

永久磁石を用いた小型・低電力シリンドリカル型ホールスラスタ “SCHT-1”の研究開発

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

○小原 秀憲・田口 誠一・根子 隆誠・松尾 樹（東海大・院）・
田原 弘一（大阪工大）・池田 知行・堀澤 秀之（東海大）

○Hidenori Obara・Seiichi Taguchi・Ryusei Neko・Tatsuki Matsuo（Tokai University）
Hirokazu Tahara（Osaka Institute of Technology）・Tomoyuki Ikeda・Hideyuki Horisawa（Tokai University）

Abstract（概要）

Many company and university are developing nanosatellites now. Cylindrical Hall Thruster (CHT) is one of the best thruster for onboard nanosatellite because of its simple structure and saving power. “TCHT-5 (by Osaka Institute of Technology)” is a CHT test thruster researching good parameter for high performance thruster by some experiments. SCHT-1 is a smaller size and its simpler structure thruster emulated “TCHT-5”. Measured a “SCHT-1” thrust performance at Osaka Institute of Technology, its thrust was 1.5 mN, specific impulse was 500 sec and thrust efficiency was 7% with thruster input power (without neutralizer system) was 50 W. Focused on the divergent plume shape of “SCHT-1” in order to more thrust performance. In this study, researched the relationship between thrust and electric field (by the discharge voltage) by the experiment measuring the propellant ion distribution. Evaluating the result, the divergence of the propellant ion distribution was confirmed at low discharge voltage (300-500 V), the divergence mitigation was confirmed at high discharge voltage (600-800 V) because of high electrostatic force. In future, research the relationship between thrust performance and magnetic field (by the thruster yoke, magnets, etc.) by the experiment measuring the propellant ion distribution in order to develop next generation type CHT “SCHT-2”.

1. 背景

近年では宇宙技術の発展は企業による大型衛星の発展だけでなく、大学衛星による超小型人工衛星技術の発展も著しい。特に超小型人工衛星のバス技術は確立されつつあり、簡易的なミッションや単純なミッションだけでは現在の発展した大学衛星の技術の技術力を十分に発揮できない可能性があり、超小型人工衛星のミッション要求の技術水準は年々高くなっている。そこで、より高度なミッションを超小型人工衛星で行うためには軌道変更や空気抵抗による軌道降下の軌道補正が必須と考えられ、超小型人工衛星に推進機を搭載することが急務である。

本研究では東海大学で試作した新型推進機“SCHT-1”の推進性能取得試験及びイオンビーム分布測定試験結果による推進機電場と推進性能の関係性に関する考察を紹介する。

2. シリンドリカル型ホールスラスタ

推進機の性能として、比推力は推進剤搭載量の節約を可能にするパラメーターであるが、推力密度は推進機の推力を示すパラメーターである。本研究では推力密度・比推力

どちらの性能に対してもほどほどの性能を持っているホールスラスタに着目している。

図1にこれまでに開発されている各種ホールスラスタの低電力域における消費電力による推進性能を示す。ホールスラスタは小型化に伴い推進性能が低下する問題が判明しており、図1では約200W以下の低電力域で推進性能の低下が顕著に表れていることが分かる。これは推進機の小型化に伴い、放電室中央にある磁場を作り出す電磁コイルの磁芯を細くせざるを得ないため、プラズマ生成の際に発せられる熱によって磁芯が加熱・透磁率が低下し、印加される径方向磁場が弱くなりプラズマ生成が十分に行われず、推進性能が大きく低下することが原因となっていると過去の研究成果より明らかになっている。

プリンストン大学プラズマ研究所の Raitses 氏らの研究チームでは中心部のコイルを取り除いた円形断面の放電室を有するシリンドリカル型ホールスラスタ (CHT : Cylindrical type Hall Thruster)を開発した(図2)¹⁾。CHTは放電室に磁芯を持たないため、小型化しても推進性能がそれほど低下しない小型化に適した電気推進機だと見込まれ、本研究ではこのCHTを採用し、超小型人工衛星搭載推進機を試みている。

