

静電加速スラスターの性能評価 (I)

Performance Evaluation of Electrostatic Acceleration Thruster (I)

○市原 大輔・内賀 嶋瞭(名大院)・岩川 輝・佐宗 章弘(名大)

○Daisuke Ichihara・Akira Uchigashima・Akira Iwakawa・Akihiro Sasoh (Nagoya University)

Abstract

A new electrostatic thruster was developed. The thruster has a cusped magnetic field between ring shape anode in upstream and hollow cathode in downstream. The ion beam characteristics, ion beam energy, ion beam current and divergence were measured as changing propellant flow rate, propellant injection port, discharge voltage and anode inner diameter. Ion beam energy was mainly affected by anode inner diameter. 2 different diameter anodes were tested and with larger diameter anode, ion beam energy was about 30% lower than that of smaller diameter anode case. Ion beam current was strongly affected by propellant flow rate and injection port. Injecting totally 1.36 Aeq Ar propellant though the near anode injection port, ion beam energy and ion beam current were 132 eV which was 59% of discharge voltage and 1.31 A which was 96% of total propellant flow rate. Using these results, thrust efficiency was 13% for maximum.

記号の説明

- D_a : アノード内径
- E_i : イオンビームエネルギー, (1)式
- \dot{J} : 全推進剤流量 ($=\dot{J}_1 + \dot{J}_2$)
- \dot{J}_1 : 推進剤流量(電流値換算)
- \dot{J}_2 : ホローカソード用推進剤流量
(電流値換算)
- J_c : RPA 捕集電流
- J_d : 放電電流
- j_i : イオンビーム電流密度
- J_i : イオンビーム電流
- J_k : キーパー電流
- R : 回転半径
- V_c : RPA 挿印電圧
- V_d : 放電電圧
- V_k : キーパー電圧
- η : エネルギー変換効率, (4)式
- $\bar{\theta}$: イオンビーム発散角
- φ_1 : RPA 第 1 ピーク電圧, 図 4
- φ_2 : RPA 第 2 ピーク電圧, 図 4

1. はじめに

化学推進機と比較してより高比推力を達成可能な電気推進機は、これまで主に宇宙機の姿勢制御に用いられてきたが、近年では軌道変更にも適用されるようになり¹⁾、活躍の幅を広げている。しかし、推力密度は化学推進機の 1/1000 程度であるために²⁾ミッション期間の長期化が避けられず、電気

推進機の高推力密度化が求められる。推力密度はプラズマ密度に比例することから、高密度プラズマを生成可能な Helicon 波放電を電気推進機に適用する試みが行われている²⁻⁶⁾。Harada ら⁵⁾は Helicon プラズマを静電加速する推進機、Helicon Electrostatic Thruster を開発した。Helicon 波放電に投入する電力を増加すると放電電圧相当のエネルギーまでイオンを加速できることが報告されている。また、Uchigashima⁶⁾らの報告では同推進機におけるイオン加速は半径方向電界を用いてなされたものであることを示唆する結果が得られている。HEST ではアノード-カソード間の直流放電によってプラズマを生成/加速することも可能である。また、半径方向電界を用いたイオン加速ではアノード近傍にてプラズマを生成することが望ましい。そこで本研究ではアノード近傍から推進剤を供給し、半径方向電界と軸方向発散磁場とを組み合わせたイオンの静電加速を試みた。アノード内径、推進剤流量、推進剤供給位置、放電電圧を変化させた際のイオンビームエネルギー、イオンビーム電流、放電電流を測定し、イオンビーム発散角、エネルギー変換効率を評価したのでその結果を報告する。

2. 実験装置

2.1 スラスターヘッド 本実験にて新たに製作したスラスターヘッドの断面図ならびに回路図を図 1 に示す。上流部にリング型アノードならびに絶縁板を、下流部にホローカソードを設置し、両者の間に発散-ソレノイドコイルと永久磁石からなる磁気回路を用いてカスプ磁場を印加する。リング型アノードは銅製であり、内径 D_a 、外径 80 mm、厚さ 10 mm とした。リング内側には直径(D_a-3) mm の凸型を有する

