

永久磁石搭載大電力定常作動型 MPD スラスタの電極及び磁場の最適化

Optimization of Electrode and Magnetic field with High-Power Steady-State MPD Thrusters using Permanent Magnets

○瀬川 秋桜子・斉藤 将太・谷 和真・知野 健吾・田原 弘一・高田 恭子(大阪工業大学)

○Akiko Segawa・Shota Saito・Kazuma Tani・Kengo Chino・Hirokazu Tahara・Kyoko Takada
(Osaka Institute of Technology)

Abstract (概要)

Magneto-Plasma-Dynamic (MPD) thrusters have been investigated at the Osaka Institute of Technology. Conventional MPD thruster system is complicated, because the thruster have water-cooled coils to apply magnetic field. The MPD thruster we developed has permanent magnets to make it easier. In order to obtain higher performances, the magnetic position and anode shapes were changed. Optimum magnetic position where swirl acceleration works effectively was investigated by changing the magnetic position. And it was changed in anode shape from a conventional convergent-divergent nozzle to a straight-divergent nozzle for improving thrust. As a result, higher performances were obtained for the magnetic position on the upstream side. Typical performance with magnetic position of +30mm, a thrust of 505.8mN, a specific impulse of 343.8s and a thrust efficiency of 6.13% were obtained.

1. 序 論

近年、宇宙開発の対象として火星や月が再び注目されており、有人火星探査や月面基地建設などが計画されている。これらの計画では宇宙空間を長距離航行する必要があるため、高推力・高比推力・高推進効率な電気推進機が必要となる。電気推進機の中でも電磁加速プラズマスラスタ (Magneto-Plasma-Dynamic Thruster, 以降 MPD スラスタと表記する。) は高推力、高比推力でありバランスが良く長距離ミッションに適していることから研究が進められている¹⁾。従来の MPD スラスタでは外部磁場を印加するために水冷コイルを用いている。水冷コイルを用いると、冷却水循環装置や、冷却水が宇宙空間で凍らないようにするためのヒーターなどが必要になり、スラスタシステムが複雑になる。そこで本学ではスラスタシステムの簡素化のため、水冷システムを必要としない永久磁石を用いて外部磁場を印加している。本研究では推進性能の向上を目指し、アノード形状や印加する磁場の位置を変更して実験を行った。アノード形状に関しては、従来のコンバージェント-ダイバージェント型アノード (以降、CD ノズルと表記する。) からストレート-ダイバージェント型アノード (以降、SD ノズルと表記する。) に変更した。これにより、推進剤の速度の壁面損失を軽減させ、推力の向上を目指した。印加する磁場位置の変更に関しては、推進剤の速度が落ち始め

た位置でスワール加速が効果的に作用する最適な磁場位置を探ることで推進性能の向上を目指した。本研究の最終目標は、推力 0.5~2N, 比推力 1,000~3,000s, 推進効率 40% 以上を達成することである。

2. 実験装置

2.1 発散磁場搭載 MPD スラスタ 本学で開発した発散磁場搭載 MPD スラスタの 3D モデルを図 1 に示す²⁾。発散磁場を印加するために永久磁石であるサマリウムコバルト磁石を用いている。磁石ホルダを用いることで磁石を独立して搭載できるようになっている。そのため、搭載する永久磁石の個数を変更し、印加する磁束密度を選択して実験を行うことができる。磁石ホルダには最大 16 個の永久磁石を搭載することができるが、本研究では水冷の関係上、最大 14 個搭載している。この永久磁石の形状を円柱型ではなくセグメント型にすることで、円環領域における磁石の占有領域を最大まで大きくしている。永久磁石の両端は透磁率の高い SS400 製のヨークに接しており、磁石による磁気回路を形成している。推進剤はカソードの後方から投入され、アノードとカソードホルダは温度上昇を防ぐため、実験段階では水冷されている。

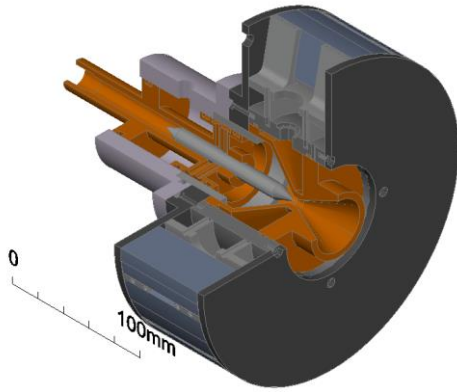


図1 発散磁場搭載MPDスラスタの3Dモデル

2.2 カスプ磁場搭載MPDスラスタ 本学で開発したカスプ磁場搭載MPDスラスタの3Dモデルを図2に示す。これは先行研究により、発散磁場搭載MPDスラスタを改良し開発されたスラスタである³⁾。磁気回路がスラスタ本体から独立しており、移動させることができる構造になっている。そのため、このスラスタを利用し、発散磁場の磁場位置移動実験を行った。このスラスタにはカスプ磁場を印加するために磁石ホルダが2列ある。本研究ではカスプ磁場ではなく発散磁場を印加するため、磁石ホルダの1列のみに磁石を搭載している。また、発散磁場搭載MPDスラスタと同様に、実験段階では水冷されている。