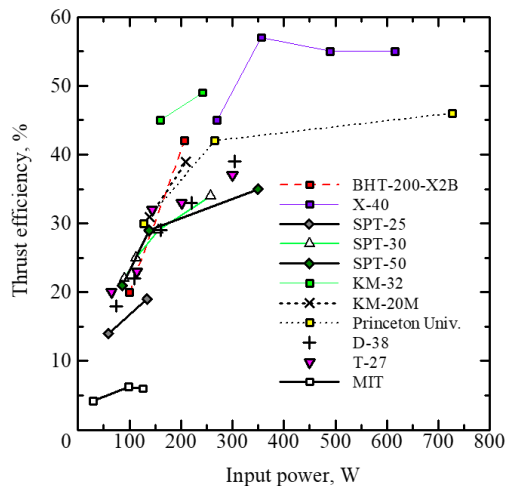


図1 ホールスラスタ各種の低電力域での推進性能

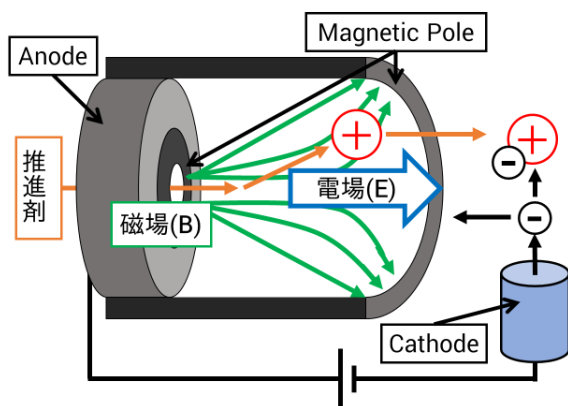
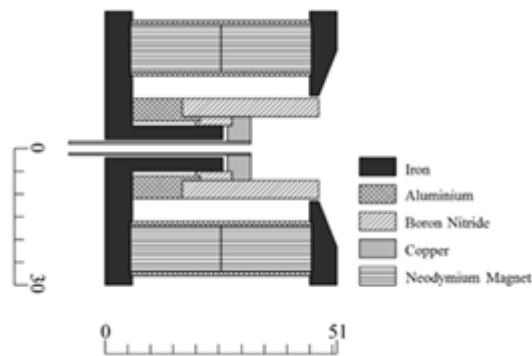
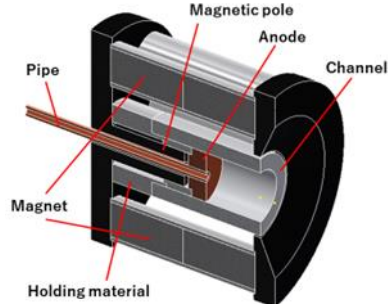


図2 CHT 概念図



(a) SCHT-1 各部寸法



(b) SCHT-1 各部名称



(c) SCHT-1(左)とTCHT-5(右)の比較

図3 SCHT-1の外観と概要

3. シリンドリカル型ホールスラスタ SCHT-1

3.1 SCHT-1 概要

大阪工業大学宇宙推進研究室ではCHT試作機“TCHTシリーズ”を用いてCHTに関する様々な先行研究が行われてきた。特に“TCHT-5”では最適な放電室長・磁極間距離を実験的に求める研究が行われ、推進性能のための最適値を求めた²⁾。しかしその一方で、具体的な改良案については検討されていなかった。そこで東海大学ではそのTCHT-5の研究を踏襲し小型化した新型CHT“SCHT-1”を開発し、SCHT-1を用いてCHTに関する研究を行っている。

