

大電力ホールスラスタの性能評価および数値解析

Performance Evaluation and Numerical Analysis of High-Power Hall Thrusters

○古久保 裕介・小林 充宜・藤原 恭兵・川上 天誠・高畑 侑弥・角間 徹生・
田原 弘一・高田 恭子（大阪工大）
池田 知行（東海大）

○Yusuke Furukubo・Mitsuyoshi Kobayashi・Kyohei Fujiwara・Tensei Kawakami・Yuya Takahata・Tetsuo Kakuma・
Hirokazu Tahara・Kyoko Takada（Osaka Institute of Technology）
Tomoyuki Ikeda（Tokai University）

Abstract

In Hall thruster R&D, high thrust, high thrust efficiency and long lifetime are required for In-Space missions such as manned Mars exploration and 1 GW-class solar power satellite construction. However, current situation does not satisfy these conditions. Therefore, the Hall thruster requires to improve the performance. In this study, the performance characteristics were measured with SPT-type and TAL-type Hall thrusters in the range of discharge voltage 300-1,000 V.

In addition, in order to improve performance, it is necessary to understand plasma feature inside the discharge channel and predict its performance. Therefore, numerical calculation using two-dimension Hybrid PIC model for the THT-VI was carried out. The validity of this model was verified by comparison between calculated and measured results.

1. はじめに

現在、ホールスラスタを用いた 1GW 級太陽光発電衛星用 OTV や有人火星探査船等の宇宙ミッションが提案されている。これらのミッションを達成するには高推力、高推進効率、長寿命が必要であるが、現状ではこれらの条件を満たしておらず更なる性能向上が必要不可欠である¹⁾。

本研究では、放電室直径 100 mm クラスの Magnetic-layer 型と Anode-layer 型に高電圧(1,000 V)を印加することで、小型でありながら高比推力(3,000 s 以上)を達成することができる大電力・高比推力のホールスラスタの開発を目標とした。実験には、SPT 型である THT-VI, TAL 型である TALT-2 の 2 種類のスラスタを使用し、それぞれについて推進性能を取得した。また、最終的には放電室内部のプラズマ状態を明らかにすると共に性能予測をする必要がある。そこで、SPT 型である THT-VI の 2 次元 Hybrid-PIC モデルを用いた数値解析を行った。その妥当性を検証するために、数値解析結果と実験結果を比較した。

2. 実験設備

2.1 実験設備概要（大阪工業大学） 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²⁾。

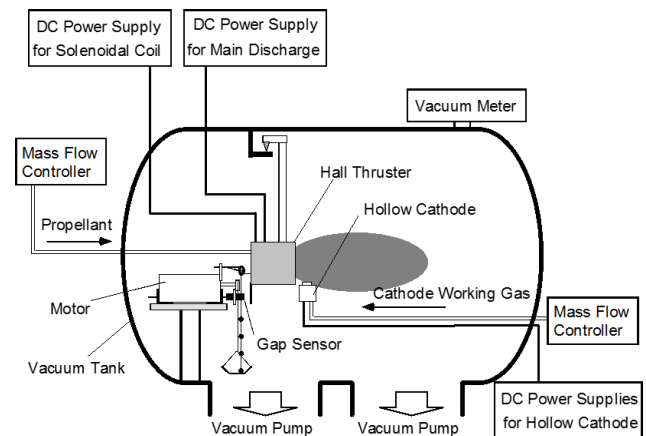


図 1 実験設備概略図

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。真空排気系

は真空容器，ターボ分子ポンプ 2 台，ロータリーポンプ 2 台の 3 系統で構成されている．ロータリーポンプには (株) 日本真空技術製のロータリーポンプ VD301 を使用しており，大気下からの粗引きはこのポンプを使用する．また，15 Pa 以下の高真空排気には，1 台あたり 5,000 L/s 排気することが可能である (株) 大阪真空機器製作所製のターボ分子ポンプ TG5000 を使用している．

2.2 実験装置概要 (宇宙航空研究開発機構) 本研究に際し，宇宙航空研究開発機構 (以後，JAXA と呼称) の所有する実験設備にて，本学で行った実験と同条件で実験を行った．実験装置の概略図を図 2，真空チェンバの外観図を図 3 に示す³⁾．この真空チェンバは，小惑星探査機「はやぶさ」，「はやぶさ 2」この両機の実験を実際に行った設備であり，日本屈指の性能を誇っている．実験システムに関しては，真空排気系以外のものは本学で使用したものと同じものを使用した．

