

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月30日現在

機関番号：34406

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22360360

研究課題名（和文） 高比推力・長寿命ホールスラスタの開発研究

研究課題名（英文） RESEARCH AND DEVELOPMENT OF HIGH-SPECIFIC-IMPULSE AND LONG-LIFETIME HALL THRUSTERS

研究代表者

田原 弘一 (TAHARA HIROKAZU)

大阪工業大学・工学部・教授

研究者番号：20207210

研究成果の概要（和文）：本研究では、ホールスラスタの高電圧安定作動による高比推力化と長寿命化を目指し、5-25kW 級ホールスラスタ開発のための基礎データを提供する。放電室直径100mm クラスのホールスラスタの放電電圧を高くすることで、小型でありながら高比推力化を試みた。耐久性に若干問題があったが、比推力 3000 秒以上、推進効率 60%以上という数値を記録した。これは現時点で放電室直径 100mm クラスのホールスラスタでは日本初となる。

研究成果の概要（英文）：High power and high specific impulse characteristics of Hall thrusters were experimentally studied. Input power and specific impulse reached above 5kW and 3,000sec, respectively. Hall thrusters are expected for future space exploration. In this study, we introduce the recent research and development of two kinds of Hall thruster at Osaka Institute of Technology, Japan. Specially, for Japanese in-space propulsion, high-power and high-specific-impulse characteristics of Hall thruster were measured with both the laboratory-model SPT-type THT-VI and TAL-type TALT-2 in order to obtain basic thruster performances with high discharge voltage and large mass flow rate and to understand practical problems under high power operations. With THT-VI the discharge current was almost flat with a constant mass flow rate although not so good with high discharge voltages of 800-1000V. The input power reached above 5kW. Both the thrust and the specific impulse linearly increase with discharge voltage. The thrust ranges from 50 to 200mN at specific impulse of 1500-4000sec. The thrust efficiency reaches above 60%. Typical thrust performance is a thrust of 110mN and a thrust efficiency of 61% at a specific impulse of 3200sec with an input power of 2.8kW. The discharge current oscillation also increased with raising discharge voltage. As for TALT-2 thruster, the input power and the specific impulse are above 3.5kW and, 2800sec, respectively.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2011年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2012年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

研究分野：宇宙推進、電気推進

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：宇宙推進・電気推進・ホールスラスタ・高比推力・長寿命・推進性能・損耗

1. 研究開始当初の背景

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。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（ 1mN/cm^2 ）を実現しており、この 25 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。

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が進み、多くの商業衛星に搭載されてきた。しかしながら、ホールスラスタのプラズマ生成・加速過程、噴出流の状態などについては未解明の問題が多く存在し、明確な設計指針・相似則はまだ得られていない。

さらに、実用化が進む一方で更なる作動範囲の拡大が望まれるようになった。イオンエンジンに匹敵する高比推力（3,000 秒以上）の達成、長寿命化（10,000 時間以上（寿命は加速チャンネル損耗量に依存））である。これらが達成されればイオンエンジンに取って代わる、大型商業衛星用の姿勢制御スラスタ、深宇宙探査用主推進スラスタとしてホールスラスタが性能面、システム面で優位に立ち、国内外の今後のスラスタ利用の動向、ミッション設計を大きく変える可能性を秘めている。

2. 研究の目的

本研究では、ホールスラスタにおいて3,000 秒以上の高比推力と10,000時間以上の長作動寿命を同時に達成するために、性能測定実験、プラズマ物理量測定実験、寿命診断実験とプラズマ粒子法による数値計算を併用し、(1) 加速チャンネルの材質を変更し壁近傍のシースプラズマ特性を変化させる、(2) 壁近傍の印加磁場の特性を変化させることによりイオンのチャンネル壁面衝突を極端に防ぐことができる最適なイオン加速状態を実現することを目指した。

3. 研究の方法

ロシア SPT100 と同じ形状を持つホールスラスタ THT-VI を設計・製作した。これまでの実験結果とプラズマ流れ場の数値計算を参考にし、電力レベル 1~2kW のスラスタを

