

# 永久磁石搭載輻射冷却式 定常作動MPDスラスタの開発研究

○杉山 義和, 湖山 典英, 鈴木 智也, 佐小田 久生, 田原 弘一 (大阪工業大学)

Research and Development of Radiation-Cooled Steady-State MPD Thruster with Permanent Magnets  
Yoshikazu Sugiyama, Norihide Koyama, Tomoya Suzuki, Hisao Sakoda, Hirokazu Tahara  
(Osaka Institute of Technology)

## Abstract

High-power steady-state MPD (Magneto-Plasma-Dynamic) thrusters have studied at Osaka Institute of Technology. The MPD thruster is equipped with permanent magnets to make the system of the thruster easier. We obtained the result of thrust 41.9mN, specific impulse 2,870s and thrust efficiency 12.5% with hydrogen as a propellant. Furthermore we experimented with single hollow cathode and multi hollow cathode and confirmed stable operations.

Key Words : MPD Thruster, Hollow Cathode, Radiation-Cooled, Permanent Magnet, In-Space Propulsion

## 1. 緒言

近年, 宇宙開発において有人火星探査や月面基地建設など, 高い比推力が必要なミッションが計画されている<sup>1)</sup>. 大阪工業大学では, それらのミッションでの使用を想定し, 3年前から電磁加速プラズマスラスタ (Magneto-Plasma-Dynamic Thruster, 以後MPDスラスタと呼ぶ) を研究している. 従来のMPDスラスタは, ソレノイドコイルを用いて外部磁場を印加している. しかし, ソレノイドコイルは, 冷却水などを用いて冷却する必要がある. 宇宙空間では, 冷却水が凍らなくするための装置が必要であるため, スラスタシステムが複雑になり, 実用化が困難とされている. そのため, 本学で開発したMPDスラスタは, システムをより簡単にするために, ソレノイドコイルではなく, 永久磁石を用いて外部磁場を印加している. 本研究の最終目標は, 推進性能において, 比推力3000s以上, 推進効率40%以上を達成すること, さらに冷却水を用いない, 定常作動輻射冷却式MPDスラスタを開発することとする.

## 2. 実験設備

### 2.1 旧型水冷式MPDスラスタ

本学では, 以前からアークジェットスラスタの研究を行ってきた<sup>2)</sup>. 定常作動型MPDスラスタの実現可能性を示すために, 永久磁石を搭載したMPDスラスタを開発した. 旧型水冷式MPDスラスタの3Dモデルを図1, 断面図を図2に示す. 旧型水冷式MPDスラスタは, 既存のアークジェットスラスタのアノード側に円柱型のサマリウムコバルト (SmCo) 磁石をSS400製のヨークで挟み込んだものを追加した形となっている. 推進剤は, カソードの根元から旋回を伴って供給される. さらに, アノードとカソードホルダー

は水冷されている.

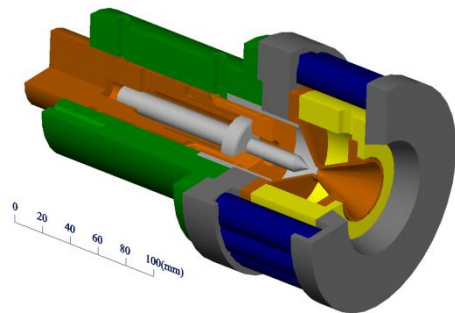


図1 旧型水冷式MPDスラスタの3Dモデル

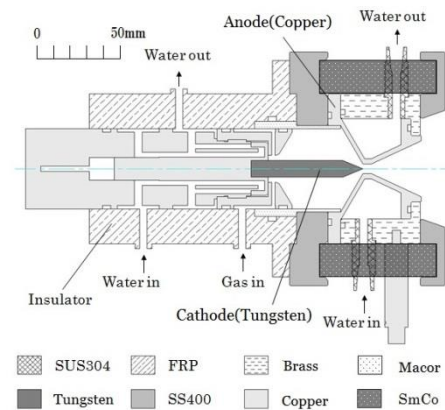


図2 旧型水冷式MPDスラスタの断面図

### 2.1.1 電極形状

旧型水冷式MPDスラスタの電極概略図を図3に示す. アノードの形状は, コンストリクタ直径6mm, コンストリクタ長さ5mm, ダイバージェントノズル角度50°, コンバージェントノズル角度120°である. カソードの形状は, 直径10mm, 長さ45mm, 先端角

