

# SPT/TAL ホールスラスタの高電圧・大電力作動特性

○籠田泰輔, 池田知行, 三藤陽平, 西田万里, 川村剛史, 田原弘一 (大阪工業大学)

High-Specific-Impulse Performance Characteristics of High-Power Hall Thrusters  
Taisuke Kagota, Tomoyuki Ikeda, Yohei Mito, Masato Nishida, Tsyutoshi Kawamura and Hirokazu Tahara(Osaka Institute of Technology)

Key Words: Electric propulsion, Hall Thruster, Magnetic Layer type, Anode Layer type, Acceleration Channel,

## 1. はじめに

本研究では、ホールスラスタの中でも放電室直径 100mm クラスの Magnetic-layer 型ホールスラスタにおいて放電電圧を高圧(500~1200V)にすることで、小型でありながら高比推力化(3000sec 以上)を目指し、その結果から RAIJIN プロジェクトで使用する Anode-layer 型ホールスラスタの参考データにする<sup>1)</sup>。使用した推進機はロシアで開発された Magnetic-layer 型の SPT100 と同じ放電室形状を持つ THT-VI ホールスラスタと Anode-layer 型ホールスラスタ TALT-2 である。

## 2. 実験装置

実験装置の概略図を図 1 に示す<sup>2)</sup>。実験装置は真空排気装置、スラスタ作動システム、測定装置の 3 つに分類される。

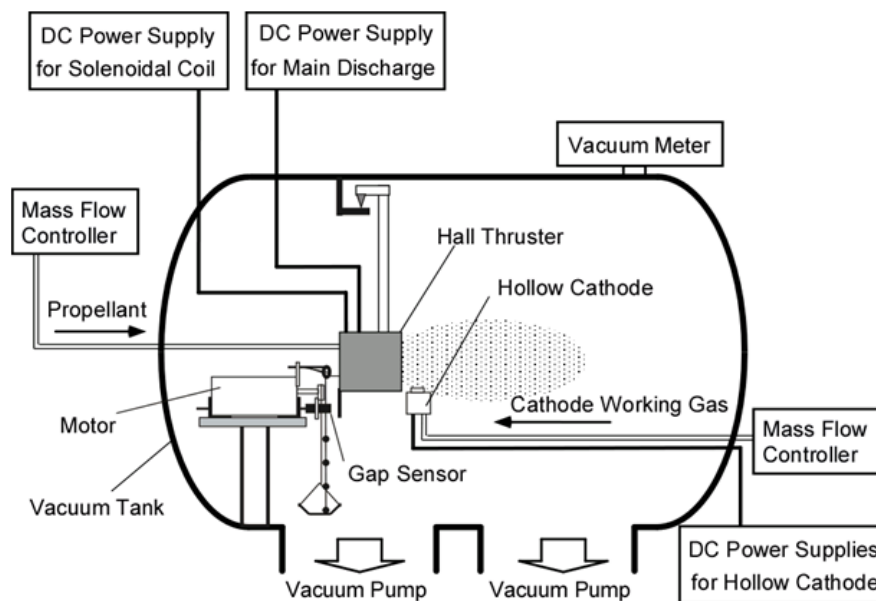


図 1 実験概略図

### 2.1. 真空排気装置

図 2 にチャンバーの外観写真、表 1 に真空チャンバーと真空ポンプの仕様を示す。真空チャンバーは長さ 225mm、直径 1200mm の円筒形の水冷ジャケット式であり、スラスタの耐久試験などの長時間実験にも使用できる。真空排気系は真空チャンバーと 2 台のターボ分子ポンプとそれに直列に接続されたロータリーポンプから構成されている。ターボ分子ポンプは真空チャンバーに直接接続されており、排気抵抗を小さく抑えることができる。低真空排気及び補助排気には (株) 日本真空技術製のロータリーポンプ VD301 を使用している。高

真空排気（15Pa 以下）においては（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。このターボ分子ポンプ 1 台当たりの排気速度は 5000 l/s である。



お

図 2 真空チャンバー外観図

表 1 真空チャンバーと真空ポンプの仕様

Chamber	
Length	2.25m
Diameter	1.2m
Pump	
Exhaust velocity	1000 l/s
Back Pressure	$5.3 \times 10^{-4}$ Pa

## 2.2. THT-VI

使用した SPT ホールスラスタ(THT-VI)の外観図と断面図を図 3, 4, 放電室とコイルの仕様を表 2, 3 に示す。

放電室長さは 40mm, 内径は 56mm, 外径は 100mm, 材質は BN を使用した<sup>3)</sup>。電磁石に用いたコイルは内側に 1 個, 外周に 6 個, アノードの後ろ側に 1 個である<sup>4)</sup>。

