

STEP-2013-032 永久磁石とマルチホローカソードを用いた 定常作動型 MPD スラスタの開発研究

○鈴木智也(大阪工大工・学), 久保田太輔(大阪工大工・学),
湖山典英(大阪工大工・院), 田原弘一(大阪工大工)

Development and Research of Steady-State MPD Thrusters
with Permanent Magnets and Multi-Hollow Cathodes

Tomoya Suzuki, Taisuke Kubota, Norihide Koyama, Hirokazu Tahara(Osaka Institute of Technology)

1. 緒言

日本で 1981 年に MS-T4 「たんせい」人工衛星に搭載されスピンドル変更の宇宙実験が行われたり、宇宙科学研究所と NASA 共同による Spacelab-1 の SEPAC 実験で MPD スラスタが電子ビーム中和用のプラズマ源として宇宙実験が行われた。また、1995 年に宇宙科学研究所、宇宙開発事業団、無人宇宙実験システム研究開発機構の共同プロジェクトである再使用型人工衛星の SFU(Space Flyer Unit)にヒドラジン MPD スラスタが搭載され、軌道上で電気推進システムとして宇宙実証実験が成功した。しかし、MPD スラスタは、大電流を流すことによる強い自己誘起磁場によりプラズマにローレンツ力を加えて加速する。それに伴う電流密度の増加は電極に用いるタングステンの融点を超える原因となる。よって、MPD スラスタが実用化された例はない。その問題が解決されないまま、世界の宇宙推進機の興味はホール推進機へと移っている。

大阪工業大学では、火星有人探査のために冷却水の必要のない実用的な定常作動の MPD スラスタの開発研究を行っている。これまでの MPD スラスタはコイルにより外部磁場を印加していたが、コイルの冷却が不可欠であり、システムが複雑化するため実用化には至っていない。そこで、陽極の回りに永久磁石を円環上に配置し、磁気回路を形成することで外部から磁場を印加する。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、水素による噴射実験を行い、スラスタの性能特性を調べた。

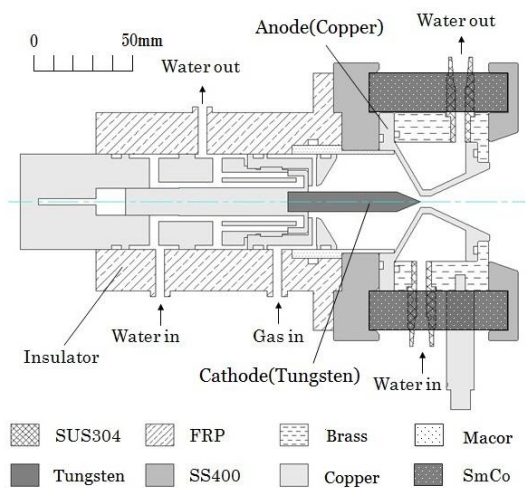
また、この度既存のスラスタよりも大きな磁束密度をもつ永久磁石を搭載したスラスタを新たに製作した。新型スラスタでは、中実カソードとマルチホローカソードともに安定作動を確認した。

2. 実験設備

2.1 MPD スラスタ

本研究で使用した水冷式 MPD スラスタの概略図と本体の写真を Fig. 1 に示す²⁾。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、磁場を印加している。永久磁石は冷却の便宜よりむき出しの状態にしてある。放電室はノズル形状をした銅製のアノード、純タングステン製のカソード、および両電極を絶縁するマコーン製の絶縁体から構成されている。アノードの形状はコンストリクタ直径が 6mm、コンストリクタ長さが 5mm、ダイバージェント角度が 50° である。カソードの形状は、直径が 10mm、長さが 45mm、先端角度が 45° である。電極間に発生する高温プラズマによる融解を防ぐため、アノードのノズル部とカソードホルダは水冷されている³⁾。

作動ガスはカソード根元から旋回を伴って供給される。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、電圧は自動的に調整される。



