円形断面放電室をもつ低電力ホールスラスタの性能特性とプラズマ状態^{*1} Performance Characteristics and Plasma Features of Low Power Hall Thrusters with Circular Cross-Sectional Discharge Chambers

白 崎 篤 司^{*2}・田 原 弘 一^{*2}
Atsushi SHIRASAKI and Hirokazu TAHARA

Key Words: Electric Propulsion, Hall Thruster, Circular Cross-Sectional Discharge Chamber, Performance, Plasma Features

Abstract: Low power Hall thrusters with circular cross-sectional discharge chambers, named TCHT-series were investigated to obtain the performance characteristics and plasma features. Hall thrusters with circular cross-sectional discharge chambers will be suitable for low power Hall thrusters because of the large volume-to-surface ratio which suppresses overheating of inner magnetic coils and ion losses on the chamber wall. TCHT-2 achieved 25% of thrust efficiency in the input power range of 100–200 W. From RPA and double probe measurements, it is expected that the ionization region is located near the anode in which strong radial magnetic field exists. The Hall thruster TCHT-3 is downsized thruster for lower power operation, and the effect of magnetic field profiles on thrust performance was examined. TCHT-3 were classified into TCHT-3A and TCHT-3B. The Hall thruster TCHT-3A has the similar magnetic field configuration to TCHT-2, and the peak of radial magnetic flux density is located near the anode. On the other hand, TCHT-3B has the peak of radial magnetic flux density near the thruster exit. Such magnetic profile suppressed the discharge current. However, the specific impulse decreased. As a result, the thrust efficiency of TCHT-3B was lower than that of TCHT-3A. In the input power range of 120–180 W, TCHT-3 achieved higher thrust efficiency than TCHT-2 did. TCHT-series showed that Hall thrusters with circular cross-sectional discharge chambers were suitable for low power Hall thrusters.

1. は じ め に

打ち上げコストの削減や開発期間の短縮などの理由から人工衛星の小型化に注目が集まっている^{1, 2)}。ホールスラスタは比較的推力密度、比推力そして推進効率が高く、小型衛星用のスラスタとして、その小型・低電力化が行われてきた。しかし、代表的なホールスラスタである Stationary Plasma Thruster (SPT), Thruster with Anode Layer (TAL) と呼ばれるホールスラスタを小型・低電力化すると著しい性能低下を招くことが明らかになった (100 W で 20% 未満の推進効率^{3, 4)})。第 1 図 (a), (b) に SPT と TAL の概略図を示す。SPT はセラミックス製の円環状断面の放電室をもち、TAL は金属製の比較的短い円環状断面の放電室をもち、設計相似則^{3, 5)}によりスラスタ寸法が小さくなるに従って大きな磁束密度が必要となる。スラスタ中心に設置された電磁石用コイル鉄心は細くなるため磁気飽和を生じて必要な磁束密度が得られなくなる可能性がある。また小型化とともに放電室に囲まれた中心コイルの冷却が困難となり、透磁率が急激に低下する温度まで加熱され、性能が悪化したという報告もある³⁾。さらに小型化に伴い放電空間体積に対して放電室表面積が増加するためイオンの壁

面損失が増大し、性能が低下するという本質的な問題がある。Raites らは第 1 図 (c) のような円形断面放電室をもつホールスラスタを提案した^{6, 7)}。このスラスタの放電室断面は名前の通り円形で SPT, TAL とは異なり、中心コイルは放電室に囲まれていない。従ってコイル鉄心を太くする空間的余裕があり、磁気飽和の回避、そして中心コイルへの入熱の抑制に有効と考えられる。また同じ放電室直径であれば放電室壁体積/放電室面積比 (以降 Volume-to-Surface ratio: V/S 比と呼ぶ) が SPT と比べて大きく、小型化に伴う壁面損失の増加が緩和されると期待される。それゆえ円形断面放電室をもつホールスラスタは小型・低電力スラスタとして適していると考えられる。

しかしこのスラスタの設計指針やその電離・加速過程、ブリューム状態等は明らかになっていない。本研究では円形断面放電室をもつホールスラスタ、TCHT シリーズを用いて作動実験を行い、その推進性能とプラズマ特性を調べた。TCHT-2 では陽極位置による性能特性の変化を調べ、さらにプラズマ計測を行い内部の電離・加速過程を推測した。そして放電室半径が半分のスラスタ TCHT-3 を製作し、小型化による性能変化を調べた。