絶縁部品を設置した。これにより、リング型アノード内面と凸部とにより幅 1.5 mm のスリットが形成され、本スリットを通じて推進剤を供給した。本供給経路を Port A とする。作動特性に対する推進剤供給経路の影響を評価するため、中心軸上に直径 1.5mm の流路を設け、Port B とした。印加した磁場形状を図 2 に示す。ソレノイドコイル、16 本のネオジウム磁石および軟鉄製円盤から構成される磁気回路を用いて発散-カスプ磁場を印加した。ネオジウム磁石は周方向に等間隔で設置した。ソレノイドコイルによってアノード近傍では緩やかな発散磁場が形成される一方、スラスタ下流域ではネオジウム磁石により磁力線は大きく変形しカスプ磁場を形成する。コイル電流は 10A に固定した。このとき磁場強度はソレノイドコイル中心部にて 100 mT でありスラスタ下流域にて 1 mT 未満の Field free 領域を形成した。この Field free 領域内において、ソレノイドコイル中心から軸方向に 150 mm、中心軸から半径方向に 70 mm の位置にホローカソード (Kaufman & Robinson 製 DLHC-1000) を設置した。

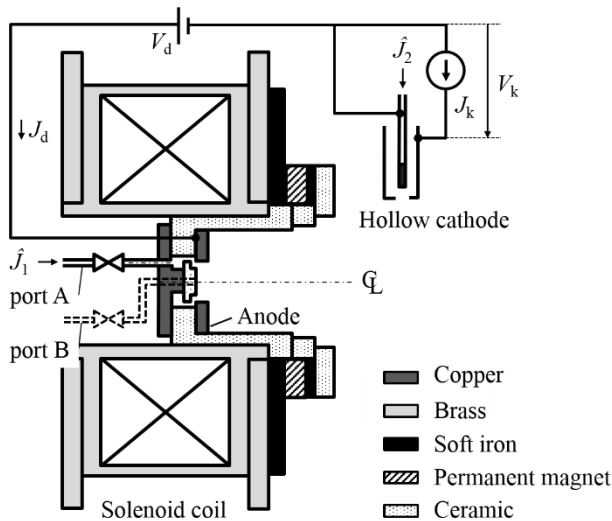


図 1 スラスタヘッド断面図ならびに回路図

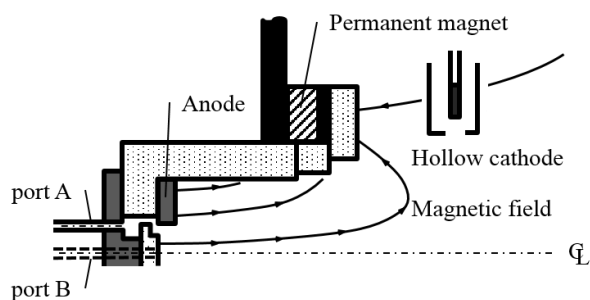


図 2 コイル電流 10A 時の磁力線

2.2 イオンビームエネルギー分布関数計測 イオンエネルギー分布関数の計測には図 3 に示す Retarding Potential Analyzer (RPA) を用いており、ソレノイドコイル中心から 350 mm 離れた中心軸上に設置した。RPA は 3 枚のステンレス製グリッドとイオンコレクタから構成されている。1 枚目のグリッドは浮遊電位であり、プラズマのデバイ長を大きくする役割を持つ。2 枚目のグリッドはカソード電位に対して -100 V にバイアスされており、電子の流入を防いでいる。3 枚目のグリッドの電位 V_3 はカソード電位に対して -20 から 440 V の間で掃引され、イオンを選別する。グリッド下流には直径 30 mm の銅製のイオンコレクタが設置されており、 V_3 以上のエネルギーを持つイオンのみがコレクタに到達しイオン電流 J_c として計測される。 J_c は 15 k Ω (誤差 $\pm 5\%$) の抵抗にかかる電圧を計測することにより評価した。