(a) 概略図

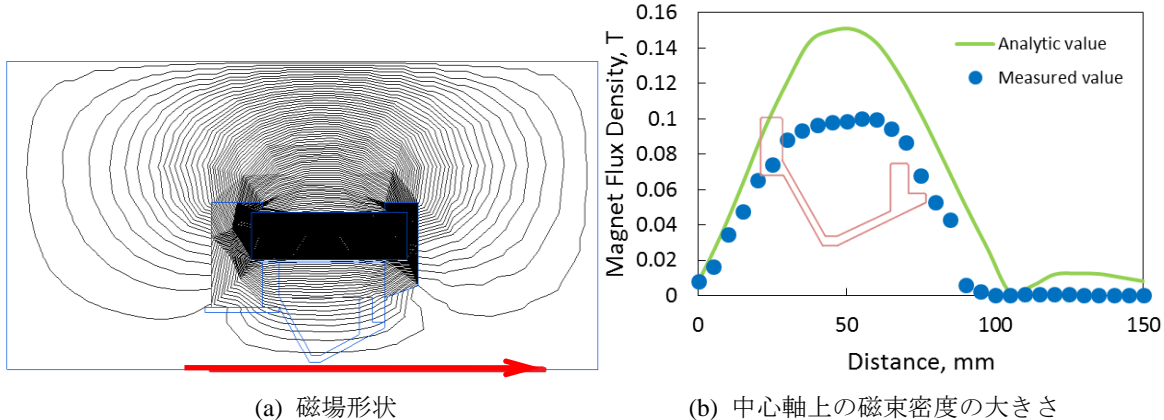


(b) 本体

Fig. 1 水冷式 MPD スラスタ

2.2 磁場形状

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。解析結果を Fig. 2 に示す。Fig. 2(a)の赤線は中心軸を示している。軸方向に対してほぼ平行に磁気回路が形成されていることがわかる。また、SS400 によって形成された磁気回路によってコンストラクタ付近で磁束密度は約 0.1T となり、最大となる。磁束密度の値が測定値と解析値で大きく異なるのは、ガウスメーターによる実測は長時間噴射を終えた後に実施したものであり、永久磁石の過熱によって永久磁石の消磁が進行していることと、永久磁石が取り付け時に損傷し傾いた状態で取り付けられ、最大限の磁場印加を行えていないことが考えられる。



(a) 磁場形状

(b) 中心軸上の磁束密度の大きさ

Fig. 2 解析結果

2.3 実験装置

本研究で用いた真空チャンバは直径 0.6 m、長さ 5.75 m の円筒形で材質はアルミニウムである。チャンバの中ほどはパイレックスガラスになっており、パイ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できるようになっている。真空チャンバ内の圧力はロータリーポンプ(大亜真空株式会社, KRP-3000, 排気速度 180 m³/h)、メカニカルブースタ(同, DMB-1500, 排気速度 1,630 m³/h)、油拡散ポンプ(昭和真空株式会社, SD-22 型, 排気速度 13,000 l/s)の 3 つの真空ポンプを併用して約 6.7×10⁻⁵ Pa 程度まで下げられる。推進剤、冷却水、電力は真空チャンバの側面のフランジを介してスラスタへと供給される。推進剤の流量は、マスフローコントローラを用いて調節している。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する。真空チャンバの写真を Fig. 3 に、実験装置の全体構成を Fig. 4 に示す。

