

TAL 及び SPT ホールスラスタの高電圧作動・高比推力化実験

○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 (大阪工業大学)

Experiment on High-Power and High-Specific-Impulse TAL and SPT Hall Thrusters

Yohei MITO, Yuki KATO, Ryo YAMAMOTO, Naru SUGIMOTO, Kazuya TOGAWA,
Tomoyuki IKEDA and Hirokazu TAHARA

The operational range of Hall thrusters will be hoped to be expanded for future orbital transfer vehicle and Mars exploration. In this study, both SPT and TAL Hall thrusters were operated with higher discharge voltages, that is, with higher input powers and large specific impulses. The input powers and specific impulse for the SPT-type Hall thruster reached above 5kW and 3000sec, respectively. In the TAL Hall thruster, they were above 3.5kW and, 2800sec, respectively. It was found that the both thrusters are promising for the future missions although the operations were thermally severe.

Key Words: Electric propulsion, Hall thruster, High power, High specific impulse, Orbital transfer vehicle, Mars exploration

1. 目的および背景

恒久的な宇宙開発には、燃費性能に優れ、小型で構造が簡素なホールスラスタの活躍が今後より一層必要になってくる。そういったホールスラスタの開発・運用を推し進めるためにも、ホールスラスタは高い目標性能をクリアしなければならない。その一環として 1GW 級太陽発電衛星建設用の大型電気推進や有人火星探査船等の案が既に出されている¹。大型電気推進や有人火星探査船用エンジンには高い推力と高い推進効率、そして長期のミッションに耐えうる寿命が必要になってくる。しかし現状でホールスラスタがその性能のすべてを満たしているとは言えない。しかし効率や潜在的な寿命、コンパクトさなどを考えた場合、更なる性能向上でこれらを満たすことも可能となってくる。

本研究の目的は SPT 及び TAL ホールスラスタの大電力・高比推力化である。研究対象として SPT は比較的小型である、放電室直径 100mm の THT-VI ホールスラスタ (SPT100 をモデルに大阪工業大学で開発) に放電電圧 1kV まで、従来の電圧 (200~400V) の倍程度の電圧をかけ比推力 3000sec 以上を目指した。比較的安定動作を行える SPT タイプにて高電圧作動時の問題を提示し、更に放電室直径 65mm と小型である TAL の TALT-2 ホールスラスタ (大阪大学にて開発) にて再び大電力・高比推力化を行いスラスタの高性能化を目指す。最終的に、こうして得たデータは上記の大型電気推進や有人火星探査船等の主力エンジンの開発に役立てられる。

2. 実験装置

2.1. THT-VI

使用した SPT ホールスラスタ (THT-VI) の外観図と断面図を図 1, 2, 放電室とコイルの仕様を表 1, 2 に示す。



図 1 THT-VI 外観図

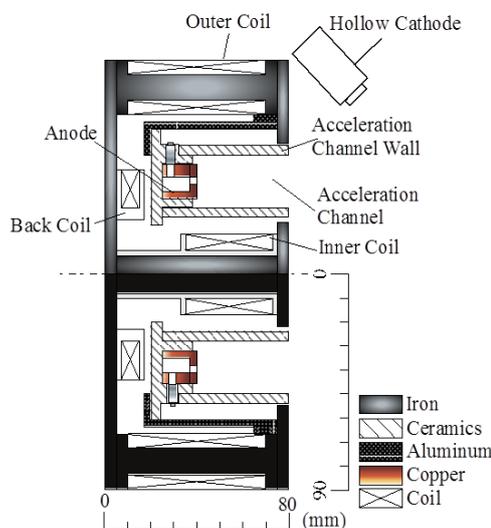


図 2 THT-VI 断面図

表 1 THT-VI の放電室詳細

Discharge channel	
Length	40mm
Inner diameter	56mm
Outer diameter	100mm
Material	Boron nitride (BN)

表 2 THT-VI のコイル詳細

Coils	
Material	Copper φ0.5mm
Inner coil	
Number of turns	1200
Quantity	1
Outer coils	
Number of turns	1400
Quantity	6
Trim coil	
Number of turns	350
Quantity	1

放電室長さは 40mm, 内径は 56mm, 外径は 100mm, 材質は BN を使用した². 電磁石に用いたコイルは内側に 1 個, 外周に 6 個, アノードの後ろ側に 1 個である³.