リッドは浮遊電位であり、プラズマのデバイ長を大きくする役割を持つ。2 枚目のグリッドはカソード電位に対して -100 V にバイアスされており、電子の流入を防いでいる。3 枚目のグリッドの電位 V_3 はカソード電位に対して -20 から 440 V の間で掃引され、イオンを選別する。グリッド下流には直径 30 mm の銅製のイオンコレクタが設置されており、 V_3 以上のエネルギーを持つイオンのみがコレクタに到達しイオン電流 J_c として計測される。 J_c は 15 k Ω (誤差 $\pm 5\%$) の抵抗にかかる電圧を計測することにより評価した。

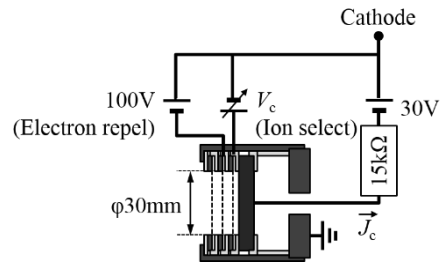


図 3 Retarding potential analyzer (RPA) 断面図および回路図

-20 V $\leq V_3 \leq 0$ V での値で規格化した J_c の測定例ならびにイオンエネルギー分布関数 (IEDF) 算出例を図 4 に示す。規格化した J_c を最小二乗法にて Fitting し、 V_3 に対する微分値 (dJ_c/dV_3) を用いて IEDF を算出した。図 4 に示す通り IEDF は 2 つのピーク値を有する。それぞれのピークにおける V_3 の値を ϕ_1 , ϕ_2 とすると、イオンビームエネルギー E_i は

$$E_i \equiv \phi_2 - \phi_1 \quad (1)$$

と定義することができる。以下、(1)式に基づいて E_i を評価する。

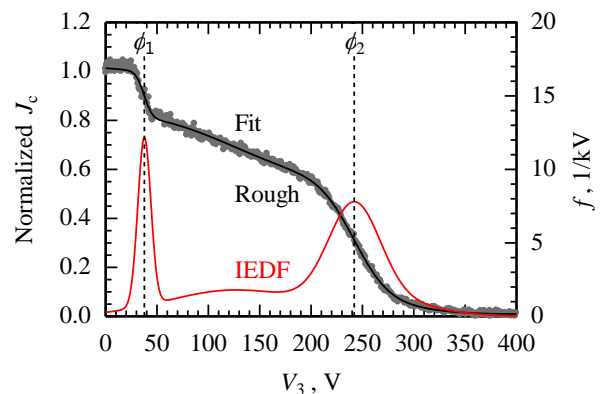


図 4 イオンエネルギー分布関数 (IEDF) 算出例 ($J_1=0.5$ Aeq, $V_a=300$ V, $D_a=27$ mm, injection port A)

2.3 イオンビーム電流計測 イオンビーム電流は直径 12 mm の捕集面を有する Faraday cup を用いて測定した。捕集面はカソード電位に対して -50 V にバイアスされており、捕集面に流入するイオンビーム電流を 1k Ω の抵抗器を用いて測定した。イオンビーム電流の空間分布計測のため Faraday cup を図 5 に示すとおり周方向に回転速度 70 deg./sec. でスイープした。中心軸上における推進機出口位置

を回転中心とし、半径 250 mm 上での回転角 θ に対するイオンビーム電流密度 $j_i(\theta)$ を測定した。 $\theta=0$ deg. の値で規格化した j_i の測定例を図 6 に示す。測定した $j_i(\theta)$ から(2), (3)式で定義されるイオンビーム電流 J_i ならびにイオンビーム発散角 $\bar{\theta}$ を算出した。