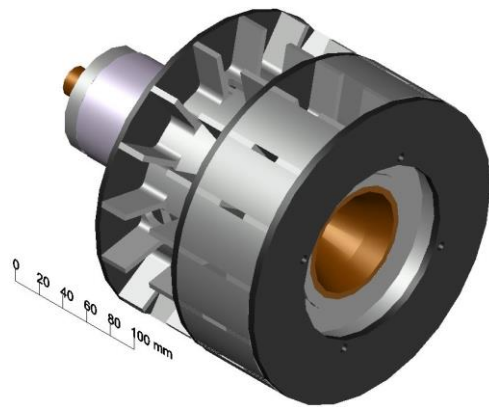


図2 カスプ磁場搭載MPDスラスタの3Dモデル

2.3 電極形状 本研究では発散磁場搭載MPDスラスタ用CDノズルとSDノズルの2種類とカスプ磁場搭載MPDスラスタ用アノードの1種類、合計3種類の形状の異なるアノードを用いた。CDノズルの概略図を図3に、SDノズルの概略図を図4に、カスプ磁場搭載MPDスラスタ用アノードの概略図を図5に示す。カソードはすべてのアノードにおいてロッドカソードを用いた。ロッドカソードを図6に示す。形状は、直径10mm、先端角45deg.であり、材質は純タングステンである。

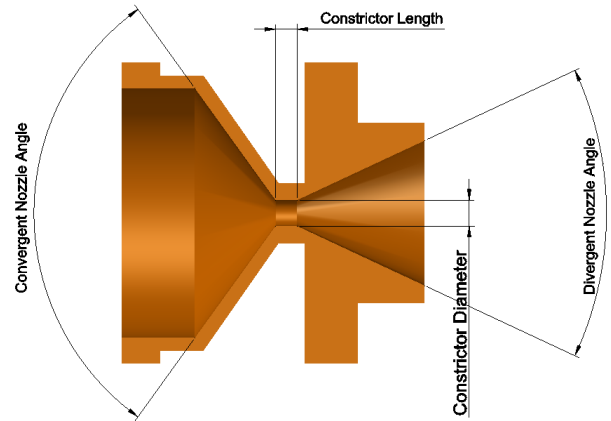


図3 CDノズルの概略図

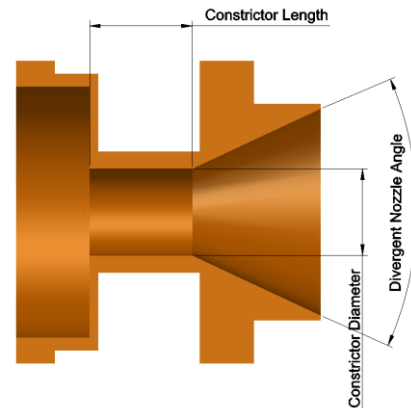


図4 SDノズルの概略図

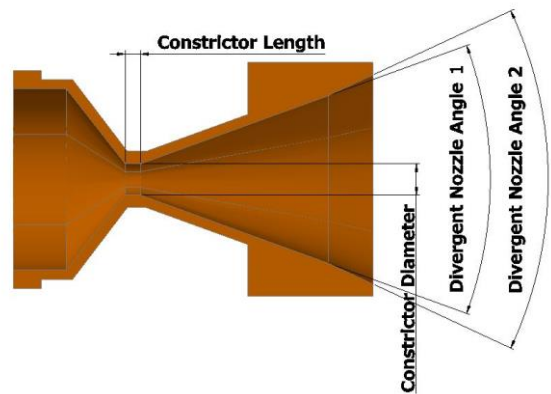


図5 カスプ磁場搭載MPDスラスタ用アノードの概略図



図6 ロッドカソード

2.4 磁場形状 磁場解析ソフトウェア TriComp (Field Precision LLC) を用いてスラスタに印加される磁場形状を解析した。解析によって得られた磁石周辺のスラスタの磁場形状を図7に示す。図7より、コンストリクタ付近では磁力線が中心軸に対して平行になっていることが確認できる。また、下流側では磁場が未広がりになっており、磁気ノズルが形成されている。スラスタ中心軸上の磁場はコンストリクタ付近で最大となり、最大磁束密度は磁石14個で0.157T、磁石8個で0.093Tとなった。

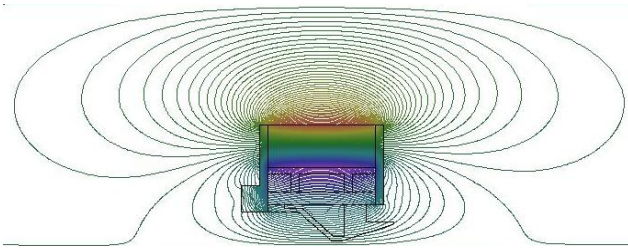


図7 発散磁場搭載MPDスラスタの磁場形状

2.5 実験装置 本実験で用いた実験装置の概略図を図8に示す。実験装置は真空排気システム、電力供給システム、推力測定較正システム、推進剤供給システムから構成されている。真空チャンバは直径1.2m、長さ2.0mの円筒形で、材質はステンレススチールである。真空チャンバ内の圧力はピラニ真空計を用いて測定している。ロータリーポンプとメカニカルブースターを併用することで真空チャンバ内の排気を行っている。この2つのポンプを併用したときの真空チャンバ内の圧力は4Pa程度である。

