

200 W 級 TAL 型ホールスラスタの性能評価

Performance Evaluation of 200 W Class TAL-type Hall Thruster

○長峯 健心(都立大・院)・高橋 亮太(都立大・学)・竹ヶ原 春貴・各務 聡(都立大)

○Kenshin Nagamine・Ryota Takahashi・Haruki Takegahara・Akira Kakami (Tokyo Metropolitan University)

Abstract (概要)

A 200 W class TAL-type Hall thruster (TMU-034) was developed and tested for verifying a thrust performance of a low-power TAL. Although a channel mean diameter of TMU-034 (28 mm) is less than half with SPTs, TMU-034 showed comparable thrust performance compared to SPT-type Hall thrusters at the same power-level. The maximum thrust performance achieved an anode efficiency of 50.2%, thrust-to-power ratio of 69.0 mN/kW, and anode specific impulse of 1480 s at a discharge power of 618 W. In this paper, a thrust performance of TMU-034 was analyzed against various anode mass flow rates (10 – 34 sccm), and an anode efficiency showed an increased tendency and saturated on the border of 18 sccm. In addition, a voltage utilization, current utilization, propellant utilization, and beam efficiencies were analyzed to clarify a cause of anode-efficiency saturation. The voltage utilization efficiency showed almost 90% for all conditions. The propellant utilization and beam efficiency improved with the increase of the anode mass flow rate. The current utilization decreased at more than 18 sccm, however, it showed an increased tendency at less than 18 sccm. These results indicate a larger magnetic flux density required in TMU-034 to establish higher performance at more than 18 sccm.

記号の説明

| | |
|---|--------------------|
| B_r : 放電チャンネル出口中心における径方向磁束密度 | η_p : 推進剤利用効率 |
| e : 電気素量 | η_v : 電圧利用効率 |
| f : 電離振動の周波数 | θ : プロープの角度 |
| f_{peak} : 放電電流のスペクトルのピークにおける周波数 | τ_m : 測定時間 |
| I_{axial} : イオンビーム電流の軸方向成分 | |
| I_{beam} : 総イオンビーム電流 | |
| I_{ci} : インナーコイル電流 | |
| I_{co} : アウターコイル電流 | |
| I_d : 放電電流 | |
| I_{sp} : 比推力 | |
| L_{ion} : 電離長 | |
| m_{ion} : イオン質量 | |
| \dot{m}_a : アノード流量 | |
| P_d : 放電電力 | |
| r : 測定距離 | |
| T : 推力 | |
| V_d : 放電電圧 | |
| V_{mp} : 最確イオンポテンシャル | |
| V_p : プラズマポテンシャル | |
| Δ_c : 放電電流振動の振幅 | |
| η_a : アノード効率 | |
| η_b : ビーム効率 | |
| η_c : 電流利用効率 | |

1. はじめに

電気推進のみを用いて南北制御や軌道間遷移、軌道維持を行う全電化衛星の開発や、低軌道衛星コンステレーションの商用化に伴い、高い効率と推力電力比を両立可能なホールスラスタが主推進として採用されている¹⁾。特に低軌道衛星においては、大気抵抗のため太陽電池パドルの展開面積に限りがあり、推力電力比に優れ、かつ小型・低電力のホールスラスタの需要が高まっている。

ホールスラスタの低電力化に関する研究は、主に SPT 型において盛んに行われており²⁻⁴⁾、従来の数 kW 級と比較すると性能が劣化することが報告されている²⁾。一方、低電力の TAL 型ホールスラスタに関しても調査が行われているが、ノミナル 200 W 以下の TAL では永久磁石を使用しており、最適な磁場形状の議論がなされておらず⁵⁻⁷⁾、低電力 TAL の性能調査は不十分である。そこで本稿では、磁場形状を変更可能なソレノイドコイルを放電チャンネル内外の有する、目標電力 200 W 級の TAL 型ホールスラスタを試作・評価したので結果を報告する。