真空チェンバは，メインチェンバ，サブチェンバ A，サブチェンバ B，の 3 つで構成され，本実験ではサブチェンバ A を使用した．真空チェンバ及び各種ポンプの仕様を表 2 に示す．サブチェンバ A は，メインバルブを介してメインチェンバと接続されている．真空排気系については，サブチェンバ A には，ターボ分子ポンプが接続されており，前準備である粗引きはこのターボ分子ポンプで排気を行う．メインチェンバにはクライオポンプが接続されており，メインバルブが開かれた後はこのクライオポンプで本引きを行う．

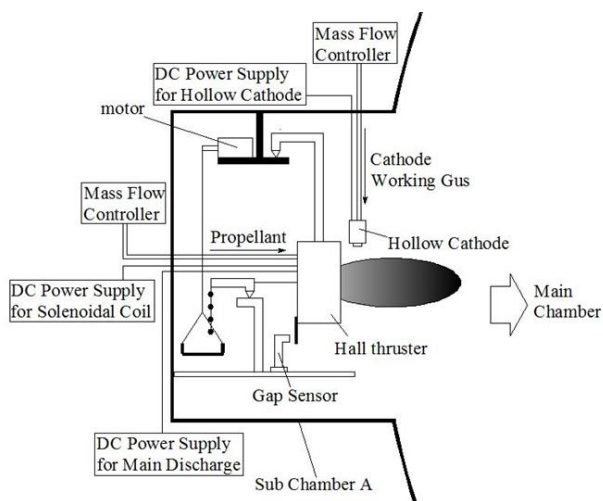


図 2 実験装置概略図



図 3 真空チェンバ外観図

表 2 真空チェンバ及び各種ポンプの仕様

Main Chamber	
Length [mm]	2,000
Diameter [mm]	5,000
Sub Chamber A	
Length [mm]	600
Diameter [mm]	800
Pumps	
Turbo Molecular Pump	
Exhaust Velocity[L/s]	140
Cryo Pump	
Exhaust Velocity [L/s]	28,000
Back Pressure [Pa]	3.25×10^{-5}

2.3 THT-VI 本研究で使用した SPT 型ホールスラスタ “THT-VI”の外観図を図 4，断面図を図 5，放電室の仕様を表 3，磁場形成に用いたコイルの仕様を表 4 にそれぞれ示す⁴⁾．

放電室の長さは 40 mm，外形 100 mm，内径 56 mm，材質には BN を使用した．磁場形成に用いたコイルは外側に 6 個，内側に 1 個，アノードの後部に 1 個備え付けられている．



図 4 THT-VI 外観図

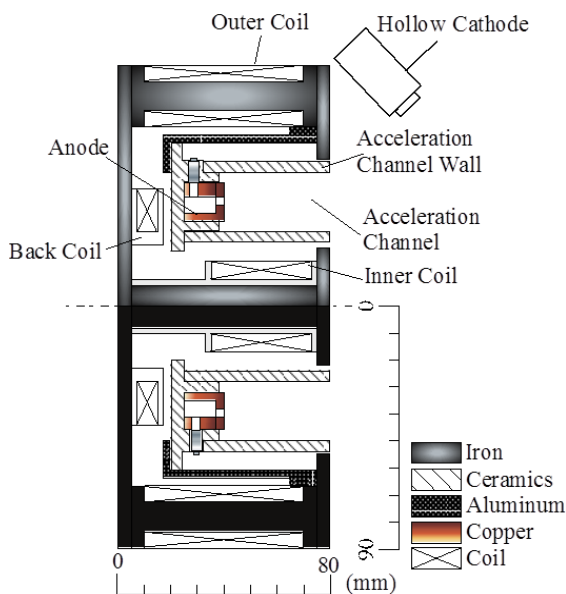


図 5 THT-VI 断面図

表 3 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 4 THT-VI の各コイル仕様

Coils	
Material	Copper ϕ 0.5 mm
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

2.4 TALT-2 本研究で使用した TAL 型ホールスラスタ ”TALT-2”の外観図を図 6, 断面図を図 7, 放電室の仕様を表 5, 磁場形成に用いたコイルの仕様を表 6 にそれぞれ示す⁵⁾.

放電室の長さは 35 mm, 外形 65 mm, 内径 45 mm, 材質には銅を使用した. 磁場形成に用いたコイルは外側に 1 個, 内側に 1 個, アノードの後部に 1 個備え付けられている.

