

## 静電加速スラスタの性能評価（Ⅱ）

### Performance Evaluation of Electrostatic thruster (II)

○水谷 佳祐・市原 大輔・岩川 輝・佐宗 章弘（名古屋大）  
山崎 拓也・笹原 松隆・岩崎 知二・安井 正明（三菱重工業）

○Keisuke Mizutani・Daisuke Ichihara・Akira Iwakawa・Akihiro Sasoh（Nagoya University）  
Takuya Yamazaki・Matsutaka Sasahara・Tomoji Iwasaki・Masaaki Yasui

#### Abstract（概要）

A new electrostatic thruster is developed which utilizes radial electric field with solenoid coil, ring-shaped anode and hollow cathode. Its feature is that cathode is located on center axis of divergence magnetic field with the aim of making axial and inward directional electric field. The prototype of that new concept thruster was tested and thrust measurements were made at different discharge voltage, magnetic field, mass flow rate and propellant species. The results shows that discharge current and thrust vary intricately to discharge voltage and mass flow rate with Ar, and monotonically increase to them with Xe.

#### 記号の説明

$B$	磁場強度
$F$	推力
$J_d$	放電電流
$l$	カソード位置
$\dot{m}_a$	推進剤流量
$V_d$	放電電圧

#### 1. はじめに

将来の宇宙ミッションとして深宇宙探査や軌道上大型建造物構築が計画<sup>1)</sup>されており、そのために電気推進の適用が検討されている。静電加速方式の一種であるホールスラスタ<sup>2)</sup>は、加速チャンネル内に印加した磁場により周方向へ運動させられた電子（ホール電流）を用いて中性粒子を電離させると同時に磁力線を横切る方向へポテンシャル差を生み、イオンを加速することで推力を得ている。ホールスラスタは電子が周方向へ閉じたパスを運動しアノードへの流入が妨げられるため、高い効率（推力効率 50%以上）が実現<sup>3)</sup>されており、現在大推力化のための研究が行われている<sup>4)</sup>。

名古屋大学では独自の静電加速方式を開発し研究を行っており、その一つに Helicon Electro Static Thruster（HEST）<sup>5,6)</sup>がある。HEST はリング状のアノードの上流内側から流出したヘリコンプラズマを、アノードとカスプ磁場でトラップされた電子の間でできるポテンシャル差で加速、排気する推進機で、ブルーム内のイオンエネルギーの計測の結果、加速電位相当のエネルギーを持つイオンの存在が確認

されている<sup>5)</sup>。また、HEST からヘリコンプラズマ源をなくし、アノードとカスプ磁場内に配置されたホローカソードによって、直流放電と加速を同時に行う静電加速スラスタも試作し、その性能評価を行っている<sup>7)</sup>。HEST 及び試作した静電加速スラスタは、下流のカスプ磁場内にホローカソードを配置しており、磁力線の発散角が大きく、発散角損失が避けられない。これらのスラスタでは、カスプ磁場内に放出される電子が、磁気回路によって中心軸上にカソード電位の等電位面を形成すると考えられる。アノードと中心軸上のカソード電位間のポテンシャル差を利用して加速し、発散角損失を抑制する構成として、発散磁場を有し中心軸上にカソードを配置した静電加速スラスタを試作した。また、試作したスラスタは、推進剤の投入方法としてアノード内面から放電室へ投入する方法を採用した。アノード内面とその内側の絶縁材の間にある隙間から放電室へ推進剤を投入することで、アノード付近での中性粒子密度の増加およびイオン生成を狙う構成とした。同様の構成を有する推進機として、エンドホールスラスタ（EHT）<sup>8)</sup>やシリンドリカルホールスラスタ（CHT）<sup>9,10)</sup>があるが、本スラスタはこれらのスラスタとは、カソード位置、磁場形状が異なっている。