2.2. TALT-2

使用した TAL ホールスラスト (TALT-2) の外観図と断面図を図 3, 4, 放電室とコイルの仕様を表 3, 4 に示す.

放電室長さは 35mm, 内径は 45mm, 外径は 65mm, 材質は銅を使用した. 電磁石に用いたコイルは内側に 1 個, 外側 1 個, その裏側に 1 個である⁴.

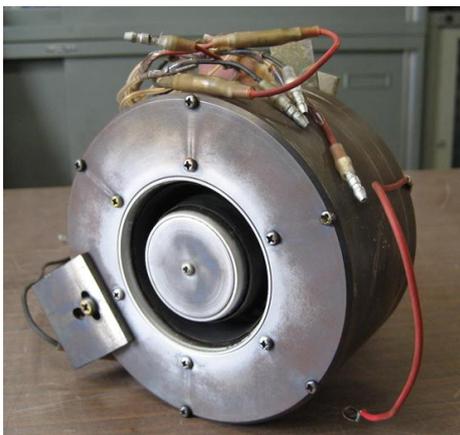


図 3 TALT-2 外観図

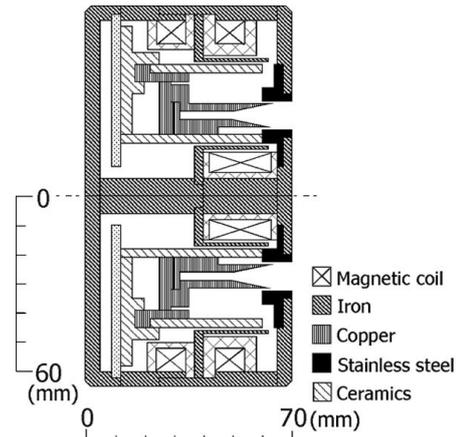


図 4 TALT-2 断面図

表 3 TALT-2 の放電室詳細

Discharge channel	
Length	35mm
Inner diameter	45mm
Outer diameter	65mm
Material	Copper (Cu)

表 4 TALT-2 のコイル詳細

Coils	
material	Copper φ0.5mm
Inner coil	
Number of turns	480
Quantity	1
Outer coils	
Number of turns	240
Quantity	1
Trim coil	
Number of turns	200
Quantity	1

2.3. 真空装置

実験装置の概略図を図 5 に示す⁵.

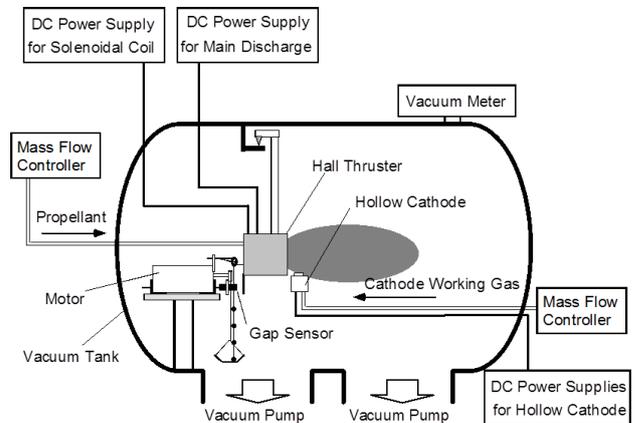


図 5 実験システムの全体図

本実験で用いた真空チェンバーは直径 1.2m, 長さ 2.25m のステンレス製水冷ジャケット式である。チェンバーにはロータリーポンプとターボ分子ポンプ(総排気速度 10000 l/s)が 2 組接続されており, 内部圧力を 5.3×10^{-4} Pa まで下げることができる。推力はスラストスタンドとギャップセンサを用いて, 振り子方式で測定する。

3. 実験条件

3.1. THT-VI

表 5 にスラストの作動条件を示す⁶。放電電圧は 300V から 1000V まで 50V 刻みで行う。推進剤本体流量は 3.0mg/s~4.5mg/s, カソード流量 0.1mg/sec~0.75mg/sec と変更して行った。推進剤には Xe を使用した。実験で取得したデータは放電電流-放電電圧の関係と推力・比推力-放電電圧の関係, 推進効率-放電電圧の関係の 3 種である。

表 5 THT-VI 実験条件

Discharge Voltage	300~1000V	
Propellant	Xenon	
Mass Flow Rate	THT-VI	3.0~4.5mg/s
	Hollow Cathode	0.1~0.75mg/s
Coil Current	0.3, 0.3, 0.9A (inner, outer, trim)	
Cathode Distance	200mm	
Backpressure	3.0×10^{-2} Pa	