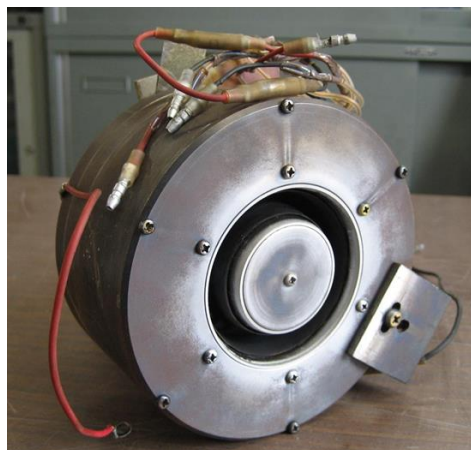


図 6 TALT-2 外観図

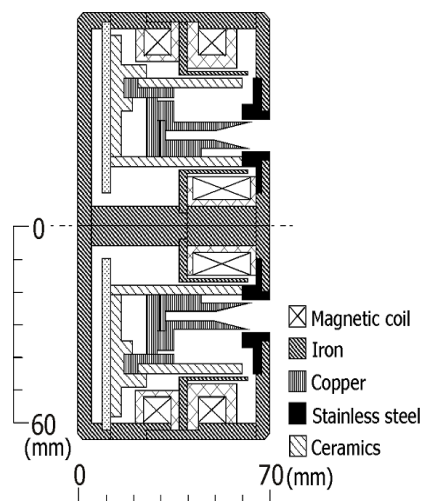


図 7 TALT-2 断面図

表 5 TALT-2 の放電室仕様

Discharge Channel	
Length [mm]	35
Inner Diameter [mm]	45
Outer Diameter [mm]	65
Material	Cu (Copper)

表 6 TALT-2 の各コイル仕様

Coils	
Material	Copper ϕ 0.5 mm
Inner Coil	
Number of Turns	480
Quantity	1
Outer Coils	
Number of Turns	240
Quantity	1
Trim Coil	
Number of Turns	200
Quantity	1

3. 実験条件・結果 (SPT 型)

3.1 実験条件

2 種類の実験条件にて作動実験を行った。1 つ目は JAXA の真空チェンバを使用した作動実験である。実験条件を表 7 に示す。放電電圧 300-1,000 V までを 50 V 刻みで作動実験を行い、推進剤には Xe (キセノン) を使用した。推進剤本体流量は 3.0 mg/s, ホローカソード流量は 0.1-0.2 mg/s と途中で増加させている。これは実験途中で作動が不安定になり、作動を安定させるために流量を増やしたためである。磁場形成用コイルには内コイルに 0.3 A, 外コイルに 0.3 A, トリムコイルに 0.9 A 流している。

2 つ目は本学の真空チェンバを使用した作動実験である。実験条件を表 8 に示す。JAXA での実験においてスラスタ本体の過熱による影響があり、スラスタヘッドの温度上昇を避けるため放電電圧 300-1,000 V までを 50 V 刻みから 100 V 刻みに変更し、推進剤には Xe (キセノン) を使用した。推進剤本体流量は 3.0, 4.0 mg/s, ホローカソード流量は 0.1 mg/s で作動実験を行った。また、JAXA 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内コイルに 0.45 A, 外コイルに 0.45 A, トリムコイルに 0.6 A 流している。

表 7 SPT 型の実験条件 1

Discharge Voltage [V]	300-1,000	
Propellant	Xenon	
Mass Flow Rate [mg/s]	THT-VI	3.0
	Hollow Cathode	0.1-0.2
Coil Current [A]	0.3, 0.3, 0.9 (Inner, Outer, Trim)	
Back Pressure [Pa]	3.55×10^{-3}	
Vacuum Device	JAXA Chamber	

表 8 SPT 型の実験条件 2

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)	
Back Pressure [Pa]	6.0×10^{-2}	
Vacuum Device	OIT Chamber	

3.2 実験結果

両実験条件より性能測定を行った。放電電流 - 放電電圧の特性グラフを図 8 に、推力 - 放電電圧の特性グラフを図 9 に、比推力 - 放電電圧の特性グラフを図 10 に、推進効率 - 放電電圧の特性グラフを図 11 にそれぞれ示す。