度45°である。電極間距離は0mmに設定した。

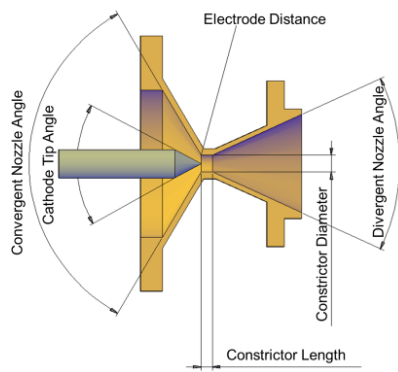


図3 旧型水冷式MPDスラスタの電極概略図

### 2.1.2 磁場形状

旧型水冷式MPDスラスタの磁場形状と、中心軸上の磁束密度の大きさを磁場解析ソフト(Quick Field)で解析した。磁場形状を図4、磁束密度の大きさを図5に示す。図4の赤線は、スラスタの中心軸を示す。図4より、磁力線は、コンストリクタ付近でスラスタ中心軸に対してほぼ平行に通っている。図5より、スラスタ中心軸上で計測された最大磁束密度は、約0.10Tであった。

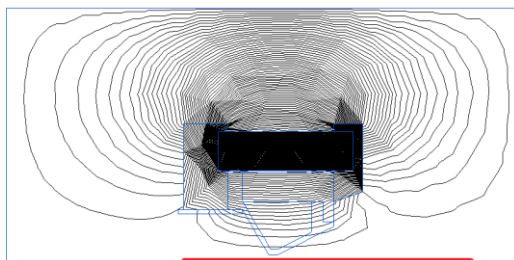


図4 旧型水冷式MPDスラスタの磁場形状

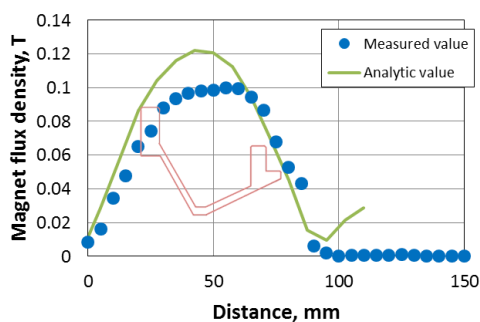


図5 旧型水冷式MPDスラスタの磁束密度

## 2.2 新型水冷式MPDスラスタ

新型水冷式MPDスラスタの3Dモデルを図6に、断面図を図7に示す。永久磁石は、旧型同様、サマリウムコバルト磁石を用いた。このスラスタを開発するにあたって、ロッド(中実)カソード、ホロー(中空)カソードの両方で実験を行えるようにすること、旧型スラスタより強い磁場を印加できるようにすること、

磁石の取り外しが容易であること、以上の3つをコンセプトとした。磁石の個数を自由に変更できるので、スラスタに印加する磁束密度を自由に変更することができる。また、カソードホルダーを交換することで、ロッド・ホロー両方のカソードで実験を行うことができる。推進剤は、ホローカソード用カソードホルダーを使用する場合、カソードホルダーの末端から供給され、ロッドカソード用カソードホルダーを使用する場合、スラスタ本体の側面から供給される。また、カソードホルダーとアノードは水冷されている。

