

アノードレイヤ型ホールスラスタの作動特性*1

Operating Characteristics of an Anode Layer Type Hall Thruster

山本直嗣*2・中川貴史*2,*3・小紫公也*4・荒川義博*2
Naoji YAMAMOTO, Takafumi NAKAGAWA, Kimiya KOMURASAKI and Yoshihiro ARAKAWA

Key Words: Electric Propulsion, Hall Thruster, Anode Layer, Hollow Anode

Abstract: Thrust performance and stable operation conditions of an anode layer type Hall thruster was investigated using a 1.5 kW class anode layer type Hall thruster. The thrust efficiency reached at 53% with the specific impulse of 2,000 s, which are competitive with these of SPT-100 thrusters. Anode shape and axial position of the anode were changed. Stability of the discharge was found sensitive to the anode configuration and applied magnetic flux density.

1. はじめに

ホールスラスタは、マグネティックレイヤ型とアノードレイヤ型の2種類に分類される¹⁾。マグネティックレイヤ型の特徴は加速チャンネル長さが加速チャンネル幅よりも長く、チャンネル壁はセラミックで絶縁されている。一方アノードレイヤ型はチャンネル長さがチャンネル幅よりも短く、チャンネル壁は導電体でできており、陰極電位に保たれている¹⁾。このチャンネル壁は磁極を守るためガードリングと呼ばれ、耐スパッタ性に優れたC/CやSUSで作られており、そのためマグネティックレイヤ型よりも寿命は長いと考えられている。チャンネル壁が陰極電位に保たれているために電子は壁と衝突せず陽極に向かい、陰極と陽極の電位差は陽極近傍の薄い層に集中して現れる。この薄い層はアノードレイヤと呼ばれその厚さは電子のサイクロトロン半径のオーダーであり、イオンの加速はほとんどその中で行われると考えられている。壁面との衝突による電子のエネルギーロスがないため電子温度は高く²⁾、電離しにくい酸素やアルゴンでもある程度の性能が期待できる。また、例として同じパワーレベルのアノードレイヤ型スラスタ(D-55)とマグネティックレイヤ型スラスタ(SPT-100)では、チャンネル外径がそれぞれ75 mmと100 mmと、アノードレイヤ型のほうがサイズは一回り小さい³⁾。これも衛星に搭載する上で利点となる。一方、安定な作動範囲が狭いという欠点もある。この安定作動範囲を広げる指針を得ることはアノードレイヤ型ホールスラスタ実用化のために不可欠である。この作動安定性にホローアノード⁴⁾と呼ばれる陽極形状が寄与しているといわれている。またホローアノードを使用することによって、陽極の過熱を防ぎ効率

的な電離が得られるという報告もある^{3,4)}。しかしこのホローアノード内部の物理に関してはまだわからないことが多く、作動安定性との関係はわかっていない。

そこで本研究の目的は、1.5 kW級のアノードレイヤ型ホールスラスタを製作し、その推進性能を測定し性能を評価することと、安定作動に陽極形状が与える影響を調べることである。さらに陽極形状の推進性能に及ぼす影響も調べる。

2. 実験装置

2.1 アノードレイヤ型ホールスラスタ 製作したアノードレイヤ型ホールスラスタ断面図及び回路図を第1図に示す。加速チャンネルの寸法は外径72 mm、内径48 mmであり、外径は62 mmに変更可能である。スラスタ中心部のソレノイドコイルと軟鉄で作られた磁極によって加速チャンネル内に半径方向の磁場が印加されており、コイルに流す電流を変化させ、加速チャンネル内に印加する磁束密度の大きさを調整した。磁束密度の周方向分布を均一にするためにソレノイドコイルは中心部のみに配置した⁵⁾。磁束密度の軸方向分布はスラスタ出口上流1 mmで最大になるように設計されているが、陽極までは数ミリしかないので加速チャンネル内では磁束密度の軸方向分布はほぼ一様である。一方径方向には磁束は一定なので、磁束密度は加速チャンネルの内側壁面で最大となり、外側に行くに従って減少するので、本研究ではチャンネル壁面の中間点における磁束密度を代表値として用いた。イオンによるスパッタリングから磁極を守るガードリングはステンレスでできており、陰極と結線され陰極電位に保たれている。ガードリングと陽極の間には1 mmの隙間がある。陽極は内側と外側の2つの環状リングで構成され、その間を推進剤が流れるホローアノードとなっている。陽極の位置は1 mm間隔で変えられる機構とした。また部品を交換することによって、ホローアノードの流路幅も変更できる。推進剤にはキセノンを用いた。

