低電力ホールスラスタの基本作動特性と推進性能^{*1} Basic Operational Characteristics and Thrust Performance of Low Power Hall Thrusters

田 原 弘 一^{*2}・後 藤 大 亮^{*2}・藤 岡 崇 志^{*2}・北 野 貴 久^{*2}
Hirokazu TAHARA, Daisuke GOTO, Takashi FUJIOKA, Takahisa KITANO,
白 崎 篤 司^{*2}・安 井 利 明^{*2}・吉 川 孝 雄^{*2}
Atsushi SHIRASAKI, Toshiaki YASUI and Takao YOSHIKAWA

Key Words: Space Propulsion, Electric Propulsion, Hall Thruster, Operational Characteristics, Thrust Performance

Abstract: Laboratory-model low-power Hall thrusters, named the THT-III-series, were operated in order to examine influences of ceramics species of the acceleration channel walls, and shape and strength of radial magnetic field in the acceleration channels on the operational characteristics. For the THT-III A-BN thruster both with acceleration channel walls made of boron nitride and with more intensive concentration of magnetic field lines near the acceleration channel exit, a higher thrust efficiency was achieved with a lower discharge current and a higher thrust for an optimum magnetic field strength regardless of discharge voltage at a constant xenon mass flow rate. Accordingly, both the thrust and the specific impulse ranged from 10 to 70 mN and from 1,200 to 2,300 s, respectively, at discharge voltages of 200–500 V with mass flow rates of 1–3 mg/s in a wide input power range of 250–1,800 W. The thrust efficiency ranged from 30 to 45%.

1. ま え が き

ホールスラスタは円環状の加速チャンネル内に径方向の磁場と軸方向の電場を印加した構造であり、下流の陰極より放出された電子はチャンネル内に入射し、磁場との相互作用 ($E \times B$ ドリフトにより周方向に回転する) によりチャンネル内に閉じ込められ、効率よくプラズマを生成する。生成されたプラズマ中の正イオンは陽極と陰極の間の電位差により下流に向かって静電的に加速される。電磁流体力学的には、誘起された周方向ホール電流と径方向磁場の相互作用によるローレンツ力で生成プラズマが軸方向に加速されると見なせる。ホールスラスタは比較的コンパクトであり、直流アークジェットスラスタよりも高い比推力 (1,500 秒) と推進効率 (50%)、またイオンスラスタよりも高い推力密度 (約 1 mN/cm^2) を実現しており、この 20 年ほどの間にロシアでは数十機の衛星に SPT (Stationary Plasma Thruster) 100 と呼ばれるホールスラスタが搭載・運用されてきた¹⁾。近年は欧米諸国でも地球近傍ミッションへの適用を目的として開発、商業化が進められている^{2, 3)}。

しかしながら、ホールスラスタのプラズマ生成・加速過程、噴出ブルーム状態などについて未解明の問題が多く存在し、明確な設計指針はまだ得られていない^{4–12)}。大阪大学ではこれまで低電力 (1 kW 級) のホールスラスタの開発を目指し、実験室モデルのスラスタ、THT シリーズを試作

し作動実験を行ってきた^{9–11)}。その 1, 2 号機では加速チャンネル内に主に一様な磁場を印加し、磁場強度やムライト系セラミックス製チャンネルの形状 (長さ、幅) の変化が推進性能に及ぼす影響を調べてきた。その結果、最大推進効率は 35% 程度であり、加速チャンネル壁の材質とチャンネル内の磁場形状の変更が推進性能の改善のためには必要であることがわかった¹²⁾。

そこで本研究では、3 号機 THT-III ホールスラスタを製作し、加速チャンネル壁の材質とチャンネル内の磁場の形状・強さが作動特性に与える影響を調べた。チャンネル壁のセラミックスとしてムライトとボロンナイトを用い、チャンネル内の磁場形状としてチャンネル出口付近に磁力線を集中させこの付近でのみ磁場を強くした。推進剤キセノンの流量、放電電圧、磁場強度を変化させて放電電流と推力を測定し、比推力と推進効率を評価した。