3.2. TALT-2

表 6 にスラストの作動条件を示す⁶。放電電圧は 300V から 550V まで 50V 刻みで行う。推進剤本体流量は 3.0mg/s, カソード流量 0.1mg/sec であり, 推進剤には Xe を使用した。実験で取得したデータは放電電流-放電電圧の関係と推力・比推力-放電電圧の関係, 推進効率-放電電圧の関係の 3 種である。

表 6 TALT-2 実験条件

Discharge Voltage	300~550V	
Propellant	Xenon	
Mass Flow Rate	TALT-2	3.0mg/s
	Hollow Cathode	0.1mg/s
Coil Current	0.8, 0.8, 2.0A (inner, outer, trim)	
Cathode Distance	133mm	
Backpressure	1.0×10^{-2} Pa	

4. 実験結果

4.1. THT-VI

放電電流 - 放電電圧のグラフは図 6, 推力・比推力 - 放電電圧のグラフは図 7, 推進効率 - 放電電圧のグラフが図 8 のように求まった。放電電圧 1000V 時のデータが取得出来なかったのは 1000V 実験時のスラスト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トに熱がこもり破損してしまったことに起因する。推進剤流量の本体流量とカソード流量が変化しているのは, 噴射時の投入電力が高くなるにしたがって作動が不安定になり, その都度それらの流量を増加したことに起因する。推進剤流量についてそれぞれ詳しく説明すると, 本体流量は放電電圧 300V~550V まで 3.0mg/sec, 600V~750V まで 3.5mg/sec, 800V~1000V まで 4.5mg/sec である。カソード流量に関しては放電電圧 300V~800V まで 0.1mg/sec, 850V 時 0.5mg/sec, 900V~1000V まで 0.75mg/sec である。また, 放電電圧 300V と放電電圧 1000V 時の写真をそれぞれ図 9,10 に示す。

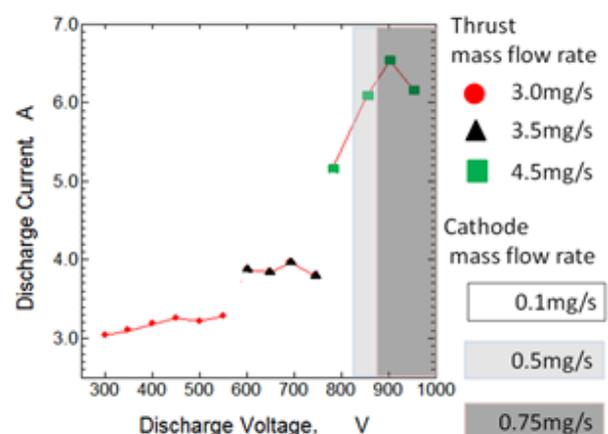


図 6 放電電流—放電電圧

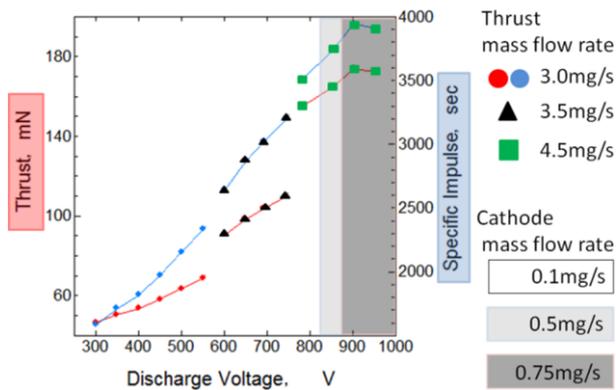


図7 推力・比推力 - 放電電圧

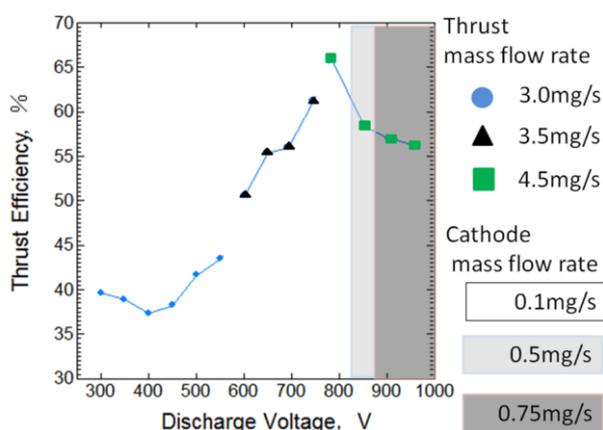


図8 推進効率-放電電圧



図9 放電電圧 300V 時噴射図



図10 放電電圧 1000V 時噴射図

放電電圧の増加により、放電電流も増加するが、800～の放電電圧の上昇が著しい。この理由は放電電圧 600～750V の結果からも読み取れる。放電電圧 600～750V 時は、300～550V までの推進剤本体流量 3.0mg/sec と比較