本稿では、この加速方式を採用したスラスタを試作し、その作動を行ったため、その結果について報告する。

#### 2. スラスタ詳細

製作したスラスタの断面図を図1に示す。スラスタは中心軸上のホローカソードとそれを覆う絶縁材、リング状のアノード、およびソレノイドコイルとその内面を保護する絶

縁壁によって構成されている。カソードは市販のカソードチップ (Kaufman & Robinson Inc. LHC-03AE1-01) と自作のタンタル製キーパー電極からなり、キーパーは外径 14 mm、内径 10 mm でオリフィス径は 3 mm である。ホローカソードはアルミナ製の絶縁材で覆われており、さらにその外側に銅製のアノードがあり、その間に推進剤拡散のための空洞領域がある。推進剤はアノードの上流部の穴を通して投入され、円筒形状の空洞領域で拡散させた後、アノードと絶縁材の間の軸方向 1.5 mm の隙間を通して放電室へ投入される。ホローカソードを通して投入する推進剤とアノード近傍から投入する推進剤はそれぞれ別のマスフローコントローラで制御しており、流量はそれぞれ独立して制御できる。アノード内径は 50 mm である。磁場は SUS316 製のケースの軸方向 100 mm の領域に外径 2 mm の被覆銅線を 2700 回巻いたソレノイドコイルにより印加され、電流 4.2 A 流した時コイル中心の軸上に 100 mT の磁場が印加される。コイルの内径は  $\Phi 100$  mm でその内側は内径  $\Phi 90$  mm のホトベール製の絶縁円筒で保護されている。カソードとその周りの絶縁材およびアノードは軸方向に移動させることが可能であり、コイル中心からカソード先端までの距離を  $l$  とし、 $l$  は 0 ~ 50 mm の範囲で可変となっている。図 1 は  $l = 25$  mm での状態を表し、図 2 に  $l = 0$  mm, 50 mm の放電部位置とその時の磁力線を表す。カソード位置を変えることで放電部がコイル内を移動し、電極間の磁力線の形状

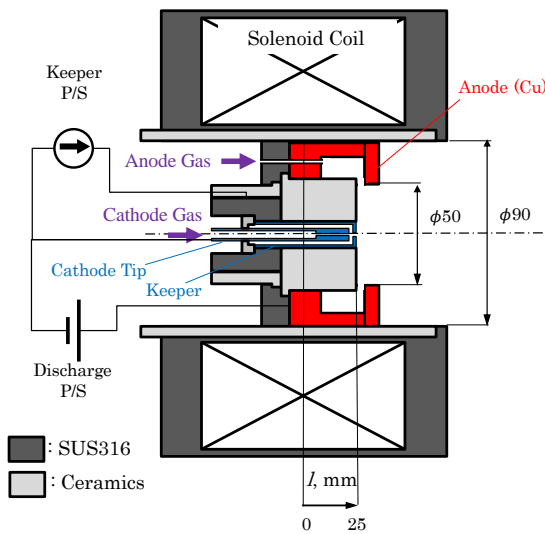


図 1. スラスタ詳細

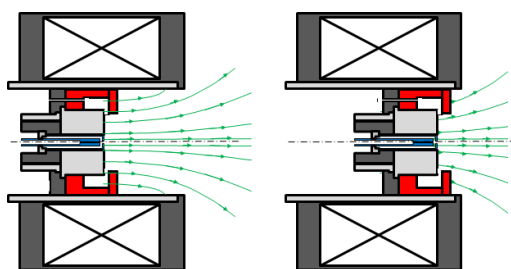


図 2 磁力線形状

左  $l = 0$  mm, 右  $l = 50$  mm

が変化する。 $l = 0$  mm ではカソードがソレノイドコイルの中心に位置し、電極間つまりリング状アノード内側の磁力線はほぼ軸方向を向いている。 $l$  を大きくすると両電極は下流に移動し、電極間の磁力線は径方向成分が大きくなっていく。