設計した。さらに既存のアノードレーア型スラスタ TALT-2 も使用した。加速チャンネルの材質、陽極形状・位置は変更可能とし、さらに磁場形状・強度は補助磁場コイルを複数配置し自由に変化させた。

推進剤にキセノンを用いて、放電電圧（200~1,200V（比推力 3,000 秒以上達成可能））と推進剤質量流量をパラメータとして変化させ、推力、放電電流、加速チャンネル損耗量を測定した。得られた結果より、比推力、推進効率を見積もった。加速チャンネルの材質（BN, BNAIN, BNAIO₂, AlN, Al₂O₃に変更、成分の傾斜機能化）と磁場形状・強度を変え、それらの最適条件を調べた。

得られた結果から、ホールスラスタ放電室内部、特に加速チャンネル壁近傍、及び下流の噴出流の状態を考察しプラズマ生成、イオン加速過程を推定すると共に、それらの結果と推進性能・加速チャンネル損耗特性との相関関係を検討した。定量的な検討を十分行うと共に、高比推力化、長寿命化のための最適なイオン加速過程が実現できる作動条件を探索した。

4. 研究成果

(1) THT-VI と TALT2 の性能特性

放電電圧 300~1000V まで行い実際に THT-VI の動作を確認した。しかし放電電圧 1000V 時のデータは取得できなかった。これは 1000V 実験時のスラスタの揺れが大きく安定しなかったことと、安定を待つまでの間にスラスタに熱がこもり破損してしまったことに起因する。図 1 と図 2 はそれぞれ放電電圧 300V と 1000V の実験時の写真である。スラスタは右端に設置されており、そこから左に向けて噴射を行っている。中央下側に見えるのはホローカソードである。そしてスラスタからホローカソードまでの距離は 200mm である。非常に輝度が高いことがわかる。放電電圧の値に対する放電電流の値を図 3、放電電圧の値に対する推力・比推力の値を図 4、放電電圧の値に対する推進効率の値を図 5 に示した。

グラフが所々切れているのは、推進剤流量の値が一定ではないからである。550V までの実験では安定した動作をしていたが、600V で作動を試みたところ動作しない、もしくは点滅するなどの非常に不安定になった。この段階で推進剤流量を増加させたところ再び安定動作をした。これは連続作動を行って、スラスタが高温化していたことによる弊害、コイルの磁場強度が足りなくなったなどが原因と考えられる。800V 実験時も似たような現象であった。図 3 のグラフでは推進剤流量、カソード流量を増加したことによる放電電流値の増加が見て取れる。



図1 放電電圧 300V 作動写真.



図2 放電電圧 1000V 作動写真.

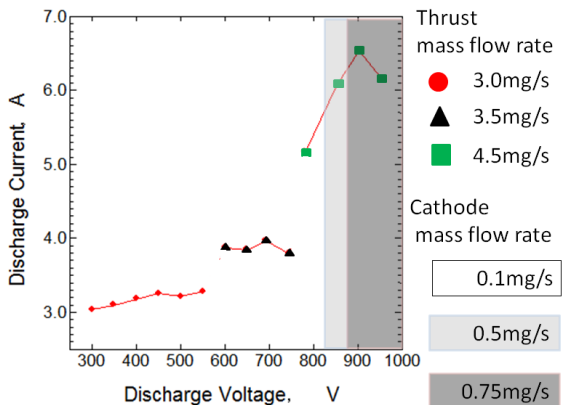


図3 放電電流-放電電圧.

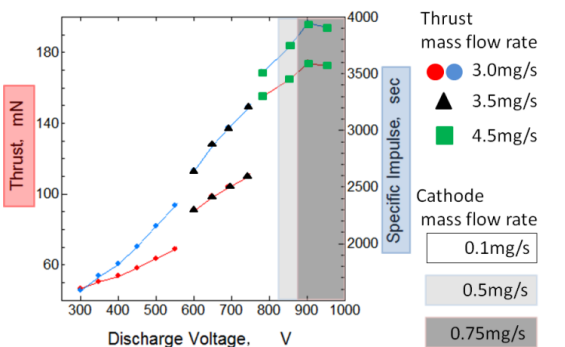


図4 推力・比推力-放電電圧.