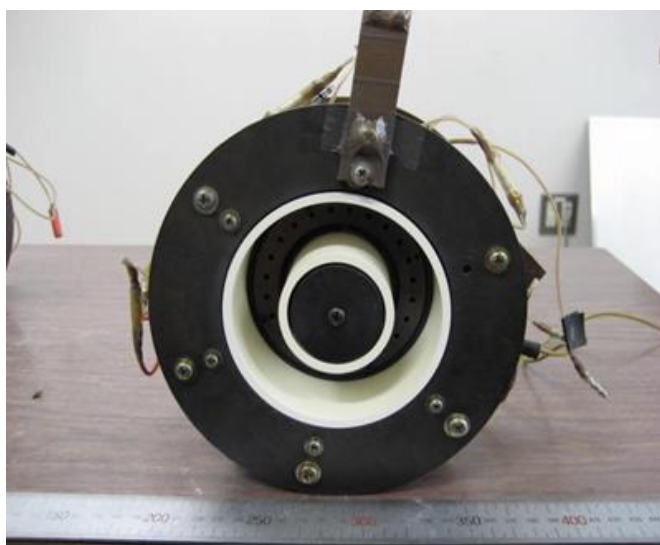


図 3 THT-VI 外観図

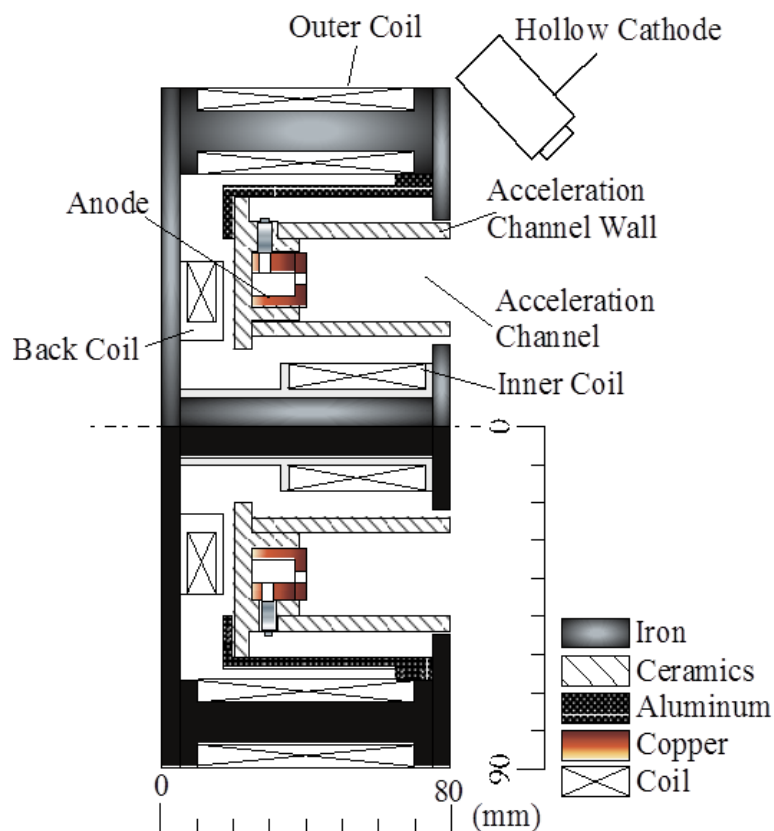


図4 THT-VI 断面図

表2 THT-VI の放電室詳細

Discharge channel	
Length	40mm
Inner diameter	56mm
Outer diameter	100mm
Material	Boron nitride (BN)

表3 THT-VI のコイル詳細

Coils	
material	Copper φ0.5mm
Inner coil	
Number of turns	1200
Quantity	1
Outer coils	
Number of turns	1400
Quantity	6
Trim coil	
Number of turns	350
Quantity	1

