

低電力シリンドリカル型ホールスラストの基礎作動試験と推進性能

STEP-2013-055

○池田知行¹，三藤陽平¹，西田万里¹，籠田泰輔²，川村剛史²，田原弘一²

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

1. 緒言

大阪工業大学では2007年より、地球低軌道から月軌道への軌道上昇および月への硬着陸（衝突）を最終目標とする質量50kgクラスの超小型人工衛星へ搭載を想定したシリンドリカル型ホールスラスト(Cylindrical type hall thruster: CHT)の開発を進めている。CHTは2000年にプリンストン大学プラズマ物理研究所（PPPL）のRaitses氏らのチームによって開発されたホールスラストで、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トと比較して放電室容積に対する放電室表面積が小さく、放電室の過熱による磁束密度の低下を抑えることができるため、小型化が容易である。^[1] そのため、搭載機器には徹底的な軽量化と低電力化が求められる超小型人工衛星に最適である。^[2] 大阪工業大学では消費電力100W、比推力1200-1900sを目標性能としてTCHT-4を開発し、作動試験を行ってきた。^[3-4]

図1に開発したTCHT-4を示す。

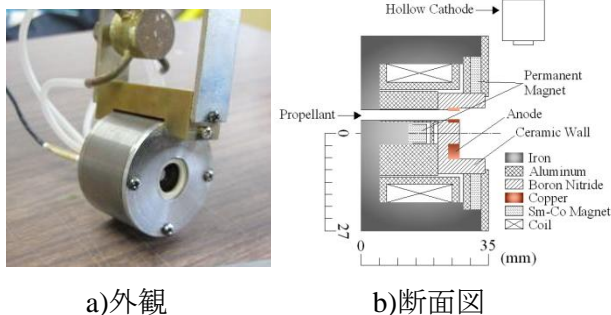


図1 TCHT-4

TCHT-4は内径14mm、長さ7mmの円形断面の

放電室を持つ。作動試験の結果、投入電力81.8Wにおいて推進力1.37mN、比推力1394.6sec、推進効率11.4%を記録したが、作動後150秒不足で永久磁石の過熱によって熱減磁し著しい推進性能の低下とアノードの焼損が見られた。^[5-10]

本研究ではTCHT-4で問題となった熱減磁を抑えつつ、TCHT-4では不可能であった放電室長と磁極位置を無段階に可変できる機構を持った新型CHT "TCHT-5"を開発し、各条件での作動実験を行った。

2. 実験について

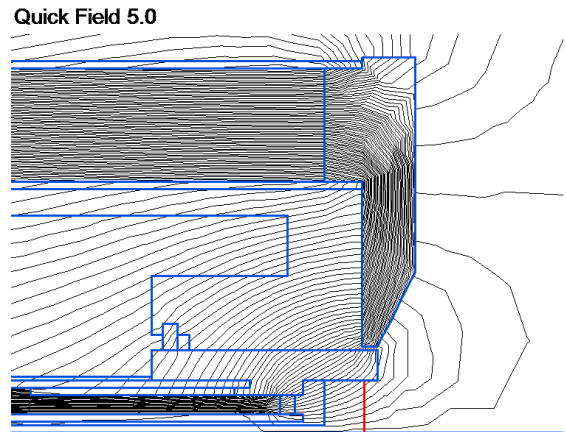
2.1 TCHT-5

図2と図3に開発した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サマリウム-コバルト磁石(SmCo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。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4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4-20mm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2 TCHT-5の外観図



磁場形状(放電室長7mm)