して、0.5mg/sec 増加させている。これにより移動する電子の量も増加し、約 1A ほど放電電流が増加する結果となった。放電電圧 800V～では、それまでの 600～750V と比較して推進剤本体流量を 1.0mg/sec 増加させている。更にカソード流量も 0.1～0.75mg/sec と増加させているため、急激な放電電流値の増加を招いた。推力値も同じく、放電電圧値の増加に合わせて 1 次曲線的に増加しつつ、推進剤流量の増加の影響を受け大きく増加している。効率に関してはカソード流量を増加させ、放電電流値が大きく上昇した 850V～の値がそれまで増加傾向だった効率を低下させた。また写真では 1kV 時の方がプリュームが発散しているのが見て取れる。

4.2. 考察

放電電圧が増加するごとに推力も増加していたが、放電電圧 950V 時は 900V 時を下回る値となった。これは投入電力が増加したことにより推進剤が高電離したため、流した推進剤の一部しか電離しなかったとも推測されたが放電電流値が低下していることから考えにくい。現実験はそもそも動作自体が非常に不安定であり、そのデータも正しいものとは言えないと考えられる。

4.3. TALT-2

放電電流 - 放電電圧のグラフは図 11、推力・比推力 - 放電電圧のグラフは図 12、推進効率 - 放電電圧のグラフが図 13、のように求まった。放電電圧 600V～のデータがないのは放電電圧 600V 動作に入ったところでアノードが融解し実験中止となったためである。推進剤本体流量は SPT と違い常時 3.0mg/sec、カソード流量は 0.1mg/sec の一定である。アノードが融解する前のスラスト出口方向の写真を図 14 に示す。実際にアノードの融解が起こったのも図 14 の写真右上部、オレンジ色の部分である。