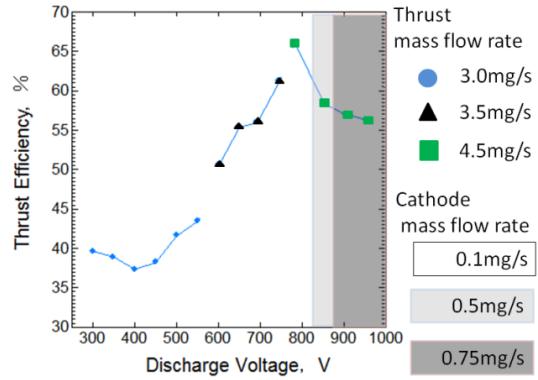


図5 推進効率-放電電圧.

表1 放電電圧750V時の性能特性.

Discharge Voltage	744 V
Discharge Current	3.8 A
Thrust	110 mN
Specific Impulse	3202 sec
Thrust efficiency	61 %
Power	2.8 KW

図4では950V時最大の推力を記録しているが、実験中の動画を見ると高電圧になればなるほどスラストが前後に揺れているのが確認できた。これは推力値がここまで高くなったことの一因かもしれない。実験結果の一例として放電電圧300V~1000Vのうち750V時の実験結果を書き出すと表1のようになる。

こうして、本実験での最大消費電力は5kW以上、比推力3000s、効率60%となった。TALT2ホールスラストにおいても同様の特性を取得していると同時に、数値計算による性能予測、内部物理現象の把握にも成功している。

(2)他の機関のホールスラストとの比較

実験値を比較するにあたって、5kW付近のスラストと比推力と推進効率の比較を行った。表2に5kW付近のスラストを示す。比推力については173Mv2の適切なデータが無かったため、大型ではあるがNASA-400Mのデータを比較に用いた。本比較に用いたスラストはいずれもが放電室直径がSPT100と比較すると大きく、173Mv2で約1.75倍、SPT-140で約1.4倍、NASA-400Mに至っては約4倍である。

表2 5kW付近のスラスタ.

Thruster name	Company and University
6kw Hall Thruster	PPEL
173Mv2	NASA
P5-2	PPEL
BPT-4000	Aerojet
P5	University of Michigan and US Air Force Research Lab
SPT-140	Fakel Enterprises
PPS-1350	Snecma

図6、図7のグラフは放電電圧600V~750Vの領域でTHT-VI、SPT-140において推進剤流量の条件が同じである。よって最も正確に性能を比較できる領域であるといえる。この領域でTHT-VIは推進効率と比推力のどちらもSPT-140の値を超えて良好な結果が出ている。

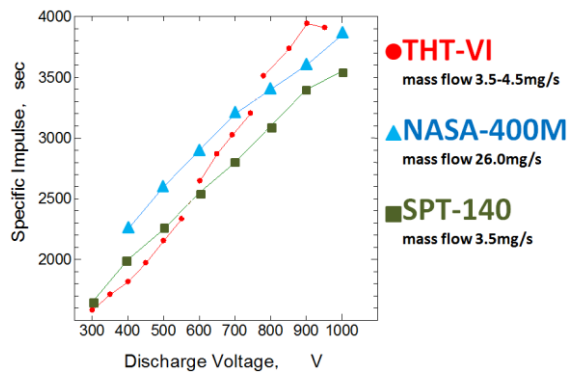


図6 比推力-放電電圧.

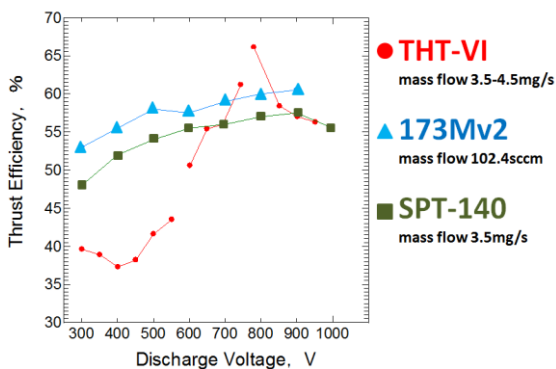


図7 推進効率-放電電圧.