SCHT-1の外観と構造断面図を図3に示す。SCHT-1は前後のヨーク材を永久磁石の磁力で固定することにより、ネジ部の構造の削減をし、複雑な構造とネジ部での磁場の低下の2つの問題点を解決した。また、外周部に配置する永久磁石と熱源である放電室との距離を十分にとったためスラスタ直径は60mmと設定され、TCHT-5直径100mmと比較して小型化に成功した。

永久磁石にはより強い磁力を発生するネオジウム磁石、推進機磁場を形成する永久磁石前後に取り付けたヨーク材にはSS400、放電室材料には絶縁性が高いセラミック部材BNを採用した。

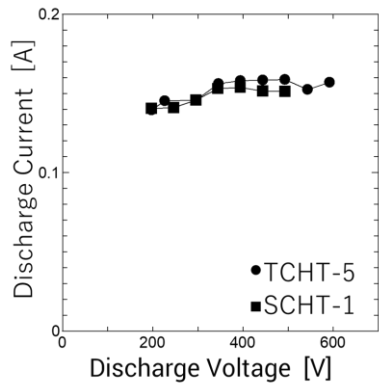
3.2 SCHT-1 推進性能

(1)式、(2)式に実験にて取得した推力から比推力 $I_{sp}[\text{sec}]$ (取得推力 $F[\text{N}]$ 、推進剤流量 $m[\text{kg/s}]$ 、重力加速度 $g[\text{m/s}^2]$ による)、アノード効率 $n_{anode}[-]$ (取得推力 $F[\text{N}]$ 、推進剤流量 $m[\text{kg/s}]$ 、推進機消費電力 $P[\text{W}]$ による)など推進性能を求めた式を示す。取得された推進性能を先行研究TCHT-5と比較して図4に示す。推進性能取得試験は大阪工業大学宇宙推進研究室にて行われ、推進剤Xeガス流量0.3mg/sで放電電圧200-500Vの電圧域で作動実験を行った。また、中和器は安定に電子を供給可能なホローカソード(HCN-252, Veeco Instruments Inc.)を作動ガスXeで使用した。

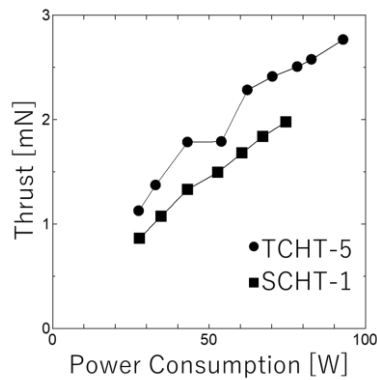
結果として、SCHT-1は専攻研究TCHT-5と同様の推進性能を取得でき、50WでのSCHT-1の推進性能をそれぞれ読み取ると、推力は1.5mN、比推力は500s、アノード効率は10%以下であった。

$$I_{sp} = \frac{F}{mg} \quad (1)$$

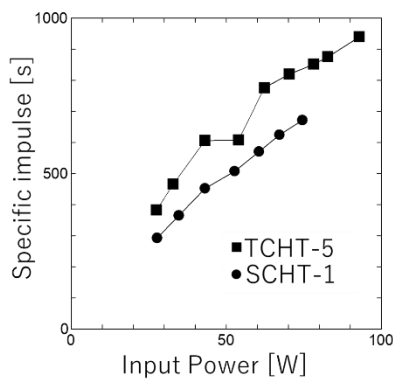
$$n_{anode} = \frac{F^2}{2mP} \quad (2)$$



