

超小型人工衛星搭載用シリンドリカル型ホールスラスタの作動特性

STEP-2012-027

○池田知行¹，戸川和也¹，杉本成¹，加藤優貴²，山本怜²，田原弘一²，渡辺陽介³

¹大阪工業大学大学院工学研究科機械工学専攻

²大阪工業大学工学部機械工学科

³大阪大学大学院基礎工学研究科機能創成専攻

1. はじめに

今世紀に入り、電気・電子工学の急速な発展と低価格な相乗り衛星打上げビジネスの展開により、世界各地の大学機関・企業において短期間かつ低コストで開発可能な超小型人工衛星の研究開発が活発に行われている。日本国内においても同様であり、2002年12月に千葉工業大学が超小型衛星を開発した事を皮切りに、その後10機以上の大学衛星が打上げられるなど、活発な動きを見せている。今後は衛星コンステレーションの構築や軌道維持、軌道変更、運用終了後の大気圏再突入など、より高度なミッションが可能となる推進機を搭載した超小型衛星の開発が望まれている¹⁾²⁾。

2007年に大阪工業大学は世界に先駆けて、電気推進機の一つである電熱加速型パルスプラズマスラスタを搭載した質量14.5kgの超小型技術試験衛星「プロイテレス」の開発プロジェクトを立ち上げ、2012年9月に打上げと初期運用に成功した。今後は軌道上でのパルスプラズマスラスタの作動試験を行う予定である。また、プロイテレス衛星の開発と並行して50kg級の超小型月探査衛星への搭載を目標としたシリンドリカル型ホールスラスタ（Cylindrical Hall Thruster:CHT）の開発を行っている。CHTは2000年にプリンストン大学プラズマ物理研究所（PPPL）のRaites氏らのチームによって開発されたホールスラスタで、放電室中心部に磁気回

路が無い円径断面の放電室を有しており、同一口径のホールスラスタと比較して放電室容積に対する放電室表面積が小さく、プラズマの壁面損失を抑制することが可能である。大阪工業大学ではCHTの更なる低電力化を行うべく磁場形成に永久磁石を用いたTCHT-4を開発し作動試験を行ってきた。その結果、推進剤流量0.1mg/sにおいて印加電圧300Vのとき、推進力0.9mN、比推力1864sec、消費電力55.5W、推進効率30.1%となったものの、作動後150秒足らずで永久磁石の過熱によって熱減磁し著しい性能低下とアノードの焼損が見られた³⁾⁴⁾。

本研究では永久磁石をスラスタ外周部に配置して熱減磁を抑えつつ、最適な放電室長と磁極位置を決定するため、放電室長と磁極位置を無段階に変更可能で、50-60Wの低電力でも作動する新型CHT，TCHT-5の作動実験を行った。

2. 実験について

2.1 概要

本稿で述べるTCHT-5の作動実験では、作動時の最適な磁極位置と放電室長さを求めるため、磁極位置を4mm，7mm，17mmと変化させた場合と、磁場形状を維持しつつ放電室長さを7mmから12mmへと変化させた場合の放電電流，推進力，比推力，消費電力，推進効率といった基本的な推進性能の測定と各条件ごとの比較を行った。作動条件をまとめた表を表1に示す。ホローカソ

ードの作動ガスおよび推進剤には比較的電離しやすく分子量が大きいキセノンを使用した。推進剤流量は0.6mg/sよりも少ない条件では作動出来なかったため、実験では0.6mg/s, 0.7mg/s, 0.8mg/s の条件下で行った。印加電圧は150Vから250Vまで10Vずつ昇圧して実験を行った。

表1 TCHT-5の作動条件

放電電圧	150~250V	
推進剤	キセノン	
質量流量	TCHT-5	0.6~0.8mg/s
	ホローカソード	0.1mg/s
背圧	1.0×10^{-2} Pa	

2.2 TCHT-5

図1と図2に本研究で開発したTCHT-5の外観とその断面図を示す。使用した永久磁石は株式会社二六製作所製のSm-Co磁石を5つ内蔵したジュラルミン製パイプをスラスト外周部に8本取り付け、放電室の熱影響を極力受けないように設計した⁵⁾⁶⁾。放電室は外径22mm, 内径14mmのボロンナイトライド製の円筒であり、上流部より陽極と磁極が差し込まれている。