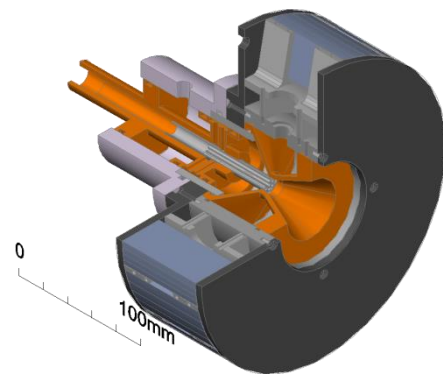


図6 新型水冷式MPDスラスタの3Dモデル

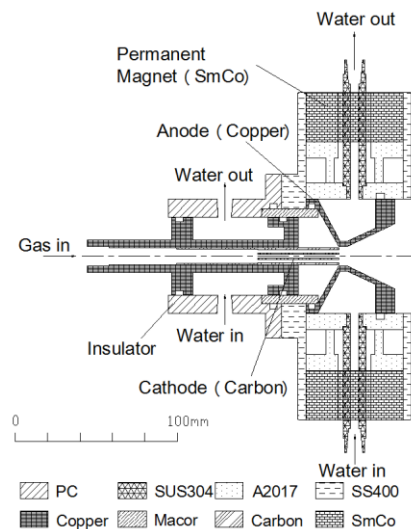


図7 新型水冷式MPDスラスタの断面図

### 2.2.1 電極形状

新型水冷式MPDスラスタの電極概略図を図8に示す。アノード形状は変更されているが、コンストリクタ直径、コンストリクタ長さ、ダイバージェントノズル角度、コンバージェントノズル角度、カソード直径、カソード先端角度、電極間距離の値は変更されていない。

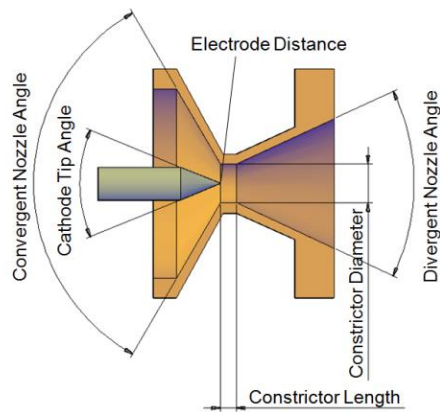


図8 新型水冷式MPDスラスタの電極概略図

### 2.2.2 磁場形状

新型スラスタには、旧型スラスタで使用した円柱型磁石ではなく、セグメント型磁石を用いた。新型スラスタに用いたセグメント型磁石の形状を図9に示す。セグメント型を採用した理由として、磁石を円環領域に隙間なく敷き詰めることができ、より強い磁場を印加できると考えたからである。



14 magnets: IR59.5mm x OR89.5mm x L60mm x 22.5°

図9 セグメント型磁石

旧型同様、新型スラスタも、磁場解析を行った。磁場形状を図10、磁束密度の大きさを図11に示す。図10の赤線は、スラスタの中心軸を示す。図10より、磁力線は、スラスタ中心軸に対してほぼ平行に通っている。図11より、コンストリクタ付近での最大磁束密度は約0.16Tであった。旧型スラスタには約0.10Tの外部磁場が印加されていたので、新型スラスタは旧型の約1.6倍の外部磁場を印加していることになる。

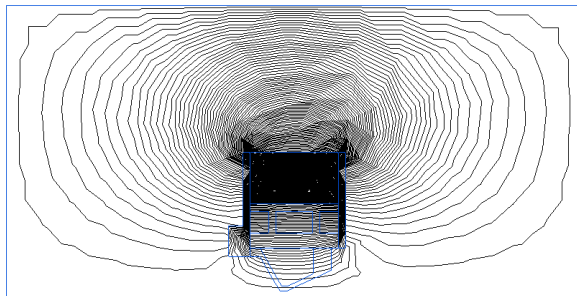


図10 新型水冷式MPDスラスタの磁場形状

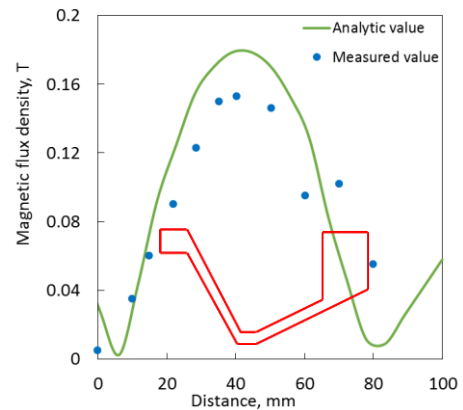


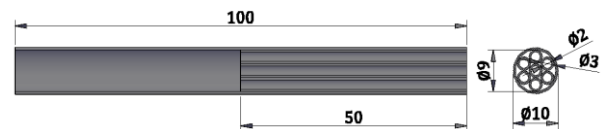
図11 新型水冷式MPDスラスタの磁束密度

### 2.2.3 ホローカソード

実験で用いたホローカソードの断面図を図12に示す。中空パイプ1本からなる、シングルホローカソードと、複数のパイプからなる、マルチホローカソードの2種類を用いた。材質はカーボンを使用している。その理由として、実験段階のホローカソードに加工が困難な純タングステンを用いるのは、高コストになると判断したためである。