2. 実 験 装 置

2.1 ホールスラスタ作動システム ホールスラスタの作動は直径 1.2 m、長さ 2.25 m の真空タンク内で行う^{8–11)}。

^{*1} © 2006 日本航空宇宙学会

平成 17 年 9 月 12 日原稿受理

^{*2} 大阪大学大学院基礎工学研究科機能創成専攻

第1図 ホールスラストの種類

作動時の背圧は推進剤流量 $0.37 \sim 1.0 \text{ mg/s}$ の範囲において $8 \times 10^{-3} \sim 1.6 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ ($6 \times 10^{-5} \sim 1.2 \times 10^{-4} \text{ Torr}$) である。陰極にはホロー陰極を用いた。推進剤およびホロー陰極の作動ガスとしてキセノンを用いた。

2.2 円形断面放電室をもつホールスラスト TCHT シリーズ 大阪大学では現在まで円形断面放電室をもつホールスラストの3号機までを試作した。1号機から3号機までをそれぞれ TCHT-1, 2, 3 と呼ぶ。TCHT-1 では基礎作動実験を行い、安定に作動することを確認した^{9, 10)}。TCHT-2 と TCHT-3 の概略図を第2図 (a), (b) に示す。それぞれの寸法と特徴を第1表に示す。表中の r , L_1 , L_2 はそれぞれ放電室半径、円形断面部の長さ、円環状断面部の長さを表している。TCHT-2 については円環状断面部の長さ L_2 を 0 mm と 10 mm に変えて性能比較を行った。円環状断面部の放電室幅は 8 mm である。中心コイルと外側コイルによって TCHT-2 の放電室内に磁場を形成する。TCHT-2 の放電室壁材料としてボロナイトライドセラミックス (Boron Nitride: BN) を用いている。

TCHT-3 は TCHT-2 よりも小型のスラストでその放電室半径は TCHT-2 の半分の 14 mm である。また放電室は円形断面部のみで構成されている。TCHT-3 のスラスト中心軸上に永久磁石が設置されている。TCHT-3 は A タイプと B タイプに分類され、第2図 (b) の (＊) で示されて

第2図 ホールスラスト TCHT-2, 3 の概略図

第1表 ホールスラスト TCHT-2, 3 の寸法と特徴

	r	L_1	L_2	備 考
TCHT-2	28 mm	25 mm	10 mm 0 mm	円環状断面部をもつ
TCHT-3A TCHT-3B	14 mm	16 mm		外側に電磁石コイルをもつ リング状永久磁石をもつ

いる部材が軟鉄である場合を TCHT-3A, リング状の永久磁石である場合を TCHT-3B と呼ぶ。B タイプの作動時には外側コイルを用いない。このリング状の磁石はセグメント磁石を6個接着してリング状にしたもので内外二極、すなわち径方向に着磁されている。TCHT-3A と TCHT-3B の磁場分布は大きく異なり本研究ではこの二つの場合について推進性能を比較した。

第3図にコイル電流比 $1:1$, コイル電流 2 A の場合の TCHT-2 の磁場分布を示す。第3図 (a) に示されている磁力線形状からノズル状の磁場が形成されていることがわかる。また第3図 (b) から TCHT-2 の $L_2 = 10 \text{ mm}$ の場合、陽極近傍で半径方向磁束密度は極大値をとり、TCHT-2 の $L_2 = 0 \text{ mm}$ の場合は放電室出口から陽極に向かうにつれ半径方向磁束密度は増加する。TCHT-3 の磁場分布については3.3節で述べる。

2.3 推力測定 ホールスラストは振り子式スラストスタンドに設置され作動時のスラストスタンドの変位が非接触変位計で測定され推力が評価される⁸⁻¹⁰⁾。スラストにはおもりが接続されており、このおもりの個数を真空環境下でモータと受け皿によって変化させてスラストに水平方向の力を負荷する。こうしておもりによる負荷と変位計の出力信号との関係が得られる。この関係を用いてスラスト作動時の変位計出力を推力に変換する。