### 3. 実験装置

**3.1 真空装置** 実験はすべて図 3 に示す長さ 4m 径 2m の真空チャンバー内で行った。真空チャンバーは油回転ポンプで粗引きした後、排気速度 3200 L/s ( $N_2$  換算) のターボ分子ポンプで減圧される。実験中は 1.5 Aeq のアルゴンを流した際、背圧は  $4.5 \times 10^{-2}$  Pa 以下に保たれている。電力のフィードスルーはチャンバー側面のフランジに取り付けられ、推進剤およびコイルの冷却水のフィードスルーは後述のスラストスタンドに取り付けられている。

**3.2 スラストスタンド** 推力は振り子式スラストスタンドを用いて計測した。スラストスタンドの自重は真空ベローズが支持しており、自重によりベアリングに掛かる荷重を低減し摩擦による影響を最小にしている<sup>11)</sup>。変位はスタンド旋回点から水平に伸びたアームの先端に設置された差動変圧器によって計測し推力に変換している。スラストスタンドの較正は各試験の前に行い、滑車とモータを使って既知の重量の錘をスラストスタンドに印加し、加えた力とその時の変位量からそれらの関係を求める。推進剤およびコイルの冷却水はスラストスタンドのアームの内側を通してスラスタに供給されている。スラスタ作動中には、コイル電流および放電電流の干渉による tare force は除去できないため、事前に tare force の値を計測し、スラスタ作動時に測定した値から tare force の値を差し引いて推力を算出している。

### 4. 実験結果

**4.1 実験条件** 本稿で報告する実験条件を表 1 に示す。推進剤にはアルゴンおよびキセノンを使用し、ホローカソードを通して投入する推進材流量は 0.36 Aeq に固定している。また、磁場強度はカソード先端位置での値を代表値とし、カソード位置  $l$  を変えた際、カソード先端での磁場強度を揃えて比較する。そのため、 $l = 0$  mm では、 $B = 100$  mT

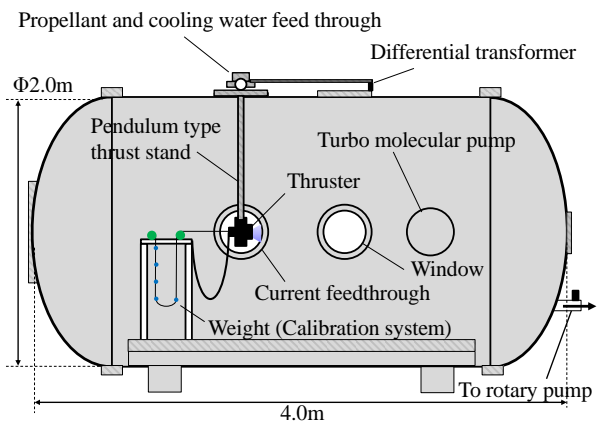


図 3. 真空装置, 推力計測装置詳細

の時のコイル電流が 4.2 A であるのに対して、 $l = 25$  mm, 50 mm ではそれぞれ 4.5 A, 5.7 A である。表 1 の条件に対して、放電電流  $J_d$  および推力  $F$  を計測し、その特性を調べた。

表 1 実験条件

Control Parameter	Symbol	Value
Discharge Voltage [V]	$V_d$	50 - 300
Magnetic Field [mT]	$B$	50, 100, 150
Cathode Position [mm]	$l$	0, 25, 50
Anode mass flow rate [Aeq]	$\dot{m}_a$	0.5, 1.0, 1.5
Propellant Species	-	Ar, Xe

**4.2 放電電圧依存性**  $l = 0$  mm, 推進剤アルゴンでの結果を図 4, 図 5 に示す。図 4 は  $\dot{m}_a = 0.5$  Aeq とし、異なる磁場強度における放電電圧に対する放電電流と推力を示し、図 5 は  $B = 100$  mT とし、異なる推進剤流量における放電電圧に対する放電電流と推力を示す。