図5 磁場形状

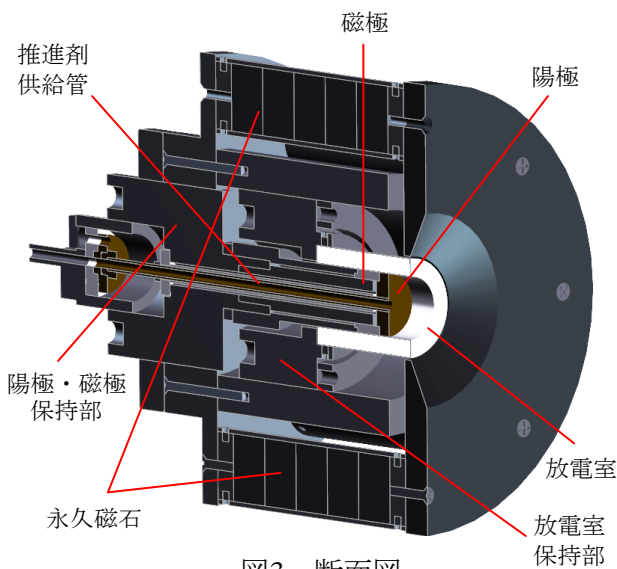


図3 断面図

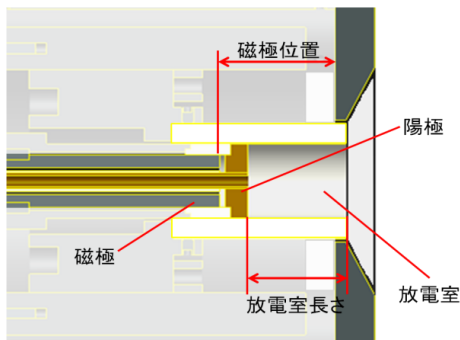


図4 磁極周りの構造

図5に磁場解析結果によるTCHT-5の磁場形状を、図6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。

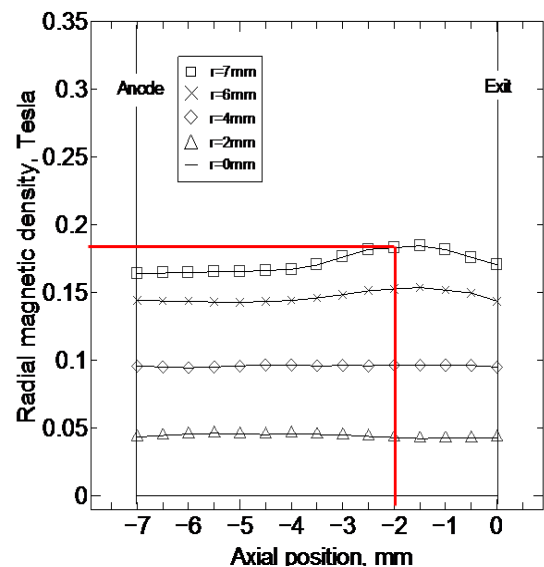


図6 径方向磁束密度の軸方向分布

2.2 作動試験

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を求めるため、放電室長を7mmに固定した上で磁極位置を4mm、7mm、17mmと変化させ、各々の放電電流、比推力、消費電力、推進効率といった推進性能を測定する。また、最良の推進性能を示した条件で、磁場を形成するSmCo磁石をネオジウム磁石(Nd磁石)に変更した場合との比較を行った。