(a)シングルホローカソード



(b)マルチホローカソード

図12 ホローカソードの断面図

### 2.3 アノード輻射冷却スラスタ

完全輻射冷却スラスタを開発する前段階として、アノードのみ輻射冷却のスラスタを開発した。開発したアノード輻射冷却スラスタの3Dモデルを図13、断面図を図14に示す<sup>3)</sup>。このスラスタは、前述のものとは異なり、永久磁石を搭載していない。そのため、アークジェットスラスタと同様の作動原理となる。アークジェットスラスタにおける推力生成の原理である電熱加速を促すために、アノードのコンストリクタ直径を2mmまですばめた。スラスタのボディ、カソードホルダーは、旧型水冷式MPDスラスタと同じものを使用した。アノード側には冷却水を流さず、カソードホルダーのみ水冷されている。

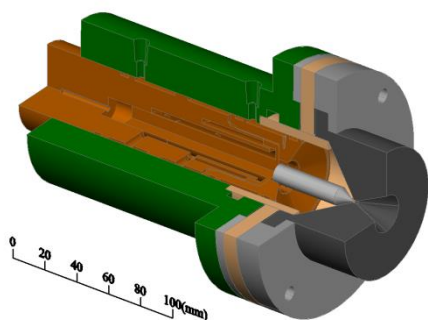


図13 アノード輻射冷却スラスタの3Dモデル

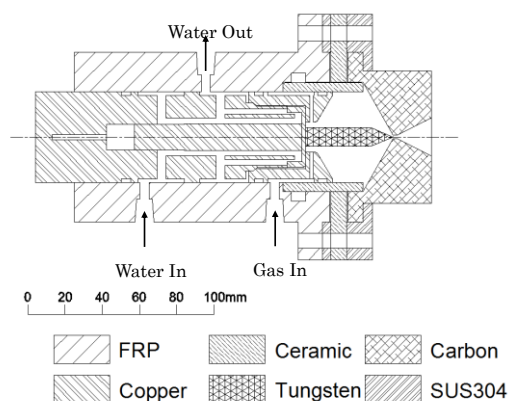


図14 アノード輻射冷却スラスタの断面図

## 2.4 実験装置

本研究で用いた真空チャンバーの概略図を図15、写真を図16に示す。真空チャンバーの主な材質はアルミニウムだが、チャンバーの中ほどはパイレックスガラスになっており、チャンバーの外から噴射の様子を観察できる。チャンバーの長さは4.75m、直径は0.6mである。真空状態を作り出すために、ロータリーポンプ、メカニカルブースター、油拡散ポンプの3つのポンプを使用し、チャンバー内部の圧力を推進剤流入時に最大で約60Paまで下げることができる。

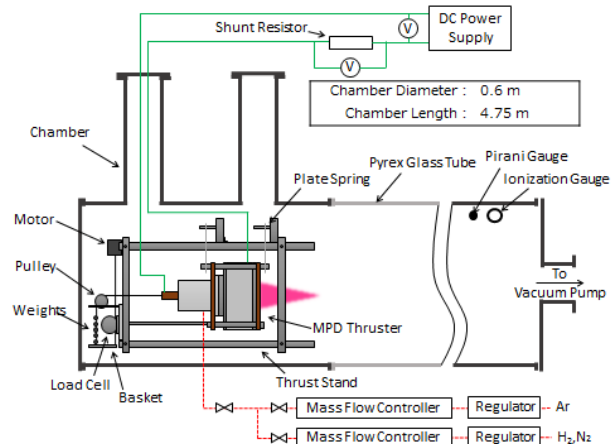


図15 真空チャンバーの概略図

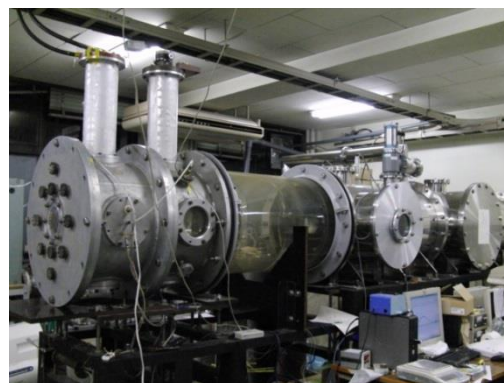


図16 真空チャンバー

## 3. 実験結果

### 3.1 旧型水冷式MPDスラスタの性能測定実験

#### 3.1.1 実験条件

旧型水冷式MPDスラスタにおける実験条件を表1に示す。この実験に用いた推進剤は、窒素、アルゴン、水素、アンモニアの計4種類である。

表1 実験条件

Propellant	N <sub>2</sub>	Ar	H <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>
Mass Flow Rate, mg/s	150	83	1.5	150
	290	170		
Discharge Current, A	70-150			