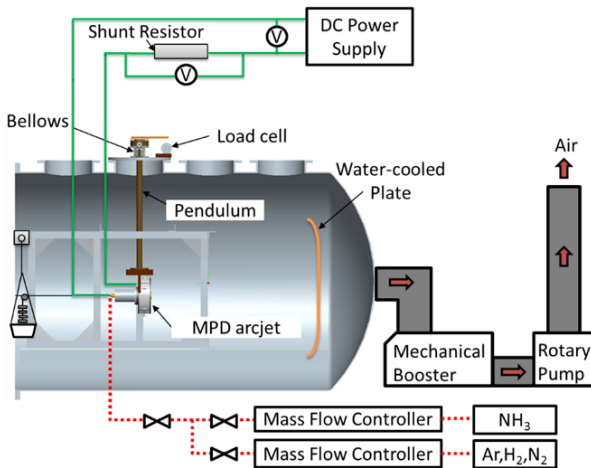


図8 実験装置の概略図

3. 実験

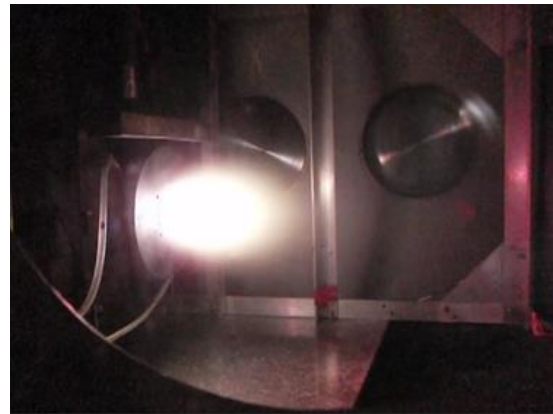
3.1 コンストリクタ径が推進性能に及ぼす影響

3.1.1 実験条件 実験条件を表1に示す。コンストリクタ径が推進性能に及ぼす影響を知るため、CDノズルのコンストリクタ径が2mmと10mmのアノードを用いて実験を行い推進性能を取得した⁴⁾。推進剤はNH₃を用いた。

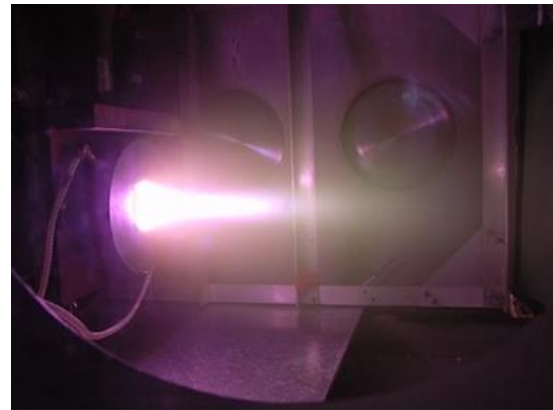
表1 実験条件

推進剤	NH ₃
コンストリクタ径[mm]	2, 10
推進剤流量[mg/s]	5, 60, 150
磁束密度[T]	0.157
放電電流[A]	70~150

3.1.2 実験結果 推進剤流量5mg/sのときの噴射の様子を図9に示す。図9より、コンストリクタ径2mmの場合はプルームが丸みを帯びており電熱加速が、コンストリクタ径10mmの場合は電磁加速が顕著に現れていると考えられる。また、その他の条件では電熱加速が優位となっていると考えられる。



(a) コンストリクタ径2mm



(b) コンストリクタ径10mm

図9 噴射の様子

推力-放電電流特性を図10に、放電電圧-放電電流特性を図11に、推進効率-比推力特性を図12に示す。図10より、推力は放電電流の増加に伴い増加していることが確認できる。小流量の場合はコンストリクタ径10mmの方が、中流量・大流量の場合はコンストリクタ径2mmの方が推力が大きくなった。小流量の場合は放電室内圧力が低くなり電磁加速が、中流量・大流量の場合は放電室内圧力が高くなり電熱加速が優位となっていると考えられる。図11より、放電電圧は放電電流の増加に伴い減少していることが確認

できる。すべての条件でコンストリクタ径 2mm の方が 10mm より放電電圧が低くなった。コンストリクタ径 2mm の方が放電室内圧力が高く、高温になり電離しやすくなったためだと考えられる。図 12 より、小流量かつアノードのコンストリクタ径が 10mm の場合、比推力 1,000s を超えており、この条件では比推力に関する最終目標を達成していることが確認できる。また、その他の条件ではコンストリクタ径 2mm の方が 10mm より推進効率、比推力ともに高いことが確認できる。また、NH₃ の推進剤流量 60mg/s、投入電力 6.75kW の条件で、推力 477.4mN、比推力 811.4s、推進効率 19.0% を達成した。