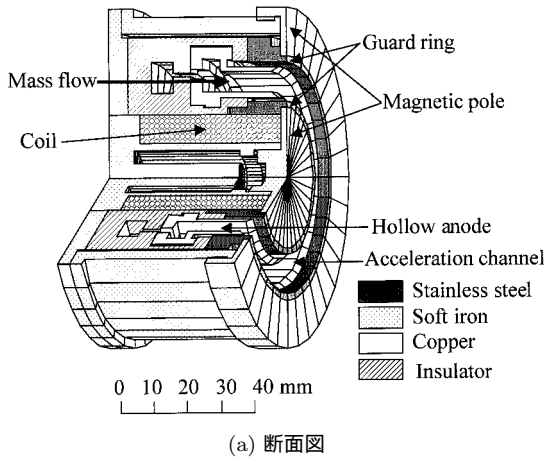
*1 © 2003 日本航空宇宙学会

平成14年10月28日原稿受理

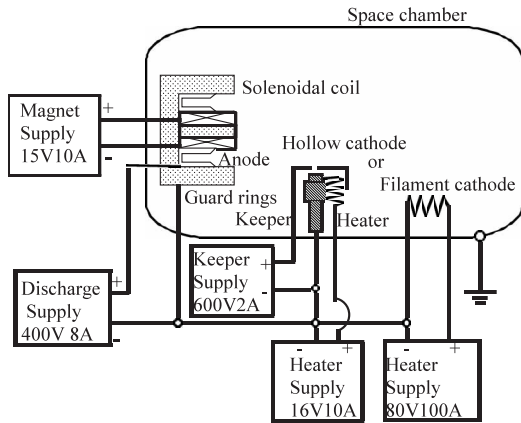
*2 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻

*3 現三菱電機(株)

*4 東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻



(a) 断面図



(b) 回路図

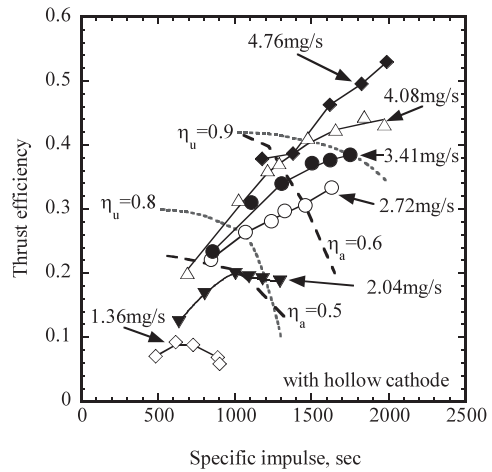
第1図 スラスタ断面図と回路図

陰極にはホローカソード (ION TECH 社製 HC252) を使用した。作動ガスにはキセノンを用い、作動ガス流量は 0.272 mg/s に固定した。しかし安定作動範囲を求める実験においてはホローカソードそれ自身がノイズ源であるために好ましくない^{6,7)}、フィラメントカソード (ϕ 0.45 mm \times 300 mm L \times 3, 2% thoriated tungsten) を用いた。

2.2 実験設備 スラスタの作動実験は直径 2 m, 長さ 3 m の真空チャンバで行った。真空ポンプの排気速度は空気で 3.0×10^4 l/s であり、到達圧力は 4.5×10^{-4} Pa でスラスタ作動時圧力は 7.3×10^{-3} Pa 以下であった。推力の測定には振り子式スラストスタンド⁸⁾を用いた。このスラストスタンドの測定誤差は 1 mN 以下に保たれた。イオンビーム電流は直径 5 mm のイオンコレクタをスラスタ中心軸を含む平面上で一定半径 500 mm の円弧状に掃引し、これを積分して求めた。