図3に放電室周りの構造を示す。推進剤は電源線を兼ねた直径3mmの純銅製パイプを通して放電室内に供給される。電極・磁極保持部を前後に移動させることによって磁極間の距離を4-12mmの範囲で変更が可能である。また、放電室支持部を移動させることにより磁場形状を維持しつつ放電室長さを7-17mm変化させることができる。

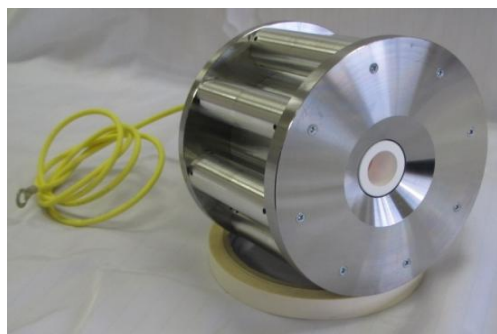


図1 TCHT-5の外観図

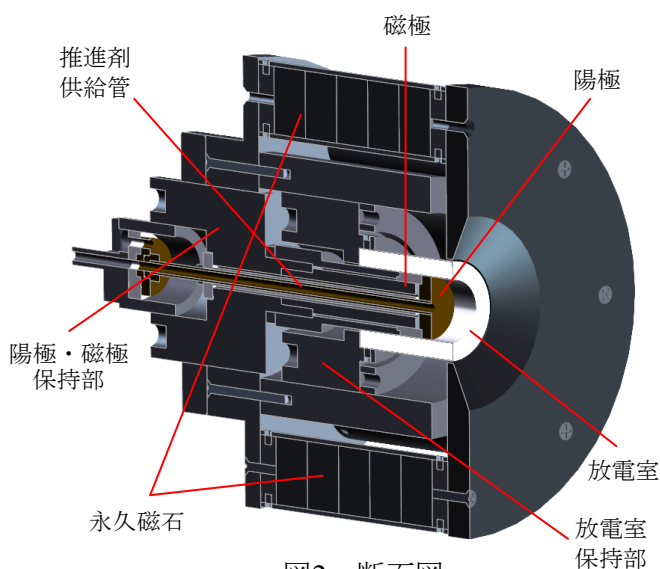


図2 断面図

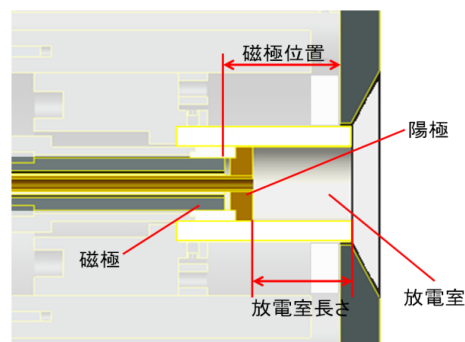


図3 磁極周りの構造

図4に磁場解析結果によるTCHT-5の磁場形状を、図5に径方向磁束密度の軸方向分布を示す。TCHT-4と同じ放電室長さ7mmの場合、放電室出口から2mmの領域において径方向の磁束密度が184 mTとTCHT-4の2.38倍であることから、熱減磁で磁束密度がある程度減少した場合においても効率的に電離が行われると期待できる。

