

超小型シリンドリカル型ホールスラスタ “SCHT-1” の研究開発

小原秀憲（東海大学大学院工学研究科），
池田知行，堀澤秀之（東海大学工学部航空宇宙学科）

Research and development of Cylindrical type Hall Thruster “SCHT-1”

○Hidenori Obara（Graduate School of Engineering, Tokai University），
Tokoyuki Ikeda・Hideyuki Horisawa（School of Engineering, Tokai University）

Abstract

Recently, many companies and universities develop nano-satellite. Tokai university are designing a nano-satellite as a goal vision “Satellite for everyone” named “fabsat” and focused on electric propulsions to solve space debris problem. Tokai university are under development of new Cylindrical type Hall Thruster (CHT) for nano-satellite. In this study, a low power CHT “SCHT-1” was designed, and the thrust performance and SCHT-1 ion current distribution were measured. As a result, SCHT-1 thrust is 0.86 -1.84 mN with 200 – 500 V, and ion current peak diverged with 200 V in distance from SCHT-1 is 270, 350 mm.

1. 背 景

近年の超小型人工衛星は相乗り打ち上げだけでなく、ISS 放出機会の提供により軌道投入の手段が増え、中小企業による衛星の商用利用やビジネス展開が検討されている。また超小型人工衛星は大型衛星より低コストかつ開発期間が短くすることができるため最新技術の搭載やより挑戦的なミッションが行うことができ、日本で最も注目されている分野の1つとして教育機関でも開発が盛んにおこなわれている。

東海大学でも超小型人工衛星の開発を目指す動きがあり、その1つに「東海大学衛星プロジェクト(Tokai Satellite Project : TSP)」がある。TSPの活動の1つとして「衛星創りを気軽に楽しめる世界へ」“Satellite for everyone”をビジョンに超小型人工衛星“fabsat”の検討が挙げられる。fabsatでは衛星内に実験機器を搭載可能な共有スペースを開発する構想を行っており、この共有スペースは宇宙用電子機器の作動実証などを行う企業の要望に応えるだけでなく、衛星工学から離れた小中高生の「宇宙でこんなことをしたい！」に応えることで衛星創りを気軽に楽しめる世界の達成のための第一歩となる。

またその一方でfabsatの技術的なミッションとして電気推進機の搭載の検討がされており、推進機の搭載は小型衛星では困難な軌道変更や軌道維持を行うことができミッションの多様化が期待できる。小型衛星の電気推進機搭載は小型衛星の大気圏突入能力を持たせることに繋がり、これは人工衛星を身近にするための課題として考えられる宇宙

デブリにならない、デブリ増加の軽減技術を期待できる。

本稿ではこのようなミッションを達成するための電気推進機として検討されている試作機の1つである“SCHT-1”の紹介を行う。

2. シリンドリカル型ホールスラスタ

各推進機の主な性能例を図1に示す。ホールスラスタは他の推進機と比較し、比推力が高いだけでなく高い推力密度も持ち合わせており、高い推進効率を期待できる。

だがその一方で、小型化により放電室容積に対する放電壁表面積が増大するため放電室壁や磁気回路が過熱され、著しく推進性能が低下することが判明しており、これがホールスラスタの小型衛星搭載への障壁となっている。

そこで2000年頃、性能低下の原因となっている中心部コイルを取り除き、放電室内部に漏斗状の磁場を形成するシリンドリカル型ホールスラスタ(Cylindrical-type Hall Thruster : CHT)を米プリンストン大学のプリンストン・プラズマ物理研究所(Princeton Plasma Physics Lab)のRaites氏らが提案した^{2,3)}。CHTの概念図を図2に示す。

CHTは従来型の円環状放電室とは異なる円筒形状放電室のため同じ放電室口径の従来型ホールスラスタと比較し放電室体積/表面積比が大きく、イオン衝突による壁面の加熱や損耗・磁性材料の加熱を抑制することが期待されており小型化が可能である。またアノード付近に強磁場を形成するのでミラー効果により低電力化も期待でき、小型・省電力ホールスラスタとして小型衛星に搭載可能だと考えられる。

