

永久磁石とマルチホローカソードを用いた 輻射冷却式MPDスラスタの開発研究

○湖山 典英, 井端 公紀, 藤田 雄也, 田原 弘一 (大阪工業大学)

Research and Development of Radiation-Cooled MPD Thrusters
with Permanent Magnets and Multi-Hollow Cathodes

Norihide Koyama, Hiroki Ibata, Katuya Fujita and Hirokazu Tahara (Osaka Institute of Technology)

Key Words : MPD Thruster, Steady-State, Applied Magnetic Field, Permanent Magnet,
Multi-Hollow Cathode

Abstract

A pulsed-operation MPD Thruster was not fit for utilization in space. In this study, the MPD thruster doesn't have the coil for external magnetic field application but permanent magnet, Samarium cobalt. So, if magnetic Curie temperature is taken into consideration, the radiation-cooled thruster without cooling water can be designed. The manned Mars explorations which are a final objective of this study are missions for which a high specific impulse is needed. Using hydrogen, we could obtain a result of thrust 41.9mN, specific impulse 2870s, and thrust efficiency 12.5%. We will perform performance improvement and heat analysis for development of a radiation-cooled thruster. And, to decrease cathode damage, we designed multi-hollow cathode. Using it, a new water-cooled thruster with changing anode geometry, distance between electrodes and magnet field strength was made.

1. はじめに

近頃、キュリオシティによる火星の写真が世間を賑わしている。本研究では、次なるステップである火星有人探査のために冷却の必要のない実用的な定常作動のMPDスラスタの研究開発を行う。今までのMPDスラスタはコイルにより外部磁場を印加していた。そのため、システムは複雑となりコイルの水冷も不可欠であり、実用化には向いていなかった。そこで、コイルは使用せず、今までのアークジェットスラスタの陽極側に永久磁石を取り付け、外部からローレンツ力を加える。それにより、システムは簡易化し、冷却の必要がなくなる。高比推力を実現するために、水素による噴射実験を行い、MPDスラスタの性能特性を調べた。また、電極損耗を低減させるためにマルチホローカソードの設計を行った。

2. 実験設備

2-2 MPDスラスタ

本研究で製作した水冷式MPDスラスタの概略図を図1に、スラスタの本体写真を図2に示す。既存のアークジェットスラスタの陽極側に、永久磁石（サマリウムコバルト）をSS400で挟み込む形で磁気回路を形成し、磁場を印加する。永久磁石はむき出しの状態になっている。また、ノズル形状をした銅製の

陽極（アノード）と、純タングステン製の陰極（カソード）、および両電極を絶縁するテフロンとポロンナイトライド製の絶縁体から構成されている。陽極ノズル部と陰極ホルダーは水冷されている。作動ガスは陰極根元部分から旋回流として供給される。主放電電源として直流定電流電源装置を用いた。供給電流値は可変で、電圧が自動的に調整される。

