周方向に非一様な推進剤供給によるアノードレイヤ型
ホールスラストの放電安定化^{*1}Discharge Stabilization for an Anode-Layer-Type Hall Thruster
by Azimuthally Nonuniform Propellant Supply福島 靖 博^{*2}・横 田 茂^{*2}・小 紫 公 也^{*3}・荒 川 義 博^{*2}

Yasuhiro FUKUSHIMA, Sigeru YOKOTA, Kimiya KOMURASAKI and Yoshihiro ARAKAWA

Key Words: Hall Thruster, Anode Layer Type, Discharge Current Oscillation, Azimuthal Nonuniformity

Abstract: Discharge current oscillation at the frequency of 10–100 kHz causes serious problems in using an anode layer type Hall thruster in space. As a novel approach to the oscillation reduction, azimuthally nonuniform propellant flows were created in an acceleration channel. As a result, the small-amplitude oscillation region became significantly wide. Although the thrust efficiency decreased in exchange due to increase in electron current from the channel exit, the tradeoff curve between oscillation amplitude and thrust efficiency was improved by introduction of a new parameter “differential flow rate.” In this study, the small-amplitude oscillation region with 42–64 mT width and the thrust efficiency 39%, which is roughly equivalent to the magnetic layer type thrusters with the same channel diameters, was achieved.

記 号 の 説 明

B : 磁束密度
 E : 電場
 e : 電気素量
 F : 推力
 I_b : ビーム電流
 I_d : 放電電流
 I_e : チャネルへ流入する電子電流
 I_g : ガードリングへ流れる電流
 k_B : ボルツマン定数
 m_e : 電子質量
 $\dot{m}_{\text{dif}}$: 高密度領域と低密度領域の流量差
 $\dot{m}_{\text{tot}}$: アノード総推進剤流量
 n_e, n_n : 電子数密度および中性粒子数密度
 r : 半径方向座標
 T_e : 電子温度
 V_d : 放電電圧
 v_e : 電子流速
 z : 軸方向座標
 Δ : 振動の大きさ
 ϕ : 電位
 η_t, η_u : 推進効率および推進剤利用効率
 ν_{en} : 電子・中性粒子間衝突周波数
 θ : 周方向座標

τ : 放電電流の測定時間
 添 字

A: 高密度領域
 B: 低密度領域

1. は じ め に

ホールスラスト^{1–3)}は、磁場による電子の閉じ込めによって電位勾配を保持し、推進剤の電離と加速を行う電気推進機である。比推力 1,000 ~ 3,000 s において推進効率が高く、また、空間電荷制限電流則による制約を受けないためイオンスラストに比べ高推力密度であり、小型・軽量な推進システムを実現する。これらの特長から、人工衛星の姿勢制御や軌道間遷移等、地球近傍ミッションに適したスラストとして注目されている。その中でもアノードレイヤ型ホールスラスト⁴⁾は、現在主流のマグネティックレイヤ型に比べ、より高い推力密度を実現し、また、放電室が短くイオンの壁面への損失が少ないため一般に壁面損耗が少ないといった利点を持つといわれ^{5, 6)}、ホールスラストの有用性を高めるものと期待されている。しかしアノードレイヤ型には、ほとんどの作動パラメータ領域において放電電流が 10 ~ 100 kHz で大きく振動し、電源や回路への高負荷をかけるという問題があるため、いまだ実用化に至っていない。そのため、アノードレイヤ型の放電電流振動を低減することはホールスラスト開発における大きな課題である。

これまで、この放電電流振動現象の解明および低減法確立に向けて多くの研究が行われてきた^{7–13)}。アノードレイヤ型では上記理由により、マグネティックレイヤ型では振動と壁面損耗の関係が定量的に明らかにされていないため