2.4 プラズマ計測 本研究では静電ダブルプローブ、イオンコレクタ、反射電場型エネルギーアナライザ (Retarding potential analyzer: RPA) を用いて TCHT-2 放電室内部と噴出ブリームのプラズマ測定を行った。

(a) 磁力線分布 (コイル電流比 1 : 1, コイル電流 2 A)

(b) 半径方向磁束密度の軸方向分布

第 3 図 TCHT-2 の磁場分布

2.4.1 イオンコレクタ測定 イオン電流測定はイオンコレクタを用いて行った。イオンコレクタは直径 20 mm の捕集電極と外径 25 mm のガードリングで構成されている¹¹⁾。ガードリングと電極との間には 0.5 mm の隙間が設けられている。電極とガードリングには同じ -27 V の電圧が印加されており、ガードリングは電極の端効果を防ぐ役割を担っている。スラスタ出口から 27.5 cm 離れた下流にイオンコレクタを設置し、スラスタ中心軸上を 0° として $\pm 90^\circ$ の範囲で掃引し、測定を行った。

2.4.2 RPA 測定 反射電場型エネルギーアナライザ (RPA) を用いてイオンエネルギーを測定した。RPA は 3 枚のグリッドと捕集電極から構成されている。1 枚目のグリッドは浮動電位になっており、2 枚目は -27 V の電圧が印加されている。そして、3 枚目のグリッドに正の電圧を掃引しイオンエネルギー分布を得る。スラスタ出口から 35 cm 下流のスラスタ中心軸上に RPA を設置して測定を行った。

2.4.3 静電ダブルプローブ測定 放電室内の電子温度と電子数密度を得るためダブルプローブ測定を行った。ダブルプローブ測定システムの概略図を第 4 図に示す。ダブルプローブは X-Y ステージ上に設置されたプローブ挿入装置のアームに取り付けられている。プローブ電極にはタングステン線を用い、プローブ電極の寸法は $\phi 0.4$ mm $\times$ 5.5 mm である。プローブ挿入装置によりプローブはスラスタ軸方向に 2 秒の周期で往復運動する。往復運動の際、プローブが最も陽極側 (上流側) に至った点 (光学センサで検出す

第 4 図 静電ダブルプローブ測定システム

る)におけるプローブ電流-プローブ間電圧特性を計測し、電子温度と電子数密度を算出する。プローブが放電室内に留まる時間を短くすることによりプローブの焼損やスラスタ作動への影響を抑える。半径方向に $r = -24 \sim 24$ mm, 軸方向に $z = -20 \sim 10$ mm の範囲において、半径方向に 8 mm 間隔, 軸方向に 5 mm 間隔で測定を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 円形断面放電室をもつホールスラスタの性能特性 TCHT-2 を用いて円環状断面部の有無が推進性能に及ぼす影響を調べた。作動の安定性を考慮して円環状断面部を設けたが、これは SPT と同様、中心コイルの寸法を制限するため、本来取り除かれるべきである。そこで円環状断面部の長さを 0 mm, 10 mm と変化させて性能比較を行った。円環状断面部をもたない $L_2 = 0$ mm の場合においても安定に作動を行うことができた。放電電圧は 200 V, 内側コイルと外側コイルの電流比は 1 : 1 とし、コイル電流は 0.6 ~ 2.6 A の範囲で変化させた。

第 5 図は放電電圧を 200 V に一定にした場合のコイル電流に対する推進特性の変化を示したものである。第 5 図 (a) の放電電流-コイル電流特性より、 $L_2 = 10$ mm の場合、コイル電流の増加に伴い放電電流は減少し、コイル電流 1.2 A 付近で最小の値をとる。そしてコイル電流をさらに増加させると放電電流は若干増加し、その後ほぼ一定となる。一方 $L_2 = 0$ mm の場合はコイル電流の増加とともに放電電流は減少し、コイル電流 2 A 以上ではほぼ横ばいとなった。また、 $L_2 = 10$ mm の場合のように放電電流の最小値の存在は確認できなかった。 $L_2 = 10$ mm の場合の放電電流は $L_2 = 0$ mm の場合と比べて小さかった。これは円環状断面部において比較的磁束密度が大きく、電子の陽極への移動が抑制され放電電流が抑えられたためと考えられる。