3. 結果及び考察

3.1 推進性能 推力の測定より比推力及び推進効率 η_t を見積り、イオンビーム電流の測定より以下の式で表される推進剤利用効率 η_u と加速効率 η_a を見積もった⁹⁾。



第2図 推進性能

第1表 スラスタの性能比較

	Anode layer thruster Univ. of Tokyo	PPS1350	SPT-100
Power, W	1,700	1,500	1,700
Thrust, mN	93	90	101
I_{sp} , s	1,900	1,740	1,840
Thrust efficiency	0.50	0.51	0.52

$$\eta_t = \frac{F^2}{2\dot{m}V_d I_d}$$

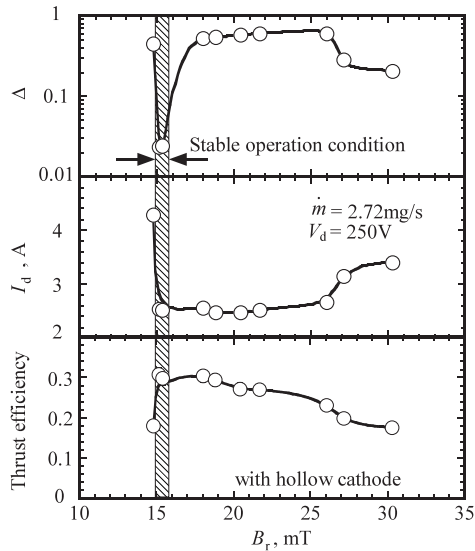
$$\eta_u = \frac{M I_b}{e \dot{m}}$$

$$\eta_a = \frac{I_b}{I_d}$$

(1)

ただし M はイオン質量, I_b はイオンビーム電流, e は素電荷, \dot{m} は推進剤の質量流量, I_d は放電電流を表している。

第2図にチャンネル外径 72 mm での推進性能を示す。比推力の増加に伴い、推進効率は増加している。また推進剤流量を増加させるに従い比推力及び推進効率は増加する。これらの主な要因は推進剤利用効率 η_u と加速効率 η_a の向上によるものと思われる。推進剤流量 $\dot{m} = 4.76$ mg/s, 放電電圧 $V_d = 350$ V で効率は 0.53, このとき比推力は 2000 s を得た。陰極流量, 陰極消費電流, コイル消費電力を考慮に入れると、これは比推力 1900 s, 効率 50% となる。第1表に代表的なマグネティックレイヤ型ホールスラスタでほぼ同じ出力である PPS1350 と SPT-100 の 350 V での推進性能を示す^{10,11)}。本スラスタはこれらのホールスラスタと同等の性能が得られている。実験室の排気系の容量より 4.76 mg/s 以上の推進剤流量では実験は行わなかったが、真空チャンバの排気性能が向上すれば \dot{m} のさらなる増加は可能であると考えられる。しかし外径 62 mm に変えて \dot{m} を 3.40 mg/s 以上で作動させると、磁束密度を増加させても放電電流が抑制できなくなる現象が見られた。このように推進剤流量には上限が存在する。一方アノードレイヤ型ホールスラスタである程度の性能が得られる推進剤流量密度の下限は 0.136 mg/s/cm² といわれていることと比較すると¹²⁾、本スラスタの推進剤流量の下限は妥当である。



第 3 図 振動の大きさと放電電流と推進効率

3.2 安定作動範囲 振動の大きさを表す指標としては以下の式で定義される指標 Δ を用いた。 τ は測定時間で本研究では 5 ms とした。

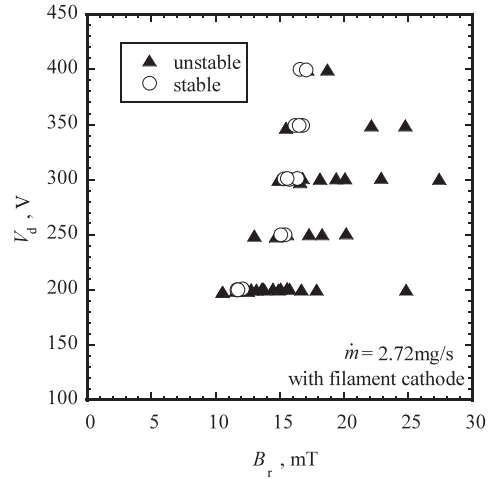
$$\Delta = \frac{\text{R.M.S}}{\bar{I}_d} = \frac{1}{\bar{I}_d} \sqrt{\frac{\int_0^\tau (I_d - \bar{I}_d)^2}{\tau}},$$