*1 © 2010 日本航空宇宙学会

平成 21 年 3 月 31 日原稿受付

*2 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻

*3 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

である．近年では，例えば，山本らは放電室出口面積の減少により振動の低減が実現可能との指針を得ている⁷⁾．また，古川らは，マグネティックレイヤ型について，推進剤を放電室供給以前に予熱しておくことで振動が低減することを報告している⁸⁾．最近では，田原により，長時間作動による壁面損耗によって，放電電流振動の大きさが時間とともに増大すると報告されている³⁾．また，根城らによってイオンの振舞いに着目した振動解析の試みもなされている⁹⁾．アノードレイヤ型の場合に限れば，ホローアノードの使用^{6, 7, 10)}はその振動低減対策の最も代表的な例であるが，これを用いた場合にも依然として振動の小さな作動領域は狭く，実用化には至っていない．

放電特性は作動パラメータ (磁束密度 B ，推進剤流量 $\dot{m}_{\text{tot}}$ ，放電電圧 V_d) の中でも特に B に大きく依存する^{7, 10-12)}．第 1 図はホローアノードによる振動対策が施された東京大学アノードレイヤ型ホールスラストの B に対する作動特性変化を示している．ここで，振動の大きさ Δ および推進効率 η_t は次式で定義される．

$$\Delta \equiv \frac{1}{\bar{I}_d} \sqrt{\frac{\int_0^\tau (I_d - \bar{I}_d)^2 dt}{\tau}} \left(\bar{I}_d \equiv \frac{\int_0^\tau I_d dt}{\tau} \right) \quad (1)$$

$$\eta_t \equiv \frac{F^2}{2\dot{m}_{\text{tot}} I_d V_d} \quad (2)$$

実用化されているマグネティックレイヤ型では通常，作動点における Δ が 0.2 程度であり^{14, 15)}，少なくともこれ以下の大きさの振動であれば実機搭載上電源等への負荷は問題ない程度のものであると判断できるため，本研究では $\Delta < 0.2$ をアノードレイヤ型の実用化に必要な条件とする．また，これを満たす時，振動が小さいと呼ぶ．領域 (I) および (III) において $\Delta < 0.2$ が満たされるが，領域 (I) では放電電流 I_d が非常に大きいため η_t が低く，領域 (III) では η_t は高いが，作動特性が B に対して敏感に変化し，安定な領域の磁束密度幅も 44 ~ 48 mT と狭い．

本研究では，新たな振動低減法として，推進剤を加速チャネルに周方向位置によって異なる流量で供給した．周方向に非一様な推進剤流量がもたらす振動低減効果は，チャネル左右の流量差による推力ベクトル制御の研究¹⁶⁾において発見された．ここでは，この手法をアノードレイヤ型に適応し，振動の小さな作動領域の拡大を試みた．

2. 実 験

2.1 実験装置

2.1.1 ホールスラスト 第 2 図に本実験で使用した東京大学アノードレイヤ型ホールスラストの断面図を示す．加速チャネルは内径 48 mm，外径 62 mm，長さ 3 mm であり，壁面はカソード電位に保たれた SUS304 製ガードリングである．アノードには，過去の研究¹⁷⁾より最も優れた振動低減効果を持つとされる厚み 1 mm，幅 3 mm のホローアノードを使用した．チャネル内の半径方向磁場はスラスト中心軸の鉄心に巻かれたソレノイドコイルにより印加された．コイルに 6 A の電流を流すことによって，最大 80 mT

(a) 放電電流および振動の大きさ

(b) 推進効率および推力

第 1 図 磁束密度に対するアノードレイヤ型の作動特性変化 ($\dot{m}_{\text{tot}} = 2.73 \text{ mg/s}$, $V_d = 250 \text{ V}$, 幅 3 mm ホローアノード)