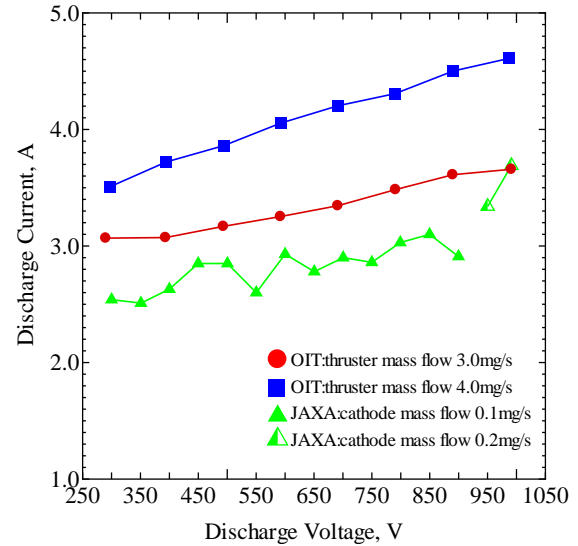


図 8 放電電流 - 放電電圧

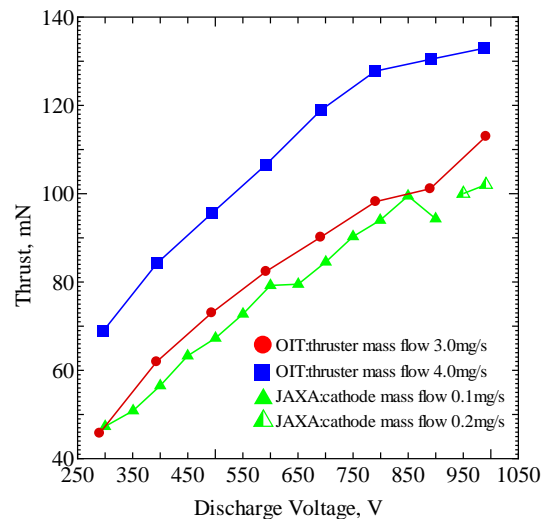


図 9 推力 - 放電電圧

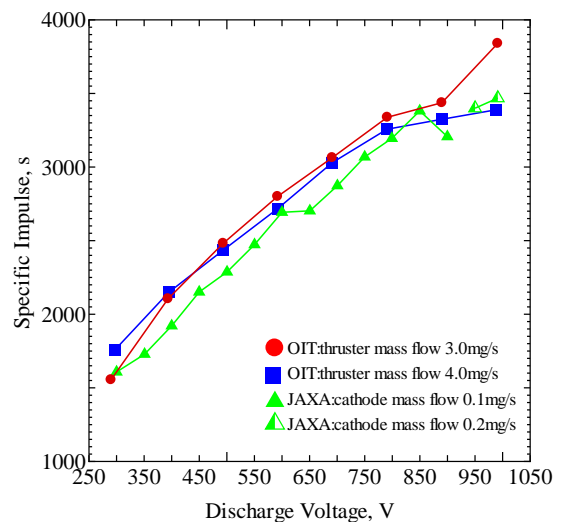


図 10 比推力 - 放電電圧

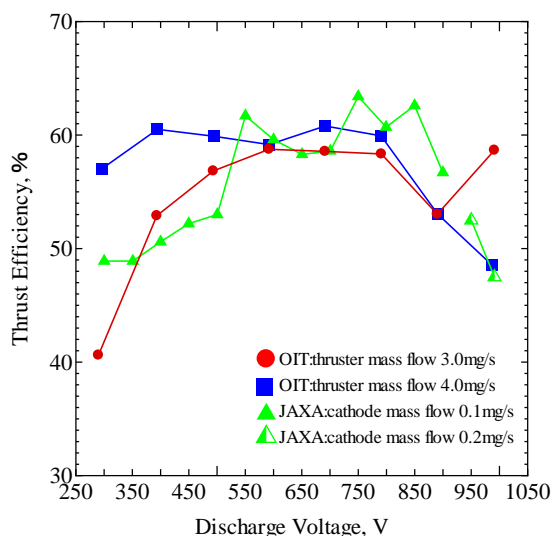


図 11 推進効率 - 放電電圧

JAXA チェンバでの実験では、放電電圧 850 V での作動の際、放電室外周部の絶縁体が赤熱していることを確認した。過去の実験で放電電圧 1,000 V での作動時においてスラスタが過熱により破損したため、一時的に実験を中断、スラスタを冷却した。そのため、電離が放電電圧 850 V 以前より促進されず 900 V 以降のパラメータに影響を及ぼしている。また、放電電圧 950-1,000 V では作動が安定せず磁場形状が最適でなかったことから電子をうまく捕捉できずにアノードに達していたことが予想される。