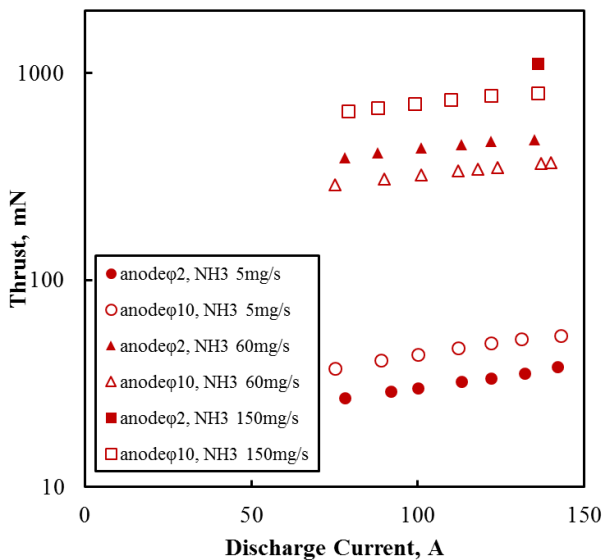


図 10 推力-放電電流特性

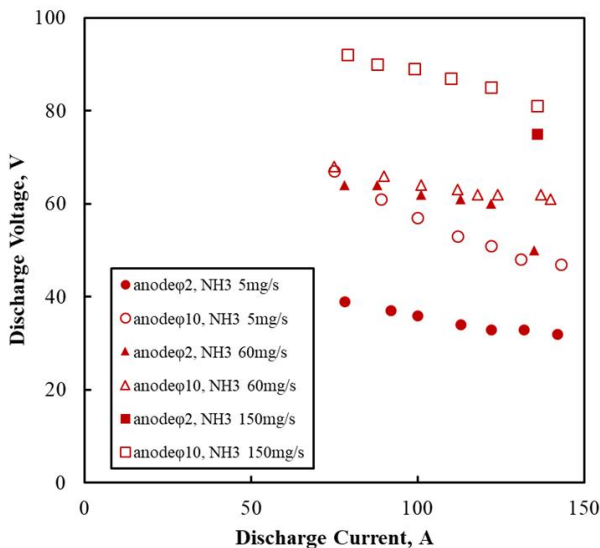


図 11 放電電圧-放電電流特性

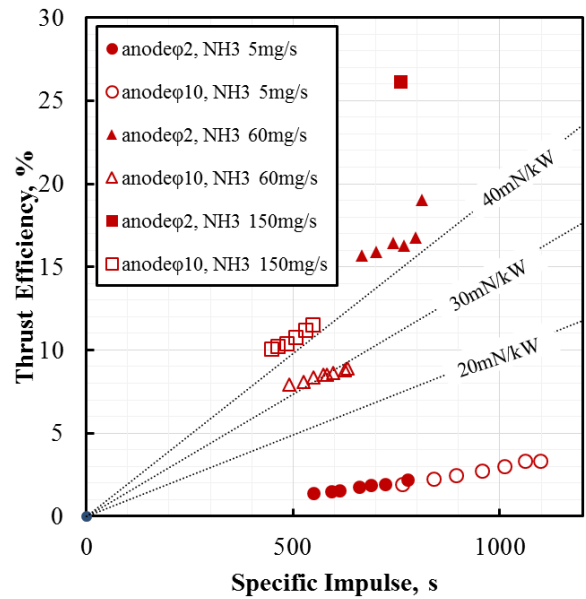


図 12 推進効率-比推力特性

3.2 アノード形状が推進性能に及ぼす影響

3.2.1 実験条件 実験条件を表 2 に示す。先行研究の結果より、従来の CD ノズルでは推進剤の速度がコンバージェント部分に達する以前に音速を超えていると考えられる⁵⁾。その場合、音速以上に加速された推進剤がコンバージェント部分を通り抜けることで、減速させてから再び加速させることになり損失が生じてしまう。この推進剤の速度の壁面損失を軽減させるため、SD ノズルを用いて実験を行い推進性能を取得した。コンストリクタ径が 12mm, 15mm, 20mm のアノードを用いて性能を比較した。

表 2 実験条件

推進剤	NH ₃
コンストリクタ径[mm]	12, 15, 20
推進剤流量[mg/s]	10, 60, 150
磁束密度[T]	0.157
放電電流[A]	70~150

3.2.2 実験結果 推進剤流量 10mg/s、SD ノズルのコンストリクタ径 12mm と 15mm の場合は作動しなかった。コンストリクタ径 20mm と大流量の場合には作動していたことから、作動しなかった原因は、放電室内圧力ではなくアノード形状や推進剤流量などの条件の組み合わせが良くなかったためであると考えられる。コンストリクタ径 15mm のときの噴射の様子を図 13 に示す。図 13 (a), (b) より、CD ノズルと SD ノズルで比較すると、プリュームに大きな差はみられなかった。一方、図 13 (b), (c) より、SD ノズルのみで比較すると、推進剤流量が多くなるにつれてプリュームが、丸みを帯びているものから細くなっていく様子がみられた。