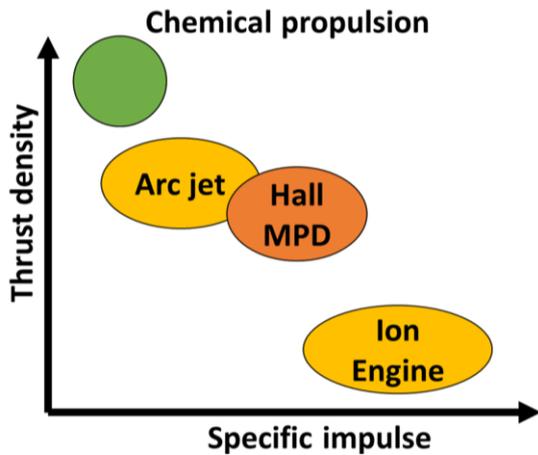
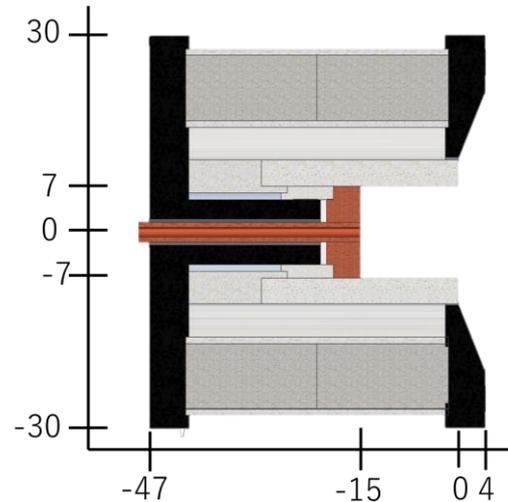


図1 推進機の代表例とその性能



(a) SCHT-1 各部寸法

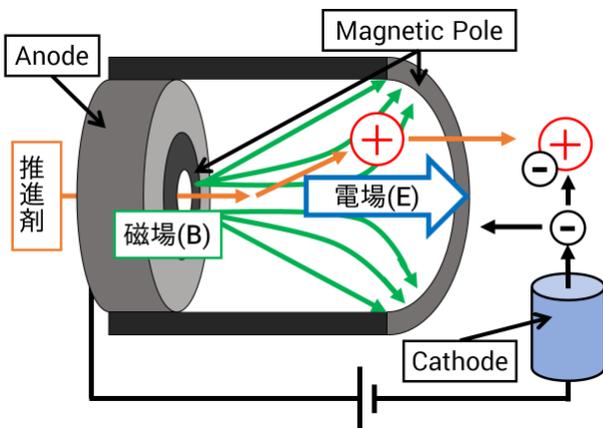
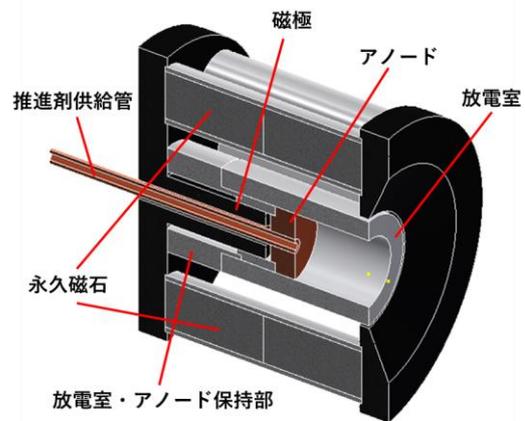


図2 CHT 概念図



(b) SCHT-1 各部名称

図3 SCHT-1 の構造

3. 試作機 SCHT-1

CHT の試作研究では大阪工業大学宇宙推進研究室にて TCHT-5 の試作研究が行われており、最適な放電室長・磁極間距離を実験によって取得した⁴⁵⁾。東海大学では TCHT-5 の研究結果を踏襲し、放電室長・磁極間距離の固定化やネジ機構の見直しなどを行い構造の単純化・小型化した SCHT-1 を試作した。

SCHT-1 の構造断面図を図3に、TCHT-5 とのサイズ比較を図4に示す。SCHT-1 は TCHT-5 の研究結果より判明した最適放電室長・磁極間距離を固定し、可変機構を省いた試作機となっている。本体磁気回路は小型化されており、本体直径は 100 mm から 60 mm に縮小している。また SCHT-1 は TCHT-5 同様に永久磁石(Nd)を用いて磁場を形成しており、コイル不要で省電力を図っている。TCHT-5 では推進剤供給管をアノードに直結した構造となっており SCHT-1 でもこの構造を採用している。TCHT-5 では永久磁石-ヨーク間をネジで固定していたが、SCHT-1 ではネジを用いず永久磁石の磁力のみで固定することにより構造の単純化を図った。