2. 実験装置および条件

2.1 試作した低電力 TAL 型ホールスラスト

図 1 に試作した TAL 型ホールスラスト (TMU-034) の断面図を示す。放電チャンネルの内径および外径はそれぞれ 11 mm, 17 mm であり, チャンネル長は 2 mm である。ガードリングは SUS316L で製作し, アノードにはホローアノードを採用している。また, 磁場を印加するためのソレノイドコイルは放電チャンネル中心に 1 つ (インナーコイル), もう 1 つは外側のスクリーンヨーク周りに巻き付けてある (アウターコイル)。マグネットワイヤには耐熱 220°C のポリアミドイミド銅線 ($\phi 0.85$ mm) を使用しており, 巻き数はインナーコイルが 75 turn, アウターコイルが 40 turn である。磁性体には比較的加工が容易な SS400 を採用した。推進剤はスラスト背面の二箇所から供給され, 円環状のバッファに貯留された後, 周方向に均一に設けられた 24 個の孔から放電チャンネル内に拡散される。磁気回路およびガードリングとアノードは, 3D プリント (Form2) で印刷した耐熱 238°C の High Temp Resin を介して絶縁してある。

図 2 に TMU-034 のインナーコイル電流 I_{ci} およびアウターコイル電流 I_{co} の電流比が 1 : 1 の条件における, 放電チャンネル中心における径方向磁束密度の軸方向分布を示す。なお, 磁場のシミュレーションには二次元磁場解析ソフト FEMM を用いた。図 2 より, 放電チャンネル出口において磁束密度が最大となり, コイル電流の増加に伴い磁束密度の最大値は増加し, コイル電流が 4 A までの範囲では実測とシミュレーション双方において磁気飽和は確認されなかった。

2.2 実験装置およびプローブ測定座標系

図 3 に実験装置を示す。放電電流 I_d , 放電電圧 V_d の測定にはそれぞれ Tektronix 社製の電流プローブ/アンプ (TCP312/TCPA300), 高電圧差動プローブ (P5200A) を使用し, オシロスコープを用いて計測した。それぞれの値は, オシロスコープで測定した 6 ms 間の計測値を平均して算出した。また, カソードから供給される電子のみでビーム中和が行われるように, カソード電位と GND 間に降伏電圧 51 V のツェナーダイオードを互いに逆向きで 2 つ挿入し, スラストを電氣的に浮かせている。電子源には Ion Tech 社製のホローカソード (HCN-252) を使用し, 推進剤およびホローカソードの作動ガスには純度 99.999% のキセノンを用いた。

図 4 にプローブの測定座標系を示す。本研究では TMU-034 の排気プルームのプラズマ診断を行うため, ファラデーカップ, RPA (Retarding Potential Analyzer), ラングミュアプローブを使用した。ファラデーカップおよび RPA は, ホールスラストの前面中心を 0° として, 1.8° 間隔で 0° から 90° の範囲を計 51 点で計測を行い, ラングミュアプローブは 0° の位置のみで計測した。なお, それぞれのプローブの測定距離はスラスト下流 250 mm である。