2. 実験装置と測定方法

2.1 ホールスラスタ作動システム ホールスラスタの実験装置システムの概略図を第 1 図に示す。水冷ジャケット式真空タンクの長さは 2.25 m、直径は 1.2 m であり、2 台のターボ分子ポンプ (総排気速度 $10,000 \text{ l/s}$) が接続され、タンク内を高真空かつクリーンな状態に保つことができる。本実験におけるスラスタ作動時の真空タンク圧力は 10^{-3} Pa 台である。

ホールスラスタは振り子型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。推力の較正は真空環境下で約 1 g の

^{*1} © 2002 日本航空宇宙学会

平成 13 年 11 月 21 日原稿受理

^{*2} 大阪大学大学院基礎工学研究科システム人間系専攻機械科学分野

第1図 ホールスラスタ実験装置システムの概略図

第2図 ホールスラスタ THT-III A の断面図

おもりをモータを用いて1つずつ受け皿に載せ、スラスタに負荷していくことにより行われる。推力較正は推力0～70 mNの範囲で行われる。50 mN時に ± 1 mN程度の精度を維持していることが、複数回行った作動実験の結果から確かめられている。スラスタ本体には、主放電、磁気コイル用、ホローカソードにはヒーター、キーパー、イグニッション用の電源が接続されている。主放電以外で消費される電力は磁気コイルに最大20 W、ホローカソードのキーパーに1～2 Wとそのヒーターに30 W（作動時）（100 W（予熱時））である。

推進剤およびホローカソードの作動ガスとしてキセノンが使用され、2台のマスフローコントローラによってそれらの流量が独立して制御される。推進剤とカソード作動ガスの質量流量はそれぞれ1～3 mg/s（2 mg/sは20.5 sccm、1.47 Aeqに相当）、0.1 mg/sである。

放電は10分程度ホローカソードを余熱した後、推進剤およびカソード作動ガスを流し電極間に電圧200 V、加速チャンネル内に磁場100 Gauss（0.01 T）程度印加した状態で、カソード電位（陽極接地）を瞬間的に500 V程度下げると開始する。点火後に放電電圧とコイル電流を所定の値に設定し、放電電流と推力を測定する。

2.2 ホールスラスタ THT-III シリーズ 本研究では2種類の実験用ホールスラスタ、THT-IIIとTHT-III Aを用いた。THT-III Aの断面図を第2図に示す。THT-IIIはTHT-III Aの磁気シールドを取り除いたスラスタである。セラミックス製加速チャンネルの外径は70 mm、内径42 mmであり（幅14 mm）、その長さ（陽極からチャンネル出口まで）は35 mmである。チャンネル壁の材料としてムライト系セラミックス（（株）ニカトー製NC Mullite（ Al_2O_3 ：47%； SiO_2 ：49%））とボロンナイトライドセラミックス（（株）昭和電工製UHS-FL（窒化硼素焼結体（BN）：99.5%以上））の2種類を用いた。推進剤は図の左側4カ所から流入し、テフロン部と陽極で構成されたプレナム部で周方向に均一に広がり、陽極にあげられた24個の穴から加速チャンネル内に供給される。中心部に1個と外周部に4個の磁気コイルがあり、第3図に示されるように

第3図 計算された THT-III A の磁力線プロフィール

第4図 THT-III シリーズの加速チャンネル両壁の中間点における径方向磁束密度の軸方向分布（微小ホールセンサーによる測定、磁気コイル電流：1 A）

磁気回路が形成されており加速チャンネル内に径方向の磁場が生み出される。

加速チャンネル両壁の中間点における径方向磁束密度の軸方向分布を第4図に示す。チャンネル出口付近において磁束密度が大きく陽極に近づくにつれて小さくなる。こうして、チャンネル出口付近でプラズマを生成・加速させることによって、チャンネル壁面上でのイオン粒子・エネルギー

(a) 加速チャンネル壁の材質の影響 (THT-III-BN と THT-III-Mullite の比較)

(b) 加速チャンネル内の磁場形状の影響 (THT-III-BN と THT-III A-BN の比較)

第 5 図 放電電流と磁束密度 $B_{\max}$ の関係 (推進剤質量流量: 2 mg/s ; 放電電圧: 200 V)