図4 SCHT-1(左)と TCHT-5(右)

4. SCHT-1 推進性能測定試験

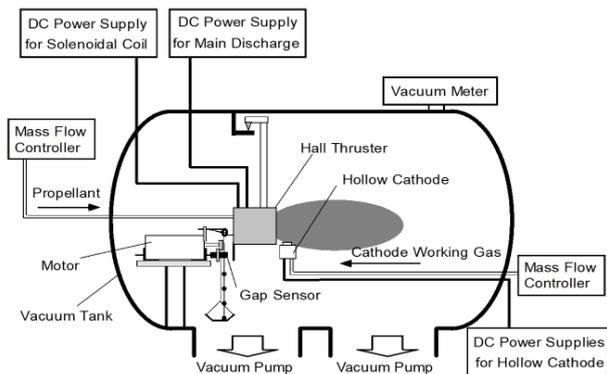
4.1 実験装置と実験条件

SCHT-1 推進性能を取得するために TCHT-5 と同様にした作動条件で推進性能測定試験を行った。実験装置概略図を図5に示す。作動試験に用いた装置一式は大阪工業大学宇宙推進研究室所有の実験装置である。実験装置に用いた真空チャンバは直径 1.2 m、奥行き 2.25 m のステンレス製真空チャンバである。作動試験中は 2 台のターボ分子ポン

ブとロータリーポンプにより 3.0×10^{-2} Pa に維持される。推力測定には渦電流式ギャップセンサと振り子式スラストスタンドを用い、振り子の移動量から推力を推定する。電子源には Veeco-Ion Tech 社の HCN-252 を使用した。表 1 に作動条件をまとめる。推進剤にはキセノン(Xe)を、推進剤流量は 0.3 mg/s、放電電圧 200 - 600 V(50 V 刻み)の条件で実施した。



(a) 真空チャンバ外観



(b) 実験装置概略図

図 5 推進性能測定試験装置図

表 1 推進性能測定実験の作動条件

真空度	3.0×10^{-2} Pa
推進剤	Xe
推進剤流量	0.3 mg/s
放電電圧	200~500 V (50 V 刻み)

4.2 SCHT-1 推進性能測定の実験結果

図 6 に SCHT-1 プリューム形状、図 7 に実験で取得した放電電流-電圧特性、図 8 に図 7 より導出した消費電力に対する測定した推力を示す。

図 7 より SCHT-1 では高電圧モードを維持して安定に作動し、放電電流は TCHT-5 と比較し 10 mA 程度低減し省電力が達成できた。しかし図 8 の消費電力と推力の関係を見ると TCHT-5 は 1.12 - 2.51 mN であるのに対し、SCHT-1 は

0.86 - 1.84 mN と推力が小さくなっていることが分かる。また図 6 の SCHT-1 プリューム形状は放電室出口付近で漏斗のような形状で急速に発散しておりイオン粒子が形成されている磁場に沿って放電室出口付近で大きく径方向に発散していると推測される。推力が小さくなっていることから、イオン粒子の系方向への発散は軸方向噴出のイオン粒子が少なくなることに関わり、それが推力の低下に起因したと推測できる。



図 6 SCHT-1 プリューム形状(キセノン)