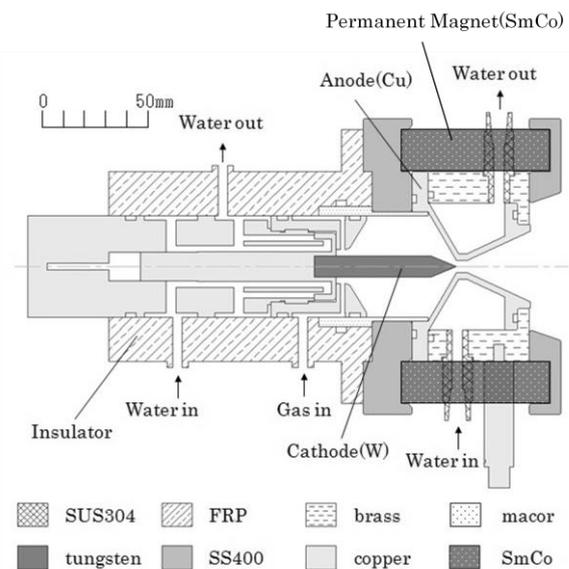


図1 MPDスラスタの断面図



図 2 MPDスラスタの本体

2-2 MPDスラスタの電極

MPDスラスタの電極拡大図を図3に示す。アノード部分の形状は、コンバージェントノズル角 120° 、ダイバージェントノズル角 50° 、コンストリクタ部の直径を6mmである。カソードの先端は先端角 45° （鋭角陰極）である。カソードの直径は10.0mm、長さはカソードホルダーから露出している部分が45.0mmである。またカソードホルダーの直径は48.0mmである。アノード、カソードカソードホルダーの写真を図4、5、6に示す。

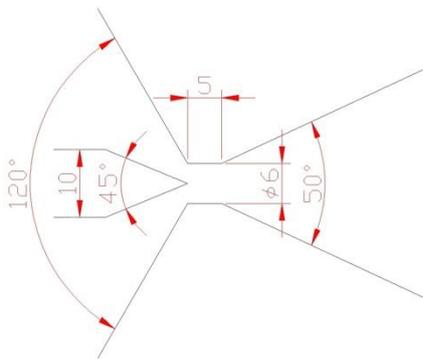


図 3 電極拡大図



図 4 アノード



図 5 先端角 45° のカソード



図 6 カソードホルダー

2-3 磁場形状

MPDスラスタの磁場形状を磁場解析（Quick Field）で解析した磁力線図を図7に、アノードの上流部から下流部までの径方向の距離と磁束密度の大きさのグラフを図8に示す。中心軸からの距離が0mm、2.5mm、5mmの時を赤、緑、紫に色付けしてそれぞれの図に示す。SS400によって形成された磁気回路により、磁束密度はコンストリクタ付近で約3000gaussとなり、軸方向に対してほぼ平行となっている。

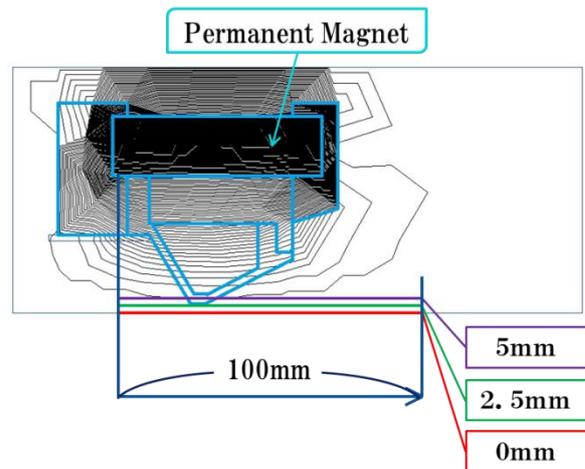


図 7 磁力線図

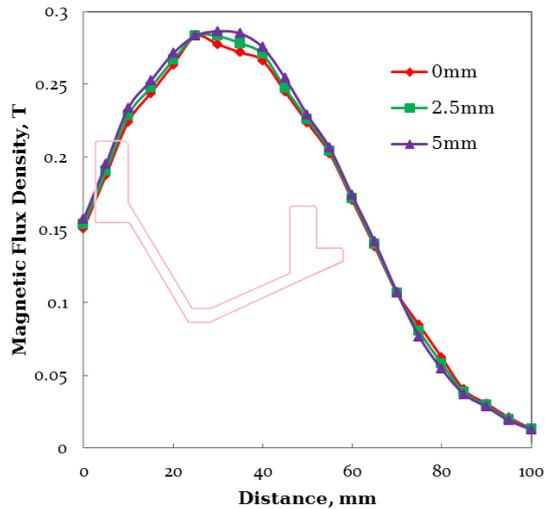


図 8 磁束密度の軸方向分布



図 10 真空ポンプ

2-4 実験装置

本研究で用いた真空チャンバは内径0.6m、長さ5.75mの円筒形で材質はアルミニウムとパイプレックスガラスである。パイプレックスガラスを通してチャンバ内の噴射の様子を観測出来るようになっている。真空チャンバの写真を図9に示す。