図 4 に示されるように、放電電流、推力は放電電圧に対して単調増加ではなく、放電電圧の大きさに依って異なるモ

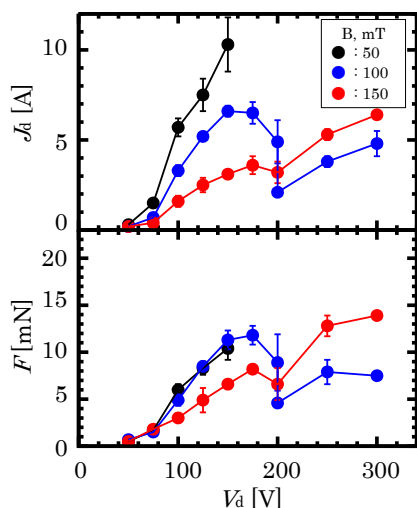


図 4  $l = 0$  mm, 推進剤 Ar,  $\dot{m}_a = 0.5$  Aeq, 異なる磁場強度での放電電圧に対する放電電流、推力

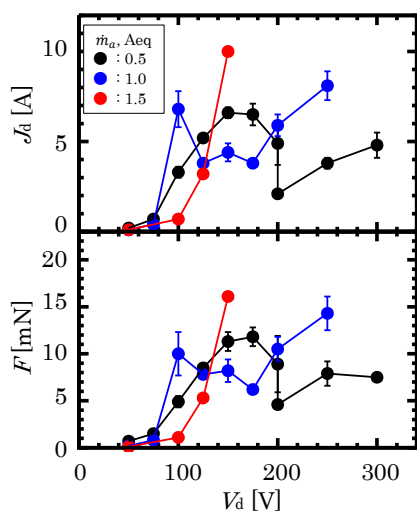


図 5  $l = 0$  mm, 推進剤 Ar,  $B = 100$  mT, 異なる流量での放電電圧に対する放電電流、推力

ードを示す。 $V_d = 200$  V 以下の領域においては、放電電流および推力は放電電圧に対して増加する。この時、放電電流は磁場が弱いほど大きくなり、 $V_d = 150$  V,  $B = 100$  mT の時  $V_d = 150$  V,  $B = 150$  mT と比べて放電電流は約 2.1 倍大きい。 $V_d = 200$  V 付近の領域においては電圧の増加に対して放電電流、推力は減少する。特に  $B = 100$  mT,  $V_d = 200$  V では同じ作動条件で異なる結果を示し、 $V_d = 200$  V 付近でモード変化が起きていると考えられる。さらに電圧を増加させ  $V_d = 200$  V 以上の領域においては、再び放電電流および推力は放電電圧に対して増加するが、 $V_d = 200$  V 以下の領域とは異なり磁場が強いほど放電電流、推力は大きくなる。 $V_d = 100$  V 以上では放電電流は推進剤流量に対する一価電離相当の電流である 0.5 A を上回り、条件によっては  $J_d = 10$  A 以上も結果も得られた。高効率化のため放電電流値の低減が今後の課題である。

図 5 から、 $\dot{m}_a = 1.0$  Aeq でも放電電圧の増加に対して放電電流、推力は単調増加でないことがわかる。 $V_d = 100 - 175$  V では電圧の増加に伴い放電電流および推力が減少する。流量をさらに増やし  $\dot{m}_a = 1.5$  Aeq で作動を行うと、放電電圧の増加に対して顕著に放電電流が増加する。なお高電圧でのデータの取得は行っていない。

**4.3 カソード位置依存性** 図 6 に異なるカソード位置での放電電圧に対する放電電流、推力の結果を示す。カソード位置を変えると作動特性は変化し、下流に移動させるほどコイル中心と比べて安定して作動する条件が少ない。 $\dot{m}_a = 0.5$  Aeq,  $B = 100$  mT の時  $l = 50$  mm では推力は得られず、電圧を上げていくと  $V_d = 180$  V 付近で信号が振動し解析が不可能となる。 $l = 25$  mm では推力が発生する条件もあり、 $V_d = 175$  V で  $F = 2.6$  mN であった。しかし、 $l = 0$  mm と比べて作動範囲は狭く  $V_d = 225$  V で不安定になる。今回はコイル中心およびその下流のカソード位置で作動を行ったが、今後は上流にも移動させて試験を行う予定である。