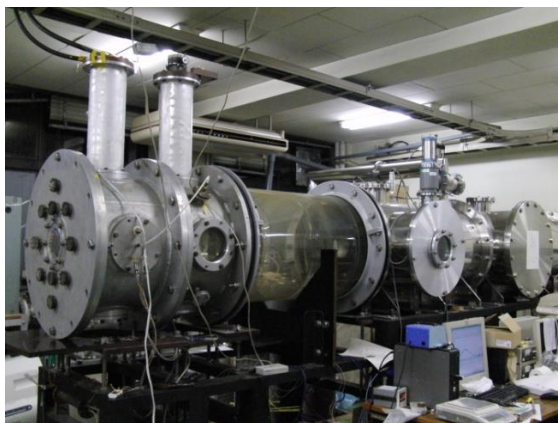


Fig. 3 真空チャンバ

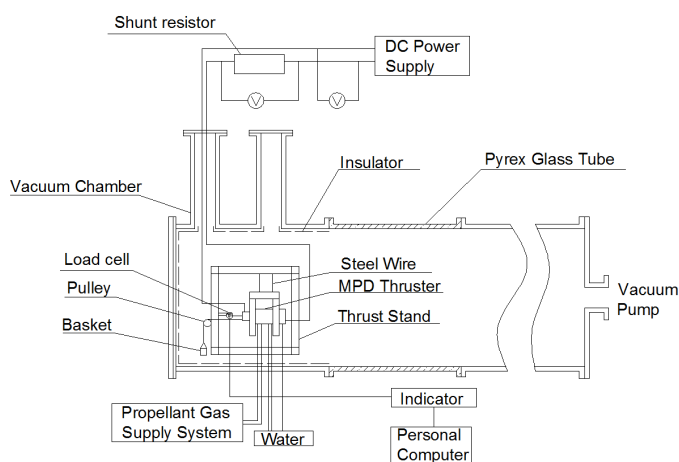


Fig. 4 実験設備の概略図

3. 実験条件

本研究では、窒素、アルゴン、水素、アンモニアを推進剤として噴射実験を行った。各推進剤における実験条件を Table 1 に示す。

Table 1 実験条件

	N ₂	Ar	H ₂	NH ₃
Mass Flow Rate, mg/s	150	83	1.5	150
	290	170		
Discharge Current, A	70~150			
Back Pressure, Pa	4			

4. 実験結果

窒素、アルゴン、水素において安定作動を確認したが、アンモニアでは放電が安定せず信頼性のあるデータがとれなかった。それぞれの推進剤における噴射の様子を Fig. 5 に示す。また、噴射実験の性能パラメータを Table 2 に示す。アンモニアにおける性能パラメータは省く。

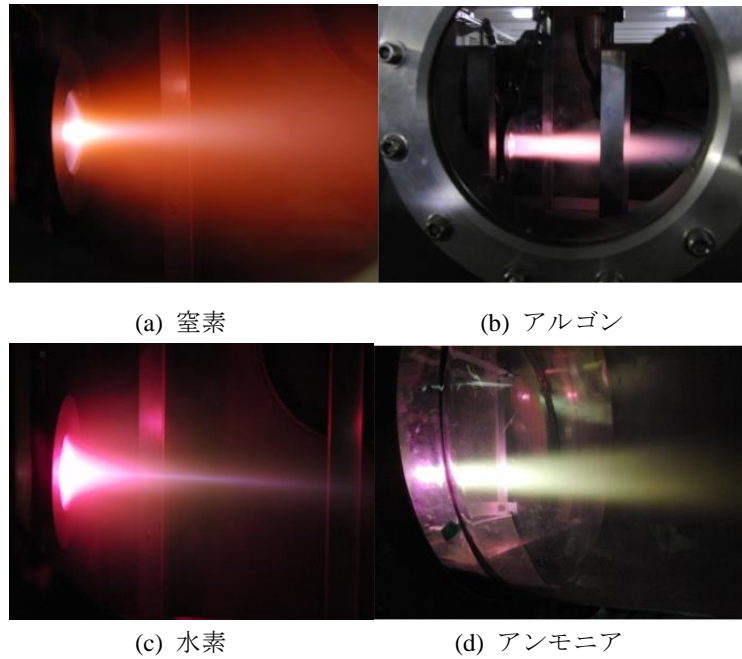
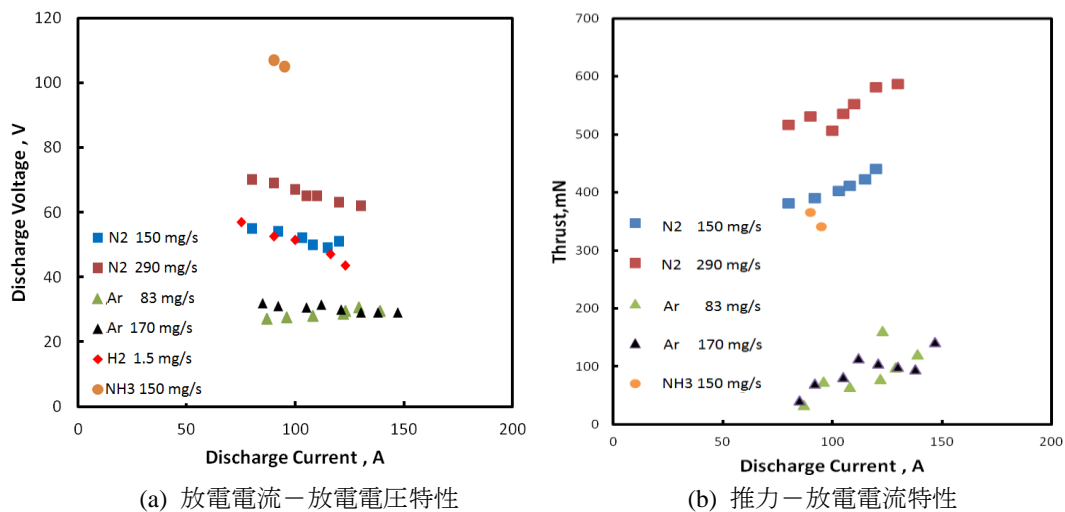