$$\left(\bar{I}_d = \frac{\int_0^\tau I_d}{\tau} \right) \quad (2)$$

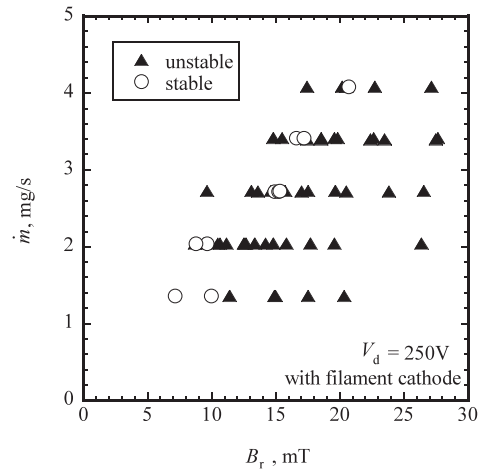
振動が存在することと不安定であることは同意義ではないが、振動が成長して作動が停止することより、振動の大きさは安定性の指標となりうる⁷⁾。

作動点を定める上で、推進効率と共に安定性も重要な要素である。第 3 図に同じくチャンネル外径 72 mm で加速チャンネルに印加している半径方向磁場の磁束密度 B_r を変化させたときの振動の大きさ Δ と放電電流と推進効率を示す。アノードレイヤ型ホールスラスタの安定性は B_r に対して非常に敏感で、安定な B_r の範囲は非常に狭い。 B_r が 18 mT 近辺の幅 1 mT の作動範囲でのみ振動の大きさ Δ が 0.05 以下と抑えられている領域が存在する。 B_r が 15 mT 以下の低い範囲でも振動は抑えられるが、放電電流が 6 A 以上流れ、電子電流が増大するために加速効率が低下し、推進効率が低下する。よって $B_r = 18$ mT 近辺の非常に狭い作動範囲で作動させなければならない。 $B_r = 20$ mT 印加した状態では振動が大きくなるが、放電電流が抑制されるため推進性能は最大となる。さらに B_r を増加させても、放電電流はほとんど減少せず、また振動は激しくなり、推力も低下するために推進効率は低下する。

さらに B_r を増加させると作動形態が遷移する。この条件では $B_r = 32$ mT で遷移が起こり、この条件ではある程度振動が抑えられているが、放電電流が増加し、性能は低下する。これは低い B_r での作動ではみられなかった周波数