第 2 図 東京大学アノードレイヤ型ホールスラストの断面図

第 3 図 4 分割拡散室

第 4 図 電気回路の概略図

の磁場を印加可能である．コイルの発熱およびアノードへの熱入力からスラスト過熱を防ぐため，鉄心内部およびスラスト側面を水冷した．

推進剤には純度 99.999% の Xe ガスを使用した．推進剤はスラスト背面に設けられた 4 箇所のポートから供給され，拡散室，ホローアノードを経て加速チャンネルへ至る．加速チャンネルへの推進剤供給を周方向に非一様な流量で行うため，拡散室およびホローアノード内部に 90° 間隔の仕切り板を設けた（第 3 図）．ホローアノード内部の仕切り板は，内部放電¹⁰⁾ を妨げないようにアノード先端から上流 10 mm 位置までとした．本研究では，推力ベクトルを偏向させない条件で測定を行うため，対角線上のポートには同流量の推進剤を供給し，第 3 図の $\dot{m}_A$ および $\dot{m}_B$ を 2 台の流量制御器により制御した．

電子源には Veeco-Ion Tech 社製ホローカソード HC252 を使用した．作動ガスには Xe ガスを用い，流量 0.27 mg/s で供給した．

2.1.2 測定系設備 直径 2.0 m，長さ 3.0 m のステンレス製円筒型真空チャンバを使用した．真空排気系は，油拡散ポンプ（排気速度 37000 L/s）1 台およびメカニカルブースタポンプ（排気速度 10000 m³/h）1 台，ロータリポンプ（排気速度 15000 L/min）2 台により構成される．本実験を通して，チャンバ内圧は 5.1×10^{-3} Pa 以下に保たれた．

第 4 図に電気回路の概略図を示す．放電電流はスラストアノードと主放電電源の正極との間でオシロスコープ（サンプリングレート 20 MS/s，周波数特性 8 MHz）を用いて測定した．ビーム電流 I_b の測定にはスラスト出口下流約 250 mm に設置された 500 × 500 mm の銅製イオンコレクタを使用した．電子の流入を避けるためイオンコレクタはチャンバ電位に対し -20 V に保持された．また，ガードリング電流 I_g はスラスト本体と主放電電源の負極との間で測定された．

推力 F の測定には東京大学で開発された 2 重振り子式スラストスタンド¹⁶⁾ を使用した．スラストおよびセンサ対象物を載せる内側振り子と LED 変位センサを載せる外側振り子を有し，ほぼ等しいブルーム輻射熱を受けるこれら 2 つの振り子間変位を計測することにより，測定値の熱ドリフト誤差を低減する．さらに，内側振り子の変位がもたら

第 5 図 左右ポートのみから Xe を供給した作動の様子

す外側振り子への熱入力の変化およびスラスト配線・配管の非線形挙動の影響を減らすため，内側振り子とチャンバ固定系で $J \times B$ 制御器を構成し，振り子間変位が 0 になるように制御した． $J \times B$ 制御器に流す電流値は LabVIEW を用いて制御した．制御電流と推力の変換係数は 4 つの 2 g (±5 mg) 精密分銅を用いた推力較正により算出した．

2.2 実験概要 $\dot{m}_{\text{tot}}$ および V_d をそれぞれ 2.73 mg/s，250 V に固定し，規格化流量差 $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}} (= (\dot{m}_A - \dot{m}_B)/(\dot{m}_A + \dot{m}_B))$ を 0.0 から 1.0 まで変化させて I_d および F の測定を行い， Δ および η_t を算出した．また， I_b および I_g を測定し，電子電流 $I_e (= I_d - I_b - I_g)$ を算出した． $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}} = 1.0$ における作動の様子を第 5 図に示す．

3. 結果と考察

3.1 振動低減効果 第 6 図に $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ に対する Δ の変化を示す． $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ の増加と共に高磁場側から振動が低減された． $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}} \leq 0.3$ の $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ が小さい範囲では，高磁場の Δ が大きく減少し， $\Delta < 0.2$ を満たす領域が高磁場側に拡大した． $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ がより大きくなると，振動の小さな領域は低磁場側へ広がり， $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}} = 1.0$ では全磁束密度領域で $\Delta < 0.2$ が満たされた．