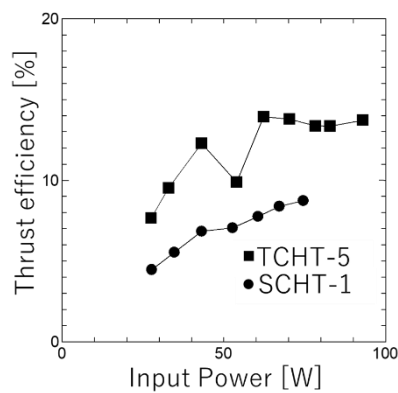
(a) SCHT-1 放電電圧電流特性図



(b) 消費電力当たりの推力



(c) 消費電量当たりの比推力



(d) 消費電力当たりの推進効率

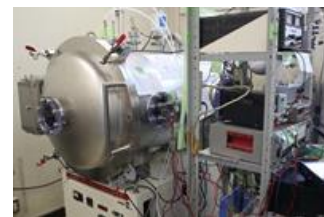
図4 SCHT-1の推進性能

3.3 イオンビーム分布測定試験概要

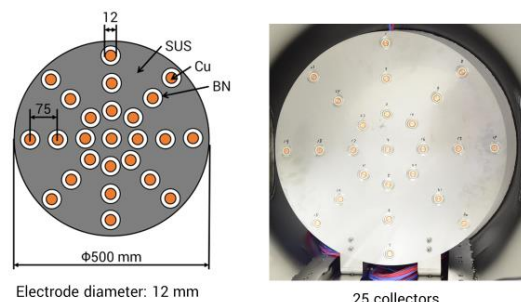
先行実験で取得した実験結果より、推進性能向上への課題として CHT 特有の発散磁場に沿った発散型プリューム形状があげられた。推進剤イオンが発散して推進機から射出されるとスラスト軸方向成分に働く推力が小さくなり、推進効率が低下する可能性がある。本研究ではこの問題を検証するため、イオンコレクタを用いて射出されたイオン電流を複数点で取得し、それを推進機からのイオンビーム分布として評価した。イオンコレクタには直列に金属皮膜抵抗を接続し、その起電力によってイオン電流を推定した。実験装置外観及び概要を図 5-6 及び表 1 に示す。推進剤 Ar ガス流量を 0.26 mg/s とし、放電電圧を 300-800 V で 100 V ごとにそれぞれ 50 sec ずつ動作実験を行った。スラスト動作中の温度は K 型シース熱電対(山里産業株式会社)を用いて測定し、中和器は簡易的な電子源であるフィラメントカソードを使用した。フィラメントカソードは熱電子を供給する原理のため経過時間に対して供給電子量が減少してしまうが、放電電圧が低い値から実験をはじめ、供給電子量が減ってもより高い放電電圧で電子を引き出しやすくした。

表1 イオンビーム分布測定試験条件

Back Pressure	8.0X10 ⁻² Pa	
Discharge voltage	300 V	
	400 V	
	500 V	
	600 V	
	700 V	
Propellant	Argon	
	Mass flow rate	Thruster
Ion Collector Voltage	-56 V	
Distance Collector-thruster	300 mm	

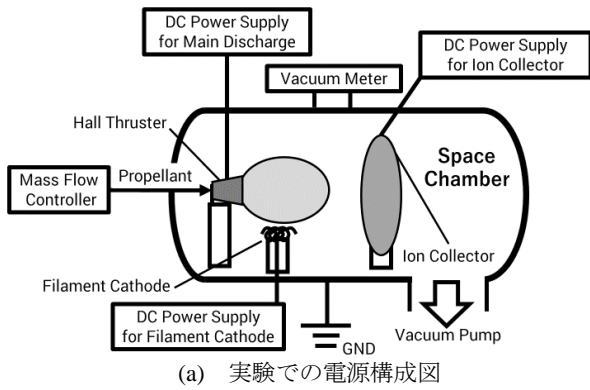


(a) 使用した真空チャンバ

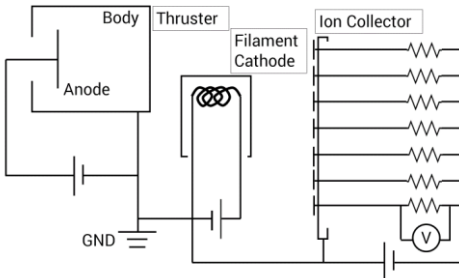


(b) 使用したイオンコレクタ

図5 実験装置外観



(a) 実験での電源構成図



(b) 実験での回路構成図

図6 実験装置構成図

3.4 イオンビーム分布測定試験結果と考察

SCHT-1 動作中のプリューム形状を図7、推進機動作中の各部の温度を図8、各イオンコレクタから推定したイオン電流密度(=各抵抗からの起電力/各抵抗値/イオンコレクタ面積)をイオンビーム分布として評価した図を図9にまとめる。