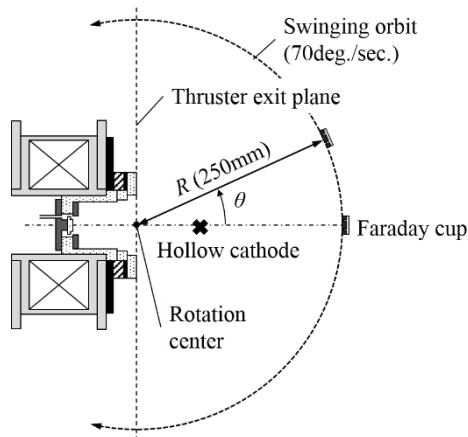


図 5 イオンビーム電流計測方法

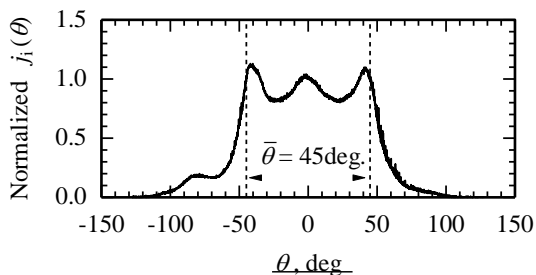


図 6 イオンビーム発散角算出例 ($J_i=0.5$ Aeq, $V_d=300$ V, $D_a=27$ mm, injection port A)

$$J_i \equiv 2\pi R^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} j_i(\theta) |\sin\theta| \cdot d\theta \quad (2)$$

$$\langle \cos\bar{\theta} \rangle \equiv \frac{2\pi R^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} j_i(\theta) |\sin\theta| \cdot \cos\theta \cdot d\theta}{2\pi R^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} j_i(\theta) |\sin\theta| \cdot d\theta} \quad (3)$$

2.4 真空排気系 実験は直径 1.2 m, 長さ 3.2 m のステンレス製真空チャンバーを使用した。チャンバー内は排気速度 116.7 L/s のドライポンプで粗引き後、排気速度 8,400 L/s のクライオポンプを用いて真空引きされる。チャンバー内圧力は、電離真空計を用いて計測され、 $J_i=1.0$ Aeq において、 1.0×10^{-2} Pa 以下に保たれている。

3. 実験結果

3.1 実験条件 本実験にて設定した各パラメータおよびその値を表 1 にまとめる。各作動条件において E_i , $j_i(\theta)$ に加え、放電電流 J_d , キーパー電圧 V_k を測定した。測定は作動条件ごとに 2 回実施し、平均値をシンボルで、標準偏差をエ

ラーバーの大きさで示す。

表 1 実験条件

Parameter	Unit	Value
Propellant	-	Ar (99.9999%)
Injection port	-	A, B
J_1	Aeq	0.5, 1.0
J_2	Aeq	0.36
J_k	A	2.0
V_d	V	175-300
D_a	mm	27, 50

3.2 アノード内径の影響 D_a を変化させた際の E_i 算出結果を図 7 に示す。 D_a によらず V_d の増加に対して E_i は線形に増加した。 $V_d=300$ V において $D_a=27$ mm では $E_i=216$ eV であった。これは V_d に対して 72% である。 $D_a=50$ mm の場合、同条件において $E_i=154$ eV であるが、これは $D_a=27$ mm での E_i に対して 71% にとどまった。また、 $D_a=27, 50$ mm においてそれぞれ $V_d < 200$ V, $V_d < 250$ V ではプラズマを生成することができなかった。推進剤の電離は中性粒子と電子との非弾性衝突によって進行する。アノード近傍では発散磁場であることを考えると、 D_a を増加させた場合、スラスター中心軸上からアノード内面の間を横切る磁力線の本数も増加する。ホローカソードから放出された電子は磁力線に沿って拡散し、スラスター中心軸上がカソード電位であると仮定すると、 D_a の増加により推進剤供給孔付近まで到達する電子が減少し、より低電位位置にて推進剤が電離すると考えられる。その結果、イオンの加速に用いることができる電位差が低下することで E_i も低下したと思われる。以下、より E_i の高い $D_a=27$ mm の場合に限って議論する。