### 2.3. TALT-2

使用した TAL ホールスラスタ(TALT-2)の概観図と断面図を図5, 6, 放電室とコイルの仕様を表4, 5に示す。

放電室長さは35mm, 内径は45mm, 外径は65mm, 材質は銅を使用した。電磁石に用いたコイルは内側に1個, 外側1個, その裏側に1個である。

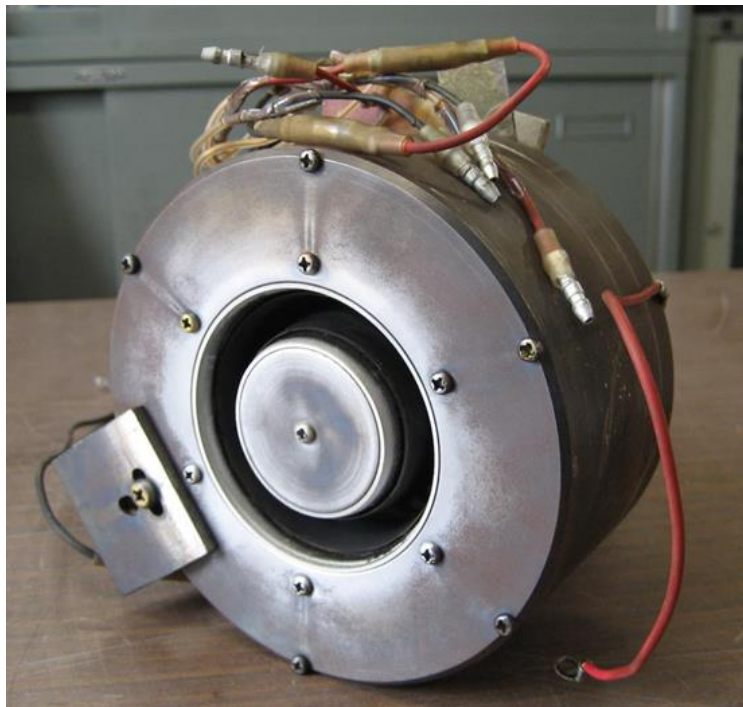


図5 TALT-2 外観図

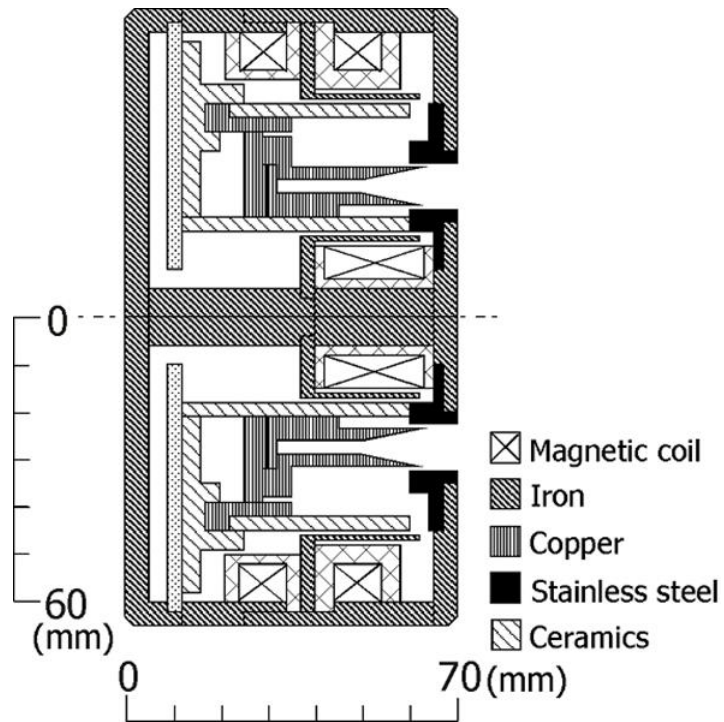


図6 TALT-2 断面図

表4 TALT-2 の放電室詳細

Discharge channel	
Length	35mm
Inner diameter	45mm
Outer diameter	65mm
Material	Copper (Cu)

表 5 TALT-2 のコイル詳細

Coils	
material	Copper φ0.5mm
Inner coil	
Number of turns	480
Quantity	1
Outer coils	
Number of turns	240
Quantity	1
Trim coil	
Number of turns	200
Quantity	1

#### 2.4. 測定装置

スラスタの推進性能を評価するためには、推力を正確に測定しなければならない。しかしホールスラスタが発生する推力は mN オーダーと小さく、ロードセルなどによる測定は困難である。本研究では、微小変位計を用いた剛体振り子方式の推力測定システムを用いた。推力測定システムの概略を図 7 に示す。また微小変位計には、(株)エミック製の渦電流式非接触微小変位計 EMIC NA-20 を用いた。

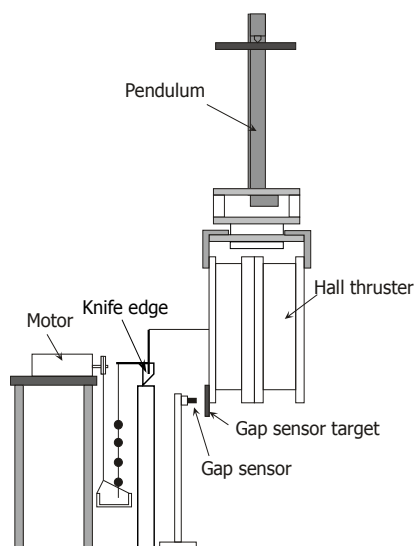


図 7 推力測定装置概略図

スラスタは真空容器天井から吊り下げられたアルミニウム製のスラストスタンドに取り付けられる。推力校正は真空環境下において次のような手順で行う。モータを動かし校正用のおもり（1 個約 2.5g）を載せてある皿を下げ、スラスタに水平方向の既知荷重を負荷させる。おもりによる垂直荷重を水平方向荷重に変換する装置には、ナイフエッジを用いた振り子式の装置を用いた。ナイフエッジを用いることにより支点での摩擦を極力小さくできるため、この装置によりおもりによる垂直荷重を損失なく水平方向荷重に変化できる。また皿に残すおもりの数を変えることにより、負荷させる既知荷重を変化させられる。スラスタに水平方向の荷重がかかることで、スラスタに取り付けられた微小変位計用のターゲット板と微小変位計との距離が変化し信号が変わる。この信号の変化をレコーダで読み取り、それと既知荷重（おもりの個数）を参照させることで図 8 のような校正曲線が得られる。信号を読み取るレコーダには、(株)キーエンス製の PC リンク型高機能レコーダ GR-3000 を用いた。図 8 に示されるようにこの校正は線形性に優れており、また非接触変位計の分解能も高いため、100mN 程度までの推力を±1.0%程度の高精度で測定できる。推力校正が終わり次第モータを動かし受け皿を上げ、おもりが全く掛かっていない状態にしてスラスタを作動させる。その作動による微小変位計の信号の変化から推力を算出する。