損失を低減させる方針をとる。また、スラスタ THT-III A の磁場は磁気シールドの効果により THT-III のそれに比べて、よりチャンネル出口付近に磁力線が集中した、急峻な形状をもつ。THT-III A のチャンネル出口付近の最大磁束密度は THT-III のそれとほぼ同じであるが (この最大値を $B_{\max}$ と定義する)、それ以外のチャンネル内の領域では THT-III A の磁場が THT-III のそれよりかなり小さい。陽極付近では 3 分の 1 程度である。

陰極にはイオンテック社製ホローカソード HCN-252 を使用した。すべての作動条件において十分なエミッション電流が確保されることが確かめられている。

3. 実験結果と検討

測定された放電電流と推力より比推力と推進効率が見積もられた。その際、ホローカソードの作動ガス流量とホローカソードおよび磁気コイルで消費される電力はスラスタ本体のそれらと比較して小さいことから考慮しなかった。

3.1 加速チャンネル壁材質および磁場形状・強度の影響
放電電流と磁束密度 $B_{\max}$ の関係を第 5 図に示す。推進剤質量流量と放電電圧は一定で、それぞれ 2 mg/s と 200 V である。全体的な傾向として、磁場が強くなるにつれて放電電流は減少するが、その減少割合は小さくなっていく。特

に $B_{\max}$ が約 150 Gauss より大きい領域では放電電流はほとんど一定になる。これは磁力線を横切る方向 (軸方向) の電子の拡散メカニズムが変化するためと考えられる。すなわち、弱い磁場ではチャンネルバルク空間における古典拡散が支配的であるが、磁場が強くなるにしたがってボーム拡散の影響が強くなると推定される。磁場が十分強くなるとバルク空間での電気伝導は激減し、チャンネル壁による電子の散乱 (壁近傍の電気伝導) が支配的になると予想される (但し、チャンネル壁近傍の電気伝導の物理はほとんどわかってはいない)。

加速チャンネル材質による変化を比較すると、第 5 図 (a) より $B_{\max}$ が 100 から 150 Gauss 付近までは、ムライトを用いた THT-III-Mullite の放電電流が BN を用いた THT-III-BN のそれより大きい。これはチャンネル壁近傍の電気伝導がムライトと BN とで異なるためと考えられる。また、THT-III-BN では $B_{\max}$ 160 Gauss 付近で急激な放電電流の増加が見られ、それよりも強い磁場では材質の違いによる放電電流の差異がほとんど見られなくなる。これより、 160 Gauss 以上の強磁場ではチャンネル壁の材質によらない別の電気伝導現象が支配的になっていると予想される。

磁場形状の違いによる変化を比較すると、第 5 図 (b) より THT-III A-BN の放電電流は $B_{\max}$ 160 Gauss より強い磁場領域においても THT-III-BN で見られるような放電電流の大幅な上昇が起こらない。そして THT-III A-BN では 175 Gauss 程度まで放電電流はわずかに低下していくが、それを超えると放電が不安定になり、放電電流は一気に THT-III-BN のそれまで上昇する。弱磁場域では放電電流波形に電離不安定性に起因すると推定される 20 kHz の振動が現れるが、磁場が大きくなるにつれてこの振動の振幅は小さくなり、放電が不安定になる条件ではこの振動は全く消えてしまう。放電の不安定現象の原因は不明であるが、この電離不安定性やさらなる高周波振動を伴うプラズマ中の不安定現象に関係していると推測される⁴⁾。以上より、加速チャンネル出口付近に磁力線を集中させ磁場を強く、陽極付近における磁場を弱くすることによって、安定作動が可能な磁場の範囲が広がり、その結果放電電流をより小さくできることがわかった。

推力・比推力と磁束密度 $B_{\max}$ の関係を第 6 図に示す。THT-III-Mullite の推力・比推力は THT-III-BN のそれらと全く同じであり、加速チャンネルの材質による影響を受けないことがわかった。

磁場が強くなるとき、THT-III-BN の推力・比推力はほとんど一定であるが、THT-III A-BN のそれらは少しずつ低下していく。 $B_{\max}$ 175 Gauss 以下では THT-III A-BN の推力・比推力は THT-III-BN のそれらより大きい。THT-III A-BN では THT-III-BN に比べて加速チャンネル出口付近に極度に急峻な磁場が形成されているため、電離領域 (イオンの生成領域) がより狭く、より出口付近にあり加速チャンネル壁面でのイオン損失は少ないが、生成イオンの加速が磁力線の湾曲の影響を強く受け、磁場強度の増加と共にイオン軌道が変化し、すなわちイオン発散角が少し大