第 5 図 (b) は推力・比推力のコイル電流に対する変化を示している。 $L_2 = 10$ mm の場合は 1.2 A 付近で推力・比推力が若干減少しているが、 $L_2 = 0$ mm の場合はコイル電流にかかわらずほぼ一定となっている。 $L_2 = 10$ mm の場合で見られる推力・比推力の谷は放電電流が最小になって

(a) 放電電流

(b) 推力・比推力

(c) 推進効率

第5図 推進特性とコイル電流の関係 ($L_2 = 0\text{ mm}$ と $L_2 = 10\text{ mm}$ との比較, コイル電流比 1:1, 放電電圧 200 V, 推進剤流量 1.0 mg/s)

いる箇所に対応しており, このことから何らかの原因で推進剤利用効率が減少したものと考えられる. $L_2 = 10\text{ mm}$ の場合の推力・比推力は $L_2 = 0\text{ mm}$ の場合と比べて小さかった. $L_2 = 10\text{ mm}$ の場合, 円環状断面は狭窄しているためここで生じたイオンが壁面に衝突し, 推力の損失が $L_2 = 0\text{ mm}$ の場合に比べて大きくなったためと推察される. 第5図(c)に示すように $L_2 = 10\text{ mm}$ の場合, 一部落ち込む領域が存在するが, いずれのタイプにおいてもコイル電流の増加とともに推進効率は増加した. また円環状断面をもたない $L_2 = 0\text{ mm}$ の場合においてより高い推進効率が得られた.

3.2 円形断面放電室をもつホールスラスタのプラズマ特性

3.2.1 イオンビーム特性 低電力化するためにはより少ない流量で作動させる必要がある. TCHT-2 を用い, 流量を 0.5 mg/s と小さくして作動を行った. この際, 高い推進効率を考慮して, $L_2 = 0\text{ mm}$ とした. 放電電圧 200 V における流量 0.5 mg/s と 1.0 mg/s に対する推進性能を第2表に示す. 0.5 mg/s の場合, 比推力が低く推進性能が低下

第2表 ホールスラスタ TCHT-2B の推進性能 (推進剤質量流量 0.5 mg/s と 1.0 mg/s との比較)

	Coil current	I_d	I_{sp}	η_T
0.5 mg/s	2 A	0.65 A	1200 s	27%
1.0 mg/s	2 A	1.54 A	1450 s	31%

第6図 ホールスラスタ TCHT-2 ($L_2 = 0\text{ mm}$) のイオン電流密度分布 (0.5 mg/s と 1.0 mg/s との比較, 放電電圧 200 V, コイル電流比 1:1, コイル電流 2 A)

する.

イオンコレクタで測定した 0.5 mg/s 及び 1.0 mg/s におけるイオン電流分布を第6図に示す. 全イオン電流の 95% を含む半頂角をビーム発散角と定義すると, 2つの流量に対するビーム発散角はいずれも 75° であった. すなわちビーム発散角は流量による影響を受けないことがわかった. 0.5 mg/s の場合の推進剤利用効率は 0.97, 1.0 mg/s の場合のそれは 1.3 であった. 1.0 mg/s の場合に推進剤利用効率が 1 を超えているのは 2価イオンの存在に起因するものと推察される. 定性的には 1.0 mg/s の場合 0.5 mg/s に比べて推進剤利用効率が高いと考えられる. これは放電室内における中性粒子密度が 0.5 mg/s の場合小さく, 電子との衝突・電離が起こりにくいためと推察される.

RPA で測定したイオンエネルギー分布を第7図に示す. いずれの作動条件においても低エネルギー ($< 50\text{ eV}$) において高いピークが見られる. これは真空タンク内の背景中性粒子との電荷交換衝突によって生じた低エネルギーイオンによるものと考えられる. 従ってこのピークはスラスタで加速されたイオンビームによるものではないと推察される. 放電電圧 200 V において 0.5 mg/s の場合 174 eV, 1.0 mg/s の場合 187 eV にイオンエネルギーのピークが見られる. このピークは放電電圧によって移動するためスラスタで加速されたイオンによるものと考えられる. 放電電圧 200 V において 50 ~ 300 eV の間でイオンエネルギーの平均値を算出すると 0.5 mg/s と 1.0 mg/s の場合それぞれ 160 eV, 178 eV であった. 0.5 mg/s の場合, ピークエネルギーと平均エネルギーいずれについても 1.0 mg/s に比べて若干低い. 他の放電電圧についても同様の傾向がある. 0.5 mg/s の場合放電室