実験は真空チャンバ内で行う。実験開始時の真空チャンバ内の圧力はロータリーポンプ（株式会社大阪真空機器製作所、排気速度3000m³/h）とメカニカルブースタ（大阪真空機器製作所、排気速度1630m³/h）と油拡散ポンプ（大阪真空機器製作所、排気速度13000l/s）を併用して約 6.7×10^{-5} Pa程度まで下げられる。推進剤（マスフローコントローラを用いて流量を調節）、冷却水、電源ケーブルは真空チャンバの側面のフランジを介してMPDスラスタへ供給される。真空チャンバ内の圧力はピラニ真空計と電離真空計を用いて測定される。真空ポンプ、実験装置の全体構成を図10、11に示す。

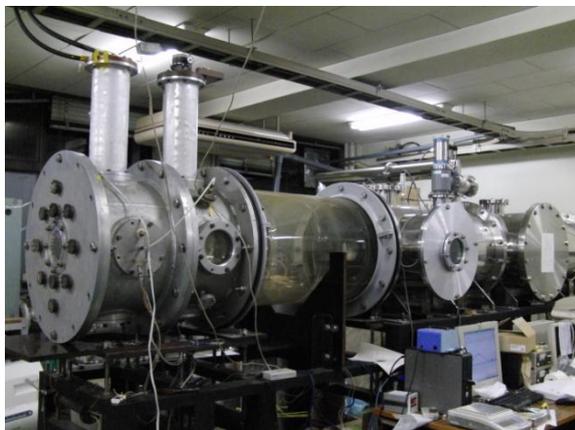


図 9 真空チャンバ

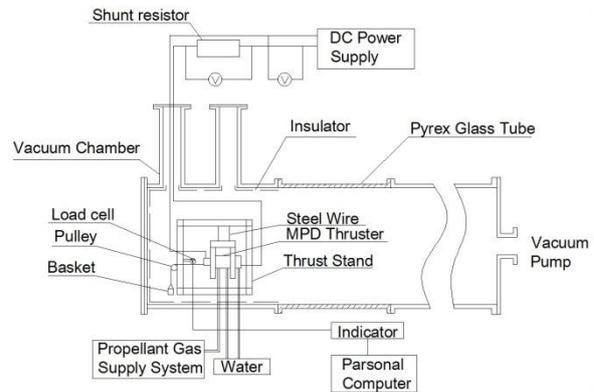


図 11 実験設備の概略図

3. 実験結果と考察

本研究では、まずアルゴンと窒素で安定作動するかどうかを確かめた。推進剤流量とその結果を表1に示す。その結果、推力は窒素が402.9[mN]、アルゴンが82.0[mN]で、推進効率も窒素が10.4[%]、アルゴンが0.71[%]となった。また、両気体共に放電は安定して行われていた。それぞれの気体の噴射の様子を図12、13に示す。

表 1 推進剤流量と実験結果（窒素・アルゴン）

| | N ₂ :0.15g/s | Ar:0.17g/s |
|----------------------|-------------------------|------------|
| Thrust[mN] | 402.9 | 82.0 |
| Input Power[kW] | 5.36 | 3.20 |
| Specific Impulse[s] | 281 | 56.3 |
| Thrust Efficiency[%] | 10.4 | 0.71 |