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	

2.3 真空容器

図7に実験で使用した真空容器の外観を、図8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。

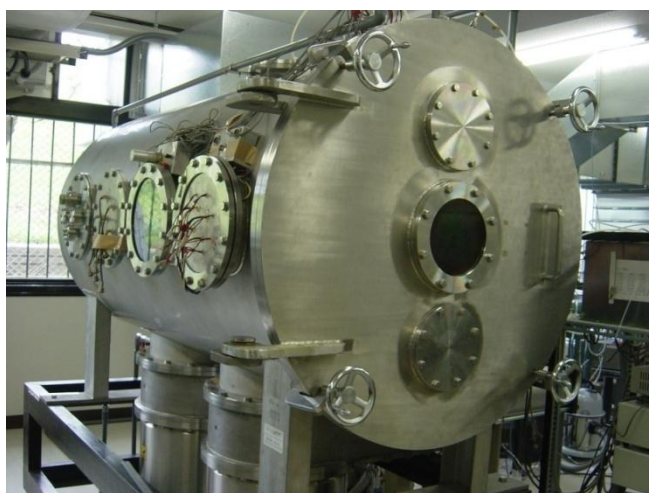


図7 真空容器

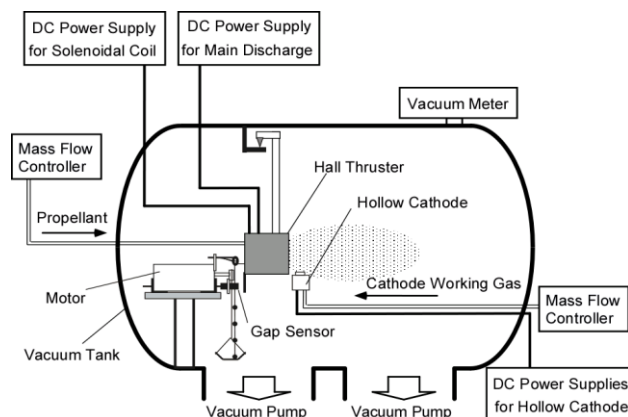


図8 実験装置の位置関係

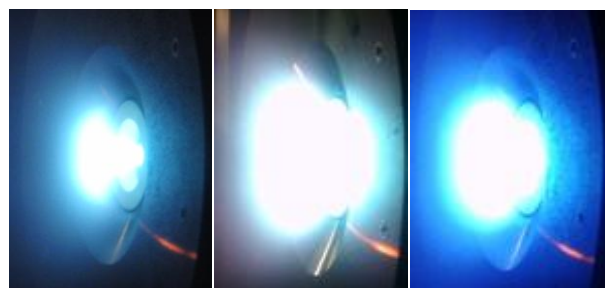
2.4 推進力の測定

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

図9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の場合ノズル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。

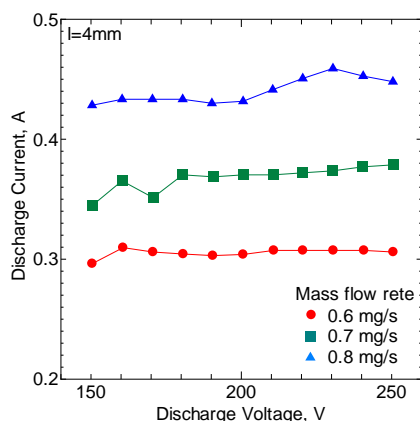


(a) 4mm (b) 7mm (c) 12mm

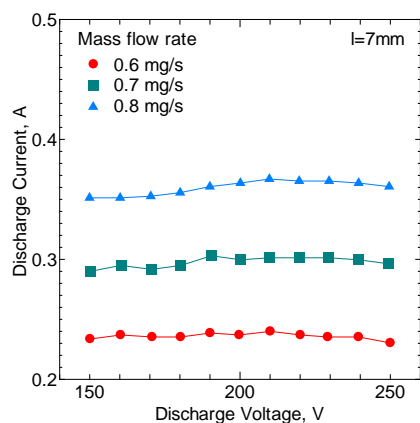
図9 プリューム形状

次に噴射により得られた印加電圧, 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10にそれぞれの磁極位置, 推進剤流量ごと

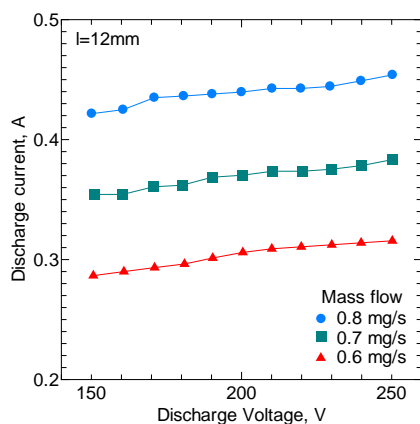
の印加電圧に対する放電電流の変化を示す。磁極位置4mmおよび7mmにおいて印加電圧に対して放電電流はほぼ一定であったが、12mmの場合は緩やかながら放電電流の上昇傾向が見られた。磁極位置4mmと12mmの場合では比較的近い値を示したが、7mmの場合、他の条件よりも10%程低い値を示した。



(a) 4mm



(b) 7mm



(c) 12mm

図10 放電電圧-放電電流の関係

図11に放電電圧と比推力の関係を示す。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、比推力は他の条件よりも30%ほど高い数値を示した。

図12に放電電圧と推進効率の関係を示す。推進効率は式(2)のように定義される。

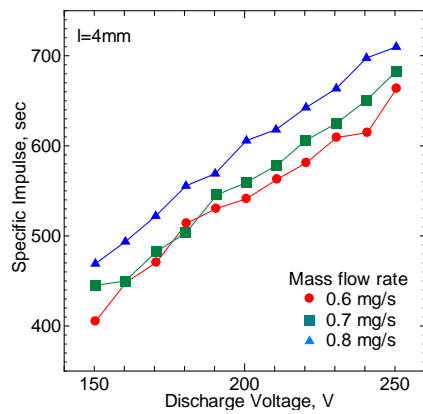
$$\eta = \frac{F^2}{2\dot{m}V_d I_d} \quad (2)$$