第 7 図 ホールスラスタ TCHT-2 ($L_2 = 0$ mm) のイオンエネルギー分布 (0.5 mg/s と 1.0 mg/s との比較, 放電電圧 150 ~ 250 V)

内の中性粒子・電子数密度が小さいため, 中性粒子が電位の下がった下流に至るまで電離されずに到達し, 電圧利用効率が若干低下したと考えられる. 以上のことから 0.5 mg/s における推進性能の低下は推進剤利用効率と電圧利用効率の低下によるものであり, これは放電室内における中性粒子密度の低下に起因するものと推察される. 従って 0.5 mg/s 以下の流量で推進性能を維持するためには放電室の径を小さくする必要がある.

3.2.2 電子温度・電子数密度分布 推進性能の更なる向上のためには電離・加速過程の解明が不可欠であり, そのためには放電室内のプラズマ物理量の把握が必要となる. 流量 0.5 mg/s, 放電電圧 200 V の場合のダブルプローブ測定より得られた放電室内の電子数密度と電子温度分布を第 8 図に示す. 第 8 図 (a) の電子数密度分布からスラスタ中心軸上の上流側で電子数密度が高い領域が存在する. これはノズル磁場に沿って電子が移動し磁力線の収束する箇所に集中するためと考えられる. 第 8 図 (b) に電子温度分布を示す. 放電室内の電子温度は 8 ~ 20 eV であり, 陽極付近で高くなっている. 陽極付近の電子温度が高いこととイオンビームのピークエネルギーが放電電圧に近い (放電電圧の約 90%) ことから電離・加速は主に陽極近傍の半径方向磁場の強い箇所で起こっていると考えられる. 電離領域が陽極に近いため生成された電子は容易に陽極に流れ込み, 加速効率 (放電電流に対するイオン電流の割合) の低下を招き, 最高でも 30% 程度の推進効率しか得られなかったと考えられる. 従って推進効率の向上のためには電離領域を陽極から離れた位置に形成する必要があると推察される.

3.3 円形断面放電室をもつホールスラスタの小型化 少流量作動においても放電室内における電離が十分に行われるように TCHT-2 よりも放電室半径の小さい小型の TCHT-3 を製作した. TCHT-3 の磁場形状を第 9 図に示す. TCHT-3A に関しては第 9 図 (a) に示されるように TCHT-2 と同様の磁場が形成されている. 一方, TCHT-3B の磁場は第 9 図 (b), (c) のように TCHT-3A とは大きく異なり, 下流

第 8 図 ホールスラスタ TCHT-2 ($L_2 = 0$ mm) のプラズマ特性 (放電電圧 200 V, 推進剤流量 0.5 mg/s)

に大きな半径方向磁場が形成されている.

3.3.1 TCHT-3A の基本作動特性 流量 0.25 mg/s, 0.37 mg/s 及び 0.5 mg/s の場合のコイル電流に対する推進性能の変化を第 10 図に示す. この際, 放電室材質として BN を用いた. 第 10 図 (a) よりいづれの流量に対してもコイル電流の増加に伴い放電電流は緩やかに減少することがわかる. 第 10 図 (b) の推力・比推力-コイル電流特性より, コイル電流 0.4 A の場合を除いて比推力はコイル電流に対してほぼ一定となる. コイル電流 0.4 A の場合に比推力が低下するのは電子の磁場による捕捉が不十分で推進剤利用

(a) TCHT-3A の磁力線形状 (外側コイル電流 2 A)

(b) TCHT-3B の磁力線形状

(c) TCHT-3B の半径方向磁束密度の軸方向分布

第9図 ホールスラスタ TCHT-3 の磁場分布

効率が低下するためと考えられる。0.25 mg/s の場合に比推力が他の流量に比べて低い原因は放電室内における中性粒子密度が小さく、推進剤利用効率が低下したためと考えられる。0.37 mg/s と 0.5 mg/s の場合の比推力はいずれも 1200 ~ 1300 s 程度であり、TCHT-2 の 1450 s には及ばなかった。TCHT-3 の V/S 比は 4.87 (mm), TCHT-2 のそれは 8.97 (mm) であり、TCHT-3 の V/S 比は TCHT-2 に比べて小さく、0.5 mg/s の場合壁面損失が増加したため比推力が低下したと考えられる。0.37 mg/s の場合、壁面損失は 0.5 mg/s の場合に比べて小さいものの、推進剤利用効率が低く、結局 0.5 mg/s の場合と同程度の比推力にとどまったものと推察される。推進効率-コイル電流特性を第 10 図 (c) に示す。コイル電流の増加とともに推進効率は緩やかに増加する。推進効率は 0.37 mg/s の場合に最も高く、最高