3.2 推進効率 第 7 図に $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ に対する η_t の変化を示す． η_t は $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ と共に減少した．全磁束密度領域において $\Delta < 0.2$ が満たされるという大きな振動低減効果が得られていた $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}} = 1.0$ では最大 η_t は 0.18 と

第6図 振動の大きさ ($\dot{m}_{\text{tot}} = 2.73 \text{ mg/s}$, $V_d = 250 \text{ V}$) 第9図 推力 ($\dot{m}_{\text{tot}} = 2.73 \text{ mg/s}$, $V_d = 250 \text{ V}$) 第7図 推進効率 ($\dot{m}_{\text{tot}} = 2.73 \text{ mg/s}$, $V_d = 250 \text{ V}$) 第10図 推進剤利用効率 ($\dot{m}_{\text{tot}} = 2.73 \text{ mg/s}$, $V_d = 250 \text{ V}$) 第8図 放電電流 ($\dot{m}_{\text{tot}} = 2.73 \text{ mg/s}$, $V_d = 250 \text{ V}$)

なり, $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}} = 0.0$ の $\Delta < 0.2$ を満たす最大 $\eta_t = 0.45$ に対し大きく低下した. 第8, 9図に $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ に対する I_d および F の変化を示す. I_d は $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ と共に大きく増加したが, F に関しては大きな変動は見られなかった. η_t 低下の主な原因は I_d の増加による消費電力の増大であった.

この際, 第10図に示す通り, 推進剤利用効率 η_u は $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ の増加と共に, 多少の前後はあるが, 増加する傾向にある. これは, 推進剤と電子間の電離衝突周波数が n_n と n_e に比例するため, 高密度領域での $\eta_{u,A}$ は増加する一方, 低密度領域での $\eta_{u,B}$ は低下し, その平均としての η_u は増加するためであると考えられる. 一方で, 第11図に示す通り, $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ の増加によりガードリングへのイオンの損失も増加する. これは, 電離量が大きくなり推進機内イオン数密度が増加するため, および, E_θ の存在によって電離したイオンが周方向に流れるためであると考えられる. イオンはガードリングとの衝突による再結合後, より下流の低電位の領域において再電離することとなり, エネルギー効率等の低下を招き, η_u の増加の効果を相殺してし

第 11 図 ガードリング電流 ($\dot{m}_{\text{tot}} = 2.73 \text{ mg/s}$, $V_d = 250 \text{ V}$) 第 12 図 推進効率と振動の大きさの関係 ($\dot{m}_{\text{tot}} = 2.73 \text{ mg/s}$, $V_d = 250 \text{ V}$)

まうため、 F に変動がなくなるものであると考えられる。

このように、本手法では η_t の低下と引き換えに振動低減効果が得られた訳であるが、 η_t と Δ の関係をまとめると第 12 図のようになる。従来の η_t と Δ の関係は $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}} = 0.0$ の線で表されるが、これに対して新たなパラメータ $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ を導入した本手法では、両端矢印の線で示されるように、より振動の小さな領域でのトレードオフが可能となった。すなわち、同じ η_t に対しても振動の小さな作動点を選択できるようになった。第 1 表に $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}} \leq 0.2$ の各流量差における $\Delta < 0.2$ を満たす最大効率点の性能とその点を含む $\Delta < 0.2$ 領域の磁束密度幅を示す。 $\Delta < 0.2$ 領域幅も η_t とのトレードオフによって拡大することが分かる。

3.3 性能比較 第 2 表は代表的なスラスタの性能を示している。スラスタ名の数字はマグネティックレイヤ型においてはチャンネル外径、アノードレイヤ型においてはチャンネル平均径を表している。単位は mm である。本研究で得ら