ここで V_d は放電電圧、 I_d は放電電流である。

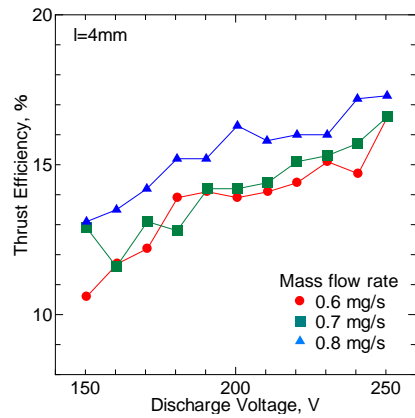
比推力の場合と同様に、磁極位置が4mmと7mmの場合は近い値を示し、12mmの場合は他の条件よりも30%近く推進効率に優れていることがわかる。また、同じ磁極位置の場合の推進材流量による比推力の差は比較的小さなものであった。

図13に消費電力と比推力の関係を示す。本試験での消費電力は推進機のみであり、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。

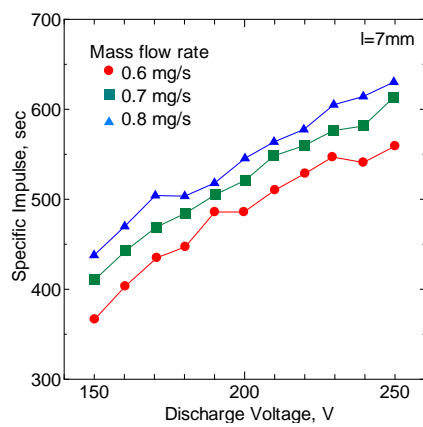
消費電力と推進効率との関係を図14に示す。磁極位置12mmの場合、他の条件下よりも推進効率7-10%近くが向上した。比推力の場合と同様に、推進剤流量が小さいほど低消費電力で作動し、逆に推進材流量が多い場合は高電圧域で比較的高い推進効率を示した。