(a) 放電電流

(b) 推力・比推力

(c) 推進効率

第 10 図 ホールスラスタ TCHT-3A の推進特性とコイル電流の関係 (放電電圧 200 V, 推進剤流量 0.37 mg/s, 放電室材質 BN)

で 25% 程度であった。

3.3.2 性能特性に及ぼす磁場分布の影響 円形断面放電室をもつホールスラスタの推進効率の向上には加速効率の向上が必要であり、そのためには電離領域を陽極から離れた下流に形成する必要がある。またこうすることにより壁面損失を低減することも期待できる。先に述べたように、電離領域は半径方向磁束密度が大きい箇所に形成されると予想される。そこで、リング状永久磁石を用いた TCHT-3B を製作し、下流域に大きな半径方向磁場を印加することにより、電離領域を下流に形成することを試みた。そして TCHT-3A と 3B の性能比較を行った。この際、放電室壁材質として BNAlN (Boron Nitride-Aluminum Nitride) を用いた。これは BNAlN を用いた場合、推進効率は BN の場合とほぼ同等でより高い比推力を得られたためである。流量 0.37 mg/s と 0.5 mg/s で作動を行ったが、0.37 mg/s

(a) 放電電流

(b) 比推力

(c) 推進効率

第11図 推進特性と放電電圧の関係 (TCHT-3A と TCHT-3B との比較, TCHT-3A の外側コイル電流 2 A, 推進剤流量 0.37 mg/s, 0.5 mg/s, 放電電圧 80 ~ 280 V, 放電室壁材質: BNAIN)

の場合, TCHT-3B では安定な作動を行うことが困難であった。推進特性の放電電圧による変化を第11図に示す。放電電流は第11図(a)に示すように電圧の増加とともに増加する。TCHT-3A は 260 V 付近で放電電流が急激に増加し作動が不安定になった。0.5 mg/s における TCHT-3B の放電電流は 0.37 mg/s における TCHT-3A よりもやや大きい程度である。そして放電電圧 200 V, 流量 0.5 mg/s においては, TCHT-3B の放電電流は TCHT-3A よりも明らかに小さく, TCHT-3B の場合, 放電電流は TCHT-3A に比べて抑えられていることがわかる。

第11図(b)に比推力-放電電圧特性を示す。TCHT-3B の比推力は放電電圧 260 V の場合を除き TCHT-3A と比べて低かった。TCHT-3B の場合放電電流が小さかったこと, そして 0.37 mg/s では作動が困難であったことを考慮する

第12図 推進効率と投入電力の関係 (TCHT-2 と TCHT-3A との比較)

と比推力が低下したのは推進剤利用効率の低下によるものと考えられる。推進剤利用効率が低下した原因は次のように考えられる。スラスト下流側に強い半径方向磁場が印加されており電離領域は下流に移動したが, ここでの中性粒子は陽極付近に比べ拡散しその数密度は小さくなっている。従って電離が効率よく行われず推進剤利用効率が低下したものと考えられる。結果として TCHT-3B の推進性能は第11図(c)に示すように TCHT-3A よりも低くなった。

3.4 投入電力による推進効率の変化 TCHT-2 ($L_2 = 0$ mm) および TCHT-3A の投入電力と推進効率の関係を第12図に示す。投入電力 120 ~ 180 W の範囲では TCHT-3A の推進効率は TCHT-2 に比べて高く, スラストの小型化により推進性能を向上させることができた。TCHT-2 の 100 ~ 250 W の電力範囲における推進効率は 25 ~ 31% で SPT-30 (同じ電力範囲で 16 ~ 34%)⁴⁾ と同等もしくはそれ以上の推進性能が得られた。