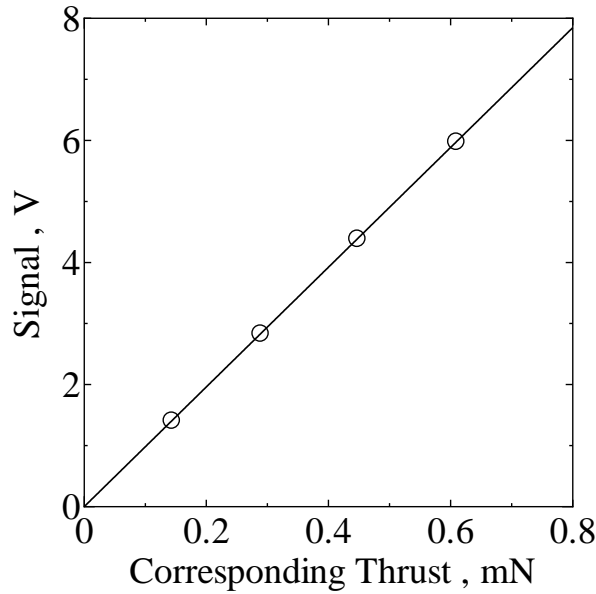


図8 推力校正の結果

### 3. 実験条件

#### 3.1. THT-VI

表6にスラスタの作動条件を示す<sup>5)</sup>。放電電圧は300Vから1000Vまで50V刻みで行う。推進剤本体流量は3.0mg/s~4.5mg/s、カソード流量0.1mg/s~0.75mg/sと変更して行った。推進剤にはXeを使用した。実験で取得したデータは放電電流-放電電圧の関係と推力・比推力-放電電圧の関係、推進効率-放電電圧の関係の3種である。

表6 THT-VI 実験条件

Discharge Voltage	300~1000V	
Propellant	Xenon	
Mass Flow Rate	THT-VI	3.0~4.5mg/s
	Hollow Cathode	0.1~0.75mg/s
Coil Current	0.3, 0.3, 0.9A (inner, outer, trim)	
Cathode Distance	200mm	
Backpressure	$3.0 \times 10^{-2}$ Pa	

#### 3.2. TALT-2

表7にスラスタの作動条件を示す<sup>5)</sup>。放電電圧は300Vから550Vまで50V刻みで行う。推進剤本体流量は3.0mg/s、カソード流量0.1mg/sであり、推進剤にはXeを使用した。実験で取得したデータは放電電流-放電電圧の関係と推力・比推力-放電電圧の関係、推進効率-放電電圧の関係の3種である。



表 7 TALT-2 実験条件

Discharge Voltage	200~400V
Propellant	Xenon
Mass Flow Rate	3.0mg/s
Coil Current	0.5,0.5, 0.5A (inner, outer, trim)
Cathode Distance	200mm
Backpressure	$3.0 \times 10^{-2}$ Pa

#### 4. 実験結果

##### 4.1. THT-VI

放電電流(A) - 放電電圧(V)のグラフを図 9, 推力(mN)・比推力(sec) - 放電電圧(V)のグラフを図 10, 推進効率(%) - 放電電圧(V)のグラフを図 11 のように示す. 放電電圧 1000V 時のデータが取得出来なかったのは, 放電電圧 1000V 実験時のスラストの揺れが大きく安定しなかったこと, また, 安定を待つまでの間にスラストに熱がこもり破損してしまったことに起因する. 図 12 と図 13 はそれぞれ放電電圧 300V と 1000V の実験時の写真である. 推進剤流量の本体流量とカソード流量が変化しているのは, 噴射時の投入電力が高くなるにしたがって作動が不安定になり, その都度それらの流量を増加させたことに起因する. グラフにそれぞれ切れ目が入っているのは, 推進剤流量をそれぞれ変化させたためである. 推進剤流量についてそれぞれ詳しく説明すると, 本体推進剤流量は放電電圧 300V~550V まで 3.0mg/s, 600V~750V まで 3.5mg/s, 800V~1000V まで 4.5mg/s である. カソード流量に関しては放電電圧 300V~800V まで 0.1mg/s, 850V 時 0.5mg/s, 900V~1000V まで 0.75mg/s である.

