

惑星探査用大電力ホールスラスタの推進性能評価及び数値解析

Evaluation of Propulsion Performance and Numerical Analysis of High Power Hall Thruster for Planet Exploration

○城戸 翔磨・藤原 恭兵・川上 天誠・多川 真登・丸石 達也・田原 弘一（大阪工大）

○Shoma Kido・Kyohei Fujiwara・Tensei Kawakami・Makoto Tagawa・Tatsuya Maruishi・Hirokazu Tahara（Osaka Institute of Technology）

Abstract

A Hall thruster is a type of electric propulsion and has advantages such as high specific impulse and high efficiency. From those points to the present, the demand for electric propulsion systems such as all electrified satellites has expanded and various missions proposals using high power Hall thrusters are cited. However, it is hard to say that high thrust and long lifetime meet the required conditions and there are still problems to be solved. In the research, we aimed to develop a Hall thruster capable of achieving high power, high specific impulse and high efficiency with the final goals of developing 1 GW class solar power satellite construction and manned Mars exploration ships. For that purpose, we got the propulsion performance of SPT type Hall thruster “THT” which is high specific impulse by applying a discharge voltage of 1,000 V. In order to further improve the performance, it is necessary to clarify the plasma states inside the discharge chamber by numerical analysis, so we used the 2-D Hybrid PIC model for the propulsive performance value obtained in the experiment and “THT-VI”. And the validity of this analysis model was verified by comparing the propulsive performance values of numerical analysis results.

1. はじめに

ホールスラスタは電気推進機の一つであり、高比推力、高推進効率等の利点を持っている。こういった点から、現在、全電化衛星等の電気推進システムの需要が拡大し、大電力ホールスラスタを用いた様々なミッションの提案が挙げられている。しかしながら、高推力、長寿命は求められる条件を満たしているとは言い難く、まだまだ課題が残されている。本研究では、1GW級太陽光発電衛星建設用や有人火星探査用の大型電気推進機の開発を最終的な目標とし、大電力かつ高比推力・高推進効率を達成できるホールスラスタの開発を目指した。そのために、放電電圧1,000Vを印加することで高比推力化したSPT本学のSPT（Stationary Plasma Thruster）型ホールスラスタである“THT-VI”の推進性能を取得した。しかしながら、実用化するためには長寿命化かつ推進性能等の更なる性能向上が必須である。そのために短期間かつ低コストで最適な開発を行える数値解析により放電室内のプラズマ状態を調査する必要がある。そのため、まずは実験で取得した推進性能値と“THT-VI”を対象に2次元Hybrid-PICモデルを用いた数値解析結果の推進性能値を比較することで本解析モデルの妥当性の検証を行った。

2. 実験設備

2.1 実験設備概要 本実験で用いた実験設備の概略図を図1、真空チェンバ及び各種ポンプの仕様を表1に示す。実験設備は真空排気系装置、スラスタ作動システム、推力測定装置の3種に分類される。

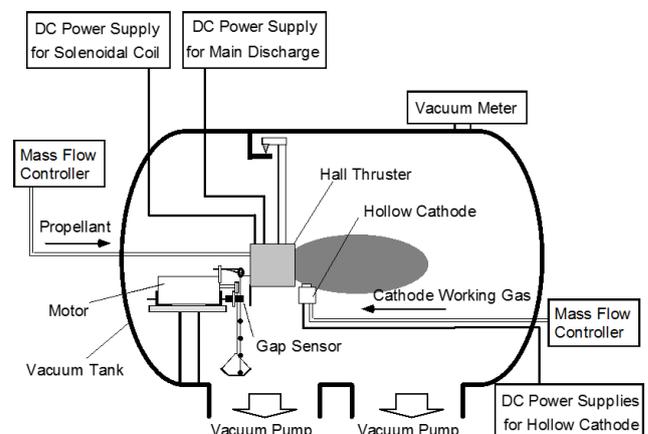


図1 実験設備の概略図

表1 真空チェンバ及び各種ポンプの仕様

Chamber	
Length [mm]	2,250
Diameter [mm]	1,200
Pump	
Exhaust Velocity [L/s]	10,000
Back Pressure [Pa]	3.3×10^{-2}

本大学が所有する真空チェンバは水冷ジャケット式真空チェンバとなっており、スラスタの長時間作動実験等、スラスタの耐久試験にも使用可能となっている。真空チェンバは直径 1,200 mm、長さ 2,250 mm の円筒形状となっている。真空排気系は低排気及び補助排気にロータリーポンプと 15 Pa 以下の高真空排気にはターボ分子ポンプを 2 台使用し排気速度は 10,000 L/s に達し、到達圧力は 3.3×10^{-3} Pa である。