第 1 表 各流量差における $\Delta < 0.2$ を満たす最大効率点性能とその点を含む $\Delta < 0.2$ 領域の磁束密度幅

規格化流量差	0.0	0.1	0.2
電力, W	580	620	690
推力, mN	38	36	35
比推力, s	1400	1400	1300
推進効率	0.45	0.39	0.33
作動領域幅, mT	44 ~ 48	42 ~ 64	45 ~ 80 以上

第 2 表 代表的なマグネティックレイヤ型 (M) およびアノードレイヤ型 (A) の性能^{18, 19)}

スラスタ	SPT-50	SPT-70	SPT-100	D-38M	D-55
種類	M	M	M	A	A
電力, W	350	700	1350	300	1600
推力, mN	20	40	80	15	100
比推力, s	1100	1500	1600	1500	1900
推進効率	0.35	0.45	0.50	0.37	0.60

れた性能と代表的なマグネティックレイヤ型の性能を比較すると、 $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}} = 0.1$ の性能 (第 1 表) は使用したスラスタ (チャンネル外径 62 mm) と同サイズのマグネティックレイヤ型とほぼ同等の性能であることが分かる。すなわち、本手法を用いて振動の小さな領域を 42 ~ 64 mT と拡大した場合、アノードレイヤ型としては η_t が低くなるが、マグネティックレイヤ型とはほぼ同等の η_t を維持することが可能といえる。このことから、本振動低減法を用いることにより、アノードレイヤ型の壁面損耗が少ない特長を生かし、長寿命なホールスラスタを実現できる可能性が示唆される。また、使用したスラスタとチャンネル平均径の等しいアノードレイヤ型 D-55 では $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}} = 0.0$ において $\eta_t = 0.60$ が達成されている。これは本研究における $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}} = 0.0$ の最大 $\eta_t = 0.45$ に比べ 0.15 高く、今後の改善により、 $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}} = 0.1$ において 0.39 よりも高い η_t を実現できる可能性を示す。

3.4 電子電流 第 13 図に I_e の $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ に対する変化を示す。 I_e は $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ と共に大きく増加しており、3.2 節で述べた I_d 増加の原因といえる。この I_e の増加には 2 つの要因が見られる。

第 1 の要因は、異常拡散領域の低磁場拡大である。第 11 図より、電子の軸方向移動度が $1/B^2$ に比例する古典拡散から $1/B$ に比例する異常拡散^{7, 20, 21)} へ遷移する点が $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ の増加と共に低磁場側へ移動する様子が見られ、これが古典拡散であった領域の I_e を増加させていることが分かる。電子と壁面の相互作用が小さいアノードレイヤ型では、異常拡散は 1 ~ 100 MHz の周方向密度揺動に起因して生じるものと考えられる。本手法は定常の周方向密度差を発生させるため、この揺動が低磁場においても誘起され易くなったと考えられる。

第 2 の要因は、 B に依存しないオフセット電子電流 I_0 の増加である。第 13 図に示す I_0 は異常拡散領域の I_e を $c/B + I_0$ (c は非磁束密度依存係数) によりフィッティングした時の値であり、 I_0 が $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ と共に大きく増加

第13図 電子電流 ($\dot{m}_{\text{tot}} = 2.73 \text{ mg/s}$, $V_d = 250 \text{ V}$) 第15図 電子電流と振動の大きさの関係 ($\dot{m}_{\text{tot}} = 2.73 \text{ mg/s}$, $V_d = 250 \text{ V}$)

第14図 周方向密度差がもたらす電位勾配の概念図

していることが分かる．この I_0 の増加は次のように説明できる²²⁾．第14図のように周方向に密度の異なる領域が存在する場合を考える．ホールスラストでは直交した E_z と B_r により電子が $+\theta$ 方向に $E \times B$ ドリフトしてホール電流を発生させる．このホール電流密度は軸方向の電子電流密度に比べ極めて大きいので、 $n_{e,A} > n_{e,B}$ の時、周方向電子流速は $v_{e\theta,A} < v_{e\theta,B}$ とならなければならない．ここで $v_{e\theta}$ は下式で与えられる．

$$v_{e\theta} = -\frac{m_e \nu_{\text{en}}}{eB^2} \left[E_\theta + \frac{\frac{\partial}{\partial \theta}(n_e k_B T_e)}{en_e} \right] + \frac{1}{B} \left[E_z + \frac{\frac{\partial}{\partial z}(n_e k_B T_e)}{en_e} \right] \quad (3)$$