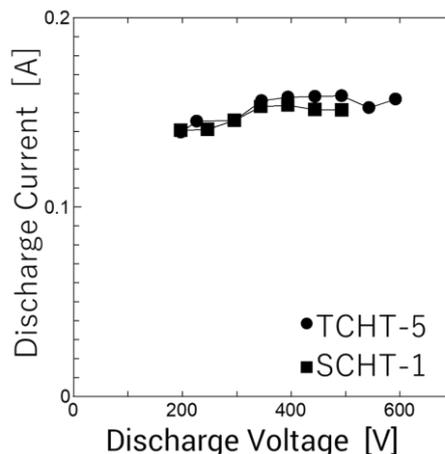


図 7 SCHT-1 の放電電圧-放電電流特性

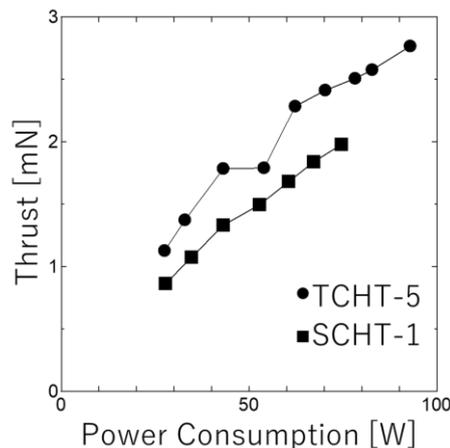


図 8 SCHT-1 の消費電力と推力の関係

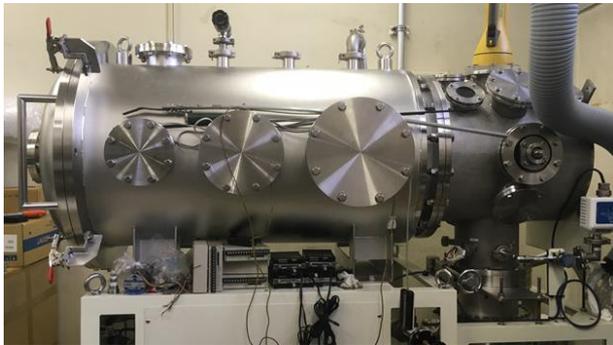
5. SCHT-1 プリューム形状測定試験

5.1 実験装置と実験条件

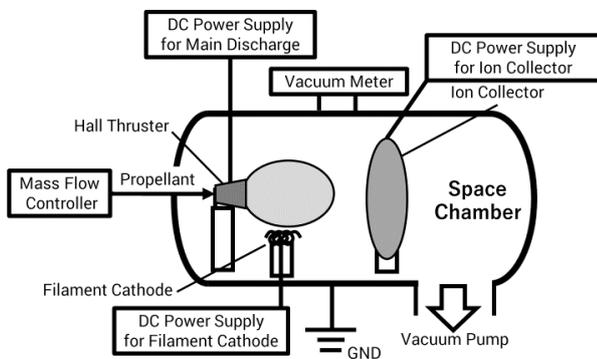
推力低下の原因であるプリューム形状を検証するため SCHT-1 プリューム形状測定試験を行った。実験装置概略図を図 9 に示す。作動試験に用いた装置一式は東海大学池田研究室所有の実験装置である。実験装置に用いた真空チャンバは直径 60 cm, 奥行き 1.5 m のステンレス製真空チャンバである。作動試験中はターボ分子ポンプとロータリーポンプにより 3.0×10^{-2} Pa に維持される。

図 10 に示すステンレス円盤にイオンコレクタを 25 チャンネル配置した測定装置を用いてイオン電流を測定することにより、プリューム形状を推定する。今回の実験では円盤上に配置したイオンコレクタのうち水平方向と垂直方向の計 13 チャンネルのイオンコレクタを使用した。電子源にはフィラメントカソードを使用した。事前にに行った実験で電子供給量が不安定であり、スラスタ放電電流が安定しなかったため今回の実験では放電電流-イオン電流比(=測定したイオン電流/放電電流)でプリューム形状を評価している。コレクタ負荷電圧は-30 V, スラスタ放電電圧 200 V で実験を行った。

表 2 に作動条件をまとめる。推進剤にはアルゴン(Ar)を、推進剤流量は 0.4 mg/s, スラスタ-コレクタ間距離を 270, 350, 450, 700 mm の 4 か所で実施した。



(a) 真空チャンバ外観



(b) 実験装置概略図

図 5 プリューム形状測定試験装置図

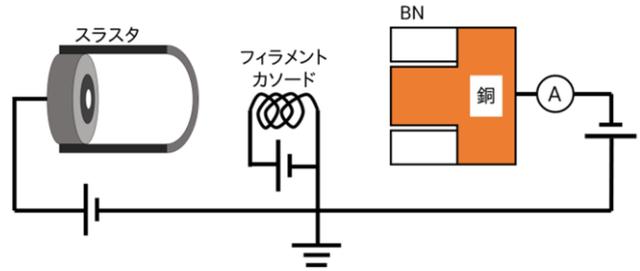


図 10 実験回路

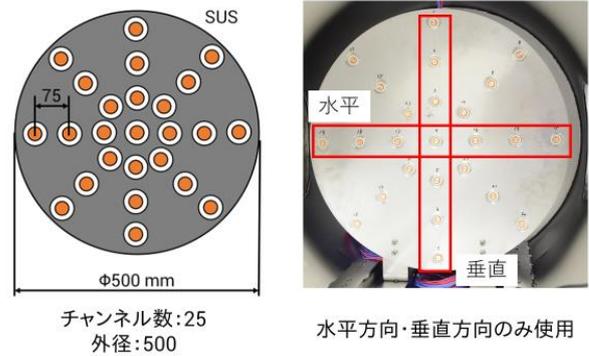


図 11 使用した円盤に配置したイオンコレクタ群

表 2 推進性能測定実験の作動条件

真空度	3.0×10^{-2} Pa
推進剤	Ar
推進剤流量	0.4 mg/s
放電電圧	200 V
スラスタ-コレクタ間距離	270 mm 350 mm 450 mm 700 mm