**4.4 アノード形状の影響** 本スラスタのアノードはリング状であり、その内面と下流面のいずれかもしくは両方

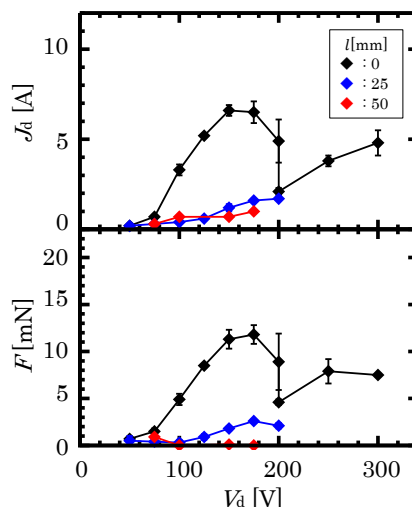


図 6 推進剤 Ar,  $\dot{m}_a = 0.5$  Aeq,  $B = 100$  mT, 異なるカソード位置での放電電圧に対する放電電流、推力

が電離・加速のための電界形成に寄与していると考えられる。リング状アノードのどの面が電界の形成に効いているかを調べるため、リング状アノードの内面のみを電離・加速に用いるようアノードの下流面を絶縁円盤で覆った試験を行った。その時の放電電圧に対する放電電流、推力の結果を図7に示す。アノード下流面を絶縁板で覆った場合、覆っていない場合と比べて放電電流および推力が減少している。この結果からこの条件では主にアノード下流面が使われていることが示唆される。

**4.5 推進剤種の影響** アノードの下流面を絶縁材で覆った状態で、推進剤としてキセノンを用いて作動を行った。流量、磁場でのキセノンでの作動結果を図8に示す。キセノンでの作動では放電電圧の増加に対して放電電流、推力は単調に増加するが、放電電流、推力に対する磁場の影響は小さい。ただし、 $B = 100 \text{ mT}$  に比べて  $B = 150 \text{ mT}$  のほうが僅かに放電電流は小さく、推力は大きいため強磁場での作動により性能向上が見込まれる。また同じ放電電圧では

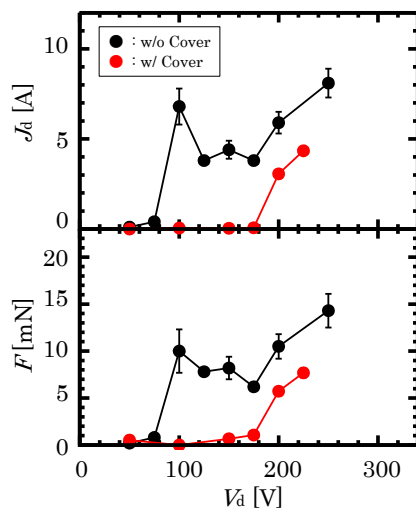


図7  $l = 0 \text{ mm}$ ,  $\dot{m}_a = 1.0 \text{ Aeq}$ ,  $B = 100 \text{ mT}$ , 異なるアノード条件の放電電圧に対する放電電流、推力

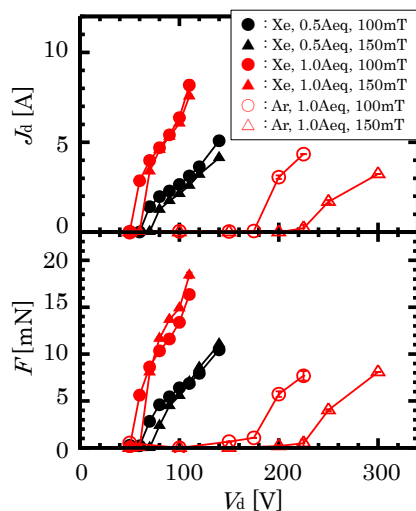


図8  $l = 0 \text{ mm}$ , 推進剤 Xe での放電電圧に対する放電電流、推力

$\dot{m}_a = 0.5 \text{ Aeq}$  と比べて  $\dot{m}_a = 1.0 \text{ Aeq}$  のほうが放電電流、推力は大きく、これはアルゴンでの傾向(図5)と異なる。一方でキセノンを使用した場合も放電電流は大きく、アルゴンでの作動と同様に放電電流の低減が課題である。