Fig. 5 噴射の様子

Table 2 実験結果

	N ₂	Ar	H ₂
Mass Flow Rate, mg/s	150	170	1.5
Input Power, kW	5.36	3.20	4.7
Thrust, mN	402.9	82.0	41.9
Specific Impulse, sec	281	56.3	2,870
Thrust Efficiency, %	10.4	0.71	12.5

放電電圧－放電電流と推力－放電電流の特性グラフを Fig. 6 に示す．放電電圧－放電電流特性からは電熱加速モードで見られる垂下特性が確認できる．しかし、噴射の写真からは電磁加速で見られるホール効果が観測できたため、加速モードは電熱加速モードと電磁加速モードのハイブリッド加速モードであることが推測される．また、投入電力が小さく、注入された推進剤すべてがプラズマとなり排出されていないことが考えられる．推力－放電電流特性からは放電電流が増加すると推力が増加することがわかる．これは、放電電流が大きくなることでプラズマ化した推進剤の割合が増えたからだと考えられる．



(a) 放電電流－放電電圧特性

(b) 推力－放電電流特性

Fig. 6 特性グラフ

噴射実験後の陰極の写真を Fig. 7 に示す．生成されたプラズマは磁場の影響を受けて推進機の軸中心に集中するためカソードの損耗は不可避である．写真からは激しい損耗が確認でき，実用化にはほど遠い．



Fig. 7 噴射後のカソードの様子

そこで，電流密度が高くなるスポットモードではなく，拡散モードで作動するホローカソードを提案する．拡散モードでは，適当な作動時においてカソードの温度がカソード材料の融解温度よりも十分低くなることが予想され，電極損耗の大幅な減少が期待できる．

5. 新型スラスタについて

既存の MPD スラスタよりも強い磁場を印加できること，中実カソードとホローカソードともに実験が行えること，磁石の増減が可能であることの3つのコンセプトをもとに新型 MPD スラスタを製作した^{4,5)}．

