

長寿命・高効率ホールスラストシステムの開発

宮坂武志, 山本直嗣, 竹ヶ原春貴, 渡邊裕樹, 船木一幸

(岐阜大)

(九大)

(首都大学東京)

(JAXA)

miyasaka@gifu-u.ac.jp

1. はじめに

有人火星探査や SSPS 建設用貨物船のメインエンジンとして大型の電気推進機の開発が盛んになっており, 実際に NASA の 457M¹⁾ やロシア D-160²⁾ 等に見られるように開発が進められている. 日本においても RAIJIN プロジェクトとして大型のアノードレイヤー型ホールスラストの開発が進められている.

ホールスラストはイオン加速領域に電子が存在するため, 空間電荷制限則をうけず, このため推力密度が高くコンパクトという特徴がある.^{3,4)} また長寿命化が期待でき, 比推力 1500-2000 秒で効率が 50%以上と高く, 寿命も 6 千から 1 万時間と長寿命であるため, NASA が開発を進めている小惑星捕獲ミッションのメインエンジンや遷移軌道から静止軌道への軌道遷移用のメインエンジンとして研究開発が進められている. 宇宙機への搭載例としては, 月探査の SMART-1⁵⁾ の主推進や静止衛星の南北制御⁶⁾ などが挙げられる.

ホールスラストには大きく分けてアノードレイヤー型とマグネチックレイヤー型がある.⁴⁾ 現在の主流はマグネチックレイヤー型であるが, 大電力化において, コンパクトさ, 推進効率, 寿命等の潜在能力の高さから, RAIJIN ではアノードレイヤー型に注目をして九州大学を中心にヘッド開発を進めている.^{7,8)} 本実験では, テーマの 1 つとして 5 kW 級アノードレイヤー型ホールスラストヘッドの計測を九州大学が主体となり実施した.

また RAIJIN では, クラスタ化による大電力を目指しており, このクラスタ化における最適設計条件の導出を目的に, その単体作動特性について多くの知見を有しているマグネチックレイヤー型

ヘッド 2 基により Side by side(SBS) システムを構築している.⁹⁾ 本実験の 2 つ目のテーマとして, 2 基の作動干渉が推進性能に及ぼす影響について評価を岐阜大学が主体となり実施した.

このようにホールスラストには一般的にホローカソードが電子源に用いられるが, ホローカソードは内部に熱電子放出源として酸化バリウム等を含浸させた多孔質タングステンを挿入しており, この含浸陰極が酸素などの活性ガスとの接触により劣化, また, 含浸剤である酸化バリウムが枯渇することにより寿命を迎える. これらのホローカソードの課題を解決し, 長寿命なホールスラストシステムを構築するために熱電子放出に依らない高周波プラズマ電子源の研究を首都大学東京では実施してきた.¹⁰⁾ 高周波プラズマ電子源は放電室内に誘導結合放電による高周波プラズマを生成し, このプラズマから電子を引き出すことにより, 電子源として作動するため, 熱電子放出源に起因する短所を持たない. そこで, 3 つ目のテーマとして, 首都大学東京が主体となり SBS システムに高周波プラズマ電子源 1 台を組み合わせたクラスタ運転を実施し, ホローカソードを使用した場合と比較, 高周波プラズマ電子源のホールスラストシステムへの適用性を評価した.

2. 真空装置

本実験の 3 テーマの測定は, ISAS 宇宙科学研究所のスペースプラズマ共同利用設備 (スペースプラズマチャンバ) にて行った. チャンバは直径 2.5 m, 長さ 5 m であり, 2 台のクライオポンプと 1 台のターボ分子ポンプで排気した.