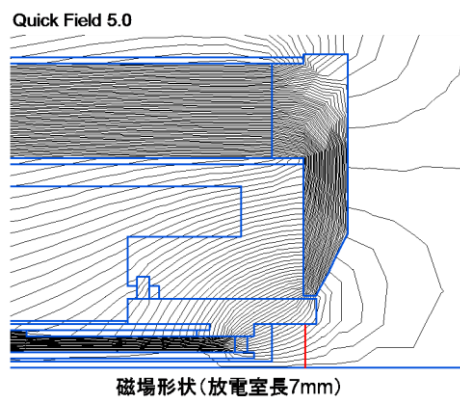


図4 磁場形状

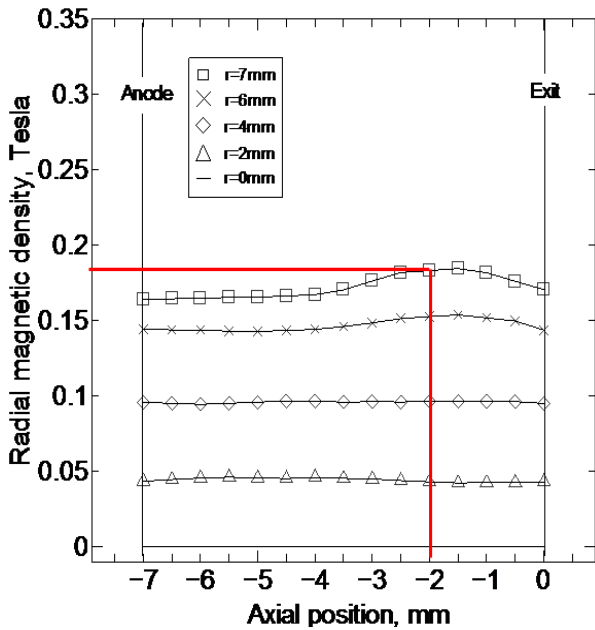


図5 径方向磁束密度の軸方向分布

2.3 真空容器

図6に実験で使用した真空容器の外観を、図7に実験機器の位置関係を示す。この真空容器は大阪真空機器製作所製の直径1.2m、奥行き2.25mのステンレス製真空容器で、ターボ分子ポンプとロータリーポンプがそれぞれ2台ずつ搭載されており、排気速度は10000 l/s、到達圧力は 5.3×10^{-4} Paである。真空度の測定にはピラニ真空計と電離真空計を使用した。実験時の背圧はいずれの推進剤流量の場合においても 1.0×10^{-2} Paであった。

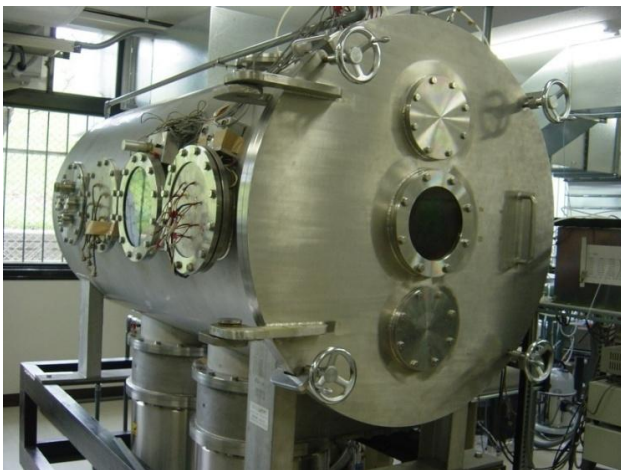


図6 真空容器

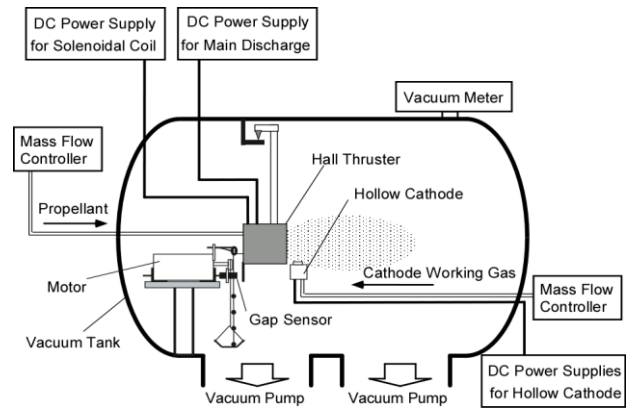


図7 実験装置の位置関係

2.4 推進力の測定

CHTの推進力は数mNオーダーであるため、推進力の測定には振り子式スラストスタンドと渦電流式非接触変位センサを用いる方法を採用した。推進力の測定はあらかじめ既知の水平方向荷重とそれによって得られる変位量から関係式を導き出しておき、実験時に測定された変位をこの関係式に代入することによって算出した。

3. 実験結果

3.1 磁極位置別にみた推進性能の変化

本実験では磁極位置4mm、7mm、12mmの場合における各推進性能を測定した。図8に噴射時のプリューム形状を示す。磁極位置7mmと12mmのプリューム形状に大きな差は見られないものの、4mmの場合において円錐状のプリュームが放電室外で大きく発散していることがわかる。

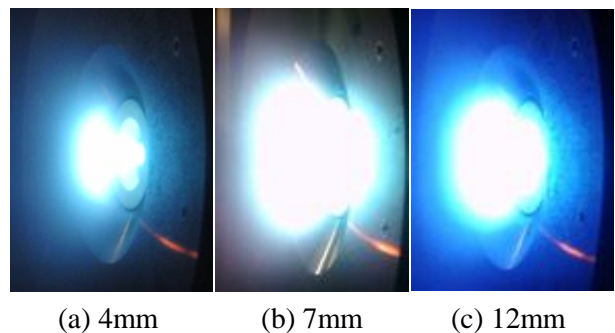


図8 プリューム形状

噴射により得られた放電電圧、放電電流、推

進力から各種条件下での推進性能を導出した。

図9にそれぞれの磁極位置, 推進剤流量ごとの放電電圧に対する放電電流の変化を示す. いずれの磁極位置においても放電電圧の上昇に対して放電電流はほぼ一定であり高電圧モードであることがわかる. 磁極位置4mmと12mmの場合では近い値を示すが, 7mmの場合, 他の条件よりも10%程低い値を示した.