第6図 推力・比推力と磁束密度 $B_{\max}$ の関係 (推進剤質量流量: 2 mg/s; 放電電圧: 200 V, THT-III-BN と THT-III A-BN の比較)

第7図 推進効率と磁束密度 $B_{\max}$ の関係 (推進剤質量流量: 2 mg/s; 放電電圧: 200 V, THT-III-BN と THT-III A-BN の比較)

きくなると推定される。こうして、加速チャンネル出口付近の磁場を強くすることによって、効率よいイオン生成が可能であるが、イオン加速・噴出過程においては磁力線の湾曲など詳細な磁場構造を考慮したその最適化が必要であると考えられる。

推進効率と磁束密度 $B_{\max}$ の関係を第7図に示す。THT-III-Mullite の推進効率は $B_{\max}$ 160 Gauss 以下の作動において THT-III-BN のそれより小さく、加速チャンネル壁の材質としてムライトより BN が望ましいことがわかった。

磁場形状の違いによる変化では、THT-III A-BN が THT-III-BN と比較して高い推進効率を示している。THT-III A-BN では $B_{\max}$ 110 ~ 175 Gauss において比較的高い推進効率が得られ、その範囲よりも磁束密度が大きくても小さくても効率は低下している。これは弱磁場域では放電電流が大きい、強磁場域では推力が低下するためである。また、THT-III A-BN は THT-III-BN のような急激な放電電流の増加が生じないため、最適作動点近傍のフラットな領域が比較的広い。実機として使用する際に磁場コイル電流の制御が容易であるというメリットを備えている。

以上の結果より、加速チャンネル壁の材質が推進性能に与える影響は次のように解釈できる。ムライトを用いた場合の放電電流が BN を用いた場合のそれより弱磁場域で大き

い理由は、推力 (イオン電流に相当) がチャンネル壁の材質に依存しないことより、逆流電流 (陰極から陽極へ流れる電子電流、放電電流はこの逆流電流と放出されるイオン電流を中和するための電子電流の和である) が大きいためと考えられる。この逆流電流はチャンネルバルク空間における電子電流とチャンネル壁のごく近傍における電子電流に分けることができるが、後者の伝導性 (Near Wall Conductivity) にチャンネル材質が大きな影響を及ぼしていると推測される。ムライトは BN と比較して熱伝導率が悪い (ムライトと BN の熱伝導率はそれぞれ $0.012 \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$ と $0.18 \text{ cal/cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C}$ である) チャンネル壁表面が高温に加熱され、2 次電子放出係数 (電子温度 20 ~ 40 eV の場合、常温では両材料の係数は 1 前後であるが、融点近くでそれらは爆発的に大きくなる) が上昇する。2 次電子放出が盛んに行われることにより壁近傍のシーす状態が変化し、壁近傍において高い電気伝導がなされ、逆流電流が大きくなると推定される (もしくは、ムライトの融点 ($1,400^\circ\text{C}$) は BN のそれ ($2,200^\circ\text{C}$) より十分低いので、チャンネル壁面はほとんど溶融状態にあり、電気伝導性が増加すると推測される)。

こうして、加速チャンネルのセラミックスの材質は放電電流特性に影響を与え、チャンネル内の磁場形状は推力特性に影響を与える。放電電流を小さく抑えるにはチャンネル壁として BN を使用し、磁場形状としてはチャンネル出口付近に急峻な強い磁場を印加し陽極付近の磁場を弱くすることによって、より高い推進性能が得られることがわかった。

3.2 放電電圧による変化 前節 3.1 の結果より、最も良好な推進性能が得られたスラスト THT-III A-BN を用いた。推進剤質量流量は一定で、2 mg/s である。まず、放電電圧 200, 300, 400, 500 V の 4 つの値において推進効率を最大にする最適磁束密度 B_{opt} を調べた。その結果、それらの値はすべて 150 Gauss 付近にあったので磁束密度を $B_{\max}$ 150 Gauss に固定し、放電電圧を 80 ~ 200 V まで変化させた。すなわち、推進剤流量一定のとき最適磁束密度の放電電圧依存性は弱い。その放電電圧に関する作動特性を第8図に示す。