3. 5kW 級アノードレイヤー型ホールスラストヘッドの計測

3.1 実験体系

図1に本実験で使用した5kW級アノードレイヤー型ホールスラスタを示す。プラズマ生成部の外径は94mm内径は60mmであり、最大220mNの推力を発生していることを確認している。

真空度の悪い条件では、作動が変化するために、キセノンガスの流量は4.9mg/sで固定して行った。推力測定にはスラストスタンドを用いて行った。2種類の陽極、通常タイプと先端に返しの付いた陽極で推力を測定した。

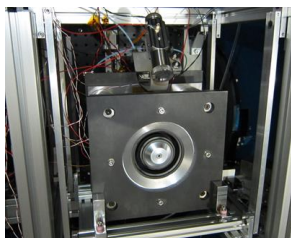


図1. 5kW級ホールスラスタの概観

3.2 実験結果

図2に放電電圧と推力の関係を示す。返しなしの陽極、返しありの陽極ともに放電電圧の増加に伴い、推力は上昇している。これは放電電圧に伴いイオンが加速されているために推力が上昇していることと、推進剤利用効率が改善されているためである。また、返しありの推力のほうが小さいがこれは、返しありではプラズマ生成領域がスラスタ外部のプラズマが生成しにくい領域まで広がっているからである。ただし、返しありの陽極は返しなしと比較して長寿命が期待できるため、どちらの陽極を選択するのかは性能と寿命のトレードオフになると考える。

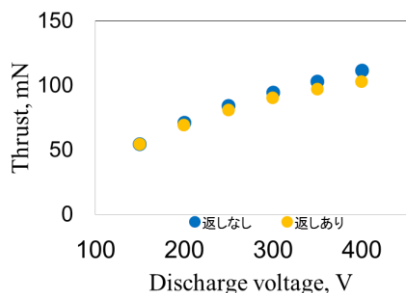


図2. 放電電圧－推力の関係

4. SBSシステムの干渉評価

4.1 実験体系

図3にSBSシステムの概略を示す。2基のマグネチックレイヤー型ヘッドを1基のホローカソードを一直線上に挟む形で配置している。ヘッドに印加する主電源は共通電源を用いているが、各ヘッドに磁場印加を行うコイル電源は独立したものをを用いており、印加方向の組み合わせにより磁場を同方向印加および逆方向印加の2通りで推力と放電電流を測定している。推力は振り子式スラストスタンドで測定を行った。放電電圧は140V、推進剤であるキセノンのヘッド流量は1基あたり1.25mg/sとし、コイル電流は0.5Aから1.5Aの範囲で変化させた。2基の中心軸間距離 D_T は156mmとした。また比較のため単体(Single)作動時の測定も行った。

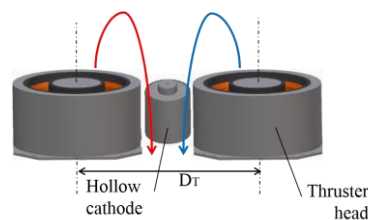


図3. SBSシステムの概略

4.2 実験結果

図4、図5にそれぞれ推力、放電電流についてSBS作動時とSingle作動時単体作動時の結果を示す。SBS作動時の磁場印加同方向及び逆方向の違いについては有意な差は見られなかったのでここでは、同方向の場合について示した。

推力、放電電流ともにSingle作動時に比べてSBS作動時に上昇している様子が得られている。この傾向は、SBS作動時のビーム干渉により逆流電子流束が増加し、電離を促進している結果であると考えられる。また、すべての作動において、コイル電流の増加とともに推力、放電電流が減少しているが、これは磁場の増加による逆流電子流束の抑制効果を示しており、SBS作動時のプルーム干渉が逆流電子流束を通じて推力へ及ぼす仮説を支持する結果となっている。

推力はコイル電流の増加に伴い SBS 作動と Single 作動との差が増加しており、SBS 作動時のプルーム干渉効果が推進性能に及ぼす影響は高印加磁場下で強く現れることを示唆している。