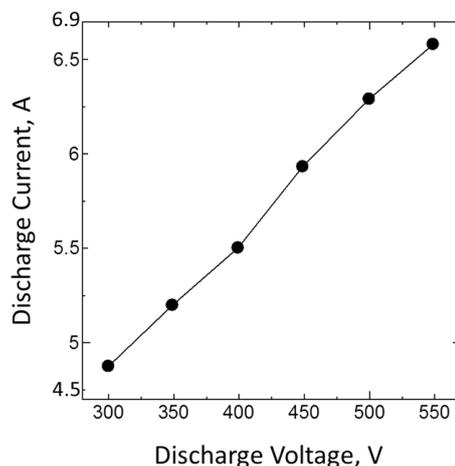


図11 放電電流—放電電圧

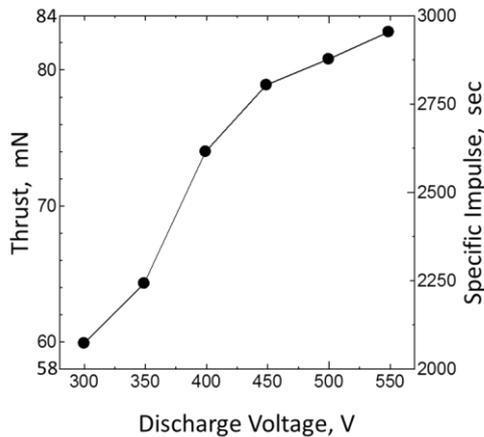


図 12 推力・比推力 - 放電電圧

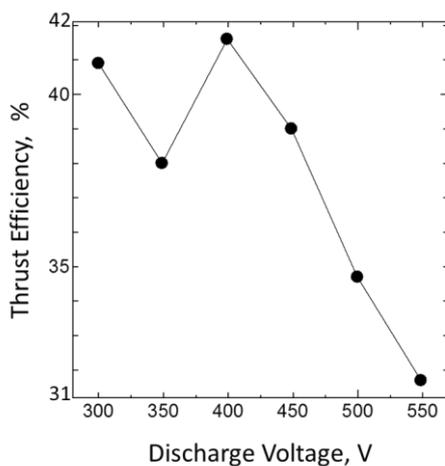


図 13 推進効率-放電電圧

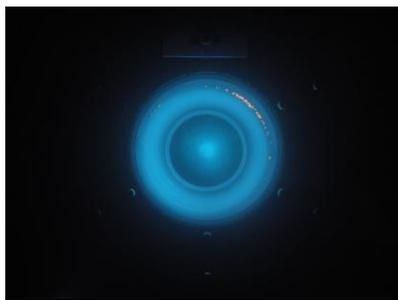


図 14 TALT-2 スラスタ出口方向写真

放電電圧の上昇に合わせて、放電電流値はほぼ 1 次曲線的に増加している。しかし推力値は放電電圧 450V までの条件から伸び悩んでいるように見える。また放電電圧 350V 時の推力値もまわりと比較して低いものとなっている。これらの結果を反映して、放電電圧と推進効率の関係は 450V までの段階で減少する方向、また 350V 時もまわりと比較して悪い結果となってしまった。放電電圧 350V 時は、実験時の測定装置の問題とも考えられる。しかし放電電圧 450V までの条件では明確に推力の増加量が

低下している。

4.4. 考察

推力値が放電電圧 450V までの条件で伸び悩んでいるのは、TALT-2 の設計の想定放電電圧が 400V までであることが起因していると考えられる。このため想定以上の電力を投入しても、推力値は微増し推進効率の値は悪化したと推測される。また本実験は外側のアノードが融解したが、熱的に不利な内側のアノードにその兆しがあり見られなかったことから、プルームが外周方向に拡散してしまっていた可能性も考えられる。

5. 結論

5.1. まとめ

THT-VI と TALT-2 について、大電力作動実験を行い高比推力化を目指した。

1)THT-VI は、放電電圧 300~1000V(放電電圧 1000V 時のデータは取得失敗)にて動作を確認した。

2)THT-VI は、比推力 1582.8~3943.8sec を記録した。最も値が低かったのは放電電圧 300V 時であり、最も値が高かったのは放電電圧 900V 時である。

3)THT-VI は、推力 46.57~174.05mN を記録した。最も値が低かったのは放電電圧 300V 時であり、最も値が高かったのは放電電圧 900V 時である。

4)THT-VI は、推進効率 38.2~58.4% を記録した。最も値が低かったのは放電電圧 350V 時であり、最も値が高かったのは放電電圧 850V 時である。

5)THT-VI は、高電圧時の動作が非常に不安定であり、取得したデータもその影響を受け正確な値ではないと推測される

6)TALT-2 は、放電電圧 300~550V(放電電圧 600V 実験時にアノード融解)にて動作を確認した。

7)TALT-2 は、比推力 2036.7~2814.5sec を記録した。最も値が低かったのは放電電圧 300V 時であり、最も値が高かったのは放電電圧 550V 時である。

8)TALT-2 は、推力 59.92~82.80mN を記録した。最も値が低かったのは放電電圧 300V 時であり、最も値が高かったのは放電電圧 550V 時である。

9)TALT-2 は、推進効率 31.7~41.6% を記録した。最も値が低かったのは放電電圧 550V 時であり、最も値が高かったのは放電電圧 400V 時である。

10)TALT-2 は、設計の想定放電電圧が 400V までであるため、それ以上電力を投入しても効率は悪化した。

11)TALT-2 は、外側のアノードから融解したことから、プ

リュームが外周方向発散していたと推測される。

5.2. 実験の妥当性

SPT では目標性能の一つとしていた比推力 3000sec を満足させる結果が得られた，しかしこれらの安定動作を確認するためには，スラストの見直しだけでなく，真空チャンバーや排気ポンプ，推力測定装置等実験システム全体の見直しが必要となってくる．今回の実験データ（THT-VI（放電室直径 100mm）を従来の SPT-140（放電室直径 140mm），173Mv2（放電室直径 148mm），NASA-400M（放電室直径 400mm）等 SPT ホールスラストのデータと比較した^{7,8}．その時のグラフを図 15，図 16 に示す．