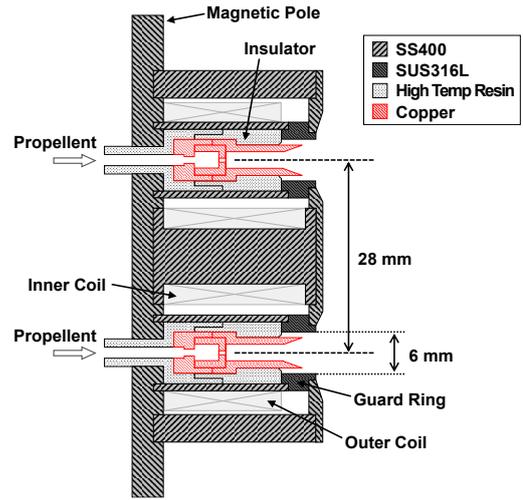


図 1 TMU-034 の断面図。

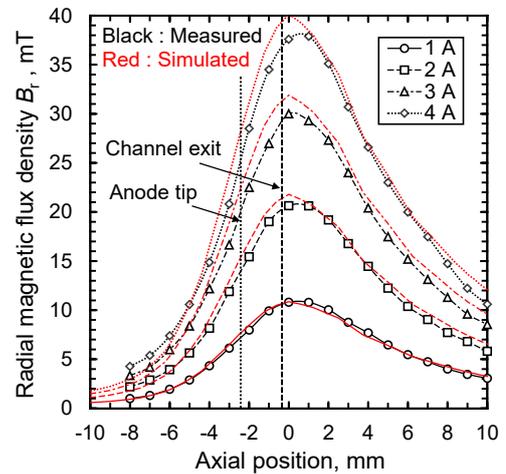


図 2 放電チャンネル出口中心における径方向磁束密度の軸方向分布。

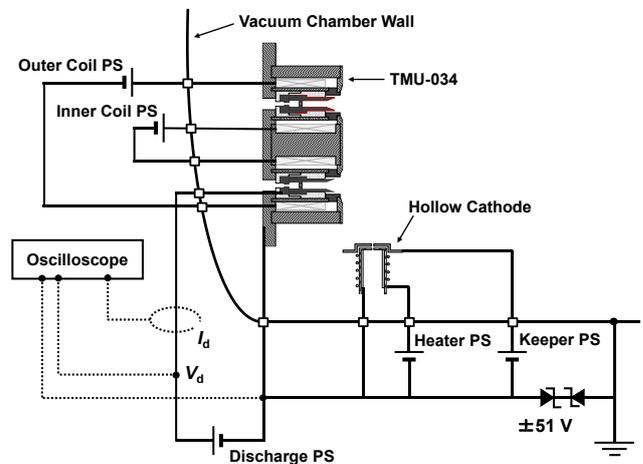


図 3 実験装置。

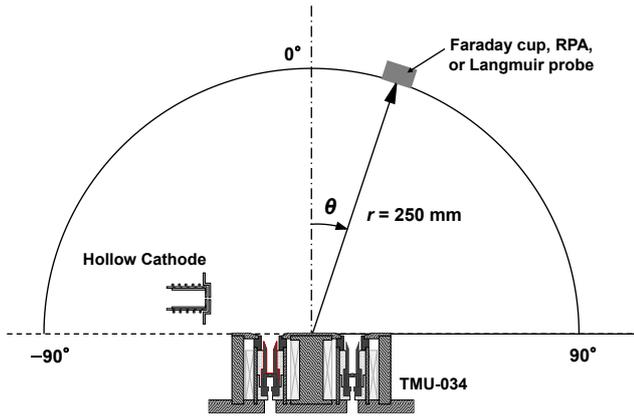


図4 プローブ測定座標系.

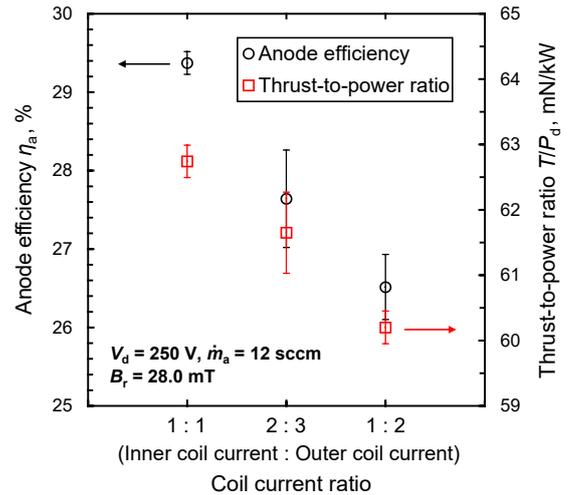


図6 コイル電流比の違いによる推進性能.

3. 実験結果および考察

3.1 最適な磁場形状 性能が最大となる最適な磁場形状を調査するため、放電チャネル出口中心の径方向磁束密度を一定として、インナーおよびアウターコイルの電流比を変更して試験した。なお、図2に示す通り、磁束密度のシミュレーション結果は測定結果を良く再現しているため、FEMMの結果に基づき電流比を決定した。

図5に $I_{ci} : I_{co} =$ (a) 1:1, (b) 2:3, (c) 1:2 における放電チャネル出口近傍の磁場形状を、図6に放電電圧 250 V, アノード流量 12 sccm の条件における、コイル電流比に対するアノード効率および推力電力比を示す。赤点の位置における径方向磁束密度は $B_r = 28.0$ mT であり、アノード効率は次式で算出される。

$$\eta_a = \frac{T^2}{2\dot{m}_a P_d} \quad (1)$$

ここで、 P_d は放電電力であり、カソードおよびコイルで要する電力は含んでいない。

図6より、 $I_{ci} : I_{co} = 1:1$ の条件でアノード効率と推力電力比は最大となり、アウターコイル電流の比率が高くなるに従い性能は低下した。また、 $I_{ci} > I_{co}$ と $2I_{ci} < I_{co}$ の条件では主放電点火には至らず、他の動作点においてもコイル電流比が 1:1 のときに性能が最大となった。したがって、TMU-034 では図5(a)のように、チャネル中心軸に対称な磁力線分布が最適な磁場形状であり、そのときのコイル電流比は $I_{ci} : I_{co} = 1:1$ であることが示された。