3. SPT 型ホールスラスタ

3.1 SPT 型ホールスラスタ “THT-VI” 本研究で使用したホールスラスタ “THT-VI” の外観図を図 2、断面図を図 3、放電室の仕様を表 2、磁場形成に用いたコイルの仕様を表 3 にそれぞれ示す。

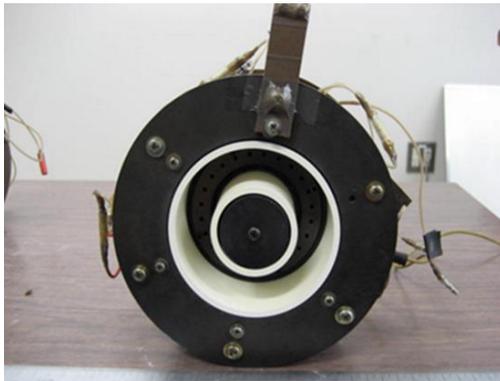


図2 THT-VIの外観図

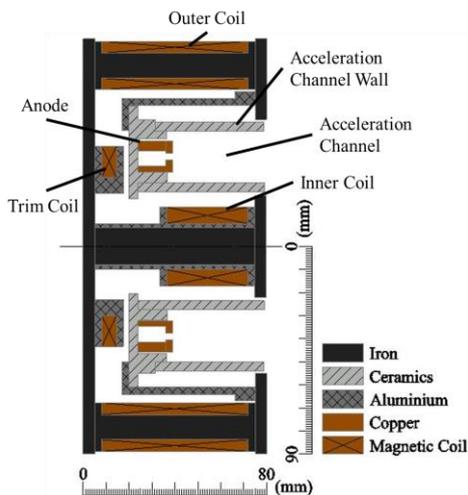


図3 THT-VIの断面図

放電室長は 40 mm、外径 100 mm、内径 56 mm、材質にはボロンナイトライド (Boron Nitride : 以降 BN と呼称) を使用した。磁場形成に用いたコイルは外側に外コイル 6 個、中心部に内コイル 1 個、アノードの後部にトリムコイル 1 個備え付けられている。

表2 THT-VIの放電室仕様

Discharge Channel	
Length [mm]	40
Inner Diameter [mm]	56
Outer Diameter [mm]	100
Material	BN (Boron Nitride)

表3 THT-VIの各コイル仕様

Coils	
Material	Copper
Diameter [mm]	0.5
Inner Coil	
Number of Turns	1,200
Quantity	1
Outer Coils	
Number of Turns	1,400
Quantity	6
Trim Coil	
Number of Turns	350
Quantity	1

3.2 性能取得実験条件 本学の真空チェンバを使用して作動実験を行った。性能取得実験条件を表 4 に示す。推進剤本体流量は 3.0 mg/s、4.0 mg/s の 2 種類となっており、実験条件はこの 2 種類にて作動実験を行った。放電電圧 300 V - 1,000 V までを 100 V 刻みで作動させ、推進剤にはキセノン (Xenon) を使用した。ホローカソードの推進剤流量は 0.1 mg/s に設定した。また、先行研究での実験において高電圧域での作動が不安定であったため、磁場形成用コイルに流す電流値を変更した。外コイルに 0.3 A、内コイルに 0.3 A、トリムコイルに 0.6 A から外コイルに 0.45 A、内コイルに 0.45 A、トリムコイルに 0.6 A に変更し、流している。

表4 性能取得実験条件

Discharge Voltage [V]	300 - 1,000	
Propellant	Xenon	
Mass Flow Rate [mg/s]	THT-VI	3.0-4.0
	Hollow Cathode	0.1
Coil Current [A]	0.45, 0.45, 0.6 (Inner, Outer, Trim)	
Maximum Magnetic Field Strength [mT]	19	
Back Pressure [Pa]	6.0×10^{-2}	
Vacuum Device	OIT Chamber	

3.2 性能取得実験結果 推力 - 放電電圧の特性グラフを図4, 比推力 - 放電電圧の特性グラフを図5, 放電電流 - 放電電圧の特性グラフを図6, 推進効率 - 放電電圧の特性グラフを図7にそれぞれ示す。