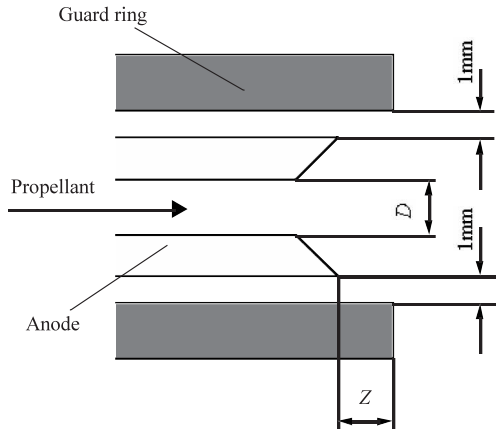
第 4 図 放電電圧と安定作動領域



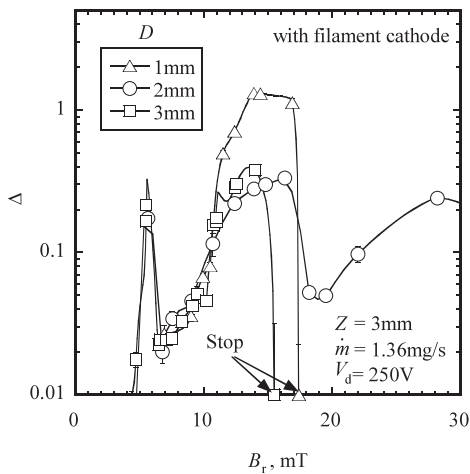
第 5 図 推進剤流量と安定作動領域

数 MHz のプラズマ振動が現れ、その影響で電子の拡散が促進したためと考えられる¹³⁾。 \dot{m} を減少させるなど作動条件を変えると、この遷移が起こらずに作動が停止する。このように作動に適した B_r の範囲は非常に狭い。安定な B_r の範囲は、 \dot{m} や V_d 、加速チャンネル形状によって変わることが示唆されている⁷⁾。そこで $\dot{m} = 2.72$ mg/s に固定して V_d と B_r を変化させたときの作動状態を第 4 図に、 $V_d = 250$ V に固定して \dot{m} と B_r を変化させたときの作動状態を第 5 図に示す。は振動の大きさ Δ が 0.05 以下の作動点、は振動の大きさ Δ が 0.05 以上の作動点を示す。モデルが示唆する通り、 \dot{m} を増加させるに伴い安定な B_r は増加する。また V_d を増加させると安定な B_r は変化する。

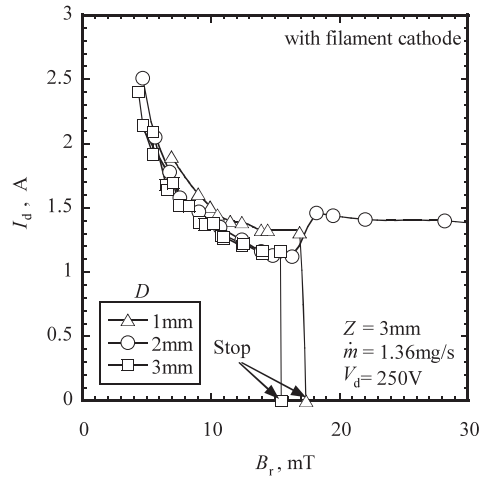
3.3 ホローアノード形状と安定性 第 6 図に示すように陽極とガードリング間の距離を 1 mm に保ったまま陽極位置及び陽極流路幅を変え、それぞれの形状ごとに振動の大きさを測定し比較した。以下では陽極位置を陽極先端とチャンネル出口の距離 Z で表すこととする。また陽極流路幅を第 6 図のように D と定義する。ホローアノードの形状を保ちながら D と Z を変えることができるように、加速チャンネル外径を 62 mm に変更した。



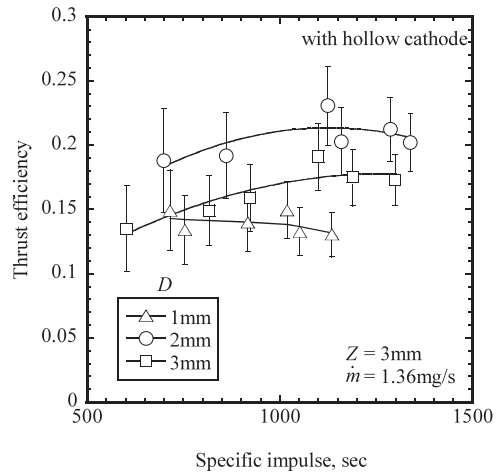
第6図 陽極部拡大図



第7図 陽極流路幅と振動の大きさ



第8図 陽極流路幅と放電電流



第9図 陽極流路幅と推進性能

3.3.1 陽極流路幅の影響 $V_d = 250\text{ V}$, $\dot{m} = 1.36\text{ mg/s}$, $Z = 3\text{ mm}$ に固定し D を変えて安定性がどのように変化するのか調べた。 D を変えたときの振動の大きさと放電電流をそれぞれ第7図, 第8図に示す。安定な作動範囲は D を変えてもそれほど変わらない。また B_r が 10 mT 以上の大きい作動点では他と比較して $D = 1\text{ mm}$ では振動が大きく不安定になっていることがわかる。 $D = 1\text{ mm}$ の放電電流は $D = 2\text{ mm}$, $D = 3\text{ mm}$ と比較すると放電電流は大きい。また $D = 1\text{ mm}$, $D = 3\text{ mm}$ では B_r を大きくしていくとある B_r で作動が停止してしまうが、 $D = 2\text{ mm}$ では $B_r = 16\text{ mT}$ で振動は抑制されるが放電電流は増加する作動形態に変わる。 $D = 2\text{ mm}$ では作動停止が起きないという観点から他と比較して安定であるといえる。