#### 3.1.2 実験結果

各推進剤における噴射の様子を図17に示す。推進剤に窒素、アルゴン、水素を用いた際、安定作動を確認した。アンモニアを用いた際、放電が安定しなかったため、信頼性のあるデータが取得できなかった。水素を用いた際、比推力2,870s、推進効率12.5%を達成し、比推力は本研究の目標である3,000sをほぼ達成した。

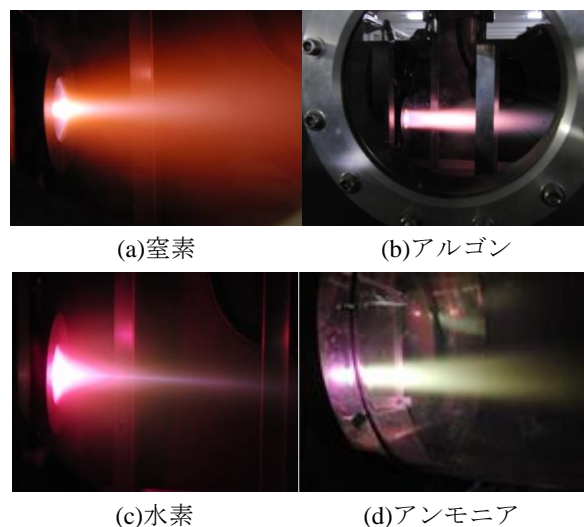


図17 各推進剤における噴射の様子



放電電圧－放電電流特性を図18，推力－放電電流特性を図19に示す．図18より，電熱加速モードにおいてみられる垂下特性が確認された．しかし，噴射の様子から，電磁加速モードにおいてみられるホール効果が観測されたため，加速モードは，電熱加速，電磁加速両方の特性を持つハイブリッド加速モードであると推測される．そのため，供給された推進剤がすべてプラズマにならず，一部がそのまま排出されていることが考えられる．図19から，電流増加とともに，推力が増加していることが確認できた．これは放電電流が大きくなることで，プラズマ化する推進剤の割合が増えたからだと考えられる．

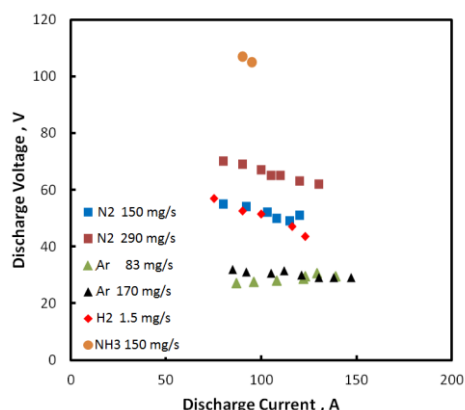


図18 放電電圧－放電電流特性

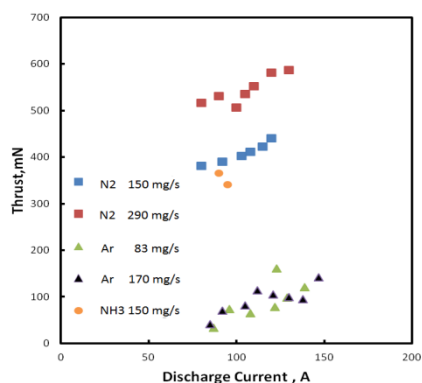


図19 推力－放電電流特性

実験終了後のカソードの写真を図20に示す．実験後，カソードの先端が激しく損耗していた．その理由として，生成されたプラズマが，印加された磁場の影響で，軸中心に集中することで，カソードの先端を激しく損耗させたのではないかと考えた．カソードの損耗は，長時間作動を行う上でとても重要な

問題である．私たちは，カソードの損耗を小さくするために，先端の1点に電流が集まるスポットモードではなく，電流密度が小さくなる拡散モードで作動するホローカソードの使用を検討した．拡散モードでの作動は，電流密度が小さくなることで，カソードの最高温度が下がり，損耗の軽減が期待される．