4. 結 論

円形断面放電室をもつホールスラスト TCHT シリーズの性能特性が調べられた。またイオンコレクタ, RPA 及びダブルプローブを用いてプラズマ測定, イオンビーム測定を行った。さらに小型のスラストを製作し, 性能の変化を調べた。以下に得られた結果を示す。

1) TCHT-2 の実験結果から, 放電室を円形断面のみで構成した場合 ($L_2 = 0$ mm) も安定に作動することがわかった。また円環状断面をもつ場合と比べてより高い比推力・推進効率を得られた。

2) TCHT-2 のイオン電流分布測定から 0.5 mg/s の場合と 1.0 mg/s の場合のビーム発散角は等しいが, 算出した推進剤利用効率は 1.0 mg/s の場合により高いことがわかった。RPA 測定からイオンビームのピーク及び平均エネルギーは 0.5 mg/s の場合 1.0 mg/s に比べて若干低いことがわかった。

3) ダブルプローブ測定より陽極付近で電子温度は高くなることがわかった。また放電室内に印加されたノズル状磁場の磁束が収束する箇所付近で電子数密度が増加することがわかった。

4) より小型の TCHT-3A において V/S 比の低下による

ものと思われる比推力・推進効率の低下が見られた。

5) TCHT-3B において下流領域に強い半径方向磁場を形成することにより TCHT-3A に比べて放電電流を抑えることができた。しかし比推力, 推進効率は TCHT-3A に比べて低くなった。

6) TCHT シリーズホールスラストは電力 100 W において約 25% の推進効率を示し, 低電力域において SPT タイプより高い推進性能が得られることがわかった。

参 考 文 献

- 1) Asada, S., Abe, N., Ando, K. and Fleeter, R.: Launching Small Satellites on the H-IIA Rocket, 17th Annual AIAA/USU Conf. on Small Satellites, Paper SSC-03-II-4, 2003.
- 2) Tahara, H.: An Overview of Electric Propulsion Activities in Japan, 28th Int. Electric Propulsion Conf., Toulouse, IEPC Paper 03-339, 2003.
- 3) Khayms, V. and Martinez-Sanchez, M.: Fifty Watt Hall Thruster for Microsatellites, Micci, M. M. and Ketsdever, A. D. (eds), Micropropulsion for Small Spacecraft, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 187, 2000, Chap. 9.
- 4) Jacobson, D. and Jankovsky, R.: Test Results of a 200 W Class Hall Effect Thruster, 34th Joint Propulsion Conf., AIAA Paper 98-3791, 1998.
- 5) Zhurin, V. V., Kaufman, H. R. and Robinson, R. S.: Physics of Closed Drift Thrusters, Plasma Sources Sci. Technol., **8** (1999), pp. R1-R20.
- 6) Raites, Y. and Fisch, N. J.: Parametric Investigations of a Nonconventional Hall Thruster, Phys. Plasmas, **8** (2001), pp. 2579-2586.
- 7) Smirnov, A., Raites, Y. and Fisch, N. J.: Parametric Investigation of Miniaturized Cylindrical and Annular Hall Thrusters, J. Appl. Phys., **92** (2002), pp. 5673-5679.
- 8) 田原弘一, 後藤大亮, 藤岡崇志, 北野貴久, 白崎篤司, 安井利明, 吉川孝雄: 低電力ホールスラストの基本作動特性と推進性能, 日本航空宇宙学会論文集, **50** (2002), pp. 318-324.
- 9) Shirasaki, A., Yuge, S., Tahara, H. and Yoshikawa, T.: Operational Characteristics and Thrust Performance of Hall Thrusters with Circular Cross-Sectional Discharge Chambers, Adv. Appl. Plasma Phys., **4** (2003), pp. 121-126.
- 10) Shirasaki, A., Tahara, H. and Yoshikawa, T.: Operational Characteristics of Cylindrical Hall Thrusters, 28th Int. Electric Propulsion Conf., Toulouse, IEPC Paper 03-051, 2003.
- 11) Shirasaki, A., Tahara, H. and Yoshikawa, T.: Plasma Diagnostic Measurement of a Hall Thruster with a Circular Cross-Sectional Discharge Chambers, Proceedings of Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2005, Kitakyushu, Paper AJCPP 2005-22071, 2005.