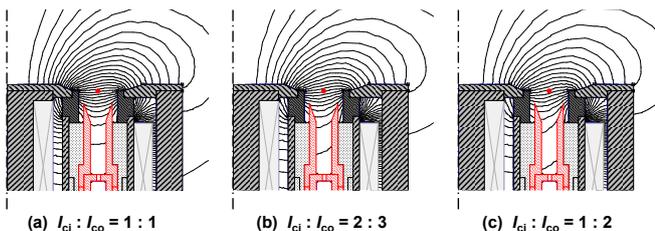


図5 コイル電流比の違いによる磁場形状.

3.2 推進剤流量に対する推進性能 図7にアノード流量に対する、(a)放電電流、(b)消費電力、(c)推力、(d)比推力、(e)アノード効率、(f)推力電力比を示す。なお、スラスターの作動条件は、放電電圧 250 V, 径方向磁束密度 36.4 mT ($I_{ci} = I_{co} = 4.0$ A) である。

図7(a)の放電電流、(b)消費電力、(c)推力は、アノード流量の増加に従い線形的に増加した。一方、図7(d)比推力および(e)アノード効率は、アノード流量の増加に伴い向上し、26 sccm 付近でピークとなり、34 sccm で低下した。図7(f)の推力電力比に関しては、比推力およびアノード効率より低流量側の 18 sccm で飽和し、34 sccm で減少した。

以上より、TMU-034 は 100 – 800 W の広い電力レベルで動作可能であり、放電電力 600 W 程度で性能は最大となることがわかった。

3.3 推進剤流量に対する内部効率 アノード流量の増加に伴う性能の飽和および低下の要因を調査するため、排気ブルームのプラズマ診断を行い、電圧利用効率 η_v 、電流利用効率 η_c 、推進剤利用効率 η_p 、ビーム効率 η_b を求めた。各効率は次式で表される⁸⁾。

$$\eta_v = \frac{V_{mp} - V_p}{V_d} \quad (2)$$

$$\eta_c = \frac{I_{beam}}{I_d} \quad (3)$$

$$\eta_u = \frac{m_{ion} I_{beam}}{e \dot{m}_a} \quad (4)$$

$$\eta_b = \left\langle \frac{I_{axial}}{I_{beam}} \right\rangle^2 \quad (5)$$

ここで、 V_{mp} は最確イオンポテンシャル、 V_p は排気ブルームのプラズマポテンシャル、 I_{beam} は総イオンビーム電流、 m_{ion} はイオンの質量、 e は電気素量、 I_{axial} はイオンビーム電流の軸方向成分である。 I_{beam} および I_{axial} は式(6)(7)を用いて算出した。各パラメータに関しては文献⁹⁾を参照されたい。

