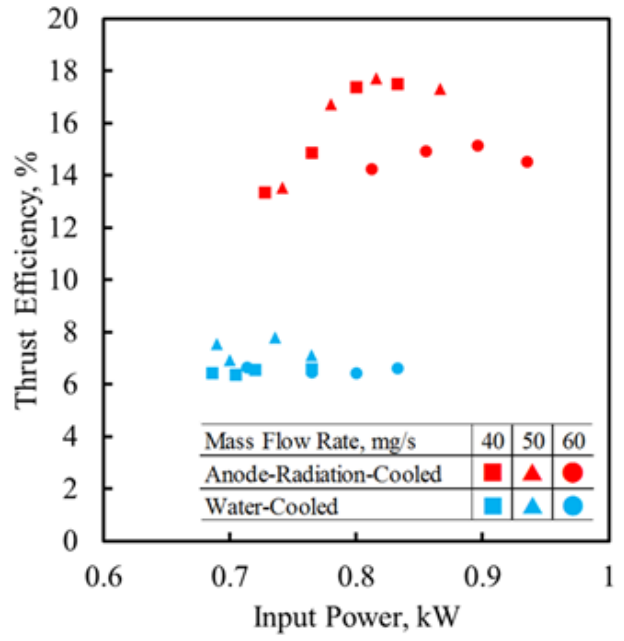
(a) 電圧 - 電流



(b) 推力 - 投入電力



(c) 比推力 - 投入電力



(d) 推進効率 - 投入電力

図 15 アノード輻射冷却式の基礎性能及び水冷式との性能比較

**3.3. アノード輻射冷却式アークジェットスラスタを用いた水作動実験** 開発したアノード輻射冷却式アークジェットスラスタを用いて研究目的である水推進剤での噴射確認実験を行った。実験手順は 3.1 に記載した方法で行った。窒素の流量約 135mg/s で初期着火後約 10 分間スラスタの予備加熱を行った。その後、水の供給を開始し窒素の供給を絞り水単体での作動を試みた。スラスタへの投入電流は 17 A、水の流量は 24.3 mg/s。実験条件を表 6 に記す。

結果、窒素の流量を減少させている際に水と窒素が混じっている青白いプルームが確認できた。この後、不安定作動になり作動停止となった。停止前の噴射の様子を図 16 に示す。

表 6 実験条件

Propellant	Nitrogen	Water
Flow Rate, mg/s	135	24.3
Current, A	17	



図 16 水噴射実験の様子

## 4. 結論

**4.1. 水冷式アークジェットスラスタを用いた水作動実験** 窒素流量 0mg/s、水 25.2mg/s のとき青白いプルームが確認できた。だが、この状態もわずか 10 秒しか持たず、その後断続的な供給となり作動が停止してしまった。また、水冷をせず実験

を行ったためボディ・電極・絶縁体に損耗が生じた。しかし、アノード部の水冷を止めた実験で噴射が確認できたため、アノード部を水冷式から輻射冷却式となるスラスタの設計・開発に着手しました。また、断続的な供給を防ぐため、ガスジェネレータにオリフィスをつけた改良モデルを作成した。

## 4.2. アノード輻射冷却式アークジェットスラスタの基礎性能取得実験及び水冷式との性能比較

アノード輻射冷却式アークジェットスラスタの窒素での噴射実験ではオレンジ色のプルームが長く伸び安定した噴射が確認できた。このことから比較的安定した噴射であると考えられる。アノード輻射冷却式アークジェットスラスタと水冷式の基礎性能比較ではアノード輻射冷却式の性能は水冷式の性能よりも高い結果が得られた。これは、水冷式の場合、絶縁破壊にいたるまでの水分子の励起に必要なエネルギーが水冷により奪われていることが原因だと考えられる。そのためアノード部を水冷しないアノード輻射冷却式の性能が水冷式よりも高いことが実証された。

## 4.3. アノード輻射冷却式アークジェットスラスタを用いた水作動実験

結果、窒素の流量を減少させている際に水と窒素が混じっている青白いプルームが確認できた。この後、不安定作動になり作動停止となった。このことから水推進剤単体での作動の可能性が見られた。実験過程でプルームが消えてしまったが、これは窒素の減少量が大きすぎたために定常アーク放電が途切れてしまったことが原因の一つと考える。また、放電室内圧力が高くなりすぎスラスタに供給される蒸気の圧力が負けてしまい推進剤が放電室まで流れていない可能性も考えられる。今後加圧タンクの圧力

を調節するなどして推進剤を一定流量流すことができれば解決できると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 下垣内 勝也, 白木 優, 福留 佑規, 奥田 和宜, 三村岳史, 田原 弘一, 高田 恭子, 桃沢 愛, 野川雄一郎, : 低毒性推進剤を用いたアノード輻射冷却式低電力 DC アークジェットスラスタの性能特性, 平成 28 年度宇宙科学連盟, 3I16
- 2) 奥田 和宜, 三村 岳史, 下垣内 勝也, 奥村 俊介, 田原 弘一, 高田 恭子 (大阪工業大学), 桃沢 愛 (東京都市大学), 低毒性推進剤として水の使用を想定した低電力 DC アークジェットスラスタの研究開発, 平成 29 年度宇宙科学連盟, 2E02
- 3) Suguru Shiraki, Yuki Fukutome, Fumihiko Inoue, Katsuya Shimogaito, Takashi Nakanishi, Hirokazu Tahara and Kyoko Takada : Performance and Thermal Characteristics of Low-Power DC Arcjet Thrusters with Radiation-Cooled Anodes for Low-Toxicity Propellants, 8th Asian Joint Conference on Propulsion and Power (AJSPP 2016), AJCPP2016-116,2016
- 4) 三村 岳史, 奥田 和宜, 下垣内 勝也, 高田 恭子, 中田 大将, 田原 弘一, 桃沢 愛, 白木 優, 福留 佑規, 野川 雄一郎 : 低毒性推進剤を用いた低電力 DC アークジェットスラスタの性能特性, 平成 28 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2016-001, 2017