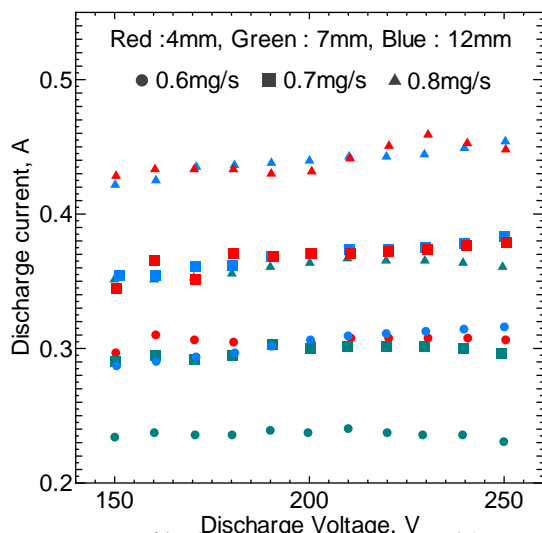


図9 放電電圧-放電電流の関係

図10に放電電圧と比推力・推進力の関係を条件ごとに示す.

比推力の定義は式(1)で表わされる.

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m}g} \quad (1)$$

F は推進力を表し \dot{m} は推進剤流量, g は標準重力加速度である. 磁極位置4mmと7mmはお互いに近い性能を示しているが, 磁極位置12mmの場合, 比推力と推進力は他の条件よりも30%ほど高い数値を示した.

次に放電電圧と推進効率の関係を図11に示す. 推進効率は式(2)のように定義される.

$$\eta = \frac{F^2}{2\dot{m}V_d I_d} \quad (2)$$

ここで V_d は放電電圧, I_d は放電電流である.

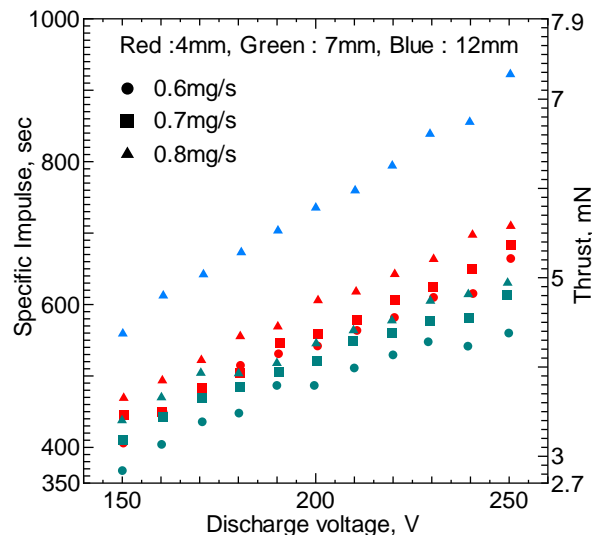


図10 放電電圧-比推力-推進力の関係

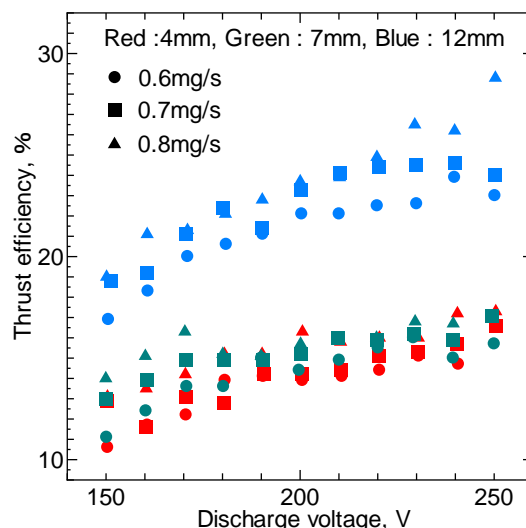


図11 放電電圧-推進効率の関係

比推力-推進力の場合と同様に, 磁極位置が4mmと7mmの場合は近い値を示し, 12mmの場合は他の条件よりも30%近く推進効率に優れていることがわかる.