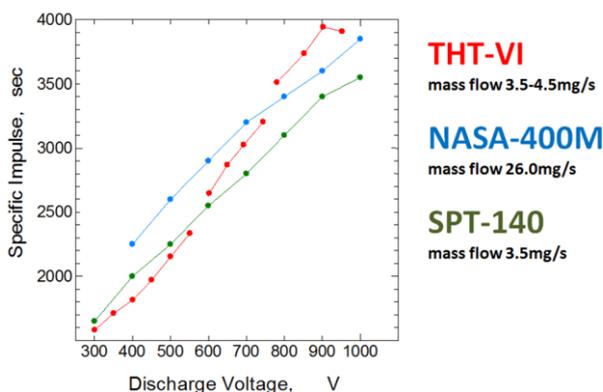


図 15 THT-VI と比較・比推力 - 放電電圧

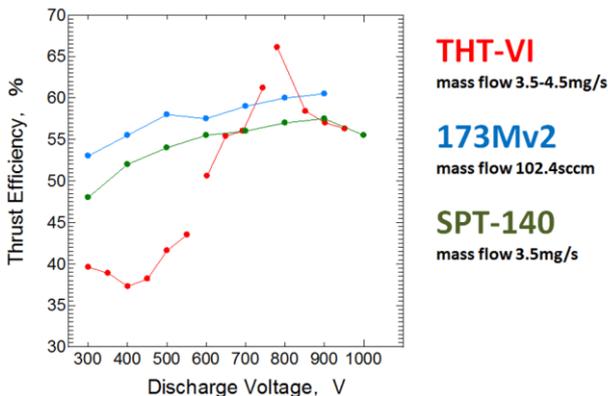


図 16 THT-VI と比較・推進効率 - 放電電圧

上記のように高電圧作動領域で従来のスラスト性能を大きく超えた値が出た．これは一概にスラストの性能が向上しただけにとどまらず，大電力による実験に何らかの問題が生じ，測定値が大きく出てしまったためとも考えられる．（特に放電電圧 800V～）実験時，スラストが大きく揺れていたことや，測定装置にまで磁場の影響が及んだことによる狂いがこういった結果の一端を担っているのではないかと考える．スラストの揺れや，測定値が大

きく出てしまった原因は，放電が安定せず推力値にも波があったことから，スラストスタンドが共振を起こしていたのではないかと推測される．これらの問題についても本実験では解決できなかったが，いくつかの解決策を講じた．

TAL は本実験を行った中でも，最も放電電圧の高い 550V 時に比推力 2814.5sec を記録した．SPT の実験のように大幅な大電力化は本実験では行えなかったが，SPT での経験を踏まえて更なる大電力化を行えば，大幅な性能向上を見込めると推測される．ただ今回実験中止に追い込まれたのは TAL 特有のアノード形状によるところが大きかったためであり，まだまだ着手しているとは言い難いアノード形状の変更等に注力して行えば，まだまだ改善は可能と予想される．また TAL 全般に言えることであるが，作動時に関して条件が SPT よりもシビアであるため，大電力・高比推力化を満足させつつ安定した噴射の条件を満たすスラストの開発はなかなか難しい．

TAL についても SPT と同様の実験測定システムを用いている以上同じような測定値誤差が出ていると考えるのが妥当であり，その対応も一部行っている．

参考文献

- 1) 山本直嗣，小紫公也，宮坂武志，船木一幸，尾崎敏之，小泉宏之，Tony Schönherr，田原弘一「In Space Propulsion としての大型ホールスラスト」平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム，STEP-2011-017，2012.
- 2) 杉本成，藤田剛，野瀬真，田原弘一「ホールスラストの加速チャンネル構造・材質の最適化」平成 22 年度宇宙輸送シンポジウム，STEP-2010-003，2011.
- 3) 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.
- 4) 弓削政郎「アノードレイヤー型ホールスラストの性能向上に関する研究」平成 18 年度大阪大学博士学位論文，2007.
- 5) 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」28th International Symposium on Space Technology and Science (28th ISTS), Okinawa Convention Center, ISTS 2011-b-18, 2011.

- 6) 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 ホールスラスタの大電力・高比推力作動」第 56 回宇宙科学技術連合講演会, 1J20, 別府国際コンベンションセンター, 2012.
- 7) Andre Bouchoule, Alexey Lazurenko, Vanessa Vial, Vladimir Kim, Vyacheslav Kozlov, Alexander Skrylnikov, “ INVESTIGATION OF THE SPT OPERATION UNDER HIGH DISCHARGE VOLTAGES” 28st International Electric Propulsion Conference, IEPC-0211-0303, 2003.
- 8) David T Jacobson, David H Manzella, Hofer Richard R. Peterson Peter Y “NASA’s 2004 Hall Thruster Program” 40th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2004.