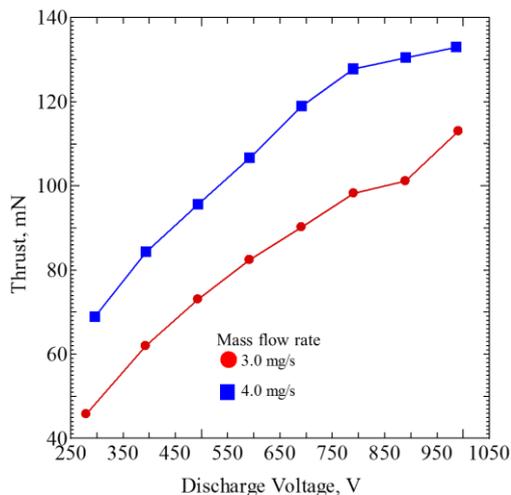


図4 推力 - 放電電圧

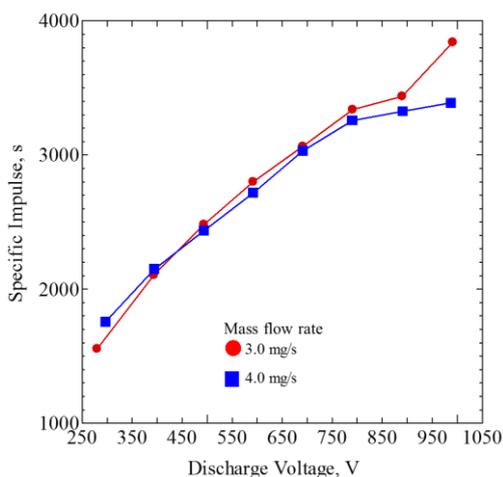


図5 比推力 - 放電電圧

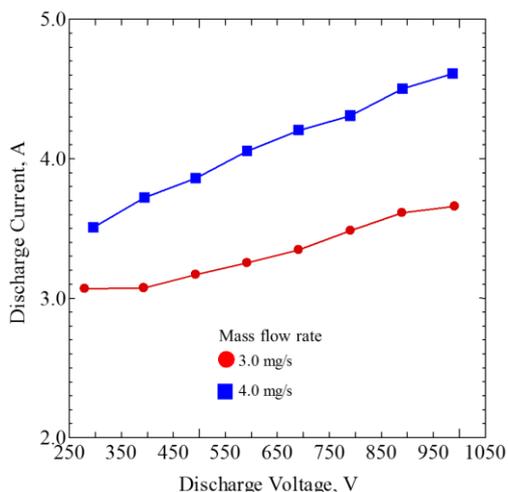


図6 放電電流 - 放電電圧

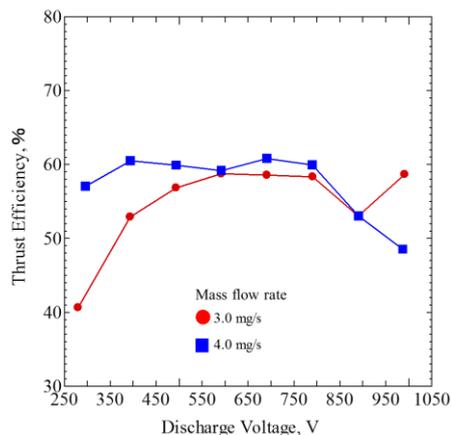


図7 推進効率 - 放電電圧

本学の真空チェンバにて新たな磁場形状による性能測定を試みた結果が外コイル 0.45 A, 内コイル 0.45 A, トリムコイル 0.6 A の条件である。放電電圧 300-1,000 V まで流量を変化させず安定作動させることに成功し, 高電圧域でも安定していた。先行研究の磁場と異なる磁場にすることで磁束密度が増加し電子を捕捉できていたため電離が促進され安定作動に繋がったと考えられる。また実験結果からも放電電流値に関しては高い値を示したが, 他のパラメータに関しては性能の向上が確認できた。

4. 数値解析

4.1 解析方法 SPT 型ホールスラスタを実用化するためには長寿命かつ推進性能等の更なる性能向上が必須である。そのために短期間かつ低コストで最適な開発を行える数値解析により放電室内のプラズマ状態を調査する必要がある。そのため, 上記の実験値と“THT-VI”を対象に行った数値解析結果の値を比較することで本解析モデルの妥当性の検証を行った。