第8図 (a) より、放電電圧 100 V 以下の領域では放電電圧の増加と共に放電電流が急上昇する。これは放電電圧の上昇に伴って推進剤の電離が急激に進むためである。放電電圧 100 ~ 130 V の領域では電流増加率が負になる。これは放電電圧の上昇と共に逆流電流が低下する (チャンネルバルク空間における電気伝導 (電子生成・拡散) 状態が変化するためと考えられる。放電電圧 130 ~ 500 V の領域では放電電流値の変化はほとんどなく、ほぼ定電流特性を示している。このとき推進剤はほぼ完全電離状態にあると推測され、スラストはこの放電電圧領域にて運転される。

推力、比推力は第8図 (b) より、放電電圧の増加と共に上昇する。これは放電電圧 100 V 以下の領域ではイオンの活発な生成と共にイオンの加速が始まり、放電電圧 100 V 以上の領域では実質的なイオンの加速電圧が上昇するためと考えられる。本作動範囲内では最大推力 45 mN、比推力

(a) 放電電流と放電電圧の関係

(b) 推力・比推力と放電電圧の関係

(c) 推進効率と放電電圧の関係

第 8 図 THT-III A-BN の作動特性 (推進剤質量流量: 2 mg/s; 磁束密度 $B_{\max}$: 150 Gauss)

2,250 秒が得られた。理想的な静電加速においては加速電圧の平方根に推力・比推力が比例する (イオン速度が比例する) が、本推力・比推力特性は零から 80 V 程度ずれてこの電圧を差し引いた値の平方根に比例することがわかる。すなわち、80 V 程度はイオンの加速には寄与せず、両電極の電圧降下、電離やチャンネル壁面損失などに相当すると推定される。

第 8 図 (c) より、推進効率は放電電圧の上昇と共に増加し、放電電圧 400 V において最も高い推進効率を得られるが、その後 500 V にかけて緩やかに低下している。これは放電電圧 500 V の作動において僅かに放電電流が増加する

第 9 図 THT-III A-BN の最適磁束密度と推進剤質量流量の関係 (放電電圧: 200 ~ 500 V)

ためである。この放電電流の増加は 2 価電離イオンの増加によると推定される。ホールスラストの噴出ブルーム中には多価電離イオンが含まれていることが観測されており、その割合は放電電圧の上昇と共に増加すると考えられる¹³⁾。推進剤キセノンを 2 価電離させるには高い電離エネルギーを必要とし、エネルギー損失が放電電圧の増加と共に増える。こうして、推進効率は放電電圧に関して極大値をもつと推定される。放電電圧 400 V のとき比推力 2,000 秒、推進効率 42.7% が達成された。この性能は SPT などの諸外国のホールスラストと比較しても遜色ないものである。

なお、ムライト系セラミックスを加速チャンネル壁に使用した THT-III-Mullite において放電電圧を 200 V 以上に設定すると、チャンネル壁の赤熱、溶融、割れなどの現象が生じた。もちろん、チャンネル壁に BN を用いた場合はこのような現象は起きなかった。これはムライト系セラミックスの熱伝導性と耐熱性の悪さが原因であると推定され、前節 3.1 のチャンネル壁の材質に関する解釈を裏付けるものである。

3.3 推進剤流量の影響 推進剤質量流量を 1 ~ 3 mg/s、放電電圧を 200 ~ 500 V の範囲で変化させて作動実験を行った。磁場の強さはすべて最適磁束密度 B_{opt} に設定された。すなわち、ある推進剤流量、放電電圧のもとで磁気コイルに流す電流を変化させながら推進効率を最大にするコイル電流値を調べ、そのコイル電流において放電電流・推力の測定を行った。

最適磁束密度と推進剤質量流量の関係を第 9 図に示す。縦軸の最適磁束密度はすべての放電電圧における平均値を表している。推進剤流量の増加に伴い最適磁束密度は増加する。これは推進剤流量の増加と共に加速チャンネル内の中性粒子密度が大きくなり電子-中性粒子衝突による電子拡散が盛んになり、逆流電流の増加を抑えるために、より強い磁場が必要になるためと考えられる。