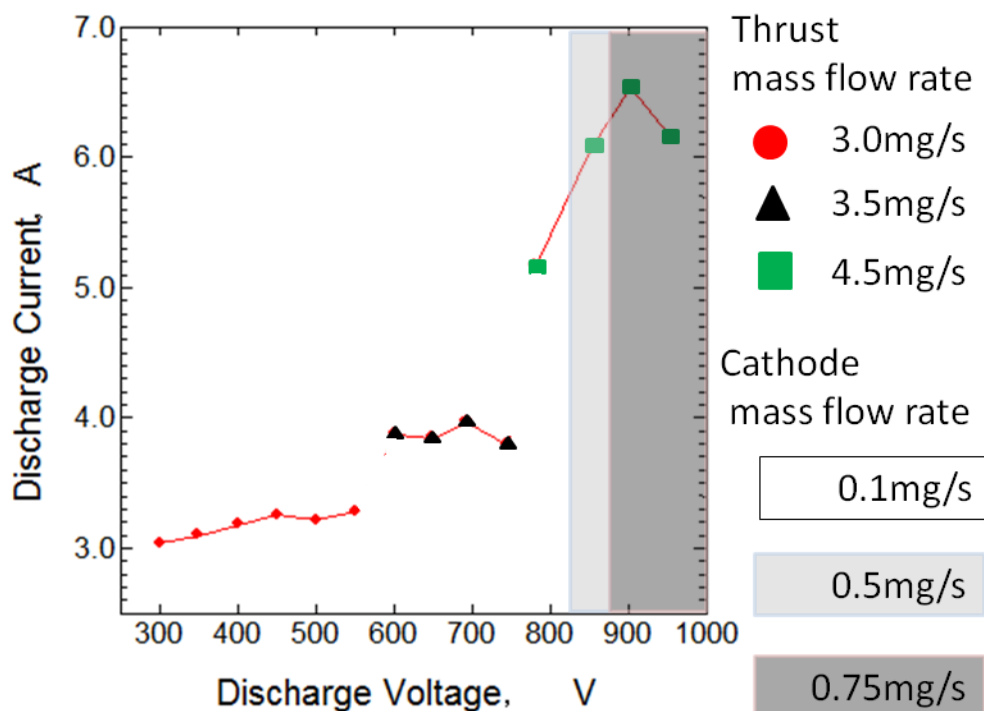


図 9 放電電流(A) - 放電電圧(V)

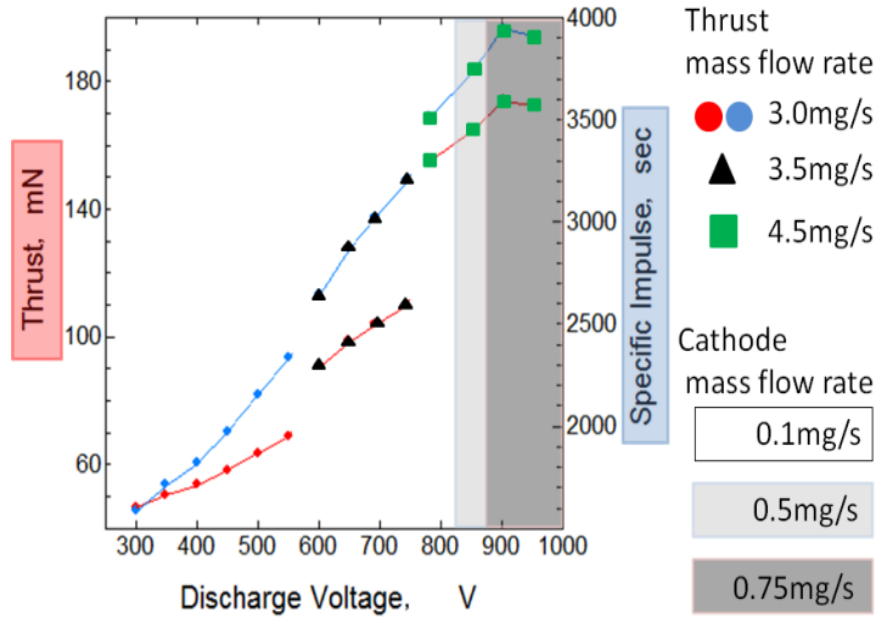


図 10 推力(mN)・比推力(sec) - 放電電圧(V)

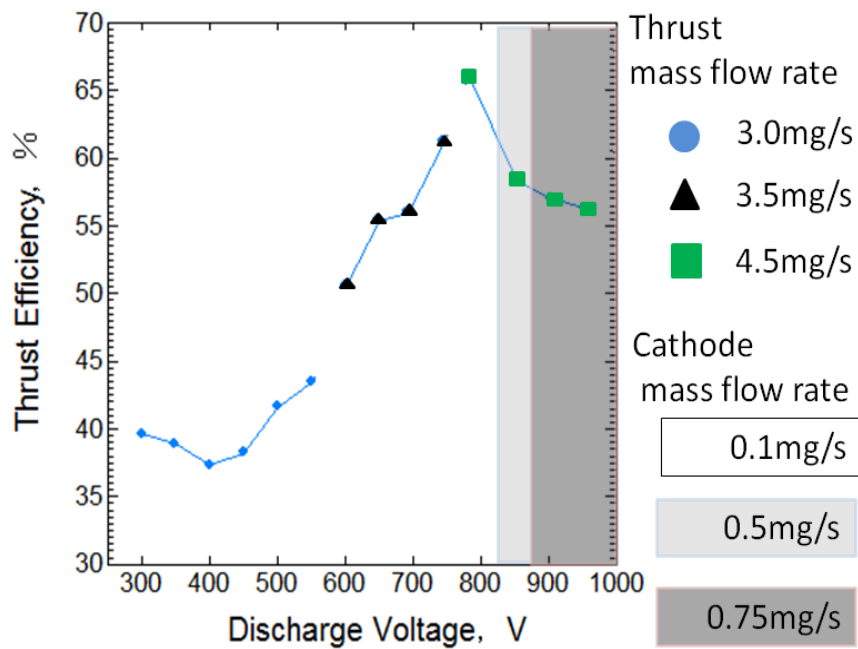


図 11 推進効率(%) - 放電電圧(V)



図 12 放電電圧 300V 作動写真.