図12に消費電力と比推力の関係を示す. 本実験での消費電力は推進機のみのものであり, ホローカソードの消費電力は含まない. グラフからいずれの磁極位置においても, 推進剤流量が少ないほど低い消費電力で高い比推力を得られることがわかる. 特に磁極位置12mmの場合, 消費電力は他のものとほぼ変わらないものの, 比推力は20%程向上していることがわかる.

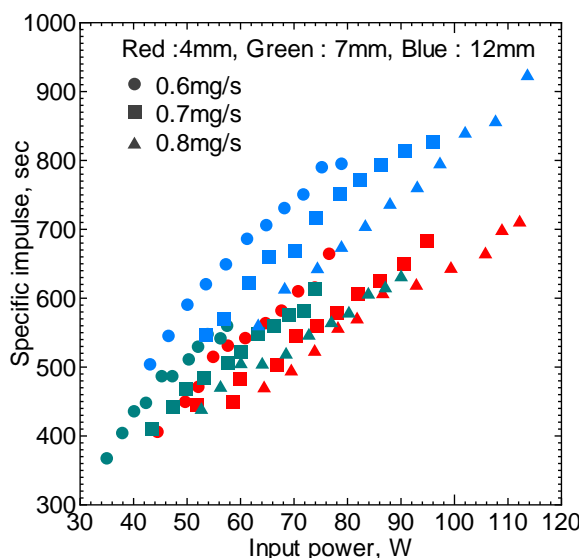


図12 消費電力-比推力の関係

消費電力と推進効率との関係を図13に示す。比推力の場合と同様に、推進剤流量が小さいほど低消費電力で作動していることがわかる。磁極位置12mmの場合、他の条件下よりも推進効率7-10%近くが向上した。

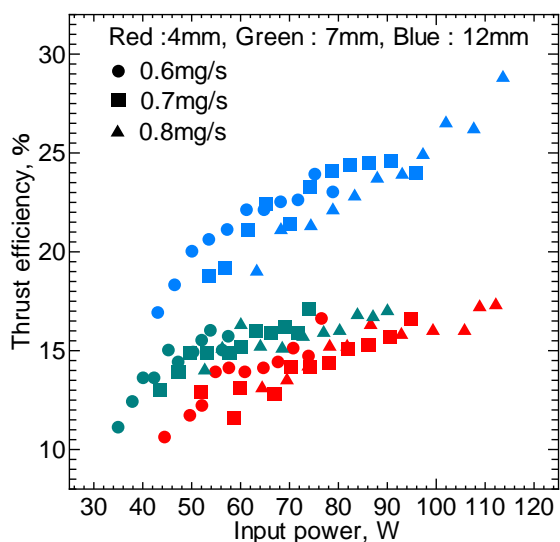


図13 消費電力-推進効率の関係

図14に比推力と推進効率の関係を示す。磁極位置7mmの場合、比推力に対する消費電力の上昇傾向は4mmの場合と大差はないが、低い比推力で2%ほど高い推進効率を出している。また磁極位置12mmの場合、他のものよりも高比推力・

高推進効率であることがわかる。

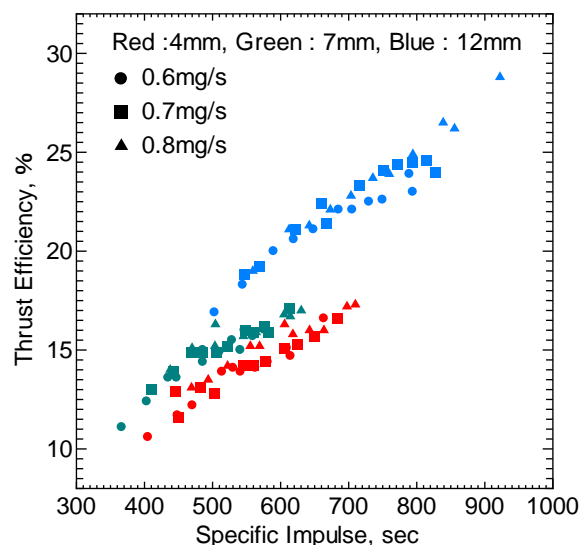


図14 比推力-推進効率の関係

以上のように、磁気位置12mmの条件下では、他の条件とほぼ同等の消費電力でありながら、比推力や推進力、推進効率といった推進性能が30%近く向上した。これは磁極間距離が延びたことにより、ノズル下流域と上流域の磁束密度の差によるミラー効果が効果的に働き、電子の捕捉が効率的に行われたためと思われる。作動中、TCHT-4に見られた磁石の熱減磁に伴うプリュームの発散角の拡大や推進性能の低下といった現象も見受けられず、磁石位置変更による熱減磁対策は功を奏したと考えられる。