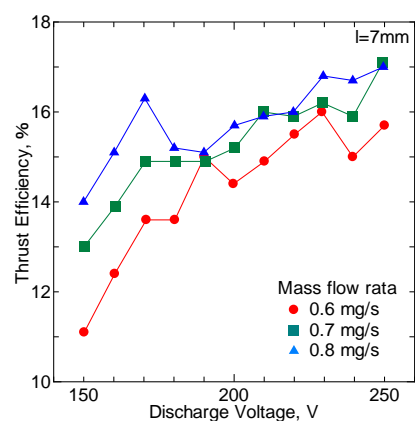
(a) 4mm



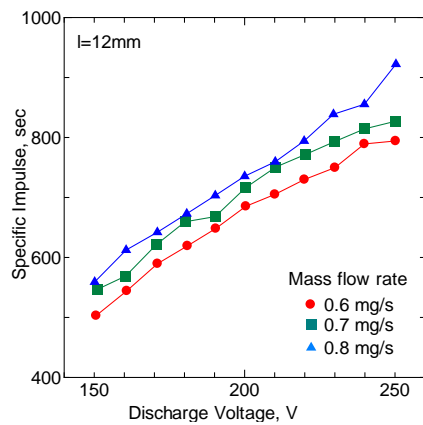
(a) 4mm



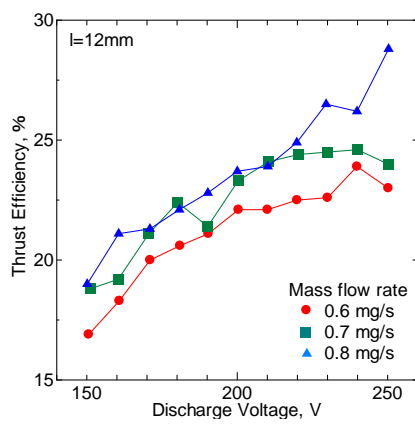
(b) 7mm



(b) 7mm



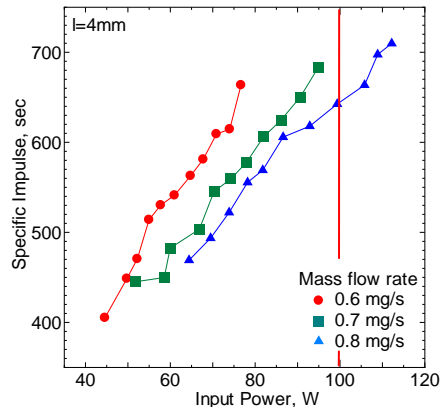
(c) 12mm



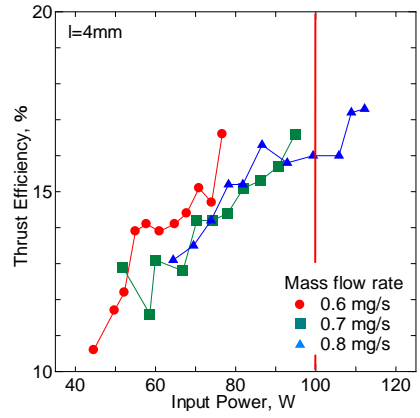
(c) 12mm

図11 放電電圧-比推力の関係

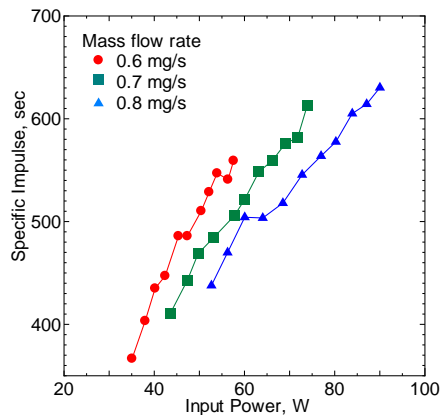
図12 放電電圧-推進効率の関係



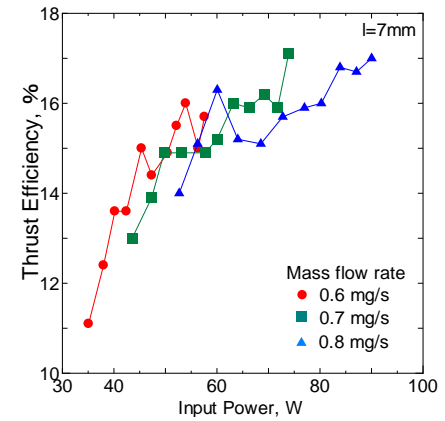
(a) 4mm



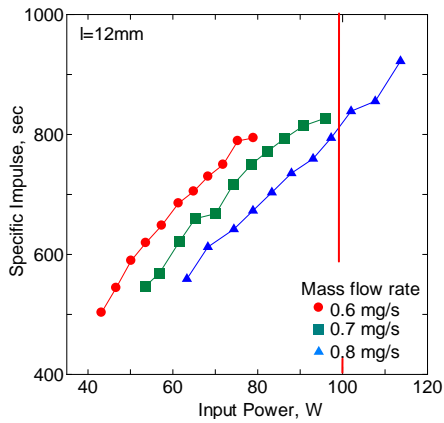
(a) 4mm



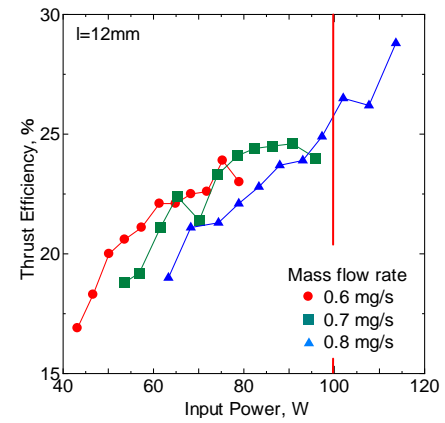
(b) 7mm



(b) 7mm



(c) 12mm



(c) 12mm

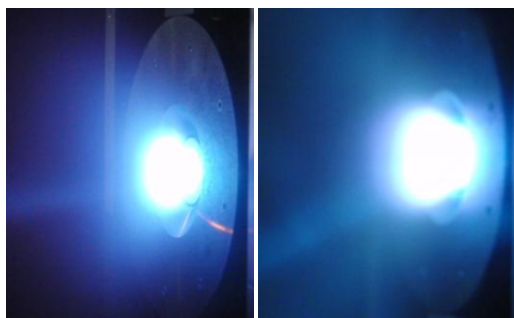
図13 消費電力-比推力の関係

図14 消費電力-推進効率の関係

3.2 SmCo磁石とNd磁石の性能比較