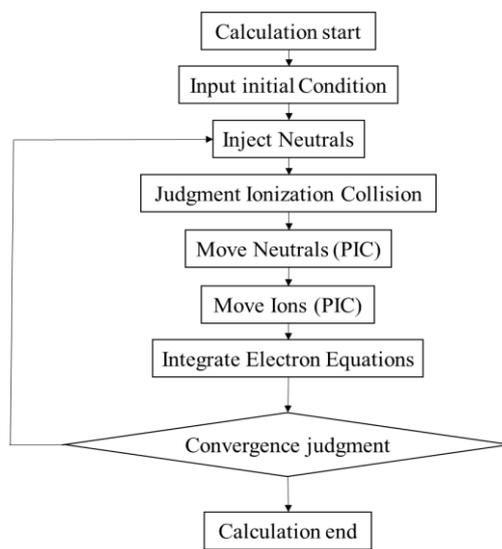


図8 フローチャート

本研究の解析方法としては、中性粒子やイオン等の質量の大きい重粒子を粒子法 (Particle-In-Cell: 以降 PIC 法と呼称) で、電子を流体モデルで解くというハイブリットモデルである 2 次元 Hybrid-PIC モデルを採用した。理由としては解析精度と計算コストの両立のためである²⁾。本解析手順のフローチャートを図 8 に示す。

4.2 計算領域 SPT 型である THT-VI について 2 次元 Hybrid-PIC モデルによる数値解析を行った³⁾。解析モデルを図 9 に示す。解析領域は放電室内部と出口下流の 10 mm とした。これはイオンの生成領域とイオン加速領域を考慮してこの領域に設定した。

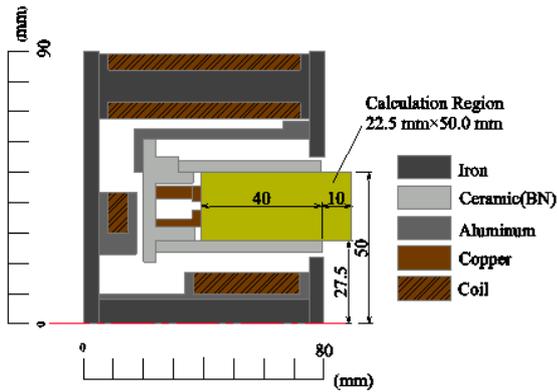


図 9 THT-VI の解析モデル

4.3 性能値解析条件・結果 本解析モデルの妥当性を検証するために、表 4 と同条件で計算を行い比較することで本モデルの妥当性を検証する。実験結果と計算結果の比較のグラフを図 10-13 に示す。比較対象としては本学の真空チェンバを用いたものと比較している。また、推進剤本体流量 3.0 mg/s、放電電圧 700 V における最大磁場強度の違いによるチャンネル内部プラズマ現象の比較も行った。この条件で解析を行ったのは、実験結果と比較した際にすべての相対誤差の平均が一番小さかったためである。