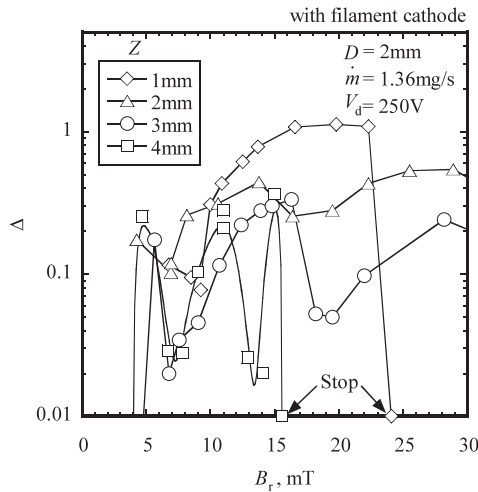
第9図に D を変えたときの推進性能を示す。安定かつ放電電流が最小になるように B_r を選んだ。 $D = 2\text{ mm}$ では推力が大きく、放電電流が少ないため最も推進性能がいい。

安定性や推進性能にはホローアノード内でのプラズマ生成領域の広がり、及びそれに付随する電子電流の陽極への流入面積が大きく影響すると考えられる¹⁾。これらが D によって変わるために安定性や推進性能に違いが生じたと思われる。

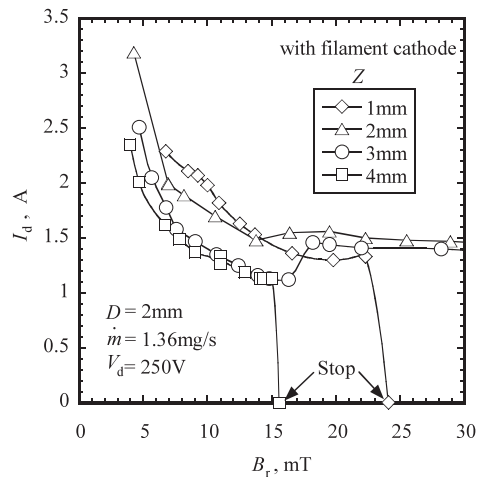
3.3.2 陽極位置の影響 $V_d = 250\text{ V}$, $\dot{m} = 1.36\text{ mg/s}$, $D = 2\text{ mm}$ に固定し、陽極位置 Z を変化させたときの振動の大きさと放電電流をそれぞれ第10図, 第11図に示す。 $Z = 1\text{ mm}$, 2 mm では振動の大きさ Δ が 0.05 以下の安定作動点はない。また $Z = 4\text{ mm}$ では、 B_r が $5 \sim 10\text{ mT}$ にある安定作動範囲は $Z = 3\text{ mm}$ よりも狭い。しかし $Z = 4\text{ mm}$ では $B_r = 14\text{ mT}$ に安定作動点が存在する。この B_r の大きい安定作動点はいつも存在するとは限らず V_d , \dot{m} などによる。また $Z = 4\text{ mm}$ では $B_r = 15\text{ mT}$ で $Z = 1\text{ mm}$ では $B_r = 23\text{ mT}$ で作動が停止するが、 $Z = 2\text{ mm}$, $Z = 3\text{ mm}$ では作動状態が遷移し、第3図と同様にこの遷移のち振動は抑制されるが放電電流は増加する。