## 5. まとめ

ソレノイドコイルによる発散磁場とその中心軸上に配置したホローカソードを有する静電加速スラスタを試作し、作動を行った。アルゴンでの作動では放電電圧の増加に対して放電電流、推力が増加するモードと減少するモードが確認された。カソードの位置が作動に影響を与え、カソードをコイル中心に配置したとき安定して作動する範囲が広がった。リング状アノードの下流面を絶縁板で覆った結果、放電電流、推力は減少した。推進剤としてキセノンを用いると、推力は磁場に依らず、放電電圧、推進剤流量に対して単調増加であった。今後、キセノンでの詳しいデータ取得、コイル上流のカソード位置での試験を行っていく予定である。

## 謝辞

スラスタ部品の製作において、名古屋大学工学研究科技術部福森勉氏に感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) International Space Exploration Coordination Group, The global exploration roadmap 2013, 2013.
- 2) V. Kim, "Main physical features and processes determining the performance of stationary plasma thrusters," *Journal of Propulsion and Power*, 14 (5), pp. 736-743, 1998.
- 3) Vladimir Kim, Garri Popov, Boris Arkhipov, Vyacheslav Murashko, Oleg Gorshkov, Anatoly Koroteyev, Valery Garkusha, Alexander Semekin, Sergei Tverdokhlebov, "Electric Propulsion Activity in Russia," : *27th International Electric Propulsion Conference*, 2001.
- 4) Scott J. Hall, Sarah E. Cusson and Alec D. Gallimore, "30-kW Performance of a 100-kW Class Nested-channel Hall Thruster," : *34th International Electric Propulsion Conference*, 2015.
- 5) S. Harada, T. Baba, A. Uchigashima, S. Yokota, A. Iwakawa, A. Sasoh, T. Yamazaki, and H. Shimizu, "Electrostatic acceleration of helicon plasma using a cusped magnetic field," *Applied Physics Letters*, vol. 105, No. 19, 2014.
- 6) Akira Uchigashima, Teruaki Baba, Daisuke Ichihara, Akira Iwakawa, Akihiro Sasoh, Shota Harada, Takuya Yamazaki, Matsutaka Sasahara, Tomiji Iwasaki, "Development of Helicon Electrostatic Thruster (HEST)," : *34th International Electric Propulsion Conference*, 2015.
- 7) 市原大輔・内賀嶋暁・岩川輝・佐宗章弘, "静電加速スラスタの性能評価(I)," : 平成 27 年度宇宙輸送シンポジウム, 2016.
- 8) Harold R. Kaufman, Raymond S. Robinson, and Richard Ian Seddon, "End - Hall ion source," *Journal of Vacuum Science & Technology*, 5 (4), pp. 2081-2084, 1987.

- 9) Raitses, Y., Fisch, N. J., Ertmer, K. M., & Burlingame, C. A.,  
“A study of cylindrical Hall thruster for low power space applications,” *36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Joint Propulsion Conferences*, 2000.
- 10) Y. Raitses, A. Smirnov, and N. J. Fisch, “Enhanced performance of cylindrical Hall thrusters,” *Applied Physics Letters*, 90, p. 221502, 2007.
- 11) Akihiro Sasoh and Yoshihiro Arakawa, “A highresolution thrust stand for ground tests of lowthrust space propulsion,” *Review of Scientific Instruments*, 64 (3), pp. 719-723, 1993.
- 12) 鵜生知輝, 片岡久志, 鄭栽勲, 市原大輔, 岩川輝, 佐宗章弘, “定常作動同軸 AF-MPD の電極形状が推進性能に及ぼす影響,” : 平成 26 年度宇宙輸送シンポジウム, 2014.