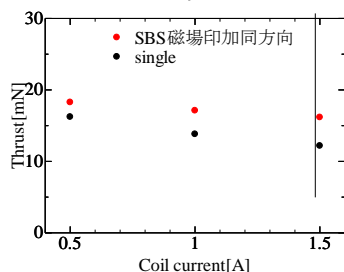


図 4. コイル電流－推力の関係

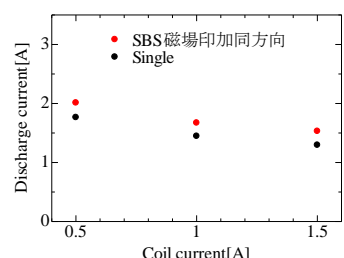


図 5. コイル電流－放電電流の関係

5. 高周波プラズマ電子源によるホールスラスタクラスタ運転

5.1. 実験体系

本研究で使用した高周波プラズマ電子源の概要を図 6 に示す。高周波プラズマ電子源はプラズマを生成・維持するためのモリブデン製放電室、プラズマと誘導結合させるタングステン製のコイルおよび電子を外部に放出するためのオリフィスが開いたタングステン製のオリフィスプレートで構成されている。電子源作動時には、外部から印加された電位差により生成プラズマから電子がオリフィスを通して外部に放出され、プラズマの準中性を保つために放出された電子と等量のイオンが放電室壁面で捕集される。

この高周波プラズマ電子源を 2 台のマグネチックレイヤー型ホールスラスタと組み合わせた際の実験構成を図 7 に示す。基本的な構成は 4 章で示されたホローカソードを用いた場合と同様であり、電子源のみホローカソードから高周波プラズマ電子源に変更した。また、

これに付随して、高周波プラズマ電子源を動作させるための 13.56 MHz の高周波電源およびインピーダンス整合回路を電子源に接続した。運転時の放電電流を電流プローブで計測し、推力を振り子式スラストスタンドにより計測した。

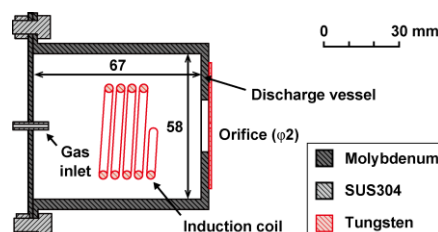


図 6. 高周波プラズマ電子源

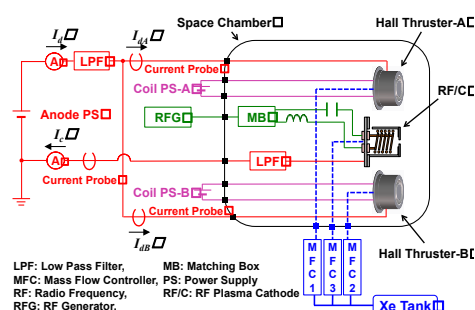


図 7. 高周波プラズマ電子源を用いたマグネチックレイヤー型ホールスラスタのクラスタ運転時の実験構成。

5.2. 実験結果および考察

図 8 および図 9 に放電電圧をパラメータとしたクラスタ運転時の放電電流および推力に対する電子源種類の影響を示す。なお、図 8 の縦軸の放電電流は 2 台のスラスタに流れた放電電流の合計値を示す。また、図 9 において、各プロットは推力の平均値を示し、エラーバーはスラストスタンドの熱ドリフトによる推力のばらつき最小値と最大値を示す。図 8 に示す通り、放電電流に対する電子源種類の影響は小さい。また、図 9 より、推力に関してもホローカソードと高周波プラズマ電子源との間には大きな差はない。以上の結果より、ホローカソードの代替として高周波プラズマ電子源を用いた場合でも、同程度の放電特性、推進性能が得られることが判明した。

本研究では電子源が真空槽電位と同電位であったため、十分なイオン中和が行われていなかった可能性があり、今後は図9で示されたような推力計測のばらつきの改善に加えて、イオンを完全に中和した状態での電子源種類の影響を評価する必要がある。