図20 実験後のロッドカソード

## 3.2 新型水冷式MPDスラスタの性能測定実験

### 3.2.1 実験条件

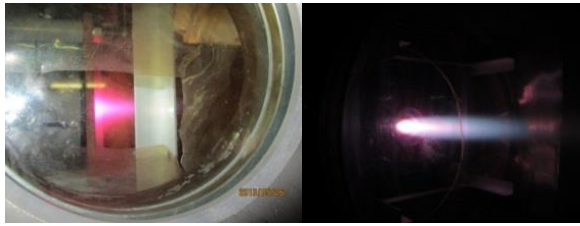
新型水冷式MPDスラスタにおける実験条件を表2に示す．カソードはロッドカソード，マルチホローカソード，シングルホローカソードの3種類を用いて実験を行った．ロッドカソードを用いた実験においては，搭載する磁石の本数を0本(0T)と14本(0.155T)で噴射実験を行った．推進剤は，旧型スラスタの性能測定実験で最も比推力の高かった水素を用いた．

### 3.2.2 ロッドカソードにおける実験結果

ロッドカソードを用いた噴射の様子を図21に示す．磁場を印加した場合，ホール効果によるプリュームの収束が観測されたことから，電磁加速が支配的になっていると考えられる．また今回の実験では，スラストスタンドの不良によって推力の測定ができなかった．そのため，放電電圧－放電電流特性のみで考察を行った．放電電圧－放電電流特性を図22に示す．外部磁場を印加しなかった場合，電熱加速モードにおいてよく見られる垂下特性がみられた．外部磁場を印加した場合，電熱加速モードにみられる垂下特性が見当たらなかったため，電磁加速モードによってプラズマが加速されていると判断できる．

表2 実験条件

Number of Magnets	0	14	14	14
Maximum Magnetic Flux Density, T	0	0.155	0.155	0.155
Shape of the Cathode	Rod (Pure Tungsten)		Multi Hollow (Carbon)	Single Hollow (Carbon)
Propellant	H <sub>2</sub>		H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
Mass Flow Rate, mg/s	7.5		3.0	3.0
Discharge Current, A	90-140		90-140	90-140



(a)磁場印加あり (b)磁場印加なし  
図21 ロッドカソードを用いた噴射の様子

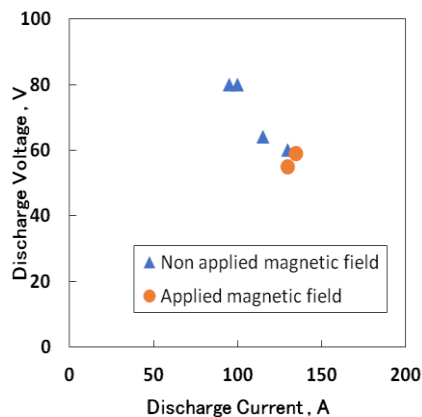
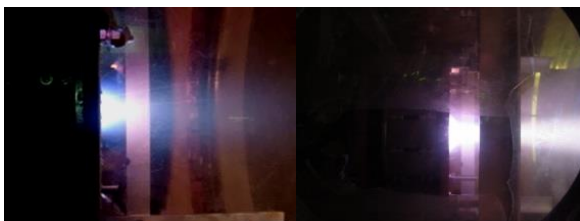


図22 放電電圧－放電電流特性

### 3.2.3 カーボン製ホローカソードにおける実験結果

各ホローカソードを用いた噴射の様子を図23に示す。噴射の様子を観察すると、両カソードとも、プリュームは安定していた。マルチホローカソードを用いた噴射において、ビームが1mほど伸びていることが確認された。マルチホローカソードを用いた実験のほうが、実験中に火花が良く飛んでいた。また、高融点材料である炭素がひどく損耗していた。炭素は高温下で水素と反応し、メタンになるため、炭素の融点に達する前に損耗してしまうからである。その理由として、プラズマとカソードの接触が大きいためだと考えた。噴射後のホローカソードの写真を図24に示す。噴射後の各ホローカソードを観察すると、カソード先端がひどく損耗していた。私たちが目指している拡散モードでの作動ではなくスポットモードでの作動が行われているためだと考えらえる。そのため、私たちが目指している損耗低減を実現することができなかった。