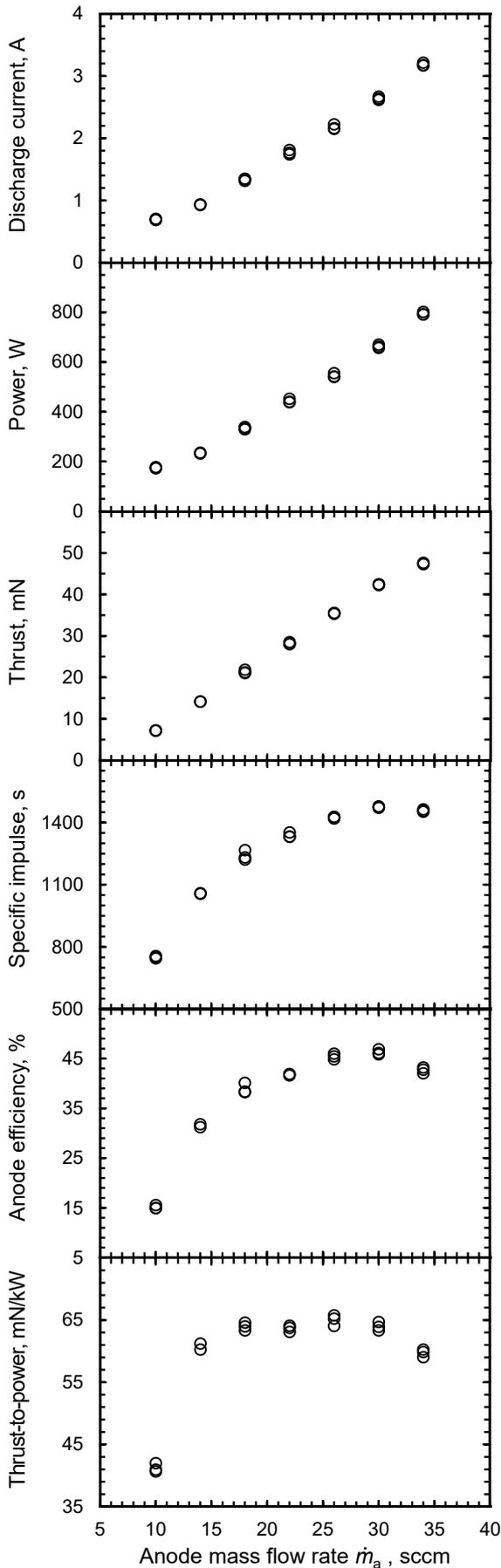


図7 アノード流量に対する推進性能.

$$I_{\text{beam}} = 2\pi r^2 \int_0^{\pi} \frac{j(\theta) \kappa_D}{A_c \kappa_A} \sin\theta d\theta \quad (6)$$

$$I_{\text{axial}} = 2\pi r^2 \int_0^{\pi} \frac{j(\theta) \kappa_D}{A_c \kappa_A} \cos(\alpha_A) \sin(\theta) d\theta \quad (7)$$

図8, 9, 10にRPA, ラングミュアプローブ, ファラデーカップによる測定結果の一例を示す. 最確イオンポテンシャルは, RPAにより得られたイオンエネルギー分布の最大値として決定し, プラズマポテンシャルはラングミュアプローブによる測定結果の指数関数領域および電子電流飽和領域にカーブフィットした際の交点で求めた. また, ファラデーカップでは高角度域における低エネルギーのCEXイオンも捕集してしまうため, 本研究ではRPAを用いて100 eV以上のイオン電流分布を取得し, 0°の位置でファラデーカップによる電流プロファイルとスケールを合わせることでCEXイオンの補正を行った.

図11に放電電圧250 V, 径方向磁束密度36.4 mTの条件における, アノード流量に対する各内部効率を示す. 電圧利用効率はどのアノード流量においても90%前後と高い効率を示した. 電流利用効率は, アノード流量18 sccmまで流量の増加に従い30%以上上昇し, その後は減少傾向に転じた. 推進剤利用効率に関しては, アノード流量の増加に伴い40%以上向上し, 22 sccmから飽和に至った. ビーム効率は流量の増加に従い増加し, 18 sccmから飽和した.

以上の結果より, 18 sccm以下のアノード効率の上昇は, 電流利用効率および推進剤利用効率, ビーム効率の向上によるものであり, 18 sccm以降の性能の飽和は, 電流利用効率の減少が原因であることが明らかになった. よって, 放電電流の中で逆流する電子電流の割合が多くなったことが要因であるため, 性能向上を図るには磁場を強めることが必要であると考えられる.

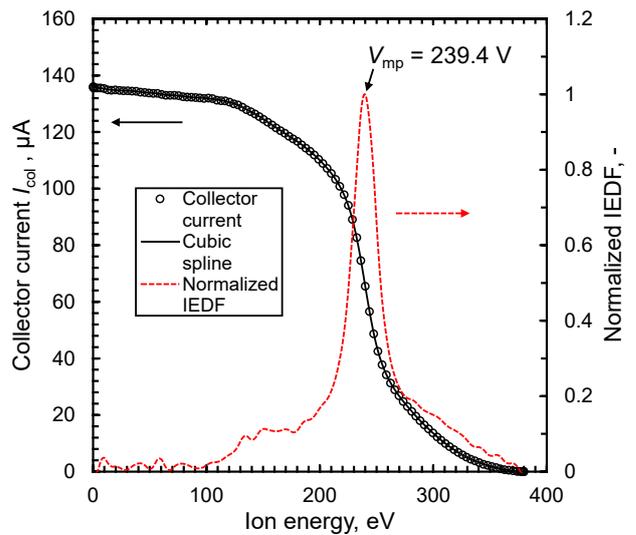


図8 RPAによる測定結果の一例.