放電電流は Z を増加させる、すなわち陽極位置を上流側に動かすごとに減少している。

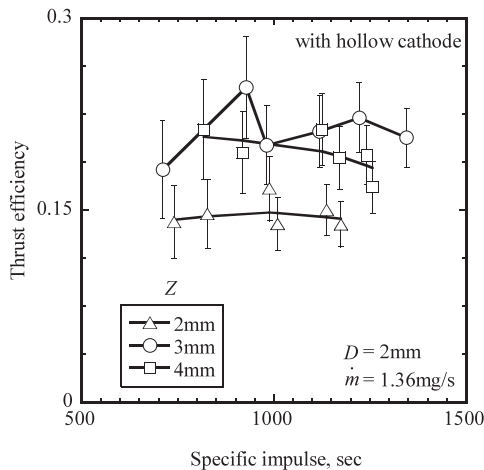
第12図に $\dot{m} = 1.36\text{ mg/s}$, $D = 2\text{ mm}$ に固定して、 Z を変化させたときの推進性能を示す。 B_r は作動が安定で I_d が最小になるように設定した。 $Z = 2\text{ mm}$ は $Z = 3\text{ mm}$, $Z = 4\text{ mm}$ と比較すると推進性能は低い。これは推力が低く、 I_d が大きいためである。このように Z の最適値が存在するのはマグネティックレイヤ型と同様の理由によるもの



第 10 図 陽極位置と振動の大きさ



第 11 図 陽極位置と放電電流



第 12 図 陽極位置と推進性能

と思われる^{14, 15)}。

3.3.3 陽極形状と安定作動 陽極形状が安定作動範囲に及ぼす影響をまとめるために $\dot{m} = 1.36 \text{ mg/s}$ に固定し陽極形状すなわち陽極流路幅 D と陽極位置 Z を変化させた。安

第 2 表 スラスタ安定作動磁束密度範囲 ($V_d = 200 \text{ V}$), B_r , mT

D	Z			
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm
1 mm	—	—	≤ 8	7 ~ 10
2 mm	—	—	≤ 14	≤ 14 , 16 ~ 19
3 mm	≤ 5	≤ 6	7 ~ 13	≤ 12 , 14 ~ 16

第 3 表 スラスタ安定作動磁束密度範囲 ($V_d = 250 \text{ V}$), B_r , mT

D	Z			
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm
1 mm	—	—	7 ~ 10	7 ~ 8
2 mm	—	—	≤ 5 , 7 ~ 10	≤ 4 , 6 ~ 9, 13 ~ 14
3 mm	—	≤ 7	≤ 5 , 6 ~ 10	≤ 4 , 7 ~ 10

第 4 表 スラスタ安定作動磁束密度範囲 ($V_d = 300 \text{ V}$), B_r , mT

D	Z			
	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm
1 mm	—	—	≤ 8	≤ 8
2 mm	—	≤ 6 , 7 ~ 8	≤ 9	≤ 9 , 14 ~ 15
3 mm	—	≤ 7	≤ 8	7 ~ 9

定作動点の判断基準は $\Delta \leq 0.05$ とした。また B_r の小さい作動範囲に安定な作動領域が存在したが、放電電流が大きく加速効率が低下し推進効率が低下するためこのような作動点は現実的でなく考慮しなかった。

第 2 表に $V_d = 200 \text{ V}$ 、第 3 表に $V_d = 250 \text{ V}$ 、第 4 表に $V_d = 300 \text{ V}$ での安定に作動する B_r の範囲を示す。は安定作動がないことを表す。 D と Z を変化させることにより安定作動範囲は変化している。 D が狭く、 Z の小さい $D1Z1$ 、 $D2Z1$ 、 $D1Z2$ ではこれらの V_d の作動範囲では振動の小さい安定作動点は見られなかった。 $V_d = 100 \text{ V}$ ではこれらの陽極形状でも安定作動点は存在した。また $V_d = 350 \text{ V}$ 、 400 V での安定作動範囲は 300 V での安定作動範囲とほぼ同じであった。

Z が 3 mm より大きな陽極形状では D によらず安定作動範囲は存在している。そこでホローアノードの効果を調べるために、 $\phi 1 \text{ mm}$ の小孔が 36 個開いた円柱陽極を $Z = 3 \text{ mm}$ に設置して作動させたが、安定作動を得ることができなかった。これよりホローアノードが安定性に影響を及ぼしていることが確認された。また $D = 1 \text{ mm}$ では $Z = 3 \text{ mm}$ 、 4 mm で安定作動点が存在するが、第 8 図 ($Z = 3 \text{ mm}$) と同様に $D1Z4$ でも $D2Z4$ 、 $D3Z4$ と比較すると放電電流が大きく、第 9 図と同様に推進効率は低い。しかし $D = 2 \text{ mm}$ と $D = 3 \text{ mm}$ では推進性能のよい安定作動範囲にそれほど差異は見られなかった。