5.1 新型スラスタ

新型スラスタでは，電極間の距離と放電室の大きさが可変である．スラスタの概略図と本体の写真を Fig. 8 に示す．本体の写真は永久磁石を外した状態である．

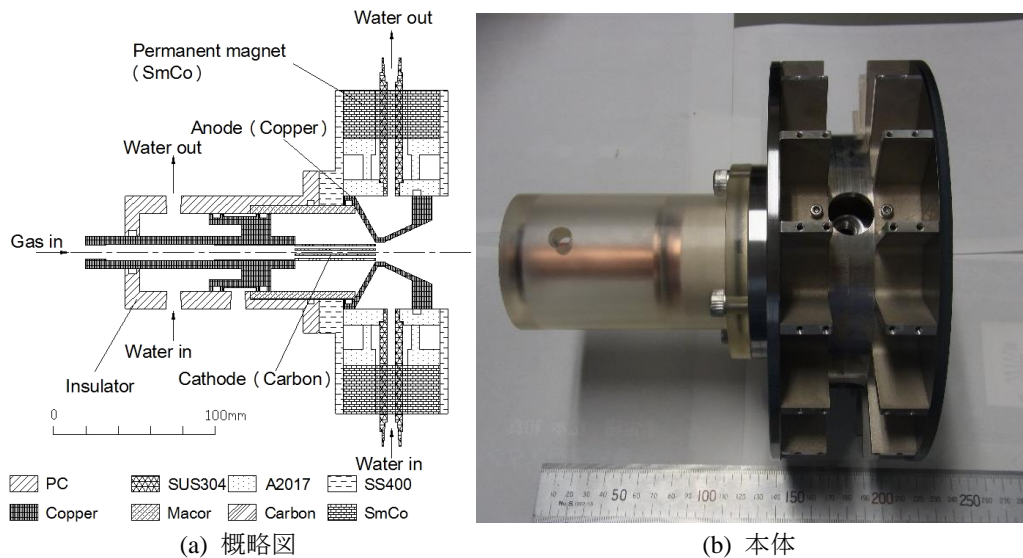


Fig. 8 新型 MPD スラスタ

5.2 ホローカソード

本実験で使用したホローカソードの断面図に Fig. 9 に示す．メインパイプの中にサブパイプを7本挿入したマルチホローカソードである．中実のカソードと違い，広範囲においてプラズマが生成されるので熱の集中を防ぐことができ，電極の損耗低減に効果があると見込まれる．

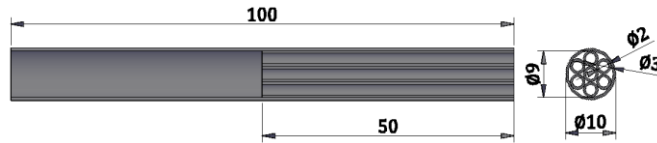


Fig. 9 マルチホローカソードの断面図

5.3 磁場形状

永久磁石にはキュリー温度が高く磁束密度の高いサマリウムコバルト磁石を用いた。今回は丸型磁石ではなくセグメント型磁石を採用した。セグメント型を採用したのは、丸型に比べ、円環領域における磁石占有面積が最大となり、強い磁場を印加できると考えたからである。

磁場解析ソフトによる解析結果を Fig. 10 に示す。これらの図より、コンストリクタ付近で磁束密度は最大となり、約 0.16T であることがわかる。これは、既存のスラストと比較して 1.6 倍の磁場印加となっている。

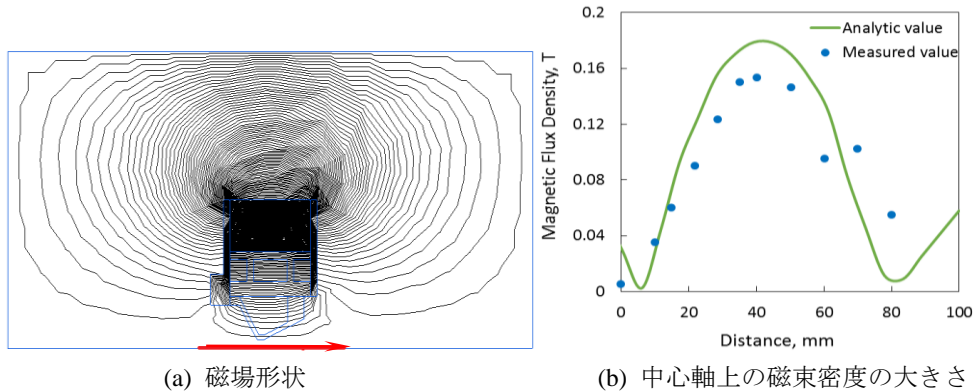


Fig. 10 解析結果

5.4 実験条件

純タングステン製の中実カソードと、炭素製のマルチホローカソードにおいて噴射実験を行った。実験条件を Table 3 に示す。マルチホローカソードの材料に炭素を用いたのは、マルチホローカソードはまだ実験段階であり、難削材である純タングステンでは高コストになることが見込まれるためである。推進剤として水素を用いた。

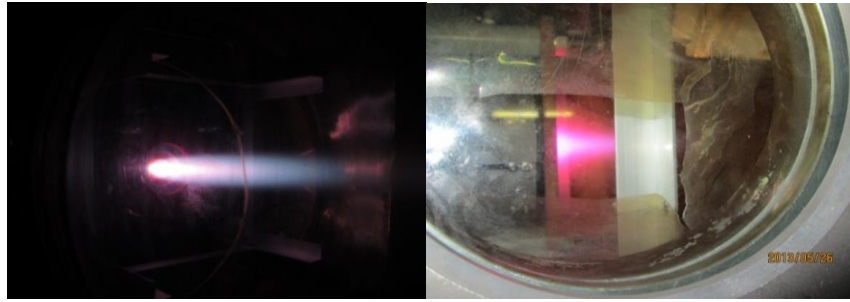
Table 3 実験条件

Number of Magnets	0	14	14
Maximum Magnetic Flux Density, T	0	0.155	0.155
Shape of the Cathode	Solid(Pure Tungsten)	Solid(Pure Tungsten)	Multi-Hollow(Carbon)
Propellant	H ₂		H ₂
Mass Flow Rate, mg/s	7.5		3.0
Discharge Current, A	90-140		90-140
Back Pressure, Pa	3.7 × 10 ⁻²		3.7 × 10 ⁻²