しかしながら50-60Wといった低電力での最良の推進性能は、放電電圧190V、磁極位置12mm、推進剤流量0.6mg/sの条件下で、消費電力57.3W、比推力648.3s、推進効率22.1%と、TCHT-4の推進性能よりも低い値であった。これはTCHT-4とほぼ同じ放電室条件で有るのにもかかわらず、以前の6倍以上の推進剤流量でなければ作動しない点を考えると、設定した放電室内の径方向磁束密度が適正値を上回る強磁場であったため、 $E \times B$ ドリフトを行う電子の周方向速度が大きく低下し、プラズマの電離衝突が効率的に行われなくなったと推測される。その結果、平均自由

行程が長くなり、少ない推進剤流量で作動しなくなったと考えられる。推進効率と比推力の改善を図るためには、磁束密度を下げることによって電子の週方向速度を上げるなどの対策が必要となる。

3.2 放電室長さごとの各種性能変化

本実験では磁極位置を7mmで固定し、放電室長さ7mmと17mmの場合の各推進性能を比較した。図15に噴射時のプルーム形状を示す。放電室長さ17mmの場合、発散角はそれほど変わらないものの、プルームの大きさは7mmの時よりも小さくなった。また、推進剤流量が0.6mg/sの時、放電電圧200V以下では間欠的に噴射されるようになり、連続的な作動が出来ない不安定な状態となった。

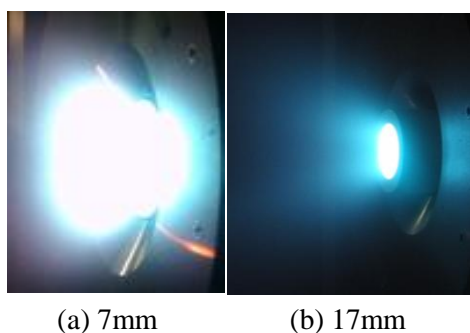


図15 プルーム形状

図16に放電電圧と放電電流の関係を示す。放電室長さ7mmの場合、放電電流は放電電圧の変化に対してほぼ一定であるのに対し、17mmの場合は放電電流の上昇がみられた。また全ての電圧域において、放電電流値が放電室長さ7mmの場合よりも15-23%高い結果となった。

図17に放電電圧と比推力・推進力の関係を示す。放電室長さ7mmの場合と同様に、放電電圧の上昇とともに比推力も上昇しているが、放電室長さ17mmの場合、全ての電圧域において常に16%低い値を示した。