4. ま と め

アノードレイヤ型ホールスラストを製作し安定作動に成功した。アノードレイヤ型ホールスラストの安定性は磁束密度の変化に対して敏感であった。また推進性能を測定したが、推進効率 η は53%に達し、このとき比推力は2000 sであった。これは同出力のマグネティックレイヤ型ホールスラスト SPT-100 の性能と比肩できるものである。アノードレイヤ型ホールスラストの安定性にはホローアノードが寄与しており、さらにこのホローアノードの形状(軸方向位置・陽極流路幅)が、放電安定性及び推進性能に影響を及ぼしている。特に陽極位置に関して敏感であることがわかった。

参 考 文 献

- 1) Zhurin, V. V., Kaufman, H. R. and Robinson, R. S.: Physics of Closed Drift Thrusters, *Plasma Sources Sci. Technol.*, **8** (1999), pp. R1–R20.
- 2) Choueiri, E. Y.: Fundamental Difference between the Two Hall Thruster Variants, *Phys. Plasmas*, **8**, 11 (2001), pp. 5025–5033.
- 3) Garner, C. E., Brophy, J. R., Polk, J. E., Semenko, A. V., Garlusha, V. I., Tverdokhlebov, S. O. and Marrese, C.: Experimental Evaluation of Russian Anode Layer Thrusters, *AIAA Paper* 94-3010, 1994.
- 4) Semenko, A., Kochergin, A., Garkusha, V., Chislov, G., Rusakov, A., Tverdokhlebov, S. and Sota, C.: RHETT/EPDM Flight Anode Layer Thruster Development, *IEPC Paper* 97-106, 1997.
- 5) 柿本英明: アノードレイヤ型ホールスラストのプラズマ特性, 東京大学大学院修士論文, 2000.
- 6) 西山和孝, 清水幸夫, 舟木一幸, 国中 均, 都木恭一郎: マイクロ波放電型中和器とホローカソードからの電磁雑音, *日本航空宇宙学会論文集*, **49** (2001), pp. 84–91.
- 7) Yamamoto, N., Nakagawa, T., Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Extending Stable Operation Range in Hall Thrusters, *AIAA Paper* 02-3953, 2002.
- 8) Sasoh, A. and Arakawa, Y.: A High Resolution Thrust Stand for Ground Tests of Low-Thrust Space Propulsion Devices, *Rev. Sci. Instrum.*, **64** (1993), pp. 719–723.
- 9) Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Hall-Current Ion Thruster Performance, *J. Propul. Power*, **8** (1992), pp. 1212–1216.
- 10) Gopantchuk, V., Kozubsky, K., Maslennikov, N. and Priddannikov, S.: Performance of Stationary Plasma Thruster PPS1350 and Its Qualification Status in Russia, *IEPC Paper* 99-086, 1999.
- 11) Brophy, J. R.: Stationary Plasma Thruster Evaluation in Russia, Summary Report, *JPL Publication* 92-4, 1992.
- 12) Semenko, A. V., Tverdokhlebov, S. O., Garlusha, V. I., Kochergin, A. V., Chislov, G. O., Shumkin, B. V., Solodukhin, A. E. and Zakharenkov, L. E.: Operating Envelopes of Thrusters with Anode Layer, *IEPC Paper* 2001-013, 2001.
- 13) Yamamoto, N., Nakagawa, T., Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Discharge Plasma Fluctuations in Hall Thrusters, *Vacuum*, **65** (2002), pp. 375–381.
- 14) Kim, V.: Main Physical Feature and Processes Determining the Performance of Stationary Plasma Thrusters, *J. Propul. Power*, **14** (1998), pp. 736–743.
- 15) Kusamoto, D., Mikami, K. and Komurasaki, K.: Channel Length and Thruster Performance of Hall Thrusters, *AIAA Paper* 96-3194, 1996.