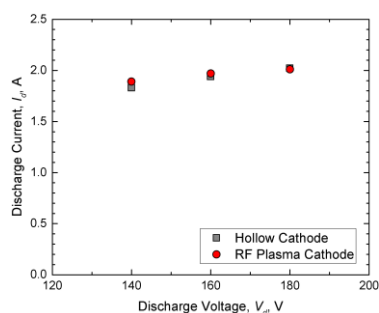


図8. クラスタ運転時の放電電流に対する電子源種類の影響。なお、カソード流量は0.2 mg/s、各スラスタのアノード流量は1.2 mg/sである。

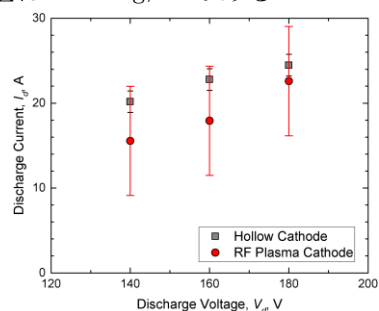


図9. クラスタ運転時の推力に対する電子源種類の影響。なお、カソード流量は0.2 mg/s、各スラスタのアノード流量は1.2 mg/sである。

6. まとめ

大電力ホールスラスタプロジェクトRAIJIN開発の一環としてISASスペースプラズマチャンバを利用し、5kW級アノードレイヤー型ヘッド評価から返しありの陽極による長寿命化における有効性、SBSシステム評価によりヘッド間干渉による推力上昇効果、高周波プラズマ電子源がホローカソードと同程度の放電特性、推進性能が得ることを

明らかにした。

謝辞

本研究の一部は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所「スペースプラズマ共同利用設備」を利用したものです。ここに謝意を表します。また、実験遂行に当たりご支援頂いた中園氏に感謝致します。

参考文献

- 1) J. A. Linnell, A.D. Gallimore, "Efficiency Analysis of a Hall thruster Operating with Krypton and Xenon," *Journal of Propulsion and Power*, Vol.22, pp. 1402-1418, 2006.
- 2) S.Tverdokhlebov, A. Semekin, and J. Polk, "Bismuth Propellant Option for Very High Power TAL Thruster," *AIAA Paper 2002-0348*, Jan. 2002.
- 3) V. V. Zhurin, H. R. Kaufman, R. S. Robinson, "Physics of Closed Drift Thrusters," *Plasma Sources Sci. Technol.* 8, 1999, R1-R20.
- 4) H. R. Kaufman, "Technology of Closed-Drift Thrusters," *AIAA journal*, Vol. 23, No. 1, 1985, pp.78-86.
- 5) V. Kim, "Main physical feature and processes determining the performance of stationary plasma thrusters," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 5, 1998, pp. 736-743.
- 6) C. R. Koppel and D. Estublier, "The SMART-1 Electric Propulsion Subsystem," *AIAA-2003-4545*, 39th Joint Propulsion Conference, Huntsville, Alabama, July 20-23, 2003.
- 7) T. Martin, F. Bernard, G. Jose, N. Giovanni, S. Walter, D. Franck, "Charge-Exchange Plasma Contamination on SMART-1: First Measurements and Model Verification" 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2004, 10.2514/6.2004-3437
- 8) 山本直嗣, 伊藤匠, 中島秀紀, 細田 聡史, 月崎 竜童, "5kW級アノードレイヤー型ホールスラスタの性能に関する研究", 2014年度宇宙輸送シンポジウム STEP2014-33, 相模原市, 2015年一月
- 9) T. Miyasaka, K. Asato, R. Muraki, D. Furuta and K. Kubota: Investigation of Side by Side Hall Thruster System, the 33st IEPC, IEPC-2013-110, Washington, 2013.
- 10) H. Watanabe, et al., "Performance Evaluation of Radio Frequency Plasma Cathode for Hall Effect Thruster," 34th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2015-194, 2015.