図18に放電電圧と推進効率の関係を示す。放電室長さ17mmの場合、推進効率が2-3%しか出ないことがわかった。また放電室長さ7mmの時

は電圧の上昇に応じて推進効率も上昇しているが、17mmの時はすべての放電電圧域において、推進効率は2-3%と低い値を示した。

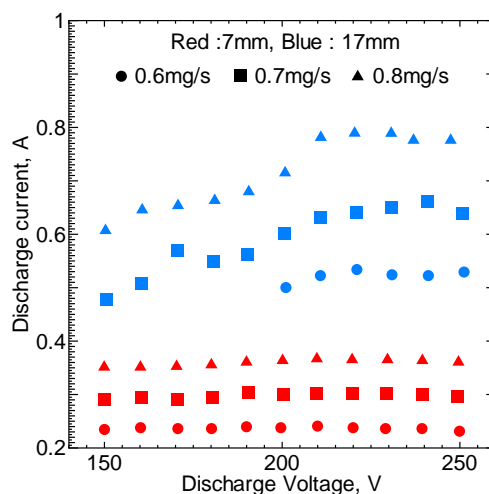


図16 放電電圧-放電電流の関係

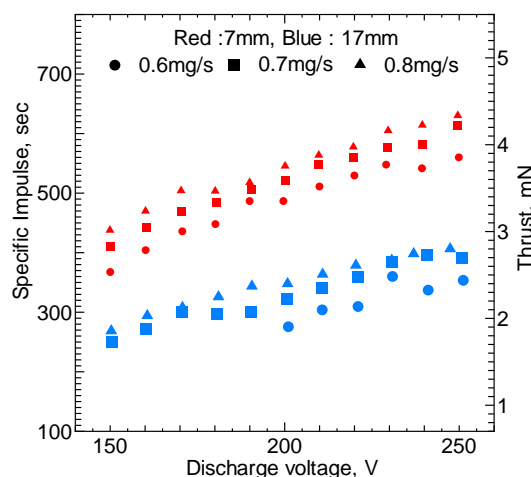


図17 放電電圧-比推力-推進力の関係

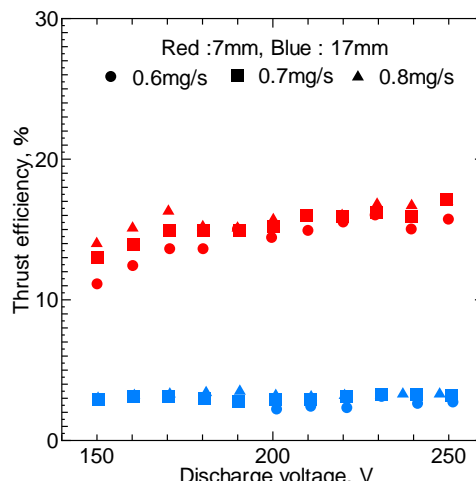


図18 放電電圧-推進効率の関係

図19に消費電力と比推力の関係を示す。放電室長さ7mmの場合、30-100Wの電力域において比推力が350-650sであるのに対し、17mmの場合は70-190Wの電力域において250-400s程の比推力であった。

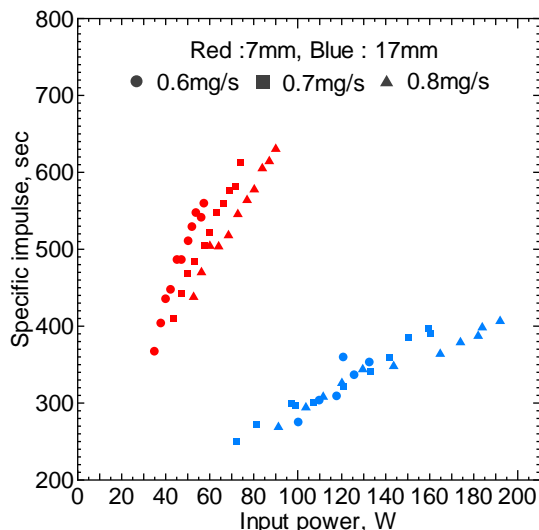


図19 消費電力-比推力の関係

図20に消費電力と推進効率の関係を示す。放電室長さが7mmの場合、消費電力60W付近に集中し、推進効率も15%程である。しかし17mmの場合、消費電力が70-190Wの領域に大きく広がっており、推進効率は2-3%で常に一定であった。