放電電流と推進剤質量流量の関係を第 10 図に示す。縦軸の放電電流はすべての放電電圧における平均値を表している。推進剤流量の上昇に伴い放電電流も上昇し、ほぼ比例関係にあることがわかる。

第10図 THT-III A-BN の放電電流と推進剤質量流量の関係 (放電電圧: 200 ~ 500 V; 磁束密度 $B_{\max}$: 最適磁束密度 B_{opt})

第12図 THT-III A-BN の推進効率と推進剤質量流量の関係 (放電電圧: 200 ~ 500 V; 磁束密度 $B_{\max}$: 最適磁束密度 B_{opt})

(a) 推力

(b) 比推力

第11図 THT-III A-BN の推力, 比推力と推進剤質量流量の関係 (放電電圧: 200 ~ 500 V; 磁束密度 $B_{\max}$: 最適磁束密度 B_{opt})

推力, 比推力と推進剤質量流量の関係を第11図に示す。推力は推進剤流量にほぼ比例している。一方, 比推力は放電電圧 200 ~ 400 V の範囲では推進剤流量の影響を受けずほぼ一定である。本作動条件において推力は 12 ~ 68 mN, 比推力は 1,200 ~ 2,300 秒の広い範囲がカバーされる。これより, 推進剤流量の変化がイオンの生成・加速に及ぼす影響は少ないと推定される。放電電圧 500 V においてのみ, 推進剤流量が小さいとき比推力が低下する傾向がある。これは放電電圧 (イオンの加速電圧) の上昇に伴って加速チャンネル内のプラズマ密度が減少し, 低推進剤流量では推進

剤の電離衝突頻度が極度に低下し, 推進剤の利用効率が低くなったと推察される。

推進効率と推進剤質量流量の関係を第12図に示す。放電電圧 200 ~ 400 V では推進効率は推進剤流量の影響をあまり受けずほぼ一定で, 30 ~ 45% の範囲にある。放電電圧 500 V, 低推進剤流量では推進効率が低下する。

こうして, ホールスラストは高性能を維持できる作動可能な推進剤流量の範囲が広いことがわかった。ホールスラストの放電電流は推進剤流量とほぼ比例するため, 投入電力一定の条件のもとで作動を行う際にも, 推進剤流量を調節することで放電電流値を変化させ, その結果放電電圧を様々な値に設定できる。つまり, 推進剤流量を大きく (放電電流を大きく) 放電電圧を小さく設定して作動させると高推力モード, 推進剤流量を小さく (放電電流を小さく) 放電電圧を高く設定して作動させると高比推力モードというように, ミッションに応じて柔軟な使い分けが可能となる。

3.4 入力電力による変化 第11図と第12図を書き直し, 横軸に投入電力をとり整理したものを第13図と第14図に示す。推力と比推力は共に推進剤流量一定では投入電力の増加に伴って単調に増加するが, 高電力作動においてはその上昇割合は鈍る。推進効率も同様な傾向を示し, 特に高電力においては効率の低下が現れる。すなわち, 過度の電力投入は電力損失を招くことがわかる。結果として, 本作動範囲は投入電力 250 ~ 1,800 W になった。

4. ま と め

低電力ホールスラスト THT-III シリーズ (THT-III-Mullite, THT-III-BN, THT-III A-BN) の作動実験を行い, 加速チャンネル壁の材質, チャンネル内の磁場の形状・強さが性能特性に与える影響を調べた。放電電圧と推進剤キセノンの質量流量を変化させ放電電流と推力を測定し, 比推力と推進効率を評価した。

基本作動特性を調べた結果, 推進剤流量と放電電圧一定のもとでは推進効率を最大にする加速チャンネル内の最適磁場強度が存在した。その値の放電電圧への依存性は小さいが, 推進剤流量の増加と共に大きくなった。推進剤流量

(a) 推力

(b) 比推力

第 13 図 THT-III A-BN の推力, 比推力と投入電力の関係 (推進剤質量流量: 1 ~ 3 mg/s; 磁束密度 $B_{\max}$: 最適磁束密度 B_{opt})

第 14 図 THT-III A-BN の推進効率と投入電力の関係 (推進剤質量流量: 1 ~ 3 mg/s; 磁束密度 $B_{\max}$: 最適磁束密度 B_{opt})