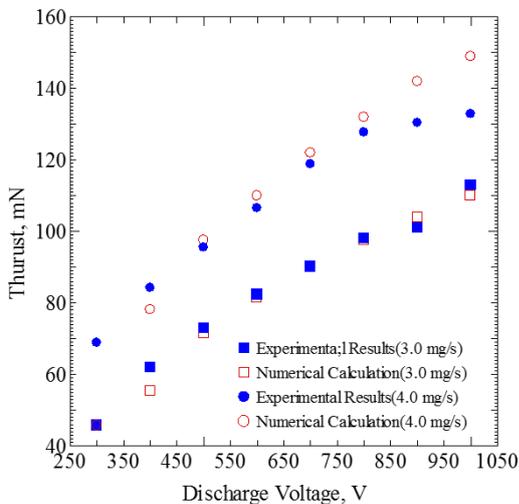


図 10 推力と放電電圧の関係

最大磁場強度の違いによる空間電位分布を図 14、電子温度分布を図 15、イオン数密度を図 16 に示す。

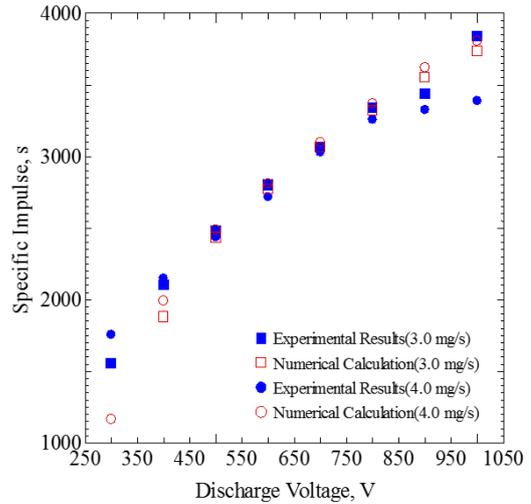


図 11 比推力と放電電圧の関係

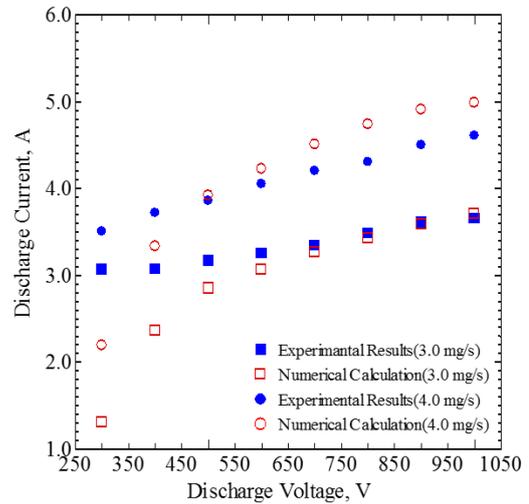


図 12 放電電流と放電電圧の関係

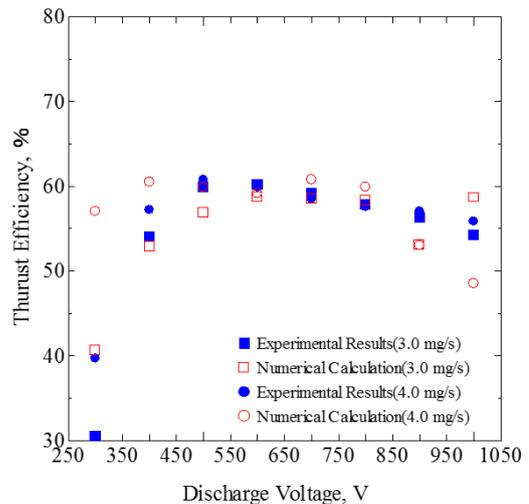
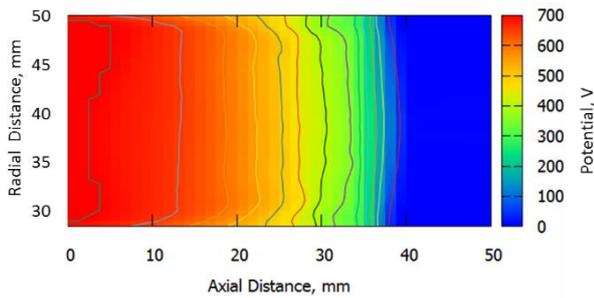
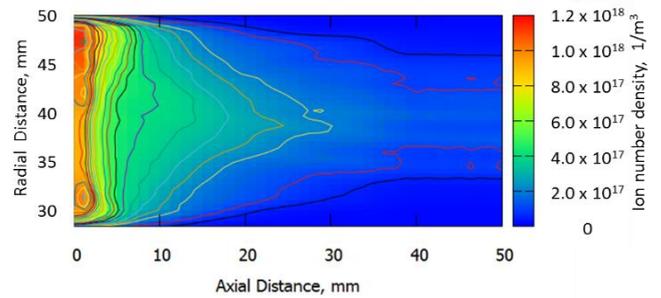