5.2 SCHT-1 プリューム形状測定の実験結果

図 12 にプリューム形状測定試験での SCHT-1 プリューム形状, 図 13 に実験結果を示す。

図 13 実験結果より、スラスタ-コレクタ間距離 450, 700 mm の時ではスラスタ出口軸上のイオンコレクタで測定されたイオン電流が最大値であったが、スラスタ-コレクタ間距離 270, 350 mm の時ではスラスタ出口軸上のイオンコレクタで測定されたイオン電流が最大値でなかった。一般的なスラスタのイオン電流分布は出口軸上にイオン電流が多く測定され、スラスタ-コレクタ間距離 450, 700 mm の実験結果のようなスラスタ出口軸上最大値の傾向が得られる。

実験結果(a)のスラスタ-コレクタ間距離 270, 350 mm の時ではスラスタ出口軸から ± 75 mm のイオンコレクタで最大イオン電流が測定されたので SCHT-1 ではスラスタ-コレクタ間距離 270 mm の時 ± 15.5 deg, 350 mm の時 ± 12.1 deg で多くイオンが発散して射出されていることが分かる。

スラスタ-コレクタ間距離 450, 700 mm の時はスラスタ出口軸上がイオン電流最大値と傾向が変わっているがこれは発散して射出されたイオンがチャンバ壁で反射したり浸透したりすることなどにより中心が最大値へと推移したと考えられる。

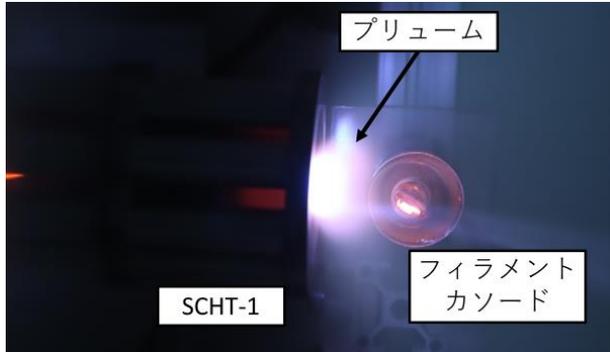
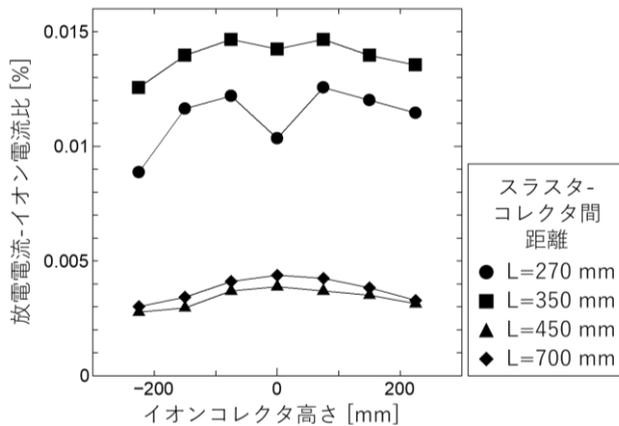
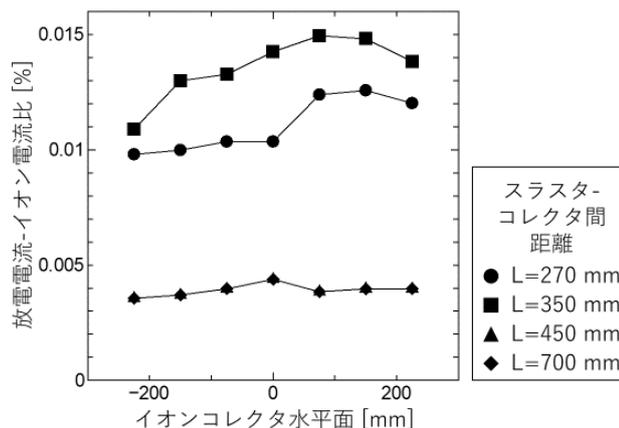