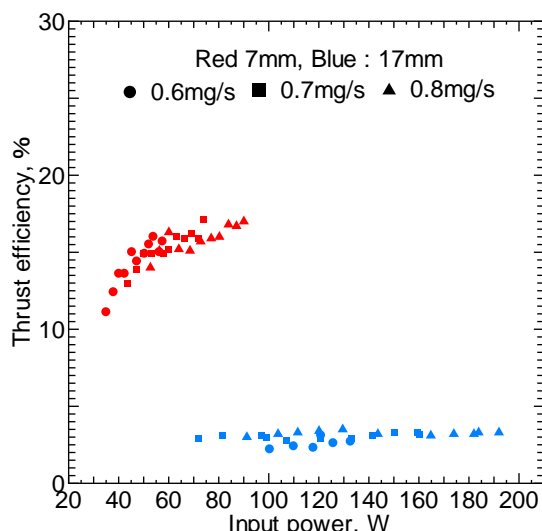


図20 消費電力-推進効率の関係

図21に比推力と推進効率の関係を示す。放電室長さ7mmの場合と比較して、17mmでは低比推

力かつ低推進効率である事がわかる。

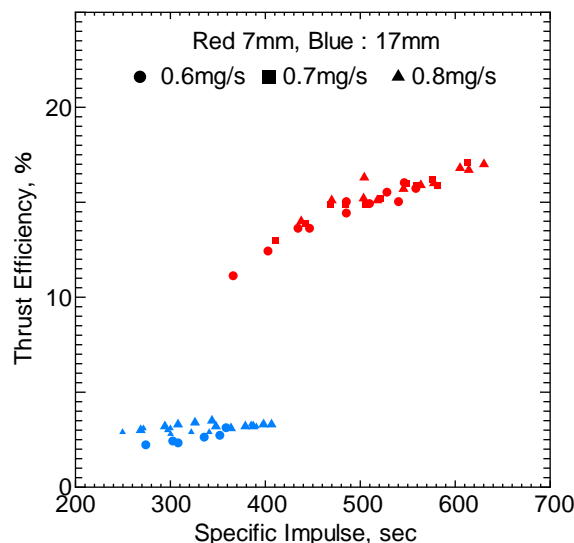


図21 比推力-推進効率の関係

以上のように、放電室長さ17mmの場合、推進性能は大幅に低下することがわかった。加速チャネルを延長することにより電離が促進される事を期待したものの、図15からもわかるようにプリュームの大部分が放電室内にあるため、イオンの壁面損失が増大し、各種推進性能が悪化したものと推定される。消費電力と推進効率との関係から、投入した電力の大半が電離と加速に使われず、熱エネルギーとしてスラストから放出されたものと考えられる。今後は放電室長さ17mm以下の範囲で作動試験を行い、最適な条件を探る必要がある。

4. 結論

本研究では50-60W級のCHTであるTCHT-5を新たに開発し、各条件のもと推進性能を測定・比較を行った。

(1) 磁極位置別にみた推進性能の変化

磁気位置12mmの条件下では、他の条件とほぼ同等の消費電力でありながら、比推力や推進力、推進効率、推進性能が30%近く向上した。

放電電圧190V、磁極位置12mm、推進剤流量

0.6mg/sの条件において、消費電力57.3W、比推力648.3s、推進効率22.1%の推進性能を取得した。しかしながらTCHT-4の推進性能よりも低い推進性能であり、これは設定した放電室内の径方向磁束密度が適正値を上回る強磁場であったため、 $E \times B$ ドリフトを行う電子の周方向速度が大きく低下し、プラズマの電離衝突が効率的に行われなくなったことが原因と考えられる。今後は磁束密度を下げることによって電子の週方向速度を上げて効率的に電離するよう、対策が必要となる。

(2) 放電室長さ7mmと17mmの場合の推進性能

放電室長さ17mmの場合、全電力域において推進性能は大きく低下した。これは発生したプリュームの大部分が放電室内に収まっているため、イオンの壁面損失が増大し、各種推進性能が悪化したものと考えられる。今後は放電室長さ17mm以下の範囲で試験を行い、最適な条件を探る必要がある。

5. 参考文献

- 1) Y. Raitses, N. J. Fisch, K. Ermer and C. B. Burlingame: A Study of Cylindrical Hall Thruster for Low Power Space Application, Princeton Plasma Physics Laboratory, Princeton University, Princeton, NJ, USA, Paper PPPL-3479, 2000.
- 2) 白崎篤司「円形断面放電室をもつホール型推進機の放電電流振動」JAXA, 宇宙輸送シンポジウム, 2007.
- 3) T. Ikeda, K. Togawa, T. Nishida, H. Tahara, and Y. Watanabe: Research and Development of Very Low Power Cylindrical Hall Thrusters for Nano-Satellites, The 32nd International Electric Propulsion Conference (IEPC), Paper No. IEPC-2011-039, Wiesbaden, Germany (2011).
- 4) Tomoyuki Ikeda, Kazuya Togawa, Yohei Mito, Hirokazu Tahara and Yosuke

Watanabe: Performance Characteristics of Very Low Power Cylindrical Hall Thrusters for Nano-Satellites, Asian Joint Conference on Propulsion and Power (AJSPP) 2012, AJCPP2012-006, Grand New World Hotel (Xi'an, China).

- 5) 池田知行, 戸川和也, 杉本 成, 三藤陽平, 林泰志, 田原弘一 「超小型月探査機搭載用シリンドリカル型ホールスラスタ“TCHT-5”の研究開発」 JAXA, 宇宙輸送シンポジウム, STEP-2011-016, 2012.
- 6) Tomoyuki Ikeda, Naru Sugimoto, Kazuya Togawa, Yohei Mito and Hirokazu Tahara: Research and Development of High-Efficiency Hall-Type Ion Engines for Small Spacecrafts, Int. Conf. on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA) 2012, Best Western Premier Hotel Nagasaki (Nagasaki-City, Nagasaki).