第3, 4項は通常の $+\theta$ 方向ホール電流をもたらす項である． $v_{e\theta,A} < v_{e\theta,B}$ を満たすため、図のような周方向電位差が発生し、高密度領域において $+\theta$ 方向の E_θ 、低密度領域において $-\theta$ 方向の E_θ が誘起されると考えられる．この E_θ は直交する B_r との $E \times B$ ドリフトによって、電子の軸方向流速を高密度領域において増加、低密度領域において減少

させる．結果として、流束の周方向積分値である I_e は増加することとなる．ここで、 $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ の増加は $v_{e\theta,B}/v_{e\theta,A}$ を増加させるため、 E_θ は $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ と共に増加する．また、(3)式の第1, 2項と第3, 4項の係数がそれぞれ $1/B^2$ 、 $1/B$ に比例することから、 E_θ はおよそ B に比例して増加する． E_θ による電子軸方向流速の変化量は E_θ/B で表されるため、この I_e の増加は非磁束密度依存項 I_0 として現れる．

以上2つの要因によって、周方向流量差は I_e を増加させ、 η_t の低下を招いている．しかし、異常拡散領域の拡大が振動の小さな領域の拡大とほぼ一致すること、 I_e と Δ の関係を示す第15図から I_e の増加に伴って Δ が減少する様子が見られることから、 I_e の増加が振動低減につながっているものと考えられる⁷⁾．また、第15図より、同じ I_e でも $\dot{m}_{\text{dif}}/\dot{m}_{\text{tot}}$ が増加し異常拡散に遷移する程 Δ が小さいことが分かる⁹⁾．本手法では、より良い I_e と Δ のトレードオフ関係を持つ異常拡散領域が拡大することにより、小さな η_t 低下で大きな振動低減効果が得られているものと考えられる．

4. ま と め

放電電流振動を低減する新しい方法として、加速チャンネルへの推進剤供給を周方向に非一様な流量で行い、以下の結果を得た．

1. 周方向流量差の増加に伴って、高磁場側から振動が大きく低減された．

2. 電子電流の増加により最大推進効率は低下したが、チャンネル径の近いマグネティックレイヤ型とはほぼ同等の推進効率 39%を維持し、42~64 mT と広い範囲で $\Delta < 0.2$ を満たす作動が達成された．

これらの結果から、推進効率はやや犠牲になるが、振動の小さな作動領域を大幅に拡大する手法が得られたと言える．また、チャンネル形状最適化等により、今回得られた 39%を超

える効率も達成可能と予想される。本振動低減手法はアノードレイヤ型の実用化に大いに貢献するものと期待される。

本研究は独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究 (S) No. 16106012 の補助を受けた。