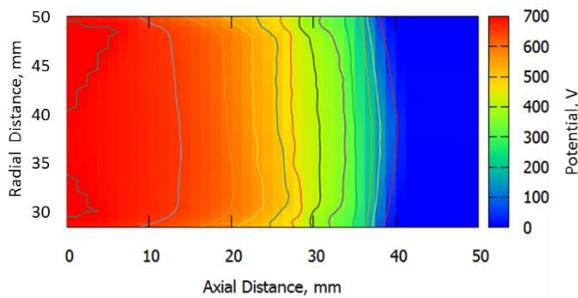
図 13 推進効率と放電電圧



(a) 最大磁場強度：12mT

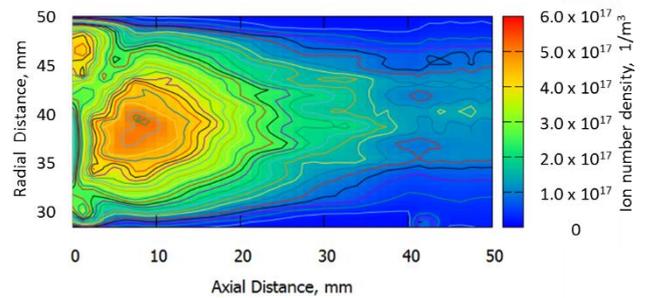


(a) 最大磁場強度：12mT



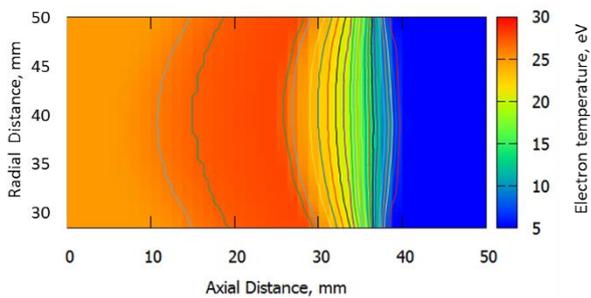
(b) 最大磁場強度：19mT

図 14 空間電位分布

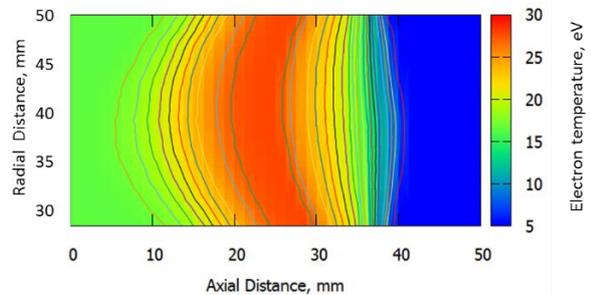


(b) 最大磁場強度：19mT

図 16 イオン数密度分布



(a) 最大磁場強度：12mT



(b) 最大磁場強度：19mT

図 15 電子温度分布

図 10-13 において、すべての実験値と解析結果値のデータの相対誤差の平均は推進剤流量 3.0 mg/s の場合、放電電流 23.4%，推力 11.4%，比推力 11.6%，推力 7.3%であった。また推進剤流量 4.0 mg/s の場合、放電電流 13.6%，推力 11.0%，比推力 11.1%，推力 10.0%であった。3.0 mg/s の時の放電電流の相対誤差の平均が大きくなったが、その他の相対誤差が 10%台となったため、これらの結果より、総じて実験結果と一致したため本解析モデルの妥当性を取得できたと判断した。

以上より、先行研究との最大磁場強度の違いによるチャンネル内部プラズマ現象の比較を行った。図 14 より(a), (b) 共にアノードから 25 mm まで緩やかな電位降下が見られ、そこから放電室出口まで急激に減少する結果となった。このことから、イオンの加速は主にアノードから 25-40 mm 付近で行われていることと図 16 から分かるように放電室壁面付近でのイオン数密度がイオンの再結合により低くなっているためであると予想される。また、図 15 に関しては(a), (b)共にアノードから 20-30 mm の間でピークを有し、その後放電室出口まで集中的に減少する。また、アノード付近を比較すると(a)の方が高い結果となった。これは電子の捕捉がうまくいっておらずエネルギーを持ったままアノードに到達していることが予想される。このことから(b)の磁場形状の方が適していることがわかる。

5 放電室壁面損耗解析

5.1 放電室壁面損耗解析条件

SPT 型ホールスラストは比較的長い絶縁材で、できた円環状の放電室をもち、放電室の幅に比べて放電室長さが大きいので、安定作動領域が比較的広いという特徴があり、実用化に向けて研究が行われている。しかし、長時間作動を行うと噴射するプラズマにより放電室出口付近が損耗し、比推力が低下するなどの欠点がある⁴⁾。そのため、THT-VIを対象に数値解析を行い、現在の THT-VI の壁面損耗量・メカニズムを把握し、損耗量を低減させる改良方法を特定する。放電室壁面損耗解析条件を表 5 に示す。推進剤にキセノンを使用し、放電電圧は 700V、推進剤流量は 3.0 mg/s、最大磁場強度を 19mT と設定し、放電室壁面損耗解析を行った。放電室壁面損耗解析結果を図 17 に示す。先ほどと同様に、この条件で解析を行ったのは、実験結果と比較した際にすべての相対誤差の平均が一番小さかったためである。

表 5 放電室壁面損耗解析条件

Discharge Voltage [V]	700
Propellant	Xenon
Mass Flow Rate [mg/s]	3.0
Maximum Magnetic Field Strength [mT]	19
Operating Time [h]	0-1,200