図 13 放電電圧 1000V 作動写真.

放電電圧の増加により、放電電流も増加するが、800V 以降の放電電流の上昇が著しい。この理由は放電電圧 600V~750V の結果からも読み取れる。放電電圧 600V~750V 時は、300V~550V までの推進剤本体流量 3.0mg/s と比較して、0.5mg/s 増加させている。これにより移動する電子の量も増加し、約 1A ほど放電電流が増加する結果となった。放電電圧 800V 以降では、それまでの 600V~750V と比較して推進剤本体流量を 1.0mg/s 増加させている。更にカソード流量も 0.1mg/s から 0.5mg/s、0.75mg/s と増加させているため、急激な放電電流値の増加を招いた。推力値も同じく、放電電圧値の増加に合わせて 1 次曲線的に増加しつつ、推進剤流量の増加の影響を受け大きく増加している。効率に関してはカソード流量を増加させ、放電電流値が大きく上昇した 850V 以降の値がそれまで増加傾向だった効率を低下させた。

#### 4.2. TALT-2

まず、アノードの形状が影響するかを確認するために、二つのアノードを低電力で作動させ比較した。アノード断面図を図 14 に示す。

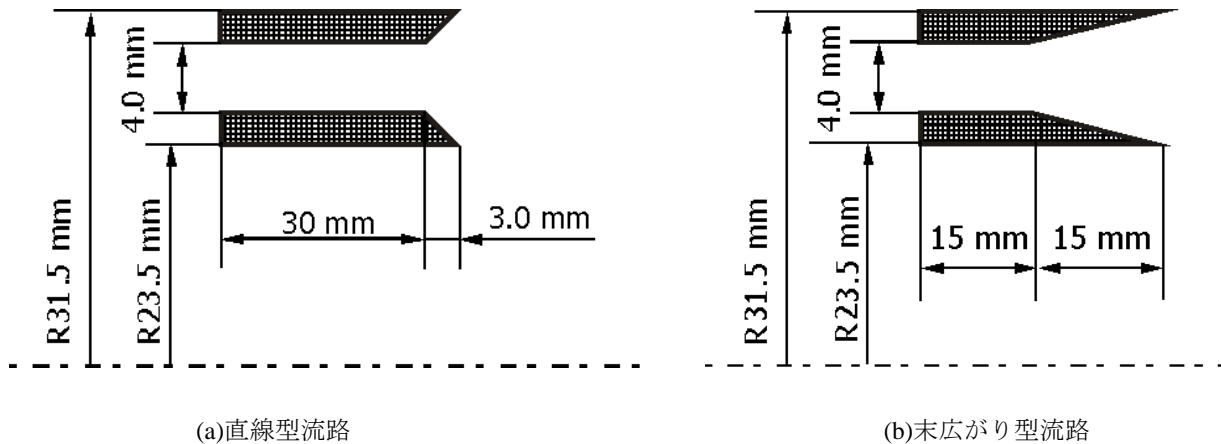


図 14 アノード断面図.

直線型流路の幅は 4.0mm、直線部の長さは 30mm で、出口付近の 3.0mm は傾斜角 45° の末広がり形状になっている。これは磁力線の湾曲に沿わせるためである。末広がり型流路の直線部は 15mm で、それより下流部の 15mm が末広がり形状となっている。

放電電流(A) - 放電電圧(V)のグラフを図 15、推力(mN)・比推力(sec) - 放電電圧(V)のグラフを図 16、推進効率(%) - 放電電圧(V)のグラフを図 17 のように示す。

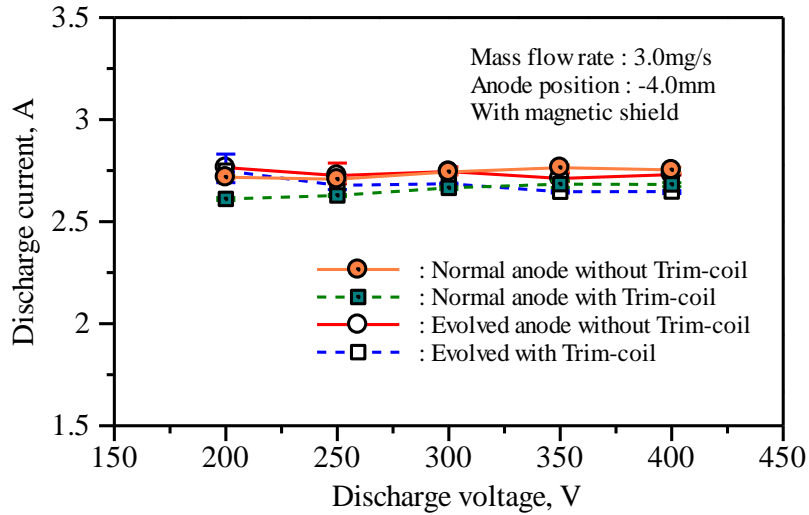


図 15 アノード中空部形状の放電電流への影響.