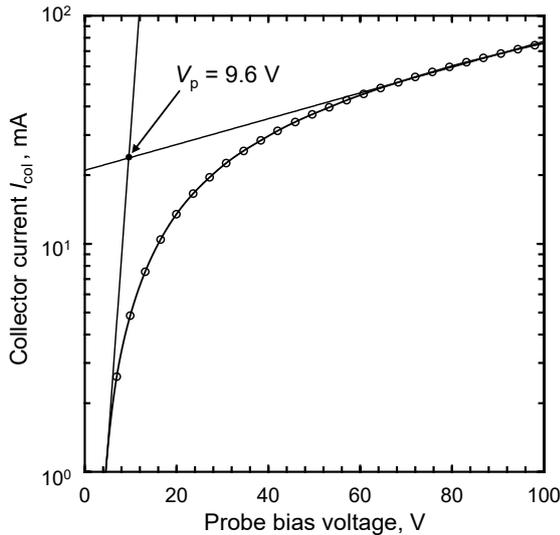


図9 ラングミュアプローブによる測定結果の一例.

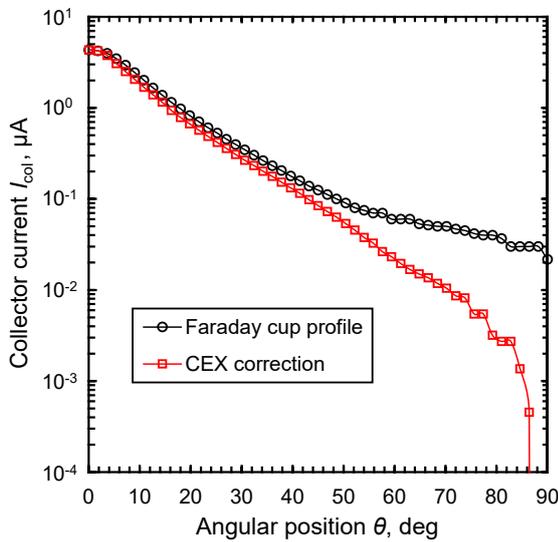


図10 ファラデーカップによる測定結果の一例
およびCEXイオンの補正.

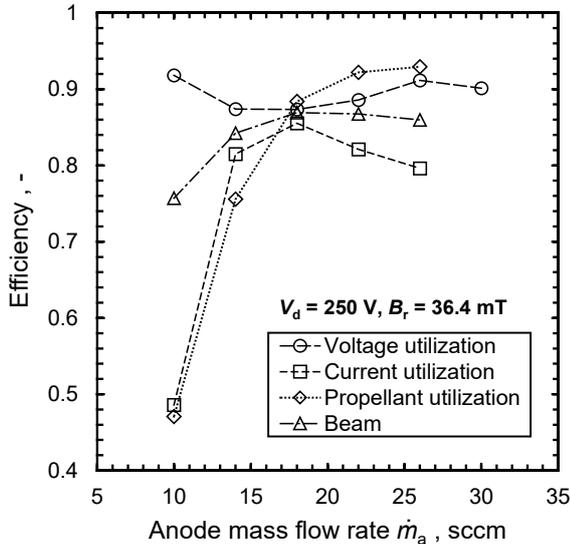


図11 アノード流量に対する内部効率.

3.4 放電電流振動 図12に放電電圧250 V, 径方向磁束密度36.4 mTの条件における, アノード流量に対する放電電流振動の振幅 Δ_c と周波数 f_{peak} を示す. 振幅 Δ_c は次式で算出され¹⁰⁾, 周波数 f_{peak} は放電電流のスペクトルのピークにおける周波数とした.

$$\Delta_c = \frac{\text{R.M.S.}}{\bar{I}_d} = \frac{1}{\bar{I}_d} \sqrt{\int_0^{\tau_m} (I_d - \bar{I}_d)^2 dt} \quad (8)$$

図12より, アノード流量を10 sccmから14 sccmに増加させるときに振幅は急激に大きくなり, 性能が良くなる26, 30 sccmで低減され, 34 sccmで再び大きな振動が現れた. 周波数に関しては, 10 sccmから14 sccmに上がる時に40 kHz程度急激に上昇し, それ以降は流量の増加に従い周波数は単調に減少している.