図 12 SCHT-1 プリューム形状(アルゴン)



(a) SCHT-1 イオン分布(垂直方向)



(b) SCHT-1 イオン分布(水平方向)

図 13 SCHT-1 イオン分布

6. 展 望

今回、SCHT-1 の推進性能改善のためのプリューム形状測定実験ではフィラメントカソードを用いて実験を行った

が、実験結果(b)ではイオンコレクタがカソードやその支持材の陰に隠れてしまったことにより対称性が得られなかったため実験結果(b)からイオン電流発散角に関する推測はしなかった。今後は SCHT-1 の動作のためにより多くの電子を供給する電子源の開発やプリューム形状測定への影響が小さくなるような電子源の位置の改良が必要であると考えている。

そして SCHT-1 のプリューム形状や磁気回路の改良の検討後、推進性能を改善した新たな CHT “SCHT-2” の開発を行う。

7. ま と め

本研究では大阪工業大学宇宙推進研究室で研究された CHT “TCHT-5” の研究成果をもとにスラスタ直径を 100 mm から 60 mm へと更なる小型化した CHT “SCHT-1” を試作した。SCHT-1 を用いた実験で得られた成果を以下に示す。

- 1) 推進剤にキセノンを使った放電電圧 200 – 500 V での TCHT-5 と同様に行った推進性能測定試験では正常動作を確認できた。TCHT-5 と同放電電圧で SCHT-1 を作動させると TCHT-5 より少ない放電電流が流れ、省電力化を確認できた。また、測定された推力を比較すると TCHT-5 では 1.12 – 2.51 mN であったが SCHT-1 では 0.86 – 1.84 mN であった。
- 2) 推進剤にアルゴンを使った放電電圧 200 V 固定で行ったイオンコレクタを用いてイオン電流分布を測定するプリューム形状測定試験ではスラスタ-コレクタ間距離を 200 – 700 mm の間で SCHT-1 から射出したイオン電流分布を計測できた。スラスタ-コレクタ間距離が 270, 350 mm ではスラスタ出口軸上にイオン電流最大値が無く 270 mm ではスラスタ出口軸から ±15.5 degree, 350 mm では ±12.1 degree で発散したイオン電流最大値を測定できた。スラスタ-コレクタ間距離 450, 700 mm の時には真空チャンバ壁の反射や射出したイオンの浸透によってスラスタ出口軸上がイオン電流最大値となった。
- 3) 今後はイオン電流分布の傾向が変化する 350 – 450 mm 間の測定を行いイオン電流最大値の発散の計測を進めるほか、SCHT-1 の磁場形状の改善案を検討し更なる推進性能向上を目標とした SCHT-2 の試作開発を行う。

参 考 文 献

- 1) 八木隆太, 藤田亮太, 山内翼, 藤田浩貴, 梶原快晴, 岩元亮介, 名田隆太, 田原弘一, 高田恭子, (大阪工業大学), 池田知行(東海大学) : 動力飛行用パルスプラズマスラスタ搭載超小型人工衛星プロイテレス 2 号機の開発状況
- 2) A.Smimov, Y.Raitses, N.J.Fisch : Electron cross-field transport in a low power cylindrical Hall thruster, Physics of Plasmas 11, 2004

- 3) R. Spektor, K. D. Diamant, E.J. Beiting, K. A. Swenson, and D.T. Goddard (The Aerospace Corporation), Y. Raitses, N. J. Fisch (Princeton Plasma Physics Laboratory) : Characterization of a Cylindrical Hall Thruster with Permanent Magnets, IEPC-2011-264, 2011
- 4) 白崎篤史, 田原弘一(大阪大学大学院基礎工学研究科機能創生専攻) : 円形断面を持つ低電力ホールスラスターの性能特性とプラズマ状態, 日本航空宇宙学会論文集 Vol.54,No.627,pp.160-167, 2006
- 5) 多川真登, 川上天誠, 藤原恭兵, 小林充宣, 古久保裕介, 田原弘一, 高田恭子(大阪工業大学) : 大阪工業大学・超小型月探査機プロイテレス 3 動力航行用シリンドリカル型ホールスラスターの開発研究, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2017