(3)まとめ

本研究では、ホールスラスタの高電圧作動を行い、高比推力化を目指し、放電電圧

1000V による作動に成功した。これは現時点で放電室直径 100mm クラスのホールスラスタでは日本初となる。また比推力 3000sec 以上、推進効率 60%以上という数値も記録した。今後は更に広い領域での実験を行い、また長時間安定動作へ向けた研究を継続していく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

① Tomoyuki Ikeda, Naru Sugimoto, Kazuya Togawa, Yohei Mito and Hirokazu Tahara, "Research and Development of High-Efficiency Hall-Type Ion Engines for Small Spacecrafts," Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Vol.1, No.1, 2012, pp.1-6, DOI コード・URL 無, 査読有.

② Yohei Mito, Tomoyuki Ikeda, Naru Sugimoto, Kazuya Togawa and Hirokazu Tahara, "Research and Development of High-Power High-Efficiency Hall-Type Ion Engines for Space Exploration," Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Vol.1, No.1, 2012, pp.7-12, DOI コード・URL 無, 査読有.

③ Tomoyuki Ikeda, Kazuya Togawa, Yohei Mito, Hirokazu Tahara and Yosuke Watanabe, "Performance Characteristics of Very Low Power Cylindrical Hall Thrusters for Nano-Satellites," Asian Propulsion and Power (AJSP), Vol.1, No.1, 2012, AJCPP2012-006, DOI コード・URL 無, 査読無.

④ Tomoyuki Ikeda, Tsuyoshi Fujita, Hirokazu Tahara and Yosuke Watanabe, "Prediction of Hall Thruster Performance and Plasma Features," Frontier of Applied Plasma Technology, Vol.4, No.2, 2011, pp.70-75, DOI コード・URL 無, 査読有.

⑤ Hirokazu Tahara, Takuma Tonari, Tsuyoshi Fujita, Tomoyuki Ikeda and Yosuke Watanabe, "Operational Characteristics of Very Low Power Cylindrical Hall Thrusters," Frontier of Applied Plasma Technology, Vol.4, No.1, 2011, pp.6-11, DOI コード・URL 無, 査読有.

⑥ Tomoyuki Ikeda, Kazuya Togawa, Hirokazu Tahara and Yosuke Watanabe, "Performance Characteristics of Very Low Power Cylindrical Hall Thrusters for the Nano-Satellite "PROITERES-3"," Advances in Applied Plasma Science, 2011, Vol.8, pp.101-102, DOI コード・URL 無, 査読有.

⑦ Tomoyuki Ikeda, Kazuya Togawa,

Takahiro Nishida, Hirokazu Tahara and Yosuke Watanabe, “ Research and Development of Very Low Power Cylindrical Hall Thrusters for Nano-Satellites,” Electric Propulsion (32nd IEPC), 2011, IEPC-2011-039, DOI コード・URL 無, 査読有.

⑧ Tomoyuki Ikeda, Tsuyoshi Fujita, Naru Sugimoto, Jun-ichi Ozaki, Hirokazu Tahara and Yosuke Watanabe, “ Optimization of Acceleration Channel Structure and Material for Magnetic-Layer-Type Hall Thrusters ,” Electric Propulsion (32nd IEPC), 2011, IEPC-2011-038, DOI コード・URL 無, 査読有.

⑨ Naru Sugimoto, Makoto Nose, Kazuya Togawa, Takahiro Nishida, Tomoyuki Ikeda, Hirokazu Tahara and Yosuke Watanabe, “ Optimization of Acceleration Channel Structure and Material for Magnetic-Layer-Type Hall Thrusters,” Space Technology and Science (28th ISTS), 2011, ISTS 2011-b-18, DOI コード・URL 無, 査読無.