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), R1–R20.
- 2) 荒川義博, 小紫公也, 平川美晴: ホール推進機, *日本航空宇宙学会論文集*, **46** (1998), pp. 146–153.
- 3) Tahara, H.: Research and Development of Hall-Effect Thrusters at Osaka Institute of Technology, *AIAA Paper* 2008-5086, 2008.
- 4) Choueiri, E. Y.: Fundamental Difference between the Two Hall Thruster Variants, *Phys. Plasmas*, **8** (2001), pp. 5025–5033.
- 5) Garner, C. E., Brophy, J. R., Polk, J. E., Semkin, S., Garkusha, V., Tverdokhlebov, S. and Marrese, C.: Experimental Evaluation of Russian Anode Layer Thrusters, *AIAA Paper* 94-3010, 1994.
- 6) Semkin, A., Kochergin, A., Garkusha, V., Chislov, G. and Rusakov, A.: RHETT/EPDM Flight Anode Layer Thruster Development, *IEPC Paper* 97-106, 1997.
- 7) Yamamoto, N., Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Discharge Current Oscillation in Hall Thrusters, *J. Propul. Power*, **21** (2005), pp. 870–876.
- 8) 古川 剛, 宮坂武志, 藤原俊隆: ホールスラスタの低周波振動制御に及ぼす推進剤予熱効果実験, *日本航空宇宙学会論文集*, **50** (2002), pp. 325–329.
- 9) Nejoh, Y., Maruko, Y., Yamamura, Y. and Tahara, H.: Investigation of Ion Current Oscillations and Erosion of the Wall with Cross-Field Ion Transport in Hall Thrusters, *ISTS Paper* 2009-b-13, 2009.
- 10) 横田 茂, 安井伸輔, 熊倉 賢, 小紫公也, 荒川義博: アノードレイヤ型ホールスラスタ内部のシース構造と放電電流の数値解析, *日本航空宇宙学会論文集*, **54** (2006), pp. 39–44.
- 11) Boeuf, J. P. and Garrigues, L.: Low Frequency Oscillations in a Stationary Plasma Thruster, *J. Appl. Phys.*, **84** (1998), pp. 3541–3554.
- 12) Choueiri, E. Y.: Plasma Oscillations in Hall Thrusters, *Phys. Plasmas*, **8** (2001), pp. 1411–1426.
- 13) Fife, J. M., Martinez, S. M. and Szabo, J.: A Numerical Study of Low-Frequency Discharge Oscillations in Hall Thrusters, *AIAA Paper* 97-3052, 1997.
- 14) Marchandise, F. R., Biron, J., Gambon, M., Cornu, N., Darnon, F. and Estublier, D.: The PPS® 1350 Qualification Demonstration 7500 h on Ground, about 5000 h in Flight, *IEPC Paper* 2005-209, 2005.
- 15) Tamida, T., Nakagawa, T., Suga, I., Osuga, H., Ozaki, T. and Matsui, K.: Determining Parameter Sets for Low-Frequency-Oscillation-Free Operation of Hall Thruster, *J. Appl. Phys.*, **102** (2007), 043304.
- 16) Nagao, N., Yokota, S., Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Development of a Two-Dimensional Dual Pendulum Thrust Stand for Hall Thrusters, *Rev. Sci. Instruments*, **78** (2007), 115108.
- 17) Yamamoto, N., Komurasaki, K. and Arakawa, Y.: Condition of Stable Operation in a Hall Thruster, *IEPC Paper* 2003-086, 2003.
- 18) Kim, V., Popov, G., Arkhipov, B., Murashko, V., Gorshkov, O., Koroteyev, A., Garkusha, V., Semkin, A. and Tverdokhlebov, S.: Electric Propulsion Activity in Russia, *IEPC Paper* 2001-005, 2001.
- 19) Semkin, A. V., Tverdokhlebov, S. O., Garkusha, V. I., Kochergin, A. V., Chislov, G. O., Shumkin, B. V., Solodukhin, A. V. and Zakharenkov, L. E.: Operating Envelopes of Thrusters with Anode Layer, *IEPC Paper* 2001-013, 2001.
- 20) Meezan, N. B., Hargus, Jr., W. A. and Cappelli, M. A.: Anomalous Electron Mobility in a Coaxial Hall Discharge Plasma, *Phys. Rev. E*, **63** (2001), 026410.
- 21) 平川美晴, 荒川義博: 粒子モデルを用いた電気推進機プラズマのシミュレーション, *日本航空宇宙学会論文集*, **45** (1997), pp. 444–452.
- 22) Baranov, V., Nazarenko, Y. and Petrosov, V.: Azimuthal Non-Uniformities in Accelerators with Closed Electron Drift, *IEPC Paper* 2001-018, 2001.