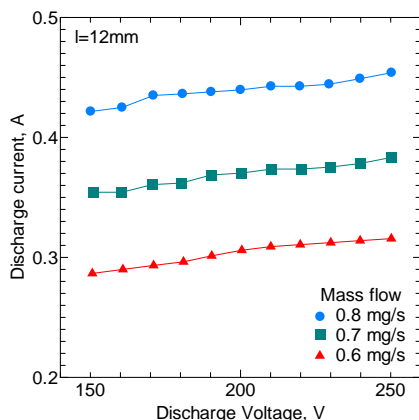
本実験では最も良い推進性能を記録した磁極位置12mmで固定し、SmCo磁石とNd磁石の各推進性能を比較した。図15に噴射時のプリューム形状を示す。両磁石共に安定作動し発散角はほぼ変化が無かったが、Nd磁石の場合プリュームがやや大きい傾向があった。

図16に放電電圧と放電電流の関係を示す。

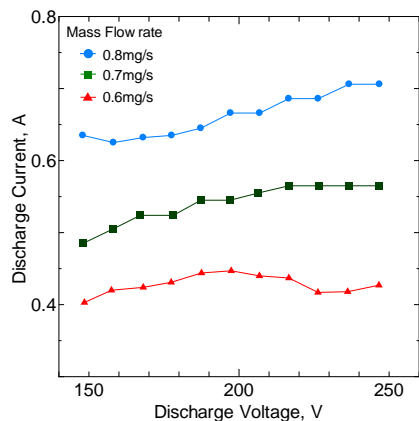


(a) SmCo (b) Nd

図15 プリューム形状



(a) SmCo磁石

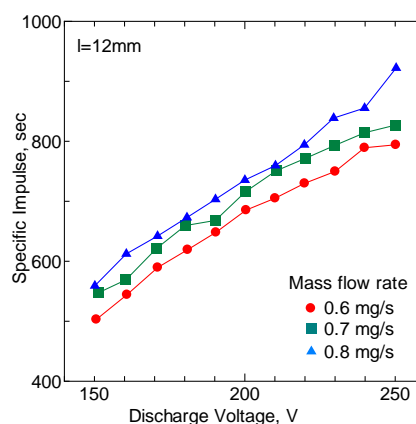


(b) Nd磁石

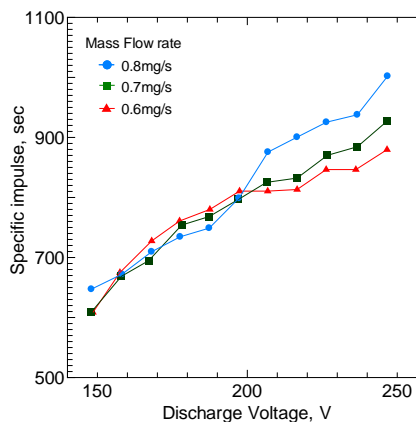
図16 放電電圧-放電電流の関係

両磁石ともに放電電流の緩やかな上昇傾向がみられる。Nd磁石の場合、全ての電圧域において放電電流はSmCo磁石の場合よりも13%高い結果となった。

図17に放電電圧と比推力の関係を示す。Nd磁石に変更した場合、SmCo磁石よりも比推力が15%程度向上した。推進材流量0.6-0.7mg/sにおける比推力の差は両磁石とも比較的小さなものであったが、推進材流量が0.8mg/s、印加電圧200Vよりも大きい場合においては、他の推進剤流量の場合よりも比推力が増加傾向にあった。