(a)シングルホロー (b)マルチホロー  
図23 各ホローカソードにおける噴射の様子



(a)シングルホローカソード



(b)マルチホローカソード

図24 噴射後のホローカソード

## 3.3 ロッドカソードを用いた電極損耗試験

### 3.3.1 実験条件

新型水冷式MPDスラスタを用いて、30分間の連続作動を行い、電極の損耗量を測定した。カソードには、純タングステン製のロッドカソードを用いた。推進剤には水素を用い、質量流量は3.0mg/s流した。また、作動中は、電流を110Aに固定した。

### 3.3.2 実験結果

噴射の様子は、終始安定していた。噴射前後でのカソードの質量を測定したところ、噴射後カソードの質量が5mg減少していた。噴射後のロッドカソードの写真を図25に示す。電極の先端は少し損耗していたが、過去の損耗に比べると小さかった。また、作動中、電圧計は47Vを示していた。



図25 噴射後のロッドカソード

### 3.4 純タングステン製シングルホローカソードにおける噴射実験

#### 3.4.1 実験条件

カソードの材質としてカーボン是不向きであるという結果になったため、純タングステン製のシングルホローカソードを用いた噴射実験を行った。今回の実験では、連続作動ではなく、安定作動を行える推進剤流量を見つけることを目的とした。また、カーボン製のシングルホローカソードとの損耗具合の違いを比較した。推進剤には水素を用いた。

#### 3.4.2 実験結果

純タングステン製のシングルホローカソードを用いた噴射の様子を図26に示す。今回、推進剤の内側注入のみで初期着火に成功した。推進剤流量を大きくすると、火花が散るようになり、すぐに不安定作動に移行してしまった。流量を調整した結果、安定する推進剤流量は、0.15-0.60mg/sとなった。また、噴射後のシングルホローカソードを図27に示す。カーボン製のホローカソード同様、先端が損耗しているため拡散モードでの作動が行えていないと考えた。今後、拡散モードで作動する推進剤流量を見つける必要がある。

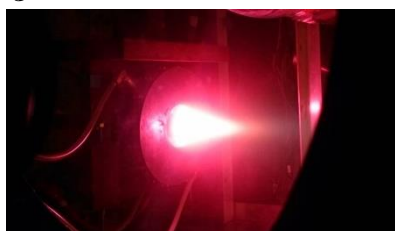


図26 噴射の様子



図27 噴射後のシングルホローカソード

### 3.5 アノード輻射冷却スラスタの実験

#### 3.5.1 実験条件

アノード輻射冷却スラスタにおける実験条件を表3に示す。推進剤は、窒素と水素の2種類を用いた。カソードは、純タングステン製のロッドカソードを使用した。

表3 実験条件

Propellant	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
Mass Flow Rate, mg/s	20	4.0
Discharge Current, A	55-150	

#### 3.5.2 実験結果

各推進剤を用いた噴射の様子を図28に示す。いずれの推進剤においても安定作動が確認できた。放電電圧ー放電電流特性を図29、投入電力ー放電電流特性を図30に示す。図29より、電熱加速モードにおいてよく見られる垂下特性が確認された。図30より、水素の流量が4.0mg/sのときに、放電電流は144A、放電電圧は46Vとなり、最大投入電力6.6kWを達成した。