一定で最適磁場の印加時, 放電電圧の上昇と共に推力, 比推力, 推進効率は増加した。一方, 放電電圧 130 ~ 500 V の範囲において, 放電電流はほぼ定電流特性を示した。推進剤質量流量 1 ~ 3 mg/s の範囲で変化させてもこの作動特性の傾向はほとんど変わらなかった。このとき投入電力は 250

~ 1,800 W となり, 推進効率 30% 以上を維持することができた。

加速チャンネル壁の材質に BN を用いるとムライトを用いた場合に比べて放電電流が小さく抑えられ, さらにチャンネル内の磁場をチャンネル出口付近で強く陽極付近で弱くし, すなわち急峻な磁場を印加したとき高推力が得られ, 推進性能が向上することがわかった。これらの効果はそれぞれ, BN とムライトの熱伝導, 2 次電子放出特性に関係したチャンネル壁近傍の電気伝導現象の差異と, 磁場形状の違いによるチャンネルバルク空間でのイオン生成・加速過程の差異によって説明することが可能であった。代表的な性能として, 推進剤質量流量 2 mg/s, 放電電圧 400 V, 放電電流 2.27 A, 投入電力 908 W 時に, 推力 39.3 mN, 比推力 2,000 sec, 推進効率 42.7% が得られ, SPT などの諸外国のホールスラスタと比較しても遜色ないものであった。

参 考 文 献

- 1) Kim, V., Popov, G., Arkhipov, B., Murashko, V., Gorshkov, O., Koroteyev, A., Garkusha, V., Semkin, A. and Tverdokhlebov, S.: Electric Propulsion Activity in Russia, 27th IEPAC, Pasadena, IEPAC Paper 01-005, 2001.
- 2) Dunning, J. W., Benson, S., Jr. and Oleson, S.: NASA's Electric Propulsion Program, 27th IEPAC, Pasadena, IEPAC Paper 01-002, 2001.
- 3) Cadiou, A., Gelas, C., Darnon, F., Jolivet, L. and Pillet, N.: An Overview of the CNES Electric Propulsion Program, 27th IEPAC, Pasadena, IEPAC Paper 01-008, 2001.
- 4) Kadomtsev, B. B. and Shafranov, V. D.: Reviews of Plasma Physics, Vol. 21, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2000, pp. 203-391.
- 5) Zhurin, V. V., Kaufman, H. R. and Robinson, R. S.: Physics of Closed Drift Thrusters, Proceedings of the 25th IEPAC, Cleveland, Vol. 2, 1997, IEPAC Paper 97-191, pp.1175-1182.
- 6) Kim, V.: Main Physical Features and Processes Determining the Performance of Stationary Plasma Thrusters, J. Propul. Power, **14** (1998), pp.736-743.
- 7) Prioul, M., Bouchoule, A., Roche, S., Magne, L., Pagnon, D. and Lasgorceix, P.: Insights on Physics of Hall Thrusters through Fast Current Interruptions and Discharge Transients, 27th IEPAC, Pasadena, IEPAC Paper 01-059, 2001.
- 8) Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Hall Current Ion Thruster Performance, J. Propul. Power, **8** (1992), pp. 1212-1216.
- 9) Tahara, H., Mitsuo, K., Goto, D., Yasui, T. and Yoshikawa, T.: Operating Characteristics of Low Power Hall Thrusters, 22nd International Symposium on Space Technology and Science, Morioka, ISTS Paper 2000-b-36p, 2000.
- 10) Tahara, H., Nikai, Y., Yasui, T. and Yoshikawa, T.: Hall Thruster Research at Osaka University, AIAA Paper 99-2570, 1999.
- 11) Tahara, H., Goto, D., Yasui, T. and Yoshikawa, T.: Thrust Performance and Plasma Characteristics of Low Power Hall Thrusters, 27th IEPAC, Pasadena, IEPAC Paper 01-042, 2001.
- 12) 田原弘一, 白崎篤司, マヌエルマルチネスサンチェス: ホールスラスタ流れ場の一次元計算, 日本航空宇宙学会論文集, 投稿中.
- 13) Gallimore, A. D.: Near- and Far-Field Characterization of Stationary Plasma Thruster Plumes, J. Spacecraft Rockets, **38** (2001), pp. 441-453.