(a) SmCo磁石

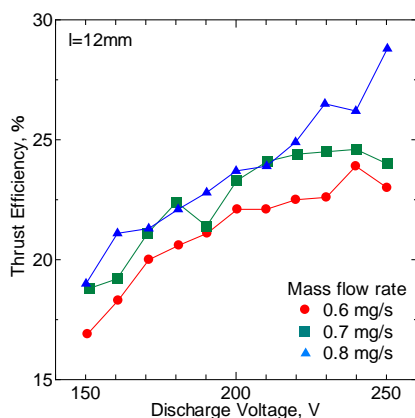


(b) Nd磁石

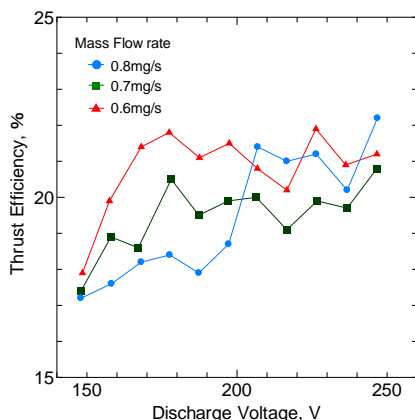
図17 放電電圧-比推力の関係

図18に放電電圧と推進効率の関係を示す。推進剤流量0.6-0.7mg/sのとき、Nd磁石使用時は20-21%付近から推進効率が伸び悩んでいる傾向があった。ただ推進剤流量が0.8mg/sの時はいずれの磁石の場合においても印加電圧の上昇と

ともに推進効率が上昇傾向し、特に印加電圧200V付近より推進効率の上昇が顕著であった。



(a) SmCo磁石



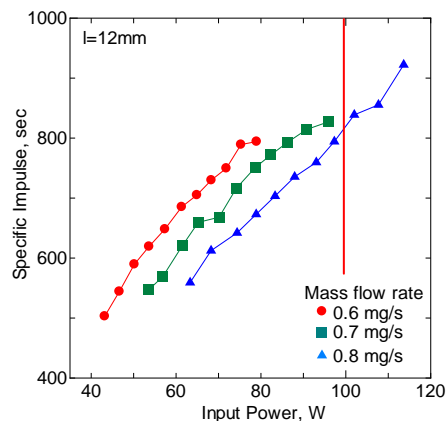
(b) Nd磁石

図18 放電電圧-推進効率の関係

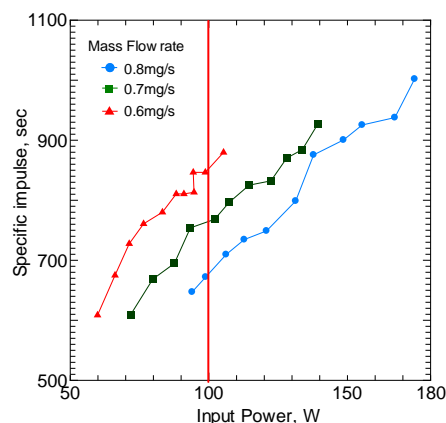
図19に投入電力と比推力の関係を示す。いずれの磁石の場合でも推進剤流量が少ないほど低電力で作動する傾向がある事がわかる。また、投入電力100WにおいてSmCo磁石が推進剤流量0.8mg/sで比推力838.8 sであるのに対して、Nd磁石の場合、推進剤流量0.6mg/sで比推力846.5 sであることから、Nd磁石を使用し印加磁場を強くすることによって推進剤流量の低減を図る事が出来る事が判明した。