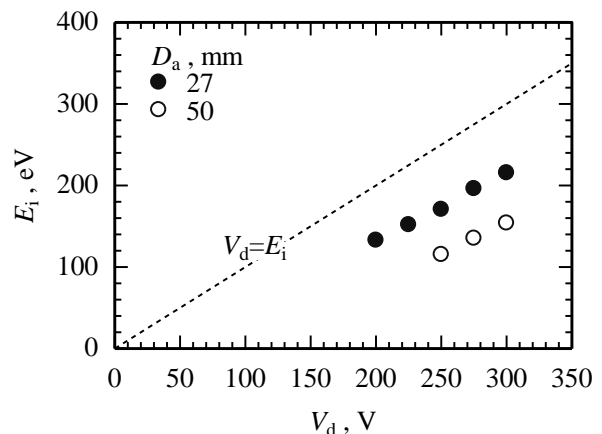


図 7 E_i に対する D_a の影響 ($J_i=0.5$ Aeq, injection port A)

3.3 推進剤流量, 供給位置の影響 はじめに推進剤流量の影響を述べる。 J_i を変化させた際の E_i, J_i, J_d 測定結果を図 8 に示す。推進剤は Port A より供給した。 J_i の値によらず E_i は V_d の変化に対して同様の傾向を示した。 J_i の違いは E_i に大きく影響しないものの、同 V_d においては J_i が小さいほど E_i も高い。 $V_d=225$ V では $J_i=1.0$ Aeq での E_i は $J_i=0.5$ Aeq での E_i に対して 87% であった。一方、 J_i, J_d は J_i の違いに

より大きく変化する。 $V_d=225\text{ V}$ では $\hat{J}_1=1.0\text{ Aeq}$ での J_i , J_d はそれぞれ 1.31 A , 2.12 A であった。 J_i は全推進剤流量相当の電流値 ($\hat{J}_1+\hat{J}_2$) の 96% に達しており、完全電離に近いプラズマを生成できた。 $\hat{J}_1=0.5\text{ Aeq}$ では同条件における $\hat{J}_1=1.0\text{ Aeq}$ での値と比較して J_i , J_d はそれぞれ 14%, 21% にとどまった。 \hat{J}_1 が大きいほど電子-中性粒子間の衝突頻度も増加すると考えられ、 $\hat{J}_1=1.0\text{ Aeq}$ において推進剤の電離が促進したことで J_i については J_d も増加したと予想される。 $V_d=150\text{ V}$ と比較して $V_d=200\text{ V}$ では、 53 W の投入電力増加に対してイオンビーム電力 ($J_i \times E_i$) は 49 W 増加している。このように投入電力増分の 90% 以上をイオンビーム電力に変換可能な作動領域が存在する。 $\hat{J}_1=1.0\text{ Aeq}$, $V_d=200\text{ V}$ での測定結果を用いると、全投入電力 ($J_d V_d + J_k V_k$) 390 W に対してイオンビーム電力は 141 W となる。これはエネルギー変換効率 36% に相当する。

次に推進剤供給位置の影響について述べる。 $\hat{J}_1=1.0\text{ Aeq}$ とし Port B から推進剤を供給した場合の E_i は Port A から供給した場合の E_i と比較して最大 14% 減少した。アノード内面に近い Port A から推進剤を供給することでアノード近傍にて推進剤が電離し、より高電位位置からイオン加速が行われた結果と考える。 J_i , J_d は推進剤供給位置の影響を大きく受ける。 $V_d=200\text{ V}$ において Port B から推進剤を供給した場合の J_i , J_d は Port A から供給した場合と比較してそれぞれ 56%, 77% にとどまった。