ここで, 周波数に着目すると, 低電力のSPTにおける放電振動の周波数は20 kHz程度であるが²⁾, TMU-034では40–100 kHzの高い周波数が観測された. これは, Fifeのpredator-preyモデルに基づいた電離振動における0次元数値モデルで説明できる. 同モデルでは, 電離振動の周波数 f は次式で表される¹¹⁾.

$$f = \frac{(U_i U_n)^{1/2}}{2\pi L_{\text{ion}}} \quad (9)$$

ここで, U_i および U_n はそれぞれイオンと中性粒子の速度, L_{ion} は電離長である. 放電電圧250 Vの条件において, $U_i = (2eV_d/m_{\text{ion}})^{1/2} = 19165$ m/s, $U_n = 100$ m/s, $L_{\text{ion}} = 3$ mmとすると, $f = 73.4$ kHzとなり, 観測された放電振動の周波数に近い. したがって, SPTより高周波であるが, TMU-034における40–100 kHzの放電振動も電離不安定性によるものであると考えられる.

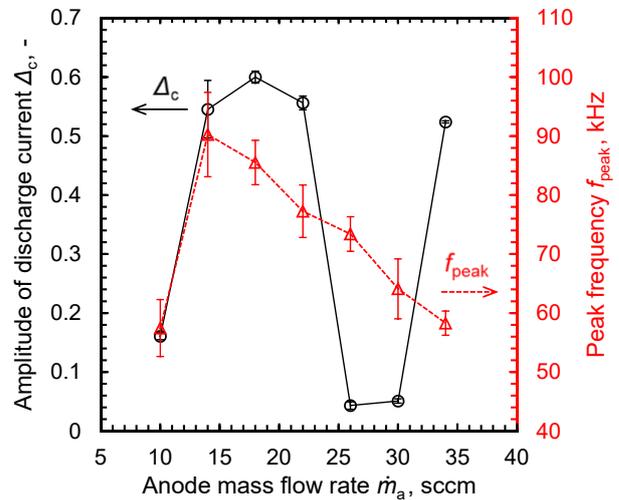


図12 アノード流量に対する放電振動の振幅と周波数.

3.5 SPT との性能比較 図13に同電力レベル(600 W)におけるTMU-034と, SPTであるBusek社のBHT-600, Fakel社のSPT-70の性能を表す^{12,13)}. TMU-034は放電電力618 W(放電電圧250 V, アノード流量30 sccm, 径方向磁束密度39.4 mT)で, アノード効率50.2%, 推力電力比69.0 mN/kW, 比推力1480 sを達成しており, 図13から商用のSPTと比較して遜色ない性能であると言える. 一方で, スラスタのサイ

ズに着目すると、TMU-034, BHT-600, SPT-70 の放電チャンネル径はそれぞれ 28mm, 56 mm, 70 mm であり、TAL 型の TMU-034 は同電力の SPT より半分以下のサイズで同等の性能を示した。TAL では放電チャンネル壁面が導体で構成されているためプラズマ密度が高くなり、サイズが小さいながらも SPT と同電力レベルで高効率を実現したと考える。したがって、ホールスラスタにおける小型・低電力化は SPT より TAL の方が適していることが示唆される。一方、TAL では SPT よりサイズがコンパクトになるためプラズマ密度が高くなり、より強い磁場が必要になるため、磁場を生成するための消費電力をいかに抑えるかが重要になる。現に、TMU-034 において、放電チャンネル出口中心における磁束密度を 39.2 mT にするには 18 W 程度の消費電力を要していた。