図20に消費電力と推進効率の関係を示す。

Nd磁石の場合、推進材流量0.6mg/sのとき推進効率21.2%を示したものの、SmCo磁石の場合よりも低い値を示した。

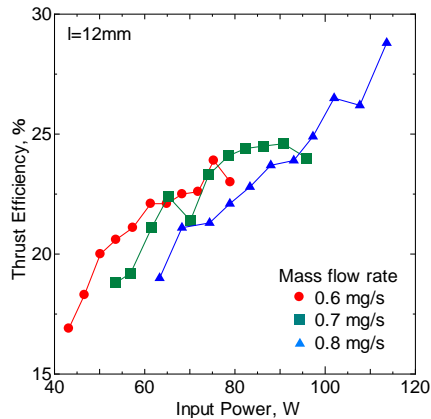


(a) SmCo磁石

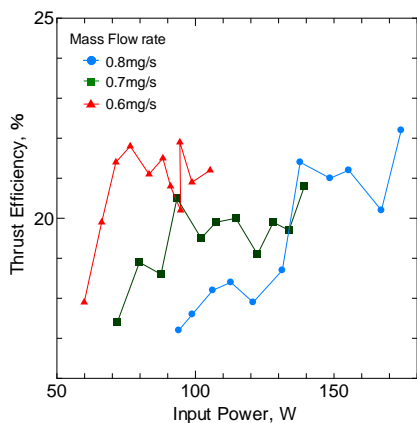


(b) Nd磁石

図19 消費電力-比推力の関係



(a) SmCo磁石



(b) Nd磁石

図20 消費電力-推進効率の関係

4. 結論

本研究では新たに開発したTCHT-5の磁極位置、使用する磁石別にみた推進性能の比較を行った。

(1) 磁極位置別にみた推進性能の変化

磁気位置12mmの条件下において、4mm、7mmの場合とほぼ同等の消費電力でありながら、比推力や推進効率が30%近く向上した。

磁極位置12mmの時に推進性能が伸びたのは磁極間の距離が伸びたことにより、ノズル下流域と上流域の磁束密度の差が他の条件よりも大きく、ミラー効果が効果的に働き、電子の捕捉・プラズマの生成が効率的に行われたためと考えられる。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、磁石の配置変更による熱減磁対策は功を奏したと考えら

れる。

しかしながら消費電力100W付近での比推力は、SmCo磁石を使用し磁極位置12mm、推進材流量0.8mg/sの条件下で示した838.8sが最良であり、TCHT-4の比推力1394.6sよりも低い値であった。また推測の域を出ないものの、TCHT-5を構成する磁気回路(ヨーク)に可動機構を設けたことによってネジ部などに出来る空隙が多くなり、放電室内の径方向磁束密度が解析値を下回り、プラズマの電離衝突が効率的に行われ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、構造の簡素化を図ることによって空隙部を減らし、磁束密度を上げるなどの対策が必要となる。

(2) SmCo磁石とNd磁石の性能比較

磁場形成にNd磁石を用いた場合の比推力は846.5s、SmCo磁石使用時の比推力は838.8sであり、わずかではあるが比推力の向上が見られた。しかし推進効率はNd磁石を用いた場合が21.2%であるのに対して、SmCo磁石の場合は26.5%と、5.3%の推進性能の低下が見られた。

これは放電室内の磁束密度が大きくなったことによって径方向の磁束密度よりも軸方向の磁束密度が支配的になり、ドリフト運動が阻害されたためと考えられる。このことから単純に磁束のみを上げるのではなく、磁極の形状などの見直しを検討するなど対策をとる必要がある。

5. 今後の予定

今後は本実験によって判明した磁気回路の問題をクリアし、より磁極位置を大きくした場合や印加電圧300V付近にまで上げた高電圧試験を行うなどしてより広い範囲の実験結果を取得し、その結果を反映する形で内部構造を簡素化し、小型軽量化を推し進めた新型機の開発に取り組む予定である。また放電室形状を現在のストレートノズルからダイバージェントノズル

に変更し、どの程度の変化が生まれるか検証する。

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 (AJSP) 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).
- 7) Tomoyuki Ikeda, Kazuya Togawa, Hirokazu Tahara and Yosuke Watanabe, ” Performance Characteristics of Very Low Power Cylindrical Hall Thrusters for the Nano-Satellite “PROITERES-3”, Vacuum, Vol.88, 2013, pp.63-69.
- 8) Tomoyuki Ikeda, Kazuya Togawa, Naru Sugimoto, Yohei Mito, Ryo Yamamoto, Yuki Kato and Hirokazu Tahara, “Research and Development of Cylindrical Hall Thrusters for Small Spacecraft,” 29th International Symposium on Space Technology and Science (29 th ISTS), Nagoya Congress Center, Nagoya City, Aichi, Japan, 2013, ISTS 2013-b-20.
- 9) Tomoyuki Ikeda, Yohei Mito, Masato Nishida, Taisuke Kagota, Tsuyoshi Kawamura and Hirokazu Tahara, “Research and Development of Very Low-Power Cylindrical Hall Thrusters for Nano Satellites,” 33rd International Electric Propulsion Conference (33rd IEPC), George Washington University, Washington, D.C., USA, 2013, IEPC-2013-109.
- 10) 池田知行, 三藤陽平, 西田万里, 籠田泰輔, 川村剛史, 田原弘一, 渡辺陽介, "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", プラズマ応用科学, Vol.21-1, 2013, pp.23-28.