⑩ Makoto Nose, Naru Sugimoto, Kazuya Togawa, Takahiro Nishida, Tomoyuki Ikeda, Tomoyuki Ikeda, Hirokazu Tahara and Yosuke Watanabe” Basic Performance Characteristics of Anode-Layer-Type Hall Thrusters,” Space Technology and Science (28th ISTS), 2011, ISTS 2011-b-60p, DOI コード・URL 無, 査読無.

⑪ Hirokazu Tahara, Tsuyoshi Fujita, Tomoyuki Ikeda and Yosuke Watanabe, “ Influence of Channel Structure and Material on Hall Thruster Performance,” Plasma Application and Hybrid Functionally Materials, Vol.1, No.1, 2011, pp.1-2, DOI コード・URL 無, 査読有. [学会発表] (計 9 件)

① 杉本 成, 池田知行, 戸川和也, 三藤陽平, 加藤優貴, 山本 怜, 田原弘一, 渡辺陽介「軌道間輸送に向けたホールスラストエンジンの開発研究」日本機械学会関西支部 第 8 8 期定時総会講演会, 1212, 2013 年 3 月 18 日, 大阪工業大学大宮キャンパス (大阪府大阪市) .

② 加藤優貴, 山本 怜, 三藤陽平, 杉本 成, 戸川和也, 池田知行, 田原弘一「大電力高比推力ホール型イオンロケットエンジンの性能特性」日本機械学会関西支部 関西学生会平成 24 年度学生員卒業研究発表講演会, 11P22, 2013 年 3 月 17 日, 大阪工業大学大宮キャンパス (大阪府大阪市) .

③ 三藤陽平, 加藤優貴, 山本 怜, 杉本 成, 戸川和也, 池田知行, 田原弘一「T A L 及び

S P T ホールスラストの高電圧作動・高比推力化実験」平成 24 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2012-026, 2013 年 1 月 19 日, J A X A 宇宙科学研究所 (神奈川県相模原市) .

④ 加藤優貴, 山本 怜, 杉本 成, 戸川和也, 三藤陽平, 池田知行, 田原弘一「高比推力大電力ホールスラストの性能特性」第 49 回日本航空宇宙学会 中部・関西支部合同秋期大会, C5, 2012 年 11 月 30 日, 名城大学 タワー 75 (名古屋市天白区) .

⑤ 杉本 成, 池田知行, 戸川和也, 加藤優貴, 山本 怜, 田原弘一, 渡辺陽介「SPT及びTALホールスラストの大電力・高比推力作動」第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 1J20, 2012 年 11 月 20 日, 別府国際コンベンションセンター (ビーコンプラザ) (大分県別府市) .

⑥ 田原弘一, 池田知行, 戸川和也, 杉本 成, 三藤陽平「大阪工業大学における宇宙航行用ホール型イオンロケットエンジンの開発研究」電気学会 プラズマ研究会, PST-12-043, PPT-12-049, 2012 年 8 月 8 日, 岩手大学 (岩手県盛岡市) .

⑦ 三藤陽平, 杉本 成, 加藤優貴, 山本 怜, 田原弘一「ホール型イオンスラストの大電力・高比推力作動」電気学会 プラズマ研究会, PST-12-025, 2012 年 5 月 10 日, 豊橋技術科学大学 ベンチャービジネスラボラトリー (愛知県豊橋市) .

⑧ 杉本 成, 池田知行, 戸川和也, 三藤陽平, 林 泰志, 田原弘一「ホールスラストの高電圧・高比推力作動特性」平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2011-015, 2012 年 1 月 19 日, J A X A 宇宙科学研究所 (神奈川県相模原市) .

⑨ 田原弘一, 藤田 剛, 杉本 成, 戸川和也, 西田隆寛, 野瀬 真, 渡辺陽介「ホールスラストの加速チャンネル構造・材質の最適化」第 51 回航空原動機・宇宙推進講演会, 2011 年 3 月 3 日, 広島 Y M C A ホール (広島県広島市) .

[その他]
ホームページ等
<http://www.oit.ac.jp/med/~tahara/top.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田原 弘一 (TAHARA HIROKAZU)
大阪工業大学・工学部・教授
研究者番号：20207210

(2) 研究分担者 無

(3) 連携研究者 無