(a)窒素20mg/s

(b)水素4.0mg/s

図28 各推進剤における噴射の様子

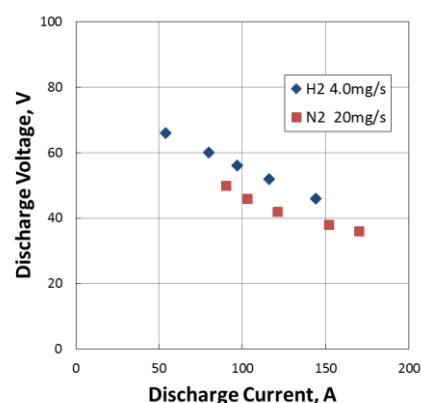


図29 放電電圧ー放電電流特性

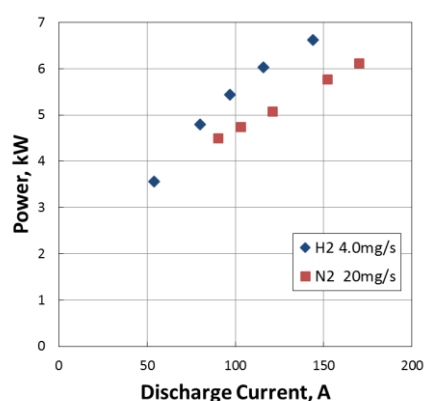


図30 投入電力ー放電電流特性

作動停止直後のアノードの様子を図31に示す。アノードは、輻射によって熱を放散している。そのため、作動中のアノードは高温となり、赤熱していた。放射温度計(THI-800, 高温域専用ハンディ型放射温度計, タスコジャパン株式会社)を用いて作動直後にアノードの表面温度を測定したところ、1,100Kであった。作動停止後約2分、アノードの赤熱が続いていた。

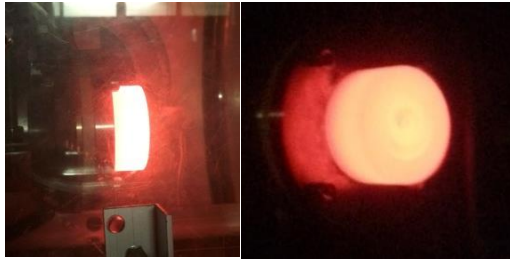


図31 作動停止直後のアノード

#### 4. 結言

- ・旧型水冷式MPDスラスタにおいて、水素を用いた場合、推力41.9mN、比推力2,870s、推進効率12.5%を達成した。
- ・新型水冷式MPDスラスタにおいて、ロッドカソードを用いた際に、電磁加速モードでよく見られる特性を確認した。また、マルチホローカソードを用いた際、データ取得はできなかったが、安定作動を確認した。
- ・ロッドカソードを用いて30分間の連続作動に成功した。純タングステン製のシングルホローカソードを用いて、推進剤の内側注入のみで初期着火に成功した。
- ・アノード輻射スラスタにおいて、窒素、水素、両推進剤での安定作動を確認した。実験後にアノードの赤熱を確認した。

#### 5. 今後の課題

スラスタスタンドの不良により性能取得ができなかったため、新型水冷式MPDスラスタを用いて、性能取得実験を行う。性能取得後、ロッドカソード、シングルホローカソードとマルチホローカソードにおいて性能比較を行い、特性の違いについて考察する。さらに、搭載する磁石の個数を変更し、印加する磁束密度の大きさによる推進性能の影響を調べる。

アノード輻射冷却スラスタを用いた実験データを参考に、完全輻射冷却式MPDスラスタを設計・開発を行う。しかし、アノード輻射冷却スラスタの噴射実験の結果から、アノード周りは高温にさらされることが確認できた。そのため、永久磁石が高温になり、印加している磁場を減磁させないような設計を行わなければならない。設計段階で熱解析を行い、永久磁石にどれだけの熱が伝わるのかを確かめ、スラスタの最適な構造を検討する。また、完全輻射冷却式スラスタでは、アノードだけでなくカソード周りも高温にさらされることが予想される。そのため、放電室まわりは全て高融点材料を使用しなければならない。また、宇宙機側へ熱をつたえないようにするために、カソード周りで発生する熱を、ボディを介してアノード下流部まで逃がす構造が必要になる。

- 1). Hirokazu Tahara, Yoichi Kagaya and Takao Yoshikawa: 「Effects of Applied Magnetic Fields on Performance of a Quasisteady Magnetoplasmadynamic Arcjet」 Journal of Propulsion and Power, Vol. 11, No. 2, (1995), pp.337-342.
- 2). Yusuke Okamachi, Katsuya Fujita, Kazuya Nakagawa, Reo Shimojo, Hirokazu Tahara, Taiichi Nagata and Ideo Masuda : 「 Performance Characteristics of Direct-Current Arcjet Thrusters Using Hydroxyl-Ammonium-Nitrate Propellant 」, 28th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS 2011-b-49(2011).
- 3). Tomoya Suzuki, Taisuke Kubota, Norihide Koyama and Hirokazu Tahara : 「Research and Development of Steady-State MPD Thrusters with Permanent Magnets and Multi Hollow Cathodes for In-Space Propulsion」 AIAA Propulsion and Energy Forum and Exposition (2014), Cleveland Convention Center, Ohio, 2014, AIAA-2014-3697.