(a) CD ノズル, 推進剤流量 60mg/s



(b) SD ノズル, 推進剤流量 60mg/s



(c) SD ノズル, 推進剤流量 150mg/s

図 13 噴射の様子

推進剤流量が 150mg/s のときの推力-放電電流特性を図 14 に、放電電圧-放電電流特性を図 15 に、推進効率-比推力特性を図 16 に、一例としてコンストリクタ径 15mm のときの生ガス推力を表 3 に示す。図 14 より、CD ノズルよりも SD ノズルを用いた場合、推力が大きくなっていることが確認できる。また、推進剤を流しただけの推力である生ガス推力を比較することにより、推進剤の速度を比較することができる。表 3 より、SD ノズルを用いた方が生ガス推力が大きくなっており、推進剤の速度が速くなっていることが確認できる。これらより、SD ノズルを用いることによって推進剤の速度の壁面損失を軽減することができ、推力の向上に繋がったと考えられる。また、アノードのコンストリクタ径が小さくなるにつれて推力が大きくなっている。図 15 より、SD ノズルよりも CD ノズルを用いた方が放電電圧が低くなっていることが確認できる。CD ノズルの方が放電室内圧力が高く、高温になり電離が促進されたためであると考えられる。図 16 より、SD ノズルのコンストリクタ径 12mm と 15mm において大きな差はみられな

かった。一方、コンストリクタ径 20mm と比較すると、推進効率が向上しており、コンストリクタ径を小さくしたことによる向上がみられる。これらより、放電室内圧力を高めることは推進性能の向上に影響を与えると考えられる。3.1 の実験において、CD ノズルのコンストリクタ径を小さくすることで推進性能の向上がみられた。今後は、CD ノズルのコンパージメント部分の角度を変更し放電室自体を小さくする、また、SD ノズルのコンストリクタ径を小さくすることで放電室内圧力を高め、推進性能の向上を目指す。