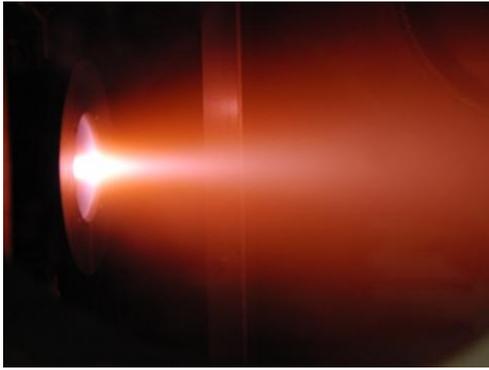


図 12 窒素での噴射

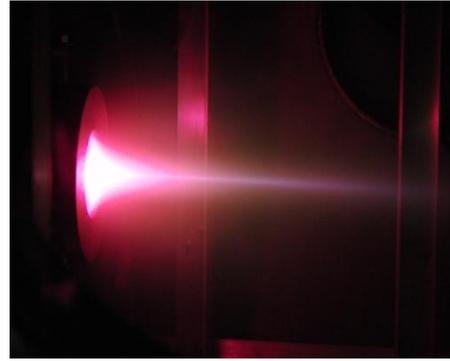


図 14 水素での噴射

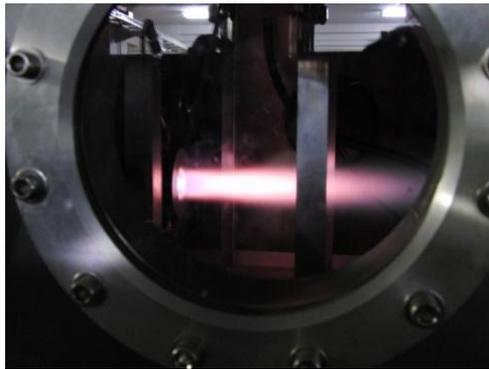


図 13 アルゴンでの噴射

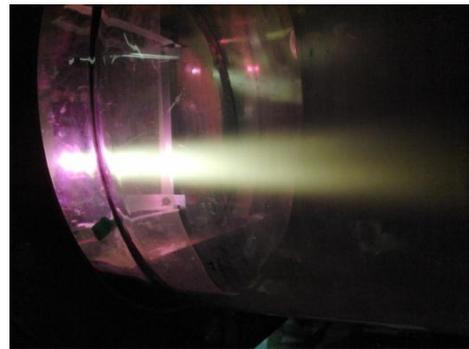


図 15 アンモニアガスでの噴射

次に高比推力が期待できる水素ガスによる噴射実験を行った。推進剤流量と結果を表2に示す。その結果、推力41.9[mN]，推進効率12.5[%]，比推力2870[s]となった。その噴射の様子を図14に示す。ビームが綺麗に伸びているのが確認できた。推力は小さいが、比推力，推進効率共に水素の方が優れている結果となった。また、アンモニアガスは実験段階であるが安定した噴射が確認できた。その噴射の様子を図15に示す。

4. カソード損耗の低減

従来のカソードを用いると、数分の噴射でカソードは大きく損耗し、実用化は難しい。そこで、電流密度が高くなるスポットモードではなく、拡散モードで作動できるマルチホローカソードを採用する。拡散モードでは、適当な作動時において陰極の最高温度が、陰極材料の融点に対して十分低くなるので陰極の損耗の大幅な減少が期待できる。従来のカソードの噴射後の様子を図16に示す。

表 2 推進剤流量と実験結果 (水素)

| | H ₂ :0.0015g/s |
|----------------------|---------------------------|
| Thrust[mN] | 41.9 |
| Input Power[kW] | 4.7 |
| Specific Impulse[s] | 2870 |
| Thrust Efficiency[%] | 12.5 |



図 16 噴射後の従来のカソード

このマルチホローカソードを用いた水冷式スラスタ2を設計した。マルチホローカソードと中実のカソードをどちらでも実験ができるようになっており、電極間距離、放電室の大きさ及び磁石の個数が可変となっている。図18に、概要図を示す。