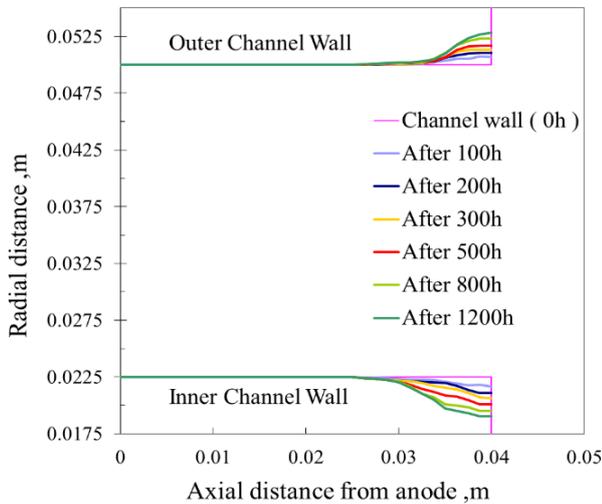


図 17 放電室壁面損耗解析結果

図 17 より、放電室出口付近での損耗量が特に激しく、時間が経つにつれ損耗量が多くなった。外チャンネル壁で最大 2.9 mm、内チャンネル壁で最大 3.5mm の損耗が発生する結果となった。放電室壁面損耗解析結果から現状の THT-VI では長時間作動は困難であると判断した。

6 マグネティックシールド搭載新型 THT-VI

6-1 マグネティックシールド マグネティックシ

ールディングの原理を図 17 に示す^{5),6),7)}。従来の磁場・壁面形状は、図 18(a)のように磁力線が放電室壁面を貫く形をしている。一方、マグネティックシールドを搭載した磁場・壁面形状は、図 18(b)のように磁力線が壁面に沿うように形成されている。このことにより、壁面に対するイオン衝突が減少し、壁面損耗を軽減させることが期待できる。

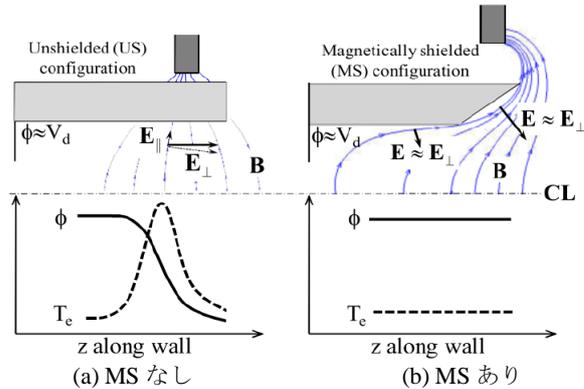


図 18 マグネティックシールドの原理

6-2 新型 THT-VI 現在使用している THT-VI の断面図を

図 19 に示す。マグネティックシールドを搭載した THT-VI の断面図を図 20 に示す。改善点は 3 点ある。1 点目は内コイルである。THT-VI の内コイルの熱影響を減らすために巻き数は変更せず、長さを 2 倍にした。また、材質を中空のアルミニウムから有芯の鉄に変更し、磁束密度を高めた。更に外コイルと内コイルの形状を類似させることでマグネティックシールドに求められる上下対称となる磁場形状を作りやすくなるように行った。2 点目は放電室のセラミックスの鉄製のホルダーを配置した。この鉄製のホルダーに磁場を吸収させることで磁場形状の最適化を図る。3 点目はトリムコイルの除去である。鉄製のホルダーを配置することで、構造上配置できなくなったトリムコイルを除去した。