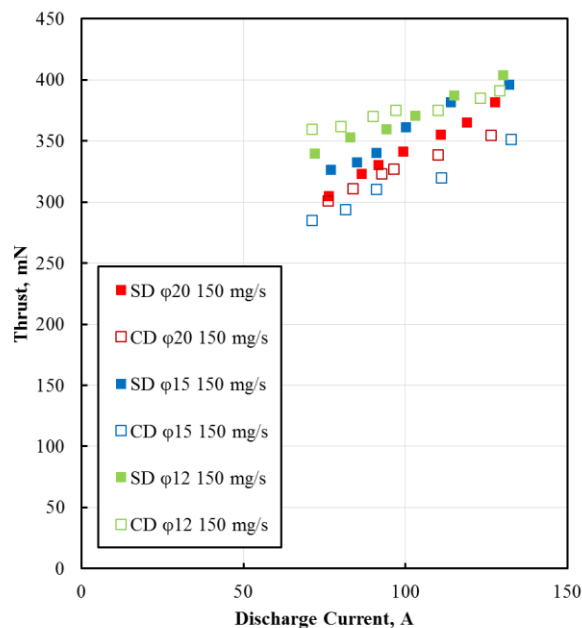


図 14 推力-放電電流特性

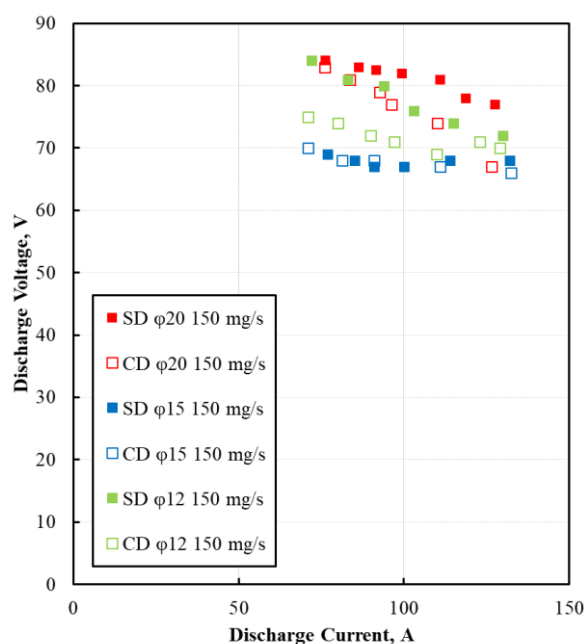


図 15 放電電圧-放電電流特性

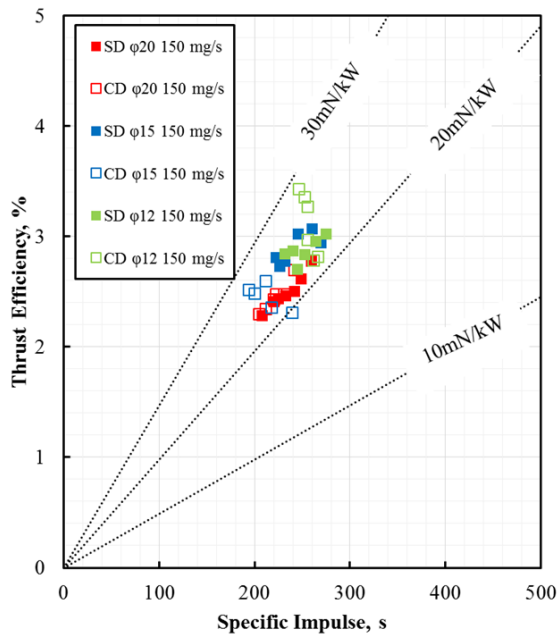


図 16 推進効率-比推力特性

表 3 生ガス推力

CD ノズル	105.624mN
SD ノズル	114.838mN

3.3 磁場位置が推進性能に及ぼす影響 1

3.3.1 実験条件 実験条件を表 4 に示す。推進剤の速度が落ち始めた位置で磁場によるスワール加速が効果的に作用する最適な磁場位置を探るため、磁石の位置を変更して実験を行い推進性能を比較した。磁石は下流側の磁石ホルダに搭載した。磁場位置は、発散磁場搭載 MPD スラスタの磁場位置を基準の 0mm とし、上流側を負、下流側を正とした。磁場位置+30mm~+70mm は構造上、磁気回路を移動させることができる限界値である。

表 4 実験条件

推進剤	NH ₃
推進剤流量[mg/s]	150
磁石数[個] / 磁束密度[T]	14 / 0.157
磁場位置 (MD) [mm]	+30~+70(5mm 間隔)
放電電流[A]	70~150

3.3.2 実験結果 各磁場位置でプリュームに大きな差はみられなかった。しかし、磁場位置+40mm~+50mm ではプリュームがヨーク側に返ってきている様子がみられた。一例として、この磁場位置+40mm のときの噴射の様子を図 17 に示す。これらの磁場位置では、アノードのノズル出口付近の磁場形状がヨーク側に返っており、それに沿ってプリューム返りが生じたと考えられる。



図 17 噴射の様子

推力-放電電流特性を図 18 に、放電電流 130A 付近の各磁場位置における推力を図 19 に、推進効率-比推力特性を図 20 に示す。図 18 より、磁場位置+30mm で推力が最大となっており、+70mm では推力が低くなっていることが確認できる。図 19 より、推力は波形状に分布しており、中でも上流側の方が推力が大きくなっていることが確認できる。また、プリューム返りがみられた磁場位置+40mm~+50mm では推力が低下していることが確認できる。図 20 より、推進効率が高くなるにつれて比推力も高くなる傾向がみられ、磁場位置+30mm で推進効率、比推力ともに最大となっている。これらより、最適な磁場位置は+30mm、またはそれより上流側に存在すると考えられる。また、磁石 14 個、NH₃ の推進剤流量 150mg/s、投入電力 8.84kW、磁場位置+30mm の条件で、本実験での最大性能である推力 505.8mN、比推力 343.8s、推進効率 6.13% を達成した。