5.5 実験結果

5.5.1 中実カソードの噴射実験

カソードに純タングステン製の中実カソードを用い、永久磁石を搭載しないものと、14本搭載したもので噴射実験を行った。噴射の様子を Fig. 11 に示す。磁場を印加すると、電磁加速で見られるホール効果が観測されたため、確かに磁場印加が行われていることが確認できた。性能パラメータとして放電電流、放電電圧、推力を測定すべきであるが、スラストスタンドの不良によって推力が測れなかったため放電電流と放電電圧のみ測定を行った。放電電流-放電電圧特性のグラフを Fig. 12 に示す。磁場を印加することで垂下特性が見られなくなるため、推進モードが電熱加速モードから電磁加速モードに切り替わっていることが推測できる。



(a) 磁場の印加なし (b) 磁場の印加あり

Fig. 11 噴射の様子

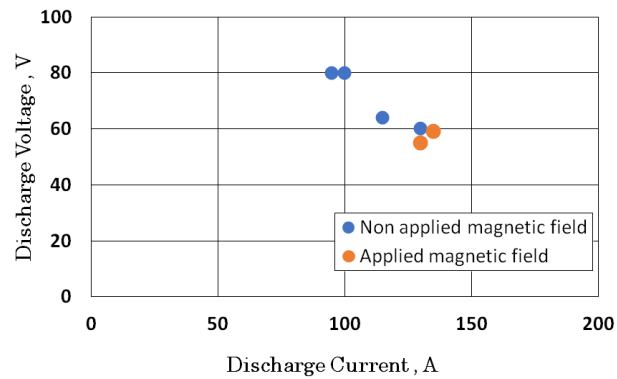


Fig. 12 放電電圧－放電電流特性

5.5.2 マルチホローカソードの噴射実験

マルチホローカソードを用いた噴射の様子を Fig. 13 に示す。噴射では、放電が安定して行われており、ビームは 1 m ほど伸びていた。わずかながらプリュームの収束も見られる。噴射性能パラメータは取得できていないため、今後の課題とする。



Fig. 13 マルチホローカソードによる噴射の様子

6. まとめ

既存の MPD スラスタの噴射実験で、窒素、水素において垂下特性が見られた。推進剤を水素として、推力が 41.9 mN、比推力が 2,870 s、推進効率が 12.5 % というデータが得られた。また、新型 MPD スラスタで基礎実験を行い、中実カソードにて電磁加速型スラスタによく見られる特性が得られた。さらに、マルチホローカソードを用いての安定作動を確認した。今後は、マルチホローカソードと中実カソードとの性能比較を行い、カソードの損耗の低減を目指す。また、輻射冷却式への導入として熱解析を行う。

参考文献

- 1) 佐宗章弘, Solem Anders Erik, 荒川義博「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), pp.528-534, 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), Okinawa Convention Center (Ginowan City, Okinawa, Japan), ISTS 2011-b-49, 2011 年 6 月.
- 3) 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タの研究」第 3 回大型 In-Space Propulsion (電気推進) ワークショップ, JAXA 筑波宇宙センター (茨城県つくば市), 2012 年 6 月.
- 4) 湖山典英, 井端公紀, 藤田雄也, 田原弘一「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 スラストの開発研究」第 53 回航空原動機・宇宙推進講演会, 倉敷市芸文館 (岡山県倉敷市), 2013 年 3 月.
- 5) Norihide Koyama, Hironori Ibata, Katsuya Fujita and Hirokazu Tahara 「Research and Development of Steady-State Magnetoplasmadynamic Arcjet Thrusters with Permanent Magnets and Multi Hollow Cathodes」29th International Symposium on Space Technology and Science (29th ISTS), Nagoya Congress Center (Nagoya City, Aichi, Japan), ISTS 2013-o-1-07, 2013 年 6 月.