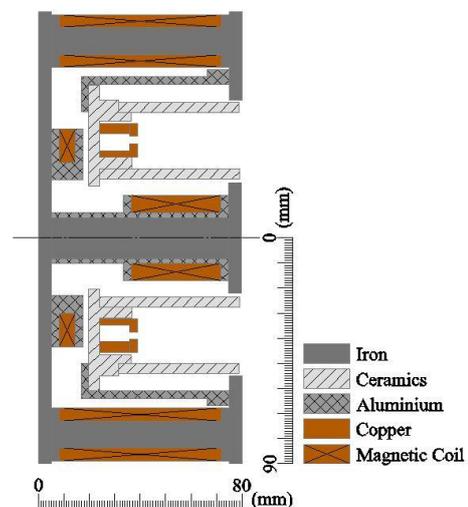


図 19 マグネティックシールド搭載前の THT-VI の断面図

計算結果より実験結果と総じて一致することが確認された。

参考文献

- 1) 高畑侑弥, 籠田泰輔, 角間徹生, 古久保裕介, 小林充宜, 田原弘一, 高田恭子, 池田知行, “5kW級SPT:TAL型ホールスラタの性能特性”, 平成27年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2015-031, 2016.
- 2) 藤田 剛, 戸川和也, 西田隆弘, 杉本 成, 野瀬 真, 田原弘一, 渡辺陽介, “マグネティックシールド型ホールスラタのプラズマ粒子シミュレーションとその実験的検証”, 第54回宇宙科学技術連合講演会, 3C08, 2010.
- 3) Yusuke Furukubo, Yuya Takahata, Tetsuo Kakuma, Mitsuyoshi Kobayashi, Kyohei Fujiwara, Tensei Kawakami, Hirokazu Tahara, Kyoko Takada, Tomoyuki Ikeda, “Performance Characteristics and Interior Plasma Phenomena of High-Power and High-Specific-Impulse Hall Thrusters for Manned Mars Exploration”, The 35th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2017-85, 2017.
- 4) V. Kim, “Main Physical Features and Processes Determining the Performance of Stationary Plasma Thrusters”, Journal of Propulsion and Power, Vol. 14, No. 5, pp. 736 – 743, 1998.
- 5) Richard R. Hofer, Sarah E. Cusson, Robert B. Lobbia, Alec D. Gallimore, “The H9 Magnetically Shielded Hall Thruster”, 35rd International Electric Propulsion Conference, IEPC-2017-232, 2017.
- 6) Ioannis G. Mikellides, Ira Katz, Richard R. Hofer, Dan M. Goebel, “Magnetic shielding of walls from the unmagnetized ion beam in a Hall thruster”, Applied Physics Letters Vol. 102, 023509, 2013.
- 7) Ioannis G. Mikellides, Ira Katz, Richard R. Hofer, Dan M. Goebel, “Magnetic shielding of a laboratory Hall thruster. I. Theory and validation”, Applied Physics Letters Vol. 115, 043303, 2014.

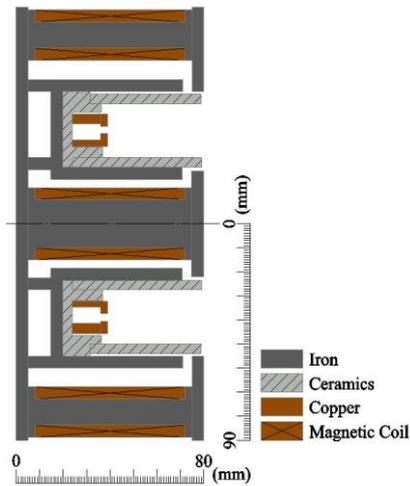


図20 マグネティックシールド搭載後のTHT-VIの断面図

6-3 マグネティックシールド搭載新型THT-VIの磁場解析結果 図21にマグネティックシールド搭載したTHT-VIの解析結果を示す。比較的磁場形状を放電室壁面と平行にすることができた。この時のコイルの電流値は外コイルに0.15 A, 内コイルに0.5 Aとなっている。今後は壁面形状の考慮や数値解析等を行い、最適化を目指す。

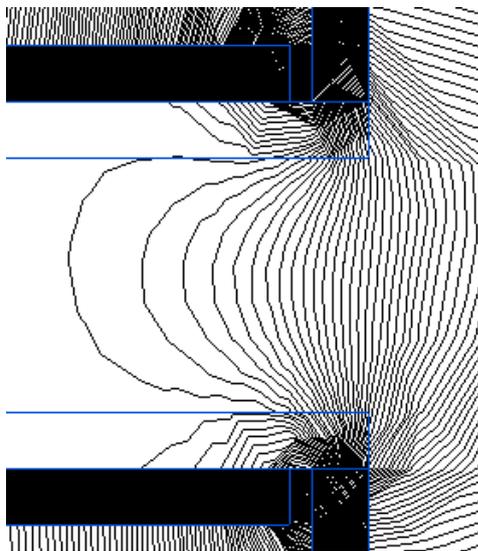


図21 マグネティックシールド搭載後のTHT-VIの磁場形状

6. 総括

6-1 性能取得実験 SPT型について大電圧作動を行った。THT-VIについては両条件で放電電圧1,000 Vでの作動を確認できた。また、磁場形状を変更することで高電圧域での安定作動を達成することができ、性能向上も確認できた。

6-2 数値解析 THT-VIについて2次元Hybrid-PICモデルによる数値計算を行い本モデルの妥当性の検証を行った。