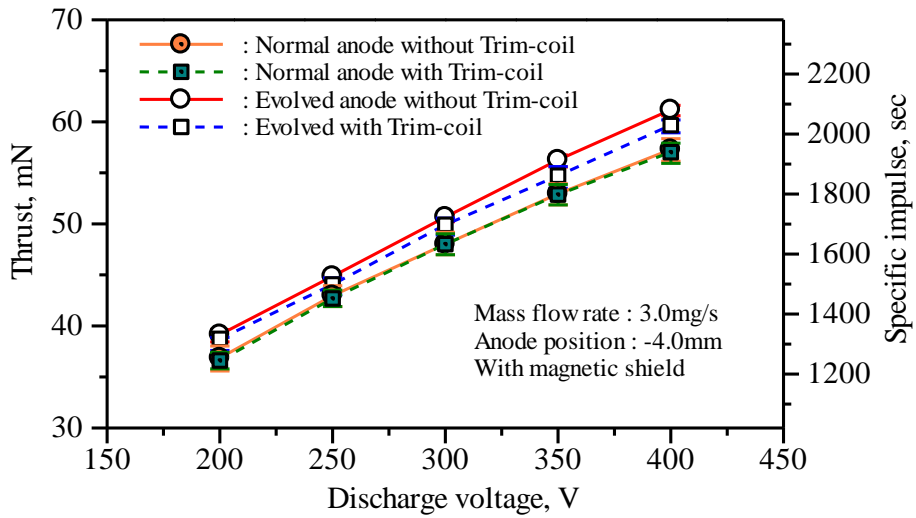


図 16 アノード中空部形状の推力・比推力への影響.

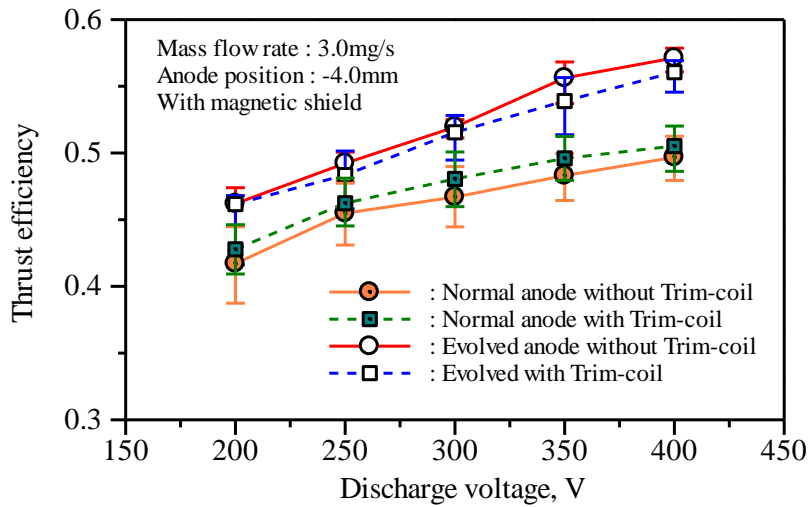


図 17 アノード中空部形状の推進効率の比較.

図 15 を見ると、改良型ホローアノードを用いた場合の放電電流が若干大きいものの、大きな差はない。また改良型ホローアノードの場合の放電電流は放電電圧に対してほぼ一定である。アノード中空部を末広がり形状にしたことでさらにプラズマがアノード内部に浸入しやすくなって、電位変化が緩やかになり電場が弱くなると考えられる。つまり電圧増加による電場の上昇をさらに緩和できるようになると推察される。また電場の上昇が抑えられるため電子温度が高くなり、そのため 2 価電離の割合も減り高電圧の作動域で放電電流が増加しなくなったと考えられる。

推力・比推力は図 16 のように、ホローアノードを改良型にすることで 4%~7% 程度増加し、特に放電電圧の高い領域での増加率が高くなっており、このことからアノード内部にプラズマが浸入しやすくなっていることが推察できる。推力が増加するのはアノード中空部が末広がり状になったことでアノード内部での電離領域が大きくなり、またそこで生成されたイオンがアノード表面に損失されることなく加速・噴出されるようになるためと考えられる。

結果として、アノード中空部を末広がり形状にすることで推進効率は上昇し、放電電圧 400V で、比推力 2080sec、推進効率 57% にまで推進性能を向上させることに成功した。

現在行っている大電力での実験は 950V までの作動を確認した。データは TALT-2 の高電圧での作動が不安定だった為に取得できていない。しかし、写真は撮影できたのでその時の写真を図 18 に示す。アノードは末広がり型を使用した。