そこで、本学の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内コイルに 0.45A, 外コイルに 0.45A, トリムコイルに 0.6A の条件である。この結果では放電電圧 300-1,000 V まで流量を変化させず作動させることに成功した。また、JAXA で行った実験結果と比較しても性能向上が見られた。放電電流に関しては JAXA で行った実験のほうが低く良い結果が得られたが、チェンバの背圧の違いが考えられる。

4. 実験条件・結果 (TAL 型)

4.1 実験条件 TAL-2 の実験条件を表 9 に示す。放電電圧は 300-800 V まで 50 V 刻みで作動実験を行い、推進剤には Xe (キセノン) を使用した。磁場形成用コイルには、内コイルに 1.5 A, 外コイルに 0.3 A, トリムコイルに 0.9 A 流した。なお、本実験では本学が所有する真空チェンバを使用し実験を行った。

表 9 TAL 型の実験条件

Discharge Voltage [V]	300-800	
Propellant	Xenon	
Mass Flow Rate [mg/s]	TALT-2	3.0
	Hollow Cathode	0.1-0.5
Coil Current [A]	1.5, 0.3, 0.9 (Inner, Outer, Trim)	
Back Pressure [Pa]	3.0×10^{-2}	
Vacuum Device	OIT Chamber	

4.2 実験結果 放電電流 - 放電電圧の特性グラフを図 12 に、推力・比推力 - 放電電圧の特性グラフを図 13 に、推進効率 - 放電電圧の特性グラフを図 14 にそれぞれ示す。

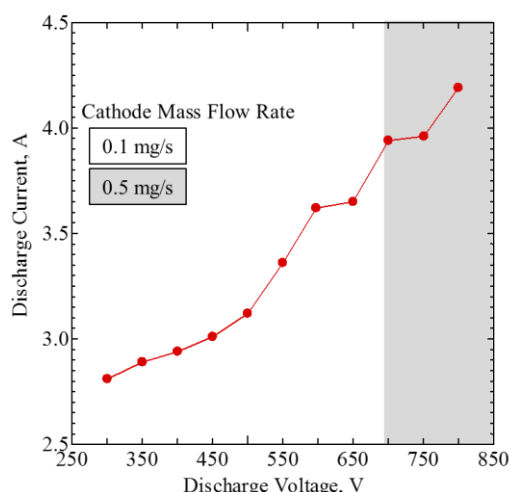


図 12 放電電流 - 放電電圧

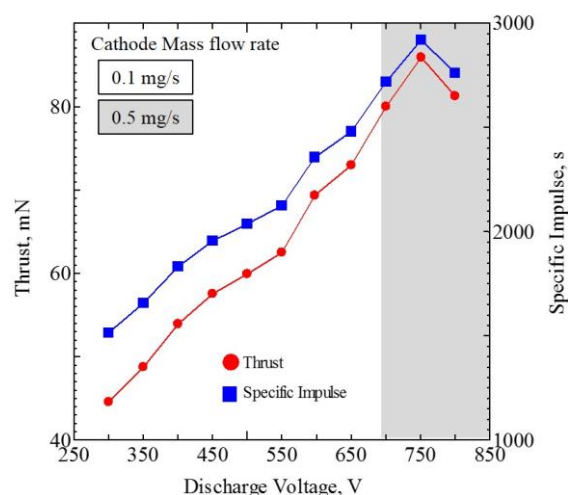


図 13 推力・比推力 - 放電電圧

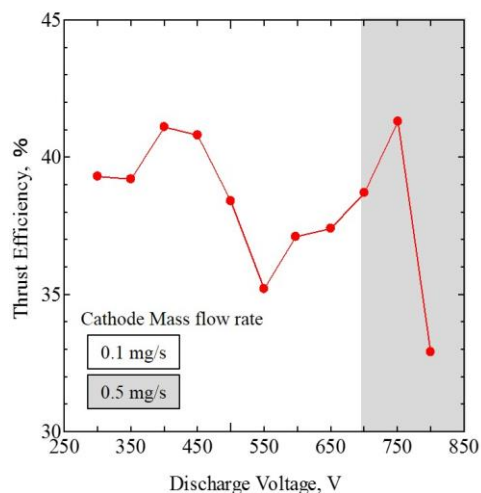


図 14 推進効率 - 放電電圧

THT-VIと同様に放電電圧1,000 Vまでの推進性能を測定する予定であったが、放電電圧 850 V 作動時アノード外周部に極端な赤熱が確認されたため、ここで実験を中止した。放電電圧 850 V 作動時のスラスタ正面からの図を図 15、作動停止直後のスラスタ側面からの図を図 16 に示す。