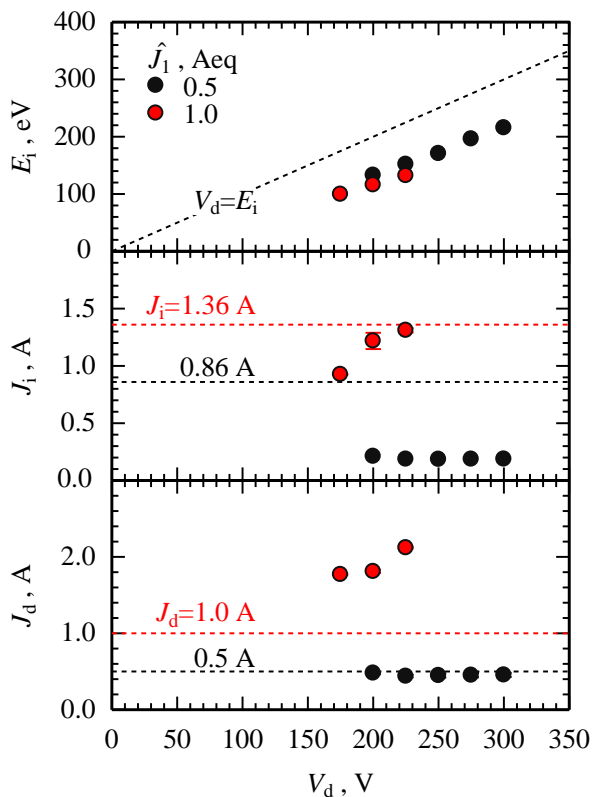


図 8 E_i , J_i , J_d に対する \hat{J}_1 の影響 ($D_a=27\text{ mm}$, injection port A)

3.4 イオンビーム発散角計測結果 (3)式に基づいて算出した $\bar{\theta}$ を図 9 に示す。 \hat{J}_1 の値によらず V_d の変化に対して $\bar{\theta}$ は大きく変化せず、 $\hat{J}_1=0.5, 1.0\text{ Aeq}$ においてそれぞれ 45 deg. , 50 deg. 程度であった。これはカスプ磁場を用いた HEMP⁷⁾ と同程度の値 ($45\text{--}55\text{ deg.}$) であり、Hall スラスタ⁸⁾ ($35\text{--}48\text{ deg.}$) より大きい。 V_d によらず $\bar{\theta}$ はほぼ一定であることから、 $\bar{\theta}$ はカスプ磁場形状で決定されると予想される。磁場形状を変化させ、 $\bar{\theta}$ を減少することが今後の課題の 1 つである。

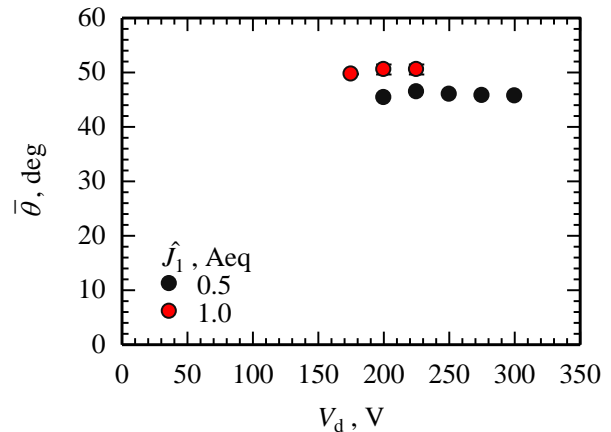


図 9 イオンビーム発散角算出結果 ($D_a=27\text{ mm}$, injection port A)

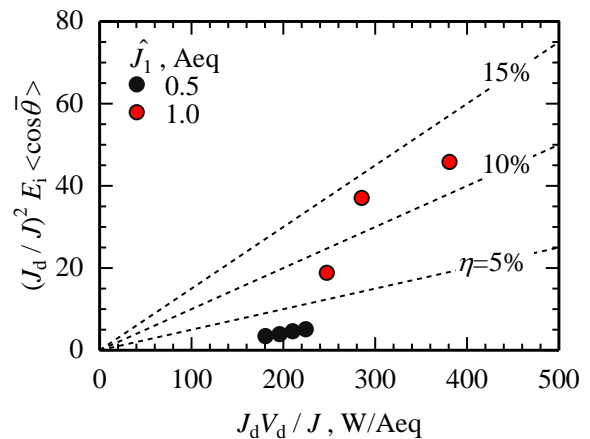


図 10 単位推進剤流量あたりの投入電力に対するイオン 1 個あたりの軸方向運動エネルギー ($D_a=27\text{ mm}$, $V_d=175\text{--}300\text{ V}$, injection port A)