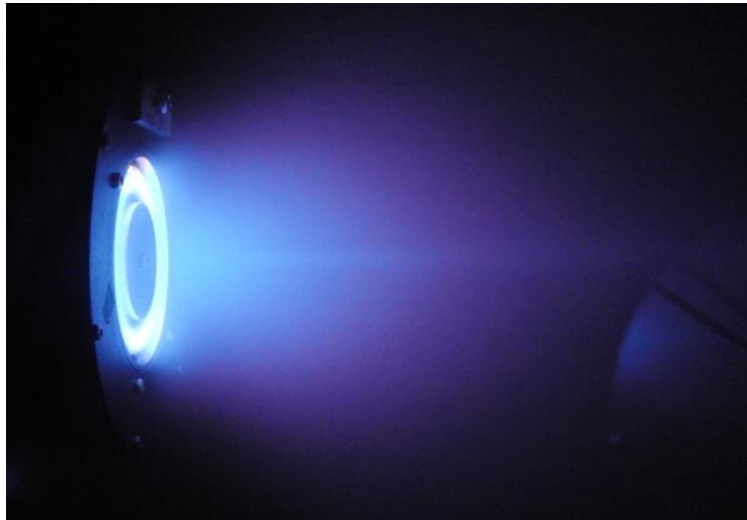


図 18 放電電圧 950V 作動写真。

図 18 の写真からわかるようにプリュームがかなり拡散している。実験中コイル電流は変化させなかったのに、磁場が最適ではないと考えられるが、高電圧作動によるスラスタ本体の温度上昇により、熱減磁が起り、磁場が低下したと考える。また高電圧作動時、アノードにいくつもの赤熱が見られた。その写真を図 19 に示す。

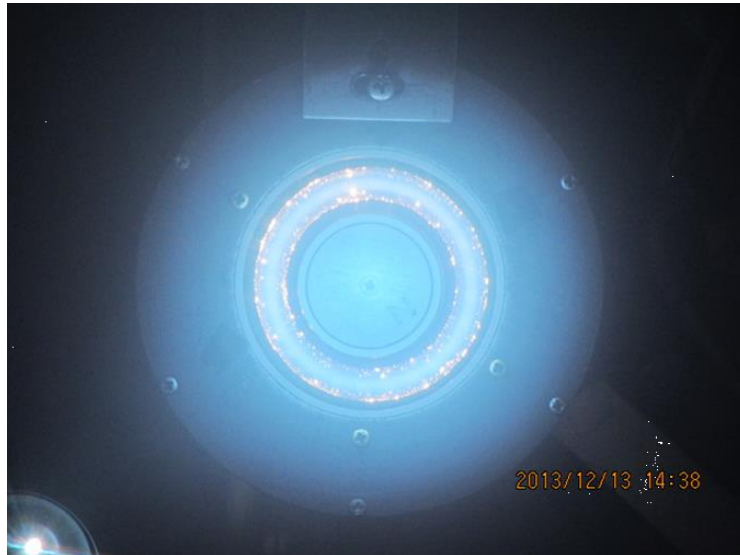


図 19 TALT-2 スラスタ出口方向の写真

図 19 の写真からわかるようにアノードの内側と外側，両方に赤熱がみられる．これはアノード加工時のバリや凹凸，整備時についた油脂などにプリュームが当たってしまったものと考えられる．

## 5. まとめ

今回ホールスラスタの高電圧作動を行い，SPT では，高比推力化を目指し放電電圧 1000V による作動に成功した．これは現時点で放電室直径 100mm クラスのホールスラスタでは日本初となる．また実験値の信憑性に疑問は残るが，比推力 3000sec 以上，推進効率 60%以上という数値も一部では記録した．今後はこれらの信憑性を高めるためにも更に広い領域での実験を行い，長時間安定動作へ向けた研究につなげる．TALT-2 については，二つのアノードでの実験を行い，性能を比較した．その結果，末広がり型の方で高い性能を記録した．また，950V での作動も確認した．今後は高電圧作動での安定動作を行えるようにし，データの取得を目指す．

## 参考文献

- 1) 山本直嗣，小紫公也，宮坂武志，船木一幸，尾崎敏之，小泉宏之，Tony Schönherr，田原弘一「In Space Propulsion としての大型ホールスラスタ」平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム，STEP-2011-017,2012.
- 2) Naru Sugimoto, Makoto Nose, Kazuya Togawa, Takahiro Nishida, Tomoyuki Ikeda, Hirokazu Tahara and Yosuke Watanabe 「Optimization of Acceleration Channel Structure and Material for Magnetic-Layer-Type Hall Thrusters」 28th International Symposium on Space Technology and Science (28th ISTS), Okinawa Convention Center,ISTSS 2011-b-18,2011.
- 3) 杉本成，藤田剛，野瀬真，田原弘一：「ホールスラスタの加速チャネル構造・材質の最適化」平成 22 年度宇宙輸送シンポジウム，STEP-2010-003，2011.
- 4) 杉本成，池田知行，戸川和也，三藤陽平，林泰志，田原弘一：「ホールスラスタの高電圧・高比推力作動特性」平成 23 年度宇宙輸送シンポジウム，STEP-2011-015，2012.
- 5) 杉本成，池田知行，戸川和也，加藤優貴，山本怜，田原弘一，渡辺陽介：「SPT 及び TAL ホールスラスタの大電力・高比推力作動」第 56 回宇宙科学技術連合講演会，1J20，別府国際コンベンションセンター，2012.