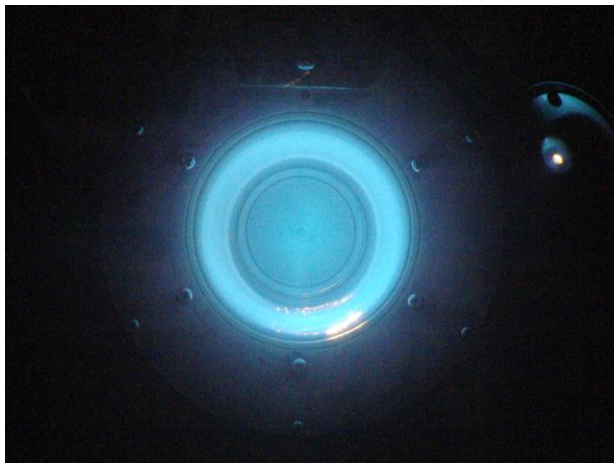


図 15 放電電圧 850 V 作動（スラスタ正面）



図 16 作動停止直後（スラスタ側面）

図 15 に示したようにアノード外周部右下に赤熱が確認できたため、放電電圧 850 V 作動実験を途中で中止し、スラスタのメンテナンスを行った。その結果、アノード外周部の赤熱していた部分が融解していることが確認された。融解した実験後のアノードを図 17 に示す。

通常プルームは内側に収束するので、本来外側ではなく内側のアノードが熱的に不利である。しかし、内側のアノードには融解の兆しは確認できなかった。また、さらにメンテナンスを進めていくと、外側のコイルが激しく焼損していることが確認された。以上のことから、熱によりコイルが焼損したことで本来の磁場が形成されず、プルームが外周方向に発散、プルームが外側のアノードに接触したため、外側のアノードが融解したと考えられる。



図 17 融解したアノード外周部

4.3 新型 TAL 型ホールスラスタ考案 実験結果よりアノードの融解が確認された。現状の TALT-2 では放電電圧 850 V 以上での作動は困難である可能性が浮上した。そこで、高電圧作動時の熱によるコイルの焼損やアノードの融解、熱膨張による絶縁体の破損を防ぐために改良を施した新型スラスタの考案が必要であると考えた。図 18 に現在考案中である新型 TAL 型ホールスラスタの 3D 図を示す⁶⁾。放電室形状は維持した状態で改良を施した。外コイルの焼損が確認されたため、焼損を防ぐために外コイルを THT-VI と同じ形状を採用し、熱源から遠ざけるような設計にした。またアノードの熱膨張による絶縁体の破損を防ぐために、アノードと絶縁体の間に隙間を設けた。今後は、この新型スラスタの開発も行い、高電圧作動による高比推力化を目指す。