3.5 推力効率算出結果 測定した E_i , J_i , J_d ならびに算出した $\bar{\theta}$ を用いて推力効率 η を算出した。推力効率の定義より、推進剤粒子 1 個あたりに投入した電力とイオン 1 個あたりの軸方向運動エネルギーとの関係は以下のように表すことができる。

$$\eta = \frac{F^2}{2mJ_d V_d} = \frac{E_i}{V_d} \cdot \frac{J_i}{J_d} \cdot \frac{J_i}{J} \cdot \langle \cos\bar{\theta} \rangle^2$$

$$= \frac{(J_i/J)^2 \cdot E_i \langle \cos\bar{\theta} \rangle^2}{J_d V_d / J} \quad (4)$$

ここで $J = J_1 + J_2$ である。Port A を用いて推進剤を供給した際の測定値に基づき、(4)式を用いて算出した η を図 10 に示す。図 10 において原点からの傾きが η に相当する。 $J_1 = 0.5$ Aeq では η は 5% 未満にとどまった。一方 $J_1 = 1.0$ Aeq においては最大 13% となった。図 8 に示すとおり J_1 によって J_i , J_d が大きく変化する。 J_1 の増加量以上に J_i が増加したことで軸方向運動エネルギーも増加したものと考える。

4. 結論

上流部のリング型アノードと下流部のホローカソードとの間にカusp磁場を配した静電加速機を試作し、そのイオンビーム特性を取得した。

1. イオンビームエネルギーはアノード内径の影響を強く受ける。アノード内径50mmの場合、27mmの場合に対して30%イオンビームエネルギーが減少する。電離位置に応じて加速に用いることができる電位が異なるためと考える。
2. イオンビーム電流は推進剤流量の影響を強く受ける。1.0 Aeq相当のArを供給した場合、推進剤流量相当のイオンビーム電流が測定されたが、0.5 Aeqではその14%程度にとどまった。電離衝突頻度が上昇したためと考える。
3. イオンビーム発散角は推進剤流量によらず45-50deg程度であった。発散角はカusp磁場形状で決定されると考える。

参考文献

- 1) Oh, D. Y., Snyder, J. S., Goebel, D. M., Hofer, R. R. and Randolph, T. M. : Solar electric propulsion for discovery-class missions, J SPACECRAFT ROCKETS, **51** (2014), pp. 1822-1835.
- 2) Charles, C., Boswell, R. W., Laine, R. and MacLellan, P. : An experimental investigation of alternative propellants for the helicon double layer thruster, J PHYS D APPL PHYS, **41** (2008), Art.ID. 175213.
- 3) Longmuir, B. W. et al. : Ambipolar ion acceleration in an expanding magnetic nozzle, PLASMA SOURCES SCI T, **20** (2011), Art.ID. 015007.
- 4) Takahashi, K., Komuro, A. and Ando, A. : Low pressure, high-density, and supersonic plasma flow generated by a helicon magnetplasmadynamic thruster, APPL PHYS LETT, **105** (2014), Art.ID. 193503.
- 5) Harada, S. et al. : Electrostatic acceleration of helicon plasma using a cusped magnetic field, APPL PHYS LETT, **105** (2014), Art.ID. 194101.
- 6) Uchigashima, A. et al. : Anode Geometry Effects on Ion Beam Energy Performance in Helicon Electrostatic Thruster, IEEE T PLASMA SCI, accepted.
- 7) Koch, N., Harmann, H. P. and Kornfeld, G. : Development & Test Status of the THALES High Efficiency Multistage Plasma (HEMP) Thruster Family, 29th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2009-297, 2009.

- 8) Hoffer, R. R., Jankovsky, R. S. and Gallimore, A. D. : High-Specific Impulse Hall Thrusters, Part 1: Influence of Current Density and Magnetic Field, J PROPUL POWER, **22** (2006), pp. 721-731.