図8より、推進機動作中の温度変化は放電電圧増加に従って大きくなり、これは放電電圧増加によってプラズマ粒子エネルギーが増加したことを示している。また SCHT-1 の前部に取り付けてある鉄部が最も温度上昇しているが、これは射出したイオンが発散磁場に沿って射出され、SCHT-1 鉄部に衝突したことが原因であると考察している。

図9より、放電電圧300Vではスラスト出口軸上が滑らかな発散したイオンビーム分布が取得されたが、放電電圧が増加していくとイオンビームの発散が次第に緩和し、放電電圧600Vでは中心軸上が尖ったイオンビーム分布となっている。これは放電電圧が低い時では CHT 発散磁場に沿って推進剤イオンが射出されていたが、放電電圧が増加することによって静電力が上昇し、プラズマ粒子エネルギーが増え磁場の拘束から推進剤イオンが離脱したことが原因だと考えられる。



図7 SCHT-1 プリューム形状(放電電圧：600V)

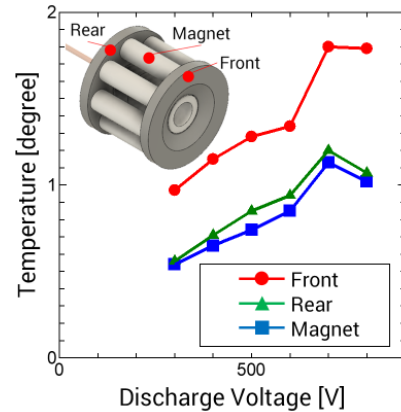


図8 SCHT-1 のそれぞれの部位での動作時温度変化

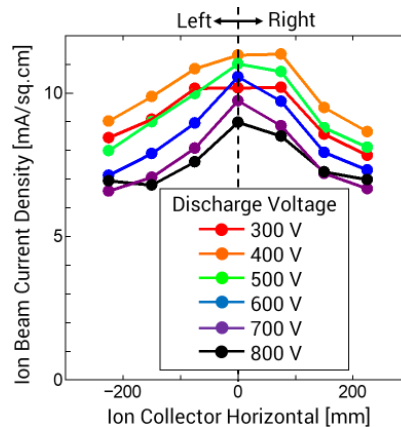


図9 SCHT-1 の放電電圧によるイオンビーム変化

4. 結論及び展望

これまでの実験結果から、CHT の推進性能について以下の研究成果が得られた。

- ・低い放電電圧域(300~500 V)では CHT 特有の発散磁場に拘束された推進剤イオンが射出され、イオンビーム分布が発散した形状となる。
- ・高い放電電圧域(600~800 V)では静電力が上昇することによってプラズマ粒子エネルギーが増加し、磁場の拘束から離脱した推進剤イオンが射出され、イオンビーム分布の発散が緩和される。

今後の展望として、SCHT-1 の推進機固有磁場の推進性能への影響を測定することにより、推進剤イオンを制御する磁場及び電場の関係性を解明し、次世代 CHT “SCHT-2” の最適設計に生かすことを期待する。

参 考 文 献

- 1) A.Smimov, Y.Raitses, N.J.Fisch : Electron cross-field transport in a low power cylindrical Hall thruster, Physics of Plasmas 11, 2004
- 2) 川上天誠, 藤原恭兵, 多川真登, 城戸翔磨, 丸石達也 (大阪工業大学): シリンドリカル型ホールスラスタに関する研究開発, 平成30年度宇宙輸送シンポジウム講演集録, 2019