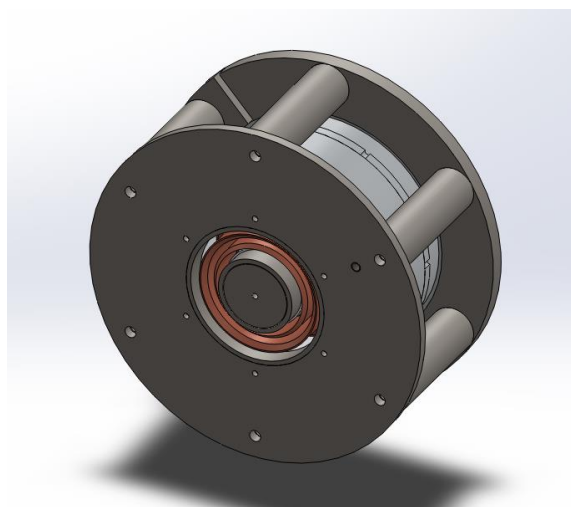


図 18 新型ホールスラスタの 3D 図

5. 数値解析

5.1 解析領域 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⁷⁾。解析モデル

を図 23 に示す。解析領域は放電室内部と出口下流の 10 mm とした。

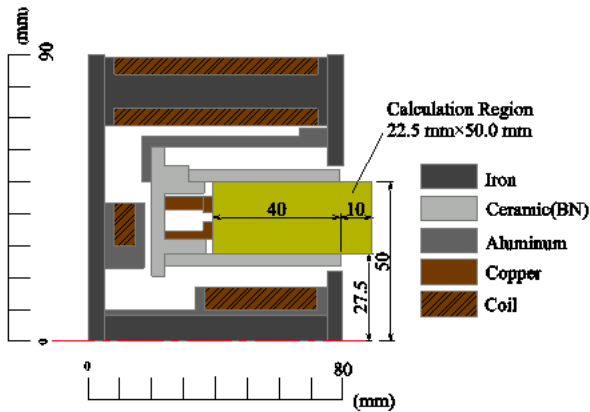


図 23 解析モデル

5.2 解析条件・結果 本モデルの妥当性を検証するために表 7 と同条件で解析を行い実験結果と解析結果の比較を行った。解析条件を表 10 に示す。

表 10 解析条件

Discharge Voltage [V]	300-1,000	
Propellant	Xenon	
Mass Flow Rate [mg/s]	THT-VI	3.0
	Hollow Cathode	0.1
Maximum Magnetic Field Strength [T]	0.013	

先行研究⁸⁾では、放電電流が流れすぎていた。そのためボーム拡散係数はボーム拡散では 16 とされているが⁹⁾、32 に設定し解析を行った。実験結果と解析結果の比較のグラフを図 24, 25, 26 にそれぞれ示す。