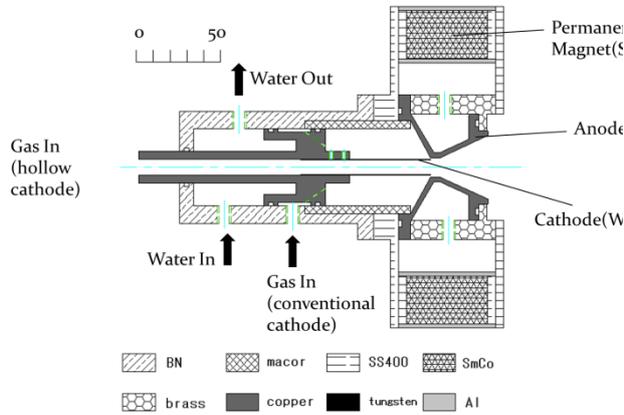


図 18 水冷式スラスタ2の概要図

輻射冷却式スラスタの設計も行った。消磁現象を回避するために、磁気回路を形成するSS400を電極と接触しないようにし、輻射熱の影響を防ぐためにラディエーションシールドを用いた。図19に、概要図を示す。

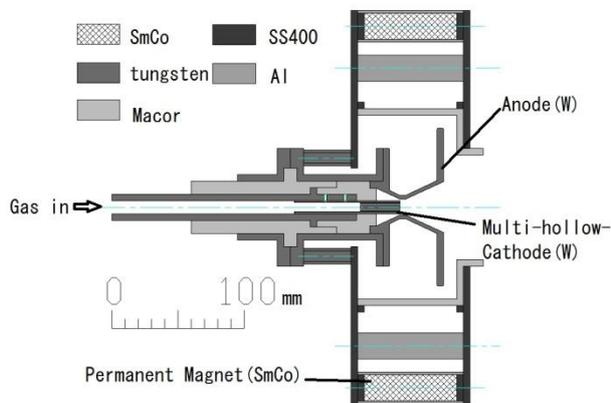


図 19 輻射式スラスタの概要図

4. まとめと今後の予定

MPDスラスタで、安定作動できることが確認できた。水素を用いると、推進効率12.5[%]、比推力2870[s]となり、アルゴンと窒素に比べて推進効率、比推力が優れていることがわかった。

今後の予定は、マルチホローカソードの拡散モードでの作動条件を探る。その後、マルチホローカソードと先端鋭角の中実のカソードの2つを比較対象としながら実験を行いつつ、電極の最適形状を探る。

また同時に、輻射冷却式スラスタに向けて磁場設計、熱計算を行っていく予定である。

参考文献

- 1) Akihiro Sasoh, Solem Anders Erik, Yoshihiro Arakawa, 外部磁場のあるMPD推進機におけるホール加速, 日本航空宇宙学会誌 37(430), p528-534, 1989年11月.
- 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 (28th ISTS), 2011年6月, Okinawa Convention Center (Ginowan City, Okinawa, Japan) ,ISTS 2011-b-49.
- 3) 三宅浩史, 田中宣行, 藤田雄也, 岡町悠介, 田原弘一, 長田泰一, 増田井出夫 「HAN系推進剤を用いた直流アークジェットスラスタの推進性能」 日本機械学会関西支部 関西学生会 平成23年度学生員卒業研究発表講演会, 1502, 2012年3月, 関西大学千里山キャンパス (大阪府吹田市).
- 4) 松本和真, 杉村勇也, 藤田雄也, 田原弘一 「低毒性推進剤を用いた直流アークジェットスラスタの性能特性」 電気学会 プラズマ研究会, PST-12-026, 2012年5月, 豊橋技術科学大学 ベンチャービジネスラボラトリー (愛知県豊橋市).
- 5) 湖山典英, 田原弘一 「永久磁石を用いた外部磁場印加型電熱・電磁加速モード可変定常作動プラズマスラスタの研究」 第3回大型 In-Space Propulsion (電気推進) ワークショップ, 2012年6月, JAXA 筑波宇宙センター (茨城県つくば市).
- 6) 湖山典英, 井端公紀, 藤田雄也, 田原弘一 「永久磁石を用いた10kW級定常作動型MPDスラスタの推進性能」 第56回宇宙科学技術連合講演会, 1J14, 2012年11月, 別府国際コンベンションセンター (ビーコンプラザ) (大分県別府市).