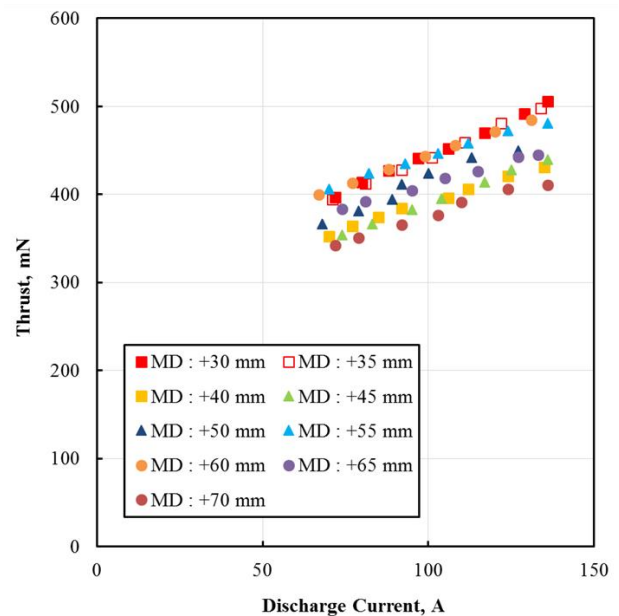


図 18 推力-放電電流特性

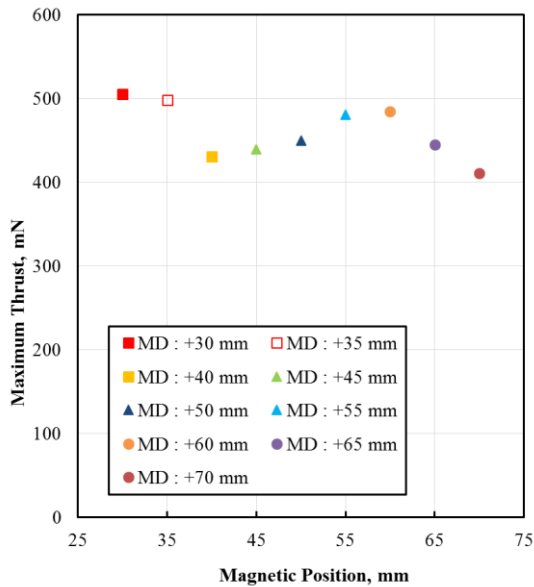


図 19 各磁場位置における推力

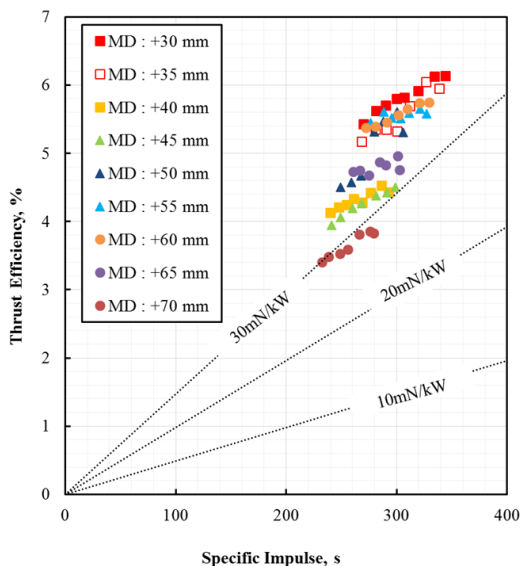


図 20 推進効率-比推力特性

3.4 磁場位置が推進性能に及ぼす影響 2

3.4.1 実験条件 実験条件を表 5 に示す。3.3 の実験より、最適な磁場位置が上流側に存在する可能性があることがわかった。そのため、上流側の磁場位置で実験を行い推進性能を比較した。しかし、スラスタの構造上、上流側では磁石を 14 個搭載すると実験を行うことができないため、磁石を 8 個搭載して実験を行い傾向を得た。磁場位置 -5mm, +5mm の場合、磁石は上流側の磁石ホルダに搭載した。

表 5 実験条件

推進剤	NH ₃
推進剤流量[mg/s]	150
磁石数[個] / 磁束密度[T]	8 / 0.093
磁場位置 (MD) [mm]	-5, +5, +30
放電電流[A]	70~150

3.4.2 実験結果 推力-放電電流特性を図 21 に、推進効率-比推力特性を図 22 に示す。図 21 より、磁場位置+5mm で推力が最大となっており、+30mm では推力が低くなっていることが確認できる。磁場位置+30mm よりも+5mm や -5mm の方が推力が大きくなったという磁石 8 個の傾向から、14 個の場合でも+30mm より上流側に最適な磁場位置が存在すると思われる。しかし、磁束密度が異なる条件での実験をもとにした推測でしかないので、さらなる検証が必要である。図 22 より、推力と同じ傾向がみられ、磁場位置+5mm で推進効率が高いことが確認できる。また、3.3 の実験と同様に、推進効率が高くなるにつれて比推力も高くなる傾向がみられる。

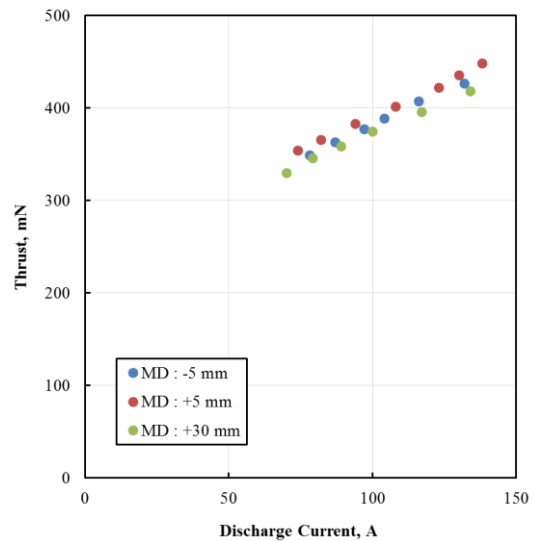


図 21 推力-放電電流特性

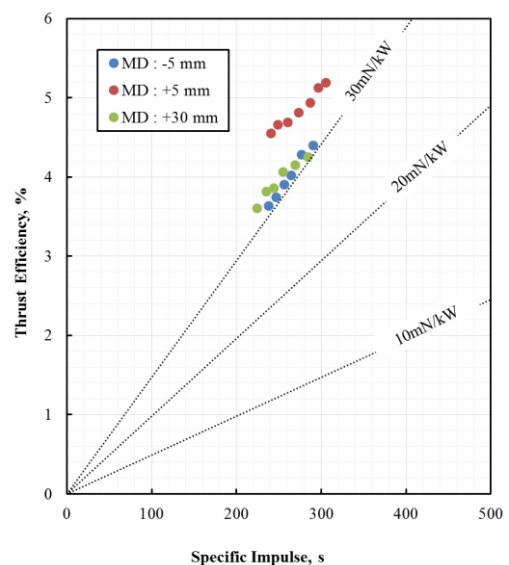


図 22 推進効率-比推力特性

3.5 磁場位置が推進性能に及ぼす影響 3

3.5.1 実験条件 実験条件を表 6 に示す。磁石が 8 個と 14 個の場合で実験を行い、磁束密度による推進性能の比較を行った。磁石は下流側の磁石ホルダに搭載した。

表 6 実験条件

推進剤	NH ₃
推進剤流量[mg/s]	150
磁石数[個] / 磁束密度[T]	8 / 0.093
	14 / 0.157
磁場位置 (MD) [mm]	+30
放電電流[A]	70~150