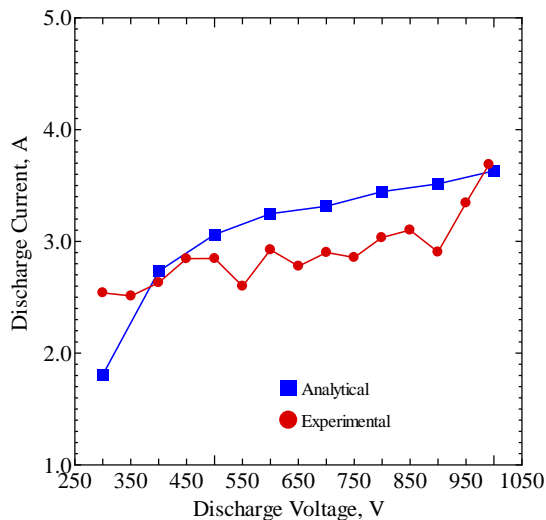


図 24 放電電流 - 放電電圧

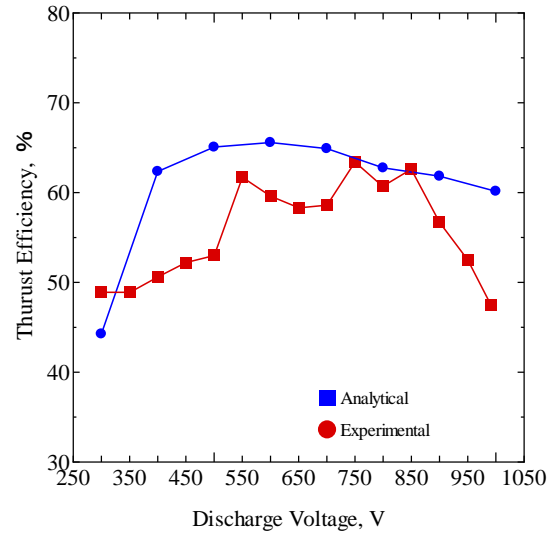


図 25 推力・比推力 - 放電電圧

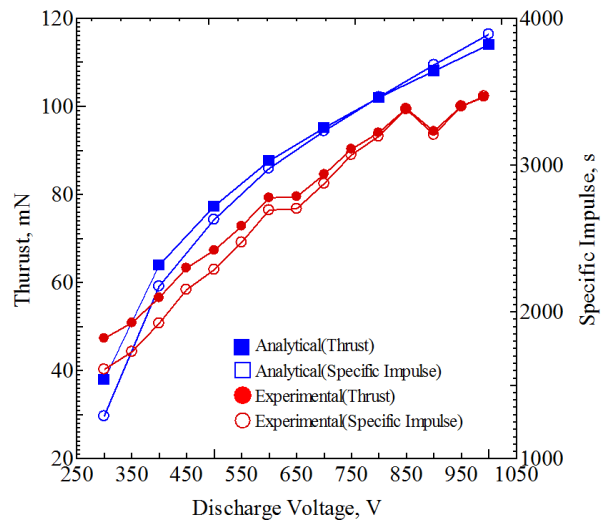


図 26 推進効率 - 放電電圧

図 24, 25, 26 よりすべてのグラフにおいて平均誤差 13% 程度と実験値に近づけることが出来た。また放電電圧 300 V において解析結果は低い値を示しているが、電離衝突の判定において、超粒子が電離する場合としない場合の二通りを考えているため電離衝突数の少ない低電圧域では実験値より低くなっていると考えられる。

6. 総括

SPT 型と TAL 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。しかし、放電電流値に関しては JAXA で実験を行った方が低かったがチェンバの背圧が関係していると考えられる。TALT-2 では、放電電圧 800 V での作動確認をした。しかし、放電

電圧 850 V でアノードの赤熱，融解等熱によるスラスタの異常が見られた．これらの結果から，現状の TALT-2 では放電電圧 800 V 以上での作動は困難である可能性が浮上した．そこで，高電圧作動時の熱によるコイルの焼損や，アノードの熱膨張による絶縁体の破損，融解を防ぐために改良を施した新型スラスタの考案が必要であると考えた．そこで，新型 TAL 型ホールスラスタを考案した．今後は，この新型スラスタの開発も行い，高電圧作動による高比推力化を目指す．

また，THT-VI について 2 次元 Hybrid-PIC モデルによる数値解析を行い本モデルの妥当性の検証を行った．解析結果と計算結果の比較のを行い，平均誤差は 13% 程度という結果になった．今後は本モデルを用いて性能予測，チャンネル内プラズマパラメータ，放電室壁の損耗シミュレーションも行っていく予定である．

参 考 文 献

- 1) Yuya Takahata, Taisuke Kagota, Tetsuo Kakuma, Mitsuyoshi Kobayashi, Yusuke Furukubo, Hirokazu Tahara, Kyoko Takada and Tomoyuki Ikeda : Hall Thruster R&D Activities at Osaka Institute of Technology, Space Propulsion 2016, Paper No. 3124904, 2016.
- 2) 籠田泰輔, 角間徹生, 高畑侑弥, 古久保祐介, 小林充宜, 田原弘一, 高田恭子, 池田知行: 大電力ホールスラスタの高電圧性能特性, 第 59 回宇宙科学技術連合講演会, 1C09, 2015.
- 3) Yuya Takahata, Taisuke Kagota, Tetsuo Kakuma, Yusuke Furukubo, Mitsuyoshi Kobayashi, Hirokazu Tahara and Kyoko Takada : Research and Development of High-Power, High-Specific-Impulse Hall Thrusters for Manned Mars Exploration, 8th Asian Joint Conference on Propulsion and Power (AJSPP2016), AJCPP2016-118, 2016.
- 4) 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 型ホールスラスタの性能特性, 平成 27 年度宇宙輸送シンポジウム, STEP-2015-031, 2016.
- 5) Yuya Takahata, Tetsuo Kakuma, Yusuke Furukubo, Mitsuyoshi Kobayashi, Tensei Kawakami, Kyohei Fujiwara, Hirokazu Tahara, Kyoko Takada and Tomoyuki Ikeda : Research and Development of High-Power, High-Specific-Impulse SPT and TAL-types Hall Thrusters for Manned Mars Exploration, The 2016 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, R2-1.
- 6) 古久保裕介, 小林充宜, 高畑侑弥, 角間徹生, 籠田泰輔, 田原弘一, 高田恭子, 池田知行 : 有人火星探査用大電力ホールスラスタの性能特性, 第 52 回日本航空宇宙学会関西・中部支部合同秋期大会, kcg005, 2015.
- 7) 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 : マグネティック型ホールスラス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.
- 8) 古久保裕介, 高畑侑弥, 角間徹生, 小林充宜, 藤原恭兵, 川上天誠, 田原弘一, 高田恭子, 池田知行 : 有人火星探査用ホールスラスタの大電力・高比推力性能特性, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 1I07.
- 9) 宮本健朗, : プラズマ物理入門, 岩波書店, 1991.