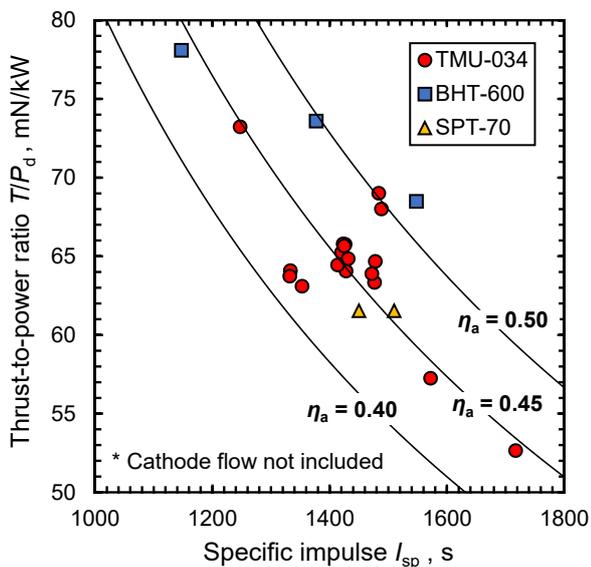


図 13 TMU-034 と SPT の性能比較。

4. おわりに

小型・低電力の TAL 型ホールスラスタにおける作動特性を調査するため、平均放電チャンネル径が 28 mm の TAL の設計・製作・評価を行った結果、同電力レベルの SPT と比較して半分以下の放電チャンネル径で遜色ない性能を示した。

推進性能に関しては、放電電圧 250 V、アノード流量 30 sccm、放電チャンネル出口中心における磁束密度 39.4 mT の条件で、消費電力は 618 W となり、アノード効率 50.2 %、推力電力比 69.0 mN/kW、比推力 1480 s を達成した。

内部効率は、電圧利用効率は概ね 90 %前後と高く、推進剤利用効率とビーム効率は流量の増加に従い向上した。一方、電流利用効率は 18 sccm までは増加傾向であるが、18 sccm 以上では減少傾向に転じた。

放電電流振動に関しては、推進剤流量の変化に対して振幅および周波数は大きく変化し、性能が良い動作点では振動は抑えられる傾向があった。また、SPT で観測される放電振動の周波数 (20 kHz 程度) より高周波 (40 - 100 kHz) の放電振動が観測された。

参考文献

- 1) D. Lev, R. M. Myers, K. M. Lemmer, J. Kolbeck, H. Koizumi, and K. Polzin, "The technological and commercial expansion of electric propulsion," *Acta Astronautica*, vol. 159, no. November 2018, pp. 213–227, 2019.
- 2) H. Watanabe, S. Cho, and K. Kubota, "Performance and plume characteristics of an 85 W class Hall thruster," *Acta Astronautica*, vol. 166, pp. 227–237, 2020.
- 3) D. Manzella, S. Oleson, J. Sankovic, T. Haag, A. Semnenkin, and V. Kim, "Evaluation of low power hall thruster propulsion," Proceedings of the 32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-96-2736, 1996.
- 4) D. LEV et al., "The Development of CAM200 - Low Power Hall Thruster," *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, vol. 14, no. ists30, p. Pb_217-Pb_223, 2016.
- 5) L. Zakharenkov, G. Chislov, and A. Semnenkin, "Study of Low Power TAL Characteristics," Proceedings of the 27th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2001-041, 2001.
- 6) N. Z. Warner, "Theoretical and Experimental Investigation of Hall Thruster Miniaturization," Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- 7) A. Olano, J. Ren, G. Zhang, H. Tang, and X. Yang, "Performance of a 100 Watt Radial Scaled Thruster with Anode Layer," Proceedings of the 36th International Electric Propulsion Conference, 2019, IEPC-2019-216, 2019.
- 8) D. L. Brown, C. W. Larson, B. E. Beal, and A. D. Gallimore, "Methodology and historical perspective of a hall thruster efficiency analysis," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 25, no. 6, pp. 1163–1177, 2009.
- 9) D. L. Brown, M. L. R. Walker, J. Szabo, W. Huang, and J. E. Foster, "Recommended Practice for Use of Faraday Probes in Electric Propulsion Testing," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 33, no. 3, pp. 614–637, 2017.
- 10) N. Yamamoto, Y. Arakawa, K. Komurasaki, and Y. Arakawa, "Discharge Current Oscillation in Hall Thrusters," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 21, no. 5, pp. 870–876, 2005.
- 11) J. M. Fife, M. Martinez-Sanchez, and J. Szabof, "A numerical study of low-frequency discharge oscillations in hall thrusters," Proceedings of the 33rd Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA-97-3052, 1997.
- 12) G. Benavides, H. Kamhawi, J. Mackey, and T. Haag, "Demonstration of a 600 Watt Hybrid Iodine-Xenon Electric Propulsion System," GRC-E-DAA-TN55166, 2018.
- 13) C. W. Clauss, D. L. Tilley, and D. A. Barnhart, "Benefits of Low-Power Stationary Plasma Thruster Propulsion for Small Satellites," Proceedings of the 9th AIAA/USU Conference on Small Satellites, 1995.