3.5.2 実験結果 推力-放電電流特性を図 23 に、推進効率-比推力特性を図 24 に示す。図 23 より、磁石 14 個の方が 8 個よりも推力が大きくなっていることが確認できる。磁石 14 個の方が磁束密度が大きく、スワール加速が効果的に作用したと考えられる。図 24 より、推力と同じ傾向がみられ、磁石 14 個の方が推進効率、比推力ともに高いことが確認できる。

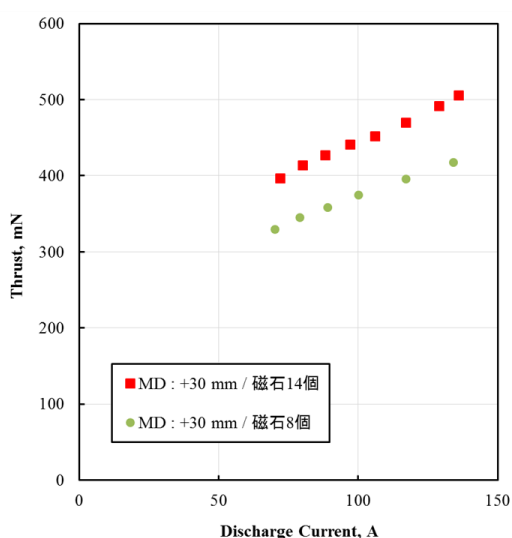


図 23 推力-放電電流特性

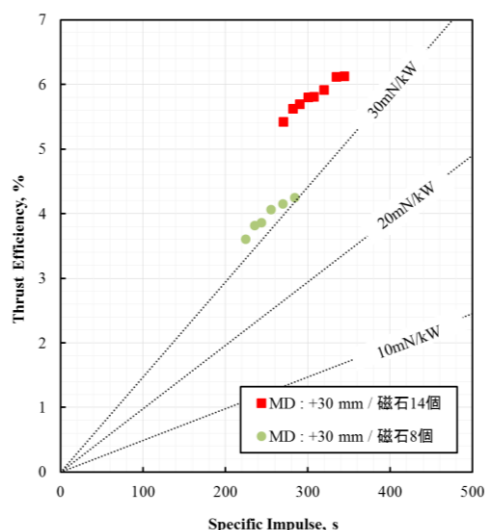


図 24 推進効率-比推力特性

4. 結論

以下に結論を述べる。

- (1) 推進剤流量が小流量かつアノードのコンストリク

タ径が大きい場合と、推進剤流量が大流量かつアノードのコンストリクタ径が小さい場合に、推力が大きくなった。また、最大性能として、NH₃の推進剤流量 60mg/s、投入電力 6.75kW の条件で、推力 477.4mN、比推力 811.4s、推進効率 19.0%を達成した。

- (2) SDノズルを用いることで、CDノズルのコンバージェント部分による推進剤の速度の壁面損失を軽減することができ、推力と比推力が向上した。また、アノードのコンストリクタ径が小さくなるにつれて推力が大きくなった。
- (3) 磁石 14 個、推進剤流量 150mg/s、投入電力 8.84kW、磁場位置+30mm の条件で、磁場位置移動実験としての最大性能である推力 505.8mN、比推力 343.8s、推進効率 6.13%を達成した。
- (4) 磁石 8 個搭載し上流側の磁場位置で実験を行った結果、スワール加速が効果的に作用する最適な磁場位置は上流側に存在すると考えられる。
- (5) 磁束密度が異なる条件で推進性能の比較を行った結果、磁束密度が大きい方がスワール加速が効果的に作用し推進性能が良い結果となったと考えられる。

5. 今後の展望

以下に今後の展望を述べる。

- (1) CD ノズルのコンバージェント部分の角度を変更し放電室自体を小さくする、また、SD ノズルのコンストリクタ径を小さくすることで放電室内圧力を高め、推進性能の向上を目指す。
- (2) 磁石 8 個、磁場位置+30mm~+70mm で実験を行い、14 個の場合と同じ条件で推進性能を比較することで傾向をより明らかにする。

参考文献

- 1) 栗木恭一, 荒川義博 (編) 「電気推進ロケット入門」, 東京大学出版会, 2003.
- 2) Kengo, C., Kohei, K., Tomoya, S., Yoshikazu, S., Hirokazu, T., and Kyoko, T. 「Research and Development of High-Power Steady-State Magneto-Plasma-Dynamic Thrusters with Permanent Magnets for Manned Mars Exploration」, 8th Asian Joint Conference on Propulsion and Power (AJCPP 2016), AJCPP2016-112, Kagawa, Japan, 2016.
- 3) 知野健吾, 杉山義和, 齊藤将太, 田原弘一, 高田恭子 「永久磁石によるカスプ磁場をもつ定常作動型 MPD スラスタの性能特性」, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 4I01, 2016.
- 4) 齊藤将太, 知野健吾, 杉山義和, 田原弘一, 高田恭子 「永久磁石搭載定常作動型 MPD スラスタの研究開発と性能取得」, 第 57 回航空原動機・宇宙推進講演会, 2A13, 2017.
- 5) 齊藤将太, 高田恭子, 知野健吾, 杉山義和, 田原弘一 「永久磁石によるカスプ磁場搭載定常作動型電磁加速プラズマ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-2016-049, 2017.